Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Kontrol Beban Listrik Rumah Tangga Berbasis Internet of Things

Muh. Irham M, Hasrul Syafar Ibrahim, Nurmayanti Zain, Abdul Hakim Udin, Lompo Ramos Emakarim, Farhan Rezki Arifin, dan Ummu Khalsum*

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Cokroaminoto Makassar

**Correspondent Author: nurmayanti.zain@ucm-si.ac.id*

***Abstract* — Conventional electrical systems in the residential sector have not provided real-time visibility of power consumption, making it difficult for users to achieve energy efficiency and early detection of abnormal conditions such as overload. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based residential electrical load monitoring and control system using an ESP32 microcontroller, PZEM-004T sensor, 4-channel relay module, and Blynk and Telegram Bot platforms. The research method includes hardware and software design, comparative calibration tests against standard instruments, actuator functionality tests, network communication reliability tests, whitelist access security tests, and state recovery tests using Non-Volatile Storage. The test results show average reading errors of 0.46% for voltage, 1.4% for current, and 0.8% for active power, all below the 5% tolerance threshold. The relay module responded to all actuation commands accurately, the non-blocking system prevented hang conditions during network disconnection, and the Telegram whitelist mechanism demonstrated 100% success in blocking commands from unregistered accounts. This prototype is feasible for implementation as a smart instrument for efficiency and safety of residential electrical installations.**

***Keyword* — Blynk, ESP32, Internet of Things, power monitoring, Telegram Bot.**

Abstrak — Sistem kelistrikan konvensional di sektor rumah tangga belum menyediakan visibilitas konsumsi daya secara real-time, sehingga menyulitkan pengguna dalam melakukan efisiensi energi dan deteksi dini kondisi abnormal seperti kelebihan beban. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring dan kontrol beban listrik rumah tangga berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor PZEM-004T, modul relai 4-channel, serta platform Blynk dan Telegram Bot. Metode penelitian mencakup perancangan perangkat keras dan lunak, uji kalibrasi komparatif terhadap instrumen standar, uji fungsionalitas aktuator, uji keandalan komunikasi jaringan, uji keamanan akses whitelist, dan uji pemulihan state menggunakan Non-Volatile Storage. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata galat pembacaan tegangan 0,46%, arus 1,4%, dan daya aktif 0,8% yang berada di bawah ambang toleransi 5%. Modul relai merespons seluruh instruksi aktuasi secara akurat, sistem non-blocking mencegah kondisi hang saat pemutusan jaringan, dan mekanisme whitelist Telegram menunjukkan keberhasilan 100% dalam memblokir perintah dari akun tidak terdaftar. Purwarupa ini layak diimplementasikan sebagai instrumen cerdas untuk efisiensi dan keamanan instalasi kelistrikan residensial.

Kata kunci — Blynk, ESP32, Internet of Things, monitoring daya, Telegram Bot.

I. PENDAHULUAN

Ketergantungan peradaban modern terhadap energi listrik terus mengalami eskalasi yang signifikan. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), tren konsumsi energi listrik nasional mencatat pertumbuhan 4 hingga 6 persen per tahun dalam satu dekade terakhir [1]. Fenomena serupa dikonfirmasi oleh International Energy Agency (IEA), di mana elektrifikasi pada sektor industri dan transportasi memicu lonjakan permintaan daya secara global [2]. Tren eksponensial ini menuntut sistem manajemen energi yang komprehensif untuk menjaga keandalan pasokan dan mereduksi inefisiensi biaya operasional.

Implementasi manajemen energi di sektor rumah tangga masih menemui kendala teknis. Masyarakat umumnya hanya bergantung pada akumulasi tagihan pascabayar di akhir bulan tanpa visibilitas terhadap rincian profil beban dari masing-masing instrumen elektronik. Kondisi buta data ini mengakibatkan optimasi penggunaan energi menjadi sulit dilakukan. Ketiadaan sistem pemantauan kelistrikan domestik juga memunculkan risiko keamanan instalasi, di mana insiden kebakaran di sektor perumahan kerap dipicu oleh kegagalan isolasi atau terjadinya overload pada jaringan listrik [3] [4].

Integrasi teknologi *Internet of Things (IoT)* menawarkan paradigma baru dalam otomasi sistem kelistrikan. Arsitektur IoT memfasilitasi interkonektivitas antar perangkat elektronik melalui protokol jaringan komunikasi, memungkinkan proses akuisisi, transmisi, dan komputasi data berjalan secara otonom [5] [6].

Penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem pemantauan konsumsi energi listrik rumah tangga berbasis IoT. Bisri et al. mengembangkan sistem monitoring daya listrik menggunakan ESP32, PZEM-004T, dan Blynk untuk memantau tegangan, arus, dan energi secara jarak jauh [7]. Setiawan et al. mengembangkan sistem monitoring dan visualisasi konsumsi energi listrik rumah secara real-time menggunakan NodeMCU ESP8266, PZEM-004T, dan Blynk [8]. Sementara itu, Adiwiranto et al. mengembangkan sistem monitoring konsumsi energi sekaligus estimasi biaya listrik pada peralatan rumah tangga berbasis IoT [9]. Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, masih terdapat peluang untuk mengembangkan sistem yang mengintegrasikan pemantauan real-time, estimasi biaya, pengendalian beban, serta aspek keamanan komunikasi dan akses data dalam satu sistem manajemen energi rumah tangga.

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring dan kontrol beban

listrik rumah tangga berbasis IoT yang terintegrasi secara multi-platform. Fokus pengembangan mencakup hibridisasi arsitektur komunikasi Blynk dan Telegram Bot, algoritma konversi finansial estimasi tagihan, protokol keamanan whitelist, serta mekanisme proteksi adaptif berbasis *Non-Volatile Storage (NVS).*

II. Tinjauan Pustaka

A. Internet of Things (IoT)

IoT merepresentasikan paradigma komputasi di mana entitas fisik disematkan dengan instrumen elektronika, sensor, aktuator, serta konektivitas jaringan. Arsitektur fundamental IoT terdiri dari empat lapisan utama: lapisan persepsi (perangkat keras), lapisan jaringan (komunikasi), lapisan pemrosesan *(cloud computing)*, dan lapisan aplikasi (antarmuka pengguna) [10].

B. Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan *System on a Chip (SoC)* yang dikembangkan oleh *Espressif Systems* dengan arsitektur dual-core Tensilica Xtensa 32-bit, frekuensi clock 80-240 MHz, dan integrasi Wi-Fi 802.11 b/g/n serta Bluetooth. Keunggulan utama ESP32 meliputi manajemen daya adaptif, 36 pin GPIO yang mendukung ADC 12-bit, DAC 8-bit, dan PWM. Papan pengembangan ini menjadi standar industri untuk aplikasi IoT karena kemampuannya menangani komputasi sensor secara paralel dengan rutinitas komunikasi jaringan [11].

C. Sensor PZEM-004T

PZEM-004T merupakan modul instrumentasi digital multifungsi untuk pengukuran parameter kelistrikan AC. Spesifikasi teknisnya mencakup rentang tegangan 80-260 VAC, arus 0-100 A, daya aktif 0-23 kW, dan energi kumulatif 0-9999,99 kWh. Modul ini menggunakan protokol Modbus-RTU dengan antarmuka UART dan baud rate 9600 bps. Keunggulan PZEM-004T dibandingkan sensor analog meliputi pemrosesan terintegrasi, akurasi tinggi berkat ADC khusus energi, imunitas terhadap *noise*, dan efisiensi pin [12].

D. Platform Blynk dan Telegram Bot

Blynk merupakan *Platform as a Service (PaaS)* yang memungkinkan pengguna menyusun dashboard visual melalui metode *drag-and-drop*. Ekosistem Blynk terdiri dari aplikasi klien, *server cloud*, dan *hardware library*. Mekanisme komunikasi menggunakan *Virtual Pin (V-Pin)* yang merupakan kanal logis abstrak di *server cloud*, membebaskan arsitektur perangkat lunak dari limitasi fisik mikrokontroler [13].

Telegram Bot API menyediakan infrastruktur berbasis HTTP untuk mengonfigurasi agen virtual yang bertindak sebagai broker lalu lintas data. Bot Token berfungsi sebagai sistem autentikasi, sedangkan Chat ID bertindak sebagai alamat tujuan notifikasi dan lapisan verifikasi keamanan melalui metode *whitelist* [14].

E. Non-Volatile Storage (NVS)

Non-Volatile Storage merupakan mekanisme penyimpanan permanen pada partisi flash memory ESP32. Library Preferences.h menyediakan antarmuka pemrograman tingkat tinggi dengan skema *key-value pair* dalam *namespace*. Mekanisme ini memungkinkan penyimpanan variabel konfigurasi seperti status relai, tarif listrik, dan batas alarm daya agar tidak hilang saat terjadi pemadaman listrik. Fitur *wear-leveling internal* membantu memperpanjang usia pakai *flash memory* [15].

