



Sistem Pemantauan Konsumsi Energi Listrik Rumah Tangga untuk Validasi Tagihan Listrik Pelanggan

Egi Hergiyani¹, Muhammad Dzaky², Nadira Desti P.P³

¹ Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Bandung

^{2,3} Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Bandung

Email author: egiraider73@gmail.com¹, muhammad.dzaky@mhs.itenas.ac.id², naddesput@gmail.com³

Article Info

Article history:

Received June 3, 2026

Revised June 4, 2026

Accepted June 20, 2026

Available: July 10, 2026

Published: July 30, 2026

Keywords:

Backup Data;

ESP32;

Grafana;

Internet of Things;

Monitoring Energi;

PZEM-004T

ABSTRACT

Current conventional electrical energy recording systems have limitations in accurately monitoring power consumption fluctuations in real-time. On the other hand, Internet of Things (IoT)-based monitoring solutions are often vulnerable to the risk of data loss during internet connection disruptions on the user's end. This study aims to design a single-phase electrical power consumption monitoring system as a comparison instrument for State Electricity Company (PLN) bills that is robust against network disturbances. The proposed solution is a system based on the ESP32 microcontroller and PZEM-004T sensor, implementing a dual (hybrid) logging method. This system utilizes an SD Card as an independent local storage medium and Google Spreadsheets as a cloud database, which is subsequently visualized through a Grafana dashboard. Processing is managed in parallel using FreeRTOS to prevent program interruptions. Calibration results demonstrate an exceptionally high level of system precision, with a coefficient of determination (R^2) of 0.9997 for voltage and 0.9999 for current against standard measuring instruments. Transmission reliability testing over 30 days recorded a 0% data loss rate from a total of 43,200 samples. Furthermore, direct validation against PLN postpaid bills shows a high degree of alignment, where the system's accumulated monthly consumption of 144.541 kWh differed by only 0.541 kWh from the official PLN meter reading (144 kWh). This system is proven effective in preventing data loss while simultaneously functioning as a credible and transparent actual bill comparison instrument for customers.

Corresponding Author:

Muhammad Dzaky,

Institut Teknologi Nasional Bandung

Jl. Khp Hasan Mustopa No.23, Kota Bandung, Jawa Barat 40124

Email: muhammad.dzaky@mhs.itenas.ac.id



1. INTRODUCTION

Energi listrik telah menjadi kebutuhan primer bagi manusia karena hampir seluruh kehidupan manusia baik dalam lingkup domestik maupun sektor industri skala luas bergantung pada ketersediaan daya listrik. Di Indonesia penyediaan energi ini dikelola secara terpusat oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN)

dengan melalui sistem pengukuran berbasis KWH meter untuk menentukan besaran konsumsi harian para pelanggan (Rahmadani & Fernandes, 2025). Namun seiring penggunaan peralatan elektronik yang meningkat, muncul kebutuhan untuk mengetahui besarnya pemakaian daya. Sistem pencatatan konvensional yang masih digunakan hingga saat ini memiliki keterbatasan dari segi pemantauan konsumsi listrik secara *real-time* dan akurat (Nuryawan & Jannah, 2022). Menurut (Dahlan et al., 2022) sistem pemantauan besaran listrik sangat diperlukan untuk mengamati perubahan arus dan tegangan secara kontinu untuk menghindari ketidakseimbangan pembebanan pada instalasi rumah tangga.

Perkembangan teknologi jaringan saat ini telah memasuki era *Internet of Things* (IoT) yang memungkinkan integrasi antara dunia fisik dengan sistem digital untuk pengendalian dan pemantauan objek dari jarak jauh (Padlia Mustamin & Bini, 2021). Implementasi IoT dalam sistem monitoring energi memberikan peluang bagi pengguna untuk mengakses data parameter elektrik seperti tegangan, arus, dan daya kapan pun serta di mana pun melalui jaringan internet (Ahmed et al., 2021). Penelitian yang dilakukan oleh (Kurniawan et al., 2022) menunjukkan bahwa penggunaan sensor PZEM-004T yang dihubungkan dengan mikrokontroler mampu menghasilkan data penggunaan daya dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi (Pradana et al., 2024). Meskipun demikian ketergantungan pada koneksi internet tetap menjadi risiko teknis karena kegagalan jaringan dapat mengakibatkan terhentinya pengiriman data yang sedang diproses oleh sistem menuju aplikasi monitoring.

Implementasi yang dikembangkan oleh (Chairunnisa & Wildian, 2022) merancang alat pemantau biaya pemakaian energi listrik berbasis IoT menggunakan sensor PZEM-004T dan mikrokontroler *WeMos D1 Mini Pro*. Sistem tersebut mampu menyajikan data parameter elektrik beserta estimasi biaya secara *real-time* dengan tingkat akurasi cukup tinggi, yakni memiliki persentase *error* hanya sebesar 0,1% untuk arus dan 0,004% untuk tegangan. Namun, operasional sistem ini sepenuhnya bergantung pada ketersediaan kuota dan stabilitas jaringan internet agar data dapat terkirim serta ditampilkan pada aplikasi *Blynk*. Keterbatasan tersebut mempertegas urgensi pengembangan sistem yang lebih tangguh, terutama dalam memitigasi risiko kehilangan data saat terjadi gangguan koneksi internet di sisi pengguna.

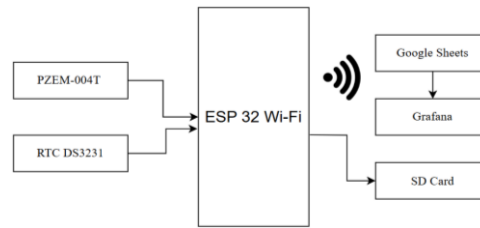
Mengatasi kendala ketidakstabilan koneksi internet tersebut maka diperlukan inovasi sistem monitoring yang memiliki mekanisme sistem pencatatan ganda yang memanfaatkan modul *SD Card* sebagai unit penyimpanan data lokal dan *Google Spreadsheet* sebagai basis data berbasis *cloud* (Rahmawati et al., 2024). Penggunaan modul *RTC DS3231* berfungsi untuk memastikan setiap data yang tersimpan memiliki *timestamp* yang presisi dan valid meskipun sistem berjalan secara *offline*. Gagasan tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Fadillah et al., 2025) mengenai pentingnya penyediaan akses data yang dekat dengan kondisi nyata pelanggan agar monitoring arus serta tegangan dapat dilakukan secara *real-time* melalui antarmuka *website* maupun *Grafana*.

