

PEMANTAUAN TERMAL BERBASIS IOT UNTUK PERINGATAN DINI HOTSPOT PADA KUBIKEL TEGANGAN MENENGAH (20 KV)

IOT-BASED THERMAL MONITORING FOR EARLY HOTSPOT WARNING IN MEDIUM VOLTAGE (20 KV) CUBICLES

Mishbahul Azhar¹, Sinka Wilyanti², Arisa Olivia Putri³

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta

²Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta

³Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta

¹mishbahulazhar999@gmail.com, ²sinka@jgu.ac.id, ³arisa@jgu.ac.id

Abstrak

Pembentukan *hotspot* pada kubikel tegangan menengah 20 kV merupakan salah satu faktor yang dapat menurunkan keandalan dan keselamatan operasi gardu induk, terutama pada kubikel tipe tertutup (*close-type*) yang tidak memungkinkan akses langsung untuk inspeksi suhu. Metode inspeksi termovisi yang digunakan dalam pemeliharaan rutin PLN bersifat periodik dan manual, sehingga tidak mampu menyediakan pemantauan suhu secara kontinu. Penelitian ini mengusulkan desain dan implementasi sistem peringatan dini berbasis ESP32 untuk mendeteksi potensi *hotspot* di dalam kubikel 20 kV dengan mengintegrasikan sensor suhu BME280 dan sensor arus SCT013. Sistem ini melakukan pembacaan suhu dan arus secara simultan, mengirimkan data melalui koneksi *Wi-Fi* ke aplikasi Android menggunakan *Firebase*, serta memberikan peringatan melalui alarm buzzer dan notifikasi visual saat terdeteksi kondisi termal abnormal. Pengujian dilakukan di Gardu Induk Jatirangon dengan kondisi terkontrol. Hasil menunjukkan bahwa pengukuran suhu pada jarak 30 cm memiliki rata-rata kesalahan relatif sebesar 2,49% bila dibandingkan dengan kamera termografi FLIR, sedangkan pada jarak 35 cm kesalahan meningkat menjadi 7,29%, menegaskan pentingnya posisi sensor dalam memperoleh akurasi optimal. Pengukuran arus dengan sensor SCT013 menunjukkan kesalahan rata-rata sebesar 2,83% terhadap *clamp meter*, yang masih dapat diterima untuk validasi awal anomali termal. Sistem berhasil memicu alarm ketika suhu mencapai $\geq 38^{\circ}\text{C}$ dan selisih suhu dengan *ambient* (ΔT) berada pada nilai $\geq 4^{\circ}\text{C}$ dengan arus melebihi 400 A. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa sistem berbasis IoT yang dikembangkan mampu mendeteksi anomali termal secara dini pada kubikel tertutup yang tidak dapat dijangkau oleh metode termovisi konvensional, sehingga menawarkan solusi alternatif yang ekonomis dan *real-time* untuk mendukung pemeliharaan preventif gardu induk.

Kata kunci : *hotspot*, ESP32, BME280, sistem *monitoring* IoT, kubikel 20 kV

Abstract

Hotspot formation in medium-voltage (20 kV) cubicles poses a significant reliability and safety risk in substation operations, particularly in *close-type* cubicles where thermal inspection access is limited. Conventional thermovision-based inspections, as mandated by PLN maintenance guidelines, rely on periodic manual measurements and therefore cannot provide continuous real-time monitoring. This study presents the design and implementation of an ESP32-based early warning system for hotspot detection inside 20 kV cubicles, integrating the BME280 temperature sensor and SCT013 current sensor. The system measures temperature and current simultaneously, transmits data through *Wi-Fi* to an Android application via *Firebase*, and activates an audible and visual alarm when abnormal thermal conditions are detected. Experimental testing was conducted under controlled conditions at the Jatirangon Substation. Results indicate that temperature measurements at a 30 cm sensor distance show an average relative error of 2.49% compared with a FLIR thermographic camera, while the error increases to 7.29% at 35 cm, highlighting the importance of sensor placement.

