

Analisis Potensi dan Perancangan Prototipe PLTMH Berbasis Turbin Propeller pada Pintu Irigasi di Desa Lugusari Pringsewu

Fika Trisnawati^{1*}, Sigit Doni Ramdan², Kia Awanda Pria³, Andry Antono⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Elektro Universitas Teknokrat Indonesia; Jl. Z.A. Pagar Alam No. 9-11, Labuhan Ratu, Kec. Labuhan Ratu, Kota Bandar Lampung, Prov. Lampung; [+62 721 702022](tel:+62721702022)

Received: 27-04-2026
Accepted: 22-05-2026

Keywords:

Micro Hydropower;
Irrigation Canal;
Renewable Energy;
Propeller Turbine;
Ultra-low head.

Correspondent Email:

fika_trisnawati@teknokrat.ac.id

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi energi serta merancang prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) pada pintu irigasi di Desa Lugusari, Kabupaten Pringsewu. Latar belakang penelitian ini didasarkan pada belum optimalnya pemanfaatan energi terbarukan berbasis potensi lokal, khususnya pada jaringan irigasi yang memiliki aliran air relatif stabil sepanjang tahun. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental melalui pengukuran langsung parameter hidrologis berupa debit (Q) dan head (H), serta perancangan dan pengujian prototipe PLTMH di lapangan. Hasil pengukuran menunjukkan debit berkisar antara 0,028–0,035 m³/s dan head 0,35–0,45 m. Berdasarkan perhitungan, potensi daya teoritis yang dihasilkan berada pada rentang 72,10–115,88 Watt. Prototipe yang dirancang menggunakan turbin propeller mampu menghasilkan daya keluaran hingga 14,81 Watt pada sisi DC dengan efisiensi sistem total sebesar 12,78%, dan berhasil menyalakan beban lampu 10 Watt secara stabil. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada implementasi dan pengujian langsung prototipe PLTMH berbasis turbin propeller pada kondisi ultra-low head yang terintegrasi langsung dengan sistem konversi energi skala mini di saluran irigasi pedesaan sebagai alternatif sumber energi terbarukan skala kecil. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pintu irigasi memiliki potensi yang layak untuk dikembangkan sebagai sumber energi listrik skala kecil.

Abstract. This study aims to analyze the energy potential and design a prototype of a Micro Hydropower Plant (MHP) at an irrigation gate in Lugusari Village, Pringsewu Regency. The background of this research is based on the suboptimal utilization of renewable energy from local potentials, particularly in irrigation networks that have relatively stable water flows throughout the year. The method used is an experimental method through direct measurement of hydrological parameters, namely discharge (Q) and head (H), as well as the design and field testing of the MHP prototype. The measurement results show that the discharge ranges from 0.028 to 0.035 m³/s and the head is 0.35 to 0.45 m. Based on calculations, the theoretical power potential generated is in the range of 72.10–115.88 Watts. The prototype designed using a propeller turbine is capable of generating an output power of up to 14.81 Watts on the DC side with a total system efficiency of 12.78%, and successfully powering a 10-Watt lamp load stably. The main contribution of this research lies in the direct implementation and testing of a propeller turbine-based MHP prototype under ultra-low head conditions, integrated directly with a mini-scale energy conversion system in a rural irrigation canal as an alternative small-scale renewable energy source. The results of this

study indicate that irrigation gates have a viable potential to be developed as a small-scale electrical energy source.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi. Berdasarkan laporan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, konsumsi listrik nasional mengalami peningkatan signifikan dalam lima tahun terakhir, namun pemerataan akses listrik di wilayah pedesaan masih menjadi tantangan [1]. Oleh karena itu, pemanfaatan energi terbarukan berbasis potensi lokal menjadi solusi strategis dalam mendukung ketahanan energi nasional [2].

Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial adalah energi air melalui Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). PLTMH merupakan sistem pembangkit listrik skala kecil dengan kapasitas di bawah 1 MW yang memanfaatkan energi potensial dan kinetik aliran air [3]. Teknologi ini memiliki keunggulan berupa ramah lingkungan, biaya operasional rendah, serta mampu beroperasi secara kontinu pada daerah dengan aliran air stabil [4].

Jaringan irigasi pertanian merupakan salah satu sumber energi air yang belum dimanfaatkan secara optimal. Indonesia memiliki jutaan hektar lahan irigasi dengan sistem saluran dan pintu air yang memiliki potensi energi dari perbedaan elevasi dan debit aliran [5]. Pemanfaatan sistem irigasi untuk PLTMH dinilai lebih efisien karena tidak memerlukan pembangunan bendungan baru serta memiliki aliran air yang relatif stabil sepanjang tahun [6].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pemanfaatan PLTMH pada jaringan irigasi mampu menghasilkan energi listrik yang cukup signifikan. Studi oleh peneliti sebelumnya menunjukkan bahwa sistem mikrohidro berbasis irigasi mampu menghasilkan daya hingga ratusan kilowatt tergantung pada debit dan *head* yang tersedia [7], [8]. Selain itu, pemilihan jenis turbin seperti *crossflow* atau *propeller* sangat dipengaruhi oleh karakteristik aliran air pada saluran irigasi [9].

Namun demikian, pengembangan PLTMH di Indonesia masih menghadapi berbagai kendala, seperti kurang optimalnya pemanfaatan potensi lokal, keterbatasan perencanaan teknis, serta minimnya integrasi sistem monitoring modern [10], [11]. Selain itu, kajian yang secara spesifik membahas pemanfaatan pintu irigasi sebagai sumber energi listrik masih terbatas, khususnya pada wilayah pedesaan [12].

