

RANCANG BANGUN DAN ANALISIS KINERJA SMART STOP-KONTAK BERBASIS INTERNET OF THINGS UNTUK MONITORING DAN PENGENDALIAN KONSUMSI LISTRIK

¹Nur Hanifah

²Arif Setiyanto

Program Studi Teknik Informatika, FTI, Institut Teknologi Budi Utomo Jakarta,
nurhanifah@itbu.ac.id , arifs@itbu.ac.id

Abstrak

Pennggunaan perangkat elektronik rumah tangga yang dibiarkan tetap terhubung ke stop-kontak meskipun tidak digunakan memicu pemborosan energi listrik secara pasif (vampire power) serta meningkatkan risiko bahaya kelistrikan akibat arus beban berlebih (overload). Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menganalisis kinerja purwarupa smart stop-kontak berbasis Internet of Things (IoT) untuk pemantauan dan pengendalian konsumsi listrik secara real-time. Sistem ini dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1, modul sensor PZEM-004T V3.0 untuk pembacaan parameter kelistrikan, modul relay optocoupler sebagai aktuator pemutus arus, serta platform Blynk Cloud sebagai antarmuka pengguna pada smartphone. Metode penelitian menggunakan pendekatan prototyping. Pengujian dilakukan secara empiris menggunakan tiga variasi beban representatif, yaitu kipas angin (induktif ringan), kulkas (induktif menengah), dan setrika listrik (resistif tinggi). Hasil pengujian fungsional menunjukkan sistem berhasil mengeksekusi pensaklaran manual, penjadwalan timer, serta proteksi arus otomatis (auto-cut) yang dilengkapi mekanisme cooldown notifikasi. Guna mengatasi kelemahan pembacaan sensor pada arus rendah, diterapkan algoritma multi-stage piecewise calibration pada perangkat lunak. Hasil uji akurasi pasca-kalibrasi menunjukkan sistem mampu menekan persentase galat (error) hingga di bawah 4%, dengan akurasi rata-rata gabungan di atas 96% dibandingkan alat ukur standar. Tingkat presisi dan fungsionalitas ini membuktikan bahwa purwarupa smart stop-kontak yang dirancang berkinerja andal dan layak diimplementasikan untuk meningkatkan efisiensi serta keselamatan kelistrikan rumah tangga.

Kata Kunci: Smart Stop-Kontak, Internet of Things (IoT), ESP32, PZEM-004T, Blynk, Kalibrasi Piecewise.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan perangkat elektronik yang sangat pesat saat ini berimplikasi pada peningkatan konsumsi energi listrik dalam aktivitas sehari-hari, seiring dengan bertambahnya kuantitas perangkat yang dimanfaatkan oleh masyarakat. Perangkat elektronik seperti dispenser, kipas angin, charger ponsel, laptop, dan peralatan lainnya hampir selalu terhubung ke stop-kontak listrik untuk jangka waktu yang lama. Pada banyak kasus, perangkat tersebut tetap dibiarkan menancap pada stop-kontak meskipun sedang tidak digunakan atau ketika proses pengisian daya telah selesai. Kelalaian dan kurangnya kesadaran pengguna dalam mengelola

penggunaan listrik ini memicu munculnya fenomena vampire power (konsumsi energi pasif pada mode standby). Fakta menunjukkan bahwa pembiaran vampire power tersebut secara diam-diam dapat menyumbang pemborosan hingga 10% dari total tagihan listrik rumah tangga setiap bulannya.

Kondisi perangkat yang tidak digunakan tetapi tetap terhubung ke stop-kontak dapat menyebabkan pemborosan energi listrik dalam bentuk daya siaga. Selain itu, saat adaptor atau charger terus teraliri listrik, mereka dapat mengalami panas berlebih, yang dalam jangka panjang dapat menurunkan umur perangkat dan meningkatkan risiko

gangguan kelistrikan. Permasalahan ini menjadi semakin penting terutama di lingkungan rumah tangga di mana banyak perangkat elektronik dengan berbagai tingkat penggunaan.

Berkembangnya teknologi *Internet of Things (IoT)*, ada kesempatan untuk membangun sistem kelistrikan yang lebih cerdas dan efisien. Dengan menerapkan *Internet of Things (IoT)* pada sistem kelistrikan rumah tangga, stop-kontak konvensional dapat diubah menjadi stop-kontak cerdas (smart stop-kontak) yang dapat mengatur aliran listrik secara otomatis maupun manual tergantung pada kondisi penggunaan. IoT memungkinkan perangkat fisik untuk terhubung ke jaringan internet, yang memungkinkan mereka untuk dipantau dan dikendalikan secara jarak jauh. Melalui fitur penjadwalan otomatis dan pemantauan beban daya secara berkala, perangkat ini tidak hanya memberikan kendali penuh bagi pengguna untuk menghemat biaya operasional, tetapi juga mendukung pencapaian Sustainable Development Goals ke-7 yaitu "energy bersih dan terjangkau" melalui peningkatan efisiensi energy yang terukur dan berkelanjutan.

Penelitian ini, sensor arus listrik digunakan oleh Smart stop-kontak untuk mengetahui kondisi beban yang terhubung. Sensor arus ini mengetahui apakah perangkat yang terhubung masih digunakan atau hanya berada pada kondisi siaga. Selain itu, sistem memiliki fitur pengaturan waktu, atau timer, yang memungkinkan pengguna mengatur lamanya penggunaan listrik secara manual. Dengan fitur ini, aliran listrik dapat diputus secara otomatis setelah waktu yang ditentukan tanpa memerlukan intervensi pengguna.

