

Perancangan Sistem Monitoring Tegangan, Arus Dan Frekuensi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Berbasis IoT

Yohanes P Simanjuntak^{1*}, Beni Satria², Amani Darma Tarigan³

¹Teknik Elektro, Fakultas, Universitas Pembangunan Panca Budi

*Penulis Korespondensi: yohanesps17@gmail.com, beni.satria@fastek.panca budi.ac.id

Abstract

Hydropower plants (PLTA) remain the largest contributor to renewable energy generation capacity in Indonesia. As of October 2025, renewable energy generation capacity was recorded at 15,446.85 MW, with hydro contributing 6,539.17 MW and micro-hydro contributing 976.18 MW. Many micro-hydro locations operate in areas with limited access, so routine generator output checks are still often carried out through periodic visits to the location. Field observations reported in previous studies show that output conditions can fluctuate widely when there are load changes, including voltages from 160 V to 235 V and frequencies from 44 Hz to 51 Hz, which can potentially affect service quality and equipment operation. This study designed and implemented an Internet of Things (IoT)-based monitoring system to measure and report generator output voltage, load current, and frequency in real-time. The prototype integrates an ESP32 microcontroller, an AC energy measurement module, a local LCD display, and a cloud dashboard for remote visualization and time-stamped logging. The polling and transmission processes in the firmware are configured with a 5-second sampling interval to capture the dynamics caused by load changes while maintaining stable data delivery. Performance evaluation includes calibration against reference instruments, measurement of data update latency from acquisition to display on the dashboard, and tracking of transmission reliability through upload outcomes. The results of the study demonstrate a practical monitoring architecture, improve data availability for operators, and support operational decision-making without relying on frequent site visits.

Keywords: Micro-hydro power plant, IoT monitoring, ESP32, PZEM-004T v3, voltage monitoring.

Abstrak

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) masih menjadi kontributor terbesar terhadap kapasitas pembangkitan energi terbarukan di Indonesia. Hingga Oktober 2025, kapasitas pembangkit energi terbarukan tercatat sebesar 15.446,85 MW, dengan kontribusi hidro 6.539,17 MW dan mikrohidro 976,18 MW. Banyak lokasi mikrohidro beroperasi di wilayah dengan akses terbatas, sehingga pemeriksaan rutin keluaran generator masih sering dilakukan melalui kunjungan berkala ke lokasi. Observasi lapangan yang dilaporkan pada penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kondisi keluaran dapat berfluktuasi lebar saat terjadi perubahan beban, termasuk tegangan 160 V hingga 235 V dan frekuensi 44 Hz hingga 51 Hz, yang berpotensi memengaruhi kualitas layanan dan operasi peralatan. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) untuk mengukur dan melaporkan tegangan keluaran generator, arus beban, dan frekuensi secara real-time. Prototipe mengintegrasikan mikrokontroler ESP32, modul pengukuran energi AC, tampilan LCD lokal, serta dasbor cloud untuk visualisasi jarak jauh dan pencatatan berstempel waktu. Proses polling dan transmisi pada firmware dikonfigurasi dengan interval sampling 5 detik untuk menangkap dinamika akibat perubahan beban sekaligus menjaga pengiriman data tetap stabil. Evaluasi kinerja mencakup kalibrasi terhadap instrumen referensi, pengukuran latensi pembaruan data dari akuisisi hingga tampil pada dasbor, serta pelacakan keandalan transmisi melalui catatan keberhasilan unggah (upload outcomes). Hasil penelitian menunjukkan arsitektur pemantauan yang praktis, meningkatkan ketersediaan data bagi operator, dan mendukung pengambilan keputusan operasional tanpa bergantung pada kunjungan lokasi yang sering.

Kata kunci: Pembangkit listrik mikrohidro, pemantauan IoT, ESP32, PZEM-004T v3, pemantauan tegangan.



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

1. LATAR BELAKANG

Pemanfaatan energi baru dan terbarukan di Indonesia menunjukkan peningkatan kapasitas terpasang seiring waktu, dengan kontribusi terbesar masih berasal dari pembangkit listrik tenaga air. Data dari Direktorat Jenderal EBTKE mencatat kapasitas pembangkit listrik EBT sebesar 15.446,85 MW per Oktober 2025, dengan komposisi 6.539,17 MW dari pembangkit listrik tenaga air, 976,18 MW dari pembangkit listrik tenaga air mikro, dan 51,07 MW dari pembangkit listrik tenaga air mini. Angka ini menunjukkan bahwa sumber daya air tetap menjadi tulang punggung EBT di sisi pembangkitan, termasuk pada skala kecil yang relevan untuk elektrifikasi dan layanan energi di daerah terpencil [1]. Di sisi penambahan kapasitas, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral melaporkan penambahan kapasitas terpasang sebesar 217,73 MW EBT pada paruh pertama 2024, dengan pertumbuhan didominasi oleh pembangkit listrik tenaga air dan surya [2]. Kondisi ini menunjukkan bahwa masih ada ruang untuk pengembangan, terutama untuk pembangkit listrik tenaga air skala kecil yang dekat dengan pusat beban komunitas dan tidak memerlukan infrastruktur transmisi yang panjang.

