JURNAL ELTEK
Vol. 24, No. 2, Oktober 2026, hal. 175~185
p-ISSN: 1693 – 4024 | e-ISSN: 2355-0740
DOI: 10.33795/eltek.v24i2.11015

Prototipe sistem pencatatan data suhu transformator gardu induk berbasis ESP32 dengan komunikasi nirkabel

Rahman Azis Prasojo[1], Achsanul Khabib[2], Muhammad Rizqy Ramadhani[3], Veri Dian Firmansyah[4], Dio Ramadhan[5], I Gusti Ngurah Mahendrayana[6], Ary Tri Farismansyah[7]
e-mail: rahmanazisp@polinema.ac.id, achsanul.khabib@polinema.ac.id, rizqyramadhani000@gmail.com, veridianfirmansyah@gmail.com, rampakekm@gmail.com, ngurah.mahendrayana@pln.co.id, atfarismansyah@gmail.com
[1,2,3,4,5]Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Indonesia
[6,7]PLN Persero UIT JBM, Sidoarjo, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 10 Agustus 2026
Direvisi 15 Oktober 2026
Diterbitkan 30 Oktober 2026

Kata kunci:

Transformator daya
Monitoring suhu
ESP32
Komunikasi nirkabel

ABSTRAK

Transformator daya memerlukan pemantauan suhu secara kontinu untuk menjaga keandalan operasi. Penelitian ini mengembangkan sistem otomatis pencatat data suhu transformator berbasis mikrokontroler ESP32 dan komunikasi nirkabel. Sistem membaca sinyal analog 4–20 mA dari parameter *Oil Temperature Indicator* (OTI), *Winding High Voltage* (WHV), dan *Winding Low Voltage* (WLV), kemudian menampilkan data pada LCD, mengirimkannya ke *ThingSpeak*, serta menyimpannya secara otomatis ke *Google Sheets*. Pengujian akurasi menggunakan generator sinyal 4–20 mA menghasilkan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 0,6% sebelum uji keandalan dan maksimum 0,8% setelah uji keandalan. Pengujian komunikasi menunjukkan bahwa penggunaan antena eksternal mampu menurunkan data loss dari 41 menjadi 5 data serta menurunkan persentase data terlambat dari 10,70% menjadi 6,35%. Pengujian selama tujuh hari menghasilkan persentase kelengkapan data hingga 99,88% dengan rata-rata *latency* sekitar 1 detik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan monitoring suhu transformator secara otomatis, *real-time*, dan andal.

Keywords:

Power transformer
Temperature monitoring
ESP32
Wireless communication

ABSTRACT

Power transformers require continuous temperature monitoring to maintain operational reliability. This study develops an ESP32-based wireless temperature data logging system for transformer monitoring. The system acquires 4–20 mA analog signals from the Oil Temperature Indicator (OTI), Winding High Voltage (WHV), and Winding Low Voltage (WLV), displays the measurements on an LCD, transmits data to ThingSpeak, and automatically stores the records in Google Sheets. Accuracy testing using a 4–20 mA signal generator resulted in a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 0.6% before the reliability test and a maximum of 0.8% after the test. Communication testing showed that an external antenna reduced data loss from 41 to 5 records and decreased delayed data from 10.70% to 6.35%. A seven-day reliability test achieved data completeness of up to 99.88% with an average latency of approximately 1 second. The results demonstrate that the proposed system provides automatic, real-time, and reliable transformer temperature monitoring.

Penulis Korespondensi:
Rahman Azis Prasojo,
Jurusan Teknik Elektro,
Politeknik Negeri Malang,
Jl. Soekarno Hatta No. 9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur, Indonesia.
Email: rahmanazisp@polinema.ac.id

1. PENDAHULUAN

Transformator daya merupakan peralatan utama pada sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik antar tingkat tegangan [1]. Keandalan transformator sangat dipengaruhi oleh kondisi suhu operasi, terutama suhu minyak dan suhu belitan. Kenaikan suhu yang melebihi batas operasi dapat mempercepat degradasi isolasi, mengurangi umur pakai transformator, dan meningkatkan risiko terjadinya gangguan pada sistem tenaga listrik [2]. Oleh karena itu, pemantauan suhu transformator secara kontinu diperlukan untuk menjaga keandalan operasi dan mendukung kegiatan pemeliharaan peralatan [3][4][5].

Pada transformator daya modern, parameter suhu minyak dan suhu belitan umumnya dipantau menggunakan perangkat *Oil Temperature Indicator* (OTI) dan *Winding Temperature Indicator* (WTI) yang telah menyediakan keluaran sinyal analog 4–20 mA sebagai representasi nilai suhu transformator [6]. Meskipun demikian, proses pemantauan pada beberapa gardu induk masih dilakukan secara manual melalui pembacaan indikator analog oleh operator. Metode tersebut memiliki keterbatasan karena hanya dilakukan secara periodik, berpotensi menimbulkan kesalahan pembacaan, serta tidak menyediakan data historis yang memadai untuk analisis kondisi transformator [7]. Kondisi ini dapat menyebabkan keterlambatan dalam mendeteksi anomali suhu yang berpotensi menurunkan keandalan transformator [8].

Penelitian lain telah mengembangkan sistem pemantauan suhu transformator berbasis komunikasi nirkabel, di antaranya menggunakan Arduino UNO dan modul GSM SIM800L untuk mengirim data suhu transformator distribusi ke *website*, namun sistem masih terbatas pada satu transformator dan belum memiliki penyimpanan data lokal [9]. Penelitian lain mengembangkan sistem monitoring trafo distribusi berbasis IoT dengan komunikasi RF 2,4 GHz dan GPRS, tetapi masih bergantung pada arsitektur *master–slave* terpusat dan belum memiliki penyimpanan data lokal [10]. Penelitian sebelumnya juga telah mengembangkan sistem pencatatan data suhu transformator berbasis Modbus RTU RS485 yang mampu membaca sinyal 4–20 mA dan melakukan pencatatan data secara otomatis [11]. Namun, penggunaan komunikasi kabel masih memiliki keterbatasan dari sisi fleksibilitas instalasi dan pengembangan sistem pada gardu induk. Penelitian-penelitian tersebut umumnya masih memiliki keterbatasan berupa ketiadaan penyimpanan data lokal dan ketergantungan pada arsitektur terpusat.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem pencatatan data suhu transformator berbasis ESP32 dengan komunikasi nirkabel. Sistem memanfaatkan sinyal analog 4–20 mA dari parameter *Oil Temperature Indicator* (OTI), *Winding High Voltage* (WHV), dan *Winding Low Voltage* (WLV) sebagai data masukan. Data hasil pengukuran ditampilkan pada LCD, dikirim ke *platform ThingSpeak* melalui jaringan internet, dan tidak memerlukan perangkat *master* terpusat untuk menerima data hasil pembacaan. Selain meningkatkan fleksibilitas instalasi, penggunaan komunikasi nirkabel juga diharapkan mampu meningkatkan keandalan sistem pencatatan data melalui pengurangan keterbatasan infrastruktur kabel dan kemudahan integrasi dengan *platform* pemantauan berbasis internet [12].

