



Desain Monitoring Turbin Archimedes Berbasis IoT

Shevano E A Gosal¹, Tineke Saroinsong^{2*}, Jedithjah N T Papia³

Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Manado, Manado, Indonesia

Email: shevano190@gmail.com

Abstract

The Archimedes turbine is frequently considered for micro-hydro power generation due to its ability to operate under low-head conditions, its relatively simple construction, and its suitability for canals or small streams. This study aims to design and test an Internet of Things (IoT)-based monitoring system to measure the voltage, current, and output power of an Archimedes turbine generator. The system utilizes an INA219 sensor, an ESP32 microcontroller, a Wi-Fi connection, and the Blynk dashboard. Testing was conducted under two conditions: no-load and with-load. The no-load voltage ranged from 14.5 V to 15.6 V. Upon connecting the load, the voltage ranged from 9.707 V to 10.582 V, the current from 0.228 A to 0.333 A, and the measured power from 2.073 W to 3.511 W. Based on the median values of each range, the application of a load reduced the voltage from 15.050 V to 10.145 V, a decrease of approximately 32.6%. These results demonstrate that the monitoring system is capable of recording changes in the generator's electrical characteristics resulting from loading. However, evaluating turbine efficiency still requires data on flow rate, head, rotational speed, and torque, while power consistency needs to be verified using synchronized voltage and current sampling.

Keywords: Archimedes turbine; Internet of Things; Power monitoring; ESP32; Micro-hydro

Abstrak

Turbin Archimedes banyak dipertimbangkan untuk pembangkit mikrohidro karena dapat bekerja pada kondisi head rendah, memiliki konstruksi yang relatif sederhana, dan sesuai untuk kanal atau aliran kecil. Penelitian ini bertujuan merancang serta menguji sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) untuk membaca tegangan, arus, dan daya keluaran generator turbin Archimedes. Sistem menggunakan sensor INA219, mikrokontroler ESP32, koneksi Wi-Fi, dan dashboard Blynk. Pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu tanpa beban dan dengan beban. Tegangan tanpa beban berada pada rentang 14,5–15,6 V. Setelah beban dihubungkan, tegangan berada pada rentang 9,707–10,582 V, arus 0,228–0,333 A, dan daya terukur 2,073–3,511 W. Berdasarkan nilai tengah masing-masing rentang, pembebanan menurunkan tegangan dari 15,050 V menjadi 10,145 V atau sekitar 32,6%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu merekam perubahan karakteristik listrik generator akibat pembebanan. Namun, evaluasi efisiensi turbin masih memerlukan data debit, head, putaran, dan torsi, sedangkan konsistensi daya perlu diverifikasi menggunakan pencuplikan tegangan dan arus yang sinkron.

Kata kunci: Turbin Archimedes; Internet of Things; Monitoring daya; ESP32; Mikrohidro

1. Pendahuluan

Kebutuhan sistem energi terbarukan skala kecil semakin penting bagi wilayah yang memiliki sumber air lokal tetapi belum tentu sesuai untuk pembangkit hidro berkapasitas besar. Turbin Archimedes menawarkan pendekatan yang relevan untuk konteks tersebut karena

mampu memanfaatkan head rendah dan debit sedang dengan konstruksi mekanik yang sederhana. Dalam konteks Manado dan Sulawesi Utara, potensi mikrohidro menjadi menarik karena karakter wilayah yang memiliki aliran sungai, kanal, dan variasi topografi. Studi kelayakan mikrohidro di Sulawesi Utara

menunjukkan bahwa penilaian ketersediaan air, kebutuhan energi, dan aspek teknis-ekonomi menjadi dasar penting sebelum sistem dikembangkan secara lebih luas (Rumbayan & Rumbayan, 2023).

Pada praktiknya, persoalan utama sistem mikrohidro bukan hanya desain turbin, tetapi juga kemampuan memantau keluaran listrik secara kontinu. Turbin dapat berputar dan menghasilkan tegangan, tetapi informasi tersebut sering tidak terekam secara terstruktur. Pengukuran manual menggunakan multimeter hanya memberikan data sesaat, sehingga fluktuasi akibat perubahan debit, beban, gesekan mekanik, atau gangguan transmisi tidak selalu teridentifikasi. Kondisi ini membatasi kemampuan peneliti untuk menilai performa turbin secara kuantitatif, terutama ketika pengujian berlangsung dalam durasi panjang atau lokasi pengujian sulit diakses.

Internet of Things (IoT) memberikan peluang untuk mengubah pengukuran manual menjadi sistem akuisisi data yang kontinu dan dapat dipantau jarak jauh. Dengan mikrokontroler berkemampuan Wi-Fi, sensor arus-tegangan, dan dashboard cloud, data arus, tegangan, serta daya dapat dikirim secara periodik dan disajikan dalam bentuk grafik. Pada sistem energi terbarukan, monitoring IoT tidak hanya berfungsi sebagai tampilan data, tetapi juga sebagai mekanisme diagnosis dini. Ketika tegangan turun, arus naik berlebihan, atau daya tidak stabil, operator dapat mengambil keputusan lebih cepat sebelum terjadi kerusakan komponen atau penurunan performa yang lebih besar.

Research gap penelitian ini terletak pada integrasi antara turbin Archimedes dan sistem monitoring IoT yang berfokus pada parameter listrik dasar. Literatur turbin Archimedes banyak membahas geometri, sudut kemiringan, jumlah sudu, debit, dan efisiensi mekanik-hidrolik (Dellinger et al., 2019; Shahverdi et al., 2020; Sołowiej & Łapiński, 2025). Di sisi lain, penelitian monitoring IoT energi banyak dikembangkan pada sistem fotovoltaik atau konsumsi listrik rumah tangga, misalnya monitoring tegangan, arus, dan daya berbasis ESP32, Telegram, atau dashboard cloud (Delfianti et al., 2025; Khowarizmi et al., 2025). Kesenjangan yang masih terlihat adalah kurangnya naskah yang merancang dan mengevaluasi sistem monitoring berbiaya rendah khusus untuk turbin Archimedes skala kecil, dengan penekanan pada akurasi pembacaan, pola daya, dan keandalan transmisi data.

Berdasarkan gap tersebut, tujuan penelitian ini adalah merancang dan menguji sistem monitoring turbin Archimedes berbasis IoT untuk memantau tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan generator. Pengujian difokuskan pada perbandingan respons listrik generator dalam kondisi tanpa beban dan dengan beban. Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi perangkat sensor, mikrokontroler, komunikasi Wi-Fi, dan dashboard cloud untuk menyediakan data keluaran listrik yang dapat digunakan sebagai dasar evaluasi awal serta pengembangan pengujian mikrohidro yang lebih lengkap.

