pISSN : 0852-0232, eISSN : 2656-582X DOI : 10.14710/gt.v23i1.xxxxx

Simulasi Sistem Monitoring Suhu Dan Tekanan Internal pada Transformator Daya Berbasis ESP32 Menggunakan *Website*

Dinar Salsabiela [1)], Yuniarto,[2)]
[1)]Program Studi Str. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
**E-mail : yuniartostmt@gmail.com*

ABSTRACT

Power transformers are prone to operational failures due to increases in internal temperature and pressure. Given that built-in mechanical protection systems operate only reactively, this study aims to design a real-time early-detection and tank-monitoring system based on the Internet of Things (IoT). This system was developed using an ESP32 microcontroller, a Type K thermocouple sensor, and a pressure sensor. The sensor readings are processed to control safety actuators (buzzer, heater relay, and solenoid valve) based on three threshold conditions: SAFE, WARNING, and DANGER. The system also visualizes monitoring data on a Node-RED website and automatically logs the history via Google Spreadsheet. Test results show that the simulated system successfully responds to changing conditions as designed. When the status is WARNING, the buzzer activates as an early warning. In the DANGER condition, the microcontroller automatically turns off the heater and opens the solenoid valve to reduce pressure. Validation tests recorded a very low average reading error percentage—0.36% for temperature and an average deviation of 1.47 psi for pressure—compared to the reference measuring instruments. Overall, this system simulation successfully performed remote monitoring and protection functions with a high level of accuracy.

Keywords: *power transformer, ESP32, Type K thermocouple, Internet of Things, Node-RED, monitoring system.*

PENDAHULUAN

Transformator daya merupakan salah satu peralatan inti dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan daya listrik dari tingkat tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya pada frekuensi konstan [1]. Sebagian besar transformator daya memanfaatkan minyak transformator sebagai media isolasi sekaligus media pendingin untuk meredam panas yang timbul pada inti dan belitan kumparan [2]. Dalam operasionalnya, lonjakan beban listrik yang tinggi memicu peningkatan suhu minyak secara signifikan [3]. Peningkatan suhu minyak yang tidak terkendali memicu ekspansi termal, penurunan kualitas isolasi, serta percepatan proses hidrokarbon yang berpotensi menyebabkan overheating dan kegagalan isolasi transformator [4].

Kenaikan suhu pada minyak transformator yang berada di dalam ruang tertutup tangki berbanding lurus dengan peningkatan tekanan internal. Tekanan internal yang berlebih (overpressure) berisiko merusak struktur tangki, keretakan pada sambungan las, serta kebocoran pada gasket dan komponen isolasi [6]. Oleh karena itu, pemantauan parameter suhu dan tekanan internal secara simultan menjadi faktor krusial untuk mendeteksi indikasi kondisi abnormal secara dini sebelum terjadi kerusakan yang lebih serius.

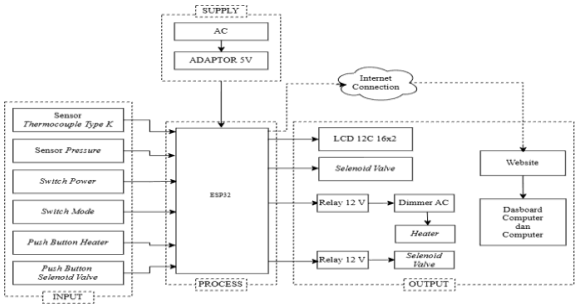
Pengembangan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) menawarkan kemudahan dalam pemantauan parameter kelistrikan dan fisik secara jarak jauh dan real-time [6]. Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji sistem pemantauan transformator. Penelitian oleh Cahyono dan Silaban (2024) menerapkan pemantauan suhu dan tekanan pada transformator traksi berbasis ESP32 dan Ubidots, dengan error pengukuran suhu di bawah 1% dan tekanan 4,53% [6]. Namun, penelitian tersebut belum dilengkapi dengan penyimpanan data historis secara mandiri dan terpisah. Penelitian oleh Desmira dan Martias (2024) mengimplementasikan sensor termokopel tipe K dan modul MAX6675 untuk pemantauan suhu tinggi dengan tingkat akurasi yang presisi [5], tetapi belum mencakup pemantauan tekanan serta tidak diterapkan pada transformator. Penelitian Ramadhanil dan Meliala (2025) mengembangkan monitoring overheat transformator 1 fasa berbasis ESP32 dan Google Spreadsheet menggunakan sensor DS18B20 [4]. Akan tetapi, sensor DS18B20 memiliki batas ukur suhu yang relatif terbatas (-55°C hingga 125°C) serta belum menyediakan antarmuka visual berbasis website interaktif maupun pemantauan tekanan internal. Berdasarkan permasalahan tersebut, pada penelitian ini dirancang dan dibangun Simulasi Sistem