Hal yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya dan memiliki keterbatasan pada implementasinya menjadikan tujuan penelitian ini yakni untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring konsumsi daya listrik rumah tangga sebagai instrumen pembandingan terhadap tagihan listrik PLN. Melalui integrasi ESP32, sensor PZEM-004T serta *platform* IoT dan *SD Card*, serta diharapkan sistem ini mampu memberikan transparansi data aktual yang kredibel bagi konsumen. Penelitian ini berfokus pada pengujian perangkat untuk melakukan validasi terhadap akurasi pengukuran energi listrik dibandingkan dengan pencatatan resmi.

2. METODE

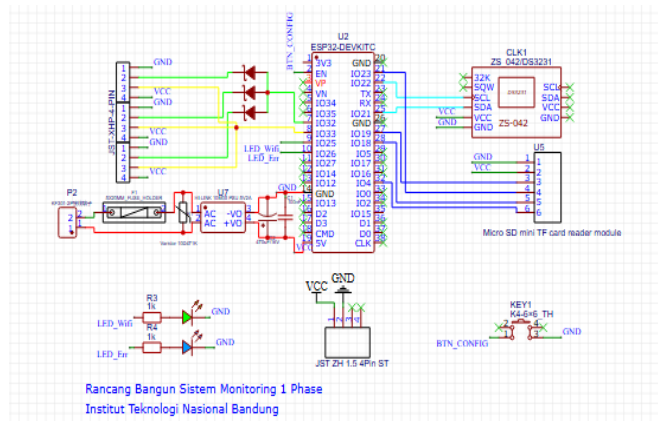
2.1. Perancangan Perangkat Keras

Sistem monitoring listrik 1 fasa yang dirancang dalam penelitian ini merupakan sistem pemantauan parameter listrik secara *real-time* berbasis mikrokontroler ESP32 (Aditya et al., 2025). Sistem ini mampu mengukur tujuh parameter listrik utama secara berkala, menyimpan data secara lokal ke *SD Card*, serta mengirimkan data ke *Spreadsheets* melalui jaringan *Wi-Fi* untuk kemudian divisualisasikan pada *dashboard Grafana*. Sistem dirancang dengan menggunakan *FreeRTOS*, sehingga proses pembacaan sensor, penyimpanan data, dan pengiriman ke *cloud* berjalan secara paralel tanpa saling mengganggu (Prameswari & Putro, n.d.). Arsitektur ini memastikan tidak ada data yang hilang meskipun koneksi internet terputus sementara karena data tetap tersimpan di *SD Card* sebagai *backup* lokal.



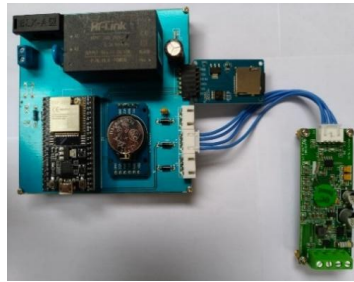
Gambar 1. Blok Diagram Sistem

Berdasarkan Gambar 1. Mikrokontroler ESP32 sebagai sebagai otak sistem menjalankan tiga *task* *FreeRTOS* secara paralel di dua *core* terpisah dan terintegrasi oleh sensor PZEM-004T serta *RTC DS3231*. PZEM004T berfungsi untuk mengukur tegangan, arus, energi, energi aktif, frekuensi, dan faktor energi dari beban listrik 1 fasa yang terhubung ke jaringan PLN 220V/50Hz sedangkan modul *RTC DS3231* memberikan referensi waktu yang akurat dan disinkronisasi dengan *Network Time Protocol Server (NTP)* setiap kali ESP32 terhubung ke internet. Dalam hal penyimpanan data dilakukan secara *hybrid* yaitu menggunakan *Spreadsheets* secara *online* dan *SD Card* sebagai *backup* data harian. Visualisasi akan data yang terukur menggunakan *dashboard Grafana* dimana data tersebut dikirimkan *Spreadsheets* via *Google Apps Scrip*. Skema perancangan ini menjelaskan cara kerja dari peralatan sistem monitoring yang telah dibuat. Peralatan ini bertujuan untuk mengukur parameter seperti tegangan, arus, energi, energi aktif, frekuensi, dan faktor energi dari beban listrik 1 fasa yang terhubung ke jaringan PLN 220V/50Hz. Rangkaian sistem dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini.



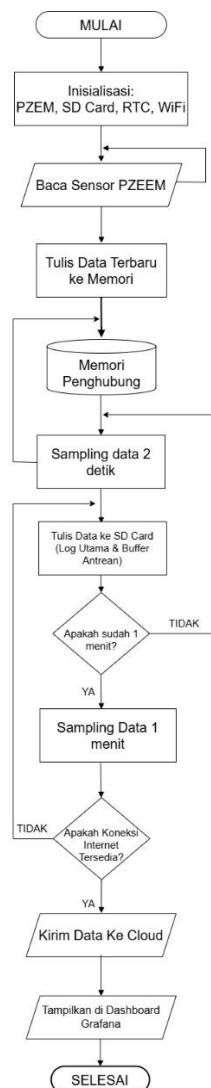
Gambar 2. Skematik Rangkaian Sistem

Rangkaian sistem diperlihatkan pada Gambar 2. dimana ESP32 sebagai otak utama yang mengelola seluruh pemrosesan dan komunikasi data. Pencatatan waktu digunakan modul *RTC DS3231*, sementara data hasil monitoring disimpan secara lokal menggunakan *SD Card*. Catu energi sistem disuplai dari tegangan AC yang dikonversi menjadi DC 5V melalui modul *Hi-Link PSU 5V/2A* yang dilengkapi *fuse holder* sebagai pengaman. Terdapat dua indikator LED, indikator pertama yaitu LED *Wifi* untuk status koneksi dan LED *error* untuk indikasi kesalahan dengan masing-masing LED dihubungkan oleh resistor 1k Ω . Sistem juga dilengkapi konektor *JST XHP* dan *JST ZH 1.5* untuk komunikasi sensor PZEM-004T, serta sebuah tombol *BTN_CONFIG* untuk konfigurasi. Secara keseluruhan, sistem ini dirancang untuk memonitor parameter listrik 1 fasa secara *real-time* dengan dilengkapi penyimpanan data lokal dan konektivitas *Wi-Fi* melalui ESP32. Selanjutnya hasil realisasi sistem berdasarkan skematik rangkaian ditunjukkan pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Realisasi Perancangan Sistem

