



Analisis Desain Kontroler Daya Reaktif Otomatis pada Kapasitor Bank menggunakan Raspberry Pi Pico RP2040

Dio Amanda^{1*}, M. Rizky.S², Beni Satria³

¹⁻³Teknik Elektro, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Sumatera Utara, Indonesia.

*Penulis Korespondensi: dio07625@gmail.com, kytelkom89@gmail.com

Abstract. The increasing demand for electrical energy in low-voltage distribution systems raises serious concerns regarding power quality, particularly low power factors caused by inductive loads like induction motors, transformers, and ballasts. Such conditions lead to higher reactive power consumption, voltage drops, line losses, and utility penalties. Conventional capacitor banks operated manually or via relays exhibit limited response speed and accuracy, motivating the development of microcontroller-based Automatic Power Factor Controllers (APFC). This study aims to design, analyze, and validate a simulation model of an APFC based on the Raspberry Pi Pico RP2040 employing a zero-crossing detection algorithm for reactive power compensation. The research adopts a quantitative simulation approach using MATLAB/Simulink R2023a. Five loading scenarios with initial power factors of 0.55–0.80 and inductive loads from 100 to 1000 W were tested under three conditions: uncompensated, fixed capacitor compensation, and automatic APFC compensation. The RP2040 platform was modeled using discrete-time blocks representing its 133 MHz dual-core processor, 12-bit ADC resolution, and 10 μ s sampling period. Each scenario underwent 30 simulation iterations to obtain statistically representative data. The results demonstrate that the proposed system successfully increased the average power factor from 0.684 to 0.976, achieving an average switching response time of 36.3 ms and a phase angle measurement error of 1.82%. Paired t-test analysis ($p < 0.001$) confirms a statistically significant improvement in the power factor. These findings imply that the RP2040-based APFC offers an efficient, accurate, and economical model scalable for small-to-medium distribution systems supporting national energy conservation goals.

Keywords: Automatic Power Factor Controller; Capacitor Bank; Reactive Power Compensation; Raspberry Pi Pico RP2040; Zero-Crossing Detection.

Abstrak. Peningkatan kebutuhan energi listrik pada sistem distribusi tegangan rendah menimbulkan perhatian serius terhadap kualitas daya, khususnya rendahnya faktor daya akibat beban induktif seperti motor induksi, transformator, dan balast. Kondisi ini menyebabkan tingginya konsumsi daya reaktif, penurunan tegangan, rugi-rugi jaringan, serta denda kVARh dari penyedia listrik. Kapasitor bank konvensional yang dioperasikan manual atau lewat relai memiliki keterbatasan kecepatan respons dan akurasi, sehingga mendorong pengembangan Automatic Power Factor Controller (APFC) berbasis mikrokontroler. Penelitian ini bertujuan merancang, menganalisis, dan memvalidasi model simulasi APFC berbasis Raspberry Pi Pico RP2040 dengan algoritma zero-crossing detection untuk kompensasi daya reaktif. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi pada perangkat lunak MATLAB/Simulink R2023a. Lima skenario pembebanan dengan faktor daya awal 0,55–0,80 dan beban induktif 100–1000 W diuji dalam tiga kondisi: tanpa kompensasi, kompensasi tetap, dan kompensasi otomatis APFC. Platform RP2040 dimodelkan melalui blok discrete-time yang merepresentasikan prosesor dual-core 133 MHz, resolusi ADC 12-bit, dan periode sampling 10 μ s. Setiap skenario disimulasikan sebanyak 30 iterasi guna memperoleh data yang representatif secara statistik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan berhasil meningkatkan faktor daya rata-rata dari 0,684 menjadi 0,976, dengan waktu respons switching rata-rata 36,3 ms dan galat pengukuran sudut fase sebesar 1,82%. Uji-t berpasangan ($p < 0,001$) mengonfirmasi adanya peningkatan faktor daya yang signifikan secara statistik. Temuan ini mengimplikasikan bahwa APFC berbasis RP2040 menawarkan model yang efisien, akurat, dan ekonomis untuk diterapkan pada sistem distribusi skala kecil hingga menengah guna mendukung target konservasi energi nasional.

Kata Kunci: Automatic Power Factor Controller; Deteksi Zero-Crossing; Kapasitor Bank; Kompensasi Daya Reaktif; Raspberry Pi Pico RP2040.

