

Sistem Otomatisasi ON-OFF Peralatan Elektronik dan Monitoring Efisiensi Daya Berbasis IoT Menggunakan ESP32 dan 4 Sensor PZEM-004T

Irhamm Makhfuth¹, Ahmad Faridh²

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa, Bekasi, Indonesia

e-mail: makhfut@gmail.com

Abstrak— Penelitian ini membahas perancangan sistem otomatisasi ON-OFF peralatan elektronik dan monitoring efisiensi energi berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan ESP32 dan empat sensor PZEM-004T. Sistem dikembangkan untuk mengatasi pengendalian beban yang masih manual serta keterbatasan kWh meter konvensional dalam memisahkan konsumsi setiap peralatan. ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama, empat PZEM-004T mengukur tegangan, arus, daya, dan energi pada empat saluran, sedangkan relay 4-channel mengeksekusi perintah ON-OFF. Data ditampilkan melalui LCD 20x4 dan dikirim ke Blynk melalui Wi-Fi. Beban dapat dikendalikan menggunakan tombol fisik, tombol virtual, atau penjadwalan otomatis. Validasi terhadap multimeter menunjukkan galat tegangan rata-rata 0,21% dengan galat maksimum 0,32%. Respons kendali jarak jauh pada kondisi jaringan pengujian memiliki latensi rata-rata 0,9 detik. Perbandingan operasional selama dua hari menunjukkan konsumsi energi menurun dari 2,87 kWh pada mode manual menjadi 1,25 kWh pada mode berbantuan IoT, atau 56,45% pada skenario yang diuji. Dengan asumsi tarif Rp1.444,70/kWh, selisih tersebut setara dengan estimasi penghematan sekitar Rp70,2 ribu per 30 hari. Hasil ini menunjukkan fungsi sistem berjalan sesuai rancangan, tetapi pengujian berdurasi lebih panjang tetap diperlukan untuk menilai konsistensi penghematan pada pola penggunaan yang berbeda.

Kata kunci— Internet of Things, ESP32, PZEM-004T, Blynk, monitoring energi, efisiensi listrik, home automation.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pada era Revolusi Industri 4.0 mendorong pemanfaatan sistem otomasi dan *Internet of Things* (IoT) dalam berbagai bidang, termasuk dalam hal pengelolaan energi listrik di sektor rumah tangga dan perkantoran. Seiring dengan peningkatan taraf hidup masyarakat, jumlah peralatan elektronik yang digunakan sehari-hari terus bertambah. Hal ini berbanding lurus dengan kebutuhan energi listrik yang terus meningkat. Sayangnya, penggunaan peralatan listrik yang belum dikelola secara efisien masih menjadi penyebab utama tingginya tagihan konsumsi energi. Pemborosan sering kali dipicu oleh kebiasaan kelalaian manusia, seperti membiarkan kipas angin atau *exhaust fan* tetap menyala meskipun ruangan tidak digunakan.

Di sisi lain, pemantauan penggunaan energi listrik saat ini masih banyak bergantung pada pembacaan kWh meter konvensional yang disediakan oleh PLN. Kelemahan dari sistem ini adalah pengukuran dilakukan secara akumulatif, sehingga pengguna kesulitan mengetahui besarnya konsumsi energi secara spesifik dari masing-masing peralatan elektronik. Oleh karena itu, diperlukan sebuah sistem cerdas yang mampu menampilkan parameter kelistrikan secara *real-time* dan terperinci, sekaligus memberikan kemampuan pengendalian jarak jauh [1].

Pradana dkk. [1] merancang sistem monitoring daya listrik 1 fasa berbasis IoT, tetapi sistem tersebut hanya berfokus pada fungsi monitoring dan belum mengintegrasikan fitur pengendalian beban.

Susanto dkk. [2] mengembangkan alat kontrol rumah tangga menggunakan PZEM-004T, tetapi implementasinya masih terbatas pada satu saluran pengukuran sehingga belum mampu memberikan pemisahan konsumsi daya yang akurat.

Mengacu pada penelitian terdahulu [3], [4], [5], [6], [7], penelitian ini mengembangkan sistem otomatisasi ON-OFF dan monitoring efisiensi daya berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 dan empat sensor PZEM-004T V4. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi arsitektur *multi-channel* (empat sensor terhubung ke satu ESP32), serta penggabungan tiga mode pengendalian (otomatis via timer, jarak jauh via Blynk, dan manual via tombol) guna menganalisis dampak langsungnya terhadap efisiensi daya.

Pemantauan per saluran dibutuhkan karena angka energi total tidak langsung menunjukkan beban mana yang paling dominan atau kapan pemborosan terjadi. Informasi tegangan, arus, daya sesaat, dan energi kumulatif pada masing-masing beban membuat pengguna dapat menghubungkan pola operasi peralatan dengan konsumsi yang terbaca. Dalam rancangan ini, fungsi monitoring tidak berdiri sendiri, tetapi menjadi dasar untuk tindakan pengendalian. Ketika suatu beban tidak lagi diperlukan, pengguna dapat memutusnya secara lokal, dari jarak jauh, atau melalui jadwal yang telah ditentukan.

Literatur menunjukkan bahwa PZEM-004T telah digunakan pada pemantauan energi berbasis Android [4], sistem multisaluran pada instalasi tiga fase [5], dan pemantauan jarak jauh dengan teknologi komunikasi IoT [7]. Di sisi lain, mekanisme kendali dan pemantauan juga dapat dibangun menggunakan protokol pesan seperti MQTT [6]. Rangkaian penelitian tersebut memperlihatkan bahwa sensor, saluran komunikasi, dan aktuator dapat diintegrasikan dengan beragam arsitektur. Penelitian ini memusatkan perhatian pada kebutuhan yang lebih spesifik, yaitu empat beban satu fase yang harus dapat dipantau secara terpisah dan dikendalikan melalui tiga cara dalam satu perangkat.

Berdasarkan permasalahan tersebut, tujuan penelitian adalah merancang dan merealisasikan perangkat yang mampu: membaca parameter listrik empat beban secara independen; menampilkan data secara lokal dan daring; mengeksekusi perintah ON-OFF melalui tombol manual, Blynk, serta timer; dan mengevaluasi dampak penggunaan sistem terhadap konsumsi energi pada objek uji. Evaluasi difokuskan pada keterbacaan data, galat pengukuran tegangan, latensi kendali jarak jauh, dan perubahan energi harian. Dengan batasan tersebut, hasil yang diperoleh dapat dibaca sebagai evaluasi prototipe pada skenario pengujian, bukan sebagai generalisasi untuk seluruh jenis bangunan atau pola pemakaian.