2.2. Perancangan Perangkat Lunak



Gambar 4. Flowchart Sistem

Gambar 4 menunjukkan *flowchart* sistem memulai operasinya dengan melakukan inisialisasi pada tiga komponen utama, yaitu sensor pembaca arus/tegangan, modul penyimpanan *SD Card*, dan modul komunikasi (*WiFi*). Setelah tahap persiapan ini selesai, sistem akan secara kontinu membaca data kelistrikan dari sensor

PZEM. Data terbaru yang ditangkap oleh sensor kemudian ditulis dan ditampung ke dalam memori penghubung (*buffer* memori internal perangkat).

Dari memori penghubung tersebut, sistem melakukan proses sampling data dengan *interval* setiap 2 detik. Data hasil sampling ini secara rutin disimpan ke dalam *SD Card* sebagai cadangan lokal. Dalam arsitektur sistem ini, *SD Card* tidak hanya berfungsi sebagai media penyimpanan historis statis, melainkan memiliki peran penting sebagai *buffer* penyangga ketika terjadi gangguan konektivitas internet. Apabila perangkat kehilangan koneksi ke *server*, sistem tidak akan mengalami data *loss*, melainkan akan terus mengakumulasi dan mengantrekan data ke dalam *SD Card*. Selanjutnya, alur program akan mengevaluasi apakah proses sampling 2 detik tersebut telah terakumulasi hingga durasi 1 menit. Jika belum mencapai 1 menit, sistem akan terus mengulang siklus sampling dan penyimpanan ke *SD Card*. Apabila durasi 1 menit telah tercapai, sistem akan membuat rekapan data (sampling 1 menit) untuk dikirimkan ke internet.

Pada tahap pengiriman inilah mekanisme pemulihan data bekerja. Ketika koneksi internet yang sebelumnya terputus telah kembali normal, sistem dirancang untuk melakukan pengiriman data secara bertahap. Sistem akan memprioritaskan penyelesaian antrean (*backlog*) dengan mengirimkan data yang sempat tertinggal di dalam *SD Card* secara berurutan, dari data yang paling lama tertunda hingga akhirnya menyusul data yang paling aktual (*real-time*).

Proses terakhir, seluruh rekapan data yang berhasil terkirim ke *server* akan divisualisasikan melalui *dashboard Grafana*. Hal ini memudahkan pengguna akhir dalam melakukan pemantauan dan analisis data kelistrikan secara komprehensif, sebelum satu siklus program dinyatakan selesai.

3. RESULT DAN ANALISIS

3.1. Kalibrasi Sistem

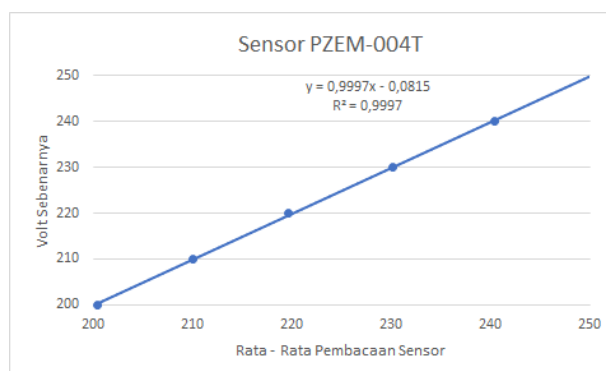
a) Pengujian dan Validasi Sensor Tegangan PZEM-004T

Pengujian instrumen dilakukan dengan memvalidasi akurasi pembacaan parameter tegangan pada modul PZEM-004T. Proses ini sangat diperlukan untuk memastikan bahwa data mentah (*raw data*) yang ditangkap oleh perangkat *IoT* memiliki kedekatan nilai dengan instrumen kalibrator standar di laboratorium, yaitu multimeter *True RMS Fluke 179*. Pengujian dilakukan pada rentang tegangan operasi panel listrik, mulai dari 200V hingga 250V dengan total pengambilan sampel sebanyak 30 kali iterasi untuk setiap titik target guna meminimalkan efek *noise* acak. Untuk ringkasan nilai rata-rata pembacaan beserta parameter regresi linear ditunjukkan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1 Data Hasil Kalibrasi Voltase Sensor PZEM-004T

REKAPITULASI RATA-RATA		
Titik Target	Nilai Fluke	Hasil Sensor
Titik 1	200	200,47
Titik 2	210	210,01
Titik 3	220	219,63
Titik 4	230	230,17
Titik 5	240	240,46
Titik 6	250	250,09
HASIL AKHIR KALIBRASI (REGRESI LINIER)		
Parameter		Hasil Sensor
Multiplier (m)		0,99965
Offset (C)		-0,05956
Linearitas (R^2)		0,99972

Berdasarkan Tabel 1, terlihat fluktuasi minor pembacaan antara hasil sensor dan perangkat kalibrasi multimeter *fluke 179 true RMS*. Hal ini disebabkan oleh adanya nilai toleransi internal (*tolerance band*) dari komponen pembagi tegangan (*voltage divider*) dan resistor beban bawaan pabrik di dalam *chip* PZEM. Hubungan kedekatan nilai ini kemudian divisualisasikan melalui kurva grafik dispersi (*scatter plot*) berikut Gambar 5 yang menunjukkan grafik linear terhadap sensor.