Pembangkit listrik mikrohidro dikategorikan sebagai pembangkit listrik skala kecil, dengan output umumnya di bawah 200 kW, dan cocok untuk digunakan di daerah berbukit atau pegunungan dengan aliran air yang memadai dan perbedaan ketinggian. Dalam konfigurasi operasionalnya, energi potensial air diubah menjadi energi mekanik melalui turbin, kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Meskipun potensi tenaga air nasional dilaporkan besar, tingkat pemanfaatannya belum sebanding dengan potensi teknis yang tersedia. Penelitian oleh TESLA melaporkan potensi tenaga air Indonesia sekitar 75.000 MW, sementara tingkat pemanfaatan yang disebutkan dalam penelitian tersebut masih 10,1% atau sekitar 7.500 MW [3]. Dalam konteks mikrohidro, pemanfaatan potensi tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan sumber daya, tetapi juga oleh keandalan operasi harian, kualitas daya di sisi keluaran generator, dan kemudahan pemeliharaan di lokasi yang seringkali sulit diakses.

Dalam praktik lapangan, pemantauan parameter output dasar seperti tegangan, arus, dan frekuensi masih sering dilakukan secara periodik melalui pemeriksaan langsung di lokasi. Pendekatan ini memiliki implikasi waktu dan biaya karena teknisi perlu mengunjungi pembangkit listrik, terutama di daerah dengan akses terbatas. Selain itu, perubahan kondisi beban dan aliran air dapat mempengaruhi stabilitas operasi generator, sehingga fluktuasi tegangan dan frekuensi berpotensi mempengaruhi peralatan pengguna. Penelitian TESLA juga



menekankan kebutuhan pemantauan berkala akibat kerugian daya dan faktor waktu, serta menyatakan bahwa praktik konvensional masih didominasi oleh pemeriksaan manual di lokasi [3]. Dalam penelitian lain oleh Semesta Teknik, dilaporkan bahwa pengelolaan dan pengendalian aliran masuk turbin masih dilakukan secara manual, sementara proses pemantauan diarahkan agar dapat dilakukan dari mana saja melalui perangkat mobile [4].

Berdasarkan kebutuhan operasional pembangkit listrik mikrohidro dan temuan penelitian sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan tegangan, arus, dan frekuensi berbasis IoT untuk pembangkit listrik mikrohidro. Fokus utama penelitian ini meliputi desain perangkat keras dan perangkat lunak untuk pengambilan data parameter listrik, transmisi data melalui internet, dan penyajian informasi secara real-time pada antarmuka lokal seperti LCD dan saluran pemantauan jarak jauh. Penelitian ini juga mengevaluasi efektivitas sistem yang dikembangkan dibandingkan dengan kebutuhan pemantauan konvensional, dengan menilai aspek fungsional dasar seperti akurasi pengukuran, kemudahan akses, dan kecepatan respons informasi untuk mendukung manajemen operasional pembangkit listrik mikrohidro.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1. Karakteristik operasi pembangkit mikrohidro dan kebutuhan pemantauan listrik

Pembangkit mikrohidro, yang umumnya disebut PLTMH di Indonesia, didefinisikan sebagai sistem pembangkit listrik tenaga air skala kecil dengan kapasitas terpasang di bawah 200 kW. Pembangkit ini mengubah ketinggian air dan aliran air menjadi torsi mekanik pada poros turbin, yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Dalam operasi praktis, perubahan beban konsumen dapat mengubah kecepatan putaran generator dan menyebabkan penyimpangan pada tegangan terminal dan frekuensi. Dalam penelitian lapangan di PLTMH Soko Kembang, tegangan keluaran yang diukur bervariasi antara 160 V dan 235 V, sementara frekuensi bervariasi antara 44 Hz dan 51 Hz saat beban berubah, menunjukkan bahwa ketidakstabilan tegangan dan frekuensi dapat signifikan dalam operasi nyata dan harus dipantau secara terus-menerus untuk pengambilan keputusan operasional dan perlindungan peralatan.

2.1. Pemantauan berbasis IoT untuk parameter listrik PLTMH.

Penelitian di Indonesia terbaru telah menerapkan pemantauan berbasis IoT untuk mengurangi kebutuhan inspeksi di lokasi dan menyediakan data berstempel waktu untuk evaluasi operasional. Zaini dkk. mengembangkan sistem pemantauan IoT untuk mikrohidro yang mengukur tegangan, arus, dan frekuensi menggunakan modul sensor ESP32 dan PZEM-004T v3, lalu mempublikasikan data ke dasbor web dan layanan pesan untuk akses jarak jauh. Kesalahan pengukuran rata-rata yang dilaporkan adalah 0,8% untuk tegangan, 4,18% untuk arus, dan 1,08% untuk frekuensi, dengan interval pembaruan dashboard sekitar 5 detik. Penelitian tersebut juga melaporkan waktu respons relay rata-rata 3,5 detik untuk pemutusan



beban menggunakan SSR, menyoroti adanya latensi komunikasi dan aktuasion yang harus dipertimbangkan saat merancang ambang batas perlindungan dan logika respons.

