

Komunikasi Data Untuk Energi Elektrik Cerdas Pembangkitan Tenaga Bayu Skala Laboratorium

Igo Iham Prakoso
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

igoilham@student.telkomuniversity.ac.id

Sudarmono Sasmono
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

ssasmono@telkomuniversity.ac.id

Bagus Aditya
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

goesaditya@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) memiliki potensi besar untuk menghasilkan energi terbarukan di Indonesia, namun efisiensi operasionalnya seringkali terbatas oleh tantangan komunikasi dan pemantauan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem energi listrik cerdas berbasis Internet of Things (IoT) pada PLTB skala laboratorium, dengan fokus pada pemilihan teknologi komunikasi yang optimal untuk mendukung sistem Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). Metode Analytical Hierarchy Process (AHP) digunakan untuk memilih teknologi komunikasi terbaik, yang kemudian diintegrasikan dengan protokol MQTT dalam sistem IoT. Pengujian sistem dilakukan untuk menilai kinerja sensor, latensi, throughput, dan integrasi perangkat dalam SCADA berbasis IoT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki latensi rendah (1,573 ms) dan throughput optimal, serta dapat mengelola data secara efisien. Pemilihan WiFi sebagai teknologi komunikasi terbukti efektif dalam mendukung komunikasi real-time antar perangkat, dengan kinerja yang stabil dan responsif terhadap perubahan variabel angin. Kesimpulannya, penerapan IoT dan sistem SCADA berbasis WiFi pada PLTB skala laboratorium dapat meningkatkan efisiensi operasional dan pengendalian yang lebih baik.

Kata kunci— sistem energi elektrik cerdas, internet of things (IOT), analytical hierarchy process (AHP), SCADA.

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan utama di Indonesia, dengan konsumsi yang terus meningkat setiap tahunnya [1]. Namun, lebih dari 82% kebutuhan energi nasional masih dipenuhi dari sumber fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam, yang berdampak pada emisi gas rumah kaca dan perubahan iklim [2]. Energi terbarukan, seperti tenaga angin, menjadi solusi yang semakin berkembang untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan menekan dampak lingkungan [3]. Indonesia memiliki potensi energi listrik dari tenaga angin hingga 60 GW, sebagaimana diatur dalam Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017, dan pemerintah menargetkan kontribusi energi terbarukan

mencapai 31% dari total kebutuhan nasional pada tahun 2050 [4], [5]. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) memanfaatkan energi kinetik angin untuk menghasilkan listrik secara bersih dan berkelanjutan [6], serta

menawarkan keuntungan berupa biaya operasional yang rendah dan ketahanan terhadap fluktuasi harga energi.

Perkembangan smart grid, yaitu sistem energi elektrik cerdas yang mengintegrasikan teknologi digital dan komunikasi, semakin penting untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan kualitas pasokan energi di era energi terbarukan [3][7]. Pada PLTB, komunikasi efektif antarperangkat seperti sensor, aktuator, dan pengendali sangat dibutuhkan agar pemantauan serta pengelolaan kinerja pembangkit dapat dilakukan secara real-time [7]. Sistem SCADA digunakan untuk mengontrol dan memantau operasi pembangkit secara terpusat [8], sementara penerapan Internet of Things (IoT) dan protokol MQTT memungkinkan pengiriman data yang efisien dan stabil di lingkungan laboratorium [9]. Untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pemilihan teknologi komunikasi, digunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) dan Simple Additive Weighting (SAW), yang memungkinkan evaluasi objektif berdasarkan berbagai kriteria teknis [10], [11]. Dengan pendekatan ini, integrasi teknologi komunikasi dan sistem energi elektrik cerdas pada PLTB diharapkan dapat meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan sistem energi di Indonesia.

