

Rancang Bangun *Prototype Tap Changer* Otomatis Berbasis IoT Menggunakan Transformator Satu Fasa Skala Laboratorium

¹Dimas Aryo Japriansyah; ^{2*}Tony Koerniawan; ³Arya Rambu Rabbani; ⁴Artyastu Fajar; ⁵Tsabit Arasyid

^{1,2,3,4} Program Studi D-III Teknologi Listrik, Institut Teknologi PLN, Jakarta

⁵Program Studi S1 Teknik Mesin, Institut Teknologi PLN, Jakarta

*Corresponding Author e-mail: tony.koerniawan@itpln.ac.id

Received: April 2026; Revised: April 2026; Published: May 2026

Abstrak

Fluktuasi tegangan pada sistem distribusi dapat menyebabkan tegangan pelayanan berada di luar batas standar sehingga diperlukan mekanisme pengaturan tap transformator untuk menjaga kestabilan tegangan. Namun, pengujian tap changer pada transformator distribusi skala penuh memiliki risiko keselamatan, biaya tinggi, dan keterbatasan modifikasi di laboratorium. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji prototype tap changer berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan transformator satu fasa skala laboratorium. Metode yang digunakan adalah eksperimental rancang bangun melalui tahapan perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, perakitan, dan pengujian laboratorium. Sistem terdiri atas transformator satu fasa dengan lima tap pada sisi sekunder, mikrokontroler ESP32, sensor PZEM-004T v3.0, modul relay lima kanal active-LOW, serta platform Blynk untuk monitoring dan kendali jarak jauh. Tegangan keluaran dibaca setiap 3 detik dan digunakan sebagai dasar perpindahan tap berdasarkan batas tegangan 198 V sampai 231 V. Pengujian dilakukan pada tiga jenis beban, yaitu lampu pijar 60 W, rheostat, dan beban gabungan lampu pijar dengan rheostat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa Tap 2 sampai Tap 5 berada dalam rentang tegangan normal, sedangkan Tap 1 berada di bawah batas bawah standar pada seluruh kondisi beban. Deviasi tegangan terbesar ke arah positif sebesar +2,27% terjadi pada Tap 5 dengan beban lampu pijar, sedangkan deviasi terbesar ke arah negatif sebesar -11,59% terjadi pada Tap 1 dengan beban gabungan. Sensor PZEM-004T menghasilkan rata-rata kesalahan relatif sebesar 0,35% terhadap clamp power meter pada pengukuran tegangan. Hasil ini menunjukkan kelayakan awal prototype sebagai media simulasi dan pembelajaran pengaturan tap transformator berbasis IoT pada skala laboratorium, khususnya untuk beban resistif dan kondisi pengujian yang terbatas. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi performa sistem pada beban induktif, kondisi fluktuasi tegangan yang lebih dinamis, serta keandalan kendali otomatis dalam jangka waktu yang lebih panjang.

Kata kunci: Tap Changer Otomatis; Iot; Esp32; Transformator Satu Fasa; Pzem-004t; Blynk

Design and Development of an IoT-Based Automatic Tap Changer Prototype Using a Laboratory-Scale Single-Phase Transformer

Abstract

Voltage fluctuations in distribution systems may cause service voltages to exceed standard limits, requiring transformer tap regulation mechanisms to maintain voltage stability. However, testing tap changers on full-scale distribution transformers involves safety risks, high costs, and limited flexibility for laboratory modifications. This study aims to design and evaluate an Internet of Things (IoT)-based tap changer prototype using a single-phase laboratory-scale transformer. The research employed an experimental design-and-development approach consisting of hardware design, software development, prototype assembly, and laboratory testing. The system comprises a single-phase transformer with five secondary-side tap positions, an ESP32 microcontroller, a PZEM-004T v3.0 sensor, a five-channel active-LOW relay module, and the Blynk platform for remote monitoring and control. Output voltage was measured every three seconds and used as the basis for tap selection within a voltage range of 198 V to 231 V. Testing was conducted using three types of loads: a 60 W incandescent lamp, a rheostat, and a combined incandescent lamp-rheostat load. The results show that Tap 2 to Tap 5 maintained output voltages within the acceptable range, while Tap 1 remained below the minimum standard limit under all load conditions. The maximum positive voltage deviation was +2.27% at Tap 5 under the incandescent lamp load, whereas the maximum negative deviation was -11.59% at Tap 1 under the combined load condition. The PZEM-004T sensor achieved an average relative error of 0.35% compared with a clamp power meter for voltage measurements. These findings indicate the preliminary feasibility of the proposed prototype as an IoT-based laboratory simulation and educational platform for transformer tap regulation, particularly under resistive loads and limited testing conditions. Further studies are required to evaluate system performance under inductive loads, dynamic voltage fluctuation scenarios, and long-term automatic control operation.

Keywords: Automatic Tap Changer; Iot; Esp32; Single-Phase Transformer; Pzem-004t; Blynk

How to Cite: Japriansyah, D. A. ., Koerniawan, T. ., Rabbani, A. R. ., Fajar, A. ., & Arasyid, T. . (2026). Rancang Bangun Prototype Tap Changer Otomatis Berbasis IoT Menggunakan Transformator Satu Fasa Skala Laboratorium. *Journal of Authentic Research*, 5(2), 3642-3656. <https://doi.org/10.36312/y7hakf06>



<https://doi.org/10.36312/y7hakf06>

Copyright© 2026, Japriansyah et al.

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



PENDAHULUAN

Transformator merupakan salah satu peralatan utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi mengubah level tegangan sesuai kebutuhan operasi, transmisi, dan distribusi daya. Pada sistem distribusi tenaga listrik, perubahan beban yang terjadi secara dinamis dapat menyebabkan terjadinya penurunan maupun kenaikan tegangan pada sisi pelanggan sehingga diperlukan mekanisme pengaturan tegangan yang efektif (Kanitha et al., 2024). Salah satu metode yang umum digunakan untuk menjaga kestabilan tegangan adalah pengaturan tap transformator yang memungkinkan perubahan rasio lilitan sesuai kondisi sistem (Asri, 2023). Pengaturan tap menjadi penting karena kualitas tegangan yang tidak sesuai standar dapat memengaruhi kinerja dan keandalan peralatan listrik (Saifulloh, 2022). Sesuai Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) 1:1995, tegangan pelayanan harus dipertahankan dalam batas +5% dan -10% terhadap tegangan nominal (SPLN, 1995). Tegangan yang terlalu rendah dapat menyebabkan penurunan performa peralatan dan peningkatan arus beban, sedangkan tegangan yang terlalu tinggi berpotensi mempercepat degradasi isolasi serta meningkatkan rugi-rugi daya. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kondisi pembebanan transformator berpengaruh terhadap umur operasi peralatan dan kualitas penyaluran energi listrik (Halawa & Ridal, 2024). Upaya perbaikan profil tegangan juga terbukti berkontribusi terhadap peningkatan kualitas layanan sistem distribusi (Hartono & Pramudita, 2021). Selain itu, optimasi drop tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya menjadi aspek penting dalam menjaga efisiensi serta keandalan sistem tenaga listrik (Tamma, 2021; Firdaos et al., 2021; Hardiranto & Suprpto, 2022).