2.2. Integrasi penginderaan sisi hidraulik dan pengendalian aktuator

Selain sensor listrik, beberapa penelitian mengintegrasikan variabel hidraulik dan pengendalian inlet untuk mendukung pembangkitan yang stabil. Syahputra dkk. mengimplementasikan prototipe yang mengukur aliran air dan tegangan generator, serta menyediakan pemantauan dan pengendalian berbasis smartphone melalui Blynk, termasuk aktuator servo untuk mengatur aliran masuk air. Prototipe mereka menggunakan Wemos D1 mini, sensor aliran air, dan sensor tegangan, serta dilengkapi dengan tahap penurun tegangan yang mengubah sekitar 12 V menjadi 5 V untuk pengisian dan pasokan daya hilir. Hasil uji coba yang dilaporkan mencakup tegangan maksimum 11,750 V tanpa tahap penurun tegangan dan 5,642 V dengan tahap penurun tegangan pada 0,34145 L/menit, serta peningkatan pengisian baterai sekitar 0,015 V per 2 menit dengan waktu pengisian penuh diperkirakan 626,67 menit. Pendekatan ini menunjukkan bagaimana pemantauan IoT dapat dipadukan dengan aktuator sederhana untuk menyesuaikan kondisi inlet, meskipun tidak menargetkan pengukuran frekuensi AC.

2.3. Pengalihan jarak jauh, manajemen beban, dan penanganan data end-to-end.

Pengalihan jarak jauh dan manajemen beban sering dibahas sebagai bagian dari implementasi IoT praktis untuk sistem tenaga listrik, termasuk situs mikrohidro. Amir dkk. mendemonstrasikan desain pemantauan dan pengendalian berbasis IoT untuk beban satu fasa, menggunakan Arduino Nano dengan sensor arus ZMCT103C dan transformator penurun tegangan untuk pengukuran tegangan, dan melaporkan bahwa kesalahan pengukuran rata-rata tidak lebih dari 5%. Meskipun konteks aplikasinya bukan mikrohidro, konsep penginderaan dan pemutusan jarak jauh sesuai dengan kebutuhan operasional mikrohidro di mana operator mungkin perlu mematikan beban saat tegangan atau frekuensi melebihi batas yang diizinkan.

Pada tingkat sistem, Hendrawati dkk. memaparkan desain pengendalian dan pemantauan IoT yang mengumpulkan data arus menggunakan sensor ACS712, memprosesnya dengan Arduino Mega 2560, menyimpan hasilnya dalam basis data MySQL melalui Ethernet Shield, dan menampilkan informasi melalui antarmuka Android. Ini menggambarkan arsitektur end-to-end dari pemantauan hingga penyimpanan basis data dan visualisasi mobile, yang relevan untuk sistem pemantauan mikrohidro yang memerlukan pencatatan historis, kontrol akses pengguna, dan penyimpanan data terstruktur.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Desain dan Alur Kerja Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan prototyping dan evaluasi. Pekerjaan dimulai dengan definisi persyaratan berdasarkan kondisi operasi mikrohidro yang dilaporkan dalam pengamatan lapangan, termasuk variasi output yang signifikan seperti 160 V hingga 235 V untuk tegangan dan 44 Hz hingga 51 Hz untuk frekuensi saat terjadi perubahan beban. Tahap berikutnya adalah perakitan hardware untuk sensor, pemrosesan, dan tampilan lokal, diikuti dengan pengembangan firmware dan integrasi cloud agar data yang diukur dapat dikirimkan dan ditampilkan secara remote. Setelah prototipe berfungsi, kalibrasi dan pengujian akurasi



dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor dengan instrumen referensi pada beberapa titik operasi. Tahap akhir mengevaluasi kinerja sistem dalam hal latensi pembaruan data, tingkat keberhasilan transmisi, dan aksesibilitas praktis bagi operator remote selama perubahan beban secara bertahap.

3.1. Persyaratan sistem dan parameter yang diukur

Sistem pemantauan dirancang untuk mengumpulkan tiga parameter listrik dari output generator mikrohidro secara real-time, yaitu tegangan RMS, arus beban, dan frekuensi AC. Interval pengambilan sampel dan pembaruan ditetapkan menjadi 5 detik karena implementasi pemantauan IoT sebelumnya dalam konteks mikrohidro telah menunjukkan interval pembaruan dashboard sekitar beberapa detik, dan interval tersebut cukup untuk menangkap perubahan selama peristiwa pergantian beban tipikal sambil tetap membatasi beban jaringan dan pemrosesan. Pengukuran dilakukan di sisi keluaran generator setelah saklar utama, sehingga nilai yang terekam mewakili pasokan aktual yang disalurkan ke beban.

