

RANCANG BANGUN SISTEM MONITORING DAN OTOMASI PERBAIKAN KUALITAS DAYA DENGAN BANK KAPASITOR SKALA INDUSTRI KECIL

Deny Nazarius Sirait¹, Ojak Abdul Rozak², Agus Setiawan³, Edy Sumarno⁴

^{1,2,3,4}Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang; Jl. Raya Puspitek No. 46, Buaran, Serpong, Tangerang Selatan, 15310

Keywords:

Capacitor bank, ESP32, PZEM-004T, SSR, MIT App Inventor

Correspondent Email:

xxxxxxxxxx@xxxx.xxx

Abstrak. Faktor daya rendah pada industri kecil menyebabkan inefisiensi energi, peningkatan konsumsi daya, dan biaya operasional tinggi. Solusi untuk masalah ini adalah penerapan sistem monitoring dan otomasi perbaikan daya menggunakan kapasitor bank, yang dikendalikan otomatis sesuai kebutuhan beban. Penelitian ini merancang sistem berbasis ESP32 sebagai pengontrol utama, menggunakan sensor PZEM-004T untuk pemantauan tegangan dan arus, serta SSR 25 A untuk pengaturan kapasitor bank. Monitoring dilakukan melalui aplikasi MIT App Inventor yang dapat diakses via *smartphone*. Metode penelitian mencakup perancangan perangkat keras dan lunak, implementasi, serta pengujian sistem. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan faktor daya dari 0,72 menjadi 0,99, penurunan daya semu dari 2,18 kVA menjadi 1,60 kVA, dan pengurangan daya reaktif dari 1,50 kVAR menjadi 0,24 kVAR. Arus listrik turun dari 10 A menjadi 7,34 A, menghasilkan penghematan energi sebesar 139,2 kWh atau Rp201.102,24 per bulan. Akurasi sensor PZEM-004T menunjukkan *error* rata-rata 0,40% untuk tegangan dan 1,13% untuk arus. Sistem ini membantu industri kecil meningkatkan efisiensi energi, menurunkan biaya operasional, dan memantau kualitas daya secara fleksibel melalui *smartphone*.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. Low power factor in small-scale industries results in energy inefficiency, increased power consumption, and higher operational costs. To address this issue, this study proposes a monitoring and automatic power factor correction system utilizing a capacitor bank controlled according to load demand. The system is built using an ESP32 microcontroller as the main controller, integrated with a PZEM-004T sensor for voltage and current measurements, and a 25 A Solid State Relay (SSR) for capacitor switching. Monitoring is facilitated through a mobile application developed using MIT App Inventor. The research methodology involves hardware and software design, system implementation, and performance evaluation. Experimental results demonstrate an improvement in power factor from 0.72 to 0.99, a reduction in apparent power from 2.18 kVA to 1.60 kVA, and a decrease in reactive power from 1.50 kVAR to 0.24 kVAR. The current draw was reduced from 10 A to 7.34 A, yielding estimated energy savings of 139.2 kWh or approximately IDR 201,102.24 per month. Sensor accuracy testing shows an average error of 0.40% for voltage and 1.13% for current. The proposed system enables small industries to enhance energy efficiency, reduce operational expenses, and monitor power quality via *smartphone*.

1. PENDAHULUAN

Listrik memiliki peran penting dalam menunjang aktivitas sektor industri kecil yang semakin berkembang di era modern [1]. Namun, dominasi beban induktif seperti motor listrik menyebabkan penurunan faktor daya yang berdampak pada peningkatan konsumsi energi dan beban daya semu [2]. Untuk mencapai efisiensi energi yang optimal, faktor daya idealnya berada di atas 0,90 [3]. Salah satu metode perbaikannya adalah dengan pemasangan kapasitor bank yang mampu mengoreksi faktor daya secara otomatis melalui prinsip segitiga daya [1], [4].

Agar proses koreksi faktor daya berjalan efektif, diperlukan sistem monitoring yang mampu memantau parameter listrik secara *real-time*, [5] telah menunjukkan pentingnya sistem pemantauan energi listrik berbasis mikrokontroler untuk menampilkan data tegangan dan arus secara langsung. Pemantauan ini memungkinkan pendeteksian dini terhadap ketidakseimbangan daya dan mendukung pengambilan keputusan dalam sistem kompensasi daya.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Nugroho dan Mustaqim [6], yang mengkaji kualitas daya listrik di Bangunan Gedung XYZ melalui analisis parameter utama seperti tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya. Pengukuran dilakukan langsung pada panel *Main Distribution Panel* (MDP) 33 kVA dan 11 kVA menggunakan *Power Quality Analyzer*, dengan fokus pada evaluasi distribusi beban antar fasa, efisiensi pemanfaatan daya, serta identifikasi potensi gangguan operasional akibat ketidakseimbangan beban.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem monitoring dan perbaikan kualitas daya menggunakan kapasitor bank berbasis *Internet of Things* (IoT), yang ditujukan untuk membantu industri kecil dalam memenuhi standar kualitas daya PLN (faktor daya minimal 0,85) dan meningkatkan efisiensi energi operasional.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Daya Aktif

Daya aktif adalah daya yang digunakan oleh peralatan listrik untuk melakukan pekerjaan nyata, seperti menggerakkan motor

atau menyalakan lampu, dan diukur dalam *watt* (W). Daya ini merupakan bagian dari daya total dalam suatu rangkaian listrik, yang mencakup juga daya reaktif [7]. Rumus perhitungan daya aktif adalah:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.1)$$

2.2. Daya Semu

Daya Semu (S) dalam sistem listrik AC merupakan total daya dalam rangkaian, terdiri dari daya nyata (P) yang digunakan untuk kerja nyata dan daya reaktif (Q) yang dibutuhkan untuk mempertahankan medan listrik dan magnet pada perangkat seperti motor dan trafo [8].

$$S = V \cdot I \quad (2.2)$$

2.3. Daya Reaktif

Daya Reaktif (Q) adalah komponen daya listrik yang tidak menghasilkan kerja nyata, namun penting untuk menjaga medan magnet pada peralatan seperti motor induksi, trafo, dan kapasitor. Diukur dalam *Volt-Ampere Reactive* (VAR), daya ini berkaitan dengan elemen reaktif seperti induktansi dan kapasitansi [8].

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (2.3)$$

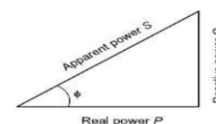
2.4. Faktor Daya

Faktor Daya adalah rasio antara daya nyata (P) dan daya semu (S) yang menunjukkan efisiensi penggunaan daya listrik dalam suatu sistem. Nilainya berkisar antara 0 hingga 1, atau dalam bentuk persentase [9].

