

Rancang Bangun Kapasitor Bank Otomatis Berbasis IoT dengan Konfigurasi Delta untuk Kompensasi Daya Reaktif pada Motor Induksi Tiga Fasa

Bryan Aurelius Rodney ¹, Ayusta Lukita Wardani ², As'ad Shidqy Aziz ³, Fithrotul Irda Amaliah ⁴
^{1,2,3,4} Sarjana Terapan Teknik Listrik, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Article Info

Article history:

Diterima 21 Juli 2026
Direvisi 23 Juli 2026
Diterbitkan 24 Juli 2026

Keywords:

Kapasitor bank otomatis
Faktor daya
Internet of Things
Konfigurasi delta
Motor induksi tiga fasa

ABSTRAK

Faktor daya rendah pada instalasi listrik industri umumnya disebabkan oleh beban induktif, terutama motor induksi tiga fasa yang menarik arus magnetisasi besar pada kondisi beban ringan, sehingga menimbulkan penalti kelebihan daya reaktif (kVARh) sesuai standar PT PLN (Persero) yang mensyaratkan faktor daya minimal 0,85. Penelitian ini merancang dan menguji kinerja sistem kapasitor bank otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan konfigurasi delta sebagai solusi kompensasi daya reaktif pada motor induksi tiga fasa secara adaptif dan *real-time*. Sistem menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai unit kendali utama, tiga sensor PZEM-004T untuk membaca parameter kelistrikan tiap fasa, kapasitor bank konfigurasi delta yang dikendalikan melalui *relay* dan kontaktor, serta modul ESP8266 yang terhubung ke platform IoT Thingier.io untuk pemantauan jarak jauh. Sistem kendali menggunakan algoritma deterministik berdasarkan perhitungan kebutuhan daya reaktif (Q) dan logika *threshold (if-else)* untuk menentukan kombinasi step kapasitor yang diaktifkan. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan beban motor pada lima tingkat massa (50–250 gram). Hasil pengujian menunjukkan sistem berhasil meningkatkan faktor daya rata-rata dari 0,536 menjadi 0,94, setara kenaikan 77%, dengan waktu respons rata-rata 3,6 detik, tanpa mengganggu kestabilan tegangan dan frekuensi sistem. Sensor PZEM-004T juga menunjukkan akurasi baik dibandingkan alat ukur konvensional DW-6095, dengan mayoritas parameter memiliki error di bawah 5%. Sistem kapasitor bank otomatis berbasis IoT ini terbukti efektif, adaptif, dan akurat sebagai solusi kompensasi daya reaktif pada motor induksi tiga fasa.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Bryan Aurelius Rodney,
Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia
Email: bryanaurelius.22015@unesa.ac.id

1. PENDAHULUAN

Efisiensi penggunaan energi listrik menjadi aspek penting agar sistem tenaga listrik dapat bekerja optimal dan ekonomis, dan salah satu parameter utamanya adalah faktor daya (*power factor*). PT PLN (Persero) menetapkan standar faktor daya minimal sebesar 0,85; apabila nilai faktor daya suatu instalasi berada di bawah standar tersebut, pelanggan dikenakan penalti biaya kelebihan daya reaktif (kVARh) [1]. Pada lingkungan industri, faktor daya rendah umumnya disebabkan oleh beban induktif, terutama motor induksi tiga fasa yang

menarik arus magnetisasi besar saat beroperasi pada beban ringan, sehingga sudut fasa antara arus dan tegangan melebar dan nilai faktor daya menurun [2].

Untuk mengatasi hal tersebut, kompensasi daya reaktif menggunakan kapasitor bank menjadi solusi umum karena kapasitor mampu menyediakan daya reaktif kapasitif yang menyeimbangkan komponen induktif pada motor. Namun, banyak sistem kapasitor bank yang diterapkan secara manual atau statis sehingga tidak dapat menyesuaikan diri terhadap perubahan beban motor yang bersifat dinamis [1]. Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang pengendalian kapasitor bank secara otomatis dan *real-time*, memungkinkan proses switching kapasitor menyesuaikan kondisi faktor daya aktual tanpa intervensi manual [3].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji otomatisasi perbaikan faktor daya. Harahap dan Toruan merancang kapasitor bank otomatis berbasis Arduino Uno dengan sensor ACS712 dan ZMPT101B yang mampu meningkatkan faktor daya dari 0,45 menjadi 0,84 dengan akurasi 90% [4]. Mahendra dkk. meneliti kombinasi kapasitor bank dan *detuned reactor* pada beban induktif tiga fasa dan mencatat peningkatan faktor daya dari 0,63 menjadi 0,95 [5]. Fadhil dan Suryawan menegaskan efektivitas kapasitor bank dalam memperbaiki faktor daya pada beban induktif sebagai landasan teori kompensasi [6]. Yang paling relevan, Setiawan dkk. mengembangkan kapasitor bank otomatis berbasis ESP32 dan sensor PZEM-004T untuk pelanggan 5500 VA dengan logika *fuzzy*, mencapai faktor daya di atas 0,93 dan waktu respons rata-rata 14,53 detik [7]. Meskipun komponen sensor yang digunakan serupa, penelitian tersebut belum membahas konfigurasi pemasangan kapasitor secara spesifik. Konfigurasi delta menawarkan penyaluran arus reaktif per fasa yang lebih merata untuk aplikasi motor induksi tiga fasa, namun penelitian yang secara khusus mengimplementasikan kapasitor bank otomatis berbasis IoT dengan konfigurasi delta masih relatif terbatas [8].

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini merancang dan menguji kinerja sistem kapasitor bank otomatis berbasis IoT dengan konfigurasi delta untuk kompensasi daya reaktif pada motor induksi tiga fasa. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang mengandalkan logika *fuzzy*, sistem ini menggunakan algoritma deterministik berbasis perhitungan kebutuhan daya reaktif (Q) dan logika *threshold (if-else)* untuk menentukan kombinasi step kapasitor yang diaktifkan secara otomatis. Penelitian ini bertujuan menganalisis peningkatan faktor daya sebelum dan sesudah kompensasi, mengukur waktu respons sistem terhadap perubahan beban, serta menguji akurasi sensor PZEM-004T dibandingkan alat ukur konvensional.

