

Prototipe Sistem Kendali dan *Monitoring* Alat Perbaikan Faktor Daya pada Beban Listrik 1 Phasa berbasis *Internet of Things*

Artha Afrita¹, Dr. Ir. Hartoyo, S.Pd., M.Pd., M.T.²

¹arthaafrita.2021@student.uny.ac.id; ²hartoyo.uny.ac.id

* Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article History

Received 01 August 2025

Revised 11 August 2025

Accepted 31 August 2025

Keywords

Faktor Daya,
PZEM-004T,
Kapasitor,
ESP32,
Solid State Relay

ABSTRACT

The problem of low power factor causes an increase in apparent power consumption and electric current. This research designs a prototype Internet of Things (IoT)-based power factor improvement system that can be controlled and monitored in real-time. The system uses ESP32, PZEM-004T v3.0 sensor, and SSR for automatic capacitor regulation, with data sent to the ThingsBoard platform via MQTT. Test results showed an improvement in power factor from 0.65 to >0.85 as well as a significant decrease in current and apparent power. The IoT monitoring works accurately (61-80 ms) and is able to display real-time data according to TIPHON standards.

Permasalahan rendahnya faktor daya menyebabkan peningkatan konsumsi daya semu dan arus listrik. Penelitian ini bertujuan untuk merancang prototipe sistem perbaikan faktor daya berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dapat dikendalikan dan dipantau secara real-time. Sistem menggunakan ESP32, sensor PZEM-004T v3.0, dan SSR untuk pengaturan kapasitor otomatis, dengan data dikirim ke platform ThingsBoard melalui MQTT. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan faktor daya dari 0,65 menjadi $>0,85$ serta penurunan arus dan daya semu secara signifikan. Monitoring IoT bekerja akurat (61–80 ms) dan mampu menampilkan data secara real-time sesuai standar TIPHON.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



1. Pendahuluan

Listrik merupakan sumber energi utama yang mendukung hampir seluruh aktivitas masyarakat modern, baik di sektor rumah tangga, industri, maupun layanan publik. Menjaga pasokan yang andal, efisien, dan terjangkau seiring meningkatnya permintaan (Makruf et al., 2022).

Salah satu tantangan dalam kualitas daya adalah rendahnya faktor daya, yang ditandai dengan tingginya konsumsi daya reaktif, penurunan efisiensi, dan peningkatan biaya listrik (Silalahi et al., 2021). Beban induktif seperti motor, kulkas, dan peralatan elektronik menjadi penyebab utama, serta berkontribusi pada distorsi harmonik dan rugi daya (Rudyanto Nadeak et al., 2024).

Rendahnya faktor daya juga menurunkan kapasitas efektif sistem dan umur peralatan listrik (Sutama & Candra, 2023). Oleh karena itu, solusi seperti pemasangan kapasitor dan sistem kendali otomatis berbasis IoT mulai dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi (Ndikade et al., 2022).

Penelitian ini mengusulkan sistem kendali dan monitoring alat perbaikan faktor daya berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan menggunakan ESP32 dan sensor PZEM-004T. Sistem ini memantau

parameter kelistrikan secara real-time dan mengaktifkan kapasitor secara otomatis untuk mengompensasi daya reaktif, sehingga mendukung peningkatan efisiensi distribusi energi listrik secara optimal.

2. Metode

2.1 Faktor Daya

Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif terhadap daya semu dalam suatu sistem listrik (Romadhona et al., 2023). Menurut SPLN 70-1: 1985, menetapkan standar minimal faktor daya sebesar 0,85 guna menjamin efisiensi dalam pemanfaatan energi listrik. Nilai faktor daya yang tinggi mampu meminimalkan rugi-rugi daya pada sistem distribusi dan meningkatkan kinerja peralatan listrik (Akmal et al., 2021). Faktor daya rendah umumnya disebabkan oleh penggunaan beban induktif seperti motor, transformator, dan lampu TL. Kondisi ini menyebabkan arus listrik yang lebih besar dari kebutuhan aktual, sehingga meningkatkan rugi daya, menurunkan efisiensi sistem, dan menaikkan biaya operasional.

2.2 Perbaikan Faktor Daya

Perbaikan faktor daya bekerja dengan cara menyuntikkan arus yang memiliki fase lebih maju ke dalam sistem guna menetralkan arus yang tertinggal fase. Salah satu metode yang umum diterapkan yaitu pemasangan kapasitor dalam rangkaian. Ketika daya reaktif meningkat banyak pada suatu instalasi listrik akan menyebabkan konsumsi daya semu (kVA) lebih besar dibandingkan daya aktif yang dihasilkan. Akibatnya, peralatan yang bekerja pada beban rendah akan meningkatkan biaya pemakaian kVA. pemasangan kapasitor pada instalasi listrik berkapasitas besar dapat membantu memperbaiki faktor daya pada jaringan. Dengan demikian, permintaan daya semu maksimum pada instalasi dapat dikurangi (Kurnia & Hariman, 2021).

2.3 Internet of Things

Berdasarkan IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), *Internet of Things* (IoT) merupakan suatu jaringan yang menghubungkan berbagai objek fisik yang telah dilengkapi dengan sensor dan terintegrasi melalui koneksi internet. Konsep IoT terdiri atas tiga komponen utama, yaitu perangkat fisik dengan sensor, konektivitas internet, serta pusat pengelolaan data di server yang berperan dalam penyimpanan dan pengolahan informasi dari aplikasi. Setiap perangkat yang terkoneksi akan mengumpulkan data secara otomatis, yang kemudian dapat dianalisis dan dimanfaatkan sesuai kebutuhan spesifik pengguna (Akbar et al., 2023; Hardiansyah et al., 2023; Panca Saputra et al., 2024; Suwanto et al., 2024; Yasa et al., 2023).