Meskipun berbagai penelitian mengenai PLTMH berbasis saluran irigasi telah dilakukan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada sistem dengan head menengah hingga tinggi dan menggunakan instalasi permanen berskala besar. Penelitian yang secara khusus membahas implementasi prototipe PLTMH pada kondisi *ultra-low head* (<0,5 m) dengan sistem konversi energi terintegrasi masih sangat terbatas, khususnya pada pintu irigasi pedesaan di Indonesia. Selain itu, kajian sebelumnya umumnya hanya membahas potensi teoritis tanpa melakukan pengujian langsung terhadap performa prototipe di lapangan.

Desa Lugusari, Kabupaten Pringsewu, merupakan salah satu wilayah dengan sistem irigasi aktif yang mendukung sektor pertanian. Keberadaan pintu irigasi dengan aliran air yang relatif stabil dan memiliki perbedaan tinggi tertentu memberikan peluang besar untuk dikembangkan sebagai sumber energi mikrohidro. Namun hingga saat ini, potensi tersebut belum dimanfaatkan secara optimal.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi serta merancang prototipe PLTMH pada pintu irigasi di Desa Lugusari. Kebaruan dan kontribusi spesifik dari penelitian ini terletak pada: (1) implementasi turbin propeller pada kondisi *ultra-low head* sebesar 0,35–0,45 m, (2) integrasi sistem *boost converter*, SCC, dan *inverter* pada prototipe PLTMH skala mini, serta (3) pengujian langsung performa sistem pada pintu irigasi aktif dengan pendekatan *proof-of-concept* berbasis kondisi lapangan nyata. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada implementasi dan pengujian langsung

prototipe PLTMH berbasis turbin propeller pada kondisi ultra-low head di saluran irigasi pedesaan dengan sistem konversi energi sederhana dan biaya rendah. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan energi terbarukan berbasis irigasi untuk mendukung kemandirian energi di wilayah pedesaan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan sistem pembangkit listrik skala kecil yang memanfaatkan energi potensial dan kinetik aliran air untuk menghasilkan energi listrik, umumnya dengan kapasitas di bawah 1 MW [3]. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama seperti saluran masuk (*intake*), turbin, generator, serta sistem transmisi energi listrik. PLTMH banyak dikembangkan di wilayah pedesaan karena memiliki keunggulan berupa ramah lingkungan, biaya operasional yang rendah, serta mampu beroperasi secara kontinu selama tersedia aliran air yang memadai [4].

Dalam perencanaan PLTMH, parameter utama yang menentukan besarnya energi yang dapat dihasilkan adalah debit air (Q) dan tinggi jatuh air (*head*, H). Debit air menunjukkan volume aliran air per satuan waktu, sedangkan *head* merupakan selisih ketinggian antara titik masuk dan keluar aliran air [6]. Semakin besar nilai debit dan *head*, maka potensi energi yang dapat dihasilkan juga semakin besar, sehingga pengukuran kedua parameter ini menjadi tahapan penting dalam analisis potensi mikrohidro [8].

Besarnya daya listrik yang dapat dihasilkan oleh sistem PLTMH dihitung berdasarkan persamaan energi air yang dipengaruhi oleh massa jenis air, percepatan gravitasi, debit, *head*, serta efisiensi sistem [13].

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

Keterangan:

P = daya (W),

ρ = massa jenis air (kg/m^3),

g = percepatan gravitasi (m/s^2),

Q = debit (m^3/s),

H = *head* (m), dan

η = efisiensi sistem.

Efisiensi sistem merupakan hasil kombinasi dari efisiensi turbin dan generator yang sangat menentukan besarnya daya keluaran yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemilihan jenis turbin menjadi faktor paling krusial dalam mengoptimalkan kinerja sistem PLTMH, terutama pada kondisi hidrologis yang spesifik.

Beberapa jenis turbin yang umum digunakan pada sistem mikrohidro antara lain *Pelton*, *Crossflow*, *Kaplan*, dan *Propeller*. Secara teknis, setiap jenis turbin memiliki spesifikasi operasi yang berbeda. Turbin *Pelton* lebih sesuai untuk head tinggi dan debit rendah, sedangkan *Crossflow* bekerja optimal pada head menengah. Beberapa penelitian sebelumnya terkait PLTMH pada saluran irigasi banyak mengimplementasikan turbin *Crossflow* [7], [8]. Namun, kinerja turbin berjenis impuls ini cenderung menurun secara signifikan jika diterapkan pada kondisi *ultra-low head* (<1 meter) karena membutuhkan tekanan jatuh yang cukup besar untuk memutar sudu secara maksimal [9].

