

RANCANG BANGUN SISTEM MONITORING DAN PENGATURAN DAYA REAKTIF BERTAHAP ADAPTIF PADA JARINGAN 3 FASA BERBASIS MIKROKONTROLER

Farhan Rahmadhani Nugraha; Rizki Nurilyas Ahmad.
Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Rendahnya faktor daya pada instalasi kelistrikan akibat tingginya beban induktif merupakan masalah krusial yang berdampak langsung pada penurunan efisiensi energi. Kondisi ini secara signifikan menyebabkan lonjakan kebutuhan daya reaktif, peningkatan arus saluran, dan pembengkakan rugi-rugi daya pada sistem tenaga listrik. Untuk mengatasi tantangan tersebut, penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sebuah inovasi *VAR Compensator* berbasis mikrokontroler ESP32. Sistem ini dirancang khusus untuk melakukan monitoring parameter kelistrikan secara komprehensif sekaligus mengatur kompensasi daya reaktif secara adaptif melalui pemanfaatan kapasitor bank bertingkat (*multi-stage*). Secara arsitektur, sistem ini mengintegrasikan sensor PZEM-004T untuk akuisisi data yang presisi, protokol komunikasi Modbus RS485 yang andal, dan *Solid State Relay* (SSR) sebagai aktuator responsif penghubung kapasitor. Keunggulan utama sistem ini terletak pada algoritma pengendalian cerdas yang secara *real-time* mengevaluasi fluktuasi beban, serta mampu mengunci (*latching*) aktuasi setiap tahapan kapasitor ketika target tercapai. Hal ini memastikan kapasitas kompensasi selalu proporsional dengan kebutuhan sistem, sehingga efektif mereduksi risiko *overcompensation* (*leading*). Hasil pengujian komprehensif menunjukkan performa yang sangat memuaskan. Sensor PZEM-004T mencatatkan tingkat akurasi tinggi dengan rata-rata tingkat kesalahan (*error*) pengukuran hanya sebesar 0,838% ketika dibandingkan dengan instrumen *Lutron Power Analyzer*. Pasca-kompensasi, kualitas daya kelistrikan mengalami perbaikan drastis; nilai faktor daya melonjak tajam dari rentang kritis 0,08–0,22 menjadi level optimal 0,8–0,95. Peningkatan ini diikuti oleh penurunan nyata pada tarikan daya reaktif dan arus sistem. Pengujian terhadap berbagai variasi pembebanan membuktikan bahwa sistem ini mampu beradaptasi otomatis dengan waktu respons 10–70 detik, sehingga menjamin proses perbaikan faktor daya berlangsung secara efisien, stabil, dan andal.

Kata kunci: *automatic power factor correction*, ESP32, kapasitor bank adaptif, PZEM-004T, *VAR compensator*.

Abstract

A low power factor in electrical installations caused by highly inductive loads is a crucial issue that directly degrades energy efficiency. This condition significantly leads to a surge in reactive power demand, increased line currents, and elevated power losses within the electrical system. To address these challenges, this study designs and implements an innovative ESP32 microcontroller-based VAR Compensator. The system is specifically designed to comprehensively monitor electrical parameters while adaptively regulating reactive power compensation utilizing a multi-stage capacitor bank. Architecturally, the system integrates PZEM-004T sensors for precise data acquisition, a reliable Modbus RS485 communication protocol, and Solid State Relays (SSR) as responsive actuators for capacitor switching. The primary advantage of this system lies in its intelligent control algorithm, which evaluates load fluctuations in real-time and securely latches the actuation of each capacitor step once the target power factor is achieved. This ensures the compensation capacity remains

proportional to system requirements, effectively mitigating the risk of overcompensation (leading conditions). Comprehensive testing results demonstrate highly satisfactory performance. The PZEM-004T sensor recorded a high degree of accuracy, with an average measurement error of only 0.838% when compared to a Lutron Power Analyzer. Post-compensation, electrical power quality exhibited a drastic improvement; the power factor value surged from a critical range of 0,08–0,22 to an optimal level of 0,79–0,93. This improvement was accompanied by a significant reduction in reactive power demand and system current. Furthermore, testing under various load configurations proved that the system adapts automatically with a response time of 10–70 seconds, ensuring that the power factor correction process operates efficiently, stably, and reliably.

.

Keyword: *adaptive capacitor bank, automatic power factor correction, ESP32, VAR compensator, PZEM-004T.*

1. PENDAHULUAN

Kualitas daya listrik merupakan salah satu aspek penting yang memengaruhi kinerja dan efisiensi sistem kelistrikan, terutama pada jaringan distribusi yang semakin kompleks (Manik, 2025). Salah satu parameter utama kualitas daya adalah faktor daya (*power factor*). Faktor daya merupakan perbandingan antara daya aktif dan daya semu pada sistem tenaga listrik yang penting untuk efisiensi dan kualitas daya, yang merepresentasikan efisiensi pemanfaatan daya listrik oleh beban (Adragna et al., 2024). Faktor daya yang rendah, umumnya disebabkan oleh dominasi beban induktif, dapat mengakibatkan peningkatan arus, rugi-rugi daya pada jaringan, penurunan efisiensi sistem, serta potensi penalti dari penyedia tenaga listrik (Ajenikoko et al., 2018).

Pada praktiknya, beban listrik pada laboratorium kelistrikan bersifat dinamis dan didominasi oleh beban induktif seperti motor induksi, transformator, dan peralatan elektromekanik lainnya. Kondisi ini menyebabkan faktor daya sistem cenderung berada di bawah nilai ideal yang disarankan oleh PLN (Rudianta et al., 2022). Salah satu metode yang umum digunakan untuk memperbaiki faktor daya adalah pemasangan kapasitor bank (Wibowo et al., 2018). Namun, penggunaan kapasitor bank statis dengan nilai tetap sering kali tidak mampu menyesuaikan perubahan karakteristik beban. Hal ini sering kali mengakibatkan kondisi kompensasi yang tidak memadai (*under-compensation*) atau kompensasi yang berlebihan (*overcompensation*) (Dang et al., 2023).

Perkembangan teknologi sistem kendali dan mikrokontroler membuka peluang penerapan kapasitor bank bertingkat (*step capacitor bank*) yang dapat menyesuaikan kapasitas reaktif secara bertahap sesuai dengan kondisi beban sistem yang sedang berjalan. Sistem ini dirancang untuk menyesuaikan kapasitas daya reaktif secara bertahap sesuai dengan perubahan kondisi beban sistem secara *real-time*, mengatasi keterbatasan bank kapasitor statis dengan nilai tetap (Diniş & Popa, 2024). sistem koreksi faktor daya dapat dirancang agar lebih adaptif terhadap perubahan beban.

