

RANCANG BANGUN APFC BERTINGKAT BERBASIS ESP32 PADA JARINGAN SATU FASA

Buyung Arya Putranda Jaya; Aris Budiman, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Rendahnya faktor daya pada beban induktif menyebabkan meningkatnya kebutuhan daya reaktif, rugi-rugi daya, serta menurunkan efisiensi sistem tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem *Automatic Power Factor Correction* (APFC) bertingkat berbasis ESP32 pada jaringan 1 fasa guna memperbaiki faktor daya secara otomatis. Sistem menggunakan sensor PZEM-004T untuk membaca parameter kelistrikan secara *real-time*, relay dan kontaktor sebagai pengendali kapasitor bank bertingkat, serta aplikasi Blynk IoT untuk *monitoring* jarak jauh. Pengujian dilakukan pada kondisi beban bertahap naik, bertahap turun, dan perubahan beban secara acak untuk mengevaluasi kinerja sistem terhadap perubahan kondisi operasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu meningkatkan faktor daya dari 0,44 menjadi 0,79 pada kondisi beban induktif serta mempertahankan faktor daya pada rentang 0,80–0,98 pada berbagai kondisi pengujian. Metode *relearning* yang diterapkan mampu menyesuaikan jumlah kapasitor saat terjadi penurunan beban sehingga mengurangi risiko overkompensasi. Hasil validasi sensor PZEM-004T terhadap *clamp meter* menunjukkan nilai *error* rata-rata sebesar 1,4%. Selain itu, aplikasi Blynk mampu menampilkan parameter kelistrikan dan status kapasitor secara *real-time*. Berdasarkan hasil pengujian, sistem APFC yang dirancang mampu memperbaiki faktor daya secara otomatis dan menyesuaikan kompensasi daya reaktif sesuai perubahan beban pada jaringan 1 fasa.

Kata Kunci: *Automatic Power Factor Correction*, ESP32, PZEM-004T, Faktor Daya, Kapasitor Bank, Blynk IoT.

Abstract

A low power factor in inductive loads increases reactive power demand, power losses, and reduces the efficiency of electrical power systems. This study aims to design and implement a multi-step Automatic Power Factor Correction (APFC) system based on ESP32 for a single-phase electrical network. The system utilizes a PZEM-004T sensor to measure electrical parameters in real time, relays and contactors to control the capacitor bank, and the Blynk IoT platform for remote monitoring. System performance was evaluated under gradual load increase, gradual load decrease, and random load variation conditions. The results show that the proposed system was able to improve the power factor from 0.44 to 0.79 under inductive load conditions and maintain the power factor within the range of 0.80–0.98 under various operating conditions. The implemented relearning method enabled the system to adjust the capacitor combination when load reduction occurred, thereby reducing the risk of overcompensation. Validation results between the PZEM-004T sensor and a clamp meter indicated an average error of 1.4%. In addition, the Blynk application successfully displayed electrical parameters and capacitor bank status in real time. The results demonstrate that the proposed APFC system can automatically improve the power factor and adapt reactive power compensation according to load variations in a single-phase electrical network.

Keywords: *Automatic Power Factor Correction*, ESP32, PZEM-004T, Power Factor, Capacitor Bank, Blynk IoT.

1. PENDAHULUAN

Penggunaan energi listrik pada sektor industri maupun rumah tangga saat ini semakin meningkat seiring berkembangnya penggunaan listrik berbeban induktif. Peralatan seperti motor induksi, transformator, dan mesin produksi memerlukan daya reaktif dalam proses kerjanya sehingga mengakibatkan nilai faktor daya menjadi rendah. Kondisi tersebut dapat membuat arus pada sistem meningkat dan menimbulkan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi listrik. Rendahnya faktor daya memberi dampak menurunnya efisiensi penggunaan energi listrik serta dapat memperbesar pembebanan pada peralatan distribusi tenaga listrik (Maribe, 2025).

Pada sistem tenaga listrik arus bolak-balik, faktor daya merupakan parameter yang menunjukkan tingkat efisiensi penggunaan energi listrik. Nilai faktor daya diperoleh dari perbandingan daya aktif terhadap daya semu. Faktor daya yang memiliki nilai mendekati satu menandakan bahwa energi listrik dimanfaatkan secara optimal, sedangkan nilai faktor daya yang rendah menunjukkan besarnya daya reaktif yang terserap pada sistem jaringan listrik (Naqash & Rashid, 2023). Rendahnya faktor daya tidak hanya menyebabkan kerugian teknis seperti meningkatnya rugi-rugi daya, namun juga menyebabkan kerugian ekonomi akibat bertambahnya biaya penggunaan energi listrik (Rija et al., 2020).

Rendahnya nilai faktor daya terjadi karena didominasinya penggunaan beban induktif pada jaringan listrik. Beban induktif menyebabkan arus tertinggal terhadap tegangan atau biasa disebut *lagging power factor*. Kondisi ini mengakibatkan meningkatnya arus yang mengalir pada sistem distribusi sehingga rugi-rugi daya bertambah dan kapasitas penyaluran daya aktif menjadi berkurang (Rija et al., 2020). Oleh karena itu diperlukan metode yang dapat mengurangi daya reaktif agar sistem tenaga listrik dapat bekerja secara efisien.

Berdasarkan ketentuan PT PLN (Persero), nilai faktor daya minimum yang dipersyaratkan adalah 0,85. Apabila nilai faktor daya berada di bawah batas tersebut, pelanggan dapat dikenakan biaya kelebihan pemakaian energi reaktif ($kVArh$), sehingga diperlukan upaya perbaikan faktor daya agar memenuhi standar yang telah ditetapkan (Utomo et al., 2024). Tujuan utama proses koreksi faktor daya adalah meningkatkan nilai faktor daya hingga mendekati *unity power factor* sehingga kebutuhan daya reaktif dapat dikurangi dan efisiensi sistem tenaga listrik meningkat (Naqash & Rashid, 2023).

Salah satu metode yang sering digunakan untuk memperbaiki faktor daya adalah dengan memasang kapasitor bank. Kapasitor bank dapat menyuplai daya reaktif kapasitif yang dapat mengimbangi daya reaktif induktif dari beban sehingga nilai faktor daya dapat meningkat mendekati *unity power factor* atau nilai satu. Penggunaan kapasitor bank dinilai lebih praktis karena mudah diterapkan, biaya pemeliharaan yang rendah, dan mampu meningkatkan kualitas sistem distribusi tenaga listrik (Hartono et al., 2022). Pemasangan kapasitor bank juga dapat membantu mengurangi nilai jatuh tegangan dan memperbaiki stabilitas sistem kelistrikan (Ferdiansah et al., 2023).

Selain meningkatkan faktor daya, penggunaan kapasitor bank juga perlu memperhatikan aspek keselamatan selama proses pengoperasian. Setelah kapasitor diputus dari sumber tegangan, masih terdapat muatan listrik yang tersimpan sehingga dapat menimbulkan tegangan sisa (*residual voltage*). Oleh karena itu, diperlukan resistor pengosongan (*discharge resistor*) untuk mempercepat pelepasan muatan listrik hingga mencapai batas aman sesuai standar. Penentuan nilai resistor pengosongan disesuaikan dengan karakteristik kapasitor, seperti nilai kapasitansi, tegangan kerja, serta waktu pengosongan yang dipersyaratkan sehingga keamanan pengoperasian kapasitor bank tetap terjamin (ABB, 2011).

Seiring berkembangnya teknologi, sistem koreksi faktor daya dapat dilakukan secara otomatis menggunakan mikrokontroler. *Automatic Power Factor Correction* (APFC) merupakan sistem yang bekerja dengan membaca parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya, dan faktor daya, kemudian menentukan kapasitor mana yang harus menyala sesuai kondisi beban. Sistem otomatis ini mampu memberi respon yang lebih cepat dibandingkan pengoperasian secara manual sehingga proses kompensasi daya reaktif menjadi lebih efisien (Rija et al., 2020).

Sensor PZEM-004T mampu membaca parameter listrik secara *real-time* meliputi tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya. Hal tersebut menandakan berkembangnya penggunaan sensor *digital* untuk sistem *monitoring* listrik. PZEM-004T dinilai cukup efektif untuk diterapkan pada sistem *monitoring* dan pengendalian berbasis mikrokontroler (Sirait et al., 2025). Perkembangan *Internet of Things* (IoT) dapat berguna untuk memantau hasil pengukuran sistem dari jarak jauh menggunakan jaringan internet (Surya et al., 2023).