Meskipun pengaturan tap transformator telah banyak diterapkan pada sistem tenaga listrik aktual, implementasinya dalam kegiatan praktikum dan penelitian laboratorium masih menghadapi berbagai keterbatasan. Penggunaan transformator distribusi skala penuh memerlukan sumber tegangan yang tinggi, biaya investasi yang besar, serta prosedur keselamatan yang ketat. Selain itu, pengoperasian tap changer pada transformator daya sering kali membutuhkan peralatan khusus yang tidak selalu tersedia pada laboratorium pendidikan. Kondisi ini menyebabkan mahasiswa dan peneliti memiliki keterbatasan dalam mempelajari prinsip pengaturan tegangan transformator secara langsung. Oleh karena itu, diperlukan suatu media simulasi yang mampu merepresentasikan karakteristik kerja tap changer secara aman, ekonomis, dan mudah dioperasikan tanpa mengurangi esensi pembelajaran sistem tenaga listrik.

Konsep pengaturan tap transformator telah dibahas secara luas dalam berbagai literatur sistem tenaga listrik. Kundur (1994) menjelaskan pentingnya pengaturan tegangan dalam menjaga stabilitas operasi sistem tenaga. Sementara itu, Gonen (2014) menguraikan prinsip kerja transformator dan mekanisme pengaturan tap dalam sistem distribusi tenaga listrik. Dari sisi standar teknis, karakteristik operasional tap changer dan regulator tegangan telah diatur melalui berbagai standar internasional yang diterbitkan oleh IEEE (IEEE, 2012; IEEE, 2021) dan IEC (IEC, 2011a; IEC, 2011b). Seiring berkembangnya teknologi digital, konsep smart grid memungkinkan integrasi sistem tenaga dengan teknologi komunikasi untuk meningkatkan kemampuan monitoring dan pengendalian secara real-time (Farhangi, 2010). Perkembangan Internet of Things (IoT) kemudian memperluas kemampuan tersebut melalui konektivitas perangkat yang mampu mengirimkan dan menerima data secara berkelanjutan melalui jaringan internet (Atzori et al., 2010). Teknologi IoT saat ini telah banyak dimanfaatkan untuk monitoring dan otomasi berbagai sistem teknik karena menawarkan fleksibilitas, efisiensi biaya, serta kemudahan akses informasi secara jarak jauh (Madakam et al., 2015).

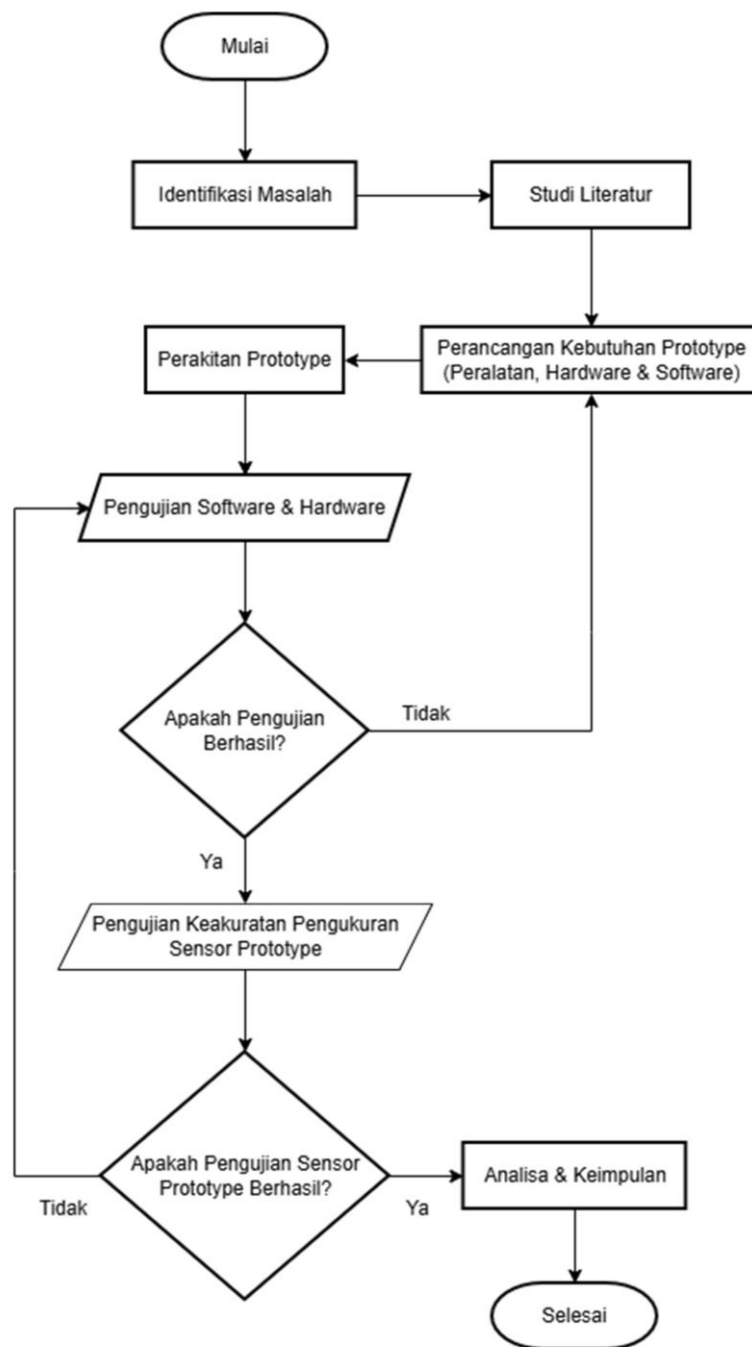
Meskipun demikian, penelitian terdahulu masih menunjukkan beberapa keterbatasan. Sebagian besar penelitian hanya berfokus pada monitoring parameter listrik berbasis IoT tanpa mengintegrasikan fungsi pengaturan tap secara otomatis dan manual dalam satu sistem. Beberapa penelitian lain telah mengembangkan sistem pengendalian tap changer, namun belum menyediakan fasilitas monitoring real-time berbasis platform IoT yang mudah diakses untuk kegiatan praktikum. Selain itu, masih terbatas penelitian yang menggabungkan simulasi multi-tap, pengendalian otomatis dan manual, monitoring parameter listrik secara daring, serta validasi hasil pengukuran sensor terhadap alat ukur referensi dalam satu prototype terintegrasi. Keterbatasan tersebut menunjukkan bahwa masih terdapat kebutuhan akan sistem simulasi tap changer yang tidak hanya mampu melakukan pengaturan tegangan secara otomatis, tetapi juga mendukung proses pembelajaran dan penelitian laboratorium secara lebih efektif.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan menguji prototype tap changer otomatis berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan transformator satu fasa skala laboratorium. Sistem dikembangkan menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama (Espressif Systems, 2024), sensor PZEM-004T sebagai alat ukur parameter listrik (Peacefair, 2023), serta platform Blynk sebagai media monitoring dan pengendalian jarak jauh (Blynk Inc., 2024). Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan prototype tap changer lima posisi yang mengintegrasikan mode operasi otomatis dan manual, monitoring parameter listrik secara real-time berbasis IoT, serta evaluasi akurasi pengukuran sensor terhadap alat ukur referensi dalam lingkungan laboratorium pembelajaran. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada transformator satu fasa skala laboratorium dengan fokus pada pengujian tegangan keluaran, daya, deviasi tegangan terhadap standar pelayanan, serta akurasi pengukuran sistem. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi alternatif media pembelajaran dan penelitian yang lebih aman, ekonomis, serta representatif untuk mempelajari prinsip pengaturan tegangan transformator.