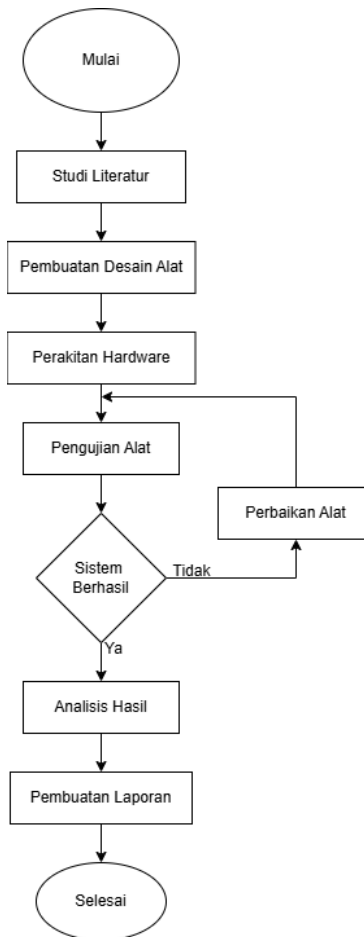
Sensor PZEM-004T, sebagai modul pengukuran arus dan tegangan AC yang relatif ekonomis dan mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler (Alberto et al., 2026).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengkaji sejauh mana sistem kapasitor bank tiga fasa bertingkat yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 berdasarkan pembacaan faktor daya sensor PZEM-004T mampu meningkatkan faktor daya sistem hingga mencapai rentang yang ditargetkan, yaitu rata-rata 0,8-0,95. Rentang ini dipilih dengan mempertimbangkan batas operasional yang aman serta menghindari risiko *overcompensation* pada sistem tenaga listrik nyata. Penelitian ini menjadi penting untuk dilaksanakan karena tidak hanya berfokus pada aspek implementasi perangkat keras, tetapi juga menguji konsep pengendalian faktor daya berbasis pengukuran langsung (*measurement-based control*) pada sistem tenaga. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem koreksi faktor daya yang lebih adaptif dan aplikatif.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu studi literatur, perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, pengujian, serta analisis hasil. Studi literatur dilakukan untuk memperoleh dasar teori mengenai perbaikan faktor daya, kompensasi daya reaktif menggunakan kapasitor bank, sensor PZEM-004T, komunikasi Modbus RS485, mikrokontroler ESP32, dan *Solid State Relay* (SSR). Selanjutnya dilakukan perancangan sistem yang meliputi penyusunan diagram blok, perhitungan kebutuhan kapasitor, serta pengembangan algoritma pengendalian *Automatic Power Factor Correction* (APFC).

Tahap implementasi dilakukan dengan mengintegrasikan sensor PZEM-004T, ESP32, modul RS485, SSR, dan kapasitor bank ke dalam satu sistem. Pengujian dilakukan untuk memverifikasi pembacaan sensor, komunikasi data, fungsi switching SSR, serta kinerja sistem dalam memperbaiki faktor daya pada beban induktif tiga fasa. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengevaluasi peningkatan faktor daya dan kinerja sistem yang telah dikembangkan.



Gambar 2.1. Diagram Alir Tahapan Penelitian

2.1. Persiapan Alat dan Bahan

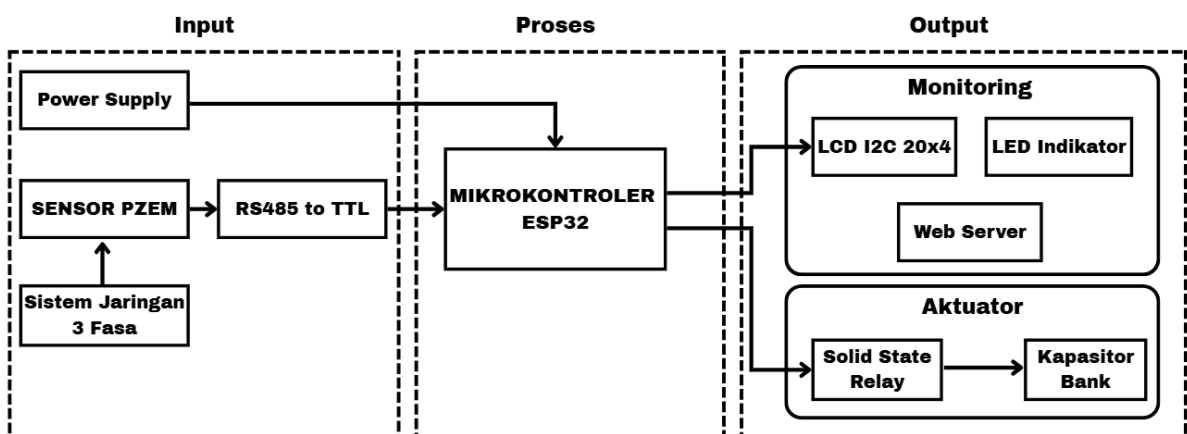
Perancangan sistem kapasitor bank otomatis berbasis ESP32 untuk perbaikan faktor daya pada sistem distribusi tiga fasa bertujuan meningkatkan nilai faktor daya secara otomatis dengan menyesuaikan kebutuhan kompensasi daya reaktif pada beban induktif. Berdasarkan hasil studi literatur, analisis karakteristik beban, serta kebutuhan sistem, ditetapkan sejumlah komponen utama yang mendukung proses pengukuran, pengendalian, dan pensaklaran kapasitor bank. ESP32 *Dev Kit* dipilih sebagai pengendali utama karena memiliki kemampuan pemrosesan yang memadai serta mendukung komunikasi serial dengan beberapa perangkat sensor. Pengukuran parameter kelistrikan dilakukan menggunakan sensor PZEM-004T yang terintegrasi dengan modul komunikasi Modbus RS485 untuk memperoleh data tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif dan faktor daya pada masing-masing fasa. Proses pensaklaran kapasitor dilakukan menggunakan *Solid State Relay* (SSR) tipe DA40 dan DA75 yang berfungsi menghubungkan maupun melepaskan kapasitor sesuai kebutuhan kompensasi daya reaktif. Sebagai sumber tegangan DC untuk sistem kendali, digunakan modul *step-down* LM2596 yang menurunkan tegangan masukan menjadi tegangan kerja yang sesuai bagi perangkat elektronika. Seluruh komponen dirancang dan dipasang di dalam panel *box* yang

dilengkapi perangkat proteksi berupa MCB satu fasa dan MCB tiga fasa untuk menjamin keamanan operasi sistem. Adapun daftar lengkap alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Alat dan Bahan

Alat dan Bahan	Jumlah
Kapasitor NC 50uF	12
ESP32 <i>Dev kit</i>	1
<i>Solid State Relay</i> DA 40	9
<i>Solid State Relay</i> DA 75	3
Sensor PZEM-004T	3
Modul RS485 to TTL	4
LM2596	1
Panel <i>Box</i>	1
Kabel NYAF 1.5mm	1 <i>roll</i>
Kabel NYAF 2.5mm x 4	20m
Kabel NYAF 2.5mm	1 <i>roll</i>
MCB C6	1
MCB 3 Fasa C32	1
<i>Power Supply</i> 12V	1

2.2. Perancangan Sistem



Gambar 2.2. Diagram Blok Sistem

Perancangan sistem kapasitor bank otomatis disusun secara modular dengan membagi sistem menjadi tiga bagian utama, yaitu *input*, proses, dan *output*. Pada bagian *input*, sistem jaringan tiga fasa diukur menggunakan sensor PZEM-004T untuk memperoleh data tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya secara *real-time*. Data hasil pengukuran kemudian dikirimkan melalui modul konverter RS485 to TTL agar dapat dikomunikasikan dengan mikrokontroler ESP32 menggunakan protokol Modbus RTU..

