

Fault Detection Analysis in Electrical Components Using IR Thermography: Applications and Recommendations

Mochamad Irlan Malik^{1*}, Anes Inda Rabbika², Yanti³, and Rachmanto Hadiputranto⁴

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Siliwangi University, Tasikmalaya, Indonesia

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Muhammadiyah University of Tasikmalaya, Tasikmalaya, Indonesia

³ Department of Mechatronic Engineering, Faculty of Engineering, Mayasari Bakti University, Tasikmalaya, Indonesia

⁴ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mayasari Bakti University, Tasikmalaya, Indonesia

*Corresponding Author, email : irlan.malik1@gmail.com

Abstract

Electric power distribution to consumers requires periodic preventive maintenance, including thermal inspection of electrical components. An efficient maintenance strategy can save an industry from potential hazards and devastating losses. Therefore, monitoring the temperature of electrical components is crucial to prevent excessive heat that can lead to fires. This research aims to analyze the detection of electrical component damage in consumer distribution networks using IR Thermography for consumer electric network maintenance. The method involves capturing thermal images of targeted hotspots in various components within the consumer distribution substation. The observed components include transformer 2500 kVA connections, connections in the Low Voltage Main Distribution Panel (LVMDP), connections in the Capacitor Bank, and the Panel Change Over Switch (COS). The acquired data is then processed using Smart View software for analysis, categorization, and recommendations. The results reveal the highest temperatures recorded were 91.0°C in the transformer 2500 kVA, specifically in Phase R, and 71.8°C in the LVMDP panel, in Phase T. These findings indicate that the main causes of temperature rise are load imbalance in the transformer and connection failure in the breaker junction.

Keywords: IR Thermography; Fault Detection; Electrical Components; Power Network; Maintenance

1. Introduction

Jaringan listrik memainkan peran sentral dalam sistem ketenagalistrikan, dimana berfungsi secara aktif untuk mensuplai energi listrik dari unit pembangkitan ke konsumen akhir. Fungsinya yang strategis menjadikan jaringan ini sebagai infrastruktur utama dalam menjamin kontinuitas pasokan energi pada sektor residensial, industri, komersial, dan layanan public [1],[2],[3],[4]. Namun, kompleksitas sistem ini membuatnya rentan terhadap gangguan teknis, seperti kondisi operasi berlebih, degradasi isolasi, fluktuasi tegangan, dan gangguan harmonisa. Jika tidak dideteksi secara tepat dan dini, gangguan tersebut dapat berkembang menjadi kerusakan serius pada komponen kelistrikan yang berpotensi menurunkan keandalan sistem distribusi secara keseluruhan [5],[6],[7].

Panas Berlebih dapat mempercepat degradasi pada komponen elektrik, sehingga meningkatkan risiko gangguan pada sistem distribusi listrik. Kondisi ini berpotensi

menimbulkan kegagalan sistem, kerugian ekonomi yang substansial, serta ancaman terhadap keselamatan publik [8],[9],[10]. Oleh karena itu, pemeliharaan jaringan listrik menjadi sangat penting untuk memastikan keandalan dan keamanan jaringan listrik. Dalam pemeliharaan jaringan listrik, identifikasi dan analisis panas pada komponen elektrik menjadi sangat penting. Dimana Termografi inframerah berfungsi sebagai alat diagnostik non-invasif dalam pemeliharaan preventif, dengan mendeteksi anomali suhu pada komponen listrik yang mengindikasikan potensi kerusakan sebelum terjadi kegagalan sistem [11],[12],[13],[14]. Hal ini dapat membantu teknisi untuk mengidentifikasi masalah potensial sebelum terjadi kegagalan, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan sebelum terlambat [15],[16].

Penelitian ini bertujuan mengembangkan pendekatan diagnostik berbasis termografi inframerah untuk mengidentifikasi potensi kerusakan pada komponen elektrik di jaringan distribusi konsumen. Dalam konteks meningkatnya kebutuhan akan pemeliharaan prediktif pada sistem distribusi tegangan rendah, metode ini menawarkan alternatif non-invasif yang belum banyak dieksplorasi dalam studi sebelumnya. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi analisis termal sebagai indikator dini kegagalan elektrik, yang dapat meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional sistem distribusi. Melalui teknik identifikasi dan analisis panas, diharapkan dapat membantu teknisi dalam mendeteksi masalah potensial sebelum terjadi kegagalan pada jaringan listrik, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan secara proaktif [17],[18]. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas pemeliharaan jaringan listrik konsumen melalui pendekatan termografi inframerah dan mengidentifikasi masalah potensial pada komponen elektrik sebelum terjadi kegagalan, mengurangi waktu pemadaman dan biaya perbaikan yang terkait [19],[20],[21].

2. Material and methods

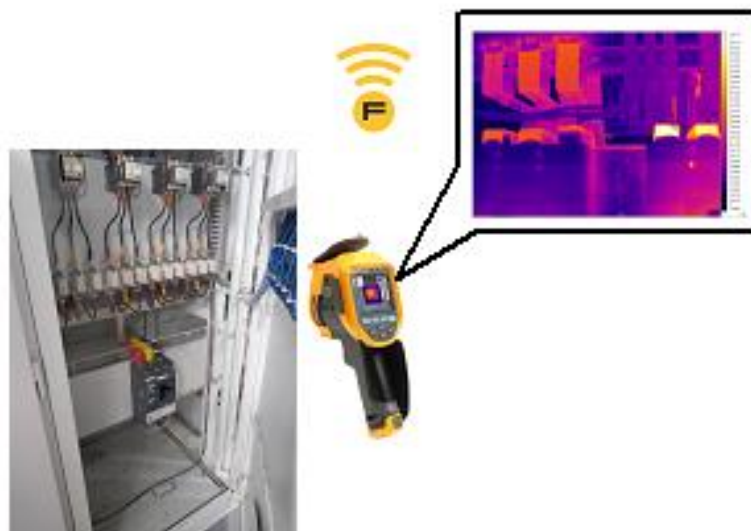
Studi ini dilakukan pada jaringan distribusi tegangan menengah milik konsumen industri menengah yang beroperasi di kawasan komersial dalam zona industri di Bekasi. dengan fokus pada deteksi kerusakan termal pada sambungan breaker, busbar, dan terminal. Pengambilan data menggunakan kamera inframerah Fluke Ti401PRO dengan resolusi 640×480 piksel, rentang suhu -20°C hingga 650°C, akurasi ±2%, dan emisivitas disetel pada 0.95. Pengukuran dilakukan pada pukul 13.00–16.00 WIB dalam kondisi sistem beroperasi dengan beban normal, dengan jarak 1–2 meter dan sudut pengambilan <15° terhadap permukaan objek. Sebanyak 12 titik ukur diamati menggunakan perangkat lunak SmartView 4.3 untuk akuisisi dan analisis citra termal. Identifikasi *hotspot* dilakukan berdasarkan perbedaan suhu lokal terhadap area referensi, dan diklasifikasikan menurut standar EPRI bahwa Level 1 ($\Delta T \leq 10^\circ\text{C}$), Level 2 ($10^\circ\text{C} < \Delta T \leq 20^\circ\text{C}$), dan Level 3 ($\Delta T > 20^\circ\text{C}$). Hasil analisis digunakan untuk menyusun rekomendasi pemeliharaan prediktif berbasis termografi guna meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik konsumen [22],[23].