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V \cdot I \cdot \cos \varphi}{V \cdot I} = \cos \varphi \quad (2.4)$$

2.5. Perbaikan Faktor Daya

Perbaikan faktor daya bertujuan meningkatkan nilai $\cos \varphi$ hingga mencapai standar, yaitu $\geq 0,85$. Hal ini dapat dilakukan dengan memasang kapasitor yang sesuai. Proses perbaikannya mencakup tiga tahap: menghitung faktor daya awal, menentukan kebutuhan kapasitor, dan menghitung faktor daya setelah pemasangan kapasitor [1], [10].



Gambar 1 Segitiga Daya

Persamaan dari 2.4 sampai 2.6 adalah perhitungan faktor daya tanpa menggunakan kapasitor sebagai berikut [1] :

$$P = V_{in} \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.5)$$

$$S_1 = V_{in} \cdot I \quad (2.6)$$

$$PF_1 = \frac{P}{S_1} \quad (2.7)$$

Persamaan dari 2.8 sampai 2.15 adalah perhitungan kapasitor yang dibutuhkan untuk perbaikan faktor daya sebagai berikut [1] :

$$\theta = \cos^{-1}(PF) \quad (2.8)$$

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta} - 1} \quad (2.9)$$

$$Q_1 = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.10)$$

$$Q_c = P \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (2.11)$$

$$Q_c = \frac{Q_c \times 10^6}{2\pi f V^2} \quad (2.12)$$

$$X_c = \frac{V_{in}^2}{Q_1} \quad (2.13)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} \quad (2.14)$$

Persamaan dari 2.16 sampai 2.20 adalah perhitungan faktor daya menggunakan kapasitor sebagai berikut [1] :

$$X_c = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (2.15)$$

$$I_2 = \frac{V_{in}}{X_c} \quad (2.16)$$

$$Q_{capatif} = \frac{V_{in}^2}{X_c} \quad (2.17)$$

$$Q_{total} = Q_{inductif} - Q_{capatif} \quad (2.18)$$

$$S_2 = \sqrt{Q_{total}^2 + P^2} \quad (2.19)$$

$$PF_2 = \frac{P}{S_2} \quad (2.20)$$

Persamaan dari 2.21 adalah perhitungan nilai daya reaktif kapasitor sebagai berikut [11] :

$$Q_c = V^2 \cdot 2\pi f \cdot c \quad (2.21)$$

Keterangan :

P adalah Daya Nyata (W)

V_{in} adalah Tegangan Input (V)

S_1 adalah Daya Semu Lama (VA)

S_2 adalah Daya Semu Baru (VA)

Q_1 adalah Daya Reaktif Lama (VAR)

Q_c adalah Daya Reaktif Kapasitor (VAR)

Q_{total} adalah Total Daya Reaktif (VAR)

PF_1 adalah Power Factor Lama

PF_{2c} adalah Power Factor Baru

C adalah Kapasitor (μF)

I_2 adalah Arus baru (A)

f adalah Frekuensi (Hz)

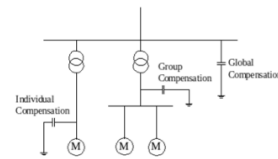
φ adalah Sudut Fasa ($^\circ$)

π adalah 3,14

2.6. Capacitorbank

Capacitorbank merupakan rangkaian beberapa unit kapasitor yang dihubungkan secara seri atau paralel untuk kompensasi daya reaktif. Instalasinya terbagi menjadi tiga jenis,

yaitu global, group, dan individual compensation [2].



Gambar 2 Instalasi Kapasitorbank

2.7. ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler buatan Espressif Systems yang mendukung Wi-Fi dan Bluetooth, serta dilengkapi prosesor dual-core untuk performa tinggi. Dikenal luas dalam pengembangan IoT, ESP32 menyediakan fitur seperti GPIO, ADC, DAC, PWM, serta antarmuka SPI, I2C, dan UART. Mikrokontroler ini dapat diprogram menggunakan C/C++, Arduino IDE, atau MicroPython. Kombinasi fitur lengkap, fleksibilitas, dan harga terjangkau menjadikannya populer dalam berbagai aplikasi, dari otomasi rumah hingga perangkat wearable [12].



Gambar 3 I/O Pin NodeMCU ESP32

2.8. PZEM-004T

Modul sensor buatan Peacefair untuk mengukur tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya. Bekerja pada 80–260VAC dan frekuensi 45–65Hz, modul ini tersedia dalam varian 10A dan 100A serta kompatibel dengan NodeMCU [12].

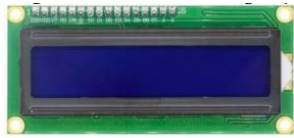


Gambar 4 ZEM004T

2.9. Modul LCD (Liquid Crystal Display)

Tampilan berbasis kristal cair yang mampu menampilkan 32 karakter dalam dua baris. Umumnya memiliki 16 pin, namun penggunaan modul I2C memungkinkan

komunikasi hanya dengan 4 pin (2 data, 2 tegangan), sehingga lebih efisien saat dihubungkan ke mikrokontroler seperti ESP32[12].



Gambar 5 LCD 16x2

2.10. Modul I2C (Inter-Integrated Circuit)

Modul I2C adalah standar komunikasi serial dua arah yang menggunakan dua jalur: SCL (*clock*) dan SDA (*data*). Sistem ini memungkinkan perangkat berperan sebagai Master (pengendali komunikasi) atau *Slave* (yang dikendalikan). I2C efisien untuk menghubungkan banyak perangkat dengan hanya dua jalur data[12].



Gambar 6 Modul I2C

2.11. SSR 25 DA

Perangkat elektronik yang berfungsi seperti relay konvensional, namun tanpa menggunakan komponen mekanis untuk berpindah. SSR bekerja secara elektronik dengan menggunakan semikonduktor untuk mengalirkan atau memutuskan arus [13].

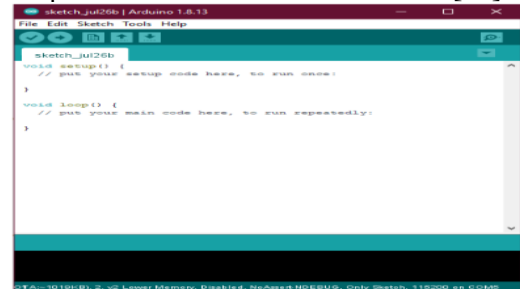


Gambar 7 SSR 25 DA

2.12. Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) adalah perangkat lunak berbasis Java yang digunakan untuk memprogram papan Arduino menggunakan bahasa pemrograman yang menyerupai C. IDE ini dilengkapi dengan pustaka *Wiring* untuk

mempermudah operasi *input-output*, serta menggunakan *bootloader* sebagai penghubung antara *compiler* dan mikrokontroler. Dirancang agar ramah bagi pemula, Arduino IDE dikembangkan dari *platform Processing* dan mendukung pemrograman fungsi-fungsi spesifik pada mikrokontroler secara efisien[12].