2.4 Thingsboard

Thingsboard merupakan platform yang dapat melakukan pemantauan data secara langsung. Platform ini dibuat dengan tampilan antarmuka yang mudah digunakan. serta menyediakan berbagai tampilan visual dan analisis data yang informatif. Melalui teknologi ini, data yang telah dikumpulkan dapat diakses dan dianalisis dengan mudah. Penggunaan Thingsboard mampu meningkatkan akurasi, efisiensi, serta keandalan dalam memantau secara langsung. Selain itu, teknologi ini memiliki beragam manfaat, seperti untuk aplikasi industri, sistem peringatan dini bencana, monitoring kondisi cuaca, dan berbagai kebutuhan monitoring lainnya yang membutuhkan data secara cepat dan akurat (Panca Saputra et al., 2024).

2.5 MQTT

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) merupakan protokol komunikasi berbasis model publish-subscribe yang bersifat terbuka dan ringan, dirancang khusus untuk mendukung perangkat dengan sumber daya terbatas dalam aplikasi telemetri. MQTT dirancang sederhana dalam implementasinya, baik dari sisi publisher maupun subscriber. Sementara itu, kompleksitas pengelolaan sistem ditangani oleh broker, yang berfungsi sebagai penghubung antara publisher dan subscriber. Broker memiliki peran sentral dalam mengelola lalu lintas pesan, menyimpan topik, serta menjamin distribusi pesan secara andal kepada klien yang berlangganan (Akbar et al., 2023).

2.6 Kapasitor

Kapasitor bank digunakan untuk mengatur tegangan serta daya reaktif di area pemasangannya, dengan cara menggabungkan beberapa kapasitor secara paralel guna mencapai nilai kapasitansi yang diinginkan. Besaran kapasitas ini dinyatakan dalam kilovolt-ampere reaktif (kVAR). Arus yang dihasilkan oleh kapasitor memiliki sifat kapasitif (leading), sehingga mampu mengurangi atau menetralkan karakteristik induktif (lagging) dalam sistem kelistrikan. Oleh karena itu, kapasitor bank dimanfaatkan untuk mengimbangi sifat induktif dalam jaringan, yang pada akhirnya dapat meningkatkan stabilitas serta efisiensi sistem tenaga listrik (Suwanto et al., 2024).

2.7 PZEM-004T

PZEM-004T adalah sensor yang mampu mendeteksi berbagai parameter listrik melalui terminal inputnya. Parameter yang dapat dideteksi meliputi tegangan, arus, daya aktif, konsumsi energi dalam kWh, frekuensi, serta faktor daya. Modul ini mengeluarkan data dalam format serial, sehingga jika ingin dihubungkan dengan kontroler lain, perlu menggunakan komunikasi serial (Yasa et al., 2023).

2.8 Solid State Relay

Solid State Relay (SSR) merupakan jenis relay elektronik yang berbeda dengan relay konvensional berbasis elektromagnetik. SSR bekerja secara senyap tanpa komponen bergerak, seperti relay elektromagnetik yang menghasilkan suara mekanis saat beroperasi. SSR dapat diaktifkan menggunakan sinyal tegangan rendah dari mikrokontroler, namun mampu mengendalikan beban arus tinggi pada sisi output secara efisien (Hardiansyah et al., 2023).

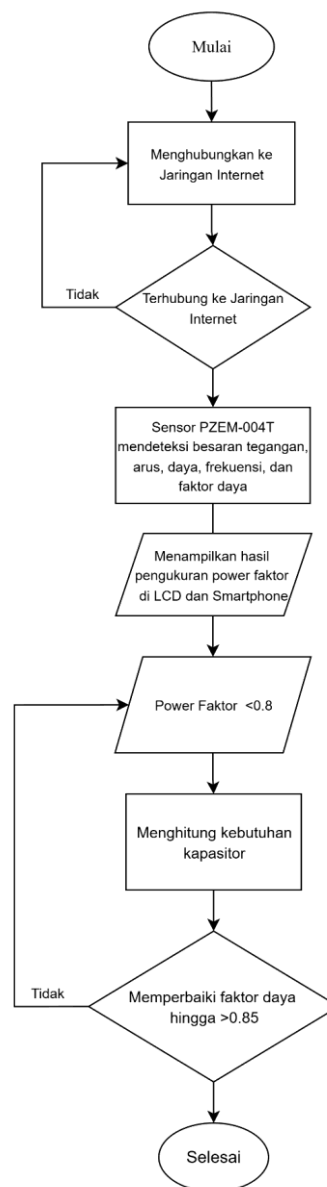
3. Metode Perancangan Alat

Konsep dasar perancangan Sistem Kendali dan *Monitoring* Alat Perbaikan Faktor Daya pada Beban Listrik berbasis *Internet of Things* (IoT) dilaksanakan melalui metode *Research and Development* (R&D). Dalam proses pengembangan prototipe sistem kendali dan monitoring alat perbaikan faktor daya berbasis *Internet of Things* (IoT), pendekatan metodologis yang digunakan mengacu pada model pengembangan ADDIE. Model ini terdiri dari lima tahap utama yang saling berurutan dan berkesinambungan, yaitu *Analysis* (Analisis), *Design* (Perancangan), *Development* (Pengembangan), *Implementation* (Implementasi), dan *Evaluation* (Evaluasi).

3.1 Diagram Alir Perancangan Alat

Tahapan perancangan alat bertujuan untuk memahami jalannya proses kerja sistem kendali dan monitoring pada prototipe alat perbaikan faktor daya otomatis untuk berbagai jenis beban listrik. Pada tahap ini dijelaskan secara menyeluruh alur kerja sistem, yang menggambarkan proses pengendalian dan pemantauan secara terstruktur.