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan sistem APFC mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik dan memperbaiki kualitas daya pada jaringan distribusi. Penelitian mengenai pengontrolan kapasitor bank otomatis menunjukkan bahwa sistem mampu meningkatkan nilai faktor daya secara bertahap sesuai perubahan beban yang terjadi (Naqash & Rashid, 2023). Peneliti lain juga menjelaskan bahwa sistem koreksi faktor daya berbasis mikrokontroler dapat membantu mengurangi konsumsi daya reaktif dan memperbaiki performa sistem tenaga listrik (Maribe, 2025).

Dari permasalahan tersebut, pada penelitian ini dirancang sistem *Automatic Power Factor Correction* (APFC) berbasis ESP 32 dengan sensor PZEM-004T untuk memantau parameter kelistrikan secara *real-time*. Sistem bekerja dengan mengendalikan relay dan kontaktor untuk menghubungkan kapasitor bank secara otomatis sesuai kondisi faktor daya pada beban motor induksi 1 fasa dan terdapat juga lampu indikator untuk mengetahui step mana saja yang menyala. Sistem ini juga menggunakan aplikasi Blynk IoT untuk memantau parameter kelistrikan melalui *smartphone*.

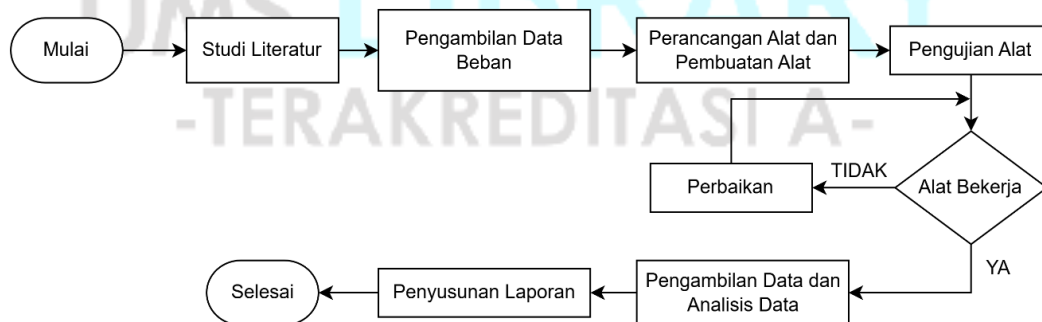
Dengan adanya sistem ini diharapkan nilai faktor daya dapat meningkat, rugi-rugi daya berkurang, dan penggunaan energi listrik menjadi lebih efisien.

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem APFC bertingkat berbasis ESP32 sebagai solusi untuk meningkatkan faktor daya pada jaringan satu fasa yang didominasi beban induktif. Selain merancang sistem, penelitian ini juga bertujuan menganalisis kinerja APFC melalui pengamatan perubahan nilai faktor daya setelah proses kompensasi serta mengevaluasi respon *switching* kapasitor bank dalam menyesuaikan perubahan kondisi beban.

2. METODE

2.1 Tahapan Penelitian

Terdapat beberapa tahapan penelitian dalam pembuatan sistem *Automatic Power Factor Correction* (APFC) seperti yang terdapat pada gambar 1. Tahapan awal yang dilakukan adalah studi literatur dengan mencari referensi jurnal sebagai acuan awal dan memahami tentang sistem kerja alat yang akan dibuat. Selanjutnya yaitu pengambilan data beban awal seperti parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya, dan faktor daya pada beban untuk memperhitungkan berapa kebutuhan nilai kapasitor yang diperlukan. Selanjutnya perancangan dan pembuatan alat seperti rancangan sistem yang sudah ditentukan, kemudian pengujian alat yang sudah dibuat jika terdapat *error* maka dilakukan perbaikan pada alat agar berfungsi sesuai yang diharapkan. Setelah alat bekerja sesuai yang diharapkan maka dilanjutkan pengambilan data dengan sistem. Tahapan terakhir yaitu melakukan penyusunan laporan dan menganalisis data yang sudah didapatkan.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

2.2 Persiapan Alat dan Bahan

Dalam proses pembuatan alat memerlukan beberapa alat dan bahan yang diperlukan dapat dilihat seperti pada Tabel 1.

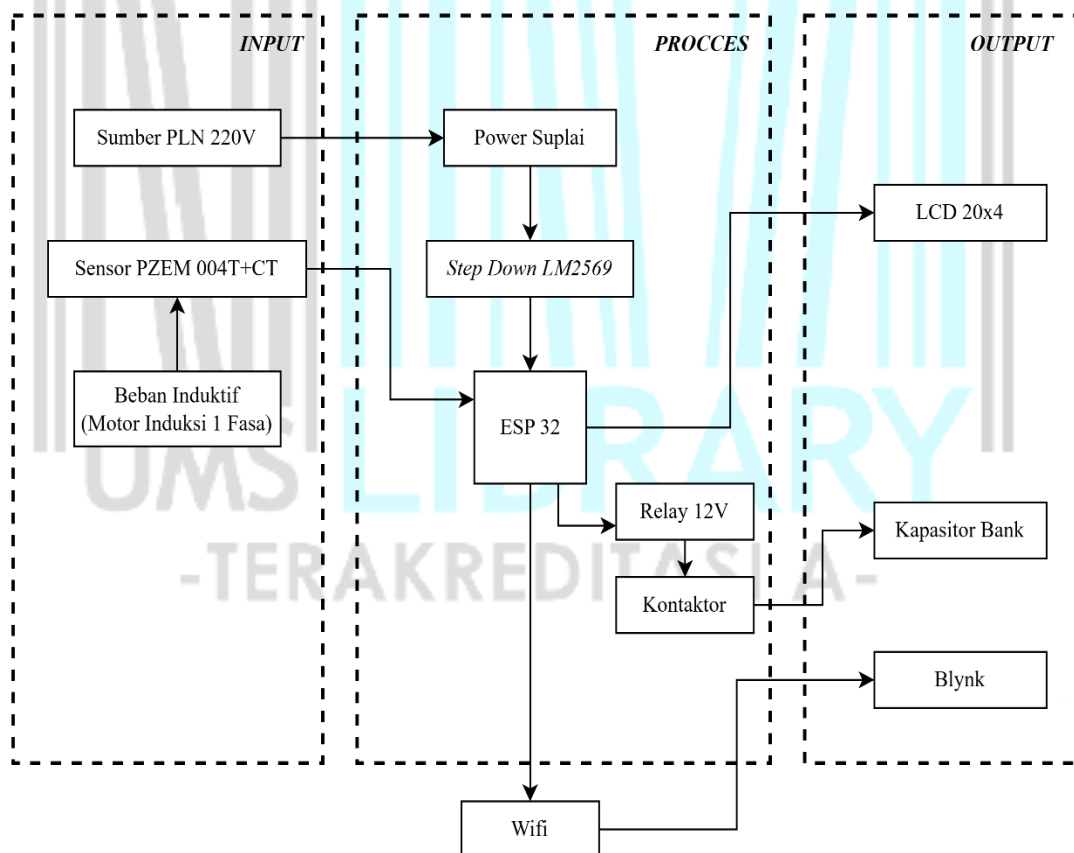
Tabel 1. Alat dan Bahan

Alat dan Bahan	Jumlah	Alat dan Bahan	Jumlah
ESP 32 DEV V1	1	MCB 1 Fasa	2

PZEM-004T	1	Kapasitor 10uF	1
Relay 5 pin 12 VDC	5	Kapasitor 15uF	1
Terminal listrik isi 12	1	Kapasitor 20uF	1
Terminal listrik isi 4	1	Kapasitor 25uF	1
Kontaktor	5	Kapasitor 30uF	1
Plug Mounting (Steker)	1	NYAF 1x1,5mm (5 meter)	2
PSU 12 V	1	NYAF 2x2,5mm (3meter)	1
Stepdown LM2965	1	Motor 1 fasa	5

