KAMPUS AKADEMIK PUBLISING
Jurnal Sains Student Research (JSSR)
Vol.4, No.6 Desember 2026
e-ISSN: 3025-9851, p-ISSN : 3025-986X, Hal 518-532
DOI : https://doi.org/10.61722/jssr.v4i6.12953

Sistem Monitoring dan Analisis Konsumsi Daya Treadmill Berbasis ESP32 Pada Gedung Vokafit K1 UNESA GYM

Mochammad Ilham Nasa'i[1*], Ayusta Lukita Wardani[2], Fithrotul Irda Amaliah[3], Alfarid Hendro Yuwono[4]
[1-4] Program Studi D4 Teknik Elektro, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia
*Penulis Korespondensi: mochilham.22055@mhs.unesa.ac.id

Abstract. *The Vokafit K1 UNESA GYM building frequently experiences power trips whenever four treadmill units are operated simultaneously, while facility managers lack tools to monitor loads or manage energy consumption preventively. This study designs and tests an Internet of Things (IoT)-based power monitoring and analysis system capable of monitoring four treadmill load points simultaneously while presenting real-time operational cost estimates. The system is built with a Master-Slave architecture: an ESP32 microcontroller reads four PZEM-016 sensors via the Modbus RTU (RS485) protocol, converts consumed energy (kWh) into cost estimates based on the applicable Basic Electricity Tariff (TDL), sends data to the ThingSpeak platform via the MQTT protocol, and backs up data to a MicroSD module when the internet connection is lost. Test results show that the PZEM-016 sensors have voltage, current, and active power deviations below 1% compared with a True RMS multimeter; data on the ThingSpeak dashboard and MicroSD are consistent with 0% deviation; and the cost calculation algorithm in the ESP32 firmware has a maximum error of 0.05%. Cumulative testing over 15 working days recorded net energy consumption of 113.89 kWh with a total operational cost of Rp193,559.47. This study also identifies inrush current as the cause of MCB tripping when several treadmills are turned on simultaneously at high power. Overall, the developed system is proven accurate, reliable for long-term monitoring, and suitable as a basis for energy cost transparency and electrical load management in the Vokafit K1 UNESA GYM building.*
Keywords: *ESP32; PZEM-016; ThingSpeak; Energy monitoring; Internet of Things; Cost analysis; Multi-Control*

Abstrak. *Gedung Vokafit K1 UNESA GYM sering mengalami pemutusan daya (trip) setiap kali empat unit treadmill dioperasikan secara bersamaan, sementara pengelola fasilitas tidak memiliki alat untuk memantau beban maupun mengelola konsumsi energi secara preventif. Penelitian ini merancang dan menguji sistem pemantauan dan analisis daya berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu memantau empat titik beban treadmill secara simultan sekaligus menyajikan estimasi biaya operasional secara waktu nyata. Sistem dibangun dengan arsitektur Master-Slave: mikrokontroler ESP32 membaca empat sensor PZEM-016 melalui protokol Modbus RTU (RS485), mengonversi energi yang terpakai (kWh) menjadi estimasi biaya berdasarkan Tarif Dasar Listrik (TDL) yang berlaku, mengirimkan data ke platform ThingSpeak melalui protokol MQTT, dan mencadangkan data ke modul MicroSD ketika koneksi internet terputus. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor PZEM-016 memiliki deviasi tegangan, arus, dan daya aktif di bawah 1% dibandingkan dengan multimeter True RMS; data pada dasbor ThingSpeak dan MicroSD konsisten dengan deviasi 0%; dan algoritma perhitungan biaya pada firmware ESP32 memiliki galat maksimum 0,05%. Pengujian kumulatif selama 15 hari kerja mencatat konsumsi energi neto sebesar 113,89 kWh dengan total biaya operasional Rp193.559,47. Penelitian ini juga mengidentifikasi arus inrush sebagai penyebab MCB trip ketika beberapa treadmill dinyalakan bersamaan pada daya tinggi. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan terbukti akurat, andal untuk pemantauan jangka panjang, dan layak dijadikan dasar transparansi biaya energi serta pengelolaan beban listrik di gedung Vokafit K1 UNESA GYM.*
Kata kunci: *ESP32; PZEM-016; ThingSpeak; Pemantauan energi; Internet of Things; Analisis biaya; Multi-Kontrol*

1. LATAR BELAKANG

Pusat kebugaran seperti gedung Vokafit K1 UNESA GYM berperan penting dalam menunjang gaya hidup sehat di lingkungan kampus, dan di dalamnya peralatan kardio

Naskah Masuk:01 Oktober 2026; Revisi: 02 Oktober 2026; Diterima: 04 Oktober 2026; Terbit: 07 Oktober 2026

seperti treadmill merupakan beban listrik yang paling dominan karena digunakan secara intensif dan terus-menerus. Tanpa pengelolaan daya yang memadai, fasilitas semacam ini rentan terhadap gangguan operasional, termasuk kegagalan sistem kelistrikan. Kondisi ini benar-benar terjadi di Vokafit K1 UNESA GYM, yang kerap mengalami pemutusan daya pada jaringan internalnya setiap kali empat unit treadmill dioperasikan secara bersamaan atau hampir bersamaan. Kejadian ini mengindikasikan adanya beban lebih (overload) atau lonjakan arus inrush yang melampaui kapasitas pemutus sirkuit (MCB) terpasang, sementara pengelola gedung tidak memiliki visibilitas terhadap data kelistrikan maupun sarana untuk melakukan manajemen beban secara preventif.