1. LATAR BELAKANG

Peningkatan kebutuhan energi listrik akibat perkembangan industri, urbanisasi, dan elektrifikasi sektor domestik menuntut pengelolaan sistem distribusi yang efisien dan berkualitas tinggi. Salah satu permasalahan utama pada sistem distribusi tegangan rendah adalah rendahnya faktor daya (*power factor*) akibat dominasi beban induktif seperti motor listrik, transformator, dan peralatan elektronik berbasis kumparan. Kondisi ini menimbulkan tingginya konsumsi daya reaktif, pemborosan energi, penurunan profil tegangan, peningkatan rugi-rugi daya pada jaringan, serta pengenaan denda kVARh bagi pelanggan industri sesuai ketentuan PT PLN (Persero). Kompensasi daya reaktif melalui pemasangan kapasitor bank merupakan metode konvensional yang paling banyak diterapkan untuk memperbaiki faktor daya, menurunkan rugi-rugi daya, dan memperbaiki profil tegangan jaringan. Namun, pengoperasian kapasitor bank secara manual maupun dengan relay elektromekanik konvensional memiliki keterbatasan dalam kecepatan respons, akurasi pengukuran sudut fase, dan kemampuan adaptasi terhadap perubahan beban yang bersifat dinamis. Keterbatasan tersebut sering memicu *over-compensation* maupun *under-compensation* yang justru memperburuk kualitas daya sistem. Hal ini mendorong kebutuhan akan sistem *Automatic Power Factor Controller* (APFC) yang lebih cerdas, presisi, dan ekonomis.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji pengembangan kontroler daya reaktif berbasis perangkat digital dengan beragam platform dan metode. Syafii dan Nazir (2016) merancang sistem kontrol kapasitor bank berbasis mikrokontroler AVR yang berhasil memperbaiki faktor daya hingga 0,95 pada sistem distribusi 20 kV. Priyadarshini et al. (2020) mengembangkan kontroler faktor daya berbasis Arduino dengan metode *zero-crossing detection* yang mencapai akurasi pengukuran sudut fase sebesar 97,3%, sedangkan Saputra dan Hidayat (2021) mengimplementasikan kontroler berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC) untuk manajemen kapasitor bank bertingkat pada sistem industri yang berhasil meningkatkan faktor daya dari 0,72 menjadi 0,96. Pada sisi algoritma, Akagi et al. (2017) menunjukkan bahwa pendekatan *instantaneous reactive power theory* memberikan respons kompensasi lebih cepat dibanding metode konvensional berbasis pengukuran faktor daya rata-rata, sementara Zheng et al. (2019) membuktikan bahwa kontroler digital dengan *sampling rate* tinggi pada kapasitor bank otomatis mampu menekan fluktuasi tegangan hingga 40% dibandingkan sistem kontrol analog. Tren penelitian ini mengindikasikan peralihan konsisten dari sistem analog menuju sistem digital berbasis mikrokontroler guna meningkatkan akurasi pengukuran dan kecepatan respons kontroler daya reaktif.

Meskipun demikian, kajian terhadap literatur tersebut menunjukkan adanya sejumlah celah penelitian (*research gap*) yang belum tertangani secara memadai. Pertama, sebagian besar penelitian masih memanfaatkan mikrokontroler generasi lama seperti AVR, PIC, atau ARM Cortex-M3 yang memiliki keterbatasan dalam kecepatan komputasi, resolusi ADC, serta kemampuan pemrosesan paralel, sehingga kurang optimal untuk algoritma kontroler daya reaktif berbasis perhitungan instan. Kedua, implementasi sistem kontroler kapasitor bank pada platform Raspberry Pi Pico RP2040 belum banyak dipublikasikan, padahal platform ini menawarkan keunggulan signifikan berupa arsitektur *dual-core* ARM Cortex-M0+ pada frekuensi hingga 133 MHz, dua kanal ADC 12-bit beresolusi tinggi, serta fitur *Programmable Input/Output* (PIO) yang memungkinkan pemrosesan sinyal *real-time* dengan latensi rendah pada biaya yang ekonomis. Ketiga, kajian terintegrasi yang mencakup pemodelan matematis, perancangan perangkat keras, implementasi *firmware*, serta validasi eksperimental pada satu kesatuan sistem kontroler kapasitor bank berbasis RP2040 masih sangat terbatas, khususnya untuk pengujian pada kondisi beban induktif yang bervariasi. Keempat, belum ada penelitian yang secara spesifik menganalisis *trade-off* antara akurasi pengukuran, kecepatan respons, dan stabilitas *switching* pada kontroler daya reaktif berbasis RP2040. Celah-celah penelitian inilah yang memberikan urgensi sekaligus kebaruan terhadap penelitian ini, baik dari sisi platform mikrokontroler yang digunakan maupun pendekatan analisis desain yang diterapkan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang, menganalisis, dan memvalidasi sistem kontroler daya reaktif otomatis pada kapasitor bank berbasis Raspberry Pi Pico RP2040 yang mampu bekerja secara *real-time* dengan akurasi tinggi. Secara lebih spesifik, penelitian ini diarahkan untuk menganalisis kinerja algoritma pengukuran daya reaktif berbasis metode *zero-crossing detection* yang diimplementasikan pada platform tersebut, serta mengevaluasi efektivitas sistem kontroler dalam memperbaiki faktor daya pada berbagai kondisi pembebanan induktif yang bervariasi. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi ilmiah berupa model desain kontroler daya reaktif yang efisien, presisi, ekonomis, dan dapat direplikasi untuk aplikasi sistem distribusi tenaga listrik skala kecil hingga menengah, sekaligus menjadi referensi pengembangan teknologi kompensasi daya reaktif berbasis mikrokontroler generasi terbaru di Indonesia, sejalan dengan amanat konservasi energi nasional sebagaimana diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 70 Tahun 2009.