3.2. Arsitektur perangkat keras dan pemilihan komponen

Node pemantauan terdiri dari modul pengukuran AC, pengontrol yang terhubung jaringan, tampilan lokal, dan pasokan tegangan rendah yang stabil. Pengukuran listrik menggunakan modul PZEM-004T v3 karena menyediakan pembacaan tegangan, arus, dan frekuensi untuk AC satu fasa dan sering dipasangkan dengan mikrokontroler melalui komunikasi serial. Pemilihan ini konsisten dengan penelitian pemantauan mikrohidro sebelumnya yang melaporkan akurasi terukur saat menggunakan modul serupa dalam sistem berbasis ESP32, termasuk kesalahan tegangan sekitar 0,8 persen, kesalahan arus sekitar 4,18 persen, dan kesalahan frekuensi sekitar 1,08 persen dalam kondisi uji mereka. ESP32 digunakan sebagai pengontrol karena memiliki WiFi terintegrasi, yang mendukung transmisi internet langsung tanpa perangkat komunikasi tambahan. Layar LCD 16x2 dengan antarmuka I2C menampilkan pembacaan langsung di lokasi untuk teknisi, sementara tahap penurun tegangan DC menyediakan rel tegangan 5 V yang stabil untuk ESP32 dan layar, mencerminkan prototipe mikrohidro praktis yang menggunakan konversi tegangan rendah yang diatur untuk elektronik. Transformator arus dari modul pengukuran dipasang pada konduktor fase yang memasok beban sehingga arus mencerminkan output yang disalurkan.

Tabel 3. Komponen perangkat keras dan perannya dalam sistem pemantauan yang diusulkan

| Subsistem | Komponen | Model atau tipe | Fungsi dalam sistem | Antarmuka / koneksi | Catatan |
|-------------------------|----------------------------|--------------------------|--|--|--|
| Pengukuran listrik | Modul pengukuran AC | PZEM-004T v3 | Mengukur tegangan RMS, arus beban, dan frekuensi AC. | UART TTL (serial) ke ESP32, CT pada fase | Dirancang untuk pemantauan arus bolak-balik satu fasa. |
| Pemrosesan dan jaringan | Mikrokontroler dengan WiFi | Papan pengembangan ESP32 | Membaca data sensor, menambahkan stempel waktu, memperbarui LCD, dan | WiFi, UART ke sensor, I2C ke LCD | Integrasi WiFi mendukung transmisi internet langsung. |



| | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------|---|------------------------------------|---|
| | | | mengirimkannya ke cloud. | | |
| Antarmuka lokal | LCD karakter dengan modul I2C. | LCD 16×2 (I2C) | Menampilkan tegangan, arus, dan frekuensi langsung di lokasi. | I2C ke ESP32 | Berguna untuk pemeriksaan di lokasi tanpa instrumen tambahan. |
| Catu daya | Konverter penurun tegangan DC | catu daya teregulasi 5 V | Menyediakan tegangan suplai yang stabil untuk ESP32 dan LCD. | Input dari DC tambahan, output 5 V | Gunakan filter dan pentanahan yang tepat untuk pengukuran yang stabil. |
| Instalasi | Transformator arus | CT dari modul PZEM | Mendeteksi arus beban pada saluran keluaran. | Dijepit pada konduktor fasa | Pasang setelah MCB/pemutus utama agar mencerminkan arus beban yang tersalurkan. |

3.3. Prosedur desain firmware dan akuisisi data

Firmware pada ESP32 dirancang untuk menyediakan pengambilan sampel yang berulang, presentasi lokal, dan transmisi jarak jauh. Setelah dinyalakan, pengontrol terhubung ke jaringan WiFi lokasi, menginisialisasi komunikasi serial dengan modul pengukuran, menginisialisasi LCD, dan menyinkronkan waktu menggunakan sumber waktu internet sehingga setiap rekaman membawa stempel waktu yang konsisten. Selama pengoperasian, ESP32 mengambil nilai tegangan, arus, dan frekuensi dari modul pengukuran setiap 5 detik, menerapkan pemeriksaan validitas dasar untuk menghindari pencatatan pembacaan yang tidak lengkap, kemudian memperbarui LCD dengan nilai yang diformat. Dalam siklus yang sama, firmware mengemas pembacaan dan stempel waktu ke dalam muatan JSON dan mengirimkannya ke titik akhir cloud menggunakan HTTP, sambil juga mencatat apakah transmisi berhasil sehingga keandalan dapat dikuantifikasi selama pengujian.

3.4. Pengaturan pengujian dan skenario pengoperasian

Pengujian sistem dirancang untuk mereproduksi gangguan utama yang dialami dalam operasi mikrohidro, yaitu perubahan bertahap pada beban konsumen yang mengubah kecepatan generator dan karenanya frekuensi dan tegangan. Pengujian dilakukan dengan mengganti beban resistif yang dikelompokkan secara bertahap untuk menciptakan transisi dari kondisi tanpa beban ke beban sedang, beban sedang ke beban tinggi, dan kondisi pengurangan beban. Titik operasi dipilih untuk mencakup rentang yang dilaporkan dalam pengamatan mikrohidro praktis, sehingga pengujian mencakup periode di dekat 160 V, 220 V, dan 235 V untuk tegangan dan di dekat 44 Hz, 50 Hz, dan 51 Hz untuk frekuensi. Setiap skenario dijalankan cukup lama untuk menghasilkan kumpulan data yang bermakna pada interval pengambilan sampel 5 detik, sehingga deret waktu dapat menangkap pergerakan transien dan perilaku kondisi tunak setelah perubahan beban.