METODE

Metode dan Objek Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental rancang bangun. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, perakitan *prototype*, pengujian laboratorium, analisis hasil pengujian, dan penarikan kesimpulan. Objek penelitian berupa transformator satu fasa skala laboratorium 220 V/2 A dengan lima posisi tap pada sisi sekunder. Pengujian dilakukan menggunakan tiga jenis beban, yaitu lampu pijar 60 W, rheostat, dan beban gabungan lampu pijar dengan rheostat yang dipasang paralel. Setiap kondisi beban diuji pada lima posisi tap. Tegangan dan arus diukur menggunakan sensor PZEM-004T, kemudian dibandingkan dengan *clamp power meter* sebagai alat ukur referensi. Alur tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Tahapan Penelitian

Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan menggunakan tiga jenis beban, yaitu:

1. Lampu pijar 60 W.
2. Rheostat variabel.
3. Kombinasi lampu pijar dan rheostat yang dihubungkan secara paralel.

Setiap jenis beban diuji pada lima posisi tap sehingga diperoleh lima kondisi pengujian untuk setiap jenis beban. Untuk meningkatkan reliabilitas data, setiap pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan pada kondisi yang sama, kemudian dihitung nilai rata-rata hasil pengukuran.

Parameter yang diukur meliputi:

- Tegangan keluaran (V)
- Arus beban (A)

- Daya aktif (W)
- Frekuensi (Hz)
- Faktor daya

Data hasil pengukuran sensor PZEM-004T dibandingkan dengan hasil pengukuran clamp power meter sebagai alat ukur referensi untuk mengevaluasi tingkat akurasi sistem.

Persamaan Perhitungan

Daya keluaran transformator dihitung berdasarkan hasil perkalian tegangan keluaran dan arus beban sebagaimana ditunjukkan pada (1).

$$P_{out} = V \times I \quad (1)$$

Deviasi tegangan dihitung terhadap tegangan nominal 220 V sebagaimana ditunjukkan pada (2). Nilai ini digunakan untuk menilai apakah tegangan keluaran masih berada dalam rentang toleransi SPLN 1:1995 (SPLN, 1995).

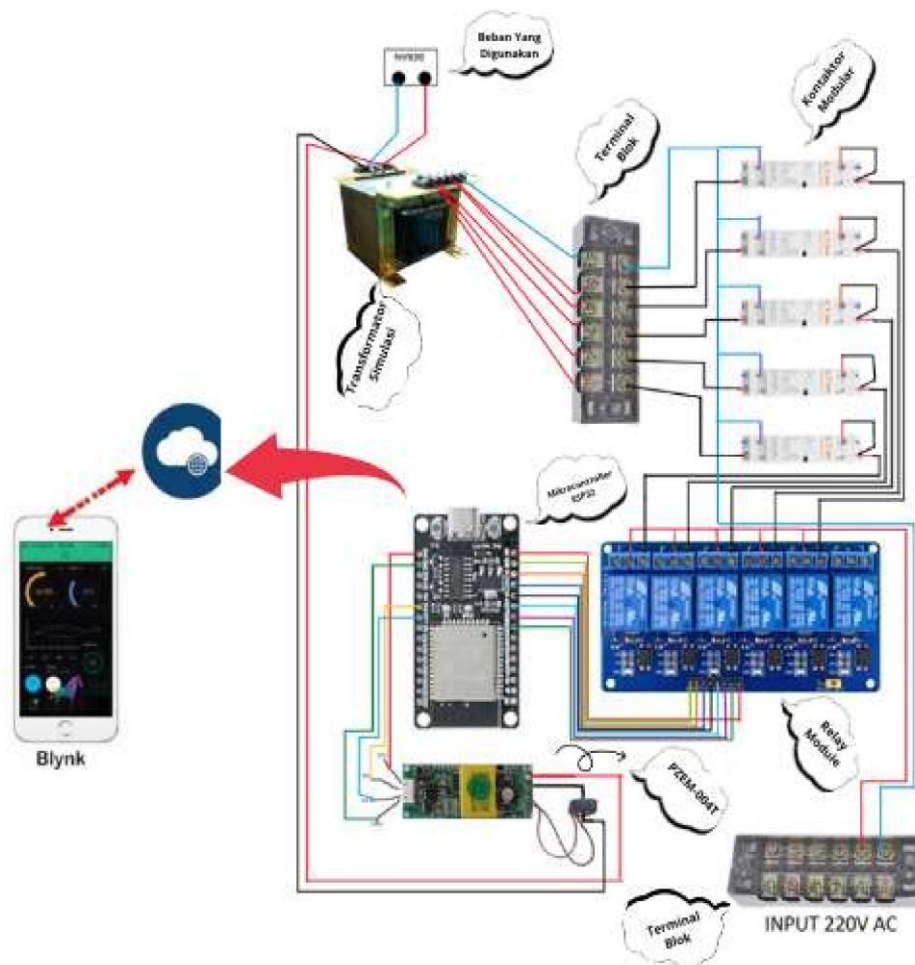
$$\Delta V = ((V_{out} - V_{nom}) / V_{nom}) \times 100\% \quad (2)$$

Kesalahan relatif sensor PZEM-004T terhadap *clamp power meter* dihitung menggunakan (3).

