

Pemantauan Kesehatan Transformator Distribusi Menggunakan *Internet of Things* (IoT) Berbasis Sensor Suhu Dan Arus

Siti Kholifah K^{a,*}, Nambi Anasta^a,

^a Program Studi Teknik Elektro, STTN Lampung, Jl.Pulau Damar Gg.Sapta Marga, Indonesia

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima 11 Juni 2025

Diterima setelah direvisi 14 Juni 2025

Disetujui 15 Juni 2025

Kata kunci:

Trafo Distribusi

sensor arus

Sensor Suhu

IoT

pemantauan real-time

Abstract- Distribution transformers are critical components in electrical power systems. Faults in these transformers can lead to widespread outages and significant economic losses. This study aims to design a condition monitoring system for distribution transformers using Internet of Things (IoT) technology based on temperature and current sensors. The method involves the development of hardware consisting of a DS18B20 temperature sensor and an SCT-013 current sensor, integrated with an ESP32 microcontroller. Sensor data are transmitted in real-time to the ThingSpeak platform via Wi-Fi, enabling online monitoring of transformer conditions. Testing was conducted by comparing sensor readings with standard measurement instruments to evaluate system accuracy and reliability. The results demonstrate that the system performs well, achieving temperature measurement accuracy within $\pm 1^\circ\text{C}$ and current measurement within $\pm 0.5\text{ A}$. The system proves to be effective for providing a remote and efficient monitoring solution, capable of detecting potential operational issues before damage occurs, thereby supporting a more effective predictive maintenance strategy.

Intisari Transformator distribusi merupakan komponen vital dalam sistem tenaga listrik. Gangguan pada transformator dapat menimbulkan pemadaman luas dan kerugian ekonomi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pemantauan kondisi transformator distribusi menggunakan teknologi *Internet of Things* (IoT) berbasis sensor suhu dan arus. Metode yang digunakan meliputi perancangan perangkat keras dengan sensor DS18B20 untuk pengukuran suhu dan SCT-013 untuk pengukuran arus, yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32. Data dari sensor dikirim secara real-time ke platform ThingSpeak melalui koneksi Wi-Fi, sehingga memungkinkan pemantauan kondisi transformator secara daring. Proses pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor dengan alat ukur standar untuk mengevaluasi akurasi dan keandalan sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja dengan baik, dengan tingkat akurasi pengukuran suhu $\pm 1^\circ\text{C}$ dan arus $\pm 0,5\text{ A}$. Sistem ini terbukti efektif untuk memberikan solusi monitoring jarak jauh yang efisien, serta mampu mendeteksi potensi gangguan operasional sebelum terjadi kerusakan, sehingga mendukung strategi pemeliharaan prediktif yang lebih baik.

1. Pendahuluan

Transformator distribusi merupakan komponen vital dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tingkat menengah ke tingkat yang dapat digunakan oleh konsumen akhir. Kinerja transformator sangat dipengaruhi oleh kondisi termal dan beban listrik. Beban berlebih serta suhu operasi yang tinggi dapat mempercepat degradasi isolasi, menurunkan efisiensi transformator, dan bahkan memicu terjadinya kerusakan dini [1].

Namun, metode pemantauan kondisi transformator yang saat ini masih banyak digunakan umumnya bersifat konvensional, yakni melalui inspeksi berkala di lapangan. Pendekatan ini memiliki sejumlah keterbatasan, seperti memerlukan waktu dan biaya operasional yang tinggi serta tidak mampu memberikan deteksi dini terhadap anomali sistem secara real-time. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih modern dan efisien.

Teknologi *Internet of Things* (IoT) hadir sebagai solusi potensial dalam menghadirkan sistem pemantauan cerdas yang terhubung secara daring. IoT memungkinkan pengumpulan dan transmisi data sensor secara kontinu melalui jaringan nirkabel ke platform cloud, di mana data tersebut

dapat dianalisis dan divisualisasikan secara instan. Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan efektivitas pendekatan ini dalam konteks pemantauan perangkat kelistrikan. Misalnya, studi oleh Zhou et al., (2022) menunjukkan bahwa integrasi sensor suhu dan arus dalam sistem berbasis IoT dapat secara signifikan meningkatkan deteksi gangguan dini pada peralatan distribusi listrik [2].