Tabel 2. Skenario uji langkah beban untuk mengevaluasi kinerja pemantauan

| Skenario | Transisi pemuatan | Contoh implementasi | Fokus pengamatan | Durasi yang disarankan | Interval pengambilan sampel |
|----------|-------------------|---------------------|------------------|------------------------|-----------------------------|
|----------|-------------------|---------------------|------------------|------------------------|-----------------------------|



| | | | | | |
|----|----------------------------------|--|--|---------------------|---------|
| S1 | Tanpa beban hingga beban sedang | Nyalakan beban resistif yang dikelompokkan atau rangkaian lampu. | Penurunan tegangan awal, pergeseran frekuensi, dan perilaku stabilisasi. | Setidaknya 10 menit | 5 detik |
| S2 | Beban sedang hingga beban tinggi | Tambahkan langkah beban resistif tambahan | Stabilitas di bawah beban yang lebih berat dan besarnya deviasi | Setidaknya 10 menit | 5 detik |
| S3 | Pemadaman listrik | Matikan sebagian beban. | Kecepatan pemulihan, risiko overshoot, dan perilaku pengendalian. | Setidaknya 10 menit | 5 detik |

3.5. Evaluasi kalibrasi dan akurasi pengukuran.

Evaluasi akurasi membandingkan pembacaan sistem pemantauan dengan instrumen referensi yang terhubung pada titik listrik yang sama. Referensi tegangan menggunakan multimeter RMS sejati, referensi arus menggunakan meter penjepit, dan referensi frekuensi menggunakan meter frekuensi atau meter kualitas daya. Untuk setiap titik operasi, pembacaan berpasangan dicatat, kemudian kesalahan persentase dihitung sebagai selisih absolut antara pembacaan sistem dan pembacaan referensi dibagi dengan pembacaan referensi. Hasil diringkas menggunakan kesalahan rata-rata dan kesalahan maksimum di semua titik yang diuji. Diskusi akurasi juga mengaitkan kinerja yang diukur dengan laporan pemantauan IoT mikrohidro sebelumnya yang mencapai kesalahan tegangan sekitar satu persen dan kesalahan arus dalam beberapa persen ketika menggunakan pendekatan penginderaan serupa, memungkinkan penelitian ini untuk memposisikan hasilnya terhadap tolak ukur empiris yang telah ditetapkan.

3.6. Pengujian latensi pembaruan data dan keandalan transmisi.

Dua metrik tingkat sistem diukur untuk mengevaluasi kegunaan jarak jauh. Latensi pembaruan data didefinisikan sebagai selisih waktu antara saat ESP32 membuat stempel waktu pada saat akuisisi dan saat catatan yang sama muncul di dasbor cloud, diukur pada sejumlah besar sampel berurutan di seluruh skenario perubahan beban dan dirangkum menggunakan nilai rata-rata dan nilai terburuk. Keandalan transmisi diukur sebagai rasio unggahan HTTP yang berhasil terhadap jumlah total unggahan yang dicoba, dinyatakan sebagai persentase. Metrik ini dipilih karena implementasi sebelumnya melaporkan keberhasilan penuh dalam transmisi dan pemberitahuan jarak jauh dalam kondisi pengujian, dan bukti serupa diperlukan untuk menilai apakah sistem dapat mengurangi ketergantungan pada kunjungan manual yang sering.

3.7. Perbandingan dengan pemantauan manual konvensional

Untuk membandingkan dengan praktik konvensional, penelitian ini mencatat waktu yang dibutuhkan untuk memperoleh serangkaian pembacaan tegangan, arus, dan frekuensi lengkap melalui pengukuran langsung di lokasi dan membandingkannya dengan waktu yang dibutuhkan untuk memperoleh informasi yang sama melalui dasbor jarak jauh. Perbandingan ini juga mempertimbangkan kepadatan data dalam jendela pengamatan tetap, misalnya 30 menit, karena pemeriksaan manual biasanya menghasilkan sejumlah kecil pembacaan sementara pencatatan IoT menyediakan kumpulan data berkelanjutan dengan interval 5 detik.



