



JASEE

Journal of Application and Science on Electrical Engineering

<https://jurnal.widyagama.ac.id/index.php/jasee/index>



Rancang Bangun Sistem Monitoring Listrik Tiga Fasa Berbasis IoT pada Bengkel TITL SMKN 1 Tangerang

I Kadek Dwi Adnyano¹, Diyajeng Luluk Karlina¹, Suhendar¹

¹Pendidikan Vokasional Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Indonesia

Corresponding author, email: kadekadnyano08@gmail.com

Abstract

Stable electrical parameters are essential for safe and reliable practical activities in vocational electrical workshops. Initial observation at the Electrical Power Installation Engineering workshop of Sekolah Menengah Kejuruan Negeri 1 Kabupaten Tangerang recorded a phase-to-neutral voltage of 190 V, indicating the need for continuous monitoring. This study designed and implemented an Internet of Things-based three-phase electrical parameter monitoring system using a PZEM-6L24 sensor, ESP32 microcontroller, local display, and Blynk platform. The system was developed using the Analyze, Design, Develop, Implement, and Evaluate model and validated through functional testing, laboratory comparison with conventional measuring instruments, and field implementation at the main distribution panel. Laboratory testing of 21 evaluated parameters produced an average error of 1.31%, with a maximum error of 2.33% for current and a minimum error of 0.31% for voltage. Field comparison produced an average error of 1.18%, while all 21 evaluated parameters were displayed successfully in real time. The field snapshot also showed highly uneven phase currents, indicating uneven load distribution under the observed operating condition. The developed system can support real-time electrical monitoring and maintenance evaluation in vocational workshops.

Keywords: Internet of Things, three-phase electrical monitoring, PZEM-6L24, ESP32, Blynk, load distribution



p-ISSN : 2721-3625

e-ISSN : 2721-320X

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan penting dalam lingkungan pendidikan. Di Indonesia, peningkatan infrastruktur dan pemanfaatan teknologi turut meningkatkan kebutuhan energi listrik, termasuk pada gedung sekolah dan fasilitas praktikum [1]. Penyaluran energi hingga konsumen dilayani melalui jaringan distribusi, antara lain tegangan menengah 20 kV dan tegangan rendah 380/220 V [2].

Kualitas parameter listrik perlu dijaga agar peralatan dapat beroperasi dengan aman dan andal. Pada instalasi tiga fasa, masalah yang relevan meliputi penurunan tegangan, distribusi beban yang tidak merata, dan penurunan faktor daya. Distribusi arus yang tidak merata dapat meningkatkan rugi-rugi dan pembebanan pada penghantar tertentu [3]. Karena beban bengkel praktikum berubah sesuai jenis dan jumlah peralatan yang digunakan, pemantauan tegangan, arus, frekuensi, dan daya secara berkelanjutan menjadi penting.

Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) memerlukan instalasi listrik yang mendukung kegiatan praktik secara aman. Pada bengkel Teknik Instalasi Tenaga Listrik (TITL), variasi penggunaan peralatan

<https://doi.org/10.31328/jasee.v7i1.01>

Received: 09/02/2026

Revised: 15/02/2026

Accepted: 17/03/2026 , published by ©UWG Press 2026

dapat menimbulkan perubahan tegangan dan distribusi arus antar fasa. Kondisi tersebut perlu dipantau secara real-time agar perubahan parameter dapat diketahui tanpa bergantung pada pengukuran sesaat.

Internet of Things (IoT) memungkinkan parameter kelistrikan dipantau dan dikirim melalui jaringan untuk ditampilkan secara real-time [4]. Penelitian monitoring energi berbasis IoT sebelumnya banyak menggunakan PZEM-004T pada sistem satu fasa [5], [6]. Sistem monitoring tiga fasa juga telah dikembangkan [7], sedangkan penelitian lain membahas kualitas daya pada fasilitas rumah sakit [8] dan sistem pembangkit off-grid [9]. Namun, konteks bengkel vokasional memerlukan pemantauan tiga fasa sekaligus, validasi pembacaan terhadap alat ukur pembanding, dan pengamatan langsung pada panel dengan distribusi beban yang berubah.

Kesenjangan penelitian terletak pada kebutuhan sistem monitoring tiga fasa yang tidak hanya menampilkan data melalui IoT, tetapi juga diuji akurasi dan diterapkan pada instalasi bengkel vokasional. Penelitian ini memanfaatkan PZEM-6L24 dan ESP32 untuk membaca parameter utama tiga fasa secara simultan dan mengirimkannya ke Blynk, sehingga kondisi tegangan dan distribusi arus dapat diamati pada panel utama bengkel TITL.

Kontribusi penelitian ini adalah integrasi sensor PZEM-6L24, ESP32, tampilan lokal, dan Blynk untuk monitoring parameter listrik tiga fasa, disertai uji fungsional, perbandingan pembacaan dengan alat ukur konvensional, dan implementasi pada panel utama bengkel. Fokus penelitian adalah monitoring dan evaluasi kondisi, bukan proteksi otomatis atau koreksi kualitas daya.

Rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Bagaimana merancang sistem monitoring parameter listrik tiga fasa berbasis IoT menggunakan PZEM-6L24 dan ESP32?
- 2) Bagaimana tingkat error pembacaan sistem dibandingkan dengan alat ukur konvensional?
- 3) Bagaimana kinerja sistem dalam menampilkan data real-time dan mengidentifikasi distribusi arus antar fasa pada panel bengkel TITL?

Penelitian ini bertujuan merancang, mengimplementasikan, dan menguji sistem monitoring parameter listrik tiga fasa berbasis IoT menggunakan PZEM-6L24 dan ESP32, mengevaluasi error pembacaan terhadap alat ukur pembanding, serta mengidentifikasi kondisi tegangan dan distribusi arus pada panel utama bengkel TITL.

Ruang lingkup penelitian dibatasi pada tegangan fasa-netral, tegangan antar fasa, arus, frekuensi, daya aktif, daya reaktif, daya semu, pengujian fungsional komunikasi, dan pemantauan real-time melalui Blynk. Penelitian tidak mencakup harmonisa, total harmonic distortion, transient, sag-swell, audit kualitas daya menggunakan power quality analyzer, proteksi otomatis, atau koreksi faktor daya.

2. STUDI PUSTAKA

2.1 Kualitas Daya dan Standar Parameter

Kualitas daya berkaitan dengan kesesuaian tegangan, arus, frekuensi, dan bentuk gelombang terhadap kebutuhan peralatan. Gangguan seperti undervoltage, overvoltage, harmonisa, interupsi, dan fluktuasi tegangan dapat menurunkan kinerja peralatan [8], [9]. Dalam penelitian ini, evaluasi tegangan menggunakan acuan nominal 220/230 V fasa-netral, 380/400 V antar fasa, dan frekuensi 50 Hz sebagaimana dinyatakan dalam naskah berdasarkan PUIL 2011/SNI 0225:2011.

2.2 Monitoring Berbasis IoT

Monitoring merupakan proses pemantauan untuk memperoleh informasi kondisi sistem dari waktu ke waktu [10]. Pada sistem kelistrikan, IoT memungkinkan hasil pengukuran dikirim dari perangkat sensor dan mikrokontroler ke antarmuka pengguna melalui jaringan. Pendekatan ini telah digunakan pada monitoring daya satu fasa [4]-[6] maupun tiga fasa [7], sehingga dapat mendukung pemantauan jarak jauh dan pencatatan parameter secara real-time.

2.3 ESP32 dan PZEM-6L24

ESP32 berperan sebagai mikrokontroler pengolah data dan antarmuka komunikasi, sedangkan PZEM-6L24 digunakan sebagai sensor parameter listrik tiga fasa. Mikrokontroler mengintegrasikan pemrosesan, memori, dan antarmuka input-output yang dapat diprogram sesuai kebutuhan aplikasi [11]. PZEM-6L24 pada sistem ini digunakan untuk membaca tegangan, arus, frekuensi, daya aktif, daya reaktif, daya semu, dan parameter energi dengan rentang spesifikasi yang dirangkum pada Tabel 2.

2.4 Blynk

Blynk merupakan platform IoT yang digunakan untuk menerima dan menampilkan data dari perangkat terhubung. Pada penelitian ini, Blynk berfungsi sebagai antarmuka monitoring pada perangkat seluler, sedangkan LCD pada panel menyediakan tampilan lokal. Penggunaan platform sejenis mendukung visualisasi data dan pemantauan jarak jauh [12].

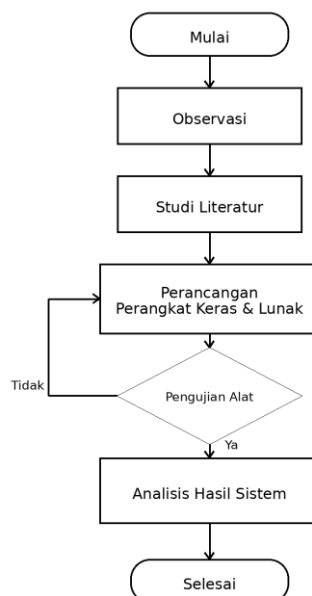
3. METODE

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa dengan pendekatan rancang bangun untuk menghasilkan prototipe monitoring parameter listrik tiga fasa berbasis IoT pada bengkel TITL SMK Negeri 1 Kabupaten Tangerang. Pengembangan mengikuti model Analyze, Design, Develop, Implement, and Evaluate (ADDIE) [13], [14]. Untuk memenuhi kebutuhan validasi teknis, evaluasi dilengkapi dengan black-box testing dan uji error pembacaan sensor terhadap alat ukur konvensional. Kegiatan penelitian berlangsung dari Desember 2025 sampai Mei 2026; pengujian laboratorium dilakukan di Laboratorium Konsentrasi Sistem Tenaga Listrik PVTE FKIP Universitas Sultan Ageng Tirtayasa dan implementasi lapangan dilakukan di Gedung CoE TITL.

