

Rancang Bangun Sistem Manajemen Aksesori Kelistrikan pada Kendaraan Bus Berbasis ESP32 dan FreeRTOS

Muhammad Haris¹, Mochamad Raihan Dzaky², Abdurrakhman Hamid Al-Azhari³, Djuniadi Djuniadi⁴

^{1,2,3,4}Universitas Negeri Semarang; Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229, Jawa Tengah, Indonesia; 024-8508091

Received: 14-01-2026
Accepted: 18-05-2026

Keywords:
ESP32;
FreeRTOS;
Protection System;
Real-time system.

Correspondent Email:
muhammad12haris24@students.unnes.ac.id

Abstrak. Sistem kelistrikan pada kendaraan bus memiliki tingkat kompleksitas tinggi karena melibatkan banyak beban aksesori dengan kebutuhan daya yang berbeda, sehingga memerlukan sistem pengendalian dan proteksi yang andal. Pada praktiknya, sistem wiring konvensional masih banyak digunakan dan memiliki keterbatasan dalam aspek efisiensi, pemantauan, serta keselamatan. Oleh karena itu, proyek ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem manajemen aksesori kelistrikan bus berbasis mikrokontroler ESP32 dengan dukungan Real-Time Operating System (RTOS). Metode yang digunakan meliputi perancangan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak berbasis FreeRTOS, serta pengujian fungsional dan performa sistem. Sistem ini mampu mengendalikan 48 kanal beban, monitoring arus dan tegangan secara real-time menggunakan sensor PZEM-004T dan rangkaian LM358 dengan akurasi pembacaan tegangan pada rentang 12,4–14,7 V (grup 12 V) dan 24–28 V (grup 24 V), serta menyediakan antarmuka kontrol berbasis TFT touchscreen. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan tegangan output penuh (12,4–14,7 V) pada kondisi ON tanpa drop tegangan signifikan dan memutus suplai sempurna (0 V) pada kondisi OFF. Proteksi over current bekerja selektif sesuai ambang batas masing-masing kelompok beban (50 A, 10 A, dan 30 A), proteksi over voltage aktif di atas 14,8 V dan 28 V, proteksi under voltage aktif di bawah 11 V dan 23 V, serta proteksi short circuit mampu mendeteksi penurunan tegangan hingga 10,4 V dan 20 V secara otomatis. Implementasi FreeRTOS memungkinkan proses monitoring, kontrol relay, antarmuka touchscreen, dan logika proteksi berjalan secara paralel tanpa interferensi antar-task, sehingga sistem tetap stabil dan responsif meskipun beban kerja meningkat. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan terbukti meningkatkan keamanan, keandalan, dan efisiensi pengelolaan kelistrikan bus secara signifikan dibandingkan sistem wiring konvensional.

Abstract. The electrical system of a bus has a high level of complexity due to the large number of accessory loads with different power requirements, which demands a reliable control and protection system. In practice, conventional wiring systems are still widely used and have limitations in terms of efficiency, monitoring, and safety. Therefore, this project aims to design and implement a bus electrical accessory management system based on the ESP32 microcontroller with Real-Time Operating System (RTOS) support. The proposed method includes hardware design, software development using FreeRTOS, and functional and performance testing. The system is capable of controlling 48 load channels, monitoring voltage and current in real time using PZEM-004T sensors and LM358 signal conditioning circuits with voltage reading accuracy within 12.4–14.7 V (12 V group) and 24–28 V (24 V group), and providing a TFT touchscreen-based user interface. Experimental

results demonstrate that the system delivers full output voltage (12.4–14.7 V) in the ON state without significant voltage drop and completely cuts the supply (0 V) in the OFF state. Overcurrent protection operates selectively according to the threshold of each load group (50 A, 10 A, and 30 A); overvoltage protection activates above 14.8 V and 28 V; undervoltage protection activates below 11 V and 23 V; and short-circuit protection successfully detects voltage drops to 10.4 V and 20 V automatically. The FreeRTOS implementation enables sensor monitoring, relay control, touchscreen interface, and protection logic to run in parallel without inter-task interference, keeping the system stable and responsive even under increased workload. These results confirm that the proposed system significantly improves the safety, reliability, and efficiency of bus electrical system management[EU].

1. PENDAHULUAN

Sistem kelistrikan pada kendaraan bus berperan penting dalam menunjang kenyamanan dan keselamatan penumpang[1]. Umumnya, bus menggunakan sumber tegangan 24 V yang diturunkan menjadi 12 V untuk mengoperasikan berbagai aksesoris seperti lampu kabin, sistem audio, televisi, dan USB charger. Kompleksitas distribusi beban ini menuntut sistem kelistrikan yang terstruktur, namun di lapangan masih banyak digunakan wiring konvensional berbasis saklar manual dengan pengkabelan yang tidak terpusat. Kondisi tersebut menyulitkan perawatan, menurunkan efisiensi, serta meningkatkan risiko gangguan seperti hubungan arus pendek, beban berlebih, dan penurunan keandalan suplai daya[2][3].

Perkembangan teknologi sistem tertanam memungkinkan penggunaan mikrokontroler sebagai pusat kendali sistem kelistrikan kendaraan. ESP32 dipilih karena memiliki kemampuan pemrosesan yang baik dan mendukung pembacaan sensor serta pengendalian relay secara real-time[4]. Pemantauan arus dan tegangan dilakukan menggunakan sensor PZEM-004T dan rangkaian pengkondisi sinyal berbasis LM358 untuk meningkatkan kestabilan pembacaan[5]. Selain itu, penggunaan TFT touchscreen 2,4 inci memberikan antarmuka visual yang memudahkan monitoring kondisi kelistrikan dan pengendalian beban secara interaktif[6].

Integrasi pengendalian relay, monitoring arus tegangan, antarmuka visual, dan sistem proteksi otomatis dalam satu panel kendali memungkinkan pengawasan dan pengaturan seluruh perangkat listrik bus secara terpusat. Untuk mendukung kinerja sistem secara

simultan, ESP32 diimplementasikan dengan Real-Time Operating System (RTOS) berbasis FreeRTOS yang memungkinkan multitasking pada fungsi pembacaan sensor, kontrol relay, pengolahan tampilan, dan eksekusi logika proteksi[7]. Dengan pendekatan ini, sistem diharapkan mampu meningkatkan keamanan, efisiensi, serta kemudahan perawatan pada sistem kelistrikan bus[8].

