

RANCANG BANGUN PROTOTIPE PLTMH DENGAN SISTEM MONITORING PARAMETER DAYA DAN DEBIT AIR BERBASIS MIKROKONTROLER ESP32

Mahatma Ghandhi Azhari^{1*}, Emidiana^{2*}, Irine Kartika Pebrianti^{3*}

^{1,2,3} Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Palembang, Jl. Jen A. Yani Lr. Gotong Royong 9/10 Ulu, Palembang Telp. 0711-510043

Keywords:

PLTMH;
ESP32;
Monitoring;
Debit Air;
Efisiensi Energi.

Correspondent Email:

emidiana@univpgri-
palembang.ac.id

Abstrak. Kenaikan konsumsi listrik mendorong eksplorasi energi terbarukan, termasuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Riset ini merealisasikan prototipe PLTMH skala laboratorium yang dilengkapi pemantauan daya dan debit air menggunakan ESP32. Turbin crossflow, generator DC 24V 150W, dan dua pompa air berdebit 43 L/m serta 54 L/m digunakan sebagai simulator aliran. Sensor INA219 dan YF-B10 dipasang untuk mengukur tegangan, arus, dan debit, sementara LCD 16x2 I2C menampilkan data secara real-time tanpa koneksi internet. Uji coba dilakukan pada debit 43 L/m (pompa 1) dan 97 L/m (pompa 1+2). Pada debit 43 L/m, tegangan tanpa beban tercatat 19V dan tegangan berbeban 12,2V dengan arus 0,04A. Pada debit 97 L/m, tegangan tanpa beban menjadi 29V dan tegangan berbeban 12,4V dengan arus 0,14A. LCD berhasil menayangkan seluruh parameter pengukuran secara langsung. Efisiensi sistem naik dari 0,81% menjadi 1,45% seiring kenaikan debit. Uji lampu 21W selama 30 menit memperlihatkan aki 12V 5Ah mengalami penurunan tegangan dari 12,41V ke 12,26V. Temuan ini menegaskan bahwa prototipe PLTMH mampu mengubah energi air menjadi listrik dengan efisiensi yang bertambah pada debit lebih besar. Sistem pemantauan berbasis ESP32 yang beroperasi secara mandiri menawarkan alternatif murah dan praktis untuk simulasi serta media pembelajaran PLTMH



Copyright © 2026 The Author(s),
Published by Jurnal Informatika dan
Teknik Elektro Terapan. This is an
open-access article distributed under
the terms of the Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0
International License (CC BY-NC
4.0).

Abstract. The rising demand for electrical energy has encouraged the exploration of renewable sources, particularly Micro-Hydro Power Plants (MHPP). This study realizes a laboratory-scale MHPP prototype equipped with power and water debit monitoring using ESP32. A crossflow turbine, DC 24V 150W generator, and two water pumps with discharge rates of 43 L/m and 54 L/m were employed as flow simulators. INA219 and YF-B10 sensors were installed to measure voltage, current, and debit, while a 16x2 I2C LCD displayed real-time data without internet connectivity. Testing was conducted at two discharge conditions: 43 L/m (pump 1) and 97 L/m (pumps 1+2). At 43 L/m, the no-load voltage reached 19V and the load voltage reached 12.2V with a current of 0.04A. At 97 L/m, the no-load voltage increased to 29V and the load voltage to 12.4V with a current of 0.14A. The LCD successfully displayed all measured parameters in real time. System efficiency rose from 0.81% to 1.45% as the discharge increased. A 30-minute test powering a 21W lamp showed that the 12V 5Ah battery experienced a voltage drop from 12.41V to 12.26V. These findings confirm that the MHPP prototype can convert water energy into electricity with improved efficiency at higher flow rates. The ESP32-based monitoring system, operating independently offline, offers an affordable and practical alternative for simulation and learning media in MHPP applications.

1. PENDAHULUAN

Keterbatasan akses listrik di daerah terpencil dengan geografis sulit masih menjadi kendala utama yang belum teratasi sepenuhnya oleh jaringan konvensional. Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang mengandalkan aliran sungai berdebit kecil namun berkelanjutan hadir sebagai solusi yang potensial. PLTMH dinilai efektif karena ramah lingkungan, biaya operasional rendah, serta cocok untuk skala pedesaan. Sebelum diimplementasikan secara langsung, diperlukan studi awal melalui prototipe laboratorium untuk memahami karakteristik sistem, menguji komponen, dan mengevaluasi kinerja pembangkit secara terkendali [1].

Performa PLTMH sangat bergantung pada debit air yang tersedia, karena perubahan debit memengaruhi kecepatan putaran turbin dan daya keluaran yang dihasilkan. Fluktuasi debit akibat kondisi alam maupun musim dapat menyebabkan ketidakstabilan daya, yang berpotensi mengganggu suplai energi ke beban atau merusak peralatan elektronik yang terhubung. Oleh karena itu, sistem monitoring yang menampilkan parameter penting secara real-time diperlukan untuk memantau kinerja, menganalisis efisiensi, mendeteksi penurunan fungsi turbin atau generator secara dini, serta menjadi dasar pengambilan keputusan operasional seperti pembersihan saluran atau penyesuaian beban [2].