ESP32 berperan sebagai pusat pemrosesan data sekaligus pengendali utama sistem. Data yang diperoleh dari sensor PZEM diolah untuk menentukan kondisi faktor daya sistem serta kebutuhan kompensasi daya reaktif. Berdasarkan hasil pengolahan tersebut, ESP32 akan menentukan jumlah *step* kapasitor yang perlu diaktifkan atau dinonaktifkan. Seluruh rangkaian kendali memperoleh suplai daya dari *power supply* yang berfungsi menyediakan tegangan kerja yang stabil bagi sistem.

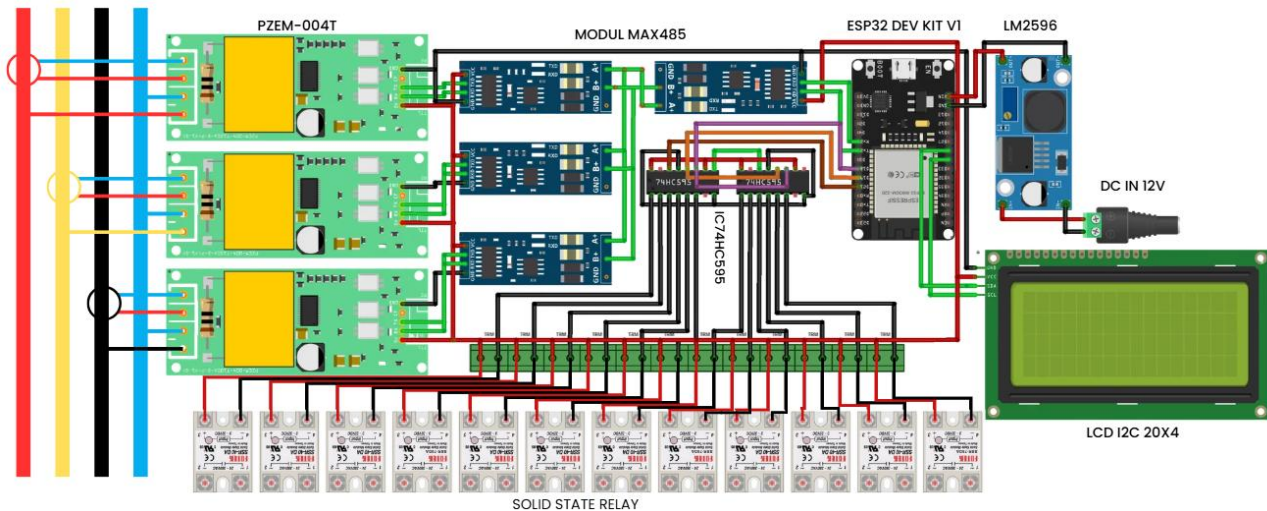
Hasil pemrosesan data ditampilkan pada bagian monitoring yang terdiri dari LCD I2C 20×4, LED indikator, dan web server. LCD digunakan untuk menampilkan parameter kelistrikan dan status kerja sistem secara langsung, sedangkan LED indikator berfungsi menunjukkan kondisi aktivasi setiap *step* kapasitor. Selain itu, data pengukuran dan status sistem juga dapat dipantau melalui web server yang diakses melalui jaringan lokal.

Pada bagian aktuator, ESP32 mengendalikan *Solid State Relay* (SSR) yang berfungsi sebagai saklar elektronik untuk menghubungkan atau memutus kapasitor bank. Aktivasi SSR dilakukan berdasarkan kebutuhan kompensasi daya reaktif yang dihitung dari nilai faktor daya hasil pengukuran. Kapasitor bank yang terhubung ke sistem akan menghasilkan daya reaktif kapasitif sehingga faktor daya dapat ditingkatkan sesuai nilai target yang telah ditentukan.

2.2.1. Perancangan Sistem Kendali

Pada tahap perancangan sistem kendali mencakup integrasi seluruh komponen perangkat keras menjadi satu sistem kapasitor bank otomatis yang terdiri atas rangkaian catu daya, sistem akuisisi data, unit pemrosesan, dan aktuator. Sumber daya utama berasal dari catu daya 12 VDC yang diturunkan menjadi 5 VDC menggunakan modul *step-down* LM2596 untuk menyuplai ESP32, LCD I2C, sensor PZEM-004T, modul RS 485 to TTL, dan rangkaian *shift register* 74HC595. Akuisisi data dilakukan oleh tiga sensor PZEM-004T yang dipasang pada masing-masing fasa untuk mengukur parameter kelistrikan secara *real-time* dan mengirimkan data ke ESP32 melalui komunikasi Modbus RTU. Selanjutnya, ESP32 mengolah data hasil pengukuran dan mengendalikan dua buah *shift register* 74HC595 yang digunakan untuk mengaktifkan 12 *Solid State Relay* (SSR). SSR berfungsi sebagai saklar elektronik yang menghubungkan atau memutus setiap *step* kapasitor bank sesuai

kebutuhan kompensasi daya reaktif, sehingga sistem mampu melakukan perbaikan faktor daya secara otomatis. Keterkaitan seluruh komponen pada sistem ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. *Wiring Diagram*

Mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama sistem yang bertugas menerima, mengolah, dan mengirimkan data ke seluruh perangkat yang terhubung. Prosesor ESP32 menggunakan inti Xtensa dual-core 32-bit dengan frekuensi kerja hingga 240 MHz serta dilengkapi antarmuka komunikasi UART, I2C, dan Wi-Fi yang mendukung kebutuhan sistem monitoring dan pengendalian secara *real-time*. Akuisisi data dilakukan menggunakan tiga sensor PZEM-004T yang dipasang pada masing-masing fasa dan dihubungkan ke ESP32 melalui modul konverter RS485-TTL sebanyak 3 buah sebagai *slave* dan 1 sebagai *master* menggunakan protokol Modbus RTU. Data yang diperoleh berupa tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya yang akan dikirim melalui *slave* masing-masing kepada *master* dengan *delay* 0.5 detik tiap fasanya, sehingga untuk mengirimkan seluruh data ketiga fasa perlu 1.5 detik, selanjutnya data digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam proses kompensasi daya reaktif.

Untuk memperluas jumlah keluaran digital, ESP32 dihubungkan dengan dua buah *shift register* 74HC595 yang bekerja secara berjenjang (*cascading*). Penggunaan *shift register* memungkinkan pengendalian 12 *Solid State Relay* (SSR) hanya dengan 3 pin keluaran mikrokontroler. Setiap SSR berfungsi sebagai saklar elektronik yang menghubungkan atau memutus satu *step* kapasitor bank sesuai perintah yang diberikan oleh ESP32. Kapasitor yang terhubung akan menyuplai daya reaktif kapasitif ke sistem sehingga nilai faktor daya dapat ditingkatkan sesuai standar PLN.

Seluruh rangkaian kendali memperoleh suplai dari modul *step-down* LM2596 yang menurunkan tegangan masukan 12 VDC menjadi 5 VDC untuk mensuplai ESP32, modul komunikasi, LCD I2C, dan rangkaian logika lainnya. Koneksi daya dan sinyal dirancang menggunakan penghantar dengan

kapasitas arus yang sesuai untuk menjamin keandalan sistem selama proses monitoring dan pengendalian kapasitor bank berlangsung.