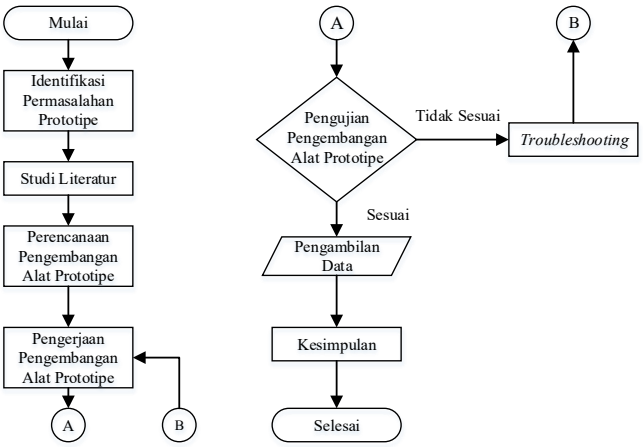
Penelitian ini bertujuan mengevaluasi akurasi pembacaan sinyal, performa komunikasi nirkabel, serta keandalan sistem pencatatan data suhu transformator. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan sistem monitoring suhu transformator yang lebih andal dan mudah diimplementasikan pada lingkungan gardu induk.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan sistem pencatatan data suhu transformator gardu induk berbasis ESP32 dengan komunikasi nirkabel. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur mengenai transformator daya, perangkat *Oil Temperature Indicator* (OTI), *Winding Temperature Indicator* (WTI), komunikasi nirkabel, serta sistem pencatatan data. Selanjutnya dilakukan identifikasi kebutuhan sistem berdasarkan hasil evaluasi penelitian sebelumnya. Tahap berikutnya meliputi perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, pembuatan prototipe, integrasi sistem, serta pengujian untuk mengetahui performa dan keandalan sistem yang dikembangkan. Hasil pengujian kemudian dianalisis sebagai dasar penarikan kesimpulan penelitian.

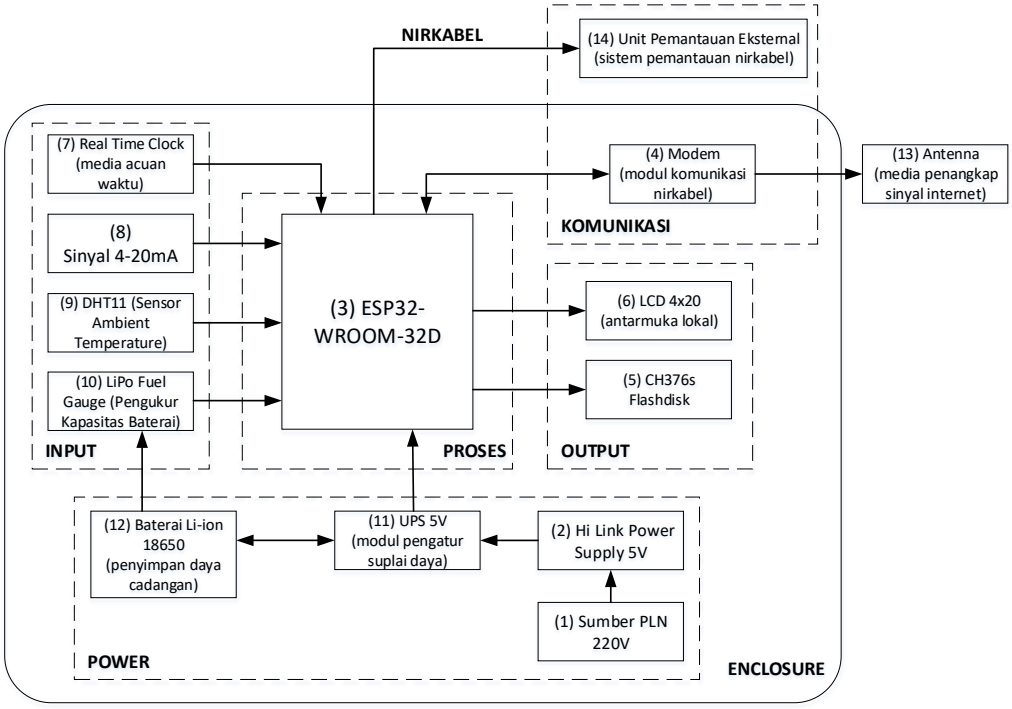
Secara keseluruhan, tahapan penelitian yang dilakukan mulai dari studi literatur hingga analisis hasil pengujian ditunjukkan pada diagram alir penelitian pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Penelitian

2.2. Blok Diagram Sistem

Blok diagram sistem digunakan untuk menggambarkan hubungan antar komponen pada sistem pencatatan data suhu transformator. Sistem menerima sinyal analog 4–20 mA dari perangkat OTI, WHV, dan WLV yang diproses oleh ESP32 WROOM-32D menjadi data suhu. Data ditampilkan pada LCD, dikirim ke *platform* monitoring melalui jaringan seluler, serta disimpan pada media penyimpanan lokal. Untuk menjaga kontinuitas operasi, sistem dilengkapi UPS *Module* dan baterai cadangan. Blok diagram sistem ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Blok Diagram Sistem

2.3. Konversi dan Evaluasi Sinyal Analog 4-20 mA

Sistem menerima masukan berupa sinyal analog 4–20 mA dari perangkat *Oil Temperature Indicator* (OTI), *Winding High Voltage* (WHV), dan *Winding Low Voltage* (WLV) yang terpasang pada transformator daya [13]. Sinyal tersebut merepresentasikan nilai suhu minyak dan belitan transformator sesuai rentang pengukuran yang ditetapkan oleh pabrikan. Agar dapat diproses oleh mikrokontroler ESP32 WROOM-32D, sinyal arus terlebih dahulu dikonversi menjadi sinyal tegangan, kemudian diubah menjadi data digital oleh ADC internal ESP32. Selanjutnya, data digital tersebut dikonversi menjadi nilai suhu yang digunakan untuk proses monitoring dan pencatatan data. Untuk memastikan hasil pembacaan sesuai dengan nilai referensi, dilakukan evaluasi akurasi menggunakan generator sinyal 4–20 mA.