Gambar 5. Data Grafik Hasil Kalibrasi Tegangan Sensor PZEM-004T

Berdasarkan hasil perhitungan rumus pada Tabel 1, Gambar 5 menunjukkan hasil yang memuaskan. Nilai koefisien determinasi (R^2) pada perangkat menyentuh angka 0,9997. Secara matematis, nilai ini membuktikan bahwa respons sensor bersifat linier terhadap perubahan tegangan aktual, di mana 99,97% variasi data pembacaan dapat dijelaskan dengan baik oleh model regresi linier. Evaluasi galat sebelum kalibrasi dilakukan dengan menghitung persentase error relatif. Sebagai contoh, pada titik tegangan nominal 220V, rata-rata pembacaan PZEM-004T adalah 219,6V, yang menghasilkan persentase error relatif sebesar 0,163%. Secara keseluruhan, rata-rata error relatif sistem berada pada rentang 0,15% hingga 0,24%. Meskipun nilai *error* bawaan ini sudah memenuhi standar *Class 1.0* industri (error < 1%) (Elektro et al., 2023), penyisipan konstanta kalibrasi tetap dilakukan di tingkat *firmware* mikrokontroler. Nilai *Multiplier* ($m = 0,9997$) dan *Offset* ($C = -0,0815$) yang didapatkan dari persamaan regresi diinjeksikan langsung ke dalam kode program ESP32 (Putra & Pohan, 2024).

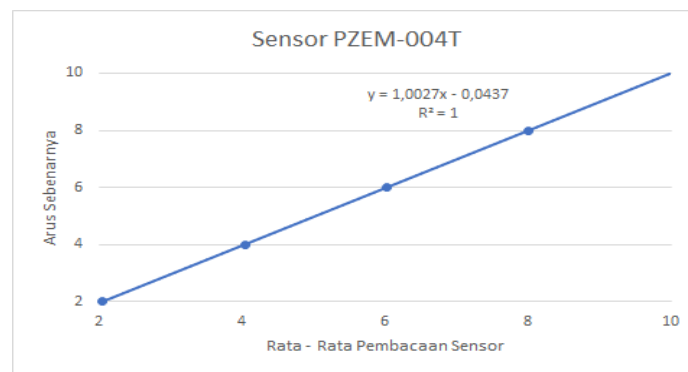
b) Pengujian dan Kalibrasi Sensor Arus

Setelah parameter tegangan tervalidasi, pengujian dilanjutkan pada parameter arus listrik menggunakan sensor *Current Transformer* (CT) bawaan modul PZEM-004T. Pengujian ini memiliki karakteristik tantangan yang berbeda dibanding parameter tegangan. Rangkaian magnetik pada inti trafo arus memiliki kecenderungan berperilaku *non-linier* pada kondisi beban rendah, atau biasa dikenal sebagai daerah eksitasi magnetik awal (Prabowo et al., 2023). Pengujian arus dieksekusi dengan memberikan beban *ekuivalen* bertingkat mulai dari 2A hingga 10A dengan interval kenaikan sebesar 2A yang ditunjukkan pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2 Data Hasil Kalibrasi Arus Sensor PZEM-004T

REKAPITULASI RATA-RATA		
Titik Target	Nilai Fluke	Hasil Sensor
Titik 1	2	2,039
Titik 2	4	4,037
Titik 3	6	6,0245
Titik 4	8	8,012
Titik 5	10	10,0245
HASIL AKHIR KALIBRASI (REGRESI LINIER)		
Parameter	Hasil Sensor	
Multiplier (m)	1,002702544	
Offset (C)	-0,04368931225	
Linearitas (R^2)	0,9999952469	

Karakteristik linieritas dari CT arus tersebut kemudian digambarkan ke dalam kurva grafik regresi linier yang ditunjukkan pada Gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Data Grafik Hasil Kalibrasi Arus Sensor PZEM-004T

Berdasarkan hasil perhitungan rumus pada Tabel 2, Gambar 6 menunjukkan hasil linieritas yang memuaskan, di mana nilai koefisien determinasi (R^2) mencapai angka 0,9999. Secara matematis, 99,99% variasi data pembacaan dapat dijelaskan dengan baik oleh model regresi linier. Evaluasi galat sebelum kalibrasi menunjukkan rata-rata persentase *error* relatif berada di 0,74%. Deviasi tertinggi tercatat mencapai 1,95% pada kondisi arus eksitasi rendah (titik referensi 2A), namun akurasi sistem terbukti semakin membaik pada beban tinggi, seperti pada titik referensi 10A dengan rata-rata pembacaan 10,024A (memiliki *error* sebesar 0,24%). Deviasi pada pembacaan arus yang lebih tinggi dibandingkan *error* parameter tegangan ini mempertegas teori bahwa *Current Transformer* (CT) pada PZEM-004T membutuhkan penyesuaian kalibrasi perangkat lunak yang lebih ketat. Untuk mengoreksi galat bawaan tersebut, nilai konstanta pengali (*Multiplier*, $m = 1,0027$) dan konstanta pergeseran (*Offset*, $C = -0,0437$) yang didapatkan dari hasil regresi linier diinjeksikan langsung ke dalam perhitungan komputasi di tingkat *firmware* ESP32.

3.2. Akumulasi Data Harian

Pengambilan data pengujian dilakukan selama 30 hari dengan perhitungan dimulai dari tanggal 05 April 2026 hingga 05 Mei 2026. Sistem yang diprogram pada penelitian ini melakukan pencatatan data dengan interval 1 menit sehingga teraget *ideal* yang diharapkan adalah 1.440 sampel data perhari. Pengujian ini dilakukan untuk mengukur stabilitas koneksi jaringan internet serta keakuratan program yang dirancang dengan membandingkan target ideal terhadap jumlah sampel aktual yang terekam pada database. Dalam memahami hasil perbandingan data maka ditunjukkan pada Gambar 7 berikut ini.