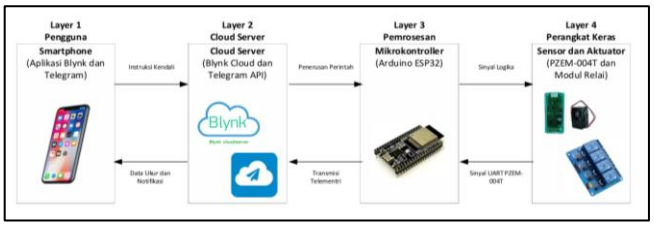
III. Metode Penelitian

A. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini diklasifikasikan sebagai penelitian terapan *(applied research)* yang mengadopsi kerangka kerja Rancang Bangun *(Engineering Design Process)*. Tahapan prosedural mencakup studi literatur, perancangan topologi sistem, realisasi perangkat keras dan lunak, hingga pengujian performa fungsional secara komprehensif.

B. Perancangan Sistem

Secara hierarkis, sistem pemantauan dan kendali ini memiliki dua rute komunikasi data utama yang berjalan dua arah *(full-duplex)*, yaitu: alur instruksi dari pengguna ke perangkat (kendali) dan alur pemantauan dari sensor ke pengguna (telemetri). Gambar 1 menyajikan skema sistem monitoring secara utuh.



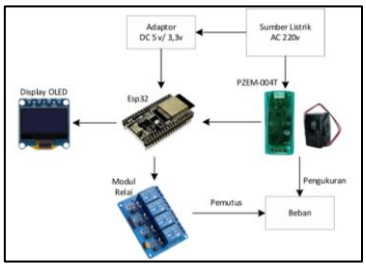
Gambar 1. Skema Sistem Monitoring

C. Perancangan Perangkat Keras (Hardware)

Perancangan perangkat keras merupakan proses rekayasa fisis untuk menggabungkan instrumen mikrokontroler, sensor, dan aktuator menjadi satu kesatuan sistem tertanam. Gambar 2 menyajikan skema perangkat keras yang merepresentasikan interkoneksi jalur kelistrikan dan komunikasi data antar-modul elektronika.

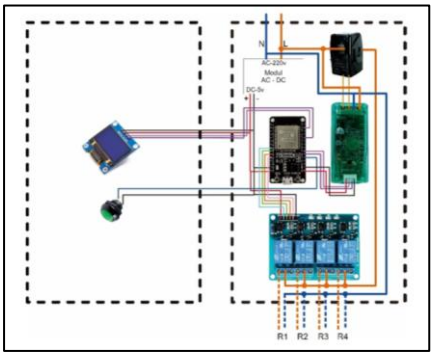
ESP32 digunakan sebagai pusat kendali sistem untuk mengelola komunikasi sensor, tampilan, dan aktuasi relai. Pemetaan antarmuka perangkat keras meliputi modul relai 4-channel pada GPIO 14, 27, 26, dan 25; sensor PZEM-004T melalui UART2 dengan GPIO 16 (RX) dan GPIO 17 (TX); serta OLED SSD1306 melalui antarmuka I²C dengan GPIO

21 (SDA) dan GPIO 22 (SCL). Tombol fisik dihubungkan ke GPIO 4 dengan konfigurasi internal pull-up. Catu daya periferal menggunakan tegangan 3,3 V dan 5 V sesuai kebutuhan masing-masing perangkat.



Gambar 2. Skema Perangkat Keras

Integrasi dengan jaringan listrik dilakukan pada sistem satu fasa. Jalur netral terhubung langsung ke sensor dan beban, sedangkan jalur fasa dilewatkan melalui CT PZEM-004T untuk mengukur arus total sebelum didistribusikan ke terminal Common (COM) setiap kanal relai. Terminal Normally Open (NO) selanjutnya dihubungkan ke masing-masing beban. Konfigurasi tersebut memungkinkan pemutusan dan penyambungan daya beban secara independen berdasarkan sinyal kendali ESP32, dengan modul relai beroperasi pada logika aktif-LOW. Diagram interkoneksi sistem ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan spesifikasi komponen disajikan pada Tabel 1.



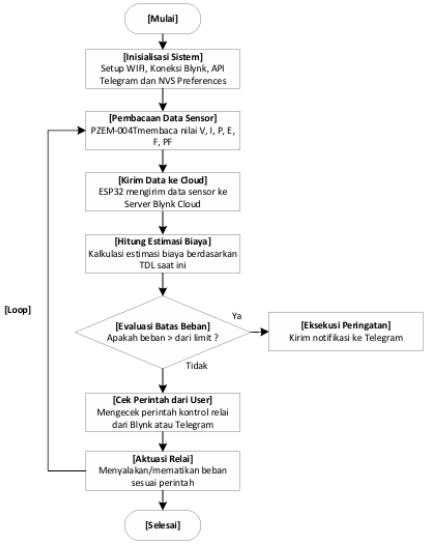
Gambar 3. Skema Perangkat Keras

Tabel 1. Spesifikasi Komponen Sistem

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
ESP32 Development Board	Dual-core Xtensa 32-bit, Wi-Fi 802.11 b/g/n	Pemrosesan utama dan komunikasi jaringan
PZEM-004T V3.0	80–260 VAC, 0–100 A, Modbus-RTU	Akuisisi tegangan, arus, daya, dan energi
Modul Relai 4-Channel	Active-Low, optoisolator	Aktuasi pemutusan dan penyambungan fasa beban
OLED SSD1306	128 × 64 piksel, I²C	Tampilan parameter dan status sistem
Push Button	SPST, Normally Open	Interupsi manual dan reset energi