Pemanfaatan Internet of Things (IoT) untuk keperluan pemantauan telah banyak dieksplorasi dalam berbagai konteks, termasuk pada peralatan olahraga. Sistem berbasis ESP32, misalnya, telah diterapkan untuk memantau kondisi fisiologis pengguna treadmill dan sepeda statis, seperti detak jantung dan parameter tubuh lainnya (Shiddiq & Nugraha, 2022; Sholihin dkk., 2024). Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut berfokus pada kondisi pengguna, bukan pada konsumsi daya listrik peralatan gym itu sendiri, sehingga belum menjawab persoalan stabilitas jaringan listrik yang dihadapi pengelola fasilitas.

Di sisi lain, penelitian tentang pemantauan konsumsi daya listrik berbasis IoT telah menghasilkan temuan yang relevan untuk diadaptasi. Kombinasi sensor PZEM dan mikrokontroler ESP32 terbukti efektif untuk mengukur tegangan, arus, daya, dan energi pada beban AC, sekaligus mengirimkan hasil pengukuran ke platform cloud seperti ThingSpeak (Asmida & Yurika, 2024). Kemampuan ThingSpeak sebagai media visualisasi data sensor juga telah ditunjukkan pada aplikasi pemantauan iklim mikro rumah kaca, yang mampu menyajikan data dalam bentuk grafik yang informatif dan mudah diakses (Kurniawan dkk., 2021). Motor induksi satu fasa yang menggerakkan treadmill pun diketahui menarik arus awal yang besar saat start, yang berpotensi membebani jaringan listrik secara signifikan apabila terjadi serentak pada beberapa unit (Fartino dkk., 2020).

Berdasarkan telaah tersebut, tampak adanya celah penelitian: belum tersedia sistem yang dapat memantau konsumsi daya listrik beberapa treadmill sekaligus (pemantauan multi-titik) pada satu platform dan pada saat yang sama menyediakan analisis biaya

energi secara waktu nyata untuk mendukung manajemen beban yang preventif. Penelitian ini mengusulkan solusi atas celah tersebut dengan membangun sistem pemantauan multi-titik yang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pusat pengolahan dan pengiriman data, empat unit sensor PZEM-016 yang berkomunikasi melalui protokol Modbus RTU dengan konverter RS485 ke TTL, serta platform ThingSpeak sebagai media visualisasi tegangan, arus, daya, energi, dan estimasi biaya dalam Rupiah.

Sistem ini dirancang untuk mencapai dua tujuan utama: meningkatkan stabilitas operasional melalui deteksi dini beban lebih, dan meningkatkan efisiensi energi dengan menyediakan data konsumsi dan biaya yang transparan. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menguji akurasi pengukuran parameter kelistrikan (tegangan, arus, dan daya aktif) pada setiap treadmill; (2) mengembangkan firmware yang mengonversi data energi (kWh) menjadi estimasi biaya (Rupiah) dan menampilkannya secara waktu nyata pada dasbor ThingSpeak; (3) mengevaluasi keandalan sistem penyimpanan cadangan MicroSD sebagai mitigasi kegagalan koneksi internet; dan (4) memvalidasi akurasi sensor PZEM-016 dengan membandingkannya terhadap alat ukur standar yang telah dikalibrasi. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi pemantauan multi-titik empat beban treadmill beserta penyediaan analisis biaya operasional secara langsung dalam satu arsitektur IoT, sebuah pendekatan yang belum banyak dibahas dalam literatur terdahulu tentang pemantauan energi peralatan gym.

2. METODE PENELITIAN

Desain Penelitian dan Arsitektur Sistem

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental melalui pendekatan perancangan sistem tertanam (embedded system), yang memungkinkan kinerja perangkat diuji dan divalidasi langsung di lokasi pemasangan sebenarnya, yaitu gedung Vokafit K1 UNESA GYM. Perancangan dan pemrograman dilakukan di Laboratorium Teknik Elektro D4 UNESA, sedangkan pengujian lapangan dilaksanakan di gedung gym pada semester ganjil 2025/2026.

Sistem dibangun dengan arsitektur Master-Slave, di mana satu unit mikrokontroler ESP32 bertindak sebagai Master yang mengoordinasikan empat sensor daya PZEM-016 sebagai Slave. ESP32 dipilih sebagai unit kendali karena memiliki modul Wi-Fi internal,

