

Optimalisasi Energi dan Proteksi Sistem Listrik Tiga Fasa Berbasis IoT

Energy Optimization and Protection of 3-Phase Electrical Systems Based on IoT

Faruq Ratuahaji*
Teknik Listrik dan Instalasi
Akademi Komunitas Industri Manufaktur Bantaeng
Bantaeng, Indonesia
faruqratuahaji@gmail.com

Mantasia
Pendidikan Teknik Elektronika
Universitas Negeri Makassar
Makassar, Indonesia
mantasia@unm.ac.id

Diterima : April 2025
Disetujui : Juli 2025
Dipublikasi : Juli 2025

Abstrak— Sistem kelistrikan tiga fasa memiliki keunggulan dalam efisiensi dan kestabilan daya, namun rentan terhadap gangguan tegangan seperti *overvoltage* dan *undervoltage*. *Overvoltage* adalah kondisi saat tegangan melebihi ambang batas atas, sedangkan *undervoltage* terjadi saat tegangan turun di bawah batas minimal. Kedua kondisi ini dapat menyebabkan penurunan efisiensi, kerusakan peralatan, dan gangguan operasional. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem proteksi yang adaptif dan mampu mendeteksi kondisi abnormal secara *real-time*. Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring dan proteksi kelistrikan tiga fasa berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem menggunakan sensor PZEM-004T untuk membaca tegangan dan arus pada masing-masing fasa, dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pengolah data dan pengendali proteksi. Informasi dikirim ke antarmuka pengguna berbasis web melalui jaringan Wi-Fi. Pengguna dapat memantau kondisi sistem secara daring melalui website monitoring yang menampilkan parameter tegangan, arus secara *real time*, serta notifikasi gangguan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki akurasi pembacaan tegangan dan arus yang sangat baik dengan masing-masing nilai rata-rata *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) 0,35% dan 0,45%, dan waktu respon otomatis pemutusan beban ketika terjadi gangguan dalam rentang 5 hingga 6 detik, disertai dengan pengiriman informasi kondisi abnormal secara *real-time* melalui antarmuka berbasis web. Dengan demikian sistem ini layak diterapkan pada instalasi rumah tangga dan industri ringan. Selain meningkatkan efisiensi energi dan keandalan sistem kelistrikan, sistem ini juga mendorong pemanfaatan teknologi IoT dalam kelistrikan modern. Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk mengembangkan sistem dengan deteksi arus hubung singkat, analisis harmonisa, serta integrasi ke jaringan listrik pintar (*smart grid*).

Kata Kunci—Sistem Kelistrikan tiga Fasa; Proteksi Tegangan; Efisiensi Energi; *Internet of Things* (IoT).

Abstract Three-phase electrical systems have advantages in efficiency and power stability but are susceptible to voltage disturbances such as *overvoltage* and *undervoltage*. *Overvoltage* is a condition where the voltage exceeds the upper threshold, while *undervoltage* occurs when the voltage drops below the minimum limit. Both of these conditions can lead to decreased efficiency, equipment damage, and operational disruptions. Therefore, an

adaptive protection system capable of detecting abnormal conditions in real-time is needed. This research develops a three-phase electrical monitoring and protection system based on the Internet of Things (IoT). The system uses a PZEM-004T sensor to read the voltage and current on each phase, with the ESP32 microcontroller as the data processor and protection controller. Information is sent to the web-based user interface via a Wi-Fi network. Users can monitor system conditions online through a monitoring website that displays voltage and current parameters in real-time, as well as fault notifications. The test results indicate that the system accurately measures voltage and current, with average errors of just 0.35% and 0.45%, and it can automatically reduce power load within 5 to 6 seconds when there is a problem, while also sending real-time alerts about any issues through a web-based interface. Thus, this system is suitable for application in household and light industrial installations. Besides improving energy efficiency and the reliability of the electrical system, this system also promotes the utilization of IoT technology in modern electricity. Further research is recommended to develop a system with short-circuit current detection, harmonic analysis, and integration into a smart grid.

Keywords— *Three Phase Electrical System; Voltage Protection; Energy Efficiency; Internet of Things (IoT).*

I. PENDAHULUAN

Dengan pertumbuhan industri dan populasi yang terus meningkat, kebutuhan akan energi listrik mengalami peningkatan yang signifikan. Kondisi ini menuntut sistem tenaga listrik untuk menjadi lebih efisien, andal, dan adaptif dalam pengelolaan energi, serta mampu merespons perubahan beban secara dinamis. Salah satu solusi yang banyak digunakan dalam penyediaan energi listrik, khususnya untuk beban besar, adalah sistem kelistrikan tiga fasa. Sistem ini dinilai lebih ekonomis dan efisien dibandingkan sistem satu fasa maupun dua fasa, terutama dalam aplikasi industri pada penggunaan motor listrik yang memerlukan torsi tinggi dan kestabilan operasi [1] [2]. Namun, sistem tiga fasa memiliki kerentanan terhadap gangguan tegangan yang dapat mempengaruhi kestabilan dan keamanan operasionalnya. Gangguan yang umum terjadi adalah *overvoltage*, yaitu kondisi ketika tegangan sistem melebihi batas maksimum

yang diizinkan, dan *undervoltage* adalah kondisi ketika tegangan berada di bawah ambang batas minimum [3]. Berdasarkan standar nasional yang digunakan PT PLN (Persero), yaitu SPLN 1:1995 tentang batas toleransi tegangan yang diperbolehkan. Tegangan yang melebihi +5% dari tegangan normal dikategorikan sebagai *overvoltage*, sedangkan tegangan yang berada di bawah -10% dari tegangan normal disebut *undervoltage*. Kedua kondisi ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti fluktuasi beban, gangguan pada jaringan distribusi, atau kesalahan sistem, dan dapat berakibat pada penurunan efisiensi, kerusakan peralatan listrik, hingga terhentinya proses produksi.