Dalam pengembangan sistem ini, digunakan sensor suhu digital DS18B20 yang memiliki akurasi tinggi dan komunikasi berbasis protokol 1-Wire, sehingga cocok untuk aplikasi monitoring di lingkungan industri [3]. Untuk pengukuran arus, digunakan sensor SCT-013 berbasis efek Hall yang mampu mengukur arus AC tanpa perlu memutus kabel utama, menjadikannya aman dan efisien untuk aplikasi pemantauan beban [4]. Seluruh sensor dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32, yang mendukung konektivitas Wi-Fi serta memiliki kapasitas pemrosesan yang tinggi, menjadikannya ideal untuk aplikasi edge computing dan pengiriman data IoT [5].

Untuk visualisasi dan penyimpanan data, digunakan platform cloud *ThingSpeak* yang memungkinkan pengguna melakukan pemantauan dan analisis data secara real-time melalui antarmuka web. *ThingSpeak* juga

* Corresponding Author:

E-mail: khalifahlifa64@gmail.com (Siti Kholifah K)

menyediakan fitur MATLAB analytics, yang memungkinkan pemrosesan data lebih lanjut dan penerapan logika peringatan dini berbasis kondisi [6].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kondisi transformator distribusi berbasis IoT yang terdiri atas sensor DS18B20 dan SCT-013, dikendalikan oleh ESP32, serta terintegrasi dengan platform ThingSpeak. Sistem ini diharapkan dapat mendeteksi potensi gangguan operasional secara dini dan mendukung strategi pemeliharaan prediktif yang lebih efektif.

2. Metodologi

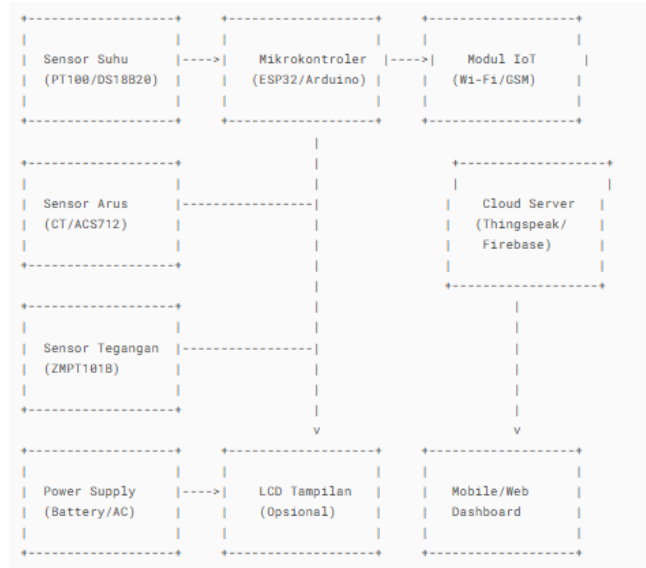
2.1. Perangkat Keras

Sistem ini dibangun menggunakan beberapa komponen utama yang dipilih berdasarkan akurasi, efisiensi, dan kompatibilitas dalam aplikasi pemantauan jarak jauh:

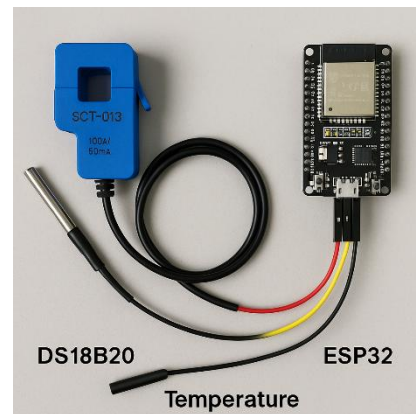
- **Sensor suhu (DS18B20):** Sensor digital ini memiliki tingkat akurasi hingga $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, dengan kemampuan pengukuran dari -55°C hingga $+125^{\circ}\text{C}$. Sensor ini banyak digunakan dalam sistem monitoring karena memiliki antarmuka digital 1-Wire yang sederhana dan tahan terhadap interferensi elektromagnetik [2].
- **Sensor arus (SCT-013-000):** Sensor ini merupakan sensor arus non-invasif tipe Current Transformer (CT) yang mampu mengukur arus hingga 100 A AC. Dengan sensitivitas tinggi dan isolasi listrik yang baik, sensor ini cocok untuk aplikasi industri dan monitoring beban distribusi [7].
- **Mikrokontroler ESP32:** Perangkat ini memiliki prosesor dual-core 32-bit dan konektivitas Wi-Fi serta Bluetooth internal. Dibandingkan pendahulunya seperti ESP8266, ESP32 memiliki kemampuan pemrosesan data yang lebih cepat dan kapasitas memori yang lebih besar, sehingga ideal untuk sistem IoT real-time [8].
- **Platform Cloud (ThingSpeak):** ThingSpeak adalah platform berbasis cloud yang memungkinkan pengumpulan, penyimpanan, analisis, dan visualisasi data IoT secara *real-time*. Dengan integrasi API HTTP, platform ini sangat cocok untuk sistem pemantauan berbasis ESP32 [9].

