

ANALISIS EFISIENSI PENGOPENAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI PT POWER SERVICES

M Aldi Firmansyah¹, Aripin², Linda Faridah³

Universitas Siliwangi^{1,2,3}

Email: 1227002016@student.unsil.ac.id¹, aripin@student.unsi.ac.id², lindafaridah@student.unsil.ac.id³

Informasi	Abstract
Volume : 3 Nomor : 8 Bulan : Agustus Tahun : 2026 E-ISSN : 3062-9624	<i>This Distribution transformers are essential devices in electrical networks, transferring power from transmission lines to consumers at usable voltage levels. Their reliability is closely linked to the condition of the insulation system, primarily composed of mineral oil and cellulose paper, which are highly sensitive to moisture. To reduce water absorption, an oven drying process is applied, improving both insulation resistance and oil breakdown voltage. This study investigates the efficiency of the oven drying process at PT Hariff Power Services using a case study approach. Data were collected through direct observation, insulation resistance testing, oil breakdown voltage measurement, and interviews with field technicians. Findings reveal that the drying process took between 7 and 14 days, significantly longer than the 1–2 days recommended in literature at 100–120 °C. The main limitation is the absence of an automatic temperature control system in the vacuum oven, leading to inefficiency. Nevertheless, post-drying measurements indicate improved insulation quality. It is therefore recommended to upgrade the oven with temperature control and to optimize storage procedures to achieve greater efficiency and extend the lifespan of distribution transformers.</i> Keyword: Distribution Transformer, Insulation Drying, Vacuum Oven, Insulation Resistance, Breakdown Voltage

Abstrak

Transformator distribusi berperan penting dalam sistem tenaga listrik karena menyalurkan daya dari jaringan tegangan tinggi ke konsumen dengan level tegangan yang sesuai. Keandalan transformator banyak dipengaruhi oleh kondisi isolasi berbahan minyak dan kertas selulosa yang mudah menyerap kelembapan. Untuk menekan kadar air pada isolasi digunakan proses pengopenan (oven drying) yang dapat meningkatkan tahanan isolasi serta kemampuan minyak menahan tegangan tembus. Penelitian ini mengevaluasi efisiensi pengopenan yang diterapkan di PT Hariff Power Services melalui pendekatan studi kasus. Data diperoleh dari observasi langsung, pengujian tahanan isolasi, pengukuran tegangan tembus minyak, serta wawancara dengan teknisi lapangan. Hasil analisis menunjukkan bahwa proses pengopenan di lapangan berlangsung 7–14 hari, jauh lebih lama dari standar literatur yang merekomendasikan 1–2 hari pada suhu 100–120 °C. Faktor utama yang menyebabkan inefisiensi adalah oven vakum tanpa sistem kendali suhu otomatis. Walaupun demikian, pengukuran setelah proses menunjukkan peningkatan kualitas isolasi. Penelitian ini menyarankan modernisasi oven dengan kontrol suhu serta perbaikan prosedur penyimpanan untuk meningkatkan efisiensi dan memperpanjang masa pakai transformator distribusi.

Kata Kunci: Transformator Distribusi, Pengeringan Isolasi, Oven Vakum, Tahanan Isolasi, Tegangan Tembus

A. PENDAHULUAN

Transformator distribusi merupakan komponen kritis dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi dari jaringan transmisi ke konsumen pada tingkat tegangan yang sesuai. Keandalan peralatan ini sangat dipengaruhi oleh kondisi sistem isolasi yang umumnya terdiri atas minyak mineral dan kertas selulosa. Kelembapan yang terperangkap dalam sistem isolasi dapat menurunkan tegangan tembus (*breakdown voltage*), mempercepat degradasi termal, serta meningkatkan risiko kegagalan isolasi [1], [2]. Oleh karena itu, perawatan melalui proses pengeringan atau pengopenan menjadi langkah penting untuk menurunkan kadar air dalam isolasi dan mempertahankan sifat dielektriknya [3], [4]. Tantangan utama dalam proses ini adalah pengaturan suhu dan durasi pengopenan yang optimal agar kelembapan dapat diminimalkan tanpa menyebabkan kerusakan pada struktur selulosa [5].

