

PERANCANGAN ALAT DETEKTOR KEGAGALAN FASA UNTUK PROTEKSI BEBAN TIGA FASA MENGGUNAKAN ESP32 BERBASIS IOT**Rafif Nasywaan Ahnaf¹, Ibrohim², Subuh Isnur Haryudo³, Pradini Puspitaningayu⁴**

S1 Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

rafifnasywaan.22025@mhs.unesa.ac.id, ibrohim@unesa.ac.id, subuhisnur@unesa.ac.id,
pradinip@unesa.ac.id**Abstract (English)**

This research aims to produce a phase failure detector for three-phase load protection using an IoT-based ESP32 as a solution to overcome the risk of damage to electrical equipment caused by the loss of one phase in a three-phase power system. The research applies a Research and Development (R&D) method covering needs analysis, system design, prototyping, testing, and performance evaluation. Testing was carried out under normal conditions and under conditions of failure of one or more phases. Results show that the system detects phase failure quickly and accurately; when a phase failure occurs, the ESP32 activates a relay and, more importantly, pushes real-time data and notifications through an Android application so that an operator can monitor the load remotely and act before damage occurs. The developed device is therefore feasible as a monitoring-and-early-warning tool for three-phase load protection and can serve as a reference for further IoT-based electrical protection and monitoring systems.

Article History

Submitted: 7 Juni 2026

Accepted: 10 Juli 2026

Published: 11 Juli 2026

Key Words

Phase failure, three-phase load protection, ESP32, Internet of Things (IoT), voltage sensor.

Abstrak (Indonesia)

Penelitian ini bertujuan menghasilkan alat detektor kegagalan fasa untuk proteksi beban tiga fasa menggunakan ESP32 berbasis Internet of Things (IoT) sebagai solusi untuk mengatasi risiko kerusakan peralatan listrik akibat kehilangan salah satu fasa pada sistem tenaga tiga fasa. Penelitian menggunakan metode Research and Development (R&D) yang meliputi tahap analisis kebutuhan, perancangan sistem, pembuatan prototipe, pengujian, dan evaluasi kinerja alat. Pengujian dilakukan pada kondisi normal dan kondisi kegagalan salah satu maupun lebih fasa. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu mendeteksi kegagalan fasa secara cepat dan akurat; ketika terjadi kegagalan fasa, ESP32 mengaktifkan relai sekaligus mengirimkan data dan notifikasi secara real-time melalui aplikasi Android sehingga operator dapat memantau dari jarak jauh dan segera bertindak. Alat yang dikembangkan layak digunakan sebagai sistem monitoring dan peringatan dini proteksi beban tiga fasa serta dapat menjadi acuan pengembangan sistem proteksi dan monitoring kelistrikan berbasis IoT pada penelitian selanjutnya.

Sejarah Artikel

Submitted: 7 Juni 2026

Accepted: 10 Juli 2026

Published: 11 Juli 2026

Kata Kunci

kegagalan fasa, proteksi beban tiga fasa, ESP32, Internet of Things (IoT), sensor tegangan.

Pendahuluan

Energi listrik merupakan sumber tenaga yang sangat dibutuhkan manusia saat ini, sehingga stabilitas penyaluran daya menjadi hal yang penting untuk dijaga. Pada sistem distribusi tiga fasa, ketidakseimbangan beban antar fasa (R, S, dan T) dapat memicu mengalirnya arus netral ke transformator distribusi dan, pada kondisi yang lebih buruk, menyebabkan hilangnya salah satu fasa (Zhang, Mo, & Wu, 2021). Tanpa sistem proteksi, kegagalan fasa berpotensi menimbulkan rugi-rugi daya, panas berlebih pada peralatan, penurunan umur pakai transformator, hingga kerusakan permanen pada motor listrik tiga fasa yang menjadi beban (Dawood, Hasaneen, & Mahmoud, 2024).

