

Sistem Monitoring Energi Listrik Rumah Tangga Berbasis IoT Menggunakan Sensor PZEM-004T dan ESP32

Rendi Dwi Rusti^{1*}, Uvi Desi Fatmawati², Sunarta³, Nahdya Aufa Hayla Anwar⁴, Maylin Ribka Manalu⁵, Ahmad Surya Anshari⁶, William Benedictus Tamba⁷

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor

*rendidwirusti@gmail.com

Abstrak— Konsumsi energi listrik sektor rumah tangga terus meningkat, namun pengguna umumnya belum memiliki sarana untuk memantau pemakaian daya secara real-time sehingga upaya penghematan energi sulit dilakukan. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring energi listrik rumah tangga berbasis Internet of Things (IoT) bernama ENERGIKU menggunakan sensor PZEM-004T dan mikrokontroler ESP32 yang dilengkapi dashboard web real-time berbasis WebSocket tanpa ketergantungan layanan cloud berbayar. Metode penelitian yang digunakan adalah rancang bangun yang meliputi analisis kebutuhan, perancangan perangkat keras dan lunak, implementasi, serta empat jenis pengujian, yaitu akurasi sensor, variasi beban, waktu respons, dan keandalan komunikasi. Akurasi divalidasi terhadap multimeter digital Sanwa RD700 sebagai instrumen acuan melalui sepuluh titik pengukuran berpasangan untuk tegangan, arus, dan daya, kemudian dianalisis menggunakan metrik MAE, MAPE, dan RMSE. Hasil pengujian menunjukkan sistem mencapai akurasi 99,65% untuk tegangan, 98,99% untuk arus, dan 98,98% untuk daya dengan MAPE di bawah 1,1% untuk seluruh parameter. Pengujian variasi beban pada rentang 5 W hingga 100 W menunjukkan respons arus yang linier terhadap perubahan daya. Waktu respons pembaruan dashboard rata-rata 2,09 detik dan komunikasi WebSocket mencapai message delivery rate rata-rata 98,73% hingga jarak 20 meter. Sistem ENERGIKU terbukti mampu memantau konsumsi energi listrik rumah tangga secara akurat, andal, dan real-time.

Kata Kunci—Dashboard Web, ENERGIKU, ESP32, Internet of Things, Monitoring Energi, PZEM-004T, Real-time, WebSocket

DOI: 10.22441/jte.2026.v17i3.006

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan fundamental masyarakat modern, dan sektor rumah tangga menjadi salah satu konsumen terbesarnya. Pertumbuhan jumlah perangkat elektronik, urbanisasi, dan perubahan gaya hidup menyebabkan permintaan energi listrik rumah tangga terus meningkat dari tahun ke tahun, sehingga pengelolaan konsumsi dari sisi permintaan (demand side management) menjadi semakin penting untuk menjaga keandalan dan efisiensi sistem tenaga listrik [1], [2].

Permasalahan mendasar pada sektor rumah tangga adalah rendahnya visibilitas konsumsi energi. Meteran listrik konvensional hanya menyajikan angka akumulatif tanpa rincian pola pemakaian per jam, per hari, atau per perangkat, sehingga pengguna kesulitan mengidentifikasi sumber

pemborosan dan mengambil keputusan penghematan yang tepat [3], [4]. Beberapa studi terkait smart meter menunjukkan bahwa penyediaan umpan balik konsumsi yang rinci dan tepat waktu merupakan prasyarat perubahan perilaku hemat energi [5], [6].

Perkembangan smart energy meter memperlihatkan pergeseran dari pengukuran akumulatif menuju pemantauan multivariabel yang rinci. Viciano dkk. mengembangkan OpenZmeter, smart meter sumber terbuka berbiaya rendah yang sekaligus berfungsi sebagai penganalisis kualitas daya [5]. Sayed dkk. merancang smart meter modular sumber terbuka yang menampilkan profil konsumsi melalui situs web pemantauan energi rumah [4]. Ahmed dkk. menunjukkan bahwa sistem distribusi rumah tangga pintar berbasis IoT dapat dibangun dengan biaya efektif menggunakan sensor komersial dan menampilkan data secara lokal maupun jarak jauh [6].