II. KAJIAN TEORI

A. Pengambilan keputusan dengan AHP DAN SAW

AHP (Analytical Hierarchy Process) dan SAW (Simple Additive Weighting) adalah dua metode yang digunakan untuk pengambilan keputusan multi-kriteria. Kedua metode ini sering diterapkan dalam situasi di mana berbagai alternatif harus dipilih berdasarkan beberapa kriteria yang relevan. AHP digunakan untuk menentukan bobot relatif dari kriteria yang terlibat dalam pengambilan keputusan melalui proses perbandingan berpasangan, sedangkan SAW digunakan untuk memilih alternatif terbaik berdasarkan bobot kriteria yang sudah ditentukan. Adapun Langkah Langkah dalam penyusunan AHP dan SAW:

a. Menentukan tujuan ataupun *goal* dalam rancangan AHP.

b. Pada langkah ini, kriteria yang relevan untuk keputusan yang akan diambil ditentukan, serta alternatif-alternatif yang akan dibandingkan berdasarkan kriteria tersebut.

c. Matriks perbandingan berpasangan disusun untuk membandingkan bobot antar kriteria. Setiap elemen a_{ij} dalam matriks dihitung berdasarkan perbandingan bobot kriteria w_i dan w_j , menggunakan rumus:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}, i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

n merujuk pada jumlah kriteria yang dibandingkan.

d. Menormalkan setiap kolom dengan cara membagi setiap kolom dengan cara membagi setiap nilai pada kolom ke i dan baris ke j dengan nilai total dari setiap kolom.

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum a_{ij}} \quad (2)$$

e. menghitung nilai CR (*Consistency Ratio*), bila nilai $CR > 0.1$, maka matriks perbandingan tinjau ulang

$$\lambda_{maks} = \frac{P \times w}{w} \quad (3)$$

h. menghitung CI (*Consistency index*) dengan persamaan.

$$CI = \frac{\lambda_{maks} - n}{n-1} \quad (4)$$

i. Lalu menghitung nilai CR sebagai berikut :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

j. Bobot untuk setiap kriteria dihitung dengan menjumlahkan seluruh elemen dalam setiap kolom matriks yang telah dinormalisasi, menggunakan rumus:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \quad (6)$$

k. Alternatif dinormalisasi berdasarkan jenis atribut: keuntungan (benefit) atau biaya (cost). Normalisasi dilakukan menggunakan rumus berikut :

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} & \text{jika atribut benefit} \\ \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}} & \text{jika atribut biaya} \end{cases} \quad (7)$$

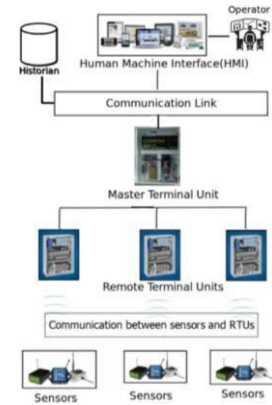
l. Skor untuk setiap alternatif dihitung dengan mengalikan nilai bobot w_j dari AHP dengan nilai normalisasi r_{ij} dari SAW, lalu menjumlahkannya untuk seluruh kriteria, menggunakan rumus:

$$S_i = \sum^n (w_j \times r_{ij}) \quad (8)$$

dimana S_i adalah skor total untuk alternatif ke- i .

B. Supervisory Control and Data Acquisition

Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) adalah sistem kontrol yang digunakan untuk memantau dan mengendalikan proses industri, fasilitas, dan infrastruktur dari jarak jauh. SCADA banyak digunakan di berbagai sektor seperti energi, air, transportasi, dan manufaktur untuk memastikan operasi yang efisien dan aman. Sistem ini mengumpulkan data secara real-time dari perangkat di lapangan, memproses data tersebut, dan memungkinkan pengendalian otomatis atau manual atas proses yang dipantau.



GAMBAR 1
Arsitektur SCADA

C. Message Queuing Telemetry Transport

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) adalah protokol komunikasi ringan yang dirancang untuk aplikasi Internet of Things (IoT) dengan model publish/subscribe. Dalam model ini, perangkat publisher mengirimkan data ke broker, yang kemudian meneruskan data ke subscriber. MQTT efisien dalam latensi rendah dan konsumsi daya rendah, menjadikannya ideal untuk aplikasi dengan sumber daya terbatas. Protokol ini mengurangi overhead komunikasi, memungkinkan pengiriman data cepat dan efisien, serta mendukung berbagai tingkat Quality of Service (QoS) untuk pengendalian pengiriman data. Meskipun efektif, MQTT memerlukan perhatian khusus terhadap keamanan, seperti enkripsi dan autentikasi.