3.2 Alur Penelitian

Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1, mulai dari observasi, studi literatur, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, pengujian, hingga analisis hasil. Jika hasil pengujian belum sesuai dengan rancangan, proses dikembalikan ke tahap perancangan untuk perbaikan.



Gambar 1. Alur Penelitian

3.3 Tahapan Penelitian (Model ADDIE)

a. Analisis Kebutuhan

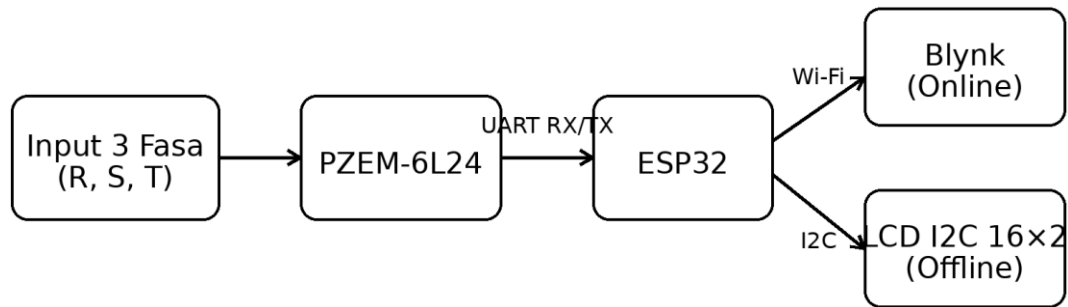
Tahap analisis dilakukan melalui observasi instalasi listrik tiga fasa dan wawancara dengan pengelola bengkel. Observasi awal mencatat tegangan fasa-netral 190 V, yaitu 13,64%

di bawah acuan nominal 220 V. Jika batas bawah -10% dari 220 V digunakan, nilainya adalah 198 V; karena itu hasil awal tersebut menunjukkan perlunya pemantauan tegangan secara berkelanjutan.

Kebutuhan fungsional mencakup pembacaan tegangan, arus, frekuensi, daya aktif, daya reaktif, daya semu, faktor daya, dan energi yang didukung sensor, serta pengiriman data ke Blynk dan tampilan lokal. Uji akurasi dalam penelitian ini dibatasi pada 21 nilai yang tersaji pada Tabel 4: enam parameter pada masing-masing fasa dan tiga tegangan antar fasa.

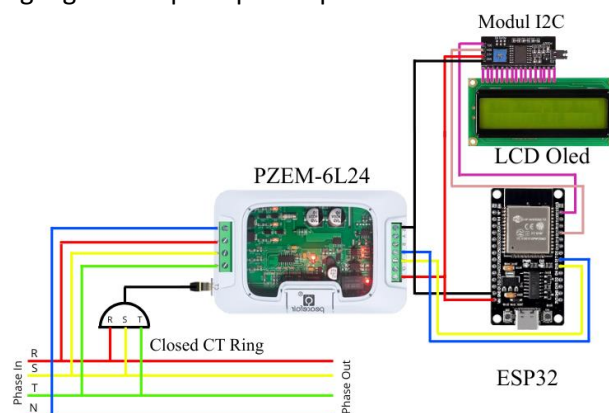
b. Desain Sistem

Tahap desain mencakup diagram blok, skema wiring, panel, dan antarmuka Blynk. Diagram blok ditunjukkan pada Gambar 2 dan skema wiring pada Gambar 3.



Gambar 2. Diagram Blok Perancangan Sistem

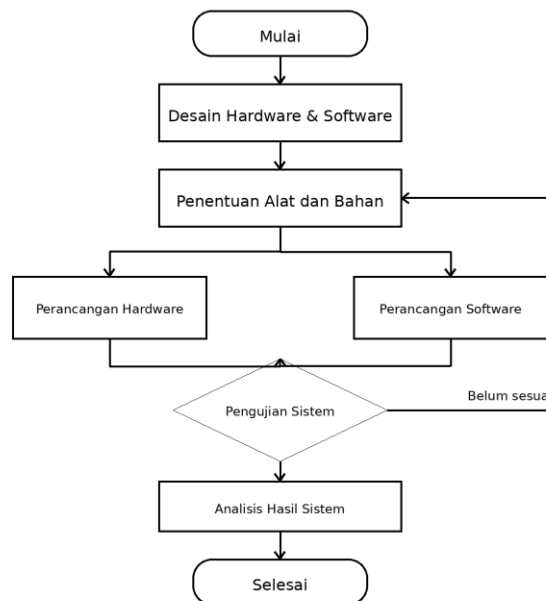
Berdasarkan Gambar 2, aliran listrik tiga fasa (R, S, T) dibaca oleh PZEM-6L24. Data dikirim ke ESP32 melalui UART, kemudian ditampilkan secara online pada Blynk dan secara lokal pada LCD I2C. Gambar 3 memperlihatkan koneksi terminal sensor, CT ring, UART2, I2C, dan catu daya 5 V yang digunakan pada prototipe.