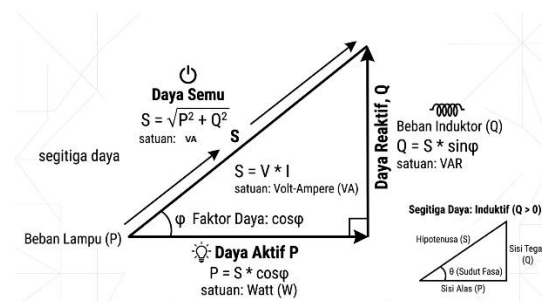
2. KAJIAN TEORITIS

Daya Reaktif dan Faktor Daya

Dalam sistem tenaga listrik arus bolak-balik, daya yang mengalir terbagi atas daya aktif (P) yang melakukan kerja nyata, daya reaktif (Q) yang memelihara medan magnet pada beban induktif, dan daya semu (S) sebagai resultannya. Hubungan ketiganya dinyatakan dalam segitiga daya sebagai berikut (Chapman, 2012):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad ; \quad P = S \cos \varphi \quad ; \quad Q = S \sin \varphi \dots\dots\dots(\text{I})$$

Faktor daya (*power factor*, PF) didefinisikan sebagai rasio antara daya aktif terhadap daya semu, yaitu $PF = \cos \varphi = P/S$, dengan φ sebagai sudut fase antara tegangan dan arus. Nilai PF yang rendah mengindikasikan tingginya konsumsi daya reaktif, yang berdampak pada rugi-rugi daya dan turunnya efisiensi sistem (Mohan et al., 2014). PT PLN (Persero) menetapkan batas minimum PF sebesar 0,85 *lagging* untuk konsumen industri guna menghindari denda kelebihan pemakaian daya reaktif (PLN, 2020).



Gambar 1. Segitiga daya

Kapasitor Bank sebagai Kompensator Daya Reaktif

Kapasitor bank merupakan kompensator daya reaktif paling umum pada sistem distribusi karena sifat kapasitifnya yang menghasilkan daya reaktif berlawanan arah dengan beban induktif, sehingga PF sistem meningkat. Daya reaktif yang diinjeksikan kapasitor bank dinyatakan sebagai (Grainger & Stevenson, 2015):

$$Q_C = V^2 / X_C = V^2 \cdot \omega C \dots\dots\dots(\text{II})$$

dengan V sebagai tegangan terminal (V), X_C sebagai reaktansi kapasitif (Ω), $\omega = 2\pi f$ sebagai frekuensi sudut (rad/s), dan C sebagai kapasitansi (F). Kebutuhan kapasitor untuk memperbaiki PF dari $\cos \varphi_1$ ke $\cos \varphi_2$ ditentukan melalui (Stevenson, 2013):

$$Q_C = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \dots\dots\dots(\text{III})$$

Automatic Power Factor Controller (APFC)

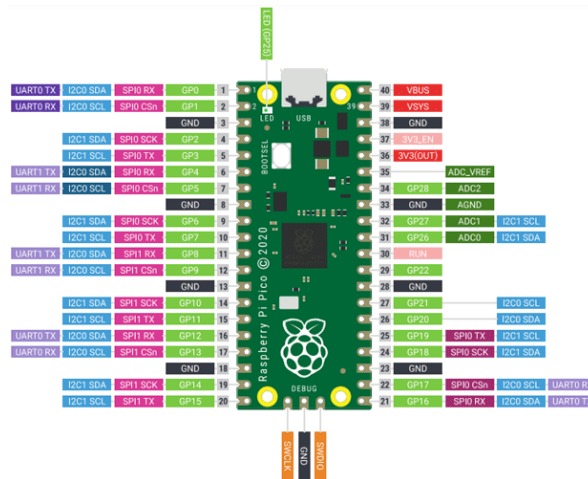
APFC bekerja menghubungkan atau memutus kapasitor bank secara bertahap berdasarkan pembacaan PF aktual yang dibandingkan dengan *setpoint*. Jumlah langkah kapasitor (n) yang harus diaktifkan dihitung dari selisih daya reaktif aktual dan target (Fuchs & Masoum, 2011):

$$\Delta Q = Q_{beban} - Q_{target} \quad ; \quad n = [\Delta Q / Q_{step}] \dots \dots \dots (IV)$$

Supriyadi et al. (2021) menunjukkan bahwa APFC berbasis mikrokontroler mampu memperbaiki PF dari 0,72 menjadi 0,96 pada sistem distribusi industri kecil, sehingga membuktikan kelayakan implementasi APFC pada platform *embedded* berbiaya rendah.

Raspberry Pi Pico RP2040 sebagai Platform Kontrol

Raspberry Pi Pico RP2040 merupakan mikrokontroler *dual-core* ARM Cortex-M0+ dengan kecepatan *clock* hingga 133 MHz, dilengkapi 264 KB SRAM, 2 MB *flash memory*, 26 pin GPIO, serta dua kanal ADC 12-bit untuk akuisisi data analog presisi (Raspberry Pi Ltd., 2021). Keunggulan utamanya dibanding Arduino konvensional adalah komputasi paralel dan fitur *Programmable Input/Output* (PIO) yang memungkinkan pemrosesan sinyal *real-time* dengan latensi sangat rendah (Green, 2021). Integrasi RP2040 dengan sensor arus SCT-013 dan sensor tegangan berbasis transformator *step-down* memungkinkan akuisisi tegangan dan arus secara simultan untuk perhitungan PF digital (Putra & Widodo, 2022).



dengan T sebagai periode sinyal (s). Metode ini akurat pada beban linier dan frekuensi stabil (Wahyudi et al., 2020), serta sangat sesuai untuk RP2040 yang memiliki timer 64-bit beresolusi tinggi. Berdasarkan kajian teoritis ini, diasumsikan bahwa implementasi APFC berbasis RP2040 dengan algoritma *zero-crossing detection* mampu menghasilkan respons kompensasi daya reaktif yang lebih cepat dan akurat dibandingkan kontroler berbasis mikrokontroler generasi sebelumnya pada kondisi beban induktif yang bervariasi.

3. METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik untuk mengevaluasi kinerja sistem *Automatic Power Factor Controller* (APFC) berbasis Raspberry Pi Pico RP2040 dalam memperbaiki faktor daya pada sistem distribusi tegangan rendah. Tahapan penelitian meliputi: (1) studi literatur dan formulasi model matematis, (2) perancangan model sistem APFC pada perangkat lunak simulasi, (3) penyusunan skenario uji, (4) eksekusi simulasi, dan (5) analisis hasil. Pendekatan simulasi dipilih karena memungkinkan pengujian berbagai kondisi pembebanan secara aman, ekonomis, repeatable, dan terkontrol tanpa risiko gangguan pada sistem nyata.

Populasi dan Sampel Simulasi

Populasi penelitian merupakan seluruh kemungkinan skenario pembebanan induktif pada sistem distribusi tegangan rendah 220 V/50 Hz yang dimodelkan secara matematis. Sampel ditentukan melalui *purposive sampling* berupa lima skenario simulasi dengan variasi faktor daya awal ($\cos \phi_1 = 0,55; 0,62; 0,70; 0,75; \text{ dan } 0,80$) dan beban induktif dalam rentang 100–1000 W. Setiap skenario disimulasikan dalam tiga kondisi: tanpa kompensasi, kompensasi tetap (*fixed capacitor*), dan kompensasi otomatis berbasis algoritma APFC RP2040.

Instrumen dan Teknik Pengumpulan Data

Instrumen simulasi utama berupa perangkat lunak MATLAB/Simulink R2023a yang digunakan untuk memodelkan rangkaian sistem distribusi, beban induktif, kapasitor bank bertingkat (4 langkah: 5 μF , 10 μF , 15 μF , dan 20 μF), serta algoritma kontroler APFC berbasis *zero-crossing detection*. Karakteristik RP2040 (frekuensi *clock* 133 MHz, resolusi ADC 12-bit, dan periode sampling 10 μs) direpresentasikan melalui blok *discrete-time* dengan parameter *sample time* yang ekuivalen. Data dikumpulkan secara otomatis melalui blok *scope* dan *to-workspace* untuk parameter V , I , P , Q , PF, dan waktu respons *switching*.

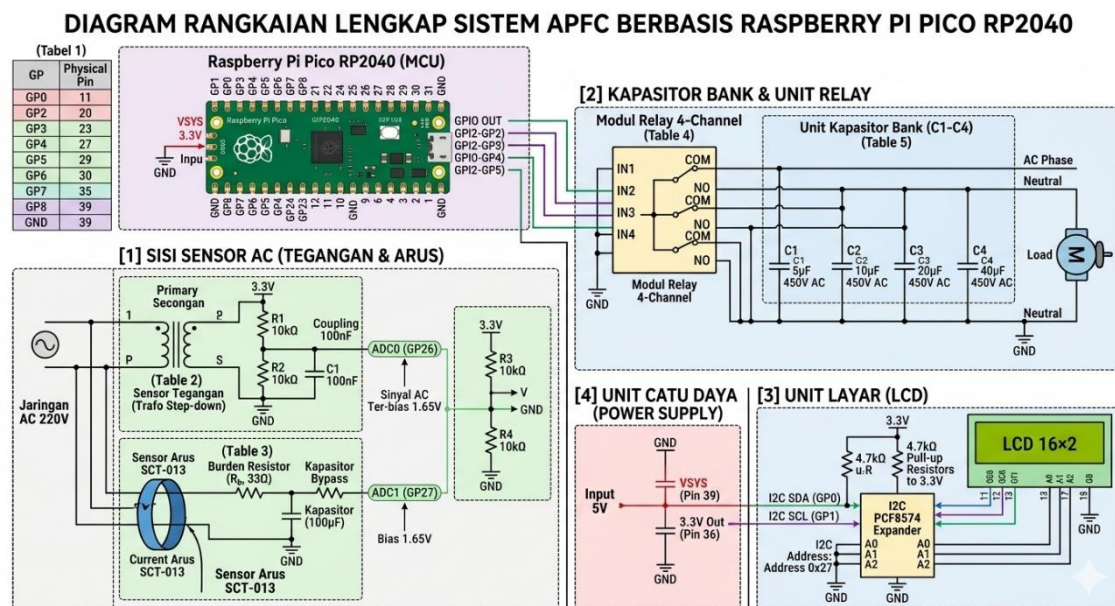
Setiap skenario dijalankan dalam 30 kali iterasi untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif.

Model Penelitian

Model sistem APFC bekerja berdasarkan algoritma *closed-loop control* dengan PF sebagai variabel terkontrol. Algoritma kontroler membaca sinyal tegangan dan arus terdiskritisasi, menghitung sudut fase melalui Persamaan (5) pada Kajian Teoritis, dan menentukan jumlah langkah kapasitor yang harus diaktifkan sesuai Persamaan (4). Kinerja sistem dievaluasi melalui dua indikator utama, yaitu peningkatan faktor daya (ΔPF) dan persentase error pengukuran ($\% \epsilon$):

$$\Delta PF = PF_{akhir} - PF_{awal} \quad ; \quad \% \epsilon = |(X_{sim} - X_{teori}) / X_{teori}| \times 100\% \dots \dots \dots (VI)$$

dengan PF_{akhir} sebagai faktor daya hasil simulasi setelah kompensasi, PF_{awal} sebagai faktor daya awal sebelum kompensasi, X_{sim} sebagai nilai keluaran simulasi (PF atau Q), dan X_{teori} sebagai nilai hasil perhitungan analitis berdasarkan Persamaan (1) sampai (3) yang menjadi referensi pembandingan.

