

PERANCANGAN SISTEM MONITORING DAN PROTEKSI GANGGUAN INTERNAL BERBASIS IoT PADA *CAPACITOR BANK*

Windra Choirul Pratama

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Surabaya
Surabaya, East Java, Indonesia
windra.20022@mhs.unesa.ac.id

Endryansyah, Rifqi Firmansyah.

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: endryansyah@unesa.ac.id, rifqifirmansyah@unesa.ac.id

Abstrak

Capacitor bank digunakan pada sistem kelistrikan industri untuk membantu memperbaiki faktor daya sekaligus menjaga kestabilan tegangan. Penelitian ini mengembangkan sistem *monitoring* dan proteksi berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan ESP32, ZMPT101B, ACS712-30A, DHT22, relay, buzzer, LCD, dan Blynk. ESP32 melakukan pembacaan parameter dan mengeksekusi logika proteksi secara lokal. *Setpoint* prototipe ditetapkan pada 209–231 V untuk tegangan, 28 A *per fasa* untuk *overcurrent*, dan 40 °C untuk peringatan suhu. Data arus tiga fasa dinormalisasi menjadi nilai *per fasa* dengan asumsi beban relatif seimbang. Pada operasi normal, tegangan berada pada 220,05–224,62 V, arus *fasa R* ekuivalen 3,52–21,24 A, dan suhu 28,96–35,63 °C. Verifikasi logika menunjukkan output alarm dan *trip* berubah sesuai kondisi *threshold* yang diprogram. Data Blynk diperbarui secara periodik, sedangkan keputusan proteksi diproses langsung oleh ESP32 sehingga fungsi *trip* tidak bergantung pada koneksi cloud.

Kata Kunci: *capacitor bank*, ESP32, Internet of Things, sistem *monitoring*, proteksi relay

Abstract

Capacitor banks are used in industrial electrical systems to improve power factor and maintain voltage stability. This study develops an Internet of Things (IoT)-based monitoring and protection system using an ESP32, ZMPT101B, ACS712-30A, DHT22, relays, a buzzer, an LCD, and Blynk. The ESP32 acquires the monitored parameters and executes the protection logic locally. Prototype setpoints are 209–231 V for voltage, 28 A per phase for overcurrent, and 40 °C for temperature warning. The recorded three-phase current is normalized to a per-phase value under a relatively balanced-load assumption. During normal operation, voltage ranged from 220.05 to 224.62 V, the equivalent phase-R current from 3.52 to 21.24 A, and temperature from 28.96 to 35.63 °C. Quantitative logic verification showed that the alarm and trip outputs changed according to the programmed thresholds. Blynk provides periodic online data updates, while the protection decision is executed directly by the ESP32 and does not depend on cloud communication.

Keywords: capacitor bank, ESP32, Internet of Things, monitoring system, protection relay

PENDAHULUAN

Capacitor bank merupakan bagian penting dalam sistem distribusi tenaga listrik karena berperan dalam kompensasi daya reaktif, perbaikan faktor daya, pengurangan rugi-rugi, serta menjaga kestabilan tegangan pada beban industri. Pada fasilitas pabrik maupun bangunan komersial, kontinuitas operasi *capacitor bank* ikut menentukan kualitas dan efisiensi distribusi energi listrik. Ketika *capacitor bank* bekerja dengan baik, arus yang ditarik dari sumber dapat berkurang sehingga sistem tenaga dapat beroperasi lebih dekat dengan tingkat efisiensi yang diharapkan [1], [2].

Walaupun memberikan berbagai manfaat teknis, *capacitor bank* tetap rentan terhadap gangguan internal yang dipicu oleh parameter listrik maupun kondisi panel yang abnormal. *Overvoltage* dapat memberikan tekanan berlebih pada elemen kapasitor dan material isolasi,

sedangkan *undervoltage* dapat menyebabkan peralatan terhubung bekerja di luar kondisi operasi normal.

Overcurrent dapat menunjukkan overload atau aliran arus yang tidak semestinya dan berpotensi meningkatkan suhu konduktor serta panel. Apabila kondisi tersebut berlangsung tanpa deteksi dini, proses penuaan peralatan dapat menjadi lebih cepat, komponen panel berisiko mengalami kegagalan, dan potensi kebakaran pada panel listrik juga meningkat [1], [3].

Salah satu permasalahan lapangan yang melatarbelakangi penelitian ini adalah kejadian *undervoltage* yang menyebabkan kerusakan pada pompa hydraulic lift. Pada saat itu tegangan *supply* turun cukup besar, namun perangkat proteksi konvensional tidak melakukan *trip* karena gangguan tersebut tidak disertai short circuit maupun *overcurrent* yang tinggi. Kejadian ini menunjukkan bahwa perangkat konvensional seperti miniature circuit breaker belum tentu mampu mendeteksi

seluruh bentuk gangguan internal. Oleh sebab itu, dibutuhkan *monitoring* dan proteksi tambahan agar kondisi tegangan dan arus yang abnormal dapat diketahui sebelum berkembang menjadi kerusakan peralatan.

Monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) menawarkan metode praktis untuk mengawasi peralatan listrik. Data hasil pengukuran diperoleh melalui sensor, diproses oleh mikrokontroler, lalu dikirimkan ke platform *online*. Melalui visualisasi *cloud*, operator dapat mengetahui kondisi terbaru tanpa harus selalu berada langsung di depan panel. Integrasi sensor, mikrokontroler, aktuator, dan *online dashboard* juga memungkinkan sistem menjalankan kontrol otomatis ketika parameter melampaui *threshold* yang telah ditetapkan [4], [5].