Monitoring Suhu dan Tekanan Internal pada Transformator Daya Berbasis ESP32 Menggunakan Website.

Sistem mengintegrasikan sensor termokopel tipe K dengan modul pengondisi sinyal MAX6675 untuk pembacaan suhu, sensor tekanan oil pressure transducer, mikrokontroler ESP32, antarmuka dashboard website Node-RED via protokol MQTT (HiveMQ Public), pencatatan riwayat otomatis pada Google Spreadsheet berbasis FreeRTOS multitasking dan Google Apps Script, serta mekanisme proteksi interlock otomatis mengendalikan buzzer, relay heater, dan selenoid valve. Sistem dikategorikan dalam tiga ambang batas kondisi operasional, yaitu AMAN, WARNING, dan DANGER.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun *(research and development)* yang terdiri dari tahap perancangan hardware, perancangan software, pembuatan alat, serta tahap pengujian dan validasi. Sistem dirancang menggunakan tangki simulasi berbentuk silinder sebagai representasi tangki minyak transformator daya. Diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok simulasi sistem monitoring suhu dan tekanan transformator daya

Perangkat keras pada sistem ini disusun atas empat bagian utama yang saling terintegrasi. Bagian pertama adalah *Supply System*, di mana sumber tegangan utama berasal dari jaringan listrik AC 220V yang dihubungkan ke adaptor 5V DC untuk mencatu mikrokontroler ESP32, modul MAX6675, sensor tekanan, dan LCD, sementara sumber AC 220V dialirkan ke rangkaian pemanas yang terdiri dari modul Dimmer AC, relay, elemen *heater*, dan *selenoid valve*. Bagian kedua, yaitu *Input System*, terdiri atas sensor termokopel tipe K yang terhubung dengan modul MAX6675 via komunikasi SPI (pin SCK di GPIO18, CS di GPIO5, dan SO di GPIO26) untuk membaca suhu internal tangki, serta sensor *oil pressure transducer* dengan keluaran analog 0,5–4,5 VDC yang terhubung ke pin ADC (GPIO35) melalui pembagi tegangan (*voltage divider*) guna mengukur tekanan internal tangki.

Sistem masukan ini juga dilengkapi dengan panel kontrol fisik berupa saklar daya (*Switch Power*), saklar mode (*Switch Mode*), serta tombol *Push Button Heater* dan *Push Button Valve* bersistem *active low.* Selanjutnya, pada Processing System, pusat pengolahan data dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 DevKit V1 30 pin yang diprogram untuk mengeksekusi dua task mandiri berbasis sistem operasi real-time (FreeRTOS).

Terakhir, *Output & Actuator System* berfungsi sebagai luaran yang mencakup LCD 16x2 I2C sebagai media penampil lokal, *buzzer* sebagai alarm suara, modul Dimmer AC 2000W untuk meregulasi laju pemanasan, Relay Heater (*Low Level Trigger*) untuk memutus atau menghubungkan elemen pemanas, serta Relay Valve (*High Level Trigger*) untuk membuka *selenoid valve* NC (*Normally Closed*) sebagai katup pelepas tekanan berlebih. Sebagai tambahan untuk pembanding visual secara manual, sebuah *Pressure Gauge* tipe tabung Bourdon (0–2.5 Bar) turut dipasang secara paralel pada ruang udara di dalam tangki.