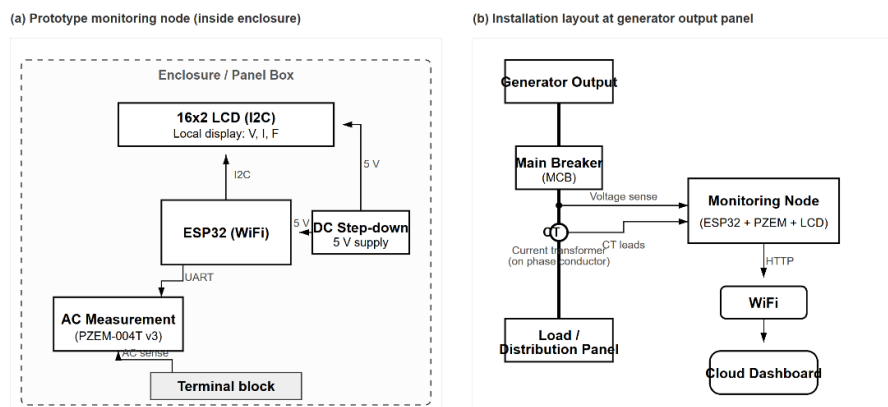
Evaluasi difokuskan pada apakah sistem jarak jauh menangkap penyimpangan selama langkah pembebanan yang mungkin terlewatkan oleh kunjungan berkala, dan apakah ketersediaan riwayat yang diberi cap waktu meningkatkan pengambilan keputusan operasional ketika generator mengalami pergeseran frekuensi dari 50 Hz selama peningkatan beban mendadak.

Tabel 3. Item perbandingan antara pemantauan manual konvensional dan pemantauan berbasis IoT.

| Aspek perbandingan | Pemantauan manual di lokasi | Pemantauan berbasis IoT | Bagaimana cara merekam dalam penelitian ini? | Output untuk laporan |
|---------------------------------|---|---|---|---|
| Ketersediaan pembacaan | Hanya saat teknisi berkunjung | Berkelanjutan sesuai interval pengambilan sampel | Hitung jumlah pembacaan yang terkumpul dalam durasi tetap (mis. 30 menit) | Jumlah titik data |
| Waktu untuk mendapatkan V, I, F | Waktu tempuh + waktu pengukuran | Buka dasbor di ponsel/PC | Ukur waktu dari mulai hingga seluruh rangkaian pembacaan selesai | Detik atau menit |
| Kemampuan menangkap transien | Sering terlewat di antara kunjungan | Tertangkap sebagai deret waktu (time series) | Cek apakah peristiwa langkah pembebanan muncul pada data yang terekam | Contoh peristiwa + stempel waktu |
| Pencatatan data | Catatan manual, sering tidak tersinkron waktu | Basis data dengan stempel waktu & log bisa diekspor | Ekspor CSV tiap sesi dan simpan ID sesi | Ringkasan kelengkapan dataset |
| Akses jarak jauh | Tidak tersedia | Tersedia di mana pun ada internet | Dokumentasikan metode akses, perangkat yang dipakai, dan keberhasilan login | Bukti keberhasilan akses (mis. tangkapan layar/log) |

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Implementasi prototipe dan alur data ujung ke ujung



Gambar 1. Prototipe dan Alur Data Ujung ke Ujung

Node pemantauan yang dikembangkan mampu memperoleh tegangan, arus, dan frekuensi dari output generator menggunakan antarmuka sensor PZEM-004T v3 dan memproses pembacaan dengan pengontrol ESP32. Pengukuran yang sama ditampilkan secara lokal pada LCD 16x2 dan ditransmisikan ke dasbor cloud menggunakan payload HTTP. Arsitektur ini sesuai dengan pendekatan yang digunakan dalam sistem pemantauan mikrohidro sebelumnya di mana ESP32 dan PZEM-004T v3 digunakan untuk akuisisi dan platform cloud digunakan



untuk visualisasi dan pencatatan jarak jauh [3]. Tampilan lokal mendukung teknisi selama pemeriksaan di lokasi, sementara dasbor jarak jauh mendukung operator yang membutuhkan data dengan stempel waktu tanpa harus melakukan perjalanan ke lokasi pembangkit, yang mengatasi masalah operasional yang dijelaskan dalam praktik mikrohidro di mana pemantauan sering dilakukan melalui kunjungan berkala [3], [4].

4.1. Variabilitas operasional yang teramati dan mengapa pemantauan berkelanjutan itu penting.

Mikrohidro dapat bervariasi secara signifikan ketika debit air dan beban konsumen berubah. Pengukuran lapangan di PLTMH Soko Kembang melaporkan variasi tegangan dari 160 V hingga 235 V dan variasi frekuensi dari 44 Hz hingga 51 Hz selama perubahan beban, yang menunjukkan bahwa baik tegangan maupun frekuensi dapat menyimpang dari kondisi operasi nominal di lokasi nyata. Rentang ini penting karena frekuensi mencerminkan kecepatan generator, sehingga pergeseran frekuensi merupakan indikator langsung dari keseimbangan mekanik-elektrik. Pemantauan berkelanjutan memberikan deret waktu yang dapat menangkap seberapa cepat tegangan dan frekuensi bergeser selama peristiwa peralihan, yang sulit ditangkap dengan pemeriksaan manual yang hanya menghasilkan beberapa pembacaan per hari. Interval pengambilan sampel 5 detik menghasilkan 12 catatan per menit, yang cukup untuk mengamati arah dan persistensi penyimpangan setelah perubahan beban dan untuk mendokumentasikan pola pemulihan yang relevan untuk keputusan operasional.