2. Tinjauan Pustaka

Turbin Archimedes merupakan mesin konversi energi air yang bekerja dengan memanfaatkan perbedaan ketinggian dan aliran air untuk memutar screw, kemudian putaran tersebut diteruskan ke generator. Dibanding turbin Pelton, Francis, atau Kaplan, turbin Archimedes lebih sesuai untuk lokasi low-head karena dapat bekerja pada head yang relatif rendah dan tidak selalu membutuhkan infrastruktur sipil yang kompleks. Review terbaru menegaskan bahwa turbin ini memiliki keunggulan pada kesederhanaan konstruksi, biaya operasi yang relatif rendah, dan dampak lingkungan yang lebih kecil dibanding beberapa turbin konvensional (Sołowiej & Łapiński, 2025). Analisis komparatif juga menunjukkan bahwa turbin Archimedes potensial untuk mini, mikro, dan pico hydro terutama pada lokasi head sangat rendah (Thakur et al., 2024).

Kinerja turbin Archimedes dipengaruhi oleh beberapa parameter, antara lain sudut kemiringan, panjang screw, jumlah sudu, diameter, debit, beban generator, dan rugi-rugi mekanik. Dellinger et al. (2019) menekankan bahwa slope dan jumlah blade memengaruhi performa Archimedes screw generator. Shahverdi et al. (2020) melakukan optimasi numerik dan menunjukkan pentingnya parameter geometris terhadap efisiensi. Sementara itu, Thakur et al. (2022) melaporkan bahwa variasi sudut kemiringan dan kondisi beban dapat meningkatkan efisiensi turbin pada kondisi eksperimen tertentu. Temuan tersebut menunjukkan bahwa desain mekanik merupakan fondasi kinerja turbin, tetapi evaluasinya tetap membutuhkan data keluaran listrik yang akurat dan kontinu.

Dari perspektif instrumentasi, daya listrik keluaran generator dapat dihitung melalui

persamaan dasar $P = V \times I$, dengan P sebagai daya, V sebagai tegangan, dan I sebagai arus. Untuk sistem DC skala kecil, sensor INA219 sering digunakan karena mampu membaca tegangan bus, arus melalui resistor shunt, dan daya melalui antarmuka I2C. Datasheet INA219 menyebutkan bahwa sensor ini dapat memantau tegangan bus hingga 26 V, melaporkan arus, tegangan, dan daya, serta memiliki akurasi tinggi pada kelas tertentu (Texas Instruments, 2015). Karakter tersebut membuat INA219 sesuai untuk prototipe mikrohidro bertegangan rendah, asalkan rentang arus dan konfigurasi shunt disesuaikan dengan beban aktual.

ESP32 banyak digunakan dalam sistem IoT karena mengintegrasikan Wi-Fi, Bluetooth, prosesor, dan antarmuka komunikasi seperti I2C, UART, SPI, serta ADC dalam satu modul. Datasheet ESP32 menjelaskan bahwa chip ini merupakan kombinasi Wi-Fi dan Bluetooth 2,4 GHz yang dirancang untuk aplikasi dengan kebutuhan RF dan konsumsi daya yang beragam (Espressif Systems, 2025). Pada sistem monitoring turbin, ESP32 berperan sebagai pengolah data sensor, pengirim data ke cloud, sekaligus pengendali interval sampling. Penggunaan ESP32 juga menekan biaya dibanding penggunaan PLC atau data logger industri, meskipun konsekuensinya adalah perlunya validasi terhadap stabilitas komunikasi dan akurasi pembacaan.

Platform cloud seperti ThingSpeak atau Blynk memungkinkan data sensor dikirim, disimpan, divisualisasikan, dan dianalisis secara daring. ThingSpeak, misalnya, menyediakan layanan agregasi, visualisasi, dan analisis live data stream, termasuk dukungan API untuk pengiriman data perangkat (MathWorks, 2026). Dalam penelitian energi terbarukan, dashboard semacam ini penting karena peneliti tidak hanya membutuhkan angka akhir, tetapi juga pola temporal. Tren daya dapat menunjukkan respon sistem terhadap perubahan aliran, sedangkan tren arus dan tegangan dapat membantu mendeteksi penurunan performa generator atau ketidaksesuaian beban.

Secara konseptual, sistem IoT untuk monitoring energi dapat dipahami sebagai kombinasi empat lapisan: lapisan sensor, lapisan edge, lapisan komunikasi, dan lapisan aplikasi. Lapisan sensor mengubah fenomena fisik menjadi data listrik. Lapisan edge melakukan pembacaan, filtrasi sederhana, validasi nilai, dan perhitungan turunan seperti daya. Lapisan komunikasi

mengirim data menggunakan Wi-Fi, MQTT, HTTP, atau protokol lain. Lapisan aplikasi menyimpan dan menampilkan data agar dapat dianalisis oleh pengguna. Dalam rancangan turbin Archimedes, keempat lapisan tersebut harus dirancang secara seimbang. Sensor yang akurat tidak cukup apabila pengiriman data sering gagal; sebaliknya, dashboard yang menarik tidak berguna apabila data input tidak terkalibrasi.

Penelitian terdahulu pada sistem monitoring energi berbasis IoT menunjukkan bahwa pendekatan sensor-mikrokontroler-cloud dapat menghasilkan data dengan galat rendah. Delfianti et al. (2025) melaporkan sistem monitoring daya berbasis ESP32 dan Telegram pada pembangkit surya dengan galat rata-rata sangat kecil untuk tegangan, arus, dan daya. Khowarizmi et al. (2025) juga menunjukkan bahwa integrasi sensor, PLC/IoT, dan dashboard dapat menghasilkan akuisisi data real-time dengan deviasi rendah terhadap alat ukur pembanding. Meskipun objek penelitian mereka bukan turbin Archimedes, prinsip akuisisi parameter listrik dapat diadaptasi untuk sistem mikrohidro.

Dengan membandingkan studi turbin dan studi monitoring IoT, terlihat bahwa dua domain penelitian tersebut sering berkembang secara terpisah. Studi turbin menekankan parameter hidraulik-mekanik, sedangkan studi IoT menekankan akurasi sensor dan akses data jarak jauh. Penelitian ini mencoba menghubungkan keduanya melalui rancangan monitoring yang sederhana namun analitis. Fokusnya bukan mengoptimalkan geometri turbin, melainkan membangun sistem yang mampu merekam keluaran listrik turbin secara kuantitatif sehingga optimasi mekanik pada penelitian lanjutan dapat didasarkan pada data yang lebih lengkap.

Penelitian Saroinsong et al. menunjukkan perkembangan kajian turbin ulir Archimedes tiga sudut yang mencakup aspek hidraulik, kinerja, optimasi, hingga sistem pengendalian. Studi tahun 2015 menganalisis pengaruh tinggi aliran masuk (*head inflow*) dan sudut kemiringan sumbu turbin terhadap efisiensi, yang menegaskan bahwa kondisi aliran dan konfigurasi pemasangan turbin merupakan faktor penting dalam meningkatkan konversi energi. Pada tahun 2016, penelitian dilanjutkan melalui pengamatan fenomena aliran fluida, evaluasi performa turbin, serta analisis pengaruh bilangan Froude terhadap efisiensi turbin ulir tiga sudu. Rangkaian penelitian tersebut memperlihatkan bahwa karakteristik aliran, kecepatan relatif, kedalaman

air, dan kondisi operasi berkaitan erat dengan daya serta efisiensi yang dihasilkan. Selanjutnya, penelitian tahun 2018 menerapkan *Response Surface Methodology* untuk menganalisis dan mengoptimalkan kinerja turbin berdasarkan interaksi beberapa parameter operasional. Perkembangan kajian kemudian mengarah pada aspek otomatisasi melalui penerapan SCADA pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro bertipe turbin ulir, yang mendukung proses pengendalian dan pemantauan sistem secara terintegrasi. Secara keseluruhan, penelitian-penelitian tersebut membentuk landasan yang komprehensif bagi pengembangan turbin ulir Archimedes, mulai dari pemahaman fenomena aliran dan peningkatan efisiensi hingga penerapan teknologi kontrol dan pemantauan pada sistem pembangkit mikrohidro.

3. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimental. Pendekatan tersebut dipilih karena penelitian mengukur parameter numerik berupa tegangan, arus, dan daya keluaran generator. Pengujian dilakukan secara langsung pada prototipe turbin Archimedes dalam dua kondisi, yaitu tanpa beban dan dengan beban. Analisis difokuskan pada rentang nilai minimum–maksimum, nilai tengah rentang, perubahan tegangan akibat pembebanan, dan pemeriksaan konsistensi daya terhadap hubungan $P = V \times I$.

Objek penelitian adalah sistem monitoring keluaran generator DC pada turbin Archimedes skala kecil. Rancangan sistem terdiri atas turbin Archimedes, generator DC, beban listrik pada prototipe, sensor INA219, mikrokontroler ESP32, koneksi Wi-Fi, dan dashboard Blynk. Sensor INA219 membaca tegangan bus, arus, serta daya pada sisi keluaran generator, kemudian ESP32 mengolah dan mengirimkan data ke dashboard agar perubahan nilai dapat dipantau selama pengujian.

Sumber data utama adalah hasil pengukuran langsung selama pengujian. Pada kondisi tanpa beban, parameter yang diamati adalah tegangan generator. Pada kondisi dengan beban, parameter yang diamati meliputi tegangan, arus, dan daya. Data disajikan sebagai nilai minimum dan maksimum yang tercatat selama pengujian karena data mentah per waktu belum dicantumkan dalam naskah. Nilai tengah rentang dihitung hanya sebagai ukuran deskriptif dan tidak diperlakukan sebagai nilai rata-rata statistik. Data rujukan

teknis tetap digunakan untuk menjelaskan karakter sensor, mikrokontroler, dan prinsip kerja turbin Archimedes.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui tahapan berikut. Pertama, rangkaian sensor INA219 dan ESP32 diaktifkan serta koneksi ke dashboard Blynk diperiksa. Kedua, generator diputar oleh turbin dan tegangan diamati pada kondisi tanpa beban. Ketiga, beban dihubungkan pada keluaran generator, kemudian tegangan, arus, dan daya direkam melalui sistem monitoring. Keempat, nilai minimum dan maksimum dari setiap parameter dicatat. Kelima, hasil pengukuran dianalisis untuk mengetahui perubahan tegangan akibat pembebanan serta kesesuaian daya terukur dengan hubungan dasar tegangan dan arus.

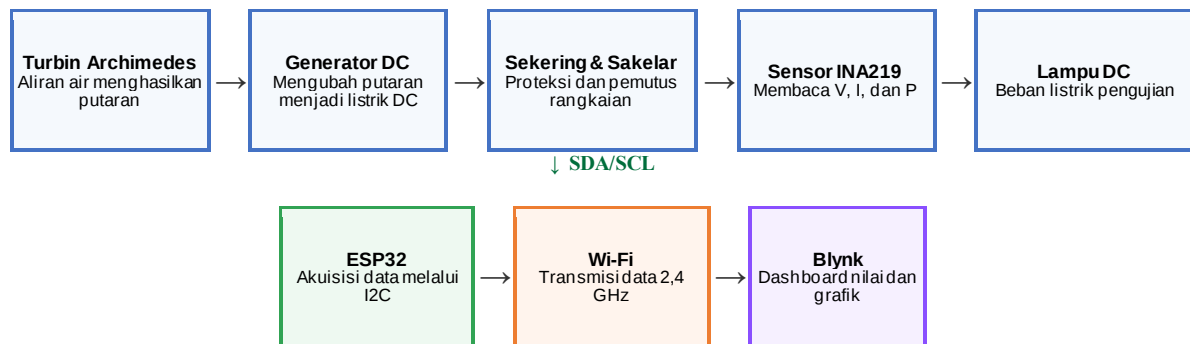
Perancangan perangkat keras mengikuti prinsip modular agar mudah direplikasi. Sensor ditempatkan pada jalur keluaran generator menuju beban sehingga pembacaan mencerminkan kondisi listrik ketika beban dihubungkan. ESP32 ditempatkan dalam kotak pelindung yang terpisah dari area percikan air, sedangkan jalur kabel dibuat sependek mungkin untuk mengurangi gangguan dan penurunan tegangan pada penghantar. Pada implementasi lapangan, panel perlu dilengkapi perlindungan terhadap kelembapan, terminal yang kuat, sekering, dan isolasi kabel yang memadai.

Perangkat lunak dirancang dengan alur kerja berupa inisialisasi Wi-Fi, inisialisasi sensor, pembacaan tegangan dan arus, perhitungan atau pembacaan daya, validasi nilai, serta pengiriman data ke dashboard Blynk. Validasi dasar dilakukan untuk menolak nilai yang tidak masuk akal, misalnya tegangan negatif atau arus yang berada di luar rentang konfigurasi sensor. Karena penelitian ini belum menyajikan data kuantitatif mengenai latensi dan rasio keberhasilan pengiriman, evaluasi komunikasi dibatasi pada keberhasilan sistem menampilkan data selama pengujian.

3.1 Diagram Alur Sistem

Alur metodologi dimulai ketika aliran air memutar turbin Archimedes dan poros turbin meneruskan putaran ke generator DC. Keluaran positif generator melewati sekering dan sakelar, kemudian masuk ke terminal VIN+ sensor INA219. Arus keluar melalui VIN- menuju lampu DC sebagai beban, sedangkan terminal negatif generator dihubungkan ke negatif lampu sebagai titik referensi bersama. INA219 mengukur tegangan bus dan arus secara seri pada jalur

positif. Data pengukuran dikirim ke ESP32 melalui komunikasi I2C, lalu diteruskan melalui Wi-Fi ke Blynk untuk ditampilkan dalam bentuk nilai dan grafik.