Dalam konteks penelitian skala laboratorium, mikrokontroler telah terbukti membantu pengumpulan data kinerja pembangkit secara sistematis. Meskipun PLTMH konvensional di lapangan tidak selalu memerlukan mikrokontroler karena pengoperasiannya dapat dilakukan secara manual, untuk keperluan riset dan pengembangan prototipe, perangkat ini menawarkan kemudahan perekaman data tegangan, arus, daya, dan debit secara otomatis dan berkelanjutan. Dengan data yang terekam, peneliti dapat menganalisis hubungan debit terhadap daya, menghitung efisiensi, serta mendeteksi gangguan secara dini. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini merancang sistem monitoring berbasis ESP32 yang terintegrasi

dalam prototipe sebagai media pembelajaran sebelum penerapan di lapangan [3]

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah pembangkit skala kecil yang mengubah energi kinetik dan potensial air menjadi listrik dengan memanfaatkan aliran air berdebit dan tinggi jatuh (head) tertentu untuk memutar turbin yang menggerakkan generator. PLTMH dapat beroperasi di sungai atau saluran irigasi tanpa bendungan besar, sehingga ramah lingkungan. Komponen utamanya meliputi sistem pengaliran, turbin, generator, serta kontrol dan distribusi daya. Kinerja PLTMH sangat dipengaruhi oleh debit dan tinggi jatuh air, dimana kesesuaian turbin dengan kondisi aliran menjadi faktor kunci efisiensi. Dengan perancangan tepat, PLTMH mampu menghasilkan daya stabil skala kecil [4].

PLTMH memiliki keunggulan sebagai energi terbarukan, yaitu memanfaatkan energi lokal, berdampak lingkungan kecil, serta beroperasi berkelanjutan selama debit tersedia. Selain itu, tidak memerlukan infrastruktur besar, sehingga cocok untuk daerah dengan aliran air skala kecil dan kebutuhan listrik terbatas [5].

2.2. Turbin Crossflow

Turbin crossflow menjadi pilihan populer untuk PLTMH karena desainnya sederhana dan cocok untuk head rendah dengan debit besar. Prinsip kerjanya mengandalkan aliran fluida yang melewati sudu runner untuk menciptakan momen putar, yang kemudian diubah menjadi energi mekanik dan listrik. Karakteristik ini membuat turbin crossflow cocok dimanfaatkan di Indonesia yang kaya akan aliran sungai. Performa dan efisiensi turbin sangat bergantung pada desain komponennya, terutama dimensi sudu dan runner [6].

Pada variasi geometri sudu terpancung segitiga mempengaruhi aliran dan daya keluaran secara nyata. Temuan ini mengungkapkan bahwa perubahan rasio sudu berdampak pada karakteristik aliran dan output daya turbin, sehingga faktor ini wajib dipertimbangkan saat merancang turbin yang

efisien untuk mengoptimalkan konversi energi air menjadi listrik pada PLTMH [7].

2.3. *Generator DC*

Generator arus searah (DC) adalah mesin elektromekanis yang mengubah energi mekanik menjadi listrik arus searah melalui prinsip induksi elektromagnetik. Menganalisis karakteristik generator DC sinkron pada berbagai kondisi beban dan variasi tegangan untuk menentukan parameter resistansi, induktansi, serta efisiensi kerja. Hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi teoritis generator DC berubah seiring distorsi medan magnet pada stator dan rotor, yang mempengaruhi kemampuan generator menghasilkan listrik DC optimal pada berbagai beban. Studi ini memberikan gambaran penting bagi perancangan generator DC yang efisien untuk aplikasi energi skala kecil dan sistem kelistrikan sederhana [8].

2.4. *Solar Charge Controller (SCC)*

Solar Charge Controller (SCC) merupakan komponen yang bertugas mengatur pengisian baterai dan menjaga stabilitas energi yang disimpan. Untuk mengoptimalkan daya pada berbagai kondisi, SCC dapat dilengkapi teknik Maximum Power Point Tracking (MPPT) dengan algoritma Perturb and Observe (P&O), yang bekerja dengan mengubah titik operasi secara bertahap sambil memantau perubahan daya hingga mencapai titik maksimum. Meneliti kinerja konverter boost, buck, dan SEPIC pada sistem MPPT berbasis P&O, dan hasilnya menunjukkan bahwa jenis DC-DC converter berpengaruh terhadap efektivitas pelacakan daya maksimum. Dengan demikian, kombinasi algoritma MPPT yang sesuai dan topologi konverter yang tepat dapat mengoptimalkan pemanfaatan daya serta proses pengisian baterai secara lebih efisien [9].

2.5. *Inverter*

Inverter merupakan perangkat elektronik daya yang mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) untuk memenuhi kebutuhan beban rumah tangga, industri, maupun sistem energi terbarukan. Perangkat ini berfungsi sebagai sumber tegangan AC saat listrik utama tidak tersedia, seperti pada sistem cadangan berbasis baterai atau panel surya.

Inverter 12V DC ke 220V AC terbukti efektif untuk menyalakan beban seperti lampu dan kipas angin saat pemadaman listrik PLN, dengan tegangan keluaran yang sesuai sehingga menjadi sumber daya cadangan praktis dalam kondisi darurat [10].

