

Sistem Pengaturan Beban dan Monitoring Berbasis IoT pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Jenis Turbin Pelton

Syakila Salsabila^{1*}, Muhammad Rifky Zulkarnain², La Ode Musa³, Muh. Yusuf Yunus⁴

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia

*E-Mail korespondensi: salsabilasyakila334@gmail.com

Abstract: Microhydro Power Plants (MHPP) are small-scale power generation systems that utilize water energy through head height and water flow rate. This study focuses on the Pelton turbine, an impulse turbine, and the implementation of an Internet of Things (IoT)-based monitoring system to enhance efficiency and operational stability. Fluctuations in voltage due to load variations are common in small-scale MHPP, highlighting the need for effective load regulation. The aim of this research is to explore the principles of load regulation and monitoring systems, as well as to evaluate the efficiency of the Pelton turbine-based MHPP integrated with IoT. The methodology employed is experimental, utilizing a prototype MHPP to test valve openings of 45° and 90° under IoT-based load regulation. The results indicate that system efficiency is inversely related to the load applied. The highest efficiency recorded at a 45° opening was 8.93% with a load of 6 Watts, while the lowest efficiency was 6.69% at a 17 Watt load. For the 90° opening, the highest efficiency was 8.83%, also occurring at a 6 Watt load. These findings underscore the necessity for efficient load management to optimize the performance of Pelton turbine-based MHPP.

Keywords: microhydro power plant (MHPP)1; pelton turbine2; internet of things (IoT)3

Abstrak: Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah sistem pembangkit listrik skala kecil yang memanfaatkan tenaga air melalui tinggi jatuh air (*head*) dan debit air. Dalam penelitian ini, fokus utama adalah pada turbin Pelton, yang merupakan jenis turbin impuls, dan penerapan sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas operasi. Masalah fluktuasi tegangan akibat variasi beban sering terjadi pada PLTMH skala kecil, sehingga diperlukan pengaturan beban yang tepat. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi prinsip kerja sistem pengaturan beban dan monitoring, serta mengevaluasi efisiensi PLTMH jenis turbin Pelton yang terintegrasi dengan IoT. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan prototipe PLTMH, menguji variasi bukaan katup 45° dan 90° pada pengaturan beban berbasis IoT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi sistem berbanding terbalik dengan beban yang diberikan. Efisiensi tertinggi pada bukaan 45° dicapai sebesar 8,93% saat dibebani lampu 6 Watt, sedangkan efisiensi terendah tercatat 6,69% pada beban lampu 17 Watt. Pada bukaan 90°, efisiensi tertinggi sebesar 8,83% juga terjadi pada beban lampu 6 Watt. Temuan ini mengindikasikan perlunya pengaturan beban yang efisien untuk optimalisasi kinerja PLTMH berbasis turbin Pelton.

Kata kunci : pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH)1; turbin pelton2; *internet of things* (IoT)3

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang stabil dan berkelanjutan merupakan faktor penting dalam mendukung aktivitas sosial dan ekonomi masyarakat modern. Ketergantungan terhadap sumber energi fosil yang tidak terbarukan menimbulkan permasalahan lingkungan serta keterbatasan pasokan energi, sehingga diperlukan pengembangan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan [1]. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial di Indonesia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), yang memanfaatkan energi potensial air untuk menghasilkan energi listrik berdasarkan tinggi jatuh air (*head*) dan debit aliran (*flow rate*) [2].

PLTMH umumnya berkapasitas antara 5 kW hingga 1 MW dan banyak digunakan di daerah terpencil untuk memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga maupun fasilitas umum. Salah satu jenis turbin yang sering digunakan dalam sistem ini adalah Turbin Pelton, yang bekerja berdasarkan prinsip impuls, di mana energi kinetik air diubah menjadi energi mekanik melalui benturan pada sudu turbin [3]. Turbin jenis ini memiliki efisiensi tinggi pada kondisi *head* besar dan debit air kecil, sehingga cocok untuk topografi pegunungan di Indonesia [4].

Namun demikian, salah satu tantangan utama dalam pengoperasian PLTMH adalah fluktuasi tegangan dan frekuensi akibat perubahan beban listrik. Ketika beban turun secara tiba-tiba, daya yang

dihasilkan generator tidak seluruhnya terserap, sehingga dapat menimbulkan ketidakstabilan sistem dan mengurangi efisiensi konversi energi [5]. Upaya pengaturan beban menjadi penting untuk menjaga stabilitas generator serta mencegah gangguan pada sistem distribusi listrik.