2. METODA

Penelitian ini merupakan penelitian terapan dengan pendekatan kuantitatif, melalui tahapan perancangan, implementasi, dan pengujian sistem kompensasi daya reaktif berbasis IoT untuk mengetahui sejauh mana sistem mampu meningkatkan faktor daya pada motor induksi tiga fasa. Pengujian dilakukan di Laboratorium D4 Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, menggunakan motor induksi tiga fasa dengan spesifikasi *frame size* 80, *4-pole*, daya 0,25 HP (0,55 kW), frekuensi 50 Hz, dan kecepatan nominal 1450 rpm.

Tabel 1. Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa

Frame Size	80
Pole	4 Pole
Horse Power	¼ Hp
Daya	0.55 kW
Frekuensi	50
RPM	1450 rpm

Kebutuhan kapasitansi kapasitor dihitung berdasarkan daya reaktif awal (Q_{awal}) dan daya reaktif target (Q_{target}) pada kondisi tanpa beban tiap fasa, menggunakan persamaan berikut [9]:

$$Q = P \cdot \tan(\cos^{-1}(PF)) \quad (1)$$

$$\Delta Q = Q_{awal} - Q_{Target} \quad (2)$$

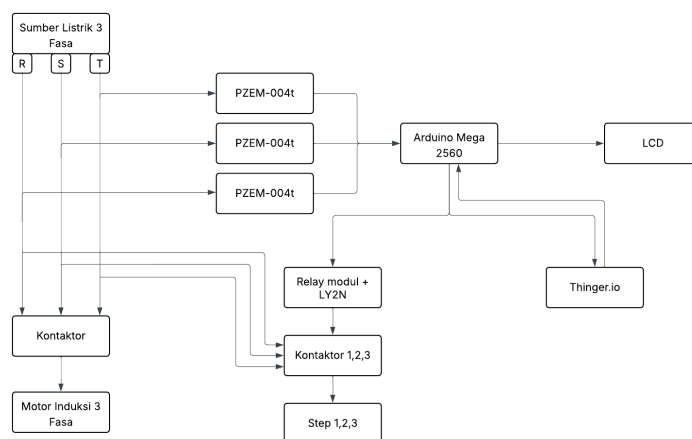
$$C = \frac{\Delta Q}{2\pi f V^2} \times 10^6 \quad (3)$$

Tabel 2. Kondisi PF & Daya Tanpa Beban

Fasa	Kondisi Mesin Penggiling	P (W)	PF Awal	PF Target
R	Tanpa Beban	27	0.20	0.95
S	Tanpa Beban	31	0.24	0.95
T	Tanpa Beban	28	0.21	0.95

Berdasarkan hasil perhitungan, total kebutuhan kapasitansi dibulatkan menjadi 8 μF , yang direalisasikan menggunakan sembilan kapasitor per fasa yang dibagi menjadi tiga step (0,6 μF ; 0,9 μF ; 1,2 μF).

Sistem dirancang menggunakan tiga sensor PZEM-004T untuk membaca parameter kelistrikan tiap fasa (tegangan, arus, daya aktif, frekuensi, dan faktor daya), Arduino Mega 2560 sebagai unit kendali utama untuk mengolah data dan menjalankan algoritma deterministik, modul relay dan kontaktor magnetik sebagai aktuator *switching* kapasitor bank konfigurasi delta, serta modul ESP8266 yang menghubungkan sistem ke platform IoT Thinger.io untuk pemantauan jarak jauh, dilengkapi LCD 20×4 sebagai antarmuka lokal.

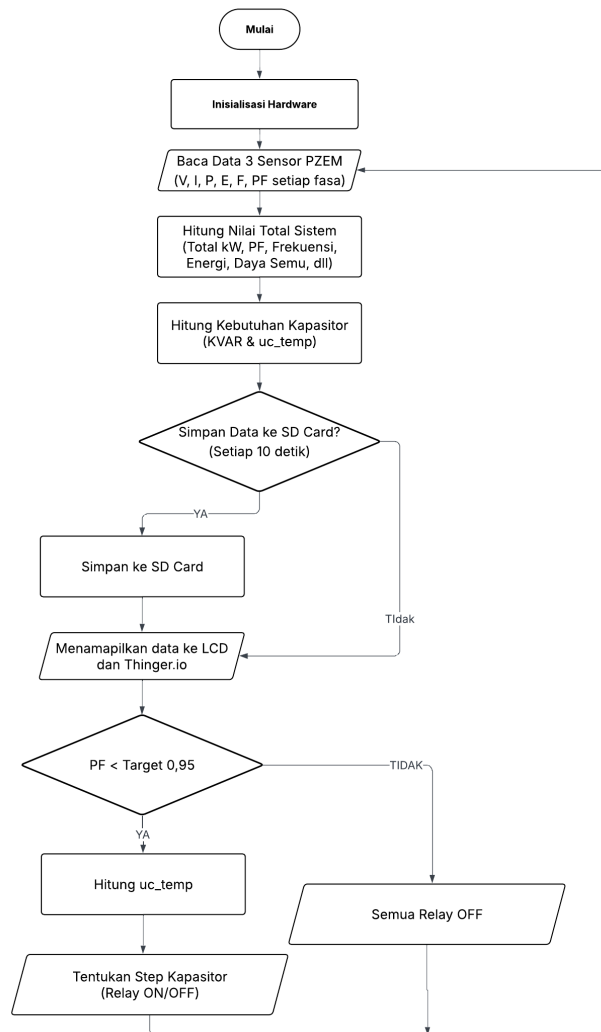


Gambar 1. Blok Diagram Sistem

Secara kelistrikan, sumber tegangan tiga fasa 380V didistribusikan melalui MCB utama menuju beban motor induksi dan sistem kapasitor bank yang dikendalikan oleh tiga kontaktor magnetik tiga fasa, dengan kapasitor pada setiap step dikonfigurasi secara delta antar-fasa agar menerima tegangan penuh 380V untuk memaksimalkan produksi daya reaktif. Sinyal logika dari Arduino Mega 2560 mengaktifkan modul relay, yang selanjutnya memicu relay bantu tipe LY2N bertegangan 24V DC sebelum menyalakan koil kontaktor utama menggunakan tegangan AC 220V dari fasa R. Untuk menjaga stabilitas sistem dari gangguan elektromagnetik, digunakan dua unit power supply terpisah, yaitu 5V untuk komponen logika sensitif (Arduino dan modul WiFi) dan 24V khusus untuk menyuplai beban induktif pada relay driver.