Untuk menjaga keandalan sistem pada saat pendistribusian energi listrik, kualitas daya listrik dan ketidakseimbangan beban yang digunakan oleh konsumen menjadi hal yang perlu diperhatikan agar tidak terjadi kegagalan sistem yang diakibatkan ketidakseimbangan beban tiap fasa (Fasa R, Fasa S, dan Fasa T) [4]. Selain itu, teknisi sering kali hanya menyadari adanya gangguan pada salah satu fasa tanpa dapat mengidentifikasi secara cepat dan tepat fasa mana yang mengalami gangguan. Keterbatasan sistem monitoring konvensional yang tidak mampu memberikan informasi secara *real-time*, serta tidak dilengkapi dengan fitur proteksi otomatis, menyebabkan keterlambatan dalam pengambilan keputusan dan penanganan gangguan. Oleh karena itu, sistem monitoring dan proteksi berbasis otomatisasi diharapkan dapat memberikan perlindungan terhadap peralatan listrik, mengurangi risiko kerusakan, serta mencegah kejadian yang tidak diinginkan seperti kebakaran akibat gangguan kelistrikan.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) saat ini memberikan kemudahan dan manfaat yang sangat besar dalam upaya peningkatan kinerja sistem tenaga listrik, khususnya melalui kemampuan pemantauan dan proteksi otomatis terintegrasi [5]. IoT merupakan jaringan perangkat fisik yang saling terhubung dan dapat berkomunikasi melalui internet untuk mengirimkan, menerima dan menganalisis data secara *real time* [6] [7]. Dalam konteks sistem tenaga, IoT mendukung konsep *smart grid*, yaitu sistem kelistrikan yang cerdas, efisien, dan responsif terhadap kondisi operasional secara *real-time*. Sehingga dengan penerapan monitoring listrik tiga fasa berbasis *Internet of Things (IoT)* dapat digunakan sebagai proteksi yang bekerja secara responsif dan *realtime* mengirimkan notifikasi kepada operator apabila terjadi gangguan agar mencegah kerusakan peralatan dan mengamankan keandalan sistem [8]. Selain itu, optimalisasi energi dan proteksi sistem listrik berbasis IoT sejalan dengan konsep *smart grid* yang bertujuan untuk mengintegrasikan teknologi informasi dengan infrastruktur yang ada pada sistem tenaga listrik [9]. Hal ini memungkinkan terciptanya jaringan listrik yang lebih efisien, berkelanjutan, dan adaptif terhadap perubahan lingkungan, dan juga saat ini merupakan tren industri yang semakin mengarah pada digitalisasi dan otomatisasi.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem monitoring berbasis IoT [10] [11] [12] [13]. Namun, pada umumnya belum mengintegrasikan fungsi proteksi otomatis terhadap gangguan tegangan berdasarkan standar SPLN 1:1995. Selain itu, evaluasi kuantitatif terhadap akurasi pembacaan sensor, waktu respons proteksi, dan keterlambatan pengiriman notifikasi (*delay*) juga belum banyak dikaji secara mendalam.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan dan proteksi kelistrikan tiga fasa berbasis IoT yang mampu:

1. Mendeteksi parameter tegangan dan arus secara *real-time*
2. Mengidentifikasi gangguan *overvoltage* dan *undervoltage* berdasarkan standar SPLN 1:1995,
3. Melakukan pemutusan beban secara otomatis sebagai tindakan proteksi, dan
4. Mengirimkan notifikasi kepada operator dalam waktu yang singkat saat terjadi gangguan.

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah integrasi monitoring *real-time* dan proteksi otomatis berbasis IoT yang didukung dengan pengujian kuantitatif terhadap akurasi pengukuran dan performa sistem. Sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi aplikatif untuk meningkatkan efisiensi energi dan keandalan sistem kelistrikan tiga fasa baik di sektor rumah tangga maupun industri ringan.