	Tanggal	#	Target	#	Aktual	#	Selisih	%	Persentase Error
1									
2	6 April 2026		1440		1440		0		0%
3	7 April 2026		1440		1440		0		0%
4	8 April 2026		1440		1440		0		0%
5	9 April 2026		1440		1440		0		0%
6	10 April 2026		1440		1440		0		0%
7	11 April 2026		1440		1440		0		0%
8	12 April 2026		1440		1440		0		0%
9	13 April 2026		1440		1440		0		0%
10	14 April 2026		1440		1440		0		0%
11	15 April 2026		1440		1440		0		0%
12	16 April 2026		1440		1440		0		0%
13	17 April 2026		1440		1440		0		0%
14	18 April 2026		1440		1440		0		0%
15	19 April 2026		1440		1440		0		0%
16	20 April 2026		1440		1440		0		0%
17	21 April 2026		1440		1440		0		0%
18	22 April 2026		1440		1440		0		0%
19	23 April 2026		1440		1440		0		0%
20	24 April 2026		1440		1440		0		0%
21	25 April 2026		1440		1440		0		0%
22	26 April 2026		1440		1440		0		0%
23	27 April 2026		1440		1440		0		0%
24	28 April 2026		1440		1440		0		0%
25	29 April 2026		1440		1440		0		0%
26	30 April 2026		1440		1440		0		0%
27	1 Mei 2026		1440		1440		0		0%
28	2 Mei 2026		1440		1440		0		0%
29	3 Mei 2026		1440		1440		0		0%
30	4 Mei 2026		1440		1440		0		0%
31	5 Mei 2026		1440		1440		0		0%

Gambar 7. Hasil Akumulasi Data Selama 30 Hari

Berdasarkan Gambar 7, diketahui bahwa selama 30 hari beroperasi, sistem memiliki akumulasi error absolut hanya sebesar 0% dari total 43.200 target sampel. Deviasi harian yang umumnya dievaluasi terbagi menjadi dua:

1) Data Loss

Data Loss ditunjukkan oleh selisih nilai negatif, di mana fenomena ini terjadi hanya pada 0 dari 30 hari pengujian. Persentase kehilangan tercatat sangat minimal, yaitu sebesar 0% selama periode pengujian. Ketiadaan angka *data loss* ini secara kuat mengindikasikan bahwa koneksi internet dan ketersediaan *server* bekerja dengan sangat stabil, sehingga insiden kegagalan pengiriman paket data (*packet drop*) tidak terjadi sama sekali.

2) Oversampling

Oversampling terjadi jika sistem memiliki selisih nilai positif. Pada sistem ini, tidak terdapat indikasi kelebihan jumlah data yang masuk selama 30 hari pengujian, dengan deviasi tercatat 0%. Ketiadaan *oversampling* ini membuktikan bahwa tidak terjadi hambatan dari akumulasi waktu eksekusi program, dan mekanisme pengiriman ulang pada protokol komunikasi tidak terpicu karena jaringan tidak mengalami *delay respons*, sehingga *server* terhindar dari data berganda (Nurfiqin et al., 2021).

3.3. Sistem Pencatatan Data

Sistem penyimpanan dan pencatatan data menggunakan metode *hybrid* dimana *Spreadsheet* dan *SD Card* sebagai tempat penyimpanan data, lalu data yang tersimpan akan divisualisasi dengan *Grafana* agar memudahkan pengguna dalam memantau data yang tercatat secara interaktif. *Spreadsheet* yang digunakan untuk mencatat parameter seperti tegangan (V), arus (I), energi aktif (P), energi terakumulasi (E), frekuensi (Hz), faktor energi (PF), dan energi reaktif (VAR) (Pian et al., 2023). Penggunaan *Spreadsheet* tidak hanya berfungsi sebagai perekam historis konsumsi energi yang dapat diakses dari jarak jauh akan tetapi juga

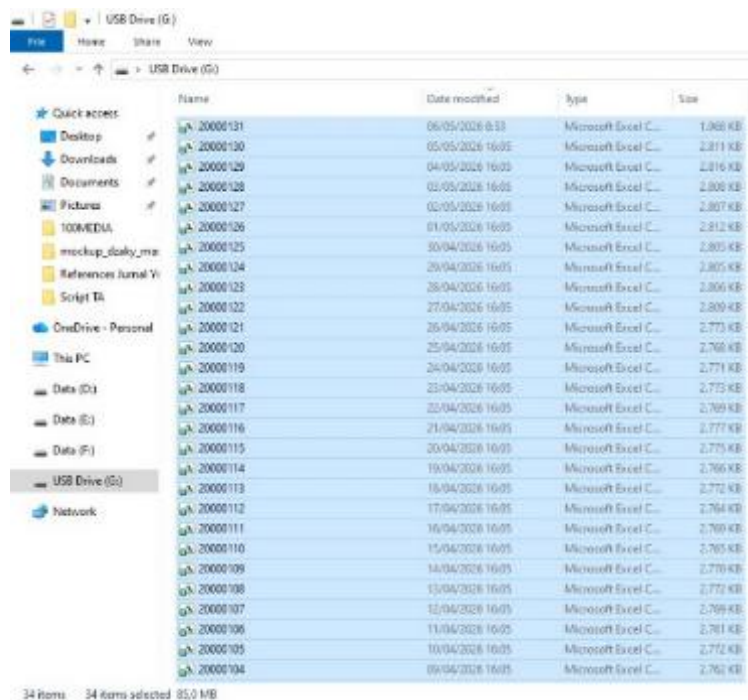
menyediakan fitur *exportable dataset* untuk keperluan analisis numerik. Berikut ini pada Gambar 8, memperlihatkan tampilan yang disajikan dalam *Spreadsheet*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Timestamp	vR	iR	pR	enR	hzR	pfR	varR					
2	2026-04-05 17:45:24	228	1.254	276	0.51	50	0.97	74.6					
3	2026-04-05 17:46:24	228.2	1.25	275.6	0.514	50	0.97	73.1					
4	2026-04-05 17:47:24	227.9	0.943	203.3	0.518	50	0.95	69.5					
5	2026-04-05 17:48:24	228.1	0.436	77.3	0.519	50	0.77	61.9					
6	2026-04-05 17:49:24	228.6	0.604	121.6	0.521	50	0.86	63					
7	2026-04-05 17:50:24	228.7	0.699	147	0.523	50	0.92	62.5					
8	2026-04-05 17:51:24	229	0.702	147.7	0.526	50	0.92	63.4					
9	2026-04-05 17:52:24	229.2	0.707	148.7	0.528	50	0.92	64.2					
10	2026-04-05 17:53:24	228.9	0.695	141.3	0.531	50	0.88	71.1					
11	2026-04-05 17:54:25	228.2	0.978	193.3	0.534	50	0.87	111.6					
12	2026-04-05 17:55:24	227.1	0.96	187.5	0.537	50	0.86	111.1					
13	2026-04-05 17:56:24	226.7	1.213	254.4	0.541	50	0.93	104					
14	2026-04-05 17:57:24	226.4	1.22	256.1	0.546	50	0.93	103.6					
15	2026-04-05 17:58:24	227	1.223	257.4	0.55	50	0.93	103.9					
16	2026-04-05 17:59:24	227.3	1.201	252.9	0.554	50	0.93	102.3					
17	2026-04-05 18:00:25	227	1.091	224	0.558	50	0.9	104.4					
18	2026-04-05 18:01:24	226.7	0.905	175.3	0.561	50	0.85	106.7					