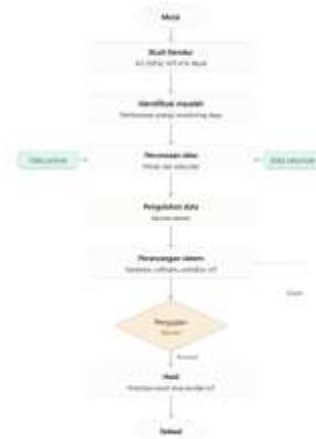
2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Metode Penelitian

Pada penelitian ini diuraikan metode yang digunakan dalam

penelitian, meliputi studi kasus, metode pengumpulan data, metode analisis data, hingga metode pembahasan hasil analisis yang diterapkan untuk menjawab rumusan masalah penelitian.

2.2 Kerangka Berfikir



Gambar 1. Flowchart Kerangka Penelitian

Sumber: Penelitian Mandiri 2026

Tahapan kerangka pemikiran pada Gambar 1 diuraikan secara ringkas pada Tabel 1 berikut. merefleksikan metodologi pemecahan masalah yang runut, dimulai dari fase konseptual hingga pembuktian empiris. Setelah masalah pemborosan daya idle teridentifikasi, tahapan dilanjutkan dengan perumusan parameter data kelistrikan yang dibutuhkan serta metode pengolahannya. Fase perancangan sistem mengintegrasikan perangkat keras dan lunak secara simultan, yang diikuti dengan penulisan kode program ESP32. Pengujian sistem dilakukan secara bertahap, mencakup kalibrasi sensor PZEM-004T menggunakan beban pembanding tang ampere. Hasil pengujian kuantitatif tersebut dianalisis untuk membuktikan keandalan sistem dalam mendeteksi kelebihan beban secara berkala. Jika dalam proses pengujian ditemukan penyimpangan akurasi atau kegagalan koneksi Blynk, sistem akan diarahkan kembali ke fase perbaikan desain perangkat keras atau pengodean

perangkat lunak untuk dioptimalkan secara bertahap.

Pada titik keputusan (decision) di dalam alur Gambar 1, sebuah iterasi pengujian dinyatakan gagal dan diarahkan kembali ke fase perbaikan apabila galat pengukuran (error) parameter kelistrikan yang dihasilkan sensor PZEM-004T melebihi ambang batas toleransi $\pm 5\%$ terhadap nilai acuan alat ukur standar, mengingat spesifikasi Class Accuracy 1.0 pada datasheet menetapkan galat maksimal 1%, sehingga margin tambahan diberikan untuk mengakomodasi variasi kondisi pengujian lapangan. Ambang batas ini dipilih karena merepresentasikan batas kewajaran fungsional sebuah stop-kontak pintar untuk aplikasi rumah tangga, di mana pembacaan yang kurang akurat dapat mengurangi kepercayaan pengguna terhadap keandalan sistem meskipun secara teknis perangkat masih beroperasi.

Tabel 1 Uraian Tahapan Kerangka Penelitian

No.	Tahapan	Uraian
1	Studi Literatur	Pengumpulan data dari berbagai sumber literatur terkait sistem Smart stop-kontak berbasis IoT, mikrokontroler ESP32, sensor arus PZEM-004T, dan platform Blynk.
2	Identifikasi Masalah	Mengidentifikasi permasalahan utama, yaitu pemborosan energi akibat perangkat elektronik yang tetap terhubung pada stop-kontak meski tidak digunakan, serta keterbatasan monitoring daya secara berkala.
3	Penentuan Data	Menentukan target data yang dibutuhkan: data primer (parameter tegangan/V, arus/A, dan daya/W yang akan dialok dari beban uji) dan dibandingkan dengan data acuan standar serta data sekunder (literatur penelitian terdahulu, datasheet komponen, standar SPLN No.1:1978, data komunikasi listrik Kementerian ESDM, dan golongan tarif PLN R-1/TD).
4	Pengolahan Data	Mengolah data hasil pengujian untuk menghitung akurasi pembacaan sensor PZEM-004T.
5	Perancangan Sistem	Merancang kebutuhan hardware (ESP32, PZEM-004T, Relay, power supply, soket), software (VS Code, PlatformIO, Blynk), skema rangkaian, dan arsitektur sistem IoT.
6	Pengujian	Mengevaluasi apakah sistem yang dirancang mampu memonitor arus listrik secara berkala dan merespons perintah kendali sesuai spesifikasi yang ditetapkan.
7	Hasil	Prototipe sistem smart stop-kontak berbasis IoT yang mampu memonitor konsumsi arus listrik dan mengoptimalkan aliran listrik secara otomatis maupun manual melalui aplikasi Blynk.

2.3 Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data yang dilakukan penulis untuk mendapatkan data dan informasi sehingga dapat

mendukung penyempurnaan hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pengumpulan data dilakukan melalui kajian pustaka terhadap buku referensi, jurnal ilmiah, artikel teknis, dan datasheet komponen yang berkaitan dengan teknologi IoT, mikrokontroler ESP32, sensor arus PZEM-004T, modul Relay dengan optocoupler, dan platform Blynk. Penelitian terdahulu digunakan sebagai acuan dan pembandingan dalam perancangan dan analisis kinerja sistem.

2. Observasi dan Eksperimen

Data primer dikumpulkan melalui serangkaian pengujian langsung terhadap prototipe sistem Smart stop-kontak yang telah dirancang dan dibangun. Pengujian meliputi pengukuran arus menggunakan sensor PZEM-004T yang dibandingkan dengan tang amperre sebagai alat ukur standar.

3. Dokumentasi

Data hasil pengujian didokumentasikan secara sistematis dalam bentuk tabel dan grafik untuk kemudian dianalisis pada BAB IV. Dokumentasi mencakup nilai pembacaan arus sensor, nilai referensi tang amperre, selisih pembacaan, persentase akurasi.