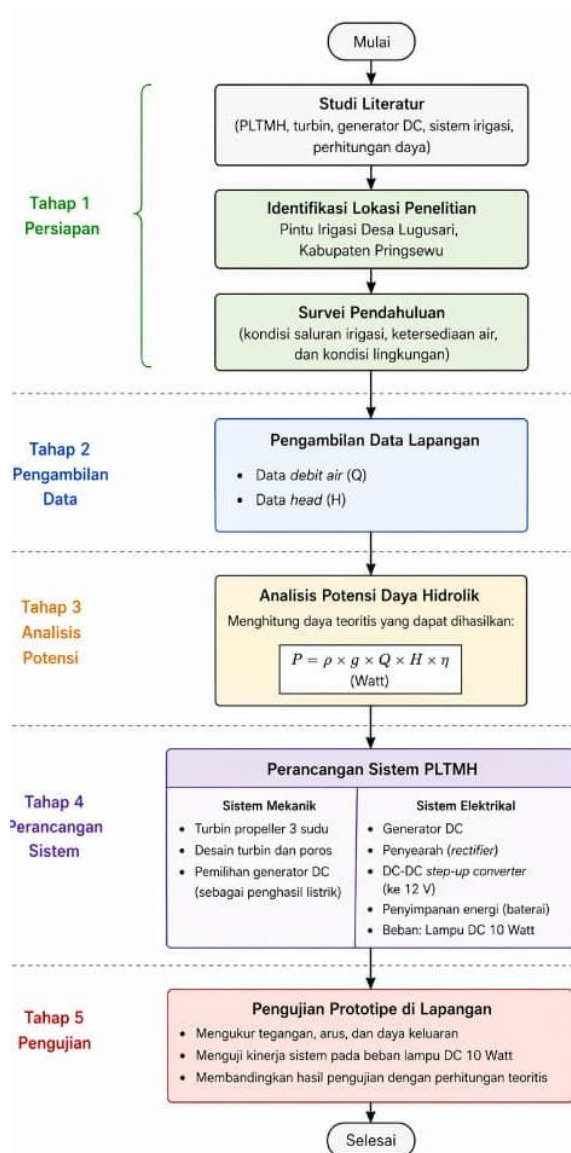
Turbin propeller bekerja dengan memanfaatkan tekanan dan kecepatan aliran air untuk memutar sudu turbin yang terhubung dengan generator. Turbin *propeller* memiliki efisiensi yang cukup tinggi pada kondisi operasi optimal, yaitu berkisar antara 70% hingga 85%, serta memiliki konstruksi yang relatif sederhana sehingga cocok diterapkan pada sistem irigasi dengan aliran air yang stabil [14].

Pada kondisi *ultra-low head* seperti pada pintu irigasi Desa Lugusari, turbin *propeller* dipilih karena memiliki kemampuan beroperasi pada head di bawah 1 meter dengan debit relatif besar serta menghasilkan putaran yang lebih stabil dibandingkan turbin impuls [9], [14]. Selain itu, konstruksi turbin *propeller* lebih sederhana dan mudah diintegrasikan dengan sistem pipa PVC skala kecil, sehingga sesuai untuk pengembangan prototipe dengan biaya rendah pada wilayah pedesaan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada pintu pembagi jalur irigasi di Desa Lugusari, Kabupaten Pringsewu, Lampung. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental berbasis pengukuran lapangan dan pengujian prototipe, yang mencakup dua tahap utama, yaitu: (1) pengukuran parameter hidrologis

untuk menentukan potensi energi hidrolik di lokasi, dan (2) perancangan serta pengujian prototipe sistem PLTMH secara langsung di lapangan. Data yang diambil secara langsung meliputi kecepatan aliran air, debit (Q), dan tinggi jatuh efektif (*head*, H) sebagai dasar perhitungan potensi daya. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Pengukuran debit air dilakukan menggunakan alat current meter digital untuk mengukur kecepatan arus air, dengan resolusi pengukuran 0,01 m/s dan tingkat akurasi $\pm 2\%$ dari nilai pembacaan. Penggunaan current meter dipilih untuk memperoleh nilai kecepatan aliran air (v) yang lebih presisi dengan

mempertimbangkan distribusi kecepatan pada profil kedalaman saluran. Sensor current meter ditempatkan secara horizontal pada beberapa titik kedalaman di penampang saluran irigasi guna memvalidasi karakteristik aliran secara menyeluruh. Selain itu, pengukuran lebar dan kedalaman saluran dilakukan menggunakan meteran manual dengan ketelitian 1 mm, sedangkan pengukuran tegangan dan arus keluaran alternator menggunakan multimeter digital dengan akurasi $\pm 0,5\%$.

Data kecepatan aliran diambil sebanyak lima kali pengujian pada interval waktu yang berbeda untuk memperoleh nilai rata-rata yang stabil dan representatif. Setelah nilai kecepatan rata-rata diperoleh, debit air (Q) dihitung berdasarkan perkalian antara luas penampang basah saluran (A) dengan kecepatan aliran (v) yang terbaca pada alat, sebagaimana dinyatakan pada persamaan 2:

$$Q = v \times A \quad (2)$$

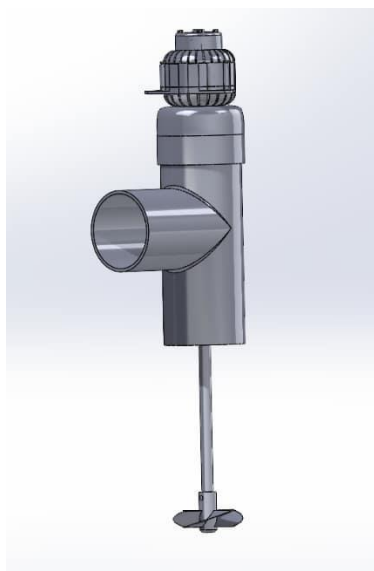
di mana A merupakan hasil perkalian lebar saluran (0,82 m) dengan kedalaman efektif aliran (m). Hasil pengukuran menunjukkan nilai debit berada antara 0,028 hingga 0,035 m³/s pada lima kali pengujian yang dilakukan. Luas penampang aliran diasumsikan konstan karena variasi kedalaman air selama pengujian relatif kecil, yaitu kurang dari ± 3 cm terhadap rata-rata kedalaman saluran. Selain itu, bentuk geometris saluran irigasi pada lokasi penelitian bersifat seragam dan tidak mengalami perubahan dimensi yang signifikan selama proses pengambilan data. Validasi asumsi ini dilakukan melalui observasi visual dan pengukuran ulang kedalaman pada setiap sesi pengujian.