Algoritma kontrol bekerja secara *closed-loop*: sistem membaca faktor daya secara kontinu dan membandingkannya dengan nilai target (*setpoint* 0,95). Apabila PF berada di bawah target, sistem menghitung kebutuhan kompensasi dan menentukan kombinasi *step* kapasitor yang harus diaktifkan berdasarkan logika *threshold*; apabila PF telah mencapai atau melampaui target, seluruh relay kapasitor dipertahankan atau dikembalikan ke kondisi OFF untuk menghindari *over-compensation*.

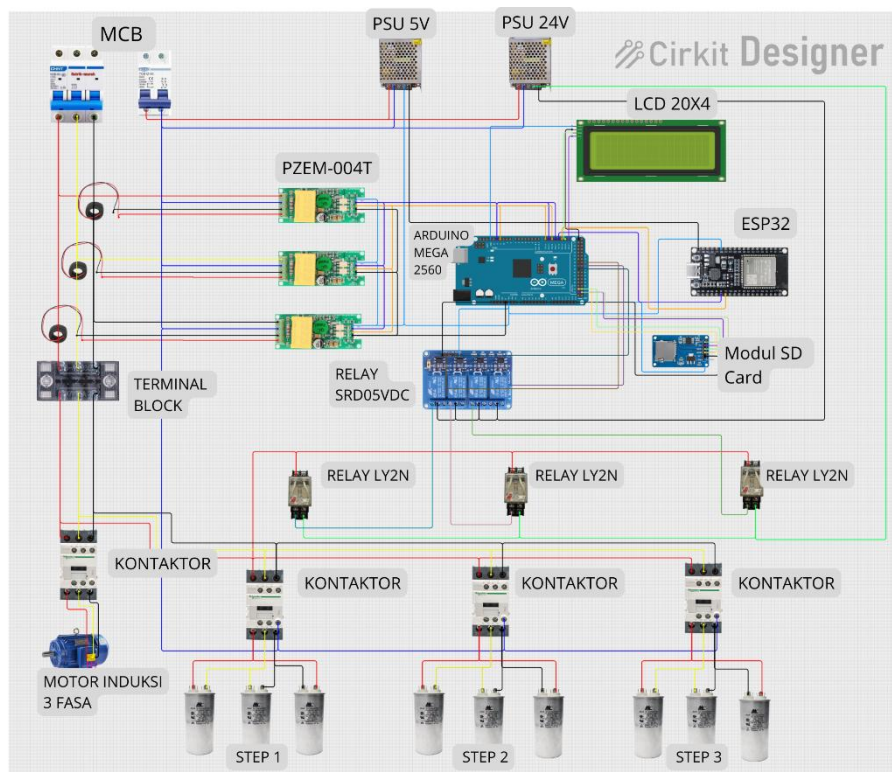
Parameter pengujian ditetapkan sebagai berikut: setpoint faktor daya sebesar 0,95, ambang batas aktivasi kompensasi pada beban minimum 0,15 kW (untuk mencegah overcompensation saat sistem tanpa beban), dan interval pembacaan sensor setiap 1 detik untuk evaluasi kondisi PF secara kontinu. Logika *switching* bekerja dengan membandingkan nilai kapasitansi hasil perhitungan (*uc_temp*) terhadap tujuh kombinasi step relay (S1, S2, S3) yang telah ditetapkan pada Tabel 3, kemudian memilih kombinasi dengan nilai kapasitansi terdekat yang memenuhi kebutuhan kompensasi tanpa melebihi target. Apabila $\text{PF} \geq 0,95$, seluruh relay dipertahankan atau dikembalikan ke kondisi OFF untuk mencegah pengaktifan step yang tidak perlu. Proses evaluasi dan *switching* ini berulang setiap siklus pembacaan sensor selama sistem beroperasi (*loop kontinu*).

Gambar 2. *Confution Matrix* Jaringan Syaraf Tiruan

Alur kerja sistem pada Gambar 2 dimulai dengan inisialisasi seluruh perangkat keras (Arduino Mega 2560, sensor PZEM-004T, modul WiFi, relay, dan LCD) agar siap membaca dan mengolah data. Selanjutnya, sistem membaca parameter kelistrikan (tegangan, arus, daya aktif, energi, frekuensi, dan faktor daya) dari ketiga sensor PZEM-004T pada tiap fasa, kemudian mengagregasinya menjadi nilai total sistem berupa daya aktif, daya semu, daya reaktif, dan faktor daya keseluruhan.

Berdasarkan nilai faktor daya sistem dan target sebesar 0,95, sistem menghitung kebutuhan kompensasi daya reaktif (kVAR) beserta nilai kapasitansi yang diperlukan. Data hasil pembacaan dan perhitungan kemudian disimpan ke *SD card* setiap interval 10 detik sebagai *data logger*, serta ditampilkan pada LCD sebagai monitoring lokal dan dikirim melalui ESP8266 ke *dashboard* Thinger.io untuk monitoring jarak jauh.