Kerusakan transformator distribusi akibat penurunan kualitas isolasi tidak hanya berdampak pada meningkatnya biaya perbaikan, tetapi juga dapat menimbulkan gangguan kontinuitas suplai energi listrik. Data operasional menunjukkan bahwa gangguan pada peralatan distribusi, termasuk transformator, berkontribusi signifikan terhadap penurunan indeks keandalan sistem [6]. Dalam konteks tersebut, kajian mengenai efektivitas proses pengopenan menjadi relevan untuk memastikan transformator dapat beroperasi secara andal dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh proses pengopenan terhadap kadar kelembapan dan kualitas dielektrik isolasi transformator distribusi, serta memberikan rekomendasi prosedur perawatan yang lebih efektif [7].

Konsep dasar perawatan transformator didasarkan pada mekanisme degradasi minyak dan kertas selulosa yang dipengaruhi oleh faktor kelembapan, suhu, dan tegangan operasi. Kadar air yang tinggi terbukti menurunkan tegangan tembus minyak serta mempercepat proses penuaan dielektrik [8]. Proses pengeringan isolasi bertujuan untuk memulihkan sifat dielektrik dengan menurunkan kandungan air hingga batas aman [9]. Seiring perkembangan teknologi, metode diagnostik modern seperti *frequency domain spectroscopy* (FDS) telah dikembangkan untuk mendeteksi distribusi kelembapan secara lebih akurat dalam sistem isolasi transformator [8]. Pemahaman hubungan antara kelembapan, suhu pengopenan, dan karakteristik dielektrik menjadi dasar dalam penentuan strategi perawatan transformator yang tepat.

Penelitian terdahulu menegaskan pentingnya metode pengeringan dalam perawatan transformator. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa pengopenan dengan pengaturan suhu

tertentu mampu menurunkan kadar kelembapan secara signifikan [3], [10]. Tazhibayev *et al.* membandingkan berbagai metode pengeringan isolasi padat dan menekankan perlunya pemilihan metode yang sesuai dengan kondisi transformator [11]. Selain itu, pendekatan diagnostik berbasis kecerdasan buatan juga telah dikembangkan untuk mendeteksi kelembapan melalui analisis spektrum frekuensi [12]. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengujian laboratorium dengan fasilitas standar dan sistem kontrol suhu otomatis. Kajian mengenai implementasi proses pengopenan transformator distribusi di lingkungan industri Indonesia, khususnya pada fasilitas dengan keterbatasan sistem kendali suhu, masih relatif terbatas.

Research Gap and Novelty

Meskipun berbagai penelitian telah membahas metode pengeringan isolasi transformator, sebagian besar studi dilakukan dalam kondisi laboratorium dengan peralatan modern yang dilengkapi sistem kendali suhu otomatis. Pendekatan tersebut belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi operasional di industri perbaikan transformator di negara berkembang, termasuk Indonesia, yang sering menggunakan fasilitas oven konvensional tanpa sistem pengendalian suhu otomatis. Kondisi ini berpotensi menyebabkan variasi suhu yang tidak stabil, waktu pengeringan yang lebih lama, serta konsumsi energi yang kurang efisien.

Selain itu, penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada evaluasi teknis kualitas isolasi setelah proses pengeringan, tanpa melakukan analisis kuantitatif terhadap efisiensi operasional, seperti konsumsi energi, durasi proses pengeringan, dan perbandingan terhadap standar internasional seperti IEC. Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) dalam hal evaluasi kinerja proses pengopenan transformator distribusi secara komprehensif yang mencakup aspek teknis dan operasional di lingkungan industri nyata.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini menawarkan kebaruan (*novelty*) melalui pendekatan studi kasus pada proses pengopenan transformator distribusi di fasilitas industri perbaikan transformator di Indonesia yang belum dilengkapi sistem kendali suhu otomatis. Penelitian ini tidak hanya mengevaluasi kualitas isolasi setelah pengopenan, tetapi juga menganalisis efisiensi operasional proses pengeringan berdasarkan parameter waktu, konsumsi energi, dan peningkatan karakteristik dielektrik isolasi.

Kontribusi ilmiah Penelitian

Penelitian ini memberikan beberapa kontribusi ilmiah dan praktis yang terstruktur sebagai berikut:

1. Kontribusi Metodologis

Penelitian ini mengembangkan pendekatan evaluasi efisiensi proses pengopenan transformator distribusi dengan mengintegrasikan parameter teknis dan operasional, meliputi:

1. Durasi proses pengeringan (jam)
2. Konsumsi energi oven (kWh)
3. Penurunan kadar kelembapan isolasi (%)
4. Peningkatan tegangan tembus minyak (kV)

Selain itu, penelitian ini mengusulkan model evaluasi efisiensi pengopenan berbasis indeks kinerja operasional (*operational efficiency index*) yang mempertimbangkan hubungan antara waktu, energi, dan kualitas isolasi transformator.