Gambar 8. Tampilan Data Pada *Spreadsheet*

Berdasarkan Gambar 8, kolom dibagi menjadi 8 dengan diawali oleh *Timestamp*, selanjutnya kolom yang memuat parameter kelistrikan meliputi vR untuk pembacaan tegangan, iR untuk arus, pR untuk energi aktif, enR untuk metrik energi terakumulasi, hzR untuk frekuensi jaringan yang stabil pada angka 50, pfR untuk faktor energi, serta varR untuk energi reaktif.

Mekanisme pencatatan data selanjutnya ialah menggunakan *SD Card* dengan mekanisme pencadangan data *offline*. Data parameter diarsipkan ke dalam format *Comma Separated Values (CSV)* menghasilkan *file log* harian yang tersusun secara sistematis. *File-file* tersebut menggunakan konvensi penamaan terstruktur (seperti _20000104 hingga _20000131) dan terekam secara berurutan setiap harinya, yang dibuktikan dari rentang waktu pencatatan (*Date modified*) sejak awal April hingga awal Mei 2026. Masing-masing rekapitulasi data harian ini memiliki ukuran kapasitas yang stabil, yaitu pada kisaran 2,7 MB hingga 2,8 MB. Penggunaan metode ini untuk mencegah *data loss* apabila terjadi gangguan konektivitas jaringan maupun kegagalan transmisi menuju *server IoT* berbasis *cloud*. Pada Gambar 9 berikut ini menunjukkan data yang direkam dan tersimpan selama proses pengujian.



Gambar 9. Tampilan Hasil Rekaman Data SD Card

Sebagai pelengkap untuk memudahkan pembacaan data, maka sistem ini menggunakan *Grafana* dengan adanya fitur visualisasi data. *Platform* ini menawarkan *fleksibilitas* dalam analisis rentang waktu serta pembaruan data secara dinamis, sehingga memungkinkan pemantauan kondisi sistem secara berkelanjutan (Doni Saputra et al., 2025). Data yang ditunjukkan pada Gambar 10. Sistem menampilkan indikator parameter dasar kelistrikan yang mencakup frekuensi jaringan sebesar 50,0 Hz dan arus sebesar 984 mA. Tingkat tegangan dan faktor energi divisualisasikan secara intuitif menggunakan *gauge chart* dengan nilai pembacaan masing-masing sebesar 227 V dan 0,85. Fluktuasi beban dipantau secara detail melalui grafik time-series yang merepresentasikan energi aktif dengan nilai mutakhir 169 W dan energi reaktif sebesar 104 VAR. Dalam memudahkan analisis secara numerik sistem ini juga mengintegrasikan modul penghitungan konsumsi energi kumulatif yang mencatat penggunaan energi harian sebesar 5,167 KWh, mingguan 34,438 KWh, dan bulanan 144,541 KWh. Seluruh akumulasi konsumsi bulanan tersebut kemudian dikonversikan secara otomatis ke dalam estimasi total biaya operasional yang tertera senilai Rp 208.818.



Gambar 10. Tampilan Interface Grafana

Guna menunjang pengolahan data pasca pemantauan dan validasi dari hasil visualisasi tersebut, sistem ini juga dibekali dengan kapabilitas manajemen pengarsipan histori pengukuran. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11 berikut ini.

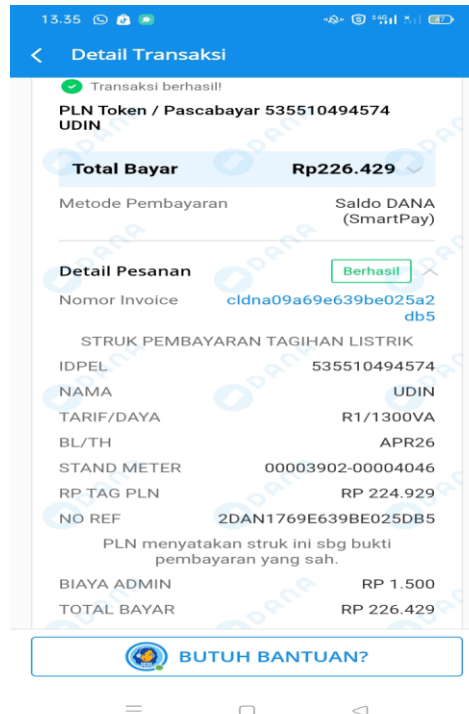


Gambar 11 Tampilan Fitur Download Data Backup

Modul ini bekerja secara terotomatisasi untuk mengeksport data mentah (*raw data*) langsung ke dalam infrastruktur *cloud* melalui direktori *Google Drive*. Antarmuka ini mengklasifikasikan opsi pengunduhan ke dalam dua interval waktu utama, yakni rekapitulasi harian dan bulanan. Penyediaan akses langsung terhadap *raw data* ini merupakan aspek krusial dalam perancangan sistem, karena tidak hanya berfungsi sebagai mekanisme backup untuk mencegah kehilangan data *logging*, melainkan juga memberikan fleksibilitas bagi peneliti untuk melakukan ekstraksi dan analisis matematis tingkat lanjut menggunakan perangkat lunak eksternal.