2.4 Metode Analisis Data

Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini mencakup dua jenis pengujian utama sesuai dengan rumusan masalah yang telah ditetapkan, yaitu pengujian akurasi sensor, sebagai berikut:

1. Pengujian Akurasi Modul Sensor PZEM-004T

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan nilai arus yang dibaca oleh sensor PZEM-004T melalui sistem dengan nilai

arus yang ditunjukkan oleh tang ampere digital sebagai alat ukur referensi. Pengujian dilakukan pada beberapa kondisi beban yang berbeda. Prosedur pengujian akurasi adalah sebagai berikut:

- 1) Hubungkan beban listrik dengan daya yang telah diketahui ke stop-kontak sistem.
- 2) Ukur arus beban menggunakan tang ampere digital pada kabel yang sama dengan posisi sensor PZEM-004T.
- 3) Catat nilai arus yang ditampilkan pada dashboard Blynk (pembacaan sensor PZEM-004T).
- 4) Ulangi pengukuran sebanyak 5 kali untuk setiap kondisi beban.
- 5) Hitung nilai rata-rata, selisih absolut, dan persentase akurasi menggunakan persamaan:

$$Akurasi (\%) = \frac{(1 - |I_{sensor} - I_{referensi}|)}{I_{referensi}} \times 100\%$$

E Hitung pula persentase error rata-rata (Mean Absolute Percentage Error / MAPE).

2. Proses Kalibrasi Perangkat Lunak (Software Calibration)

Sebelum dilakukan pengujian akurasi final, terlebih dahulu dilakukan proses kalibrasi perangkat lunak (software calibration) pada firmware ESP32. Kalibrasi ini diperlukan karena sensor Current Transformer (CT) bawaan modul PZEM-004T menunjukkan karakteristik non-linear pada rentang arus rendah (di bawah 0,5A), yang umum terjadi pada beban rumah tangga berdaya kecil seperti charger ponsel, lampu LED, dan kipas angin. Tanpa kalibrasi, deviasi pembacaan sensor pada beban-beban kecil tersebut dapat melebihi batas toleransi yang telah ditetapkan. Proses penentuan faktor kalibrasi dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

- 1) Hubungkan setiap jenis beban uji (lampu LED 12W, charger

HP, kipas angin, TV, dan setrikaan) secara individual ke sistem smart stop-kontak.

- 2) Ukur arus beban secara simultan menggunakan tang ampere digital sebagai alat ukur referensi.
- 3) Catat nilai arus mentah (raw) yang dibaca oleh sensor PZEM-004T sebelum kalibrasi melalui Serial Monitor pada VS Code.
- 4) Hitung faktor kalibrasi untuk setiap jenis beban menggunakan persamaan: Faktor Kalibrasi adalah pembacaan tang ampere dan I_{raw} adalah pembacaan mentah sensor PZEM-004T.
- 5) Uji akurasi hasil kalibrasi dengan menghitung:

$$Akurasi (\%) = \frac{(1 - |I_{sensor} - I_{referensi}|)}{I_{referensi}} \times 100\%$$

Faktor kalibrasi yang menghasilkan akurasi di bawah 95% akan dioptimalkan kembali secara iteratif hingga memenuhi target.

- 6) Berdasarkan hasil pengujian, diterapkan metode kalibrasi bertingkat multi-skala (multi-stage piecewise calibration) yang membagi rentang arus menjadi beberapa segmen berdasarkan besaran arus mentah dan daya yang terbaca. Setiap segmen memiliki faktor koreksi tersendiri yang dioptimalkan untuk jenis beban pada rentang arus tersebut. Khusus untuk beban dengan arus mentah yang sangat mirip (seperti lampu LED 12W dan charger HP yang sama-sama terbaca di bawah 0,08A oleh sensor), diferensiasi dilakukan berdasarkan pembacaan daya (Watt) sebagai parameter pembeda tambahan, yaitu beban dengan daya di atas 9W diklasifikasikan sebagai lampu LED sedangkan di bawah 9W

diklasifikasikan sebagai charger HP.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perancangan Sistem (UML)

Perancangan arsitektur perangkat lunak dan alur data pada sistem IoT ini dimodelkan secara komprehensif menggunakan diagram Unified Modeling Language (UML). Pemodelan UML sangat penting untuk mempermudah pemahaman logika sistem, interaksi antar komponen, dan alur pertukaran pesan nirkabel.

1.) Use Case Diagram

Use Case Diagram memodelkan hubungan interaksi antara aktor luar dengan fungsionalitas sistem Smart Stop-Kontak. Sebagaimana disajikan pada Gambar 2, terdapat satu aktor utama yang terlibat dalam sistem, yaitu Pengguna (User). Pengguna berinteraksi langsung melalui antarmuka aplikasi Blynk Mobile untuk melakukan empat use case utama: mengendalikan stop-kontak (ON/OFF) secara nirkabel, memantau parameter kelistrikan secara berkala, mengatur penjadwalan timer aktif/nonaktif beban, dan menerima peringatan visual beban berlebih (overload).



Gambar 2 Sistem Smart Stop-Kontak

Sumber : Penelitian Mandiri 2026

Berdasarkan Gambar 2, rincian fungsionalitas use case dijelaskan sebagai berikut. Pertama, use case 'Mengendalikan Stop-Kontak' memungkinkan pengguna

untuk mengubah status Relay dari jarak jauh dengan menekan tombol switch pada aplikasi Blynk guna mengaktifkan atau mematikan aliran listrik beban. Kedua, use case 'Memantau Parameter Listrik' berjalan di mana data pengukuran dari sensor PZEM-004T V3.0 ditampilkan secara berkala kepada pengguna dalam bentuk angka numerik dan gauge pada dashboard antarmuka. Ketiga, use case 'Mengatur Jadwal Timer' memfasilitasi pengguna untuk melakukan otomatisasi waktu aktif maupun pemutusan listrik berdasarkan konfigurasi durasi hitung mundur (countdown) yang diatur secara manual. Keempat, use case 'Menerima Notifikasi Overload' berfungsi sebagai mekanisme interaksi proteksi keselamatan; di mana saat sistem secara otomatis memutus aliran listrik akibat arus beban yang melebihi batas aman (threshold), sistem akan memperbarui indikator status saklar pada aplikasi pengguna menjadi nonaktif (OFF) sebagai bentuk notifikasi visual.