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem PLTMH. Saputra *et al.* [2] meneliti pengaruh jumlah sudu pada turbin Pelton terhadap efisiensi daya keluaran, dan menunjukkan bahwa variasi jumlah sudu dapat memengaruhi torsi dan performa turbin secara signifikan. Putra *et al.* [3] mengembangkan sistem kontrol penggerak mula generator magnet permanen menggunakan *planetary gear* untuk meningkatkan kestabilan putaran generator. Sementara itu, Saraswati [6] merancang alat simulasi PLTMH dengan turbin Pelton untuk pembelajaran, tetapi belum menerapkan sistem pengaturan dan pemantauan daya secara digital.

Teknologi Internet of Things (IoT) kini banyak dimanfaatkan untuk sistem energi karena kemampuannya dalam melakukan pemantauan dan pengendalian jarak jauh secara *real-time*. Menurut Nurfalah *et al.* [7], penerapan IoT dalam sistem energi dapat meningkatkan efisiensi dengan menyediakan data operasi secara langsung kepada operator. Rahman *et al.* [8] juga mengembangkan sistem monitoring PLTMH menggunakan mikrokontroler ESP32 dan platform Blynk, yang memungkinkan integrasi data sensor untuk pemantauan tegangan dan arus. Hamsah dan Apriliya [9] mengimplementasikan sistem monitoring digital berbasis IoT pada PLTMH, tetapi sistem tersebut belum memiliki fitur pengaturan beban otomatis untuk menjaga kestabilan tegangan.

Selain aspek teknis, penerapan standar manajemen energi seperti ISO 50001 juga terbukti efektif dalam mengoptimalkan kinerja sistem pembangkitan dengan menerapkan prinsip efisiensi energi dan kontrol berkelanjutan [10]. Standar ini dapat menjadi acuan dalam merancang sistem PLTMH modern yang tidak hanya efisien tetapi juga berorientasi pada pengelolaan energi yang terukur.

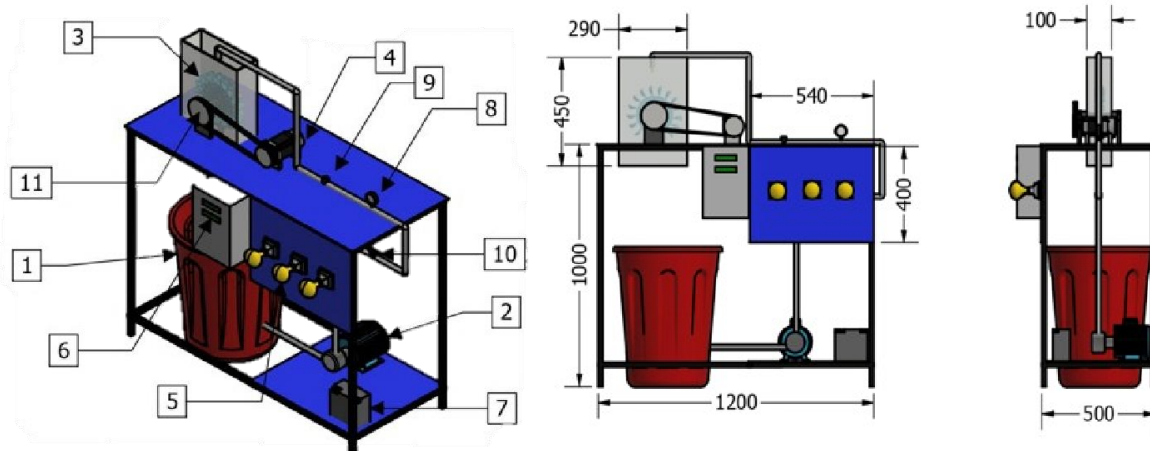
Berdasarkan kajian literatur tersebut, dapat disimpulkan bahwa penelitian sebelumnya lebih berfokus pada aspek mekanik dan sistem monitoring pasif, sedangkan pengembangan sistem pengaturan beban aktif berbasis IoT pada PLTMH jenis Turbin Pelton masih jarang dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan rancang bangun sistem pengaturan beban dan monitoring PLTMH berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor tegangan, arus, dan debit air. Sistem ini diharapkan dapat meningkatkan stabilitas tegangan serta efisiensi turbin melalui pengaturan beban dinamis otomatis dan pemantauan data secara *real-time*.

II. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Pembuatan alat simulasi PLTMH berbasis IoT dilaksanakan di Laboratorium Energi Terbarukan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang. Waktu perancangan, pembuatan, dan pengujian berlangsung 7 bulan. Sejak bulan Februari sampai dengan bulan September 2024. Penelitian dengan pengaturan beban bekerja pada pengontrolan relay 5v yang dikontrol oleh ESP32 dan monitoring parameter dilakukan melalui *platform Blynk* yang menerima data dari ESP32 melalui sensor-sensor pengukuran yang digunakan.

B. Tahap Perakitan



Gambar 1. Rancangan PLTMH Jenis Turbin Pelton

Tabel 1. Keterangan Gambar

No.	Komponen	No.	Komponen
1	Penampung air	7	Aki/ Baterai
2	Pompa	8	Manometer
3	Turbin Pelton	9	Flowmeter
4	Generator DC	10	Katup Utama
5	Beban Utama	11	Pulley
6	Panel Box		

C. Prosedur Percobaan

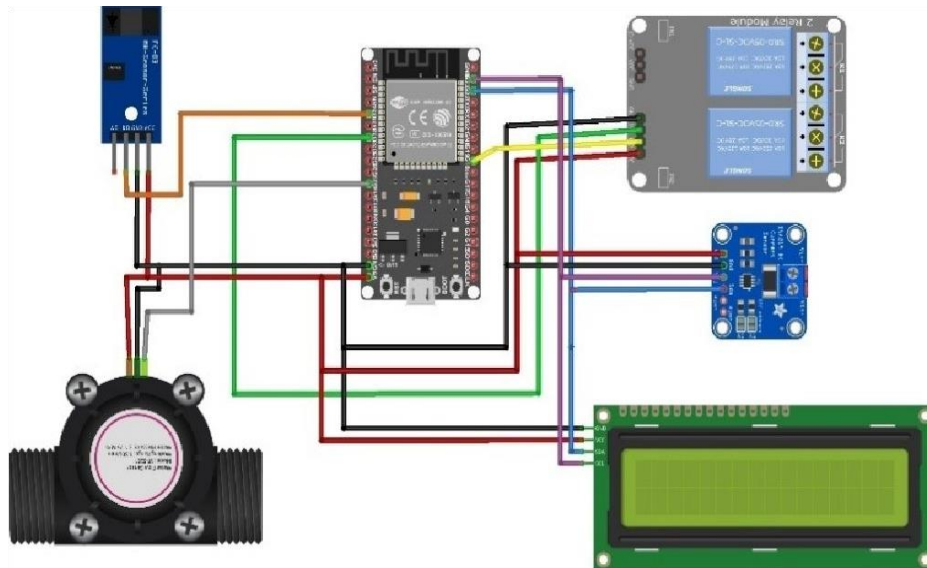
Dalam tahap pengujian dan pengambilan data, ada langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut:

1. Mengisi air pada penampungan air sebagai sumber pembangkit listrik di alat ini.
2. Atur bukaan nozzle dengan memutar handle, dan sesuaikan dengan tegangan tertinggi yang dihasilkan generator saat kondisi tanpa beban.
3. Membuka aplikasi atau website blynk.
4. Login ke akun blynk PLTMH turbin pelton.
5. Menyalakan mikrokontroller pada panel box dengan menghubungkan sumber listrik dari adaptor ke ESP32.
6. Memastikan ESP32 telah terhubung jaringan wifi dengan melihat statusnya yang ditandai dengan indikasi warna hijau pada halaman blynk.
7. Untuk pengujian berbeban menggunakan 3 macam variasi percobaan (1 lampu, 2 lampu, dan 3 lampu) secara bergantian.
8. Selanjutnya start alat jika semua bagian dari alat telah siap.
9. Membuka katup utama untuk mengalirkan air dalam pipa.
10. Melakukan pencatatan data dari flowmeter untuk laju aliran, kecepatan putar turbin, serta tegangan dan arus beban utama maupun beban pembantu yang dimonitoring melalui blynk.
11. Setelah mencatat data ke dalam tabel hasil pengamatan, selanjutnya adalah menganalisis data.
12. Membuat pembahasan dan kesimpulan mengenai hasil penelitian.
13. Pengujian selesai.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Perancangan Sensor Sistem Monitoring PLTMH Berbasis IoT

Penelitian diawali dengan melakukan pergantian pada *nozzle* yang selanjutnya pembuatan sistem monitoring IoT pada rancang bangun Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). PLTMH menggunakan Turbin Pelton yang terbuat dari aluminium dengan jumlah *bucket* atau sudu 12 buah. Pengatur beban digunakan aki 12V sebagai tempat peralihan tegangan dari generator.