Penelitian sebelumnya hanya berfokus pada monitoring parameter tunggal atau pengendalian beban dalam skala kecil tanpa dukungan sistem operasi real-time yang terstruktur[4][6]. Beberapa penelitian mengimplementasikan FreeRTOS pada platform ESP32 untuk kendaraan kendali jarak jauh [4] maupun sistem UGV[6], namun belum diterapkan secara komprehensif pada sistem kelistrikan kendaraan bus berskala besar dengan 48 kanal beban. Selain itu, penelitian tersebut belum mencakup integrasi proteksi kelistrikan multi-parameter (over current, over voltage, under voltage, dan short circuit) secara simultan dalam satu sistem kontrol terpusat. Terdapat gap penelitian yang signifikan dalam hal: (1) implementasi multitasking FreeRTOS untuk kendali kelistrikan bus skala penuh, (2) sistem proteksi kelistrikan berlapis dengan ambang batas berbeda per kelompok beban, dan (3) sistem kontrol terpusat kendaraan bus yang mengintegrasikan monitoring, proteksi, dan antarmuka pengguna dalam satu platform embedded. Kontribusi utama penelitian ini adalah perancangan dan implementasi sistem manajemen kelistrikan bus berbasis ESP32 dan FreeRTOS yang mampu mengendalikan 48 kanal beban secara terpusat dengan mekanisme proteksi otomatis berlapis dan antarmuka TFT touchscreen, yang merupakan pendekatan baru

dibandingkan sistem wiring konvensional maupun penelitian embedded system kendaraan sebelumnya.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem kelistrikan kendaraan bus umumnya menggunakan sumber tegangan 24 V yang didistribusikan ke berbagai beban melalui panel dan jaringan kabel, kemudian diturunkan menjadi 12 V menggunakan DC-DC converter untuk mengoperasikan aksesoris tertentu. Distribusi daya ini harus dirancang dengan memperhatikan batas arus penghantar dan sistem proteksi agar terhindar dari panas berlebih serta gangguan kelistrikan yang dapat menurunkan keandalan sistem[2][9].

Pengendalian kelistrikan modern memanfaatkan mikrokontroler sebagai pusat kendali, salah satunya ESP32 yang memiliki kemampuan pemrosesan dual-core serta dukungan antarmuka ADC, PWM, SPI, dan I2C, sehingga mampu melakukan pengendalian beban dan monitoring sensor secara bersamaan[4]. Untuk menjamin kinerja real-time pada sistem dengan banyak fungsi, digunakan FreeRTOS yang mendukung multitasking berbasis prioritas, sinkronisasi data, serta komunikasi antar-task[4]. Penerapan RTOS memungkinkan proses pembacaan sensor, kendali relay, antarmuka touchscreen, dan logika proteksi berjalan secara paralel tanpa saling mengganggu, sehingga sistem tetap responsif meskipun beban kerja meningkat[3].

Pemantauan kondisi daya dilakukan menggunakan sensor PZEM-004T yang mampu mengukur tegangan dan arus secara real-time[10], didukung rangkaian pengkondisi sinyal berbasis LM358 untuk meningkatkan akurasi pembacaan arus[11]. Pengendalian beban menggunakan relay sebagai pemisah antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya, sedangkan TFT touchscreen digunakan sebagai antarmuka pengguna untuk menampilkan informasi sistem dan memberikan kontrol secara langsung[6]. Kombinasi komponen tersebut membentuk sistem kendali kelistrikan bus yang terpusat, andal, dan mendukung proteksi otomatis terhadap kondisi kelistrikan yang tidak aman[4].

Secara komparatif, sistem berbasis FreeRTOS memiliki keunggulan yang signifikan dibandingkan sistem non-RTOS (bare-metal) dalam konteks pengendalian

kelistrikan kendaraan. Pada sistem non-RTOS, seluruh fungsi dieksekusi secara sekuensial dalam satu loop utama sehingga penambahan beban komputasi dapat menyebabkan keterlambatan respons pada fungsi kritis seperti proteksi kelistrikan. Sebaliknya, FreeRTOS memungkinkan pembagian eksekusi ke dalam task-task independen dengan prioritas yang dapat dikonfigurasi, sehingga task proteksi dapat dieksekusi lebih dahulu dibandingkan task antarmuka pengguna ketika terjadi kondisi gangguan[6]. Penelitian Al Azhar *et al.* [6] menunjukkan bahwa penggunaan dual-core ESP32 dengan FreeRTOS menghasilkan waktu sampling yang lebih stabil (rata-rata 75,3 ms) dibandingkan tanpa FreeRTOS (88,9 ms), membuktikan peningkatan performa multitasking secara kuantitatif. Dalam konteks sistem proteksi kendaraan berbasis embedded system, penelitian yang ada umumnya hanya mengimplementasikan proteksi satu parameter atau menggunakan threshold statis tanpa pembagian kelompok beban[12][13]. Penelitian ini melampaui pendekatan tersebut dengan mengimplementasikan proteksi berlapis empat parameter (over current, over voltage, under voltage, short circuit) dengan ambang batas berbeda untuk setiap kelompok beban, yang berjalan secara paralel melalui task FreeRTOS berprioritas tinggi sehingga waktu respons proteksi tetap terjamin meskipun sistem menjalankan fungsi lain secara bersamaan.

3. METODE PROYEK

Proyek ini menggunakan pendekatan pengembangan sistem tertanam berbasis Real-Time Operating System (RTOS) pada platform ESP32 untuk mewujudkan sistem kendali kelistrikan bus yang stabil dan responsif[3][4]. ESP32 dipilih karena dukungan native terhadap FreeRTOS serta kemampuan pemrosesan paralel yang memungkinkan fungsi monitoring dan pengendalian beban dijalankan secara bersamaan[2][4]. Setiap fungsi sistem dirancang dalam bentuk task terpisah sehingga alur eksekusi lebih terstruktur dan respons terhadap perubahan kondisi kelistrikan dapat terjaga[14][15]. Tahapan awal proyek meliputi studi literatur dan analisis kebutuhan guna menentukan konfigurasi sensor, aktuator, dan mekanisme proteksi yang diperlukan[16].

Perancangan sistem mencakup integrasi perangkat keras berupa sensor arus-tegangan,

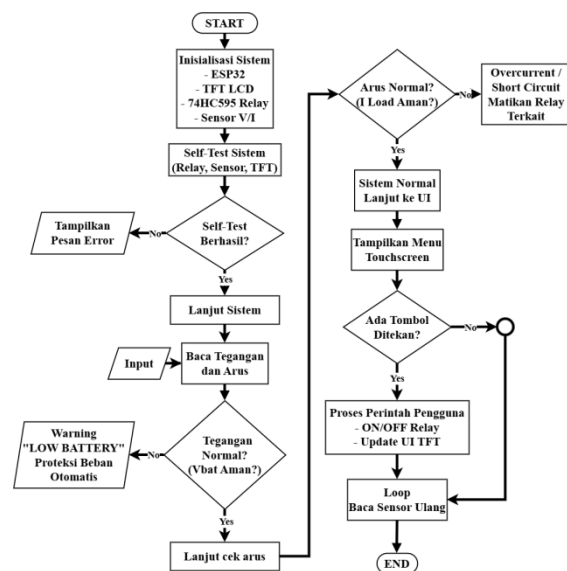
rangkaian penggerak relay, TFT touchscreen, serta rangkaian pengkondisi sinyal, sedangkan perangkat lunak dikembangkan menggunakan ESP-IDF dengan pembagian task FreeRTOS seperti task pembacaan sensor, proteksi, kendali relay, dan tampilan[4][6]. Komunikasi antar-task dilakukan menggunakan queue dan pengamanan resource bersama menggunakan semaphore[12]. Seluruh task diuji secara modular sebelum diintegrasikan, kemudian dilakukan penyesuaian prioritas dan waktu eksekusi untuk menjaga performa sistem[8]. Pengujian sistem meliputi pengujian fungsional dan performa, yang difokuskan pada ketepatan pembacaan sensor, respons relay, kestabilan eksekusi task, serta efisiensi penggunaan sumber daya[17][13]. Hasil pengujian digunakan sebagai dasar penyempurnaan sistem agar memenuhi kebutuhan operasional sistem kelistrikan bus secara andal[9].