Gambar 8 Arduino IDE

2.13. Mit App Inventor

Platform ini memungkinkan pembuatan aplikasi Android tanpa keterampilan pemrograman, menggunakan antarmuka *drag-and-drop* dan blok pemrograman visual. Cocok untuk pemula, *platform* ini mendukung fitur seperti GPS, sensor, dan pengolahan data [14].



Gambar 9 Mit App Inventor

2.14. Firebase

Platform pengembangan aplikasi dari Google yang menyediakan layanan cloud seperti *Realtime Database*, *Authentication*, *Cloud Messaging*, *Analytics*, dan *Hosting*, yang memudahkan pengembang dalam membangun dan mengelola aplikasi *web* maupun *mobile* secara efisien [15].

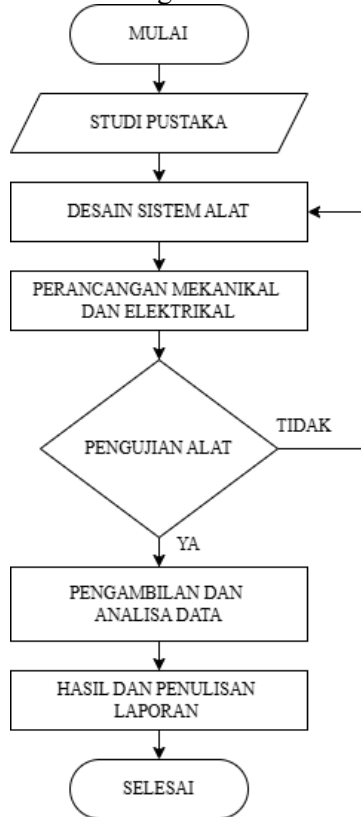


Gambar 10 Firebase

3. METODE PENELITIAN

3.1. Tahapan Penelitian

Berikut ini merupakan *flowchart* yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut:



Gambar 11 Tahapan Penelitian

3.2. Alat dan Bahan

Tabel 1 Alat yang digunakan.

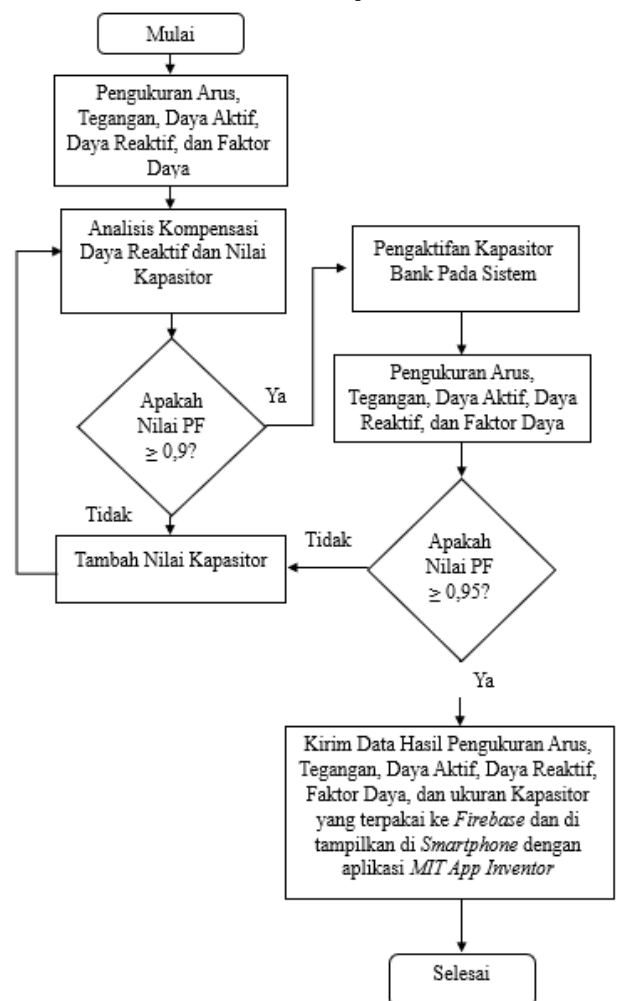
No	Alat	Jumlah	Satuan
1	Obeng + & -	1	SET
2	Tespen	1	PC
3	Tang Potong	1	PC
4	Solder Listrik	1	PC
5	Bor Listrik	1	PC
6	Gerinda Listrik	1	PC
7	Laptop	1	PC
8	Multimeter	1	PC
9	Meteran	1	PC

Tabel 2 Bahan yang digunakan.

No	Bahan	Jumlah	Satuan
1	EPS 32	1	PC
2	Kapasitor 5	1	PC
3	Kapasitor 10	2	PC
4	Kapasitor 15	1	PC

No	Bahan	Jumlah	Satuan
5	Modul LCD	1	PC
6	Modul DC	1	PC
7	Adaptor 5v DC	1	PC
8	Kabel Jumper	10	Meter
9	SSR 25 DA	4	PC
10	PZEM-004	1	PC
11	Box Panel 30 X 40 CM Indoor	1	PC
12	MCB 6A	5	PC
13	Selector Switch	4	PC
14	Pilot Lamp Green	5	PC
15	Pilot Lamp Green	5	PC
16	Kabel Duck	2	Meter

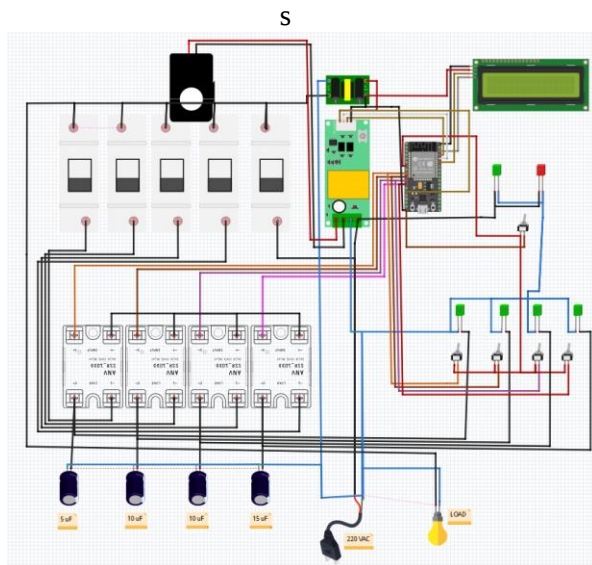
3.3. Proses Perbaikan Faktor Daya



Gambar 12 Proses Perbaikan Faktor Daya

3.4. Rangkaian Keseluruhan

Berikut ini merupakan wiring sistem otomasi kapasitorbank.