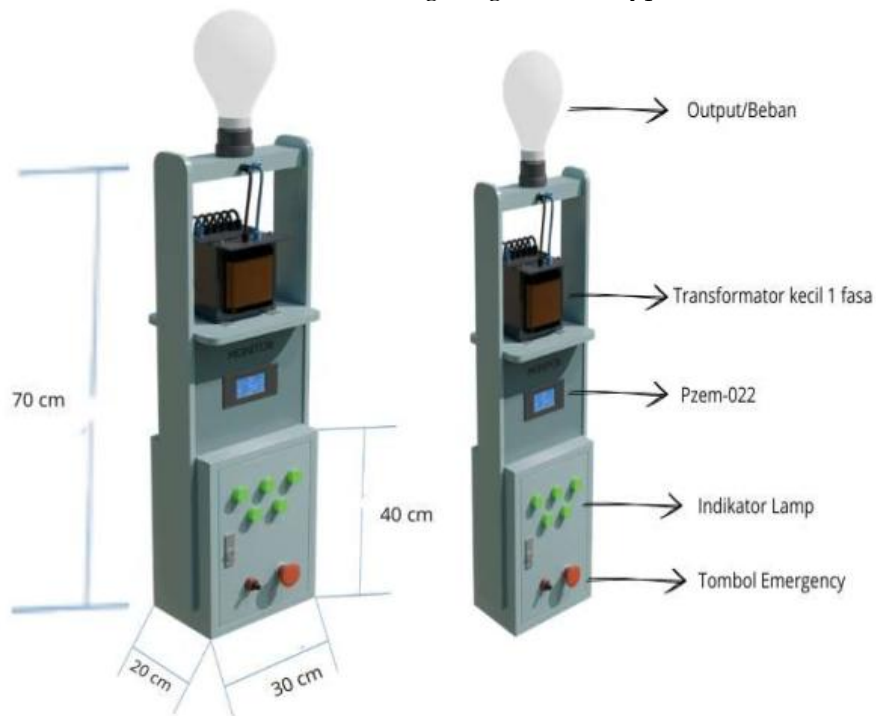
$$KR = (|V_{sensor} - V_{ref}| / V_{ref}) \times 100\% \quad (3)$$

Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem terdiri atas transformator satu fasa, sensor PZEM-004T, ESP32, modul relay lima kanal active-LOW, terminal blok, tombol kendali, indikator lampu, serta platform Blynk untuk monitoring dan kendali jarak jauh. Sensor PZEM-004T mengirimkan data pengukuran melalui komunikasi UART, sedangkan ESP32 mengolah data tegangan dan mengaktifkan relay sesuai posisi tap yang dibutuhkan. Wiring diagram prototype ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan desain fisik prototype ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Wiring Diagram Prototype



Gambar 3. Desain Prototype

Logika Kendali Tap

Sistem membaca tegangan keluaran secara periodik setiap 3 detik. Apabila tegangan lebih rendah dari 198 V, sistem menaikkan posisi tap untuk meningkatkan tegangan keluaran. Apabila tegangan lebih tinggi dari 231 V, sistem menurunkan posisi tap. Apabila tegangan berada pada rentang 198 V sampai 231 V, posisi tap dipertahankan.

Pemetaan Virtual Pin Blynk

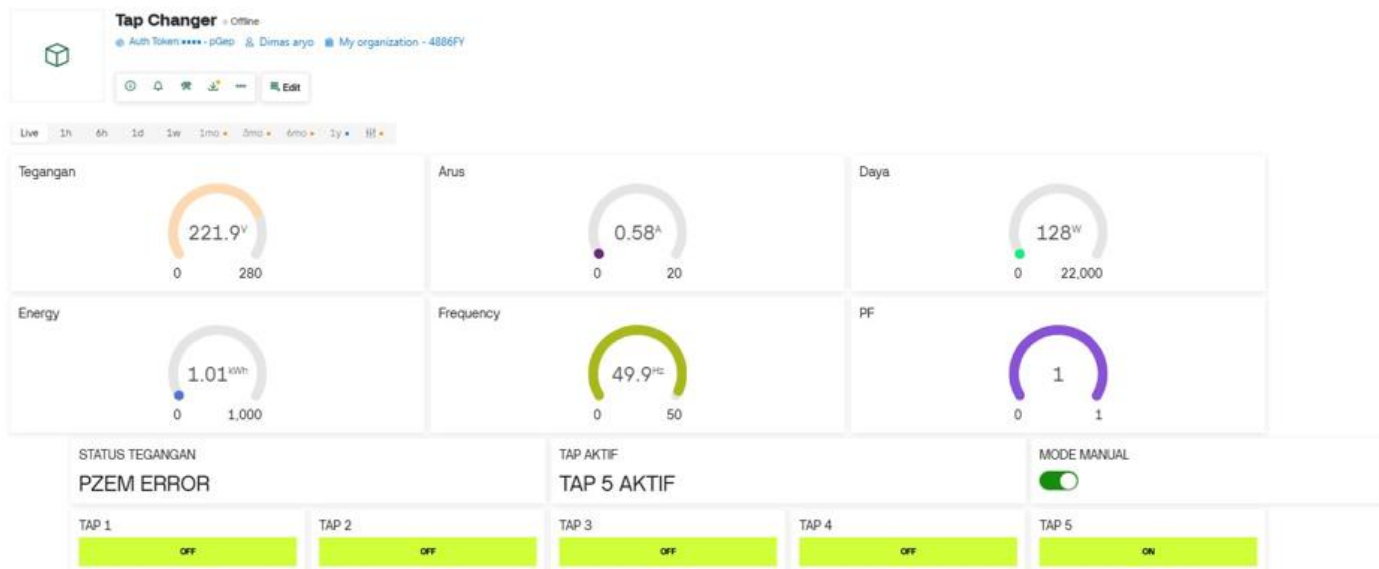
Platform Blynk digunakan untuk menampilkan parameter listrik, status tegangan, status tap aktif, serta mode operasi. Pemetaan virtual pin yang digunakan pada dashboard ditunjukkan pada Tabel 1. Jumlah tombol manual disesuaikan dengan jumlah tap yang digunakan, yaitu TAP 1 sampai TAP 5.

Tabel 1. Pemetaan Virtual Pin Blynk pada Sistem Tap Changer Otomatis

Pin	Datastream	Tipe	Rentang	Fungsi
V0	Voltage	Double	0-280	Tegangan keluaran transformator (V)
V1	Current	Double	0-20	Arus beban (A)
V2	Power	Double	0-22000	Daya aktif (W)
V3	Energy	Double	0-1000	Energi kumulatif (kWh)
V4	Frequency	Double	0-60	Frekuensi jaringan (Hz)
V5	Power Factor	Double	0-1	Faktor daya
V6	Mode Control	Integer	0/1	0 = otomatis, 1 = manual
V7	Tap Active Label	String	-	Label tap aktif
V8-V12	TAP 1-TAP 5 Button	Integer	0/1	Tombol kendali manual tap 1 sampai tap 5
V14	Voltage Status	String	-	Status tegangan
V15	Voltage Gauge	Double	0-280	Gauge tegangan real-time

Tampilan Dashboard Blynk

Dashboard Blynk dirancang agar operator dapat memantau parameter listrik dan status sistem secara *real-time*. Bagian atas *dashboard* menampilkan enam *widget* utama, yaitu tegangan (V), arus (A), daya (W), energi (kWh), frekuensi (Hz), dan faktor daya. Bagian bawah menampilkan status tegangan, tap aktif, pilihan mode operasi, serta tombol kendali manual TAP 1 sampai TAP 5. Pada contoh tampilan, TAP 5 aktif dengan nilai tegangan 221,9 V, arus 0,58 A, daya 128 W, frekuensi 49,9 Hz, dan faktor daya 1. Indikasi PZEM ERROR digunakan sebagai penanda ketika pembacaan sensor tidak valid atau terjadi gangguan komunikasi sensor.