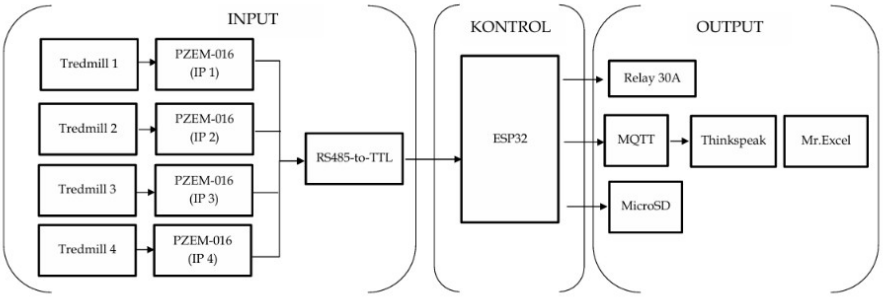
prosesor dual-core, dan dukungan pustaka komunikasi yang luas, sehingga sesuai sebagai pusat akuisisi data multi-titik untuk aplikasi IoT (Qays dkk., 2022; Putra dkk., 2024). Keempat sensor PZEM-016 dipasang langsung pada jalur daya AC masing-masing treadmill dan berkomunikasi dengan ESP32 melalui protokol Modbus RTU dengan konverter RS485 ke TTL, dengan alamat slave ID yang unik untuk setiap sensor (Syamsudin dkk., 2024; Susilo dkk., 2023). Protokol RS485 dipilih karena keandalannya dalam mendukung komunikasi multi-perangkat pada satu jalur bus, dengan jarak dan kecepatan transmisi yang memadai untuk aplikasi industri (Zagan & Găitan, 2022; Espinosa-Gavira dkk., 2024).

Data energi (kWh) yang terkumpul kemudian diolah oleh ESP32 untuk dikonversi menjadi estimasi biaya operasional (Rupiah) berdasarkan Tarif Dasar Listrik (TDL) yang berlaku (Irawan dkk., 2023; Teruna, 2021; Almira, 2024), menggunakan persamaan berikut.

$$E = P \times t \qquad (1)$$

$$Biaya\ (Rp) = Energi\ (kWh) \times TDL\ (Rp/kWh) \qquad (2)$$

Untuk menjamin keamanan data, sistem dilengkapi modul MicroSD Card yang berfungsi sebagai pencatat data (data logger) cadangan otomatis melalui protokol SPI ketika koneksi Wi-Fi terputus (Tirta dkk., 2024; Wahyuni dkk., 2023). Seluruh data kelistrikan dan hasil perhitungan biaya dikirim ke platform ThingSpeak melalui protokol MQTT (Hatem dkk., 2022), yang dipilih karena ringan dan hemat bandwidth. Arsitektur sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Pemantauan Konsumsi Daya Treadmill

Gambar 1 menunjukkan tiga modul fungsional utama sistem: Modul Masukan (empat treadmill, sensor PZEM-016, dan konverter RS485 ke TTL), Modul Kendali (ESP32 sebagai pengolah data dan penghitung biaya), dan Modul Keluaran (protokol MQTT, dasbor ThingSpeak, MicroSD Card, serta relay 30 A sebagai aktuator proteksi beban lebih). Sebagai proteksi tambahan pada tingkat perangkat keras, setiap jalur daya treadmill dilengkapi MCB satu fasa 16 A yang dipasang secara seri sebelum stopkontak dan sensor PZEM-016.

Perhitungan Perancangan Sistem

Justifikasi teknis pemilihan rasio Current Transformer (CT) sensor dan rating MCB dihitung berdasarkan data daya nominal keempat unit treadmill di lapangan, yaitu tiga unit berdaya 2.200 W dan satu unit berdaya 2.400 W, dengan total daya terpasang 9.000 W. Arus nominal tertinggi dihitung menggunakan persamaan arus satu fasa berikut.

$$I_Nominal = P / (V \times PF) \qquad (3)$$

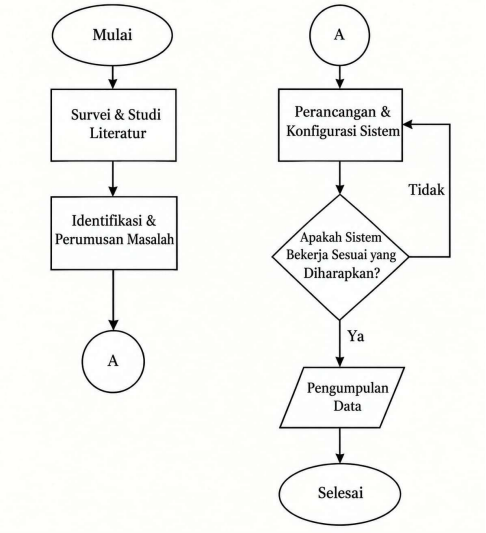
Dengan daya aktif tertinggi P = 2.400 W, tegangan operasi V = 220 V, dan faktor daya yang diasumsikan PF = 0,85, diperoleh arus nominal sebesar 2.400/(220×0,85) = 12,83 A. Nilai ini digunakan untuk memvalidasi bahwa sensor PZEM-016, dengan kapasitas pengukuran arus maksimum 100 A, memiliki margin keamanan yang sangat memadai untuk memantau beban treadmill, termasuk mengakomodasi arus inrush awal. Nilai arus nominal yang sama sebesar 12,83 A juga digunakan untuk memvalidasi pemilihan MCB satu fasa 16 A, yang memberikan margin keamanan yang cukup terhadap kondisi arus lebih berkelanjutan tanpa mudah trip akibat lonjakan arus sesaat yang lazim terjadi saat motor treadmill dinyalakan.

