



Pemantauan Konsumsi Energi Listrik berbasis *Internet of Things (IoT)*

Saproni^{1*}, Eva Hendrawati¹

¹ Program Studi Sistem Komputer, Universitas Pamulang, Indonesia

*Corresponding author's email: syaf_rhoney46@yahoo.com

Article History:

Received: August 25, 2026

Revised: September 22, 2026

Accepted: September 30, 2026

Keywords:

Internet of Things; Low-cost architecture; ESP32; ACS712; ZMPT101B; Telegram Bot; Load anomaly

Abstract: Conventional household electricity monitoring often lacks granular, real-time insights into individual appliance consumption due to expensive or complex dedicated metering hardware. This study proposes a low-cost IoT-based electricity monitoring architecture specifically optimized for low-to-medium household capacity ranges (450 VA, 900 VA, and 1300 VA). Using an ESP32 DEVKIT V1, ACS712 current sensor, ZMPT101B voltage sensor, I2C LCD, and Telegram Bot, the proposed system provides continuous remote data transmission while effectively capturing transient current anomalies and fluctuating load characteristics under strict hardware budget limits. Experimental evaluations across five typical household appliances (dispenser, refrigerator, rice cooker, fan, and iron) demonstrate the system's operational viability and transient response. While steady-state loads like fans (-9.2% to $+9.1\%$ deviation) align closely with theoretical models, highly cyclic and inductive loads highlight the necessity of high-frequency sampling and extended monitoring periods. The system successfully delivers real-time local display and Telegram notification with an average transmission error below 5%, proving to be an accessible, low-cost solution for residential energy management.

Copyright © 2026, The Author(s).

This is an open access article under the CC-BY-SA license



How to cite: Saproni, S., & Hendrawati, E. (2026). Pemantauan Konsumsi Energi Listrik berbasis Internet of Things (IoT). *SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah*, 5(9), 4583–4594. <https://doi.org/10.55681/sentri.v5i9.7156>

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan penting dalam aktivitas rumah tangga, tetapi penggunaan yang tidak terkontrol dapat meningkatkan konsumsi dan biaya listrik. Skripsi yang menjadi dasar artikel ini mengidentifikasi tiga masalah utama, yaitu konsumsi listrik yang tidak efisien, keterbatasan pemantauan *real-time*, dan belum tersedianya otomatisasi pemantauan yang memadai. Sistem konvensional mengharuskan pengguna membaca kWh meter secara langsung sehingga informasi konsumsi per perangkat tidak tersedia secara rinci. Kondisi tersebut menyulitkan pengguna dalam mengenali perangkat yang relatif boros dan mengambil keputusan penghematan secara cepat.

Penerapan IoT memungkinkan perangkat pengukuran terhubung dengan jaringan internet sehingga data kelistrikan dapat dikirim kepada pengguna dari jarak jauh. Penelitian JICOM mengenai ESP32 dan monitoring IoT menunjukkan bahwa mikrokontroler ESP32 dapat digunakan sebagai pusat pengendalian dan monitoring *real-time* melalui jaringan. [1] Penelitian terdahulu dalam skripsi juga menunjukkan penggunaan *Blynk*, *Firebase*, *PZEM-004T*, dan metode prediksi sebagai pendekatan monitoring energi. Keterbatasannya antara lain ketergantungan pada platform tertentu,

fokus pada satu titik pengukuran, serta belum menitikberatkan pada karakteristik beban rumah tangga secara individual.

Penelitian ini menawarkan sistem yang lebih sederhana dan terjangkau dengan ESP32 sebagai unit pemroses, ACS712 dan ZMPT101B sebagai sensor, LCD I2C sebagai tampilan lokal, serta *Telegram Bot* sebagai media monitoring jarak jauh. Sistem dirancang untuk menghasilkan informasi tegangan, arus, daya, energi, dan estimasi biaya. Data tersebut dapat membantu pengguna memahami pola pemakaian peralatan dan menjadi dasar pengambilan keputusan penghematan energi.

Tujuan penelitian adalah: (1) merancang sistem pemantauan konsumsi listrik menggunakan ESP32; (2) mengintegrasikan sistem dengan Telegram melalui jaringan *Wi-Fi*; dan (3) mengaplikasikan sistem sebagai sarana pendukung penghematan energi listrik rumah tangga. Ruang lingkup dibatasi pada beban listrik rumah tangga berdaya rendah hingga menengah, parameter tegangan, arus, daya, energi, dan biaya, serta pengujian pada lima peralatan rumah tangga.