Persentase error dan akurasi pada pengujian sensor dihitung menggunakan persamaan:

$$Error\ (\%) = |Nilai\ Sistem - Nilai\ Referensi| \,/\, Nilai\ Referensi \times 100\%$$

$$Akurasi\ (\%) = 100\% - Error\ (\%)$$

LOGIKA KENDALI DAN AMBANG BATAS PARAMETER

Sistem ini diprogram menggunakan logika proteksi bertingkat yang didasarkan pada tiga klasifikasi kondisi operasional. Kondisi pertama adalah status AMAN, yang berlaku saat suhu terpantau kurang dari 55 °C dan tekanan di bawah 2 Psi. Pada kondisi tersebut, *heater* beroperasi dalam keadaan ON untuk mode otomatis, sedangkan *selenoid valve* dan *buzzer*

tetap OFF. Kondisi kedua yaitu status WARNING, yang aktif ketika suhu berada pada rentang 55 °C hingga di bawah 65 °C, atau tekanan berada pada 2 Psi hingga di bawah 4 Psi (dalam pengujian integrasi ditetapkan saat suhu ≥ 65 °C dan tekanan ≥ 4 Psi).

Pada fase ini, sistem mengaktifkan *buzzer* sebagai peringatan dini, sementara *heater* tetap ON dan *valve* masih keadaan OFF. Kondisi ketiga adalah status DANGER, yang terpicu apabila suhu melonjak hingga 80 °C atau lebih dan tekanan mencapai 6 Psi atau lebih. Dalam situasi kritis, sistem akan secara instan mematikan *heater* (OFF) untuk menghentikan proses pemanasan dan langsung membuka *selenoid valve* (ON) guna membuang kelebihan tekanan internal di dalam tangki. Selain itu, untuk mencegah terjadinya fluktuasi perpindahan status aktuator yang terlalu cepat (*chattering*), sistem akan menerapkan algoritma *Cooling Down.*

HASIL PENGUKURAN

1. Akurasi Sensor Thermocouple Type K

Pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor termocouple type k terhadap termometer digital pembanding pada rentang suhu 45 °C hingga 46 °C sebanyak 20 kali pengambilan data. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 1.

No	Waktu	Sensor Suhu Tipe K (°C)	Termometer Pembanding (°C)	Selisih (°C)	Error (%)	Akurasi
1	14:46:33	45,00	45,00	0,00	0,00	100,0
2	14:46:34	44,75	45,00	0,25	0,56	99,4
3	14:46:35	45,00	45,00	0,00	0,00	100,0
4	14:46:36	45,25	45,00	0,25	0,56	99,4
5	14:46:37	45,50	45,00	0,50	1,11	98,8
6	14:46:38	45,50	45,00	0,50	1,11	98,8
7	14:46:39	45,75	45,00	0,75	1,67	98,3
8	14:46:40	45,25	45,00	0,25	0,56	99,4
9	14:46:41	45,50	45,00	0,50	1,11	98,8
10	14:46:42	45,75	45,00	0,75	1,67	98,3
11	14:46:43	46,00	45,00	1,00	2,22	97,7
12	14:46:44	45,50	45,00	0,50	1,11	98,8
13	14:46:45	46,00	46,00	0,00	0,00	100,0
14	14:46:46	45,50	46,00	0,50	1,09	98,9
15	14:46:47	46,00	46,00	0,00	0,00	100,0
16	14:46:48	45,00	46,00	1,00	2,17	97,8
17	14:46:49	46,25	46,00	0,25	0,54	99,4
18	14:46:50	46,00	46,00	0,00	0,00	100,0
19	14:46:51	46,00	46,00	0,00	0,00	100,0
20	14:46:52	45,75	46,00	0,25	0,54	99,4
RATA-RATA		**45,56**	**45,40**	**0,36**	**0,81**	**99,6**

Berdasarkan Tabel 1, rata-rata pembacaan sensor termokopel tipe K diperoleh sebesar 45,56 °C, yang sangat mendekati rata-rata termometer pembanding sebesar 45,40 °C. Rata-rata selisih pembacaan tercatat sangat rendah yakni 0,36 °C, dengan rata-rata persentase error relatif sebesar 0,81% dan rata-rata tingkat keakuratan mencapai 99,64%.