2.1 Termografi Inframerah Pada Jaringan Listrik

Termografi Inframerah merupakan metode non-kontak yang digunakan untuk memvisualisasikan dan menganalisis distribusi suhu pada instalasi listrik. Dalam hal ini, kamera termal inframerah Fluke Ti401 PRO digunakan untuk mengukur suhu permukaan peralatan listrik dan komponen listrik lainnya. Teknologi ini memanfaatkan kemampuan kamera inframerah untuk mendeteksi radiasi panas yang dipancarkan oleh objek. Beberapa penerapan Termografi Inframerah sangat penting untuk mendeteksi gangguan listrik seperti Deteksi *Hotspot*. Pencegahan Kebakaran dari gangguan hubungan arus pendek, Perawatan Prediktif untuk menjaga umur komponen, dan Efisiensi Energi karena jika *loss Connection* menyebabkan Ampere tinggi dan pemborosan pada daya.

Keuntungan utama dari Termografi Inframerah ialah kemampuannya untuk memantau suhu secara non-kontak, cepat, dan non-destruktif [24].

Dengan menggunakan teknologi ini, personel pemeliharaan atau inspeksi dapat dengan mudah memindai area instalasi listrik dari jarak yang aman tanpa harus menyentuh atau melepas perlengkapan listrik. Hal ini memungkinkan deteksi dini masalah suhu dan intervensi yang cepat untuk mencegah kerusakan lebih lanjut atau kejadian berbahaya. Selain itu perlu untuk diingat bahwa termografi inframerah hanya mampu mendeteksi suhu permukaan objek dan tidak memberikan informasi tentang suhu internal atau kondisi yang tidak dapat terlihat dari luar. Selain itu, interpretasi gambar termal membutuhkan keahlian dan pengalaman untuk mengidentifikasi hotspot dan memahami konteks pengukuran suhu yang sesuai [25]. Dalam instalasi listrik, Termografi inframerah menjadi alat penting dalam perawatan prediktif dan pemantauan suhu. Dengan melakukan pemantauan berkala menggunakan termografi inframerah, masalah suhu yang tidak normal dapat dideteksi secara dini, tindakan perbaikan yang tepat dapat diambil, dan keandalan serta keselamatan sistem listrik dapat ditingkatkan. Selain itu, integrasi termografi inframerah ke dalam strategi pemeliharaan prediktif tidak hanya memungkinkan identifikasi dini terhadap potensi gangguan, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam manajemen aset kelistrikan, sehingga meningkatkan efisiensi operasional dan memperpanjang umur layanan peralatan [26],[27].



Gambar 1. Proses Penembakan Termografi Inframerah dengan Fluke Ti401 PRO

2.2 Standar Termografi Inframerah

Standar termografi inframerah merujuk pada EPRI (*Electric Power Research Institute*) merupakan organisasi riset dan pengembangan yang fokus pada teknologi energi listrik. Penelitian signifikan telah dilakukan terkait penggunaan termografi inframerah untuk pemantauan suhu pada instalasi listrik. Pada dasarnya, termografi inframerah adalah metode non-kontak yang menggunakan kamera termal untuk mengukur suhu permukaan peralatan dan komponen listrik [28]. EPRI telah menginvestasikan waktu dan sumber daya untuk mengevaluasi efektivitas dan manfaat penggunaan teknologi ini dalam konteks instalasi listrik. Tujuan penelitian EPRI dalam hal ini meliputi beberapa aspek penting. Evaluasi dan perbandingan dilakukan terhadap berbagai kamera termal inframerah yang tersedia di pasaran untuk memahami kinerjanya, termasuk resolusi termal, akurasi pengukuran suhu, serta kemampuan dalam mendeteksi hotspot pada sistem kelistrikan [29][30][31].

Tabel 1. Klasifikasi Temperatur berdasarkan EPRI

Classification Of Rise in Temperature	Comment	Action	Priority
> 90 °C	Perbaikan Segera	< 3 Hari	1
60 °C ~ 90 °C	Perbaikan Segera	< 1 Bulan	2
40 °C ~ 60 °C	Perbaikan Tidak Terjadwal	< 3 Bulan	3
10°C ~ 40 °C	Rencanakan Perbaikan Berikutnya	6-12 Bulan	4
< 10°C	Kondisi Baik dan Monitor Selama Perawatan Berikutnya	6-12 Bulan	5