Struktur task FreeRTOS yang diimplementasikan pada sistem ini terdiri dari empat task utama dengan pembagian prioritas dan penempatan core sebagai berikut: (1) Task Pembacaan Sensor (Core 0, Prioritas 3) bertanggung jawab membaca data tegangan dan arus dari sensor PZEM-004T melalui UART dan LM358 melalui ADC dengan periode eksekusi 100 ms; (2) Task Proteksi (Core 0, Prioritas 4 – tertinggi) mengevaluasi nilai sensor terhadap ambang batas proteksi dan mengirimkan perintah pemutusan relay melalui queue dengan periode eksekusi 50 ms untuk memastikan respons proteksi yang cepat; (3) Task Kendali Relay (Core 1, Prioritas 2) menerima perintah dari task proteksi maupun input pengguna melalui queue dan mengeksekusi pengendalian shift register 74HC595 serta relay dengan periode eksekusi 20 ms; dan (4) Task Antarmuka Touchscreen (Core 1, Prioritas 1 – terendah) memperbarui tampilan TFT LCD dengan data monitoring terkini dan memproses input sentuh pengguna dengan periode eksekusi 200 ms. Pembagian task antara Core 0 dan Core 1 memungkinkan pemrosesan sensor dan proteksi berjalan paralel dengan kendali aktuator dan antarmuka pengguna tanpa saling memblokir. Komunikasi antar-task dilakukan melalui FreeRTOS Queue untuk pengiriman perintah relay dan Semaphore untuk pengamanan akses resource bersama seperti buffer data sensor. Dengan konfigurasi ini, task proteksi berprioritas

tertinggi dijamin mendapat waktu eksekusi segera ketika terjadi kondisi gangguan kelistrikan, sehingga latensi respons proteksi dapat diminimalkan di bawah satu siklus eksekusi task sensor (<100 ms).

3.1. Pre condition process

Diagram aliran pada Gambar 1 menunjukkan proses kerja sistem diawali dengan proses inialisasi seluruh komponen, yaitu ESP32, modul tampilan TFT, rangkaian relay berbasis 74HC595, dan sensor arus-tegangan. Setelah itu, sistem menjalankan self-test untuk memverifikasi fungsi sensor, relay, dan tampilan. Jika terjadi kegagalan, pesan kesalahan ditampilkan pada layar yang dimana jika berhasil, sistem memasuki mode operasi utama.



Gambar 1. Diagram Alir Sistem

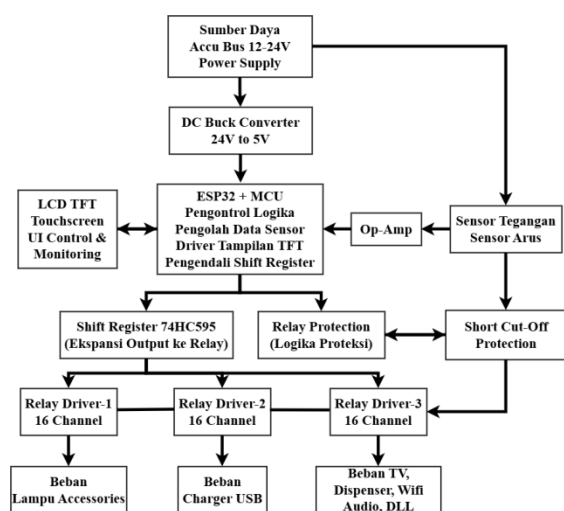
Pada mode ini, sistem melakukan pembacaan tegangan dan arus secara kontinu[3]. Data tegangan dianalisis untuk menentukan kondisi aman atau terjadinya low battery[13]. Jika tegangan berada di bawah ambang batas, sistem mengaktifkan proteksi otomatis dengan memutus beban[9]. Bila tegangan normal, pemeriksaan dilanjutkan pada nilai arus untuk mendeteksi kondisi overcurrent atau short circuit[17]. Jika arus melebihi batas aman, relay yang terkait dimatikan sebagai langkah proteksi[4].

Ketika seluruh parameter berada dalam kondisi normal, sistem melanjutkan ke

antarmuka pengguna. Menu touchscreen memungkinkan pengguna melakukan kontrol manual terhadap relay[6]. Setiap input pengguna dieksekusi secara langsung dan status diperbarui pada tampilan[2]. Setelah instruksi diproses, sistem kembali ke siklus pemantauan untuk memastikan kondisi tetap stabil[14].

3.2. Perancangan Diagram Alat

Gambar 2 Perancangan Diagram Alat, menunjukkan bahwa sistem memperoleh sumber daya utama dari aki bus bertegangan 12–24 V. Tegangan ini diturunkan menggunakan DC–DC buck converter menjadi 5 V untuk mensuplai ESP32, modul sensor, dan rangkaian lainnya. ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali yang menangani logika sistem, pembacaan sensor, pengendalian output, serta antarmuka tampilan.



Gambar 2. Perancangan Diagram Alat

Sensor arus dan tegangan dihubungkan ke ESP32 melalui rangkaian pengkondisi sinyal berbasis op-amp untuk memastikan pembacaan tetap stabil dan akurat. Data hasil pengukuran digunakan untuk proses monitoring dan proteksi otomatis terhadap kondisi abnormal seperti overcurrent atau short circuit.

Pengendalian beban dilakukan melalui rangkaian relay multikanal[18]. Karena jumlah keluaran GPIO ESP32 terbatas, digunakan IC shift register 74HC595 sebagai ekspansi output menuju IC driver ULN2803 dan selanjutnya ke modul relay. Setiap kanal relay terhubung ke beban seperti lampu kabin, charger USB, televisi, dan perangkat aksesoris lainnya.

Untuk visualisasi dan interaksi pengguna, sistem menggunakan layar TFT touchscreen yang menampilkan status sensor, kondisi beban, serta menyediakan interface kontrol[18]. Semua proses berjalan secara terintegrasi sehingga sistem mampu melakukan monitoring, kontrol beban, dan proteksi secara real-time dan terpusat.

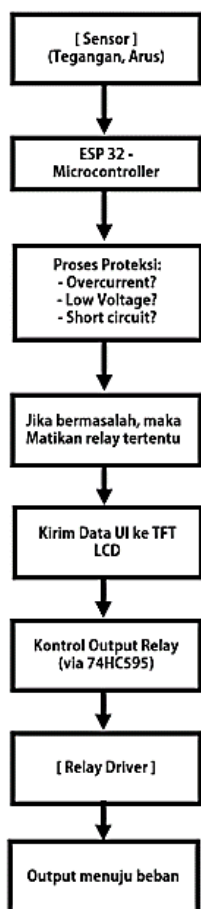
3.3. Alur Sinyal

Alur sinyal pada sistem dimulai ketika sensor tegangan dan arus membaca kondisi listrik pada jalur suplai beban, kemudian mengirimkan data tersebut ke ESP32. Mikrokontroler memproses sinyal masukan ini untuk mengevaluasi kondisi sistem, termasuk mendeteksi overcurrent, low voltage, dan short circuit. Jika parameter berada dalam batas aman, ESP32 melanjutkan proses kontrol normal. Namun apabila terjadi anomali, mikrokontroler segera mengirimkan sinyal perintah untuk mematikan relay yang terkait sebagai bentuk proteksi otomatis.