Kebutuhan daya sistem kendali (ESP32, empat sensor PZEM-016, dan konverter RS485 ke TTL) juga dihitung berdasarkan arus operasi maksimum setiap komponen pada 5 V, sehingga diperoleh kebutuhan arus total minimum sebesar 0,32 A. Dengan demikian, adaptor 5 V yang digunakan sebagai catu daya sistem kendali terkonfirmasi memiliki kapasitas yang cukup untuk menjaga komunikasi Modbus dan MQTT tetap stabil.

Prosedur dan Skenario Pengujian

Prosedur penelitian diawali dengan survei lapangan dan studi literatur untuk mengidentifikasi masalah trip dan kebutuhan pemantauan, dilanjutkan dengan

perancangan dan konfigurasi perangkat keras dan perangkat lunak, pengujian fungsional awal (debugging), pengumpulan data lapangan, dan terakhir analisis serta penarikan kesimpulan, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alur Prosedur Penelitian

Pengujian dilakukan melalui empat skenario utama. Pertama, pengujian akurasi sensor dilakukan dengan membandingkan pembacaan tegangan, arus, dan daya aktif PZEM-016 terhadap multimeter True RMS pada dua kondisi beban yang berbeda, yaitu beban linier berarus rendah (pengisi daya ponsel) dan beban nonlinier motor induksi (bor listrik), menggunakan persamaan galat berikut.

$$\%E = |(Data\ sensor - Data\ standar) / Data\ standar| \times 100\% \quad (4)$$

Kedua, pengujian sinkronisasi data dilakukan dengan membandingkan nilai parameter kelistrikan pada dasbor ThingSpeak terhadap data yang tersimpan pada MicroSD untuk menit yang sama. Ketiga, pengujian akurasi perhitungan biaya dilakukan dengan membandingkan biaya hasil perhitungan firmware ESP32 terhadap perhitungan manual berdasarkan TDL resmi, pada empat variasi data energi dan tarif. Keempat, pengujian stabilitas komunikasi dilakukan dengan mengevaluasi status koneksi, jumlah kegagalan pengiriman data, dan latensi pengiriman data MQTT ke ThingSpeak, pada empat percobaan representatif dalam periode pengujian 15 hari kerja (06.00–21.00 WIB), dengan interval pengiriman data setiap 60 detik.

Selain keempat skenario tersebut, dilakukan pula evaluasi terhadap akumulasi energi dan biaya operasional selama 15 hari kerja penuh, klasifikasi status treadmill (aktif/siaga) berdasarkan ambang daya aktif 50 W (Koerniawan dkk., 2024), serta analisis masalah arus inrush dan gangguan konektivitas Wi-Fi yang teridentifikasi selama pengujian lapangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Realisasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Perangkat keras sistem diintegrasikan sepenuhnya di gedung Vokafit K1 UNESA GYM dan dibagi menjadi tiga boks panel terpisah untuk mengisolasi jaringan tegangan tinggi dari rangkaian logika berarus rendah, seperti ditunjukkan pada Gambar 3: satu boks panel utama dari pelat besi (20×30×12 cm) yang memuat ESP32, modul MicroSD, dan konverter RS485 ke TTL, yang sekaligus berfungsi sebagai pelindung elektromagnetik; serta dua boks panel distribusi dari PVC (25×15×11,8 cm), masing-masing memuat dua sensor PZEM-016, satu modul relay 2 kanal, dua MCB 16 A, dan dua stopkontak untuk treadmill 1–2 dan 3–4. Pemisahan sistem menjadi dua panel distribusi bertujuan meminimalkan panjang kabel daya menuju beban sehingga mengurangi jatuh tegangan (voltage drop) di lapangan.



Gambar 3. Realisasi Boks Panel Sistem Pemantauan

Pada sisi perangkat lunak, firmware ESP32 dikembangkan menggunakan Arduino IDE dan mengintegrasikan komunikasi Modbus RTU, pengelolaan berkas MicroSD, protokol MQTT, serta sinkronisasi waktu melalui server NTP. Data dari keempat treadmill dipublikasikan ke tiga kanal ThingSpeak terpisah karena adanya batas delapan

field per kanal pada akun gratis: dua kanal pertama menampilkan grafik tegangan, arus, dan energi kumulatif untuk sepasang treadmill, sedangkan kanal ketiga menyajikan indikator numerik biaya operasional harian setiap unit berdasarkan TDL sebesar Rp1.699,53/kWh.

Perlu dicatat bahwa selama periode pengujian 15 hari terjadi kesalahan pelabelan pada dasbor ThingSpeak Kanal 1 dan 2, di mana grafik yang seharusnya menampilkan Daya Aktif (Watt) sempat berlabel Energi (kWh). Kesalahan ini murni persoalan tampilan (tata letak) dan telah diperbaiki setelah periode pengambilan data berakhir; data mentah pada MicroSD tidak terpengaruh oleh kesalahan ini dan tetap mencatat seluruh parameter secara lengkap dan akurat.