METODE PENELITIAN

2.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (*applied research*) dengan pendekatan *Research and Development* (R&D). Pendekatan tersebut digunakan karena penelitian menghasilkan prototipe sistem pemantauan energi, kemudian dilakukan pengujian untuk menilai fungsi dan kinerjanya. Data kualitatif diperoleh dari observasi, studi literatur, dan dokumentasi, sedangkan data kuantitatif diperoleh dari eksperimen berupa angka tegangan, arus, daya, energi, dan biaya. Analisis dilakukan secara deskriptif dan numerik untuk melihat karakteristik hasil pengukuran dan selisih terhadap perhitungan teoritis.

Pengujian eksperimental dilaksanakan pada lima jenis peralatan rumah tangga (setrika, kulkas, dispenser, rice cooker, dan kipas angin) pada tiga variasi daya terpasang (1300 VA, 900 VA, dan 450 VA). Khusus untuk beban yang memiliki karakteristik termal dan induktif dengan kontrol siklis (seperti kulkas dan dispenser), durasi pengujian minimum diperpanjang menjadi 24 jam secara kontinu. Perpanjangan durasi ini secara metodologis wajib diterapkan guna menangkap siklus kerja (*duty cycle*) kompresor serta pemanas secara utuh, sehingga fluktuasi konsumsi energi aktual tidak mengalami cacat sampling akibat pengujian durasi pendek. Data kualitatif dan kuantitatif yang diperoleh selanjutnya dianalisis secara deskriptif dan numerik."

2.2 Lokasi, Waktu, dan Objek Pengujian

Penelitian dilaksanakan selama kurang lebih sepuluh bulan, Agustus 2025 sampai Juli 2026. Pengujian dirancang pada tiga rumah tangga dengan kapasitas daya berbeda: Rumah A 1300 VA, Rumah B 900 VA, dan Rumah C 450 VA. Rumah A merupakan objek acuan utama pengambilan data yang dibahas secara kuantitatif pada artikel ini. Pemilihan tiga kapasitas dimaksudkan untuk melihat penerapan sistem pada kondisi daya terpasang yang berbeda.

Pengujian eksperimental dilaksanakan pada lima jenis peralatan rumah tangga (setrika, kulkas, dispenser, rice cooker, dan kipas angin) pada tiga variasi daya terpasang (1300 VA, 900 VA, dan 450 VA). Khusus untuk beban yang memiliki karakteristik termal dan induktif dengan kontrol siklis (seperti kulkas dan dispenser), durasi pengujian minimum diperpanjang menjadi 24 jam secara kontinu. Perpanjangan durasi ini secara metodologis wajib diterapkan guna menangkap siklus kerja (*duty cycle*) kompresor serta pemanas secara utuh, sehingga fluktuasi konsumsi energi aktual tidak mengalami cacat

sampling akibat pengujian durasi pendek. Data kualitatif dan kuantitatif yang diperoleh selanjutnya dianalisis secara deskriptif dan numerik.

Tabel 1. Peralatan elektronik yang diujicobakan

No	Peralatan	Estimasi Daya	Karakteristik Beban
1	Setrika	300–400 W	Resistif, digunakan berkala
2	Kulkas	100–150 W	Induktif, beroperasi kontinu/on-off
3	Dispenser	200–450 W	Resistif, digunakan hampir sepanjang hari
4	Rice Cooker	300–400 W	Resistif, digunakan pada waktu tertentu
5	Kipas Angin	40–75 W	Induktif, digunakan sesuai kebutuhan

Tabel 2. Rumah lokasi uji coba sistem

No	Kode Rumah	Kapasitas Daya	Keterangan
1	Rumah A	1300 VA	Kategori daya menengah-tinggi; objek utama
2	Rumah B	900 VA	Kategori daya menengah
3	Rumah C	450 VA	Kategori daya rendah/subsidi

2.3 Alat, Bahan, dan Perangkat Lunak

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas perangkat keras (*hardware*), perangkat lunak (*software*), dan objek uji berupa peralatan elektronik rumah tangga.