D. Perancangan Perangkat Lunak (Software)

Implementasi perangkat lunak mencakup perancangan logika mikrokontroler dan antarmuka pengguna untuk memfasilitasi komunikasi dua arah antara purwarupa dan pengguna dari jarak jauh. Berbeda dengan program konvensional yang berjalan secara sekuensial *(blocking)*, arsitektur perangkat lunak pada ESP32 dirancang menggunakan algoritma non-blocking berbasis pewaktuan millis(). Pendekatan ini memastikan bahwa rutinitas konektivitas jaringan, pembacaan sensor, pemrosesan antrean notifikasi, dan interupsi tombol fisik dapat beroperasi secara asinkron tanpa membebani sistem utama. Gambar 4 menyajikan flowchart perangkat lunak sistem.



Gambar 4. *Flowchart* Perangkat Lunak

Siklus operasional sistem dimulai saat sensor PZEM-004T melakukan pengambilan data kelistrikan dan mengirimkannya ke ESP32 melalui komunikasi UART. Mikrokontroler kemudian mengeksekusi dua tugas paralel: mengunggah data ke dashboard Blynk Cloud dan mencocokkan nilai pembacaan dengan ambang batas keamanan. Apabila terdeteksi anomali, rutin interupsi aktif dan sistem secara otonom menembakkan pesan peringatan ke Telegram. Selama siklus ini berjalan, mikrokontroler juga bersiaga menerima instruksi trigger balik dari pengguna.

D. Prosedur Pengujian Sistem

Pengujian fungsional *(black-box testing)* dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pada aspek pengukuran, kendali, komunikasi, keamanan, dan keandalan. Akurasi PZEM-004T divalidasi dengan membandingkan tegangan, arus, dan daya terhadap multimeter digital dan clamp meter pada beberapa variasi beban, dengan error dihitung berdasarkan selisih relatif terhadap alat referensi, sebagaimana formula berikut:

$$Error\ (\%) = \frac{Xsensor - Xreferensi}{Xreferensi} \times 100\% \qquad (1)$$

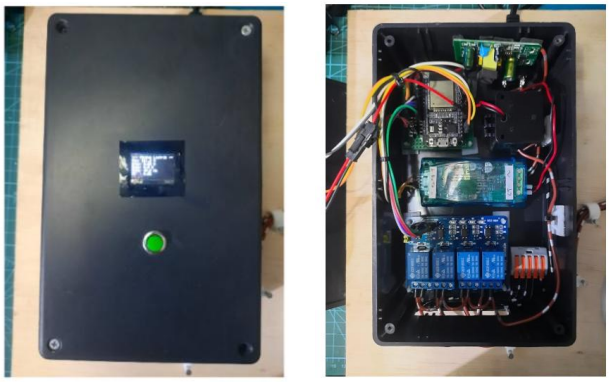
Fungsi aktuasi diuji melalui kendali individual maupun seluruh relai menggunakan Telegram dan Blynk, kemudian diverifikasi melalui indikator relai dan tampilan OLED. Keandalan komunikasi dievaluasi dengan memutus koneksi Wi-Fi secara paksa untuk memastikan sistem tetap responsif, melakukan auto-reconnect, dan mengirimkan notifikasi setelah koneksi pulih. Aspek keamanan diuji melalui akses dari akun Telegram di luar whitelist, sedangkan fungsi alarm diverifikasi dengan memberikan beban yang melebihi batas daya yang telah ditentukan.

Respons tombol fisik diuji melalui penekanan singkat untuk pergantian tampilan dan penekanan ⩾3 detik untuk reset energi. Selanjutnya, ketahanan penyimpanan konfigurasi diverifikasi dengan mengubah parameter tarif dan nama relai, diikuti pemutusan catu daya untuk memastikan state dapat dipulihkan melalui NVS.

IV. Hasil dan Pembahasan

A. Implementasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Implementasi perangkat keras merupakan tahap penerjemahan skema rangkaian elektronika ke dalam purwarupa fisik yang utuh. Purwarupa dikemas menggunakan enclosure berbahan polimer isolator untuk mengamankan sirkuit internal. Gambar 5a menyajikan implementasi fisik purwarupa tampak luar, sedangkan Gambar 5b memperlihatkan konfigurasi rangkaian internal.