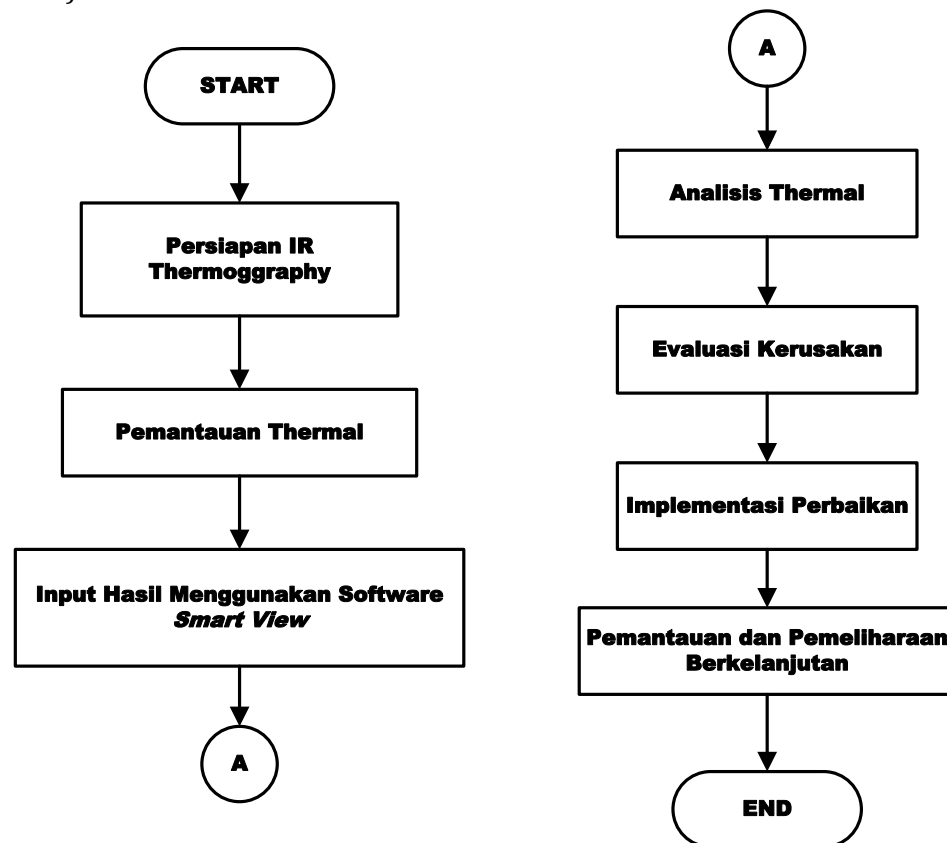
Tabel 2. Refrensi Suhu Pada Komponen berdasarkan EPRI

Objek	Refrensi Temperatur °C
Terminasi Kabel	45
Body Transformator	60
Terminasi Trafo	55
Terminasi Circuit Breaker	45
ACB	60
MCCB 400~1600A	60
MCCB 50~250A	55
MCB 32~63A	55
MCB 2~25A	45
Kontaktor >115A	70
Kontaktor 25~115A	65
Overload Relay	55
Koneksi Kontaktor-Overload	75
Switch	60
Fuse	50
Motor 1 s.d 2 PK 60	60
Motor > 10 PK 115	115

2.3 Flowchart Penelitian

Prosedur penelitian dimulai dengan identifikasi suhu anomali pada berbagai komponen elektrik sistem distribusi konsumen untuk mendeteksi indikasi awal kerusakan termal. Objek pengamatan mencakup trafo distribusi 2500 kVA, panel PUTR, panel capacitor bank, dan panel change over switch (COS). Pengukuran dilakukan menggunakan kamera termografi Fluke Ti401 PRO, yang dioperasikan untuk mendeteksi titik panas (*hotspot*) secara non-kontak pada komponen kritis seperti terminasi trafo, air circuit breaker (ACB), molded case circuit breaker (MCCB), busbar, kontak COS, power meter, dan kontaktor. Proses pengambilan data dilakukan dengan mengarahkan kamera ke masing-masing titik sambungan dan komponen kelistrikan dalam kondisi bertegangan dan beroperasi normal. Citra termal yang dihasilkan dianalisis untuk mengidentifikasi area *overheating* berdasarkan distribusi suhu, yang kemudian digunakan untuk menentukan prioritas tindakan pemeliharaan berdasarkan klasifikasi suhu menurut standar EPRI. Seluruh tahapan proses ini divisualisasikan secara sistematis dalam Gambar 1, yang menggambarkan alur kerja mulai dari inspeksi awal, akuisisi data termal, analisis suhu, hingga rekomendasi perbaikan preventif [25],[27]. Selanjutnya, hasil citra termografi yang diperoleh dari kamera inframerah diinput ke komputer dan dianalisis menggunakan perangkat lunak SmartView 4.3. Proses analisis diawali dengan pemilihan

area pengukuran (region of interest/ROI) pada masing-masing citra untuk mengekstraksi nilai suhu maksimum, rata-rata, dan minimum. Titik-titik dengan suhu tertinggi kemudian diidentifikasi sebagai hotspot, dan dibandingkan terhadap nilai ambang batas suhu referensi sesuai dengan jenis komponen (dimana 55°C untuk terminasi kabel dan MCB kecil, 60°C untuk ACB dan MCCB besar, serta 115°C untuk motor >10 PK). Berdasarkan selisih temperatur (ΔT) antara hotspot dengan area referensi, klasifikasi tingkat keparahan dilakukan mengikuti standar *Electric Power Research Institute* (EPRI). Seluruh citra termal yang diperoleh dianalisis dengan memantau titik panas (hotspot) pada setiap koneksi peralatan listrik. Setiap *hotspot* kemudian diklasifikasikan berdasarkan tingkat keparahan suhu menggunakan standar EPRI, dan dievaluasi untuk mengidentifikasi potensi kerusakan termal pada komponen yang diuji. Hasil evaluasi ini menjadi dasar untuk merumuskan rekomendasi teknis, baik dalam bentuk tindakan perbaikan langsung maupun strategi pemantauan berkala sesuai kategori prioritas. Dengan demikian, pendekatan ini mendukung pelaksanaan pemeliharaan prediktif yang lebih efektif dalam meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem distribusi tenaga listrik. (Lihat Gambar 2 untuk melihat alur penelitian).