Sistem selanjutnya mengevaluasi nilai faktor daya terhadap target: apabila $PF < 0,95$, sistem melanjutkan proses kompensasi dengan menghitung ulang nilai kebutuhan kapasitansi (*uc_temp*) untuk menentukan kombinasi *step* relay kapasitor yang harus diaktifkan; apabila $PF \geq 0,95$, seluruh relay kapasitor dipertahankan atau dikembalikan ke kondisi OFF. Penentuan *step* kapasitor mengikuti tujuh variasi tingkat kompensasi bertingkat (*incremental*) — dari kompensasi ringan (mengaktifkan S1 atau S2) hingga kompensasi maksimal (S1+S2+S3 aktif seluruhnya) — untuk memperoleh resolusi perbaikan faktor daya yang halus sekaligus menjaga stabilitas tegangan dan memperpanjang umur kontaktor. Seluruh proses ini kemudian berulang secara terus-menerus (*loop*) selama sistem beroperasi.



Gambar 3. Rangkaian Sistem Kapasitor Bank

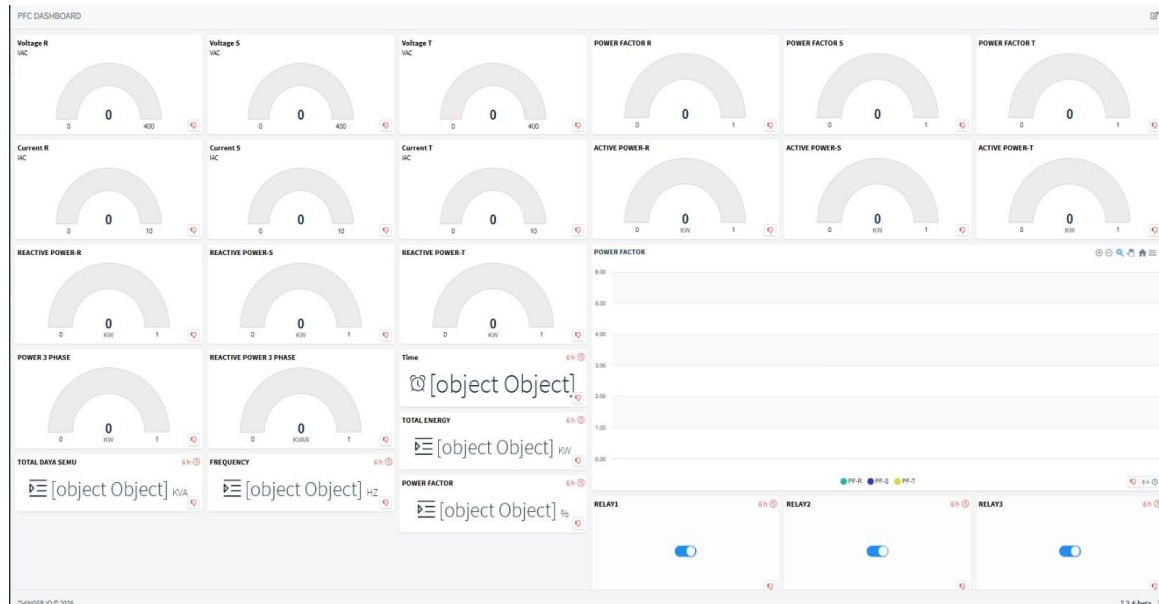
Gambar 3 menunjukkan rangkaian sistem keseluruhan yang mengintegrasikan sistem daya bertegangan 380V AC dengan sistem kendali bertegangan rendah untuk menjamin keamanan dan efisiensi operasional. Sumber tegangan tiga fasa didistribusikan melalui MCB utama menuju beban motor induksi dan sistem kapasitor bank yang dikendalikan oleh tiga kontaktor magnetik tiga fasa, dengan kapasitor pada setiap *step* dikonfigurasi secara delta antar-fasa agar menerima tegangan penuh 380V untuk memaksimalkan produksi daya reaktif. Sinyal logika dari Arduino Mega 2560 mengaktifkan modul relay, yang selanjutnya memicu relay bantu tipe LY2N bertegangan 24V DC sebelum menyalakan koil kontaktor utama menggunakan tegangan AC 220V dari fasa R. Untuk menjaga stabilitas sistem dari gangguan elektromagnetik, digunakan dua unit *power supply* terpisah, yaitu 5V untuk komponen logika sensitif (Arduino dan modul WiFi) dan 24V khusus untuk menyuplai beban induktif pada relay *driver*.

Tabel 3. Logika Relay Kompensasi

Tahap Kompensasi	S1 (Relay 1)	S2 (Relay 2)	S3 (Relay 3)	Total μF	Estimasi VAR
Ringan	ON	OFF	OFF	0,6	201,2
Ringan	OFF	ON	OFF	0,9	299,2
Sedang	OFF	OFF	ON	1,2	381,2
Sedang	ON	ON	OFF	1,5	447,7
Tinggi	ON	OFF	ON	1,8	482,1
Tinggi	OFF	ON	ON	2,1	551,2
Maksimal	ON	ON	ON	2,7	660,5

Tabel 3 menunjukkan tujuh variasi kombinasi *switching* relay S1, S2, dan S3 beserta estimasi total kapasitansi dan daya reaktif yang dihasilkan tiap fasa. Kombinasi ini disusun bertingkat (*incremental*), mulai dari kompensasi ringan dengan mengaktifkan salah satu relay (0,6–0,9 μF ; ± 201 –299 VAR), kompensasi sedang dengan satu atau dua relay (1,2–1,5 μF ; ± 381 –448 VAR), kompensasi tinggi dengan dua relay (1,8–2,1 μF ; ± 482 –551 VAR), hingga kompensasi maksimal dengan ketiga relay aktif sekaligus (2,7 μF ; ± 660 VAR). Penyusunan bertingkat ini bertujuan memperoleh resolusi perbaikan faktor daya yang halus sekaligus menjaga stabilitas tegangan dan memperpanjang umur kontaktor.