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) membuka peluang menghadirkan kemampuan pemantauan tersebut dengan biaya terjangkau. IoT memungkinkan perangkat sensor, pengolah data, dan antarmuka pengguna saling terhubung melalui jaringan sehingga informasi konsumsi dapat diakses dari mana saja secara real-time [2], [7]. Saleem dkk. mengkaji secara komprehensif teknologi, arsitektur, dan purwarupa IoT untuk jaringan listrik pintar yang umumnya diorganisasikan dalam tiga lapisan, yaitu lapisan persepsi, lapisan jaringan, dan lapisan aplikasi [2]. Pada sisi perangkat keras, mikrokontroler ESP32 dengan prosesor dual-core Xtensa LX6 hingga 240 MHz dan konektivitas WiFi 802.11 b/g/n terintegrasi telah terbukti andal sebagai platform IoT berbiaya rendah [8], [9], [10]. Sensor PZEM-004T v3.0 mampu mengukur enam parameter kelistrikan (tegangan, arus, daya aktif, energi kumulatif, frekuensi, dan faktor daya) sekaligus dengan akurasi pabrikan 0,5% melalui antarmuka UART TTL berprotokol Modbus-RTU [11]. Varela-Aldás dkk. memvalidasi pembacaan PZEM-004T terhadap monitor energi komersial selama tujuh hari berturut-turut dan memperoleh kesalahan relatif di bawah 3% untuk daya aktif, menegaskan kelayakan sensor ini untuk aplikasi pemantauan energi [12].

Sejumlah penelitian telah mengembangkan sistem monitoring energi berbasis IoT dengan berbagai arsitektur. Jabbar dkk. mengembangkan smart energy meter berbasis LoRaWAN untuk sistem fotovoltaiik mandiri [13]. Aghenta dan Iqbal merancang sistem SCADA IoT sumber terbuka menggunakan ESP32 dan platform Thingier.IO [14], sementara Chen dkk. mengintegrasikan analitik cloud pada

smart power meter untuk manajemen sisi permintaan pada rumah pintar [15]. Rabie dkk. menyoroti bahwa arsitektur berbasis cloud memberikan skalabilitas tinggi namun menghadirkan tantangan latensi dan ketergantungan konektivitas [16], sedangkan Gomes de Melo dkk. dan Ghosh membuktikan bahwa sistem IoT berbiaya rendah mampu melakukan pemantauan real-time pada jaringan pintar dengan keandalan yang memadai [17], [18].

Karakteristik utama sistem monitoring real-time adalah kemampuan menyajikan data terbaru kepada pengguna dengan latensi minimal. Pada aplikasi web konvensional, pembaruan data dilakukan melalui HTTP polling yang boros lebar pita karena klien harus mengirim permintaan berulang. WebSocket, yang distandardisasi dalam RFC 6455, menyediakan kanal komunikasi dua arah (full-duplex) di atas satu koneksi TCP sehingga server dapat mendorong data ke klien segera setelah tersedia [19]. Pimentel dan Nickerson menunjukkan bahwa WebSocket menghasilkan latensi yang jauh lebih rendah dibandingkan teknik polling untuk penyajian data real-time [20], menjadikannya pilihan yang tepat untuk dashboard pemantauan energi yang diperbarui setiap beberapa detik.

Kajian terhadap penelitian-penelitian tersebut mengungkap tiga celah penelitian. Pertama, sebagian besar sistem bergantung pada platform cloud pihak ketiga (ThingSpeak, Blynk, Thinger.IO) yang menimbulkan latensi tambahan, ketergantungan koneksi internet, dan potensi biaya berlangganan [12], [14], [16]. Kedua, validasi akurasi sensor terhadap instrumen acuan umumnya hanya dilaporkan sebagai persentase kesalahan sederhana tanpa analisis statistik yang komprehensif menggunakan metrik baku seperti MAE, MAPE, dan RMSE secara simultan untuk beberapa parameter [12], [15]. Ketiga, keandalan komunikasi IoT pada kondisi operasional nyata, seperti pengaruh jarak dan halangan fisik terhadap message delivery rate dan latensi, jarang dievaluasi secara kuantitatif [13], [17].