Gambar 4. Tampilan Dashboard Blynk Sistem Tap Changer Otomatis Berbasis IoT

Implementasi Program ESP32

Program ESP32 disusun menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C/C++. Struktur program dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu logika kendali otomatis, fungsi pemilihan relay tap, serta pembacaan sensor dan pengiriman data ke *Blynk*. Pembagian ini membuat proses pengendalian lebih mudah diuji karena setiap fungsi memiliki tugas yang terpisah. Logika otomatis membandingkan tegangan keluaran terhadap batas 198 V sampai 231 V, fungsi set *tap* memastikan hanya satu relay *tap* yang aktif, sedangkan fungsi pembacaan sensor mengirimkan parameter listrik ke *virtual pin Blynk*.

Kode Program 1. Logika Kendali Otomatis (Mode AUTO)

```

if (controlMode == MODE_AUTO) {
    if (voltage < V_MIN) {
        setTap(currentTap + 1);
    } else if (voltage > V_MAX) {
        setTap(currentTap - 1);
    } else {
        // NORMAL (198 V <= V <= 231 V) - pertahankan posisi
        updateTapStatusBlynk(currentTap);
    }
}

```

Kode Program 2. Fungsi setTap() untuk Kendali Relay Active-LOW

```

void setTap(int tapIndex) {
    for (int i = 0; i < TAP_COUNT; i++) {
        digitalWrite(RELAY_PIN[i], HIGH); // HIGH = OFF
    }
    delay(200); // Cegah short-circuit antar tap
    digitalWrite(RELAY_PIN[tapIndex], LOW); // LOW = ON
    currentTap = tapIndex;
    updateTapStatusBlynk(tapIndex);
}

```

Kode Program 3. Pembacaan Sensor dan Pengiriman Data ke Blynk

```

void sendDataAndControl() {
    float voltage = pzem.voltage();
    float current = pzem.current();
    float power = pzem.power();

    if (isnan(voltage) || voltage <= 0.0f) {
        Blynk.virtualWrite(V14, "PZEM ERROR");
    }
}

```

```

    return;
}

Blynk.virtualWrite(V0, voltage); // Tegangan (V)
Blynk.virtualWrite(V1, current); // Arus (A)
Blynk.virtualWrite(V2, power); // Daya (W)
Blynk.virtualWrite(V14, statusV); // Status tegangan
}

```

Pada fungsi *set tap*, seluruh relay dimatikan terlebih dahulu sebelum relay tap terpilih diaktifkan. Jeda 200 ms diberikan untuk mengurangi kemungkinan hubungan singkat antar *tap*. Mekanisme ini penting karena modul relay yang digunakan bertipe *active-LOW*, sehingga logika *LOW* berarti relay aktif dan logika *HIGH* berarti relay tidak aktif.

Aspek Keselamatan Sistem

Untuk menjaga keselamatan pengoperasian prototype, sistem dilengkapi dengan pengaman berupa fuse pada sisi masukan transformator dan MCB sebagai proteksi arus lebih. Relay yang digunakan memiliki rating kontak yang melebihi arus maksimum transformator sehingga mampu beroperasi dengan aman pada kondisi pengujian.

Selain itu, seluruh relay dimatikan terlebih dahulu sebelum relay tujuan diaktifkan. Jeda switching selama 200 ms diterapkan untuk mengurangi kemungkinan hubungan singkat antar tap transformator. Seluruh bagian bertegangan ditempatkan dalam panel tertutup dan menggunakan terminal blok berisolasi untuk meminimalkan risiko kontak langsung selama proses pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan pada lima posisi tap dan tiga jenis beban. Tegangan nominal yang digunakan adalah 220 V. Rentang tegangan normal berdasarkan SPLN 1:1995 adalah 198 V sampai 231 V. Oleh karena itu, nilai di bawah 198 V dikategorikan sebagai tegangan rendah, sedangkan nilai di atas 231 V dikategorikan sebagai tegangan tinggi (SPLN, 1995).

Hasil Pengujian Beban Lampu Pijar 60 W

Tabel 2. Data Hasil Pengujian dengan Beban Lampu Pijar 60 W

TAP	V no-load (V)	I (A)	V out (V)	P out (W)	ΔV (%)	V sensor (V)	V ref (V)	KR (%)	Status
1	198,0	0,32	196,8	62,98	-10,55	196,8	197,6	0,40	Rendah
2	207,0	0,32	205,4	65,73	-6,64	205,4	206,1	0,34	Normal
3	214,0	0,33	212,1	69,99	-3,59	212,1	212,7	0,28	Normal
4	220,0	0,34	218,3	74,22	-0,77	218,3	218,9	0,27	Normal
5	227,0	0,35	225,0	78,75	+2,27	225,0	225,5	0,22	Normal

Berdasarkan Tabel 2, tegangan keluaran meningkat secara bertahap dari 196,8 V pada Tap 1 menjadi 225,0 V pada Tap 5. Kenaikan tegangan ini menunjukkan bahwa perubahan posisi tap berhasil mengubah jumlah lilitan efektif transformator sehingga rasio transformasi meningkat. Fenomena ini sesuai dengan teori transformator yang menyatakan bahwa tegangan keluaran berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan primer dan sekunder. Pada Tap 1, tegangan keluaran berada sedikit di bawah batas minimum SPLN, sedangkan Tap 2 hingga Tap 5 telah memenuhi rentang tegangan yang dipersyaratkan.

Hasil Pengujian Beban Rheostat

Hasil pengujian menggunakan rheostat menunjukkan pola yang serupa dengan beban lampu pijar, namun dengan tegangan keluaran yang sedikit lebih rendah pada setiap posisi tap. Kondisi ini disebabkan oleh arus beban yang lebih besar sehingga menyebabkan penurunan tegangan (voltage drop) yang lebih tinggi pada impedansi internal transformator. Tegangan keluaran pada Tap 1 sebesar 195,2 V berada di bawah batas minimum SPLN, sedangkan Tap 2 hingga Tap 5 tetap berada dalam rentang operasi normal.

Tabel 3. Data Hasil Pengujian dengan Beban Rheostat

TAP	V no-load (V)	I (A)	V out (V)	P out (W)	ΔV (%)	V sensor (V)	V ref (V)	KR (%)	Status
1	198,0	0,48	195,2	93,70	-11,27	195,2	196,0	0,41	Rendah
2	207,0	0,52	203,8	105,98	-7,36	203,8	204,6	0,39	Normal
3	214,0	0,55	211,0	116,05	-4,09	211,0	211,8	0,38	Normal
4	220,0	0,58	217,5	126,15	-1,14	217,5	218,2	0,32	Normal
5	227,0	0,60	224,2	134,52	+1,91	224,2	224,9	0,31	Normal

Hasil Pengujian Beban Gabungan

Pada pengujian beban gabungan diperoleh arus terbesar, yaitu antara 0,79 A hingga 0,94 A. Akibat meningkatnya arus beban, tegangan keluaran mengalami penurunan yang lebih besar dibandingkan dua jenis beban sebelumnya. Tegangan terendah tercatat sebesar 194,5 V pada Tap 1 dengan deviasi sebesar -11,59%. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar arus yang mengalir maka semakin besar pula jatuh tegangan yang terjadi pada impedansi internal transformator. Meskipun demikian, Tap 2 hingga Tap 5 masih mampu mempertahankan tegangan dalam rentang yang dipersyaratkan SPLN.