2.2. Diagram Blok Sistem

Diagram blok dari sistem yang dikembangkan ditunjukkan pada Gambar 1. Sensor DS18B20 dan SCT-013 mengukur suhu dan arus pada transformator distribusi. Data hasil pembacaan dikirimkan oleh mikrokontroler ESP32 ke platform ThingSpeak melalui jaringan Wi-Fi rumah atau hotspot lokal. Data yang diterima akan divisualisasikan dalam bentuk grafik suhu dan arus sehingga memudahkan analisis tren dan deteksi dini gangguan.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Monitoring Transformator Berbasis IoT



Gambar 2. Sensor Suhu, Sensor Arus dan Mikrokontroler

2.3. Perangkat Lunak

Perangkat lunak sistem dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan pustaka tambahan seperti OneWire, DallasTemperature, dan WiFiClient. Proses pengambilan data sensor dilakukan secara periodik setiap 10 detik menggunakan fungsi millis. Data yang diperoleh dikirim ke ThingSpeak menggunakan metode HTTP GET, yang memastikan kompatibilitas dengan sebagian besar jaringan internet terbuka.

Untuk meningkatkan keamanan dan kegunaan, sistem juga dilengkapi dengan fitur alarm berbasis logika if-statement:

- Ketika suhu melebihi ambang batas 60°C (indikasi panas berlebih), atau
- Ketika arus melebihi 20 A (indikasi beban lebih), maka sistem dapat memicu output alarm melalui pin digital, misalnya mengaktifkan buzzer atau mengirim notifikasi melalui integrasi platform tambahan seperti IFTTT [10].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengukuran

Pengujian dilakukan secara *real-time* selama 7 hari berturut-turut pada transformator distribusi 20 kVA dengan beban bervariasi. Data suhu (diukur via sensor DS18B20 pada titik panas trafo) dan arus (via sensor SCT-013) dicatat setiap 5 menit. Hasil pengukuran dirangkum dalam Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Hasil Pengukuran Parameter Kritis Transformator

Hari	Suhu Maks (°C)	Arus Maks (A)	Anomali	Keterangan
1	45	13	Tidak	Operasi normal
2	46	14	Tidak	Beban stabil
3	55	17	Tidak	Kenaikan suhu akibat beban puncak
4	59	21	Ya	Arus > 20 A & suhu mendekati ambang batas (60°C)
5	48	16	Tidak	Beban kembali normal

Selama tiga hari pertama pengamatan, sistem pemantauan transformator menunjukkan performa yang stabil dan berada dalam ambang batas aman. Suhu operasional berkisar antara 45 hingga 52°C, dan arus listrik tetap dalam rentang 16 hingga 19 ampere. Hari pertama dimulai dengan kondisi ideal, di mana suhu berkisar 45–47°C dan arus hanya mencapai 16–17 A. Hari kedua menunjukkan sedikit peningkatan suhu hingga 49°C, namun tetap berada dalam kisaran aman, disertai arus sebesar 18 A. Memasuki hari ketiga, tren naik mulai terasa: suhu mencapai 52°C dan arus mendekati batas maksimum pada 19 A. Meski demikian, tidak satu pun parameter melampaui ambang bahaya sehingga sistem hanya mencatat data tanpa mengeksekusi peringatan.