Current measurement using SCT013 demonstrated an average error of 2.83% compared with a clamp meter, which is acceptable for early anomaly validation. The system successfully triggered alarms when the temperature reached $\geq 38^{\circ}\text{C}$ and the temperature difference with ambient (ΔT) was $\geq 4^{\circ}\text{C}$, supported by current readings above 400 A. These findings demonstrate that the proposed IoT-based system can detect early thermal abnormalities in enclosed cubicle environments that are inaccessible to conventional thermographic tools, offering a low-cost and real-time alternative for substation preventive maintenance.

Keywords: Hotspot detection, ESP32, BME280, IoT monitoring system, 20 kV cubicle

1. PENDAHULUAN

PT PLN (Persero) melalui Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk (ULTG) memiliki tanggung jawab penting dalam menjaga keandalan penyaluran energi listrik [1]. Salah satu tantangan utama yang dihadapi adalah mendeteksi peningkatan suhu abnormal atau *hotspot* pada kubikel tegangan menengah (20 kV), khususnya pada tipe tertutup (*close type cubicle*) yang sulit diakses untuk inspeksi langsung. Berdasarkan pedoman SKDIR PLN No. 520 Tahun 2022, pemeriksaan suhu kubikel dilakukan melalui inspeksi termal periodik dengan metode *thermovision* [1]. Namun, keterbatasan waktu dan akses membuat pendekatan ini tidak dapat mendeteksi perubahan suhu secara *real-time*, sehingga potensi gangguan termal dapat terlewat hingga periode inspeksi berikutnya.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas deteksi *hotspot* menggunakan berbagai pendekatan. Multi dan Mubarak meneliti penggunaan kamera *thermovision* untuk menganalisis *hotspot* pada PMS Gardu Induk 150 kV Rawadenok Depok. Hasilnya menunjukkan efektivitas tinggi dalam mendeteksi suhu abnormal, tetapi metode tersebut masih bersifat manual dan bergantung pada inspeksi visual [1]. Fahturozi et al. (2024) mengevaluasi kondisi termal pada konduktor transformator 60 MVA menggunakan kamera FLIR, menegaskan pentingnya pemantauan suhu preventif, namun belum menyertakan sistem otomatisasi [1]. Pendekatan berbasis *machine learning* mulai digunakan oleh Goyal dan Rajapakse, yang mengembangkan sistem pembelajaran mandiri untuk mengisolasi *hotspot* dari citra termal dengan akurasi tinggi [2]. Demikian pula, Ukiwe et al. mengusulkan model deteksi berbasis *deep learning* yang mencapai akurasi hingga 99,98% dalam mendeteksi anomali termal pada peralatan listrik [1]. Meskipun demikian, sistem-sistem tersebut masih memerlukan infrastruktur komputasi besar dan tidak praktis untuk implementasi langsung di lapangan.

Dalam konteks teknologi sensor, penelitian sebelumnya lebih menekankan pada sistem pengukuran berbasis kamera termal atau algoritma *image processing*, bukan pada sistem *embedded* mandiri dengan kemampuan komunikasi nirkabel [1], [2], [3], [4]. Padahal, kebutuhan di lapangan menuntut perangkat yang mampu bekerja secara otomatis, berbiaya rendah, serta dapat beroperasi dalam kondisi kubikel tertutup yang tidak dapat dijangkau alat *thermovision*. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan alat peringatan dini potensi *hotspot* berbasis ESP32 dengan integrasi sensor suhu BME280 dan sensor arus SCT013 sebagai sistem pemantauan termal dan arus secara *real-time*. Sistem ini dirancang untuk memberikan peringatan otomatis melalui *buzzer* dan notifikasi aplikasi Android ketika suhu melebihi ambang batas 38°C atau selisih suhu terhadap lingkungan (ΔT) $\geq 4^{\circ}\text{C}$. Dengan demikian, alat ini berfungsi sebagai solusi preventif dalam mendeteksi potensi anomali termal sebelum terjadi kegagalan peralatan.

Dari tinjauan literatur, dapat disimpulkan bahwa *state-of-the-art* teknologi deteksi *hotspot* saat ini masih didominasi oleh pendekatan berbasis *thermovision* dan *machine learning* untuk pengolahan citra termal. Namun, kedua pendekatan tersebut memiliki keterbatasan pada kebutuhan perangkat mahal dan pemantauan *offline*. Penelitian ini menghadirkan *novelty* berupa sistem *Internet of Things* (IoT) berbasis mikrokontroler ESP32 yang mampu melakukan deteksi dini dan peringatan otomatis

potensi *hotspot* secara *real-time* di ruang kubikel tertutup. Keunggulan ini menjadi solusi praktis terhadap *research gap* berupa kebutuhan sistem *monitoring* berkelanjutan yang dapat diintegrasikan langsung ke infrastruktur gardu induk tanpa memerlukan inspeksi manual ataupun sistem kamera termal berbiaya tinggi.