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem IoT untuk memonitor parameter kelistrikan. ESP32 dan MQTT, misalnya, telah dimanfaatkan untuk pemantauan tegangan dan arus secara *real time*, sementara perangkat berbasis PZEM digunakan untuk memonitor beban sekaligus mendukung perbaikan faktor daya [2], [4]. Penelitian lain memanfaatkan IoT untuk pemantauan tegangan dan arus pada sistem fotovoltaik serta pengukuran suhu dan kelembapan di dalam kubikel 20 kV [5], [6]. Namun, sebagian besar pengembangan tersebut masih menitikberatkan pada fungsi *monitoring* dan visualisasi. Fungsi proteksi umumnya berdiri terpisah atau belum diarahkan secara langsung untuk merespons gangguan pada *capacitor bank*.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian ini menawarkan sistem *monitoring* dan proteksi *capacitor bank* berbasis IoT yang terintegrasi. Sistem menggabungkan *monitoring* tegangan AC, arus AC, dan suhu panel dengan proteksi berbasis relay terhadap *overvoltage*, *undervoltage*, dan *overcurrent*. Kontribusi utama penelitian terletak pada implementasi prototipe berbasis ESP32 yang mengintegrasikan *display* lokal, *dashboard Blynk*, indikasi alarm, logika *trip* otomatis, serta kontrol *reset* dalam satu platform *monitoring* dan proteksi.

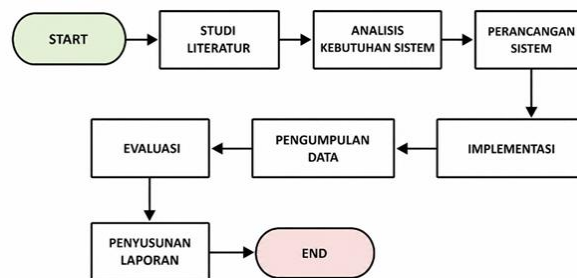
Tabel 1. Posisi penelitian yang diusulkan dibandingkan dengan penelitian terdahulu

Fokus Penelitian	Keterbatasan Utama	Peningkatan pada Penelitian Ini
<i>Monitoring</i> energi menggunakan ESP32 dan MQTT [4]	Hanya <i>monitoring</i> ; tidak terdapat perintah <i>trip</i> otomatis	Respons berbasis relay untuk gangguan tegangan dan arus
<i>Monitoring</i> beban dan faktor daya berbasis IoT [2]	Fungsi <i>trip</i> tidak menjadi fokus utama	<i>Monitoring</i> dan proteksi terintegrasi dalam satu prototipe
<i>Monitoring</i> tegangan/arus berbasis IoT untuk PV [5]	Berfokus pada <i>online monitoring</i>	Diterapkan untuk deteksi gangguan internal <i>capacitor bank</i>
<i>Monitoring</i> suhu dan kelembapan panel [6]	Berfokus pada kondisi lingkungan	Menggabungkan parameter kelistrikan dan lingkungan

METODE

Penelitian ini menggunakan metode pengembangan prototipe dengan pendekatan eksperimental. Tahapan pekerjaan mencakup analisis kebutuhan sistem, perancangan *hardware*, perancangan *software*, implementasi, dan pengujian fungsional. Objek penelitian berupa panel *capacitor bank* dengan parameter tegangan, arus, dan suhu yang dimonitor secara kontinu. Pengujian dilakukan melalui kegiatan laboratorium dan pengujian berorientasi kondisi lapangan di panel maker Jombang serta ruang panel Astra Daihatsu Gresik.

Tegangan dan arus digunakan sebagai parameter utama untuk mendeteksi kondisi *undervoltage*, *overvoltage*, dan *overcurrent*, sedangkan suhu digunakan sebagai parameter pendukung kondisi termal panel. DHT22 digunakan untuk pembacaan suhu panel pada pengujian yang dianalisis. Data *monitoring* dikirimkan ke *Blynk* untuk pengamatan daring, sedangkan keputusan proteksi dijalankan secara lokal oleh ESP32.

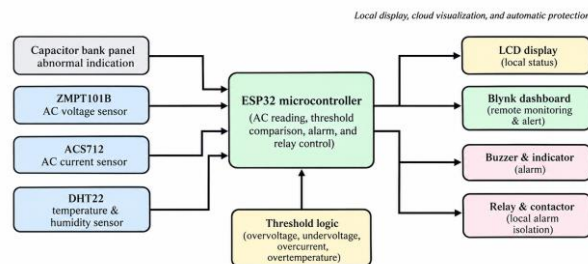


Gambar 1. Tahapan penelitian dalam pengembangan prototipe

Sistem Arsitektur

Arsitektur sistem ditunjukkan pada Gambar 2. Seluruh sensor terhubung ke ESP32 untuk membaca sinyal analog maupun digital, melakukan perbandingan terhadap *setpoint* prototipe, dan mengirimkan data ke *dashboard Blynk* melalui Wi-Fi. *Monitoring* lokal ditampilkan melalui LCD 16x2, sedangkan relay, buzzer, dan LED digunakan sebagai keluaran proteksi dan alarm. Keputusan *trip* diproses secara lokal sehingga tidak bergantung pada server *cloud*. *Blynk* berfungsi sebagai antarmuka supervisi, bukan sebagai lapisan proteksi primer.