Akurasi Sensor PZEM-016 terhadap Alat Ukur Standar

Tabel 1. Perbandingan Nilai Sensor PZEM-016 dengan Alat Ukur Standar

Beban Uji	Parameter	PZEM-016	Alat Ukur Standar	Deviasi
Pengisi Daya Ponsel	Tegangan (V)	230,2	230,7	0,22%
	Arus (A)	0,105	0,105	0%
	Daya Aktif (W)	11,2	11,14	0,54%
Bor Listrik	Tegangan (V)	231,9	232,3	0,17%
	Arus (A)	0,419	0,419	0%
	Daya Aktif (W)	25,1	25,3	0,79%

Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai tegangan, arus, dan daya aktif yang dibaca oleh sensor PZEM-016 memiliki tingkat kesesuaian yang sangat tinggi dengan alat ukur standar. Pada pengujian beban pengisi daya ponsel, deviasi yang tercatat adalah 0,22% untuk tegangan, 0% untuk arus, dan 0,54% untuk daya aktif. Pada pengujian beban nonlinier menggunakan bor listrik, deviasi yang tercatat adalah 0,17% untuk tegangan, 0% untuk arus, dan 0,79% untuk daya aktif. Seluruh nilai deviasi tersebut jauh di bawah batas toleransi 1% alat ukur standar, yang membuktikan bahwa sensor PZEM-016 akurat dan layak digunakan dalam sistem pemantauan energi listrik, baik untuk beban linier maupun beban induktif dinamis.

Sinkronisasi Data antara Dasbor ThingSpeak dan MicroSD

Tabel 2. Perbandingan Nilai Dasbor ThingSpeak dengan MicroSD

Percobaan	Parameter	ThingSpeak	MicroSD	Deviasi
1	Tegangan (V)	231,50	231,5	0%
	Arus (A)	0,071	0,071	0%
	Daya Aktif (W)	6,80	6,8	0%
2	Tegangan (V)	230,60	230,6	0%
	Arus (A)	0,07	0,07	0%
	Daya Aktif (W)	6,80	6,8	0%

Berdasarkan Tabel 2, nilai tegangan, arus, dan daya aktif yang tersimpan pada dasbor ThingSpeak identik dengan nilai yang tercatat pada modul MicroSD, dengan deviasi 0% pada kedua percobaan. Perbedaan format angka nol desimal di belakang pada beberapa baris murni disebabkan oleh karakteristik visualisasi otomatis widget ThingSpeak dan tidak mengubah nilai substantif parameter fisis yang diukur. Hasil ini membuktikan bahwa algoritma parsing data string (pengemasan payload) yang dijalankan ESP32 beroperasi dengan keandalan tinggi, tanpa gejala kerusakan data akibat latensi jaringan, sehingga arsitektur pencatatan data redundan yang dirancang valid untuk menjaga ketersediaan data historis.

Akurasi Perhitungan Biaya

Tabel 3. Pengujian Akurasi Perhitungan Biaya

Percobaan	Energi (kWh)	TDL (Rp/kWh)	Biaya Sistem (Rp)	Biaya Manual (Rp)	Galat (%)
1	0,027	1.699,53	45,89	45,887	0,006%
2	0,012	1.800	21,61	21,60	0,05%
3	0,030	1.900	57,00	57,00	0%
4	0,027	1.980	53,46	53,46	0%

Tabel 3 menunjukkan hasil validasi algoritma konversi energi ke biaya pada firmware ESP32. Pada Percobaan 1, nilai energi 0,027 kWh pada TDL Rp1.699,53/kWh menghasilkan biaya sistem sebesar Rp45,89 dibandingkan biaya manual sebesar Rp45,887, dengan galat hanya 0,006%. Pada Percobaan 2, biaya sistem sebesar Rp21,61 dibandingkan biaya manual sebesar Rp21,60 menghasilkan galat 0,05% akibat pembulatan desimal pada tipe data float. Pada Percobaan 3 dan 4, selisih antara biaya sistem dan biaya manual adalah 0, sehingga galatnya 0%. Nilai galat maksimum sebesar 0,05% ini jauh di bawah ambang toleransi 1%, yang membuktikan bahwa algoritma

perhitungan biaya pada firmware ESP32 beroperasi dengan presisi dan dapat diandalkan untuk analisis biaya operasional.

Stabilitas Komunikasi MQTT

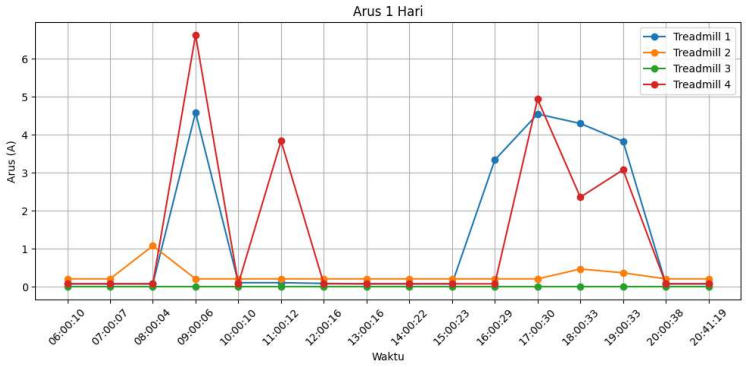
Tabel 4. Pengujian Stabilitas Komunikasi