2. DASAR TEORI /MATERIAL DAN METODOLOGI/PERANCANGAN

2.1 Dasar Teori

Kubikel tegangan menengah (20 kV) merupakan bagian dari sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi sebagai penghubung, pemutus, serta pelindung jaringan dari gangguan. Kubikel jenis *close type* memiliki desain tertutup demi keselamatan operasi, tetapi menyebabkan keterbatasan dalam akses visual maupun termal terhadap komponen internal seperti *moving contact* atau *finger contact* pada Pemutus Tenaga (PMT) [1]. Berdasarkan standar IEC 62271-200 (2021), jarak aman antar komponen di dalam kubikel berkisar antara 12–14 cm untuk *phase-to-earth* dan 20–24 cm untuk *phase-to-phase*, tergantung kondisi ruang tertutup dan tegangan operasi [1].

Dalam konteks pemeliharaan, SKDIR PLN No. 520 Tahun 2022 menetapkan prosedur inspeksi termal menggunakan kamera *thermovision* atau *thermal imager* untuk mendeteksi titik panas (*hotspot*) [1]. Namun, metode tersebut hanya efektif untuk kubikel terbuka, karena alat ukur termal seperti *thermogun* tidak dapat menjangkau ruang tertutup. Berdasarkan rekomendasi *Fluke Corporation* dan *NETA Maintenance Testing Specification*, perbedaan suhu (ΔT) sebesar $\geq 4^\circ\text{C}$ antara komponen dan suhu lingkungan dianggap sebagai indikasi awal *overheating* atau potensi *loose contact* [1], [2].

Fenomena *hotspot* secara fisik dapat dijelaskan oleh hukum Joule, di mana panas (P) berbanding lurus dengan kuadrat arus (I^2) dan tahanan (R) konduktor ($P = I^2R$). Ketika resistansi meningkat akibat sambungan longgar atau oksidasi permukaan kontak, arus tinggi yang melewati jalur tersebut akan menghasilkan akumulasi panas berlebih [1]. Apabila tidak terdeteksi dini, panas tersebut dapat mempercepat degradasi isolasi dan menurunkan keandalan sistem distribusi [1].

Upaya mitigasi umumnya dilakukan melalui pengujian tahanan kontak (*contact resistance test*) saat kondisi padam, namun pendekatan ini bersifat reaktif. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem pemantauan suhu dan arus yang mampu beroperasi secara *online* untuk memberikan peringatan dini sebelum kerusakan terjadi [1].

2.2 Material dan Komponen Sistem

Penelitian ini menggunakan kombinasi perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) berbasis *Internet of Things* (IoT). Komponen utama terdiri dari:

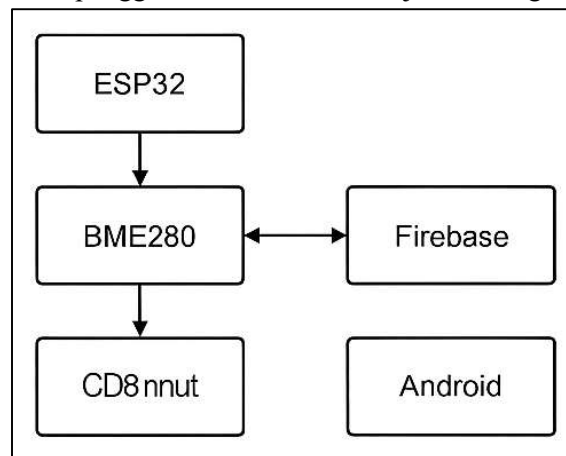
1. Mikrokontroler ESP32 D1 R32, yang berfungsi sebagai pusat pemrosesan data. Perangkat ini memiliki prosesor *dual-core Xtensa LX6* berkecepatan hingga 240 MHz, konektivitas *Wi-Fi* dan *Bluetooth*, serta kompatibel dengan *Arduino IDE*. Keunggulan ESP32 terletak pada efisiensi daya, fleksibilitas GPIO, dan kemampuan *real-time data transmission*.
2. Sensor suhu BME280, diproduksi oleh *Bosch Sensortec*, mampu mengukur suhu dalam rentang -40°C hingga $+85^\circ\text{C}$ dengan akurasi $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Sensor ini menggunakan antarmuka komunikasi I²C dan dipilih karena stabilitas serta kepekaannya terhadap perubahan suhu pada ruang tertutup.
3. Sensor arus SCT013, yaitu *current transformer* (CT) tipe *non-invasive* yang memungkinkan pengukuran arus AC tanpa kontak langsung dengan konduktor. Sensor ini digunakan untuk mendeteksi arus beban sebagai parameter validasi kenaikan suhu akibat aliran arus tinggi.