2.3 Blok Diagram dan Wiring Diagram

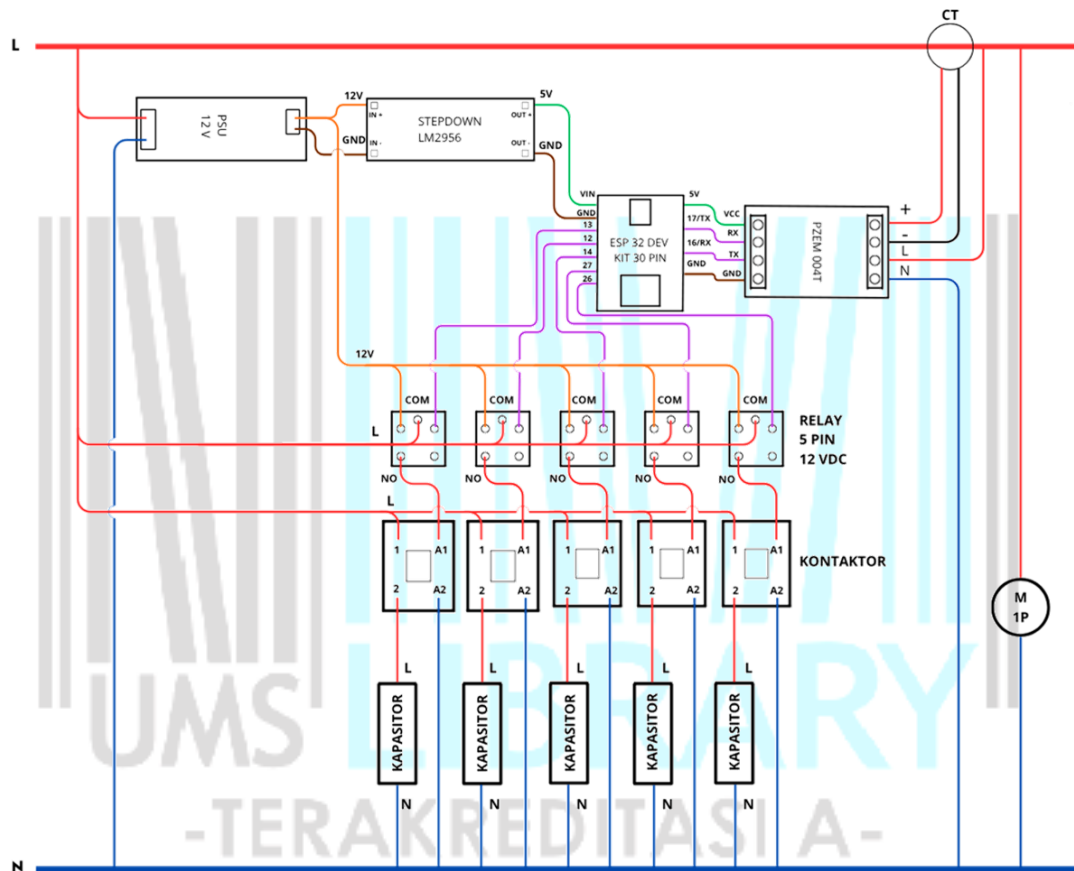
Perancangan sistem pada penelitian ini disajikan dalam bentuk *blok diagram* dan *wiring diagram* yang dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3. *Blok diagram* menjelaskan alur kerja sistem, sedangkan *wiring diagram* menunjukkan konfigurasi pengkabelan setiap komponen.



Gambar 2. Blok Diagram Rancangan Sistem

Gambar 2 merupakan *blok diagram* sistem untuk mengkoreksi power faktor secara otomatis dengan menggunakan IoT untuk *monitoring* parameter kelistrikan dan step yang menyala menggunakan *smartphone*. Alat ini menggunakan sumber PLN 220V yang diturunkan menjadi 12V melalui *power supply* untuk mensuplai relay lalu sebelum dilanjutkan ke rangkaian, tegangan akan diturunkan menjadi 5V melalui *Stepdown* LM2569 agar komponen tersuplai tegangannya sesuai kebutuhan. ESP 32 merupakan mikrokontroler yang berfungsi untuk mengolah data dari sensor PZEM-004T lalu data

tersebut ditampilkan di LCD I2C dan aplikasi Blynk Iot. PZEM-004T membaca parameter listrik dari beban motor induksi 1 fasa, terdapat beberapa parameter yang dibaca yaitu tegangan, arus, daya, frekuensi, dan power faktor. Power faktor merupakan parameter utama yang dipantau oleh sistem ini apabila nilainya terdapat dibawah ambang batasnya maka ESP 32 akan mengirim sinyal untuk mengaktifkan relay lalu relay mengaktifkan kontaktor yang terhubung dengan kapasitor bank yang berfungsi untuk menyuplai daya reaktif kapasitif agar dapat mengimbangi daya reaktif induktif. Informasi dari alat ini akan ditampilkan melalui LCD 20x4 dan aplikasi Blynk IoT.



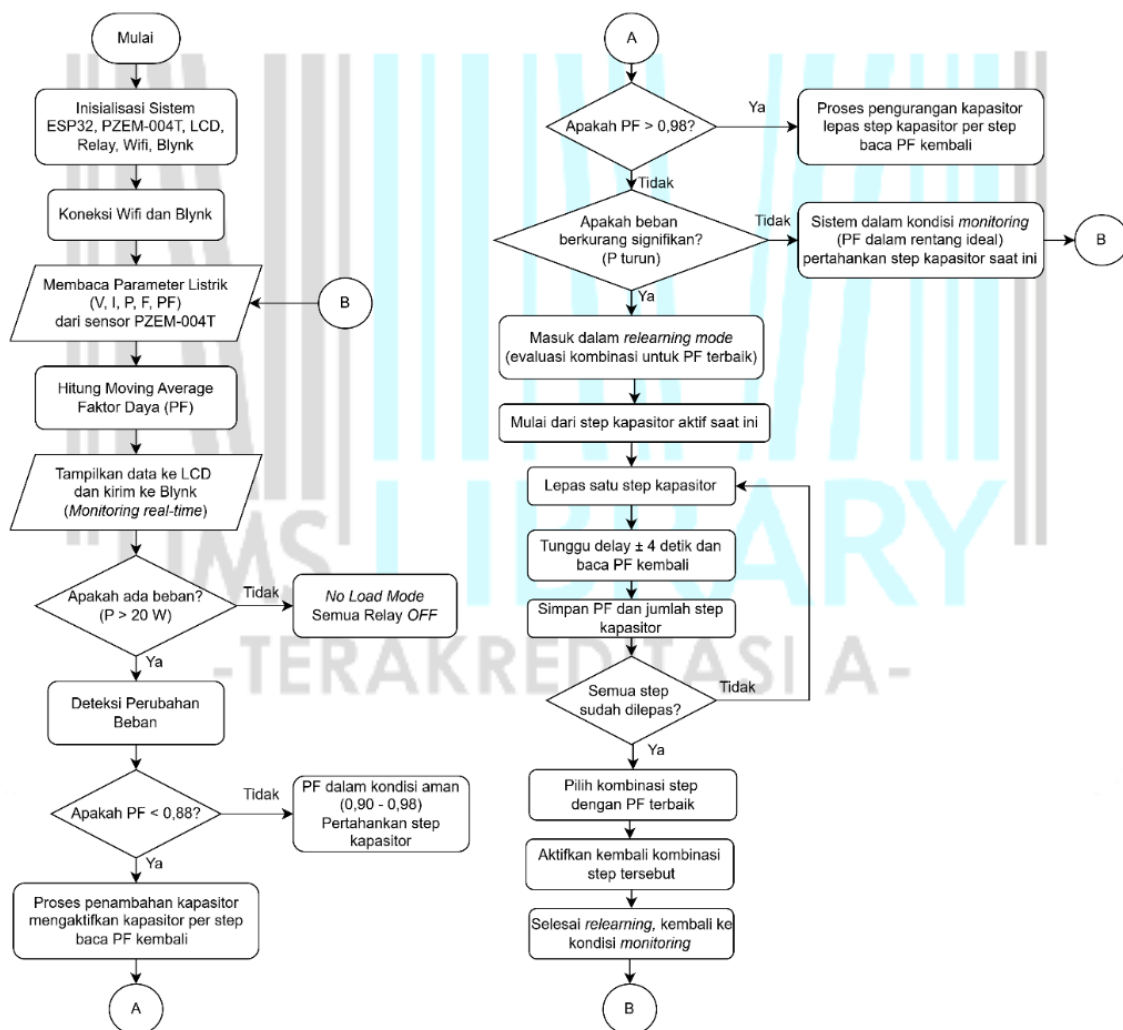
Gambar 3. *Wiring diagram*

Gambar 3 menunjukkan *wiring diagram* dari sistem *Automatic Power Factor Correction* (APFC) berbasis ESP32 pada beban motor induksi 1 fasa. Sistem menggunakan sumber 220 VAC yang terhubung pada *power supply* 12 VDC untuk mensuplai relay dan rangkaian kontrol. Tegangan keluaran dari *power supply* kemudian diturunkan Kembali menjadi 5 VDC menggunakan *stepdown* LM2596 agar sesuai dengan kebutuhan kerja ESP32 dan sensor PZEM-004T. ESP32 berfungsi sebagai pusat kontrol sistem dengan menerima data pembacaan dari sensor PZEM-004T. Sensor PZEM-004T digunakan untuk membaca parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya, frekuensi, dan faktor daya pada beban motor induksi 1 fasa. Pembacaan nilai arus digunakan menggunakan *Current Transformer* (CT) yang terpasang pada jalur fasa menuju beban. Data dari pembacaan PZEM-004T akan diproses oleh ESP32 untuk menentukan kondisi faktor daya pada sistem, apabila nilai faktor daya