Kontribusi praktis penelitian terletak pada penggunaan alamat berbeda untuk empat PZEM-004T dalam satu jalur komunikasi, pemetaan satu sensor dan satu relay untuk setiap beban, serta penyatuan tiga mode kendali pada ESP32. Konfigurasi tersebut memungkinkan pengguna membandingkan konsumsi

antarperalatan tanpa menambah mikrokontroler untuk setiap saluran. Selain itu, pembahasan tidak hanya menyatakan penurunan energi total, tetapi menelusuri kontribusi setiap beban dan batas interpretasi hasil pengujian.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Pendekatan dan Tahapan Penelitian

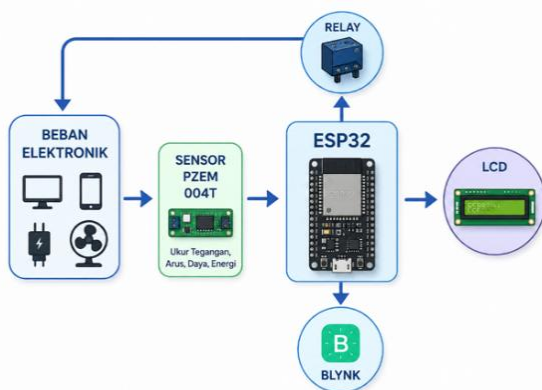
Penelitian menggunakan pendekatan rancang bangun yang dilanjutkan dengan pengujian fungsional dan pengukuran komparatif. Tahap awal mencakup identifikasi empat beban yang akan diamati, penentuan parameter kelistrikan, serta penyusunan kebutuhan input dan output. Input sistem berasal dari empat sensor PZEM-004T, empat tombol manual, perintah pada Blynk, dan referensi waktu NTP. Output sistem meliputi data pada LCD dan Blynk, status tiap saluran, serta perubahan keadaan empat relay.

Tahap perancangan meliputi penyusunan diagram blok, pemilihan catu daya, pengalamatan sensor, pemetaan pin ESP32, serta pembuatan alur perangkat lunak. Setelah perakitan, pemeriksaan dilakukan bertahap mulai dari pembacaan satu sensor, penambahan sensor berikutnya pada jalur komunikasi yang sama, pengujian relay, tampilan LCD, hingga koneksi Blynk. Urutan ini digunakan agar gangguan pada komunikasi sensor, logika kendali, dan jaringan dapat dipisahkan saat proses pemeriksaan.

Tahap evaluasi terdiri atas empat kelompok. Pertama, fungsi monitoring dan kendali diperiksa pada keempat saluran. Kedua, pembacaan tegangan dibandingkan dengan multimeter digital sebagai nilai referensi. Ketiga, waktu respons dari perintah Blynk sampai relay berubah diamati pada jaringan Wi-Fi 2,4 GHz. Keempat, energi harian pada operasi manual dibandingkan dengan operasi yang memanfaatkan timer dan kendali IoT. Seluruh hasil dianalisis sesuai besaran yang tersedia pada pengujian; tidak ada data ulangan atau kondisi lingkungan yang ditambahkan di luar catatan penelitian.

B. Blok Diagram Sistem

Sistem dirancang dengan arsitektur multisaluran untuk memonitor empat beban secara independen: lampu ruangan, kipas angin, rice cooker, dan exhaust fan. Pusat kendali menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1.



Gambar. 1 Diagram blok sistem keseluruhan

Pada Gambar 1, ESP32 membaca data dari 4 sensor PZEM-004T yang dipasang pada setiap jalur fasa beban. Data tersebut akan ditampilkan di LCD 20x4 dan diunggah ke *cloud* Blynk via koneksi Wi-Fi. Modul Relay 4-Channel digunakan untuk

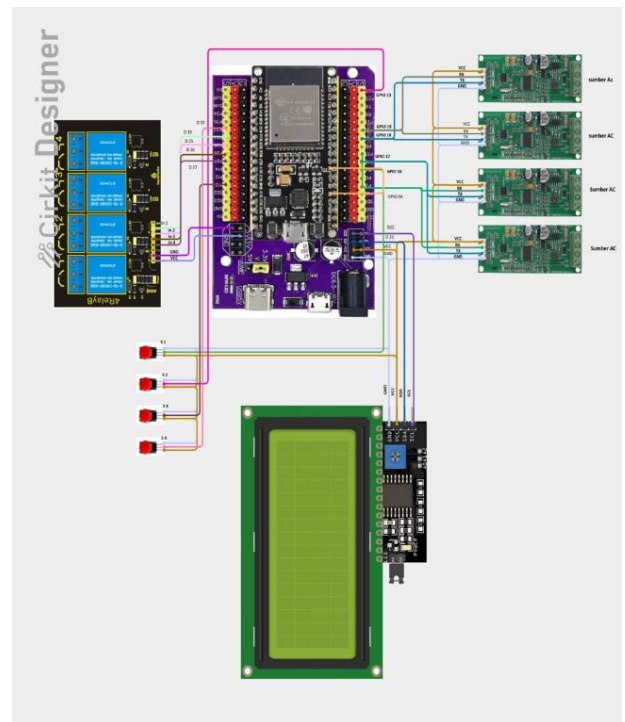
mengeksekusi perintah pemutusan dan penyambungan arus listrik.

Secara fungsional, arsitektur sistem dapat dipisahkan menjadi lapisan akuisisi, pemrosesan, aktuasi, dan antarmuka. Lapisan akuisisi dibentuk oleh PZEM-004T yang mengukur setiap jalur beban. Lapisan pemrosesan berada pada ESP32 yang mengidentifikasi alamat sensor, menyimpan nilai pembacaan sementara, dan memeriksa masukan kendali. Lapisan aktuasi berupa relay 4-channel, sedangkan lapisan antarmuka terdiri atas LCD untuk pengguna di lokasi dan Blynk untuk akses melalui jaringan. Pemisahan ini memudahkan penelusuran sumber masalah apabila salah satu fungsi tidak bekerja.

Aliran data berlangsung dua arah. Data kelistrikan bergerak dari sensor ke ESP32, kemudian diteruskan ke LCD dan server Blynk. Sebaliknya, perintah kendali bergerak dari tombol fisik, widget Blynk, atau timer menuju logika program dan diakhiri pada perubahan status relay. Setiap saluran diperlakukan independen, sehingga perubahan keadaan satu peralatan tidak menghapus pembacaan saluran lain. Dengan demikian, pengguna tetap dapat melihat perbedaan karakter konsumsi lampu, kipas angin, rice cooker, dan exhaust fan.

C. Perancangan Perangkat Keras

Karena ESP32 hanya memiliki 3 *Hardware Serial*, sistem mengatasi keterbatasan port dengan memanfaatkan fitur modifikasi alamat perangkat (*slave address*) bawaan PZEM-004T V4. Masing-masing sensor diberikan identitas logika yang berbeda (0x01 hingga 0x04) dan dihubungkan secara paralel ke satu jalur RX/TX pada ESP32, mencegah terjadinya *data collision*.