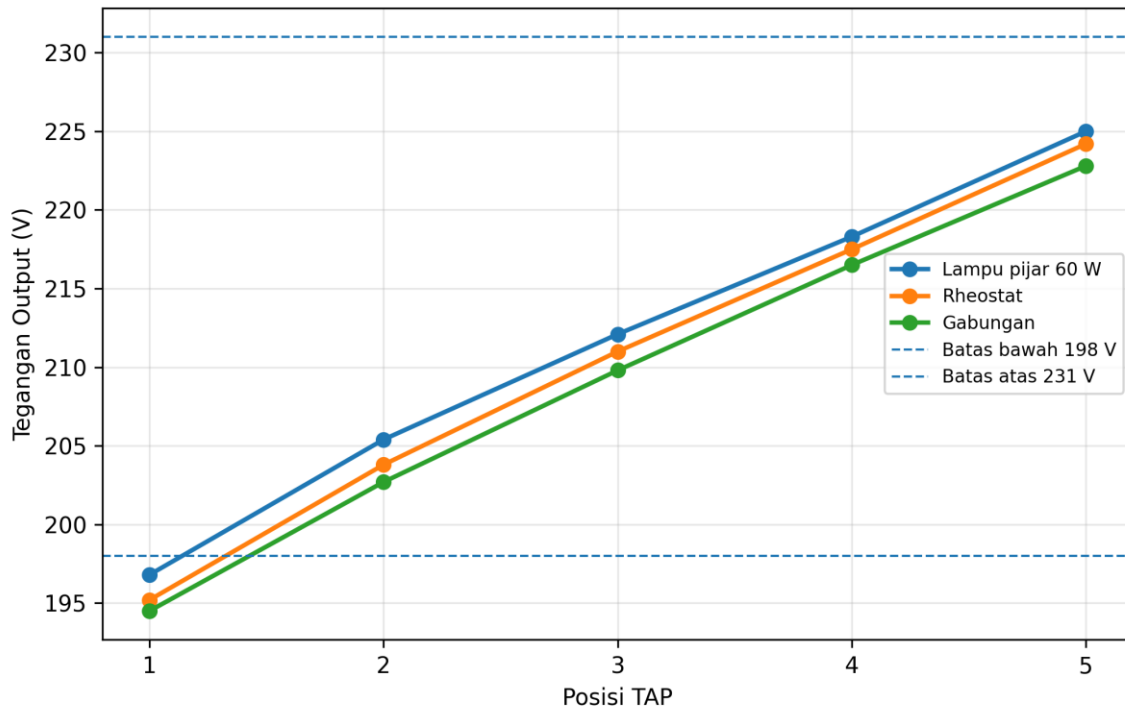
Tabel 4. Data Hasil Pengujian dengan Beban Gabungan Lampu Pijar dan Rheostat

TAP	V no-load (V)	I (A)	V out (V)	P out (W)	ΔV (%)	V sensor (V)	V ref (V)	KR (%)	Status
1	198,0	0,79	194,5	153,66	-11,59	194,5	195,4	0,46	Rendah
2	207,0	0,83	202,7	168,24	-7,86	202,7	203,5	0,39	Normal
3	214,0	0,87	209,8	182,53	-4,64	209,8	210,6	0,38	Normal
4	220,0	0,91	216,5	197,02	-1,59	216,5	217,2	0,32	Normal
5	227,0	0,94	222,8	209,43	+1,27	222,8	223,5	0,31	Normal

Analisis Tegangan, Deviasi, dan Daya Output

Visualisasi hasil pengujian ditampilkan secara berurutan pada Gambar 5 sampai Gambar 8. Gambar 5 menunjukkan adanya hubungan yang konsisten antara posisi tap dan tegangan keluaran transformator. Semakin tinggi posisi tap, semakin tinggi tegangan keluaran yang dihasilkan. Pola ini menunjukkan bahwa sistem relay dan konfigurasi tap yang dirancang mampu merepresentasikan prinsip kerja tap changer pada transformator distribusi. Selain itu, pengaruh jenis beban juga terlihat jelas, di mana beban gabungan menghasilkan tegangan keluaran yang lebih rendah dibandingkan beban lampu pijar akibat

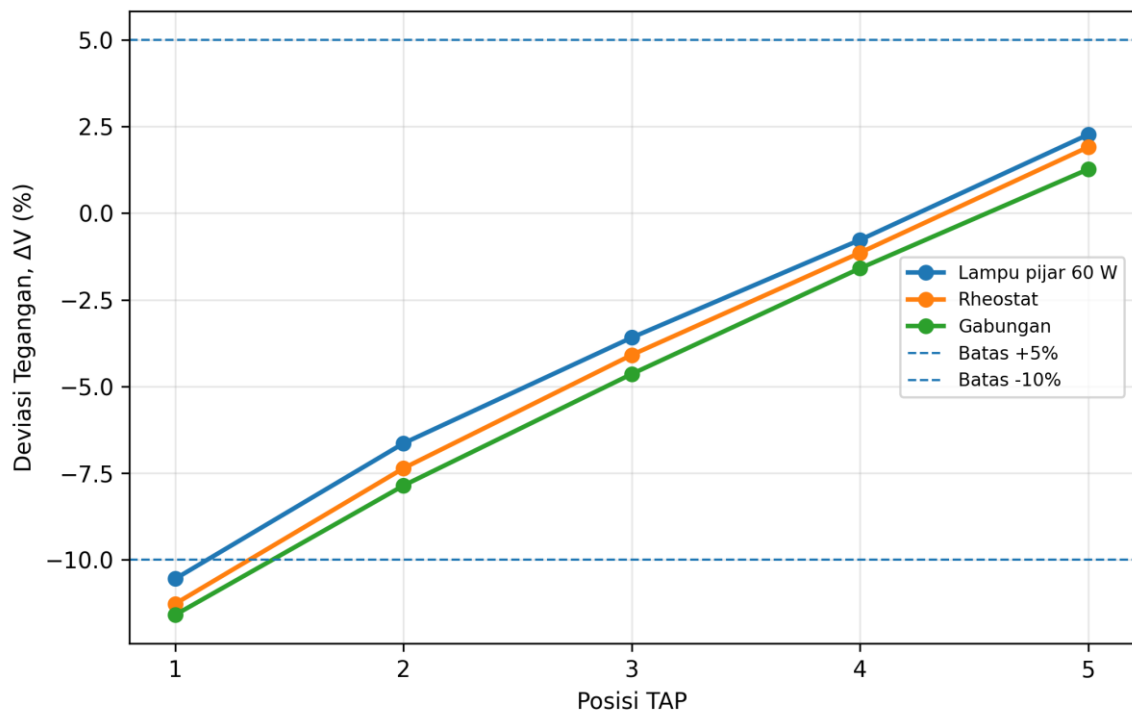
arus yang lebih besar dan meningkatnya rugi-rugi tegangan internal.