Pengukuran *head* efektif (H) dilakukan menggunakan alat ukur meteran dengan ketelitian 1 mm melalui pengukuran selisih ketinggian permukaan air antara bagian hulu dan hilir pintu irigasi. Pengukuran dilakukan pada setiap sesi pengujian yang sama dengan pengukuran debit untuk menjamin konsistensi data. Hasil pengukuran menunjukkan nilai *head* berada di 0,35 m hingga 0,45 m, yang mengindikasikan bahwa lokasi pintu irigasi Desa Lugusari termasuk dalam kategori *head* sangat rendah (*ultra-low head*). Meskipun demikian, nilai *head* tersebut masih dalam rentang yang dapat dimanfaatkan oleh turbin

tipe *propeller* yang dirancang khusus untuk kondisi *head* rendah [9].

Setelah data debit dan *head* diperoleh, analisis potensi daya hidrolik dilakukan menggunakan persamaan daya PLTMH sebagaimana tercantum pada persamaan (1). Nilai massa jenis air (ρ) ditetapkan sebesar 1.000 kg/m^3 , percepatan gravitasi (g) sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$, dan efisiensi sistem (η) sebesar 75% sesuai dengan karakteristik turbin *propeller* pada kondisi operasi optimal [9], [14]. Nilai efisiensi tersebut digunakan sebagai pendekatan teoritis berdasarkan literatur dan tidak merepresentasikan efisiensi aktual keseluruhan prototipe.

Untuk mengurangi kesalahan pembacaan, setiap parameter diukur sebanyak tiga kali pada tiap sesi pengujian, kemudian diambil nilai rata-ratanya. Data hasil pengukuran lapangan ini selanjutnya dijadikan acuan utama dalam perancangan prototipe PLTMH. Desain rancangan prototipe PLTMH dapat dilihat pada gambar 2.



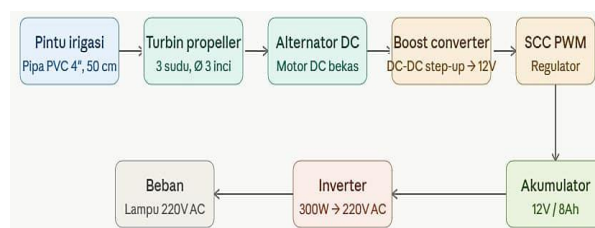
Gambar 2. Desain 3D prototipe PLTMH

Prototipe PLTMH dirancang berdasarkan hasil analisis potensi yang diperoleh dari pengukuran lapangan. Komponen mekanik utama prototipe terdiri dari pipa PVC berdiameter 4 inci dengan panjang 50 cm yang berfungsi sebagai saluran pengarah aliran (*draft tube*) menuju turbin, serta turbin tipe *propeller* dengan 3 sudu berdiameter 3 inci.



Gambar 3. Turbin *Propeller*

Pada gambar 3 menunjukkan turbin *propeller* yang digunakan pada penelitian ini. Pemilihan turbin *propeller* didasarkan pada kesesuaiannya dengan kondisi lokasi yang memiliki *head* sangat rendah ($0,35\text{--}0,45 \text{ m}$) dan debit yang relatif besar, sesuai dengan rekomendasi literatur untuk sistem mikrohidro berbasis saluran irigasi [9], [14]. Turbin *propeller* dikopel langsung dengan poros alternator menggunakan sistem kopling mekanis sederhana untuk meminimalkan rugi-rugi transmisi daya.



Gambar 4. Blok diagram PLTMH

Pada gambar 4, merupakan blok diagram sistem elektrikal prototipe PLTMH secara keseluruhan. Sistem elektrikal prototipe dirancang secara bertingkat untuk menangani karakteristik tegangan keluaran rendah dari alternator. Generator yang digunakan adalah alternator berbasis motor DC bekas (*brushed DC motor*) yang berfungsi mengonversi energi mekanik rotasi menjadi energi listrik arus searah (DC), dapat dilihat pada gambar 5.

Tegangan DC hasil keluaran alternator yang relatif rendah kemudian dinaikkan menggunakan modul *boost converter DC-to-DC* hingga mencapai tegangan 12 Volt agar sesuai dengan spesifikasi pengisian baterai. Tegangan 12V yang dihasilkan *boost converter* selanjutnya diregulasi oleh *Solar Charge Controller (SCC)* tipe PWM (*Pulse Width*

Modulation) sebelum disimpan ke dalam akumulator 12V/8Ah.



Gambar 5. Alternator DC

SCC berfungsi mencegah pengisian berlebih (*overcharging*) dan melindungi akumulator dari kerusakan akibat fluktuasi tegangan masukan. Energi yang tersimpan di dalam akumulator kemudian dikonversi menjadi tegangan AC 220V menggunakan *inverter* berkapasitas 300 Watt untuk mengoperasikan beban berupa lampu 10 Watt bertegangan 220V AC.

Pengujian prototipe dilakukan langsung di lapangan dengan menempatkan turbin *propeller* pada aliran keluar pintu irigasi Desa Lugusari. Pengujian dilaksanakan sebanyak lima kali pada kondisi dan waktu yang berbeda, searah dengan pengambilan data debit dan *head*, guna memperoleh data yang representatif terhadap variasi kondisi aliran. Parameter keluaran yang diukur pada setiap pengujian meliputi tegangan keluaran alternator (V) menggunakan multimeter digital, arus keluaran (I), serta daya keluaran (P) yang dihitung berdasarkan persamaan 3:

$$P = V \times I \quad (3)$$

Beban yang digunakan selama pengujian adalah lampu 10 Watt bertegangan 220V AC yang disuplai melalui *inverter* 300 Watt. Keberhasilan sistem secara keseluruhan ditentukan berdasarkan kemampuan prototipe menyalakan beban lampu secara penuh dan stabil melalui rangkaian konversi energi yang telah dirancang.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Kondisi Lokasi Pengujian