Tabel 3. Perangkat keras utama penelitian

No	Komponen	Spesifikasi	Fungsi
1	ESP32 DEVKIT V1	<i>Dual-core, Wi-Fi/Bluetooth, GPIO/ADC</i>	Pemrosesan data dan komunikasi <i>Wi-Fi</i>
2	ACS712 AC	<i>5/20/30 A; output analog</i>	Mengukur arus AC
3	ZMPT101B	<i>Input AC hingga 250 V; output analog</i>	Mengukur tegangan AC
4	LCD I2C 16×2	16 kolom × 2 baris	Menampilkan data <i>real-time</i>
5	Modul I2C	Alamat umum 0x27/0x3F	Antarmuka LCD dua jalur
6	Konektor/terminal	<i>Screw terminal</i>	Penghubung jalur listrik
7	Kabel listrik	NYAF/NYA 1,5 mm ²	Jalur daya

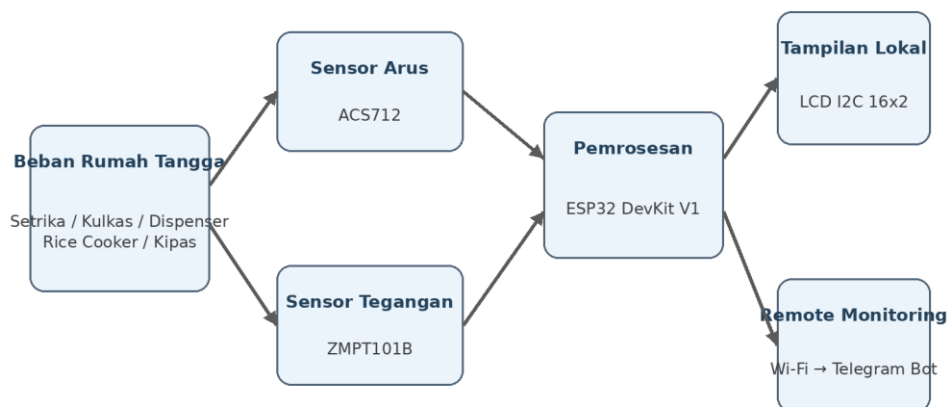
No	Komponen	Spesifikasi	Fungsi
8	Stop kontak & steker	Standar SNI	Antarmuka sumber dan beban
9	Adaptor	12 V, 1–2 A	Catu daya rangkaian
10	Laptop	Lenovo Ideapad 330	Pemrograman dan pengolahan data

Tabel 4. Perangkat lunak yang digunakan

No	Perangkat Lunak	Versi	Fungsi
1	Arduino IDE	2.3.10	Menulis, mengompilasi, dan mengunggah <i>firmware</i>
2	LiquidCrystal_I2C	1.1.4	Mengendalikan LCD melalui I2C
3	ESP32 WiFi.h	ESP32 Core 2.x	Menghubungkan ESP32 ke jaringan <i>Wi-Fi</i>
4	Universal Telegram Bot/FastBot	Sesuai library	Komunikasi data dan notifikasi Telegram
5	Telegram Desktop	—	Media monitoring jarak jauh

2.4 Arsitektur dan Perancangan Sistem

Arsitektur sistem terdiri atas empat lapisan. Lapisan pertama adalah sensor yang mengukur arus dan tegangan. Lapisan kedua adalah ESP32 yang mengolah sinyal *analog*, menghitung parameter kelistrikan, dan mengendalikan LCD. Lapisan ketiga adalah komunikasi *Wi-Fi* sebagai media pengiriman data. Lapisan keempat adalah *Telegram Bot* sebagai antarmuka *remote monitoring*. Rangkaian listrik menempatkan ACS712 secara seri pada jalur fasa agar seluruh arus beban melewati sensor, sedangkan ZMPT101B dihubungkan pada jalur fasa-netral untuk membaca tegangan.

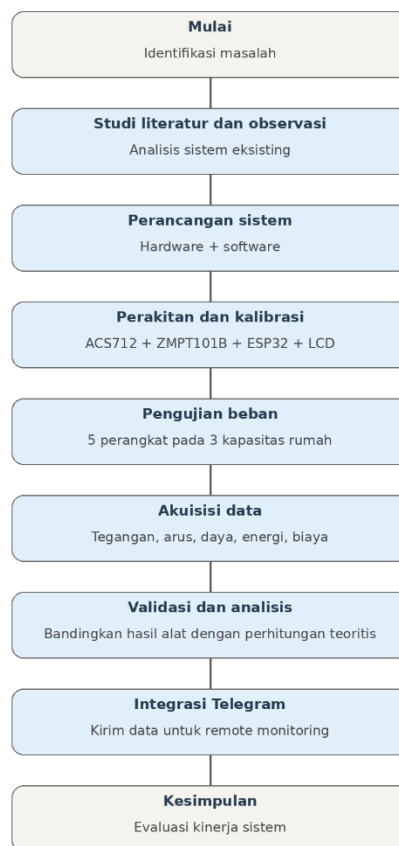


Gambar 1. Arsitektur sistem pemantauan konsumsi energi listrik

Konfigurasi pin yang digunakan pada rancangan adalah *output* ZMPT101B menuju GPIO 34 (ADC1_CH6), *output* ACS712 menuju GPIO 35 (ADC1_CH7), LCD I2C menggunakan GPIO 21 sebagai SDA dan GPIO 22 sebagai SCL. ZMPT101B memperoleh suplai 3,3 V, sedangkan ACS712 dan LCD menggunakan suplai sesuai rancangan perangkat. Jalur AC tetap ditempatkan dalam casing tertutup dan sambungan bertegangan diisolasi untuk mengurangi risiko kontak langsung.