2.3.1. Konversi Tegangan ke Nilai Digital (ADC)

Sinyal arus 4–20 mA tidak dapat dibaca secara langsung oleh ADC ESP32 sehingga diperlukan rangkaian konversi arus ke tegangan menggunakan resistor shunt 120 Ω. Tegangan hasil konversi dihitung menggunakan hukum Ohm sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$V = I \times R \tag{1}$$

Dengan:
V = Tegangan hasil konversi
I = Nilai arus input analog
R = Nilai resistor shunt

Sinyal 4–20 mA dikonversi menjadi tegangan 0,48–2,4 V sebelum dibaca ADC ESP32. Tegangan hasil konversi selanjutnya dibaca oleh ADC 12-bit pada ESP32 WROOM-32D dan diubah menjadi nilai digital dengan rentang 0 hingga 4095. Hubungan antara tegangan masukan dan nilai ADC ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$ADC = \left(\frac{V_{in}}{V_{ref}}\right) \times 4095 \tag{2}$$

Dengan:
ADC = Nilai digital hasil pembacaan ADC
V_{in} = Tegangan masukan (V)
V_{ref} = Tegangan referensi ADC (V)

Nilai digital yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan suhu transformator melalui proses konversi yang dilakukan pada perangkat lunak.

2.3.2. Konversi ADC ke Suhu

Nilai ADC yang diperoleh dari proses pembacaan kemudian dikonversi menjadi nilai suhu menggunakan metode penskalaan linier sesuai rentang pengukuran perangkat OTI dan WTI. Metode ini digunakan karena hubungan antara sinyal 4–20 mA dan parameter suhu bersifat linier sehingga perubahan nilai masukan akan menghasilkan perubahan suhu yang proporsional [14]. Konversi nilai ADC menjadi suhu dilakukan menggunakan Persamaan (3).

$$T_{value} = T_{min} + \frac{ADC_{value} - ADC_{min}}{ADC_{max} - ADC_{min}} \times (T_{max} - T_{\min}) \tag{3}$$

Dengan:
T_{value} = Nilai suhu (°C)
ADC_{value} = Nilai pembacaan ADC
ADC_{min} = Nilai minimum ADC
ADC_{max} = Nilai maksimum ADC
T_{max} = Rentang maksimum parameter suhu
T_{min} = Rentang minimum parameter suhu

Atau jika ingin langsung menghitung nilai suhu berdasarkan nilai arus dapat menggunakan persamaan berikut:

$$T_{value} = T_{min} + \frac{I_{value} - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \times (T_{max} - T_{\min}) \tag{4}$$

Dengan:
T_{value} = Nilai suhu (°C)
I_{value} = Nilai Pembacaan Arus Input Analog
I_{min} = Nilai minimum Arus Input Analog
I_{max} = Nilai maksimum Arus Input Analog
T_{max} = Rentang maksimum parameter suhu
T_{min} = Rentang minimum parameter suhu

Persamaan (3) dan Persamaan (4) digunakan dalam program ESP32 untuk mengonversi sinyal masukan menjadi nilai suhu OTI, WHV, dan WLV.

2.3.3. Evaluasi Akurasi dengan MAPE

Evaluasi akurasi dilakukan menggunakan generator sinyal 4–20 mA sebagai sumber referensi [15]. Pengujian dilakukan pada beberapa titik arus yang mewakili rentang pengukuran suhu transformator. Nilai suhu hasil pembacaan sistem dibandingkan dengan nilai suhu referensi untuk mengetahui tingkat kesalahan pengukuran.

Tingkat akurasi sistem dievaluasi menggunakan metode *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) yang ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{T_{ref} - T_{ukur}}{T_{ref}}\right| \times 100\% \tag{5}$$

Dengan:
$MAPE$ = Error rata-rata pengujian
$Error$ = Error pada setiap sampel pengujian

n = Jumlah sampel pengujian
T_{ref} = Nilai suhu referensi
T_{ukur} = Nilai suhu yang terukur

Nilai MAPE digunakan untuk menunjukkan tingkat kesesuaian antara hasil pembacaan sistem dan nilai referensi. Semakin kecil nilai MAPE yang diperoleh, semakin tinggi tingkat akurasi sistem dalam melakukan pengukuran suhu transformator. Kriteria evaluasi nilai MAPE yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1 [16].

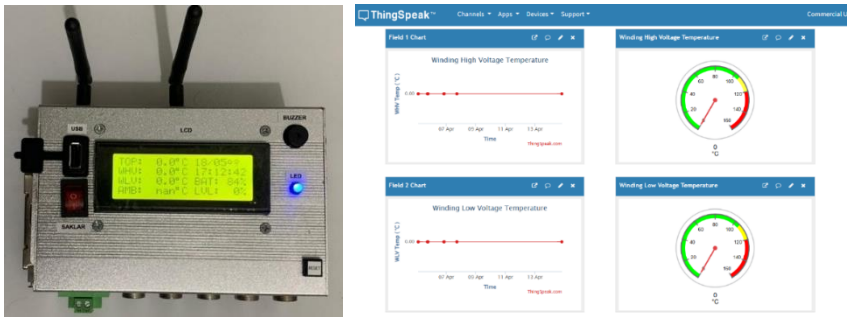
Tabel 1. Acuan Kriteria Hasil MAPE

No	Hasil Uji (%)	Keterangan	Rekomendasi
1	0 – 2.5	Normal	-
2	> 2.5	Tidak normal	Lakukan penyesuaian setting

Berdasarkan kriteria tersebut, sistem dinyatakan memiliki tingkat akurasi yang baik apabila nilai MAPE yang diperoleh berada di bawah 2,5%, sedangkan nilai MAPE di atas 2,5% menunjukkan bahwa sistem memerlukan penyesuaian setting kalibrasi ulang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem pencatatan data suhu transformator berhasil direalisasikan dengan mengintegrasikan ESP32, modem seluler, LCD 20×4, media penyimpanan data, dan *backup* daya dalam satu perangkat. Sistem membaca parameter OTI, WHV, dan WLV, kemudian menampilkan, menyimpan, dan mengirimkan data secara otomatis. Implementasi perangkat ditunjukkan pada Gambar 3.