2. Kontribusi Praktis bagi Industri

Penelitian ini memberikan rekomendasi teknis yang dapat langsung diterapkan pada industri perbaikan transformator distribusi, khususnya pada fasilitas dengan keterbatasan sistem kendali suhu, antara lain:

1. Penentuan durasi pengopenan optimal berdasarkan kondisi kelembapan isolasi
2. Estimasi konsumsi energi oven selama proses pengeringan
3. Strategi peningkatan efisiensi operasional melalui penerapan sistem kontrol suhu otomatis
4. Evaluasi performa proses pengopenan berdasarkan indikator kuantitatif

Kontribusi ini diharapkan dapat membantu industri meningkatkan keandalan transformator serta mengurangi biaya operasional perawatan.

3. Kontribusi terhadap Peningkatan Efisiensi Operasional

Penelitian ini melakukan analisis kuantitatif terhadap efisiensi proses pengopenan transformator distribusi dengan mempertimbangkan beberapa parameter penting, antara lain:

1. Persentase deviasi waktu pengeringan dibandingkan standar IEC
2. Estimasi pemborosan energi akibat tidak adanya kontrol suhu otomatis
3. Perbandingan konsumsi energi sebelum dan sesudah pengopenan
4. Proyeksi penghematan energi dan waktu jika sistem kontrol suhu otomatis diterapkan

5. Analisis statistik sebelum dan sesudah proses pengopenan terhadap parameter kualitas isolasi

Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan penelitian tersebut melalui studi kasus proses pengopenan transformator distribusi pada fasilitas industri perbaikan transformator di Indonesia dengan konfigurasi oven tanpa sistem kendali suhu otomatis. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada pengujian laboratorium, penelitian ini menekankan analisis efisiensi operasional proses pengeringan dalam kondisi nyata di lapangan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode evaluasi efisiensi pengopenan transformator serta kontribusi praktis dalam meningkatkan kualitas isolasi dan memperpanjang umur pakai transformator distribusi.

B. METODE PENELITIAN

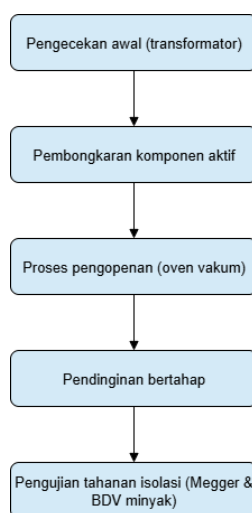
Waktu dan Tempat

Penelitian dan pengumpulan data dilakukan pada, sebagai berikut :

- Waktu Penelitian : 16 Juni 2025 sampai 08 Agustus 2025
- Tempat Penelitian : JL.A.H.Nasution,No.08,CipadungKulon,Kecamatan Ujung Berung, Kota Bandung, Jawa Barat 40614.

Prosedur Penelitian

proses pengopenan merupakan tahapan ketiga dalam siklus perbaikan transformator, Setelah pengecekan awal dan pembongkaran komponen. Prosedur yang dilakukan meliputi ;



Gambar 1. Alur Proses Pengopenan Transformator Distribusi

- a. Pembongkaran dan pemisahan bagian aktif (inti besi dan lilitan)
- b. Bagian aktif dimasukkan ke dalam oven vakum milik PT Hariff yang belum dilengkapi dengan sistem kontrol suhu otomatis.



Gambar 2. Tampilan dalam dan luar oven vakum transformator di PT Hariff Power Services

- c. Pengeringan dilakukan pada variasi yang bervariasi, dengan waktu aktual di lapangan berkisar 7 hingga 14 hari sampai nilai meggernya lebih dari 200 M Ω , jauh lebih lama dibanding standar literatur yang merekomendasikan 1–2 hari.
- d. Setelah proses pengopenan dilakukan pendinginan bertahap untuk menghindari kerusakan akibat perubahan suhu yang cepat.
- e. Dilakukan pengujian tahanan isolasi menggunakan Megger minimal harus memiliki nilai 2000 M Ω



Gambar 3. Pengujian Tahanan Isolasi Menggunakan Megger Di PT Hariff Power Services

Metode Pengambilan Data

Data penelitian dikumpulkan melalui beberapa metode untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai proses pengopenan transformator distribusi. Metode yang digunakan meliputi observasi langsung selama pelaksanaan proses pengopenan, pencatatan durasi pengeringan, serta pengukuran nilai tahanan isolasi menggunakan alat ukur *megger*. Selain itu, wawancara dilakukan dengan teknisi lapangan untuk memperoleh informasi terkait prosedur operasional, kondisi peralatan, serta kendala yang dihadapi selama proses pengopenan.