Integrated IoT Monitoring and Protection Architecture



Gambar 2. Arsitektur sistem *monitoring* dan proteksi berbasis IoT yang diusulkan

Sensor ZMPT101B digunakan untuk membaca tegangan AC melalui isolasi transformator. Kanal arus

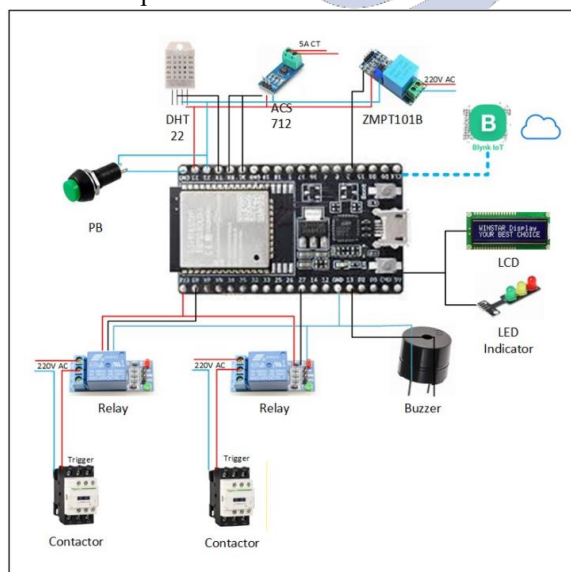
menggunakan ACS712 varian 30 A dengan sensitivitas nominal 66 mV/A [18]. Satu kanal ACS712 ditempatkan untuk merepresentasikan pembacaan arus fasa R, sedangkan data arus tiga fasa pada pencatatan operasi dinormalisasi menjadi nilai *per fasa* menggunakan $I_{\text{fasa}} = I_{3\phi}/3$ dengan asumsi beban relatif seimbang. Nilai hasil normalisasi berada pada 3,52–21,24 A sehingga masih berada di dalam rentang nominal ACS712-30A. DHT22 digunakan untuk pemantauan suhu panel. Konfigurasi ini mengintegrasikan pembacaan tegangan, arus fasa, dan suhu ke dalam satu controller ESP32.

Tabel 2. Konfigurasi *hardware* dan *software* pada sistem yang diusulkan

Kelompok	Hardware dan Software	
	Elemen	Fungsi dalam Sistem
Controller	ESP32	Akuisisi data, logika proteksi lokal, Wi-Fi, dan kontrol aktuator
Sensor	ZMPT101B, ACS712, DHT22	Tegangan; kanal arus prototipe; suhu panel
Aktuator	Relay, buzzer, LED	Perintah <i>trip</i> dan indikasi alarm
Interface	LCD, Blynk	Monitoring lokal dan daring

Perancangan Hardware dan Wiring

Prototipe menggunakan *low-voltage DC power supply* untuk *controller* dan sensor. ESP32 menerima input dari ZMPT101B, ACS712, dan DHT22. Output dialokasikan untuk relay, buzzer, indikator merah, indikator hijau, dan LCD. Jalur tegangan diisolasi melalui modul ZMPT101B, sedangkan kanal arus diproses melalui ADC ESP32. Relay terhubung pada rangkaian kontrol kontaktor sehingga perintah *trip* dapat memutus kondisi operasi ketika *setpoint* proteksi terlampaui.



Gambar 3. Diagram wiring sistem *monitoring* dan proteksi berbasis ESP32

Hardware dipasang di dalam panel *capacitor bank*. DHT22 ditempatkan pada area internal panel untuk membaca suhu udara, sedangkan sensor tegangan dan

kanal arus terhubung pada jalur pengukuran prototipe. Tombol reset fisik disediakan untuk menghapus *latched alarm* setelah pemeriksaan operator. Blynk juga menyediakan perintah reset sebagai fungsi *supervisi jarak jauh*. Untuk penerapan lapangan, fungsi reset ditempatkan setelah verifikasi kondisi normal dan dipadukan dengan *interlock lokal*.

Perancangan Software dan Logika Kontrol

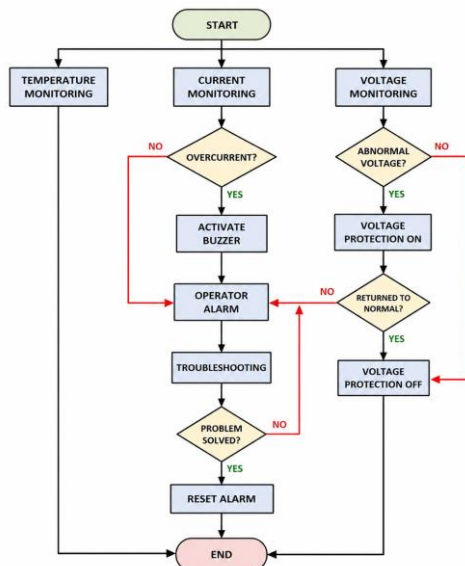
Program ESP32 dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan library Wi-Fi, Blynk, DHT22, LCD, dan ZMPT101B. Program menginisialisasi kredensial, pin sensor/aktuator, konstanta kalibrasi, dan *setpoint*. Controller membaca tegangan, arus, dan suhu, memperbarui LCD, mengirimkan data ke Blynk, lalu mengevaluasi kondisi *fault*. Pada implementasi yang terdokumentasi, pembaruan DHT22 ke Blynk dilakukan pada interval sekitar 1 s; interval ini merupakan interval pembaruan *monitoring* dan bukan waktu *trip* relay.

Logika alarm menggunakan *latched state* agar gangguan singkat tetap tercatat sampai diperiksa operator. Reset dapat dilakukan melalui tombol lokal maupun Blynk setelah kondisi operasi diverifikasi. Pada rancangan penerapan lapangan, *remote reset* dipadukan dengan verifikasi kondisi normal, *interlock lokal*, otorisasi pengguna, dan *fail-safe hardwired* sehingga fungsi *supervisi* tidak mengalahkan lapisan proteksi utama.