berada dibawah batas yang telah ditentukan maka ESP32 akan memberikan sinyal keluaran ke relay 12 VDC, relay kemudian mengaktifkan kontaktor yang terhubung dengan kapasitor bank secara bertahap sesuai kebutuhan kompensasi daya reaktif. Kontaktor berfungsi sebagai penghubung antara sumber tegangan dengan kapasitor bank, ketika kontaktor aktif kapasitor akan terhubung secara paralel dengan beban sehingga mampu menghasilkan daya rekatif kapasitif untuk mengimbangi daya rekatif induktif yang dihasilkan dari motor induksi 1 fasa. Dengan adanya kompensasi tersebut nilai faktor daya pada sistem dapat meningkat mendekati kondisi ideal.

2.4 Diagram Alir Sistem

Diagram alir sistem pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4. Diagram tersebut menjelaskan alur kerja sistem secara keseluruhan mulai dari inisialisasi hingga proses monitoring dan pengendalian faktor daya.



Gambar 4. Diagram alir sistem

Diagram alir sistem pada Gambar 4 menjelaskan mekanisme kerja *Automatic Power Factor Correction* (APFC) bertingkat berbasis ESP32. Sistem diawali dengan proses inisialisasi seluruh komponen, meliputi ESP32, sensor PZEM-004T, LCD I2C, relay, serta koneksi WiFi dan Blynk. Selanjutnya ESP32 membaca parameter kelistrikan berupa tegangan, arus, daya aktif, frekuensi, dan faktor daya

dari sensor PZEM-004T. Nilai faktor daya kemudian diproses menggunakan metode *moving average* untuk mengurangi fluktuasi pembacaan sebelum ditampilkan pada LCD dan dikirimkan ke aplikasi Blynk sebagai media pemantauan secara *real-time*.

Setelah itu sistem mendeteksi keberadaan beban. Apabila tidak terdapat beban, seluruh relay dimatikan sehingga bank kapasitor dilepas (*No Load Mode*). Sebaliknya, jika terdapat beban, ESP32 mengevaluasi nilai faktor daya. Ketika faktor daya berada di bawah batas yang ditentukan, sistem akan menambahkan kapasitor secara bertahap, sedangkan apabila faktor daya terlalu tinggi sistem akan mengurangi kapasitor untuk menghindari *overcompensation*. Selain itu, ketika terdeteksi perubahan beban yang signifikan, sistem menjalankan proses *relearning* dengan mengevaluasi kombinasi kapasitor untuk memperoleh nilai faktor daya terbaik sesuai kondisi beban. Setelah kombinasi optimal diperoleh, sistem kembali ke kondisi *monitoring*. Seluruh proses berlangsung secara berulang (*closed-loop*) sehingga sistem mampu menyesuaikan kombinasi bank kapasitor secara otomatis berdasarkan kondisi beban yang berubah.

2.5 Dasar Perhitungan Sistem APFC

Perancangan sistem APFC memerlukan beberapa perhitungan dasar untuk menentukan kebutuhan kompensasi daya reaktif dan kapasitas kapasitor bank yang digunakan. Perhitungan tersebut meliputi daya aktif, daya semu, faktor daya, daya reaktif yang diperlukan, serta nilai kapasitansi kapasitor yang diperlukan untuk meningkatkan faktor daya sesuai dengan nilai yang ditargetkan.

2.5.1 Perhitungan Daya Aktif

Daya aktif merupakan daya yang digunakan oleh beban untuk melakukan kerja nyata dan dinyatakan dalam satuan Watt (W). Nilai daya aktif dapat dihitung menggunakan persamaan 1.

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

Keterangan:

- P = Daya Aktif (W)
- V = Tegangan (V)
- I = Arus (A)
- $\cos(\varphi)$ = Faktor Daya (VAR)

2.5.2 Perhitungan Daya Semu

Daya semu merupakan nilai dari perkalian antara tegangan dan arus tanpa menggunakan faktor daya. Nilai daya semu dapat dihitung menggunakan persamaan 2.

$$S = V \times I \quad (2)$$

Keterangan:

- S = Daya Semu (VA)
- V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

2.5.3 Perhitungan Faktor Daya

Nilai faktor daya dapat diperoleh melalui perbandingan antara daya aktif dan daya semu. Nilai faktor daya dapat dihitung menggunakan persamaan 3.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (3)$$

Keterangan:

$\cos(\varphi)$ = Faktor Daya (VAR)

P = Daya Aktif (W)

S = Daya Semu (VA)

2.5.4 Perhitungan Daya Reaktif yang Diperlukan

Besarnya daya reaktif yang perlu disuplai kapasitor untuk meningkatkan faktor daya dapat dihitung dengan persamaan berikut. Nilai daya reaktif yang diperlukan dapat dihitung menggunakan persamaan 4.

$$Q_c = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (4)$$

Keterangan:

Q_c = Daya Reaktif Kapasitor (VAR)

P = Daya Aktif (W)

$\tan\varphi_1$ = Sudut Faktor Daya Awal

$\tan\varphi_2$ = Sudut Faktor Daya yang Dituju

2.5.5 Perhitungan Kapasitansi Kapasitor

Nilai Kapasitansi yang dibutuhkan dapat dihitung dengan persamaan berikut. Nilai kapasitansi kapasitor dapat dihitung menggunakan persamaan 5.

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f V^2} \quad (5)$$

Keterangan:

C = Kapasitansi (F)

Q_c = Faktor Daya (VAR)

F = Frekuensi (Hz)

V = Tegangan (V)

2.5.6 Perhitungan Resistor Pengosongan pada Kapasitor Bank

Nilai resistor pengosongan (*discharge resistor*) ditentukan berdasarkan nilai kapasitansi, tegangan awal, tegangan akhir, dan waktu pengosongan kapasitor. Perhitungan nilai resistor pengosongan dapat dilakukan menggunakan Persamaan 6.

$$R \leq \frac{t}{kC \ln\left(\frac{\sqrt{2}U_n}{U_r}\right)} \quad (6)$$

Keterangan:

R = Nilai resistor pengosongan (*discharge resistor*) (Ω)

t = Waktu pengosongan kapasitor (s)