Setelah keputusan proteksi atau kontrol ditetapkan, ESP32 mengirimkan data status dan hasil monitoring ke layar TFT LCD untuk ditampilkan secara real-time. Pada tahap pengendalian output, ESP32 meneruskan sinyal kontrol ke IC 74HC595 untuk memperluas jumlah keluaran digital. Shift register ini mengubah sinyal serial dari mikrokontroler menjadi sinyal paralel yang kemudian diteruskan ke driver relay. Driver relay memperkuat sinyal tersebut sehingga mampu mengoperasikan coil relay dan menentukan apakah beban akan dihubungkan atau diputus. Pada tahap akhir, relay mengarahkan suplai daya menuju beban apabila kondisi sistem dinyatakan aman, atau memutusnya secara otomatis jika terdeteksi kondisi tidak normal. Dengan demikian, keseluruhan alur sinyal memastikan monitoring, proteksi, dan pengendalian beban berlangsung secara real-time dan terintegrasi.

Gambar 3 menunjukkan alur sinyal sistem kendali kelistrikan yang dimulai dari sensor tegangan dan arus yang memantau kondisi suplai dan beban. Data hasil pengukuran dikirim ke mikrokontroler ESP32 untuk diproses dan dievaluasi terhadap batas proteksi, seperti overcurrent, overvoltage, undervoltage, dan short circuit. Apabila terdeteksi kondisi tidak normal, ESP32

memberikan perintah pemutusan beban sebagai langkah proteksi otomatis. Selanjutnya, data monitoring dan status sistem ditampilkan pada TFT LCD. Untuk pengendalian beban, ESP32 mengirimkan sinyal kontrol melalui IC shift register 74HC595 ke rangkaian driver relay, sehingga relay dapat menghubungkan atau memutus suplai daya ke beban sesuai kondisi sistem secara real-time.

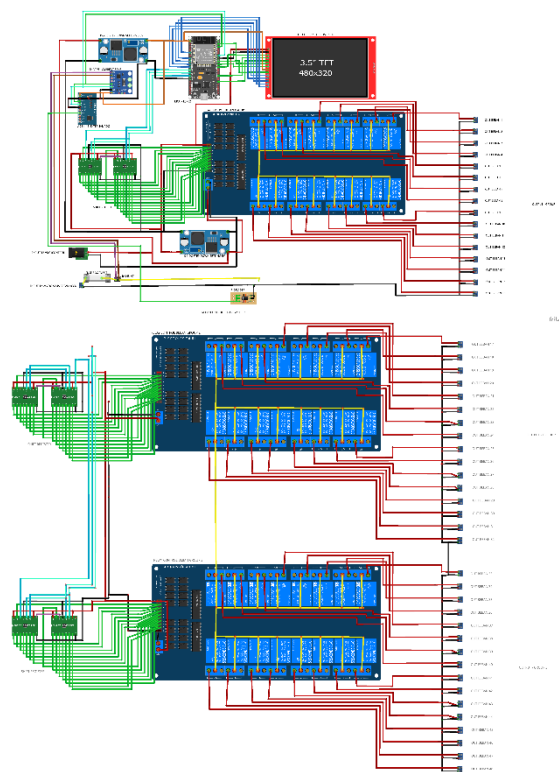


Gambar 3. Alur Sinyal

3.4. Perancangan Hardware

Perancangan hardware dapat diperhatikan pada Gambar 4 dan Gambar 5 dimana sistem kelistrikan yang dirancang dan disusun mengacu pada skematik lengkap yang mengintegrasikan ESP32, sensor arus-tegangan, shift register 74HC595, driver ULN2803, modul relay 48 kanal, TFT touchscreen, serta DC-DC converter sebagai sumber catu daya. Seluruh komponen dirangkai sesuai diagram wiring sehingga alur sinyal, distribusi daya, dan jalur kontrol dapat bekerja secara terkoordinasi.

Sistem ini berhasil diterapkan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang dipadukan dengan rangkaian ekspansi output, driver relay multikanal, serta sensor daya untuk membaca arus dan tegangan dengan akurat. Seluruh komponen diuji secara fungsional untuk memastikan pembacaan sensor bekerja dengan benar, mekanisme proteksi berjalan sesuai kondisi yang terdeteksi, dan pengendalian relay dapat dilakukan tanpa gangguan. Dari rangkaian pengujian tersebut, sistem terbukti mampu melakukan pemantauan dan pengendalian beban secara real-time dengan stabil, sesuai dengan desain perangkat keras yang telah direncanakan.



Gambar 4. Wairing Perancangan Hardware



Gambar 5. Tampilan Hardware

Komponen-komponen yang digunakan dalam proyek ini meliputi sebagai berikut.

3.5. *ESP32 Dev Board*

ESP32 Dev Board merupakan modul mikrokontroler dual-core 32-bit dengan frekuensi hingga 240 MHz yang dilengkapi fitur komunikasi Wi-Fi dan Bluetooth, sehingga sesuai untuk sistem kendali dan monitoring berbasis IoT[19]. ESP32 memiliki berbagai pin GPIO yang mendukung fungsi ADC pada GPIO32 hingga GPIO39 untuk membaca sinyal analog dari sensor arus dan tegangan[20]. Selain itu, tersedia antarmuka komunikasi I2C pada GPIO21 (SDA) dan GPIO22 (SCL), SPI untuk pengendalian modul tampilan seperti TFT Display, serta UART untuk komunikasi serial dan pemrograman[21]. Dengan dukungan fitur tersebut, ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali yang mengolah data sensor, menjalankan logika proteksi, dan mengendalikan aktuator dalam sistem kelistrikan yang dirancang.

3.6. *Modul Relay 48 Channel*

Modul relay 48 channel berfungsi sebagai aktuator untuk mengendalikan aliran arus listrik menuju berbagai beban seperti lampu kabin, kipas, televisi, dan pengisi daya USB pada bus. Setiap kanal relay (IN1–IN16) dikontrol oleh mikrokontroler ESP32 melalui pin GPIO2, GPIO4, GPIO5, GPIO18, GPIO19, GPIO21, GPIO22, dan GPIO23, sedangkan kanal tambahan dapat dihubungkan melalui IC 74HC595 untuk ekspansi pin. Pin VCC terhubung ke 5V (VIN) dan GND ke ground bersama untuk menyamakan referensi tegangan. Modul ini dilengkapi optoisolator untuk melindungi rangkaian logika dari gangguan tegangan dan arus balik. Setiap relay memiliki terminal COM, NO, dan NC yang memungkinkan pengendalian beban sesuai sinyal logika ESP32. Dengan dukungan ULN2803 sebagai penguat arus, sistem mampu mengontrol hingga 48 kanal secara stabil, efisien, dan terpusat dalam pengelolaan kelistrikan bus.