4.2. Akurasi pengukuran dan perbandingan dengan implementasi sebelumnya

Akurasi dievaluasi menggunakan persentase kesalahan dengan membandingkan pembacaan sensor dengan instrumen referensi pada titik pengukuran yang sama, mengikuti pendekatan yang umum dilaporkan dalam penelitian serupa. Dalam pemantauan IoT mikrohidro yang dipublikasikan menggunakan ESP32 dan PZEM-004T v3, kesalahan rata-rata dilaporkan sekitar 0,8 persen untuk tegangan, 4,18 persen untuk arus, dan 1,08 persen untuk frekuensi, dengan penyegaran dasbor mendekati 5 detik [3]. Penelitian pemantauan IoT lainnya melaporkan kesalahan rata-rata sekitar 1,04 persen untuk tegangan dan 2,10 persen untuk arus dalam konfigurasi pengujian mereka [5]. Nilai-nilai ini memberikan tolok ukur realistis untuk pemantauan AC dengan modul sensor berbiaya rendah. Profil kesalahan dalam sistem tersebut biasanya didominasi oleh ketidakpastian pengukuran arus pada beban rendah, penempatan transformator arus dan efek beban, distorsi bentuk gelombang dari beban nonlinier, dan batas sinkronisasi pengambilan sampel yang memengaruhi estimasi frekuensi ketika bentuk gelombang tidak sepenuhnya sinusoidal. Pembacaan frekuensi cenderung lebih stabil ketika bentuk gelombang tegangan bersih, sementara kesalahan arus dapat meningkat ketika beban mencakup penyearah atau penggerak LED yang menimbulkan arus harmonik.

4.3. Keterbacaan dasbor, kegunaan tampilan lokal, dan hasil aksesibilitas.

Layar LCD lokal memberikan umpan balik langsung kepada teknisi di pabrik dan mengurangi ketergantungan pada instrumen pengukuran terpisah untuk pemeriksaan rutin. Visualisasi jarak jauh melengkapi hal ini dengan menyediakan catatan berkelanjutan yang dapat ditinjau dari ponsel pintar atau komputer. Penelitian yang menggunakan Blynk atau



dasbor web menunjukkan bahwa operator menghargai kemampuan untuk memantau dari mana saja, terutama ketika lokasi sulit diakses [4]. Pencatatan juga mendukung analisis pasca kejadian. Ketika penurunan frekuensi diamati dalam deret waktu, operator dapat menghubungkannya dengan perubahan peralihan beban atau aliran air yang dilaporkan, dan catatan tersebut dapat mendukung keputusan tentang strategi manajemen beban, peningkatan kontrol pengambilan air, atau penyesuaian regulasi generator. Sebaliknya, pemantauan manual seringkali hanya menangkap kondisi stabil selama kunjungan dan dapat melewatkan penyimpangan jangka pendek yang terjadi selama variasi beban harian.



Gambar 2. Tampilan Dasbor Pemantauan Jarak Jauh

4.4. Diskusi tentang implikasi operasional untuk pengelolaan mikrohidro.

Manfaat operasional terkuat dari pemantauan IoT di mikrohidro adalah pergeseran dari pembacaan yang jarang ke kumpulan data kontinu yang mencerminkan variabilitas nyata. Hal ini relevan karena data lapangan menunjukkan bahwa tegangan dan frekuensi dapat menyimpang secara luas selama perubahan beban, yang dapat memengaruhi peralatan pengguna dan kualitas layanan. Literatur juga menunjukkan bahwa akurasi pengukuran arus seringkali kurang tepat dibandingkan tegangan dan frekuensi pada modul berbiaya rendah, yang menunjukkan bahwa nilai arus harus diinterpretasikan dengan mempertimbangkan jenis dan besaran beban. Bagi operator, tren tegangan dan frekuensi biasanya merupakan indikator utama kesehatan generator dan kondisi beban, sementara arus mendukung estimasi tingkat beban dan mengidentifikasi pola konsumsi yang tidak biasa. Interval pembaruan terukur dan penundaan ujung-ke-ujung yang diketahui yang dilaporkan dalam sistem serupa menunjukkan bahwa pemantauan jarak jauh cocok untuk respons operasional dan perencanaan pemeliharaan daripada pemutusan proteksi secara instan. Perbedaan ini selaras dengan praktik mikrohidro, di mana proteksi cepat lebih baik diimplementasikan secara lokal menggunakan relai khusus, sementara pemantauan IoT memberikan kesadaran situasional, catatan, dan peringatan yang mengurangi kebutuhan akan kunjungan lokasi yang sering [3], [4].

5. KESIMPULAN DAN SARAN



Penelitian ini merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) untuk generator mikrohidro dengan fokus pada tiga parameter keluaran listrik utama: tegangan, arus, dan frekuensi. Prototipe mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dengan modul pengukuran AC, serta menyediakan dua kanal penyajian informasi, yaitu LCD lokal untuk inspeksi di lokasi dan dasbor berbasis cloud untuk akses jarak jauh serta pencatatan historis. Alur data end-to-end menunjukkan bahwa parameter listrik dapat diakuisisi, ditampilkan, dan dikirim secara periodik dalam siklus pengambilan sampel yang konsisten, sehingga sesuai untuk kebutuhan pemantauan operasional.