Pintu irigasi Desa Lugusari terletak di saluran irigasi sekunder yang berfungsi mendistribusikan air ke lahan pertanian sekitar. Berdasarkan survei lapangan, saluran memiliki lebar rata-rata sekitar 82 cm dengan kedalaman air bervariasi tergantung debit musiman. Aliran air pada lokasi ini bersifat relatif stabil sepanjang tahun karena diatur oleh sistem pengelolaan irigasi pertanian yang terorganisir, sehingga menjadikannya kandidat yang layak untuk pengembangan PLTMH berbasis saluran irigasi [6], [12]. Kondisi lokasi pengujian disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pintu Irigasi Desa Lugusari

Perbedaan ketinggian (*head*) antara sisi hulu dan hilir pintu air berkisar antara 0,35 hingga 0,45 m, yang mengkategorikan lokasi ini sebagai sistem *head* sangat rendah (*ultra-low head*). Meskipun nilai *head* tersebut tergolong kecil, keberadaan debit aliran yang cukup besar menjadi faktor kompensasi yang signifikan dalam perhitungan potensi daya hidrolik.

4.2. Hasil Pengukuran Debit dan Head

Pengukuran debit dan *head* dilakukan sebanyak 5 kali pengujian pada kondisi dan waktu yang berbeda untuk menjamin validitas serta akurasi data yang diperoleh. Hasil pengukuran lapangan tersebut disajikan secara komprehensif pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Debit dan Head

No.	Head (m)	Kecepatan Alir (m/s)			Luas A (m ²)	Debit Q (m ³ /s)
		v ₁	v ₂	\bar{v} rata		
1	0,35	0,54	0,58	0,56	0,0492	0,028
2	0,38	0,59	0,63	0,61	0,0492	0,030
3	0,4	0,63	0,67	0,65	0,0492	0,032
4	0,43	0,65	0,69	0,67	0,0492	0,033
5	0,45	0,69	0,73	0,71	0,0492	0,035
Rata-rata		0,62	0,66	0,64	0,0492	0,032

Berdasarkan Tabel 1, nilai debit air berkisar antara 0,028 hingga 0,035 m³/s dengan kecepatan aliran antara 0,56 hingga 0,71 m/s, sedangkan nilai head berada pada rentang 0,35 hingga 0,45 m. Variasi data antar pengujian yang relatif kecil menunjukkan bahwa kondisi aliran pada lokasi tersebut cukup stabil, sehingga mendukung keandalan sistem PLTMH untuk beroperasi secara kontinu [6], [8].

4.3. Analisis Potensi Daya PLMH

Berdasarkan data pengukuran yang diperoleh, perhitungan potensi daya listrik dilakukan menggunakan persamaan (1) dengan nilai massa jenis air (ρ) sebesar 1.000 kg/m³, percepatan gravitasi (g) sebesar 9,81 m/s², dan efisiensi sistem turbin *propeller* (η) sebesar 75%. Berikut salah satu rincian hasil perhitungan potensi daya yang dihasilkan PLTMH berdasarkan berdasarkan persamaan (1):

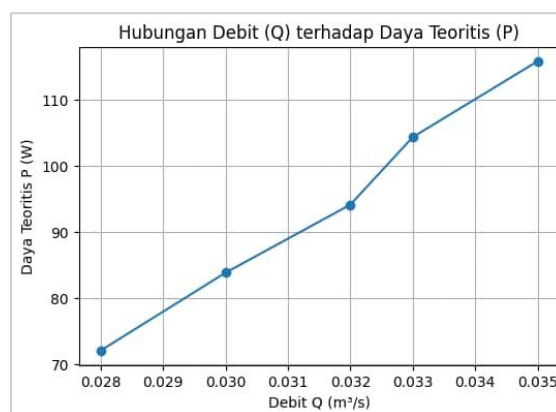
$$P_{min} = 1000 \times 9,81 \times 0,028 \times 0,35 \times 75\%$$

$$P_{min} = 72,1032 \text{ watt}$$

Hasil perhitungan potensi daya teoritis dari masing-masing pengujian disajikan pada Tabel 2 berikut ini. Berdasarkan Tabel 2, potensi daya teoritis PLTMH dihitung menggunakan persamaan (1), sehingga hasil perhitungan menunjukkan bahwa daya teoritis sistem berada pada rentang 72,10–115,88 Watt.

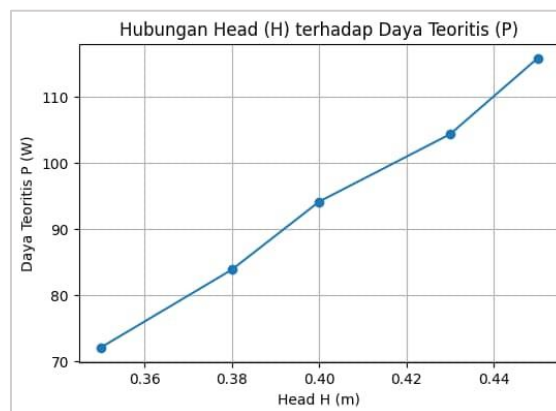
Tabel 2. Hasil Perhitungan Potensi Daya PLTMH

No.	H (m)	Q (m ³ /s)	P teoritis (W)
1	0,35	0,028	72,10
2	0,38	0,030	83,88
3	0,40	0,032	94,18
4	0,43	0,033	104,40
5	0,45	0,035	115,88
Rata-rata		0,032	94,09



Gambar 7. grafik perhitungan debit vs daya

Pada gambar 7, menunjukkan bahwa peningkatan debit aliran air berbanding lurus terhadap peningkatan daya teoritis PLTMH. Semakin besar debit air yang mengalir, maka energi kinetik yang tersedia untuk memutar turbin juga meningkat sehingga daya yang dihasilkan menjadi lebih besar.