Gambar. 2 Skematik rangkaian perangkat keras

Catu daya utama disuplai dari adaptor 12V yang diturunkan (*step-down*) menggunakan IC AMS1117 ke 5V (untuk menyuplai daya Relay dan LCD) dan 3,3V (untuk ESP32 dan logika komunikasi PZEM-004T).

Empat PZEM-004T diberi alamat logis 0x01 sampai 0x04. Saat program meminta data, alamat tujuan disertakan agar hanya sensor yang sesuai memberikan respons. Pendekatan ini membuat beberapa modul dapat menggunakan pasangan jalur RX/TX yang sama tanpa mencampurkan identitas beban. Urutan

pembacaan dilakukan per alamat, kemudian nilai tegangan, arus, daya, dan energi disimpan pada variabel saluran masing-masing sebelum ditampilkan atau dikirimkan.

Pemetaan aktuator mengikuti pemetaan sensor: satu kanal relay dipasangkan dengan satu jalur beban. Hubungan satu-ke-satu ini penting karena status relay dan nilai energi harus tetap merujuk pada peralatan yang sama. Tombol manual dipertahankan agar perangkat masih dapat dioperasikan dari panel ketika pengguna tidak memakai aplikasi. Blynk menambah akses jarak jauh, sedangkan timer menangani perintah berdasarkan waktu tanpa menunggu interaksi langsung.

Bagian tegangan rendah dan jalur beban AC ditempatkan di dalam box panel. Terminal input dan output digunakan untuk merapikan pemasangan serta mengurangi sambungan bebas. Karena relay berhadapan dengan tegangan jaringan 220 V, pemeriksaan pengawatan, isolasi, dan kondisi terminal harus dilakukan sebelum perangkat diberi daya. Rancangan ini merupakan prototipe penelitian; penerapan permanen tetap memerlukan komponen proteksi dan tata pemasangan yang memenuhi ketentuan keselamatan instalasi setempat.

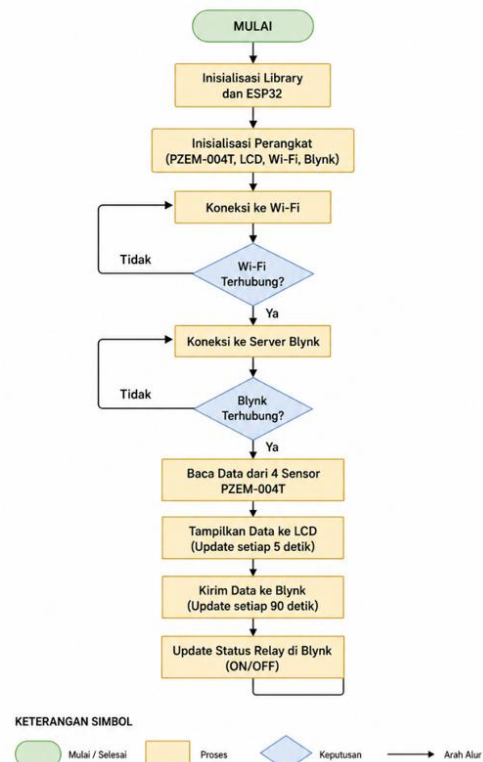
D. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dibangun menggunakan Arduino IDE. Program menerapkan pembacaan sensor asinkron berbasis millis agar pembaruan LCD dan pengiriman data ke Blynk dapat dijalankan secara periodik tanpa menghentikan pemeriksaan masukan kendali.

Penggunaan penjadwalan berbasis millis memungkinkan beberapa pekerjaan dijalankan bergantian tanpa menghentikan keseluruhan loop program. Pembaruan LCD memberi umpan balik lokal secara periodik, sedangkan pengiriman Blynk menggunakan interval yang lebih panjang untuk membatasi paket jaringan. Di antara dua jadwal tersebut, program tetap dapat memeriksa tombol dan perubahan status kendali. Pola ini lebih sesuai untuk sistem interaktif dibandingkan penundaan blocking yang membuat mikrokontroler tidak merespons selama jeda.

Nilai dari setiap sensor disimpan secara terpisah sebelum dipetakan ke elemen tampilan. Pemisahan variabel diperlukan agar nilai saluran satu tidak bertukar dengan saluran lain ketika pembaruan dilakukan berurutan. Data pada LCD digunakan untuk pemeriksaan langsung di panel, sedangkan data Blynk mendukung pemantauan ketika pengguna berada di lokasi berbeda. Dengan dua jalur tampilan tersebut, fungsi dasar masih dapat diamati walaupun akses aplikasi sedang tidak digunakan.

FLOWCHART SISTEM MONITORING BERBASIS ESP32



Gambar. 3 Diagram alir (flowchart) perangkat lunak

Seperti terlihat pada Gambar 3, program mengambil referensi waktu dari *Network Time Protocol* (NTP) server untuk mendukung fitur otomasi jadwal (*timer*). Sistem akan terus memeriksa kondisi tombol manual, jadwal timer, dan *widget* di Blynk untuk mengubah *state* dari Relay.

E. Logika Kendali Tiga Mode

Mode manual menerima perubahan dari tombol fisik pada panel. Mode jarak jauh menerima perubahan dari tombol virtual Blynk, sedangkan mode timer membandingkan waktu NTP dengan jadwal yang telah dimasukkan pengguna. Ketiganya berakhir pada variabel status saluran dan keluaran relay yang sama. Penyatuan titik keluaran mencegah setiap antarmuka mengendalikan perangkat keras melalui jalur logika yang terpisah. Setelah perubahan dijalankan, status terbaru perlu ditampilkan kembali agar kondisi yang dilihat pengguna sesuai dengan kondisi relay.

Timer digunakan untuk mengurangi ketergantungan pada ingatan pengguna, terutama pada peralatan yang mempunyai jam operasi berulang. Tombol Blynk tetap diperlukan untuk perubahan di luar jadwal, sedangkan tombol fisik menjadi jalur kendali langsung dari panel. Kombinasi ini tidak berarti seluruh keputusan dilakukan otomatis; sistem menyediakan pilihan kendali sesuai situasi. Manfaat efisiensi muncul ketika penjadwalan dan informasi konsumsi benar-benar digunakan untuk mengurangi waktu nyata yang tidak diperlukan.

Apabila dua sumber perintah muncul berdekatan, kondisi akhir relay bergantung pada urutan pemeriksaan di dalam loop. Karena data penelitian belum mencatat pengujian konflik perintah, penelitian ini tidak menetapkan prioritas baru di luar program yang telah dibuat. Pada pengembangan berikutnya, aturan prioritas, pencatatan sumber perintah terakhir, dan sinkronisasi status dapat ditambahkan agar perilaku sistem tetap deterministik ketika tombol manual, Blynk, dan timer aktif hampir bersamaan.