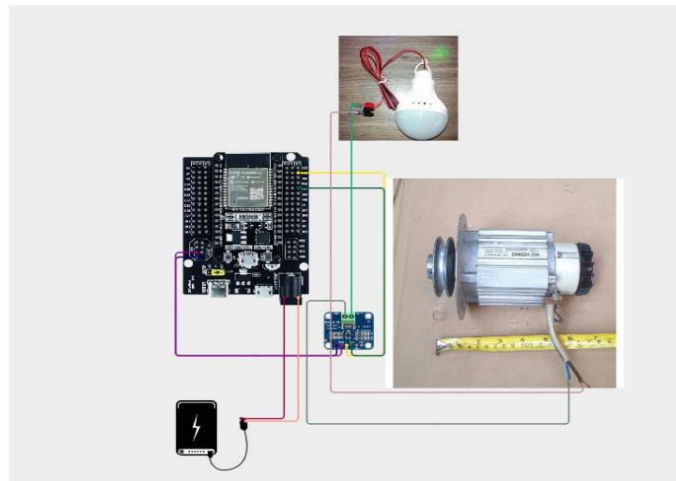


Gambar 1. Daigram Alur Generator Turbin Archimedes Hingga Beban Lampu DC Dan Monitoring IoT

3.2 Desain Perangkat Keras

Desain perangkat keras menggunakan topologi pengukuran high-side agar arus beban dapat dibaca tanpa memutus jalur negatif sistem. Generator DC menjadi sumber energi, INA219 ditempatkan seri pada jalur positif, dan lampu DC berfungsi sebagai beban pengujian. ESP32 memperoleh catu 5 V dari sumber

terpisah atau regulator yang stabil. Ground ESP32 dan INA219 harus terhubung bersama. Sambungan I2C menggunakan SDA pada GPIO 21 dan SCL pada GPIO 22 sebagai konfigurasi umum ESP32; pin dapat diubah melalui firmware bila papan yang digunakan berbeda. Konfigurasi perangkat keras ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Konfigurasi perangkat keras sistem monitoring turbin Archimedes berbasis IoT

Tabel 1. Spesifikasi Perangkat Keras Sistem Monitoring

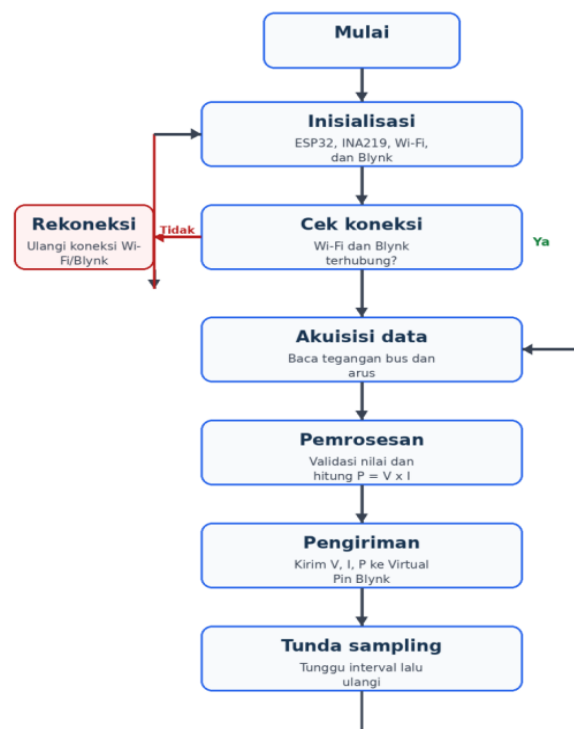
Komponen	Spesifikasi rancangan	Fungsi	Keterangan pemasangan
Turbin Archimedes	Prototipe skala kecil, kondisi low-head	Mengubah energi air menjadi putaran	Poros dikopel ke generator
Generator DC	Tegangan nominal 12–24 V DC	Mengubah putaran menjadi energi listrik	Tegangan aktual pengujian 9,707–15,6 V
Sensor INA219	Bus 0–26 V; antarmuka I2C; catu 3–5,5 V	Mengukur tegangan, arus, dan daya	VIN+ ke generator; VIN– ke beban

Komponen	Spesifikasi rancangan	Fungsi	Keterangan pemasangan
ESP32	Wi-Fi 2,4 GHz; logika 3,3 V; I2C	Akuisisi, pengolahan, dan pengiriman data	SDA GPIO 21; SCL GPIO 22 (konfigurasi umum)
Lampu DC	Lampu 12 V DC; daya disesuaikan kemampuan generator	Beban listrik pengujian	Dipasang setelah INA219
Sekering dan sakelar	Nilai sekering sedikit di atas arus kerja normal	Proteksi dan pemutus rangkaian	Dipasang pada jalur positif generator
Catu ESP32	5 V DC stabil melalui USB/regulator	Menjaga ESP32 dan sensor tetap stabil	Sebaiknya terpisah dari keluaran generator yang berfluktuasi
Kabel/terminal	Penampang sesuai arus; koneksi kuat dan berisolasi	Mengurangi rugi tegangan dan risiko hubung singkat	Gunakan kotak panel tahan percikan

3.3 Desain Perangkat Lunak

Firmware dibuat menggunakan Arduino IDE dengan paket board ESP32. Program menginisialisasi antarmuka I2C dan sensor INA219, menghubungkan ESP32 ke jaringan Wi-Fi serta Blynk, membaca tegangan dan arus secara periodik, memeriksa kewajaran data, menghitung daya menggunakan $P = V \times I$, lalu mengirimkan

tegangan, arus, dan daya ke datastream Blynk. Virtual Pin V0 digunakan untuk tegangan, V1 untuk arus, dan V2 untuk daya. Jika koneksi terputus, program menjalankan prosedur rekoneksi tanpa menghentikan proses pengukuran. Interval pengiriman disarankan 1-2 detik agar dashboard responsif tanpa membebani jaringan.



Gambar 3. Diagram Alur Perangkat Lunak Sistem Monitoring

Tabel 2. Spesifikasi Perangkat Lunak Sistem Monitoring

Perangkat lunak	Spesifikasi/komponen	Fungsi	Konfigurasi utama
Arduino IDE	IDE 2.x atau versi kompatibel	Menulis, memverifikasi, dan mengunggah firmware	Board package ESP32 dipasang melalui Board Manager
Arduino-ESP32 Core	Paket dukungan papan ESP32	Menyediakan API Wi-Fi, I2C, timer, dan serial	Pilih tipe board sesuai modul yang digunakan
Library INA219	Adafruit INA219 atau library kompatibel	Membaca bus voltage, shunt current, dan power	Alamat I2C bawaan umumnya 0x40
Blynk Library	Library Blynk untuk ESP32	Menghubungkan firmware ke Blynk Cloud	Template ID, Device Name, dan Auth Token
Blynk Console/App	Dashboard web dan aplikasi seluler	Visualisasi nilai serta grafik	V0: tegangan; V1: arus; V2: daya
Wi-Fi	Jaringan 2,4 GHz dengan akses internet	Media komunikasi ESP32 ke cloud	SSID dan password disimpan pada firmware secara aman
Serial Monitor	115200 baud (disarankan)	Diagnostik koneksi dan pembacaan sensor	Menampilkan status dan pesan kesalahan

Sebelum pengujian, pembacaan sensor perlu diverifikasi menggunakan alat ukur acuan. Verifikasi tegangan dilakukan dengan multimeter digital, sedangkan arus diperiksa menggunakan amperemeter atau multimeter yang dipasang sesuai prosedur. Verifikasi penting dilakukan pada kondisi tanpa beban dan dengan beban karena tegangan generator dapat turun setelah arus mengalir. Selain itu, pencuplikan tegangan dan arus harus dilakukan pada waktu yang sama agar perhitungan daya $P = V \times I$ tidak menghasilkan selisih akibat data yang berasal dari waktu pengukuran berbeda.