Selain menjalankan keputusan kompensasi tersebut, sistem juga memantau seluruh parameter kelistrikan hasil pembacaan sensor secara jarak jauh melalui *dashboard* Thinger.io, yang menampilkan tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya semu, energi, frekuensi, dan faktor daya tiap fasa menggunakan widget *gauge*, dilengkapi grafik *real-time* faktor daya terhadap waktu.



Gambar 4. *Dashboard* Thinger.io

Pada Gambar 4 selain menjalankan keputusan kompensasi tersebut, sistem juga memantau seluruh parameter kelistrikan hasil pembacaan sensor secara jarak jauh melalui *dashboard* Thinger.io, yang menampilkan tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya semu, energi, frekuensi, dan faktor daya tiap fasa menggunakan widget *gauge*, dilengkapi grafik *real-time* faktor daya terhadap waktu.

Pengujian dilakukan menggunakan mesin penggiling kacang tanah sebagai beban induktif dinamis, dengan variasi massa 50–250 gram. Kacang tanah direndam 1–2 jam agar beban stabil, lalu ditiriskan ± 5 menit sebelum digunakan. Beban dimasukkan bertahap agar tidak terjadi lonjakan mendadak, hingga faktor daya terbaca stabil. Setiap variasi beban diuji dua kali pengulangan, hasilnya dirata-ratakan.

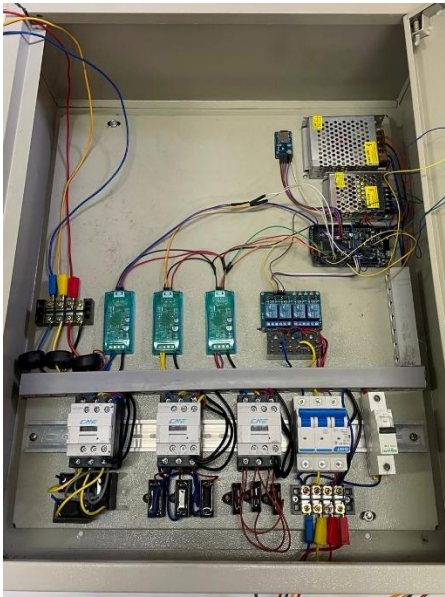
Tiga pengujian utama dilakukan pada tiap variasi beban: (1) faktor daya sebelum dan sesudah kompensasi, (2) waktu respons sistem terhadap perubahan beban, dan (3) akurasi sensor PZEM-004T dibandingkan alat ukur konvensional Analyzer & Harmonic Power DW-6095, dengan akurasi dihitung menggunakan:

$$\%Error = \frac{Nilai Standar - Nilai Sensor}{Nilai Standar} \times 100\% \quad (4)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil perancangan hardware serta hasil pengujian sistem kapasitor bank otomatis berbasis IoT, meliputi pengujian faktor daya sebelum dan sesudah kompensasi, waktu respons sistem terhadap perubahan beban, dan akurasi sensor PZEM-004T dibandingkan alat ukur konvensional, disertai pembahasan atas temuan-temuan tersebut.

3.1. Hasil Perancangan Hardware



Gambar 5. Hasil Perancangan Hardware

Perancangan hardware direalisasikan dalam satu unit panel kontrol terintegrasi, dengan tata letak yang memisahkan rangkaian kendali (bagian atas) dan rangkaian daya/*switching* kapasitor bank (bagian bawah) untuk meminimalisir interferensi elektromagnetik terhadap sinyal sensor. Beban uji berupa motor induksi tiga fasa 0,55 kW dikopel secara mekanis dengan mesin penggiling kacang tanah melalui sistem *pulley* dan *V-belt*, merepresentasikan karakteristik beban induktif dinamis yang umum dijumpai pada aplikasi industri kecil dan menengah.

3.2. Hasil Pengujian Faktor Daya Sebelum dan Sesudah Kompensasi

Tabel 4. Pengujian Faktor Daya Sebelum Kapasitor Bank

Pengujian Faktor Daya Sebelum Kapasitor Bank								
No	Massa (gr)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya Aktif (W)	Daya Reaktif (VAR)	Daya Semu (VA)	Frekuensi (Hz)	Faktor Daya
1	50	404.2	1,15 A	410	792	890	49.9	0.46
2	100	404.1	1.2	435	751	867	49.9	0.50
3	150	404.8	1.31	455	705	839	49.9	0.54
4	200	404.6	1.39	470	660	810	49.9	0.57
5	250	404.9	1.42	480	615	780	49.9	0.61

Tabel 5. Pengujian Faktor Daya Sesudah Kapasitor Bank

Pengujian Faktor Daya Sesudah Kapasitor Bank								
No	Massa (gr)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya Aktif (W)	Daya Reaktif (VAR)	Daya Semu (VA)	Frekuensi (Hz)	Faktor Daya
1	50	404.5	1.1 A	410	140	432	49.9	0.94
2	100	404.7	1.21	435	149	457	49.9	0.94
3	150	404.6	1.29	455	161	477	49.9	0.93
4	200	403.2	1.38	470	165	499	49.9	0.94
5	250	404.1	1.45	480	171	512	49.9	0.95

Sebelum kapasitor bank aktif, faktor daya sistem berada pada rentang 0,46–0,61, jauh di bawah standar PLN (minimal 0,85), dengan daya reaktif yang ditarik motor mencapai 615–790 VAR. Setelah kapasitor bank otomatis aktif melakukan kompensasi, faktor daya meningkat signifikan menjadi rentang 0,93–0,95 pada seluruh titik pengujian, dengan daya reaktif tertekan menjadi 140–171 VAR. Rata-rata PF sebelum kompensasi adalah 0,536 (SD $\pm$ 0,057), sedangkan sesudah kompensasi mencapai 0,94 dengan standar deviasi jauh lebih kecil ($\pm$ 0,0071) — menunjukkan bahwa sistem tidak hanya menaikkan PF secara absolut, tetapi juga

menstabilkannya pada rentang sempit di seluruh variasi beban, mengindikasikan algoritma *switching* bekerja adaptif, bukan hanya optimal pada satu titik beban statis.