LCD 20x4 berfungsi sebagai antarmuka lokal untuk memeriksa pembacaan tanpa membuka telepon seluler. Pada sisi daring, Blynk mengelompokkan tampilan untuk empat beban dan menyediakan nilai V, A, W, serta kWh. Penamaan elemen antarmuka harus mengikuti identitas saluran sensor dan relay. Konsistensi label ini penting karena kesalahan pemetaan dapat membuat pengguna memutus beban yang berbeda dari beban yang datanya sedang diamati.

Interval LCD dan Blynk dibedakan sesuai fungsi masing-masing. Tampilan lokal diperbarui lebih cepat untuk membantu pemeriksaan di panel, sedangkan paket cloud dikirim pada interval yang lebih panjang. Konsekuensinya, angka pada aplikasi dapat tertinggal beberapa detik dari pembacaan lokal. Perbedaan waktu pembaruan ini merupakan karakter desain, bukan perbedaan sensor, sehingga interpretasi data harus memperhatikan waktu saat kedua tampilan dibandingkan.

G. Prosedur Pengujian

Pengujian fungsional diawali dengan memastikan setiap saluran menampilkan data beban yang benar dan relay yang dituju dapat berubah melalui masing-masing mode kendali. Pemeriksaan dilakukan per saluran agar hubungan sensor, label, tombol, dan relay dapat dilacak. Keberhasilan fungsi dinilai dari munculnya data pada LCD dan Blynk serta perubahan keadaan beban setelah perintah diberikan. Data penelitian tidak mencantumkan jumlah pengulangan terpisah untuk setiap fungsi; karena itu hasilnya disajikan sebagai verifikasi kerja prototipe.

Validasi tegangan dilakukan dengan membandingkan pembacaan PZEM-004T dan Multimeter Digital Sanwa pada empat jenis beban. Nilai multimeter diperlakukan sebagai referensi, kemudian selisih absolut dan persentase galat dihitung untuk setiap saluran. Tabel hasil juga dipakai untuk melihat apakah galat hanya muncul pada satu beban atau relatif kecil pada seluruh saluran. Karena tabel tidak memuat pengulangan pada tegangan yang berbeda, evaluasi dibatasi pada kondisi yang tercatat.

Latensi jaringan diamati dari saat tombol virtual diberikan sampai relay merespons pada koneksi Wi-Fi 2,4 GHz. Besaran yang tersedia adalah nilai rata-rata 0,9 detik. Nilai ini digunakan untuk menilai pengalaman kendali interaktif, tetapi belum cukup untuk menjelaskan variasi akibat kualitas sinyal, kepadatan jaringan, atau waktu akses server. Oleh sebab itu, pembahasan latensi tidak menyatakan batas terburuk yang tidak diukur.

Evaluasi energi membandingkan dua hari operasi: satu hari dengan kebiasaan manual dan satu hari dengan bantuan timer serta kendali IoT. Energi empat beban dijumlahkan untuk memperoleh total harian, lalu selisih dan persentase penurunan dihitung. Desain ini sesuai untuk menunjukkan indikasi dampak pada objek uji, namun faktor aktivitas penghuni, lama penggunaan, dan kondisi beban antarhari belum dikendalikan melalui pengulangan.

H. Metode Perhitungan

Galat tegangan dihitung dari selisih absolut antara pembacaan sensor dan alat referensi. Rata-rata galat diperoleh dari empat saluran. Notasi V_s menyatakan tegangan sensor, V_r menyatakan tegangan referensi, dan n menyatakan jumlah data yang dibandingkan.

$$eV = |V_s - V_r| / V_r \times 100\%$$

$$\bar{eV} = (1/n) \sum eV_i$$

Penghematan energi merupakan selisih antara energi pada operasi manual dan energi pada operasi berbantuan IoT.

Persentase efisiensi pada artikel ini menyatakan proporsi penurunan terhadap kondisi manual, bukan efisiensi konversi listrik dari suatu alat.

$$\Delta E = E_{\text{manual}} - E_{\text{IoT}}$$

$$\eta = \Delta E / E_{\text{manual}} \times 100\%$$

Estimasi biaya dihitung dengan mengalikan energi dan asumsi tarif listrik T. Proyeksi bulanan diperoleh dari selisih biaya harian dikalikan 30 hari. Karena tarif dan pola pemakaian dapat berubah, nilai rupiah dibaca sebagai estimasi berdasarkan asumsi penelitian.

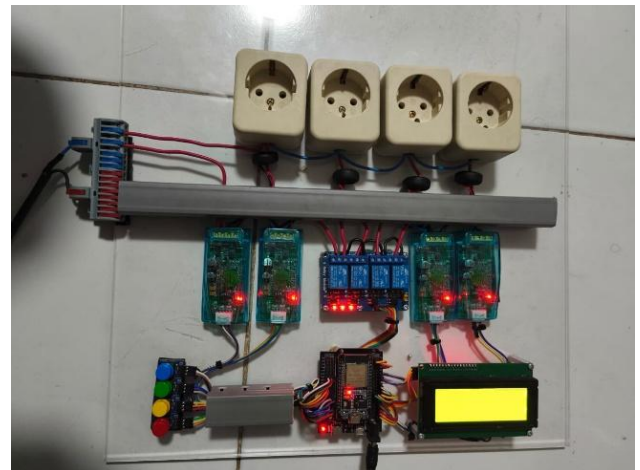
$$C = E \times T$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Realisasi Perangkat Keras

Hasil perakitan komponen perangkat keras dikemas rapi dalam *box panel project*. Panel utama dilengkapi terminal input/output untuk mempermudah pemasangan kabel AC 220V secara aman.

Hasil realisasi menunjukkan seluruh fungsi utama ditempatkan dalam satu panel: pengendali, modul relay, bagian catu daya, terminal, dan tampilan. Susunan ini mendukung pemasangan empat jalur beban sekaligus dan memudahkan identifikasi kanal saat pengujian. Dari sisi penggunaan, keberadaan tombol serta LCD pada panel mempertahankan akses lokal, sehingga fungsi ON-OFF dan pemeriksaan data tidak sepenuhnya bergantung pada antarmuka ponsel.

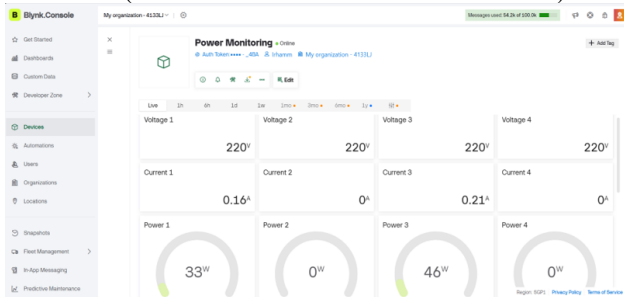


Gambar. 4 Implementasi dan realisasi perangkat keras

B. Tampilan Antarmuka Blynk (IoT)

Aplikasi Blynk dirancang dengan desain interaktif. Terdapat empat blok utama yang masing-masing menampilkan V, A, W, dan kWh beban yang bersangkutan. Pengguna dapat menekan tombol virtual untuk menyalakan/mematikan alat dan mengatur *Time Input* untuk otomatisasi.