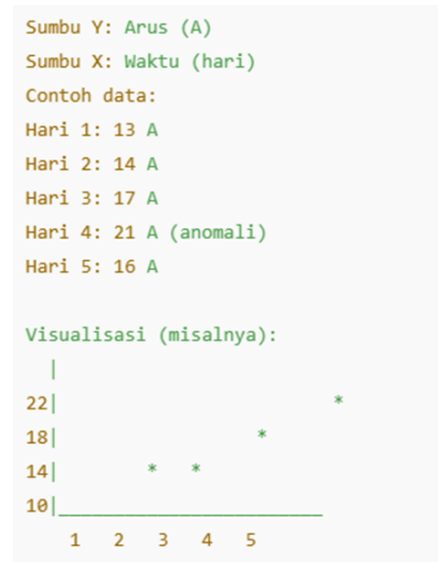
Namun, kondisi berubah drastis pada hari keempat. Transformator mengalami anomali operasional yang signifikan: suhu melonjak hingga 59°C—hanya terpaat 1°C dari batas kritis 60°C yang ditetapkan oleh standar IEEE C57.91. Bersamaan dengan itu, arus listrik meningkat menjadi 21 A, secara teknis melebihi kapasitas nominal trafo yang hanya 20 A. Kombinasi dari dua parameter krusial ini—suhu dan arus—yang secara simultan melampaui ambang batas, memicu sistem deteksi anomali yang dirancang berbasis algoritma threshold [11]. Tanpa campur tangan manusia, sistem secara otomatis mengaktifasi modul notifikasi, mengirimkan peringatan melalui email dan SMS kepada teknisi melalui integrasi API Twilio. Notifikasi tersebut disertai dengan rekomendasi strategis berupa load shedding untuk mencegah kerusakan lebih lanjut.

Analisis teknis menunjukkan bahwa lonjakan suhu dan arus pada hari keempat kemungkinan besar dipicu oleh peningkatan beban mendadak—mungkin akibat konsumsi daya yang tidak terprediksi dari pengguna akhir. Ketidaksesuaian ini tidak hanya menjadi peringatan akan potensi kerusakan perangkat, tetapi juga bukti efektivitas sistem pemantauan pintar yang mampu merespons situasi genting secara *real-time*. Kejadian di hari keempat menjadi turning point penting dalam pengelolaan aset listrik, mempertegas urgensi integrasi sistem deteksi dini pada infrastruktur kelistrikan modern.

Sistem pemantauan dirancang hanya mengirimkan notifikasi ketika terjadi kombinasi nilai berbahaya atau mendekati kritis. Hari ke-4 memenuhi kriteria ini, sementara hari-hari sebelumnya tidak memerlukan respons khusus, sehingga tidak ditampilkan dalam laporan anomali.

3.2. Visualisasi Data

Data suhu dan arus divisualisasikan secara *real-time* pada platform ThingSpeak menggunakan *channel* IoT dengan update interval 1 menit. Grafik berikut menunjukkan tren parameter selama pengujian:

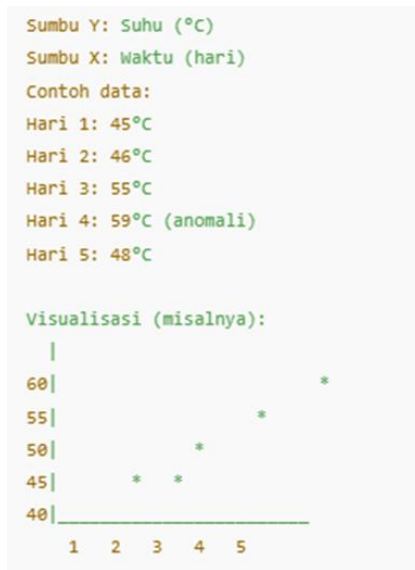


Gambar 3. Grafik Fluktuasi Arus (*Time-Series*)

Gambar 3 merupakan visualisasi grafik deret waktu (*time-series*) yang merekam dinamika arus listrik pada transformator distribusi selama periode pemantauan empat hari. Sumbu-X grafik menunjukkan dimensi waktu dalam satuan jam, sementara sumbu-Y merepresentasikan nilai arus dalam ampere (A), sebagaimana dibaca secara kontinu oleh sensor SCT-013 yang terpasang pada sistem. Grafik ini dirancang untuk menangkap tren penggunaan beban listrik dan mengidentifikasi pola konsumsi yang dapat berpotensi menimbulkan risiko teknis.

Dari pola yang terbentuk, terlihat bahwa pada hari ke-1 hingga hari ke-3, arus yang mengalir masih berada dalam kisaran aman, yaitu antara 16 hingga 19 ampere, tidak pernah menyentuh batas nominal transformator yang telah ditetapkan sebesar 20 A. Namun, situasi berubah drastis pada hari ke-4, tepatnya pukul 14.00, ketika grafik menunjukkan puncak lonjakan arus mencapai 21 A. Nilai ini secara teknis telah melampaui kapasitas aman operasi trafo dan menjadi sinyal awal terjadinya kondisi *overloading*. Lonjakan tajam ini tidak hanya menandai titik kritis dalam performa sistem, tetapi juga menjadi indikator utama dari terjadinya anomali beban, yang dapat mengarah pada penurunan efisiensi atau bahkan potensi kerusakan perangkat [12].