Berbagai penelitian telah merintis sistem monitoring dan proteksi kelistrikan tiga fasa berbasis IoT. Sucita dan Suprihartini (2021) merancang sistem monitoring fasa dan daya menggunakan sensor PZEM-004T dan modul Wemos D1 Mini yang mengirimkan data ke platform ThingSpeak dan divisualisasikan melalui aplikasi Android, namun sistem tersebut terbatas pada fungsi monitoring dan belum menyediakan mekanisme peringatan dini berbasis ambang batas yang dapat dikonfigurasi. Nugroho (2024) mengembangkan sistem monitoring dan proteksi motor induksi tiga fasa berbasis NodeMCU ESP8266 dengan notifikasi otomatis saat tegangan turun di bawah 200 V, dengan galat pengukuran rata-rata 0,86%–1,55%, tetapi fokus penelitian tersebut lebih pada aspek proteksi undervoltage dibandingkan deteksi kehilangan fasa secara menyeluruh. Pratama, Amrita, dan Khrisne (2021) mengembangkan monitoring listrik tiga fasa berbasis Wireless Sensor Network menggunakan LoRa untuk transmisi data jarak jauh, namun tanpa fitur notifikasi kegagalan fasa secara langsung ke pengguna.

Kebaruan yang ditawarkan pada penelitian ini terletak pada integrasi mikrokontroler ESP32 dan tiga unit sensor PZEM-004T yang membaca parameter tegangan, arus, dan daya pada tiap fasa secara independen, dipadukan dengan aplikasi Android yang tidak hanya menampilkan data secara real-time tetapi juga menyediakan halaman konfigurasi ambang batas (threshold) overvoltage, undervoltage, dan arus maksimum yang dapat diubah pengguna kapan saja tanpa perlu memprogram ulang firmware ESP32. Dengan demikian sistem yang dihasilkan berfungsi sebagai perangkat monitoring preventif yang adaptif terhadap kebutuhan operator di lapangan.

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana menghubungkan ESP32 dengan sensor PZEM-004T agar bekerja dengan baik, bagaimana alur kerja perangkat dalam mendeteksi kegagalan fasa dan memberikan notifikasi melalui aplikasi Android, serta bagaimana efisiensi kerja perangkat tersebut. Tujuan penelitian ini adalah merancang dan menguji kinerja alat detektor kegagalan fasa berbasis ESP32 dan IoT untuk proteksi beban tiga fasa, meliputi akurasi pembacaan sensor, kecepatan deteksi gangguan, dan keandalan pengiriman notifikasi kepada pengguna.

Metode Penelitian

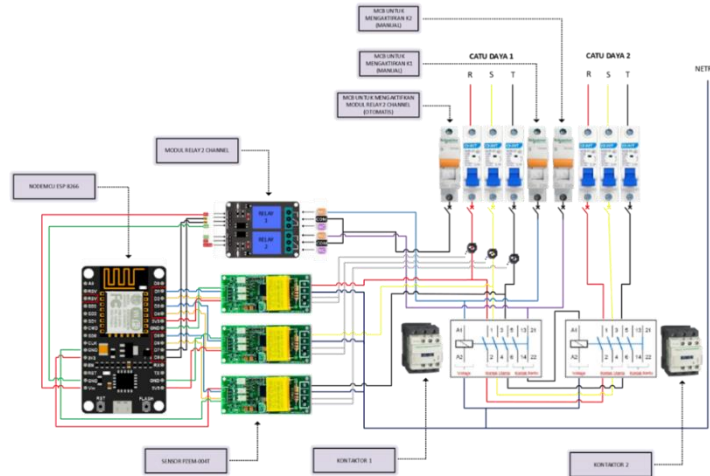
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif melalui tahapan Research and Development (R&D): analisis kebutuhan (analyze), perancangan sistem (design), pengembangan (development), implementasi (implement), dan evaluasi (evaluation). Penelitian dilaksanakan di Gedung A7.02.03 Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya selama tiga bulan, dari April hingga Juni 2026.

Analisis Kebutuhan

Kebutuhan perangkat keras meliputi ESP32, tiga unit sensor PZEM-004T, modul relai 2 channel, catu daya 5 VDC, kontaktor, serta unit beban berupa lampu, stop kontak, dan motor listrik tiga fasa. Kebutuhan perangkat lunak meliputi Arduino IDE untuk pemrograman mikrokontroler, Circuit Designer untuk skema pengawatan, dan Android Studio untuk pengembangan aplikasi monitoring.