II. METODE

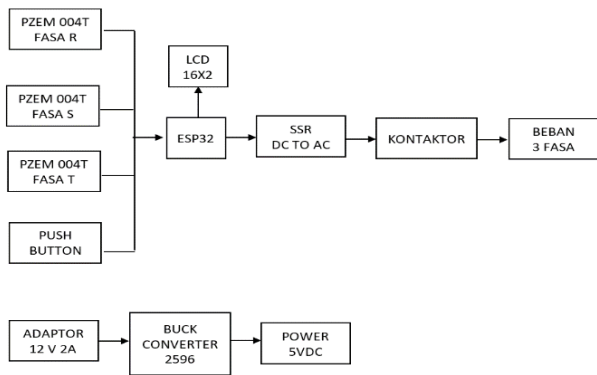
Penelitian ini menggunakan pendekatan Research and Development (R&D), yaitu metode penelitian yang bertujuan untuk menghasilkan inovasi dalam bentuk produk dan menguji keefektifannya [14] [15] [16]. Produk yang dikembangkan pada penelitian ini adalah sistem monitoring dan proteksi kelistrikan tiga fasa berbasis *Internet of Things* (IoT) yang kemudian akan dievaluasi performa dan efektivitasnya. Pendekatan R&D dipilih karena berorientasi pada pengembangan solusi nyata yang divalidasi melalui serangkaian proses pengujian secara iteratif. Proses tersebut meliputi perencanaan, pengembangan, validasi, serta revisi [17]. Kelebihan metode R&D adalah fleksibilitas dalam tahapan iteratif desain dan pengujian, namun kekurangannya memerlukan waktu dan sumber daya yang lebih besar untuk mencapai validitas sistem yang optimal [15]. Penelitian ini dilaksanakan dalam empat tahapan utama yang dapat dilihat pada tabel 1.

TABEL 1. TAHAPAN PENELITIAN

No.	Tahapan Penelitian	Kegiatan
1.	Perancangan	Menyusun diagram blok, pemilihan komponen, desain sistem berbasis IoT
2.	Pengembangan	Perakitan alat, pemrograman sensor dan mikrokontroler, integrasi IoT
3.	Pengujian	Evaluasi fungsional sistem, pengujian sensor, validasi akurasi, uji proteksi
4.	Analisis dan Evaluasi	Analisis data pengujian, perbandingan dengan standar, penilaian performa sistem

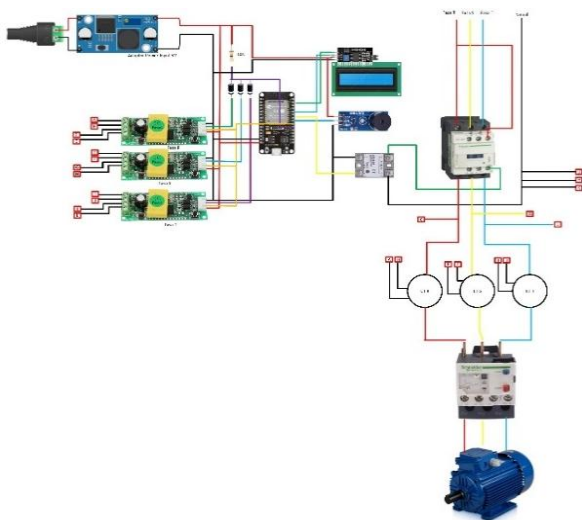
Perancangan Sistem Optimalisasi Energi dan proteksi sistem kelistrikan tiga fasa

Perancangan sistem monitoring dan proteksi pada penelitian ini dilakukan dalam dua tahap, yaitu perancangan blok diagram dan implementasi dalam bentuk wiring diagram. Gambar 1 memperlihatkan blok diagram sistem yang merepresentasikan hubungan fungsional antar komponen utama.



Gambar 1. Blok diagram sistem

Perancangan alat pada penelitian ini menggunakan media sensor sebagai komponen utama untuk mendeteksi parameter listrik. Sensor merupakan perangkat keras yang dirancang untuk menerima input dari lingkungan sekitarnya sesuai dengan tujuan spesifik penggunaannya [18]. Input yang diterima oleh sensor kemudian dikonversi menjadi sinyal digital yang dapat dibaca dan diolah oleh mikrokontroler. Sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1, parameter kelistrikan berupa tegangan dan arus pada masing-masing fasa (R, S, dan T) dibaca menggunakan sensor PZEM-004T [19]. Data dari hasil pengukuran sensor ini dikirimkan ke *Mikrokontroler* ESP32, yang bertindak sebagai unit pengolah utama. ESP32 menganalisis data tersebut berdasarkan batas ambang tegangan sesuai standar SPLN 1:1995, yaitu *overvoltage* di atas 231 V dan *undervoltage* di bawah 198 V untuk sistem tegangan nominal 220 V. Apabila terjadi penyimpangan dari nilai ambang batas tersebut, ESP32 akan mengirimkan sinyal kendali ke Solid State Relay (SSR) untuk memutus kontaktor tiga fasa, sehingga arus ke beban akan dihentikan secara otomatis. Sistem ini juga menampilkan status tegangan dan arus melalui LCD 16x2, serta mengirimkan notifikasi kondisi abnormal secara real-time ke platform web. Sistem ini didukung oleh adaptor 12V 2A sebagai sumber daya utama, yang kemudian diturunkan menggunakan DC-DC *buck converter* (LM2596) menjadi 5V DC untuk mendukung operasi *mikrokontroler* dan sensor.



Gambar 2. Wiring diagram sistem

Gambar 2 menunjukkan wiring diagram dalam bentuk hubungan antar komponen. Terlihat bahwa setiap sensor PZEM-004T dihubungkan ke saluran masing-masing fasa dan ke ESP32 melalui komunikasi serial. Komponen *push button* disediakan sebagai kontrol manual untuk mereset sistem

setelah gangguan diatasi. SSR dihubungkan antara ESP32 dan kontaktor sebagai pengendali sirkuit daya utama. Kontaktor tiga fasa terhubung langsung ke beban.