Gambar 3. 1 Diagram Alir

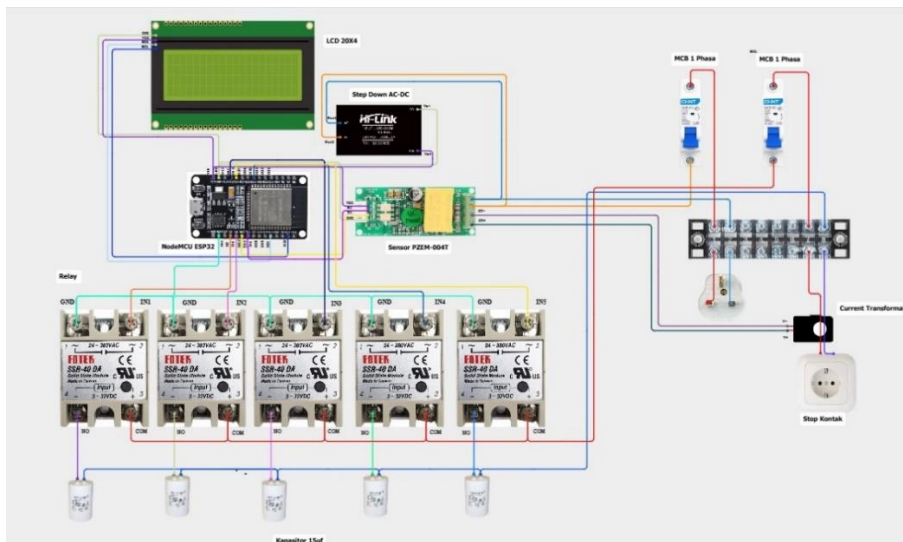


Setelah sistem terhubung ke jaringan internet, sensor PZEM-004T membaca parameter listrik seperti tegangan, arus, daya, frekuensi, dan faktor daya. Data ditampilkan pada LCD dan dapat diakses melalui smartphone secara real-time. Sistem akan memperbaiki faktor daya secara otomatis jika nilainya di bawah 0,85, dengan mengaktifkan kapasitor melalui relay untuk mengurangi daya reaktif. Proses ini terus berlangsung hingga faktor daya mencapai nilai minimal yang ditentukan, kemudian sistem kembali ke mode monitoring.

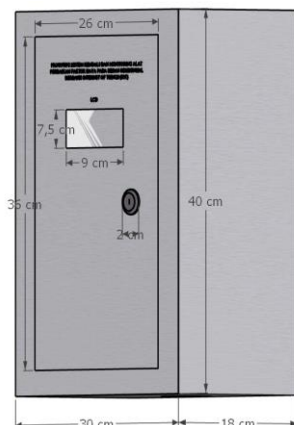
3.2 Desain dan Perancangan Hardware

Desain perancangan hardware pada sistem ini mencakup tiga aspek utama, yaitu perancangan elektrik, mekanik, dan pembuatan PCB. Perancangan elektrik melibatkan penyusunan rangkaian elektronik yang terdiri dari sensor, mikrokontroler, relay, kapasitor, dan komponen pendukung lainnya. Perancangan mekanik dilakukan untuk menata dan melindungi seluruh komponen dalam wadah yang ergonomis dan aman, serta memastikan tata letak yang rapi dan fungsional. Sementara itu, pembuatan PCB dilakukan guna menyusun jalur koneksi antar komponen secara lebih praktis, kuat, dan efisien.

Gambar 3. 2 Diagram Kelistrikan



Gambar 3. 3 Desain Mekanikal



3.3 Desain dan Perancangan Software

Tujuan dari perancangan perangkat lunak adalah untuk memantau kondisi beban listrik, sistem secara otomatis akan menampilkan informasi terkait parameter-parameter kelistrikan seperti arus, tegangan, faktor daya, serta konsumsi energi berdasarkan data yang diperoleh dari sensor PZEM-004T. Dalam tahap ini, pemrograman ESP32 dilakukan dengan bantuan perangkat lunak yang digunakan untuk menulis kode. Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) merupakan platform yang dimanfaatkan untuk membuat, menyusun, dan mengunggah program ke mikrokontroler.

Sistem ini menggunakan platform ThingsBoard sebagai media monitoring berbasis IoT. ThingsBoard memungkinkan ESP32 mengirim dan menampilkan data kelistrikan secara real-time melalui koneksi Wi-Fi, sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem dari jarak jauh.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Pembuatan Hardware

Tahap pembuatan *Hardware* pada prototipe ini mencakup proses perakitan sistem elektrikal dan mekanikal. Adapun hasil dari proses pembuatan *Hardware* dijelaskan sebagai berikut.

Gambar 4. 1 Hasil Pembuatan Perangkat Kelistrikan



Pembuatan PCB bertujuan untuk mempermudah perakitan komponen elektronik agar lebih teratur, efisien, dan aman. Setelah jalur koneksi diverifikasi sesuai rancangan, komponen dipasang dan disolder pada papan PCB. Hasil akhir perangkat elektrik ditampilkan pada Gambar 4.2.

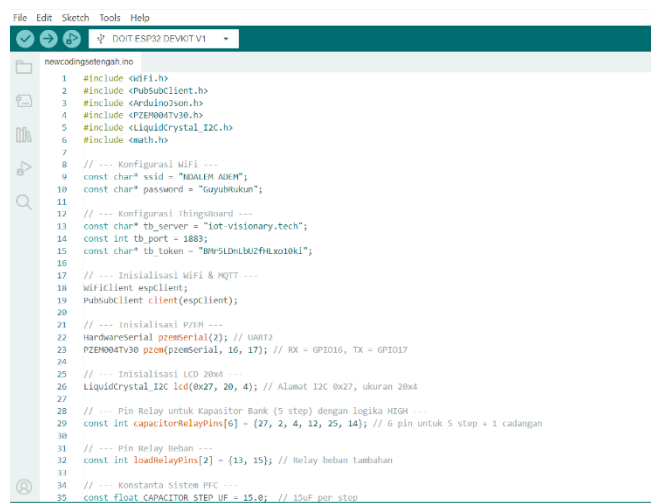
Gambar 4. 2 Hasil Pembuatan Perangkat Mekanikal



4.2 Pembuatan Software

Proses pengembangan perangkat lunak (*Software*) pada sistem ini bertujuan untuk mengatur logika kendali dan memfasilitasi proses *monitoring* daya secara *real-time* melalui jaringan internet. Pembuatan *Software* terdiri dari dua bagian utama, yaitu pemrograman NodeMCU ESP32 sebagai pusat kendali dan akuisisi data, serta perancangan *Dashboard Thingsboard* sebagai antarmuka *monitoring* berbasis web.