Sebagai data pendukung, dilakukan pula dokumentasi terhadap kondisi penyimpanan transformator sebelum proses pengopenan, yang mencakup lingkungan penyimpanan dan perlakuan awal terhadap transformator. Seluruh data yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis untuk mengevaluasi efektivitas dan efisiensi proses pengopenan transformator distribusi.

Analisis Data

Data hasil pengujian dan observasi dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan kondisi aktual di lapangan terhadap standar internasional serta temuan penelitian terdahulu. Rekomendasi IEC 60076-16 menyebutkan bahwa suhu pengeringan isolasi transformator berada pada kisaran 100–120 °C dengan durasi 1–2 hari. Rekomendasi tersebut sejalan dengan hasil penelitian Asem dan Howe yang menunjukkan bahwa pengeringan pada rentang suhu tersebut efektif menurunkan kadar kelembapan tanpa mempercepat degradasi selulosa [15]. Studi eksperimental lain juga menegaskan bahwa durasi pengeringan yang terlalu lama tidak selalu meningkatkan kualitas isolasi secara signifikan [16].

Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan bahwa proses pengopenan transformator distribusi berlangsung selama 7–14 hari, atau hingga nilai tahanan isolasi yang diukur menggunakan *megger* mencapai lebih dari 2000 MΩ. Durasi ini jauh lebih lama dibandingkan rekomendasi literatur dan disebabkan oleh penggunaan oven vakum yang belum dilengkapi sistem pengendalian suhu otomatis. Kondisi serupa dilaporkan oleh Trotsenko *et al.* yang menyatakan bahwa pengeringan tanpa kendali suhu yang presisi dapat memperpanjang waktu proses dan meningkatkan ketidakpastian kualitas isolasi [17].

Kondisi tersebut menimbulkan dua konsekuensi utama. Pertama, terdapat risiko degradasi sistem isolasi akibat suhu pengeringan yang tidak terpantau secara optimal. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa paparan suhu tinggi dalam durasi panjang dapat mempercepat penuaan kertas selulosa dan menurunkan kekuatan mekanik serta sifat dielektriknya [20], [18]. Kedua, dari sisi operasional, proses pengopenan menjadi tidak efisien karena memperpanjang waktu perbaikan dan menunda pengembalian transformator ke sistem.

Selain aspek waktu, penggunaan oven tanpa sistem kendali suhu otomatis juga berdampak pada konsumsi energi. Sistem oven yang digunakan mengoperasikan blower dan elemen pemanas (*heater*) secara kontinu selama 24 jam. Kondisi ini berpotensi menyebabkan pemborosan energi listrik. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pengeringan dengan sistem kendali suhu dan siklus pemanasan terkontrol dapat menurunkan konsumsi energi sekaligus menjaga kualitas isolasi [13], [16]. Dengan sistem kendali otomatis, elemen pemanas hanya akan aktif saat suhu berada di bawah batas yang ditentukan, sementara blower dapat dioperasikan sesuai kebutuhan siklus pengeringan.

Berdasarkan hasil analisis dan perbandingan dengan penelitian sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa penggunaan oven tanpa sistem pengendalian suhu otomatis menyebabkan

proses pengeringan menjadi lebih lama, kurang efisien, dan boros energi. Implementasi sistem kendali suhu otomatis direkomendasikan untuk mempercepat proses pengopenan, menurunkan biaya operasional, serta menjaga kualitas isolasi transformator distribusi agar tetap memenuhi standar internasional dan temuan ilmiah terkini.

Catatan Tambahan

Berdasarkan hasil pengamatan dan analisis selama proses pengopenan transformator distribusi, terdapat beberapa faktor utama yang mempengaruhi efektivitas pengeringan isolasi.