Seluruh pengawatan sistem dirancang dengan mempertimbangkan kapasitas hantar arus, karakteristik sinyal, serta aspek keandalan operasi untuk memastikan kinerja sistem berjalan secara optimal. Pemilihan penghantar pada setiap bagian sistem disesuaikan dengan kebutuhan arus dan tegangan kerja perangkat yang terhubung, sehingga rugi-rugi daya, penurunan tegangan dapat diminimalkan. Untuk sinyal dan logika menggunakan ukuran 1mm dan untuk *input* serta distribusi ke beban menggunakan ukuran 2.5mm x 4.

2.3. Pengolahan Data

Data hasil pengukuran yang diperoleh dari sensor PZEM-004T selanjutnya dikirim ke mikrokontroler untuk diproses sebagai dasar dalam menentukan kondisi sistem dan pengambilan keputusan pengendalian kapasitor bank. Untuk mengolah data sensor menggunakan perhitungan berikut:

2.3.1 Pengolahan Data Daya Aktif Motor

$$P = 3 \times V \times I \times \cos \varphi \quad (1)$$

Keterangan :

P = Daya (W)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

2.3.2 Pengolahan Nilai Faktor Daya

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$S = \sqrt{3} \times VLL \times IL \quad (2)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \times VLL \times IL}$$

Keterangan :

P = Daya Aktif (W)

S = Daya Semu (VA)

VLL = Tegangan *line to line* (V)

IL = Arus *line* (A)

2.3.3 Pengolahan Nilai Daya Reaktif

- Jika yang diketahui tegangan, arus dan faktor daya

$$Q = \sqrt{3} \times VLL \times IL \times \sin \varphi \quad (3)$$

- Jika diketahui daya semu dan daya aktif

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Keterangan :

Q = Daya Reaktif (VAR)

VLL = Tegangan *line to line* (V)

IL = Arus *line* (A)

Φ = Sudut Faktor Daya

2.3.4 Pengolahan Data Kebutuhan Kapasitor

- Menentukan Daya Reaktif Kapasitor

$$Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Keterangan :

Qc = Daya Reaktif Kapasitor (kVAR)

P = Daya Aktif Beban (W)

φ_1 = $\cos(\text{Pfawal})$

φ_2 = $\cos(\text{Pftarget})$

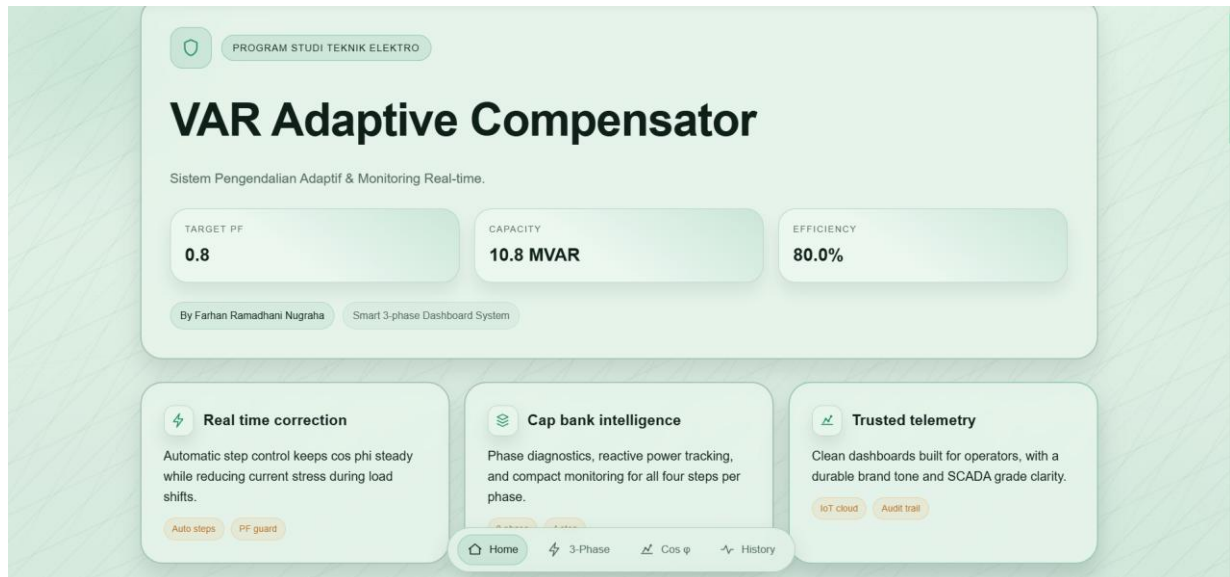
- Menghitung Kapasitansi

$$C = \frac{Q_c \times 10^3}{3 \times 2\pi f \times V \ln^2} \quad (4)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Implementasi Alat pada Motor Listrik 3 Fasa

Pengujian alat VAR *Comparator* ini dilakukan pada Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta sebagai simulasi implementasi langsung di lapangan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan berbagai jenis motor listrik 3 fasa, pengujian dilakukan dengan penuh pengawasan.