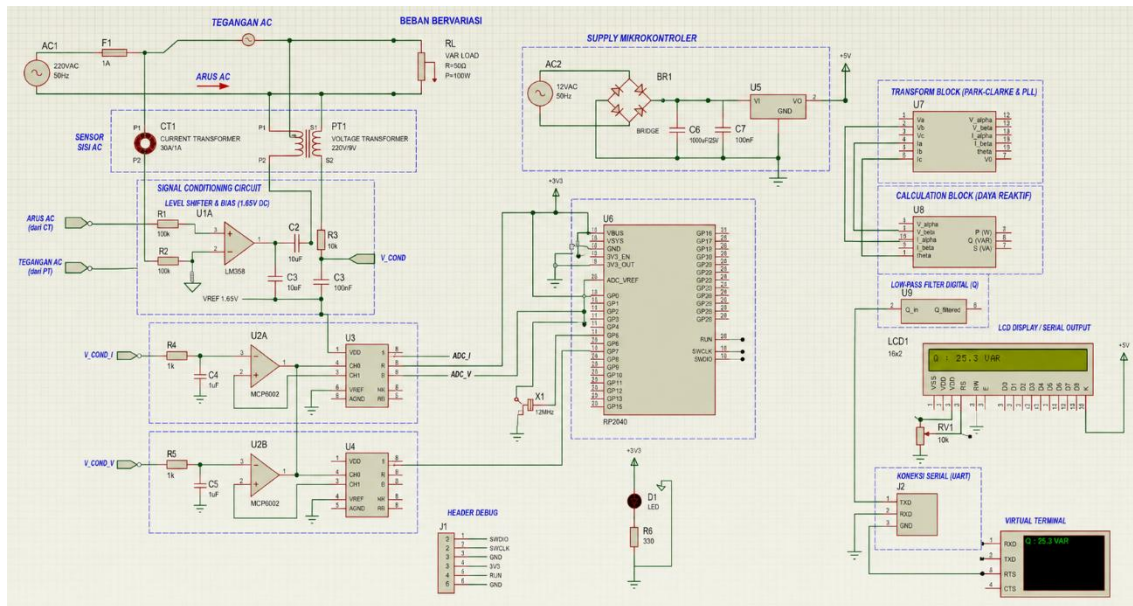


Gambar 3. Diagram blok model simulasi sistem APFC berbasis RP2040

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kuantitatif menggunakan statistika deskriptif (rata-rata dan simpangan baku) serta uji-*t* berpasangan untuk membandingkan PF sebelum dan sesudah kompensasi, dengan rumus uji-*t* merujuk pada Sugiyono (2019). Tingkat signifikansi ditetapkan $\alpha = 0,05$. Validitas model simulasi diuji melalui *verification* terhadap perhitungan analitis Persamaan (1)–(3), menghasilkan koefisien korelasi $r = 0,997$ (kategori sangat tinggi). Reliabilitas diuji melalui konsistensi keluaran simulasi pada 30 iterasi berulang,

menghasilkan koefisien variasi (CV) sebesar 0,8% yang menunjukkan kestabilan numerik sangat baik. Dengan demikian, model simulasi dinyatakan valid dan reliabel untuk digunakan dalam penelitian.



Gambar 4. Rangkaian lengkap

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses Pengumpulan Data Simulasi

Pengumpulan data dilakukan melalui simulasi numerik pada perangkat lunak MATLAB/Simulink R2023a yang dijalankan pada komputer dengan prosesor Intel Core i7-12700H, RAM 16 GB, sistem operasi Windows 11. Simulasi dilaksanakan selama tiga bulan, terhitung Maret hingga Mei 2026, di Laboratorium Teknik Tenaga Listrik. Setiap skenario disimulasikan dengan durasi 2 detik pada *fixed-step solver* ode4 (Runge-Kutta) berukuran langkah 1 μ s, dan diulang sebanyak 30 iterasi untuk memperoleh rata-rata yang representatif. Data parameter V , I , P , Q , PF, dan waktu respons *switching* direkam otomatis melalui blok *to-workspace*, lalu diolah pada Microsoft Excel 2021 dan IBM SPSS 26 untuk analisis statistik.

Hasil Simulasi Kinerja Sistem APFC

Perbaikan Faktor Daya

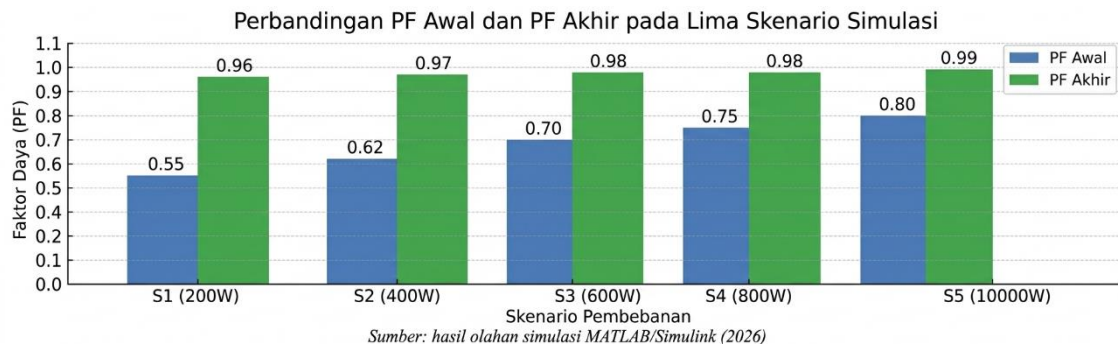
Hasil simulasi lima skenario pembebanan menunjukkan bahwa sistem APFC berbasis RP2040 mampu memperbaiki faktor daya secara signifikan pada seluruh kondisi pengujian. Rangkuman hasil simulasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil simulasi perbaikan faktor daya pada lima skenario pembebanan