1. oven vakum yang digunakan di PT Hariff Power Services belum memenuhi standar pengeringan transformator karena tidak dilengkapi dengan sistem pengendalian suhu otomatis. Kondisi ini menyebabkan suhu internal oven selama proses pengopenan tidak dapat dipantau dan dikendalikan secara presisi. Beberapa penelitian menyatakan bahwa pengeringan tanpa kendali suhu yang akurat berpotensi memperpanjang durasi proses serta meningkatkan risiko degradasi isolasi selulosa [18], [5].
2. transformator yang tidak mengalami kerusakan serius disimpan di ruang terbuka sebelum dilakukan pengujian awal tahanan isolasi, dengan nilai *megger* awal tercatat di atas 500 MΩ. Lingkungan penyimpanan terbuka berpotensi meningkatkan penyerapan kelembapan oleh sistem isolasi, terutama pada kondisi kelembapan lingkungan yang tinggi, sebagaimana dilaporkan dalam beberapa studi terkait migrasi kelembapan pada isolasi minyak-kertas [2], [8].
3. durasi proses pengopenan yang berlangsung selama 1–2 minggu jauh melebihi rekomendasi literatur yang umumnya menyarankan waktu pengeringan 1–2 hari pada suhu terkendali. Durasi yang terlalu lama ini tidak hanya menimbulkan inefisiensi dari sisi waktu dan biaya operasional, tetapi juga berpotensi meningkatkan risiko teknis akibat paparan panas dalam jangka panjang [19].
4. beberapa penelitian menyebutkan bahwa paparan suhu pengeringan di atas 130 °C dapat mempercepat degradasi kertas selulosa, yang ditandai dengan penurunan derajat polimerisasi hingga lebih dari 50%, sehingga berdampak langsung pada penurunan umur pakai transformator [6], [20]. Oleh karena itu, pengendalian suhu selama proses pengopenan menjadi faktor krusial untuk menjaga kualitas dan keandalan sistem isolasi.

Berdasarkan catatan tambahan tersebut, dapat ditegaskan bahwa optimalisasi proses pengopenan memerlukan perbaikan fasilitas pengeringan, khususnya melalui penerapan sistem kendali suhu otomatis dan pengelolaan penyimpanan transformator yang lebih baik, guna meningkatkan efisiensi proses sekaligus menjaga kualitas isolasi transformator distribusi.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

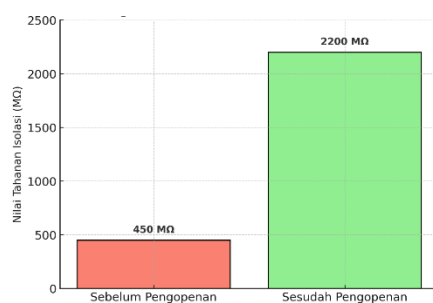
Berdasarkan hasil observasi selama pelaksanaan kerja praktik di PT Hariff Power Services, proses pengopenan transformator distribusi merupakan tahapan yang paling memakan waktu dalam siklus perbaikan, dengan durasi berkisar antara 7 hingga 14 hari. Durasi ini jauh lebih lama dibandingkan dengan standar literatur yang merekomendasikan waktu pengeringan 1–2 hari pada suhu ideal 100–120 °C dalam kondisi vakum, sebagaimana tercantum dalam IEC 60076-16 serta dilaporkan oleh Brahami *et al.*

Keterbatasan utama yang ditemukan di lapangan adalah penggunaan oven vakum yang belum dilengkapi dengan sistem pengendalian suhu otomatis, sehingga suhu internal selama proses pengopenan tidak dapat dipantau maupun dikendalikan secara presisi. Kondisi ini berpotensi menimbulkan risiko paparan suhu berlebihan (>130 °C), yang menurut beberapa penelitian dapat mempercepat degradasi termal pada isolasi kertas selulosa. Degradasi tersebut ditandai dengan penurunan derajat polimerisasi (*degree of polymerization*, DP) yang signifikan dan berdampak langsung pada penurunan umur pakai isolasi transformator [21]



Gambar 4. Kondisi penyimpanan transformator di ruang terbuka di PT Hariff Power Services

Selain itu, penyimpanan transformator yang belum mengalami kerusakan berat dilakukan di ruang terbuka sebelum proses pengopenan. Kondisi penyimpanan ini berpotensi meningkatkan penyerapan kelembapan dari lingkungan sekitar, sehingga nilai tahanan isolasi awal yang diukur menggunakan *megger* sering berada di bawah 500 M Ω , yang mengindikasikan kualitas isolasi yang kurang baik.