2. Akurasi Sensor Tekanan

Pengujian validasi sensor tekanan dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor transducer terhadap indikator Pressure Gauge mekanis. Data diambil sebanyak 20 kali secara berurutan pada kondisi tekanan tangki antara 5,7 psi hingga 6,0 psi. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

No	Waktu	Sensor Pressure (Psi)	Pressure Gauge (Psi)	Selisih (Psi)	Error (%)	Akurasi (%)
1	17:25:27	4,70	5,70	1,00	17,54	82,46
2	17:25:28	4,40	5,70	1,30	22,81	77,19
3	17:25:29	4,70	5,70	1,00	17,54	82,46
4	17:25:30	4,30	5,70	1,40	24,56	75,44
5	17:25:31	4,50	5,70	1,20	21,05	78,95
6	17:25:32	4,30	5,70	1,40	24,56	75,44
7	17:25:33	4,70	5,70	1,00	17,54	82,46
8	17:25:34	4,70	5,70	1,00	17,54	82,46
9	17:25:35	3,50	5,80	2,30	39,66	60,34
10	17:25:36	4,70	5,80	1,10	18,97	81,03
11	17:25:37	4,50	5,80	1,30	22,41	77,59
12	17:25:38	4,40	5,80	1,40	24,14	75,86
13	17:25:39	4,60	5,90	1,30	22,03	77,97
14	17:25:40	4,50	5,90	1,40	23,73	76,27
15	17:25:41	4,60	5,90	1,30	22,03	77,97
16	17:25:42	3,50	5,90	2,40	40,68	59,32
17	17:25:43	3,50	6,00	2,50	41,67	58,33
18	17:25:44	5,00	6,00	1,00	16,67	83,33
19	17:25:45	4,50	6,00	1,50	25,00	75,00
20	17:25:46	3,50	6,00	2,50	41,67	58,33
RATA-RATA		**4,36**	**5,82**	**1,47**	**25,07**	**(98,54% FS)**

Berdasarkan Tabel 2, pembacaan sensor tekanan secara umum menunjukkan kecenderungan under-reading terhadap Pressure Gauge mekanis dengan rata-rata selisih absolut sebesar 1,47 psi. Rata-rata pembacaan sensor berada pada nilai 4,36 psi sedangkan Pressure Gauge menunjukkan 5,82 psi.

Jika dievaluasi terhadap skala ukur maksimal sensor (174 psi / 1.2 MPa), penyimpangan 1,47 psi setara dengan error skala penuh sebesar 0,84% atau akurasi sebesar 98,54%.

3. Pengujian Keseluruhan Sistem dan Respons Aktuator

Pengujian terintegrasi dilakukan untuk memverifikasi kesesuaian tindakan kendali aktuator (buzzer, selenoid valve, dan heater) pada tiap klasifikasi status. Ringkasan hasil 15 skenario pengujian ditampilkan pada Tabel 3.

Pengujian Ke-	Suhu (°C)	Tekanan (Psi)	Buzzer	Selenoid Valve	Relay Heater	Status Sistem
1–5	54,00 – 55,25	0,00	OFF	OFF	ON	**AMAN**
6–10	70,00 – 74,75	4,00	ON	OFF	ON	**WARNING**
11–15	83,25 – 87,25	6,00	OFF	ON	OFF	**DANGER**

Sistem terbukti mengeksekusi logika interlock secara tepat: (1) Pada kondisi AMAN (Suhu < 55 °C, Tekanan < 2 Psi), heater beroperasi memanaskan tangki, sementara buzzer dan valve dalam keadaan non-aktif; (2) Pada kondisi WARNING (Suhu 70–74,75 °C, Tekanan 4 Psi), buzzer berbunyi sebagai peringatan awal tanpa mematikan heater; dan (3) Pada kondisi DANGER (Suhu 83,25–87,25 °C, Tekanan 6 Psi), sistem secara otomatis memutus daya heater untuk menghentikan pemanasan dan membuka selenoid valve untuk membuang tekanan berlebih.

