

Rancang Bangun Sistem Monitoring Transformator Distribusi Berbasis ESP-32 Guna Deteksi Dini Kondisi Abnormal

Abimanyu Furqan Al-Hagus¹ Taryana² Nurul Azizah Syahbilla³

Diploma IV Teknik Listrik Bandara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Tangerang,
Banten, Indonesia^{1,2,3}

Email: abimanyualhg@gmail.com¹ taryana@ppicurug.ac.id² nurulazizahsyahbil@gmail.com³

Abstrak

Peningkatan beban pada transformator distribusi dapat menyebabkan kenaikan arus tiap fasa, ketidakseimbangan beban, dan peningkatan suhu yang berpotensi menurunkan keandalan serta umur operasi transformator. Pemantauan yang masih dilakukan secara berkala belum mampu memberikan informasi kondisi transformator secara kontinu dan real-time, sehingga diperlukan sistem monitoring yang dapat memberikan informasi kondisi abnormal secara lebih cepat. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem monitoring transformator distribusi berbasis mikrokontroler ESP-32 yang mampu memantau arus tiap fasa dan suhu serta mengolah data menjadi informasi overload, overheat, dan unbalance. Metode yang digunakan adalah Research and Development (R&D) karena penelitian berorientasi pada pengembangan dan pengujian purwarupa secara bertahap. Tahapan penelitian meliputi identifikasi potensi dan masalah, pengumpulan data, perancangan produk, validasi rancangan, revisi, pengujian produk, revisi produk, dan uji coba pemakaian. Purwarupa menggunakan tiga sensor SCT-013 untuk pengukuran arus fasa R, S, dan T, sensor suhu DS18B20, mikrokontroler ESP-32, Firebase Realtime Database, serta web monitoring. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu membaca data arus dan suhu, mengolah parameter overload, overheat, dan unbalance, mengirimkan data ke Firebase Realtime Database, serta menampilkan informasi kondisi transformator melalui web secara real-time. Sistem yang dikembangkan dapat digunakan sebagai media pemantauan kondisi transformator distribusi berdasarkan parameter arus dan suhu untuk mendukung deteksi dini kondisi abnormal. Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi sensor arus, menambahkan parameter pengukuran lain, mengembangkan penerapan langsung pada transformator distribusi, serta menambahkan fitur keamanan siber, SOP penanganan, dan notifikasi otomatis.

Kata Kunci: Transformator Distribusi, ESP-32, Monitoring, Arus, Suhu



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Transformator distribusi merupakan peralatan vital dalam sistem distribusi tenaga listrik yang beroperasi secara kontinu untuk menyalurkan energi listrik kepada konsumen (Djuma et al., 2025). Dalam pengoperasiannya, transformator dapat mengalami kondisi pembebanan yang tidak ideal, seperti ketidakseimbangan arus antar fasa dan pembebanan yang tinggi. Hasil observasi pada transformator distribusi di Substation RB Bandara Internasional Juanda menunjukkan arus pada fasa R sebesar 70 A, fasa S sebesar 56 A, dan fasa T sebesar 48 A, dengan persentase ketidakseimbangan beban sebesar 14%, arus netral sebesar 19,28 A, serta tingkat pembebanan mencapai 92,03% dari kapasitas arus nominal. Kondisi tersebut dapat menyebabkan distribusi arus yang tidak merata, meningkatkan rugi-rugi daya dan temperatur, serta berpotensi mempercepat penurunan kinerja dan umur pakai transformator apabila berlangsung secara terus-menerus. Penelitian mengenai *condition monitoring* transformator berbasis *Internet of Things (IoT)* telah berkembang dengan berbagai parameter dan metode komunikasi data (Msane et al., 2024). Penelitian (Madjid et al., 2019) mengembangkan sistem monitoring arus dan suhu pada transformator distribusi berbasis IoT yang mampu menampilkan data secara *real-time*, tetapi belum melakukan klasifikasi kondisi transformator berdasarkan *overload*, *overheat*, dan *unbalance*. Penelitian (Widodo et al., 2018) berfokus pada

monitoring dan pengendalian suhu gardu transformator menggunakan IoT, tetapi belum memonitor arus atau beban sehingga belum mendukung deteksi dini *overload* dan *unbalance*. Sementara itu, penelitian (Lestari, 2023) melalui IoT TROHEMS memantau tegangan, arus, suhu, dan kelembapan secara *real-time*, tetapi memiliki arsitektur yang lebih kompleks dan kebutuhan biaya yang lebih tinggi sehingga kurang sesuai untuk penerapan pada transformator distribusi yang tersebar luas.