(a) (b)

Gambar 5. Purwarupa: (a) tampak luar, (b) rangkaian internal

Pada eksterior panel dipasang layar OLED SSD1306 untuk pemantauan lokal dan tombol fisik tunggal untuk interupsi manual. Pada ruang internal, pengkabelan diorganisasikan dengan memisahkan jalur kabel arus kuat dan sinyal logika untuk meminimalisasi interferensi elektromagnetik.

Implementasi perangkat lunak mencakup dua platform cloud yang berjalan paralel. Gambar 6 menyajikan antarmuka dashboard pada aplikasi Blynk, di mana data telemetri (tegangan, arus, daya, frekuensi, energi) ditransmisikan melalui Virtual Pin dan direpresentasikan dalam widget gauge serta tombol kontrol.



Gambar 6. Antarmuka Dashboard pada Aplikasi Blynk

Sebagai subsistem komunikasi asinkron, antarmuka Telegram dirancang berbasis teks untuk notifikasi peringatan dini dan kendali administratif. Gambar 7 menyajikan interaksi perintah pada antarmuka Bot Telegram, yang dilengkapi algoritma pengenalan perintah (/status, /pzem_status, /relay1_on, /all_off) serta lapisan keamanan whitelist.



Gambar 7. Interaksi Perintah pada Antarmuka Bot Telegram

B. Hasil Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi sensor merupakan tahap krusial untuk memastikan validitas data telemetri sebelum didistribusikan ke komputasi awan. Validasi dilakukan melalui metode kalibrasi komparatif dengan instrumen standar pabrik.

Tabel 2. Hasil Komparasi Pengukuran Tegangan AC

Pengujian ke-	Multimeter (V)	PZEM-004T (V)	Selisih (V)	Error (%)
1	218,4	219,0	0,6	0,3
2	218,3	219,3	1,0	0,5
3	218,9	219,8	0,9	0,4
4	216,3	217,5	1,2	0,6
5	216,4	217,5	1,1	0,5
			Rata-Rata	**0,46**



Gambar 8. Pengujian Akurasi Tegangan

Berdasarkan Tabel 2, modul PZEM-004T menunjukkan sensitivitas yang sangat baik terhadap dinamika tegangan jala-jala dengan rata-rata error 0,46%, jauh di bawah ambang toleransi standar 5%.

Tabel 3. Hasil Komparasi Pengukuran Arus dengan Pembebanan Bertingkat

Skenario Pembebanan	Tang Ampere (A)	PZEM-004T (A)	Selisih (A)	Error (%)
Beban 1	0,15	0,15	0,00	0,0
Beban 2	0,25	0,25	0,00	0,0
Beban 3	0,20	0,21	0,01	5,0
Beban 4	1,64	1,65	0,01	0,6
			Rata-Rata	**1,4**

Hasil kalibrasi arus membuktikan respons linier dari inti feromagnetik CT dengan rata-rata galat 1,4%, yang mengonfirmasi bahwa penempatan satu unit CT pada jalur fasa utama merupakan topologi perancangan yang efisien tanpa interferensi silang.

Tabel 4. Hasil Komparasi Pengukuran Daya Aktif

Skenario Pengujian	Alat Referensi (W)	PZEM-004T (W)	Selisih (W)	Error (%)
Beban Rendah	22,3	22,7	0,4	1,8
Beban Menengah	46,4	46,2	−0,2	0,4
Beban Tinggi	236,5	236,3	−0,2	0,1
			Rata-Rata	**0,8**

Tingkat presisi tinggi dicapai karena PZEM dilengkapi ASIC energy metering yang melakukan komputasi RMS secara kontinu, sehingga mengurangi beban komputasi ESP32.

C. Hasil Pengujian Fungsionalitas Aktuator dan Keandalan Jaringan

Pengujian fungsionalitas aktuator difokuskan pada evaluasi kinerja modul relai 4-channel sebagai sakelar elektromekanis utama. Pengujian pada Gambar 9 memastikan ESP32 mampu menerjemahkan instruksi logis dari berbagai antarmuka.