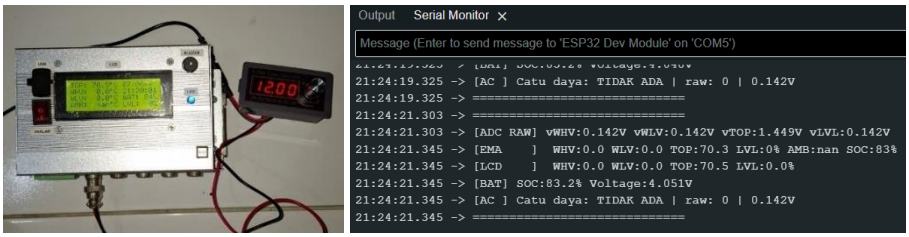


(a) (b)

Gambar 3. (a) Tampilan Alat; (b) *Dashboard* Nirkabel Monitoring Suhu Transformator

3.1. Kalibrasi Pembacaan Sinyal 4-20 mA

Kalibrasi dilakukan untuk menyesuaikan hasil pembacaan suhu sistem terhadap sinyal keluaran 4–20 mA yang dihasilkan oleh perangkat *Oil Temperature Indicator* (OTI), *Winding High Voltage* (WHV), dan *Winding Low Voltage* (WLV). Proses kalibrasi menggunakan generator sinyal 4–20 mA sebagai sumber referensi yang diberikan pada masukan sistem [17]. Nilai arus yang diberikan kemudian dikonversi menjadi tegangan menggunakan resistor shunt 120 Ω sesuai Persamaan (1), dilanjutkan dengan proses pembacaan ADC berdasarkan Persamaan (2), dan konversi menjadi suhu menggunakan Persamaan (3).



Gambar 4. (a) Kalibrasi Dengan Generator 4-20 mA; (b) Tampilan Serial Monitor Tegangan Hasil Konversi pada Arduino IDE

Tabel 2 menunjukkan lima titik kalibrasi yang digunakan sebagai acuan dalam proses konversi suhu. Titik kalibrasi dipilih untuk mewakili seluruh rentang pengukuran sehingga hubungan antara sinyal masukan dan suhu dapat direpresentasikan secara merata. Pada parameter OTI digunakan rentang pengukuran −20°C hingga 140°C, sedangkan pada parameter WHV dan WLV digunakan rentang pengukuran 0°C hingga 160°C [16].

Tabel 2. Pemetaan 5 Titik Kalibrasi

I input (mA)	Suhu OTI (°C)	Suhu WTI (°C)	Oil Level (%)
4	-20	0	0
8	20	40	25
12	60	80	50
16	100	120	75
20	140	160	100

Berdasarkan Tabel 2, peningkatan arus masukan menghasilkan peningkatan suhu secara linier pada seluruh titik kalibrasi. Nilai hasil kalibrasi digunakan sebagai acuan interpolasi pada program ESP32 sehingga sistem dapat menghitung suhu secara kontinu pada rentang pengukuran yang digunakan.

3.2. Pengujian Akurasi Pembacaan Suhu Sinyal 4-20 mA

Pengujian akurasi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengonversi sinyal 4–20 mA menjadi nilai suhu. Pengujian menggunakan generator sinyal 4–20 mA sebagai sumber referensi yang mewakili keluaran perangkat pemantau suhu transformator. Pengujian dilakukan sebelum dan sesudah pengujian ketahanan sistem untuk mengetahui pengaruh pengoperasian sistem secara kontinu terhadap performa pembacaan suhu.

Gambar 5 menunjukkan skema pengujian akurasi yang digunakan pada penelitian ini. Generator sinyal 4–20 mA dihubungkan ke masukan sistem monitoring untuk mensimulasikan sinyal keluaran perangkat pemantau suhu transformator. Sinyal arus yang diberikan kemudian diproses oleh sistem menjadi nilai suhu dan dibandingkan dengan nilai referensi untuk memperoleh nilai error dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE).



Gambar 5. Skema Pengujian Akurasi Pembacaan Sinyal 4-20 mA

Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian akurasi sebelum dan sesudah pengujian ketahanan sistem. Pengujian sebelum ketahanan sistem dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi awal setelah proses kalibrasi diterapkan, sedangkan pengujian setelah ketahanan sistem dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan pembacaan setelah sistem beroperasi secara kontinu dalam jangka waktu tertentu.

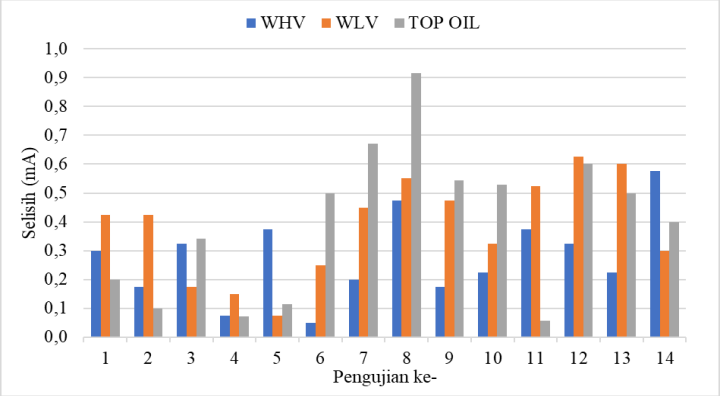
Tabel 3. Perbandingan Hasil MAPE pada Kedua Pengujian Akurasi

Parameter	MAPE Sebelum (%)	MAPE Setelah (%)	Selisih (%)	Kategori
OTI	0,6	0,7	0,1	Normal
WHV	0,6	0,8	0,2	Normal
WLV	0,6	0,7	0,1	Normal

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 3, diperoleh nilai MAPE sebesar 0,6% sebelum pengujian ketahanan sistem dilakukan. Setelah sistem dioperasikan secara kontinu selama periode pengujian, nilai MAPE setelah pengujian ketahanan sebesar 0,7% pada OTI, 0,8% pada WHV, dan 0,7% pada WLV. Meskipun terjadi peningkatan nilai error, seluruh hasil pengujian masih menunjukkan nilai MAPE di bawah 2,5% sehingga sistem tetap memiliki tingkat akurasi yang baik [16].