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, masih terdapat kesenjangan berupa keterbatasan sistem monitoring yang secara khusus mengintegrasikan pemantauan arus tiap fasa dan suhu dengan klasifikasi kondisi transformator secara *real-time* menggunakan pendekatan yang sederhana dan aplikatif. Penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem dengan parameter yang lebih lengkap, tetapi kompleksitas perangkat dan kebutuhan biaya dapat menjadi kendala dalam penerapannya pada transformator distribusi yang jumlahnya banyak dan tersebar. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan sistem monitoring berbasis ESP-32 yang memantau arus tiap fasa dan suhu secara *real-time*, kemudian mengolah kedua parameter tersebut menjadi informasi kondisi *normal*, *overload*, dan *overheat*, serta menggunakan mekanisme *threshold* dan logika klasifikasi untuk memberikan informasi kondisi secara otomatis. Pendekatan ini difokuskan pada dua parameter utama, yaitu arus dan suhu, sehingga sistem lebih sederhana, aplikatif, dan ekonomis untuk digunakan sebagai media deteksi dini kondisi abnormal transformator distribusi. Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem monitoring transformator distribusi berbasis mikrokontroler ESP-32 yang mampu memantau arus tiap fasa dan suhu secara *real-time*, mengolah data untuk mengidentifikasi kondisi *overload*, *overheat*, dan *unbalance*, serta menyajikan informasi kondisi transformator secara daring melalui web sebagai media pemantauan jarak jauh.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/ Tahun	Judul	Tujuan	Metode	Hasil	Kontribusi dan relevansi
1	Madjid & Suprianto (2019)	Prototype Monitoring Arus, dan Suhu pada Transformator Distribusi Berbasis Internet of Things (IoT)	Mengembangkan sistem untuk memonitor arus dan suhu transformator distribusi secara <i>real-time</i> .	Perancangan dan pengujian sistem monitoring berbasis IoT menggunakan Wemos D1, sensor SCT-013-000, DS18B20, ADS1115, dan Blynk.	Sistem mampu melakukan pengukuran arus tiga fasa dan suhu serta menampilkan hasil pengukuran secara <i>real-time</i> .	Menjadi dasar pengembangan monitoring arus dan suhu transformator. Penelitian ini belum melakukan klasifikasi kondisi transformator berdasarkan <i>overload</i> , <i>overheat</i> , dan <i>unbalance</i> .
2	Widodo et al. (2018)	Pembuatan Sistem Monitoring dan Pengendalian Suhu Gardu Trafo dengan Internet of Things	Mengembangkan sistem monitoring dan pengendalian kondisi suhu pada gardu transformator.	Sistem IoT menggunakan NodeMCU dan sensor DHT11 untuk monitoring serta pengendalian <i>exhaust fan</i> dan <i>heater</i> .	Sistem mampu memonitor temperatur dan kelembapan serta mengirimkan data ke halaman web untuk pemantauan jarak jauh.	Relevan pada aspek monitoring kondisi suhu transformator. Penelitian belum memonitor arus atau beban sehingga belum mendukung identifikasi <i>overload</i> dan <i>unbalance</i> .
3	Tianur, Borahima, & Widodo (2023)	IoT TROHEMS (Transformator Online Health Monitoring System)	Mengembangkan sistem <i>online health monitoring</i> untuk memantau kondisi transformator	IoT menggunakan Arduino Uno WiFi Rev2, Raspberry Pi CM4, Node-RED, InfluxDB, MQTT, dan Grafana.	Sistem melakukan pemantauan berbagai parameter transformator dan kelistrikan secara <i>real-time</i>	Menunjukkan penerapan <i>condition monitoring</i> dengan parameter yang lebih luas. Namun, arsitektur sistem lebih kompleks sehingga penelitian ini

			melalui beberapa parameter.		serta mendukung identifikasi kondisi transformator.	mengambil pendekatan yang lebih terfokus pada arus dan suhu.
--	--	--	-----------------------------	--	---	--

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) Level 4 karena metode tersebut digunakan untuk menghasilkan suatu produk dan menguji keefektifan produk yang dikembangkan (Sugiyono, 2013). Metode ini dipilih karena penelitian bertujuan menghasilkan purwarupa sistem monitoring kondisi transformator distribusi berbasis ESP-32 untuk mendeteksi kondisi abnormal berdasarkan parameter arus dan suhu. Tahapan pengembangan dalam penelitian ini disesuaikan dengan kebutuhan perancangan sistem dan dibatasi menjadi delapan tahap, yaitu identifikasi potensi dan masalah, pengumpulan data, desain produk, validasi desain, revisi desain, uji coba produk, revisi produk, dan uji coba pemakaian. Tahap desain produk mencakup perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras terdiri atas ESP-32, tiga sensor SCT-013 untuk pengukuran arus fasa R, S, dan T, serta sensor suhu DS18B20. Perangkat lunak mencakup pemrograman pembacaan sensor, pengolahan data, komunikasi dengan Firebase Realtime Database, serta penyajian data melalui web monitoring.