4. LCD 16×2 dengan modul I2C, digunakan untuk menampilkan hasil pembacaan suhu dan arus secara langsung. Modul ini dipilih karena efisiensi penggunaan *pin* serta kompatibilitas dengan ESP32.
5. *Firebase Realtime Database*, sebagai media penyimpanan data berbasis *cloud* untuk pengiriman data suhu dan arus ke aplikasi Android secara simultan.

Sistem ini juga didukung oleh aplikasi Android yang menampilkan kondisi *real-time* dari kubikel, termasuk status alarm jika ambang batas suhu atau arus terlampaui.

2.3 Rancangan Sistem

Rancangan sistem diawali dengan penyusunan diagram blok yang menggambarkan hubungan antar komponen utama: sensor suhu dan sensor arus sebagai *input*, mikrokontroler ESP32 sebagai pemroses, LCD sebagai *local display*, serta aplikasi Android sebagai *remote monitoring interface*. Data suhu dan arus yang terbaca oleh sensor akan dikirimkan secara nirkabel melalui koneksi *Wi-Fi* ke *Firebase* untuk diakses oleh pengguna. Gambar 1 menunjukkan diagram sketsa rancangan sistem.



Gambar 1. Diagram sketsa sistem yang diusulkan

Secara fungsional, sistem bekerja dengan prinsip antara lain sensor BME280 membaca suhu di ruang *contact finger* pada kubikel. Disisi lain, sensor SCT013 mengukur arus fasa dari kabel daya 20 kV. Mikrokontroler ESP32 memproses kedua data tersebut dan membandingkannya dengan ambang batas yang telah diprogram. Jika suhu $\geq 38^{\circ}\text{C}$ dan $\Delta T \geq 4^{\circ}\text{C}$ dengan arus $> 400\text{ A}$, maka sistem akan mengaktifkan *buzzer* alarm dan mengirimkan peringatan ke aplikasi Android. Diagram alir (*flowchart*) sistem menggambarkan proses logika ini secara berurutan: mulai dari inisialisasi sensor, pembacaan data, komparasi nilai ambang, hingga aktivasi alarm dan pengiriman notifikasi.

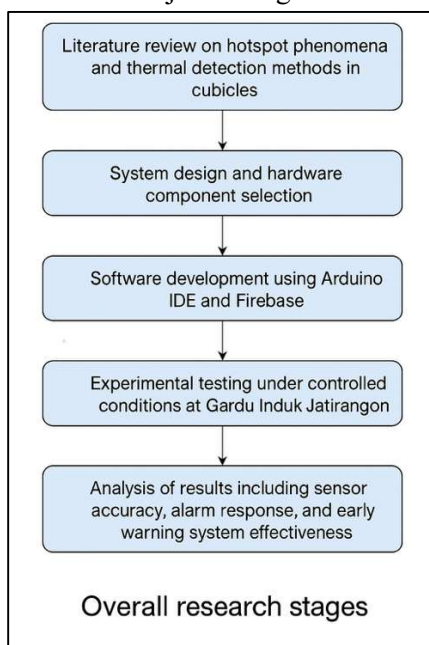
Pengujian dilakukan di Gardu Induk Jatirangon, wilayah kerja PLN ULTG Cawang, Jakarta Timur. Lokasi ini dipilih karena memiliki kubikel 20 kV tipe tertutup yang representatif untuk simulasi kondisi operasional. Prosedur pengujian mencakup tiga tahap utama: (1) Kalibrasi sensor suhu terhadap kamera termovisi FLIR dengan variasi jarak 30 cm dan 35 cm untuk menilai pengaruh posisi terhadap akurasi pembacaan; (2) Kalibrasi sensor arus SCT013 terhadap *clamp meter* untuk memvalidasi ketepatan pengukuran arus; (3) Simulasi kenaikan suhu di ruang *finger contact* dengan variasi beban arus, guna menguji respons sistem terhadap kondisi mendekati batas aman. Seluruh data hasil pengukuran direkam dan dikirim ke *Firebase* untuk kemudian dibandingkan dengan nilai referensi dari peralatan pengujian standar.