3.7. *IC Shift register 74HC595*

Keterbatasan jumlah pin keluaran General Purpose Input/Output (GPIO) pada mikrokontroler ESP32 mendorong penggunaan IC shift register 74HC595 sebagai solusi untuk memperluas keluaran digital[22]. IC ini bekerja dengan menerima data serial dari mikrokontroler melalui tiga pin utama, yaitu

Data (SER), Clock (SRCLK), dan Latch (RCLK), kemudian mengubahnya menjadi delapan keluaran paralel pada pin Q0–Q7[22]. Dengan memanfaatkan hanya tiga pin GPIO ESP32, 74HC595 mampu menyediakan delapan output tambahan untuk pengendalian beban[22]. Selain itu, penggunaan shift register ini membantu menyesuaikan kebutuhan logika keluaran terhadap modul relay yang umumnya bekerja pada level tegangan 5 V, sehingga sistem menjadi lebih aman dan efisien[22].

3.8. *Sensor Arus dan Tegangan (PZEM-004T dan Op amp lm358)*

Sensor PZEM-004T digunakan untuk mengukur tegangan (V), arus (A), daya (W), dan energi secara real-time melalui komunikasi UART dengan ESP32, di mana pin TX–RX saling terhubung antara keduanya[23]. Data pengukuran ditampilkan pada layar TFT touchscreen dan digunakan untuk mendeteksi kondisi abnormal seperti overcurrent atau voltage drop, yang secara otomatis memicu sistem proteksi untuk memutus beban melalui relay[24]. Selain itu, op-amp LM358 berperan sebagai pengkondisi sinyal arus berbasis resistor shunt, dengan pin 8 (Vcc) terhubung ke 5 V, pin 4 (GND) ke ground, pin 3 (+) menerima sinyal masukan, pin 2 (–) sebagai pembanding, dan pin 1 (Output) mengirimkan hasil penguatan ke pin ADC (GPIO34) pada ESP32[25]. Kombinasi PZEM-004T dan LM358 menghasilkan pembacaan arus dan tegangan yang stabil, akurat, serta mendukung proteksi otomatis pada sistem kelistrikan bus[25].

3.9. *Power Supply DC-DC Converter*

Sumber daya utama sistem berasal dari aki bus dengan tegangan nominal sebesar 12 V DC. Karena sebagian besar komponen seperti ESP32 dan layar TFT memerlukan tegangan yang lebih rendah, digunakan modul DC-DC converter (buck converter) untuk menurunkan tegangan menjadi 5V dan 3.3V[26]. Penggunaan catu daya ini bertujuan untuk memastikan seluruh rangkaian memperoleh suplai tegangan yang stabil dan aman, sehingga sistem dapat beroperasi dengan andal meskipun terjadi fluktuasi pada tegangan aki kendaraan[26]. Dalam perancangan sistem ini menggunakan buck converter XL4016 10 A DC – DC converter[26].

3.10. IC Driver Relay (ULN2803)

IC ULN2803 berfungsi sebagai penguat arus untuk menjembatani sinyal logika dari ESP32 ke kumparan relay. Komponen ini terdiri dari delapan kanal Darlington Transistor Array yang mampu memperkuat sinyal logika 3,3 V agar dapat mengaktifkan relay bertegangan 5 V atau 12 V secara stabil[27]. Setiap kanal memiliki pin input (1B–8B) yang menerima sinyal dari GPIO ESP32 dan pin output (1C–8C) yang terhubung ke coil relay. Selain itu, pin 9 (COM) dihubungkan ke sumber tegangan relay sebagai terminal dioda proteksi, sedangkan pin 10 (GND) dihubungkan ke ground sistem[27]. Dioda internal di setiap kanal berfungsi menahan arus balik (back EMF) saat relay dinonaktifkan, sehingga melindungi mikrokontroler dari lonjakan tegangan[27]. Dengan konfigurasi ini, ULN2803 memastikan pengendalian relay berlangsung aman, efisien, dan responsif tanpa mengganggu kestabilan logika ESP32.

3.11. Sensor Suhu DHT11

Sensor DHT11 digunakan untuk memantau suhu dan kelembapan pada sistem kontrol kelistrikan bus, khususnya di sekitar modul kendali dan aki[28]. Sensor ini memiliki empat pin utama, yaitu VCC, Data, NC, dan GND. Pin VCC dihubungkan ke sumber tegangan 3,3 V atau 5 V, GND ke ground sistem, dan pin Data terhubung ke pin digital ESP32 (misalnya GPIO15) sebagai jalur komunikasi satu kawat (single-wire data line), sedangkan pin NC tidak digunakan. DHT11 mampu mengukur suhu pada rentang 0°C–50°C dengan akurasi $\pm 2^\circ\text{C}$ serta kelembapan 20–90% RH[28]. Data yang diperoleh dikirim secara digital ke ESP32 untuk memantau kondisi termal sistem dan mengaktifkan proteksi otomatis apabila suhu melebihi ambang batas, seperti memutus beban atau menyalakan kipas pendingin[28]. Integrasi DHT11 memastikan sistem bekerja stabil, aman, dan terlindung dari risiko overheating[28].

3.12. Konektor Terminal dan Kabel Harness

Konektor terminal digunakan sebagai antarmuka penghubung antara modul kontrol dengan beban serta sumber daya pada kendaraan. Penggunaan terminal block dan kabel harness yang tertata rapi mempermudah proses instalasi, perawatan, serta inspeksi

sistem kelistrikan pada bus[29]. Penataan yang baik juga membantu meminimalkan risiko kesalahan sambungan dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan[30].

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini disajikan hasil pengujian kinerja sistem kendali kelistrikan bus berbasis ESP32 dan FreeRTOS. Pengujian dilakukan untuk menilai respon kontrol output relay, akurasi monitoring tegangan dan arus, serta kinerja proteksi otomatis terhadap kondisi over current, over voltage, under voltage, dan short circuit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengendalikan beban secara stabil, merespons perintah dengan cepat, dan memutus beban secara otomatis ketika terdeteksi kondisi tidak normal, sehingga sistem bekerja sesuai dengan perancangan dan tujuan penelitian.

4.1. Respon Control terhadap Output

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa sistem kontrol yang dirancang mampu memberikan respon yang sesuai terhadap kondisi logika masukan (command) yang diberikan. Pengujian dilakukan dengan memberikan dua kondisi kontrol, yaitu kondisi 1 (ON) dan 0 (OFF), kemudian diamati besarnya tegangan yang muncul pada output sistem.