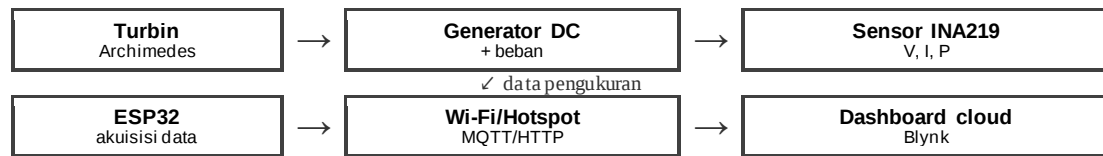
Teknik analisis data meliputi analisis deskriptif, perhitungan nilai tengah rentang, perhitungan penurunan tegangan, dan pemeriksaan konsistensi daya. Nilai tengah rentang dihitung dengan persamaan $(X_{\min} + X_{\max})/2$. Persentase penurunan tegangan dihitung dari selisih nilai tengah tegangan tanpa beban dan dengan beban, kemudian dibagi nilai tengah tegangan tanpa beban dan dikalikan 100%. Daya listrik secara teoritis mengikuti persamaan $P = V \times I$. Karena data yang tersedia berupa rentang dan bukan pasangan data per waktu, perkalian batas minimum dan maksimum hanya digunakan sebagai pemeriksaan awal, bukan sebagai pengganti analisis data sinkron.

Batasan penelitian perlu ditegaskan. Penelitian ini belum menghitung efisiensi total

turbin karena debit, head, putaran, torsi poros, dan rugi-rugi mekanik tidak diukur secara langsung. Data mentah berbasis waktu, jenis serta nilai beban, jumlah pengulangan, ketidakpastian alat ukur, dan parameter komunikasi jaringan juga belum dicantumkan. Oleh karena itu, hasil penelitian dibatasi pada karakteristik keluaran listrik yang teramati dan respons tegangan terhadap pembebanan, bukan pada penilaian efisiensi hidraulik maupun keandalan komunikasi secara menyeluruh.

4. Hasil dan Pembahasan

Rancangan sistem monitoring disusun sebagai rantai akuisisi data dari turbin menuju dashboard. Air menggerakkan turbin Archimedes, turbin memutar generator DC, kemudian keluaran generator masuk ke beban dan sensor. Sensor INA219 membaca tegangan serta arus, sedangkan ESP32 mengambil data melalui I2C, menghitung daya, menambahkan timestamp, dan mengirim data ke cloud. Arsitektur ini ditunjukkan pada Gambar 4. Keunggulan rancangan tersebut adalah seluruh parameter utama keluaran generator dapat dipantau tanpa operator harus berada di dekat turbin. Hal ini relevan untuk lokasi pengujian di kanal, sungai kecil, atau laboratorium terbuka yang aksesnya tidak selalu mudah.

**Gambar 4.** Arsitektur monitoring turbin Archimedes berbasis IoT

Tabel 1 menunjukkan spesifikasi rancangan sistem. Pemilihan sensor INA219 didasarkan pada kebutuhan pengukuran DC bertegangan rendah. Penggunaan ESP32 dipilih karena modul ini telah memiliki Wi-Fi terintegrasi sehingga tidak memerlukan modul komunikasi tambahan. Platform dashboard dapat menggunakan

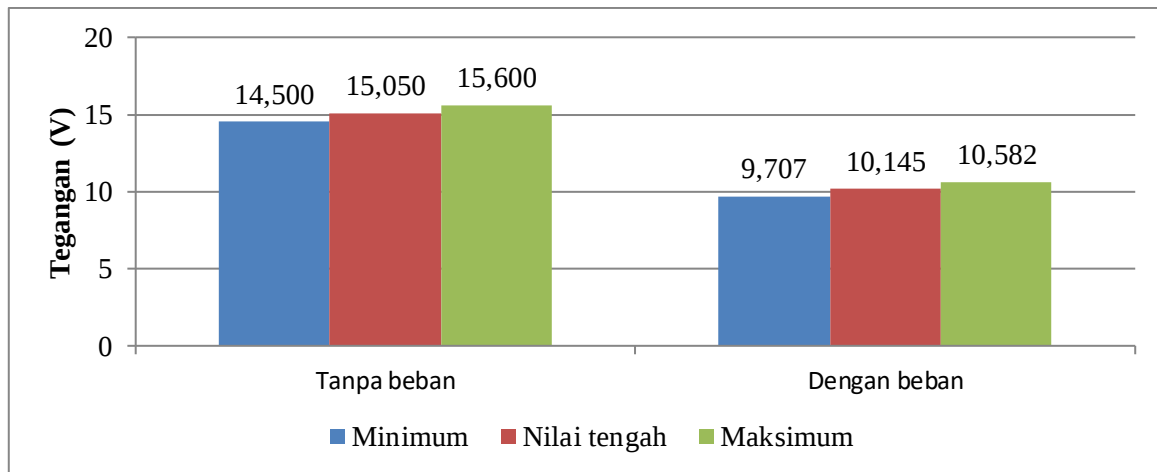
Tabel 3. Spesifikasi Rancangan Sistem Monitoring

Komponen	Spesifikasi/Rancangan	Fungsi
Turbin	Archimedes screw skala kecil, low-head	Mengubah energi aliran menjadi putaran
Generator	Generator DC 12–24 V	Menghasilkan tegangan dan arus DC
Sensor	INA219, antarmuka I2C	Membaca tegangan, arus, dan daya
Mikrokontroler	ESP32 Wi-Fi	Akuisisi, pemrosesan, dan pengiriman data
Platform	Blynk	Dashboard, grafik, dan penyimpanan data
Interval sampling	Pencuplikan periodik sesuai konfigurasi firmware	Merekam perubahan nilai selama pengujian
Parameter utama	V tanpa beban; V, I, dan P dengan beban	Evaluasi respons generator terhadap pembebanan

Hasil pengujian memperlihatkan perbedaan yang jelas antara kondisi tanpa beban dan dengan beban. Pada kondisi tanpa beban, tegangan generator berada pada rentang 14,5–15,6 V. Setelah beban dihubungkan, tegangan turun menjadi 9,707–10,582 V, sedangkan arus berada pada rentang 0,228–0,333 A dan daya terukur berada pada rentang 2,073–3,511 W. Penurunan tegangan tersebut menunjukkan bahwa nilai tegangan tanpa beban tidak dapat digunakan sendirian untuk menilai kemampuan generator menyuplai daya.

ThingSpeak atau Blynk karena keduanya mendukung visualisasi data real-time. Pada implementasi fisik, pemilihan platform perlu disesuaikan dengan kebutuhan penyimpanan data, interval update, kemudahan ekspor, dan kestabilan jaringan di lokasi pengujian.