Perancangan Sistem

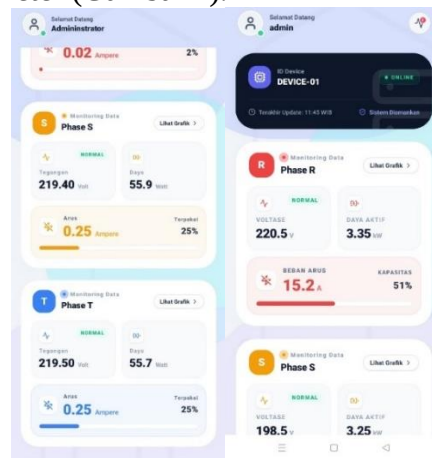
Perancangan perangkat keras terdiri atas desain mekanik (tata letak sensor dan modul pada papan 40 cm × 30 cm) dan desain elektronik yang menghubungkan tiga sensor PZEM-004T pada tiap jalur fasa (R, S, T) dengan ESP32 dan modul relai. Perancangan perangkat lunak mengikuti alur pada Gambar 1: ESP32 membaca data dari ketiga sensor, memeriksa kondisi drop tegangan dan overload, kemudian mengatur status relai serta mengirimkan data ke aplikasi Android melalui koneksi Wi-Fi



Gambar 1. Perancangan Hardware Sistem (Sumber: Hasil karya penulis, 2025)

Pengembangan dan Implementasi

Pengembangan perangkat keras meliputi perakitan rangkaian catu daya dan rangkaian kontrol yang menghubungkan ESP32 dengan sensor PZEM-004T dan modul relai. Pengembangan perangkat lunak meliputi penulisan program pada Arduino IDE menggunakan bahasa C++ untuk akuisisi data sensor dan pengiriman data melalui protokol HTTP POST ke server, serta pengembangan aplikasi Android yang menampilkan dashboard, grafik historis per fasa, dan menu pengaturan ambang batas parameter (Gambar 2).



Gambar 2. Dashboard Monitoring pada Aplikasi Android (Sumber: hasil karya penulis)

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menghitung galat (error) pengukuran sensor PZEM-004T terhadap alat ukur referensi (multimeter dan tang ampere) menggunakan Persamaan (1):

$$error (\%) = \left| \frac{nilai_{perkiraan} - nilai_{aktual}}{nilai_{aktual}} \right| \times 100\%$$

Pengujian kinerja sistem dilakukan melalui dua jenis uji: uji fungsionalitas (pengujian sensor, modul relai, dan pembacaan data pada dashboard) serta uji kinerja (kepekaan, kecepatan

deteksi, dan efektivitas notifikasi) pada kondisi beban normal, beban tidak seimbang, kegagalan fasa, dan beban motor induksi tiga fasa.

Hasil dan Pembahasan

Implementasi Sistem

Prototipe berhasil direalisasikan dengan ESP32 sebagai unit kendali utama yang terhubung ke tiga sensor PZEM-004T untuk memantau tegangan, arus, dan daya pada fasa R, S, dan T secara independen. Spesifikasi sistem ditunjukkan pada Tabel 1.

Table 1. Spesifikasi Sistem

No	Nama	Jumlah	Fungsi
1	ESP32	1	Microcontroller
2	Sensor arus PZEM	3	Akuisisi data arus dan tegangan tiap Fasa
3	LCD Display 16x2	1	Menampilkan informasi tegangan dan arus fasa
4	Terminal Block Screw x4	2	Terminal input dan output fasa

Validasi Akurasi Sensor

Perbandingan hasil pengukuran sensor PZEM-004T terhadap alat ukur referensi ditunjukkan pada Tabel 2. Galat rata-rata pengukuran tegangan sebesar 0,27% dan galat rata-rata pengukuran arus sebesar 0,43%, sehingga sensor dapat dikategorikan layak digunakan untuk aplikasi monitoring dan proteksi kelistrikan tiga fasa.