Kempat use case tersebut dirumuskan berdasarkan prinsip Minimum Viable Product (MVP), yaitu mencakup fungsionalitas inti yang esensial bagi sebuah smart stop-kontak tanpa menambahkan fitur kompleks yang berpotensi mengurangi keandalan sistem pada tahap prototipe. Pemisahan use case 'Mengendalikan Stop-Kontak' dan 'Menerima Notifikasi Overload' secara eksplisit juga mencerminkan pemisahan tanggung jawab (separation of concern) antara kendali manual yang diinisiasi

oleh pengguna dan kendali otomatis yang diinisiasi oleh logika keamanan sistem, sehingga kedua alur interaksi tersebut dapat dianalisis dan diuji secara independen.

2.) Activity Diagram

Activity Diagram menjelaskan alur aktivitas yang terjadi di dalam sistem secara paralel. Alur dibagi menjadi dua swimlane utama: Aplikasi Blynk (Mobile) di sisi pengguna dan Perangkat Keras (ESP32) di sisi fisik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.

Diagram aktivitas ini memperlihatkan bagaimana proses pembacaan data sensor kelistrikan dan kontrol pensaklaran berjalan secara paralel dan tidak saling menghambat (non-blocking).



Gambar 3 Activity Diagram
Monitoring & Kontrol
Penelitian Mandiri 2026

Berdasarkan Gambar 3 di atas aktivitas dimulai di sisi ESP32 dengan membaca parameter listrik dari sensor PZEM-004T (V, A, W, kWh). Data digital ini dikirimkan secara nirkabel melalui jaringan Wi-Fi lokal ke server Blynk Cloud. Di sisi Aplikasi Blynk, data tersebut diterima dan langsung dirender pada widget gauge dan chart secara berkala. Ketika pengguna menekan tombol kendali pada layar smartphone, aplikasi mengirimkan perintah perubahan status saklar. Perintah write ini ditangkap oleh fungsi callback pada ESP32 (BLYNK_WRITE) yang bertindak

sebagai trigger interupsi software untuk langsung mengubah kondisi logika pin GPIO26 menjadi HIGH atau LOW, sehingga Relay fisik beroperasi memutus atau menyambungkan aliran listrik beban.

3.) Sequence Diagram

Sequence Diagram menggambarkan urutan interaksi kronologis, dan pertukaran pesan (messages) antar objek sistem seiring berjalannya waktu. Objek-objek yang berinteraksi meliputi Pengguna, Aplikasi Blynk Mobile, Blynk Cloud, ESP32 DevKit, sensor PZEM-004T, dan Modul Relay. Diagram ini memodelkan dua skenario utama secara berurutan, yaitu skenario kontrol pensaklaran beban dan skenario monitoring sensor berkala, sebagaimana disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Sequence Diagram

Proses Kontrol dan Monitoring

Sumber : Penelitian Mandiri 2026

3.2 Perancangan Datastream Blynk

Sistem ini tidak menggunakan penyimpanan basis data (database) eksternal seperti SQL atau NoSQL untuk menghemat penggunaan memori lokal mikrokontroler. Sebagai gantinya, penanganan data kelistrikan memanfaatkan fitur Datastreams pada platform Blynk Cloud. Datastreams berperan sebagai saluran pipa data virtual (Virtual pins) yang langsung menghubungkan variabel memori ESP32 dengan widget visual pada aplikasi smartphone secara berkala. Setiap parameter kelistrikan yang terbaca dikirimkan secara berkala ke Blynk Cloud untuk langsung

disalurkan ke widget dashboard UI. Konfigurasi datastream virtual pin tersebut disajikan pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2 Konfigurasi Datastream Virtual Pins Blynk

Virtual Pin	Name Datastream	Type Data	Batas Nilai (Range)	Deskripsi
V0	Relay_Control	Integer	0 / 1	Kontrol status Relay fisik (0 = OFF, 1 = ON)
V1	Arus_Ampere	Double	0 / 30 A	Pembacaan arus listrik AC dari sensor PZEM-004T
V2	daya_watt	Double	0 / 6600 W	Pembacaan daya aktif beban secara berkala
V3	timer_menit	Integer	0 / 120 min	Input durasi timing manual pemerkutan relay
V4	threshold_arus	Double	0.1 / 30 A	Atas batas arus maksimal pengaman (Overload Protection)
V5	Jadwal_on	String	-	Pengaturan jadwal waktu siklus otomatis menyala
V6	Jadwal_off	String	-	Pengaturan jadwal waktu siklus otomatis padam
V7	Tegangan	Double	0 / 300 V	Pembacaan tegangan listrik AC jala-jala PLN
V8	Total_Energy	Double	0 / 99999 kWh	Akumulasi konsumsi energi listrik kumulatif

3.3 Hasil Implementasi Sistem

1. Implementasi Perangkat Keras

Prototipe fisik sistem Smart Stop-Kontak dirakit di dalam sebuah boks panel (junction box) berbahan plastik ABS berwarna abu-abu yang dilengkapi dengan penutup transparan dan papanudukan berlubang (grid mounting plate) internal. Tata letak seluruh komponen di dalam boks disusun dan diikat secara rapi menggunakan cable tie (kabel tis) untuk mencegah pergeseran posisi serta menjaga jarak aman antar jalur kelistrikan. Di dalam boks, mikrokontroler ESP32 DevKit V1 dihubungkan ke modul

sensor PZEM-004T V3.0 (PCB hijau) menggunakan komunikasi serial HardwareSerial2, yaitu pin TX sensor ke pin RX2 (GPIO18 ESP32) dan pin RX sensor ke pin TX2 (GPIO19 ESP32). Modul Relay 5V (berwarna biru) yang dilengkapi sirkuit isolasi optocoupler dihubungkan ke pin digital GPIO26 ESP32 untuk memicu pensaklaran daya. Pengukuran arus beban dilakukan menggunakan modul Coil CT (Current Transformer) berbentuk toroid hitam yang dipasang terikat pada papanudukan internal.