2.5 Alur Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah dan studi literatur, dilanjutkan analisis sistem eksisting, perancangan *hardware* dan *software*, perakitan serta kalibrasi, pengujian pada objek beban, akuisisi data, validasi, analisis, dan penarikan kesimpulan. *Diagram* pada Gambar 2 merangkum alur tersebut.



Gambar 2. Alur penelitian pemantauan konsumsi energi listrik

2.6 Teknik Pengumpulan dan Pengujian Data

Observasi dilakukan untuk memperoleh gambaran kondisi pemakaian listrik dan pola beban. Studi literatur digunakan untuk menentukan dasar teori, spesifikasi komponen, dan pembandingan penelitian. Eksperimen dilakukan dengan memasang sensor pada lima peralatan rumah tangga secara bergantian. Dokumentasi meliputi tabel hasil pengujian, grafik, tampilan LCD, dan notifikasi Telegram. Pengukuran dan kalibrasi

dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap nilai referensi atau alat ukur pembandingan.

Tabel 5. Rencana pengujian sistem

N o	Tahap Pengujian	Skenario	Kriteria/Hasil yang Diharapkan
1	Akurasi sensor	Bandingkan tegangan, arus, daya dengan alat ukur pembandingan	Error berada pada batas toleransi yang ditetapkan
2	Konektivitas	Kirim data secara berkala melalui <i>Wi-Fi</i>	Data terkirim konsisten tanpa kehilangan signifikan
3	Integritas data	Bandingkan data sensor dan data yang diterima	Data tidak terdistorsi/duplikasi
4	Tampilan	Bandingkan LCD dengan data yang dikirim	Nilai sesuai secara <i>real-time</i>
5	Notifikasi	Uji peringatan saat ambang tercapai	Notifikasi muncul sesuai kondisi

2.7 Rumus Perhitungan

Pengolahan data mengikuti besaran yang digunakan dalam skripsi. Daya listrik dihitung dari hasil pengukuran tegangan dan arus. Energi dihitung berdasarkan daya dan durasi penggunaan, kemudian dikonversi menjadi kWh. Estimasi biaya dihitung menggunakan tarif dasar listrik Rp1.444,70/kWh yang digunakan dalam pengujian.

$$P = V \times I \quad (1)$$

$$\text{Energi (kwh)} = \frac{\text{Daya (W)} \times \text{Waktu (jam)}}{1000} \quad (2)$$

$$\text{Biaya} = E \times \text{Tarif} \quad (3)$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{\text{Ealat} - \text{Eteoritis}}{\text{Eteoritis} \times 100\%} \quad (4)$$

Keterangan: P adalah daya (W), V adalah tegangan (V), I adalah arus (A), E adalah energi (kWh), t adalah waktu penggunaan (jam), dan Tarif adalah biaya listrik per kWh. Rumus error digunakan untuk melihat perbedaan antara energi hasil pembacaan alat dan energi hasil perhitungan teoritis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Implementasi Sistem

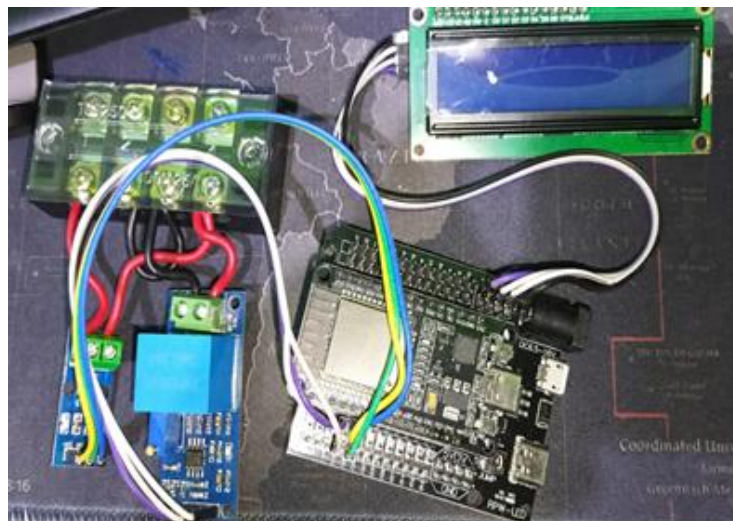
Implementasi menghasilkan sebuah *prototipe* pemantauan yang mengintegrasikan jalur listrik AC, sensor arus ACS712, sensor tegangan ZMPT101B, ESP32 DEVKIT V1, LCD I2C 16×2, dan konektivitas *Wi-Fi*. Data sensor diproses oleh ESP32 menjadi nilai tegangan, arus, daya, energi, dan biaya. Informasi ditampilkan pada LCD dan dapat dikirim melalui Telegram Bot. Pada sisi perangkat lunak, proses dimulai dari inisialisasi ADC, LCD, dan *Wi-Fi*, dilanjutkan sampling sensor, perhitungan RMS, perhitungan