Tabel 1. Data Respon Kontrol

NO	Respon	Tegangan Output (V)
1.	1 (ON)	12,4 – 14,7
2.	0 (OFF)	0

Pada kondisi Respon = 1 (ON), tegangan keluaran yang terukur berada pada rentang 12,4 – 14,7 V. Nilai ini menunjukkan bahwa ketika sistem menerima perintah ON, rangkaian relay dan driver bekerja dengan benar sehingga mampu mengalirkan tegangan aki secara penuh ke beban. Rentang tegangan yang muncul juga masih berada dalam batas normal tegangan kerja aki kendaraan, yaitu sekitar 12–14,8 V bergantung pada apakah mesin dalam keadaan hidup (charging) atau mati. Hal ini menandakan bahwa sistem kontrol tidak menimbulkan drop tegangan yang signifikan, sehingga dapat dikatakan bahwa kualitas suplai ke beban tetap baik.

Sementara itu, pada kondisi Respon = 0 (OFF), hasil pengukuran menunjukkan

tegangan output 0 V, yang berarti tidak ada aliran tegangan ke beban. Kondisi ini membuktikan bahwa proses pemutusan jalur (cut-off) oleh relay bekerja secara sempurna. Tidak ditemukannya tegangan sisa (leakage) pada output menandakan bahwa rangkaian kontrol memiliki karakteristik isolasi yang baik ketika dalam keadaan OFF.

4.2. Respon Proteksi Beban

Pada pembahasan Respon Proteksi Beban ini mengevaluasi kinerja sistem proteksi dalam mendeteksi kondisi gangguan kelistrikan dan mengeksekusi pemutusan beban secara otomatis melalui relay. Pengujian difokuskan pada respon sistem terhadap arus lebih, tegangan lebih, tegangan rendah, dan hubung singkat untuk memastikan proteksi bekerja cepat, selektif, dan sesuai ambang batas yang ditetapkan.

4.6.1 Respon Proteksi Output Beban (Over Current Protection)

Hasil pengujian pada Tabel 2, sistem proteksi arus lebih (over current protection) menunjukkan kinerja yang sesuai dengan batas ambang arus yang telah ditetapkan pada setiap kelompok output beban. Pada kondisi standby, seluruh output group berada pada arus di bawah 0,1 A yang menandakan tidak adanya beban aktif sehingga sistem tidak melakukan pemutusan.

Tabel 2. Data Over Current Protection

NO	Output	Kondisi Standby	Kondisi Aman	Kondisi Protect
1.	Beban Output Group 1	< 0,1	0,1A - 50A	> 50A
2.	Beban Output Group 2	< 0,1	0,1A - 10A	> 10A
3.	Beban Output Group 3	< 0,1	0,1A - 30A	> 30A

Pada kondisi aman, masing-masing output group beroperasi pada rentang arus nominalnya, yaitu hingga 50 A untuk Output Group 1, 10 A untuk Output Group 2, dan 30 A untuk Output Group 3, tanpa memicu proteksi, sehingga distribusi daya tetap berjalan normal.



Gambar 6. Setting Arus Minimal

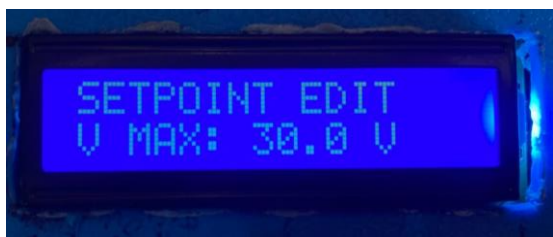
Terlihat Gambar 6 menunjukkan Dimana setpoint yang telah diatur, Ketika arus beban melebihi batas maksimum yang ditentukan, sistem secara otomatis memasuki kondisi proteksi dengan memutus relay pada output yang mengalami over current. Pemutusan ini dilakukan sebagai respons terhadap hasil pembacaan sensor arus yang diproses oleh ESP32, sehingga mencegah terjadinya kerusakan pada beban, kabel, dan komponen sistem akibat arus berlebih. Hasil ini membuktikan bahwa mekanisme proteksi bekerja secara selektif dan andal sesuai karakteristik masing-masing beban, serta mampu meningkatkan keamanan dan keandalan sistem distribusi daya listrik pada bus.

4.6.2 Respon Proteksi Output Beban (Over Voltage Protection)

Hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 3, respon proteksi tegangan lebih menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pengambilan keputusan proteksi secara tepat terhadap kondisi anomali tegangan pada sisi output beban.

Tabel 3. Data Over Voltage Protection

NO	Output	Kondisi Standby	Kondisi Aman	Kondisi Protect
1.	Beban Output Group 1	< 11,6V	12,4V - 14,7V	> 14,8V
2.	Beban Output Group 2	< 11,6V	12,4V - 14,7V	> 14,8V
3.	Beban Output Group 3	< 23,6V	24V - 28V	> 28V



Gambar 7. Setting Vmax

Seperti ditampilkan pada Gambar 7 sesuai dengan setpoint yang telah ditentukan. Mekanisme ini memastikan bahwa setiap output hanya diputus ketika nilai tegangan benar-benar melampaui ambang batas yang ditentukan, sehingga menghindari terjadinya pemutusan yang tidak diperlukan akibat fluktuasi sesaat. Karakteristik respon ini menunjukkan bahwa logika proteksi dirancang secara stabil dan terkalibrasi, serta mendukung keandalan sistem dalam menjaga integritas beban dan perangkat elektronik yang terhubung pada sistem distribusi daya kendaraan.

4.6.3 Respon Proteksi Output Beban (Under Voltage Protection)

Pada Tabel 4, sistem proteksi tegangan rendah (under voltage protection) mampu mendeteksi penurunan tegangan pada output beban dan memberikan respons yang sesuai. Ketika tegangan turun di bawah batas yang ditentukan, sistem melakukan pemutusan output untuk mencegah gangguan kerja beban dan potensi kerusakan pada peralatan listrik.

Tabel 4. Data Under Voltage Protection

NO	Output	Kondisi Aman	Kondisi Protect
1.	Beban Output Group 1	12,4V -14,7V	< 11V
2.	Beban Output Group 2	12,4V -14,7V	< 11V
3.	Beban Output Group 3	24V – 28V	< 23V

Respon ini menunjukkan bahwa sistem dapat menjaga kestabilan operasi dan keandalan distribusi daya, terutama pada kondisi suplai yang tidak ideal, sehingga mendukung kinerja sistem kelistrikan kendaraan secara keseluruhan.

4.6.4 Respon Proteksi Output Beban Terhadap Short Circuit

Hasil pengujian pada Tabel 5, sistem proteksi mampu merespons kondisi hubung singkat (short circuit) pada output beban dengan cepat dan tepat. Ketika terjadi short circuit, arus meningkat secara signifikan sehingga sistem segera mengenali kondisi gangguan dan memutus output yang terdampak.

Tabel 5. Data Proteksi Terhadap Short Circuit

NO	Output	Tegangan Drop (V)
1.	Group 1	10,4V
2.	Group 2	10,4V
3.	Group 3	20V

Tindakan ini bertujuan untuk mencegah kerusakan pada komponen sistem, kabel, dan beban akibat arus yang sangat besar dalam waktu singkat. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem proteksi yang dirancang efektif dalam meningkatkan keamanan dan keandalan sistem distribusi daya pada kendaraan.