Table 1. Perbandingan Hasil Pengukuran Sensor PZEM-004T terhadap Alat Ukur Referensi

Parameter	No.	Sensor PZEM-004T	Alat Referensi	Error (%)
Tegangan (V)	1–5	220,0 (rata-rata)	221,8 (rata-rata)	0,27
Arus (A)	1–5	1,38 (rata-rata)	1,39 (rata-rata)	0,43

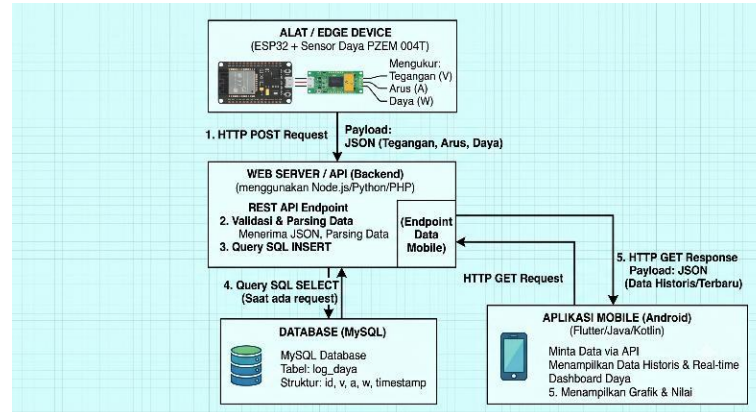
Deteksi Kondisi Abnormal dan Kegagalan Fasa

Pengujian pada kondisi beban normal (lampu dan stop kontak) menunjukkan sistem mampu membaca tegangan berkisar 201–206 V secara stabil pada ketiga fasa. Pada simulasi tegangan tidak stabil, sistem berhasil mengidentifikasi kondisi undervoltage ketika tegangan turun hingga 198 V, di bawah ambang batas 200 V yang dikonfigurasi pada aplikasi, dan langsung mengubah status menjadi "Tegangan Tidak Stabil". Pada simulasi kegagalan fasa dengan memutus salah satu jalur, tegangan pada fasa yang terputus turun menjadi 0 V dan sistem segera menampilkan status "DROP" pada dashboard, sementara fasa yang masih bertegangan tetap berstatus "NORMAL", menunjukkan bahwa deteksi dilakukan secara independen per fasa.

Pengujian pada beban motor induksi tiga fasa menghasilkan rata-rata daya keluaran 67,3 W dengan arus yang lebih fluktuatif dibandingkan beban resistif, sesuai karakteristik beban induktif. Ketika salah satu fasa disimulasikan hilang, arus pada fasa yang tersisa meningkat secara signifikan, sejalan dengan karakteristik motor tiga fasa yang berisiko mengalami overheating apabila kondisi tersebut dibiarkan berlangsung lama (Dawood et al., 2024). Sistem berhasil mengklasifikasikan kondisi ini sebagai anomali secara konsisten.

Keandalan Sistem Notifikasi

Alur komunikasi data pada sistem ditunjukkan pada Gambar 3: ESP32 mengirimkan data pengukuran dalam format JSON melalui HTTP POST ke server backend, data disimpan dalam basis data MySQL, kemudian aplikasi Android mengambil data terbaru melalui HTTP GET untuk ditampilkan pada dashboard dan grafik historis.



Gambar 3. Diagram Alur Komunikasi Sistem (Sumber: hasil karya penulis)

Pengujian keandalan notifikasi menunjukkan bahwa setiap kejadian tegangan tidak stabil maupun arus berlebih berhasil memicu notifikasi pada aplikasi Android secara konsisten. Karena sistem belum dilengkapi mekanisme pemutusan beban otomatis, keandalan notifikasi menjadi faktor kritis: keterlambatan respons operator terhadap notifikasi meningkatkan risiko kerusakan peralatan akibat kegagalan fasa yang berkepanjangan (Matthews, Patel, Summers, Reno, & Hossain-McKenzie, 2021). Dibandingkan dengan sistem proteksi berbasis relai konvensional, pendekatan berbasis notifikasi IoT pada penelitian ini menawarkan keunggulan pada aspek monitoring jarak jauh dan skalabilitas, meskipun belum memberikan proteksi langsung terhadap beban seperti pada sistem relai pengaman fasa otomatis (Siregar & Ikhsan, 2025; Indrianto, Hartono, Kustori, Hariyadi, & Suhanto, 2023).