k = Koefisien konfigurasi pemasangan resistor terhadap kapasitor

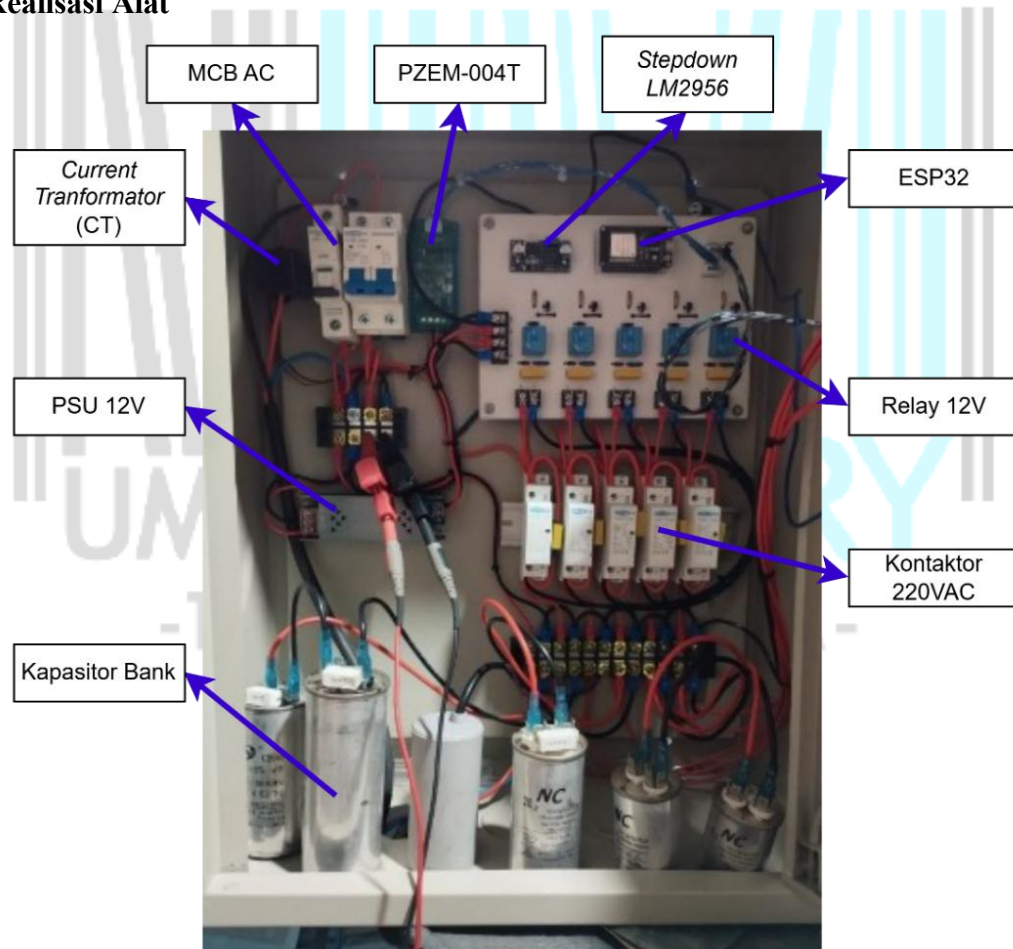
C = Kapasitansi kapasitor (F)

U_n = Tegangan nominal kapasitor (V)

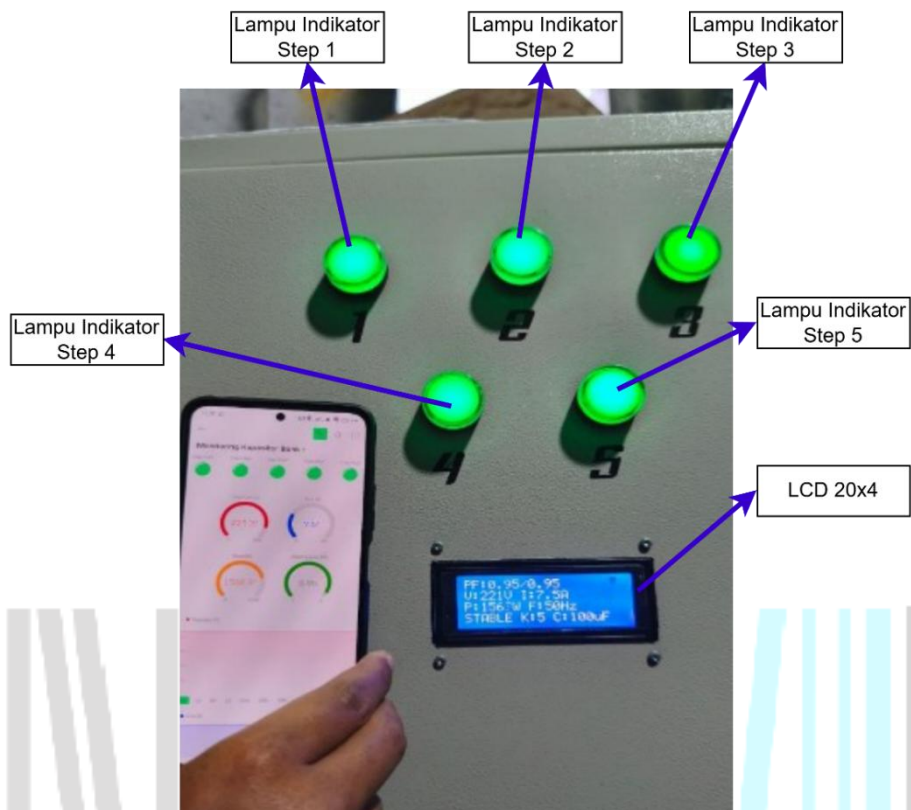
U_r = Tegangan sisa (*residual voltage*) yang diizinkan setelah proses pengosongan (V)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Realisasi Alat



Gambar 5. Komponen Dalam Panel



Gambar 6. Tampak Depan *Hardware*

Gambar 5 sampai Gambar 6 merupakan hasil dari realisasi alat untuk sistem perbaikan faktor daya beban induktif menggunakan *Automatic Power Factor Correction* (APFC) bertingkat berbasis ESP32 pada jaringan 1 fasa. Gambar 5 menunjukkan komponen yang sudah dirancang dalam panel *box*, terdiri dari MCB AC sebagai pengaman dari sistem, PSU 12V sebagai penurun tegangan dan mengkonversi tegangan AC menjadi DC sebagai suplai *coil* pada relay dan suplay kelistrikan pada komponen yang terletak di PCB, ESP32 sebagai kontrol utama dari sistem, PZEM-004T sebagai pembaca parameter kelistrikan, *relay*, kontaktor sebagai proses *switching* pengaktifan kapasitor bank, dan kapasitor bank yang berfungsi untuk mengkompensasi nilai faktor daya pada beban induktif. Gambar 6 menunjukkan tampak depan dari *hardware* yang terdiri dari *pilot lamp* sebagai lampu indikator dari step kapasitor yang aktif, *LCD display* untuk antarmuka *monitoring* kendali pada alat dan parameter kelistrikan yang dibaca oleh sensor.

3.2 Pengujian dan Pembahasan

3.2.1 Pengujian Monitoring Menggunakan Blynk

Pengujian monitoring menggunakan Blynk dilakukan untuk memastikan bahwa data hasil pengukuran dapat ditampilkan secara *real-time* melalui jaringan internet. Parameter yang ditampilkan meliputi tegangan, arus, daya, faktor daya, serta status kapasitor yang aktif. Selain menampilkan data secara langsung, Blynk juga digunakan untuk merekam perubahan dalam bentuk grafik.



Gambar 7. Tampilan *Monitoring* Blynk pada Kondisi Perubahan Beban dan Kondisi Stabil

Berdasarkan gambar 7, aplikasi Blynk mampu menampilkan parameter kelistrikan secara *real-time* baik saat terjadi perubahan beban maupun saat sistem berada pada kondisi stabil. Pada gambar sebelah kiri terlihat adanya perubahan nilai arus, daya, dan faktor daya yang ditunjukkan oleh pola grafik pada fitur *superchart*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem sedang mengalami perubahan beban sehingga parameter yang ditampilkan ikut berubah. Sementara itu, pada gambar sebelah kanan grafik cenderung mendatar yang menunjukkan bahwa seluruh beban telah aktif dan sistem telah mencapai kondisi yang relatif stabil. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa Blynk mampu menampilkan dan merekam perubahan parameter kelistrikan sesuai kondisi aktual sistem.

3.2.2 Validasi Pengukuran Sensor PZEM-004T Terhadap *Clamp Meter*

Keandalan hasil pembacaan sensor PZEM-004T pada sistem APFC dievaluasi melalui proses validasi dengan membandingkan nilai pengukuran yang dihasilkan sensor terhadap hasil pengukuran menggunakan *clamp meter* sebagai alat ukur pembanding. Tahap validasi ini dilakukan untuk mengetahui tingkat ketelitian sensor dalam mengukur parameter kelistrikan yang digunakan selama pengujian sistem. Validasi dilakukan pada kondisi sistem stabil setelah proses kompensasi selesai

dilakukan. Nilai dibandingkan meliputi parameter arus, daya, dan faktor daya. Hasil pengukuran kedua alat disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Validasi Pengukuran PZEM-004T Terhadap *Clamp Meter*

Parameter	Rata-rata PZEM-004T	Rata-rata <i>Clamp Meter</i>	Error (%)
Arus (A)	6,02	6	0,3
Daya (W)	1304,8	1274,2	2,4
Faktor Daya (PF)	0,918	0,903	1,6
<i>Error Rata-rata (%)</i>			1,4

Nilai rata-rata yang ditampilkan pada Tabel 2 diperoleh dari hasil pengukuran pada lima kondisi beban bertahap naik setelah sistem mencapai kondisi stabil. Perhitungan nilai rata-rata dilakukan menggunakan persamaan 7.