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini bertujuan merancang, mengimplementasikan, dan menguji sistem monitoring energi listrik rumah tangga bernama ENERGIKU dengan tiga kontribusi utama. Pertama, arsitektur pemantauan real-time berbasis WebSocket yang sepenuhnya berjalan lokal pada ESP32 tanpa ketergantungan layanan cloud berbayar, dilengkapi enam mode pemantauan (real-time, harian, mingguan, bulanan, tahunan, dan estimasi biaya). Kedua, validasi akurasi sensor PZEM-004T terhadap multimeter digital Sanwa RD700 menggunakan metrik statistik MAE, MAPE, dan RMSE secara simultan untuk tegangan, arus, dan daya. Ketiga, evaluasi kuantitatif keandalan komunikasi WebSocket melalui pengujian message delivery rate dan latensi pada berbagai jarak dan halangan.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun (Research and Development) yang terdiri atas lima tahapan, yaitu analisis kebutuhan sistem, perancangan perangkat keras dan lunak, implementasi, pengujian, dan analisis hasil. Pengujian dilakukan di lingkungan laboratorium pada suhu ruang (25°C) dan mengevaluasi empat aspek utama, yaitu

akurasi sensor, respons terhadap variasi beban, waktu respons real-time, dan keandalan komunikasi IoT.

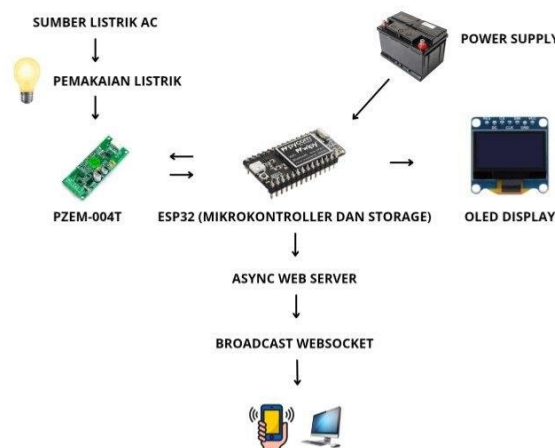
A. Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras sistem ENERGIKU terdiri atas komponen yang ditunjukkan pada Tabel 1. Sensor PZEM-004T dihubungkan ke ESP32 melalui komunikasi UART (GPIO16 sebagai RX dan GPIO17 sebagai TX) pada laju 9600 baud, sedangkan OLED display SSD1306 dihubungkan melalui antarmuka I2C.

Tabel 1. Komponen Perangkat Keras Sistem ENERGIKU

No	Komponen	Jumlah
1	ESP32 Dev Board	1
2	Sensor PZEM-004T v3	1
3	OLED Display 0,96" I2C SSD1306	1
4	Inverter DC-AC 150 W	1
5	Aki 12V 7Ah	1
6	Kabel dan Aksesori	Secukupnya

Diagram blok sistem ENERGIKU ditunjukkan pada Gambar 1. Sumber listrik AC dialirkan melalui sensor PZEM-004T untuk diukur parameternya, kemudian data dikirim ke ESP32 melalui UART. ESP32 memproses data, menampilkannya pada OLED display sebagai pemantauan lokal, menyimpannya ke Flash NVS agar tidak hilang saat perangkat dimatikan, serta mem-broadcast data ke dashboard web melalui WebSocket.

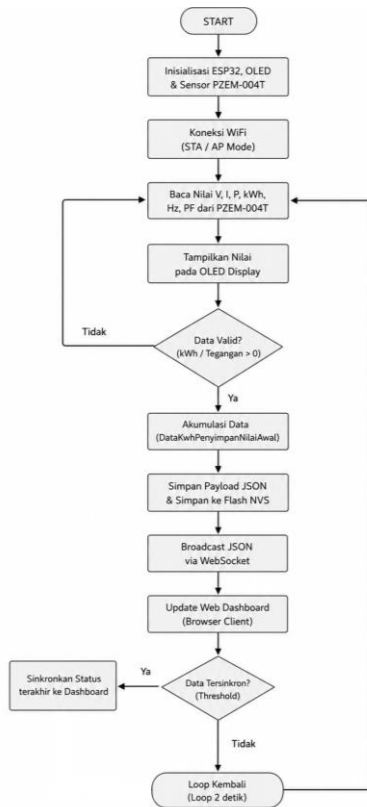


Gambar 1. Diagram Blok Sistem ENERGIKU.

B. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan framework Arduino dengan pustaka ESPAsyncWebServer untuk web server dan WebSocket. Alur kerja sistem ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem melakukan inisialisasi ESP32, OLED display, dan sensor PZEM-004T, kemudian melakukan koneksi WiFi. Sensor dibaca setiap 2 detik dan data divalidasi untuk menolak pembacaan tidak wajar. Data yang valid diakumulasi pada basis waktu harian, mingguan, bulanan, dan tahunan, disimpan ke Flash NVS, dan disusun menjadi payload JSON untuk di-broadcast ke seluruh klien yang

terhubung melalui WebSocket. Klien menerima data dan memperbarui tampilan dashboard secara otomatis.



Gambar 2. Diagram Alir Sistem ENERGIKU.

C. Metrik Analisis Akurasi

Evaluasi akurasi instrumen pengukuran menggunakan tiga metrik statistik standar. Mean Absolute Error (MAE) merepresentasikan rata-rata besaran kesalahan absolut [22], Root Mean Square Error (RMSE) memberikan bobot lebih besar pada kesalahan bernilai besar sehingga sensitif terhadap pencilan [21], dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) menyatakan kesalahan relatif dalam persen sehingga memudahkan perbandingan antarparameter yang berbeda satuan. Chai dan Draxler menganjurkan pelaporan kombinasi metrik tersebut karena masing-masing menggambarkan aspek kesalahan yang berbeda [21]. Persamaan (1), (2), dan (3) menunjukkan rumus ketiga metrik tersebut.

$$MAE = (1/n) \sum |y_i - \hat{y}_i| \quad (1)$$

$$MAPE = (100\%/n) \sum |(y_i - \hat{y}_i) / y_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{(1/n) \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

dengan y_i adalah nilai acuan dari instrumen referensi, $\hat{y}_i$ adalah nilai pembacaan sistem yang diuji, dan n adalah jumlah titik pengukuran. Tingkat akurasi dihitung sebagai Accuracy = 100% – MAPE.

D. Skenario Pengujian

Terdapat empat skenario pengujian yang dilaksanakan pada penelitian ini. Pengujian akurasi sensor membandingkan

pembacaan PZEM-004T dengan multimeter digital Sanwa RD700 pada sepuluh titik pengukuran berpasangan untuk parameter tegangan dan arus, serta terhadap daya referensi yang dihitung dari kedua parameter tersebut. Pengujian variasi beban dilakukan terhadap lima jenis beban listrik dengan daya berbeda pada rentang 5 W hingga 100 W, masing-masing dengan tiga kali pengulangan, untuk mengevaluasi linearitas respons sensor. Pengujian waktu respons mengukur selang waktu antara pembacaan sensor pada sisi ESP32 dan pembaruan tampilan pada dashboard klien sebanyak sepuluh kali percobaan. Pengujian keandalan komunikasi IoT mengukur message delivery rate dan round-trip time (RTT) komunikasi WebSocket pada lima variasi jarak, yaitu 1 m, 5 m, 10 m, 15 m dengan satu halangan tembok, dan 20 m dengan dua halangan tembok, masing-masing dengan pengiriman 300 pesan aplikasi.

E. Prosedur Pengujian Akurasi Daya

Instrumen acuan yang digunakan adalah multimeter digital Sanwa RD700. Perlu ditegaskan bahwa Sanwa RD700 merupakan multimeter true-RMS yang mengukur tegangan AC dan arus AC secara langsung, tetapi tidak menyediakan pengukuran daya aktif maupun faktor daya secara langsung. Oleh karena itu, pengujian akurasi tegangan dan arus dilakukan dengan pengukuran berpasangan (paired measurement), yaitu pembacaan PZEM-004T dan Sanwa RD700 dicatat secara bersamaan pada titik yang sama pada rangkaian uji.