Grafik 1 membandingkan rentang tegangan generator dalam dua kondisi pengujian. Nilai tengah rentang tegangan tanpa beban adalah 15,050 V, sedangkan nilai tengah rentang tegangan dengan beban adalah 10,145 V. Dengan demikian, pembebanan menyebabkan penurunan nilai tengah tegangan sekitar 4,905 V. Penurunan ini dapat dipengaruhi oleh resistansi internal generator, rugi-rugi pada kabel dan sambungan, perubahan putaran turbin ketika menerima torsi lawan dari generator, serta ketidaksesuaian antara karakteristik generator dan beban.



Grafik 1. Rentang Tegangan Generator Pada Kondisi Tanpa Beban Dan Dengan Beban

Tabel 2 merangkum seluruh data utama yang diberikan. Kolom nilai tengah merupakan titik tengah antara nilai minimum dan maksimum, bukan rata-rata dari serangkaian pengamatan. Tegangan tanpa beban memiliki nilai tengah 15,050 V, sedangkan tegangan dengan beban

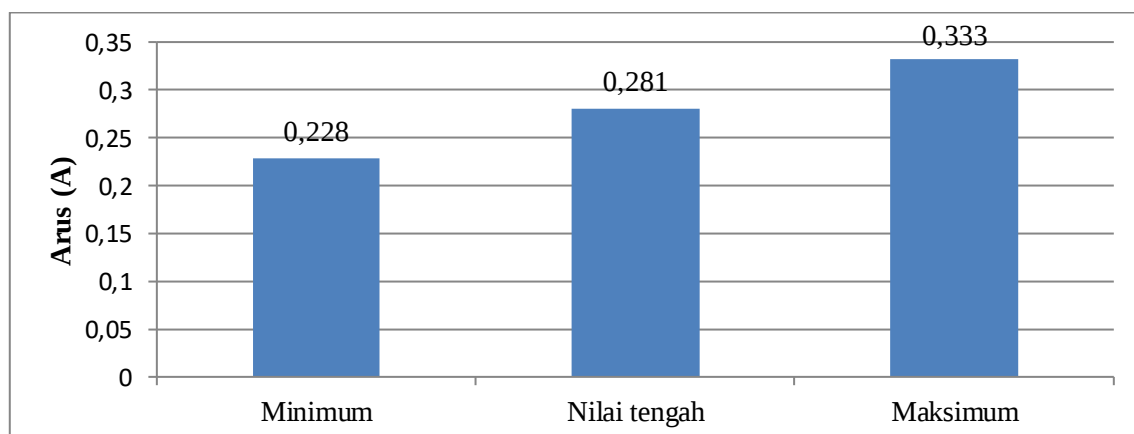
memiliki nilai tengah 10,145 V. Arus dan daya hanya dilaporkan pada kondisi dengan beban karena pada kondisi tanpa beban tidak terdapat jalur arus beban yang relevan untuk evaluasi keluaran daya.

Tabel 4. Ringkasan Hasil Pengujian Tanpa Beban Dan Dengan Beban

Parameter	Minimum	Maksimum	Nilai tengah rentang
Tegangan tanpa beban (V)	14,500	15,600	15,050
Tegangan dengan beban (V)	9,707	10,582	10,145
Arus dengan beban (A)	0,228	0,333	0,281
Daya terukur dengan beban (W)	2,073	3,511	2,792

Grafik 2 menunjukkan bahwa arus pada kondisi dengan beban berada pada rentang 0,228–0,333 A, dengan nilai tengah rentang 0,281 A. Variasi arus sebesar 0,105 A menunjukkan bahwa keluaran generator tidak sepenuhnya konstan selama pengujian. Perubahan tersebut dapat

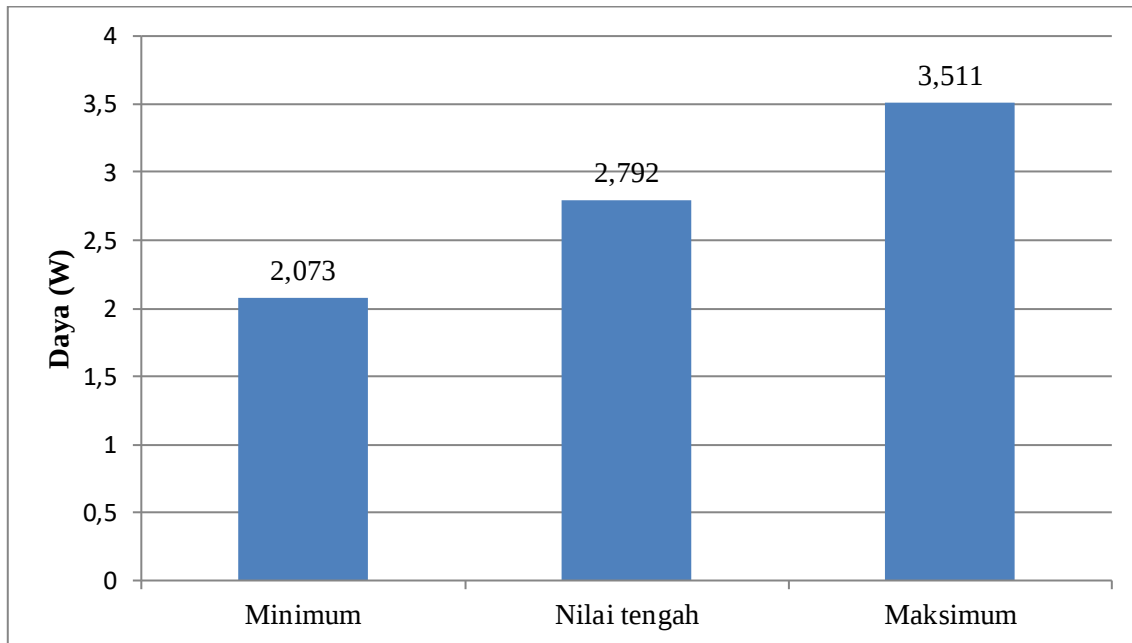
berasal dari fluktuasi kecepatan putar turbin, perubahan aliran air, kestabilan beban, kualitas sambungan listrik, atau resolusi pembacaan sensor. Tanpa data per waktu, sumber dominan variasi belum dapat ditentukan secara pasti.



Grafik 2. Rentang Arus Pada Pengujian Dengan Beban

Grafik 3 memperlihatkan daya terukur pada kondisi dengan beban sebesar 2,073–3,511 W, dengan nilai tengah rentang 2,792 W. Secara teoritis, jika batas tegangan dan arus dikalikan secara independen, diperoleh batas awal sekitar 2,213–3,524 W. Nilai maksimum daya terukur mendekati batas teoritis tersebut, tetapi nilai minimum daya terukur lebih rendah sekitar 0,140