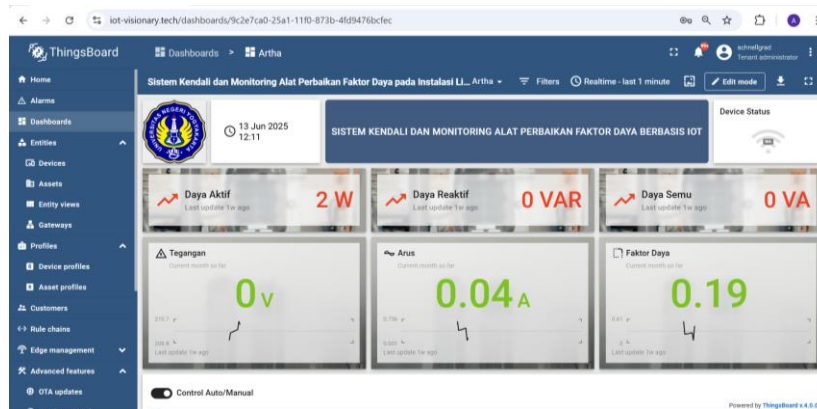
Gambar 4. 3 Kode Program



Pemrograman pada NodeMCU ESP32 mencakup konfigurasi komunikasi data dengan sensor daya PZEM-004T, pengaturan logika kendali untuk aktivasi relay kapasitor, serta proses pengiriman data secara periodik ke *platform* IoT melalui protokol MQTT dengan bantuan fitur WiFi. Data yang dikirim meliputi tegangan, arus, daya aktif, daya semu, faktor daya, dan status relay.

Tahapan selanjutnya adalah merancang *Dashboard* pada *platform Thingsboard*. *Dashboard* ini berfungsi untuk menampilkan data hasil pengukuran berbagai parameter yang dikirim oleh NodeMCU ESP32 dari sistem alat perbaikan faktor daya. Berikut merupakan tampilan akhir *Dashboard* pada *Thingsboard*.

Gambar 4. 4 Tampilan Thingsboard



4.3 Hasil Pengujian

Berdasarkan perencanaan pengujian terhadap prototipe sistem kendali dan *monitoring* alat perbaikan faktor daya berbasis *Internet of Things*, pengujian dibagi menjadi dua tahap, yaitu pengujian fungsional dan pengujian kinerja. Pengujian fungsional dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen yang digunakan dalam sistem perbaikan faktor daya, seperti sensor PZEM-004T, mikrokontroler, LCD 20x4, Hi-Link 10M05, relay kapasitor, dan komponen lainnya dapat berfungsi dengan baik sesuai peran dan fungsinya. Sementara itu, pengujian kinerja bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan prototipe sistem kendali dan *monitoring* alat perbaikan faktor daya secara keseluruhan dalam memperbaiki faktor daya serta memastikan sistem dapat memantau dan mengendalikan kapasitor secara otomatis sesuai kebutuhan beban.

A. Hasil Uji Fungsional

Tahapan pengujian fungsional dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen penyusun sistem bekerja dengan baik dan sesuai dengan fungsinya masing-masing. Pengujian ini menjadi langkah awal yang penting guna menjamin keandalan sistem saat dioperasikan dalam kondisi sebenarnya.

Gambar 4. 5 Tabel Uji Fungsional

No	Komponen	Aspek yang Diuji	Hasil
1	NodeMCU ESP32	Upload program, uji koneksi Wi-Fi, cek komunikasi serial	Program berjalan, terhubung ke Wi-Fi dan ThingsBoard
2	PZEM-004T	Hubungkan ke beban, baca data data via serial monitor	Berhasil membaca parameter listrik dengan responsif
3	Hi-Link HLK-10M05	Ukur tegangan output Hilink, pastikan output stabil pada 5V saat digunakan	Menyuplai daya DC 5V stabil untuk seluruh rangkaian
4	MCB 1 Phasa	Proteksi hubung singkat	Memutus arus otomatis saat terjadi hubung singkat
5	Solid State Relay	Kirim sinyal dari ESP32 dan	Semua relay menyala/mati sesuai

No	Komponen	Aspek yang Diuji	Hasil
	30DA	periksa apakah relay aktif sesuai logika	perintah
6	Kapasitor 15uF	Koreksi faktor daya (cosphi)	Meningkatkan faktor daya secara signifikan setelah terhubung
7	LCD 20x4 I2C	Tampilan data dan status alat	Menampilkan data parameter listrik dan status alat secara jelas

Hasil uji fungsional menunjukkan bahwa seluruh komponen dalam sistem bekerja sesuai dengan fungsinya. NodeMCU ESP32 berhasil menjalankan program dan terhubung ke Wi-Fi serta ThingsBoard. Sensor PZEM-004T mampu membaca parameter listrik secara responsif. Modul Hi-Link HLK-10M05 menyuplai tegangan DC 5V yang stabil. MCB 1 fasa berfungsi memutus arus saat terjadi hubung singkat. Solid State Relay merespons perintah ESP32 dengan benar. Kapasitor 15 μ F efektif meningkatkan faktor daya setelah terhubung. LCD 20x4 I2C menampilkan data dan status sistem dengan jelas.

B. Hasil Uji Kinerja

Uji Kinerja yang merupakan tahap akhir dalam evaluasi sistem alat perbaikan faktor daya. Pengujian ini dilaksanakan berdasarkan rancangan dan instrumen uji yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Sepuluh variasi beban diterapkan secara bertahap guna mengamati efektivitas kinerja alat perbaikan faktor daya dalam meningkatkan nilai faktor daya pada sistem listrik. Hasil pengujian ini dilakukan untuk dapat memberikan gambaran menyeluruh terkait kemampuan alat dalam mengoptimalkan faktor daya pada berbagai kondisi beban. Dengan adanya pengujian ini, keandalan sistem dapat dipastikan sebelum diterapkan dalam lingkungan operasional yang sebenarnya.