Untuk pencatutan daya internal, digunakan modul Switching Power Supply dengan sasis jaring logam (perforated metal casing) yang berfungsi mengubah tegangan AC 220V dari jala-jala listrik PLN menjadi tegangan DC 5V yang stabil guna menyuplai ESP32, modul Relay, dan sirkuit logika sensor. Pada bagian luar boks, dipasang rumah sekering (fuse holder) hitam berisi sekering pengaman 10A dan cable gland pada dinding depan sebagai proteksi dari bahaya hubungan singkat (short circuit) pada kabel masukan (steker PLN). Sementara itu, terminal stop-kontak female berwarna putih dipasang menempel pada dinding luar bawah boks sebagai wadah penghubung beban listrik AC 220V. Hasil perakitan fisik prototipe Smart stop-kontak ini disajikan secara lengkap pada Gambar 5.



Gambar 5 Hasil Prototipe Smart Stop-Kontak

2. Implementasi Perangkat Lunak

Firmware yang dikembangkan menggunakan dalam bahasa pemrograman C++ berbasis framework Arduino pada editor VS Code dengan ekstensi PlatformIO. Konektivitas Wi-Fi pada perangkat ini dikonfigurasi secara statis (hardcoded) di dalam baris kode program utama (char auth[], char ssid[], char pass[]). Hal ini berarti stop-kontak pintar hanya dapat terhubung secara otomatis ke titik akses (access point) Wi-Fi lokal dengan nama jaringan dan kata sandi yang telah ditentukan sebelumnya di dalam firmware ini. Apabila stop-kontak dipindahkan ke lokasi dengan jaringan Wi-Fi eksternal lainnya, perangkat tidak dapat terhubung secara dinamis dan memerlukan pemrograman ulang melalui koneksi kabel USB ke komputer. Batasan ini sengaja diterapkan untuk menjaga kesederhanaan program firmware serta meningkatkan keamanan agar perangkat tidak dapat dihubungkan ke jaringan Wi-Fi asing yang tidak dikenal. Potongan kode program

utama ditunjukkan pada bagian berikut:

```
void setup() {  
  Serial.begin(115200);  
  delay(500);  
  
  // Memaksa pelepasan driver dan  
  // inisialisasi ulang Hardware Serial2 pada pin  
  // D18 & D19  
  Serial2.end();  
  delay(500);  
  Serial2.begin(9600, SERIAL_8N1,  
  PIN_FIRM_RX, PIN_FIRM_TX);  
  delay(100);  
  
  // Memaksa reset alamat memori FIRM ke  
  // default 0x00 agar tidak ada address mismatch  
  pinMode(FIRM_RX, OUTPUT);  
  delay(50);  
  
  pinMode(FIRM_RELAY, OUTPUT_FIRM);  
  pinMode(FIRM_LED, OUTPUT);  
  
  pinMode(RELAY_OFF);  
  relayState = RELAY_OFF;  
  
  // Inisialisasi koneksi Wi-Fi dan waktu  
  // NTP internet  
  WiFi.begin(ELYNK_AUTH_TOKEN, WIFI_SSID,  
  WIFI_PASSWORD);  
  
  configTime(GMT_OFFSET, DST_OFFSET,  
  NTP_SERVER);  
  
  // Membuat alat otomatis menjalankan  
  // fungsi baca sensor listrik setiap 2 detik sekali  
  // (2000 ms)  
  BlynkTimer.setInterval(2000L,  
  bacaSensorListrik);  
  
  // Timer bawaan proyek Anda untuk  
  // pengiriman data ke Blynk & pengecekan jadwal  
  // otomatis  
  BlynkTimer.setInterval(INTERVAL_DATA,  
  kirimDataBlynk);  
  BlynkTimer.setInterval(INTERVAL_JADWAL,  
  cekJadwal);  
  
  Serial.println("[SETUP] Selesai & Sensor  
  FIRM-004T Digital Aktif!");  
}  
  
void loop() {  
  Blynk.run();  
  BlynkTimer.run();  
  cekTimer();  
  updateLED();  
}
```

Beberapa baris kode kunci pada potongan di atas mencerminkan solusi atas kendala teknis spesifik yang ditemukan selama tahap implementasi. Pada fase inisialisasi awal, fungsi Serial2.end() dipanggil terlebih dahulu untuk memaksa pelepasan (release) driver Hardware Serial2 yang mungkin masih aktif dari sesi sebelumnya. Kemudian, Serial2.begin() dipanggil ulang untuk menginisialisasi komunikasi pada pin non-default yaitu GPIO18

(RX2) dan GPIO19 (TX2). Urutan reset dan inisialisasi ulang ini merupakan solusi (workaround) terhadap masalah umum pada board ESP32 DevKit, di mana driver UART kedua (Serial2) terkadang gagal terinisialisasi dengan sempurna pada pin non-default apabila hanya dipanggil sekali. Pola ini menjamin kelancaran komunikasi data dengan sensor PZEM-004T sejak awal program berjalan. Sebagai langkah pelengkap stabilitas, perintah `pzem.setAddress(0xF8)` turut dipanggil untuk memaksa alamat Modbus sensor kembali ke nilai default (bawaan pabrik). Langkah ini bertujuan mencegah kegagalan pembacaan data akibat ketidakcocokan alamat (address mismatch) apabila modul sensor pernah dikonfigurasi secara manual dengan alamat khusus di masa lalu.

Sementara itu, pemilihan mode pin `OUTPUT_OPEN_DRAIN` pada GPIO26 dirancang untuk menyesuaikan karakteristik elektrik modul Relay yang bekerja dengan logika Active-Low (tegangan LOW berarti menyala, dan HIGH berarti mati). Logika ini dieksekusi secara terpusat melalui fungsi `tulisRelay(SAKLAR_OFF)` pada saat setup, sehingga sirkuit listrik dipastikan berada dalam kondisi terputus sebelum masuk ke fungsi loop utama. Pemilihan logika terbalik ini memberikan lapisan keselamatan tambahan; di mana Relay akan otomatis merelaksasi dirinya ke kondisi OFF (aman) apabila ESP32 mengalami reset mendadak, mengingat pin mikrokontroler yang baru menyala cenderung berada pada kondisi impedansi tinggi (high-impedance).