Percobaan	Status Koneksi	Kegagalan Pengiriman Data	Latensi (ms)
1	Gagal Terhubung	Seluruh Data	13.000
2	Terhubung	Tidak Ada	20.000
3	Gagal Terhubung	Seluruh Data	11.270
4	Terhubung	Tidak Ada	20.430

Pengujian stabilitas komunikasi dilakukan selama 15 hari kerja dengan interval pengiriman data setiap 60 detik. Berdasarkan Tabel 4, dari empat percobaan yang mewakili kondisi lapangan, dua percobaan (1 dan 3) mengalami kegagalan koneksi akibat gangguan sinyal Wi-Fi, yang menyebabkan seluruh data pada menit tersebut gagal mencapai ketiga kanal ThingSpeak, dengan latensi 13.000 ms dan 11.270 ms. Pada dua percobaan lainnya (2 dan 4), koneksi berhasil dan seluruh data terkirim tanpa kegagalan, dengan latensi 20.000 ms dan 20.430 ms, sehingga diperoleh latensi rata-rata keseluruhan sebesar 16.175 ms. Selama koneksi gagal, sistem secara otomatis mengalihkan pencatatan ke modul MicroSD sehingga tidak ada data yang hilang secara permanen. Hasil ini menunjukkan bahwa protokol MQTT tetap tangguh dalam mengirimkan data setelah koneksi TCP/IP pulih, dan bahwa mekanisme fail-safe berbasis MicroSD secara efektif menjamin integritas data meskipun jaringan mengalami gangguan.

Akumulasi Konsumsi Energi dan Biaya Operasional (15 Hari)

Selama 15 hari kerja tanpa henti di gedung Vokafit K1 UNESA GYM, sistem berhasil mencatat parameter kelistrikan keempat treadmill secara kontinu. Gambar 4 menunjukkan pola arus keempat unit selama satu hari pengujian, yang memperlihatkan karakteristik beban intermiten dengan pola yang berulang setiap hari: arus melonjak pada jam operasional gym yang ramai (06.00–21.00 WIB) dan menurun mendekati 0 A ketika fasilitas kosong.



Gambar 4. Grafik Arus Keempat Treadmill selama Satu Hari Pengujian

Tabel 5. Rekapitulasi Akumulasi Energi dan Biaya Operasional (15 Hari)

ID Treadmill	Total Energi (kWh)	Rata-rata/Hari (kWh)	Total Biaya (Rp)
Treadmill 1	53,44	3,56	90.822,88
Treadmill 2	10,70	0,71	18.184,97
Treadmill 3	2,23	0,15	3.789,95
Treadmill 4	47,52	3,17	80.761,67
Total	113,89	7,59	193.559,47

Nilai total pada Tabel 5 merepresentasikan konsumsi energi neto, yaitu selisih antara nilai kumulatif pada akhir pengujian dan nilai kumulatif pada awal pengujian, yang dikoreksi dengan akumulasi bawaan dari sesi operasional sebelumnya pada setiap unit (1,30 kWh untuk Treadmill 1; 0,25 kWh untuk Treadmill 2; 0 kWh untuk Treadmill 3; dan 1,64 kWh untuk Treadmill 4). Data menunjukkan adanya disparitas intensitas penggunaan yang signifikan antarunit: Treadmill 1 mencatat konsumsi tertinggi sebesar 53,44 kWh (3,56 kWh/hari), diikuti Treadmill 4 sebesar 47,52 kWh (3,17 kWh/hari), sedangkan Treadmill 2 dan Treadmill 3 hanya mengonsumsi masing-masing 10,70 kWh dan 2,23 kWh pada periode yang sama. Pola ini mengindikasikan kecenderungan pengguna gym untuk memilih unit treadmill tertentu, yang kemungkinan dipengaruhi oleh kenyamanan tata letak fisik peralatan di dalam ruangan.

Secara total, keempat treadmill mengonsumsi energi neto sebesar 113,89 kWh dengan total biaya operasional Rp193.559,47, berdasarkan TDL kategori bisnis sebesar Rp1.699,53/kWh. Sebagai catatan, nilai total akumulasi pada berkas log MicroSD (Rp193.634,25) dan pada dasbor ThingSpeak Kanal 3 (Rp192.844,05) tidak identik dengan perhitungan manual di atas, tetapi selisihnya secara proporsional sangat kecil (kurang dari 0,1%). Selisih ini disebabkan oleh akumulasi galat pembulatan floating-point

pada penjumlahan inkremental per detik di MicroSD, serta perbedaan latensi pencatatan antara media penyimpanan lokal dan pengiriman ke cloud. Karena selisih ini tidak mengubah kesimpulan substantif penelitian, Tabel 5 menggunakan perhitungan manual berdasarkan selisih kWh neto sebagai acuan utama.