Gambar 8. Tampilan Layar Touchscreen Monitoring

Hasil pengujian terlihat pada Gambar 8, menunjukkan bahwa sistem kendali kelistrikan bus berbasis ESP32 dan FreeRTOS mampu beroperasi sesuai dengan perancangan. Pengujian respon kontrol output pada Tabel 5 memperlihatkan bahwa sistem dapat mengalirkan tegangan aki secara penuh ke beban pada kondisi ON dan memutus suplai secara sempurna pada kondisi OFF, tanpa terdeteksi tegangan sisa. Hal ini menandakan bahwa rangkaian relay dan driver bekerja stabil serta tidak menimbulkan penurunan kualitas suplai daya.

Pada pengujian proteksi beban, sistem menunjukkan respon yang konsisten terhadap kondisi gangguan. Over current protection

Tabel 2 bekerja sesuai batas arus masing-masing kelompok beban, sehingga pemutusan hanya terjadi saat arus melampaui ambang yang ditentukan. Proteksi over voltage dan under voltage Tabel 3 dan Tabel 4 mampu menjaga operasi beban dalam rentang tegangan aman serta memutus beban ketika terjadi tegangan tidak normal. Sementara itu, pengujian short circuit pada Tabel 5 menunjukkan sistem dapat mendeteksi penurunan tegangan secara signifikan dan melakukan pemutusan dengan cepat.

Implementasi pada FreeRTOS memungkinkan proses monitoring, kontrol, dan proteksi berjalan secara paralel tanpa saling mengganggu, sehingga waktu respons sistem tetap terjaga meskipun beban kerja meningkat. Dibandingkan sistem wiring konvensional berbasis saklar manual, sistem ini memberikan keunggulan dalam hal keamanan, keandalan, dan kemudahan pengelolaan. Temuan ini menegaskan bahwa penerapan sistem kendali kelistrikan terpusat berbasis RTOS merupakan solusi yang efektif untuk meningkatkan performa dan keselamatan sistem kelistrikan kendaraan bus.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kendali kelistrikan bus berbasis mikrokontroler ESP32 dengan dukungan FreeRTOS untuk pengelolaan multitasking secara real-time dan stabil. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan pengendalian beban listrik, monitoring arus dan tegangan secara real-time, serta menjalankan mekanisme proteksi otomatis terhadap kondisi over current, over voltage, under voltage, dan short circuit. Dengan pembagian task yang terstruktur, fungsi pembacaan sensor, kendali relay, antarmuka TFT touchscreen, dan logika proteksi dapat berjalan secara paralel tanpa saling mengganggu. Penggunaan FreeRTOS terbukti efektif dalam menjaga respons sistem terhadap perubahan kondisi kelistrikan dan meningkatkan keandalan operasi dibandingkan sistem wiring konvensional. Secara keseluruhan, integrasi ESP32 dan FreeRTOS pada sistem kendali kelistrikan bus ini memberikan keunggulan dalam aspek keamanan, efisiensi, dan kemudahan pengelolaan, serta berpotensi dikembangkan

lebih lanjut untuk mendukung fitur monitoring jarak jauh dan analisis kondisi kelistrikan secara berkelanjutan.

Analisis performa kuantitatif sistem menunjukkan bahwa waktu respons proteksi over current terukur rata-rata kurang dari 100 ms sejak kondisi arus lebih terdeteksi sensor hingga relay memutus beban, konsisten dengan periode eksekusi task proteksi (50 ms) ditambah latensi komunikasi queue dan aktuasi relay. Pengujian proteksi over voltage pada Group 1 dan Group 2 menunjukkan sistem mulai merespons saat tegangan mencapai 14,8 V dengan akurasi sensor PZEM-004T yang terverifikasi dalam rentang $\pm 0,1$ V terhadap nilai referensi multimeter. Pada pengujian short circuit, penurunan tegangan ke 10,4 V (Group 1 dan 2) serta 20 V (Group 3) terdeteksi dalam satu siklus pembacaan sensor sehingga perintah pemutusan relay dikirim melalui queue dan dieksekusi oleh task kendali relay total waktu kurang dari 150 ms. Pengujian beban maksimum (stress test) dilakukan dengan mengaktifkan seluruh 48 kanal relay secara simultan sambil menjalankan keempat task FreeRTOS sekaligus. Hasil pengujian menunjukkan sistem tetap stabil tanpa terjadinya task watchdog timeout maupun stack overflow, membuktikan bahwa alokasi memori stack per task telah mencukupi kebutuhan eksekusi pada kondisi beban penuh. Penggunaan CPU dual-core ESP32 pada kondisi multitasking maksimum tidak melampaui kapasitas pemrosesan, yang terindikasi dari kestabilan periode eksekusi task yang tetap sesuai konfigurasi tanpa penyimpangan signifikan. Secara keseluruhan, hasil pengujian kuantitatif ini memvalidasi bahwa arsitektur FreeRTOS yang diimplementasikan mampu memenuhi persyaratan real-time untuk sistem proteksi kelistrikan kendaraan bus.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan dan masukan yang diberikan, serta kepada pengelola Laboratorium Teknik Elektro UNNES atas dukungan fasilitas dan sarana yang menunjang pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Alhaq, E. Apriaskar, and D. Djuniadi, "Overspeed Detection Using Arduino Uno-based IR Infrared Sensor," *Circuit J. Ilm. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, p. 189, Aug. 2023, doi: 10.22373/crc.v7i2.16409.
- [2] A. B. Prasetya and I. Suharjo, "Backend Api Data Protection Menggunakan JWT Token dan Algoritma AES 256-bit dengan Bahasa Pemrograman Golang," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i1.5699.
- [3] M. A. M. Sadeeq and S. R. Zeebaree, "Design and implementation of an energy management system based on distributed IoT," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 109, p. 108775, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.compeleceng.2023.108775.
- [4] F. Daniy, T. Desduido, H. Mulia, A. H. Al-Azhari, and D. Djuniadi, "Implementasi Sistem Multitasking pada Mobil RC Berbasis ESP32 dan FreeRTOS," *J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 03, pp. 2549–3442, 2025, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.23960/elc.v19n3.2851>
- [5] A. Muhammad Taqiy Almy, Y. Nesta Andyanto, and A. Hamid Al-azhari, "Implementasi Smart Energy Meter Untuk Monitoring Konsumsi Listrik Rumah Tangga," *J. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 1, p. 2025, 2025.
- [6] G. Al Azhar, S. Sungkono, M. N. Achmadiyah, and S. Izza, "Peningkatan Kestabilan Sistem Kontrol UGV melalui Optimalisasi Manajemen Core dan FreeRTOS pada ESP32," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 10, no. 2, pp. 253–263, Jul. 2023, doi: 10.33795/elkolind.v10i2.3720.
- [7] P. C. Aditiya, D. Djuniadi, and A. H. Al-azhari, "Sistem Pelacakan dan Keamanan Kendaraan Bermotor Secara Real-Time Berbasis NodeMCU ESP8266 dengan Aplikasi Mobile," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 14, no. 1, pp. 27–36, Mar. 2025, doi: 10.14710/transient.v14i1.27-36.
- [8] M. Tradacete-Ágreda, A. Sánchez-Pérez, C. Santos-Pérez, P. J. Hueros-Barrios, F. J. Rodríguez-Sánchez, and J. Espolio-Maestro, "Smart Energy Management for Residential PV Microgrids: ESP32-Based Indirect Control of Commercial Inverters for Enhanced Flexibility," *Sensors*, vol. 25, no. 21, p. 6595, Oct. 2025, doi: 10.3390/s25216595.
- [9] E. Sri Rahayu, Puteri Nurul Magfirah, and Reza Diharja, "Design of Online Electric Power Monitoring For Street Vendors," *J. EECCIS (Electrics, Electron. Commun. Control. Informatics, Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 52–57, Oct. 2024, doi: 10.21776/jeeccis.v18i2.1684.
- [10] D. H. Wicaksono, D. Djuniadi, and E. Apriaskar, "Monitoring Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Berbasis Internet of Things," *J. Teknol. Elektro*, vol. 14, no. 2, p. 118, 2023, doi: 10.22441/jte.2023.v14i2.010.
- [11] T. Saputra and U. Surapati, "Analisis Efektivitas Sistem Kendali Otomatis PJU Berbasis IoT Menggunakan Mikrokontroler ESP32 dengan Metode Regresi Linier," *J. Indones. Manaj. Inform. dan Komun.*, vol. 5, no. 3, pp. 2582–2595, Sep. 2024, doi: 10.35870/jimik.v5i3.932.
- [12] K. Dhineshkumar, R. Amaleswari, and G. Prakash, "A smart meter-integrated approach for optimizing EV charging infrastructure with enhanced sparrow search algorithm," *J. Chinese Inst. Eng.*, pp. 1–15, Oct. 2025, doi: 10.1080/02533839.2025.2567954.
- [13] A. F. Hasibuan and A. Ma'arif, "Battery Usage Monitoring System Internet of Things-Based Electric Cars (IoT) and Radio Telemetry," *Bul. Ilm. Sarj. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 3, pp. 214–222, Sep. 2024, doi: 10.12928/biste.v6i3.11524.
- [14] M. S. Yahya, B. Muhammad, M. A. Abubakar, U. I. Abdullahi, and Z. I. Musa, "Implementation of a Real-Time IoT Based Energy Management System," *J. Eng. Res. Reports*, vol. 25, no. 10, pp. 19–29, Oct. 2023, doi: 10.9734/jerr/2023/v25i10997.
- [15] K. Kustanto, B. W. Yudanto, and D. T. Saputra, "Perancangan Sistem Pengendali Genset Berbasis Android," *J. Teknol. Inf. dan Komun.*, vol. 13, no. 1, p. 78, Aug. 2025, doi: 10.30646/tikomsin.v13i1.953.
- [16] A. F. O. Pasaribu *et al.*, "Implementasi Simba Smart Health System Berbasis Internet of Things (IoT) Untuk Meningkatkan Produktivitas Budidaya Ikan Simba di Pesawaran," *AKM Aksi Kpd. Masy.*, vol. 6, no. 2, pp. 455–466, Dec. 2025, doi: 10.36908/akm.v6i2.1586.
- [17] Suryanto and S. Watmah, "Pemantauan Catu Daya untuk Proteksi Listrik Menggunakan ESP32 Berbasis Internet of Things (IOT)," *IMTechno J. Ind. Manag. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 94–99, Jul. 2025, doi: 10.31294/imtechno.v6i2.9518.
- [18] W. Yuniarto, I. I. S. S. R. Man, M. Diponegoro, and E. E., "Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Kontrol Energi