Pengelompokan antarmuka berdasarkan beban membantu pengguna membaca hubungan antara status ON-OFF dan parameter energi pada saluran yang sama. Nilai daya sesaat dapat dipakai untuk mengenali beban yang sedang aktif, sedangkan energi kumulatif digunakan untuk melihat akibat durasi operasi. Fitur *Time Input* menambahkan fungsi preventif: pengguna dapat menetapkan periode operasi tanpa harus mengingat waktu pemutusan setiap hari.



Gambar. 5 Dasbor kontrol pada aplikasi Blynk

C. Pengujian Keakuratan Sensor

Pengujian validasi data membandingkan pembacaan sensor di sistem dengan alat ukur standar (Multimeter Digital Sanwa).

Empat pengukuran tegangan dilakukan pada exhaust fan, rice cooker, kipas angin, dan lampu ruangan. Nilai referensi pada seluruh pengamatan adalah 218 V. Keceragaman nilai referensi membuat perbedaan persentase terutama ditentukan oleh selisih bacaan masing-masing saluran, sehingga hasil dapat dibandingkan langsung antarjenis beban.

TABEL I
HASIL PENGUJIAN AKURASI TEGANGAN (VOLT)

Beban	Multimeter (V)	Sensor (V)	Selisih (V)	Error (%)
Exhaust Fan	218	217.3	0.7	0.32
Rice Cooker	218	217.4	0.6	0.28
Kipas Angin	218	217.9	0.1	0.05
Lampu Ruangan	218	217.6	0.4	0.18

Berdasarkan Tabel I, seluruh pembacaan PZEM-004T berada sedikit di bawah nilai multimeter. Selisih terbesar terdapat pada exhaust fan sebesar 0,7 V dengan galat 0,32%, sedangkan selisih terkecil terdapat pada kipas angin sebesar 0,1 V dengan galat 0,05%. Rata-rata empat persentase galat adalah 0,2075% atau dibulatkan menjadi 0,21%. Hasil ini menunjukkan akurasi tegangan yang baik pada titik kerja yang diuji. Istilah akurasi digunakan karena pembacaan dibandingkan dengan alat referensi; data yang tersedia belum cukup untuk menilai presisi pengulangan.

$$\bar{eV} = (0,32 + 0,28 + 0,05 + 0,18) / 4 = 0,2075\%$$

Urutan galat dari terbesar ke terkecil adalah exhaust fan, rice cooker, lampu ruangan, dan kipas angin. Rentang galat 0,05–0,32% menunjukkan tidak ada satu saluran dengan penyimpangan mendekati batas 1% pada tabel tersebut. Namun, pengujian hanya menggambarkan satu tegangan referensi dan empat kondisi beban. Karakteristik pada tegangan jaringan yang berubah, faktor daya berbeda, atau pemakaian jangka panjang memerlukan pengujian tambahan.

Catatan pengujian arus menyebut deviasi terbesar 10% pada lampu LED dengan arus sekitar 0,04 A. Nilai ini menunjukkan bahwa persentase galat dapat tampak lebih besar pada arus yang sangat kecil, meskipun selisih absolutnya kecil. Karena rincian seluruh pembacaan arus tidak disertakan dalam tabel, hasil arus tidak digabungkan ke dalam perhitungan rata-rata galat tegangan dan tidak digunakan untuk menyimpulkan akurasi pada semua rentang arus.

D. Pengujian Latensi Jaringan

Uji jaringan menunjukkan latensi rata-rata 0,9 detik sejak tombol pada Blynk ditekan hingga relay berubah pada koneksi Wi-Fi 2,4 GHz. Pada kondisi pengujian tersebut, respons kurang

dari satu detik cukup mendukung kendali interaktif rumah tangga karena pengguna dapat memperoleh perubahan keadaan tanpa jeda yang panjang. Nilai ini tidak diartikan sebagai jaminan untuk semua jaringan, sebab jalur perintah melibatkan akses Wi-Fi dan layanan Blynk.

Latensi berbeda dari interval pengiriman telemetri. Interval tersebut mengatur pembaruan monitoring ke cloud, sedangkan respons tombol merupakan jalur perintah kendali. Karena itu, nilai pada aplikasi dapat diperbarui lebih lambat daripada perubahan relay yang dipicu pengguna. Pemisahan dua proses ini menjelaskan mengapa sistem tetap dapat merespons tombol meskipun telemetri tidak dikirim pada setiap putaran program.

Evaluasi yang lebih lengkap memerlukan nilai minimum, maksimum, simpangan, jumlah ulangan, kekuatan sinyal, dan kondisi ketika koneksi terputus. Data tersebut belum tersedia pada penelitian ini, sehingga kesimpulan dibatasi pada rata-rata 0,9 detik di jaringan uji. Batasan ini penting agar kinerja jaringan tidak disamakan dengan kinerja deterministik pada koneksi yang berbeda.

E. Analisis Efisiensi Energi

Pengujian lapangan dilakukan selama dua hari untuk membandingkan dua pola operasi. Pada hari pertama, perangkat dioperasikan secara manual mengikuti kebiasaan penggunaan sebelumnya. Pada hari kedua, pengguna memanfaatkan timer Blynk dan kendali IoT untuk membatasi waktu nyala. Energi lampu ruangan, kipas angin, rice cooker, dan exhaust fan dicatat secara terpisah, kemudian dijumlahkan menjadi total harian. Perbandingan ini menilai perubahan pada objek dan skenario yang sama, tetapi belum merupakan uji jangka panjang dengan banyak pengulangan.

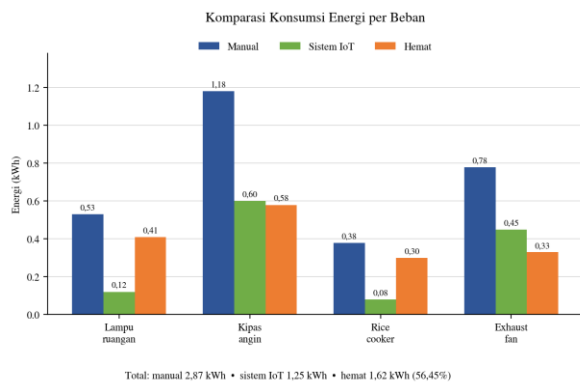
Kondisi manual dipakai sebagai baseline, sedangkan kondisi IoT merupakan perlakuan. Selisih per beban membantu menentukan sumber penghematan, bukan hanya melihat total akhir. Dengan cara ini, penurunan energi dapat dikaitkan dengan perubahan lama operasi pada peralatan tertentu. Faktor di luar sistem, seperti perbedaan aktivitas penghuni antarhari, belum dinormalisasi karena catatan penelitian hanya memuat dua hari pengamatan.