Gambar 2. Skema perancangan sensor sistem pengaturan beban dan monitoring PLTMH berbasis IoT

Gambar 2 dapat dilihat skema perancangan dari setiap sensor pada sistem pengaturan beban dan monitoring pada PLTMH berbasis IoT yang menunjukkan ESP32 sebagai *mikrokontroler* yang dapat berfungsi sebagai pusat kendali, pemantauan yang terintegrasi, mengumpulkan data dari sensor-sensor, menampilkan data dari LCD secara *real-time* dan ON-OFF saklar melalui *relay*. ESP32 juga berfungsi sebagai otak dari sistem yang terhubung dengan berbagai komponen untuk berbagai aplikasi. Ketika terhubung dengan LCD (*Liquid Crystal Display*), ESP32 menggunakan antar muka I2C atau SPI untuk menampilkan data seperti hasil pengukuran atau status sistem. INA219 digunakan oleh ESP32 untuk memantau arus dan tegangan melalui komunikasi I2C. *Sensor flowmeter* menghasilkan sinyal pulsa yang dihitung oleh ESP32 untuk menentukan laju aliran fluida.

ESP32 juga mengendalikan relay, yang memungkinkan pengendalian saklar untuk on-off. Selain itu, LM393 adalah komparator voltase, digunakan untuk memonitor sinyal rpm atau kecepatan putaran dengan membandingkan dua tegangan dan memberikan output digital yang memungkinkan ESP32 untuk mengukur dan mengontrol kecepatan putaran perangkat. Integrasi komponen ini memungkinkan ESP32 untuk melakukan pengukuran, kontrol, dan tampilan data secara menyeluruh. Hasil pembacaan sensor NodeMCU ESP32 yang sebagai modul wifi dikirim ke *server blynk*, sehingga sistem kontrol dan monitoring ini harus terhubung ke internet untuk pengiriman datanya. Monitoring pembacaan sensor dapat dipantau secara langsung melalui LCD, dimana LCD terhubung langsung dengan NodeMCU.

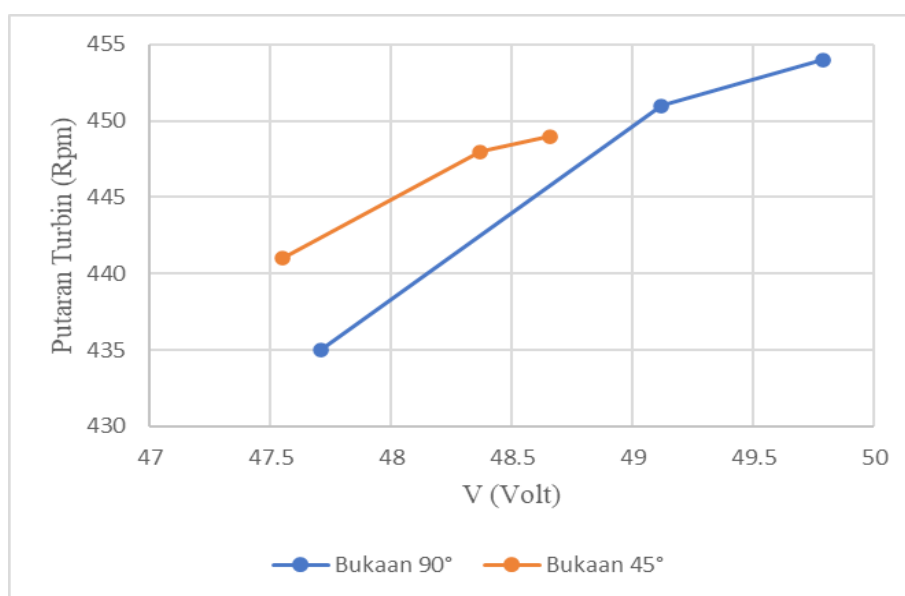
Tabel 2. Data Hasil Pengujian dengan beban bukaan katup 45°