Perbedaan nilai MAPE sebelum dan sesudah pengujian relatif kecil sehingga menunjukkan sistem tetap stabil selama pengoperasian kontinu. Nilai MAPE sebesar 0,6% yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan peningkatan akurasi dibandingkan sistem sebelumnya, yang menghasilkan MAPE sebesar 2,3% pada parameter OTI dan WLV serta 3,6% pada parameter WHV. Peningkatan ini menunjukkan bahwa proses kalibrasi yang diterapkan pada penelitian ini mampu meningkatkan akurasi pembacaan sinyal 4–20 mA secara signifikan.

Untuk memvalidasi kemampuan sistem pada kondisi yang lebih mendekati implementasi sebenarnya, dilakukan pengujian menggunakan sensor PT100 yang dihubungkan dengan temperature transmitter 4–20 mA sebagai simulator suhu transformator. Konfigurasi ini digunakan untuk mensimulasikan prinsip kerja perangkat *Oil Temperature Indicator* (OTI) dan *Winding Temperature Indicator* (WTI) yang menghasilkan sinyal keluaran 4–20 mA pada transformator daya.



Gambar 6. Grafik Selisih Pembacaan Suhu Thermometer dengan Alat

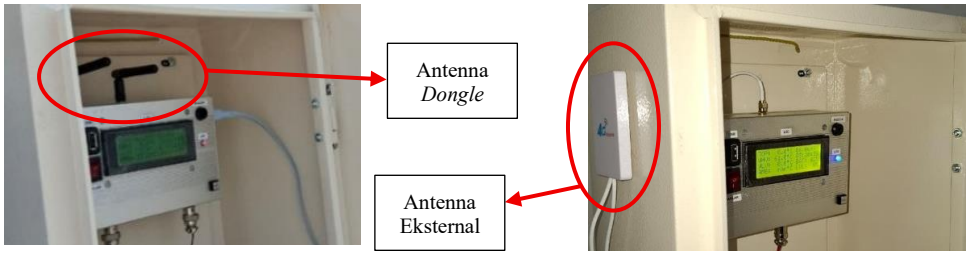
Berdasarkan Gambar 6, seluruh parameter pengukuran menunjukkan selisih pembacaan yang relatif kecil terhadap sensor PT100. Pada pengukuran suhu WHV, selisih pembacaan berada pada rentang 0,05°C hingga 0,58°C. Pengukuran suhu WLV memiliki selisih antara 0,07°C hingga 0,62°C, sedangkan suhu Top Oil menunjukkan selisih antara 0,05°C hingga 0,91°C.

Nilai selisih terbesar terjadi pada pengukuran suhu *Top Oil* pengujian ke-8 sebesar 0,91°C, sedangkan selisih terkecil terjadi pada pengukuran suhu *Top Oil* pengujian ke-11 sebesar 0,05°C. Meskipun terdapat variasi hasil pengukuran, seluruh nilai selisih masih berada di bawah 1°C sehingga menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pembacaan suhu dengan tingkat akurasi yang baik.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem monitoring yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi suhu transformator dengan baik dan dapat digunakan sebagai alternatif pemantauan suhu secara *real-time* pada transformator daya.

3.3. Pengujian Performa Komunikasi Nirkabel

Pengujian performa komunikasi nirkabel dilakukan untuk mengevaluasi kualitas pengiriman data dari perangkat monitoring menuju *server* melalui jaringan seluler. Pengujian dilaksanakan selama 24 jam dengan interval pengiriman data setiap 20 detik. Metode pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu menggunakan antena bawaan modem dan menggunakan antena eksternal. Parameter yang diamati meliputi jumlah data tercatat, jumlah data *loss*, rata-rata *latency*, jumlah data terlambat, dan persentase data terlambat. *Latency* yang dihitung lama waktu pengiriman data dari *timestamp* pengiriman data hingga *timestamp* data diterima oleh pemantauan eksternal.



(a) (b)

Gambar 7. (a) Pemasangan Antenna Dongle; (b) Pemasangan Antenna Eksternal

Pada pengujian ini, data suhu yang diperoleh sistem dikirim secara periodik menuju media pemantauan nirkabel melalui jaringan internet. Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan antena terhadap kualitas komunikasi dan keberhasilan pengiriman data.

Tabel 4. Hasil Pengujian Performa Komunikasi Nirkabel

Durasi	Metode Pengujian	Data Tercatat	Ideal Data Harian	Jumlah *Data Loss*	Rata-rata *Latency* (ms)	Data Terlambat (Interval>20s)	Persentase Data Terlambat (%)
00:00:11 - 23:59:59	Antenna Dongle	4279	4320	41	1020,38	458	10,70
00:00:12 - 23:59:55	Antenna Eksternal	4315	4320	5	1029,93	274	6,35

Berdasarkan Tabel 4, penggunaan antena bawaan modem menghasilkan 4279 data tercatat dengan 41 data *loss*, sedangkan penggunaan antena eksternal menghasilkan 4315 data tercatat dengan 5 data *loss*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa antena eksternal mampu meningkatkan keberhasilan pengiriman data selama proses monitoring.

Rata-rata *latency* yang diperoleh pada pengujian menggunakan antena bawaan modem sebesar 1020,38 ms, sedangkan pada antena eksternal sebesar 1029,93 ms. Selisih sebesar 9,55 ms menunjukkan bahwa penggunaan antena eksternal tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai rata-rata *latency*. Selain itu, jumlah data terlambat mengalami penurunan dari 458 data (10,70%) menjadi 274 data (6,35%).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa antena eksternal tidak memberikan peningkatan yang signifikan terhadap rata-rata *latency*, tetapi mampu meningkatkan performa komunikasi nirkabel melalui penurunan data *loss* dan jumlah keterlambatan pengiriman data. Oleh karena itu, antena eksternal dipilih sebagai konfigurasi komunikasi yang digunakan pada pengujian ketahanan sistem selama tujuh hari. Meskipun demikian, rata-rata *latency* pengiriman data pada penelitian ini relatif lebih tinggi dibandingkan *latency* komunikasi Modbus RTU RS485 pada sistem sebelumnya, yang mencapai 32–172,25 ms untuk komunikasi *request-response* langsung antar perangkat. Perbedaan ini wajar mengingat *latency* pada penelitian ini turut mencakup proses pengiriman data melalui jaringan seluler dan *platform cloud ThingSpeak*, sedangkan komunikasi Modbus RTU RS485 bersifat langsung tanpa melalui infrastruktur internet [18]. Meskipun demikian, jika dibandingkan dengan sistem nirkabel sejenis pada penelitian sebelumnya yang masih memiliki keterbatasan berupa ketiadaan penyimpanan data lokal dan rentan terhadap gangguan koneksi internet [9, 10], sistem yang dikembangkan pada penelitian ini menunjukkan tingkat keandalan yang lebih baik. Penggunaan antena eksternal mampu menekan angka data *loss* secara signifikan, serta didukung oleh adanya media penyimpanan data lokal berbasis *flashdisk* sehingga proses pencatatan suhu transformator tetap dapat berjalan secara berkelanjutan meskipun koneksi nirkabel terputus.