2.4 Desain Eksperimen

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif dengan rancangan uji yang berfokus pada tiga variabel utama: suhu komponen ($^{\circ}\text{C}$), suhu lingkungan (*ambient*), dan arus beban (A). Analisis dilakukan dengan menghitung kesalahan relatif antara pembacaan sensor dan alat referensi menggunakan persamaan (1).

$$Error (\%) = \frac{|X_{sensor} - X_{referensi}|}{X_{referensi}} \times 100 \quad (1)$$

Selain itu, nilai ΔT digunakan sebagai indikator terjadinya anomali termal. Apabila $\Delta T \geq 4^{\circ}\text{C}$, sistem dikategorikan *warning*, sedangkan jika suhu komponen $\geq 38^{\circ}\text{C}$, sistem masuk ke status *critical* dan alarm otomatis aktif. Sementara itu, secara ringkasnya, tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 2. Tahapan ini menghasilkan sistem *IoT-based early warning* yang mampu memantau kondisi termal kubikel 20 kV secara berkelanjutan dengan akurasi tinggi dan waktu respons cepat.



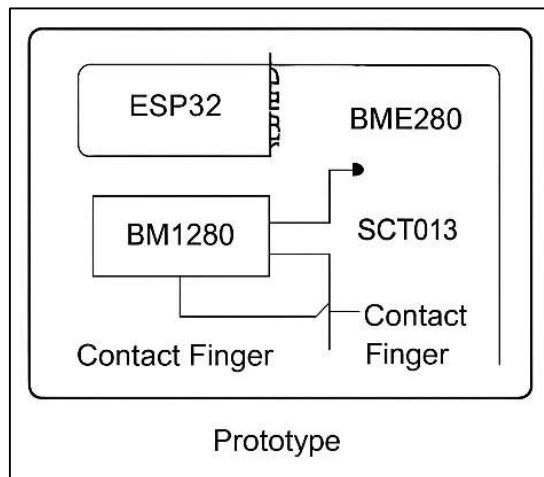
Gambar 2. Diagram alir penelitian yang diusulkan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

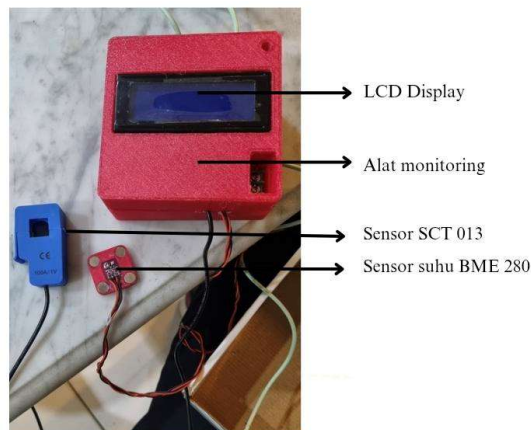
Pembahasan terhadap hasil penelitian dan pengujian, disajikan dalam bentuk uraian teoritis, dapat secara kualitatif maupun kuantitatif. Hasil pengujian sebaiknya ditampilkan dalam berupa grafik atau pun tabel. Untuk grafik dapat mengikuti format untuk diagram dan gambar.