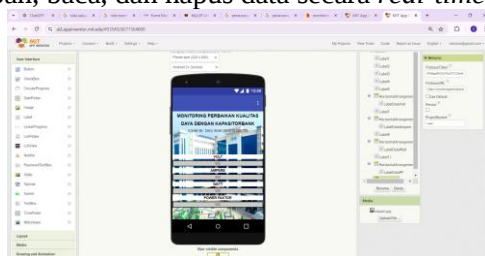
Gambar 13 Rangkaian Otomasi Kapasitorbank

3.5. Perancangan Program

Program dirancang menggunakan Arduino IDE pada ESP32 untuk membaca data dari sensor PZEM-004T, mengontrol relay SSR 25 DA, menampilkan informasi pada LCD I2C 16x2, serta mengirim data ke Firebase yang terintegrasi dengan MIT App Inventor.

3.6. Perancangan Aplikasi

Aplikasi dirancang menggunakan Firebase Realtime Database dan MIT App Inventor. Proses dimulai dengan pembuatan proyek dan pengaturan database pada Firebase Console. Antarmuka disusun di MIT App Inventor, lalu diintegrasikan dengan Firebase melalui komponen FirebaseDB. Logika aplikasi dikembangkan di Blocks View untuk fungsi simpan, baca, dan hapus data secara *real-time*.



Gambar 14 Rancang Antarmuka

3.7. Pengujian Sensor PZEM

Untuk menguji kebenaran nilai arus, tegangan dan daya pada alat yang dibuat maka dilakukan perbandingan antara alat yang telah dibuat dengan alat ukur yang digunakan. Berikut langkah-langkah yang harus dilakukan:

$$\% \text{ Kesalahan} = \frac{\text{Nilai Alat Ukur Standar} - \text{Nilai Eksperimen}}{\text{Alat ukur standar}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Kesalahan rata - rata} = \frac{\sum \% \text{ Kesalahan}}{n}$$

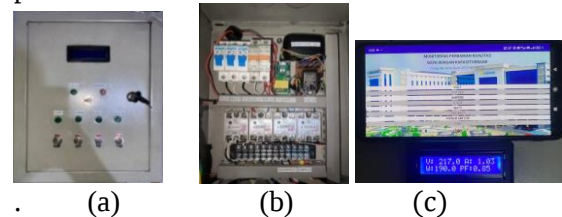
3.8. Pengambilan Data

Untuk analisis sistem, data dikumpulkan selama dua jam untuk masing-masing beban: gerinda 650 W, kompresor 1200 W, dan motor pompa 250 W. Pengukuran tegangan, arus, dan daya dilakukan menggunakan PZEM-004T, lalu dihitung nilai VA dan VAR untuk masing-masing beban.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Perancangan Alat

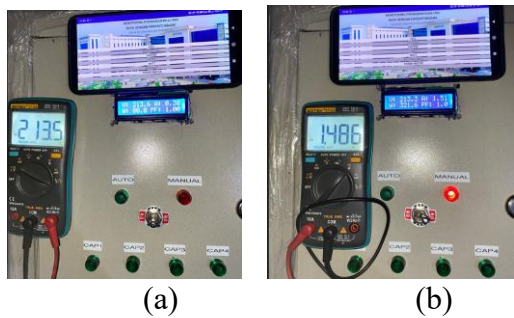
Setelah melalui tahapan perancangan alat, database Firebase, antarmuka MIT App Inventor, dan pemrograman, bagian ini menyajikan hasil sistem kontrol dan monitoring voltase, arus, daya, serta faktor daya secara *real-time*. Sistem ini dirancang untuk memantau faktor daya pada skala industri kecil melalui aplikasi MIT App Inventor di *smartphone*. Hasil rancangan alat ditunjukkan pada Gambar 18.



Gambar 15 (a) Hasil perancangan alat tampak luar, (b) Hasil perancangan alat tampak dalam, (c) Hasil Tampilan pada *smartphone*

4.2. Pengujian Pembacaan Sensor PZEM-004T

Hasil sistem dibandingkan dengan alat ukur standar berpresisi tinggi untuk mengetahui akurasi pengukuran modul PZEM-004T. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi seberapa dekat hasil PZEM-004T dengan nilai sebenarnya yang dihasilkan oleh alat ukur referensi:



Gambar 16 (a) Pengukuran tegangan, (b) Pengukuran arus

Tabel 3 Perbandingan nilai tegangan PZEM-004T dan alat ukur

Beban	Tegangan (V)		Error (%)
	PZEM-004T	Alat Ukur	
Gerinda 650 W	214,1	213,2	0,42%
Kompresor 1200 W	214,6	213	0,75%
Bor Listrik 650 W	213,9	213,1	0,38%
Motor Pompa 250 W	213,6	213,1	0,05%
Rata-rata Error			0,40%

Pada tabel 4 menunjukkan hasil pembacaan nilai tegangan pada sensor PZEM-004T dan alat ukur konvensional menunjukkan bahwa sensor bekerja dengan baik dan memiliki nilai *error* berkisar antara 0,05% dan 0,75% dengan nilai *error* rata-rata 0,40%.

Tabel 4 Perbandingan nilai arus PZEM-004T dan alat ukur.

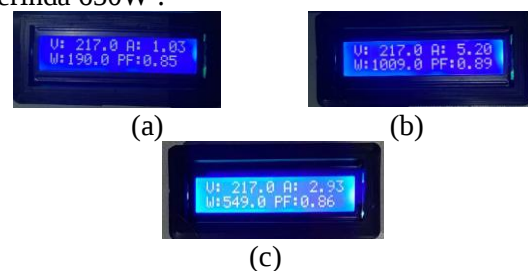
Beban	Arus (A)		Error (%)
	PZEM-004T	Alat Ukur	
Gerinda 650 W	1,92	1,91	0,52%
Kompresor 1200 W	5,20	5,15	0,97%
Bor Listrik 650 W	1,51	1,48	2,03%
Motor Pompa 250 W	1,00	1,01	0,99%
Rata-rata Error			1,13%

Tabel 5 menunjukkan perbandingan pengukuran arus listrik antara sensor PZEM-

004T dan alat ukur standar pada lima jenis beban. Sensor ini menunjukkan akurasi tinggi dengan tingkat *error* antara 0,52% hingga 2,03%, dan rata-rata *error* sebesar 1,13%. Hasil ini menandakan bahwa PZEM-004T cukup andal untuk pengukuran arus pada beban yang diuji.