Analisis Arus Inrush dan Keandalan Proteksi MCB versus Relay

Selama periode pengujian, tercatat satu kejadian trip pada MCB utama panel distribusi Vokafit K1 GYM, tepatnya pukul 18.26 WIB, ketika Treadmill 1, 2, dan 4 dinyalakan secara bersamaan pada kecepatan tinggi oleh pengguna gym. Motor induksi penggerak sabuk treadmill membutuhkan torsi awal yang tinggi untuk mengatasi gesekan statis, sehingga arus inrush yang ditarik dapat mencapai 4–6 kali arus nominal pada kondisi berjalan stabil. Akumulasi lonjakan arus transien dari ketiga motor yang start bersamaan tersebut melampaui kurva proteksi MCB Tipe C 16 A pada panel utama, menyebabkan MCB trip dan memutus seluruh suplai listrik di area tersebut, termasuk catu daya sistem pemantauan. Sistem baru kembali mengirim data secara normal pada pukul 18.27 WIB, setelah tuas MCB di-reset secara manual.

Modul relay 2 kanal, yang dikonfigurasi dengan ambang proteksi 16 A dan fungsi timer interupsi 100 ms, ternyata kurang responsif untuk berperan sebagai proteksi utama terhadap gangguan arus transien sebesar itu, karena dua keterbatasan teknis: pertama, waktu transisi mekanis kontak relay dari tertutup ke terbuka relatif lambat dibandingkan laju kenaikan gelombang arus inrush yang terjadi dalam orde mikrodetik; kedua, relay standar tidak dilengkapi rangkaian pemadam busur api (arc chute) seperti pada MCB, sehingga rentan mengalami kegagalan mekanis berupa kontak yang meleleh atau menyatu (welded) apabila dipaksa memutus arus kritis. Oleh karena itu, fungsi proteksi pemutusan arus seketika tetap paling tepat ditangani oleh kinerja mekanis MCB, sedangkan modul relay pada sistem ESP32 lebih tepat diposisikan sebagai perangkat pensakelaran sekunder untuk pelepasan beban (load shedding) dan isolasi jarak jauh melalui interupsi program.

Gangguan Konektivitas Wi-Fi dan Keandalan Pencatatan Luring

Penelusuran historis grafik ThingSpeak menemukan beberapa blok kekosongan pencatatan data yang kerap terjadi pada hari Senin hingga Kamis selama jam operasional gym. Pencocokan silang dengan catatan lapangan menunjukkan bahwa fenomena ini

disebabkan oleh hujan lebat yang menurunkan kualitas sinyal Wi-Fi lokal, meskipun jaringan tersebut didukung modem seluler dengan infrastruktur yang relatif andal. Penurunan nilai RSSI menyebabkan terputusnya komunikasi nirkabel sementara antara ESP32 dan Access Point, sehingga paket data yang seharusnya dikirim setiap 60 detik gagal mencapai broker ThingSpeak dan menghasilkan grafik kosong pada dasbor selama gangguan berlangsung.

Untuk memvalidasi keandalan mekanisme mitigasi, dilakukan perbandingan langsung antara baris data pada basis data ThingSpeak daring yang menunjukkan kekosongan dan berkas log luring pada MicroSD untuk menit yang sama. Hasil validasi menunjukkan bahwa untuk setiap baris data yang hilang dari ThingSpeak akibat gangguan Wi-Fi, modul MicroSD tetap mencatat seluruh parameter kelistrikan secara lengkap tanpa kehilangan satu baris pun (zero data loss), dan begitu koneksi Wi-Fi pulih, sistem secara otomatis melanjutkan pengiriman data ke cloud (auto-recovery) tanpa mengganggu proses akuisisi sensor. Hal ini membuktikan bahwa arsitektur penyimpanan redundan yang dirancang berhasil mengatasi kelemahan mendasar sistem pemantauan IoT konvensional yang sepenuhnya bergantung pada konektivitas internet.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian selama 15 hari di gedung Vokafit K1 UNESA GYM, sistem pemantauan dan analisis konsumsi daya treadmill multi-titik berbasis ESP32 yang dikembangkan telah berhasil menjawab permasalahan yang dirumuskan dalam Pendahuluan. Sensor PZEM-016 terbukti memiliki akurasi tinggi, dengan deviasi tegangan, arus, dan daya aktif di bawah 1% dibandingkan alat ukur standar, baik untuk beban linier maupun nonlinier. Algoritma perhitungan biaya pada firmware ESP32 beroperasi dengan presisi, dengan galat maksimum hanya 0,05%, sedangkan data pada dasbor ThingSpeak dan MicroSD konsisten dengan deviasi 0%, yang membuktikan keandalan arsitektur penyimpanan redundan yang dirancang. Pengujian stabilitas komunikasi menunjukkan latensi rata-rata 16.175 ms; meskipun beberapa percobaan mengalami kegagalan koneksi akibat gangguan Wi-Fi, mekanisme fail-safe berbasis MicroSD berhasil memastikan tidak ada data yang hilang secara permanen. Evaluasi kumulatif 15 hari mencatat konsumsi energi neto sebesar 113,89 kWh dengan total biaya operasional Rp193.559,47, yang mengungkap disparitas

penggunaan antarunit treadmill dan memberikan transparansi bagi pengelola gedung dalam pengambilan keputusan manajemen beban. Penelitian ini juga mengidentifikasi arus inrush sebagai penyebab utama MCB trip ketika beberapa treadmill dinyalakan bersamaan pada daya tinggi, sehingga penataan ulang instalasi menuju skema sirkuit khusus (satu MCB per treadmill) dan penyediaan access point Wi-Fi khusus dengan autentikasi statis direkomendasikan sebagai langkah pengembangan lanjutan untuk meningkatkan keandalan sistem secara menyeluruh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi D4 Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, serta pengelola gedung Vokafit K1 UNESA GYM, atas dukungan fasilitas, akses lokasi, dan izin pengambilan data yang diberikan selama penelitian ini.