Gambar 2. Flowchart Penelitian

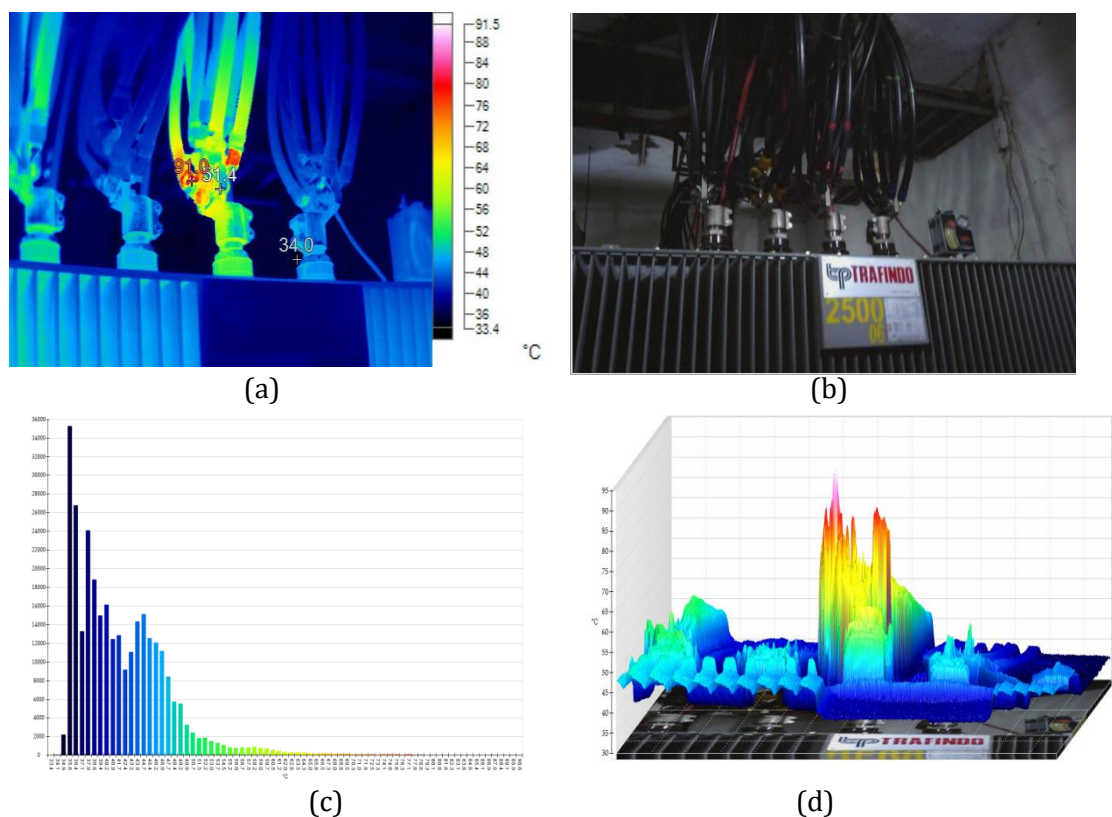
3. Results and discussion

Bagian ini menyajikan hasil pengujian IR Thermography pada trafo 2500 kVA, panel PUTR, capacitor bank, dan change-over switch (COS), yang bertujuan mendeteksi anomali suhu akibat ketidakseimbangan beban, koneksi longgar, atau degradasi isolasi/kontak. Analisis dilakukan menggunakan kombinasi citra termal 2D, histogram distribusi suhu, serta visualisasi permukaan suhu 3D-IR. Data suhu maksimum tiap titik uji disajikan dalam Tabel 1, kemudian dibandingkan dengan ambang batas suhu komponen berdasarkan standar EPRI. Beberapa titik menunjukkan kenaikan suhu di

atas 60°C, seperti terminasi trafo dan koneksi COS, yang mengindikasikan prioritas perbaikan dalam waktu <1 bulan (Level 2). Peningkatan suhu umumnya disebabkan oleh hambatan kontak akibat korosi ringan atau pengencangan koneksi yang tidak sesuai torsi standar. Dimana koneksi longgar dapat menyebabkan peningkatan resistansi lokal dan menghasilkan pemanasan resistif berlebih. Jika tidak ditangani, kondisi ini akan berpotensi menurunkan efisiensi sistem, meningkatkan risiko *thermal runaway*, bahkan kegagalan sistem distribusi secara menyeluruh. Oleh karena itu, setiap temuan disertai dengan rekomendasi pemeliharaan spesifik, baik dalam bentuk pengencangan ulang, penggantian komponen, atau pemantauan lanjutan sesuai kategori prioritas (Lihat Tabel 3).

3.1 Pengujian IR Thermograph pada Transformator 2500 Kva

Hasil inspeksi termografi pada transformator 2500 kVA (Gambar 3a-d) menunjukkan anomali suhu signifikan pada fasa R, dengan titik panas (hotspot) mencapai 91.0°C. Nilai ini melampaui ambang batas referensi sebesar 55°C untuk koneksi terminasi trafo menurut standar Electric Power Research Institute (EPRI), sehingga diklasifikasikan sebagai Kategori Level 1 ($\Delta T > 90^\circ\text{C}$) yang memerlukan intervensi perbaikan segera (<3 hari). Visualisasi termal 2D (Gambar 3a) menampilkan distribusi suhu tidak merata antar fasa, yang diperkuat oleh histogram termal (Gambar 3c) di mana hotspot 91.0°C terdeteksi pada tiga piksel area koneksi. Sementara itu, citra 3D-IR (Gambar 3d) mengonfirmasi bahwa puncak suhu terkonsentrasi pada jalur koneksi kabel fasa R menuju sisi konsumen. Ketidakseimbangan beban antar fasa teridentifikasi sebagai penyebab utama, yang dapat meningkatkan arus pada salah satu fasa, menghasilkan pemanasan berlebih, resistansi lokal tinggi, dan berpotensi menyebabkan kerusakan isolasi jika tidak ditangani [32].



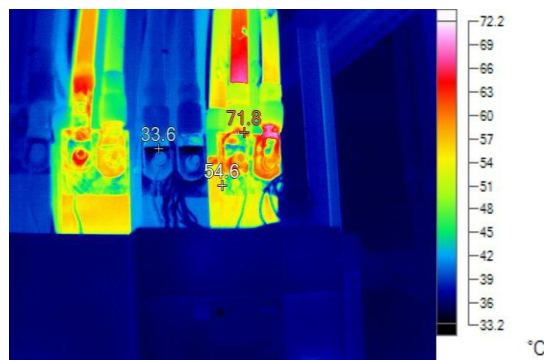
Gambar 3. Hasil Thermograph Pada Transformator 2500 kVA

Temuan ini menegaskan pentingnya pemantauan beban dan penyetimbangan fasa sebagai bagian dari strategi pemeliharaan prediktif berbasis termografi. peningkatan suhu memperbesar resistansi kontak, yang selanjutnya menimbulkan kenaikan ΔT dan

risiko *thermal runaway* [33]. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan prediktif harus mencakup pemantauan beban fasa, pengendalian harmonik, dan inspeksi termografi secara berkala pada koneksi terminal. Dengan demikian, intervensi dapat diarahkan pada peningkatan torsi koneksi, penyeimbangan ulang beban, atau penerapan filter harmonik, demi menjaga stabilitas dan umur operasional sistem distribusi [34].