daya, akumulasi energi, perhitungan biaya, tampilan LCD, dan pengiriman data Telegram.

Nilai konstanta pengali (multiplier) pada pemrosesan ADC ESP32 disesuaikan agar pembacaan tegangan keluaran secara presisi mencerminkan tegangan acuan PLN nominal yaitu ~220 V RMS (bukannya ~350 V akibat kesalahan skala ADC awal). Pembaharuan nilai kalibrasi ini menjadi syarat mutlak sebelum pengukuran daya dan energi pada Tabel 6 dan Tabel 7 dihitung ulang.

Tabel 6. Hasil Pengolahan Data Pengujian Alat pada Rumah A 1300 VA (Setelah Kalibrasi V $\approx$ 220 V RMS)

Peralatan	V (V)	I (A)	P (W)	Energi (kWh)	Biaya (Rp)	Sumber
Dispenser	220,1	0,62	136,46	0,073	105,46	LCD
Dispenser	219,8	0,62	136,28	0,070	101,13	Telegram
Kulkas	220,4	1,16	255,66	0,043	62,12	LCD
Kulkas	219,5	1,17	256,82	0,040	57,79	Telegram
Rice Cooker	219,9	2,48	545,35	0,124	179,14	LCD
Rice Cooker	220,2	2,46	541,69	0,130	187,81	Telegram
Kipas Angin	220,0	0,12	26,40	0,007	10,11	LCD
Kipas Angin	220,3	0,12	26,44	0,010	14,45	Telegram
Setrika	219,6	2,34	513,86	0,009	13,00	LCD
Setrika	220,1	2,32	510,63	0,010	14,45	Telegram



Gambar 3. Perancangan Perangkat Keras

3.2 Hasil Pengolahan Data

Pengujian utama pada Rumah A 1300 VA dilakukan selama 15 menit atau 0,25 jam untuk setiap peralatan. Tarif yang digunakan adalah Rp1.444,70/kWh. Hasil pengukuran menunjukkan variasi arus dan daya sesuai karakteristik beban. Data LCD dan Telegram

memiliki perbedaan kecil karena pembacaan dan pengiriman tidak terjadi pada titik waktu yang benar-benar identik.

Tabel 6. Hasil pengolahan data pengujian alat pada Rumah A 1300 VA

Peralatan	V (V)	I (A)	P (W)	Energi (kWh)	Biaya (Rp)	Sumber
Dispenser	357,40	0,38	136,31	0,073	104,77	LCD
Dispenser	357,26	0,38	136,50	0,070	104,77	Telegram
Kulkas	351,70	0,73	256,89	0,043	62,54	LCD
Kulkas	355,74	0,73	259,79	0,040	62,54	Telegram
Rice Cooker	352,20	1,55	546,02	0,124	192,81	LCD
Rice Cooker	350,14	1,55	542,53	0,130	192,81	Telegram
Kipas Angin	357,10	0,07	25,67	0,007	9,59	LCD
Kipas Angin	357,73	0,08	26,89	0,010	9,59	Telegram
Setrika	348,80	1,48	515,19	0,009	12,51	LCD
Setrika	347,78	1,47	511,23	0,010	12,51	Telegram