Gambar 3. Rangkaian Sistem Monitoring

c. Pengembangan

Tahap pengembangan meliputi pemilihan komponen, pemrograman pada Arduino IDE, perakitan awal, dan pengujian sistem. Alur pengembangan dan evaluasi ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Flowchart Rancang Bangun Sistem

Berdasarkan Gambar 4, desain perangkat keras dan perangkat lunak dikembangkan secara paralel, kemudian diuji. Jika hasil belum sesuai, konfigurasi perangkat dan program disesuaikan sebelum pengujian diulang.

d. Implementasi

Komponen dirakit secara semi permanen dalam panel 18 cm × 11 cm × 6 cm. Sensor dihubungkan ke fasa R, S, dan T, sedangkan CT ring digunakan untuk pembacaan arus secara non-invasif. Selama pemasangan pada panel utama diterapkan prosedur K3, termasuk penggunaan alat pelindung diri, pendampingan pengelola bengkel, penempatan komponen elektronik di dalam panel tertutup, serta penggunaan catu daya 5 V yang terisolasi dari jalur tegangan yang diukur.

e. Evaluasi

Evaluasi dilakukan melalui dua tahap: (1) black-box testing untuk memverifikasi fungsi koneksi, tampilan, dan reconnect [15], serta (2) pengujian error dengan membandingkan pembacaan PZEM-6L24 dan alat ukur konvensional pada 21 nilai parameter listrik.

3.4 Instrumentasi Penelitian

Perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan dirangkum pada Tabel 1, sedangkan rentang pengukuran PZEM-6L24 disajikan pada Tabel 2 [20].

Tabel 1. Komponen Penelitian

No	Perangkat	Keterangan
1	Arduino IDE	Perangkat lunak untuk penulisan dan pengunggahan program C/C++ ke ESP32 [16].
2	Blynk	Platform IoT untuk menampilkan data pengukuran secara real-time pada perangkat seluler.
3	NodeMCU ESP32	Mikrokontroler 32-bit dengan Wi-Fi dan antarmuka UART, I2C, SPI, serta GPIO [17].
4	Sensor PZEM-6L24	Sensor tiga fasa untuk tegangan, arus, frekuensi, daya aktif, daya reaktif, daya semu, faktor daya, dan energi.
5	LCD I2C 16×2	Tampilan lokal yang terhubung ke ESP32 melalui I2C.

Tabel 2. Spesifikasi Pengukuran PZEM-6L24 [20]

Parameter	Min	Typical	Max	Akurasi	Satuan
Tegangan	50	220/380	566	1%	V
Arus	0	—	100	1%	A
Frekuensi	45	50	65	1%	Hz
Daya Aktif	0	—	38	1%	kW
Daya Reaktif	0	—	38	1%	kVAR
Daya Semu	0	—	38	1%	kVA
Faktor Daya	0	—	1	1%	PF
Energi Aktif	0	—	399.999.999,9	1%	kWh
Suhu Operasi	-20	23	60	—	°C

3.5 Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras mengikuti skema pada Gambar 3. Fasa R, S, dan T dihubungkan ke terminal tegangan PZEM-6L24 sesuai konfigurasi sistem; data sensor dikirim ke ESP32 melalui UART2 (RX2 pin 16 dan TX2 pin 17), sedangkan LCD menggunakan I2C (SDA pin 21 dan SCL pin 22). Seluruh komponen ditempatkan pada panel box dengan tampilan LCD di bagian depan.

3.6 Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan pada Arduino IDE menggunakan C/C++. Program mencakup inisialisasi UART, I2C, Wi-Fi, dan Blynk; pendefinisian parameter dan virtual pin; pengiriman data melalui fungsi sendDataKeBlynk() setiap 0,5 detik; serta logika status Wi-Fi/Blynk dan reconnect pada LCD. Struktur modular seperti ini digunakan agar fungsi komunikasi dan tampilan dapat diuji secara terpisah [18].

3.7 Pengujian Sistem

Pengujian fungsional menggunakan black-box testing [15] pada empat skenario: koneksi Wi-Fi, koneksi Blynk, status sistem, dan reconnect otomatis. Hasilnya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Uji Coba Respon Sistem

No	Pengujian	Keterangan
1	Menghubungkan Wi-Fi	Berhasil; LCD menampilkan status koneksi dan Wi-Fi terhubung dalam <2 detik.
2	Menghubungkan Blynk	Berhasil; LCD menampilkan status koneksi dan Blynk terhubung dalam <2 detik setelah Wi-Fi tersedia.
3	Konektivitas sistem	Berhasil; LCD menampilkan "Sistem Siap" dan data dikirim ke Blynk setiap 0,5 detik.
4	Menghubungkan ulang	Berhasil; sistem melakukan reconnect otomatis dan kembali terhubung penuh dalam <4 detik.