Validasi desain dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian komponen, rangkaian atau *wiring*, alur kerja sistem, metode pengukuran, dan pengolahan parameter arus serta suhu. Revisi desain dilakukan berdasarkan hasil validasi sebelum sistem direalisasikan menjadi purwarupa. Selanjutnya, uji coba produk dilakukan untuk mengetahui fungsi sensor, komunikasi data, dan tampilan data pada sistem monitoring. Apabila ditemukan kekurangan, dilakukan revisi produk sebelum memasuki tahap uji coba pemakaian. Pada tahap uji coba pemakaian, purwarupa diuji untuk mengetahui kemampuan sistem dalam melakukan pengukuran arus tiap fasa dan suhu, pengolahan parameter *overload*, *unbalance*, dan *overheat*, pengiriman data melalui Firebase Realtime Database, serta penyajian data pada web monitoring secara *real-time*. Purwarupa ditempatkan pada panel distribusi sebagai media pengujian dan tidak dipasang secara langsung pada transformator. Pengujian sensor arus dilakukan melalui proses kalibrasi SCT-013 menggunakan tang ampere. Sensor DS18B20 diuji untuk memastikan kemampuan pembacaan perubahan temperatur secara stabil. Pengujian komunikasi dilakukan dengan mengamati pengiriman data hasil pembacaan sensor dari ESP-32 menuju Firebase Realtime Database. Data dinyatakan berhasil dikirim apabila perubahan nilai arus dan suhu tersimpan pada Firebase sesuai interval pengiriman yang ditentukan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

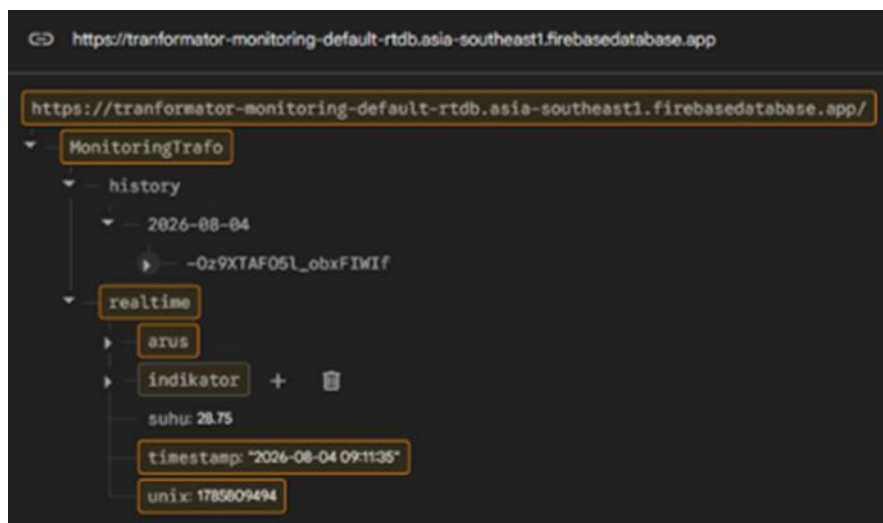
Hasil Penelitian

Penelitian ini menghasilkan purwarupa sistem monitoring kondisi transformator distribusi berbasis mikrokontroler ESP-32. Sistem menggunakan tiga sensor arus SCT-013 untuk memperoleh nilai arus pada fasa R, S, dan T serta sensor suhu DS18B20 untuk memperoleh nilai temperatur. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh ESP-32 untuk memperoleh nilai arus tiap fasa, persentase pembebanan, ketidakseimbangan beban (*unbalance*), dan temperatur. Data hasil pengolahan kemudian dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi menuju Firebase Realtime Database dan ditampilkan pada halaman web monitoring. Pengujian sensor arus SCT-013 dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sistem terhadap hasil pengukuran menggunakan tang ampere sebagai alat ukur pembanding. Proses kalibrasi dilakukan dengan menyesuaikan faktor koreksi pada program ESP-32 berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi beban yang berbeda.