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n} \quad (7)$$

Keterangan:

$\bar{X}$ = Nilai rata-rata parameter pengukuran

X = Nilai hasil pengukuran

n = Jumlah data pengukuran

Setelah diperoleh nilai rata-rata dari masing-masing parameter, selanjutnya dilakukan perhitungan *error* untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pengukuran sensor PZEM-004T terhadap *clamp meter* sebagai alat ukur referensi. Perhitungan *error* dilakukan menggunakan persamaan 8.

$$Error(\%) = \frac{X_{PZEM} - X_{Clamp}}{X_{Clamp}} \times 100\% \quad (8)$$

Keterangan:

X_{PZEM} = Nilai rata-rata hasil pengukuran sensor PZEM-004T

X_{Clamp} = Nilai rata-rata hasil pengukuran *clamp meter*

Untuk memperoleh gambaran tingkat akurasi sensor secara keseluruhan, nilai *error* dari setiap parameter kemudian dirata-ratakan menggunakan persamaan 9.

$$\overline{Error} = \frac{Error_{Arus} + Error_{Daya} + Error_{PF}}{3} \quad (9)$$

Proses validasi antara sensor PZEM-004T dan *clamp meter* menghasilkan rata-rata kesalahan pengukuran sebesar 1,4%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa perbedaan hasil pembacaan kedua alat relatif kecil, sehingga sensor mampu mempresentasikan parameter kelistrikan dengan tingkat ketelitian yang memadai. Oleh karena itu, sensor PZEM-004T dapat digunakan sebagai perangkat pengukuran yang andal untuk mendukung proses pemantauan dan pengendalian pada sistem APFC yang dirancang.

3.2.3 Pengujian Beban Bertahap Naik

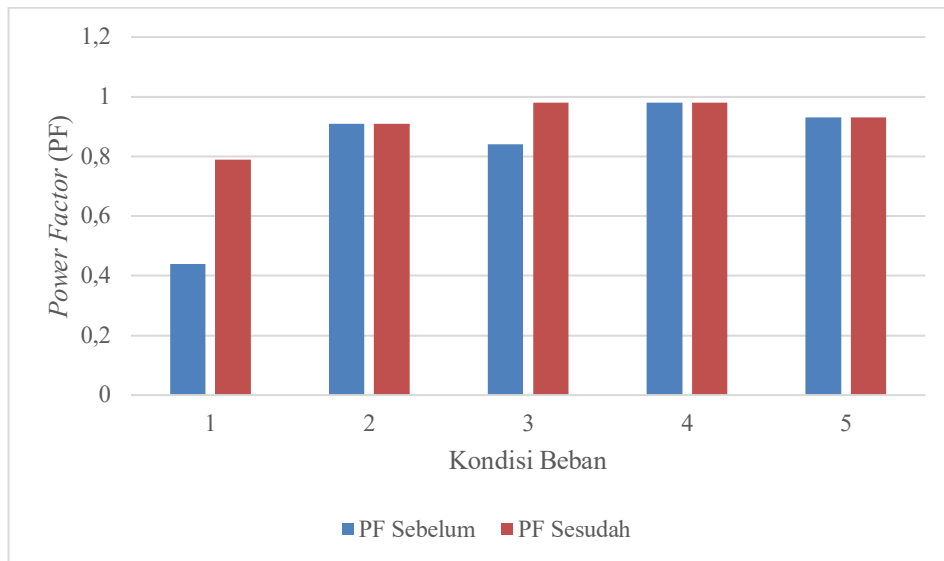
Pada tahap ini dilakukan pengujian kinerja sistem APFC pada kondisi penambahan beban secara bertahap. Pengujian bertujuan untuk mengevaluasi respons sistem dalam memperbaiki faktor daya serta memastikan bahwa proses kompensasi yang dilakukan telah sesuai dengan perancangan yang telah ditetapkan. Hasil pengujian beban bertahap naik disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian Beban Bertahap Naik

No	Beban Aktif	Daya Total (W)	PF Sebelum	Arus Sebelum (A)	Jumlah Step Kapasitor	PF Sesudah	Arus Sesudah (A)	Blynk
1.	<i>Lift</i>	354	0,44	4,1	3	0,79	1,9	Menampilkan
2.	+ <i>Blower</i>	1384	0,91	6,7	3	0,91	6,7	Menampilkan
3.	+ <i>Conveyor</i>	1521	0,84	7,1	5	0,98	6,7	Menampilkan
4.	+ <i>Exhaust</i>	1601	0,98	7	5	0,98	7	Menampilkan
5.	Semua Beban	1664	0,93	7,9	5	0,93	7,8	Menampilkan

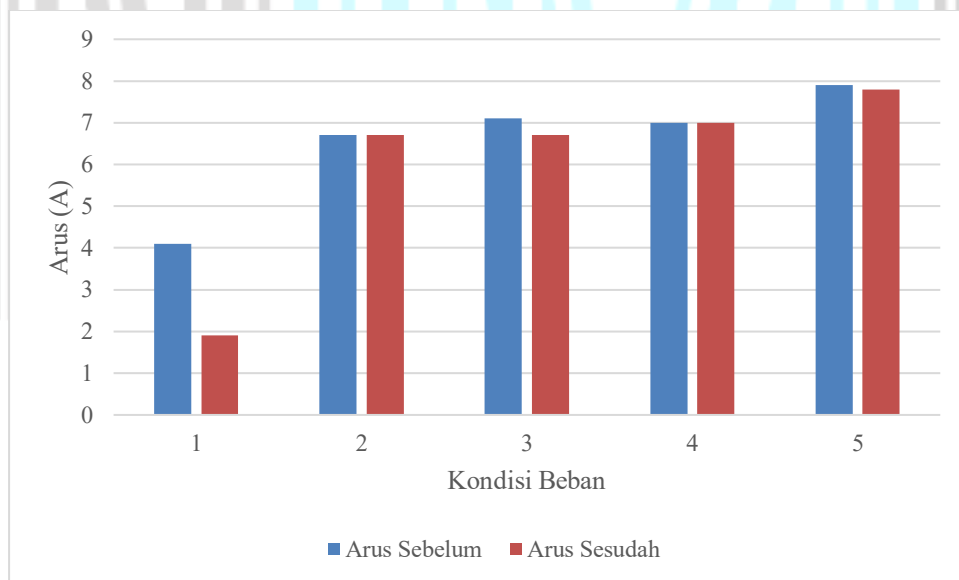
Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian APFC pada kondisi penambahan beban secara bertahap. Saat *lift* diaktifkan, daya yang terukur sebesar 354 W dengan faktor daya 0,44, nilai tersebut kemudian meningkat menjadi 0,79 setelah sistem mengaktifkan 3 step kapasitor. Penambahan *blower* menyebabkan daya total meningkat menjadi 1384 W dan faktor daya naik menjadi 0,91 sehingga tidak diperlukan penambahan kapasitor. Peningkatan faktor daya ini dipengaruhi oleh penggunaan kapasitor *run* 20 μ F pada motor *blower* yang membantu mengurangi kebutuhan daya reaktif induktif.

Ketika *conveyor* diaktifkan, faktor daya turun menjadi 0,84 akibat bertambahnya beban induktif, sistem kemudian menambahkan kapasitor hingga step ke-5 sehingga faktor daya meningkat menjadi 0,98. Penambahan *exhaust* tidak memberikan perubahan yang signifikan karena memiliki faktor daya yang relatif baik. Selanjutnya, saat kompresor diaktifkan, faktor daya menjadi 0,93 namun masih berada dalam rentang kerja yang ditetapkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem APFC mampu menyesuaikan kompensasi secara otomatis terhadap perubahan beban dan mempertahankan faktor daya pada nilai yang diinginkan.



Gambar 8. Grafik Perbandingan PF Sebelum dan Sesudah Pada Beban Bertahap Naik

Berdasarkan gambar 8, nilai faktor daya setelah kompensasi mengalami peningkatan dibandingkan kondisi sebelum kompensasi pada setiap variasi beban. Hal ini menunjukkan bahwa sistem APFC mampu memperbaiki faktor daya dan mempertahankannya pada rentang yang mendekati nilai target.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Arus Sebelum dan Sesudah Pada Beban Bertahap Naik

Berdasarkan gambar 9, kompensasi faktor daya menyebabkan arus yang ditarik dari sumber menjadi lebih kecil dibandingkan sebelum kompensasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor mampu mengurangi kebutuhan daya reaktif sehingga arus sistem menjadi lebih efisien.