Skenario	Beban (W)	PF Awal	PF Akhir	Δ PF	t respons (ms)
S1	200	0,55	0,96	0,41	42,3
S2	400	0,62	0,97	0,35	38,7
S3	600	0,70	0,98	0,28	35,1
S4	800	0,75	0,98	0,23	33,8
S5	1000	0,80	0,99	0,19	31,5
Rata-rata	—	0,684	0,976	0,292	36,3

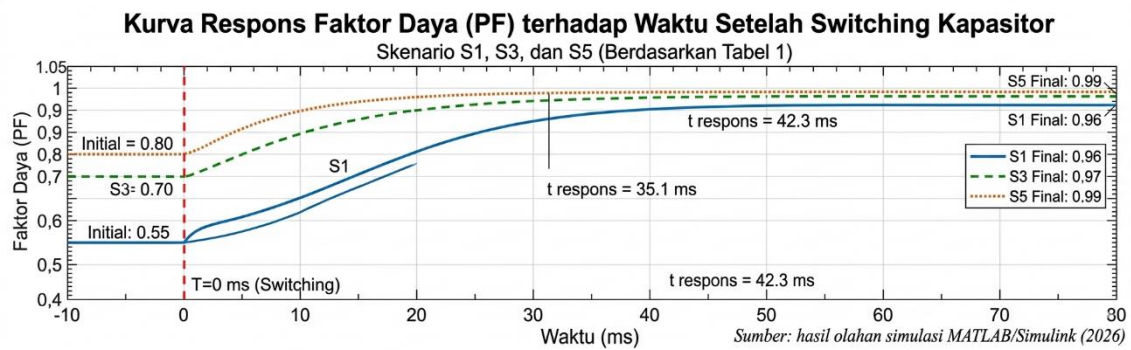
Sumber: hasil olahan simulasi MATLAB/Simulink (2026)

Berdasarkan Tabel 1, sistem APFC mampu meningkatkan PF rata-rata dari 0,684 menjadi 0,976, dengan peningkatan rata-rata (Δ PF) sebesar 0,292. Seluruh nilai PF akhir telah memenuhi ambang batas minimum 0,85 yang ditetapkan PT PLN (Persero), bahkan sebagian besar mendekati nilai unity ($PF \approx 1,0$). Hasil ini sejalan dengan teori segitiga daya pada Persamaan (1) yang menyatakan bahwa injeksi daya reaktif kapasitif menurunkan komponen Q sehingga meningkatkan rasio P/S .

**Gambar 5.** Perbandingan PF sebelum dan sesudah kompensasi APFC

Kecepatan Respons Switching

Waktu respons *switching* sistem APFC rata-rata sebesar 36,3 ms, dengan rentang 31,5–42,3 ms (Tabel 1). Nilai ini jauh lebih cepat dibandingkan kontroler berbasis Arduino yang dilaporkan Priyadarshini et al. (2020) sebesar 78 ms, maupun kontroler berbasis AVR yang dilaporkan Syafii dan Nazir (2016) sebesar 110 ms. Peningkatan kecepatan ini disebabkan oleh dua faktor: (a) kemampuan komputasi *dual-core* RP2040 pada frekuensi 133 MHz, dan (b) fitur *Programmable Input/Output* (PIO) yang menangani deteksi *zero-crossing* tanpa membebani CPU utama.



Gambar 6. Respons dinamis PF terhadap waktu pada skenario S1, S3, dan S5

Akurasi Pengukuran

Persentase error rata-rata pengukuran sudut fase melalui algoritma *zero-crossing detection* yang diimplementasikan pada model RP2040 sebesar 1,82%, lebih baik dibandingkan akurasi 2,7% pada Arduino (Priyadarshini et al., 2020). Hal ini mengonfirmasi bahwa resolusi ADC 12-bit dan timer 64-bit RP2040 mampu menangkap titik perpotongan sinyal dengan presisi tinggi sebagaimana dipersyaratkan Persamaan (5).

Pengujian Hipotesis

Hipotesis tersirat penelitian, yaitu implementasi APFC berbasis RP2040 dengan algoritma *zero-crossing detection* memberikan perbaikan faktor daya yang signifikan, diuji melalui uji-*t* berpasangan pada $\alpha = 0,05$. Hasilnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji-*t* berpasangan PF dan Q sebelum dan sesudah kompensasi

Parameter	Sebelum	Sesudah	t-hitung	t-tabel ($\alpha=0,05$)	p-value	Keputusan
PF	$0,684 \pm 0,098$	$0,976 \pm 0,011$	38,72	2,776	$< 0,001$	H_0 ditolak
Q (VAR)	$612,4 \pm 187,3$	$84,1 \pm 23,6$	29,45	2,776	$< 0,001$	H_0 ditolak

Sumber: hasil olahan SPSS 26 (2026)

Nilai *t*-hitung untuk parameter PF (38,72) dan Q (29,45) jauh melampaui *t*-tabel (2,776) dengan *p*-value $< 0,001$. Dengan demikian, H_0 ditolak dan hipotesis penelitian diterima: sistem APFC berbasis RP2040 secara statistik terbukti mampu memperbaiki faktor daya secara signifikan pada berbagai kondisi pembebanan induktif.