3.4. Pengujian Ketahanan Sistem

Pengujian ketahanan sistem dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan perangkat dalam menjalankan fungsi monitoring, penyimpanan, dan pengiriman data suhu transformator secara kontinu dalam jangka waktu yang panjang. Pengujian dilaksanakan selama tujuh hari berturut-turut dengan interval pencatatan data setiap 20 detik. Parameter yang diamati meliputi keandalan komunikasi nirkabel, keandalan penyimpanan data lokal, kemampuan pencatatan data saat koneksi internet terputus, serta ketahanan perangkat terhadap peningkatan suhu operasi.

Gambar 8 menunjukkan implementasi sistem selama pengujian ketahanan. Selama pengujian berlangsung, sistem melakukan pembacaan data suhu, menyimpan data pada flashdisk melalui modul CH376S, serta mengirimkan data ke *platform* monitoring menggunakan jaringan seluler secara otomatis tanpa intervensi operator. Untuk pengujian hari ke 1 hingga hari ke 2 menggunakan antenna dongle dan pada hari ke 3 hingga ke 7 menggunakan antenna eksternal.



Gambar 8. Implementasi Sistem Selama Pengujian Ketahanan

Hasil pengujian keandalan komunikasi nirkabel selama tujuh hari ditunjukkan pada Tabel 5. Parameter yang diamati meliputi jumlah data ideal, jumlah data tercatat, jumlah data loss, persentase kelengkapan data, rata-rata latency, jumlah data terlambat, dan persentase data terlambat.

Tabel 5. Hasil Pengujian Ketahanan Komunikasi Nirkabel

Hari Ke-	Ideal Data Harian	Data Tercatat	Jumlah *Data Loss*	Persentase Kelengkapan Data (%)	Rata-rata Latency (ms)	Data Terlambat (Interval >20s)	Persentase Data Terlambat (%)
1	4320	4.279	41	99,05	1020,38	458	10,70
2	4320	4.306	14	99,68	1023,13	288	6,69
3	4320	4.311	9	99,79	1026,22	273	6,33
4	4320	4.315	5	99,88	1029,93	274	6,35
5	4320	4.313	7	99,84	1018,86	275	6,38
6	4320	4.314	6	99,86	1020,85	273	6,33
7	4320	4.315	5	99,88	1022,84	270	6,26

Berdasarkan Tabel 5, sistem berhasil mengirimkan sebagian besar data hasil pengukuran ke *platform* monitoring dengan persentase kelengkapan data berkisar antara 99,05% hingga 99,88%. Jumlah data *loss* tertinggi terjadi pada hari pertama sebanyak 41 data, sedangkan jumlah data loss terendah terjadi pada hari keempat dan ketujuh sebanyak 5 data. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komunikasi nirkabel mampu bekerja secara stabil dibandingkan sistem sebelumnya yang berbasis komunikasi kabel Modbus RTU RS485.

Rata-rata *latency* yang diperoleh berada pada kisaran 1.018 ms hingga 1.030 ms. Nilai tersebut menunjukkan bahwa data hasil pengukuran dapat diterima oleh *platform* monitoring dalam waktu yang relatif singkat. Persentase data terlambat berada pada rentang 6,26% hingga 10,70%, dengan jumlah data terlambat tertinggi terjadi pada hari pertama. Meskipun demikian, data yang diterima masih berada pada tingkat kelengkapan yang tinggi sehingga proses monitoring tetap dapat berjalan dengan baik.

Selain komunikasi nirkabel, dilakukan pengujian terhadap keandalan penyimpanan data lokal untuk memastikan sistem mampu melakukan pencatatan data secara kontinu dengan interval 15 detik. Hasil pengujian data *logger* lokal selama tujuh hari ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Ketahanan Data Logger Lokal

Hari Ke-	Data Ideal	Data Tercatat	Data Hilang	Interval >15 Detik	Persentase Keberhasilan (%)
1	5760	5756	4	1	99,93
2	5760	5750	10	4	99,83
3	5760	5754	6	4	99,9
4	5760	5754	6	0	99,9
5	5760	5758	2	1	99,97
6	5760	5756	4	2	99,93
7	5760	5758	2	1	99,97

Berdasarkan Tabel 6, sistem berhasil mencatat 40.286 data dari total data ideal sebanyak 40.320 data dengan persentase keberhasilan pencatatan mencapai 99,92%. Jumlah data yang tidak berhasil tercatat selama tujuh hari pengujian sebanyak 34 data. Kehilangan data terbesar terjadi pada hari ke-2 sebanyak 10 data, sedangkan kehilangan data terkecil terjadi pada hari ke-5 dan ke-7 sebanyak 2 data.

Selama tujuh hari pengujian ditemukan 13 kejadian interval pencatatan lebih dari 15 detik. Jumlah tersebut tidak berpengaruh signifikan terhadap kontinuitas pencatatan sehingga data logger tetap memiliki tingkat keandalan yang tinggi.