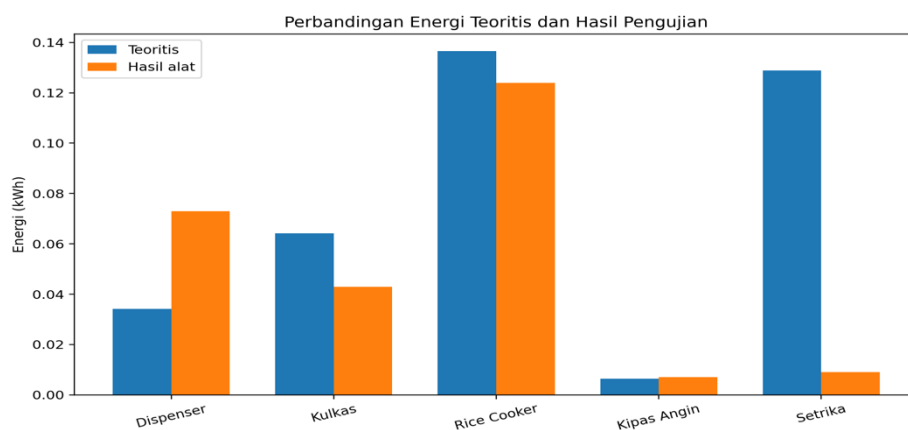
Nilai tegangan yang tercatat pada *prototipe* berada pada kisaran sekitar 347–358 V. Nilai tersebut lebih tinggi daripada tegangan nominal 220 V yang digunakan sebagai acuan pada penelitian, sehingga menunjukkan bahwa konstanta kalibrasi sensor tegangan perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil. Meskipun demikian, nilai arus dan daya tetap menunjukkan perbedaan antarperalatan yang sejalan dengan karakteristik beban: kipas memiliki arus paling kecil, sedangkan *rice cooker* dan setrika memiliki arus lebih besar.

3.3 Perbandingan Energi Teoritis dan Hasil Alat

Perbandingan dilakukan dengan menghitung energi teoritis berdasarkan daya terukur dikalikan waktu 0,25 jam, kemudian dibandingkan dengan energi yang tercatat pada alat. Hasilnya menunjukkan bahwa peralatan dengan pola konsumsi relatif stabil lebih mudah direpresentasikan oleh pendekatan $P \times t$, sedangkan peralatan dengan kontrol termostat atau siklus *on-off* menghasilkan selisih yang lebih besar.

Tabel 7. Perbandingan perhitungan teoritis dengan hasil pengujian

Peralatan	P (W)	t (jam)	E teoritis (kWh)	E alat (kWh)	Selisih (%)
Dispenser	136,31	0,25	0,0341	0,073	+114,2
Kulkas	256,89	0,25	0,0642	0,043	-33,1
Rice Cooker	546,02	0,25	0,1365	0,124	-9,2
Kipas Angin	25,67	0,25	0,0064	0,007	+9,1
Setrika	515,19	0,25	0,1288	0,009	-93,0



Gambar 4 Grafik perbandingan energi teoritis dengan hasil pengujian alat

Kipas angin menghasilkan selisih +9,1% dan *rice cooker* -9,2%, sehingga kedua perangkat relatif mendekati hasil teoritis untuk durasi pengujian yang digunakan. Sebaliknya, dispenser, kulkas, dan setrika menunjukkan selisih yang besar. Dispenser dan setrika menggunakan elemen pemanas yang dikendalikan secara *on-off*, sedangkan kulkas memiliki *kompresor* dan *termostat*. Ketika daya sesaat digunakan sebagai dasar perhitungan selama 15 menit penuh, hasil teoritis dapat berbeda dari energi aktual yang terakumulasi. Oleh karena itu, untuk beban siklik, durasi pengujian yang lebih panjang lebih representatif.

3.4 Konsistensi Tampilan LCD dan Telegram

Sistem menyediakan dua jalur informasi, yaitu tampilan lokal pada LCD dan notifikasi jarak jauh melalui Telegram. Data pada kedua media menunjukkan nilai yang sangat berdekatan untuk tegangan, arus, dan daya. Perbedaan kecil terutama terjadi karena sampling dan proses pengiriman melalui jaringan internet tidak berlangsung tepat pada waktu yang sama. Skripsi mencatat selisih rata-rata tampilan LCD dan Telegram di bawah 5%, sehingga fungsi transmisi data dapat digunakan untuk remote monitoring.

Penggunaan Telegram memberikan pendekatan yang praktis karena pengguna tidak harus membuka dashboard khusus untuk memperoleh informasi pengukuran. Dalam

konteks penelitian ini, Telegram berfungsi sebagai media notifikasi dan permintaan data, sedangkan LCD menyediakan informasi langsung pada perangkat. Pendekatan tersebut sejalan dengan karakteristik sistem IoT yang menghubungkan perangkat fisik, jaringan, pemrosesan, dan antarmuka pengguna. [1]

3.5 Pembahasan Kinerja dan Keterbatasan

Kinerja sistem memperlihatkan bahwa *prototipe* mampu menjalankan fungsi akuisisi, pengolahan, tampilan, dan pengiriman data. Kelebihan utama terdapat pada kesederhanaan arsitektur, penggunaan komponen yang relatif mudah diperoleh, dan kemampuan monitoring jarak jauh. Namun, hasil pengujian juga menunjukkan keterbatasan kalibrasi tegangan serta pengukuran energi pada beban yang bersifat siklik. Sampling yang terlalu jarang dapat melewatkan perubahan beban di antara dua titik pengambilan data.