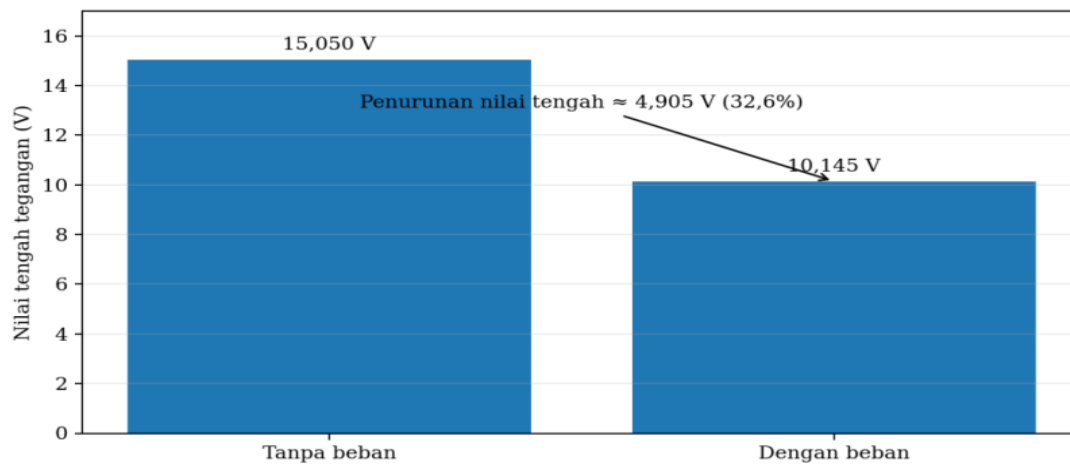
W dari hasil perkalian batas minimum. Perbedaan ini tidak otomatis menunjukkan kesalahan alat karena nilai minimum tegangan, arus, dan daya mungkin tidak terjadi pada waktu yang sama. Namun, data mentah bertimestamp tetap diperlukan untuk memastikan konsistensi perhitungan.



Grafik 3. Rentang Daya Pada Pengujian Dengan Beban

Hasil pengujian menegaskan pentingnya pengukuran pada kondisi berbeban. Tegangan tanpa beban hanya menunjukkan gaya gerak listrik generator ketika arus yang ditarik sangat kecil, sedangkan tegangan berbeban menunjukkan kemampuan sistem mempertahankan tegangan ketika energi benar-benar disalurkan. Dalam sistem monitoring berbasis INA219, akurasi arus sangat dipengaruhi oleh konfigurasi resistor shunt, kualitas koneksi, dan kalibrasi. Karena itu, validasi sensor pada beberapa titik beban lebih relevan daripada hanya membandingkan satu nilai pengukuran.

Grafik 4 memperlihatkan perbandingan nilai tengah tegangan. Penurunan dari 15,050 V menjadi 10,145 V setara dengan sekitar 32,6%. Besarnya penurunan ini merupakan temuan teknis utama karena menunjukkan bahwa pembebanan memberikan pengaruh kuat terhadap kondisi kerja generator. Akan tetapi, persentase tersebut merupakan perbandingan nilai tengah dua rentang, bukan hasil pasangan pengukuran yang identik. Untuk analisis yang lebih kuat, tegangan tanpa beban dan berbeban perlu diukur pada putaran atau debit yang sama serta dilakukan berulang kali.



Grafik 4. Perbandingan Nilai Tengah Tegangan Akibat Pembebanan

Dari perspektif mekatronika, integrasi sensor, mikrokontroler, komunikasi, dan dashboard meningkatkan fungsi turbin Archimedes dari perangkat mekanik menjadi platform eksperimen berbasis data. Sistem mampu memperlihatkan bahwa perubahan kondisi listrik tidak cukup dinilai dari tegangan tanpa beban. Data tegangan, arus, dan daya pada saat beban terhubung memberikan informasi yang lebih relevan mengenai kemampuan generator memasok energi pada kondisi operasi nyata.

Sistem monitoring berhasil menampilkan parameter listrik melalui dashboard selama pengujian, tetapi naskah ini belum memiliki data jumlah paket terkirim, paket gagal, latensi, atau durasi pemutusan jaringan. Oleh karena itu, klaim mengenai keandalan transmisi tidak dihitung secara kuantitatif. Pada penelitian lanjutan, setiap data perlu dilengkapi timestamp, status pengiriman, dan penyimpanan lokal agar kehilangan data dapat dibedakan dari perubahan fisik keluaran generator.

Tabel 5. Analisis Deskriptif Dan Pemeriksaan Konsistensi Data

Indikator	Dasar perhitungan	Hasil	Satuan	Jenis	Interpretasi
Rentang tegangan tanpa beban	15,600 – 14,500	1,100	V	Turunan	Variasi tegangan saat beban belum terhubung
Rentang tegangan dengan beban	10,582 – 9,707	0,875	V	Turunan	Variasi tegangan selama beban terhubung
Penurunan nilai tengah tegangan	15,050 – 10,145	4,905	V	Turunan	Tegangan menurun setelah pembebanan
Persentase penurunan tegangan	$4,905 / 15,050 \times 100$	32,6	%	Turunan	Perbandingan nilai tengah kedua rentang
Rentang arus dengan beban	0,333 – 0,228	0,105	A	Turunan	Arus berubah selama pengujian berbeban
Rentang daya dengan beban	3,511 – 2,073	1,438	W	Turunan	Daya terukur tidak konstan
Batas awal daya dari $V \times I$	$9,707 \times 0,228$ hingga $10,582 \times 0,333$	2,213–3,524	W	Pemeriksaan	Bukan pengganti pasangan data sinkron
Selisih pada batas minimum daya	$2,213 - 2,073$	0,140	W	Pemeriksaan	Perlu verifikasi dengan data bertimestamp

Secara teknis, rancangan ini memberikan tiga kontribusi. Pertama, sistem menyediakan metode sederhana untuk membandingkan kondisi generator tanpa beban dan dengan beban. Kedua, sistem menghasilkan parameter listrik yang langsung relevan, yaitu tegangan, arus, dan daya. Ketiga, hasil pengukuran memperlihatkan perlunya menguji generator pada kondisi operasi aktual, sebab tegangan tanpa beban yang relatif tinggi turun secara nyata ketika beban dihubungkan.

Aspek biaya juga menjadi pertimbangan. Rancangan berbasis ESP32 dan INA219 relatif murah dibandingkan data logger industri sehingga sesuai untuk prototipe dan penelitian mahasiswa. Walaupun demikian, pemilihan sensor harus memperhatikan rentang tegangan, arus, dan resistor shunt. Rangkaian juga perlu dilengkapi sekering, terminal yang kuat, isolasi kabel, dan perlindungan dari air. Biaya rendah tidak dapat dijadikan alasan untuk mengabaikan keselamatan maupun kualitas data pada prototipe.

Temuan utama penelitian adalah bahwa monitoring IoT perlu diposisikan sebagai instrumen pengukuran, bukan sekadar tampilan dashboard. Data yang ditampilkan harus dapat ditelusuri berdasarkan waktu, kondisi beban, putaran, dan kondisi aliran. Tanpa informasi tersebut, rentang nilai hanya dapat digunakan untuk analisis deskriptif dan belum cukup untuk menjelaskan hubungan sebab-akibat maupun menentukan titik operasi optimum turbin.