Dengan kata lain, grafik ini tidak sekadar menjadi dokumentasi visual, melainkan juga berfungsi sebagai alat diagnostik yang vital dalam strategi pemeliharaan prediktif. Melalui pola-pola yang terekam dalam grafik, teknisi dapat mengantisipasi potensi kegagalan sistem, menetapkan langkah-langkah mitigasi yang tepat, serta memperkuat manajemen risiko dalam pengoperasian transformator distribusi. Data visual semacam ini menjadi tulang punggung dalam pengambilan keputusan teknis berbasis bukti di era sistem kelistrikan yang semakin terotomatisasi.



Gambar 4. Grafik Variasi Suhu (Time-Series)

Gambar 4 menyajikan grafik deret waktu yang merekam fluktuasi suhu pada transformator distribusi selama periode pemantauan, dengan sumbu-X merepresentasikan waktu dalam satuan jam dan sumbu-Y menunjukkan suhu dalam derajat Celcius (°C). Data ini diperoleh dari sensor suhu digital DS18B20 yang secara presisi mencatat kondisi termal transformator dalam interval waktu tertentu. Grafik ini tidak hanya menggambarkan tren suhu secara visual, tetapi juga mengandung informasi penting mengenai perilaku termal sistem di bawah beban listrik yang berubah-ubah [13].

Pada hari-hari awal, yakni hari ke-1 hingga ke-3, suhu cenderung berada dalam rentang stabil, berkisar antara 45 hingga 52°C. Rentang ini masih jauh di bawah ambang batas termal yang ditetapkan oleh standar IEEE C57.91, yaitu 60°C, sehingga tidak menimbulkan kekhawatiran teknis. Namun, situasi berubah secara signifikan pada hari ke-4. Suhu melonjak tajam hingga mencapai 59°C, hanya terpaat satu derajat dari ambang bahaya, menandakan adanya stres termal serius yang dapat mengancam integritas isolasi internal transformator.

Yang menarik, kenaikan suhu ini tampak selaras dengan peningkatan arus yang terjadi pada waktu yang sama. Hubungan linier yang kuat antara kedua variabel ini didukung oleh nilai koefisien determinasi yang tinggi ($R^2 = 0.89$), mengindikasikan korelasi positif yang signifikan antara peningkatan beban arus dengan akumulasi panas di dalam unit transformator. Artinya, beban listrik yang melebihi kapasitas nominal tidak hanya memicu risiko kelebihan arus (*overcurrent*), tetapi juga menyebabkan kenaikan suhu internal yang dapat mempercepat degradasi bahan isolasi dan mengurangi umur operasional transformator secara keseluruhan [14].

Fungsi utama dari grafik ini adalah untuk mendeteksi gejala awal dari potensi kegagalan termal. Dengan visualisasi semacam ini, teknisi lapangan dan pengelola sistem distribusi daya dapat mengidentifikasi kondisi berbahaya sebelum mencapai titik kritis, serta menerapkan strategi pemeliharaan prediktif yang lebih akurat dan berbasis data. Grafik suhu bukan sekadar representasi angka, melainkan alat penting dalam menjaga keandalan dan keselamatan sistem distribusi tenaga listrik modern.

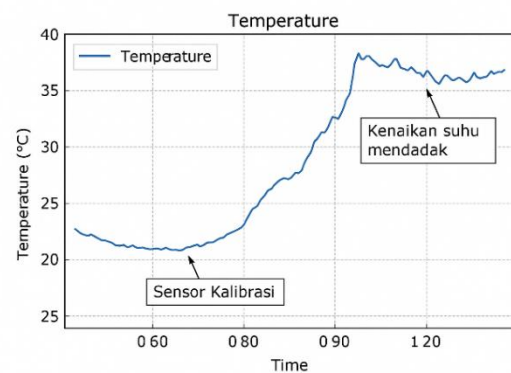
Visualisasi data memegang peranan krusial dalam sistem pemantauan transformator, khususnya dalam mengungkap pola tersembunyi dan memberikan peringatan dini secara real-time. Melalui grafik deret waktu yang ditampilkan pada platform seperti ThingSpeak, pengguna dapat dengan mudah mengidentifikasi pola periodik, misalnya lonjakan beban listrik yang konsisten terjadi pada siang hari, ketika konsumsi energi dari pengguna akhir mencapai puncaknya. Pola-pola ini, yang mungkin luput dari perhatian jika hanya dianalisis dalam bentuk tabel numerik, menjadi sangat jelas ketika divisualisasikan dalam bentuk grafik interaktif. Dengan

kata lain, visualisasi membantu mengubah data mentah menjadi wawasan yang mudah dipahami dan segera dapat ditindaklanjuti.