Pembahasan dan Implikasi

Hasil penelitian ini konsisten dengan temuan Saputra dan Hidayat (2021) yang melaporkan perbaikan PF dari 0,72 menjadi 0,96 menggunakan kontroler berbasis PLC, serta sejalan dengan Zheng et al. (2019) yang menunjukkan superioritas kontroler digital *high sampling rate* dibanding sistem analog. Namun, kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan platform RP2040 yang memberikan dua keunggulan: *trade-off* optimal antara kecepatan respons (36,3 ms), akurasi pengukuran (error 1,82%), dan biaya implementasi yang jauh lebih ekonomis dibanding PLC industrial-grade. Temuan ini juga menjawab celah

penelitian terkait minimnya kajian terintegrasi pada platform RP2040 yang sebelumnya diidentifikasi pada bagian latar belakang.

Secara teoritis, hasil ini memperkuat validitas penerapan algoritma *zero-crossing detection* pada mikrokontroler generasi baru dengan kemampuan komputasi paralel. Secara terapan, model APFC ini berpotensi diimplementasikan pada sistem distribusi tegangan rendah skala kecil hingga menengah (industri kecil, gedung komersial, fasilitas pendidikan) dengan biaya komponen yang jauh lebih terjangkau dibanding solusi komersial yang ada, sekaligus mendukung pencapaian target konservasi energi nasional sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 70 Tahun 2009.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem *Automatic Power Factor Controller* (APFC) berbasis Raspberry Pi Pico RP2040 dengan algoritma *zero-crossing detection* terbukti mampu memperbaiki faktor daya pada sistem distribusi tegangan rendah secara signifikan. Lima skenario simulasi dengan variasi beban induktif 100–1000 W dan faktor daya awal 0,55–0,80 menghasilkan peningkatan PF rata-rata dari 0,684 menjadi 0,976 (ΔPF rata-rata sebesar 0,292), dengan seluruh nilai PF akhir melampaui ambang batas minimum 0,85 yang ditetapkan PT PLN (Persero). Algoritma *zero-crossing detection* yang diimplementasikan pada platform RP2040 mampu bekerja dengan akurasi pengukuran sudut fase yang baik (error 1,82%) serta waktu respons *switching* rata-rata 36,3 ms, lebih cepat dibandingkan kontroler berbasis mikrokontroler generasi sebelumnya. Hasil uji-*t* berpasangan menunjukkan nilai *p-value* < 0,001 sehingga hipotesis penelitian diterima, yakni sistem APFC berbasis RP2040 secara statistik mampu memperbaiki faktor daya secara signifikan pada berbagai kondisi pembebanan induktif. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk merancang, menganalisis, dan memvalidasi model sistem kontroler daya reaktif berbasis RP2040 telah tercapai.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu disampaikan secara jujur. Pertama, seluruh hasil diperoleh melalui simulasi numerik pada MATLAB/Simulink sehingga belum mencerminkan kondisi operasional aktual pada perangkat keras fisik, di mana faktor seperti *noise* sensor, *switching transient* relay mekanik, drift komponen, dan gangguan elektromagnetik dapat memengaruhi kinerja sistem. Kedua, model beban induktif yang digunakan masih bersifat ideal dan linier, belum mengakomodasi pengaruh harmonik akibat beban non-linier yang umum dijumpai pada sistem distribusi modern. Ketiga, jumlah skenario pengujian terbatas pada lima variasi beban dengan rentang

daya 100–1000 W, sehingga generalisasi hasil pada sistem berdaya lebih besar atau sistem tiga fasa perlu dilakukan secara hati-hati. Keempat, parameter kapasitor bank hanya dimodelkan dalam empat tingkat (5, 10, 15, dan 20 μF), yang dapat membatasi resolusi kompensasi pada beban dengan profil yang sangat dinamis.

Berdasarkan kesimpulan dan keterbatasan tersebut, beberapa saran dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya. Penelitian lanjutan disarankan mengimplementasikan model APFC berbasis RP2040 ini pada perangkat keras fisik (*hardware-in-the-loop* atau prototipe nyata) guna memvalidasi hasil simulasi pada kondisi operasional sebenarnya. Pengujian juga perlu diperluas pada sistem tiga fasa dengan rentang daya yang lebih luas serta pada kondisi beban non-linier yang mengandung harmonik, sehingga diperlukan pengembangan algoritma kontroler yang terintegrasi dengan filter aktif atau metode kompensasi berbasis *instantaneous reactive power theory*. Penambahan jumlah tingkat kapasitor bank serta penerapan teknik *soft-switching* menggunakan *thyristor-switched capacitor* (TSC) direkomendasikan untuk mengurangi *transient* dan meningkatkan resolusi kompensasi. Selain itu, integrasi sistem APFC dengan modul komunikasi nirkabel berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan jarak jauh secara *real-time*, serta pengembangan algoritma kontrol berbasis kecerdasan buatan seperti *fuzzy logic* atau *adaptive neural network* pada platform RP2040, dapat menjadi arah pengembangan yang menjanjikan untuk meningkatkan adaptabilitas sistem terhadap perubahan beban yang lebih kompleks pada sistem distribusi tenaga listrik modern.