Implikasi praktis penelitian ini adalah sistem dapat digunakan untuk pembelajaran dan validasi awal pembangkit mikrohidro. Dalam laboratorium teknologi rekayasa mekatronika, prototipe menggabungkan aspek mekanik, elektrik, instrumentasi, pemrograman, dan komunikasi data. Mahasiswa dapat mengamati secara langsung bahwa pemasangan beban mengubah tegangan, menimbulkan arus, dan menghasilkan daya, sekaligus mempelajari pentingnya pencuplikan data yang sinkron.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, data yang disajikan masih berupa rentang minimum dan maksimum sehingga pola waktu, variasi antarulangan, dan simpangan baku belum dapat dihitung. Kedua, jenis dan nilai beban belum dijelaskan sehingga resistansi ekuivalen serta kesesuaian beban tidak dapat dianalisis. Ketiga, debit, head, rpm, dan torsi tidak diukur sehingga efisiensi turbin belum dapat dihitung. Keempat, performa jaringan dan

akurasi terhadap alat acuan belum dilaporkan secara kuantitatif.

Untuk penelitian lanjutan, sistem perlu dilengkapi sensor rpm, debit, ketinggian air, temperatur generator, dan penyimpanan lokal. Pengujian sebaiknya menggunakan beberapa variasi beban yang nilainya diketahui, dilakukan pada debit yang dikendalikan, serta diulang sedikitnya pada beberapa siklus pengukuran. Data tegangan, arus, dan daya harus direkam secara sinkron dengan timestamp agar hubungan $P = V \times I$ dapat diperiksa pada setiap titik pengamatan. Dengan data tersebut, analisis dapat diperluas menuju kurva karakteristik generator, penentuan beban optimum, dan perhitungan efisiensi sistem.

5. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan menguji sistem monitoring turbin Archimedes berbasis IoT untuk memantau parameter listrik keluaran generator. Sistem menggunakan sensor INA219, ESP32, koneksi Wi-Fi, dan dashboard Blynk. Pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban dan dengan beban sehingga respons generator terhadap pembebanan dapat dibandingkan secara langsung.

Hasil utama menunjukkan tegangan tanpa beban sebesar 14,5–15,6 V. Pada kondisi dengan beban, tegangan turun menjadi 9,707–10,582 V, arus berada pada rentang 0,228–0,333 A, dan daya terukur sebesar 2,073–3,511 W. Berdasarkan nilai tengah rentang, pembebanan menurunkan tegangan sekitar 4,905 V atau 32,6%. Hasil tersebut menegaskan bahwa penilaian performa generator harus didasarkan pada pengujian berbeban, bukan hanya pada tegangan tanpa beban.

Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi monitoring listrik berbasis IoT dengan pengujian turbin Archimedes skala kecil. Sistem dapat digunakan sebagai instrumen evaluasi awal, tetapi kesimpulan mengenai efisiensi, akurasi, dan keandalan komunikasi belum dapat dibuat tanpa data tambahan. Penelitian berikutnya perlu menyertakan data mentah bertimestamp, spesifikasi beban, pengulangan pengujian, perbandingan dengan alat acuan, serta pengukuran debit, head, rpm, dan torsi.

Referensi

Delfianti, R., Prasetyo, Y., & Rahmawati, D. (2025). Internet of Things (IoT) based electrical power monitoring system for solar power plants using the Telegram

- application. *Vokasi UNESA Bulletin of Engineering, Technology and Applied Science*.
- Dellinger, G., Garambois, P. A., Dellinger, N., Dufresne, M., Terfous, A., & Vazquez, J. (2019). Effect of slope and number of blades on Archimedes screw generator power output. *Renewable Energy*, 136, 896–908.
- Espressif Systems. (2025). ESP32 series datasheet: 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth + Bluetooth LE SoC. Espressif Systems.
- González-González, F., Blanco-Marigorta, A. M., & Pérez-Díaz, J. I. (2024). An experimental investigation of various control systems for a micro-hydropower plant using an Archimedes screw turbine. *Applied Sciences*, 14(2), 512.
- Khowarizmi, M. H., Purnama, A., & Sari, R. (2025). Real-time monitoring system for solar power plants using PLC and Internet of Things. *ELKOMIKA*.
- MathWorks. (2026). ThingSpeak: IoT analytics platform. MathWorks.
- Pambudi, N. A., Firdaus, R. A., Ulfa, D. K., & Sukatiman. (2023). Renewable energy in Indonesia: Current status, potential, and future development. *Sustainability*, 15(3), 2342.
- Piper, A. T., Rosewarne, P. J., Wright, R. M., & Kemp, P. S. (2018). The impact of an Archimedes screw hydropower turbine on fish migration and behaviour. *Ecological Engineering*, 118, 31–42.
- Rumbayan, M., & Rumbayan, R. (2023). Feasibility study of a micro hydro power plant for rural electrification in Lalumpe Village, North Sulawesi, Indonesia. *Sustainability*, 15(19), 14285.
- Shahverdi, K., Maestre, J. M., & Katopodis, C. (2020). Numerical optimization study of Archimedes screw turbine (AST): A case study. *Renewable Energy*, 145, 2130–2143.
- Sołowiej, P., & Łapiński, K. (2025). Recent progress in research on the design and use of an Archimedes screw turbine: A review. *Sustainability*, 17(1), 201.
- Texas Instruments. (2015). INA219 zero-drift, bidirectional current/power monitor with I2C interface (Rev. G). Texas Instruments.
- Thakur, N. K., Bisht, M. S., & Kumar, A. (2022). Efficiency enhancement in Archimedes screw turbine by varying different input parameters: An experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1779–1785.
- Thakur, R., Kumar, A., & Singh, P. (2024). Potential of the Archimedes screw to generate sustainable green energy for mini, micro, and pico hydro turbine power stations: An extensive analysis. *Results in Engineering*.
- Wibowo, L., Setiawan, A., & Nugroho, B. (2024). IoT-based high-accuracy monitoring system for on-grid photovoltaic power plants. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*.
- Saroinsong Tineke, at al.(2015) *The Effect of Head Inflow and Turbine Axis Angle Towards The Three Row Bladed Screw Turbine Efficiency*. *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol.10, no 7, pp 16977-16984. RIP, India
- Saroinsong Tineke, at al (2016). *Fluid Flow Phenomenon in a Three-Bladed Power Generating Archimedes Screw Turbine*. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. Vol.9, no 2, pp. 72-79. Kavala Institute of Technology, Greece (Yunani)
- Saroinsong Tineke, at al (2016). *Performance of Three-Bladed Archimedes Screw Turbine*. *ARPJ journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol.11, No 15, pp 9491-9495. ARPJ Journals, Pakistan
- Saroinsong Tineke, at al (2016). *Effect of Froude Numbers On Three-Bladed Archimedes Screw Turbine Efficiency*. *International Journal of Renewable Energy Research*. Vol.6, No 3, pp 1153-1158. Gazi University, Turkey.
- Saroinsong Tineke, at al (2018). *Performance Of Three-Bladed Archimedes Screw Turbine Using Responase Surface Methodology* (2018), IEEE Xplore.
- Saroinsong Tineke, at al (2025). *Scada Implementation In Microhydro Power Plant Control And Monitoring Systems Of Screw Turbine Type*. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*ISSN: 18196608Volume: 19Issue: 6Pages: 332 – 336. ArticleOpen Access2024EID: 2-s2.0-85195300743. DOI: 10.59018/032449