Tabel 3. Penetapan virtual pin Blynk pada sistem *monitoring*

Virtual Pin	Data atau Perintah	Tujuan
V1	Data tegangan	Menampilkan hasil pengukuran tegangan di Blynk
V2	Data suhu	Menampilkan suhu panel
V3	Data arus	Menampilkan hasil pengukuran arus
V5	Status buzzer	Menampilkan status alarm
V6	Status relay tegangan	Menampilkan kondisi proteksi tegangan
V8	Status relay arus	Menampilkan kondisi proteksi arus
V0, V7, V9	Perintah <i>reset</i>	Reset jarak jauh untuk <i>latched buzzer</i> dan relay

Pembagian virtual pin memisahkan jalur data sensor, status aktuator, dan perintah *reset*. Struktur ini membantu *troubleshooting* dan memisahkan fungsi *supervisi* dari keputusan proteksi lokal. Perintah *reset* pada prototipe hanya digunakan setelah pemeriksaan operator dan tidak menggantikan *interlock keselamatan* yang dipersyaratkan pada implementasi lapangan.

Gambar 4. Alur kendali algoritma *monitoring* dan proteksiTabel 4. *Setpoint* prototipe yang digunakan dalam logika kontrol

Parameter	Kondisi	<i>Setpoint</i>	Respons Sistem
Tegangan	<i>Overvoltage</i>	$V > 231 \text{ V}$	Relay trip
Tegangan	<i>Undervoltage</i>	$V < 209 \text{ V}$	Relay trip
Arus	Overcurrent	$I_R \geq 28 \text{ A}$	Relay trip
Arus	Normal	$I_R < 28 \text{ A}$	Normal prototipe
Suhu	<i>Overtemperature</i>	$T > 40 \text{ }^\circ\text{C}$	Alarm early-warning

Batas tegangan 209–231 V digunakan sebagai *setpoint* prototipe dengan acuan nominal 220 V. Sebagai dasar teknis penetapan tegangan, SPLN 1:1995 memuat tegangan sistem nominal dan batas variasi pelayanan [15], sehingga penetapan *setpoint* akhir pada instalasi mengikuti tegangan nominal aktual dan koordinasi proteksi peralatan. Untuk kanal ACS712-30A, *setpoint overcurrent* prototipe ditetapkan 28 A *per fasa*, yaitu di bawah batas ukur 30 A agar tersedia margin pengukuran sebelum full-scale. Pada implementasi *capacitor bank*, setting arus akhir tetap disesuaikan dengan rated current dan maximum permissible current sesuai prinsip IEC 60831-1 [17]. Ambang suhu 40 °C digunakan sebagai *early-warning* prototipe dan konsisten dengan batas atas kondisi udara lingkungan normal pada IEC 61439-1 untuk low-voltage assemblies [16]. Deviasi tegangan dihitung dengan persamaan berikut:

$$Dv = (|V - V_n| / V_n) \times 100\% \quad (1)$$

dengan dV sebagai selisih antara tegangan terukur dan nilai acuan, serta V_n sebagai tegangan nominal/acuan. Persamaan daya semu, daya aktif, dan faktor daya yang sebelumnya dicantumkan dihapus karena parameter tersebut tidak diukur dan tidak dianalisis secara kuantitatif dalam dataset artikel.

Validasi Pengukuran dan Penanganan Data

Kalibrasi awal dilakukan dengan membandingkan ZMPT101B terhadap multimeter, ACS712-30A terhadap *power meter*, dan DHT22 terhadap termometer acuan. Untuk validasi kuantitatif, error relatif didefinisikan sebagai $|x_{\text{sensor}} - x_{\text{ref}}| / x_{\text{ref}} \times 100\%$. Kriteria penerimaan prototipe ditetapkan maksimum 2% untuk kanal tegangan, maksimum 1,5% untuk kanal ACS712-30A mengikuti total output error tipikal pada 25 °C [18], dan $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ untuk DHT22 [13]. Pada Tabel 6, nilai *power meter* tiga fasa ditampilkan bersama nilai ekuivalen *per fasa* dan batas toleransi ACS712 agar konsistensi skala pengukuran dapat dievaluasi secara langsung.

Data sensor dibaca dan dikonversi ke *engineering unit* sebelum dibandingkan dengan *setpoint*. Pembacaan tegangan menggunakan sampling berulang untuk mengurangi fluktuasi, kanal arus menerapkan koreksi offset, dan pembacaan DHT22 yang tidak valid diabaikan. *Dashboard* hanya menampilkan hasil; keputusan alarm dan relay diproses di ESP32. Struktur ini mempertahankan fungsi proteksi lokal ketika koneksi *Blynk* terputus.

Mekanisme *latch* mempertahankan indikasi *fault* sampai operator melakukan pemeriksaan dan *reset*. *Reset* lokal maupun daring digunakan untuk menghapus status *latch* setelah kondisi sistem kembali normal. Pada rancangan implementasi industri, fungsi ini dipadukan dengan interlock kondisi normal, autentikasi pengguna, dan proteksi *hardwired* sebagai lapisan keselamatan utama.

Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dalam empat tahap: *monitoring* dan proteksi tegangan, pengamatan arus, pemantauan suhu, dan verifikasi *dashboard Blynk*. Data operasi normal dicatat setiap satu jam pukul 09.00–22.00 untuk membentuk tren operasi. Pengujian proteksi dilakukan secara terpisah dengan memberikan kondisi uji di luar *setpoint* dan mengamati perubahan alarm serta status relay.