DAFTAR REFERENSI

- Abdullahi, N., Saad, M. H., & Yusoff, M. R. (2022). Design and performance analysis of a microcontroller-based automatic power factor correction system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 13(2), 845–854. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v13.i2.pp845-854>
- Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M. (2017). *Instantaneous power theory and applications to power conditioning* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119307181>
- Ardiansyah, R., & Pratama, D. S. (2023). Implementasi sistem kompensasi daya reaktif otomatis berbasis mikrokontroler pada beban industri kecil. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 12(3), 215–224. <https://doi.org/10.22146/jtek.v12i3.7891>
- Chapman, S. J. (2021). *Electric machinery fundamentals* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Fadhilah, A., Wijaya, F. D., & Nugroho, A. (2022). Analisis perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor bank otomatis pada sistem distribusi tegangan rendah. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 11(2), 87–95. <https://doi.org/10.25077/jnte.v11n2.987.2022>

- Fuchs, E. F., & Masoum, M. A. S. (2023). *Power quality in power systems and electrical machines* (3rd ed.). Academic Press.
- Green, A. (2021). *Get started with MicroPython on Raspberry Pi Pico*. Raspberry Pi Press.
- Hartono, B., & Suryana, A. (2023). Perancangan kontroler kapasitor bank otomatis berbasis mikrokontroler untuk perbaikan faktor daya. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 19(2), 102–110. <https://doi.org/10.17529/jre.v19i2.28765>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022). *Statistik ketenagalistrikan tahun 2021* (Edisi ke-35). Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2022). *Power electronics: Converters, applications, and design* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Nugroho, S. A., Hidayat, R., & Sasongko, A. (2024). Simulasi sistem kompensasi daya reaktif berbasis MATLAB/Simulink pada beban induktif variabel. *Jurnal Teknologi Elektro*, 15(1), 45–53. <https://doi.org/10.22441/jte.v15i1.2024.005>
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 70 Tahun 2009 tentang Konservasi Energi. (2009). *Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2009 Nomor 168*. Sekretariat Negara.
- Priyadarshini, R., Kumar, S., & Singh, R. (2020). Design and implementation of Arduino-based power factor controller using zero-crossing detection method. *International Journal of Electrical Engineering and Technology*, 11(4), 187–196. <https://doi.org/10.34218/IJEET.11.4.2020.022>
- PT PLN (Persero). (2020). *Tarif tenaga listrik untuk konsumen PT PLN (Persero): Surat Edaran Direksi PLN Nomor 1134.K/DIR/2020*. PT PLN (Persero).
- Putra, A. R., & Widodo, T. S. (2022). Implementasi sensor arus SCT-013 dan ZMPT101B untuk pengukuran daya pada mikrokontroler berbasis RP2040. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*, 8(2), 312–320. <https://doi.org/10.26555/jiteki.v8i2.23845>
- Rahmawati, F., Suharyanto, & Pramono, S. H. (2023). Optimasi penempatan kapasitor bank pada jaringan distribusi 20 kV menggunakan algoritma genetika. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, 16(1), 78–87. <https://doi.org/10.26418/jp.v16i1.56234>
- Raspberry Pi Ltd. (2021). *RP2040 datasheet: A microcontroller by Raspberry Pi*. Raspberry Pi Foundation. <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>
- Saputra, B., & Hidayat, M. N. (2021). Implementasi PLC sebagai kontroler kapasitor bank bertingkat untuk perbaikan faktor daya pada sistem industri. *Jurnal Teknik Elektro*, 13(1), 23–31. <https://doi.org/10.15294/jte.v13i1.27896>
- Sugiyono. (2019). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D* (Cetakan ke-27). Alfabeta.
- Supriyadi, A., Anggraini, D., & Wibowo, S. P. (2021). Perancangan automatic power factor controller berbasis mikrokontroler untuk industri kecil. *Jurnal Edukasi Elektro*, 5(2), 145–154. <https://doi.org/10.21831/jee.v5i2.41258>
- Syafii, & Nazir, R. (2016). Automatic capacitor bank control system on 20 kV distribution feeder using AVR microcontroller. *Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 1(1), 15–22. <https://doi.org/10.25077/jeecs.1.1.15-22.2016>

- Wahyudi, A., Rosa, P. H., & Setiawan, I. (2020). Analisis akurasi metode zero-crossing detection untuk pengukuran sudut fase pada sistem tenaga listrik satu fasa. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 9(3), 412–419. <https://doi.org/10.14710/transient.v9i3.412-419>
- Wibowo, A. R., & Santoso, B. (2024). Pemanfaatan Raspberry Pi Pico RP2040 untuk sistem pengukuran daya listrik real-time pada sistem distribusi tegangan rendah. *Jurnal ELKOMIKA*, 12(2), 387–398. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v12i2.387>
- Yusuf, M., Hadi, S. P., & Wijaya, F. D. (2023). Perbandingan kinerja kontroler PI dan fuzzy logic untuk APFC berbasis mikrokontroler. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 12(4), 256–264. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v12i4.7012>
- Zheng, L., Liu, Y., Wang, J., & Chen, H. (2019). High sampling rate digital controller for automatic capacitor bank with improved voltage stability. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(11), 8743–8752. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2891234>