Gambar 3.1 *Dashboard web*



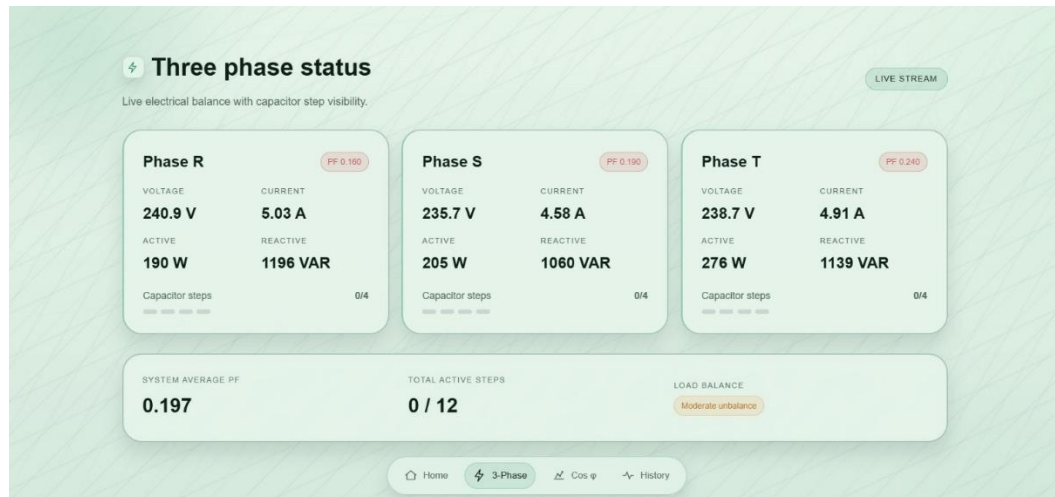
Gambar 3.2 Hasil Perancangan *Hardware*

3.2. Pengujian Awal Sistem

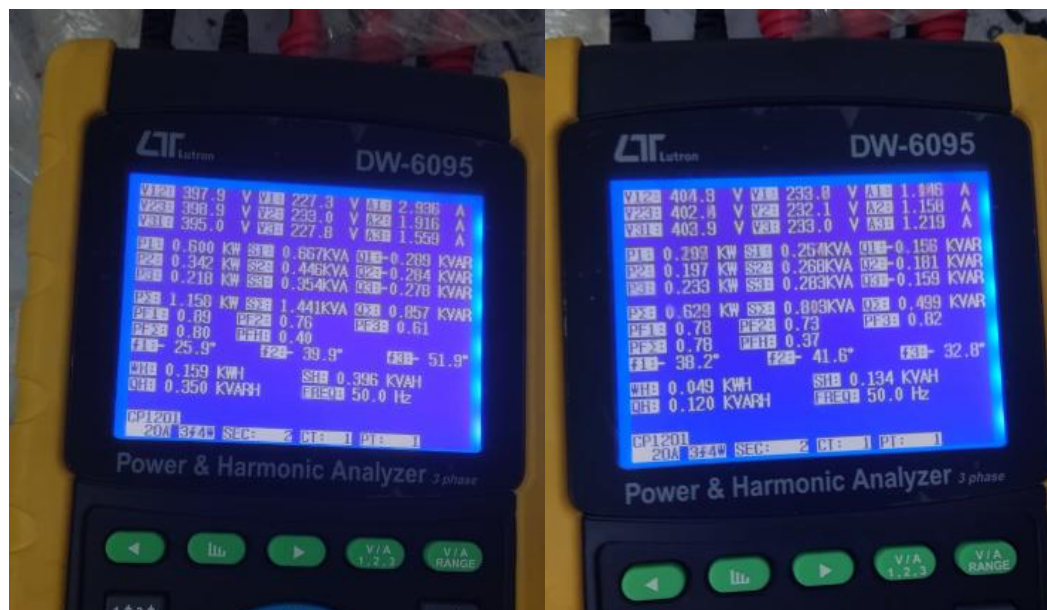
3.2.1 Pengujian Sensor

Pengujian sensor bertujuan untuk memverifikasi akurasi pembacaan parameter kelistrikan yang meliputi tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif dan faktor daya menggunakan sensor PZEM-004T. Proses pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sensor terhadap hasil pengukuran *Power analyzer* Lutron DW-6195 yang digunakan sebagai referensi. Perbedaan nilai yang diperoleh dari kedua alat ukur tersebut dihitung sebagai nilai *error* pengukuran. Selanjutnya, nilai *error* pada masing-masing parameter dianalisis dan dihitung rata-

ratanya untuk mengetahui tingkat akurasi sensor dalam mendukung proses monitoring pada sistem kapasitor bank otomatis.



Gambar 3.3 Kondisi *dashboard* web saat melakukan monitoring



Gambar 3.4 Pengujian dengan Lutron *power analyzer*

Tabel 2. Pengukuran *error* sensor PZEM-004T terhadap Lutron *power analyzer*

NO	PZEM-004T					Power Analyzer				
	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya aktif (W)	Daya Reaktif (VAR)	PF	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya aktif (W)	Daya Reaktif (VAR)	PF
1	384,57	2,45	197,6	1626,8	0,121	382,9	2,48	195	1636	0,12
2	384,2	2,57	296,1	1684,2	0,173	382,13	2,594	295,5	1700	0,17
3	382,56	2,457	335,9	1591,3	0,207	381,63	2,487	335,4	1621	0,2

4	383,42	4,9	528,6	3210	0,162	381,93	4,95	525,7	3247	0,16
5	384,64	12,21	1175,2	8042,1	0,145	382	12,23	1175,5	8045	0,14

Tabel 3. Hasil *error* rata-rata sensor PZEM-004T terhadap *power analyzer*

Hasil	Hasil Rata-rata PZEM-004T					Hasil Rata-rata <i>Power Analyzer</i>				
	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya aktif (W)	Daya Reaktif (VAR)	PF	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya aktif (W)	Daya Reaktif (VAR)	PF
Rata-rata	383,878	4,917	506,68	3230,88	0,16	382,118	4,948	505,42	3249,8	0,15
V %	0,458									
I %	0,626									
Watt %	0,248									
VAR %	0,585									
PF %	2,277									
Total %	0,838									

Berdasarkan hasil pengujian, perbandingan antara hasil pengukuran sensor PZEM-004T dan *power analyzer* menunjukkan nilai rata-rata *error* sebesar 0,838%. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh adanya selisih pembacaan arus antara kedua alat ukur, yang secara langsung memengaruhi hasil perhitungan daya dan parameter kelistrikan lainnya. Meskipun demikian, nilai *error* yang diperoleh masih tergolong kecil sehingga menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki tingkat akurasi yang baik dan layak digunakan sebagai perangkat monitoring pada sistem kapasitor bank otomatis.

3.3. Pengujian Sistem Pengaturan Daya Reaktif

3.3.1 Pengujian Pembebanan Tanpa VAR *Compensator*

Pengujian pembebanan tanpa VAR *Compensator* dilakukan untuk memperoleh kondisi awal sistem sebelum proses kompensasi daya reaktif diterapkan. Metode pembebanannya menggunakan berbagai variasi beban motor 3 fasa yang dirangkai secara *star*, serta variasi beban tidak seimbang yang difokuskan pada fasa R. Parameter yang diamati meliputi tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya semu, dan faktor daya pada masing-masing fasa. Hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4

Tabel 4. Pengukuran beban tanpa VAR *compensator* pada *dashboard*

NO	PZEM-004T					
	<i>line to line</i>	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya aktif (W)	Daya Reaktif (VAR)	PF
1	VLL = 411,48	R = 241	R = 7,94	R = 205	R = 1895	R = 0,12

	IL = 7,78	S = 236,6	S = 7,46	S = 240	S = 1739	S = 0,13
	P = 923	T = 236,3	T = 7,93	T = 295	T = 1839	T = 0,17
	VLL = 412,63	R = 240,9	R = 5,03	R = 145	R = 1196	R = 0,13
2	IL = 4,84	S = 235,7	S = 4,58	S = 163	S = 1060	S = 0,17
	P = 671	T = 238,7	T = 4,91	T = 240	T = 1139	T = 0,22
	VLL = 410,61	R = 240,5	R = 11,84	R = 225	R = 2829	R = 0,09
3	IL = 11,83	S = 235,6	S = 11,54	S = 292	S = 2688	S = 0,11
	P = 671	T = 235,5	T = 12,10	T = 330	T = 2817	T = 0,11
	VLL = 410,43	R = 239,6	R = 15,08	R = 288	R = 3588	R = 0,08
4	IL = 14,90	S = 234,8	S = 14,35	S = 413	S = 3324	S = 0,13
	P = 1612	T = 236,9	T = 15,27	T = 513	T = 3562	T = 0,15
	VLL = 408,88	R = 236,5	R = 16,7	R = 891	R = 3812	R = 0,21
5	IL = 15,42	S = 235,5	S = 14,43	S = 480	S = 3341	S = 0,13
	P = 2181	T = 236,6	T = 15,13	T = 403	T = 3541	T = 0,12
	VLL = 408,88	R = 236,5	R = 16,7	R = 891	R = 3812	R = 0,21