Interval satu jam pada tabel merupakan interval pencatatan tren dan bukan *sampling rate* internal ESP32. Pada fungsi pembacaan tegangan, program mengambil 30 sampel dengan jeda 2 ms sehingga waktu *sampling* eksplisit sekitar 60 ms. Loop utama memiliki *delay* 1000 ms; karena logika *trip* dievaluasi secara lokal pada setiap siklus, estimasi batas atas waktu respons *software* terhadap *fault* adalah sekitar 1,06 s dan dibulatkan menjadi $\leq 1,1 \text{ s}$. Communication *delay* menuju *Blynk* tidak berada pada jalur *trip* relay karena keputusan proteksi dijalankan langsung oleh ESP32.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Prototipe

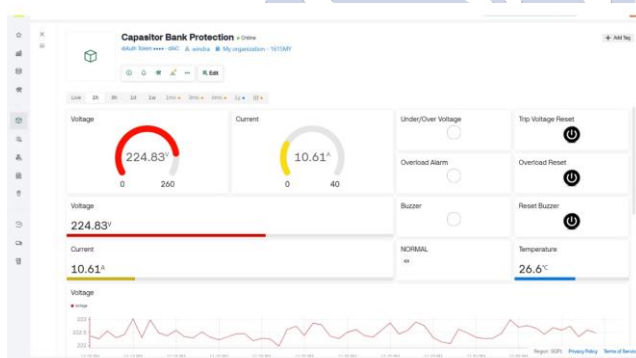
Prototipe *hardware* berhasil dipasang dan diuji di panel *capacitor bank*. LCD menampilkan parameter *monitoring* dan indikator menunjukkan status operasi. Pada pengujian

awal, ESP32 mampu membaca kanal sensor, mengendalikan *relay* dan *buzzer*, serta berkomunikasi dengan *Blynk*. Gambar 5 menunjukkan implementasi prototipe pada panel *capacitor bank* saat proses pengujian lapangan.



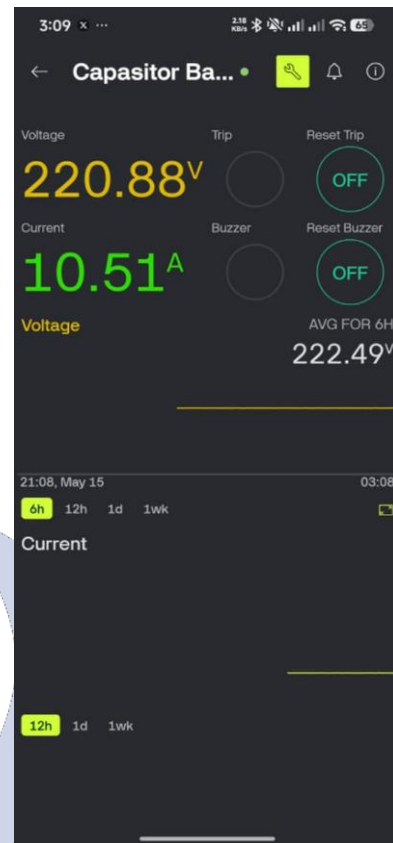
Gambar 5. Implementasi prototipe pada panel *capacitor bank*

Interface *Blynk* memuat indikator numerik, grafik, status alarm, dan tombol reset. Melalui dashboard web, operator dapat mengamati kondisi prototipe dari jarak jauh. Remote reset digunakan setelah operator memastikan parameter telah kembali pada kondisi normal. Untuk penerapan industri, perintah reset dipadukan dengan interlock lokal, autentikasi pengguna, dan prosedur pemeriksaan sebelum energisasi kembali.



Gambar 6. Dashboard web *Blynk* untuk monitoring prototipe

Selain dashboard web, *Blynk* pada *smartphone* digunakan untuk melihat tegangan, arus, status *trip*, status *buzzer*, tombol reset, dan tren secara *mobile*. Gambar 7 menunjukkan tampilan aplikasi yang digunakan operator untuk melakukan monitoring jarak jauh.



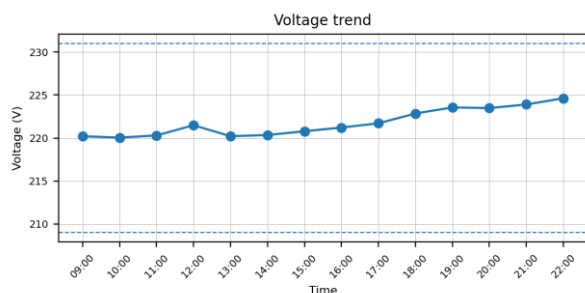
Gambar 7. Tampilan *Blynk* pada *smartphone* untuk monitoring jarak jauh

Hasil Monitoring Tegangan

Hasil *monitoring* tegangan disajikan pada Tabel 5. Tegangan berada pada 220,05–224,62 V dengan rata-rata 221,77 V. Deviasi maksimum terhadap acuan 220 V sebesar 2,10%. Seluruh nilai operasi normal berada di dalam pita prototipe 209–231 V. Pita ini digunakan untuk pengujian prototipe dan tidak dimaksudkan untuk menggantikan batas pelayanan SPLN 1:1995 yang mengacu pada nominal 230/400 V [15].

Tabel 5. Hasil *monitoring* tegangan pada pukul 09.00 sampai 22.00

Waktu	Tegangan (V)	Deviasi	Status
09:00	220.21	0.10%	Normal
10:00	220.05	0.02%	Normal
11:00	220.30	0.14%	Normal
12:00	221.49	0.68%	Normal
13:00	220.21	0.10%	Normal
14:00	220.35	0.16%	Normal
15:00	220.79	0.36%	Normal
16:00	221.22	0.55%	Normal
17:00	221.71	0.78%	Normal
18:00	222.85	1.30%	Normal
19:00	223.56	1.62%	Normal
20:00	223.48	1.58%	Normal
21:00	223.90	1.77%	Normal
22:00	224.62	2.10%	Normal