1. Hasil Pengujian Akurasi Faktor Daya

Gambar 4. 6 Pengujian Faktor Daya Sebelum Perbaikan

No	Keterangan Beban	Hasil Pembacaan		Selisih	Error (%)	Tingkat Ketelitian
		Thingsboard	PQA			
1	Kulkas SHARP SJ-225MD + 1 LED LUBY 5 Watt + 2 kipas Maspion F-18 DA + 1 Lampu PHILIPS 8 Watt + 1 Motor Shimizu PS-135 E + 1 Motor Shimizu PS-128 BIT + 1 Motor EFOS DB 125B + 1 Charger laptop Asus 45 Watt	0.73	0.7	0.03	4.29%	IV
2	1 Motor Shimizu PS-135 E + 1 Motor Shimizu PS-128 BIT + 1 Motor EFOS DB 125B + 1 kipas Maspion F-18 DA + 1 lampu LUBY 5 Watt	0.74	0.74	0	0.00%	I
3	1 Motor Shimizu PS-128 BIT + 1 Motor EFOS DB 125B + 1 Kulkas SHARP SJ-225MD	0.74	0.73	0.01	1.37%	IV
4	1 led LUBY 5 Watt + 1 1 Motor Shimizu PS-128 BIT + 1 kipas Maspion F-18 DA + 1 kulkas SHARP SJ-225MD	0.66	0.63	0.03	4.76%	IV
5	1 Motor Shimizu PS-128 BIT + 1 Motor EFOS DB 125B	0.63	0.62	0.01	1.61%	IV
6	1 lampu LUBY 5 Watt + 1 Lampu PHILIPS 8 Watt + 1 1 Motor Shimizu PS-128 BIT + 1 kulkas SHARP SJ-225MD	0.65	0.64	0.01	1.56%	IV
7	2 kipas Maspion F-18 DA + 1 motor Shimizu PS-128 BIT + 1 kulkas SHARP SJ-225MD	0.65	0.63	0.02	3.17%	IV
8	2 kipas Maspion F-18 DA + 1 lampu LUBY 5 Watt + 1 motor Shimizu PS-128 BIT	0.66	0.63	0.03	4.76%	IV
9	1 kipas Maspion F-18 DA + 1 motor Shimizu PS-128 BIT + 1 LED LUBY 5 Watt	0.64	0.61	0.03	4.92%	IV
10	2 kipas Maspion F-18 DA + 1 kulkas SHARP SJ-225MD + 1 lampu LUBY 5 Watt + 1 lampu PHILIPS 8 Watt	0.72	0.69	0.03	4.35%	IV

No	Keterangan Beban	Hasil Pembacaan		Selisih	Error (%)	Tingkat Ketelitian
		Thingsboard	PQA			
Rata-Rata				0.02	3.08%	IV

Berdasarkan hasil pengujian faktor daya sebelum perbaikan yang ditampilkan pada tabel 4.6 di atas, dapat dilihat bahwa rata-rata error pengukuran antara alat Thingsboard dan alat PQA adalah sebesar 3,08%. Nilai error ini menunjukkan bahwa masih terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara kedua alat, terutama pada beberapa variasi beban yang kompleks. Sebagian besar hasil pengukuran berada pada tingkat ketelitian IV, Berdasarkan IEC (Internasional Electrotechnical Commission) 13B-23 standar pengujian yang menandakan akurasi pengukuran masih berada pada ambang batas standar namun masih perlu ditingkatkan agar dapat lebih sesuai dengan standar pengukuran.

Gambar 4. 7 Pengujian Faktor Daya Setelah Perbaikan

No	Keterangan Beban	Hasil Pembacaan		Selisih	Error (%)	Tingkat Ketelitian
		Thingsboard	PQA			
1	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt + 1 charger laptop 45 Watt	0.94	0.93	0.01	1.08%	III
2	1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt	0.94	0.93	0.01	1.08%	III
3	1 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt + 1 kulkas 100 Watt	0.93	0.93	0	0.00%	I
4	1 kulkas 100 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	0.93	0.92	0.01	1.09%	III
5	1 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt	0.87	0.86	0.01	1.16%	III
6	1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	0.88	0.86	0.02	2.33%	IV
7	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	0.9	0.88	0.02	2.27%	IV
8	1 lampu 5 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	0.9	0.87	0.03	3.45%	IV
9	1 lampu 5 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	0.9	0.89	0.01	1.12%	III
10	2 kipas 20 Watt + 1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt	0.85	0.83	0.03	2.41%	IV
Rata-Rata				0.014	1.60%	III

Nilai faktor daya hasil pengukuran alat dan *Power Quality Analyzer* (PQA) menunjukkan perbedaan yang sangat kecil, dengan rata-rata selisih hanya 0.014 dan error sebesar 1.60%. Error yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa alat perbaikan faktor daya bekerja secara efektif dan akurat dalam meningkatkan faktor daya sistem. Berdasarkan IEC (Internasional Electrotechnical Commission) 13B-23 standar pengujian berada pada golongan akurasi III yang menandakan akurasi pengukuran masih berada pada ambang batas standar sehingga masih layak digunakan untuk dilakukan pengujian faktor daya.