Tabel 5. Pengukuran beban tanpa *VAR compensator* dengan Lutron *power analyzer*

NO	Lutron <i>Power Analyzer</i>					
	<i>line to line</i>	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya aktif (W)	Daya Reaktif (VAR)	PF
1	VLL = 411,48	R = 239,8	R = 7,981	R = 195	R = 1901	R = 0,10
	IL = 7,78	S = 235,5	S = 7,550	S = 233	S = 1761	S = 0,12
	P = 923	T = 234,6	T = 7,989	T = 291	T = 1848	T = 0,15
2	VLL = 410,85	R = 239,8	R = 5,063	R = 142	R = 1204	R = 0,12
	IL = 4,89	S = 235	S = 4,642	S = 160	S = 1077	S = 0,16
	P = 532	T = 237,2	T = 4,961	T = 230	T = 1151	T = 0,20
3	VLL = 408,59	R = 239,3	R = 11,90	R = 220	R = 2837	R = 0,08
	IL = 11,93	S = 234,4	S = 11,66	S = 291	S = 2717	S = 0,11
	P = 836	T = 234	T = 12,22	T = 325	T = 2837	T = 0,11
4	VLL = 408,36	R = 238,5	R = 15,15	R = 280	R = 3600	R = 0,08
	IL = 15,02	S = 233,6	S = 14,49	S = 405	S = 3359	S = 0,12
	P = 1178	T = 235,4	T = 15,42	T = 493	T = 3594	T = 0,14
5	VLL = 406,97	R = 234,9	R = 16,81	R = 883	R = 3845	R = 0,22
	IL = 15,56	S = 234,1	S = 14,59	S = 477	S = 3380	S = 0,14
	P = 1757	T = 235,3	T = 15,29	T = 397	T = 3570	T = 0,11

Berdasarkan hasil pengukuran sebelum pemasangan kapasitor bank, diperoleh bahwa pembacaan sensor PZEM-004T memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap alat ukur referensi Lutron *Power Analyzer*. Hasil validasi menunjukkan nilai *error* rata-rata tegangan *line-to-line* sebesar 0,38%, arus sebesar 0,71%, daya aktif sebesar 1,67%, dan daya reaktif sebesar

0,82%. Sementara itu, pengukuran faktor daya menghasilkan *error* rata-rata sebesar 2,40%. Nilai *error* yang relatif kecil pada parameter tegangan, arus, daya aktif, dan daya reaktif menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T mampu melakukan pengukuran dengan tingkat akurasi yang baik. Perbedaan pembacaan yang masih terdapat pada faktor daya disebabkan oleh sensitivitas perhitungan sudut fasa antara tegangan dan arus, sehingga perubahan sudut fasa yang kecil dapat memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap hasil faktor daya.

3.3.2 Pengujian Pembebanan Menggunakan VAR Compensator

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pengoperasian VAR Compensator terhadap peningkatan faktor daya dan penurunan daya reaktif pada sistem. Metode pembebanannya menggunakan berbagai variasi beban motor 3 fasa yang dirangkai secara *star*, serta variasi beban tidak seimbang yang difokuskan pada fasa R. Selama pengujian, ESP32 mengendalikan aktivasi setiap *step* kapasitor berdasarkan nilai faktor daya yang dibaca oleh sensor PZEM-004T secara *real-time*. Hasil pengukuran selama VAR Compensator beroperasi disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Pengukuran beban dengan VAR compensator pada dashboard

NO	PZEM-004T						
	<i>line to line</i>	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya aktif (W)	Daya Reaktif (VAR)	PF	<i>Step</i>
1	VLL = 415	R = 241,4	R = 1,19	R = 230	R = 180	R = 0,8	R = 2
	IL = 1,61	S = 237,9	S = 1,52	S = 292	S = 212	S = 0,81	S = 2
	P = 885	T = 239,5	T = 1,87	T = 363	T = 262	T = 0,81	T = 2
2	VLL = 405,42	R = 234,3	R = 1,08	R = 202	R = 153	R = 0,81	R = 1
	IL = 1,12	S = 233,5	S = 1,07	S = 199	S = 149	S = 0,81	S = 1
	P = 636	T = 234,4	T = 1,17	T = 235	T = 141	T = 0,86	T = 1
3	VLL = 415	R = 240,9	R = 1,9	R = 312	R = 234	R = 0,82	R = 3
	IL = 2,11	S = 239,3	S = 2,14	S = 437	S = 265	S = 0,86	S = 3
	P = 1167	T = 238,6	T = 2,19	T = 418	T = 314	T = 0,8	T = 3
4	VLL = 412,23	R = 241	R = 2,4	R = 420	R = 315	R = 0,81	R = 4
	IL = 2,63	S = 236	S = 2,6	S = 512	S = 318	S = 0,85	S = 4
	P = 1527	T = 237	T = 2,9	T = 595	T = 402	T = 0,83	T = 4
5	VLL = 412,98	R = 238,1	R = 4,89	R = 1010	R = 506	R = 0,93	R = 4
	IL = 3,55	S = 237,3	S = 2,97	S = 621	S = 333	S = 0,88	S = 4
	P = 2158	T = 239,9	T = 2,75	T = 527	T = 395	T = 0,8	T = 4

Tabel 7. Pengukuran beban dengan VAR compensator dengan Lutron Power analyzer

NO		Lutron Power Analyzer					
	<i>line to line</i>	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya aktif (W)	Daya Reaktif (VAR)	PF	<i>Step</i>
1	VLL = 412,92	R = 240,3	R = 1,23	R = 236	R = 182	R = 0,83	R = 2
	IL = 1,65	S = 237	S = 1,560	S = 298	S = 215	S = 0,82	S = 2
	P = 895	T = 237,9	T = 1,905	T = 361	T = 270	T = 0,81	T = 2
2	VLL = 403,05	R = 233	R = 1,10	R = 205	R = 154	R = 0,79	R = 1
	IL = 1,17	S = 232,1	S = 1,08	S = 197	S = 160	S = 0,81	S = 1
	P = 635	T = 233	T = 1,219	T = 233	T = 159	T = 0,82	T = 1
3	VLL = 412,63	R = 239,7	R = 1,72	R = 318	R = 239	R = 0,8	R = 3
	IL = 2,15	S = 238	S = 2,166	S = 441	S = 266	S = 0,85	S = 3
	P = 1175	T = 237	T = 2,19	T = 416	T = 312	T = 0,8	T = 3
4	VLL = 410,09	R = 239,7	R = 2,27	R = 435	R = 318	R = 0,8	R = 4
	IL = 2,69	S = 235,2	S = 2,612	S = 520	S = 320	S = 0,84	S = 4
	P = 1530	T = 235,4	T = 2,999	T = 575	T = 405	T = 0,81	T = 4
5	VLL = 410,55	R = 236,7	R = 4,969	R = 1004	R = 510	R = 0,9	R = 4
	IL = 3,61	S = 235,9	S = 3,024	S = 626	S = 338	S = 0,87	S = 4
	P = 2155	T = 238,5	T = 2,78	T = 525	T = 397	T = 0,79	T = 4

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 6 dan Tabel 7, terlihat adanya perubahan yang signifikan terhadap parameter kelistrikan setelah VAR *Compensator* diaktifkan. Sebelum kompensasi dilakukan, sistem memiliki nilai faktor daya yang relatif rendah, yaitu berada pada kisaran 0,08–0,22 berdasarkan hasil pengukuran sensor PZEM-004T maupun Lutron *Power Analyzer*. Nilai tersebut menunjukkan bahwa beban didominasi oleh daya reaktif induktif sehingga arus yang mengalir pada sistem masih cukup besar.