Gambar 8. Tren tegangan selama operasi normal

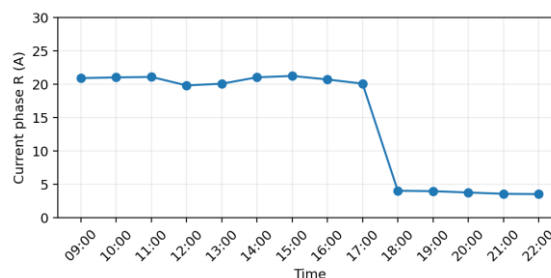
Data tegangan menunjukkan ZMPT101B mampu mengikuti perubahan tegangan selama periode observasi. Pembacaan sensor dibandingkan dengan *multimeter* pada tahap kalibrasi awal. Selama pengamatan normal, tegangan berada pada 220,05–224,62 V dengan deviasi maksimum 2,10% terhadap acuan 220 V. Seluruh nilai berada di dalam *setpoint* prototipe 209–231 V sehingga relay tetap pada kondisi normal.

Hasil Monitoring Arus dan Suhu

Hasil *monitoring* arus ditampilkan pada Tabel 6. Nilai *power meter* yang dicatat sebagai arus tiga fasa dinormalisasi menjadi nilai *per fasa* untuk menyesuaikan penggunaan ACS712-30A pada fasa R. Pada pukul 09.00–17.00, arus ekuivalen fasa R berada pada 19,82–21,24 A. Setelah pukul 18.00, nilai turun menjadi 3,52–4,02 A. Penurunan ini konsisten dengan kondisi operasional lokasi: setelah sekitar pukul 17.00 aktivitas bengkel dan sebagian besar beban office telah selesai, sehingga beban yang tersisa terutama PJU dan beberapa lampu penerangan. Seluruh nilai berada di bawah *setpoint overcurrent* 28 A *per fasa*. Batas toleransi pembacaan ACS712 pada Tabel 6 menggunakan $\pm 1,5\%$ sebagai kriteria penerimaan berdasarkan datasheet [18].

Tabel 6. Hasil *monitoring* arus tiga fasa dan normalisasi arus fasa R

Waktu	Power meter 3 ϕ (A)	ACS712-30A fasa R* (A)	Toleransi $\pm 1,5\%$ (A)
09:00	62.73	20.91	± 0.31
10:00	63.05	21.02	± 0.32
11:00	63.27	21.09	± 0.32
12:00	59.45	19.82	± 0.30
13:00	60.22	20.07	± 0.30
14:00	63.09	21.03	± 0.32
15:00	63.73	21.24	± 0.32
16:00	62.12	20.71	± 0.31
17:00	60.23	20.08	± 0.30
18:00	12.07	4.02	± 0.06
19:00	11.88	3.96	± 0.06
20:00	11.27	3.76	± 0.06
21:00	10.67	3.56	± 0.05
22:00	10.56	3.52	± 0.05

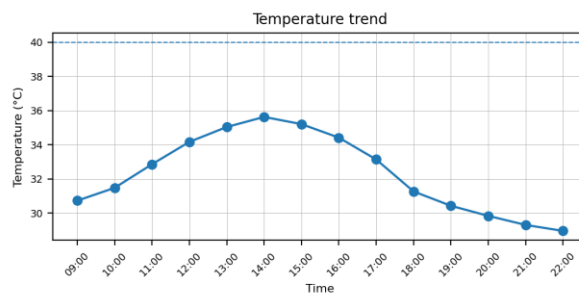


Gambar 9. Tren arus ekuivalen fasa R selama periode pengamatan

Hasil *monitoring* suhu disajikan pada Tabel 7. Suhu tertinggi 35,63 °C terjadi pukul 14.00 dan terendah 28,96 °C pukul 22.00, dengan rata-rata 32,32 °C. Nilai selama pengamatan berada di bawah *setpoint early-warning* 40 °C sehingga kondisi suhu panel selama periode pengujian berada pada status normal.

Tabel 7. Hasil *monitoring* suhu pada pukul 09.00 sampai 22.00

Waktu	Suhu (°C)	Ambang	Status
09:00	30.73	< 40 °C	Normal
10:00	31.48	< 40 °C	Normal
11:00	32.86	< 40 °C	Normal
12:00	34.17	< 40 °C	Normal
13:00	35.04	< 40 °C	Normal
14:00	35.63	< 40 °C	Normal
15:00	35.21	< 40 °C	Normal
16:00	34.42	< 40 °C	Normal
17:00	33.14	< 40 °C	Normal
18:00	31.27	< 40 °C	Normal
19:00	30.43	< 40 °C	Normal
20:00	29.84	< 40 °C	Normal
21:00	29.31	< 40 °C	Normal
22:00	28.96	< 40 °C	Normal

Gambar 10. Tren suhu di dalam panel *capacitor bank*

Ringkasan Kinerja Monitoring

Ringkasan statistik ditunjukkan pada Tabel 8. Tegangan rata-rata adalah 221,77 V, arus ekuivalen fasa R rata-rata 14,63 A, dan suhu rata-rata 32,32 °C. Arus fasa R diperoleh dari normalisasi data tiga fasa dengan asumsi beban relatif seimbang. Selama periode pengamatan, tegangan, arus, dan suhu berada pada kondisi normal terhadap *setpoint* prototipe.

Tabel 8. Ringkasan statistik data *monitoring*

Parameter	Minimum	Maksimum	Rata-rata / Status
Tegangan (V)	220.05	224.62	221.77 / Normal
Arus fasa R (A)	3.52	21.24	14.63 / Normal
Suhu (°C)	28.96	35.63	32.32 / Normal

Validasi sensor dilakukan terhadap instrumen acuan yang sesuai. ZMPT101B dibandingkan dengan multimeter, ACS712-30A menggunakan *power meter* sebagai referensi skala arus, dan DHT22 dibandingkan dengan termometer. Kriteria error relatif maksimum ditetapkan 2% untuk kanal tegangan dan 1,5% untuk ACS712-30A, sedangkan DHT22 menggunakan toleransi $\pm 0,5$ °C. Untuk data arus, Tabel 6 memperlihatkan nilai *power meter* tiga fasa, hasil normalisasi *per fasa*, serta toleransi arus yang diperkenankan pada setiap titik pengamatan.