DAFTAR REFERENSI

Ahmed. S. H, Jameel. K. A, Ahmed. R. A, Design and implementation of pulse rate monitoring over internet using ThingSpeak and ESP8266, in Proc. 2022 2nd Int. Conf. Adv. Electr. Comput. Commun. Sustain. Technol. (ICAECT), 1629-1633 (2022). https://doi.org/10.1109/ICAECT54875.2022.9807925

Aisyah. I A, Analysis of the effect of capacitor banks on power factor and electricity cost savings based on ETAP 20 software simulation [in Indonesian], in Proc. 15th Ind. Res. Workshop Nat. Semin. (IRONS), 1-6 (2024). https://doi.org/10.35313/irwns.v15i1.6243

Anri. K, Slamet. S, Andika. R, Real-time greenhouse micro-climate monitoring using ThingSpeak-based Internet of Things (IoT) [in Indonesian]. J. Tek. Pertanian Lampung 10, 468-480 (2021). https://doi.org/10.23960/jtep-l.v10i4.468-480

Asmida, Yurika, The effect of a charging and power-consumption monitoring system on a hybrid (solar and wind) power plant based on the ThingSpeak platform [in Indonesian]. INNOVATIVE: J. Soc. Sci. Res. 4, 7388-7397 (2024).

Candra. I, Yudi. P. H, Hari. P, Design of an indirect electrical energy measurement module using kWh and kVArh meters [in Indonesian], in Proc. 14th Ind. Res. Workshop Nat. Semin. (IRONS), 116-122 (2023). https://doi.org/10.35313/irwns.v14i1.5371

Dimas. Rangga. R. P. P, Joko, Design of an IoT-based off-grid PV performance monitoring device using NodeMCU ESP32 and Telegram [in Indonesian]. J. Tek. Elektro 13, 248-255 (2024). https://doi.org/10.26740/jte.v13n3.p248-255

Fartino, Tarmizi, M. Syukri, A study on the design of an automatic power-factor correction device [in Indonesian]. KITEKTRO: J. Online Tek. Elektro 5, 11-18 (2020).

Ionel. Z, Vasile. G. G, Enhancing the Modbus communication protocol to minimize acquisition times based on an STM32-embedded device. Mathematics 10, 4686 (2022). https://doi.org/10.3390/math10244686

Ivan. D. T, Arief. W, Akhmad. A, Jamaaluddin, Home surveillance monitoring with ESP32-CAM and SD card for data storage. J. Comput. Netw. Archit. High Perform. Comput. 6, 419-429 (2024). https://doi.org/10.47709/cnahpc.v6i1.3498

Juli. C. T, A study on electrical energy savings to reduce the specific fuel consumption (SFC) of a backup generator set at the Muara Teweh Polytechnic building [in Indonesian]. Elektrika Borneo (JEB) 7, 1-6 (2021). https://doi.org/10.35334/jeb.v7i2.220

M Zaky Z. M., Susana. R., Pujianto., Sistem Monitoring Energi Listrik 3 Fase Berbasis IoT dan Firebase https://doi.org/10.33795/elposys.v12i2.7206

M. J. Espinosa-G, Agustin . A, Characterization and performance evaluation of ESP32 for real-time synchronized sensor networks. Procedia Comput. Sci. 237, 261-268 (2024). https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.104

Md. Ohirul. Q, Musse. M. A, Md. Hossain, Monitoring of renewable energy systems by IoT-aided SCADA system. Energy Sci. Eng. 10, 1874-1885 (2022). https://doi.org/10.1002/ese3.1130

Muhammad. J. S, Anggara. T. Nugraha, Heart rate monitoring system on a treadmill using an MAX30102 sensor [in Indonesian]. J. Comput. Electron. Telecommun. 3 (2022). https://doi.org/10.52435/complete.v3i2.200

Muhammad. S. S, Lala. S. R, Rasim, Energy management of a low-cost power meter using ESP8266 and PZEM-016. Int. J. Reg. Innov. 4 (2024). https://doi.org/10.52000/ijori.v4i1.97

Retno. T. W, Heri. S, Amirul. H, The design and construction of a dynamic multi-sensor and multi-storage data logger for weather parameters. Photon: J. Nat. Sci. Technol. 14, 10-17 (2023). https://doi.org/10.37859/jp.v14i1.6278

Sholihin. S, Emilia. H, Eka. S, Mutiara, Ningsih. R. S, Design of an Internet of Things-based monitoring device for a stationary bike [in Indonesian]. RESISTOR J. 7 (2024).

Tony. K, Anastasya. Y, Sigit. S, Aas. W. H, Satrio. Y, Analysis of unmeasured electrical energy anomalies in the AMR system at UP3 Teluk Naga [in Indonesian]. ELECTRICES: J. Otomasi Kelistrikan Energi Terbarukan 6, 11-18 (2024). https://doi.org/10.32722/ees.v6i1.6078