Setelah VAR *Compensator* dioperasikan, nilai faktor daya meningkat menjadi sekitar 0,8–0,95, bergantung pada kondisi pembebanan dan jumlah *step* kapasitor yang aktif. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa kapasitor bank mampu menyuplai daya reaktif kapasitif sehingga kebutuhan daya reaktif dari sumber berkurang. Kondisi ini sesuai dengan prinsip kerja kompensasi faktor daya, di mana daya reaktif yang sebelumnya disuplai oleh jaringan digantikan oleh kapasitor bank.

Perubahan tersebut juga terlihat pada nilai daya reaktif. Sebelum kompensasi, daya reaktif berada pada kisaran 1,0–3,8 kVAR, sedangkan setelah kompensasi turun menjadi sekitar 141–510 VAR. Penurunan daya reaktif ini menunjukkan bahwa sebagian besar kebutuhan daya reaktif beban telah dipenuhi oleh VAR *Compensator*, sehingga daya reaktif yang ditarik dari sumber listrik menjadi jauh lebih kecil.

Selain menurunkan daya reaktif, pengoperasian VAR *Compensator* juga menyebabkan arus sistem menurun secara signifikan. Sebelum kompensasi, arus saluran berada pada kisaran 5–17 A, sedangkan setelah kompensasi turun menjadi sekitar 1–5 A. Penurunan arus ini merupakan konsekuensi langsung dari meningkatnya faktor daya, karena untuk daya aktif yang relatif sama, kebutuhan arus dari sumber menjadi lebih kecil. Kondisi tersebut berpotensi mengurangi rugi-rugi daya pada penghantar serta meningkatkan efisiensi penyaluran energi listrik.

Nilai tegangan pada masing-masing fasa tidak mengalami perubahan yang berarti sebelum maupun sesudah kompensasi. Tegangan tetap berada pada kisaran 233–241 V dengan tegangan antar fasa sekitar 403–415 V, sehingga dapat disimpulkan bahwa pengoperasian VAR *Compensator* tidak memengaruhi kestabilan tegangan sistem. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi utama sistem lebih berfokus pada perbaikan faktor daya dan pengurangan daya reaktif dibandingkan perubahan profil tegangan.

Hasil pengukuran menggunakan sensor PZEM-004T juga menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil pengukuran Lutron *Power Analyzer*. Perbedaan nilai yang diperoleh pada parameter tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, maupun faktor daya relatif kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor PZEM-004T mampu memberikan hasil pengukuran yang representatif untuk digunakan sebagai perangkat monitoring pada sistem VAR *Compensator*.

3.3.3 Pengujian Respon VAR *Compensator* terhadap Perubahan Beban

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan VAR *Compensator* dalam merespons perubahan kondisi pembebanan secara otomatis. Selama pengujian, beban ditambah dan dikurangi secara bertahap sehingga nilai faktor daya sistem mengalami perubahan. Berdasarkan hasil pembacaan sensor PZEM-004T, sistem mengaktifkan atau menonaktifkan *step* kapasitor sesuai kebutuhan kompensasi daya reaktif agar faktor daya tetap berada pada rentang target tanpa menyebabkan kondisi *leading*. Hasil pengujian respon sistem terhadap variasi pembebanan disajikan pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Pengujian beban bertingkat

BEBAN	ARUS Awal	ARUS Akhir	PF Awal	PF Akhir	VAR Awal	VAR Akhir	Waktu Respon	Step
Yuema 1, yuema 2, Fujital dan HPS	R = 3,14	R = 1,04	R = 0,19	R = 0,51	R = 740	R = 216,4	R = 30	R = 1
	S = 2,81	S = 1,20	S = 0,21	S = 0,44	S = 649,3	S = 254,6	S = 30	S = 1
	T = 3,04	T = 1,07	T = 0,27	T = 0,62	T = 690,2	T = 236,3	T = 30	T = 1
+ Tatung 3 HP	R = 2,49	R = 1,76	R = 0,31	R = 0,41	R = 568,9	R = 386	R = 50	R = 2
	S = 2,31	S = 1,99	S = 0,44	S = 0,45	S = 450,2	S = 419	S = 50	S = 2
	T = 2,63	T = 1,99	T = 0,47	T = 0,5	T = 550	T = 377	T = 50	T = 2
+ tatung 5 HP	R = 4,43	R = 1,89	R = 0,29	R = 0,660	R = 1015,6	R = 342	R = 70	R = 3
	S = 4,03	S = 1,94	S = 0,4	S = 0,82	S = 873,3	S = 264	S = 70	S = 3

T = 4,78	T = 2,4	T = 0,4	T = 0,81	T = 1028,3	T = 329	T = 70	T = 3
----------	---------	---------	----------	------------	---------	--------	-------

Tabel 9. Pengujian beban menurun

BEBAN	ARUS Awal	ARUS Akhir	PF Awal	PF Akhir	VAR Awal	VAR Akhir	Waktu Respon	Step
Yuema 1	R = 13,43	R = 1,86	R = 0,12	R = 0,67	R = 3157	R = 345	R = 10	R = 3
yuema 2	S = 12,8	S = 1,97	S = 0,16	S = 0,813	S = 2990	S = 267	S = 10	S = 3
fujita 250 + tatung 3 hp + tatung 5 hp	T = 13,72	T = 2,3	T = 0,17	T = 0,82	T = 3160	T = 322	T = 10	T = 3
- tatung 5 hp dan tatung 3 hp	R = 7,25 S = 8,23 T = 8,12	R = 1,05 S = 1,23 T = 1,1	R = 0,23 S = 0,35 T = 0,32	R = 0,52 S = 0,46 T = 0,63	R = 326 S = 248 T = 325	R = 217 S = 256,2 T = 239	R = 20 S = 20 T = 20	R = 1 S = 1 T = 1

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 9, sistem VAR *compensator* mampu menyesuaikan jumlah *step* kapasitor secara adaptif mengikuti perubahan kondisi beban. Ketika beban meningkat akibat penambahan motor, kebutuhan daya reaktif juga meningkat sehingga sistem secara otomatis mengaktifkan *step* kapasitor yang lebih besar untuk meningkatkan faktor daya. Sebaliknya, saat beban dikurangi, sistem menonaktifkan sebagian *step* kapasitor agar kapasitas kompensasi tetap sesuai dengan kebutuhan beban. Mekanisme ini menunjukkan bahwa algoritma yang diterapkan mampu melakukan pengambilan keputusan secara otomatis berdasarkan nilai faktor daya yang terukur sehingga risiko *overcompensation* dapat diminimalkan.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa pengaktifan kapasitor memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan daya reaktif (VAR) pada setiap fasa. Penurunan daya reaktif tersebut diikuti dengan peningkatan nilai faktor daya dari kondisi awal yang relatif rendah menjadi nilai yang lebih baik setelah proses kompensasi dilakukan. Selain itu, arus pada masing-masing fasa juga mengalami penurunan setelah kapasitor diaktifkan, yang menunjukkan bahwa kebutuhan arus reaktif dari sumber telah berkurang. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem kompensasi bekerja sesuai dengan prinsip perbaikan faktor daya, yaitu menyuplai kebutuhan daya reaktif melalui kapasitor sehingga beban pada jaringan listrik menjadi lebih ringan.