Gambar 8. grafik perhitungan head vs daya

Berdasarkan gambar 8, grafik tersebut menunjukkan bahwa peningkatan head efektif menghasilkan kenaikan daya teoritis PLTMH. Hal ini sesuai dengan prinsip dasar konversi energi mikrohidro bahwa energi potensial air meningkat seiring bertambahnya perbedaan ketinggian aliran air. Potensi daya tersebut dinilai cukup signifikan untuk memenuhi kebutuhan listrik skala kecil di lingkungan pedesaan, seperti penerangan rumah tangga maupun fasilitas umum. Hasil ini selaras dengan temuan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa sistem irigasi dengan debit dan *head* yang memadai mampu menghasilkan daya yang bernilai ekonomis [7], [13].

4.4. Hasil Perancangan Prototipe PLMTH

Prototipe PLTMH yang dirancang terdiri dari dua subsistem utama, yaitu subsistem mekanik dan subsistem elektrikal. Pada subsistem mekanik, turbin *propeller* 3 sudu berdiameter 3 inci dipasang pada ujung pipa PVC berdiameter 4 inci dengan panjang 50 cm yang berfungsi sebagai saluran pengarah aliran. Turbin *propeller* dikopel langsung dengan poros alternator motor DC bekas (*brushed* DC motor) menggunakan sistem kopling mekanis sederhana. Desain ini dipilih karena konstruksinya yang kompak, ringan, dan mudah dipasang langsung pada bukaan pintu irigasi tanpa memerlukan modifikasi infrastruktur yang berarti [9], [12]. Prototipe turbin dan generator PLTMH disajikan pada Gambar 7.



Gambar 9. Prototipe PLTMH di pintu irigasi Desa Lugusari

Pada subsistem elektrikal, tegangan DC keluaran alternator yang bersifat rendah dan bervariasi dinaikkan oleh modul *boost converter DC-to-DC* hingga mencapai 12 Volt. Tegangan 12V tersebut selanjutnya diregulasi oleh *Solar Charge Controller (SCC)* tipe PWM untuk mengisi akumulator 12V/8Ah secara aman dan mencegah *overcharging*. Energi yang tersimpan pada akumulator kemudian dikonversi oleh *inverter* 300 Watt menjadi tegangan AC 220V guna menyuplai beban lampu 10 Watt. Rangkaian subsistem elektrikal ini memungkinkan pemanfaatan energi yang dihasilkan prototipe secara optimal meskipun tegangan keluaran alternator masih tergolong rendah [11].

Efisiensi total sistem dihitung berdasarkan perbandingan antara daya keluaran aktual prototipe pada sisi DC terhadap potensi daya hidrolik teoritis yang tersedia pada saluran irigasi. Berdasarkan hasil pengujian, daya teoritis maksimum sebesar 115,88 Watt, sedangkan daya keluaran alternator maksimum sebesar 14,81 Watt.

Dengan efisiensi total prototipe terhadap potensi hidrolik teoritis dapat dihitung sebagai berikut:

$$\eta_{total} = \frac{P_{aktual}}{P_{teoritis}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\eta_{total} = \frac{14.81}{115.88} \times 100\% = 12.78\%$$

Perbandingan antara daya teoritis dan daya aktual menunjukkan adanya selisih daya yang cukup signifikan. Nilai efisiensi total sebesar 12,78% menunjukkan bahwa hanya sebagian energi hidrolik yang berhasil dikonversi menjadi energi listrik pada prototipe. Nilai ini masih tergolong wajar untuk sistem PLTMH skala mini berbasis *proof-of-concept* dengan konstruksi sederhana dan menggunakan komponen *non-customized*.

4.5. Hasil Pengujian Prototipe PLMTH

Pengujian prototipe dilakukan langsung di pintu irigasi Desa Lugusari sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9. Parameter keluaran yang diukur meliputi tegangan alternator (V), arus (I), dan daya (P) pada sisi DC, serta tegangan dan daya pada sisi AC keluaran *inverter*. Beban yang digunakan

adalah lampu 10 Watt bertegangan 220V AC dengan arus sisi AC sebesar 45,5 mA. Hasil pembacaan tegangan keluaran prototipe pada alat ukur disajikan pada Gambar 10.



Gambar 10. Pengukuran tegangan keluaran prototipe PLTMH

Tabel 3. Hasil Pengukuran Prototipe PLTMH

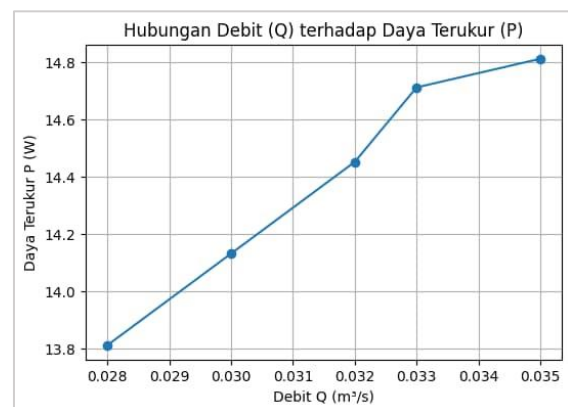
No.	H (m)	Q (m ³ /s)	Sisi DC — Alternator			Sisi AC — Beban	
			Teg. (V)	Arus (A)	Daya (W)	Teg. (V)	Daya (W)
1	0,35	0,028	6,45	2,141	13,81	220	10
2	0,38	0,030	6,60	2,141	14,13	220	10
3	0,40	0,032	6,75	2,141	14,45	220	10
4	0,43	0,033	6,87	2,141	14,71	220	10
5	0,45	0,035	6,92	2,141	14,81	220	10
Rata-rata	0,032	6,72	2,141	14,38	220	10	

Sementara itu, pada tabel 3 dari hasil pengujian prototipe menunjukkan daya aktual keluaran alternator berada pada rentang 13,81–14,81 Watt. Nilai tertinggi diperoleh pada pengujian ke-5 yang memiliki kombinasi debit dan head terbesar (Q = 0,035 m³/s, H = 0,45 m).