Pengujian error membandingkan pembacaan PZEM-6L24 dengan alat ukur konvensional pada 21 nilai: tegangan fasa-netral, arus, frekuensi, daya aktif, daya reaktif, dan daya semu untuk fasa R, S, dan T, serta tegangan R-S, S-T, dan T-R. Persentase error dihitung menggunakan Persamaan (1). Untuk ringkasan deskriptif, Tabel 4 juga menampilkan akurasi relatif yang didefinisikan sebagai 100% dikurangi error.

$$\text{Error (\%)} = |X_{\text{sensor}} - X_{\text{referensi}}| / X_{\text{referensi}} \times 100\% \quad (1)$$

Alat ukur pembanding yang digunakan pada penelitian ini adalah multimeter digital Sanwa CD800A dengan tampilan 3-3/4 digit (4000 count). Berdasarkan spesifikasi pabrikan, alat ini memiliki resolusi 0,001 V untuk pengukuran tegangan AC dan 0,01 mA untuk pengukuran arus AC, dengan akurasi $\pm(1,6\% + 9 \text{ digit})$ untuk tegangan AC, $\pm(2,8\% + 5 \text{ digit})$ untuk arus AC, dan $\pm(0,5\% + 3 \text{ digit})$ untuk frekuensi [19]. Status kalibrasi resmi alat ini tidak terdokumentasi pada penelitian ini, dan setiap titik uji hanya diukur satu kali (*single reading*) tanpa pengulangan, sehingga hasil pengujian error pada

Tabel 4 dan Tabel 5 bersifat indikatif dan belum merepresentasikan nilai rata-rata dari beberapa kali pengukuran.

Tabel 4. Uji Coba Pengukuran Sistem

No	Parameter	Hasil Sensor	Pengukuran	% Error	Akurasi relatif (%)
1	Tegangan (R)	223,5 V	224,2 V	0,31%	99,69%
2	Arus (R)	0,51 A	0,52 A	1,92%	98,08%
3	Frekuensi (R)	49 Hz	50 Hz	2,00%	98,00%
4	Real Power (R)	91,19 W	92,4 W	1,31%	98,69%
5	Reactive Power (R)	68,39 VAR	69,1 VAR	1,03%	98,97%
6	Apparent Power (R)	113,99 VA	115,4 VA	1,22%	98,78%
7	Tegangan (S)	221,8 V	222,5 V	0,31%	99,69%
8	Arus (S)	0,44 A	0,45 A	2,22%	97,78%
9	Frekuensi (S)	49 Hz	50 Hz	2,00%	98,00%
10	Real Power (S)	78,07 W	79,2 W	1,43%	98,57%
11	Reactive Power (S)	58,55 VAR	59,5 VAR	1,60%	98,40%
12	Apparent Power (S)	97,59 VA	98,8 VA	1,22%	98,78%
13	Tegangan (T)	235,0 V	234,2 V	0,34%	99,66%
14	Arus (T)	0,42 A	0,43 A	2,33%	97,67%
15	Frekuensi (T)	49 Hz	50 Hz	2,00%	98,00%
16	Real Power (T)	78,96 W	80,1 W	1,42%	98,58%
17	Reactive Power (T)	59,22 VAR	60,2 VAR	1,63%	98,37%
18	Apparent Power (T)	98,70 VA	100,2 VA	1,50%	98,50%
19	Tegangan R-S	385,63 V	387,1 V	0,38%	99,62%
20	Tegangan S-T	395,59 V	398,2 V	0,66%	99,34%
21	Tegangan T-R	397,06 V	399,5 V	0,61%	99,39%
	Rata-rata			1,31%	98,69%

Berdasarkan Tabel 4, rata-rata error 21 nilai pengujian laboratorium adalah 1,31% dengan akurasi relatif 98,69%. Error tertinggi adalah 2,33% pada pengukuran arus dan error terendah 0,31% pada pengukuran tegangan. Hasil ini menunjukkan bahwa pembacaan sistem mendekati nilai alat ukur pembandingan pada kondisi pengujian yang dilaporkan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil pengujian fungsional, pengujian laboratorium, serta implementasi dan perbandingan pembacaan sistem pada panel utama Gedung CoE TITL SMK Negeri 1 Kabupaten Tangerang.

4.1 Hasil Pengujian Fungsional Sistem

Black-box testing [15] menunjukkan keempat fungsi pada Tabel 3 berjalan sesuai rancangan. Wi-Fi dan Blynk terhubung masing-masing dalam waktu kurang dari 2 detik, data dikirim setiap 0,5 detik, dan sistem dapat melakukan reconnect otomatis dalam waktu kurang dari 4 detik.

Hasil fungsional tersebut menunjukkan mekanisme komunikasi dan pemulihan koneksi bekerja tanpa restart manual pada skenario uji yang dilaporkan. Pengujian ini memverifikasi fungsi perangkat, tetapi tidak menggantikan evaluasi akurasi pengukuran.