Pengujian Sistem Optimalisasi Energi dan proteksi sistem kelistrikan tiga fasa

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi perangkat sistem monitoring dan proteksi tiga fasa berbasis IoT, baik dari sisi fungsi maupun akurasi sensor. Pengujian dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan jenis beban resistif, sebagaimana terlampir pada tabel 2.

TABEL 2. BEBAN PENGUJIAN SISTEM

No.	Beban	Jumlah	Daya (Watt)	Total Daya (Watt)
1.	Lampu LED	3	40	120
		1	20	20
2.	Lampu Pijar	2	15	30
		1	5	5
3.	Solder	1	200	200
Jumlah Daya (Watt)				375

Setiap beban diuji secara terpisah maupun digabung, untuk menciptakan variasi beban pada masing-masing fasa. Selain itu, digunakan regulator AC satu fasa (sejenis dimmer) untuk mensimulasikan kondisi *overvoltage* dan *undervoltage* dengan cara mengatur besar kecilnya tegangan secara bertahap. Dengan kombinasi ini, sistem dapat diuji dalam berbagai skenario ketidakseimbangan tegangan dan beban.

Pengujian dilakukan dalam beberapa skenario, sebagai berikut:

1. Tegangan normal: semua fasa berada dalam rentang toleransi SPLN 1:1995 (198–231 V).
2. *Undervoltage*: salah satu fasa diturunkan di bawah 198 V menggunakan regulator.
3. *Overvoltage*: salah satu fasa dinaikkan di atas 242 V menggunakan regulator.



Gambar 3. Pengujian sistem dengan beban



Gambar 4. Pengujian Sistem dengan Regulator AC Satu Fasa

Masing-masing skenario diuji sebanyak tiga hingga lima kali pengulangan untuk memastikan konsistensi respons sistem. Adapun parameter yang diukur dalam pengujian ini meliputi:

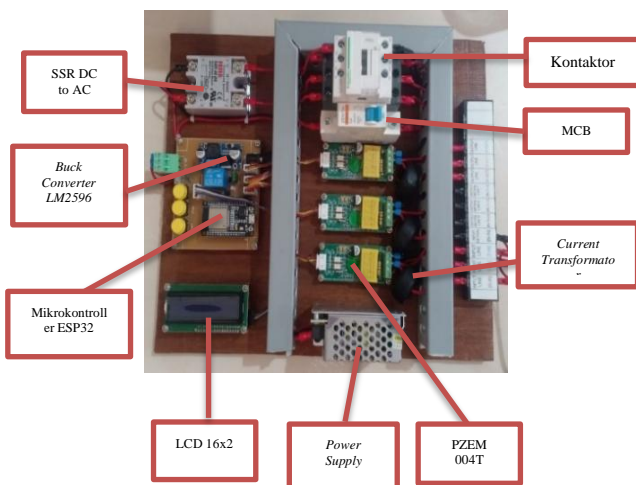
- Akurasi pembacaan tegangan dan arus dari sensor PZEM-004T dibandingkan dengan multimeter digital *Nepto NT-9250A* sebagai alat ukur pembandingan.
- pengujian performa sistem proteksi dilakukan pengukuran terhadap waktu tunda (*delay time*) antara deteksi gangguan tegangan oleh sensor dan aksi pemutusan beban oleh kontaktor dengan menggunakan *stopwatch digital*. Pencatatan waktu dimulai saat tegangan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem Optimalisasi Energi dan Proteksi Sistem Listrik tiga Fasa Berbasis IoT

1. Implementasi Perangkat keras

Pemilihan komponen perangkat keras pada penelitian ini merupakan salah satu tahap krusial yang menentukan keberhasilan sistem secara keseluruhan. Komponen utama yang diimplementasikan meliputi: PZEM 004T, Mikrokontroler ESP32, LCD 16x2, SSR DC to AC, Kontaktor, MCB, Current Transformator (CT) Buck Converter LM2596, dan Power Supply, seperti yang terlihat pada gambar 5.



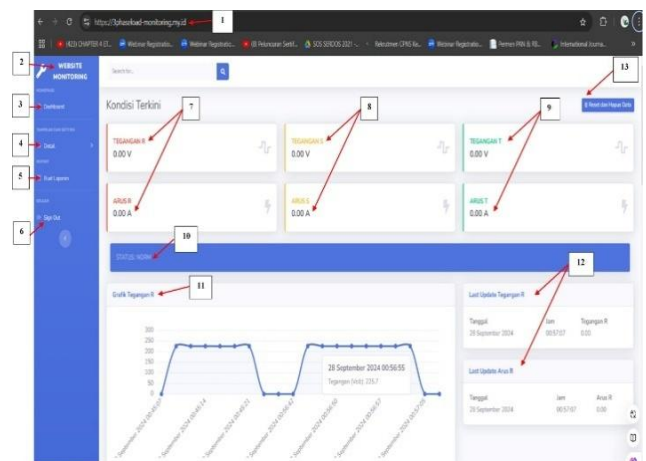
Gambar 5. Implementasi Perangkat Keras Rangkaian

2. Implementasi Perangkat Lunak dan Antarmuka Pengguna (UI)

Implementasi perangkat lunak dalam sistem ini memberikan manfaat langsung dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi serta melindungi peralatan listrik dari kerusakan akibat gangguan tegangan. Monitoring sistem dilakukan secara *online* yang dirancang *responsif* untuk menampilkan data secara *real time*, sehingga pengguna dapat mengakses data kondisi kelistrikan kapan saja dan dari mana saja.