ANALISIS

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor

termokopel tipe K yang dilengkapi modul MAX6675 memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi (99,64%) dengan rata-rata kesalahan pembacaan hanya 0,36 °C. Ketelitian ini dicapai berkat penggunaan housing berbahan stainless steel (tipe industrial head) yang mampu menghantarkan panas secara efektif serta melindungi probe dari kontak langsung dengan fluida dan kelembapan. Selain itu, kompensasi cold-junction internal pada chip MAX6675 berhasil meminimalkan derau (noise) sinyal analog sebelum dikonversi menjadi data digital 12-bit via komunikasi SPI.

Pada parameter tekanan, sensor transducer menghasilkan kecenderungan pembacaan yang sedikit lebih rendah (under-reading) dibandingkan Pressure Gauge mekanis berbasis tabung Bourdon, dengan rata-rata selisih 1,47 psi. Penyimpangan ini disebabkan oleh adanya perbedaan karakteristik mekanis antara membran sensor piezoresistive dengan tabung Bourdon pada kondisi tekanan rendah, serta penurunan tegangan linier pada rangkaian pembagi tegangan (voltage divider). Namun demikian, kecenderungan pembacaan sensor tetap bersifat linier dan konsisten terhadap perubahan tekanan internal tangki, sehingga sangat memadai untuk memicu fungsi proteksi interlock saat mencapai ambang batas 6 psi.

Dari aspek arsitektur perangkat lunak dan komunikasi IoT, penggunaan sistem operasi real-time (FreeRTOS) pada mikrokontroler ESP32 terbukti ampuh mencegah pembekuan program (lag). Pemisahan task akuisisi sensor (TaskSensorControl) pada Core 1 dan task pengiriman data cloud (TaskGoogleSheets) pada Core 0 dengan perlindungan Mutex memastikan seluruh fungsi kendali darurat dapat dieksekusi secara instan (latensi < 1 detik) tanpa terganggu oleh proses koneksi jaringan internet.

Protokol MQTT via broker HiveMQ Public mampu meneruskan data suhu, tekanan, dan status sistem menuju dashboard Node-RED secara real-time dengan waktu tunda yang sangat rendah. Integrasi dengan Google Apps Script Web App juga berhasil mencatat riwayat pemantauan secara berkala setiap 15 detik ke dalam Google Spreadsheet tanpa terjadi kehilangan data (data loss). Penerapan algoritma Cooling Down (histeresis) terbukti berhasil menjaga selenoid valve tetap terbuka hingga suhu dan tekanan menyentuh ambang aman, sehingga mencegah terjadinya osilasi saklar (chattering) pada relay.

KESIMPULAN

1. Prototipe sistem monitoring suhu dan tekanan internal pada transformator daya berbasis ESP32 telah berhasil dirancang, dibangun, dan diimplementasikan secara terintegrasi menggunakan sensor termokopel tipe K, modul MAX6675, sensor tekanan, LCD 16x2 I2C, relay, Dimmer AC, heater, dan selenoid valve.

2. Pengujian validasi menunjukkan sensor termokopel tipe K memiliki tingkat akurasi sebesar 99,64% (rata-rata error 0,36 °C). Sensor tekanan menghasilkan rata-rata pembacaan 4,36 psi berbanding 5,82 psi pada Pressure Gauge (rata-rata selisih 1,47 psi), dengan keakuratan sebesar 98,54% terhadap skala ukur maksimum.