Untuk pengujian akurasi daya, karena Sanwa RD700 tidak mengukur daya aktif secara langsung, daya referensi dihitung sebagai $P_{ref} = V_{Sanwa} \times I_{Sanwa} \times \cos\phi$, dengan $\cos\phi$ diasumsikan sama dengan 1 karena beban uji yang digunakan berupa lampu pijar dan pemanas resistif murni. Asumsi ini didukung oleh hasil pengukuran faktor daya oleh PZEM-004T pada Tabel 6 yang berada di rentang 0,96–0,98. Dengan demikian, pengujian ini mengevaluasi akurasi pengukuran daya pada beban yang mendekati resistif murni. Untuk pengujian daya pada beban induktif atau kapasitif, penggunaan wattmeter yang mengukur daya aktif secara langsung (mis. HIOKI CM3286) direkomendasikan pada penelitian lanjutan.

F. Prosedur Pengujian Keandalan Komunikasi

Pengujian keandalan komunikasi diukur pada tingkat pesan aplikasi, bukan pada tingkat paket jaringan (packet) atau frame WebSocket. Meskipun WebSocket berjalan di atas TCP yang memiliki mekanisme retransmisi dan pengiriman berurutan sehingga secara teoretis tidak terjadi kehilangan paket pada tingkat transport, kehilangan pesan aplikasi tetap dapat terjadi akibat pemutusan koneksi WebSocket (mis. karena timeout, kegagalan handshake, atau kualitas sinyal yang buruk). Oleh karena itu, metrik yang digunakan pada penelitian ini adalah message delivery rate, yaitu perbandingan jumlah pesan JSON yang berhasil diterima klien terhadap jumlah pesan yang dikirim server dalam periode pengujian.

Setiap pesan aplikasi diberi nomor urut (sequence number) monotonik pada sisi server. Klien mencatat sequence number pesan yang diterima; pesan yang tidak diterima dalam jendela

waktu tertentu (mis. 3 detik) dianggap hilang. Jumlah pesan yang direncanakan pada setiap sesi pengujian adalah 300 pesan yang dikirim dengan interval 2 detik sesuai interval pembacaan sensor.

Latensi yang dilaporkan pada penelitian ini adalah round-trip time (RTT), bukan latensi satu arah. RTT diukur dengan mekanisme ping-pong pada WebSocket, yaitu klien mengirim pesan ping berisi cap waktu (timestamp) ke server, server segera membalasnya dengan pesan pong yang berisi cap waktu yang sama, dan klien menghitung selisih antara waktu penerimaan pong dan waktu pengiriman ping. Pengukuran satu arah tidak dilakukan karena membutuhkan sinkronisasi clock antara server dan klien yang di luar cakupan penelitian ini. RTT dilaporkan sebagai rata-rata dari 100 pengukuran ping-pong berturut-turut pada setiap titik pengujian.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan pembacaan sistem ENERGIKU (sensor PZEM-004T) terhadap multimeter digital Sanwa RD700 sebagai instrumen acuan. Hasil pengujian akurasi tegangan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Akurasi Tegangan

No	Sanwa RD700 (V)	ENERGIKU (V)	Error (%)
1	218,5	219,2	0,32
2	220,2	220,7	0,23
3	221,8	222,8	0,45
4	219,4	220,2	0,36
5	222,5	221,9	0,27
6	217,9	218,5	0,28
7	220,8	220,0	0,36
8	223,1	224,0	0,40
9	219,9	218,8	0,50
10	221,3	222,1	0,36

$MAE = 0,7800\text{ V}$; $MAPE = 0,35\%$; $RMSE = 0,8000\text{ V}$; $Akurasi = 99,65\%$

Berdasarkan Tabel 2, pengukuran tegangan memiliki tingkat kesalahan yang sangat kecil dengan MAPE sebesar 0,35% dan akurasi mencapai 99,65%. Nilai RMSE sebesar 0,800 V yang hampir sama dengan nilai MAE-nya menunjukkan deviasi pengukuran tersebar merata tanpa pencilan besar, konsisten dengan spesifikasi akurasi pabrikan sensor sebesar 0,5%. Hasil pengujian akurasi arus ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Akurasi Arus

No	Sanwa RD700 (A)	ENERGIKU (A)	Error (%)
1	0,045	0,046	2,22
2	0,091	0,092	1,10
3	0,136	0,135	0,74
4	0,181	0,183	1,10
5	0,227	0,225	0,88

No	Sanwa RD700 (A)	ENERGIKU (A)	Error (%)
6	0,272	0,274	0,74
7	0,318	0,316	0,63
8	0,363	0,367	1,10
9	0,409	0,407	0,49
10	0,454	0,449	1,10