Selain pengujian penyimpanan data, dilakukan pengujian suhu operasi perangkat untuk mengetahui kemampuan sistem bekerja pada kondisi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan kondisi normal selama 1 jam. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Pengujian Sistem pada Suhu Ekstrim

Suhu Tertinggi			Suhu Terendah			Selisih
Waktu	Suhu Ruang Lingkup (°C)	WTI HV (°C)	Waktu	Suhu Ruang Lingkup (°C)	WTI HV (°C)	
18:00	76	79,7	03:02	22,2	80,5	0,8
18:10	76,6	79,8	03:07	22,1	80,6	0,8
18:20	76,2	79,6	03:09	22,3	80,4	0,8
19:30	76,1	79,7	03:13	22,4	80,4	0,7

Berdasarkan Tabel 7, sistem tetap mampu beroperasi dengan baik selama pengujian suhu operasi. Seluruh fungsi pembacaan data, penyimpanan data, dan pencatatan waktu tetap berjalan normal tanpa ditemukan kegagalan sistem. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perangkat yang dikembangkan memiliki ketahanan operasi yang baik dan mampu mempertahankan kinerjanya pada kondisi suhu yang lebih tinggi dari kondisi operasi normal.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keandalan yang baik dalam melakukan pencatatan dan monitoring suhu transformator secara berkelanjutan. Tingginya persentase kelengkapan data komunikasi nirkabel, keberhasilan pencatatan data lokal sebesar 99,92%, kemampuan penyimpanan data saat koneksi internet terputus, serta kestabilan operasi perangkat pada pengujian suhu menunjukkan bahwa sistem layak diterapkan sebagai sistem pencatatan suhu transformator secara real-time dan berkelanjutan.

3.5. Pengujian Keandalan *Backup* Daya

Pengujian keandalan *backup* daya dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem catu daya cadangan dalam mempertahankan operasi perangkat ketika sumber daya utama mengalami gangguan atau terputus. Sistem *backup* daya yang digunakan terdiri dari UPS Module 5V, baterai Li-ion 18650 berkapasitas 3000 mAh, dan modul MAX17048 sebagai pemantau kapasitas baterai. Pengujian dilakukan untuk mengetahui ketahanan baterai selama menyuplai beban, karakteristik pengisian baterai, serta kinerja sistem proteksi baterai yang diterapkan pada perangkat.

Pengujian pertama dilakukan untuk mengetahui ketahanan baterai saat menyuplai seluruh sistem tanpa bantuan sumber daya utama. Selama pengujian, perangkat tetap menjalankan fungsi monitoring suhu, pencatatan data, dan komunikasi nirkabel sebagaimana kondisi operasi normal. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Ketahanan Baterai

Tanggal	Waktu	Presentase Baterai (%)
30/05/2026	21:27:38	100
31/05/2026	00:42:47	75
31/05/2026	03:20:58	50
31/05/2026	04:47:49	25
31/05/2026	10:00:04	0
Ketahanan Baterai = 12 jam 32 menit		

Berdasarkan Tabel 8, kapasitas baterai mengalami penurunan secara bertahap seiring waktu penggunaan hingga mencapai batas minimum operasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa baterai mampu mempertahankan operasi sistem selama 12 jam 32 menit. Selama periode tersebut seluruh fungsi perangkat tetap berjalan normal tanpa terjadi *restart* sistem maupun kehilangan data. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem *backup* daya mampu menjaga kontinuitas monitoring dan pencatatan data ketika terjadi pemadaman listrik dalam jangka waktu tertentu.

Pengujian pengisian baterai dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan UPS *Module* dalam mengisi ulang baterai. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Pengujian Pengisian Baterai

Tanggal	Waktu	Presentase Baterai (%)
31/05/2026	15:30:45	0
31/05/2026	17:21:33	25
31/05/2026	19:12:22	50
31/05/2026	19:41:46	75
31/05/2026	21:11:03	100
Pengisian Baterai = 5 jam 40 menit		

Berdasarkan hasil pengujian, kapasitas baterai meningkat secara bertahap dari kondisi kosong hingga mencapai 100%. Waktu yang dibutuhkan untuk proses pengisian penuh adalah 5 jam 40 menit. Proses pengisian berlangsung stabil tanpa ditemukan kenaikan suhu yang berlebihan maupun gangguan pada sistem. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rangkaian pengisian pada UPS *Module* mampu mengisi baterai secara normal sehingga baterai dapat kembali digunakan sebagai sumber daya cadangan.

Sistem dilengkapi dengan proteksi *overcharge* dan *overdischarge* untuk menjaga keamanan baterai. Pengujian dilakukan dengan mengamati kondisi baterai saat mencapai batas minimum dan batas maksimum kapasitas. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Pengujian Proteksi Baterai

Pengujian Proteksi *Overcharge* (Baterai Penuh)				Pengujian Proteksi *Overdischarge* (Baterai habis)			
Tegangan Baterai (V)	Status UPS	Status Alat	Hasil Pengujian	Tegangan Baterai (V)	Status UPS	Status Alat	Hasil Pengujian
< 4,1	Normal	Aktif	Normal	> 2,95	Normal	Aktif	Normal
> 4,1	*Cut Off*	Aktif	Proteksi Aktif	< 2,95	*Cut Off*	Padam	Proteksi Aktif

Berdasarkan hasil pengujian, sistem proteksi *overdischarge* mampu memutus suplai daya baterai secara otomatis ketika kapasitas baterai mencapai batas minimum yang telah ditentukan. Selain itu, proteksi *overcharge* juga bekerja dengan baik dengan menghentikan proses pengisian ketika kapasitas baterai mencapai 100%. Mekanisme proteksi tersebut mampu mencegah pengosongan maupun pengisian berlebih yang dapat menurunkan umur pakai baterai dan memengaruhi keandalan sistem.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem *backup* daya yang dikembangkan memiliki tingkat keandalan yang baik dalam mendukung operasi perangkat monitoring suhu transformator. Ketahanan baterai selama 12 jam 32 menit, kemampuan pengisian penuh dalam waktu 5 jam 40 menit, serta keberhasilan fungsi proteksi *overcharge* dan *overdischarge* menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kontinuitas operasi perangkat ketika terjadi gangguan sumber daya utama.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pencatatan data suhu transformator gardu induk berbasis ESP32 dengan komunikasi nirkabel dan *backup* daya. Hasil pengujian menunjukkan nilai MAPE sebesar 0,6% sebelum pengujian ketahanan dan maksimum 0,8% setelah pengujian ketahanan. Penggunaan antena eksternal menurunkan data *loss* dari 41 menjadi 5 data serta menurunkan persentase data terlambat dari 10,70% menjadi 6,35%. Pada pengujian selama tujuh hari, sistem mencapai kelengkapan data nirkabel sebesar 99,88% dan keberhasilan pencatatan data lokal sebesar 99,92%. Sistem juga tetap mampu mencatat data saat koneksi internet terputus, beroperasi pada kondisi suhu tinggi, serta mempertahankan operasi selama 12 jam 32 menit menggunakan *backup*

daya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem layak digunakan untuk monitoring dan pencatatan data suhu transformator secara real-time dan berkelanjutan.