No.	Daya Beban	Debit (L/mnt)	Putaran (rpm)		Tegangan (V)	Arus (A)	P (Watt)	p (bar)
			Turbin	Generator				
1	1 Lampu (6 Watt)	12,5	190	458	12,26	0,22	2,67	1,4
2	2 Lampu (12 Watt)	13,1	193	460	12,04	0,21	2,48	1,4
3		12,4	169	412	9,89	0,18	1,75	1,4
4		11,9	171	409	10,19	0,21	2,12	1,4
5	3 Lampu (17 Watt)	11,3	160	388	9,61	0,24	2,28	1,4
6		10,7	165	389	9,43	0,21	2	1,4

Tabel 3. Data Hasil Pengujian dengan beban bukaan katup 90°

No.	Daya Beban	Debit (L/mnt)	Putaran (rpm)		Tegangan (V)	Arus (A)	P (Watt)	p (bar)
			Turbin	Generator				
1	1 Lampu (6 Watt)	16,6	178	466	12,14	0,22	2,67	1,4
2		16	195	465	12,15	0,22	2,72	1,4
3	2 Lampu (12 Watt)	14,4	174	414	10,48	0,24	2,48	1,4
4	3 Lampu (17 Watt)	13,6	173	416	10,47	0,24	2,51	1,4
5		14,2	178	389	9,48	0,22	1,59	1,4
6		15,4	178	392	9,52	0,22	2,09	1,4

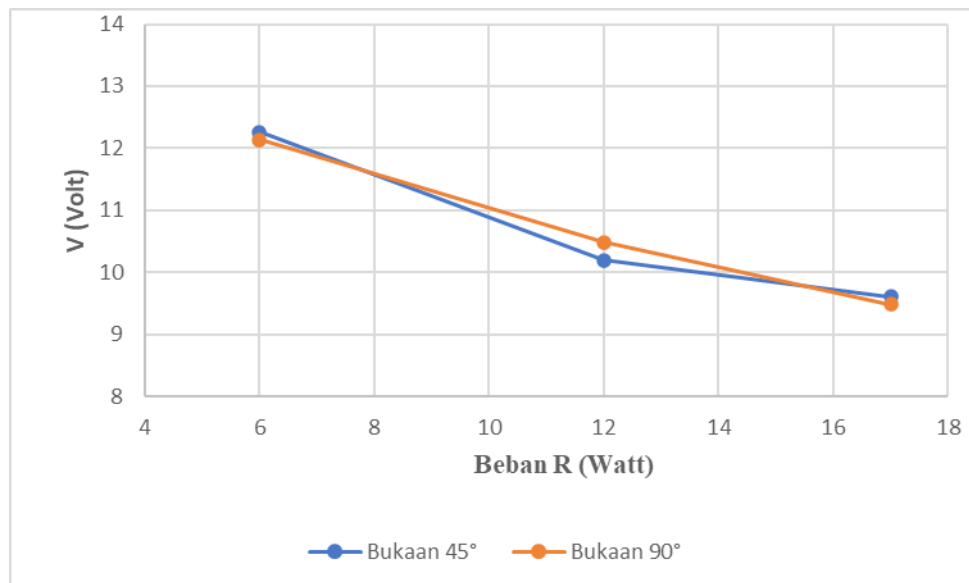
2. Hasil Analisis



Gambar 3. Grafik Hubungan Antara Putaran Turbin (Rpm) dengan Tegangan (V) pada Percobaan Tanpa Beban

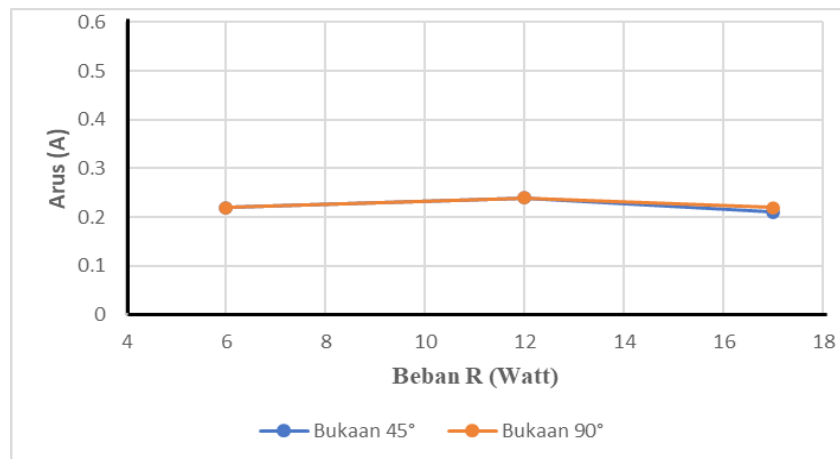
Gambar 3. menunjukkan hubungan antara putaran turbin yang berbanding lurus terhadap tegangan yang dihasilkan, dimana semakin besar tegangan yang dihasilkan maka semakin besar pula putaran turbinnya. Dapat dilihat secara langsung bahwa putaran dan tegangan mengalami kenaikan (*uptrend*). Dapat dilihat nilai tertinggi putaran dari bukaan 45° yaitu 449 Rpm pada saat tegangan 48,66 Volt dan nilai terendah pada putaran yaitu 441 Rpm pada saat tegangan 47,55 Volt. Sedangkan nilai