Gambar 9. Pengujian Fungsionalitas Kontrol Beban

Tabel 5. Hasil Pengujian Fungsionalitas Kontrol Beban (Relai 4-Channel)

No	Antarmuka	Instruksi	Target Relai	Indikator Modul & OLED	Status Beban	Hasil
1	Telegram	/relay1_on	Relai 1	LED 1 ON, OLED ON	Beban 1 ON	Berhasil
2	Telegram	/relay2_off	Relai 2	LED 2 OFF, OLED OFF	Beban 2 OFF	Berhasil
3	Telegram	/all_on	Semua relai	Semua LED ON, OLED ON	Semua beban ON	Berhasil
4	Telegram	/all_off	Semua relai	Semua LED OFF, OLED OFF	Semua beban OFF	Berhasil
5	Blynk	Tombol V1 (ON)	Relai 1	LED 1 ON, OLED ON	Beban 1 ON	Berhasil
6	Blynk	Tombol V3 (OFF)	Relai 3	LED 3 OFF, OLED OFF	Beban 3 OFF	Berhasil
7	Telegram & Blynk	V4 ON + /status	Relai 4	LED 4 ON, Telegram: "ON"	Beban 4 ON	Berhasil

Seluruh instruksi kendali, baik melalui Blynk maupun Telegram, berhasil dieksekusi tanpa lag atau kegagalan sinkronisasi, ditunjukkan pada Tabel 5. Modul relai dengan konfigurasi Active Low terbukti responsif, dan isolasi optik (optocoupler) berfungsi optimal tanpa kebocoran tegangan balik dari koil 5V yang berpotensi merusak pin GPIO 3.3V.

Pengujian keandalan jaringan dilakukan untuk memvalidasi ketangguhan arsitektur non-blocking saat terjadi pemutusan WiFi tampak pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Keandalan Jaringan dan Pemulihan Koneksi

No	Skenario Pengujian	Fungsionalitas Lokal (ESP32)	Layanan Cloud & Notifikasi	Hasil
1	Waktu Respons Normal	Relai merespons cepat dan OLED diperbarui secara langsung	Blynk dan Telegram merespons normal	Berhasil
2	Pemutusan Jaringan Paksa	LED berkedip, tombol fisik tetap responsif, dan status relai dipertahankan	Blynk offline dan perintah Telegram tidak diterima	Berhasil
3	Pemulihan Jaringan	LED kembali menyala stabil, sensor dan OLED berfungsi normal	Blynk kembali online dan notifikasi koneksi dikirim	Berhasil

Implementasi fungsi non-blocking pada rutin koneksi WiFi dan Blynk terbukti mampu mencegah mikrokontroler dari kondisi hang saat terisolasi dari jaringan. Perangkat keras lokal tetap beroperasi melayani perintah fisik secara independen (offline mode), dan proses re-integrasi dengan server IoT berlangsung otomatis tanpa intervensi pengguna.

D. Hasil Pengujian Lapisan Keamanan (Whitelist) dan Peringatan Dini

Pengujian keamanan dilakukan dengan menyimulasikan upaya intervensi dari akun Telegram asing yang belum didaftarkan. Fitur peringatan dini diuji dengan memanipulasi ambang batas daya dan memberikan beban fisis yang

melampaui batas tersebut. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Hasil Pengujian Keamanan (Whitelist) dan Peringatan Dini

No	Fitur	Skenario	Observasi Sistem	Hasil
1	Keamanan Akses	Perintah kontrol dari akun yang tidak terdaftar	Perintah diabaikan, bot memberikan respons "Tidak diizinkan", dan relai tetap pada kondisi sebelumnya	Berhasil
2	Keamanan Akses	/add_whitelist [Chat_ID] oleh admin	Bot mengonfirmasi penambahan ID dan akun dapat melakukan kontrol	Berhasil
3	Peringatan Dini	/set_power_limit 100 W	Bot mengonfirmasi batas alarm daya sebesar 100 W	Berhasil
4	Peringatan Dini	Beban 350 W > batas 100 W	Notifikasi "⚠ ALARM" dikirim ke seluruh akun dalam *whitelist*	Berhasil
5	Peringatan Dini	Daya kembali di bawah batas	Notifikasi "☑ Konsumsi daya kembali normal" dikirim	Berhasil

Mekanisme whitelist terbukti secara efektif memfilter dan menolak instruksi dari Chat ID tidak teridentifikasi, memberikan perlindungan mutlak dari potensi sabotase. Fitur alarming dieksekusi secara instan berkat mekanisme antrean notifikasi (notification queue) tanpa menyebabkan perlambatan pemrosesan data lainnya.