$MAE = 0,0022\text{ A}$; $MAPE = 1,01\%$; $RMSE = 0,0025\text{ A}$; $Akurasi = 98,99\%$

Berdasarkan Tabel 3, pengukuran arus menunjukkan MAPE sebesar 1,01% dengan akurasi 98,99%. Kesalahan relatif arus sedikit lebih besar dibandingkan tegangan karena pada nilai arus kecil, resolusi pengukuran 0,001 A menjadi signifikan terhadap besaran yang diukur, sehingga kesalahan pembulatan berkontribusi lebih besar terhadap kesalahan relatif. Meskipun demikian, tingkat akurasi tersebut masih memenuhi kebutuhan monitoring energi rumah tangga. Hasil pengujian akurasi daya ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Akurasi Daya (Beban Resistif)

No	P _{ref} = V×I (W)	ENERGIKU (W)	Error (%)
1	9,8	9,9	1,02
2	19,9	20,2	1,51
3	30,2	30,6	1,32
4	40,1	40,5	1,00
5	50,5	49,8	1,39
6	60,3	60,7	0,66
7	70,1	69,5	0,86
8	80,4	79,7	0,87
9	90,2	90,9	0,78
10	99,8	100,6	0,80

$MAE = 0,5100\text{ W}$; $MAPE = 1,02\%$; $RMSE = 0,5523\text{ W}$; $Akurasi = 98,98\%$

Pengujian daya pada Tabel 4 menghasilkan MAPE sebesar 1,02% dengan akurasi 98,98%. Kesalahan daya merupakan kombinasi kesalahan tegangan dan arus karena daya aktif dihitung dari perkalian keduanya dengan faktor daya. Rekapitulasi statistik akurasi ketiga parameter ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Statistik Akurasi Ketiga Parameter

Parameter	MAE	MAPE (%)	Akurasi (%)
Tegangan (V)	0,7800	0,35	99,65
Arus (A)	0,0022	1,01	98,99
Daya (W)	0,5100	1,02	98,98
Rata-rata	—	0,79	99,21

Berdasarkan Tabel 5, sistem ENERGIKU mencapai akurasi rata-rata 99,21% dengan MAPE rata-rata 0,79% untuk ketiga parameter. Capaian ini sebanding dengan hasil validasi Varela-Aldás dkk. yang memperoleh kesalahan relatif di bawah 3% pada pengujian PZEM-004T terhadap monitor energi komersial [12], dan membuktikan bahwa sensor tersebut layak digunakan sebagai basis alat ukur konsumsi energi listrik rumah tangga.

B. Pengujian Variasi Beban

Pengujian variasi beban dilakukan untuk mengevaluasi respons sistem terhadap perubahan daya. Hasil pengukuran pada lima jenis beban ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Variasi Beban

Jenis Beban	V (Volt)	I (Ampere)	P (Watt)	PF
Lampu LED 5 W	221,6	0,023	5,0	0,98
Lampu LED 10 W	219,4	0,046	10,2	0,97
Lampu LED 15 W + Kipas	219,2	0,162	35,6	0,96
Setrika mini 60 W	221,7	0,267	59,2	0,96
Solder 100 W	219,7	0,442	97,2	0,96

Berdasarkan Tabel 6, nilai arus meningkat secara linier seiring bertambahnya daya beban, sesuai dengan hubungan $I = P/V$ pada tegangan yang relatif konstan. Faktor daya yang terukur berada pada rentang 0,96–0,98, menunjukkan karakteristik beban resistif yang dominan pada beban uji. Konsistensi hubungan arus dan daya di seluruh rentang pengujian membuktikan sensor merespons perubahan beban secara akurat dan linier.

C. Pengujian Waktu Respons

Pengujian waktu respons mengukur kecepatan pembaruan data pada dashboard. Dari sepuluh percobaan, diperoleh waktu respons rata-rata sebesar 2,09 detik dengan nilai minimum 1,94 detik dan maksimum 2,24 detik. Hasil lengkap ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Waktu Respons Dashboard

Percobaan	Waktu Respons (detik)
1	2,15
2	2,10
3	2,04
4	2,24
5	2,13
6	2,01
7	2,22
8	1,95
9	1,94
10	2,08
Rata-rata	2,09

Waktu respons yang konsisten pada kisaran 2 detik sesuai dengan interval pembacaan sensor yang ditetapkan pada firmware, dengan variasi maksimum hanya 0,3 detik. Konsistensi ini menunjukkan bahwa arsitektur WebSocket yang berjalan lokal mampu menyalurkan data tanpa keterlambatan berarti, berbeda dengan arsitektur berbasis cloud yang waktunya bergantung pada kualitas koneksi internet dan beban server pihak ketiga.