Tabel 6. Presentase Kenaikan PF per titik beban

Massa (gr)	PF Sebelum	PF Sesudah	Kenaikan PF	Persentase Kenaikan
50	0.46	0.94	0.48	104,30%
100	0.50	0.94	0.44	88,00%
150	0.54	0.93	0.39	72,20%
200	0.57	0.94	0.37	64,90%
250	0.61	0.95	0.34	55,70%

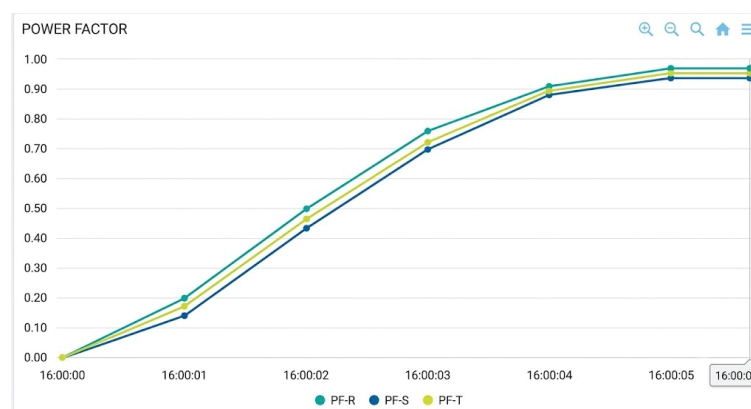
Rata-rata kenaikan PF absolut adalah 0,404 poin, setara kenaikan rata-rata 77,0%. Pola persentase kenaikan menurun hampir linier seiring bertambahnya massa beban, namun hal ini merupakan konsekuensi matematis dari basis PF awal yang sudah lebih tinggi pada beban berat, bukan indikasi penurunan performa sistem. Tegangan dan frekuensi tercatat stabil pada seluruh titik pengujian (403,2–404,9 V dan 49,9 Hz), menunjukkan proses *switching* relay/kontaktor tidak menyebabkan *drop* tegangan atau gangguan resonansi LC berbeda dengan kondisi *overcompensation* yang sempat ditemukan pada pengujian tanpa beban di tahap awal penelitian, yang berhasil diatasi melalui penerapan ambang batas minimum (TOTAL_KW > 0,15 kW) sebagai syarat aktifnya kompensasi.

Jumlah step kapasitor (tiga step per fasa) turut memengaruhi kestabilan PF pasca-kompensasi. Standar deviasi PF yang sangat kecil ($\pm 0,0071$) mengindikasikan bahwa resolusi tiga step dengan tujuh kombinasi sudah cukup halus untuk mendekati setpoint 0,95 tanpa osilasi berarti antar-titik beban. Namun, resolusi ini juga membatasi presisi akhir: karena step terkecil bernilai 0,6 μ F, sistem cenderung berhenti pada PF 0,93–0,95 alih-alih mendekati 1,0, sebab kombinasi step yang tersedia tidak selalu menghasilkan nilai kapasitansi yang persis sama dengan kebutuhan kompensasi (uc_temp). Semakin banyak jumlah step dengan resolusi lebih kecil, semakin kecil pula selisih antara kapasitansi terpasang dan kapasitansi ideal, sehingga PF dapat lebih presisi mendekati target—namun dengan konsekuensi kompleksitas *switching* dan jumlah kontaktor yang lebih banyak, yang berpotensi memperpendek umur relay akibat frekuensi *switching* yang lebih tinggi. Trade-off inilah yang mendasari rekomendasi penambahan step dengan resolusi lebih kecil pada bagian kesimpulan.

3.3. Hasil Pengujian Waktu Respons Sistem

Tabel 7. Waktu respons step kapasitor

No	Beban (gr)	Kondisi Awal	Pengujian Respon Waktu			Waktu Respon
			PF Target	Step Kapasitor	ΔQ diperbaiki (VAR)	
1	50	0.46	0.95	S1+ S2+S3	652	5 detik
2	100	0.50	0.95	S1+S2+S3	602	4 detik
3	150	0.54	0.95	S2+S3	544	3 detik
4	200	0.57	0.95	S2+S3	495	4 detik
5	250	0.61	0.95	S1+S3	444	2 detik



Gambar 6. Grafik respons faktor daya saat beban 50 gr

Sistem mampu merespons perubahan kondisi beban dalam waktu 2–5 detik, dengan rata-rata 3,6 detik. Waktu respons terlama (5 detik) terjadi pada kondisi PF awal terendah (0,46 pada beban 50 gr), saat sistem mengaktifkan seluruh *step* kapasitor (S1+S2+S3) untuk memenuhi kebutuhan kompensasi terbesar ($\Delta Q = 652$ VAR) — sejalan dengan logika bahwa semakin besar selisih PF awal terhadap target, semakin banyak kombinasi kapasitor yang perlu dievaluasi sebelum kondisi stabil tercapai. Menariknya, kombinasi *step* yang aktif tidak selalu berkurang linier terhadap peningkatan PF awal; hal ini terjadi karena pemilihan *step* didasarkan pada nilai kapasitansi hasil perhitungan (*uc_temp*) yang dipetakan ke kombinasi kapasitor yang tersedia, bukan semata besar-kecilnya PF awal. Dibandingkan penelitian Setiawan dkk. yang mencatat waktu respons rata-rata 14,53 detik pada sistem berbasis ESP32 dengan logika *fuzzy* [7], sistem berbasis algoritma deterministik pada penelitian ini menunjukkan waktu respons yang jauh lebih cepat, mengindikasikan bahwa pendekatan *threshold* langsung dapat lebih efisien untuk aplikasi yang membutuhkan kompensasi cepat.