3.2 Pengujian IR Thermograph pada Panel PUTR

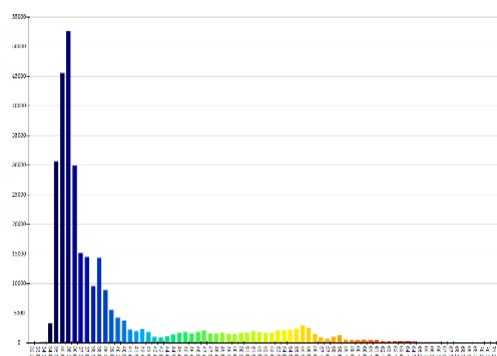
Analisis termografi terhadap panel PUTR (Gambar 4a-d) mengidentifikasi *hotspot* pada fasa T dengan suhu maksimum mencapai 71,8 °C, melebihi ambang batas koneksi ACB yang ditetapkan EPRI (60 °C). Kenaikan suhu ini dikategorikan sebagai Level 2 (ΔT 60–90 °C), memerlukan intervensi dalam waktu kurang dari satu bulan. Hotspot berukuran satu piksel (terlihat pada Gambar 4c-d) terlokasi tepat di koneksi terminal ACB. Penyebab utama anomali suhu pada panel PUTR adalah koneksi yang longgar dan akumulasi debu, yang meningkatkan resistansi kontak. Kondisi ini memicu lonjakan suhu pada terminal ACB dan mengarah pada overheating. Kenaikan resistansi lokal menyebabkan rugi-rugi daya ($P = I^2R$), yang berdampak pada kenaikan suhu (ΔT) secara berulang dan dapat memicu fenomena *thermal runaway* [35]. Fenomena ini umum dijumpai pada koneksi kelistrikan dengan tekanan kontak yang menurun atau konektor yang terkontaminasi, sebagaimana dijelaskan dalam studi eksperimental tentang saklar vakum dan sistem distribusi tegangan rendah [36],[37]. Implikasinya, isolasi termal bisa mengalami percepatan degradasi, meningkatkan risiko gangguan operasional atau bahkan kebakaran jika tidak segera dilakukan tindakan korektif. Oleh karena itu, diperlukan langkah pemeliharaan prediktif berupa pengetatan ulang koneksi terminal sesuai torsi pabrikan dan pembersihan area koneksi dari debu atau kontaminan yang dilakukan maksimal dalam 1 tahun sekali [38].



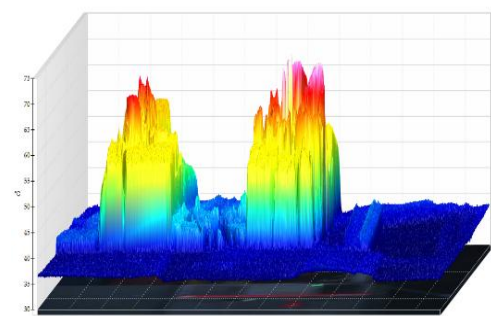
(a)



(b)



(c)

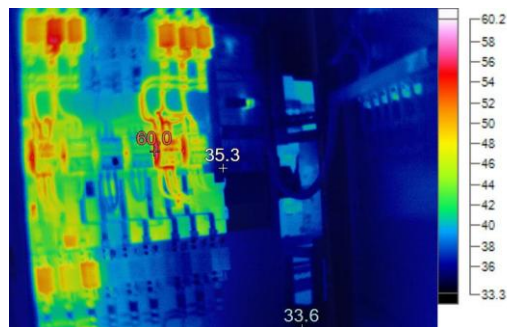


(d)

Gambar 4. Hasil Thermograph Pada Panel PUTR

3.3 Pengujian IR Thermograph pada Capacitor Bank

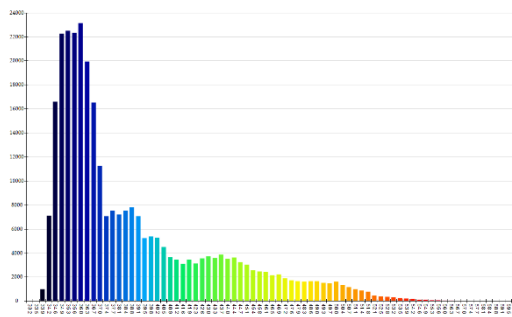
Pada Panel Capacitor Bank terjadi peningkatan suhu pada kontaktor 5 akan tetapi suhunya masih dalam batas normal yaitu mencapai 60.0°C data dilihat pada gambar (5a). hal ini dikarenakan bahwa kontaktor saat dalam kondisi sedang beroperasi menghasilkan suhu yang tinggi dengan tidak boleh melebihi 70.0°C (Menurut standar EPRI). Pada gambar histogram (5c) Hot Spotnya pada suhu 60.0°C mencapai 2 Pixel. Lalu dilihat pada gambar (5d) gambar 3D-IR menunjukkan bahwa terjadi peningkatan suhu pada kontaktor 5 dan kontaktor 6 dikarenakan kontaktor sedang beroperasi secara normal sebagai pengendali pada capacitor bank. Namun harus dilakukan peninjauan kembali dengan inspeksi <6 bulan untuk mengamati apakah kenaikan suhu pada kontaktor tersebut mengalami peningkatan atau tidak. Karena jika terus menerus suhu meningkat dapat memperpendek umur kontaktor.



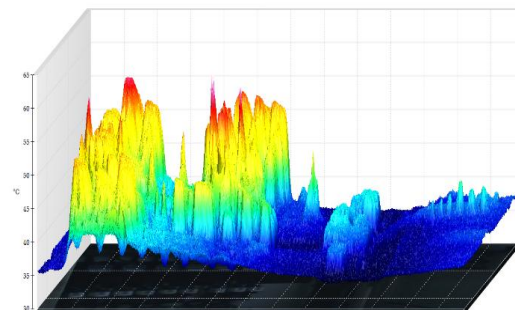
(a)



(b)



(c)

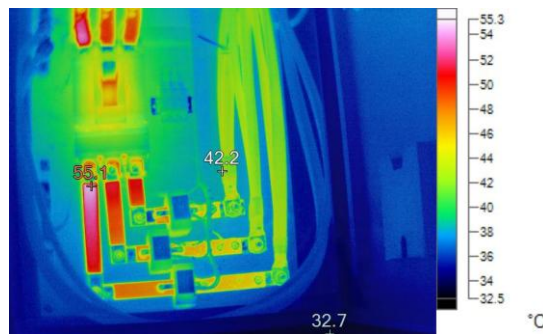


(d)

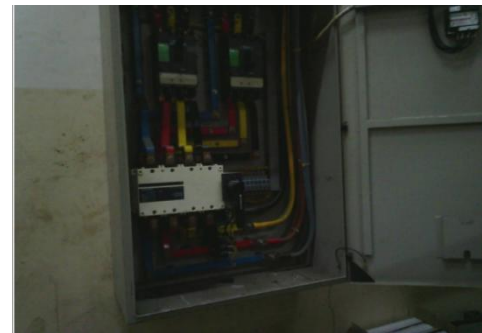
Gambar 5. Hasil Thermograph Pada Panel Capacitor Bank