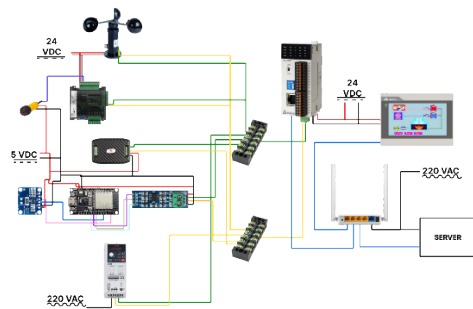
III. METODE

Pada penelitian ini, sistem yang dirancang diawal merupakan sistem SCADA yang diterapkan pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) skala laboratorium. Sistem ini mengintegrasikan berbagai komponen perangkat keras dan perangkat lunak untuk memantau dan mengendalikan operasi turbin angin dan pembangkit listrik. Tujuan utama dari desain sistem lokal ini adalah untuk menciptakan platform yang dapat mengumpulkan data dari sensor, mengirimkan data tersebut melalui sistem komunikasi, dan menampilkan informasi hasil pengukuran kepada operator secara real-time, dengan menggunakan protokol komunikasi MQTT dalam sistem SCADA berbasis IoT. Adapun komponen yang dipilih sebagai berikut :

TABEL 1
Pemilihan Komponen

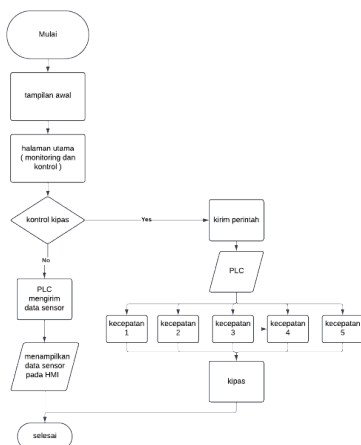
Komponen	Keterangan
Sensor arus	Ina219
Sensor Tegangan	Pzem 017
Sensor putaran turbin	E18-D80NK
Sensor kecepatan angin	ZTS-3000-FSJT120
Variable Frequency Drive	Kinco KC100
Human User Interface	Haiwell CS10
Programmable logic controller	Haiwell AT12MOT

Berikut merupakan diagram sistem yang akan dirancang :



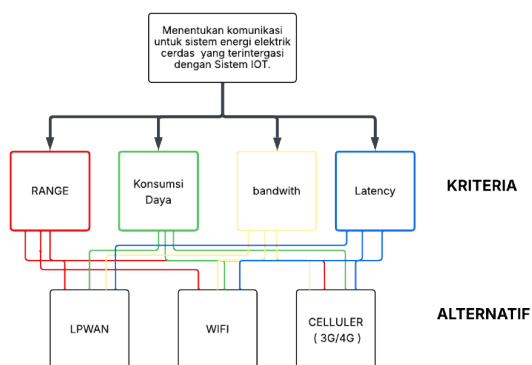
GAMBAR 2
Rancangan Sistem

Setelah diagram sistem, berikut adalah flowchart yang menggambarkan alur proses pada Human Machine Interface (HMI). Flowchart ini menunjukkan bagaimana data dari sensor diproses dan ditampilkan :



GAMBAR 3
Flowchart HMI

Setelah menjelaskan alur proses pada flowchart HMI, berikut adalah struktur Analytical Hierarchy Process (AHP) yang digunakan untuk menentukan alternatif terbaik dalam memilih teknologi komunikasi untuk sistem energi cerdas berbasis IoT. Bagan ini menunjukkan bagaimana kriteria yang telah dipilih—seperti range, konsumsi daya, bandwidth, dan latency—digunakan untuk mengevaluasi alternatif komunikasi, yaitu LPWAN, WiFi, dan Cellular (3G/4G).