3.1 Gambaran Umum Sistem

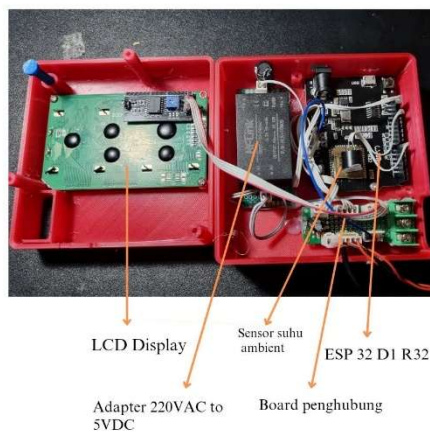
Prototipe perangkat peringatan dini *hotspot* yang dikembangkan terdiri atas mikrokontroler ESP32, sensor suhu BME280, sensor arus SCT013, modul LCD I2C, serta aplikasi pemantauan berbasis Android. Sistem dirancang untuk mendeteksi kenaikan suhu di ruang *contact finger* kubikel 20 kV secara *real-time* dan memberikan alarm otomatis ketika kondisi termal melewati batas aman (lihat Gambar 3 untuk sistematika diagram penyusunan alatnya). Proses pengujian difokuskan pada tiga aspek utama: (1) akurasi sensor suhu, (2) akurasi sensor arus, dan (3) respons sistem terhadap kondisi peringatan dini. Secara lebih rinci, Gambar 4 dan 5 menampilkan purwarupa dari sistem yang dibangun.



Gambar 3. Gambaran umum sistem tampak depan



Gambar 4. Gambaran umum sistem tampak depan



Gambar 5. Gambaran umum sistem tampak dalam

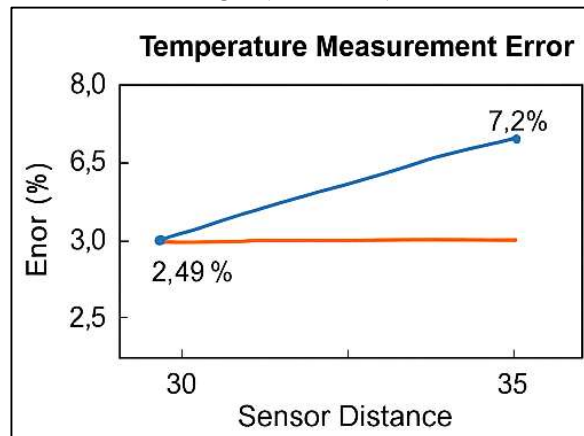
3.2 Pengujian Pengukuran Suhu

Pengujian akurasi suhu dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor BME280 terhadap kamera termovisi FLIR sebagai alat referensi. Dua jarak berbeda digunakan, yaitu 30 cm dan 35 cm dari area *contact finger* (Gambar 6). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa jarak sensor berpengaruh signifikan terhadap akurasi.



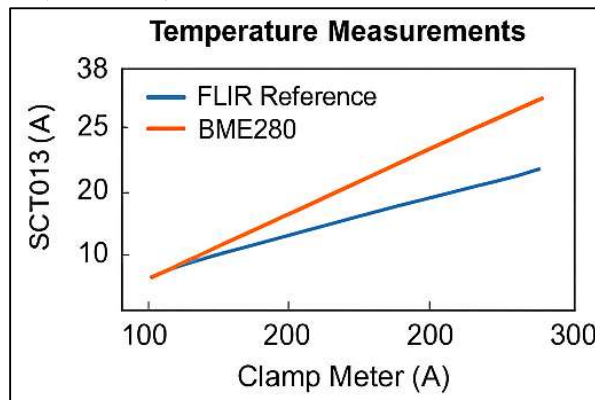
Gambar 6. Jarak sensor dari *durfur*/kontak *finger* 30 cm dan 35 cm

Pada jarak 30 cm, nilai rata-rata kesalahan relatif adalah 2,49%, menandakan tingkat akurasi yang baik dan dapat diterima untuk kebutuhan deteksi dini. Sebaliknya, pada jarak 35 cm, kesalahan meningkat menjadi 7,29%, yang menunjukkan penurunan ketelitian akibat melemahnya sensitivitas sensor terhadap perubahan suhu di area target (Gambar 7).