Selain berfungsi sebagai konverter DC ke AC, inverter juga memerlukan teknik modulasi yang tepat untuk menghasilkan gelombang keluaran yang baik stabil.[11]mengembangkan inverter pure sine wave dengan menerapkan teknik Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) untuk menghasilkan sinyal PWM sebagai pengendali MOSFET pada rangkaian inverter. Hal ini menegaskan bahwa pemilihan teknik modulasi dan metode pengendalian yang tepat berperan penting dalam meningkatkan kualitas keluaran konversi DC ke AC, sehingga inverter dapat digunakan untuk memenuhi berbagai jenis beban listrik.

2.6. *Sensor INA219*

INA219 merupakan sensor daya digital yang mengukur arus, tegangan, dan daya listrik memanfaatkan metode shunt resistor dan komunikasi I2C. Dengan kemampuan membaca tegangan bus hingga 26V dan arus resolusi tinggi, sensor ini sangat sesuai untuk sistem monitoring daya berbasis mikrokontroler. Setelah dikalibrasi, INA219 menunjukkan hubungan linear yang baik antara hasil pengukuran dan nilai acuan, sehingga tingkat akurasi dapat diandalkan [12].

Akurasi dan stabilitas pembacaan menjadi faktor krusial dalam penggunaan INA219 sebagai sensor daya. Bahwa sensor ini mampu mengukur arus, tegangan, dan daya secara konsisten pada berbagai kondisi beban. Kemudahan implementasi juga menjadi nilai tambah, karena antarmuka I2C memungkinkan integrasi dengan berbagai mikrokontroler tanpa rangkaian tambahan yang rumit [13].

2.7. *Sensor YF-B10*

YF-B10 merupakan sensor aliran berbasis efek Hall yang mengukur laju aliran air dengan menghasilkan keluaran pulsa digital. Pengukuran debit air menjadi hal yang krusial dalam sistem PLTMH untuk mengetahui jumlah aliran yang mengalir menuju turbin. Sensor YF-B10 memungkinkan pemantauan debit secara langsung melalui pulsa yang timbul akibat putaran rotor saat air mengalir. Data yang

terbaca kemudian diolah oleh ESP32 dan disajikan pada LCD 16x2 I2C sebagai bagian dari sistem monitoring prototipe. Debit yang terukur berfungsi sebagai parameter penting dalam analisis kinerja PLTMH, sebab perubahan debit berdampak pada putaran turbin dan daya yang dibangkitkan generator. Karena itu, penggunaan sensor YF-B10 pada riset ini bertujuan menyajikan informasi debit secara aktual agar kondisi aliran pada prototipe dapat terus terpantau selama pengujian berlangsung [14].

2.8. LCD 12C 16x2

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan perangkat tampilan alfanumerik yang umum digunakan sebagai antarmuka keluaran pada sistem berbasis mikrokontroler. LCD bekerja dengan mengendalikan susunan piksel cair melalui driver internal untuk menampilkan huruf, angka, dan simbol tertentu. Penggunaan antarmuka I2C pada LCD bertujuan menyederhanakan proses interfacing dengan mikrokontroler, sehingga sistem menjadi lebih efisien, sederhana, dan mudah dikembangkan, terutama untuk aplikasi embedded seperti jam digital, pengukur suhu, atau sistem monitoring sederhana [15].

2.9. ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler generasi lanjut dari Espressif Systems dengan arsitektur dual-core berperforma tinggi, memori flash dan SRAM lebih besar dari pendahulunya, serta mendukung antarmuka GPIO, UART, SPI, dan I2C. Kemampuan pemrosesan yang baik dan stabil menjadikannya cocok sebagai pengendali utama sistem tertanam berbasis IoT [16].

Selain fitur komunikasi, ESP32 memiliki fleksibilitas tinggi dalam pemrograman dan pengembangan sistem. ESP32 mendukung berbagai lingkungan pengembangan, seperti Arduino IDE dan ESP-IDF, sehingga memudahkan proses implementasi pada berbagai aplikasi. Dengan kombinasi performa, efisiensi daya, dan kemudahan integrasi, ESP32 banyak digunakan sebagai mikrokontroler utama pada sistem tertanam modern [17].

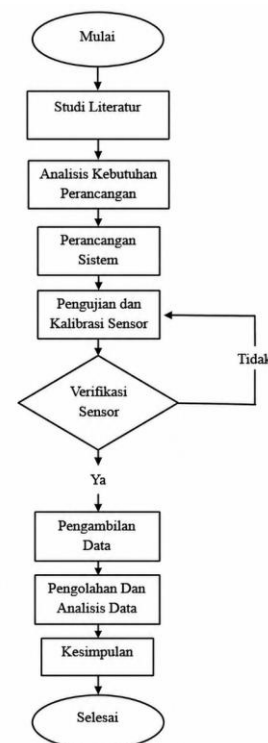
3. METODE PENELITIAN

3.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan

pendekatan eksperimental. R&D dipilih karena penelitian bertujuan merancang, membangun, dan menghasilkan alat berupa prototipe PLTMH yang dilengkapi sistem monitoring berbasis mikrokontroler. Pendekatan eksperimental digunakan karena peneliti melakukan percobaan langsung pada prototipe dengan memberikan perlakuan berupa variasi debit air, kemudian diamati pengaruhnya terhadap tegangan, arus, dan daya listrik yang dihasilkan. Data yang diperoleh dianalisis untuk mengetahui efisiensi sistem, sehingga penelitian ini tidak hanya membuat alat, tetapi juga menguji kinerja dan kelayakannya melalui data eksperimen yang akurat.