Antarmuka pengguna (*user interface*) berperan sebagai penghubung antara sistem teknis dan pengguna dalam teknologi *Internet of Things* (IoT), sehingga data dan informasi teknis dapat dibaca dan diinterpretasikan dengan mudah oleh pengguna[20]. Pada penelitian ini, antarmuka dikembangkan dalam bentuk website, yang dapat diakses melalui alamat: <https://3phasesload-monitoring.my.id>. Data dikirim dari mikrokontroler ESP32 ke server menggunakan koneksi Wi-Fi dan

ditampilkan secara dinamis dalam bentuk teks numerik dan grafik interaktif. Tampilan antarmuka menyajikan informasi tegangan dan arus dari masing-masing fasa (R, S, dan T), status sistem (Normal, UV-V, atau OV-V), serta indikator visual berbasis warna untuk membedakan tampilan pada tiap fasa. Selain fungsi monitoring, antarmuka ini memungkinkan pengguna untuk mengawasi pola konsumsi beban secara *real-time*, yang selanjutnya dapat digunakan sebagai dasar dalam mengatur pengoperasian beban guna mendukung optimalisasi konsumsi energi. Untuk meningkatkan aspek keamanan, sistem antarmuka juga dilengkapi dengan notifikasi peringatan otomatis yang akan dikirimkan secara langsung apabila terdeteksi gangguan tegangan. Notifikasi ini ditampilkan secara visual pada laman antarmuka untuk memudahkan pengambilan keputusan cepat oleh pengguna. Pada gambar 6 menunjukkan tampilan halaman utama dari website monitoring sistem listrik tiga fasa yang telah diimplementasikan dalam penelitian ini.



Gambar 6. Laman Utama Website Monitoring Sistem Listrik tiga Fasa

Keterangan gambar 6:

- Alamat *website* monitoring sistem listrik tiga fasa
- Judul utama dari *platform*
- Halaman utama
- Menu untuk mengakses informasi lebih lanjut
- Fitur buat laporan
- Tombol *sign out* atau keluar
- Pembacaan tegangan dan arus Fasa R
- Pembacaan tegangan dan arus Fasa S
- Pembacaan tegangan dan arus Fasa T
- Indikasi Status Kondisi Sistem listrik (*Norm, OV-V, dan UN-V*)
- Grafik tegangan masing-masing Fasa
- Informasi waktu update
- Tombol reset dan hapus data

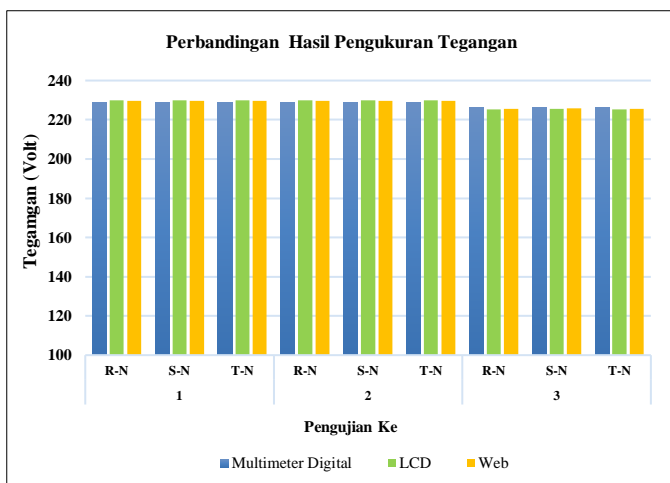
B. Hasil Pengujian Sistem Optimalisasi Energi dan Proteksi Sistem Listrik Tiga Fasa Berbasis IoT

1. Hasil Pengujian Sensor dan Akurasi Pembacaan

Pengujian dilakukan untuk membandingkan hasil pembacaan sensor PZEM-004T, terhadap alat ukur multimeter digital *Nepto NT-9250A*. Hasil perbandingan pengukuran tegangan disajikan pada tabel 3 dan gambar 7.

TABEL 3. PERBANDINGAN HASIL PENGUKURAN TEGANGAN

Pengujian Ke	Fasa	Tegangan (Volt)			% Error
		Multimeter Digital	LCD	Web	
1	R-N	228,9	229,9	229,6	0,31 %
	S-N	228,7	230	229,6	0,39 %
	T-N	228,8	230	229,6	0,35 %
2	R-N	228,8	230	229,6	0,35 %
	S-N	228,7	229,9	229,6	0,39 %
	T-N	228,9	230	229,7	0,35 %
3	R-N	226,3	225,3	225,5	0,35 %
	S-N	226,4	225,5	225,7	0,31 %
	T-N	226,3	225,4	225,6	0,31 %