Gambar 7. Grafik hasil pengukuran suhu dengan nilai rata-rata kesalahan relatif

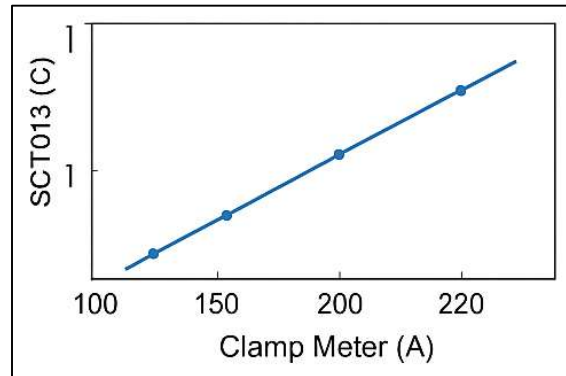
Secara umum, hubungan jarak dan akurasi bersifat linier: semakin dekat sensor terhadap titik panas, semakin kecil kesalahan pengukuran. Temuan ini sesuai dengan karakteristik BME280 yang lebih optimal untuk pengukuran suhu ruang tertutup dengan jarak sensor–target yang relatif dekat. Grafik konversi dari tabel pengujian memperlihatkan tren kenaikan *relative error* seiring bertambahnya jarak sensor (Gambar 8).



Gambar 8. Grafik hasil pengukuran suhu dengan alat ukur standar

3.3 Pengujian Pengukuran Arus

Sensor arus SCT013 diuji dengan membandingkan hasil bacaannya terhadap *clamp meter* sebagai alat acuan. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi arus beban. Gambar 9 menunjukkan hasil pengujian pengukuran arus.



Gambar 9. Grafik hasil pengukuran arus dengan alat ukur standar

Hasil menunjukkan bahwa sensor SCT013 memiliki rata-rata kesalahan relatif sebesar 2,83%, yang tergolong akurat untuk kebutuhan validasi awal sumber panas. Perbedaan kecil ini dipengaruhi oleh toleransi komponen *burden resistor* serta variasi harmonisa arus pada beban tertentu. Grafik hasil konversi menunjukkan hubungan yang stabil antara nilai arus referensi dan nilai yang terukur oleh sistem.

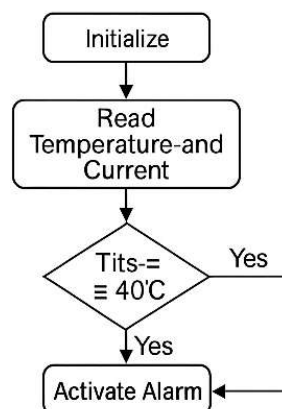
Dengan akurasi tersebut, SCT013 dapat digunakan sebagai parameter tambahan untuk memperkuat interpretasi bahwa kenaikan suhu memang berasal dari aliran arus yang tinggi, bukan dari faktor lingkungan eksternal.

3.4 Pengujian Respons Peringatan Dini

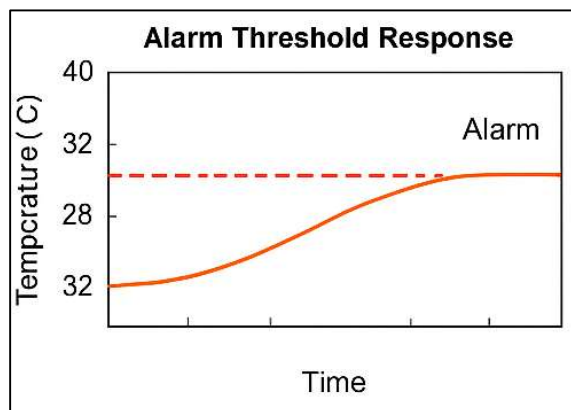
Respons alarm diuji menggunakan simulasi kenaikan suhu pada ruang *finger contact*. Kriteria aktivasi alarm yang diprogram antara lain sebagai berikut, dan diilustrasikan dalam Gambar 10.

- 1) Suhu komponen mencapai $\geq 38^{\circ}\text{C}$,
- 2) Selisih suhu dengan *ambient* (ΔT) $\geq 4^{\circ}\text{C}$,
- 3) Arus beban terukur $> 400\text{ A}$.

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa sistem secara konsisten mengaktifkan alarm *buzzer* dan mengirimkan notifikasi melalui aplikasi Android ketika parameter-parameter tersebut terpenuhi (Gambar 11). Tampilan pada LCD berubah dari status Normal menjadi *Warning* atau *Critical* sesuai ambang batas yang telah ditentukan.