E. Hasil Pengujian Interupsi Perangkat Keras (Tombol Fisik)

Pengujian interupsi perangkat keras mengevaluasi responsivitas tombol fisik tunggal yang dikonfigurasi menggunakan logika State Machine dan pewaktuan millis(). Tombol dialokasikan untuk dua instruksi berbeda berdasarkan durasi penekanan. Hasil pengujian tampak pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Pengujian Fungsionalitas dan Interupsi Tombol Fisik

No	Skenario Pengujian	Durasi Penekanan	Observasi Sistem	Hasil
1	Penekanan Singkat	±0,5 detik	Mode OLED berpindah dengan transisi yang responsif	Berhasil
2	Penekanan Beruntun	3× cepat	*Debounce* berfungsi tanpa terjadi *glitch*	Berhasil
3	Penekanan Tahan	≥3 detik	OLED menampilkan "RESET OK!" dan energi kembali ke 0 kWh	Berhasil
4	Sinkronisasi Laporan	Setelah *long press*	Admin menerima laporan sebelum proses *reset*	Berhasil

Logika pembacaan interupsi terbukti presisi dalam mengklasifikasikan durasi input fisis. Eksekusi reset energi melalui perangkat keras berhasil memicu transmisi laporan pencatatan terakhir ke Telegram, sehingga Administrator tetap mendapatkan rekam jejak historis.

F. Hasil Pengujian Interupsi Perangkat Keras (Tombol Fisik)

Pengujian ini memvalidasi pemanfaatan memori NVS melalui library Preferences.h untuk menyimpan variabel kritis seperti status relai, tarif, batas alarm, dan nama relai. Prosedur dilakukan dengan memberikan instruksi perubahan parameter melalui Telegram, kemudian catu daya ESP32 dicabut dan dihidupkan kembali.

Tabel 9. Hasil Pengujian Pemulihan State dan Penyimpanan NVS

No	Parameter	Kondisi Sebelum Pemutusan Daya	Observasi Setelah Pemulihan	Hasil
1	Status Aktuator	R1 ON, R2 OFF, R3 ON, R4 OFF	R1 dan R3 ON, R2 dan R4 OFF serta status tersinkronisasi	Berhasil
2	Konfigurasi Tarif	/set_tariff 1500.5	Tarif tetap Rp1.500,5/kWh pada /pzem_status	Berhasil
3	Batas Alarm Daya	/set_power_limit 450	Batas 450 W tetap tersimpan saat pembacaan beban	Berhasil
4	Nama Relai Kustom	/rename_relay 1 LampuTeras	Label "LampuTeras" tetap ditampilkan pada OLED dan /status	Berhasil
5	Tanggal Mulai Perekaman	Data waktu NTP tersimpan	Sistem mempertahankan tanggal dan tidak menimpanya tanpa *reset*	Berhasil

Mekanisme NVS beroperasi dengan tingkat keberhasilan sempurna. Seluruh parameter dinamis berhasil ditulis ke flash memory dan dibaca kembali secara akurat saat mikrokontroler menyala ulang. Ketahanan memori ini memastikan fungsionalitas otomasi berjalan berkelanjutan tanpa perlu konfigurasi ulang manual setiap kali terjadi pemadaman listrik.

G. Pembahasan

Rangkaian pengujian memberikan landasan empiris untuk mengevaluasi kinerja purwarupa secara komprehensif. Pertama, dari aspek instrumentasi, sensor PZEM-004T menunjukkan akurasi tinggi (galat < 2%). Current Transformer tipe inti terpisah mampu menjaga linearitas fluks magnetik, mengonfirmasi efisiensi topologi satu CT pada jalur fasa utama. Kedua, dari aspek aktuasi, relai 4-channel dengan konfigurasi Active Low responsif terhadap sinyal ESP32 tanpa kebocoran tegangan balik. Algoritma early warning berjalan sesuai rancangan, namun bersifat software polling sehingga ideal sebagai instrumen preventif interaktif, bukan pengganti proteksi fisik MCB. Ketiga, arsitektur perangkat lunak ganda (Blynk + Telegram) menghasilkan ekosistem IoT redundan yang saling melengkapi. Temuan paling signifikan adalah keberhasilan implementasi whitelist yang menuntaskan kerentanan unauthorized access. Fleksibilitas perintah administratif mendemonstrasikan skalabilitas yang baik.

Meskipun hasil pengujian optimal, purwarupa ini memiliki keterbatasan: (1) ketergantungan absolut pada stabilitas Wi-Fi lokal; (2) retensi data historis terbatas pada Blynk Free Plan yang tidak mendukung perekaman berbulan-bulan. Kedua keterbatasan ini dapat menjadi pertimbangan untuk pengembangan penelitian di masa mendatang.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan pada purwarupa sistem monitoring dan kontrol beban listrik rumah tangga berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor PZEM-004T, modul relai 4-channel, serta platform Blynk dan Telegram Bot, dapat disimpulkan bahwa sistem ini telah berhasil direalisasikan dan terbukti beroperasi secara optimal serta andal. Dari aspek akurasi instrumentasi, sensor PZEM-004T menunjukkan tingkat presisi yang sangat baik dengan rata-rata galat pembacaan tegangan sebesar 0,46%, arus sebesar 1,4%, dan daya aktif sebesar 0,8%, yang semuanya berada jauh di bawah ambang batas toleransi standar kelistrikan sebesar 5%. Dari sisi fungsionalitas aktuasi, modul relai 4-channel berhasil merespons seluruh instruksi kendali yang dikirimkan melalui antarmuka Blynk dan Telegram Bot secara akurat tanpa mengalami kegagalan atau keterlambatan yang signifikan, serta mampu mempertahankan sinkronisasi status antar-antarmuka secara real-time.