3.4. Nilai Real PLN

Berikut ini Gambar 12 menunjukkan bukti sah pembayaran tagihan listrik pascabayar PLN yang memuat parameter aktual konsumsi energi dari pihak penyedia layanan.



Gambar 12 Tarif Tagihan PLN

Data administratif ini berfungsi sebagai nilai referensi (*ground truth*) yang akan dikomparasikan dengan hasil pengukuran purwarupa sistem. Dari bukti tersebut, terdapat empat parameter esensial yang diekstraksi untuk keperluan validasi. Pertama, status Tarif/Energi (R1/1300VA) mengonfirmasi bahwa pengujian dilakukan pada instalasi listrik rumah tangga 1 fasa dengan batas energi 1300 VA. Kedua, Periode Tagihan (APR26) memastikan bahwa akumulasi pemakaian energi yang tercatat adalah untuk bulan April 2026, selaras dengan periode penarikan sampel pada *database* sistem. Ketiga, parameter *Stand Meter* (00003902-00004046) menunjukkan posisi meteran awal dan akhir, di mana selisih dari metrik ini memastikan bahwa total volume pemakaian energi aktual secara resmi adalah sebesar 144 kWh. Terakhir, Tagihan Aktual yang tertera sebesar Rp 224.929 merepresentasikan beban biaya murni atas konsumsi energi (di luar biaya administrasi platform), yang selanjutnya akan dihadapkan langsung dengan hasil estimasi biaya operasional dari kalkulasi algoritma pada dasbor Grafana.

4. DISCUSSION/CONCLUSION

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, sistem monitoring penggunaan energi listrik rumah tangga 1 fasa berbasis ESP32 dan PZEM-004T ini telah berhasil menjawab permasalahan mengenai tingginya kerentanan kehilangan data akibat instabilitas jaringan internet yang diuraikan pada bab pendahuluan. Implementasi metode penyimpanan *hybrid*—yang memfungsikan *SD Card* sebagai penyangga (*buffer*) memori lokal dan *Google Spreadsheet* sebagai pengarsipan jarak jauh—terbukti sangat tangguh. Keandalan arsitektur ini divalidasi oleh hasil pengujian operasional selama 30 hari beruntun, di mana sistem sukses mencatatkan angka *data loss* dan *oversampling* sebesar 0% dari total 43.200 target sampel harian. Selain keandalan transmisi, perangkat keras ini juga terbukti memiliki tingkat presisi pengukuran yang sangat mendekati instrumen ukur standar industri. Hal ini ditunjukkan oleh nilai koefisien linieritas kalibrasi (R^2) parameter tegangan yang mencapai 0,9997 dan arus listrik sebesar 0,9999. Tingkat akurasi tinggi dan arsitektur pengamanan data ganda ini menjadikan perangkat ini sangat layak diimplementasikan sebagai instrumen pembanding mandiri yang transparan terhadap tagihan aktual PLN (Amru et al., 2025).

Sebagai pembuktian atas kelayakan tersebut, komparasi data pada akhir periode pengujian menunjukkan tingkat keselarasan yang sangat tinggi antara pembacaan purwarupa dan tagihan resmi instansi. Berdasarkan dasbor pemantauan, sistem mencatatkan akumulasi konsumsi energi bulanan sebesar 144,541 kWh. Angka ini merepresentasikan selisih yang sangat minor (hanya 0,541 kWh) bila dibandingkan dengan rekaman volume pemakaian pada *stand meter* PLN yang menunjukkan angka bulat 144 kWh. Dari segi estimasi biaya operasional, sistem mengkalkulasi beban tarif murni sebesar Rp 208.818, sementara tagihan aktual PLN mencetak angka Rp 224.929. Adanya deviasi biaya ini divalidasi bukan sebagai galat (*error*) pada pembacaan sensor tegangan maupun arus, melainkan implikasi dari penambahan komponen Pajak Penerangan Jalan (PPJ) dan biaya administrasi yang diakumulasikan dalam skema penagihan pascabayar PLN. Secara keseluruhan, hasil komparasi ini secara definitif mengonfirmasi bahwa sistem yang dikembangkan mampu menyajikan transparansi data pemakaian energi pokok secara akurat.

Guna mendorong penelitian ini ke arah yang lebih aplikatif (prospek pengembangan selanjutnya), arsitektur *IoT* dan mekanisme pencadangan *hybrid* ini dapat diekspansi untuk mengakomodasi jaringan kelistrikan 3 fasa yang lebih kompleks. Pengembangan menuju sistem 3 fasa akan memperluas cakupan implementasi alat, tidak hanya untuk sektor domestik, tetapi juga utilitas industri dan fasilitas publik. Selain itu, dataset historis dalam format *CSV* yang secara berkala diakumulasikan oleh sistem ini berpeluang besar untuk diintegrasikan dengan pemodelan kecerdasan buatan (*machine learning*). Integrasi lanjutan tersebut dapat dirancang untuk melakukan klasifikasi beban tak wajar (*phantom load*) secara otomatis, sekaligus meramalkan tren konsumsi listrik prediktif di masa mendatang. Dari perspektif akurasi estimasi biaya, pengembangan algoritma kalkulasi pada sistem juga perlu penambahan variabel Pajak Penerangan Jalan (PPJ) pada pemograman mikrokontroler. Hal ini penting agar akumulasi nominal tagihan yang ditampilkan selaras dengan skema tarif *real* Perusahaan Listrik Negara (PLN), sehingga pengguna mendapatkan representasi beban finansial kelistrikan yang presisi dan komprehensif (Wongwut & Angamnuaysiri, 2024).

ACKNOWLEDGEMENTS

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ibu Ratna Susana, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing, atas segala bimbingan, arahan, waktu, dan dedikasi intelektual yang telah diberikan sepanjang perancangan hingga penyelesaian penelitian ini. Apresiasi dan ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Bandung, yang telah memfasilitasi lingkungan akademik serta sarana laboratorium pendukung bagi para penulis.