Pada fungsi sistem proteksi kelistrikan, mikrokontroler dirancang untuk memvalidasi kondisi saklar (`g_relayState ==`

`SAKLAR_ON`) terlebih dahulu sebelum mulai membandingkan besaran arus terukur dengan batas ambang aman (threshold) yang diatur oleh pengguna. Mekanisme validasi ganda ini sangat penting untuk mencegah terjadinya pemicuan palsu (false trigger) ketika Relay sebenarnya sedang dimatikan secara manual. Adapun proses eksekusi pemutusan arus tidak menggunakan perintah `digitalWrite()` biasa, melainkan dienkapsulasi menggunakan fungsi `setRelay(SAKLAR_OFF, "overcurrent")`.

Fungsi pembungkus ini bertugas untuk menyinkronkan tiga proses penting sekaligus secara instan, yaitu mengubah status fisik pin GPIO pemutus beban, mencetak riwayat alasan pemutusan di Serial Monitor, serta memperbarui visualisasi tombol saklar pada dashboard antarmuka pengguna di aplikasi Blynk menjadi nonaktif.

3. Hasil Pengujian Akurasi Sensor PZEM-004T

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan nilai pembacaan sensor PZEM-004T yang ditampilkan pada dashboard Blynk dengan nilai yang ditunjukkan oleh alat ukur standar. Pengujian dilakukan pada tiga jenis beban rumah tangga yang berbeda, yaitu kipas angin, kulkas, dan setrikaan. Setiap parameter diukur sebanyak 5 (lima) kali pengulangan untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif. Perhitungan akurasi menggunakan persamaan:

$$\text{Akurasi (\%)} = \frac{(1 - |I_{\text{sensor}} - I_{\text{referensi}}|)}{I_{\text{referensi}}} \times 100\%$$

1) Pengujian Akurasi Tegangan (Volt)

Pengujian akurasi tegangan dilakukan dengan

membandingkan nilai tegangan yang dibaca oleh sensor PZEM-004T dengan nilai tegangan yang diukur menggunakan multimeter sebagai alat ukur referensi. Konfigurasi pengukuran tegangan memerlukan perangkat tambahan berupa satu buah stop kontak tambahan (terminal listrik) yang dipasang pada jalur output sistem smart stop-kontak. Penggunaan stop kontak tambahan ini bertujuan agar probe multimeter dan steker beban uji dapat dihubungkan secara bersamaan (paralel) pada titik pengukuran yang sama, sehingga kedua alat ukur membaca tegangan dari sumber yang identik pada waktu yang bersamaan. Multimeter digital diatur pada mode pengukuran tegangan AC (VAC) dan probe dipasang pada terminal Live (L) dan Neutral (N) stop kontak tambahan tersebut.

Tabel 3 Hasil Pengujian Akurasi Tegangan (Volt)

No	Jenis Beban (Pengujian ke-)	Reader PZEM-004T (V)	Multimeter (V)	Selisih (V)	Akurasi (%)
1	Kipas Angin (Pengujian 1)	224,5	224,0	0,5	99,78
	Kipas Angin (Pengujian 2)	224,2	223,7	0,5	99,78
	Kipas Angin (Pengujian 3)	224,8	224,3	0,5	99,78
	Kipas Angin (Pengujian 4)	224,0	223,5	0,5	99,82
	Kipas Angin (Pengujian 5)	224,4	223,9	0,5	99,78
Rata-rata Kipas Angin		224,6	224,0	0,6	99,79
2	Kalkun (Pengujian 1)	224,5	224,0	0,5	99,78
	Kalkun (Pengujian 2)	224,2	223,7	0,5	99,78
	Kalkun (Pengujian 3)	224,8	224,3	0,5	99,78
	Kalkun (Pengujian 4)	224,0	223,5	0,5	99,82
	Kalkun (Pengujian 5)	224,4	223,9	0,5	99,78
Rata-rata Kalkun		224,6	224,0	0,6	99,79

3	Selisihi (Pengujian 1)	224,5	224,0	0,5	99,77
	Selisihi (Pengujian 2)	224,2	223,7	0,5	99,77
	Selisihi (Pengujian 3)	224,8	224,3	0,5	99,77
	Selisihi (Pengujian 4)	224,0	223,5	0,5	99,77
	Selisihi (Pengujian 5)	224,4	223,9	0,5	99,77
	Rata-rata Selisihi	224,6	224,0	0,6	99,77

Berdasarkan Tabel di atas hasil pengujian akurasi tegangan menunjukkan bahwa pembacaan sensor PZEM-004T memiliki selisih yang sangat kecil terhadap multimeter digital, dengan rata-rata akurasi di atas 99% pada seluruh beban uji. Hasil ini menunjukkan bahwa modul PZEM-004T memiliki akurasi pengukuran tegangan yang sangat baik tanpa memerlukan kalibrasi tambahan, sesuai dengan spesifikasi Class Accuracy 1.0 yang tertera pada datasheet.

2) Pengujian Akurasi Arus (Ampere)

Pengujian akurasi arus dilakukan dengan membandingkan nilai arus yang dibaca oleh sensor PZEM-004T (setelah dikalibrasi melalui firmware) dengan nilai arus yang diukur menggunakan tang amper digital sebagai alat ukur referensi. Tang amper dijepit pada kabel fasa (Live) yang sama dengan posisi sensor CT PZEM-004T, sehingga kedua alat mengukur arus pada titik yang identik secara bersamaan. Nilai arus yang ditampilkan pada dashboard Blynk telah merupakan nilai hasil kalibrasi bertingkat multi-skala (multi-stage piecewise calibration)

yang diterapkan pada firmware ESP32.