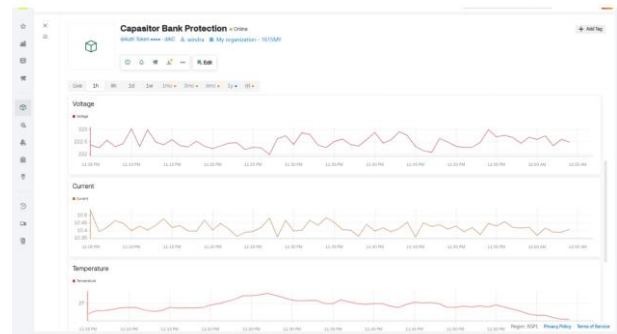
Respons Proteksi dan Monitoring Daring

Verifikasi kuantitatif logika proteksi dilakukan menggunakan *test vector* representatif terhadap *threshold* program. Kondisi normal menggunakan V=220 V dan I_R=15,0 A sehingga output *trip*=0. *Undervoltage* menggunakan V=205 V, *overvoltage* V=235 V, dan *overcurrent* I_R=29,0 A; masing-masing memenuhi kondisi logika *trip* sehingga output digital menjadi 1. Berdasarkan struktur program, estimasi batas atas waktu respons *software* adalah $\leq 1,1$ s. Nilai ini berasal dari waktu *sampling* eksplisit sekitar 60 ms dan *delay* loop 1000 ms; jalur *trip* tetap diproses lokal dan tidak menunggu komunikasi *Blynk*.



Gambar 11. Kondisi *hardware* saat pengujian respons alarm dan proteksi

Blynk menampilkan nilai aktual dan tren sehingga perubahan parameter dapat diamati dari waktu ke waktu. Fungsi ini digunakan untuk supervisi dan penelusuran kondisi operasi. Logika *trip* tetap dijalankan lokal pada ESP32; karena itu, koneksi internet digunakan untuk *monitoring* dan perintah supervisi, bukan sebagai jalur keputusan proteksi primer.



Gambar 12. Visualisasi tren yang diperoleh dari *dashboard Blynk*

Tabel 9. Verifikasi kuantitatif logika proteksi dan estimasi waktu respons

Kondisi	Input kuantitatif	Output trip	Estimasi respons
Normal	V=220 V; I _R =15,0 A	0 / relay closed	≤ 1.1 s/cycle
Undervoltage	V=205 V	1 / relay open	≤ 1.1 s
Overvoltage	V=235 V	1 / relay open	≤ 1.1 s
Overcurrent	I _R =29,0 A	1 / relay open	≤ 1.1 s
Remote reset	Normal + command <i>Blynk</i>	1→0 / reset latch	Supervisory

Pembahasan

Hasil verifikasi logika memperlihatkan bahwa fungsi *monitoring* dan *trip* dapat diintegrasikan dalam satu sistem IoT berbasis ESP32. Keputusan *trip* dilakukan lokal sehingga tidak bergantung pada *Blynk*. *Setpoint* tegangan 209–231 V, arus 28 A *per fasa*, dan suhu 40 °C digunakan pada prototipe untuk mengevaluasi logika kontrol. *Test vector* 205 V dan 235 V memenuhi kondisi *trip* tegangan sehingga menghasilkan flag=1, sedangkan input arus 29,0 A memenuhi kondisi *overcurrent* dan menghasilkan flag=1. Kondisi normal 220 V dan 15 A menghasilkan flag=0. Estimasi waktu respons *software* $\leq 1,1$ s diperoleh dari struktur *sampling* dan loop program. Pada penerapan lapangan, nilai setting tetap disesuaikan dengan nominal sistem, rating *capacitor bank*, karakteristik peralatan, koordinasi proteksi, dan standar yang berlaku [15]–[17].

Blynk meningkatkan akses supervisi karena data dan status dapat dipantau dari jarak jauh. *Remote reset* ditempatkan setelah proses verifikasi kondisi normal dan pada rancangan industri dipadukan dengan interlock lokal serta autentikasi pengguna. Proteksi *hardwired* dan prosedur pemeriksaan lokal tetap menjadi lapisan keselamatan utama sebelum sistem dioperasikan kembali.

Pengembangan sistem diarahkan pada peningkatan ketelitian kalibrasi multi-titik, pencatatan data proteksi beresolusi tinggi, *data logging* lokal, serta pengujian berulang pada setiap skenario gangguan. Pengembangan berikutnya juga mencakup verifikasi *response time* menggunakan logger atau osiloskop untuk mengonfirmasi estimasi *software* $\leq 1,1$ s, serta penguatan *interlock remote reset*, autentikasi pengguna, dan penyimpanan riwayat alarm.

Dari sisi maintenance, prototipe dapat berfungsi sebagai lapisan *early warning* dan alat bantu supervisi.

Sistem tidak dimaksudkan menggantikan proteksi standar. Kondisi *undervoltage* dapat dikenali oleh logika tambahan meskipun tidak memicu *overcurrent*, tetapi *setpoint* final harus dikoordinasikan dengan tegangan pelayanan dan karakteristik beban. Pendekatan ini relevan untuk mencegah pengulangan kasus tegangan rendah pada peralatan, dengan tetap mempertahankan perangkat proteksi tersertifikasi.