2. Hasil Pengujian Kompensasi Daya Reaktif

Gambar 4. 8 Kompensasi Daya Reaktif Secara Manual

No	Keterangan Beban	Step Kapasitor Aktif	Daya Reaktif (Q) Sebelum (kVAR)	Daya Reaktif (Q) Sesudah (kVAR)
1	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 fasa 286 Watt + 1	2 step	645	241.8

No	Keterangan Beban	Step Kapasitor Aktif	Daya Reaktif (Q) Sebelum (kVAR)	Daya Reaktif (Q) Sesudah (kVAR)
	motor 1 phasa 125 Watt + 1 charger laptop 45 Watt			
2	1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 phasa 286 Watt + 1 motor 1 phasa 125 Watt	2 step	537	203
3	1 motor 1 phasa 286 Watt + 1 motor 1 phasa 125 Watt + 1 kulkas 100 Watt	2 step	448.5	192.6
4	1 kulkas 100 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 phasa 286 Watt	2 step	478	157.5
5	1 motor 1 phasa 286 Watt + 1 motor 1 phasa 125 Watt	1 step	396	181.3
6	1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 phasa 286 Watt	1 step	350.4	158.3
7	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 phasa 286 Watt	1 step	319.3	130
8	1 lampu 5 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 phasa 286 Watt	1 step	253.2	104.2
9	1 lampu 5 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 motor 1 phasa 286 Watt	1 step	251	100.4
10	2 kipas 20 Watt + 1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt	1 step	157.4	102

Berdasarkan hasil pengukuran arus pada alat perbaikan faktor daya yang ditampilkan pada Tabel 4.8, pemberian kompensasi daya reaktif secara manual dengan penambahan kapasitor mampu menurunkan nilai daya reaktif (Q) secara signifikan pada berbagai variasi beban. Misalnya, pada percobaan pertama dengan kombinasi beban kulkas, kipas, LED, motor, charger laptop, dan lampu, penggunaan kapasitor dengan 2 step berhasil menurunkan daya reaktif dari 645 kVAR menjadi 241,8 kVAR. Pola penurunan serupa juga terjadi pada percobaan-percobaan lain, di mana setelah pemasangan kapasitor, nilai Q sesudah selalu lebih kecil dibandingkan Q sebelum yang menandakan terjadinya perbaikan faktor daya.

Gambar 4. 9 Kompensasi Daya Reaktif Secara Otomatis

No	Keterangan Beban	Step Kapasitor Aktif	Daya Reaktif (Q) Sebelum (kVAR)	Daya Reaktif (Q) Sesudah (kVAR)
1	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 phasa 286 Watt + 1 motor 1 phasa 125 Watt + 1 charger laptop 45 Watt	2 step	630.6	244.4
2	1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 phasa 286 Watt + 1 motor 1 phasa 125 Watt	2 step	524.6	210.5
3	1 motor 1 phasa 286 Watt + 1 motor 1 phasa 125 Watt + 1 kulkas 100 Watt	2 step	437.5	188.9
4	1 kulkas 100 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 phasa 286 Watt	2 step	470.3	174.6
5	1 motor 1 phasa 286 Watt + 1 motor 1 phasa 125 Watt	1 step	388.5	170.2
6	1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 phasa 286 Watt	1 step	342.6	152.1
7	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 phasa 286 Watt	1 step	310.4	128.2
8	1 lampu 5 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 phasa 286 Watt	1 step	248.6	99.8
9	1 lampu 5 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 motor 1 phasa 286 Watt	1 step	245.7	96.9
10	2 kipas 20 Watt + 1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt	1 step	153.8	112.7

Berdasarkan hasil pengukuran pada alat perbaikan faktor daya yang menggunakan sistem kompensasi daya reaktif secara otomatis pada Tabel 4.9, terlihat bahwa penambahan kapasitor secara otomatis pada setiap variasi beban mampu menurunkan nilai daya reaktif (Q) secara signifikan. Misalnya, pada beban paling lengkap (kulkas, kipas, LED, motor, charger laptop), setelah

kapasitor 2 step diaktifkan, daya reaktif turun dari 630,6 kVAR menjadi 244,4 kVAR. Pada beban-beban lain, seperti kombinasi kipas, motor, kulkas, dan lampu, penurunan daya reaktif juga konsisten terjadi setelah pemasangan kapasitor otomatis.

Gambar 4. 10 Pengujian Faktor Daya Sebelum dan Sesudah Perbaikan

No	Keterangan Beban	Faktor Daya		Perbaikan (%)
		Thingsboard	PQA	
1	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt + 1 charger laptop 45 Watt	0.73	0.94	22.34%
2	1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt	0.74	0.94	21.28%
3	1 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt + 1 kulkas 100 Watt	0.74	0.93	20.43%
4	1 kulkas 100 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	0.66	0.93	29.03%
5	1 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt	0.63	0.87	27.59%
6	1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	0.65	0.88	26.14%
7	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	0.65	0.9	27.78%
8	1 lampu 5 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	0.66	0.9	26.67%
9	1 lampu 5 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	0.64	0.9	28.89%
10	2 kipas 20 Watt + 1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt	0.72	0.85	15.29%

Tabel 4.10 merupakan hasil pengujian kompensasi daya reaktif terhadap berbagai kombinasi beban listrik yang diuji dalam sistem. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan nilai faktor daya ($\cos \phi$) sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan dengan metode kompensasi, serta menghitung persentase perbaikannya. Berdasarkan data yang ditampilkan, terlihat bahwa seluruh kombinasi beban mengalami peningkatan faktor daya yang cukup signifikan. Misalnya, pada kombinasi beban kulkas, dua kipas, dua LED, tiga motor satu fasa, dan satu charger laptop, faktor daya meningkat dari 0.73 menjadi 0.94, dengan persentase perbaikan sebesar 22.34%. Bahkan pada kombinasi beban satu LED, satu motor, satu kipas, dan satu kulkas, peningkatan faktor daya mencapai 29.03%.

Gambar 4. 11 Pengujian Arus, Tegangan, dan Faktor Daya

No	Keterangan Beban	Sebelum Perbaikan			Setelah Perbaikan		
		V	I	$\cos \phi$	V	I	$\cos \phi$
1	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt + 1 charger laptop 45 Watt	221.1	4.26	0.73	221	3.25	0.94
2	1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt	221.2	3.61	0.74	221.2	2.78	0.94
3	1 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt + 1 kulkas 100 Watt	220.6	3.03	0.74	221.1	2.38	0.93
4	1 kulkas 100 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	221.2	2.88	0.66	221.4	2	0.93
5	1 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt	222.8	2.3	0.63	222.8	1.66	0.87