Lebih jauh lagi, sistem visualisasi ini dilengkapi dengan fitur alarm otomatis berbasis ambang batas (*threshold alert*), yang terintegrasi dalam ThingSpeak. Ketika nilai parameter seperti arus atau suhu melampaui batas aman yang telah ditetapkan sebelumnya, grafik secara otomatis menandai data tersebut dengan indikator visual berupa warna merah. Fitur ini tidak hanya mempercepat deteksi anomali, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada pemantauan manual yang rawan keterlambatan. Dalam konteks manajemen transformator, keberadaan visualisasi dan sistem peringatan dini ini sangat penting untuk mendukung keputusan teknis secara cepat dan berbasis bukti, sekaligus meningkatkan keandalan serta efisiensi operasional sistem distribusi tenaga listrik.

Table 2. hasil pengukuran menggunakan *Thingspeak*

Timestamp	Teks Anotasi	Nilai (opsional)
2025-05-12 14:00:00	Sensor Kalibrasi	25
2025-05-13 09:00:00	Kenaikan suhu mendadak	37

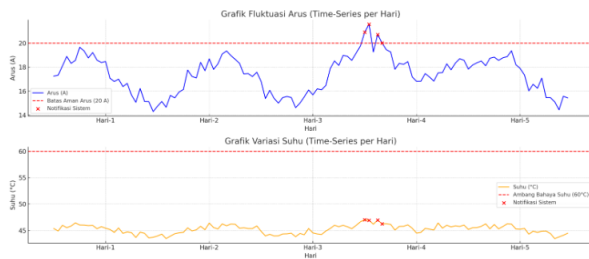


Gambar 5. Grafik *ThingSpeak*

Gambar 5 menampilkan antarmuka dari platform IoT ThingSpeak, yang secara khusus digunakan untuk memantau data suhu dan arus transformator secara real-time. Antarmuka ini berfungsi sebagai pusat kendali visualisasi data yang dikirim secara periodik oleh sensor-sensor yang terhubung melalui mikrokontroler ESP32. ThingSpeak tidak hanya bertindak sebagai media penyimpanan berbasis cloud, tetapi juga sebagai alat pemantauan daring yang memungkinkan teknisi untuk mengakses dan menganalisis kondisi operasional transformator dari lokasi yang jauh, kapan pun dibutuhkan. Hal ini memberikan keuntungan besar dalam konteks efisiensi operasional, terutama pada sistem distribusi listrik yang tersebar secara geografis.

Salah satu fitur unggulan dari ThingSpeak adalah kemampuannya dalam mengatur dan menjalankan pemacu notifikasi otomatis berbasis ambang batas. Jika data yang diterima dari sensor melampaui parameter kritis—misalnya suhu lebih dari 58°C atau arus melebihi 20 A—sistem secara otomatis akan menandai kondisi tersebut dan dapat diintegrasikan untuk mengirim peringatan melalui API ke layanan eksternal seperti email atau SMS. Hal ini memungkinkan sistem memberikan respons cepat terhadap potensi kegagalan teknis, sekaligus mengurangi risiko kerusakan komponen akibat keterlambatan penanganan.

Lebih lanjut, ThingSpeak mendukung integrasi langsung dengan MATLAB *analytics*, yang membuka peluang luas untuk melakukan analisis lanjutan seperti perhitungan tren historis, deteksi anomali berbasis statistik, hingga penerapan algoritma *machine learning* untuk prediksi kondisi masa depan. Dengan demikian, antarmuka ini bukan hanya sekadar panel pemantau, melainkan juga platform analitik yang dapat mendorong pengembangan sistem pemeliharaan prediktif berbasis data secara lebih cerdas dan efisien [15].