TABEL II
KOMPARASI KONSUMSI ENERGI HARIAN

Jenis Beban	Manual (kWh)	Sistem IoT (kWh)	Hemat (kWh)
Lampu Ruangan	0.53	0.12	0.41
Kipas Angin	1.18	0.60	0.58
Rice Cooker	0.38	0.08	0.30
Exhaust Fan	0.78	0.45	0.33
Total Energi	2.87	1.25	1.62

Berdasarkan Tabel II, energi total pada operasi manual adalah 2,87 kWh, sedangkan operasi berbantuan IoT menggunakan 1,25 kWh. Selisihnya mencapai 1,62 kWh. Dengan baseline manual sebagai pembagi, persentase penurunan energi adalah 56,45%.

$$\eta = (2,87 - 1,25) / 2,87 \times 100\% = 56,45\%$$



Gambar. 6 Grafik komparasi energi (manual vs IoT)

Gambar 6 memperlihatkan bahwa seluruh beban mengalami penurunan energi, tetapi besarnya tidak sama. Lampu ruangan berkurang dari 0,53 menjadi 0,12 kWh atau 77,36%. Kipas angin berkurang dari 1,18 menjadi 0,60 kWh atau 49,15%. Rice cooker berkurang dari 0,38 menjadi 0,08 kWh atau 78,95%, sedangkan exhaust fan berkurang dari 0,78 menjadi 0,45 kWh atau 42,31%. Persentase terbesar terdapat pada rice cooker, sementara penurunan absolut terbesar terdapat pada kipas angin sebesar 0,58 kWh.

Jika kontribusi terhadap total penghematan 1,62 kWh dihitung, kipas angin menyumbang sekitar 35,80%, lampu ruangan 25,31%, exhaust fan 20,37%, dan rice cooker 18,52%. Analisis ini menunjukkan perbedaan antara persentase penurunan dan dampak absolut. Rice cooker mempunyai penurunan relatif tertinggi, tetapi kipas angin memberi kontribusi energi terbesar karena konsumsi manualnya juga paling tinggi. Informasi per saluran membantu pengguna menetapkan prioritas pengendalian berdasarkan kedua sudut pandang tersebut.

Dengan asumsi tarif penelitian Rp1.444,70/kWh, biaya energi manual adalah sekitar Rp4.146,29 per hari dan kondisi IoT sekitar Rp1.805,88 per hari. Selisih sebelum pembulatan sebesar Rp2.340,41 per hari menghasilkan proyeksi sekitar Rp70.212 untuk 30 hari. Apabila biaya harian terlebih dahulu dibulatkan menjadi Rp4.147 dan Rp1.806 sebagaimana catatan awal, proyeksinya menjadi Rp70.230. Perbedaan kecil tersebut hanya berasal dari urutan pembulatan, bukan dari perbedaan data energi.

Proyeksi bulanan mengasumsikan selisih harian yang sama berulang selama 30 hari. Dalam pemakaian nyata, nilai tersebut dapat berubah mengikuti jumlah penghuni, cuaca, kebutuhan memasak, jadwal ruangan, dan kestabilan kebiasaan penggunaan. Oleh sebab itu, hasil biaya lebih tepat digunakan sebagai ilustrasi potensi pada skenario uji daripada sebagai nilai penghematan tetap untuk setiap bulan.

F. Analisis Integrasi Monitoring dan Kendali

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa monitoring dan kendali mempunyai peran yang berbeda tetapi saling melengkapi. PZEM-004T tidak secara langsung membuat beban lebih hemat; sensor menyediakan informasi tentang kondisi listrik dan energi yang telah digunakan. Penghematan terjadi ketika informasi tersebut diikuti perubahan waktu operasi melalui tombol, perintah jarak jauh, atau timer. Dengan demikian, sistem bekerja sebagai pendukung keputusan dan

pelaksana jadwal, bukan sebagai perangkat yang menurunkan kebutuhan daya internal dari peralatan.

Perbedaan ini terlihat pada data energi. Semua beban tetap merupakan perangkat yang sama pada dua kondisi pengujian, sedangkan perubahan utama berada pada pola ON-OFF. Penurunan kWh menunjukkan berkurangnya energi yang terakumulasi selama periode pengamatan. Oleh karena itu, istilah efisiensi pada penelitian ini perlu dipahami sebagai efisiensi penggunaan atau pengurangan pemborosan waktu nyala, bukan peningkatan efisiensi elektromekanis lampu, kipas, rice cooker, maupun exhaust fan.

Arsitektur empat saluran memberikan dua tingkat informasi. Tingkat pertama adalah total energi yang menggambarkan kebutuhan seluruh objek. Tingkat kedua adalah data per beban yang menunjukkan sumber perubahan total tersebut. Jika hanya angka agregat yang tersedia, pengguna mengetahui adanya penurunan 1,62 kWh tetapi tidak dapat melihat bahwa kipas angin menyumbang selisih absolut terbesar. Pemisahan saluran karena itu meningkatkan keterjelasan evaluasi dan membantu penentuan prioritas jadwal.

Integrasi juga menuntut konsistensi status. Perintah pada Blynk, tombol manual, dan timer dapat mengubah relay yang sama, sehingga tampilan terakhir seharusnya mengikuti kondisi aktual keluaran. Tanpa sinkronisasi, aplikasi dapat menampilkan status yang berbeda dari panel setelah pengguna menekan tombol fisik. Rancangan yang telah dibuat memusatkan keputusan pada ESP32; pengembangan berikutnya dapat menambahkan umpan balik eksplisit dan log perubahan agar asal serta waktu setiap perintah dapat diaudit.

Perbedaan interval proses merupakan kompromi antara keterkinian data dan beban komunikasi. LCD dan telemetri Blynk diperbarui secara periodik dengan interval berbeda, sedangkan perintah kendali tetap diperiksa di dalam loop. Pengaturan ini menjaga tampilan lokal lebih dekat dengan kondisi sensor sekaligus membatasi pengiriman cloud. Namun, saat pengguna membandingkan LCD dan Blynk pada detik yang sama, angka dapat tidak identik karena waktu cupliknya berbeda. Pencantuman stempel waktu pada data daring akan membantu menjelaskan perbedaan tersebut.

Penggunaan empat alamat sensor pada satu jalur komunikasi mengurangi kebutuhan port serial, tetapi meningkatkan ketergantungan pada urutan polling dan kualitas pengawatan bersama. Gangguan pada satu titik jalur berpotensi memengaruhi lebih dari satu modul. Karena itu, evaluasi skalabilitas sebaiknya tidak hanya menambah jumlah sensor, tetapi juga mengukur waktu satu siklus pembacaan, kejadian timeout, dan kemampuan sistem mengisolasi sensor yang tidak merespons tanpa menghentikan saluran lain.