3.2.4 Pengujian Beban Bertahap Turun

Pada tahap Pengujian ini dilakukan dengan mengurangi beban secara bertahap untuk mengamati respons sistem APFC terhadap perubahan kondisi operasi. Fokus pengujian adalah mengevaluasi kemampuan sistem dalam menyesuaikan jumlah kapasitor yang aktif agar kompensasi daya reaktif

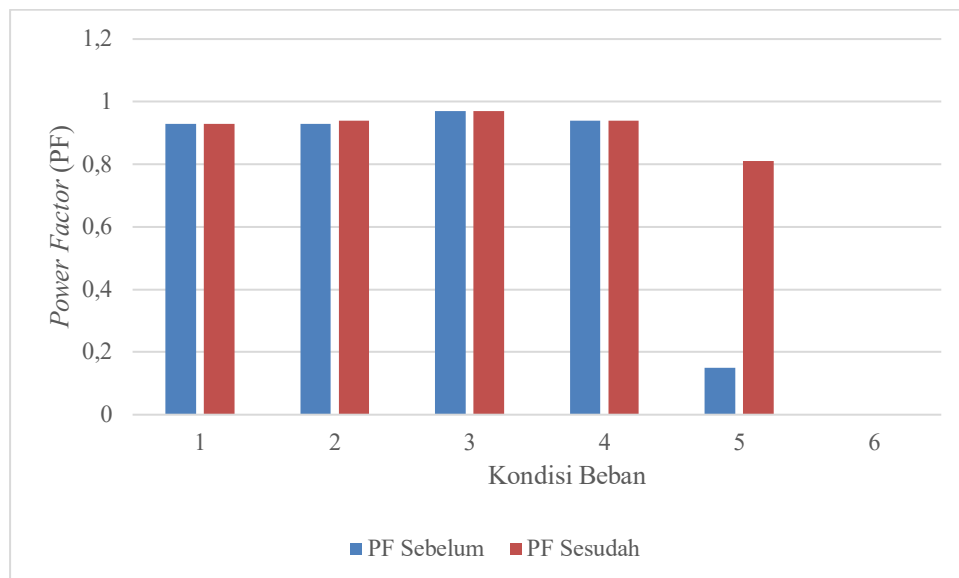
tetap sesuai dengan kebutuhan beban, sekaligus mengurangi kemungkinan terjadinya *over* kompensasi. Data hasil pengujian pada setiap tahapan pelepasan beban disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Pengujian Beban Bertahap Turun

No	Beban Aktif	Daya Total (W)	PF Sebelum	Jumlah Step Kapasitor	PF Sesudah	Respon Sistem	Blynk
1.	Semua Beban	1664	0,93	5	0,93	Stabil	Menampilkan
2.	- <i>Exhaust</i>	1598	0,93	5	0,94	Stabil	Menampilkan
3.	- <i>Conveyor</i>	1483	0,97	5	0,97	Stabil	Menampilkan
4.	- Kompresor	1372	0,94	5	0,94	Stabil	Menampilkan
5.	- <i>Blower</i>	446	0,15	3	0,81	Menurunkan Step	Menampilkan
6.	- <i>Lift</i>	0	0	0	0	<i>No Load Mode</i>	Menampilkan

Tabel 4 menunjukkan hasil pengujian APFC pada kondisi pelepasan beban secara bertahap. Pada kondisi awal saat seluruh beban aktif hingga pelepasan kompresor, faktor daya tetap berada pada rentang 0,93-0,97 sehingga sistem tidak melakukan perubahan jumlah kapasitor. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitor yang terhubung masih sesuai dengan kebutuhan daya reaktif beban. Perubahan yang signifikan terjadi ketika blower dilepaskan, daya total turun menjadi 446 W dan faktor daya menurun menjadi 0,15. Kondisi ini terjadi karena jumlah kapasitor yang aktif masih disesuaikan untuk kondisi beban sebelumnya sehingga terjadi *over* kompensasi. Pada penelitian awal, kondisi tersebut belum dapat diatasi secara optimal karena sensor PZEM-004T hanya menampilkan nilai faktor daya tanpa dapat membedakan kondisi *lagging* dan *leading*.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diterapkan metode *relearning*. Metode ini bekerja dengan mengevaluasi kembali kombinasi step kapasitor berdasarkan nilai faktor daya yang diperoleh setelah terjadi perubahan beban. Sistem kemudian memilih jumlah step yang menghasilkan faktor daya terbaik pada kondisi beban terbaru. Melalui proses tersebut, jumlah kapasitor aktif berkurang dari lima step menjadi tiga step dan faktor daya meningkat menjadi 0,81. Ketika seluruh beban dilepaskan, sistem masuk ke *No Load Mode* untuk mencegah kapasitor tetap terhubung tanpa adanya beban. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode *relearning* mampu membantu sistem menyesuaikan kompensasi setelah terjadi penurunan beban dan menghasilkan faktor daya yang lebih baik dibandingkan sebelum proses penyesuaian dilakukan.



Gambar 10. Grafik Perbandingan PF Sebelum dan Sesudah Pada Beban Bertahap Turun

Berdasarkan gambar 10, nilai faktor daya setelah kompensasi tetap berada pada rentang nilai yang baik meskipun terjadi pengurangan beban secara bertahap. Hal ini menunjukkan bahwa sistem APFC mampu menyesuaikan kompensasi daya reaktif sesuai perubahan kondisi beban.

3.2.5 Pengujian Beban Acak

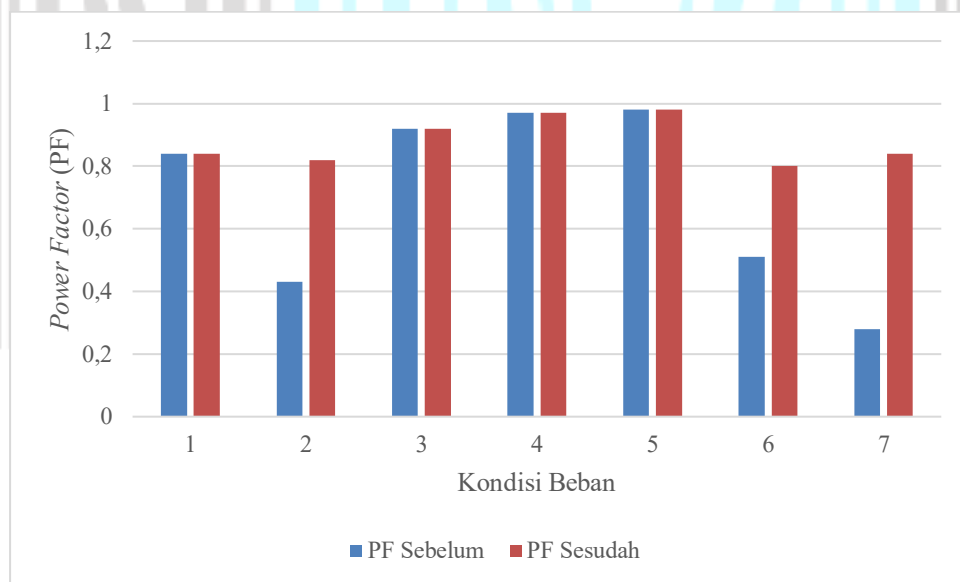
Pada tahap ini dilakukan pengujian kinerja sistem APFC pada kondisi perubahan beban secara acak. Pengujian bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merespons perubahan beban yang tidak berurutan serta mempertahankan faktor daya pada rentang yang telah ditetapkan. Hasil pengujian beban acak disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengujian Beban Acak

No	Beban Aktif	Daya Total (W)	PF Sebelum	Jumlah Step Kapasitor	PF Sesudah	Respon Sistem	Blynk
1.	<i>Exhaust</i>	69	0,84	0	0,84	Stabil	Menampilkan
2.	<i>+Lift</i>	417	0,43	3	0,82	Menambahkan Step	Menampilkan
3.	<i>+Blower</i>	1444	0,92	3	0,92	Stabil	Menampilkan
4.	<i>-Lift</i>	1102	0,97	3	0,97	Stabil	Menampilkan
5.	<i>+Conveyor</i>	1220	0,98	3	0,98	Stabil	Menampilkan
6.	<i>-Blower</i>	185	0,51	2	0,8	Menurunkan Step	Menampilkan
7.	<i>-Conveyor</i>	67	0,28	0	0,84	Menurunkan Step	Menampilkan

Tabel 5 menunjukkan hasil pengujian sistem APFC pada kondisi perubahan beban secara acak. Pada kondisi awal saat hanya *exhaust* yang aktif, faktor daya sebesar 0,84 sehingga belum diperlukan penambahan kapasitor. Ketika beban *lift* ditambahkan, faktor daya turun menjadi 0,43 akibat meningkatnya kebutuhan daya reaktif beban. Sistem kemudian merespons dengan mengaktifkan tiga step kapasitor sehingga faktor daya meningkat menjadi 0,82. Penambahan *blower* dan *conveyor* tidak menyebabkan perubahan jumlah kapasitor karena faktor daya telah berada pada rentang yang ditetapkan, yaitu 0,92 hingga 0,98. Kondisi ini menunjukkan bahwa kompensasi yang diberikan masih sesuai dengan kebutuhan daya reaktif beban.