REFERENCES

- [1] L. Aditya, H. Prayitno, and N. Naibaho, "Disain Monitoring Dan Pengendali Beban Pada Panel Listrik Berbasis IoT Menggunakan Web Server," *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 52–58, 2025, doi: 10.52447/jkte.v10i1.8089.
- [2] M. M. Ahmed, M. O. Qays, A. Abu-Siada, S. M. Mueen, and M. L. Hossain, "Cost-effective design of iot-based smart household distribution system," *Designs*, vol. 5, no. 3, pp. 1–18, 2021, doi: 10.3390/designs5030055.
- [3] A. Amru et al., "Pemanfaatan Power Meter PZEM-004T Berbasis IoT Untuk Pemantauan Daya Listrik Secara Real-Time," in *Seminar Nasional Teknik Elektro*, vol. 11, no. 1, 2025, pp. 153–159.
- [4] I. Chairunnisa and W. Wildian, "Rancang Bangun Alat Pemantau Biaya Pemakaian Energi Listrik Menggunakan Sensor PZEM-004T dan Aplikasi Blynk," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 11, no. 2, pp. 249–255, 2022, doi: 10.25077/jfu.11.2.249-255.2022.
- [5] M. Dahlan, B. C. Wibowo, S. Solekhan, and S. Solekhan, "Monitoring Besaran Listrik Instalasi Menggunakan Aplikasi Android," *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, vol. 11, no. 2, p. 77, 2022, doi: 10.35793/jtek.11.2.2022.39994.
- [6] M. Doni Saputra, Husain, and K. Marzuki, "Desain dan Implementasi Monitoring Infrastruktur Perangkat Jaringan dan Server Menggunakan Grafana dan Prometheus," *Jurnal Teknik Informatika Dan Sistem Informasi*, vol. 12, no. 3, pp. 29–47, 2025.
- [7] S. T. Elektro et al., "Desain Sistem Perlindungan Motor Tiga Fasa dari Tegangan Lebih Berbasis Mikrokontroler Arduino Mega 2560," 2023, pp. 46–53.
- [8] R. Fadillah, W. W. Adi, and N. Akhriyanto, "Rancang Bangun Edge Computing Untuk Pengukuran," vol. 3, no. 2, pp. 11–21, 2025.
- [9] E. Kurniawan, D. S. Pangaudi, and N. Widjtmoko, "Perancangan Sistem Monitoring Konsumsi Daya Listrik Berbasis Android," vol. 5, no. 01, pp. 63–68, 2022.
- [10] L. Nurfiqin, Z. Sari, F. Dwi, and S. Sumadi, "Analisis Quality of Service (QoS) Protokol MQTT dan HTTP Pada Sistem Smart Metering Arus Listrik," vol. 3, no. 1, pp. 121–130, 2021.
- [11] N. Nuryawan and M. Jannah, "Electrical Energy Monitoring and Control System In Boarding Rooms Based On The Internet of Things," *Int. J. Eng. Sci. Inf. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 76–83, 2022, doi: 10.52088/ijesty.v2i4.335.
- [12] Ai. Padlia Mustamin and T. Bini, "Rancang Bangun Kontrol Kwh Meter Satu Fasa Berbasis Internet of Things," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro Dan Informatika (SNTEI) 2021*, 2021, pp. 303–309.
- [13] P. Pian, I. Sulistiyowati, and A. Wisaksono, "Perancangan Alat Perbaikan Faktor Listrik Rumah Tangga Dengan Monitoring Telegram," *JEECOM Journal of Electrical Engineering and Computer*, vol. 5, no. 1, pp. 71–77, 2023, doi: 10.33650/jeecom.v5i1.5841.
- [14] Y. Prabowo, A. Narendro, T. Wisjhnuadji, and S. Siswanto, "Uji Akurasi Modul Kwh Meter Digital Pzem-004T Berbasis Pengendali Digital Esp32," *SKANIKA: Sistem Komputer Dan Teknik Informatika*, vol. 6, no. 2, pp. 85–96, 2023, doi: 10.36080/skanika.v6i2.3064.
- [15] A. A. Pradana, P. Yuliantoro, and S. Indriyanto, "Perancangan Sistem Monitoring Daya Listrik 1 Fasa Pada Rumah Tangga Berbasis Internet of Things," *Jurnal SINTA: Sistem Informasi Dan Teknologi Komputasi*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2024, doi: 10.61124/sinta.v1i1.13.
- [16] C. A. Prameswari and I. S. Putro, "Sistem Smart Home Berbasis ESP32 Dengan RTOS Dan MQTT Serta Aplikasi Flutter Untuk Monitoring Real-Time," vol. 14, no. 2.
- [17] R. T. Putra and M. A. R. Pohan, "Penerapan Jaringan Syaraf Tiruan untuk Meningkatkan Akurasi Sensor Arus PZEM-004T," *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali Dan Elektronika Terapan*, vol. 12, no. 2, pp. 119–129, 2024, doi: 10.34010/telekontran.v12i2.9687.
- [18] A. Rahmadani and A. Fernandes, "Rancang Bangun Kwh Meter Portabel Dengan Fitur Tagihan Susulan Dan Pemutus Otomatis Berbasis IoT," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 9, no. 3, pp. 3849–3856, 2025, doi: 10.36040/jati.v9i3.13414.
- [19] Y. Rahmawati, A. N. Ramadhan, and T. M. Kadarina, "Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Daya Pada Panel Saklar Tegangan Rendah Secara Real-Time Berbasis Internet of Things (IoT)," *Journal of Telecommunication Electronics and Control Engineering (JTECE)*, vol. 6, no. 1, pp. 60–73, 2024, doi:

10.20895/jtece.v6i1.1327.

- [20] K. Wongwut and D. Angamnuaysiri, "Development of real-time energy monitoring system using IoT base," *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, vol. 23, no. 3, pp. 1-11, 2024, doi: 10.60101/jarst.2024.255911.