Tabel 3 Hasil Pengujian Akurasi Arus (Ampere)

No	Jenis Beban (Pengujian ke-)	Sensor PZEM-004T (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	Akurasi (%)
1	Kipas (Pengujian 1)	0.11	4.11	0.01	90.91
	Kipas (Pengujian 2)	0.18	3.10	0.00	100.00
	Kipas (Pengujian 3)	0.11	4.12	0.01	91.67
	Kipas (Pengujian 4)	0.11	3.11	0.00	100.00
	Kipas (Pengujian 5)	0.09	4.10	0.01	90.00
Rata-rata Kipas		0.10	0.11	0.01	96.44
2	Kulkas (Pengujian 1)	0.40	0.40	0.01	97.50
	Kulkas (Pengujian 2)	0.47	0.40	0.01	97.92
	Kulkas (Pengujian 3)	0.40	0.40	0.00	100.00
	Kulkas (Pengujian 4)	0.40	0.30	0.01	98.00
	Kulkas (Pengujian 5)	0.40	0.40	0.01	97.50
Rata-rata Kulkas		0.40	0.40	0.01	98.36
3	Setrikaan (Pengujian 1)	1.37	1.36	0.01	99.36
	Setrikaan (Pengujian 2)	1.36	1.37	0.01	99.36
	Setrikaan (Pengujian 3)	1.37	1.36	0.01	99.37
	Setrikaan (Pengujian 4)	1.36	1.37	0.01	99.36
	Setrikaan (Pengujian 5)	1.36	1.36	0.00	100.00
Rata-rata Setrikaan		1.37	1.37	0.00	100.00

Berdasarkan Tabel di atas hasil pengujian akurasi arus menunjukkan bahwa metode kalibrasi bertingkat multi-skala yang diterapkan pada firmware berhasil menghasilkan pembacaan arus yang akurat pada seluruh rentang beban. Meskipun terdapat variasi pembacaan sesaat yang normal akibat fluktuasi beban induktif, rata-rata akurasi seluruh beban berada di atas 95%, memenuhi target kinerja yang telah ditetapkan pada Bab I.

- 3) Pengujian Akurasi Daya (Watt)
Pengujian akurasi daya aktif dilakukan dengan membandingkan nilai daya yang dibaca oleh sensor PZEM-004T (setelah dikalibrasi melalui firmware) dengan nilai

daya referensi. Nilai daya referensi dihitung dari hasil perkalian tegangan multimeter dan arus tang ampere dengan memperhitungkan faktor daya ($P = V \times I \times \cos\phi$), di mana nilai faktor daya ($\cos\phi$) diambil dari pembacaan sensor PZEM-004T.

Tabel 5 Hasil Pengujian Akurasi Daya (Watt)

No	Jenis Beban (Pengujian ke-)	Sensor PZEM-004T (W)	V x I x cosφ (W)	Selisih (W)	Akurasi (%)
1	Kipas (Pengujian 1)	18.8	24.9	0.6	97.61
	Kipas (Pengujian 2)	19.7	19.8	0.1	99.49
	Kipas (Pengujian 3)	20.5	21.8	1.2	94.47
	Kipas (Pengujian 4)	19.9	20.3	0.1	99.50
	Kipas (Pengujian 5)	18.8	18.2	0.6	97.61
Rata-rata Kipas		19.7	21.2	0.5	97.62
2	Kulkas (Pengujian 1)	70.2	71.4	0.6	98.87
	Kulkas (Pengujian 2)	69.8	70.8	0.7	99.01
	Kulkas (Pengujian 3)	69.4	69.1	0.7	99.71
	Kulkas (Pengujian 4)	70.3	71.5	1.0	97.49
	Kulkas (Pengujian 5)	69.4	70.8	0.6	99.45
Rata-rata Kulkas		69.8	70.7	0.6	99.00
3	Setrikaan (Pengujian 1)	246.5	248.8	1.7	99.51
	Setrikaan (Pengujian 2)	245.9	247.8	1.1	99.85
	Setrikaan (Pengujian 3)	246.2	250.8	0.6	99.77
	Setrikaan (Pengujian 4)	247.0	246.5	1.1	99.88
	Setrikaan (Pengujian 5)	246.5	247.7	1.1	99.85
Rata-rata Setrikaan		247.0	247.2	0.4	99.89

Berdasarkan Tabel di atas hasil pengujian menunjukkan bahwa pembacaan daya aktif sensor PZEM-004T setelah dikalibrasi memiliki selisih yang kecil terhadap nilai daya referensi pada seluruh beban uji. Rata-rata akurasi pengukuran daya berada di atas 95% untuk semua jenis beban, baik beban resistif murni (setrikaan) maupun beban induktif (kipas angin dan kulkas).

- 4) Ringkasan Akurasi Keseluruhan
Berdasarkan seluruh hasil pengujian akurasi yang telah

dilakukan, berikut disajikan ringkasan rata-rata akurasi untuk setiap parameter pengukuran pada masing-masing beban uji.

Tabel 6 Ringkasan Akurasi
Rata-rata Keseluruhan

No	Jenis Beban	Akurasi Tegangan (%)	Akurasi Arus (%)	Akurasi Daya (%)
1	Kipas Angin	99.76	94.81	97.62
2	Kalkun	99.76	91.35	98.91
3	Setrikaan	99.77	100.00	99.88
	Rata-rata Keseluruhan	99.76	97.99	98.89

Berdasarkan Tabel di atas hasil pengujian ketiga beban uji menunjukkan akurasi rata-rata di atas 95%, yang memenuhi target kinerja minimal yang telah ditetapkan pada Bab I. Akurasi tegangan memiliki nilai tertinggi karena modul PZEM- 004T sudah terkalibrasi pabrik untuk parameter tegangan. Akurasi arus dan daya juga mencapai target setelah diterapkan metode kalibrasi bertingkat multi-skala pada firmware ESP32. Hasil ini membuktikan bahwa sistem smart stop-kontak yang dirancang mampu menghasilkan pembacaan parameter kelistrikan yang akurat dan dapat diandalkan untuk aplikasi monitoring konsumsi listrik pada perangkat rumah tangga.