3.3. Hasil Pengujian Akurasi Sensor PZEM-004T

Tabel 8. Akurasi monitoring PZEM-004T

Pengujian Monitoring IoT					
No	Parameter	Power & Harmonic Analyzer DW-6095	Data Dashboard Iot	Selisih	Error %
1	Tegangan	R = 236.6 V	R = 236.5 V	R = 0.1 V	R = 0.04%
		S = 233.1 V	S = 238.4 V	S = 5.3 V	S = 2.27%
		T = 231.3 V	T = 236.8 V	T = 5.5 V	T = 2.38%
2	Arus (I)	R = 0.583 A	R = 0.59 A	R = 0.007 A	R = 1.20%
		S = 0.569 A	S = 0.56 A	S = 0.009 A	S = 1.58%
		T = 0.682 A	T = 0.65 A	T = 0.032 A	T = 4.69%
3	Daya Aktif (W)	0.095 KW	0.10 KW	0.005 kW	5.26%
4	Daya Reaktif (VAR)	0.392 KVAR	0.39 KVAR	0.002 kVAR	0.51%
5	Daya Semu (VA)	0.402 KVA	0.4 KVA	0.002 kVA	0.50%
6	Frekuensi (Hz)	50.0 Hz	50.0 Hz	0 Hz	0%
7	Faktor Daya	0.21	0.2	0.01	4.76%

Pengujian akurasi terhadap alat ukur konvensional Power & Harmonic Analyzer DW-6095 menunjukkan mayoritas parameter memiliki *error* di bawah 5%. Parameter frekuensi menunjukkan kesesuaian sempurna (*error* 0%), sedangkan *error* tertinggi terjadi pada arus fasa T (4,69%) dan daya aktif (5,26%) — meski secara nilai absolut selisih daya aktif hanya sekitar 5 watt, wajar mengingat pengujian dilakukan pada kondisi beban ringan di mana persentase *error* cenderung tampak lebih besar meski selisih absolutnya kecil. Daya reaktif dan daya semu menunjukkan *error* sangat kecil (0,51% dan 0,50%), mengindikasikan proses perhitungan dan pengiriman data berlangsung stabil. Secara keseluruhan, tingkat akurasi ini sebanding dengan sistem sejenis pada penelitian Harahap dan Toruan yang mencapai akurasi 90% [4], menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T layak digunakan untuk keperluan pemantauan jarak jauh pada aplikasi kompensasi daya reaktif motor induksi tiga fasa.

4. KESIMPULAN

Sistem kapasitor bank otomatis berbasis IoT yang dirancang menggunakan Arduino Mega 2560, sensor PZEM-004T, dan konfigurasi kapasitor delta berhasil memperbaiki faktor daya motor induksi tiga fasa secara signifikan dan konsisten pada seluruh variasi beban uji (50–250 gr), dari rata-rata PF 0,536 (rentang 0,46–0,61) sebelum kompensasi menjadi rata-rata PF 0,94 (rentang 0,93–0,95) setelah kompensasi, setara kenaikan rata-rata 0,404 poin atau 77%. Standar deviasi PF yang sangat kecil setelah kompensasi ($\pm 0,0071$) dibanding sebelum kompensasi ($\pm 0,057$) membuktikan sistem bekerja adaptif terhadap perubahan beban, bukan hanya optimal pada satu titik beban tertentu, tanpa mengganggu kestabilan tegangan (403,2–404,9 V) maupun frekuensi (49,9 Hz) sistem.

Sistem juga mampu memberikan respons kompensasi daya reaktif dengan waktu rata-rata 3,6 detik (rentang 2–5 detik) ketika terjadi perubahan beban, dengan waktu respons dipengaruhi oleh besarnya selisih PF awal terhadap target (0,95) serta jumlah kombinasi *step* kapasitor yang perlu diaktifkan. Sensor PZEM-004T menunjukkan tingkat akurasi yang baik dibandingkan alat ukur konvensional *Power & Analyzer Harmonic* DW-6095, dengan mayoritas parameter (tegangan fasa R, daya reaktif, daya semu, dan frekuensi) memiliki *error* di bawah 1%, sedangkan parameter dengan *error* tertinggi daya aktif masih berada dalam batas wajar di 5,26%. Hasil ini membuktikan bahwa sistem kapasitor bank otomatis berbasis IoT yang dirancang

efektif, adaptif, dan akurat sebagai solusi kompensasi daya reaktif pada motor induksi tiga fasa, sejalan dengan tujuan penelitian yang dirumuskan pada bagian Pendahuluan.

Pengembangan lebih lanjut dapat diarahkan pada penerapan algoritma kontrol yang lebih adaptif seperti *fuzzy logic* atau PID sebagai pembanding terhadap metode *direct-threshold* yang digunakan, penambahan fitur pengukuran distorsi harmonisa total (THD) mengingat beban induktif juga berpotensi menjadi sumber harmonisa, serta penambahan jumlah *step* kapasitor atau penggunaan *step* dengan resolusi lebih kecil agar faktor daya yang dicapai dapat lebih mendekati nilai ideal 1,0.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Ibu Ayusta Lukita Wardani, S.ST., M.T., selaku dosen pembimbing sekaligus Koordinator Program Studi D4 Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, atas bimbingan, arahan, dan masukan yang diberikan selama proses penelitian dan penulisan artikel ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Vokasi Universitas Negeri Surabaya atas dukungan fasilitas Laboratorium D4 Teknik Listrik yang digunakan dalam perancangan dan pengujian sistem.