4.3. Data Kualitas Daya Tanpa Kapasitorbank

Berikut gambar pengambilan data beban tanpa kapasitorbank dengan beban Motor Pompa 250W, Kompresor 1200W, dan Gerinda 650W :



Gambar 17 (a) Pembacaan beban Motor Pompa, (b) Pembacaan beban Kompresor, (c) Pembacaan beban Gerinda

Berikut tabel hasil pengambilan data kualitas daya tanpa kapasitor pada beban motor pompa 250 W, Kompresor 1200W, dan Gerinda 650 W:

Tabel 5 Data Kualitas Daya Tanpa Kapasitorbank

Beban	Tegangan (V)	Frekuensi (Hz)	Arus (A)	Daya (W)	Faktor Daya
Motor Pompa 250 W	217	50	1,03	190	0,85
Kompresor 1200 w	217	50	5,20	1009	0,98
Gerinda 650 W	217	50	2,93	549	0,86

4.4. Dasar Menentukan Nilai Kapasitorbank

Untuk menentukan nilai kapasitor pada setiap beban, perlu dihitung terlebih dahulu daya reaktif, daya semu, dan impedansi beban berdasarkan nilai faktor daya awal. Nilai kapasitor ditentukan agar faktor daya mencapai target yang diinginkan.

Perhitungan pada beban Motor pompa 250W Sudut faktor daya (θ) yang perlu diketahui dengan :

$$\theta = \cos^{-1}(PF) \quad (2.8)$$

Hitung sudut awal (θ_1)

$$\theta_1 = \cos^{-1}(0,85)$$

$$\theta_1 = \cos^{-1}(0,85) = 31,79^\circ$$

$$\theta_1 \text{ dalam radian} = 0,554 \text{ Rad}$$

Hitung sudut akhir (θ_2)

$$\theta_1 = \cos^{-1}(0,98)$$

$$\theta_1 = \cos^{-1}(0,98) = 11,47^\circ$$

$$\theta_1 \text{ dalam radian} = 0,200 \text{ rad}$$

Hitung nilai $\tan \theta$

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta} - 1} \quad (2.9)$$

Hitung $\tan \theta_1$

$$\tan \theta_1 = \sqrt{\frac{1}{(0,85)^2} - 1}$$

$$\tan \theta_1 = \sqrt{\frac{1}{0,7225} - 1} = \sqrt{1,384 - 1}$$

$$\tan \theta_1 = \sqrt{0,384} = 0,62$$

Hitung $\tan \theta_2$

$$\tan \theta_2 = \sqrt{\frac{1}{(0,98)^2} - 1}$$

$$\tan \theta_2 = \sqrt{\frac{1}{0,9604} - 1} = \sqrt{1,041 - 1}$$

$$\tan \theta_2 = \sqrt{0,041} = 0,20$$

Hitung Daya Reaktif yang harus dikompensasi

$$Q_c = P \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (2.11)$$

$$Q_c = 190 \times (0,62 - 0,20)$$

$$Q_c = 190 \times 0,42$$

$$Q_c = 79,17 \text{ VAR} = 0,079 \text{ kVAR}$$

Hitung nilai kapitan (C) dalam mikrofarad

$$Q_c = \frac{Q_c \times 10^6}{2\pi f V^2}$$

$$Q_c = \frac{79,17 \times 10^6}{2 \times 3.1416 \times 50 \times (217)^2}$$

$$Q_c = \frac{79,17 \times 10^6}{2 \times 3.1416 \times 50 \times 47089}$$

$$Q_c = \frac{79,17 \times 10^6}{14,8 \times 10^6}$$

$$Q_c = 5,35 \mu F$$

Lalu didapat data hasil perhitungan dari beban motor pompa 250W, Kompresor 1200W, dan Gerinda 650 W diuraikan pada tabel 5.

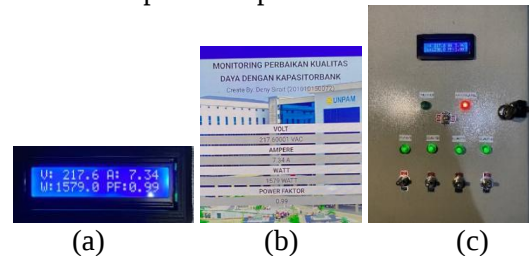
Tabel 6 Tabel Perhitungan Kebutuhan Kapasitorbank

Beban	Tegangan (V)	Frekuensi (Hz)	Arus (A)	Daya (W)	Faktor Daya Target	Faktor Daya Awal θ_1	Sudut Faktor Daya Awal θ_1	Tan θ_1	Tan θ_2	Daya Reaktif Kompensasi (VAR)	Kapitan ke Mikrofarad
Motor Pompa 250 W	217	50	1,03	190	0,85	0,98	0,55	0,20	0,62	79,17	5,35
Kompresor 1200 W	217	50	5,19	1009	0,90	0,98	0,46	0,20	0,50	295,43	19,97
Gerinda 650 W	217	50	2,93	549	0,86	0,98	0,53	0,20	0,58	209,23	14,14
Total Kebutuhan Kapasitor (μF)											39,5

Dari tabel 6 total kebutuhan kapasitorbank untuk kompensasi daya reaktif untuk mencapai target nilai faktor daya 0.98 untuk beban Motor Pompa 250W, Kompresor 1200W, dan Gerinda 650 W sebesar 39,5 μF .

4.5. Kontrol Kapasitor Secara Manual

Untuk memastikan Pada kontrol kapasitor manual berjalan dengan baik ,maka dilakukan percobaan menggunakan beban berupa kompresor 1200W dan gerinda 650W dan *step* kapasitor diaktifkan dari *step* 0 sampai *step* 4 diaktifkan adapun hasil pembacaan alat:



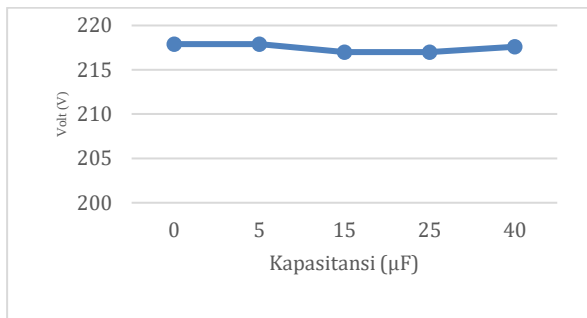
Gambar 18(a) Pembacaan LCD alat, (b) Pembacaan Aplikasi, (c) Alat *step* 4 manual