3.2. Tahapan Penelitian

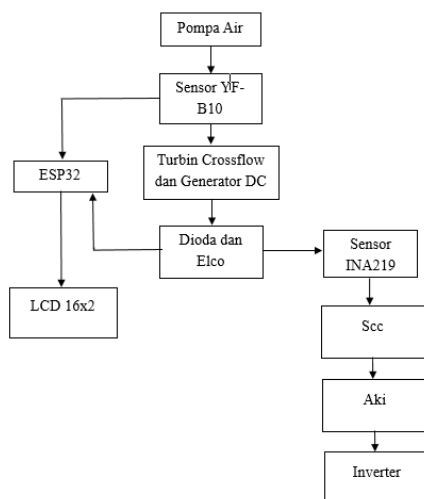


Gambar 3.1. Tahapan Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memahami teori dasar PLTMH, komponen-komponennya, serta rumus perhitungan daya dan efisiensi. Selanjutnya dilakukan analisis kebutuhan untuk menentukan spesifikasi setiap komponen yang digunakan. Tahap perancangan meliputi perakitan hardware (pompa, pipa, sensor YF-B10, turbin crossflow, generator DC, sensor INA219, ESP32, LCD, dan rangkaian daya)

serta pembuatan software menggunakan Arduino IDE untuk pemrograman ESP32. Setelah itu, sensor INA219 dan YF-B10 diuji dan dikalibrasi secara terpisah untuk memastikan akurasi pembacaan. Verifikasi sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan terhadap alat ukur referensi hingga berada dalam batas toleransi. Pengambilan data dilakukan dengan memvariasikan debit air dari pompa 1 dan 2. Tahap akhir adalah pengolahan dan analisis data untuk melihat hubungan debit terhadap tegangan, arus, daya, dan efisiensi sistem.

3.3. Diagram Blok Sistem



Gambar 3.2. Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem menggambarkan alur kerja dan hubungan antar komponen utama pada sistem PLTMH beserta monitoringnya. Sistem terbagi menjadi dua bagian, yaitu bagian pembangkit listrik yang terdiri dari pompa air, pipa ketinggian 65 cm, turbin crossflow, generator DC, diode bridge, elco, solar charge controller, aki, inverter, dan beban lampu, serta bagian monitoring yang terdiri dari sensor debit YF-B10, sensor tegangan dan arus INA219, mikrokontroler ESP32, dan LCD 16x2 I2C. Aliran air dari pompa memutar turbin dan generator sehingga menghasilkan listrik, dimana tegangan dan arus terbaca oleh INA219 sedangkan debit terbaca oleh YF-B10, kemudian data diproses ESP32 dan ditampilkan pada LCD secara real-time, sedangkan daya dari generator distabilkan oleh diode dan elco, diatur pengisiannya oleh SCC, disimpan dalam

aki, dan diubah menjadi tegangan AC oleh inverter untuk menyalakan beban lampu.

3.4. Perangkat Keras (Hardware)

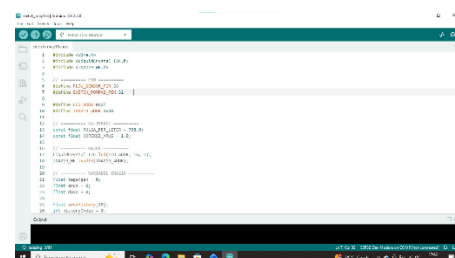
Perancangan hardware monitoring meliputi pemilihan, penempatan, dan koneksi fisik antar komponen elektronik yang digunakan untuk memantau parameter listrik dan debit air. Komponen utama dalam perancangan ini adalah mikrokontroler ESP32, sensor INA219, sensor YF-B10, dan LCD 16x2 I2C. Seluruh komponen ditempatkan dalam satu box panel yang rapi untuk melindungi dari percikan air dan memudahkan akses saat pengujian.



Gambar 3.3 Perangkat keras

3.5. Perangkat Lunak (Software)

Program ESP32 menggunakan Arduino IDE untuk membaca sensor INA219 (tegangan, arus, daya) dan YF-B10 (debit), lalu menampilkannya secara bergantian pada LCD 16x2 I2C karena keterbatasan layar. Sensor YF-B10 dikonfigurasi dengan interrupt agar pulsa tidak terlewat, dan INA219 dikalibrasi untuk arus maksimal 1A. Data yang fluktuatif akibat noise pompa distabilkan dengan filter sederhana, serta dikirim ke Serial Monitor untuk verifikasi.



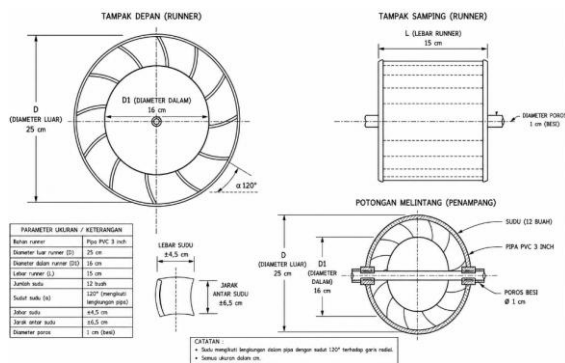
Gambar 3.4 Perangkat Lunak

3.6. Perancangan Turbin Crossflow

Turbin crossflow yang digunakan dalam penelitian ini dirancang dan dibuat secara

mandiri. Pembuatan turbin sendiri dilakukan karena turbin crossflow komersial dengan spesifikasi yang sesuai sulit ditemukan di pasaran, selain itu pembuatan sendiri memungkinkan penyesuaian dimensi dengan debit air dan head yang tersedia pada prototipe. Bahan utama yang digunakan adalah pipa PVC yang dipilih karena mudah dibentuk, tahan terhadap air, ringan, serta ekonomis untuk skala laboratorium.