D. Pengujian Keandalan Komunikasi IoT

Pengujian keandalan komunikasi WebSocket dilakukan pada lima variasi jarak antara ESP32 dan perangkat klien, masing-masing mengirimkan 300 pesan aplikasi. Hasil pengukuran message delivery rate dan latensi ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Keandalan Komunikasi WebSocket

Jarak	Pesan Terkirim	Pesan Hilang	Delivery Rate (%)	RTT (ms)
1 m	300	0	100,00	58
5 m	300	1	99,67	74
10 m	300	2	99,33	132
15 m (1 tembok)	300	5	98,33	196
20 m (2 tembok)	300	11	96,33	271

Berdasarkan Tabel 8, message delivery rate menurun seiring bertambahnya jarak dan jumlah halangan, dari 100% pada jarak 1 meter menjadi 96,33% pada jarak 20 meter dengan dua halangan tembok. Rata-rata delivery rate keseluruhan sebesar 98,73% menunjukkan komunikasi WebSocket cukup andal untuk cakupan area rumah tangga pada umumnya. Latensi meningkat dari 58 ms menjadi 271 ms seiring bertambahnya jarak akibat pelemahan sinyal WiFi oleh jarak dan penghalang fisik, namun nilai tersebut masih jauh di bawah interval pembaruan 2 detik sehingga tidak memengaruhi pengalaman pemantauan real-time.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring energi listrik rumah tangga berbasis IoT bernama ENERGIKU menggunakan sensor PZEM-004T dan mikrokontroler ESP32 dengan dashboard web real-time berbasis WebSocket yang sepenuhnya berjalan lokal. Sistem mencapai akurasi rata-rata 99,21% terhadap multimeter digital Sanwa RD700 dengan MAPE di bawah 1,1% untuk seluruh parameter, waktu respons pembaruan dashboard rata-rata 2,09 detik, serta message delivery rate rata-rata 98,73% pada jarak hingga 20 meter. Ketiga hasil tersebut menjawab tujuan penelitian dan membuktikan bahwa arsitektur tanpa cloud yang diusulkan mampu memberikan pemantauan yang akurat, andal, dan real-time. Penelitian selanjutnya disarankan menguji sistem pada beban induktif dan kapasitif, melakukan pengujian stabilitas jangka panjang, serta mengintegrasikan analisis prediktif berbasis machine learning untuk klasifikasi pola konsumsi energi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Hussain, N. Javaid, S. Iqbal, Q. Hasan, K. Aurangzeb, and M. Alhussein, "An Efficient Demand Side Management System with a New Optimized Home Energy Management Controller in Smart Grid," *Energies*, vol. 11, no. 1, p. 190, 2018, doi: 10.3390/en11010190.
- [2] Y. Saleem, N. Crespi, M. H. Rehmani, and R. Copeland, "Internet of Things-Aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 62962–63003, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913984.