GAMBAR 4
Struktur AHP

Setelah menentukan struktur hierarki dan kriteria menggunakan metode AHP, langkah selanjutnya adalah melakukan normalisasi nilai menggunakan metode SAW. Untuk itu, berikut adalah spesifikasi komponen yang

dipilih sebagai alternatif pada proses penilaian SAW:

TABEL 2
Pemilihan Komponen untuk Alternatif

alternatif	Komponen	Data Rate	Latency	range	Konsumsi Daya
Lpwan	TL-WR840N	300000 Kbps	20ms	75M	5.4 Watt
Wifi	lora aurora v3	27 Kbps	50ms	10.000 M	1.3 Watt
Cellular	sim7000	375 Kbps	20ms	15.000 M	2 Watt

Dalam penelitian ini, Penilaian perbandingan kriteria dilakukan oleh lima responden yang berpengalaman di bidang telekomunikasi, IoT, dan SCADA. Berikut adalah tabel hasil perbandingan berpasangan berdasarkan penilaian para responden tersebut:

TABEL 3
Tabel Perbandingan Berpasangan

Kriteria	Range	Konsumsi Daya	Data Rate	Latency
Range	1	$\frac{2^1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$
Konsumsi daya	$\frac{2}{5}$	1	$\frac{1}{5}$	$\frac{5}{9}$
Data rate	$\frac{4^1}{3}$	$\frac{4^6}{7}$	1	4
Latency	$\frac{3^1}{9}$	$\frac{1^4}{5}$	$\frac{1}{4}$	1

Setelah memperoleh data pada tabel perbandingan, rasio konsistensi (CR) dihitung menggunakan perangkat lunak Expert Choice :

Inconsistency = 0,09
with 0 missing judgments.

GAMBAR 5
Hasil CR expert choice

Hasil CR dalam matriks perbandingan memenuhi syarat konsistensi karena nilai CR sebesar $0,09 < 0,1$. Dengan demikian, proses dapat dilanjutkan ke tahap pembobotan, dan berikut adalah hasil perhitungan bobot untuk setiap kriteria:

TABEL 4
Perhitungan Pembobotan

Kriteria	Range	Konsumsi Daya	Data Rate	Latency
Range	0,11312217	0,24131274	0,14705882	0,0565365
Konsumsi Daya	0,037669683	0,096525097	0,117647059	0,094227504
Data Rate	0,489819005	0,468822394	0,588235294	0,679117148

Pembobotan dijumlahkan untuk setiap baris pada matriks normalisasi, sehingga diperoleh bobot akhir masing-masing kriteria yang digunakan dalam penilaian alternatif

TABEL 5
Hasil Bobot

Kriteria	Bobot
Data rate	56.5
Latency	23.1
Range	12.3
Konsumsi daya	8.1

Setelah didapatkan bobot dari setiap kriteria maka selanjutnya menghitung normalisasi alternatif menggunakan metode SAW. tabel dibuat berdasarkan attribut benefit dan cost.

TABEL 6
Normalisasi Metode SAW

Alternatif	Data Rate	Latency	Range	Konsumsi Daya
WiFi	300000	20	75	5.4
	300000	30	15000	1.3
Lpwan	27	20	10000	1.3
	300000	50	15000	1.3
Celluler	375	20	15000	2
	300000	20	15000	1.3

Tahap akhir adalah perhitungan skor, di mana setiap nilai normalisasi alternatif dikalikan dengan bobot kriteria yang telah diperoleh. Hasil perkalian dari kedua tabel tersebut kemudian dijumlahkan untuk menentukan skor akhir setiap alternatif, seperti ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 7 Perhitungan skor

Alternatif	Data Rate	Latency	Range	Konsumsi Daya
Wifi	1 X 0.565	0.67 X 0.231	0.005 X 0.123	0.245 X 0.081
Lpwan	0.00009 X 0.565	0.4 X 0.231	0.67 X 0.123	1 X 0.081
Celluler	0.00125 X 0.565	1 X 0.231	1 X 0.123	0.66 X 0.081

Sehingga didapatkan hasil skoring sebagai berikut

Tabel 8 Hasil Skor

Alternatif	skor
Wifi	0.74
Lpwan	0.26
Celluler	0.4

Dengan kedua metode tersebut didapatkan wifi yang akan dipilih sebagai teknologi komunikasi yang dipakai untuk penelitian ini.