Proses pembuatan turbin crossflow diawali dengan memotong pipa PVC 3 inch menjadi tiga bagian memanjang sebagai bahan sudu, kemudian setiap sudu dipotong 15 cm sesuai lebar runner. Lengkungan alami pipa menghasilkan sudut sudu sekitar 20° , masih dalam rentang optimal 16° – 30° . Sebanyak 12 sudu dipasang melingkar pada runner berdiameter luar 25 cm dan dalam 16 cm, direkatkan dengan lem PVC dan diperkuat baut kecil untuk ketahanan mekanis. Poros turbin dari besi diameter 1 cm dipasang di tengah runner sebagai penghubung ke generator. Setelah perakitan, turbin diuji keseimbangan putarannya secara manual untuk menghindari getaran berlebih yang dapat menurunkan efisiensi atau merusak komponen lain saat beroperasi.



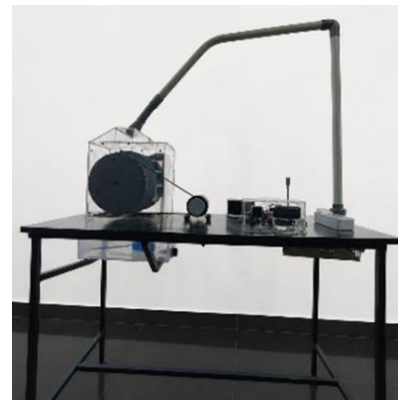
Gambar 3.3. Sketsa Turbin Crossflow

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Perancangan Prototipe PLTMH

Prototipe PLTMH skala laboratorium ini dirancang untuk mengubah energi aliran air menjadi energi listrik menggunakan dua pompa sebagai simulator sumber aliran. Air dipompa dari bak penampung menuju pipa vertikal, melewati sensor YF-B10, lalu memutar turbin crossflow yang terhubung ke generator DC 24V 150W. Karena tegangan yang dihasilkan

generator masih fluktuatif, maka dilewatkan pada rangkaian penyearah diode bridge dan kapasitor elco untuk disearahkan dan dihaluskan. Tegangan stabil kemudian dialirkan ke SCC 10A untuk mengisi aki 12V 5Ah, lalu diubah menjadi AC 220V oleh inverter untuk menyalakan beban lampu LED 21W. Seluruh komponen disusun terintegrasi dalam sistem sirkulasi air tertutup, sehingga air yang keluar dari turbin kembali ke bak penampung dan dipompa terus-menerus. Berdasarkan hasil pengujian, prototipe terbukti mampu menghasilkan tegangan listrik yang bervariasi sesuai dengan debit air yang mengalir, dimana semakin besar debit maka tegangan yang dihasilkan semakin meningkat.



Gambar 4.1. Hasil Perancangan PLTMH

4.2. Hasil Pengujian dan Perhitungan

4.2.1. Data Output Generator Tanpa Beban

Tabel 4.1. Data Output Generator Tanpa Beban

Kondisi	Debit (L/m)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
Pompa 1	43	19	0	0
Pompa 1+2	97	29	0	0

Pengujian tanpa beban dilakukan untuk mengetahui tegangan maksimal (open circuit voltage) yang mampu dihasilkan generator sebelum diberikan beban. Pada pengujian ini, generator diputar dengan variasi debit air yang berbeda, sedangkan output generator tidak terhubung ke SCC maupun aki sehingga arus yang mengalir adalah nol ampere dan daya listrik yang dihasilkan juga nol watt.

4.2.2. Data Output Generator Berbeban ke SCC

Tabel 4.2. Output Generator Berbeban SCC

Kondisi	Q (L/m)	V (V)	I (A)	P_listrik (W)
Pompa 1	43	12,2	0,04	0,488
Pompa 1+2	97	12,4	0,14	1,736

Data hasil pengujian sistem saat generator terhubung ke SCC dan sedang melakukan pengisian aki. Percobaan ini dilakukan dengan kondisi tegangan awal aki yang sama, yaitu 12,20 volt agar perbandingan data antara kondisi satu pompa dan dua pompa menjadi lebih akurat dan tidak dipengaruhi oleh perbedaan kondisi awal aki. Dari data yang tersaji dalam tabel, dapat dilihat perbedaan kinerja antara kedua kondisi tersebut, baik dari segi arus pengisian yang mengalir maupun efisiensi sistem secara keseluruhan. Data ini menjadi acuan utama untuk menganalisis seberapa besar pengaruh debit air terhadap kemampuan generator dalam mengisi aki.