Gambar 5. Perbandingan Nilai tahanan Isolasi Sebelum dan Sesudah Pengopenan

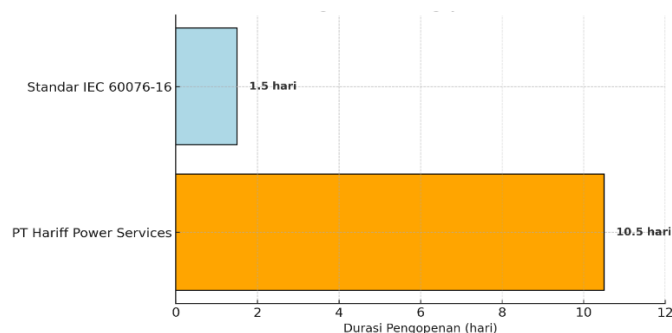
Setelah proses pengopenan selesai, nilai tahanan isolasi meningkat hingga di atas 2000 M Ω , yang menunjukkan terjadinya penurunan kadar air dalam sistem isolasi minyak–kertas. Peningkatan nilai tahanan isolasi sebelum dan sesudah pengopenan. Meskipun demikian, durasi pengeringan yang relatif lama (7–14 hari) mengindikasikan adanya ketidakefisienan proses pengopenan yang diterapkan di lapangan.

Untuk memperjelas perbedaan antara fasilitas pengopenan yang digunakan di PT Hariff Power Services dan standar industri, selanjutnya disajikan tabel perbandingan fasilitas pengopenan, yang mencakup aspek sistem kendali suhu, durasi pengeringan, serta efisiensi operasional.

TABEL I PERBANDINGAN KONDISI PT HARIFF DENGAN INDUSTRI STANDAR

NO	FASILITAS PENGOPENAN	PT HARIFF POWER SERVICES	PABRIK INDUSTRI STANDAR
1	Oven Vakum	Ada, tanpa Kontrol suhu otomatis	Ada, dengan sistem Kontrol suhu otomatis
2	Sistem kontrol suhu	Tidak tersedia	Tersedia (terintegrasi PLC atau digital controller)
3	Pompa Vakum	Blower Keong	Umumnya tersedia (Rotary Vane atau Roots Vacuum)
4	Pemanas (Heater)	Ada	Ada (elektrik, Uap, atau Radiant Heater)
5	Sensor suhu dan kelembapan	Tidak ada pengukuran real-time	Tersedia (thermocouple, dew point sensor)
6	Monitoring dan perekapan data	Tidak tersedia	Ada (SCADA atau data logger)
7	Sistem Pemisah Uap (Condensation Trap)	Tidak disebutkan	Ada (untuk transformator distribusi)
8	Durasi Pengeringan	7–14 hari	24–48 jam (untuk transformator distribusi)
9	Metode Pendinginan	Manual, hanya dibiarkan di ruang terbuka	Bertahap, terkontrol (cooling stage)
10	Penyimpanan Sebelum Oven	Disimpan di ruang terbuka	Tertutup, Tangki minyak/ruangan nitrogen

Berdasarkan Tabel 1, dapat dilihat bahwa proses pengopenan di PT Hariff Power Services telah berjalan secara fungsional, namun belum memenuhi standar efisiensi dan kualitas industri. Ketidadaan sistem kontrol suhu otomatis menyebabkan suhu pengeringan tidak dapat dipantau secara *real-time*, sehingga sulit memastikan proses berlangsung dalam rentang optimal 100–120 °C. Ketidakterkendalian suhu ini juga meningkatkan risiko terjadinya *overheating* (>130 °C), yang menurut Brahami *et al.* (2025) dapat mempercepat degradasi termal kertas selulosa dan menurunkan nilai *degree of polymerization* (DP), sehingga memperpendek umur pakai isolasi transformator.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Nilai Megger Sebelum dan Sesudah Pengopenan

Waktu pengeringan yang relatif panjang (1–2 minggu) juga menunjukkan adanya inefisiensi proses dibandingkan dengan standar industri yang umumnya hanya memerlukan 24–48 jam untuk transformator distribusi. Selain itu, penyimpanan transformator di ruang terbuka sebelum pengopenan berpotensi meningkatkan kadar kelembapan awal karena sifat higroskopis kertas selulosa. Kondisi ini menyebabkan nilai awal tahanan isolasi (*megger*) menjadi rendah (di bawah 500 M Ω) dan baru meningkat setelah proses pengopenan dilakukan.