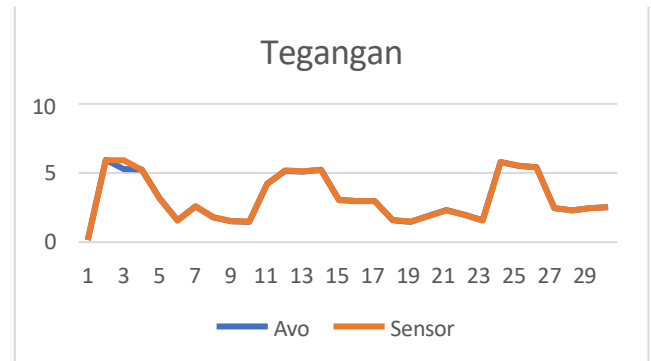
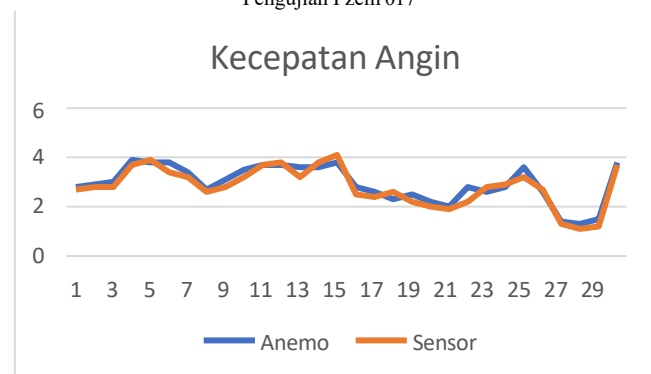
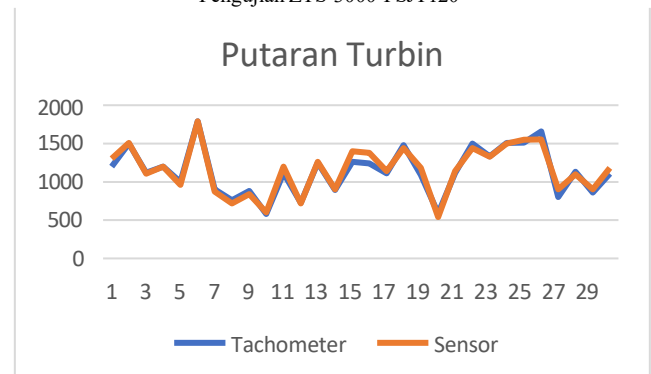
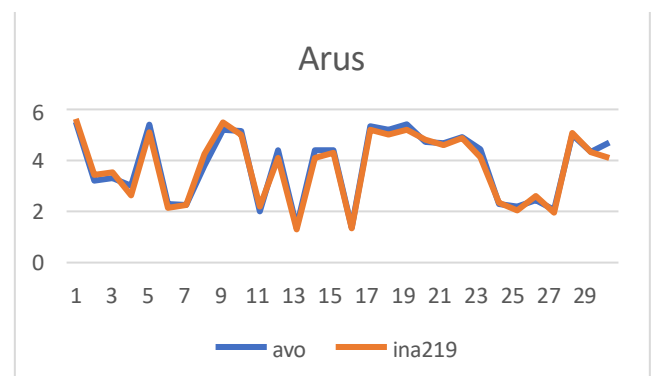
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan pada empat jenis sensor yang digunakan dalam sistem, yaitu sensor arus (Ina219), sensor tegangan (Pzem 017), sensor putaran turbin (E18-D80NK), dan sensor kecepatan angin (ZTS-3000-FSJT120). Setiap sensor diuji untuk memperoleh nilai akurasi dan error, dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi, dengan

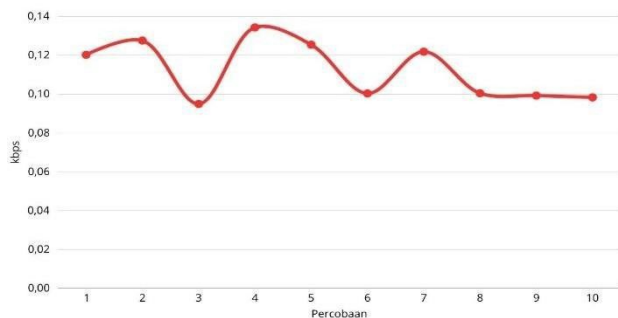
persamaan *error* sebagai berikut :