No	Keterangan Beban	Sebelum Perbaikan			Setelah Perbaikan		
		V	I	$\cos \phi$	V	I	$\cos \phi$
6	1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	221.3	2.08	0.65	221.5	1.5	0.88
7	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	221.2	1.9	0.65	221.2	1.35	0.9
8	1 lampu 5 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	222.4	1.51	0.66	222.5	1.06	0.9
9	1 lampu 5 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	222	1.48	0.64	222	1.04	0.9
10	2 kipas 20 Watt + 1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt	221.6	1.02	0.72	221.6	0.85	0.85

Tabel 4.11 merupakan hasil pengujian terhadap parameter listrik yaitu tegangan (V), arus (I), dan faktor daya ($\cos \phi$) sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan sistem kompensasi daya reaktif. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sistem dalam meningkatkan efisiensi pemakaian energi listrik. Dari data yang ditampilkan, dapat dilihat bahwa tegangan pada seluruh beban cenderung stabil di kisaran 221–223 volt, baik sebelum maupun sesudah kompensasi. Namun, terdapat penurunan yang cukup signifikan pada nilai arus setelah perbaikan. Pada kombinasi beban kulkas, dua kipas, dua LED, tiga motor satu fasa, dan satu charger laptop, arus turun dari 4.26 A menjadi 3.25 A, yang menunjukkan pengurangan arus akibat menurunnya beban reaktif dalam sistem.

Gambar 4. 12 Pengujian Daya Semu dan Daya Aktif

No	Keterangan Beban	Sebelum Perbaikan		Setelah Perbaikan	
		Daya Aktif (P)	Daya Semu (VA)	Daya Aktif (P)	Daya Semu (VA)
1	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt + 1 charger laptop 45 Watt	685.8	941.6	675.6	717.5
2	1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 2 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt	591.3	798.7	580.1	614.7
3	1 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt + 1 kulkas 100 Watt	496	668.7	490.9	527.3
4	1 kulkas 100 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	422.4	637	412.7	442.1
5	1 motor 1 fasa 286 Watt + 1 motor 1 fasa 125 Watt	324.8	512.2	321.3	368.9
6	1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	298.4	460.3	293.1	333.1
7	1 kulkas 100 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	274.6	421.2	269	298.8
8	1 lampu 5 Watt + 2 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	222.1	336.8	211.5	235.6
9	1 lampu 5 Watt + 1 kipas 20 Watt + 1 motor 1 fasa 286 Watt	210	328	207.4	230.4
10	2 kipas 20 Watt + 1 kulkas 100 Watt + 1 lampu 8 Watt + 1 lampu 5 Watt	161.9	225.8	160.1	190.3

Tabel 4.12 menampilkan hasil pengujian daya aktif dan daya semu dari berbagai kombinasi beban listrik sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan sistem, yaitu dengan penerapan kompensasi

daya reaktif. Berdasarkan data pada tabel, terlihat bahwa setelah dilakukan kompensasi, nilai daya semu mengalami penurunan yang cukup signifikan pada seluruh variasi beban. Sebagai contoh, pada kombinasi beban kulkas, dua kipas, dua lampu LED, tiga motor satu fasa, dan satu charger laptop, daya semu turun dari 941,6 VA menjadi 717,5 VA, sementara daya aktif hanya mengalami penurunan kecil dari 685,8 W menjadi 675,6 W. Hal ini menunjukkan bahwa daya reaktif dalam sistem berhasil dikurangi tanpa mengorbankan daya aktif yang dibutuhkan oleh beban.

C. Pembahasan

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan sebelumnya pada sistem perbaikan faktor daya, dapat disimpulkan bahwa penggunaan kapasitor sebagai alat kompensasi daya reaktif efektif dalam meningkatkan faktor daya pada berbagai variasi beban. Pada pengujian manual maupun otomatis, baik menggunakan pembacaan lokal melalui LCD maupun monitoring jarak jauh melalui Thingsboard, seluruh data menunjukkan adanya penurunan signifikan pada nilai daya reaktif (Q) setelah kapasitor diaktifkan.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang dilakukan terhadap prototipe sistem kendali dan monitoring alat perbaikan faktor daya pada beban listrik berbasis IoT, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Perancangan prototipe dilakukan melalui tahapan studi literatur, observasi lapangan, desain perangkat keras dan perangkat lunak, serta integrasi dengan platform IoT Thingsboard. Sistem dirancang untuk dapat membaca parameter listrik secara real-time, mengendalikan kapasitor secara otomatis maupun manual, dan menampilkan data monitoring baik secara lokal maupun jarak jauh. Parameter yang diukur pada sistem monitoring alat perbaikan faktor daya ini adalah arus, tegangan, faktor daya, daya reaktif, daya aktif, dan daya semu. Sistem monitoring ini juga menggunakan mikrocontroller Node MCU ESP 32. Node MCU ESP 32 ini mempunyai fitur Wi-Fi yang berfungsi untuk mengirimkan data parameter ke Platform Thingsboard supaya dapat di monitoring secara real-time.
2. Setiap komponen prototipe memiliki fungsi yang saling terintegrasi, di mana sensor PZEM-004T v3.0 berfungsi untuk membaca parameter tegangan, arus, daya, dan faktor daya, NodeMCU ESP32 sebagai pusat kendali dan pengirim data ke Thingsboard, SSR sebagai pengendali ON/OFF kapasitor, dan LCD I2C 20x4 sebagai penampil lokal. Keseluruhan komponen bekerja secara sinergis membentuk sistem monitoring dan kendali yang responsif.
3. Kinerja sistem kendali alat perbaikan faktor daya menunjukkan hasil yang baik, di mana sistem mampu mengaktifkan atau menonaktifkan kapasitor secara otomatis berdasarkan nilai faktor daya aktual yang terbaca. Logika pengendalian berjalan sesuai ambang batas yang telah diprogramkan, dengan waktu respon yang sesuai. Pengujian juga menunjukkan bahwa sistem otomatis memiliki kelebihan dalam menyesuaikan nilai kompensasi secara real-time, sehingga alat dapat langsung merespon perubahan beban tanpa intervensi manual. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu meningkatkan faktor daya dari rata-rata 0,65 menjadi lebih dari 0,90, serta menurunkan arus dan daya semu secara signifikan pada berbagai kombinasi beban. Delay atau waktu tunda antara perintah dan reaksi sistem juga berada pada kisaran yang sangat rendah (di bawah 100 ms), sehingga tidak mengganggu kinerja sistem secara keseluruhan.
4. Kinerja sistem monitoring juga bekerja secara optimal, terbukti dari hasil pengujian parameter listrik yang menunjukkan tingkat akurasi tinggi dengan persentase error yang masih berada dalam batas toleransi standar IEC. Data monitoring ditampilkan dengan jelas pada LCD dan platform Thingsboard, baik secara manual maupun otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja dengan baik dengan dilakukan pengujian faktor daya sebelum perbaikan yaitu error 3,08% yang masuk pada kategori IV berdasarkan IEC (Internasional Electrotechnical Commission) 13B-23. Berdasarkan IEC 13B-23 standar pengujian faktor daya setelah perbaikan dengan tingkat ketelitian pada Gol III dengan rata-rata error yaitu 1.72% yang