Kesimpulan

Integrasi ESP32 dengan tiga unit sensor PZEM-004T berhasil membaca parameter tegangan dan arus pada tiap fasa dengan galat rata-rata 0,27% untuk tegangan dan 0,43% untuk arus, sehingga layak digunakan dalam sistem monitoring dan proteksi kelistrikan tiga fasa. Aplikasi Android yang dikembangkan mampu menampilkan data secara real-time dan mengirimkan notifikasi peringatan dini secara andal, baik pada kondisi tegangan tidak stabil (undervoltage/overvoltage) maupun kegagalan salah satu fasa, yang ditandai dengan status "DROP" pada dashboard. Pada pengujian beban motor tiga fasa, sistem terbukti mampu mendeteksi kehilangan fasa secara cepat sebelum berkembang menjadi kondisi overheating pada motor. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dapat menjadi acuan pengembangan proteksi dan monitoring kelistrikan berbasis IoT selanjutnya, khususnya dengan menambahkan mekanisme pemutusan beban otomatis dan penyimpanan data lokal agar keandalan sistem tidak bergantung sepenuhnya pada konektivitas jaringan.

Referensi

- Burhan, A. Q., & Islami, S. (2024). Implementation of the Internet of Things using Blynk platform for smart home. *Journal of Industrial Automation and Electrical Engineering*, 1(2), 114–119.
- Dawood, A., Hasaneen, B., & Mahmoud, A. (2024). Detection and classification of phase failure faults for a three-phase induction motor using algorithm based on rules derived from simulation of these faults. *Journal Repository*, 2110–2121.
- Indrianto, R., Hartono, H., Kustori, K., Hariyadi, S., & Suhanto, S. (2023). Sistem proteksi dan monitoring keseimbangan beban tiga fasa pada jaringan distribusi tegangan rendah berbasis IoT.
- Kryvonos, O., Kuzmenko, Ye., & Kryvonos, M. (2025). Specialized applied software Fritzing and its use for simulation of electronic devices based on Arduino platform.
- Matthews, R. C., Patel, T. R., Summers, A. K., Reno, M. J., & Hossain-McKenzie, S. (2021). Per-phase and 3-phase optimal coordination of directional overcurrent relays using genetic algorithm. *Energies*, 14(6), 1699.
- Nugroho, H. S. (2024). Monitoring dan proteksi motor induksi 3 fasa berbasis IoT. *Jurnal ELKON: Teknik Elektro dan Komputer*.
- Pratama, A., Amrita, A. A. N., & Khrisne, D. C. (2021). Rancang bangun sistem monitoring listrik tiga fasa berbasis wireless sensor network menggunakan LoRa Ra-02 SX1278. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro (MITE)*, 20(2).
- Singasatia, D., Minarto, & Sunandar, M. A. (2025). Sistem monitoring parameter listrik tiga fasa berbasis IoT dengan data logger untuk meningkatkan efisiensi energi. *Jurnal Teknologika*, 15(1).
- Siregar, R. S., & Ikhsan, M. (2025). Implementasi Internet of Things (IoT) untuk monitoring dan pengaman beban listrik 3 phase menggunakan fuzzy sugeno. *Jurnal Algoritma*, 22(1).
- Sucita, L. I., & Suprihartini, Y. (2021). Rancang bangun sistem monitoring fasa dan daya berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan smartphone. *Airman: Jurnal Teknik dan Keselamatan Transportasi*.
- Tsebesebe, T., Mpofo, K., Sivarasu, S., & Mthunzi-Kufa, P. (2025). Arduino-based devices in healthcare and environmental monitoring.
- Zhang, Z., Mo, M., & Wu, C. (2021). Three-phase distribution transformer connections modeling based on matrix operation method by phase-coordinates. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Article 66.