4.2 Hasil Pengujian Akurasi di Sekolah

Sistem dipasang pada 21 Mei 2026 di panel hubung bagi utama Gedung CoE TITL SMK Negeri 1 Kabupaten Tangerang dengan pendampingan pengelola bengkel dan prosedur K3. Pembacaan sistem kemudian dibandingkan dengan alat ukur konvensional; hasilnya disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Pengukuran Lapangan

No	Parameter	Hasil Sensor	Pengukuran	% Error	Keterangan
1	Tegangan R-S	401,48 V	396,40 V	1,28%	Berhasil
2	Tegangan S-T	397,37 V	392,30 V	1,29%	Berhasil
3	Tegangan T-R	370,82 V	366,10 V	1,29%	Berhasil
4	Tegangan (R)	233,8 V	230,80 V	1,30%	Berhasil
5	Arus (R)	0,04 A	0,0396 A	1,01%	Berhasil
6	Frekuensi (R)	49,81 Hz	49,17 Hz	1,30%	Berhasil
7	Real Power (R)	4,8 Watt	4,75 Watt	1,05%	Berhasil
8	Reactive Power (R)	1,39 VAR	1,37 VAR	1,46%	Berhasil
9	Apparent Power (R)	4,1 VA	4,05 VA	1,23%	Berhasil
10	Tegangan (S)	209,9 V	207,20 V	1,30%	Berhasil
11	Arus (S)	2,18 A	2,16 A	0,93%	Berhasil
12	Frekuensi (S)	49,85 Hz	50,00 Hz	0,30%	Berhasil
13	Real Power (S)	449 Watt	445 Watt	0,90%	Berhasil
14	Reactive Power (S)	67,61 VAR	66,72 VAR	1,33%	Berhasil
15	Apparent Power (S)	454,1 VA	448,30 VA	1,29%	Berhasil
16	Tegangan (T)	235,9 V	232,90 V	1,29%	Berhasil
17	Arus (T)	0,03 A	0,0297 A	1,01%	Berhasil
18	Frekuensi (T)	49,84 Hz	49,20 Hz	1,30%	Berhasil
19	Real Power (T)	0,8 Watt	0,79 Watt	1,27%	Berhasil
20	Reactive Power (T)	6,25 VAR	6,17 VAR	1,30%	Berhasil
21	Apparent Power (T)	6,3 VA	6,22 VA	1,29%	Berhasil
Keberhasilan tampilan data				21/21	100%

Berdasarkan Tabel 5, seluruh 21 nilai yang dievaluasi berhasil dibaca dan ditampilkan pada Blynk (21/21 atau 100% keberhasilan tampilan). Perhitungan ulang dari nilai pada tabel menghasilkan rata-rata error lapangan 1,18%. Pada snapshot tersebut, arus fasa R, S, dan T masing-masing 0,04 A, 2,18 A, dan 0,03 A, sehingga distribusi arus pada saat pengukuran sangat tidak merata. Tegangan fasa S sebesar 209,9 V adalah sekitar 4,6% di bawah nominal 220 V dan masih berada di atas 198 V, yaitu batas -10% dari nominal tersebut.

4.3 Analisis Faktor Penyebab Error Pengukuran

Pola error pada Tabel 4 dan Tabel 5 menunjukkan perbedaan yang relatif kecil antara sensor dan alat ukur pembanding, tetapi besarnya error tidak sama untuk setiap parameter. Karena itu, penyebab error dibahas sebagai indikasi teknis berdasarkan pola data yang tersedia, bukan sebagai hasil pengujian metrologi terpisah.

Spesifikasi pada Tabel 2 mencantumkan akurasi sensor 1%. Pada pengujian laboratorium, error arus mencapai 2,33%, lebih tinggi daripada error tegangan 0,31%-0,66%. Perbedaan ini dapat berkaitan dengan sensitivitas pembacaan CT dan kondisi pemasangan, sehingga posisi CT dan kestabilan beban perlu diperhatikan ketika membandingkan pembacaan arus.

Frekuensi terbaca 49 Hz pada sensor dan 50 Hz pada alat pembanding sehingga error relatif menjadi 2,00%. Pada nilai yang sempit, resolusi dan pembulatan pembacaan dapat memberi pengaruh proporsional yang lebih besar. Pada pengujian lapangan, arus fasa R dan T hanya 0,04 A dan 0,03 A; pada beban sangat rendah, selisih absolut kecil juga menghasilkan persentase error yang terlihat lebih besar.

Interpretasi penyebab error tetap memiliki keterbatasan karena status kalibrasi resmi multimeter Sanwa CD800A sebagai alat ukur pembanding tidak terdokumentasi, dan setiap titik uji hanya diukur satu kali tanpa pengulangan maupun pencatatan durasi sampling. Pengukuran berulang

dengan alat yang telah dikalibrasi resmi diperlukan pada penelitian lanjutan agar ketidakpastian pengukuran dan *repeatability* dapat dievaluasi secara lebih kuat.