Gambar 5. Grafik Tegangan Output per Posisi TAP dan Jenis Beban

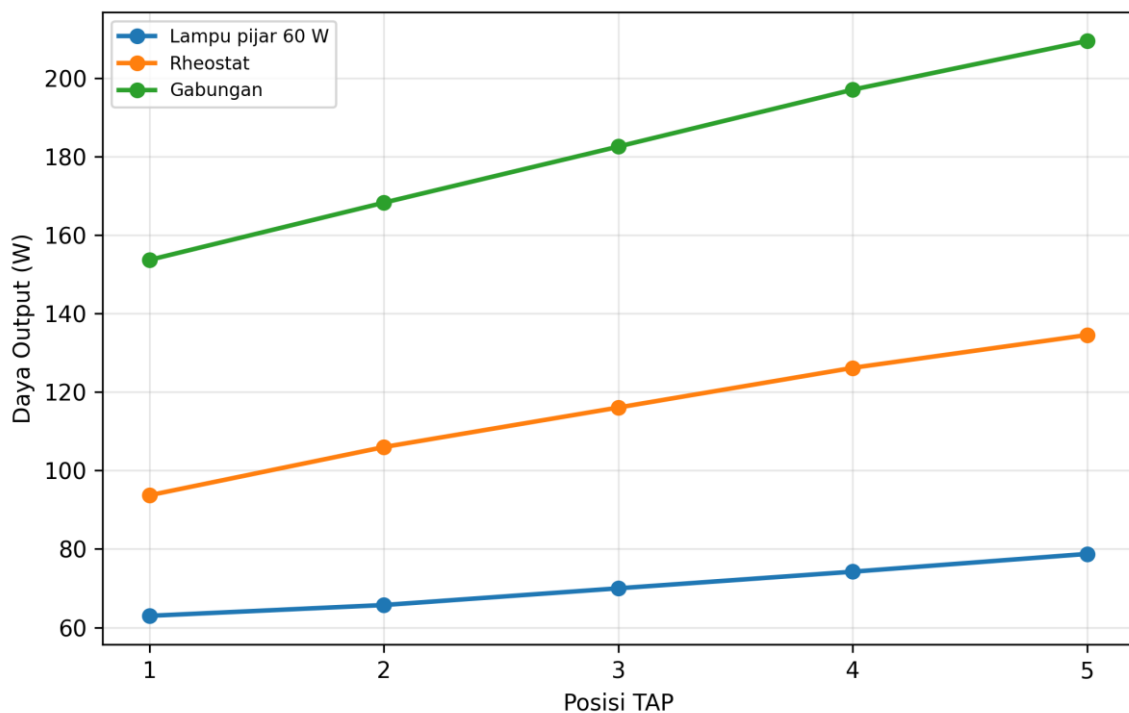
Pada Gambar 6 ditunjukkan deviasi tegangan terbesar terjadi pada Tap 1 untuk seluruh jenis beban. Nilai deviasi mencapai -11,59% pada beban gabungan, yang berada di luar batas toleransi SPLN 1:1995. Sebaliknya, seluruh pengujian pada Tap 2 hingga Tap 5 menghasilkan deviasi yang masih berada dalam rentang standar. Temuan ini menunjukkan bahwa mekanisme perpindahan tap memiliki potensi untuk digunakan sebagai strategi koreksi tegangan ketika sistem mendeteksi kondisi undervoltage.

Dari sudut pandang sistem kendali, hasil ini menjadi dasar penentuan logika otomatis. Ketika sensor mendeteksi tegangan di bawah 198 V, sistem dapat memerintahkan perpindahan menuju tap yang lebih tinggi sehingga tegangan kembali berada dalam rentang normal. Dengan demikian, posisi tap tidak hanya berfungsi sebagai pengatur rasio transformasi tetapi juga sebagai mekanisme koreksi kualitas tegangan.



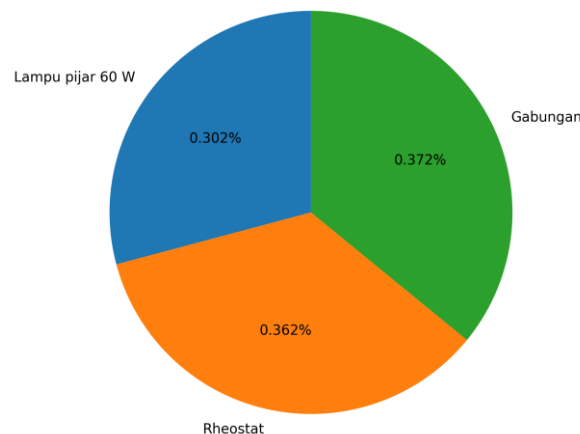
Gambar 6. Grafik Deviasi Tegangan ($\Delta V\%$) per Posisi TAP dan Jenis Beban

Pada Gambar 7 diperlihatkan bahwa daya keluaran meningkat seiring meningkatnya posisi tap. Peningkatan daya terjadi karena kenaikan tegangan keluaran yang diikuti oleh peningkatan arus pada beban. Fenomena ini sesuai dengan karakteristik beban resistif yang mengikuti hubungan daya listrik $P = V \times I$. Beban gabungan menghasilkan daya terbesar karena memiliki arus yang lebih tinggi dibandingkan dua jenis beban lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan posisi tap tidak hanya memengaruhi tegangan tetapi juga memengaruhi kemampuan transformator dalam menyalurkan daya ke beban.



Gambar 7. Grafik Daya Output per Posisi TAP dan Jenis Beban

Analisis Akurasi Sensor PZEM-004T



Gambar 8. Diagram Lingkaran Rata-rata Kesalahan Relatif Sensor PZEM-004T per Jenis Beban

Akurasi sensor dievaluasi dengan membandingkan hasil pengukuran tegangan PZEM-004T terhadap clamp power meter sebagai alat ukur referensi. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata kesalahan relatif sebesar 0,35%, dengan nilai rata-rata 0,302% pada beban lampu pijar, 0,362% pada rheostat, dan 0,372% pada beban gabungan. Nilai kesalahan yang rendah menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk kebutuhan monitoring dan simulasi laboratorium (Peacefair, 2023).

Meskipun demikian, validasi pada penelitian ini masih terbatas pada parameter tegangan. Sensor PZEM-004T juga menyediakan data arus, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu melakukan validasi terhadap parameter-parameter tersebut menggunakan alat ukur referensi yang sesuai agar tingkat akurasi sistem dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.