G. Pembahasan terhadap Penelitian Terdahulu

Sistem pada penelitian ini memperluas pendekatan monitoring satu fase [1] dengan menambahkan pengendalian beban dan pemisahan empat saluran. Dibandingkan prototipe kontrol rumah tangga satu saluran [2], penggunaan empat alamat sensor memberi informasi konsumsi yang lebih terperinci. Perbedaan utama bukan hanya jumlah sensor, tetapi hubungan antara data per beban dan tiga pilihan kendali. Pengguna dapat melihat saluran yang dominan, lalu menentukan apakah perubahan dilakukan melalui panel, aplikasi, atau jadwal.

Penelitian lain memperlihatkan penerapan monitoring dan kontrol pada arsitektur IoT yang beragam [3], penggunaan antarmuka Android [4], pemantauan sistem tiga fase [5], komunikasi MQTT [6], serta pemantauan jarak jauh dengan PZEM-004T dan LoRa [7]. Posisi penelitian ini berada pada

otomasi empat beban satu fase berbasis ESP32 dan Blynk. Dengan demikian, kontribusinya bersifat integratif dan aplikatif: menggabungkan pengukuran per saluran, aktuasi, tampilan lokal, akses cloud, dan penjadwalan dalam satu prototipe.

Nilai penurunan 56,45% tidak dapat dibandingkan langsung dengan semua penelitian terdahulu karena objek, durasi, jumlah beban, serta metode observasinya berbeda. Angka tersebut terutama menunjukkan bahwa pengaturan waktu nyala pada objek uji mampu mengurangi energi yang sebelumnya terpakai pada operasi manual. Temuan yang lebih umum adalah bahwa informasi per beban dan sarana kendali dapat digunakan bersama untuk mengubah perilaku operasi; besarnya dampak tetap bergantung pada kebiasaan awal dan karakter peralatan.

H. Implikasi Penerapan

Dalam penerapan sehari-hari, jadwal sebaiknya disusun dari kebutuhan nyata tiap beban, bukan sekadar menyalin waktu pengujian. Data per saluran dapat diamati selama beberapa hari untuk menemukan jam operasi yang berulang. Setelah itu, timer diterapkan pada periode yang jelas tidak memerlukan peralatan, sementara kendali manual dan Blynk dipertahankan untuk pengecualian. Pendekatan bertahap mengurangi risiko jadwal terlalu ketat yang justru mengganggu aktivitas pengguna.

Identitas kanal harus dicantumkan secara konsisten pada terminal, sensor, relay, LCD, dan Blynk. Pemeriksaan berkala perlu mencakup kecanggihan terminal, kondisi isolasi, fungsi relay, kesesuaian pembacaan sensor, serta koneksi jaringan. Jika perangkat digunakan di luar lingkungan pengujian, kapasitas relay dan proteksi harus disesuaikan dengan karakter beban. Beban induktif dan peralatan dengan arus awal tinggi memerlukan perhatian khusus dalam pemilihan komponen pemutus.

Evaluasi ekonomi sebaiknya menggunakan tarif yang berlaku pada pelanggan dan energi rata-rata dari beberapa minggu. Biaya perangkat, pemasangan, perawatan, serta konektivitas kemudian dibandingkan dengan penghematan energi untuk memperoleh waktu pengembalian. Penelitian ini belum menghitung biaya investasi, sehingga estimasi Rp70,2 ribu per 30 hari hanya menjelaskan pengurangan biaya energi pada skenario uji dan belum dapat disebut sebagai keuntungan bersih.

I. Keterbatasan Penelitian

Keterbatasan pertama terletak pada durasi evaluasi energi yang hanya dua hari, masing-masing satu hari untuk kondisi manual dan IoT. Desain tersebut belum memisahkan pengaruh sistem dari variasi aktivitas harian. Pengujian lanjutan perlu menggunakan beberapa siklus manual dan IoT pada jadwal yang sebanding, kemudian melaporkan nilai rata-rata dan variasinya. Data durasi ON setiap beban juga perlu dicatat agar penurunan energi dapat dijelaskan melalui perubahan waktu operasi.

Keterbatasan kedua adalah validasi sensor yang belum mencakup banyak titik tegangan, pengulangan, dan rentang arus. Tabel tegangan mendukung kesimpulan akurasi pada kondisi yang diuji, tetapi belum menggambarkan linearitas atau stabilitas jangka panjang. Untuk beban berarus kecil, persentase deviasi arus juga perlu dilengkapi dengan selisih absolut dan spesifikasi alat referensi. Kalibrasi serta pengujian pada beban resistif dan induktif dapat memperkuat evaluasi tiap parameter.

Keterbatasan ketiga berkaitan dengan konektivitas dan konflik perintah. Artikel baru melaporkan latensi rata-rata pada satu kondisi Wi-Fi dan belum mengevaluasi keadaan offline, pemulihan koneksi, atau perintah yang datang bersamaan. Pengembangan berikutnya dapat menambahkan pencatatan waktu, status terakhir yang aman, prioritas sumber kendali, notifikasi kegagalan, dan penyimpanan lokal. Fitur tersebut akan

membantu menilai keandalan sistem, tidak hanya keberhasilan fungsi pada kondisi jaringan normal.

J. Rekomendasi Pengembangan dan Pengujian Lanjutan

Pengujian energi berikutnya perlu menggunakan rancangan berulang yang dapat membedakan dampak sistem dari variasi aktivitas. Kondisi manual dan IoT dapat diterapkan secara bergantian pada beberapa hari kerja dan hari libur dengan jumlah penghuni serta jenis aktivitas yang dicatat. Selain nilai kWh, waktu ON tiap kanal, daya rata-rata ketika aktif, dan alasan perubahan jadwal perlu disimpan. Data tersebut memungkinkan analisis apakah penghematan berasal dari pemendekan durasi, perubahan frekuensi penggunaan, atau perbedaan kebutuhan antarhari.

Validasi sensor dapat diperluas menjadi beberapa titik tegangan dan arus yang mewakili karakter beban. Setiap titik sebaiknya diulang, kemudian dilaporkan rata-rata, simpangan, galat absolut, dan galat relatif. Tegangan, arus, daya aktif, energi, serta faktor daya perlu dibandingkan dengan alat referensi yang sesuai. Langkah ini akan menunjukkan apakah galat 0,21% pada tegangan juga konsisten pada parameter lain dan apakah perbedaan beban resistif maupun induktif memengaruhi hasil pembacaan.

Pengujian komunikasi perlu memisahkan waktu pemrosesan lokal, waktu akses Wi-Fi, dan waktu layanan cloud. Latensi dapat diukur dalam banyak ulangan pada beberapa kekuatan sinyal, lalu disajikan sebagai minimum, maksimum, rata-rata, dan persentil. Skenario putus koneksi juga perlu diuji untuk mengetahui apakah tombol lokal dan timer tetap bekerja, bagaimana sistem menyimpan data yang belum terkirim, serta berapa lama proses sinkronisasi setelah jaringan kembali tersedia.