$$\%Error = \left| \frac{M-N}{N} \right| \times 100 \quad (9)$$

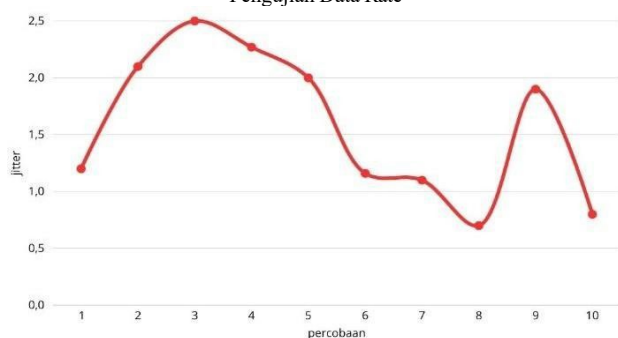
$$\%Akurasi = 100 - \%Error \quad (10)$$

GAMBAR 6
Pengujian Pzem 017GAMBAR 7
Pengujian ZTS-3000-FSJT120GAMBAR 8
Pengujian E18-D80NKGAMBAR 9
Pengujian INA219

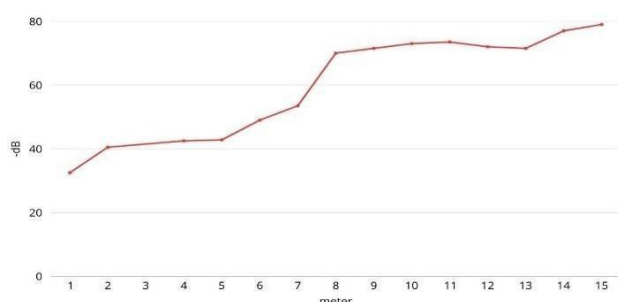
Pengujian sensor kecepatan angin dilakukan dengan membandingkan hasil ZTS-3000-FSJT120 terhadap anemometer manual. Hasil pengukuran menunjukkan tingkat error sebesar 6,4% dan akurasi 93,6%. Pengujian sensor tegangan Pzem-017 menghasilkan error rata-rata 0,87% dan akurasi 99,13% terhadap pembacaan multimeter. Untuk sensor putaran turbin E18-D80NK, pengujian dengan tachometer menunjukkan error rata-rata 4,2% dan akurasi 96,8%. Sementara itu, sensor arus Ina219 diuji terhadap alat ukur arus referensi, menghasilkan error 5,2% dan akurasi 94,8%.



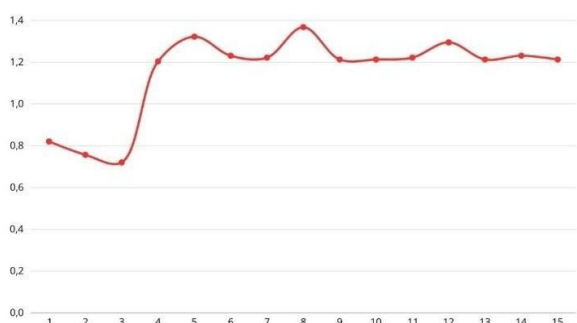
GAMBAR 10
Pengujian Data Rate



GAMBAR 11
Pengujian Jitter



GAMBAR 12
Pengujian Range



GAMBAR 13
Pengujian konsumsi daya

Setelah pengujian sensor, selanjutnya dilakukan pengujian terhadap performa teknologi komunikasi yang meliputi parameter data rate, latency, jangkauan, dan konsumsi daya

Pengujian data rate dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Wireshark dan diperoleh throughput rata-rata sebesar 0,11 kbps. Pengujian latency menggunakan parameter jitter menunjukkan nilai rata-rata 1,573 ms, yang jauh di bawah standar komunikasi real-time. Pengujian jangkauan dilakukan dengan mengukur kuat sinyal WiFi pada berbagai jarak, dan hasilnya menunjukkan penurunan sinyal mulai jarak 6 meter dari router. Sementara itu, pengujian konsumsi daya pada router WiFi menunjukkan kebutuhan daya antara 1,2 hingga 1,4 watt pada kondisi idle dan aktif.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem energi listrik berbasis PLTB skala laboratorium dengan memanfaatkan teknologi komunikasi IoT. Sistem ini mengintegrasikan sensor kecepatan angin dengan tingkat error 6,4%, sensor tegangan dengan error rata-rata 0,87%, sensor putaran turbin dengan error 4,2%, dan sensor arus dengan error 5,2%, yang seluruhnya terhubung ke sistem SCADA berbasis IoT untuk pemantauan data secara real-time. Data yang diperoleh dari setiap sensor dapat dikumpulkan dan dianalisis secara langsung, sehingga memungkinkan pemantauan kinerja pembangkit yang lebih efektif dan mendukung stabilitas operasional sistem pada skala laboratorium