Maka didapatkan data saat percobaan *step* kapasitor diaktifkan secara bertahap dengan kondisi manual sebagai berikut:

Tabel 7 Data kondisi alat manual *step* 1 s/d 4

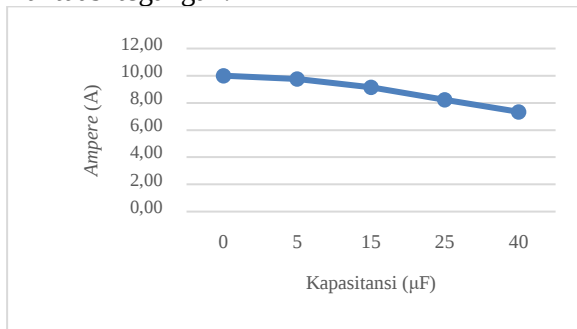
Beban	Step	Kapitan (μF)	Total Kapitan (μF)	Frekuensi (Hz)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (kW)	Faktor Daya (PF)	Daya Reaktif (KVAR)	Daya Semu (KVA)
Motor Pompa 250W Kompresornya	C0	0	0	50	218	10,00	1,58	0,72	2,18	1,50
	C1	5	5	50	218	9,77	1,58	0,74	2,13	1,43
	C2	10	15	50	217	9,15	1,58	0,79	1,99	1,21
	C3	10	25	50	217	8,23	1,58	0,88	1,79	0,84
	C4	15	40	50	218	7,34	1,58	0,99	1,60	0,24

Maka berikut grafik hasil pengukuran Volt, Ampere, Daya, Faktor Daya, Daya Semu, Daya Reaktif:



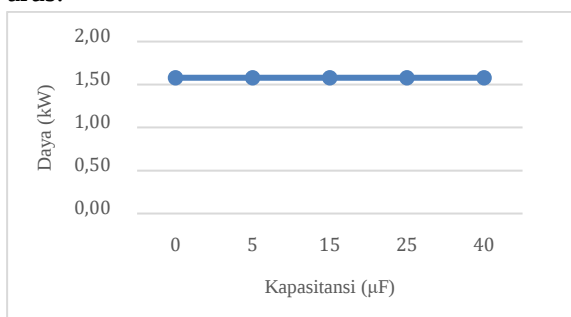
Grafik 1 Nilai Tegangan alat saat kondisi alat manual

Dari grafik 1 nilai tegangan stabil sekitar 217,8 V pada kapasitansi 0–5 μF dan 40 μF , namun menurun menjadi 217,0 V pada kapasitansi 15–25 μF , menunjukkan bahwa kapasitansi tidak signifikan mempengaruhi fluktuasi tegangan.



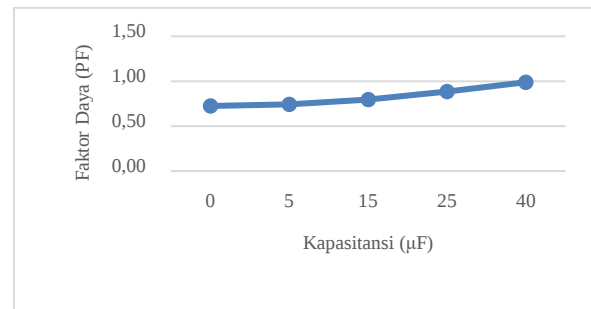
Grafik 2 Nilai *Ampere* saat kondisi alat manual

Dari grafik 2 nilai arus sebesar 10 A pada kapasitansi 0 μF menurun menjadi 7,34 A saat kapasitansi ditingkatkan hingga 40 μF , menunjukkan pengaruh kapasitansi terhadap arus.



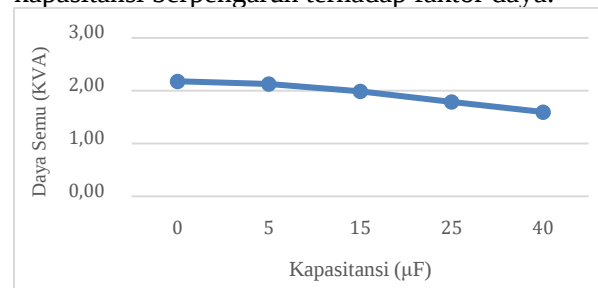
Grafik 3 Nilai Daya saat kondisi alat manual

Dari grafik 3 nilai daya stabil dengan bertambahnya nilai kapasitansi. Ini menunjukkan tidak ada pengaruh nilai kapasitansi dengan daya.



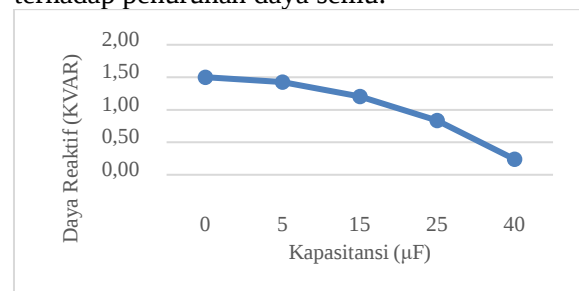
Grafik 4 Nilai Faktor Daya saat kondisi alat manual

Pada grafik 4 nilai faktor daya meningkat dari 0,72 menjadi 0,99 seiring peningkatan kapasitansi hingga 40 μF , menunjukkan bahwa kapasitansi berpengaruh terhadap faktor daya.



Grafik 5 Nilai Daya semu saat kondisi alat manual

Pada grafik 5 nilai daya semu menurun dari 2,18 kVA menjadi 1,60 kVA seiring peningkatan kapasitansi hingga 40 μF , menunjukkan bahwa kapasitansi berpengaruh terhadap penurunan daya semu.



Grafik 6 Nilai Daya reaktif saat kondisi alat manual

Dari grafik 6 nilai daya reaktif menurun dari 1,50 kVAR menjadi 0,24 kVAR seiring peningkatan kapasitansi hingga 40 μF , membuktikan bahwa kapasitansi berpengaruh terhadap daya reaktif.