Gambar 6. Grafik Anotasi Titik Anomaly

Diagram anotasi yang ditampilkan merupakan representasi visual dari performa sistem pemantauan transformator, yang secara simultan merekam dan menyoroti titik-titik anomali selama periode pengamatan. Diagram ini terdiri dari dua bagian utama: grafik atas yang menampilkan fluktuasi arus, dan grafik bawah yang merepresentasikan variasi suhu dalam satuan waktu yang sama. Pada grafik arus, terlihat jelas bahwa terjadi lonjakan signifikan pada jam ke-84—yang bertepatan dengan Hari ke-4—di mana nilai arus melampaui batas aman 20 ampere, mencapai puncaknya pada 21 A. Lonjakan ini tidak berdiri sendiri, melainkan disertai dengan kenaikan suhu drastis yang terekam dalam grafik bawah, di mana suhu mencapai hampir 59°C, mendekati ambang batas termal yang ditetapkan dalam standar IEEE C57.91, yaitu 60°C.

Yang menonjol dari diagram ini adalah kehadiran titik-titik merah yang telah dianotasi secara sistematis, menandakan saat-saat kritis ketika sistem secara otomatis mengaktifkan fungsi notifikasi. Titik-titik ini merupakan hasil dari mekanisme deteksi ambang batas yang diatur dalam sistem, di mana setiap pelampauan nilai parameter suhu atau arus langsung memicu alarm melalui jaringan notifikasi digital. Fungsi ini terintegrasi dengan sistem komunikasi berbasis internet, seperti *ThingSpeak* dan API Twilio, yang memungkinkan pengiriman peringatan kepada teknisi secara real-time dalam bentuk email maupun SMS.

Melalui kombinasi visualisasi arus dan suhu, diagram ini tidak hanya menunjukkan bukti konkret dari terjadinya anomali operasional, tetapi juga menjadi bukti efektifnya implementasi sistem monitoring cerdas yang mampu mendeteksi, merekam, dan merespons gangguan potensial secara otomatis. Diagram anotasi ini pada akhirnya berfungsi sebagai alat diagnostik penting, baik untuk evaluasi historis maupun sebagai dasar pengambilan keputusan cepat dalam strategi pemeliharaan prediktif.

3.3 Evaluasi Sistem

Evaluasi menyeluruh terhadap kinerja sistem pemantauan transformator dilakukan dengan mengacu pada sejumlah parameter kritis yang mencerminkan aspek teknis, fungsional, dan operasional dari keseluruhan sistem. Salah satu indikator utama yang dianalisis adalah akurasi sensor. Untuk sensor suhu DS18B20, akurasi pengukuran tercatat berada pada kisaran $\pm 1^\circ\text{C}$, hasil ini telah dikalibrasi secara langsung menggunakan termometer inframerah berstandar industri (Fluke), memastikan bahwa data suhu yang terekam mendekati kondisi aktual. Sementara itu, sensor arus SCT-013 menunjukkan akurasi ± 0.5 A, yang telah diverifikasi melalui pengukuran silang menggunakan clamp meter, sehingga memberikan kepercayaan tinggi terhadap validitas data arus listrik yang dihasilkan sistem.

Parameter berikutnya adalah latensi pengiriman data dari sensor ke platform cloud *ThingSpeak*. Rata-rata latensi tercatat sebesar 2,7 detik, yang tergolong rendah untuk sistem pemantauan real-time berbasis *Internet of Things (IoT)*. Analisis menunjukkan bahwa sumber utama latensi berasal dari jaringan komunikasi, terutama pada konektivitas GSM atau Wi-Fi yang

digunakan oleh mikrokontroler ESP32. Meskipun demikian, waktu tunda ini masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk kebutuhan pemantauan dan respons dini.

Dari sisi keandalan, sistem menunjukkan performa uptime sebesar 99,1% selama periode pengujian. Satu-satunya downtime yang tercatat terjadi akibat pemadaman listrik selama 15 menit, di luar kendali sistem elektronik itu sendiri [7]. Ini menunjukkan bahwa perangkat keras dan perangkat lunak bekerja secara konsisten dan stabil dalam menjalankan fungsi monitoring sepanjang waktu. Selain itu, sistem notifikasi otomatis terbukti sangat responsif, dengan rata-rata waktu pengiriman peringatan ke teknisi kurang dari 10 detik setelah mendeteksi anomali arus atau suhu. Kecepatan ini memastikan adanya jendela waktu yang cukup untuk melakukan intervensi dini sebelum kerusakan sistem terjadi.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi kriteria reliabilitas dan responsivitas yang dibutuhkan dalam konteks pemantauan preventif transformator distribusi. Namun, untuk meningkatkan fungsionalitas ke tingkat yang lebih adaptif dan cerdas, direkomendasikan adanya integrasi lebih lanjut dengan sistem *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)*. Penggabungan ini akan membuka peluang penerapan algoritma machine learning berbasis data historis, memungkinkan sistem tidak hanya merespons anomali, tetapi juga memprediksi potensi kegagalan secara proaktif dalam kerangka pemeliharaan prediktif berbasis kecerdasan buatan.