4.4 Kesesuaian Hasil dengan Standar PUIL/SPLN dan Penelitian Terdahulu

Hasil lapangan memperlihatkan tegangan fasa S 209,9 V. Nilai ini 10,1 V atau sekitar 4,6% di bawah nominal 220 V, sehingga masih berada dalam rentang $\pm 10\%$ jika nominal 220 V digunakan. Kondisi ini berbeda dari observasi awal 190 V, yang berada 13,64% di bawah 220 V. Perbedaan dua waktu pengukuran tersebut menunjukkan bahwa kesimpulan tentang undervoltage perlu didasarkan pada pemantauan berulang atau kontinu, bukan satu snapshot.

Distribusi arus pada snapshot lapangan sangat tidak merata: fasa S 2,18 A, sedangkan fasa R 0,04 A dan fasa T 0,03 A. Data ini menunjukkan dominasi beban pada fasa S pada saat pengukuran, tetapi satu kondisi operasi belum cukup untuk menggeneralisasi tingkat ketidakseimbangan sepanjang waktu. Implikasi teknis distribusi beban yang tidak merata tetap relevan untuk dipantau karena dapat meningkatkan pembebanan pada fasa tertentu [3], sejalan dengan perhatian pada kualitas daya di fasilitas publik [8].

Dibandingkan sistem satu fasa berbasis PZEM-004T [5], [6], rancangan ini memantau tiga fasa secara simultan. Penelitian monitoring tiga fasa sebelumnya juga telah menunjukkan pemanfaatan IoT untuk penyajian data daya [7]. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penerapan di bengkel vokasional serta pembandingan 21 nilai pengukuran dengan alat ukur konvensional. Rata-rata error lapangan berdasarkan Tabel 5 adalah 1,18%, sedangkan pengujian laboratorium menghasilkan 1,31%.

Dengan demikian, sistem memenuhi fungsi monitoring real-time dan mampu memperlihatkan perubahan tegangan serta distribusi arus antar fasa pada kondisi pengujian. Namun, interpretasi terhadap standar PUIL/SPLN dan karakterisasi load imbalance perlu diperkuat dengan rujukan standar resmi serta data pengukuran berulang pada beberapa tingkat dan waktu pembebanan.

5. SIMPULAN

Sistem monitoring parameter listrik tiga fasa berbasis IoT berhasil dirancang menggunakan PZEM-6L24, ESP32, LCD I2C, dan Blynk. Pengujian laboratorium pada 21 nilai menghasilkan rata-rata error 1,31%, dengan error maksimum 2,33% pada arus dan minimum 0,31% pada tegangan. Pada implementasi lapangan, seluruh 21 nilai berhasil ditampilkan secara real-time dan rata-rata error hasil perhitungan ulang adalah 1,18%. Snapshot lapangan juga menunjukkan distribusi arus yang sangat tidak merata antar fasa, sehingga sistem dapat digunakan untuk membantu identifikasi kondisi yang memerlukan pemeriksaan lebih lanjut.

Kesimpulan mengenai undervoltage dan ketidakseimbangan beban belum dapat digeneralisasi karena data lapangan yang tersedia terbatas pada kondisi pengukuran yang dilaporkan. Penelitian lanjutan perlu mencatat pengukuran pada beberapa kondisi beban dan waktu operasi, menggunakan alat pembanding dengan spesifikasi dan status kalibrasi terdokumentasi, serta menambahkan penyimpanan data historis dan alarm berbasis ambang yang dirujuk pada standar resmi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Teknik Instalasi Tenaga Listrik SMK Negeri 1 Kabupaten Tangerang yang telah menyediakan lokasi dan mendukung pelaksanaan penelitian.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] N. S. Syam *et al.*, "Model Support Vector Machine untuk Prediksi pada Penggunaan Energi Listrik di Rumah Hemat Energi," *Jurnal Informatika*, vol. 1, no. 2, pp. 56–59, Sep. 2022, [Online]. Available: <https://jurnal.uniraya.ac.id/index.php/JI>
- [2] Arman, T. Rijanto, Joko, and R. Harimurti, "Analisis Penempatan Recloser Terhadap Keandalan Sistem Tenaga Listrik Jaringan Distribusi 20kV di PT.PLN (Persero) ULP AMUNTAI," *Jurnal Teknik Elektro Universitas Negeri Surabaya*, vol. 13, no. 2, pp. 130–34, 2024.