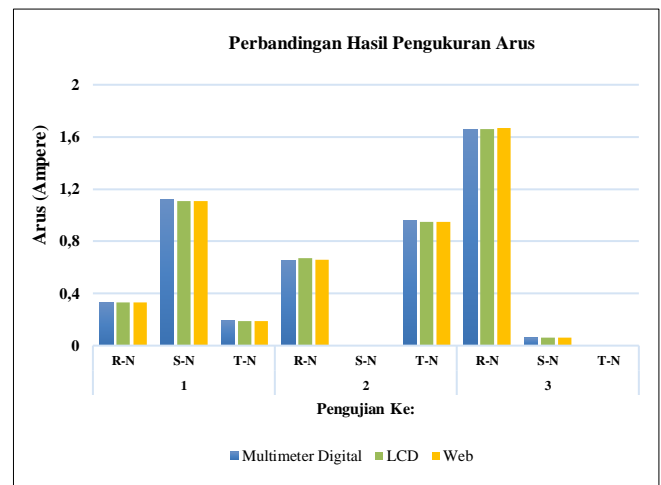


Gambar 7. Grafik Perbandingan Pengukuran

Sedangkan hasil perbandingan pengukuran arus disajikan pada tabel 3 dan gambar 8.

TABEL 4. PERBANDINGAN HASIL PENGUKURAN ARUS

Pengujian Ke	Fasa	Arus (Ampere)			% Error
		Multimeter Digital	LCD	Web	
1	R-N	0,33	0,33	0,33	0,00 %
	S-N	1,12	1,11	1,11	0,89 %
	T-N	0,19	0,19	0,19	0,00 %
2	R-N	0,65	0,67	0,66	1,54 %
	S-N	0	0	0	0,00 %
	T-N	0,96	0,95	0,95	1,04 %
3	R-N	1,66	1,66	1,67	0,60 %
	S-N	0,06	0,06	0,06	0,00 %
	T-N	0	0	0	0,00 %



Gambar 8. Grafik Perbandingan Hasil Pengukuran Arus

Untuk mengevaluasi akurasi pembacaan sensor PZEM-004T terhadap arus dan tegangan, dilakukan perbandingan dengan alat ukur standar berupa multimeter digital. Data arus dan tegangan diambil dari ketiga fasa (R, S, dan T) dengan variasi beban yang berbeda. Akurasi dihitung menggunakan metode *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)*, yang merupakan metode statistik untuk mengukur persentase tingkat kesalahan penyimpangan antara nilai aktual (hasil pengukuran multimeter) dan nilai prediksi (hasil pembacaan sensor PZEM-004T). Semakin kecil nilai *MAPE* yang diperoleh maka nilai prediksi yang dipakai semakin akurat, begitupula sebaliknya. Nilai *MAPE* dihitung dengan persamaan[21]:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - P_i}{A_i} \right| \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

A_i = Nilai aktual (pengukuran dari multimeter digital)
 P_i = Nilai pembacaan sensor (PZEM-004T)
 n = Jumlah data pengujian

Setelah dihitung, rata-rata nilai *MAPE* dari untuk pengujian pembacaan Tegangan adalah 0,35% dan pembacaan arus adalah 0,45%. Hal ini menunjukkan bahwa sensor PZEM 004T memiliki tingkat akurasi yang sangat baik untuk kebutuhan monitoring tegangan secara *real-time*.

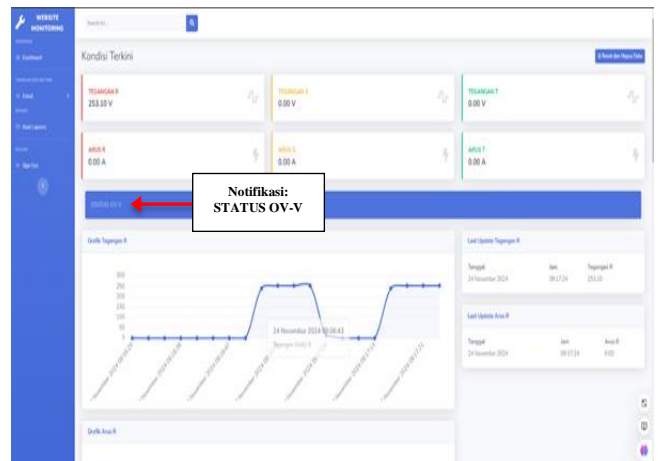
2. Hasil Pengujian Sistem Proteksi

• Pengujian *Under Voltage*

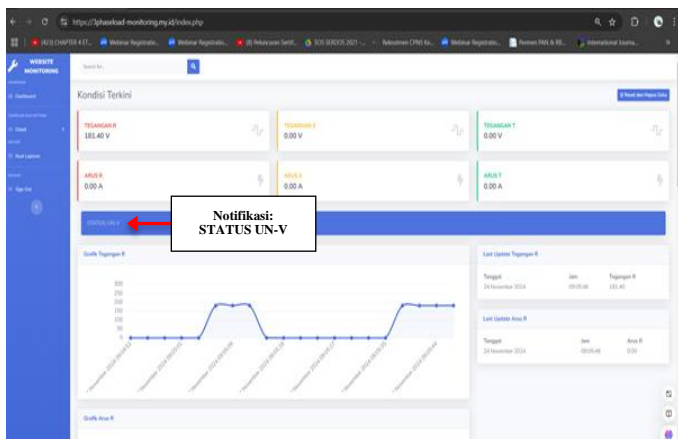
Pengujian bertujuan untuk memastikan bahwa sistem proteksi dapat mendeteksi dan merespon kondisi tegangan rendah dengan cepat dan tepat. Pengujian dilakukan dengan menurunkan tegangan secara bertahap di bawah 198 Volt. Jika tegangan berada dibawah batas normal, maka sistem mendeteksi adanya gangguan dan mengubah status "Normal" pada website menjadi "UV-V" (*Undervoltage*) serta memutus aliran listrik ke beban dengan delay waktu rata-rata sistem untuk memutus beban 5 hingga 6 detik. Hasil pengujian *undervoltage* dapat dilihat pada tabel 5.