Gambar 10. Diagram alur kriteria alarm dalam merespons



Gambar 11. Grafik hasil pengujian *alarm threshold response* seiring dengan kenaikan suhu

Grafik respons pada Gambar 11 menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan peringatan dalam kurun waktu kurang dari satu detik sejak sensor mendeteksi kondisi tidak normal, menandakan performa *real-time* yang sangat baik untuk keperluan pemeliharaan preventif.

3.5 Pembahasan

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa sistem peringatan dini berbasis ESP32 yang dikembangkan mampu mendeteksi potensi *hotspot* secara efektif dalam kubikel tertutup. Akurasi pengukuran suhu dan arus berada pada rentang yang dapat diterima untuk aplikasi lapangan, sementara logika peringatan dini yang menggabungkan parameter suhu, ΔT , dan arus terbukti meningkatkan keandalan deteksi anomali.

Dibandingkan metode *thermvision* konvensional yang hanya menyediakan pemantauan periodik, sistem ini menawarkan pemantauan kontinu, *real-time*, dan berbiaya rendah. Integrasi IoT memungkinkan data dikirimkan ke perangkat seluler, memperluas kemampuan respons cepat bagi petugas gardu induk. Temuan ini menempatkan sistem sebagai alternatif praktis untuk kondisi operasional kubikel tertutup yang tidak dapat dijangkau oleh alat *thermogun* atau kamera termal.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem peringatan dini potensi *hotspot* pada kubikel tegangan menengah 20 kV berbasis ESP32 dengan integrasi sensor suhu BME280 dan sensor arus SCT013 yang mampu melakukan pemantauan suhu dan arus secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa akurasi sensor BME280 pada jarak optimal 30 cm memiliki kesalahan relatif 2,49% dibandingkan kamera termovisi FLIR, sementara SCT013 menunjukkan rata-rata kesalahan 2,83% terhadap *clamp meter*, sehingga keduanya valid untuk deteksi awal anomali termal. Sistem memberikan respons alarm otomatis kurang dari satu detik ketika suhu mencapai $\geq 38^{\circ}\text{C}$ dan ΔT mencapai $\geq 4^{\circ}\text{C}$ dengan arus $> 400\text{ A}$, sehingga efektif dalam mendeteksi kondisi kritis pada ruang kubikel tertutup yang tidak dapat dijangkau oleh inspeksi termovisi konvensional. Dengan demikian, sistem ini menawarkan solusi praktis, berbiaya rendah, dan mudah diintegrasikan untuk mendukung pemeliharaan preventif di gardu induk, dengan potensi pengembangan lebih lanjut melalui penerapan *machine learning* dan perluasan titik pengukuran untuk meningkatkan keandalan pemantauan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Multi, A., & Mubarak, A. (2022). *Analisis Hotspot pada PMS Gardu Induk 150 kV Rawadenok Depok Menggunakan Thermovisi*. Jurnal Teknik Elektro.

- [2] Fahturozi, R., et al. (2024). *Evaluasi Hotspot pada Transformator 60 MVA Menggunakan Thermovisi FLIR*. Jurnal Energi dan Kelistrikan.
- [3] Goyal, A., & Rajapakse, A. (2023). Self-learning approach for hotspot isolation in thermal images. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- [4] Ukiwe, C., et al. (2024). Deep learning-based thermal anomaly detection for electrical equipment. *Energy AI*.
- [5] IEC. (2021). *IEC 62271-200: High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 200*. International Electrotechnical Commission.
- [6] PLN. (2022). *SKDIR PLN No. 520: Pedoman Pemeliharaan Peralatan Transmisi dan Distribusi*. PT PLN (Persero).
- [7] Wang, C., & Kopsidas, K. (2020). Thermal behavior analysis of contact resistance degradation in medium-voltage switchgear. *Electric Power Systems Research*.
- [8] Guan, Y., et al. (2019). Thermal-aging failure mechanisms in power distribution components. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*.
- [9] Li, T., et al. (2023). Online monitoring strategies for switchgear thermal reliability using IoT-based sensors. *Sensors*.
- [10] Murniyasih E, Suryani L, Rahawarin HF. Penerapan Internet Of Things Pada Pemantauan Otomatis Suhu Dan Kelembaban Tanaman Hidroponik Menggunakan Raspberry Pi. *Jurnal Tekinkom (Teknik Informasi dan Komputer)*. 2023 Dec 24;6(2):331-8.