Dengan penerapan sistem oven vakum yang dilengkapi kontrol suhu otomatis, sensor *real-time*, serta prosedur penyimpanan tertutup, proses pengopenan berpotensi menjadi lebih cepat, lebih hemat energi, dan lebih konsisten dalam menjaga kualitas isolasi. Analisis ini menunjukkan bahwa meskipun proses pengopenan di PT Hariff Power Services secara fungsional efektif dalam meningkatkan kualitas isolasi, namun secara operasional belum sepenuhnya memenuhi standar efisiensi waktu dan pengendalian proses. Oleh karena itu, perbaikan fasilitas oven vakum dan prosedur penyimpanan transformator sangat diperlukan untuk meningkatkan efektivitas proses serta memperpanjang umur pakai transformator distribusi.

D. KESIMPULAN

Penelitian Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa proses pengopenan transformator distribusi di PT Hariff Power Services secara nyata mampu meningkatkan kualitas sistem isolasi. Peningkatan tersebut ditunjukkan oleh naiknya nilai tahanan isolasi setelah proses pengopenan, meskipun kondisi awal isolasi relatif kurang baik akibat penyimpanan transformator di ruang terbuka sebelum dimasukkan ke dalam oven pengeringan.

Namun demikian, dari sisi efisiensi proses, praktik pengopenan yang diterapkan di lapangan masih belum sesuai dengan standar teknis yang direkomendasikan. Durasi pengeringan yang mencapai 7–14 hari jauh lebih lama dibandingkan dengan standar literatur

dan ketentuan internasional IEC 60076-16, yang merekomendasikan waktu pengeringan 1–2 hari pada rentang suhu 100–120 °C. Perbedaan ini terutama disebabkan oleh keterbatasan fasilitas oven vakum yang belum dilengkapi dengan sistem pengendalian suhu otomatis, sehingga proses pengeringan tidak dapat dipantau dan dikendalikan secara presisi.

Berdasarkan temuan tersebut, diperlukan upaya peningkatan fasilitas dan prosedur perawatan transformator. Modernisasi oven pengeringan melalui penerapan sistem kontrol suhu otomatis dan pemantauan kelembapan secara *real-time*, serta penerapan prosedur penyimpanan transformator secara tertutup sebelum proses pengopenan, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi perawatan, menekan biaya operasional, dan memperpanjang umur pakai transformator distribusi di lingkungan industri.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa rekomendasi yang dapat diajukan adalah sebagai berikut.

1. Modernisasi fasilitas pengopenan

PT Hariff Power Services disarankan untuk meningkatkan fasilitas oven vakum dengan menambahkan sistem pengendalian suhu otomatis serta sensor kelembapan. Penerapan sistem ini penting untuk memastikan proses pengeringan berlangsung pada rentang suhu optimal **100–120 °C** dan untuk meminimalkan risiko degradasi sistem isolasi akibat paparan suhu berlebih.

2. Perbaikan prosedur penyimpanan

Transformator yang menunggu proses perbaikan sebaiknya disimpan dalam kondisi tertutup atau terendam minyak isolasi, bukan di ruang terbuka. Prosedur penyimpanan tersebut dapat mengurangi penyerapan kelembapan oleh sistem isolasi sebelum proses pengopenan, sehingga waktu pengeringan dapat dipersingkat.

3. Monitoring dan evaluasi rutin

Disarankan untuk menerapkan sistem pemantauan dan pencatatan data suhu, kelembapan, serta durasi pengopenan secara *real-time*. Data yang diperoleh dapat dimanfaatkan untuk evaluasi berkala dan perbaikan prosedur operasional, sehingga proses pengopenan dapat berlangsung lebih efisien dan terkontrol.

4. Penelitian lanjutan

Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada pengaruh variasi suhu pengeringan, tekanan vakum, serta jenis material isolasi terhadap kualitas hasil pengopenan. Kajian tersebut diharapkan dapat memperkaya data empiris dan mendukung pengembangan

standar operasional prosedur (SOP) pengopenan transformator distribusi yang lebih komprehensif di Indonesia.

E. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Brahami, A. Betie, F. Meghnefi, I. Fofana, and Z. Yeo, "Development of a comprehensive model for drying optimization and moisture management in power transformer manufacturing," *Energies*, vol. 18, no. 4, 2025, doi: 10.3390/en18040789.
- [2] Z. Liang et al., "Innovative transformer life assessment considering moisture and oil circulation," *Energies*, vol. 17, no. 2, 2024, doi: 10.3390/en17020429.
- [3] S. Tenbohlen, M. Koch, and T. Prevost, "Moisture equilibrium in power transformer insulation systems," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 36, no. 4, pp. 20–31, 2020, doi: 10.1109/MEI.2020.9125312.
- [4] A. Tazhibayev, Y. Amitov, N. Arynov, N. Shingissov, and A. Kural, "Experimental investigation and evaluation of drying methods for solid insulation in transformers: A comparative analysis," *Results in Engineering*, vol. 23, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102470.
- [5] Q. Chen, W. Zhao, L. Chen, and S. Hu, "Analysis of transformer moisture treatment based on DIRANA dielectric spectrum analyzer," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2917, no. 1, 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2917/1/012006.
- [6] M. Koch and S. Tenbohlen, "Diagnostics of moisture in transformer solid insulation using dielectric response methods," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 5, pp. 1658–1665, 2020, doi: 10.1109/TDEI.2020.008987.
- [7] R. A. Kusuma, J. A. Prayogo, and C. Mufit, "Analisis perawatan berkala trafo distribusi 800 kVA pada rumah sakit X kota Tangerang," *Elektrika*, vol. 15, no. 1, p. 45, 2023, doi: 10.26623/elektrika.v15i1.6478.
- [8] P. G. Arinsya, Z. Anthony, and A. Anugrah, "Analisa tahanan isolasi pada transformator daya 150/30 kV gardu induk Padang Luar PT PLN (Persero) Bukittinggi," *Indonesian Journal of Engineering and Technology*, vol. 6, no. 1, 2023.
- [9] Y. Zhang, D. Li, H. Yan, and J. Zhao, "Estimation for the moisture content of oil-immersed insulating pressboard using dielectric characteristic parameter," in *Proc. IEEE*, 2019, doi: 10.2991/eee-19.2019.7.
- [10] A. E. Abu-Siada and S. Islam, "A review of transformer insulation condition monitoring techniques," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 36, no. 3, pp. 12–25, 2020, doi: 10.1109/MEI.2020.9087081.

- [11] N. Borovnik, S. Mudrinić, and N. Ferdelji, "Dual-scale modelling of the vacuum drying process for transformer cellulose-based insulation," *Processes*, vol. 13, no. 9, 2025, doi: 10.3390/pr13092676.
- [12] M. Duval and A. dePablo, "Interpretation of transformer oil analysis using new moisture equilibrium curves," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 36, no. 5, pp. 7–15, 2020, doi: 10.1109/MEI.2020.9192087.
- [13] Q. Dai et al., "The influence of aging time and moisture content on the tensile strength of transformer bushing insulating paper," *AIP Advances*, vol. 12, no. 11, 2022, doi: 10.1063/5.0121821.
- [14] P. Przybylek, H. Moranda, H. Moscicka-Grzesiak, and M. Cybulski, "Laboratory model studies on the drying efficiency of transformer cellulose insulation using synthetic ester," *Energies*, vol. 13, no. 13, 2020, doi: 10.3390/en13133467.
- [15] P. Jarman, B. Ryder, and T. Prevost, "Understanding the impact of moisture on transformer insulation life," *CIGRE Science & Engineering*, no. 22, pp. 45–55, 2021.
- [16] H. Borsi, E. Gockenbach, and M. Wang, "Drying of transformer insulation systems: A review of processes and technologies," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 29, no. 2, pp. 456–465, 2022, doi: 10.1109/TDEI.2022.3145678.
- [17] IEC 60076-16, "Power transformers – Part 16," International Electrotechnical Commission, 2021.
- [18] C. Yigit, A. Aydin, H. Yasar, F. Isik, and T. Engin, "Numerical investigation of vapor phase drying process for drying of transformer's insulation paper," *Thermal Science*, vol. 24, no. 3, pp. 2125–2135, 2020, doi: 10.2298/TSCI180928104Y.
- [19] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, "Review of condition assessment of power transformers in service," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, no. 6, pp. 12–25, 2021.
- [20] M. Cybulski and P. Przybylek, "Applying of hygroscopic materials to dry transformer insulation," *ITM Web of Conferences*, vol. 19, 2018, doi: 10.1051/itmconf/20181901017.
- [21] S. Saodah, B. Eliana, and J. Jakariya, "Studi pengaruh penuaan minyak trafo terhadap karakteristik dielektrik," *JITEL*, vol. 3, no. 2, pp. 83–90, 2023, doi: 10.35313/jitel.v3.i2.2023.83-90.