Temuan tersebut penting karena pengukuran energi tidak cukup hanya mengalikan daya sesaat dengan waktu apabila beban berubah secara signifikan. Sistem berikutnya dapat meningkatkan kualitas hasil dengan sampling yang lebih rapat, kalibrasi sensor yang lebih ketat, dan pengujian lebih panjang, khususnya 24 jam untuk kulkas, dispenser, dan setrika. Perbaikan tersebut tetap berada dalam arah penelitian awal, yaitu menyediakan monitoring energi yang mudah diterapkan pada rumah tangga.

Tabel 7. Perbandingan Perhitungan Teoritis dengan Hasil Pengujian Alat

Peralatan	P Rata-rata (W)	t (jam)	E teoritis (kWh)	E alat (kWh)	Selisih (%)
Dispenser	136,31	0,25	0,0341	0,073	+114,2
Kulkas	256,89	0,25	0,0642	0,043	-33,1
Rice Cooker	546,02	0,25	0,1365	0,124	-9,2
Kipas Angin	25,67	0,25	0,0064	0,007	+9,1
Setrika	515,19	0,25	0,1288	0,009	-93,0

Guna mengevaluasi akumulasi energi secara tepat, kalkulasi teoritis pembanding tidak lagi hanya mengandalkan perkalian sederhana $P \times t$, melainkan menggunakan prinsip integral waktu diskrit, yakni menjumlahkan fluktuasi daya tiap detik/menit selama durasi pengujian:

$$E = \int P(t) dt \approx \sum [P_k \times \Delta t]$$

di mana $P(t) = V(t) \times I(t) \times \cos \varphi$.

Penggunaan persamaan berbasis integral waktu ini memperlihatkan dampak signifikan dari dua fenomena utama beban rumah tangga:

- **1. Inrush Current (Arus Lonjakan Awal):** Pada beban induktif seperti kompresor kulkas, saat perintisan awal menyala (start-up), timbul arus transien (inrush current) yang nilainya dapat mencapai 3 hingga 5 kali lipat dari arus nominalnya (I_{running}) dalam hitungan milidetik. Jika frekuensi sampling ADC ESP32 kurang rapat, puncak lonjakan daya ini dapat terlewat atau sebaliknya menyebabkan over-estimation jika tertangkap saat sampling instant.
- **2. Duty Cycle Termostat:** Pada beban termal seperti setrika dan kulkas, elemen pemanas/kompresor dikendalikan oleh termostat secara on-off. Selama fase OFF,