4.2.3. Data Pengujian Beban Lampu

Tabel 4.3. Tabel Data Pengujian Beban Lampu

NO	Kondisi	Tegangan Aki (V)	Keterangan
1	Sebelum inverter hidup	12,41	Aki dalam keadaan diam (resting)
2	Inverter hidup (tanpa lampu)	12,32	Tegangan turun akibat beban inverter
3	Lampu 21W dinyalakan	12,23	Tegangan turun karena beban penuh
4	Setelah 30 menit	12,13	Tegangan saat beban

			masih menyala
5	Lampu mati (inverter masih hidup)	12,16	Tegangan naik sedikit (lepas beban)
6	Inverter dimatikan	12,26	Tegangan pemulihan

Menunjukkan perubahan tegangan aki selama proses menyalakan lampu berdaya 21 watt melalui inverter. Data ini menggambarkan secara runtut perilaku tegangan aki mulai dari kondisi diam (resting), saat inverter pertama kali dihidupkan tanpa lampu, saat lampu dinyalakan, selama 30 menit lampu menyala, hingga setelah lampu dan inverter dimatikan. Pengujian ini berguna untuk mengetahui seberapa besar ketahanan aki dalam menyuplai beban serta bagaimana karakteristik penurunan tegangan aki ketika digunakan secara terus-menerus.

4.2.4. Perhitungan Efisiensi

Tabel 4.4. Data Awal Perhitungan Pengujian Pompa 1

Panjang pipa, (L1)	2,55 m
Diameter dalam pipa, (D1)	0,026 m
Waktu tempuh bola, (t1)	2,1 s
Tegangan generator, (V)	12,2 V
Arus generator, (I)	0,04 A
Daya pompa, (P1)	60 W
Massa jenis air, (ρ)	1000 kg/m ³
Percepatan gravitasi, (g)	9,81 m/s

1. Luas Penampang Pipa

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4}$$

$$A_1 = \frac{3,14(0,026)^2}{4}$$

$$A_1 = 0,000531 \text{ m}^2$$

2. Kecepatan Aliran Air

$$v_1 = \frac{L_1}{t_1}$$

$$v_1 = \frac{2,55}{2,1}$$

$$v_1 = 1,214 \text{ m/s}$$

3. Debit air

$$Q_1 = A_1 v_1$$

$$Q_1 = 0,000531 \times 1,214$$

$$Q_1 = 0,000645 \text{ m}^3/\text{s}$$

atau

$$Q_1 = 38,7 \text{ L/menit}$$

4. Head

$$H_1 = \frac{P_1}{\rho g Q_1}$$

$$H_1 = \frac{1000 \times 9,81 \times 0,000645}{60}$$

$$H_1 = 9,48 \text{ m}$$

5. Daya Hidrolik

$$P_{h1} = \rho g Q_1 H_1$$

$$P_{h1} = 1000 \times 9,81 \times 0,000645 \times 9,48$$

$$P_{h1} = 60 \text{ W}$$

6. Daya Listrik Generator

$$P_{out1} = V_{gen1} \times I_{gen1}$$

$$P_{out1} = 12,2 \times 0,04$$

$$P_{out1} = 0,488 \text{ W}$$

7. Efisiensi sistem

$$\eta_1 = \frac{P_{out1}}{P_{h1}} \times 100\%$$

$$\eta_1 = \frac{0,488}{60} \times 100\%$$

$$\eta_1 = 0,81\%$$

Tabel 4.5. Data Awal Perhitungan Pengujian Pompa 1+2

Panjang pipa, (L2)	0,35 m
Diameter dalam pipa, (D2)	0,020 m
Waktu tempuh bola, (t2)	0,15 s
Tegangan generator, (V)	12,4 V
Arus generator, (I)	0,15 A
Daya pompa, (P2)	120 W
Massa jenis air, (ρ)	1000 kg/m ³
Percepatan gravitasi, (g)	9,81 m/s

1. Luas Penampang Pipa

$$A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4}$$

$$A_2 = \frac{3,14(0,020)^2}{4}$$

$$A_2 = 0,000314 \text{ m}^2$$

2. Kecepatan Aliran Air

$$v_2 = \frac{L_2}{t_2}$$

$$v_2 = \frac{0,35}{0,15}$$

$$v_2 = 2,33 \text{ m/s}$$

3. Debit Air

$$Q_2 = A_2 v_2$$

$$Q_2 = 0,000314 \times 2,33$$

$$Q_2 = 0,000732 \text{ m}^3/\text{s}$$

atau

$$Q_2 = 43,9 \text{ L/menit}$$

4. Debit Total

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_{total} = 38,7 + 43,9$$

$$Q_{total} = 82,6 \text{ L/menit}$$

atau

$$Q_{total} = 0,001377 \text{ m}^3/\text{s}$$

5. Head

$$H_2 = \frac{P_2}{\rho g Q_{total}}$$

$$H_2 = \frac{120}{1000 \times 9,81 \times 0,001377}$$

$$H_2 = 8,88 \text{ m}$$

6. Daya Hidrolik

$$P_{h2} = \rho g Q_{total} H_2$$

$$P_{h2} = 1000 \times 9,81 \times 0,001377 \times 8,88$$

$$P_{h2} = 120 \text{ W}$$

7. Daya Listrik Generator

$$P_{out2} = V_{gen2} \times I_{gen2}$$

$$P_{out2} = 12,4 \times 0,14$$

$$P_{out2} = 1,736 \text{ W}$$

8. Efisiensi Sistem

$$\eta_2 = \frac{P_{out2}}{P_{h2}} \times 100\%$$

$$\eta_2 = \frac{1,736}{120} \times 100\%$$

$$\eta_2 = 1,45\%$$

Tabel 4.6. Hasil Perhitungan Efisiensi

Keterangan	Pompa 1	Pompa 1+2
Luas Penampang Pipa	0,000531 m ²	0,000314 m ²
Kecepatan Aliran Air	1,214 m/s	2,33 m/s
Debit Air	38,7/menit	82,6/menit
Head	9,48 m	8,88 m
Daya Hidrolik	60 W	120 W
Daya Listrik Generator	0,488 W	1,736 W
Efisiensi Sistem	0,81 %	1,45 %