- [3] K. Luechaponthara and A. Vijayalakshmi, "IoT Based Application for Monitoring Electricity Power Consumption in Home Appliances," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 9, no. 6, pp. 4988–4992, 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i6.pp4988-4992.
- [4] S. Sayed, T. Hussain, A. Gastli, and M. Benammar, "Design and Realization of an Open-Source and Modular Smart Meter," *Energy Science & Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 1405–1422, 2019, doi: 10.1002/ese3.361.
- [5] E. Viciano, A. Alcayde, F. G. Montoya, R. Baños, F. M. Arrabal-Campos, A. Zapata-Sierra, and F. Manzano-Agugliaro, "OpenZmeter: An Efficient Low-Cost Energy Smart Meter and Power Quality Analyzer," *Sustainability*, vol. 10, no. 11, p. 4038, 2018, doi: 10.3390/su10114038.
- [6] M. M. Ahmed, M. O. Qays, A. Abu-Siada, S. M. Muyeen, and M. L. Hossain, "Cost-Effective Design of IoT-Based Smart Household Distribution System," *Designs*, vol. 5, no. 3, p. 55, 2021, doi: 10.3390/designs5030055.
- [7] W. A. Jabbar, T. K. Kian, R. M. Ramli, S. N. Zubir, N. S. M. Zamrizaman, M. Balfaqih, V. Shepelev, and S. Alharbi, "Design and Fabrication of Smart Home with Internet of Things Enabled Automation System," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 144059–144074, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2942846.
- [8] A. Maier, A. Sharp, and Y. Vagapov, "Comparative Analysis and Practical Implementation of the ESP32 Microcontroller Module for the Internet of Things," in *Proc. 2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*, Wrexham, UK, 2017, pp. 143–148, doi: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.
- [9] M. Babiuch, P. Foltýnek, and P. Smutný, "Using the ESP32 Microcontroller for Data Processing," in *Proc. 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Kraków-Wieliczka, Poland, 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/CarpathianCC.2019.8765944.
- [10] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, Espressif Systems, Shanghai, China, 2023.
- [11] Peacefair, *PZEM-004T V3.0 Communication Module User Manual*, Peacefair Electronics, 2022.
- [12] J. Varela-Aldás, S. Silva, and G. Palacios-Navarro, "IoT-Based Alternating Current Electrical Parameters Monitoring System," *Energies*, vol. 15, no. 18, p. 6637, 2022, doi: 10.3390/en15186637.
- [13] W. A. Jabbar, S. Annathurai, T. A. A. Rahim, and M. F. M. Fauzi, "Smart Energy Meter Based on a Long-Range Wide-Area Network for a Stand-Alone Photovoltaic System," *Expert Systems with Applications*, vol. 197, p. 116703, 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.116703.
- [14] L. O. Aghenta and M. T. Iqbal, "Low-Cost, Open Source IoT-Based SCADA System Design Using Thingier.IO and ESP32 Thing," *Electronics*, vol. 8, no. 8, p. 822, 2019, doi: 10.3390/electronics8080822.
- [15] Y.-Y. Chen, Y.-H. Lin, C.-C. Kung, M.-H. Chung, and I.-H. Yen, "Design and Implementation of Cloud Analytics-Assisted Smart Power Meters Considering Advanced Artificial Intelligence as Edge Analytics in Demand-Side Management for Smart Homes," *Sensors*, vol. 19, no. 9, p. 2047, 2019, doi: 10.3390/s19092047.
- [16] A. H. Rabie, A. I. Saleh, and H. A. Ali, "Smart Electrical Grids Based on Cloud, IoT, and Big Data Technologies: State of the Art," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 12, pp. 9449–9480, 2021, doi: 10.1007/s12652-020-02685-6.
- [17] S. Ghosh, "Neuro-Fuzzy-Based IoT Assisted Power Monitoring System for Smart Grid," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 168587–168599, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137812.
- [18] G. C. Gomes de Melo, I. C. Torres, Í. B. Q. de Araújo, D. B. Brito, and E. de A. Barboza, "A Low-Cost IoT System for Real-Time Monitoring of Climatic Variables and Photovoltaic Generation for Smart Grid Application," *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 3293, 2021, doi: 10.3390/s21093293.
- [19] I. Fette and A. Melnikov, "The WebSocket Protocol," RFC 6455, Internet Engineering Task Force (IETF), Dec. 2011, doi: 10.17487/RFC6455.
- [20] V. Pimentel and B. G. Nickerson, "Communicating and Displaying Real-Time Data with WebSocket," *IEEE Internet Computing*, vol. 16, no. 4, pp. 45–53, 2012, doi: 10.1109/MIC.2012.64.
- [21] T. Chai and R. R. Draxler, "Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)? – Arguments Against Avoiding RMSE in the Literature," *Geoscientific Model Development*, vol. 7, no. 3, pp. 1247–1250, 2014, doi: 10.5194/gmd-7-1247-2014.
- [22] C. J. Willmott and K. Matsuura, "Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in Assessing Average Model Performance," *Climate Research*, vol. 30, no. 1, pp. 79–82, 2005, doi: 10.3354/cr030079.