Logika kendali dapat dikembangkan menjadi mesin keadaan yang mempunyai aturan prioritas eksplisit. Setiap perintah diberi sumber, waktu, kanal, dan status hasil. Apabila tombol manual, Blynk, dan timer mengirim kondisi berbeda dalam selang berdekatan, program dapat menentukan aturan yang konsisten, misalnya perintah manual terbaru atau keadaan aman yang telah ditetapkan. Riwayat perubahan juga membantu pengguna menjelaskan mengapa suatu beban aktif dan memudahkan diagnosis ketika status aplikasi tidak sama dengan panel.

Penyimpanan deret waktu akan memperkuat fungsi monitoring. Selain menampilkan angka terkini, sistem dapat merekam energi per jam, durasi ON, perubahan relay, dan kualitas koneksi. Data kemudian dapat diekspor untuk membandingkan hari, minggu, dan beban. Batas konsumsi atau durasi dapat digunakan untuk menghasilkan notifikasi, tetapi ambang harus ditentukan dari pola normal objek, bukan dari nilai arbitrer. Fitur ini mengubah dashboard dari sekadar tampilan sesaat menjadi alat evaluasi kebiasaan penggunaan.

Dari sisi perangkat keras, pengembangan perlu mencakup proteksi arus lebih, pemutusan yang sesuai dengan karakter beban, pemisahan jalur tegangan rendah dan AC, serta enclosure yang mencegah bagian bertegangan tersentuh. Keadaan relay saat ESP32 memulai ulang atau kehilangan catu daya harus ditentukan agar beban tidak berubah tanpa kendali. Watchdog dan pemeriksaan kesehatan sensor dapat digunakan untuk membawa sistem ke keadaan aman ketika program atau komunikasi tidak merespons.

Skalabilitas multisaluran perlu dinilai melalui waktu satu putaran polling dan jumlah kegagalan respons. Penambahan sensor meningkatkan panjang siklus baca dan membuat jalur bersama lebih sensitif terhadap gangguan pengawatan. Program dapat memberi batas waktu per alamat, melewati sensor yang

gagal, dan mempertahankan saluran lain tetap aktif. Apabila jumlah kanal bertambah jauh, arsitektur bus, isolasi komunikasi, dan pembagian tugas ke pengendali tambahan perlu dibandingkan dari sisi keandalan serta waktu respons.

Otomasi yang lebih adaptif dapat memanfaatkan masukan lain seperti keberadaan pengguna, kondisi ruangan, atau batas energi, tetapi fungsi tersebut belum menjadi bagian prototipe saat ini. Penambahannya harus disertai aturan override manual, perlindungan terhadap aktivasi yang salah, dan evaluasi manfaat energi. Dengan tahapan tersebut, pengembangan tidak hanya menambah fitur, tetapi juga menghasilkan bukti yang lebih kuat mengenai akurasi, keandalan, keselamatan, dan penghematan pada pemakaian jangka panjang.

IV. KESIMPULAN

Sistem otomatisasi ON-OFF dan monitoring energi berbasis ESP32 serta empat sensor PZEM-004T berhasil direalisasikan untuk empat beban: lampu ruangan, kipas angin, rice cooker, dan exhaust fan. Pengalamatan 0x01–0x04 memungkinkan pembacaan empat sensor melalui jalur komunikasi yang sama, sedangkan relay 4-channel menjalankan kendali manual, jarak jauh melalui Blynk, dan penjadwalan berbasis NTP. Data dapat diamati melalui LCD 20x4 dan antarmuka Blynk sesuai kebutuhan akses lokal maupun daring.

Pada validasi tegangan, galat rata-rata empat saluran adalah 0,21% dan galat maksimum 0,32%. Latensi kendali Blynk rata-rata 0,9 detik pada jaringan pengujian. Perbandingan dua hari operasi menunjukkan energi menurun dari 2,87 menjadi 1,25 kWh, setara 56,45% pada skenario uji. Kipas angin memberi kontribusi penghematan absolut terbesar, sedangkan rice cooker mempunyai persentase penurunan terbesar. Berdasarkan asumsi tarif penelitian, potensi penghematan berada di sekitar Rp70,2 ribu per 30 hari.

Hasil tersebut mendukung kelayakan fungsi prototipe dan menunjukkan manfaat monitoring per beban yang dihubungkan langsung dengan pengendalian. Namun, angka penghematan belum dapat digeneralisasi karena observasi energi hanya dua hari dan pengujian jaringan serta sensor masih terbatas. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan periode observasi lebih panjang, pengulangan pada kondisi beban yang beragam, pencatatan durasi ON, evaluasi kondisi offline, dan aturan prioritas untuk konflik antarmode kendali.

REFERENSI

- [1] A. A. Pradana, P. Yulianto, & S. Indriyanto, "Perancangan Sistem Monitoring Daya Listrik 1 Fasa Pada Rumah Tangga Berbasis Internet of Things (IoT)," *SINTA Jurnal Sistem Informasi dan Teknologi Komputasi*, vol. 1, no. 1, pp. 1-9, 2024.
- [2] E. S. Susanto, S. Bulan, & Dinola, "Perancangan prototype alat monitoring dan kontrol peralatan listrik berbasis internet of things (IoT) pada rumah tangga menggunakan sensor PZEM-004T," *Jurnal SimanteC*, vol. 13, no. 2, pp. 91-100, 2025.
- [3] G. A. Ena, S. Y. Doo, H. J. Djahi, & W. T. Ina, "Perancangan alat monitoring daya dan kontrol peralatan elektronik berbasis IoT," *JTEKEL: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 73-87, 2025.
- [4] F. N. Habibi, S. Setiawidayat, & M. Mukhsim, "Alat monitoring pemakaian energi listrik berbasis Android menggunakan modul PZEM-004T," *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Elektro Terapan*, pp. 157–162, 2017.
- [5] M. R. Hamdani & P. Airlangga, "Rancang bangun sistem monitoring menggunakan sensor PZEM 004T pada listrik tiga phase untuk alat produksi menggunakan mikrocontroller," *JPIM: Jurnal Penelitian Ilmiah Multidisipliner*, vol. 1, no. 4, pp. 1100-1108, 2025.
- [6] E. S. Pasaribu, S. Aisyah, P. Wikanta, A. G. Darmoyono, & E. M. Lubis, "Sistem kendali dan pemantauan daya listrik dengan MQTT berbasis IoT," *Jurnal Teknik Indonesia*, vol. 3, no. 7, pp. 99–114, 2024.
- [7] R. Sirait, M. Pardede, E. Hutajulu, Junaidi, S. C. Y. Pardede, & A. Pakpahan, "Implementation of PZEM-004T and LoRa for Internet of Things-based monitoring of power supply sources in laboratory building," *Jurnal Mandiri IT*, vol. 14, no. 2, pp. 223-235, 2025.