Berdasarkan Tabel hasil perhitungan, debit total pada percobaan kedua mengalami peningkatan karena kedua pompa dioperasikan secara bersamaan. Peningkatan debit menyebabkan daya keluaran generator meningkat dari 0,488 W menjadi 1,736 W dan efisiensi sistem meningkat dari 0,81% menjadi 1,45%. Meskipun nilai efisiensi masih relatif rendah, hal tersebut masih dapat diterima pada prototipe PLTMH skala laboratorium karena adanya rugi-rugi energi pada pompa, sistem perpipaan, turbin, dan generator.

4.3. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian, peningkatan debit air terbukti berpengaruh signifikan terhadap kinerja generator, dimana kenaikan debit dari 43 L/m menjadi 97 L/m menyebabkan tegangan tanpa beban naik dari 19V menjadi 29V, serta arus pengisian aki meningkat dari 0,04A menjadi 0,14A, yang sesuai dengan prinsip generator DC bahwa tegangan dan arus berbanding lurus dengan kecepatan putaran. Pengisian aki selama 30 menit menunjukkan bahwa pada debit rendah tegangan aki hanya naik 0,02V karena arus kecil (40mA), sedangkan pada debit tinggi naik 0,12V dengan arus lebih besar (140mA), sehingga debit air menjadi faktor kunci yang menentukan kecepatan pengisian aki dan kinerja PLTMH secara keseluruhan.

Berdasarkan hasil perhitungan, efisiensi sistem meningkat dari 0,81% menjadi 1,45%.

Peningkatan ini terjadi karena pada debit rendah generator berputar di bawah kecepatan optimal sehingga rugi-rugi daya (tembaga dan gesek) relatif besar, sedangkan pada debit tinggi putaran mendekati kecepatan nominal sehingga konversi energi lebih efisien. Rendahnya efisiensi yang dicapai tidak terlepas dari skala laboratorium dan keterbatasan komponen yang digunakan, namun secara keseluruhan prototipe PLTMH yang dirancang telah terbukti mampu mengonversi energi air menjadi listrik dengan efektif.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa prototipe PLTMH dengan turbin crossflow, generator DC, dan sistem monitoring berbasis ESP32 telah berhasil dirancang dan diuji. Sistem monitoring terbukti mampu menampilkan parameter tegangan, arus, daya, dan debit air secara real-time dengan akurasi yang baik. Prototipe ini dapat menjadi dasar pengembangan PLTMH skala lebih besar serta media pembelajaran konversi energi air menjadi listrik. Sistem monitoring offline yang dirancang juga cocok diterapkan di daerah tanpa jaringan internet karena tidak memerlukan koneksi online.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan:

5.1 Kelebihan

1. Prototipe PLTMH berhasil dibuat menggunakan turbin crossflow dan generator DC 24V 150W yang mampu menghasilkan tegangan bervariasi sesuai dengan debit air yang mengalir.
2. Sistem monitoring berbasis ESP32 dengan sensor INA219 dan YF-B10 berhasil dibangun dan mampu menampilkan data tegangan, arus, daya, dan debit air secara real-time pada LCD secara offline.
3. Sistem sirkulasi air tertutup memungkinkan pengujian berulang tanpa memerlukan air dalam jumlah besar.
4. Rangkaian kelistrikan lengkap (diode bridge, elco, SCC, aki, inverter) mampu menstabilkan tegangan dan menyimpan energi untuk menyalakan beban lampu AC.

5.2 Kekurangan

1. Efisiensi sistem masih rendah di bawah 2%, yang disebabkan oleh rugi-rugi mekanis pada turbin dan generator serta ketidaksesuaian putaran generator dengan kecepatan optimalnya.
2. Debit air yang dihasilkan pompa masih terbatas, sehingga potensi daya yang dihasilkan belum maksimal.
3. Sistem monitoring belum dilengkapi fitur penyimpanan data dan pemantauan jarak jauh.