Pengembangan selanjutnya dapat memperluas *data logging* lokal dan melakukan pengukuran *fault-to-trip* dengan logger atau osiloskop sebagai validasi terhadap estimasi *software* $\leq 1,1$ s. *Dashboard* dapat dilengkapi notification rule dan historical chart. Pengukuran power factor dan harmonisa dapat ditambahkan menggunakan instrumen yang sesuai untuk memperluas evaluasi kualitas daya *capacitor bank*.

Komponen prototipe relatif mudah diperoleh sehingga cocok untuk laboratorium dan *proof of concept*. Untuk implementasi industri, pemilihan sensor/transduser, *electrical isolation*, *enclosure safety*, *electromagnetic compatibility*, kalibrasi, koordinasi proteksi, dan standar instalasi wajib diverifikasi. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan kelayakan arsitektur, bukan sertifikasi kinerja proteksi industri.

PENUTUP

Simpulan

Penelitian ini menghasilkan sistem *monitoring* dan proteksi gangguan internal *capacitor bank* berbasis IoT menggunakan ESP32, ZMPT101B, ACS712-30A, DHT22, relay, buzzer, LCD, dan *Blynk*. Tegangan operasi normal berada pada 220,05–224,62 V dengan rata-rata 221,77 V, arus ekuivalen *fasa R* 3,52–21,24 A dengan rata-rata 14,63 A, dan suhu 28,96–35,63 °C dengan rata-rata 32,32 °C. *Setpoint* prototipe 209–231 V, 28 A *per fasa*, dan 40 °C digunakan untuk logika proteksi tegangan, arus, dan peringatan suhu. Uji logika kuantitatif menunjukkan flag *trip* berubah dari 0 menjadi 1 ketika input melewati *threshold*, dengan estimasi batas atas waktu respons *software* $\leq 1,1$ s. *Blynk* mendukung *monitoring* dan supervisi jarak jauh, sedangkan keputusan proteksi dijalankan lokal oleh ESP32. Sistem dapat dikembangkan lebih lanjut melalui kalibrasi multi-titik, validasi *response time* menggunakan instrumen beresolusi tinggi, *data logging*, dan *interlock remote reset* untuk penerapan industri.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya atas dukungan akademik selama proses pengembangan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. S. W. Widagdo, G. Budiono, and M. I. Novianto, "Analysis of capacitor bank installation for power quality improvement at PT. Sunrise Steel," Wahana, vol. 75, no. 2, 2023.
- [2] I. Surya, A. Maulana, and R. Prasetyo, "Sistem monitoring beban listrik dan perbaikan faktor daya menggunakan PZEM004T berbasis IoT," Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan, vol. 3, no. 3, 2023.
- [3] A. Jaenul, M. Manfaluthy, Y. Pramodja, and F. Anjara, "Capacitor bank performance and power quality evaluation in low-voltage distribution systems," Journal of Electrical Engineering and Technology, 2023.
- [4] A. Setiawan, R. Pratama, and D. Kurniawan, "Smart energy monitoring system using ESP32 and MQTT for real-time electrical parameter tracking," International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2022.
- [5] T. Sutikno, A. Hakim, and M. F. Akbar, "Monitoring tegangan dan arus pada panel surya menggunakan IoT," Majalah Ilmiah Teknologi Elektro, vol. 22, no. 1, 2023.
- [6] I. Irawati, M. T. Amien, E. Sumarno, and F. Rosyadi, "Prototype monitoring suhu dan kelembapan pada kubikel 20 kV berbasis IoT," Transmisi, vol. 25, no. 3, 2023.
- [7] A. B. Arief, "Rancang bangun sistem kendali otomatis dan monitoring suhu dan kelembapan pada rumah burung walet berbasis Blynk," Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan, vol. 12, no. 2, 2024.
- [8] M. G. Arkhan and Z. R. Saputra, "Air quality monitoring system based Internet of Things," Brilliance: Research of Artificial Intelligence, vol. 4, no. 2, 2023.
- [9] H. S. Hakki, "ESP8266 and ESP32 series of SoC microcontrollers," Programmable Smart Microcontroller Cards, 2021.
- [10] A. Saputra, H. Khumaini, and A. Azkiya, "Perancangan alat monitoring arus pada circuit breaker dengan sensor ACS712 menggunakan tampilan LCD," Informatika, vol. 14, no. 2, 2023.
- [11] L. H. Laisina, "Leak current detector in low voltage network system using ZMPT101B sensor based on the Internet of Things," International Journal of Multidisciplinary Science and Arts, vol. 2, no. 1, 2023.
- [12] R. J. Syahputra, "Monitoring the temperature and humidity air in the room using a sensor IoT-based DHT-11," Journal of Artificial Intelligence Engineering and Applications, vol. 3, no. 1, 2023.
- [13] R. Ramadhani, A. Wijaya, and D. R. Nugroho, "Monitoring suhu panel distribusi menggunakan sensor digital berbasis mikrokontroler," Jurnal Teknik Elektro dan Komputer, 2022.
- [14] M. Akbari, "Interfacing ZMPT101B voltage sensor with Arduino," ElectroPeak, 2021.
- [15] PT PLN (Persero), "SPLN 1:1995 Tegangan-Tegangan Standar," Jakarta, Indonesia, 1995.
- [16] International Electrotechnical Commission, "IEC 61439-1:2011 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies—Part 1: General rules," Geneva, Switzerland, 2011.
- [17] International Electrotechnical Commission, "IEC 60831-1:2014 Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1 000 V—Part 1: General," Geneva, Switzerland, 2014.
- [18] Allegro MicroSystems, "ACS712 Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC," Datasheet ACS712-DS Rev. 22, Feb. 2024.