3.4 Pengujian IR Thermograph pada Panel COS

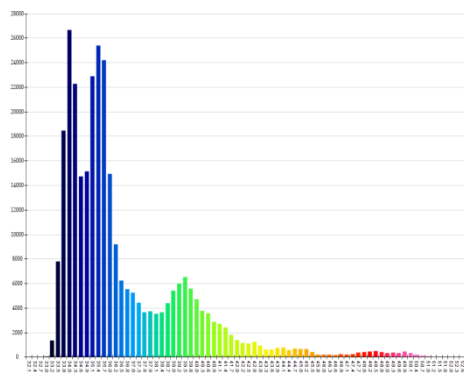
Pada panel COS di fasa R dimana titik terpanasnya mencapai 52.2°C gambar dapat dilihat pada gambar (6a). dimana hal ini masih dalam kategori normal dan tidak perlu adanya kegiatan untuk perbaikan pada koneksi circuit breaker (Lihat tabel 2) kenaikan suhu pun tergantung dari besarnya beban yang diterima dan tingkat kekencangan pada terminasi. Pada histogramnya dapat dilihat pada gambar (6c) Hot Spotnya pada suhu 52.2°C mencapai 8 Pixel dimana pixel tersebut berada pada koneksi R,S,T. lalu pada gambar (6d) dapat dilihat gambar 3D-IR menunjukkan bahwa fasa R, Fasa S, dan fasa T. Namun yang tertinggi pada fasa R namun dalam kenaikan suhu ini masih dalam batas standard yang sudah ditetapkan dimana masih dalam kategori aman untuk di operasikan.



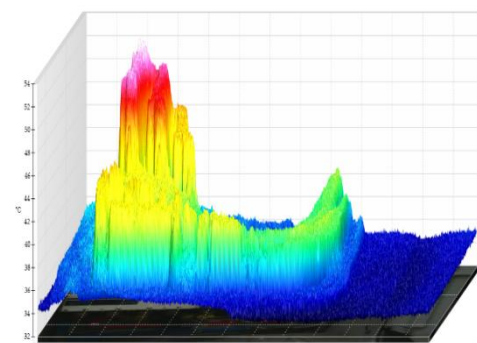
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 6. Hasil Thermograph Pada Panel COS

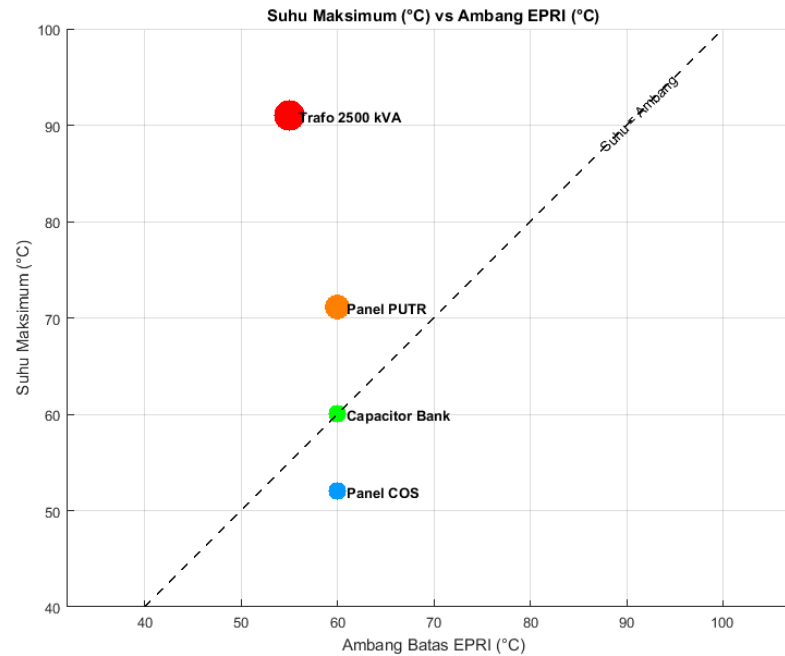
3.5 Analisis Hasil Uji

Hasil inspeksi termografi inframerah terhadap sistem distribusi tegangan rendah menunjukkan variasi suhu signifikan pada beberapa komponen utama (Lihat Tabel 3). Transformator 2500 kVA mencatat suhu maksimum sebesar 91.0 °C pada fasa R, dengan selisih suhu (ΔT) yang jauh melebihi ambang batas referensi 60.0 °C untuk koneksi terminal trafo menurut standar EPRI. Temuan ini mengindikasikan adanya ketidakseimbangan beban antar fasa yang menghasilkan aliran arus tidak merata, meningkatkan rugi daya I^2R dan memicu akumulasi panas pada koneksi fasa tersebut. Jika kondisi ini tidak ditangani melalui redistribusi beban atau peningkatan konektivitas mekanis terminal, potensi terjadinya degradasi insulasi dan risiko *thermal runaway* akan meningkat secara eksponensial.

Pada panel PUTR, anomali suhu terdeteksi di fasa T dengan nilai puncak mencapai 71.8 °C, melampaui ambang batas suhu maksimum untuk koneksi ACB sebesar 60 °C. Berdasarkan klasifikasi EPRI, suhu ini dikategorikan dalam Level 2 (ΔT 60–90 °C), yang menunjukkan kebutuhan akan intervensi perbaikan dalam kurun waktu kurang dari satu bulan. Penyebab utamanya adalah resistansi kontak tinggi akibat koneksi longgar dan kontaminasi debu, yang memperbesar disipasi panas lokal. Hal ini dapat mengakibatkan degradasi koneksi pada saklar utama secara signifikan meningkatkan suhu terminal akibat efek resistansi dinamis.

Sebaliknya, panel Capacitor Bank dan panel Change Over Switch (COS) menunjukkan suhu maksimum masing-masing sebesar 60.0 °C dan 52.2 °C, masih dalam batas referensi normal berdasarkan jenis komponennya. Tidak terdeteksi adanya hotspot signifikan atau deviasi suhu yang mencolok. Oleh karena itu, kedua panel diklasifikasikan sebagai kondisi aman (Level 4–5), dengan rekomendasi inspeksi ulang berkala dalam interval 6–12 bulan sebagai bagian dari strategi pemeliharaan prediktif.

Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa deteksi dini terhadap anomali termal memberikan dasar kuat bagi pelaksanaan strategi condition-based maintenance yang adaptif dan efisien. Dengan memfokuskan sumber daya pemeliharaan pada area dengan risiko tinggi, sistem distribusi dapat dijaga stabilitasnya, menghindari potensi downtime kritis, serta memperpanjang umur operasional peralatan (Lihat Gambar 7).



Gambar 7. Grafik Suhu Maksimum (°C) vs Suhu Ambang Batas (°C)

Tabel 3. Hasil Pengujian Panas Dengan IR Thermograph

No	Komponen	Suhu Maks (°C)	Ambang Referensi (EPRI) (°C)	Kategori EPRI	Estimasi Penyebab	Rekomendasi Teknis
1	Transformator 2500 kVA	91.0	55	Level 1 (>90°C)	Distribusi beban tidak seimbang, koneksi longgar	Perbaikan segera < 3 hari
2	Panel PUTR	71.08	60	Level 2 (60–90°C)	Koneksi terminal aus/longgar	Perbaikan < 1 bulan
3	Panel Capacitor Bank	60.0	60	Level 4 (40–60°C)	Operasi normal, pendinginan cukup	Pemantauan berkala 6–12 bulan
4	Panel COS	52.02	60	Level 5 (<60°C)	Beban ringan, koneksi stabil	Pemantauan berkala 6–12 bulan

4. Conclusion

Penelitian ini menegaskan bahwa inspeksi termografi inframerah merupakan teknik non-destruktif yang efektif untuk mengidentifikasi anomali termal tahap awal pada sistem distribusi listrik tegangan rendah. Hasil analisis mengungkap hotspot kritis pada transformator 2500 kVA (Fasa R, 91,0 °C) dan Air Circuit Breaker (ACB) di panel PUTR (Fasa T, 71,8 °C), yang keduanya melebihi ambang batas suhu yang direkomendasikan oleh Electric Power Research Institute (EPRI). Kondisi ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban fasa dan koneksi terminal yang longgar, yang secara signifikan meningkatkan resistansi kontak dan dapat menyebabkan degradasi isolasi, kegagalan peralatan, atau bahkan bahaya kebakaran.

Temuan ini menekankan pentingnya integrasi strategi pemeliharaan prediktif, termasuk pemantauan termografi berkala, penyeimbangan beban fasa, serta pengencangan kembali koneksi terminal sesuai torsi yang ditetapkan oleh pabrikan. Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk mengembangkan integrasi klasifikasi anomali termal berbasis kecerdasan buatan dan analisis tren jangka panjang guna meningkatkan keandalan sistem dan keselamatan operasional.

References

- [1] W. Ahmed, "Enhancing solar PV reliability with hybrid local features and infrared thermography," *Energy Reports*, vol. 13, no. September 2024, pp. 345–352, 2025, doi: 10.1016/j.egy.2024.12.014.
- [2] N. Pang *et al.*, "Flexible multifunctional MXene/SWCNTs composite films with excellent infrared stealth, electromagnetic interference shielding and electrical heating properties," *Carbon N. Y.*, vol. 238, p. 120303, 2025, doi: 10.1016/j.carbon.2025.120303.
- [3] J. Vicnesh *et al.*, "Application of Infrared Thermography and Artificial Intelligence in Healthcare: A Systematic Review of Over a Decade (2013–2024)," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 5949–5973, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3522251.
- [4] A. Sasithradevi *et al.*, "Advanced thermal vision techniques for enhanced fault diagnosis in electrical equipment: a review," *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 16, no. 5, pp. 1914–1932, 2025, doi: 10.1007/s13198-025-02782-9.
- [5] M. Rifaldi and S. Suhendar, "Efektivitas pemeliharaan suhu Sutet 500 kV dan SUTT 150 kV dengan metode thermography di PT. PLN (Persero) ULTG Cilegon," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 1, pp. 1051–1062, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i1.5817.
- [6] M. I. Malik, Y. M. Hamdani, and Yanti, "Optimization Design of Single-Tuned Passive Filter Using Particle Swarm Optimization Algorithm in Industry," *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 137–144, 2025, doi: 10.37058/jee.v6i2.14644.
- [7] W. Minkina and S. Gryś, "Thermographic Measurements in Electrical Power Engineering—Open Discussion on How to Interpret the Results," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 11, 2024, doi: 10.3390/app14114920.
- [8] I. A. Zulkifli and N. A. Agus Salim, "The Application of Infrared Thermography for Enhancing Maintenance in Public University," *J. Adv. Res. Exp. Fluid Mech. Heat Transf.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–10, 2024, doi: 10.37934/arefmht.16.1.110.
- [9] A. Setiawan, S. Suminto, and L. Solihin, "Analisis Thermal Instalasi Capacitor Bank 575 kVar Menggunakan Metode Infrared Thermography," *Epic J. Electr. Power Instrum. Control*, vol. 7, no. 1, pp. 98–107, 2024, doi: 10.32493/epic.v7i1.39660.
- [10] A. A. Yusof *et al.*, "SUAS-Based Infrared Thermography for Rapid Temperature Measurement in Building and Solar Photovoltaic Panels for Thermal Distribution Analysis," in *Intelligent Manufacturing and Mechatronics*, R. Hamidon, M. S. Bahari, J. M. Sah, and Z. Zainal Abidin, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 257–270. doi: 10.1007/978-981-97-0169-8_19.
- [11] J. Zhang, P. Li, and T. You, "Infrared Thermography-based Temperature Detection