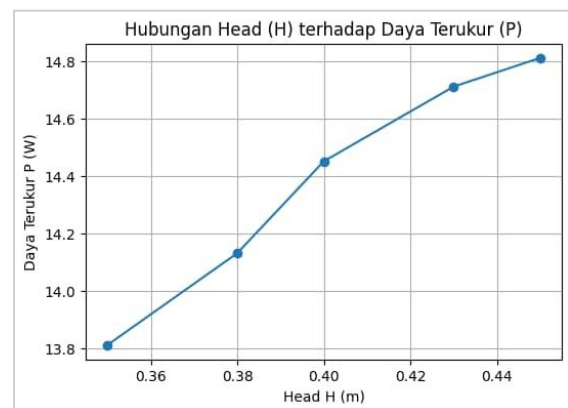
Grafik diatas menunjukkan bahwa peningkatan debit aliran air menyebabkan kenaikan daya keluaran terukur pada prototipe PLTMH. Hal ini menunjukkan bahwa debit air memberikan pengaruh signifikan terhadap energi kinetik yang diterima turbin propeller sehingga meningkatkan daya keluaran sistem. Sedangkan grafik perbandingan hasil pengukuran daya terhadap ketinggian air (head) dapat dilihat pada gambar 12.

Pada gambar 12, menunjukkan adanya hubungan positif antara head efektif dan daya keluaran terukur prototipe PLTMH. Semakin

besar nilai head, maka energi potensial air yang dimanfaatkan turbin semakin meningkat sehingga daya listrik yang dihasilkan juga bertambah. Meskipun pengukuran RPM turbin belum dilakukan secara langsung menggunakan *tachometer*, kenaikan tegangan keluaran alternator menunjukkan adanya korelasi positif antara kecepatan putar turbin dan daya listrik yang dihasilkan. Terbukti pada pengujian dengan debit tertinggi sebesar 0,035 m³/s dan head 0,45 m, prototipe menghasilkan daya keluaran terbesar sebesar 14,81 Watt.



Gambar 11. Grafik pengukuran debit air vs daya



Gambar 12. Grafik pengukuran head vs daya

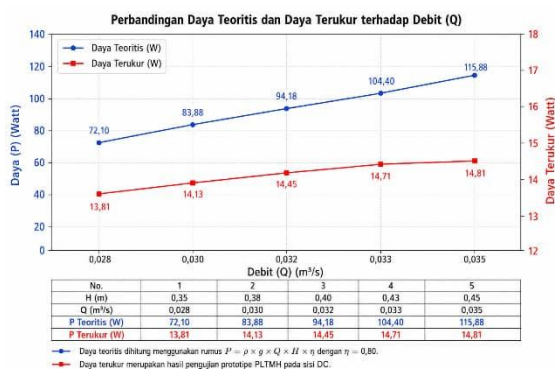
Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan keluaran alternator meningkat secara konsisten seiring dengan bertambahnya nilai head dan debit aliran air pada setiap sesi pengujian. Tegangan tertinggi sebesar 6,87 Volt diperoleh pada pengujian ke-4 dengan kondisi head 0,43 m dan debit 0,033 m³/s, yang menghasilkan daya DC alternator sebesar 14,71 Watt. Nilai daya tersebut telah melampaui kebutuhan daya beban lampu sebesar 10 Watt,

sehingga sistem mampu menyuplai beban secara penuh dan stabil.

Selama pengujian berlangsung, peningkatan debit dan head menyebabkan putaran turbin *propeller* terlihat semakin stabil dan cepat. Hal ini ditunjukkan oleh meningkatnya tegangan keluaran alternator pada setiap pengujian.

4.6. Analisa Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan grafik hubungan debit terhadap daya teoritis dan daya terukur, terlihat bahwa peningkatan debit air memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan daya keluaran sistem PLTMH. Semakin besar debit aliran, maka energi kinetik air yang diterima turbin *propeller* juga semakin besar sehingga putaran turbin meningkat dan menghasilkan daya keluaran yang lebih tinggi. Hubungan serupa juga terlihat pada grafik hubungan head terhadap daya. Peningkatan nilai head efektif menyebabkan energi potensial air meningkat sehingga daya teoritis dan daya aktual prototipe turut mengalami kenaikan. Hasil ini sesuai dengan teori dasar PLTMH yang menyatakan bahwa daya hidrolik berbanding lurus terhadap debit dan head aliran air. Grafik hasil perbandingan antar daya perhitungan dan pengukuran dapat dilihat pada gambar 13 berikut ini:



Gambar 13. Grafik perbandingan daya terhitung dan terukur

Pada gambar 13, terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara daya teoritis saluran irigasi dengan daya keluaran alternator prototipe yang dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor kehilangan energi (*losses*), baik pada sisi hidrolik, mekanik, maupun elektrik dari penelitian ini. Prototipe yang dirancang merupakan sistem skala mini (*proof-of-*

concept) yang hanya memanfaatkan sebagian kecil dari total debit saluran melalui pipa PVC 4 inci berdiameter terbatas, sehingga daya yang terkonversi tidak merepresentasikan kapasitas penuh potensi hidrolik saluran [13].