TABEL 5. DATA PENGUJIAN UNDERVOLTAGE

Regulator AC	Tegangan Output (Volt)		Status	Jeda Waktu Memutus
	LCD	Website		
220	221,7	221,6	Normal	-
200	201	200,9	Normal	-
180	182	181,4	UN-V	5 detik
160	161	161,3	UN-V	6 detik
140	142	141,8	UN-V	6 detik



Gambar 10. Data terkirim dari hasil pengujian proteksi *Overvoltage*



Gambar 9. Data terkirim dari hasil pengujian proteksi *Undervoltage*

• *Pengujian Over Voltage*

Uji *Over Voltage* bertujuan untuk memastikan bahwa sistem proteksi dapat mendeteksi dan merespon kondisi tegangan berlebih secara cepat dan tepat. Pengujian dilakukan dengan tegangan dinaikkan bertahap di atas 231 Volt. Jika tegangan berada diatas batas aman, maka sistem mendeteksi gangguan *overvoltage* dan status “Normal” pada website berubah menjadi “OV-V” serta memutus aliran listrik dengan delay rata-rata 6 detik. Hasil pengujian *overvoltage* dapat dilihat pada tabel 6.

TABEL 6. PENGUJIAN OVERVOLTAGE

Regulator AC	Tegangan Output (Volt)		Status	Jeda Waktu Memutus
	LCD	Website		
220	222	222,9	Normal	-
230	232	231,8	OV-V	6 detik
240	243	243	OV-V	6 detik
250	253	253,3	OV-V	6 detik
260	262,6	262,3	OV-V	6 detik

Dibandingkan dengan sistem proteksi konvensional seperti MCB atau relay proteksi, sistem berbasis IoT yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki keunggulan, diantaranya sistem ini tidak hanya mampu mendeteksi *overvoltage* dan *undervoltage* secara otomatis, tetapi juga memberikan notifikasi *real-time* kepada pengguna melalui web monitoring. Selain itu, sistem mencatat data historis dan menampilkan grafik tegangan serta arus tiap fasa secara *real-time*, yang tidak tersedia pada sistem konvensional. Dengan nilai rata-rata *MAPE*, 0,35% dan *delay* proteksi 5 hingga 6 detik, sistem ini lebih responsif, informatif, dan sesuai dengan kebutuhan monitoring dan proteksi modern yang berbasis digital.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian, sistem monitoring dan proteksi kelistrikan tiga fasa berbasis IoT berhasil membaca parameter tegangan dan arus secara *real-time* dengan tingkat akurasi yang sangat baik, di mana nilai rata-rata *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)* sebesar 0,35% dan 0,45%. Sistem juga mampu mendeteksi gangguan seperti *overvoltage* dan *undervoltage*, serta memberikan respon otomatis berupa pemutusan beban dengan delay dalam 5 hingga 6 detik, disertai pengiriman notifikasi kondisi abnormal secara *real-time* melalui antarmuka berbasis web. Meskipun demikian, waktu respon proteksi sebesar 5–6 detik tersebut masih relatif lambat jika dibandingkan dengan sistem proteksi kelistrikan konvensional yang bekerja dalam orde milidetik. Hal ini menjadi keterbatasan utama dari sistem dan perlu diperhatikan dalam penerapan di instalasi yang memerlukan waktu respon tinggi. Oleh karena itu, sistem ini lebih cocok digunakan pada instalasi rumah tangga dan industri ringan, sementara untuk aplikasi industri besar perlu pengembangan lebih lanjut guna mempercepat respon sistem. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya akurat, tetapi juga responsif dan informatif, serta berpotensi diterapkan untuk meningkatkan efisiensi energi dan keamanan operasional sistem tenaga listrik tiga fasa. Untuk pengembangan selanjutnya, sistem ini dapat dikembangkan dengan menambahkan fitur proteksi terhadap gangguan hubung singkat, deteksi harmonisa, serta integrasi dengan konsep *smart grid* agar lebih adaptif terhadap kebutuhan sistem distribusi modern.