menandakan akurasi pengukuran masih berada pada ambang batas standar sehingga masih layak digunakan untuk dilakukan pengujian faktor daya.

5. Platform Thingsboard yang digunakan efektif dalam mendukung proses monitoring dan kendali, karena mampu menampilkan data secara real-time, menyimpan data historis untuk keperluan analisis lebih lanjut, menyediakan visualisasi dalam bentuk grafik, tabel dan gauge. Dengan platform yang mudah diakses dari perangkat manapun yang terhubung internet, Thingsboard mendukung sistem ini menjadi solusi yang praktis dan efisien

References

- Akbar, R. M. R., Arif, T. Y., & Irhamsyah, M. (2023). *Analisis Performansi Protokol MQTT Pada Sistem Pemantauan Kualitas Udara Ruangan Berbasis IoT* (Vol. 8, Issue 3).
- Akmal, H., Wicaksono, A., Handoko, S., Ajub, D., & Zahra, A. (2021). *ANALISIS PERBAIKAN FAKTOR DAYA DAN NILAI TEGANGAN DI POLTEKKES SEMARANG* (Vol. 10, Issue 2). <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/transient.v10i2.327-334>
- Hardiansyah, A. H., Hartati, R. S., & Divayana, Y. (2023). Proteksi Konsleting Listrik Dengan Memutus Jarak Jauh Arus 3 Fasa Beban Besar Dengan Kombinasi Solid State Relay (SSR) dan IoT NodeMCU 8266 Menggunakan Aplikasi Blynk di Sub Panel Gedung Telkomsel Smart Office Renon Denpasar. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 22(1), 71. <https://doi.org/10.24843/mite.2023.v22i01.p09>
- Kurnia, H., & Hariman, H. (2021). ANALISIS PENGARUH PEMAKAIAN KAPASITOR UNTUK PERBAIKAN FAKTOR DAYA PADA MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN DAYA 1 HP 380/660 V DI SMKN 01 REJANG LEBONG. *JTERAF (Jurnal Teknik Elektro Raflesia)*, 1(2).
- Makruf, A., Ilham, R., Sakti, B., Syam, E., Akbar, M., & Yudistira, Y. (2022). Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 Kv dari Gi Tengkawang Pada Penyulang T4. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 22(2), 155–160. <https://doi.org/10.23917/emitor.v22i2.16770>
- Ndikade, H., Salim, S., & Abdussamad, S. (2022). *Studi Perbaikan Faktor Daya Pada Jaringan Listrik Konsumen Di Kecamatan Katobu Kabupaten Muna*.
- Panca Saputra, E., Ginanjar, S., Tunjung Kusumo, A., & Saryoko, A. (2024). MONITORING TEKANAN UDARA BERBASIS INTERNET OF THINGS MENGGUNAKAN THINGSBOARD UNTUK KONTROL RUANGAN. *Jurnal Riset Dan Aplikasi Mahasiswa Informatika (JRAMI)*, 05.
- Romadhona, G., Sapundani, R., Novalino Wibowo, B., & Wondi Prasitio. (2023). Pengukuran dan Analisis Kualitas Daya Listrik di IGD dan IKBS Rumah Sakit Islam Purwokerto. *Jurnal Teknik Elektro*, 6. <https://doi.org/https://doi.org/10.30651/cl.v6i1.16283>
- Rudyanto Nadeak, O., Sinambela, R., & Manik, M. (2024). *ANALISIS KUALITAS DAYA LISTRIK AKIBAT DAMPAK BEBAN NONLINEAR*. <http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index>
- Silalahi, E. M., Widodo, B., & Purba, R. (2021). *Analisis Total Harmonic Distortion (THD) dan Arus Harmonik Akibat Penggunaan Lampu Hemat Energi (LHE) dan Light-Emitting Diode (LED) secara Kolektif Pada Jaringan Tegangan Rendah*. <http://ojs.uho.ac.id/index.php/jfe/54>
- Sutama, I. W., & Candra, D. (2023). Analisis Perbaikan Faktor Daya Pada Tranformator 2500KVA/400V di Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai Bali. *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil Dan Teknik Informasi*, 6(1), 37–45. <https://doi.org/10.38043/telsinas.v6i1.4321>
- Suwanto, D., Haddin, M., & Nugroho, D. (2024). Simulasi Perbaikan Faktor Daya pada Gedung Rumah Sakit Islam Gigi dan Mulut Sultan Agung Semarang dengan Menggunakan ETAP. *Aviation Electronics, Information Technology, Telecommunications, Electricals, and Controls (AVITEC)*, 6(2), 135. <https://doi.org/10.28989/avitec.v6i2.2350>
- Yasa, K. A., Purbhawa, I. M., Sumerta Yasa, I. M., Teresna, I. W., Nugroho, A., & Winardi, S. (2023). Prototype Pemantauan Konsumsi Energi Listrik pada Firebase Menggunakan PZEM-004T. *Jurnal Eksplora Informatika*, 12(2), 104–112. <https://doi.org/10.30864/eksplora.v12i2.993>