- of Key Components in Switchgear,” in *2024 7th International Symposium on Autonomous Systems (ISAS)*, 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISAS61044.2024.10552500.
- [12] M. I. Malik, A. Adriansyah, and Y. Yanti, “Design a capacitor bank using load flow analysis to improve power factor correction in the food industry,” *J. Integr. Adv. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 143–152, 2024, doi: 10.51662/jiae.v4i2.159.
- [13] L. F. Dahmer dos Santos, J. L. dos Santos Canuto, R. C. Thom de Souza, and L. B. R. Aylon, “Thermographic image-based diagnosis of failures in electrical motors using deep transfer learning,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 126, p. 107106, 2023, doi: 10.1016/j.engappai.2023.107106.
- [14] S. P. Kala, R. Palanivel, M. P. Singh, G. Arulkumaran, and A. H. Shnain, “Infrared Thermography-Based Induction Motor Bearing Fault Detection Using Hybrid Method,” in *2024 Third International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE)*, 2024, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICDCECE60827.2024.10548847.
- [15] X. Zhu, S. Hu, Z. Bing, and D. Zhao, “Infrared Thermal Image Fault Detection of Electric Motor Based on Improved VGG16 Network Model,” in *2024 6th International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE)*, 2024, pp. 856–862. doi: 10.1109/CISCE62493.2024.10653406.
- [16] A. Setiawan and L. Solihin, “Analisis Hot Point Panel LVMDP Kapasitas 1250 kVA Dengan Metode Infrared Thermography,” *Epic J. Electr. Power Instrum. Control*, vol. 6, no. 1, p. 9, 2023, doi: 10.32493/epic.v6i1.28581.
- [17] L. Moga *et al.*, “Infrared thermography application for in-situ determination of the building envelope thermal performance,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2654, no. 1, p. 12122, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2654/1/012122.
- [18] M. I. Malik and E. Ihsanto, “Design and Simulation High Pass Filter Second Order and C-Type Filter for Reducing Harmonics as Power Quality Repair Effort in the Automotive Industry,” *J. Integr. Adv. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 23–36, 2023, doi: 10.51662/jiae.v3i1.79.
- [19] V. Aviña-Corral, J. de Jesus Rangel-Magdaleno, J. H. Barron-Zambrano, and S. Rosales-Núñez, “Review of fault detection techniques in power converters: Fault analysis and diagnostic methodologies,” *Measurement*, vol. 234, p. 114864, 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2024.114864.
- [20] S. Goyal and J. C. Rajapakse, “Self-supervised learning for hotspot detection and isolation from thermal images,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 237, p. 121566, 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.121566.
- [21] M. P. Dirgantara and I. Sunaryantiningsih, “Analisis pemeliharaan kinerja dengan metode termovisi pada jaringan SUTT 70kV GI Manisrejo,” *ELECTRA Electr. Eng. Artic.*, vol. 5, no. 2, 2024.
- [22] S. Akbar, T. Vaimann, B. Asad, A. Kallaste, and M. U. Sardar, “State-of-the-Art Techniques for Fault Diagnosis in Electrical Machines : Advancements and Future Directions,” *energies*, vol. 16, no. 17, pp. 1–44, 2023, doi: 10.3390/en16176345.
- [23] R. T. Kidangan, C. V. Krishnamurthy, and K. Balasubramaniam, “Detection of dis-bond between honeycomb and composite facesheet of an Inner Fixed Structure bond panel of a jet engine nacelle using infrared thermographic techniques,” *Quant. Infrared Thermogr. J.*, vol. 19, no. 1, pp. 12–26, 2022, doi: 10.1080/17686733.2020.1793284.
- [24] H. Bakır, “A comparative evaluation and real-time measurement of failures in solar power plants by thermal imaging in Turkey,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 42, 2023, doi: 10.1016/j.tsep.2023.101945.
- [25] Y. Wei, Y. Ye, H. He, Z. Su, L. Ding, and D. Zhang, “Multi-frequency Fused Lock-in Thermography in Detecting Defects at Different Depths,” *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 41, no. 3, p. 60, 2022, doi: 10.1007/s10921-022-00889-8.

- [26] Prasetyoa, G. A. Putra, and P. Raharjo, "Karakteristik Penyebaran Panas Menggunakan Metode Termografi pada Pompa Sentrifugal Tigkat Tunggal," *Pist. J. Tech. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 24–30, 2022, doi: doi.org/10.32493/pjte.v6i1.19546.
- [27] A. T. Ramadhani, A. S. Setiyoko, and M. D. Khairansyah, "Analisa Bahaya Listrik yang di Dukung Dengan Infrared Thermography Test Pada Panel SDP di Workshop 1 Perusahaan Fabrikasi Baja," *Semin. Nas. Terap. Ris. Inov. Ke-8*, vol. 8, no. 1, pp. 171–180, 2022.
- [28] G. K. Balakrishnan *et al.*, "A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations," *Energies*, vol. 15, no. 16, 2022, doi: 10.3390/en15166000.
- [29] P.Zayicek, "Infrared Thermography Guide," EPRI, Palo Alto, 2002.
- [30] F. I. Pasaribu and M. L. Fazawi, "Penentuan Hot Point dan Monitoring Peralatan Menggunakan Thermal Imagers Fluke Dengan Metode Thermovisi," *JESCE (Journal Electr. Syst. Control Eng. Electr. Syst. Control Eng.)*, vol. 4, no. 2, pp. 114–128, 2021, doi: 10.31289/jesce.v4i2.4814.
- [31] A. Kusmantoro and S. Sukamta, "Pemeriksaan Kondisi Peralatan Mekanikal dan Elektrikal Gedung Menggunakan Metode Infrared Thermography," *J. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 1, pp. 6–11, 2013.
- [32] R. Balabantaraya, A. K. Sahoo, P. K. Sahoo, C. M. Abir, and M. K. Panda, "A novel infrared thermography image analysis for transformer condition monitoring," *e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, vol. 10, p. 100758, 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100758.
- [33] A. Subramaniam, J. Saha, O. J. Xie, and S. K. Panda, "Marine Transformer Lifespan Estimation by Hotspot Temperature Measurements," in *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/PEDES49360.2020.9379501.
- [34] Z. I. M. Yassin, D. M. Said, N. Ahmad, N. N. Nik, A. Malik, and H. Abdullah, "Impact of unbalanced harmonic loads towards winding temperature rise using FEM modeling," *Indones. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 8, no. 2, pp. 409–418, 2020, doi: 10.11591/ijeei.v8i2.1283.
- [35] N. Hadziefendic, J. Trifunovic, I. Zarev, N. Kostic, and M. Davidovic, "The importance of preventive thermographic inspections within periodic verifications of the quality of low-voltage electrical installations," *Int. Sci. J. Mach. Technol. Mater.*, vol. 82, no. 2, pp. 78–82, 2020.
- [36] K. Nowak, K. Nowak, and S. Rabczak, "The Analysis of the Thermal Processes Occurring in the Contacts of Vacuum Switches During the Conduction of Short-Circuit Currents," *Energies*, vol. 17, no. 21, 2024, doi: 10.3390/en17215408.
- [37] J. Khan and M. J. Nene, "Real Time Machinery Health Detection Via Thermal Imaging," in *2025 10th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*, 2025, pp. 556–561. doi: 10.1109/ICSC64553.2025.10968769.
- [38] P. J. Zarco-periñ, F. J. Zarco-soto, I. M. Zarco-soto, and L. Mart, "applied sciences Conducting Thermographic Inspections in Electrical Substations : A Survey," *Appl. Sci.*, vol. 16, no. 24, 2022, doi: 10.3390/app122010381.