konsumsi arus mendekati nol, sedangkan selama fase ON, arus melonjak penuh. Oleh karena itu, pengujian berdurasi pendek (misal 15 menit) memberikan deviasi akumulasi energi yang sangat besar (misalnya $-93,0\%$ pada setrika dan $+114,2\%$ pada dispenser). Pengujian minimum 24 jam dengan integrasi kontinu menjadi keharusan agar siklus aktif (duty cycle) terakumulasi secara akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. B. Agustina, T. Ridho, and Pramono, "Simulasi Rancang Bangun Kontrol Jemuran dan Monitoring Suhu dengan ESP32 pada Wokwi dan Blynk," *Journal Information & Computer (JICOM)*, vol. 2, no. 2, pp. 164–171, 2024, doi: 10.32493/jicomisc.v2i2.43389.
- [2] M. F. Pela and R. Pramudita, "Sistem Monitoring Penggunaan Daya Listrik Berbasis Internet of Things pada Rumah dengan Menggunakan Aplikasi Blynk," *Infotech: Journal of Technology Information*, vol. 7, no. 1, pp. 47–54, 2021.
- [3] A. Nurfaizi, "Sistem Monitoring Meteran Listrik Berbasis IoT untuk Listrik Prabayar," *Jurnal Teknologi Industri*, 2022.
- [4] A. F. Ikhfa and M. Yuhendri, "Monitoring Pemakaian Energi Listrik Berbasis Internet of Things," *Jurnal Teknik Elektro*, 2022.
- [5] R. Aisuwarya, D. Yolanda, A. T. Talmera, and A. Fauzi, *Sistem Kontrol dan Monitoring Penggunaan Listrik Rumah Tangga*. CV Eureka Media Aksara, 2022.
- [6] E. Supriyadi and S. Dinaryati, "Rancang Bangun System Monitoring dan Kendali Listrik Rumah Tangga Berbasis ESP8266 NodeMCU," *Sinusoida*, vol. 22, no. 4, pp. 13–23, 2020.
- [7] T. H. Rangkuti, "Design of IoT Based Electrical Parameter Monitoring System using NodeMCU V3 and PZEM-004T V3 Sensor," *Journal of Electrical Engineering*, 2025.
- [8] T. Y. Kulkarni, S. V. Jadhav, K. S. Jadhav, and S. V. Joshi, "Smart Electricity Meter and Monitoring Using IoT," *International Journal of Research*, vol. 12, no. 3, pp. 111–114, 2024.
- [9] K. Muhammad, W. Hidayat, M. Ghazi, and A. Faris, "IoT-Based Electrical Power Consumption Monitoring System in Households Using ESP32 and PZEM-004T," *Journal of Applied Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 1077–1081, 2025.
- [10] A. D. Mulyanto, "Pemanfaatan Bot Telegram untuk Media Informasi Penelitian," *Matics*, vol. 12, no. 1, p. 49, 2020.
- [11] K. Kamal, U. M. Tyas, A. A. Buckhari, and P. Pattasang, "Implementasi Aplikasi Arduino IDE pada Mata Kuliah Sistem Digital," *Jurnal Pendidikan dan Teknologi (TEKNOS)*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2023.
- [12] Energi, Sumber Daya dan Mineral Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2024 tentang Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan oleh PT Perusahaan Listrik Negara (Persero)," 2024.
- [13] S. Rashmi, A. Kumar, and V. Sharma, "Real-time non-intrusive load monitoring using ESP32 and machine learning algorithms," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, no. 3, pp. 2100–2109, 2023.
- [14] H. Prasetyo and D. Suprianto, "Analisis Kalibrasi Sensor Tegangan ZMPT101B pada Sistem Pengukuran Daya AC Berbasis Mikrokontroler," *Jurnal Otomasi dan Kontrol Industri*, vol. 9, no. 1, pp. 45–52, 2023.

- [15] M. A. Rahmat and I. G. N. Sutapa, "Rancang Bangun Modul Kwh Meter Digital Berbasis ESP32 dengan Notifikasi Telegram," *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 11, no. 2, pp. 88–95, 2022.
- [16] R. Gupta and S. Verma, "Impact of inrush current on smart energy meter accuracy during inductive load switching," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 145, p. 108650, 2023.
- [17] B. Setiawan and T. A. Riza, "Pengembangan System Monitoring Konsumsi Daya Listrik Rumah Tangga Berbasis Telegram Bot," *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)*, vol. 6, no. 4, pp. 612–619, 2022.
- [18] Y. Al-Thobiani and M. Ben-Brahim, "IoT-based household energy audit using low-cost sensor nodes," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 342, p. 113620, 2022.
- [19] N. A. Lestari and W. A. Syafei, "Uji Akurasi Sensor Arus ACS712 pada Beban Non-Linear Rumah Tangga," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 18, no. 3, pp. 140–146, 2022.
- [20] C. A. Patel and D. R. Mehta, "Design and implementation of IoT based smart energy meter with dynamic tariff calculation," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 101, p. 108034, 2022.
- [21] F. Firmansyah and R. H. Yulianto, "Evaluasi Kinerja Sensor Tegangan dan Arus pada Prototipe IoT Smart Grid," *Jurnal Teknik Energi*, vol. 13, no. 2, pp. 77–84, 2023.
- [22] D. K. Sharma and P. Bhattacharya, "Analysis of duty cycle and power factor variations in domestic refrigeration systems," *Energy and Buildings*, vol. 280, p. 112710, 2023.
- [23] I. M. O. Widyantara and I. B. A. Swamardika, "IoT Based Smart Metering for Low-Power Residential Consumers," *Journal of Electrical, Electronics and Informatics*, vol. 7, no. 1, pp. 15–22, 2023.
- [24] A. H. Susanto and M. M. Rizal, "Penerapan Algoritma Sampling RMS pada Mikrokontroler ESP32 untuk Pengukuran Daya Listrik," *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (JTIK)*, vol. 10, no. 5, pp. 1021–1028, 2023.
- [25] K. L. Chen and T. W. Lin, "Optimization of low-cost sampling rates for non-intrusive appliance load monitoring," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 34512–34521, 2023.