Selain faktor skala, perbedaan tersebut juga dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis lainnya. Hal ini selaras dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa prototipe PLTMH skala kecil umumnya menghasilkan efisiensi sistem yang lebih rendah dibandingkan instalasi skala penuh [7], [13], [14].

Pada sisi hidrolik, rugi-rugi terjadi akibat turbulensi aliran, ketidaksempurnaan arah aliran menuju sudu turbin, serta adanya celah antara sudu *propeller* dan dinding pipa PVC yang menyebabkan sebagian debit air tidak sepenuhnya mengenai runner turbin. Selain itu, diameter runner turbin yang hanya 3 inci menyebabkan prototipe hanya memanfaatkan sebagian kecil dari total debit saluran irigasi.

Pada sisi mekanik, rugi-rugi energi terjadi akibat gesekan pada poros, kopling, dan bantalan turbin. Penggunaan sistem kopling sederhana juga menyebabkan transfer energi mekanik dari turbin menuju alternator belum optimal. Sementara itu, pada sisi elektrik, efisiensi *boost converter* sekitar 80%, sedangkan efisiensi *inverter* sekitar 85%. Jika kedua komponen dikombinasikan, maka efisiensi sistem konversi elektrik menjadi:

$$\eta_{elektrikal} = 0.80 \times 0.85 \times 100\% = 68\%$$

Nilai tersebut masih berupa estimasi dan belum diperoleh melalui pengukuran efisiensi masing-masing komponen secara langsung. Selain itu, alternator berbasis motor DC bekas memiliki efisiensi relatif rendah pada putaran rendah dibandingkan generator permanen magnet yang memang dirancang untuk aplikasi mikrohidro. Faktor - faktor tersebut menyebabkan daya keluaran aktual sistem menjadi jauh lebih kecil jika dibandingkan potensi teoritis hidrolik yang tersedia.

Meskipun daya aktual yang dihasilkan masih jauh di bawah daya teoritis, tren peningkatan daya aktual menunjukkan bahwa prototipe mampu merespons perubahan kondisi hidrolik secara konsisten. Hal ini membuktikan bahwa sistem PLTMH berbasis turbin *propeller* pada kondisi *ultra-low head* dapat berfungsi dengan baik secara teknis dan memiliki potensi

untuk dikembangkan ke skala yang lebih besar guna mengoptimalkan pemanfaatan energi hidrolik yang tersedia di lokasi.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan, terutama pada belum dilakukannya pengukuran RPM turbin secara langsung serta belum dianalisisnya karakteristik torsi dan efisiensi masing-masing komponen secara individual. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk memperoleh karakteristik performa sistem yang lebih komprehensif.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Pintu irigasi Desa Lugusari memiliki potensi energi mikrohidro dengan debit air antara 0,028–0,035 m³/s dan *head* sebesar 0,35–0,45 m yang tergolong kategori *ultra-low head* dengan potensi daya berkisar antara 72,10 hingga 115,88 Watt, sehingga cukup untuk pemanfaatan listrik skala kecil di pedesaan.
- b. Prototipe PLTMH yang dirancang menggunakan turbin *propeller* mampu menghasilkan daya hingga 14,81 Watt pada sisi DC dan berhasil menyalakan beban lampu 10 Watt secara stabil.
- c. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan debit dan *head* berbanding lurus terhadap peningkatan daya keluaran prototipe PLTMH di pintu irigasi Desa Lugusari, sehingga sistem PLTMH berbasis turbin *propeller* pada kondisi *ultra-low head* memiliki potensi yang layak untuk dikembangkan sebagai sumber energi PLTMH dengan skala yang lebih besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Teknokrat Indonesia atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada perangkat Desa Lugusari, Kabupaten Pringsewu, Lampung, atas bantuan, kerja sama, serta dukungan selama proses pengambilan data di lapangan. Dukungan dari berbagai pihak tersebut sangat membantu kelancaran dan keberhasilan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian ESDM, Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia, Jakarta, 2023.
- [2] IEA, Renewables 2023: Analysis and Forecast, Paris: International Energy Agency, 2023.
- [3] A. Paish, “Small hydro power: technology and current status,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 44, pp. 423–431, 2021.
- [4] M. K. Singal and R. Saini, “Micro-hydropower systems: A review,” Energy Reports, vol. 7, pp. 746–756, 2021.
- [5] Kementerian PUPR, Data Statistik Irigasi Indonesia, Jakarta, 2022.
- [6] B. Williamson et al., “Hydropower from irrigation canals,” Renewable Energy, vol. 145, pp. 219–229, 2020.
- [7] R. Sinaga, I. Roza, and A. Yanie, “Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH),” JESCEJESCE, 2025.
- [8] L. T. Melati et al., “Microhydro potential assessment in irrigation channel,” Energy Procedia, vol. 156, pp. 452–457, 2021.
- [9] H. Ramos et al., “Low-head micro hydropower turbines: A review,” Sustainable Energy Technologies, vol. 45, 2022.
- [10] A. Y. Pratama et al., “Challenges in microhydro development in Indonesia,” Energy Policy, vol. 162, 2022.
- [11] D. Firmansyah et al., “Smart monitoring system for micro hydro power plant,” IEEE Access, vol. 11, 2023.
- [12] S. Hadi et al., “Utilization of irrigation gate for microhydro application,” Jurnal ELECTRICIAN, vol. 16, no. 2, 2022.
- [13] M. H. Rahman et al., “Techno-economic analysis of microhydro systems,” Renewable Energy Focus, vol. 41, 2022.
- [14] P. K. Das and S. Paul, “Optimization of micro hydro systems,” Energy Conversion and Management, vol. 258, 2022.
- [15] World Bank, *Mini Grid Solutions for Rural Electrification*, Washington DC, 2021.