Tabel 1. Hasil Pengujian Sensor Arus SCT-013

Fasa	Tang Ampere (A)	SCT-013 (A)	Deviasi (A)	Error (%)
R	11,31	11,30	0,01	0,09
S	35,50	35,49	0,01	0,03
T	10,33	10,34	0,01	0,10

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai arus pada fasa R, S, dan T yang diperoleh dari Arduino IDE sama dengan hasil perhitungan manual. Nilai pembebanan yang diperoleh sebesar 25,09%, sedangkan nilai *unbalance* sebesar 57,50%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses pengolahan data pada mikrokontroler menghasilkan nilai yang sesuai dengan perhitungan manual yang digunakan sebagai pembanding. Hasil pengukuran arus kemudian digunakan untuk menghitung persentase pembebanan dan *unbalance*. Pada pengujian dengan asumsi transformator berkapasitas 50 kVA dan arus nominal 75,97 A, diperoleh nilai rata-rata arus sebesar 19,06 A dan persentase pembebanan sebesar 25,09%. Perhitungan *unbalance* menghasilkan nilai sebesar 57,50%. Hasil pengolahan pada aplikasi menunjukkan nilai arus fasa R sebesar 11,35 A, fasa S sebesar 35,50 A, dan fasa T sebesar 10,33 A, dengan temperatur 28,44 °C, *load* 25,09%, dan *unbalance* 57,50%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem telah melakukan pengolahan hasil pembacaan sensor menjadi parameter kondisi yang ditampilkan pada antarmuka monitoring. Setelah proses pembacaan dan pengolahan data, dilakukan pengujian komunikasi antara ESP-32 dan *Firestore Realtime Database*. Pengujian dilakukan dengan mengamati apakah perubahan nilai arus dan suhu yang diperoleh sensor dapat tersimpan pada basis data sesuai interval pengiriman yang ditentukan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data hasil pengukuran telah berhasil tersimpan pada *Firestore Realtime Database*.



Gambar 1. Informasi pengukuran yang sudah terunggah pada *Firestore Realtime Database*

Pengujian berikutnya dilakukan pada web monitoring untuk memastikan data yang tersimpan pada Firebase dapat ditampilkan dengan benar. Parameter yang ditampilkan meliputi arus fasa R, S, dan T, suhu, persentase *load*, *unbalance*, serta status kondisi transformator. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data hasil pengolahan ESP-32 dapat ditampilkan pada halaman web monitoring.



Gambar 2. Informasi pengukuran yang sudah terunggah pada web monitoring

Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan dengan menghubungkan seluruh bagian purwarupa, mulai dari sensor arus dan sensor suhu, ESP-32 sebagai pengolah data, Firebase Realtime Database sebagai media penyimpanan, hingga web monitoring sebagai media penyajian informasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang dirancang, sehingga purwarupa dapat digunakan sebagai media monitoring kondisi transformator berdasarkan parameter arus dan suhu.

Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi fungsi utama yang dirancang, yaitu melakukan pembacaan arus tiga fasa dan suhu, mengolah data menjadi parameter *load* dan *unbalance*, kemudian mengirimkan serta menampilkan hasil pengukuran melalui sistem berbasis IoT. Hal ini sesuai dengan tujuan penelitian untuk membangun sistem monitoring kondisi transformator yang mampu memberikan informasi kondisi secara *real-time*. Pada pengujian arus, perbedaan nilai antara fasa R, S, dan T terlihat cukup besar. Pada salah satu kondisi pengujian, arus fasa S mencapai 35,50 A, sedangkan fasa R dan T masing-masing sebesar 11,31 A dan 10,33 A pada pengukuran menggunakan tang ampere. Ketidaksamaan arus tersebut menghasilkan nilai *unbalance* sebesar 57,50% berdasarkan metode perhitungan yang digunakan dalam penelitian. Kondisi ini menunjukkan bahwa distribusi beban pada ketiga fasa tidak merata.

Persentase pembebanan yang diperoleh sebesar 25,09% menunjukkan bahwa arus rata-rata pada kondisi pengujian berada jauh di bawah arus nominal 75,97 A yang digunakan dalam perhitungan. Dengan demikian, pada kondisi pengujian tersebut sistem tidak menunjukkan kondisi pembebanan tinggi. Nilai *load* yang rendah dan *unbalance* yang tinggi juga menunjukkan bahwa kedua parameter memberikan informasi yang berbeda: tingkat pembebanan menunjukkan besarnya beban terhadap kapasitas nominal, sedangkan *unbalance* menunjukkan pemerataan beban antar fasa. Dari sisi temperatur, sistem mampu membaca temperatur menggunakan DS18B20 dan menampilkannya bersama parameter arus pada antarmuka monitoring. Pada salah satu hasil pengujian, temperatur yang ditampilkan adalah 28,44 °C, sedangkan pada tampilan web tercatat 28,88 °C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor suhu telah terintegrasi dengan proses pengolahan dan penyajian data sistem.