REFERENSI

- [1] R. S. Siregar and M. Ikhsan, "Implementasi Internet of Thing (IOT) untuk Monitoring dan Pengaman Beban Listrik 3 Phase Menggunakan Fuzzy Sugeno," *Jurnal Algoritma*, vol. 22, no. 1, pp. 1013–1025, Jun. 2025, doi: 10.33364/algoritma/v.22-1.2343.
- [2] M. Ashar Tahir and M. Irsan, "Trainer Rangkaian Control Menggunakan Sistem Forward Reverse Pada Motor Listrik 3 Phase Sebagai Media Pembelajaran Di Jurusan Teknik Listrik Politeknik Kotabaru," *UNM of Journal Technologycal*, vol. 8, no. 1, 2024, doi: <https://doi.org/10.26858/ujtv.v8i1.1693>.
- [3] B. M. Arsyad, A. Sofwan, and A. Nugroho, "Perancangan Sistem Kontrol Over/Under Voltage Relay Berbasis Mikrokontroler Pada Saluran Tegangan 220VAC," *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 85–92, 2019, doi: <https://doi.org/10.14710/transient.v8i1.85-92>.
- [4] L. A. Subagyo and B. Suprianto, "Sistem Monitoring Arus Tidak Seimbang 3 Fasa Berbasis Arduino Uno," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 6, no. 3, pp. 213–221, 2017.
- [5] D. Suarna and Z. Zainuddin, "Rancang Bangun Pengontrolan Alat Elektronik Berbasis Internet of Things," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 136–142, 2023.
- [6] M. A. Rizkiawan, H. Ramza, N. Nuroji, and A. Sofwan, "Data Center Room Monitoring Based on Temperature and Humidity with Internet of Things," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 115–123, 2024, doi: <https://doi.org/10.37905/jjee.v6i2.23344>.
- [7] W. Ridwan, F. S. D. Parebba, I. Z. Nasibu, and I. Wiranto, "Sistem Pengamanan Rumah dan Pengendali Penerangan Menggunakan ESP8266 dan Blynk," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 79–86, 2023.
- [8] Y. Hermanto, "Prototype Monitoring Electricity System 220V of Wind Power Plant (PLTB) Based on The Internet of Things," *Internet of Things and Artificial Intelligence Journal*, vol. 1, no. 3, pp. 133–145, Sep. 2021, doi: 10.31763/iota.v1i3.469.
- [9] Z. Chen, A. M. Amani, X. Yu, and M. Jalili, "Control and Optimisation of Power Grids Using Smart Meter Data: A Review," *Sensors*, vol. 23, no. 4, p. 2118, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23042118.
- [10] C. Widiyari, "Sistem Monitoring Daya Listrik dan Pengontrolan Perangkat Elektronik Berbasis IoT," in *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi dan Industri*, 2020, p. 342.
- [11] J. Lianda, D. Handarly, and A. Adam, "Sistem Monitoring Konsumsi Daya Listrik Jarak Jauh Berbasis Internet of Things," *JTERA (Jurnal Teknol. Rekayasa)*, vol. 4, no. 1, p. 79, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.31544/jtera.v4.i1.2019.79-84>.
- [12] H. Andrianto, Y. Susanthi, and V. Jonathan, "Platform Sistem Pemantauan Penggunaan Energi Listrik Berbasis IoT," *Techne: Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, vol. 23, no. 2, pp. 199–212, 2024, doi: <https://doi.org/10.31358/techne.v23i2.422>.
- [13] S. Hadi, A. S. Anas, and L. G. R. Putra, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Penggunaan Daya Listrik Berbasis Internet of Things," *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 54–66, 2022, doi: <https://doi.org/10.22373/crc.v6i1.10862>.
- [14] D. Effendi, R. P. Dhaniawaty, M. Fitriawati, D. Cancerina, and A. Ramadhan, "Design and Development of Qurban Service Information System Using Research and Development Method," *JESTEC*, vol. 19, no. 5, pp. 1588–1599, 2024.
- [15] O. Okpatrioka, "Research and development (R&D) penelitian yang inovatif dalam pendidikan," *Dharma Acariya Nusantara: Jurnal Pendidikan, Bahasa dan Budaya*, vol. 1, no. 1, pp. 86–100, 2023, doi: <https://doi.org/10.47861/jdan.v1i1.154>.
- [16] I. Purwata, M. F. Zulkarnaen, and W. Bagye, "Hand Sanitizer Otomatis Berbasis Internet of Things," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 22–26, 2022, doi: <https://doi.org/10.37905/jjee.v4i1.11668>.
- [17] A. Rahayu, "Metode Penelitian dan Pengembangan (R&D): Pengertian, Jenis dan Tahapan," *DIAJAR: Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran*, vol. 4, no. 3, pp. 459–470, 2025, doi: <https://doi.org/10.54259/diajar.v4i3.5092>.
- [18] M. Afandy and M. I. Rianto, "Bluetooth-based Heart Rate and Oxygen Saturation Monitoring System HC-05 Based on IoT," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 48–54, 2025, doi: <https://doi.org/10.37905/jjee.v7i1.27447>.
- [19] A. Aska, R. Suppa, and M. Muhallim, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Daya Listrik Berbasis IoT," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 2, 2025, doi: <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i2.6160>.
- [20] S. U. Anggono, E. Siswanto, and L. R. H. A. Fajri, "User interface berbasis web pada perangkat Internet of Things," *Teknik: Jurnal Ilmu Teknik dan Informatika*, vol. 3, no. 1, pp. 35–54, 2023, doi: <https://doi.org/10.51903/teknik.v3i1.326>.
- [21] O. Y. Putri, M. Dalillah, L. A. Pohan, and A. O. Siregar, "Prediksi Jumlah Angka Kemiskinan di Kabupaten Deli Serdang Tahun 2024," *Aljabar: Jurnal Ilmuan Pendidikan, Matematika dan Kebumihan*, vol. 1, no. 3, pp. 29–38, 2025, doi: <https://doi.org/10.62383/aljabar.v1i3.653>.