3. Integrasi IoT menggunakan protokol MQTT, dashboard website Node-RED, dan Google Spreadsheet berbasis Google Apps Script berhasil menyajikan visualisasi real-time dan mencatat riwayat data pemantauan secara otomatis setiap 15 detik.

4. Logika kendali keselamatan (interlock) bertingkat terbukti dapat bekerja secara konsisten merespons kondisi AMAN, WARNING (mengaktifkan buzzer), dan DANGER (mematikan heater dan membuka selenoid valve untuk mereduksi tekanan internal).

SARAN

1. Mengembangkan sistem monitoring dengan menambahkan parameter uji yang lebih komprehensif, seperti pemantauan temperatur belitan (winding temperature), level minyak isolasi, serta pengujian kualitas minyak isolasi (Dissolved Gas Analysis / DGA).

2. Menambahkan mekanisme penyimpanan data lokal sementara (offline queueing) menggunakan SD Card atau memori non-volatile (EEPROM/Flash) pada ESP32 sebagai cadangan ketika koneksi jaringan internet terputus.

3. Melakukan kalibrasi tingkat lanjut (multi-point offset calibration) pada sensor tekanan untuk meningkatkan kepresisian pembacaan pada rentang tekanan rendah.

DAFTAR PUSTAKA

[1] I. B. Iriyanto and B. B. Murti, “Analisis Kegagalan Isolasi Pada Rel Trafo Utama 150KV Di PT. Indonesia Power UPJP BALI Unit Pesanggaran,” 2020. [Online]. Available: http://etd.repository.ugm.ac.id/

[2] A. N. Adnanti, “Analisis Sistem Proteksi Relai Diferensial Pada Transformator Daya 60 MVA Di Gardu Induk Jajar Menggunakan Software ETAP,” 2022.

[3] F. Ramadhan Pratama and W. Purnawan, “Perancangan Sistem Kendali Temperature Suhu dan Level Oil Pada Prototype Transformator Tenaga,” TELKA, vol. 6, no. 2, pp. 85–92, 2020.

[4] Ramadhanil and S. Meliala, “Monitoring Suhu Overheat Pada Transformator 1 Fasa Berbasis Esp32 Menggunakan Google Spreadsheet,” 2025.

[5] Desmira and Martias, “Optimisasi Pengukuran dan Pengendalian Suhu pada Furnace Industri Menggunakan Termokopel Tipe K dan Sistem PID,” 2024. [Online]. Available: http://jurnal.bsi.ac.id/index.php/insantek65.

[6] E. Cahyono and F. Silaban, “Monitoring Realtime Suhu dan Tekanan Transformator Traksi dengan ESP32 dan Ubidots,” 2024.

[7]] J. Hericson Purba and M. S. Safriandi, “Analisis Nilai Tahanan Isolasi dan Tegangan Tembus pada Minyak Transformator 150 kV Sebelum dan Sesudah Purifikasi di PT Energi Listrik Batam,” 2024.

[8] A. Siswanto, A. Rohman, S. Suprijadi, M. Baehaqi, and A. Arifudin, “Analisis Karakteristik Minyak Transformator Menggunakan Pengujian Dissolved Gas Analysis (Dga) Pada Ibt 1 Gardu Induk,” Foristek, vol. 12, no. 1, pp. 30–42, May 2022, doi: 10.54757/fs.v12i1.142.

[9] A. Nurfaizi and I. Sulistiyowati, “Sistem Monitoring Instrumen Air Sistem Berbasis Internet of Things di PT.Parna Raya,” vol. 16, no. 2, 2022.

[10] Jefrina Dian Stifvani, Yudi Kristyawan, and Edi Prihartono, “Sistem Kontrol Stop Kran Otomatis Berdasarkan Deteksi Kebocoran Pipa Air Rumah Tangga Berbasis Arduino,” Router : Jurnal Teknik Informatika dan Terapan, vol. 3, no. 2, pp. 149–161, Jun. 2025, doi: 10.62951/router.v3i2.5