4.6. Kontrol Kapasitorbank Secara Otomatis

Untuk memastikan pada kontrol kapasitorbank otomatis berjalan dengan baik, maka dilakukan percobaan menggunakan

beban Motor Pompa 250 W, Gerinda 650 W, dan Kompresor 1200 W yang dipakai secara bertahap guna melihat kondisi otomatis pada kapasitorbank berjalan dengan baik. Adapun hasil pembacaan alat dan kondisi alat sebagai berikut :

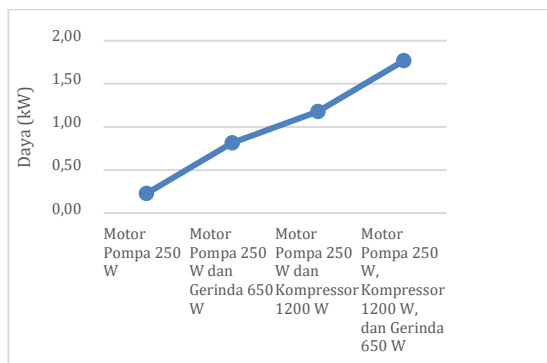


Gambar 19 Pembacaan LCD alat, (b) Pembacaan Aplikasi, (c) Alat *step* 4 otomatis.

Maka didapatkan data saat kondisi otomatis pada kapasitor dan ditambah beban pada peralatan listrik secara bertahap maka didapatkan data sebagai berikut:

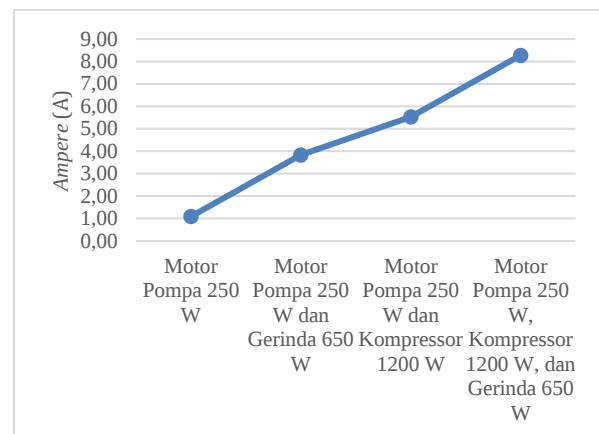
Tabel 8 Data kondisi alat otomatis *step* 1 s/d 4

Beban	Step	Kapasitansi (μF)	Total Kapasitansi (μF)	Frekuensi (Hz)	Volt (V)	Daya (kW)	Faktor Daya (PF)	Daya Semu (KVA)	Daya Reaktif (KVAR)
Motor Pompa 250 W	1	5	5	50	217	0,23	0,96	0,24	0,07
Motor Pompa 250 W dan Gerinda 650 W	2	10	15	50	218	0,82	0,98	0,84	0,18
Motor Pompa 250 W dan Kompresor 1200 W	3	10	25	50	218	1,18	0,98	1,20	0,24
Motor Pompa 250 W, Kompresor 1200 W, dan Gerinda 650 W	4	15	40	50	218	1,77	0,98	1,80	0,36



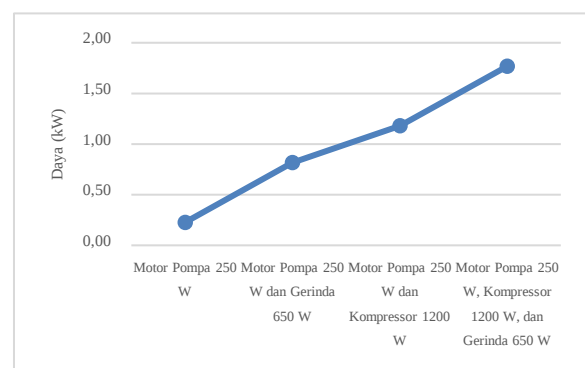
Grafik 7 Nilai Tegangan saat kondisi alat otomatis

Dari grafik 7 nilaiTegangan meningkat dari 217,3 V menjadi 217,9 V seiring bertambahnya beban, menunjukkan bahwa tegangan dipengaruhi oleh penambahan beban saat sistem otomatis beroperasi.



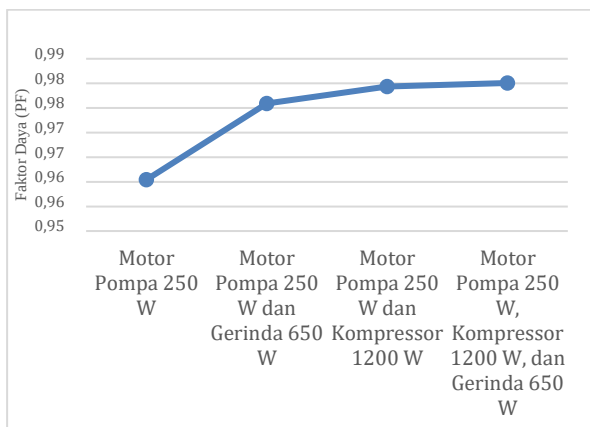
Grafik 8 Nilai *Ampere* saat kondisi alat otomatis

Dari grafik 8 nilai arus listrik (*ampere*) meningkat dari 1,09 A menjadi 8,27 A seiring bertambahnya beban, menunjukkan bahwa arus dipengaruhi oleh penambahan beban saat sistem otomatis beroperasi.



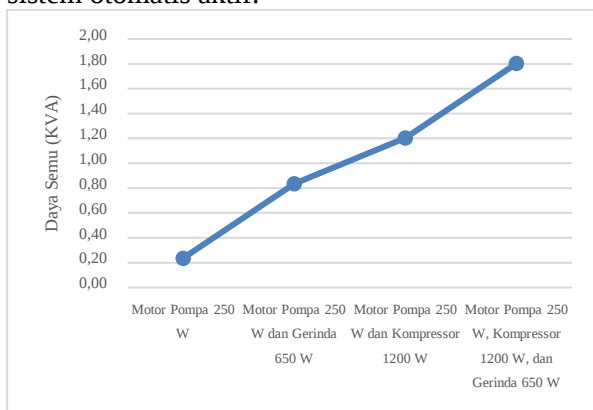
Grafik 9 Nilai Daya saat kondisi alat otomatis

Dari grafik 9 nilai daya aktif meningkat dari 0,23 kW menjadi 1,77 kW seiring bertambahnya beban, menunjukkan bahwa daya dipengaruhi oleh penambahan beban saat sistem otomatis beroperasi.



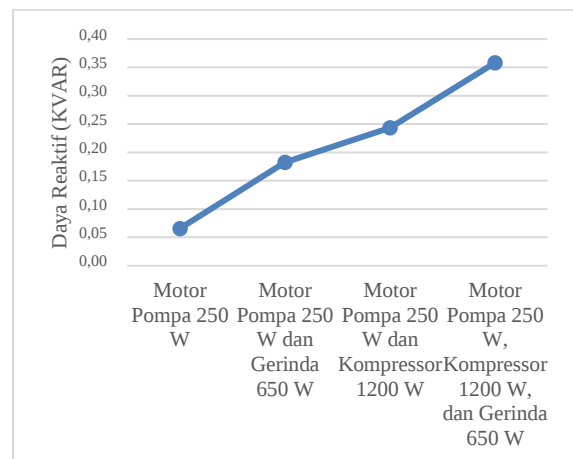
Grafik 10 Nilai Faktor daya saat kondisi alat otomatis

Dari grafik 10 nilai faktor daya meningkat dari 0,96 menjadi 0,98 seiring bertambahnya beban, menunjukkan bahwa faktor daya dipengaruhi oleh penambahan beban saat sistem otomatis aktif.