REFERENSI

- [1] M. Fahmi, Hasan, and E. Radwitya, "Rancang Bangun Kapasitor Bank Otomatis Berbasis Internet of Things (IoT) Pada Rumah Tinggal," ENTRIES (Journal of Electrical Network Systems and Sources), vol. 3, no. 2, pp. 6–13, 2024, doi: 10.11591/ijeecs.v24.i2.pp715-727.
- [2] R. Harahap and Y. M. L. Toruan, "Rancang Bangun Kapasitor Bank Otomatis Untuk Perbaikan Faktor Daya Pada Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Arduino Uno," JET (Journal of Electrical Technology), vol. 8, no. 2, pp. 54–61, 2023, doi: 10.30743/jet.v8i2.7679.
- [3] L. Mahendra, M. R. Rusli, M. N. Habibi, and A. F. Adila, "Analisa Pengaruh Kapasitor Bank dan Detuned Reactor Sebagai Perbaikan Faktor Daya Listrik 3 Fasa untuk Beban-beban Induktif," Jurnal Arus Elektro Indonesia, vol. 9, no. 2, pp. 39–45, 2023, doi: 10.19184/jaei.v9i2.37285.
- [4] M. Ali, F. Rashid, and S. Rasheed, "Power factor improvement for a three-phase system using reactive power compensation," Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 24, no. 2, p. 715, 2021, doi: 10.11591/ijeecs.v24.i2.pp715-727.
- [5] F. Setiawan, A. Wasono, and E. A. Karuniawan, "Rancang Bangun Kapasitor Bank Otomatis Untuk Mengetahui Dampak Terhadap Kualitas Daya Listrik Pada Variasi Beban Pelanggan 5500VA," Orbith: Majalah Ilmiah Pengembangan Rekayasa dan Sosial, vol. 21, no. 1, pp. 51–56, 2025, doi: 10.32497/orbith.v21i1.5906.
- [6] S. Sulistyowati, M. F. Hakim, H. Sungkono, and I. A. Husna, "Analisis Perencanaan Capacitor Bank Untuk Perbaikan Faktor Daya Pada Pusat Perbelanjaan Blitar Square," ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan, vol. 8, no. 3, pp. 59–64, 2021, doi: 10.33795/elposys.v8i3.80.
- [7] W. Ahmad, D. Widiatmoko, and F. Kholid, "Perancangan Sistem Monitoring Energi Listrik Menggunakan NodeMCU ESP8266 dan PZEM-004T untuk Pengendalian Penggunaan Daya," Jurnal FORTECH, vol. 5, no. 1, pp. 10–18, 2024, doi: 10.56795/fortech.v5i1.5102.
- [8] G. Al Azhar, S. Sungkono, M. N. Achmadiyah, and S. Izza, "Peningkatan Kestabilan Sistem Kontrol UGV melalui Optimalisasi Manajemen Core dan Free-RTOS pada ESP32," Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri, vol. 10, no. 2, pp. 253–263, 2023, doi: 10.33795/elkolind.v10i2.3720.
- [9] A. Fahmi and I. Kurniawan, "Studi Kinerja Transmisi Data Menggunakan ESP32 dan Raspberry Pi Pico Berbasis Simulasi Wokwi," Journal Zetroem, vol. 7, no. 1, pp. 80–87, 2025, doi: 10.36526/ztr.v7i1.5102.
- [10] I. Y. Fawzy, M. A. Mossa, A. M. Elsayy, I. Suwarno, and A. A. Z. Diab, "Deployment of STATCOM with Fuzzy Logic Control for Improving the Performance of Power System under Different Faults Conditions," Journal of Robotics and Control (JRC), vol. 5, no. 3, pp. 636–646, 2024, doi: 10.18196/jrc.v5i3.21558.
- [11] K. Hemasri and Ch. Srinivasa Kumar, "Fuzzy Controller with Shunt Active Power Filter in Reducing THD for Three Phase System," International Transactions on Electrical Engineering and Computer Science, vol. 3, no. 2, pp. 101–108, 2024, doi: 10.62760/iteecs.3.2.2024.93.
- [12] M. H. Musajidhin, Safiq Rosad, and Mochamad Taufiqurrochman Abdul Aziz Zein, "Sistem Monitoring Kecepatan Angin, Suhu, dan Kelembaban Udara Menggunakan ESP32," Joutica, vol. 10, no. 2, pp. 194–202, 2025, doi: 10.30736/jti.v10i2.1447.
- [13] K. K. Nurshofa, A. F. Ramadan, Nur Fajri Faiz, Paul Manurung, and Diajeng Luluk Karlina, "Penggunaan Kontaktor pada Sistem Pengaman Motor Induksi 3 Fasa," Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika, vol. 3, no. 4, pp. 280–289, 2024, doi: 10.55606/jtnei.v3i4.4567.
- [14] M. Prasetyo, S. Haryudo, J. Joko, and A. Agung, "Analisis Pemasangan Kapasitor Bank Terhadap Perubahan Nilai Faktor Daya dan Jatuh Tegangan Pada Unit Power Plant di Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi Cepu," Jurnal Teknik Elektro, vol. 11, no. 2, pp. 208–217, 2022, doi: 10.26740/jte.v11n2.p208-217.
- [15] T. Ridwan, I. Pratama, and A. K. Dewi, "Analisa Perbaikan Faktor Daya Sebagai Upaya Optimasi Daya Listrik Di Gedung Percetakan Sendok," Jurnal Teknik Elektro, vol. 9, no. 1, 2025, doi: 10.31000/jte.v9i1.13871.
- [16] M. Saleh and M. Haryanti, "Rancang Bangun Sistem Keamanan Rumah Menggunakan Relay," Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 39, no. 2, 2017, doi: 10.11591/ijeecs.v39.i2.pp860-873.
- [17] M. Somantri, M. R. Fauzan, and I. Surya, "Optimization of IoT-based monitoring system for automatic power factor correction using PZEM-004T sensor," Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 39, no. 2, p. 860, 2025, doi: 10.11591/ijeecs.v39.i2.pp860-873.
- [18] F. A. Yaqin, D. Rahmawati, A. F. Ibadillah, and K. A. Wibisono, "Perancangan Power Supply Switching Dengan Power Factor Correction (PFC) Untuk Mengoptimalkan Daya Output Dan Pengaman Proteksi Hubung Singkat," Jurnal Arus Elektro Indonesia, vol. 7, no. 2, p. 42, 2021, doi: 10.19184/jaei.v7i2.23674.