Evaluasi Kinerja Sistem

Hasil pengujian menunjukkan bahwa prototype mampu membaca parameter listrik, menentukan status tegangan, mengaktifkan relay sesuai posisi tap yang dipilih, dan mengirimkan data ke dashboard Blynk secara real-time. Mode manual memungkinkan pengguna mengamati perubahan tegangan dan daya pada setiap posisi tap, sedangkan mode otomatis dirancang untuk melakukan koreksi tegangan berdasarkan batas bawah 198 V dan batas atas 231 V.

Namun demikian, penelitian ini masih berfokus pada pengujian karakteristik tegangan dan performa setiap posisi tap. Pengujian dinamis terhadap respons otomatis sistem, seperti waktu perpindahan tap, jumlah perpindahan yang diperlukan untuk mencapai rentang normal, kestabilan tegangan setelah switching, kemungkinan hunting, serta performa komunikasi Blynk saat pengendalian jarak jauh, belum dilakukan secara khusus. Oleh karena itu, aspek-aspek tersebut menjadi peluang penelitian lanjutan untuk mengevaluasi performa sistem otomatis secara lebih komprehensif.

KESIMPULAN

Prototype tap changer berbasis Internet of Things (IoT) berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan transformator satu fasa skala laboratorium, ESP32, sensor PZEM-004T, modul relay lima kanal, dan platform Blynk sebagai media monitoring dan pengendalian. Sistem telah diimplementasikan dengan mode otomatis dan manual. Mode otomatis dirancang untuk menentukan posisi tap berdasarkan batas tegangan 198 V sampai

231 V sesuai standar SPLN 1:1995, sedangkan mode manual memungkinkan pengguna memilih posisi TAP 1 sampai TAP 5 melalui dashboard Blynk. Namun demikian, evaluasi lebih lanjut terhadap respons dinamis perpindahan tap masih diperlukan untuk memastikan kestabilan kendali pada kondisi fluktuasi tegangan yang berubah secara kontinu.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa posisi Tap 1 pada seluruh kondisi beban menghasilkan tegangan yang berada sedikit di bawah batas bawah standar SPLN 1:1995, sedangkan Tap 2 hingga Tap 5 mampu mempertahankan tegangan keluaran dalam rentang yang diperbolehkan. Deviasi tegangan terbesar ke arah positif sebesar +2,27% diperoleh pada Tap 5 dengan beban lampu pijar, sedangkan deviasi terbesar ke arah negatif sebesar -11,59% terjadi pada Tap 1 dengan beban gabungan lampu pijar dan rheostat. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan posisi tap berpengaruh langsung terhadap tegangan keluaran transformator dan dapat digunakan sebagai mekanisme koreksi tegangan pada kondisi undervoltage maupun overvoltage.

Pengujian akurasi sensor menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki rata-rata kesalahan relatif sebesar 0,35% terhadap clamp power meter pada pengukuran tegangan. Nilai kesalahan yang rendah menunjukkan bahwa sensor cukup layak digunakan sebagai sumber data monitoring dan kendali pada prototype skala laboratorium.

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Pengujian yang dilakukan berfokus pada karakteristik tegangan, daya, dan akurasi sensor pada kondisi beban statis, sehingga belum mengevaluasi secara mendalam respons dinamis sistem otomatis, waktu perpindahan tap, kestabilan setelah switching, kemungkinan hunting, maupun performa komunikasi IoT dalam berbagai kondisi jaringan. Selain itu, validasi sensor masih terbatas pada parameter tegangan dan belum mencakup seluruh parameter yang tersedia pada PZEM-004T seperti arus, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan penerapan mekanisme hysteresis atau deadband tambahan guna mengurangi potensi perpindahan tap berulang akibat fluktuasi tegangan kecil, penambahan sistem proteksi switching yang lebih komprehensif, pengujian menggunakan beban induktif dan kombinasi beban yang lebih beragam, validasi seluruh parameter sensor terhadap alat ukur referensi, serta pengujian performa komunikasi IoT untuk mengevaluasi keandalan monitoring dan kendali jarak jauh secara real-time.

REFRENSI

- Asri, A. (2023). Analisis Perbaikan Tegangan Akibat Under Voltage dengan Menggunakan Tap Changer dan Capacitor Bank pada Sistem IEEE 9 Bus. *Jurnal Media Elektrik*, 20(2), 20-25.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787-2805.
- Blynk Inc. (2024). *Blynk IoT Platform Documentation*. Blynk Inc.
- Espressif Systems. (2024). *ESP32 Series Datasheet*. Espressif Systems.
- Farhangi, H. (2010). The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1), 18-28.
- Firdaos, L. A. A., Suyono, H., & Hasanah, R. N. (2021). *Kajian Implementasi Hibrid Kapasitor Bank dan Tap Trafo untuk Perbaikan Profil Tegangan*. Universitas Brawijaya.
- Gonen, T. (2014). *Electric Power Distribution Engineering* (3rd ed.). CRC Press.
- Halawa, A., & Ridal, Y. (2024). Analisa Susut Umur Transformator terhadap Pengaruh Pembebanan pada PLTU Teluk Sirih Padang. *Jurnal MESIL*, 5(2), 93-103.
- Hardiranto, W. N., & Suprpto, Y. (2022). Analisa Optimasi Perbaikan Faktor Daya dan Drop Tegangan. *Jurnal Teknik Elektro*, 12(2), 77-84.

- Hartono, R., & Pramudita, B. D. (2021). Evaluasi Kondisi dan Prediksi Umur On Load Tap Changer (OLTC) Berbasis Metode Fuzzy Logic. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 10(2), 112-121.
- IEC. (2011a). *Power transformers - Part 1: General* (IEC 60076-1:2011). International Electrotechnical Commission.
- IEC. (2011b). *Power transformers - Part 21: Standard requirements, terminology, and test code for step-voltage regulators* (IEC 60076-21:2011). International Electrotechnical Commission.
- IEEE. (2012). *IEEE Standard Requirements for Load Tap Changers* (IEEE Std C57.131-2012). IEEE.
- IEEE. (2021). *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers* (IEEE Std C57.12.00-2021). IEEE.
- Kanitha, J., Kastawan, I. M. W., & Mashar, A. (2024). Rancangan Tap-Changer Elektronik pada Transformator Generator Kapasitas 66 MVA, 13,8 kV/150 kV. *Jurnal Teknik Energi*, 13(1), 36-42.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
- Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, 3(5), 164-173.
- Peacefair. (2023). *PZEM-004T V3.0 User Manual*. Peacefair.
- Saifulloh, A. R. (2022). *Analisis Kinerja On Load Tap Changer (OLTC) pada Trafo 2 60 MVA* [Master's thesis, Universitas Semarang]. Repository Universitas Semarang.
- SPLN. (1995). *Standar Tegangan Distribusi Tenaga Listrik (SPLN 1:1995)*. Perusahaan Listrik Negara.
- Tamma, W. R. (2021). *Penentuan Kondisi Transformator Daya Tegangan Tinggi dengan Mempertimbangkan Nilai Health Index* [Master's thesis, Institut Teknologi Bandung].