Waktu respon sistem selama pengujian berada pada rentang 10 hingga 70 detik, bergantung pada perubahan kondisi beban dan jumlah *step* kapasitor yang harus diaktifkan atau dinonaktifkan. Perbedaan waktu respon tersebut menunjukkan bahwa proses switching dilakukan secara bertahap sesuai algoritma yang diterapkan sehingga perpindahan antar *step* menjadi lebih stabil dan dapat mengurangi kemungkinan terjadinya *hunting* akibat perubahan beban yang bersifat sesaat. Secara keseluruhan, hasil pengujian membuktikan bahwa sistem APFC berbasis ESP32 mampu melakukan

kompensasi daya reaktif secara otomatis, adaptif, dan efektif dalam meningkatkan faktor daya serta menjaga kestabilan operasi sistem distribusi tiga fasa.

4. PENUTUP

Rancang bangun VAR Compensator bertingkat berbasis mikrokontroler ESP32 telah berhasil diimplementasikan untuk memonitor dan melakukan kompensasi daya reaktif pada jaringan 3 fasa secara adaptif. Sistem ini terbukti bekerja dengan stabil berkat penerapan algoritma kendali yang secara presisi mempertahankan status aktuasi (latched steps) setelah target faktor daya tercapai, sehingga efektif mencegah perangkat terjebak dalam siklus penyalaan kontaktor terus-menerus (continuous looping) saat merespons dinamika beban. Keandalan pengendalian ini juga didukung kuat oleh performa modul sensor PZEM-004T yang menunjukkan tingkat akurasi sangat tinggi; hasil kalibrasi terhadap instrumen standar Lutron Power Analyzer mencatatkan rata-rata persentase error gabungan untuk pengukuran parameter kelistrikan hanya sebesar 0,838%.

Secara operasional, penerapan sistem ini memberikan dampak yang masif terhadap efisiensi kualitas daya, yang dibuktikan dengan melonjaknya nilai faktor daya dari rentang kritis 0,08–0,22 menjadi 0,79–0,93 pasca-kompensasi. Peningkatan tersebut secara langsung memicu penurunan drastis pada tarikan daya reaktif dan beban arus saluran dari sumber jaringan. Selain itu, sistem menunjukkan responsivitas yang sangat baik saat dihadapkan pada fluktuasi beban induktif, termasuk pada pengujian variasi beban motor listrik. Dengan durasi penyesuaian otomatis yang berada pada rentang 10 detik tiap step, transisi step kapasitor berjalan aman dan proporsional tanpa menimbulkan risiko kondisi leading akibat kompensasi berlebih (over-compensation).

PERSANTUNAN

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat-Nya sehingga naskah publikasi mengenai sistem monitoring dan pengaturan daya reaktif bertahap adaptif pada jaringan 3 fasa berbasis mikrokontroler ini dapat diselesaikan dengan baik. Keberhasilan penyusunan penelitian ini tentu tidak lepas dari doa, kasih sayang, dan dukungan moral maupun material dari orang tua. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Ir. Rizki Nurilyas Ahmad, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing atas segala arahan dan evaluasinya, seluruh jajaran dosen dan tenaga kependidikan Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta atas ilmu yang diberikan, serta Laboratorium Teknik Elektro UMS yang memfasilitasi penuh proses pengujian sistem. Melalui karya ini, penulis berharap penelitian yang telah dilakukan mampu memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan teknologi *Automatic Power Factor Correction* (APFC) sekaligus menjadi referensi yang bermanfaat untuk studi selanjutnya di bidang kualitas daya listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Adragna, C., Bianco, A., Gritti, G., & Sucameli, M. (2024). *State-of-the-Art Power Factor Correction : An Industry Perspective Power tion : An Industry Perspective . Encyclopedia*. 1324–1354.
- Ajenikoko, G. A., Adigun, O., & Rafiu, A. O. (2018). *Control Techniques and Power Factor Correction Methods : A Review*. 2(1), 1–13. <https://doi.org/10.9734/JERR/2018/v2i19883>
- Alberto, J., Magaña, C., & Magaña, A. M. (2026). *Experimental Validation of a Low-Cost IoT-Based Residential Electrical Monitoring System using ESP32 and PZEM-004T*. 7–14.
- Dang, J., Tang, F., Wang, J., Yu, X., & Deng, H. (2023). A Differentiated Dynamic Reactive Power Compensation Scheme for the Suppression of Transient Voltage Dips in Distribution Systems. *Sustainability (Switzerland)*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/su151813816>
- Diniş, C. M., & Popa, G. N. (2024). An Experimental Analysis of Three-Phase Low-Voltage Power Factor Controllers Used in a Deforming Regime. *Energies*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/en17071647>
- Manik, U. P. (2025). *3-Phase Electrical Power Factor Improvement Simulator System Design Based on Automatic Control*. 2(1), 258–268.
- Rudianta, B., Hafizhuddin, M., & Syakur, A. (2022). *Perbaikan Faktor Daya Beban Induktif di Industri dengan Menggunakan Kapasitor Shunt*. 77–82.
- Wibowo, D. T., Nasution, R., & Pelawi, Z. (2018). *ANALISIS PERBAIKAN FAKTOR DAYA MENGGUNAKAN KAPASITOR BANK DI MASJID AGUNG SERDANG BEDAGAI*. 1099, 1–6.
- Adragna, C., Bianco, A., Gritti, G., & Sucameli, M. (2024). *State-of-the-Art Power Factor Correction : An Industry Perspective Power tion : An Industry Perspective . Encyclopedia*. 1324–1354.
- Ajenikoko, G. A., Adigun, O., & Rafiu, A. O. (2018). *Control Techniques and Power Factor Correction Methods : A Review*. 2(1), 1–13. <https://doi.org/10.9734/JERR/2018/v2i19883>
- Alberto, J., Magaña, C., & Magaña, A. M. (2026). *Experimental Validation of a Low-Cost IoT-Based Residential Electrical Monitoring System using ESP32 and PZEM-004T*. 7–14.
- Dang, J., Tang, F., Wang, J., Yu, X., & Deng, H. (2023). A Differentiated Dynamic Reactive Power Compensation Scheme for the Suppression of Transient Voltage Dips in Distribution Systems. *Sustainability (Switzerland)*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/su151813816>
- Diniş, C. M., & Popa, G. N. (2024). An Experimental Analysis of Three-Phase Low-Voltage Power Factor Controllers Used in a Deforming Regime. *Energies*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/en17071647>
- Manik, U. P. (2025). *3-Phase Electrical Power Factor Improvement Simulator System Design Based on Automatic Control*. 2(1), 258–268.

- Rudianta, B., Hafizhuddin, M., & Syakur, A. (2022). *Perbaikan Faktor Daya Beban Induktif di Industri dengan Menggunakan Kapasitor Shunt*. 77–82.
- Wibowo, D. T., Nasution, R., & Pelawi, Z. (2018). *ANALISIS PERBAIKAN FAKTOR DAYA MENGGUNAKAN KAPASITOR BANK DI MASJID AGUNG SERDANG BEDAGAI*. 1099, 1–6.