Pada saat *blower* dilepaskan, faktor daya turun menjadi 0,51 akibat perubahan komposisi beban dan jumlah kapasitor yang aktif. Sistem kemudian mengurangi satu step kapasitor sehingga faktor daya meningkat menjadi 0,80. Selanjutnya ketika *conveyor* dilepaskan, sistem kembali menyesuaikan jumlah kapasitor hingga faktor daya meningkat dari 0,28 menjadi 0,84. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan beban yang tidak berurutan serta mempertahankan faktor daya pada nilai yang mendekati target operasi.



Gambar 11. Grafik Perbandingan PF Sebelum dan Sesudah Pada Beban Acak

Berdasarkan Gambar 11, nilai faktor daya setelah kompensasi cenderung lebih tinggi dibandingkan sebelum kompensasi pada kondisi perubahan beban secara acak. Perbaikan faktor daya terlihat pada saat terjadi penurunan nilai faktor daya akibat perubahan beban, dimana sistem APFC melakukan penyesuaian jumlah kapasitor sehingga faktor daya kembali mendekati rentang target. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kualitas faktor daya meskipun terjadi perubahan beban yang tidak beraturan.

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem APFC yang dirancang mampu memperbaiki faktor daya pada kondisi beban bertahap naik, bertahap turun, maupun beban acak.

Metode *relearning* yang diterapkan mampu membantu sistem menyesuaikan jumlah kapasitor ketika terjadi perubahan beban sehingga faktor daya dapat dipertahankan pada rentang yang ditetapkan. Hasil validasi menunjukkan bahwa PZEM-004T memiliki tingkat akurasi yang baik setelah dibandingkan dengan alat ukur referensi, sedangkan sistem *monitoring* dengan aplikasi Blynk mampu menampilkan data pengukuran secara *real-time*. Dengan demikian sistem yang dirancang telah berfungsi sesuai dengan tujuan penelitian dan dapat bekerja sebagaimana yang telah direncanakan.

4. PENUTUP

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem *Automatic Power Factor Correction* (APFC) bertingkat berbasis ESP32 berhasil dirancang dan diimplementasikan sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem mampu membaca parameter kelistrikan menggunakan sensor PZEM-004T, mengendalikan penyambungan dan pelepasan kapasitor bank secara otomatis, serta menampilkan hasil pemantauan melalui aplikasi Blynk secara *real-time*. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem mampu memperbaiki faktor daya pada berbagai kondisi pengujian, yaitu beban bertahap naik, bertahap turun, dan beban acak. Proses *switching* kapasitor bank dapat menyesuaikan perubahan kondisi beban sehingga faktor daya setelah kompensasi berada pada rentang yang lebih baik dibandingkan sebelum kompensasi. Selain itu, penerapan metode *relearning* mampu membantu sistem menentukan kombinasi kapasitor yang sesuai saat terjadi penurunan beban sehingga tujuan penelitian dalam meningkatkan faktor daya serta mengevaluasi respons *switching* kapasitor bank telah tercapai.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan sensor yang tidak hanya mampu mengukur nilai faktor daya, tetapi juga dapat membedakan kondisi *lagging* dan *leading power factor*. Hal tersebut diharapkan dapat meningkatkan akurasi pengendalian kapasitor bank, terutama saat terjadi perubahan beban, sehingga proses *switching* dapat dilakukan secara lebih cepat dan tepat tanpa bergantung pada metode *relearning*.

PERSANTUNAN

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, kesehatan, dan kemudahan yang telah dilimpahkan sehingga penelitian dan penyusunan naskah publikasi ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua dan keluarga atas doa, kasih sayang, serta dukungan yang tiada henti selama proses penyelesaian penelitian ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak Aris Budiman, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, saran, motivasi, serta meluangkan waktu dalam setiap tahapan penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Saudari Ayu Afriliyani, S.T. atas dukungan, perhatian, motivasi, dan semangat selama proses penelitian dan penyusunan naskah ini. Apresiasi turut disampaikan kepada teman-teman seperjuangan, yaitu Muhammad Aisyul Falah, Roma Febrian, Alfin Muhammad Nugroho, Hasby Asshodiq, Tegar Maulana Akmal, Farhan Rahmadhani Nugraha, Azzam Reza Ahmad Mujahid,

Ridwan El Hakim, Muhamad Idhan Arkhan, Gilang Rifaldi, dan Khitananda Timor, atas kebersamaan, bantuan, masukan, serta dukungan selama proses perancangan, pengujian, dan penyelesaian penelitian. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta atas fasilitas yang mendukung pelaksanaan penelitian, kepada Haris Elektronik yang telah menyediakan tempat pengujian beban beserta fasilitas pendukung penelitian, kepada teman-teman angkatan 2022 Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta atas kebersamaan dan dukungan selama masa perkuliahan, serta kepada teman-teman di Kost Songo, khususnya keluarga "Anak Murid Walid", atas kebersamaan, dukungan, dan motivasi selama proses penelitian. Semoga segala bantuan dan kebaikan yang telah diberikan memperoleh balasan terbaik dari Allah SWT.

DAFTAR PUSTAKA

- ABB. (2011). *Power factor correction and harmonic filtering in electrical plants (Technical Application Papers No. 8)*.
<https://library.e.abb.com/public/4704e67320c08992c1257870002e4700/1SDC007107G0202.pdf>
- Ferdiansah, B., Margiantono, A., & Ahmad, F. (2023). Analisis Pengaruh Kapasitor Bank Terhadap Nilai Faktor Daya dan Nilai Jatuh Tegangan. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5(2), 234–241. <https://ejurnal.ung.ac.id/index.php/jjee/article/view/20893>
- Hartono, Sudarmaji, H., Slamet, H., Rifdian, I. ., Julaihah, S., & Indra, M. (2022). Analisa Manfaat Pemasangan Capacitor Bank untuk Memperbaiki Faktor Daya dan Mengurangi Kerugian Daya dan Energi Listrik di Politeknik Penerbangan Surabaya. *Jurnal Penelitian Politeknik Penerbangan Surabaya*, 7(2), 159–170. <https://doi.org/10.46491/jp.v7i2.919>
- Maribe, M. (2025). Power Factor Correction in Electrical Circuits. *Nightingale International Journal of Pure and Applied Science*, 9(9). <https://doi.org/10.70382/nijpas.v9i9.018>
- Naqash, M. Y., & Rashid, Z. (2023). PI Controller Based Automatic Power Factor Correction (APFC) Using Capacitor Bank. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 19(1), 40–48. <https://doi.org/10.2478/ecce-2023-0006>
- Rija, B. M., Hussain, M. K., & Vural, A. M. (2020). Microcontroller Based Automatic Power Factor Correction for Single-Phase Lagging and Leading Loads. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10(6), 6515–6520. <https://doi.org/10.48084/etasr.3916>
- Sirait, D., Rozak, O., Setiawan, A., & Sumarno, E. (2025). Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Otomasi Perbaikan Kualitas Daya dengan Bank Kapasitor Skala Industri Kecil. *JITET (Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan)*, 13(3S1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i3S1.7908>
- Surya, I., Kustija, J., Pawinanto, R. E., Pramudita, R., Rizqulloh, M., Wahyudin, D., & Haritman, E. (2023). Sistem monitoring beban listrik dan perbaikan faktor daya menggunakan PZEM004T dan dashboard Adafruit berbasis IoT. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, Dan Listrik Tenaga)*, 3(3), 235–246. <https://doi.org/10.35313/jitel.v3.i3.2023.235-246>
- Utomo, M., Wirawan, A. P., Margono, W. C., & Alham, N. R. (2024). Design of Automatic Power Factor Correction for Optimization of. *Jurnal ECOTIPE (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering*, 11(1), 10–18. <https://doi.org/10.33019/jurnalecotipe.v11i1.4361>