Sistem komunikasi yang dibangun dengan arsitektur perangkat lunak non-blocking berbasis pewaktuan millis() terbukti tangguh dalam mencegah kondisi hang saat terjadi pemutusan jaringan dan mampu menjalankan proses pemulihan koneksi *(auto-reconnect)* secara otonom tanpa memerlukan intervensi pengguna. Dari aspek keamanan, implementasi lapisan proteksi berbasis *whitelist* Chat ID pada Telegram Bot terbukti efektif memblokir 100% akses tidak sah dari akun asing yang mencoba mengirimkan perintah kontrol. Selain itu, mekanisme penyimpanan *Non-Volatile Storage (NVS)* melalui pustaka Preferences.h telah berhasil memastikan seluruh parameter konfigurasi kritis, seperti status akhir relai, nilai tarif dasar listrik, batas ambang daya alarm, dan penamaan relai kustom, tetap tersimpan secara permanen dan dapat dipulihkan sepenuhnya pasca-terjadinya pemadaman listrik total. Dengan demikian, secara keseluruhan purwarupa ini layak diimplementasikan sebagai instrumen cerdas yang mampu meningkatkan efisiensi energi dan keamanan instalasi kelistrikan di sektor residensial.

DAFTAR ACUAN

[1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2024*, Jakarta: Kementerian ESDM, 2025.

[2] International Energy Agency, *Global Energy Review 2025*, Paris: IEA, 2025.

[3] Z. Li, F. Qiu, H. Yang, Y. Zhang, H. Chen, and Y. Du, "Residential electrical fire in Shenzhen: Data analysis and possible solution," *2021 IEEE/IAS 57th Int. Conf. Ind. Commer. Power Syst. Tech. (I&CPS)*, pp. 1–5, 2021.

[4] R. Ramadan, Q. Huang, O. Bamisile, and A. S. Zalhaf, "Intelligent home energy management using Internet of Things platform based on NILM technique," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 31, p. 100785, 2022.

[5] B. Prayitno, A. Muhammad, R. I. Putra, E. Putra, and P. Palupiningsih, "Rancang bangun sistem monitoring dan controlling penggunaan daya peralatan listrik rumah tangga menggunakan IoT," *PETIR*, vol. 15, no. 1, pp. 57–62, 2021.

[6] P. Moghadam and A. Roshan Fekr, "Non-intrusive load monitoring for smart residential buildings: An AI-based framework with cross-country generalization," *Energy Buildings*, vol. 364, p. 117632, 2026.

[7] M. H. Bisri, F. Santoso, and F. Lazim, "Alat monitoring daya listrik berbasis IoT pada Ponpes Salafiyah Syafi'iyah Sukorejo (P2S3) menggunakan NodeMCU dan Blynk," *J. Ilm. BETRIK: Besemah Teknol. Inf. Komput.*, vol. 15, no. 2, 2025.

[8] P. W. Setiawan, A. L. Hananto, E. Novalia, and A. Hananto, "Sistem monitoring dan visualisasi data konsumsi energi listrik rumah berbasis IoT dengan aplikasi Blynk," *Jutisi: Jurnal Ilmiah Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, vol. 14, no. 1, pp. 455–466, 2025.

[9] M. N. Adiwiranto, C. B. Waluyo, and B. Sudibya, "Prototipe sistem monitoring konsumsi energi listrik serta estimasi biaya pada peralatan rumah tangga berbasis Internet of Things," *J. Edukasi Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 32–41, May 2022.

[10] R. Buyya and A. V. Dastjerdi, Eds., *Internet of Things: Principles and Paradigms*. Morgan Kaufmann, 2016.

[11] A. Maier, A. Sharp, and Y. Vagapov, "Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the Internet of Things," *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*, Wrexham, UK, 2017, pp. 143–148.

[12] Peacefair Electronic Technology Co., Ltd., "PZEM-004T V3.0 user manual: AC communication module," 2020.

[13] Blynk Inc., "Blynk documentation: Architecture and virtual pins," 2023.

[14] Telegram Messenger LLP, "Telegram Bot API: Official documentation," 2023.

[15] Espressif Systems. ESP-IDF Documentation: Non-volatile Storage Library. Available: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/storage/nvs_flash.htm.