TABEL 9
Standarisasi ITU-T G.1010

Throughput	<1kb	Sangat bagus
Jitter	<150 ms	Sangat bagus

Pada aspek teknologi komunikasi, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berbasis WiFi memenuhi standar ITU-T G.1010 untuk komunikasi real-time, dengan rata-rata latency (jitter) sebesar 1,573 ms, jauh di bawah ambang batas 75 ms yang ditetapkan standar. Selain itu, performa data rate, jangkauan, dan konsumsi daya juga memenuhi kebutuhan sistem, sehingga WiFi dapat diandalkan sebagai solusi komunikasi data pada sistem SCADA berbasis IoT di lingkungan laboratorium

REFERENSI

- [1] A. A. Solikah and B. Bramastia, "Systematic Literature Review : Kajian Potensi dan Pemanfaatan Sumber Daya Energi Baru dan Terbarukan Di Indonesia," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 5, no. 1, pp. 27–43, Mar. 2024, doi: 10.14710/jebt.2024.21742.
- [2] R. Putri, A. Hasibuan, M. Jannah, R. Kurniawan, W. V. Siregar, and M. Sayuti, "Pembangkit Listrik Tenaga Bayu sebagai Sumber Alternatif pada Mesjid Tengku Bullah Universitas Malikussaleh," 2022, doi:

10.30596/rele.v1i1.

[3] Syakirman M., Bintoro Andik, and Hasibuan Arnawan, "Saykirman real," *Jurnal Energi Elektrik*, vol. 7, pp. 1–5, 2018.

[4] A. Potensi Energi Angin Dan Analisis Teknik Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Untuk Membangkitkan Energi Listrik Studi kasus di Gunung Kincir *et al.*, *Analysis Of Wind Energy Potentials And Technical Analysis Of Wind Turbine To Generate Electricity (A Case Study At Gunung Kincir, Desa Ciheras Kecamatan Cipatujah Kabupaten Tasikmalaya)*. 2019.

[5] L. N. Rahayu and J. Windarta, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Pengembangan PLTA dan PLTMH di Indonesia," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 2, pp. 88–98, Jun. 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.13327.

[6] R. Kurniawan, A. Nasution, A. Hasibuan, M. Isa, M. Gard, and S. V. Bhunte, "The Effect of

Distributed Generator Injection with Different Numbers of Units on Power Quality in the Electric Power System," *Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering*, vol. 1, no. 2, p. 71, Sep. 2021, doi: 10.29103/jreece.v1i2.5236.

[7] S. Biswas, "Development of Microcontroller Based Smart Grid Framework," *International Journal of Science and Management Studies (IJSMS)*, pp. 315–324, Aug. 2021, doi: 10.51386/25815946/ijsms-v4i4p129.

[8] A. Mustika, "ANALISIS QUALITY OF SERVICE (QoS) JARINGAN KOMUNIKASI PADA MINI SCADA."

[9] Z.-T. Shao, M.-X. Huang, D. Wu, X. Zhang, and A. Huang, "Design of a Simplified Wireless Sensor Network Node based on MQTT Protocol."

[10] J. Syahputra and A. Rikki, "Penerapan Metode Analitical Hierarchy Process (AHP) dalam Menentukan Judul Skripsi," *STMIK Budi*

Darma Medan, Jl.Sisingamangaraja No.338 Simpang Limun Medan, vol. 2, no. 24, 2020.

[11] R. Hardianto, "SPK Pemilihan Presiden Mahasiswa Unilak Dengan Metode Simple Additive Weighting (SAW)," 2019.