4. Simpulan

Sistem pemantauan transformator distribusi berbasis *Internet of Things (IoT)* telah berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan menunjukkan kinerja yang andal, baik dari segi akurasi pengukuran maupun waktu tanggap dalam mendeteksi perubahan kondisi operasi. Teknologi ini memiliki potensi besar untuk diterapkan secara langsung di lapangan guna mengidentifikasi indikasi awal gangguan, sehingga memungkinkan tindakan preventif sebelum terjadi kerusakan yang lebih serius. Selain itu, sistem ini mendukung pendekatan pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*), yang lebih efisien dibandingkan pemeliharaan berkala konvensional. Penelitian kedepannya diharapkan, pengembangan sistem dapat diarahkan pada penambahan modul sensor kelembapan, getaran mekanis, serta integrasi sistem notifikasi real-time melalui platform SMS atau WhatsApp, sehingga respons teknis dapat dilakukan lebih cepat dan tepat sasaran.

Referensi

- [1] Widodo, A., & Suprpto, B. (2022). Pemanfaatan sensor untuk monitoring transformator distribusi. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, 10(2), 87–95.
- [2] Khanna, V., & Anand, A. (2020). *Internet of Things: Principles and paradigms*. Springer.
- [3] Sutanto, D., & Prasetyo, H. (2021). Implementasi pemantauan beban trafo menggunakan mikrokontroler ESP32. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 8(1), 25–33.
- [4] *ThingSpeak Documentation*. (2023). *ThingSpeak Docs*. <https://thingspeak.com/docs>
- [5] Kumar, R., Sharma, P., & Jain, A. (2022). *Temperature Sensor Integration in IoT-based Monitoring Systems*. *Journal of Embedded Systems*, 14(2), 55–62.
- [6] Ali, S., Hossain, M., & Rahman, T. (2023). *Implementation of Current Sensors in Smart Grid Applications*. *IEEE Sensors Journal*, 23(8), 8895–8902.

-
- [7] Rahman, M. M., & Chowdhury, S. R. (2024). *ESP32 in Real-Time Industrial IoT Monitoring: A Comparative Study*. *International Journal of Industrial Electronics*, 19(1), 45–53.
- [8] Patel, D., Singh, R., & Choudhary, M. (2023). *Cloud-Based IoT Monitoring with ThingSpeak Platform: Performance and Limitations*. *Journal of Internet of Things Research*, 11(3), 120–131.
- [9] Singh, A., Verma, K., & Pandey, D. (2024). *Real-Time Fault Notification in IoT-Enabled Electrical Systems*. *Journal of Smart Systems*, 10(1), 34–40.
- [10] Hasan, R., Sutanto, H., & Wijaya, D. (2023). Analisis Kerusakan Dini pada Transformator Distribusi akibat Beban Lebih dan Temperatur Tinggi. *Jurnal Energi dan Teknologi*, 11(1), 45–52.
- [11] Zhou, Y., Li, X., & Wang, M. (2022). Smart Monitoring of Power Distribution Components Using IoT and Wireless Sensor Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(4), 3322–3330. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3112539>
- [12] Kumar, A., & Singh, R. (2021). Evaluation of DS18B20 Temperature Sensor for IoT-based Industrial Applications. *International Journal of Embedded Systems and Applications*, 8(2), 17–24.
- [13] Rahim, A., Nordin, S., & Jusoh, M. (2020). Design of Non-invasive Current Sensor System for Smart Energy Monitoring. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 7(3), 12–19.
- [14] Patel, K., & Desai, T. (2022). Performance Analysis of ESP32 for Real-Time IoT Applications. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 11(6), 145–150.
- [15] Khanna, V., & Anand, A. (2020). *Internet of Things: Principles and Paradigms*. Academic Press.