Grafik 11 Nilai Daya semu saat kondisi alat otomatis

Dari grafik 11 nilai daya semu meningkat dari 0,24 kVA menjadi 1,87 kVA seiring bertambahnya beban, menunjukkan bahwa daya semu dipengaruhi oleh peningkatan beban saat sistem otomatis beroperasi.



Grafik 12 Nilai Daya reaktif saat kondisi alat otomatis

Dari grafik 12 menunjukkan daya reaktif meningkat dari 0,07 kVAR menjadi 0,36 kVAR seiring bertambahnya beban, membuktikan bahwa daya semu dipengaruhi oleh penambahan beban saat sistem otomatis aktif.

5. KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Sistem otomasi perbaikan kualitas daya berbasis ESP32 dan sensor PZEM-004T menunjukkan performa baik dalam memonitor dan mengendalikan kapasitor bank pada skala industri kecil. Sensor mampu membaca parameter listrik dengan akurasi tinggi (*error* rata-rata tegangan 0,40% dan arus 1,13%) dan data dapat dipantau melalui aplikasi berbasis MIT *App Inventor*. Implementasi kapasitor bank secara otomatis berhasil meningkatkan efisiensi listrik, menaikkan faktor daya dari 0,72 menjadi 0,99, serta mengurangi daya semu dan reaktif secara signifikan. Hal ini berdampak pada penghematan energi hingga 139,2 kWh atau setara Rp 2,41 juta per tahun.

5.2. Saran

Pengembangan lanjutan disarankan dengan menambahkan kemampuan pembacaan parameter listrik per beban serta pengujian sistem pada berbagai lingkungan industri kecil dengan karakteristik jaringan berbeda untuk meningkatkan keandalan dan fleksibilitas sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Barlian, Y. Apriani, N. Savitri, and M. Hurairah, "Analisis Kapasitor Bank Untuk Memperbaiki Tegangan," *J. Surya Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 391–396, 2020, doi: 10.32502/jse.v4i2.2562.
- [2] J. Murianto, D. Febrianto, and F. Azmi, "Rancang Bangun Alat Uji Pada Perbaikan Faktor Daya Dengan Kapasitor Bank," *JESCE (Journal Electr. Syst. Control Eng.)*, vol. 4, no. 1, pp. 53–62, 2020, [Online]. Available: <https://www.ojs.uma.ac.id/index.php/jesce/article/view/3995%0Ahttps://www.ojs.uma.ac.id/index.php/jesce/article/download/3995/2811>
- [3] T. R. K. Lestari, B. Nugroho, and R. Kristiyono, "Purwarupa Perbaikan Faktor Daya Listrik Otomatis Menggunakan Mikrokontroler Untuk Listrik Rumah Tangga Dan Home Industri," *Teknika*, vol. 7, no. 2, pp. 84–92, 2021, doi: 10.52561/teknika.v7i2.147.
- [4] Y. Panggei, Y. R. Pasalli, F. Y. S. Paisey, and A. Rehiara, "Power factor correction for energy efficient at public hospital of Manokwari," *J. Innov. Mater. Energy, Sustain. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 20–34, 2023, doi: 10.61511/jimese.v1i1.2023.33.
- [5] D. T. Laksono, R. Afrianti, M. W. Fatma, M. Prasafitri, and H. Alchudri, "RANCANG BANGUN SISTEM PEMANTAUAN ENERGI," vol. 13, no. 1, 2025.
- [6] S. Kualitas, D. Listrik, and P. Quality, "Studi kualitas daya listrik (power quality) di bangunan gedung xyz," vol. 13, no. 2, 2025.
- [7] B. Nurdiansyah *et al.*, "Analysis of Electrical Energy Consumption in City," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 12, no. 3, pp. 181–188, 2023.
- [8] F. Toba, V. A. Suoth, H. S. Kolibu, H. I. R. Mosey, As'ari, and D. P. Pandara, "Analisis Perbandingan Daya Listrik Saat Sebelum Dan Sesudah Variasi Kapasitor Pada Beban Listrik Rumah Tangga," *J. MIPA*, vol. 13, no. 1, pp. 11–17, 2023, doi: 10.35799/jm.v13i1.48968.
- [9] O. R. Nadeak, R. Sinambela, and M. Manik, "Analisis Kualitas Daya Listrik Akibat Dampak Beban Nonlinear," *SINERGI POLMED J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 75–84, 2024, doi: 10.51510/sinergipolmed.v5i2.1664.
- [10] R. Ramadhan, Z. Saputra, and Surojo, "Rancang Bangun Perbaikan Faktor Daya Menggunakan Kapasitor Bank Berbasis Mikrokontroler Untuk Beban Rumah Tangga Dengan Daya Maksimal 900 W," *Pros. Semin. Nas. Inov. Teknol. Terap.*, pp. 287–293, 2021.
- [11] R. A. Dedzky and F. Atabiq, "Perbaikan Faktor Daya Pada Peralatan Listrik Rumah Tangga," *J. Appl. Sci. Electr. Eng. Comput. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 23–29, 2020, doi: 10.30871/aseect.v1i3.2385.
- [12] A. O. Putri, T. Tohir, and F. A. S. Putra, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Daya Listrik Rumah 900VA Berbasis Arduino Uno dan Node MCU ESP32 Melalui Aplikasi Blynk," *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 15, no. 1, pp. 466–472, 2024, doi: 10.35313/irwns.v15i1.6247.
- [13] D. Ramschie, A. A. . Ramschie, L. Wenas, and R. Katuuk, "Implementasi Sistem Proteksi Dan Automatic Transfer Switch (ATS) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," *Elektrik*, vol. 2, no. 1, pp. 16–26, 2023.
- [14] S. Edriati, L. Husnita, E. Amri, A. A. Samudra, and N. Kamil, "Penggunaan Mit App Inventor untuk Merancang Aplikasi Pembelajaran Berbasis Android," *E-Dimas J. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 12, no. 4, pp. 652–657, 2021, doi: 10.26877/e-dimas.v12i4.6648.
- [15] A. T. Gaikwad, "Firebase - Overview and usage," *Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci.*, vol. 3(12), no. August, pp. 1178–1183, 2022.