Integrasi *Firebase Realtime Database* berfungsi sebagai penghubung antara perangkat pengukuran dan web monitoring. Data yang dibaca oleh ESP-32 dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi dan disimpan pada *Firebase*, kemudian digunakan oleh web untuk menampilkan

parameter kondisi. Dengan mekanisme tersebut, pengguna tidak perlu melakukan pembacaan langsung pada perangkat untuk memperoleh informasi hasil pengukuran. Dengan demikian, temuan utama penelitian ini adalah terbentuknya purwarupa monitoring yang mengintegrasikan pengukuran arus tiga fasa dan suhu dengan pengolahan *load* dan *unbalance*, serta penyajian data secara daring melalui Firebase dan web monitoring. Sistem tersebut dapat digunakan sebagai media pemantauan awal kondisi abnormal, tetapi belum dapat diposisikan sebagai perangkat proteksi transformator. Hal ini sesuai dengan batasan dalam TA bahwa purwarupa ditempatkan pada panel distribusi sebagai media pengujian dan tidak dipasang langsung pada transformator.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan membangun purwarupa sistem monitoring kondisi transformator distribusi berbasis mikrokontroler ESP-32 yang mampu melakukan pemantauan arus pada setiap fasa menggunakan sensor SCT-013 dan temperatur menggunakan sensor DS18B20 secara *real-time*. Data hasil pengukuran dapat diolah menjadi informasi tingkat *overload*, *unbalance*, dan *overheat*, kemudian dikirim melalui Firebase Realtime Database dan ditampilkan pada web monitoring. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh rangkaian sistem, mulai dari pembacaan sensor, pengolahan data, pengiriman data, hingga penyajian informasi pada web, dapat berfungsi sesuai dengan rancangan. Kebaruan praktis penelitian ini terletak pada integrasi pemantauan arus tiga fasa dan temperatur dalam satu purwarupa berbasis ESP-32 yang tidak hanya menampilkan hasil pengukuran, tetapi juga mengolahnya menjadi informasi kondisi *overload*, *unbalance*, dan *overheat* serta menyajikannya secara *real-time* melalui web. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dapat digunakan sebagai media pemantauan awal kondisi abnormal transformator dari lokasi yang berbeda tanpa melakukan pengukuran secara langsung pada perangkat. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena purwarupa diuji pada panel distribusi dan belum diterapkan secara langsung pada transformator distribusi. Pengembangan selanjutnya dapat menggunakan sensor arus dengan akurasi yang lebih tinggi serta menambahkan parameter seperti tegangan, faktor daya, daya aktif, dan kelembapan agar informasi kondisi transformator lebih lengkap. Sistem juga dapat dikembangkan dengan penerapan *cyber security*, pengaturan hak akses, pengamanan kredensial, serta penguatan keamanan komunikasi dan penyimpanan data antara ESP-32, Firebase Realtime Database, dan web monitoring.

DAFTAR PUSTAKA

- Djuma, B. R., Dwi, R., & Kartika, J. (2025). *VISA : Journal of Visions and Ideas Berbasis IoT untuk Predictive Maintenance dan Notifikasi Gangguan VISA : Journal of Visions and Ideas*. 5(2), 1415–1423.
- Lestari, M. (2023). *IoT TROHEMS (Transformator Online Health Monitoring System)*. 9(2), 151–161.
- Madjid, A. R., Elektro, T., Teknik, F., & Surabaya, U. N. (2019). *Prototype Monitoring Arus , Dan Suhu Pada Transformator Distribusi Berbasis Internet Of Things (Iot) Bambang Suprianto Abstrak*. 111–119.
- Msane, M. R., Thango, B. A., & Ogudo, K. A. (2024). *Applied Sciences Condition Monitoring Of Electrical Transformers Using The Internet Of Things : A Systematic Literature Review*.
- Sugiyono, P. D. (2013). *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif Dan R&D*.
- Widodo, H. A., Bima, M., Mudjiono, U., & Kristiawan, I. (2018). *Pembuatan Sistim Monitoring dan Pengendalian Suhu Gardu Trafo dengan Internet Of Things*. 1509, 123–132.