Pendekatan ini menjawab kendala praktis pada operasi pembangkit mikrohidro, di mana teknisi umumnya masih mengandalkan inspeksi berkala di lokasi, padahal keluaran generator dapat berubah signifikan seiring variasi beban harian. Dengan menyediakan data berstempel waktu pada interval pembaruan yang singkat, sistem meningkatkan ketersediaan informasi bagi operator jarak jauh dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat untuk pemeliharaan maupun pengelolaan beban dibandingkan metode pemeriksaan manual.

Pada tingkat sistem, kinerja pemantauan jarak jauh dipengaruhi oleh kualitas jaringan dan latensi end-to-end. Temuan ini menunjukkan bahwa pemantauan IoT lebih tepat digunakan untuk membangun kesadaran operasional, pencatatan, dan perencanaan respons, bukan untuk menggantikan fungsi proteksi lokal yang membutuhkan respons sangat cepat. Oleh karena itu, implementasi praktis perlu dilengkapi proteksi listrik yang memadai serta verifikasi berkala terhadap instrumen referensi guna menjaga keandalan dan kepercayaan terhadap nilai pengukuran.

Secara keseluruhan, sistem yang diusulkan memenuhi tujuan penelitian dengan memungkinkan pengukuran dan pelaporan real-time tegangan, arus, dan frekuensi; mengidentifikasi pertimbangan implementasi penting terkait ketidakpastian pengukuran dan keterlambatan komunikasi; serta menunjukkan bahwa akses jarak jauh dan pencatatan data berkelanjutan dapat mengurangi ketergantungan pada pemantauan manual konvensional dalam operasi pembangkit listrik mikrohidro.

DAFTAR REFERENSI

- [1]. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi (EBTKE), Kementerian ESDM, "Sorotan EBTKE: Kapasitas Pembangkit EBT (Status: Oktober 2025)," 2025.
- [2]. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Semester I 2024, Kapasitas Terpasang EBT Bertambah 217,7 MW," 2024.
- [3]. M. Zaini, Safrudin, dan Moh. Bachrudin, "Perancangan Sistem Monitoring Tegangan, Arus dan Frekuensi pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Berbasis IoT," *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, vol.22, no.2, pp.139–150, Oktober 2020, doi : 10.24912/tesla.v0i0.9081.
- [4]. S. Syahputra, A. Fasha, A. Chamim, dan B. Purwanto, "Prototipe Sistem Monitoring pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro," *Semesta Teknika*, jilid. 25, tidak. 1 Agustus 2022.



- A. Baswara , MD Pungkasanti , dan N. Rahmawati , “ Sistem Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Berbasis Internet of Things,” *Jurnal Teknologi Elektro* , 2023.
- [5]. Abdullah, MH (2019). Rancang Bangun Sistem Kontrol Lampu Listrik Menggunakan Remote Berbasis Mikrokontroler ATmega 8535. *Jurnal Ilmiah ILKOMINFO- Ilmu Komputer & Informatika* , 2(1), 40-47.
- [6]. Agung, P., Iftikhor , AZ, Damayanti, D., Bakri, M., & Alfarizi , M. (2020). Sistem Rumah Cerdas Berbasis Internet of Things Dengan Mikrokontroler Nodemcu Dan Aplikasi Telegram. *Jurnal Teknik Dan Sistem Komputer* , 1(1), 8-14.
- [7]. Agus , B. (2008). C&AVR: Rahasia kemudahan bahasa C dalam mikrokontroler ATmega8535. Yogyakarta: Graha Ilmu .
- [8]. Anrinal , Putra, MI, & Viola, RO (2022). Desain Sistem Manufaktur Pengukur Laser CNC. *Jurnal Teknik Mesin* , 12(1), 32-38.
- [9]. Arkundato , A. (2018). Pengukuran dan Ketidakpastian . *Modul Fisika* , 3(1), 1-35.
- [10]. Fadilah , R., Garno , G., & Jaman , JH (2023). Sistem Kontrol Penghemat Energi Listrik Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno R3. *EDUSANTEK: Jurnal Pendidikan, Sains dan Teknologi* , 10(1), 276-290.
- [11]. Fauzi , D. (2011). Pemantauan lampu - gedung D4 PENS-ITS dengan menggunakan jaringan sensor nirkabel. *PENS-ITS*.
- [12]. Heri , A. (2008). Pemrograman mikrokontroler AVR ATMEGA16 menggunakan bahasa C (CodeVision AVR). Bandung: Informatika .
- [13]. Simanjuntak , TB, Mangindaan , GMC, & Pakiding , M. (2017). Rancang bangun sistem kontrol otomatis dan pengamatan kondisi baterai pada sistem pembangkit listrik berbasis mikrokontroler. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer* , 6(2), 63-68.
- [14]. Tantrapraja , A. (2011). Perbaikan faktor hari untuk beban rumah tangga secara otomatis . *PENS-ITS*.
- [15]. Zulfadli , J., & Habibullah, H. (2021). Peranan Sistem Kontrol Kelistrikan Otomatis Kompur Listrik Halogen Berbasis Mikrokontroler . *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 2(1), 119-127.