tertinggi putaran dari bukaan 90° yaitu 454 Rpm pada saat tegangan 49,79 Volt dan nilai terendah pada putaran yaitu 435 Rpm pada saat tegangan 47,71 Volt.



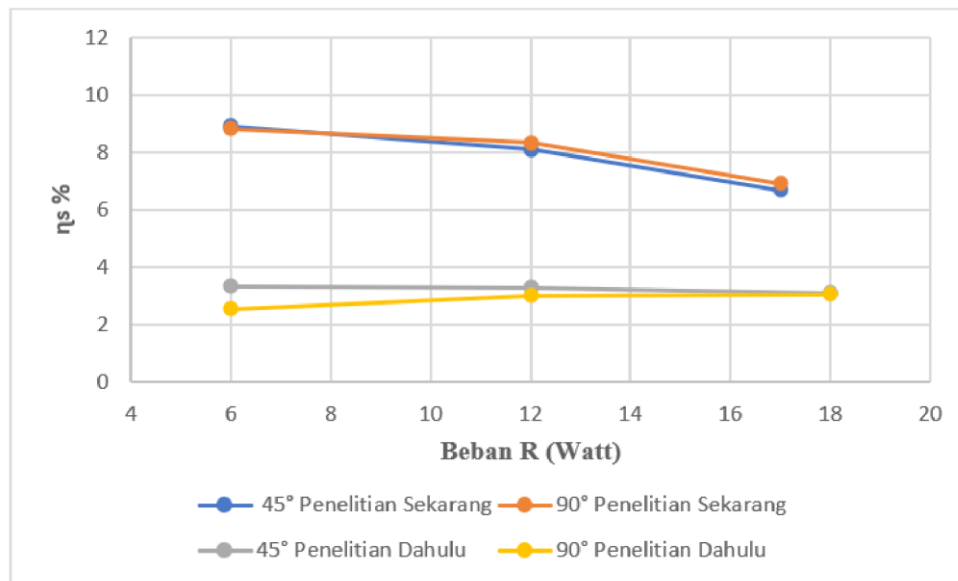
Gambar 4. Grafik Hubungan Antara Tegangan (V) dengan Beban R (Watt) pada Percobaan Berban

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara tegangan yang berbanding terbalik terhadap beban, dimana semakin besar beban yang digunakan maka semakin kecil pula tegangan. Dilihat secara langsung tegangan mengalami penurunan, dimana nilai tertinggi tegangan dari bukaan 45° yaitu 12,26 Volt pada saat dibebani lampu 6 Watt dan nilai terendah pada tegangan yaitu 9,61 Volt pada saat dibebani lampu 17 Watt. Sedangkan nilai tertinggi tegangan dari bukaan 90° yaitu 12,14 Volt pada saat dibebani lampu 6 Watt dan nilai terendah pada tegangan yaitu 9,48 Volt pada saat dibebani lampu 17 Watt.



Gambar 5. Grafik Hubungan Antara Arus (A) dengan Beban R (Watt) pada Percobaan Berban.