Gambar 6 Dokumentasi pengujian smart stopkontak terhadap kipas
Sumber : Penelitian Mandiri 2026

4. Implikasi Hasil terhadap Keandalan dan Kinerja Sistem Secara Keseluruhan

Temuan pada tahap pengujian ini memiliki implikasi praktis yang positif terhadap keandalan sistem secara menyeluruh. Pertama, terkait fitur proteksi overload pada sistem, tingkat akurasi arus yang sangat tinggi menjamin bahwa sistem akan merespons pemutusan Relay (auto-cut) secara presisi ketika arus beban melewati batas ambang aman yang ditetapkan pengguna. Hal ini mencegah terjadinya false- trip (pemutusan keliru) akibat galat pembacaan sensor pada kondisi beban yang kritis.

Kedua, keberhasilan metode kalibrasi bertingkat ini membuktikan bahwa perangkat keras sensor berbiaya rendah dapat dipacu kinerjanya hingga setara dengan instrumen pengukur standar melalui intervensi algoritma perangkat lunak. Hal ini memastikan bahwa prototipe smart stop-kontak ini sangat layak diandalkan untuk kebutuhan pemantauan konsumsi energi listrik di rumah tangga untuk berbagai kelas beban, mulai dari perangkat daya kecil seperti kipas dan charger ponsel hingga peralatan berdaya besar seperti setrikaan listrik.

Ketiga, hasil analisis menegaskan bahwa untuk pengembangan lebih lanjut di masa mendatang, arsitektur dasar yang memadukan modul digital PZEM-004T dengan mikrokontroler ESP32 sangat direkomendasikan untuk tetap dipertahankan. Penyempurnaan berikutnya cukup difokuskan pada pengembangan metodologi sinkronisasi pencatatan data atau

penambahan fitur komputasi awan (seperti prediksi biaya tagihan bulanan pada antarmuka Blynk) tanpa perlu merombak infrastruktur perangkat keras sensorik yang telah terbukti andal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, perancangan, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian yang telah dilakukan terhadap sistem Smart Stop-Kontak berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 dan platform Blynk Cloud, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan yang menjawab rumusan masalah sebagai berikut:

1. Sistem smart stop-kontak berbasis IoT berhasil dirancang dan dibangun dengan mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 DevKit V1, modul sensor kelistrikan PZEM-004T V3.0, modul Relay 5V dengan sirkuit isolasi optocoupler, serta switching power supply 5V di dalam boks panel. Perangkat keras ini terhubung secara nirkabel melalui Wi-Fi ke server cloud Blynk dan menyajikan dashboard pemantauan parameter kelistrikan (tegangan, arus, daya) serta antarmuka kendali yang responsif pada aplikasi smartphone.
2. Modul sensor PZEM-004T V3.0 terbukti memiliki tingkat akurasi dan kinerja yang sangat baik dalam mengukur parameter kelistrikan setelah diterapkannya metode algoritma multi-stage piecewise calibration pada firmware ESP32. Hasil pengujian kalibrasi terhadap alat ukur standar menunjukkan nilai rata-rata akurasi gabungan mencapai lebih dari 96% (deviasi error di bawah 4%), dengan tingkat akurasi tegangan rata-rata >99%, arus rata-rata >96%, dan daya aktif rata-rata >96%. Hal ini membuktikan bahwa deviasi pembacaan akibat karakteristik non-linear sensor pada beban rendah berhasil diatasi secara perangkat lunak, sehingga unjuk kerja sistem terbukti telah melampaui target akurasi minimal 95% yang ditetapkan pada awal penelitian.
3. Kinerja sistem dalam merespons perintah penghubungan dan pemutusan arus listrik terbukti berjalan secara fungsional, stabil, dan andal. Sistem mampu merespons perintah pensaklaran manual melalui fitur Button Switch pada aplikasi Blynk, mengeksekusi otomasi pemutusan berbasis durasi waktu (Timer), serta memicu pemutusan arus seketika secara otomatis ketika terdeteksi kondisi kelebihan beban (Overload Protection) berdasarkan batas threshold arus yang dikonfigurasi oleh pengguna. Sistem proteksi juga telah dilengkapi dengan mekanisme cooldown notifikasi untuk melindungi pembatasan frekuensi (rate limit) dari server Blynk.

DAFTAR PUSTAKA

- M. A. J. Plaza, Yulina, dan S. Gunanto, "Penerapan Internet of Things pada Stop Kontak Lampu Berbasis Arduino," *Jurnal Sistem dan Teknologi Informasi (JUSTIN)*, vol. 11, no. 2, pp. 198-204, Apr. 2023.
- F. S. Permana, M. N. S. Putro, dan R. Suwartika, "Pemanfaatan Teknologi Cloud Blynk dalam Sistem Kontrolling Stop Kontak Lampu Rumah Berbasis Aplikasi Android," *Jurnal Teknik Informatika*, vol. 9, no. 2, pp. 92-98, 2021.
- Syaifurrahman dan A. Aula, "Sistem Monitoring dan Proteksi pada Stop Kontak Berbasis IoT," *Jurnal Edukasi dan Penelitian Informatika (JEPIN)*, vol. 8, no. 1, pp. 104-111, Apr. 2022.
- S. Suman dan V. Kumar, "Comparative Analysis of ESP32 and ESP8266 for IoT Applications," dalam *International Conference on Smart*

Technologies in Computing and
Communication (SmartTech), 2022,
pp. 45-50.

PT PLN (Persero), SPLN No.1:1978 -
Tegangan-Tegangan Standar. Jakarta:
Perusahaan Listrik Negara, 1978.