- [3] A. I. Wira, "Perancangan Sistem monitoring Aliran Daya Menggunakan Mikrokontroler," Makasar, Jun. 2021.
- [4] J. William Jokanan, A. Widodo, N. Kholis, and L. Rakhmawati, "Rancang Bangun Alat Monitoring Daya Listrik Berbasis IoT Menggunakan Firebase," *Jurnal Teknik Elektro Universitas Negri Surabaya*, vol. 11, no. 1, pp. 47–55, 2022.
- [5] M. F. Pela and R. Pramudita, "Sistem Monitoring Penggunaan Daya Listrik Berbasis Internet Of Things Pada Rumah Dengan Menggunakan Aplikasi Blynk," *Infotech: Journal of Technology Information*, vol. 7, no. 1, pp. 47–54, Jun. 2021, doi: 10.37365/jti.v7i1.106.
- [6] A. F. Batubara and Martiano, "Implementasi IOT Untuk Sistem Monitoring Penggunaan Daya Listrik Secara Real-Time Pada Lingkungan Rumah Tangga INFORMASI ARTIKEL ABSTRAK," *Jurnal Sistem Informasi dan Teknologi Jaringan*, vol. 5, no. 2, pp. 42–48, Aug. 2024, [Online]. Available: <https://bit.ly/SISFOTEKJAR>
- [7] S. Nurdiyanti and O. Candra, "Sistem Monitoring Daya Listrik 3 Fasa Berbasis IoT (Internet of Things)," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 2, pp. 924–933, Oct. 2023, doi: 10.24036/jtein.v4i2.532.
- [8] G. Romadhona, R. Sapundani, B. Novalino Wibowo, and W. Prasitio, "Pengukuran dan Analisis Kualitas Daya Listrik di IGD dan IKBS Rumah Sakit Islam Purwokerto," *CYCLOTRON: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 20–25, Jan. 2023.
- [9] J. Syaputra Siregar, H. Eteruddin, and Monice, "Analisa Kualitas Daya Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sistem Off Grid Pada Gedung Fakultas Teknik Universitas Lancang Kuning," *Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri*, vol. 6, no. 2, pp. 90–98, Jun. 2022, doi: 10.31849/sainetin.v6i2.9624.
- [10] L. Trisnawati, D. Setiawan, and Budiman, "Sistem Monitoring kegiatan kemahasiswaan Menggunakan Metode Agile development," *JOISIE Journal Of Information System And Informatics Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 49–57, Jun. 2022.
- [11] A. Junaedi, D. M. Puspitasari Manikta, and M. Maulidina, "Pengaruh (Intensor) Induktor Heater Menggunakan Thermal Sensor Berbasis Mikrokontroler Arduino Nano Dalam Mengolah Logam," *Jurnal NOE*, vol. 4, no. 2, pp. 169–75, Oct. 2021, [Online]. Available: <https://ojs.unpkediri.ac.id/index.php/noe>
- [12] F. Palaha, Ermawati, Machdalena, and E. H. Arya, "Analisa Traffic Data Esp8266 Pada Kontrol Dan Monitoring Daya Lisrik Menggunakan Aplikasi Blynk Berbasis Arduino Nano," *Jurnal Nasional Komputasi dan Teknologi Informasi*, vol. 4, no. 6, p. 480, Dec. 2021.
- [13] E. S. Suandri, Nehru, and R. Y. Hais, "Rancang Bangun Solar Tracker Satu Sumbu Pada Panel Surya 50 Wp Berbasis Internet Of Thing (Iot)," in *Seminar Nasional Teknologi Informasi & Ilmu Komputer*, Jambi, 2023.
- [14] M. Virgil, G. R. Lumanauw, and F. Anus Bungkaes, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Pada Pembangkit Listrik Hybrid Di Kawasan Pesisir Danau Tondano," *Jurnal Elektrik*, vol. 02, no. 02, pp. 2830–1838, Dec. 2023.
- [15] A. Suryadi, D. Darmawan, D. Rahadian, D. Wahyudin, and C. Riyana, "Pengembangan Aplikasi Sistem Database Virtual Community Digital Learning Nusantara (VCDLN) Menggunakan Model Waterfall Dan Pemrograman Terstruktur," *Jurnal PETIK*, no. 1, pp. 48–56, 2022.

-
- [16] M. Fahreza, "Desain Controlling Pengaman Arus Lebih Berbasis Arduino," *Jurnal Mesil (Mesin, Elektro, Sipil,)*, vol. 2, no. 1, pp. 47–53, Jun. 2021.
- [17] S. Wirgantara, "Sistem Control Lampu Gedung Menggunakan Sensor LDR dan NodeMCU ESP8266 Berbasis Telegram," Universitas Satya Negara Indonesia, Jakarta, 2024.
- [18] Y. Anis, E. N. Wahyudi, and H. C. Kurniawan, "Sistem Peminjaman Barang Menggunakan QR Code Berbasis Aplikasi Android," *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, vol. 6, no. 2, pp. 322–328, Apr. 2024, doi: 10.47233/jteksis.v6i2.1350.
- [19] Sanwa Electric Instrument Co., Ltd., "CD800a Digital Multimeter Instruction Manual," Sanwa Electric Instrument Co., Ltd. [Online]. Available: https://overseas.sanwa-meter.co.jp/pdf/manual/digital_multimeters/CD800a_EN.pdf.
- [20] Mis. Peacefair, "Peacefair_Power_System_6L24", 2025, <https://pan.baidu.com/s/1cscXu-ReePyi6b5Uurl9lw?pwd=dp6y>.