Meskipun sistem menunjukkan kinerja yang baik, beberapa aspek masih dapat dikembangkan lebih lanjut. *Latency* pengiriman data dapat dikurangi dengan protokol yang lebih ringan seperti MQTT, dilengkapi mekanisme *buffering* dan *retry* otomatis untuk menekan data *loss* pada jaringan yang kurang stabil. Pengembangan berikutnya juga dapat mencakup fitur notifikasi otomatis saat suhu melampaui ambang aman, penguatan keamanan siber pada pengiriman dan penyimpanan data, serta pemanfaatan data historis melalui pendekatan *machine learning* untuk mendukung *predictive maintenance* transformator daya.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] Y. Pirniawan, U. A. Gani, and M. Rajagukguk, "Analysis of Distribution Transformer Life Based on Load at PT . PLN (Persero) Pontianak," *Telecommun. Comput. Electr. Eng. J.*, vol. 2, no. 1, pp. 14–31, 2024, doi: 10.26418/telectrical.v2i1.75928.

[2] A. H. Santoso, E. Rizka, and H. M. K, "Analisis Pembebanan Terhadap Perkiraan Umur Transformator Distribusi 20 kV Penyulang Lowokwaru di PT. PLN(PERSERO) UP3 Malang," *J. Sist. Kelistrikan*, vol. 09, no. 3, pp. 122–126, 2022.

[3] Z. Han *et al.*, "Abnormal Detection Method of Sensor Data Based on Informer," in *Annual Conference of China Electrotechnical Society*, Springer, 2023, pp. 379–387.

[4] A. Solihin and O. A. Rozak, "Prototype Monitoring Temperatur dan Tekanan Minyak Transformator Distribusi dengan SCADA LabVIEW," *JTE UNIBA*, vol. 9, no. 1, pp. 486–495, 2024.

[5] P. R. K, V. Jagadeesh, B. Vamshee, C. Srikanth, and R. K. M, "IoT Based Transformer Monitoring System using ESP-32," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 5, pp. 4597–4602, 2024, doi: 10.22214/ijraset.2024.62643.

[6] S. Sahrani, N. D. Ahmad, R. Mohamed, and M. A. Talib, "Real-Time Monitoring of Oil Temperature in Distribution Power Transformer by Using Internet of Things," *Pertanika J. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–16, 2022, doi: 10.47836/pjst.31.1.01.

[7] N. K. Ming, N. Philip, and S. Sahlan, "Proactive and Predictive Maintenance Strategies and Application for Instrumentation & Control in Oil & Gas Industry," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 11, no. 4, pp. 119–130, 2019, doi: 10.30880/ijie.2019.11.04.013.

[8] Z. Zhao, J. Xu, and Y. Zang, "Adaptive Abnormal Oil Temperature Diagnosis Method of Transformer Based on Concept Drift," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 14, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/app11146322.

[9] D. E. Suprapto, D. Lestari, and Aripriharta, "MONITORING TEMPERATUR TRAFO DISTRIBUSI 220V DENGAN ARDUINO BERBASIS IoT," *J. INOVTEK POLBENG*, vol. 9, no. 1, pp. 155–161, 2019.

[10] B. E. Prasetyo, W. Hayuhardhika, N. Putra, D. Syauqy, and A. Bhawiyuga, "SISTEM MONITORING TRAFO DISTRIBUSI PT . PLN (Persero) BERBASIS IoT IOT," *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 7, no. 1, pp. 205–210, 2020, doi: 10.25126/jtiik.202071951.

[11] A. F. Mubarok, *RANCANG BANGUN PROTOTIPE SISTEM OTOMATIS PENCATAT DATA SUHU MINYAK MULTI-TRANSFORMATOR PADA GARDU INDUK DENGAN KOMUNIKASI MODBUS RTU RS485*. Malang, Indonesia: B.S. thesis, Dept. Elect. Eng., State Polytechnic of Malang, 2025.

[12] T. Domínguez-bolaño, O. Campos, V. Barral, C. J. Escudero, and J. A. García-naya, "An overview of IoT architectures , technologies , and existing open-source projects," *Internet Things Eng. Cyber-Physical Hum. Syst.*, vol. 20, 2022, doi: 10.1016/j.iot.2022.100626.

[13] M. Abotaleb, J. Mindykowski, B. Dudojc, and R. Masnicki, "DIGITAL COMMUNICATION LINKS COOPERATING WITH THE ANALOG 4-20 mA STANDARD FOR MARINE APPLICATIONS," *Bull. Polytech. Inst. Jassy (BulLETINUL INSTITUTULUI Politeh. DIN IAŞI)*, vol. 67 (71), no. 1, pp. 22–44, 2021, doi: 10.2478/bipie-2021-0002.

[14] M. Abotaleb, J. Mindykowski, B. Dudojc, and R. Masnicki, "Case-Study-Based Overview of Methods and Technical Solutions of Analog and Digital Transmission in Measurement and Control Ship Systems," *sensors (MDPI)*, vol. 22, no. 18, pp. 1–34, 2022, doi: 10.3390/s22186931.

[15] T. W. Nugroho, A. Aliyu, and J. Prasojo, "Rancang Bangun Alat Pengirim Sinyal Arus 4 -20 mA dari Pemancar Suhu melalui Jaringan GPRS," *J. ELKOMIKA*, vol. 5, no. 1, pp. 1–14, 2017.

[16] PT PLN (PERSERO), "BUKU PEDOMAN PEMELIHARAAN PERALATAN PRIMER GARDU INDUK, PDM/PGI/01:2014," Jakarta, 2014.

[17] C. Jamroen and A. Pannawan, "Portable Industrial Standard Mixed-Signal Transmitter for Laboratory," in *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, IEEE, 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/IEECON.2018.8712234.

[18] A. Hasib and A. S. M. A. S. Akib, "Cloud-Enabled IoT System for Real-Time Environmental Monitoring and Remote Device Control Using Firebase," 2026, *arXiv*. doi: 10.48550/arXiv.2601.17414.