5.3 Pengembangan Selanjutnya

1. Sistem monitoring dikembangkan ke versi IoT berbasis internet dan ditambahkan fitur data logging untuk penyimpanan data.
2. Kualitas turbin ditingkatkan dengan pembuatan yang lebih presisi (CNC) agar aliran air lebih optimal.
3. Ketinggian head ditingkatkan untuk memperbesar tekanan dan kecepatan air.
4. Pipa berdiameter lebih besar digunakan untuk mengurangi hambatan aliran.
5. Debit air ditingkatkan dengan pompa berkapasitas lebih besar atau bak penampung pada ketinggian tertentu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Albița and D. Selișteanu, "A Compact IIoT System for Remote Monitoring and Control of a Micro Hydropower Plant," *Sensors*, vol. 23, no. 4, 2023, doi: 10.3390/s23041784.
- [2] T. V. Yastica, M. A. Pulungan, and M. Rendra, "Sistem Monitoring Berbasis IoT pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Tangsijaya," *War. LPM*, vol. 27, no. 2, pp. 196–205, 2024, doi: 10.23917/warta.v27i2.4235.
- [3] D. Dewantara, D. E. Yuliana, Y. Shalahuddin, F. Teknik, U. I. Kadiri, and K. Kediri, "Sistem Deteksi Dini Gangguan PLTMH Berbasis Iot Dengan Metode Threshold dan Fuzzy," *JITET (Jurnal Inform. dan Tek. Elektro Ter.)*, vol. 13, no. 3, pp. 749–761, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3S1.7807.
- [4] I. B. Dwiki Dharma Putra, L. Jasa, and I. W. Arta Wijaya, "Disain Perbandingan Karakteristik Turbin Snail-Lie 4 Snail Dan 8 Snail Pada Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (Pltmh)," *J. SPEKTRUM*, vol. 7, no. 4, p. 7, 2020, doi: 10.24843/spektrum.2020.v07.i04.p2.
- [5] A. Akhwan, B. Gunari, S. Sunardi, and W. A. Wirawan, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (Pltmh) Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun," *Eksergi*, vol. 17, no. 1, p. 15, 2021, doi: 10.32497/eksergi.v17i1.2168.
- [6] A. Aziz, M. Basri, and S. Buyung, "Desain Dan Pembuatan Turbin Cross-Flow," *J. Voering*, vol. 8, no. 2, pp. 65–71, 2023, doi: 10.32531/jvov.v8i2.820.
- [7] P. H. Adiwibowo, G. Walianduw, I. Nurjannah, and A. Purwanto, "Impression : Jurnal Teknologi dan Informasi Pengaruh Rasio Sudu Terpancung Berpenampang Segitiga terhadap," *J. Teknol. dan Informas*, vol. 3, no. 2, pp. 69–81, 2024, doi: 10.59086/jti.v3i2.1070.
- [8] C. D. Wicaksono, Y. A. Prabowo, J. T. Elektro, and K. Surabaya, "Analisa dan Pemodelan Generator DC Sinkron Daya Rendah," *J. POLEKTRO J. Power Elektron.*, vol. 11, no. 2, pp. 271–275, 2022, doi: 10.30591/polektro.v12i1.3738.
- [9] R. W. Pratomo, M. F. Suyoto, and M. H. Farras, "Perbandingan Boost , Buck , dan Sepic Converter Pada Sistem Mppt BERBASIS Algoritma Perturb and Observe," *TRANSIENT J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 14, no. 3, pp. 120–127, 2025, doi: 10.14710/transient.v14i3.120-127.
- [10] G. F. Pratiwi and S. Ilman, "Prototipe Inverter 12Vdc To 220Vac 200W Untuk Menghidupkan Beban (Lampu Atau Kipas Angin) Saat Terjadi Pemadaman Listrik Pln," *J. Tera*, vol. 2, no. 2, pp. 63–72, 2022, doi: 10.59832/jt.v2i2.185.
- [11] M. Yunus, L. Sartika, A. M. Prasetya, N. Laga, S. Temu, and T. Noviyansyah, "Desain Osilator Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) Pada Inverter Pure Sine Wave Secara Digital Menggunakan Mikrokontroler," *J. Elektr. Borneo*, vol. 10, no. 2, pp. 34–40, 2024, doi: 10.35334/eb.v10i2.5673.
- [12] F. Y. Prasetyawati, D. Harjunowibowo, A. Fauzi, B. Utomo, and D. Harmanto, "Calibration and Validation of INA219 as Sensor Power Monitoring System using Linear Regression," *AIUB J. Sci. Eng.*, vol. 22, no. 3, pp. 240–249, 2023, doi: 10.53799/AJSE.V22I3.595.
- [13] H. Santoso, R. Hanafi, M. Firdan Nurdin, and A. Muis Prasetya, "Studi Penggunaan Sensor Ina-219 Sebagai Rangkaian Dasar Alat Uji Solar Sel Berdaya Rendah," *J. Elektr. Borneo*, vol. 11, no. 2, pp. 89–93, 2025, doi: 10.35334/eb.v11i2.6965.
- [14] I. M. P. Rahayu, I. N. Piarsa, and A. A. K. A. C. Wiranatha, "Design and Development of Water Pump Controlling and Monitoring Tools Based

- on the Internet of Things,” *J. Ilm. MERPATI*, vol. 11, no. 2, pp. 92–102, 2023, doi: 10.24843/jim.2023.v11.i02.p04.
- [15] P. Son Maria and E. Susianti, “Programming Algorithm on MCS-51 for Alphanumeric Liquid Crystal Display(LCD) Simplified Driver Circuit,” *Indones. J. Electr. Eng. Renew. Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 39–46, 2022, doi: 10.57152/ijeere.v2i1.205.
- [16] S. A. Arrahma and R. Mukhaiyar, “Pengujian Esp32-Cam Berbasis Mikrokontroler,” *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 4, no. 1, pp. 60–66, 2023, doi: 10.24036/jtein.v4i1.347.
- [17] Tundo, Sodik, K. Setiawan, and R. F. Aula, “Penerapan IoT dengan Algoritma Fuzzy dan Mikrokontroler ESP32 dalam Monitoring Penyiraman,” *J. Indones. Manaj. Inform. dan Komun.*, vol. 5, no. 3, pp. 2915–2924, 2024, doi: 10.35870/jimik.v5i3.977.