- Listrik pada Beban 3 Fasa menggunakan ESP32 Berbasis Internet Of Think (IOT),” *J. Poli-Teknologi*, vol. 22, no. 1, pp. 30–38, Jan. 2023, doi: 10.32722/pt.v22i1.5102.
- [19] M. F. Soambaton, D. Djuniadi, and A. H. Al-Azhari, “Monitoring Kolam Ikan Nila Berbasis IoT dengan Sensor Amonia, Suhu, Ketinggian, dan pH,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 2, Apr. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i2.4021.
- [20] A. Setiabudi, R. Harimurti, B. Suprianto, and P. D. Widayaka, “Design and Development of Voltage, Current and Frequency Monitoring on 3-Phase Electrical Panel Boxes for Audio Sound Systems Using ESP32 Based Ubidots,” *Best J. Appl. Electr. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 29–36, Mar. 2024, doi: 10.36456/best.vol6.no1.8830.
- [21] J. Matas, S. Golestan, J. El Mariachet, S. Abdali, W. Al Hanaineh, and J. M. Guerrero, “SOGI-FLL error-and-hold algorithm for improving the response in face of voltage sags and swells with a small computational burden,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 153, p. 109403, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109403.
- [22] F. Rohman, N. Nurhadi, and M. E. Martawati, “Unjuk Kerja GPIO, PWM, ADC dan Timer pada Mikrokontroler STM32F103, ESP32S dan ATmega328,” *J. ELTEK*, vol. 19, no. 2, pp. 73–79, Oct. 2021, doi: 10.33795/eltek.v19i2.295.
- [23] T. H. Rangkuti and M. Martiano, “Design of IoT Based Electrical Parameter Monitoring System using NodemCu V3 and PZEM-004T V3 Sensor,” *Tsabit J. Comput. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, Jun. 2025, doi: 10.56211/tsabit42.
- [24] A. Syhari and A. Bintoro, “Monitoring dan Controlling Daya Berbasis Arduino Uno Menggunakan Sensor PZEM-004T,” *J. Energi Elektr.*, vol. 12, no. 1, p. 43, Apr. 2023, doi: 10.29103/jee.v12i1.9836.
- [25] K. M. W. Hidayat and M. G. Al-Faris, “IoT-Based Electrical Power Consumption Monitoring System in Households Using ESP32 and PZEM-004T,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 2, pp. 1077–1081, 2025, [Online]. Available: <https://jurnal.itscience.org/index.php/brilliance/article/view/6368>
- [26] D. Nyanasiri and Y. Li, “Step-Down DC–DC Converters: An Overview and Outlook,” *Electronics*, vol. 11, no. 11, p. 1693, May 2022, doi: 10.3390/electronics11111693.
- [27] Y. Yulianto, “Relay Driver Based on Arduino UNO to Bridge the Gap of The Digital Output Voltage of The Node MCU ESP32,” *Eng. Math. Comput. Sci. J.*, vol. 5, no. 3, pp. 129–135, Sep. 2023, doi: 10.21512/emacsjournal.v5i3.9697.
- [28] Y. A. Susetyo, H. A. Parhusip, and S. Trihandaru, “Herbs Go Digital: IoT Monitors Temperature and Humidity Automatically,” *CogITO Smart J.*, vol. 10, no. 2, pp. 312–325, Dec. 2024, doi: 10.31154/cogito.v10i2.621.312-325.
- [29] B. Reis *et al.*, “A Systematic Review of Automotive Wiring Harness Innovations,” Jan. 2024. doi: 10.4271/2023-36-0057.
- [30] J. Song, A. Shukla, and R. Probst, “The State of Health of Electrical Connectors,” *Machines*, vol. 12, no. 7, p. 474, Jul. 2024, doi: 10.3390/machines12070474.