Berdasarkan gambar 5. dapat dilihat secara langsung bahwa nilai arus dan beban pada kedua percobaan di atas mengalami fluktuatif. Dapat dilihat nilai tertinggi arus dari bukaan 45° yaitu 0,24 A pada saat dibebani lampu 12 Watt dan nilai terendah pada arus yaitu 0,21 A pada saat dibebani lampu 17 Watt. Sedangkan nilai tertinggi arus dari bukaan 90° yaitu 0,24 A pada saat dibebani lampu 12 Watt dan nilai terendah pada arus yaitu 0,22 A pada saat dibebani lampu 6 dan 17 Watt.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Hubungan Antara Efisiensi Sistem (η_s) dengan Beban R (Watt) pada Percobaan Berban Penelitian Sekarang dan Penelitian Terdahulu

Berdasarkan gambar 6 dapat dilihat secara langsung bahwa nilai η_s dan beban berbanding terbalik, dimana semakin besar beban yang diberikan maka semakin kecil efisiensi sistemnya. Dapat dilihat nilai tertinggi η_s dari bukaan 45° pada penelitian sekarang yaitu 8,93 % pada saat dibebani lampu 6 Watt sedangkan nilai tertinggi penelitian terdahulu pada η_s yaitu 3,33% pada saat dibebani lampu 6 Watt. Sedangkan nilai tertinggi η_s dari bukaan 90° pada penelitian sekarang yaitu 8,83% pada saat dibebani lampu 6 Watt sedangkan nilai tertinggi pada η_s penelitian terdahulu yaitu 3,07% pada saat dibebani lampu 18 Watt.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil penelitian dijelaskan pada bagian ini

1. ESP32 berfungsi sebagai otak dari sistem yang terhubung dengan berbagai komponen untuk berbagai aplikasi. Ketika terhubung dengan LCD (Liquid Crystal Display), ESP32 menampilkan data seperti hasil pengukuran atau status sistem. INA219 digunakan oleh ESP32 untuk memantau arus dan tegangan melalui komunikasi I2C. Sensor flowmeter menghasilkan sinyal pulsa yang dihitung oleh ESP32 untuk menentukan laju aliran fluida. ESP32 juga mengendalikan relay, yang memungkinkan pengendalian saklar untuk on-off. Selain itu, LM393 digunakan untuk memonitor sinyal rpm atau kecepatan putaran. Integrasi komponen ini memungkinkan ESP32 untuk melakukan pengukuran, kontrol, dan tampilan data secara menyeluruh.
2. Nilai efisiensi (η_s) cenderung mengalami penurunan ketika nilai tegangan (V) dan arus (A) menurun. Bukaan katup 45° nilai η_s tertinggi sebesar 7,14 % sedangkan nilai η_s terendah sebesar η_s 5,34 %. Bukaan katup 90° nilai η_s tertinggi sebesar 7,07 % sedangkan nilai η_s terendah sebesar η_s 5,52 %.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Buyung, “Pembangkit listrik tenaga mikrohidro,” *J. Energi Terbarukan*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2013.
- [2] I. G. N. Saputra, L. Jasa, and I. W. A. Wijaya, “Pengaruh jumlah sudu pada prototype PLTMH dengan menggunakan turbin Pelton terhadap efisiensi yang dihasilkan,” *J. Spektrum*, vol. 7, no. 4, pp. 161–167, 2020.
- [3] R. P. Putra, S. Samsurizal, and N. G. Pahiyanti, “Desain sistem kontrol penggerak mula generator magnet permanen PLTMH menggunakan planetary gear,” *J. Kilat*, vol. 7, no. 2, pp. 149–159, 2018, doi: 10.33322/kilat.v7i2.358.
- [4] A. K. Bhatia, *Introduction to Hydro Power Systems*, 2nd ed. New York, NY, USA: Industrial Press, 2019.
- [5] M. A. R. Siddiqui and S. Mekhilef, “Energy efficiency improvement using inverter-based control for renewable systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 131, p. 107003, 2021.
- [6] S. D. Saraswati, *Rancang Bangun Alat Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Menggunakan Turbin Pelton*, Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang, 2022.
- [7] D. Nurfalah, A. Prasetyo, and I. Santoso, “IoT-based monitoring system for microhydro power plant performance,” *Int. J. Eng. Technol. Innov.*, vol. 10, no. 3, pp. 245–253, 2022.
- [8] M. A. Rahman, S. S. Ramli, and H. M. Zainal, “Real-time monitoring of microhydro power system using ESP32 and Blynk platform,” *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 1120–1128, 2022.
- [9] A. Hamsah and P. A. R. Putri, *Rancang Bangun Sistem Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Berbasis Digital*, Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang, 2023.
- [10] International Organization for Standardization, *ISO 50001: Energy Management Systems – Requirements with Guidance for Use*, ISO Standard, 2018.