



Trafo daya menggunakan minyak isolasi yang dapat terurai secara biologis

Agus Indarto¹, Arunkumar Bohra², Slamet Wahyudi³, Asep Dharmanto⁴

¹Institut Teknologi PLN

^{2,3,4}PT Elsewedy Electric Indonesia

¹agus.indarto@itpln.ac.id, ²arunkumar.bohra@elsewedy.com, ³slamet.wahyudi@elsewedy.com

Info Artikel :

Diterima :

7 Agustus 2023

Disetujui :

11 Agustus 2023

Dipublikasikan :

25 Agustus 2023

ABSTRAK

Desain, proses manufaktur, dan teknologi material baru yang ramah lingkungan diadopsi oleh industri transmisi dan distribusi listrik karena meningkatnya permintaan untuk emisi karbon nol untuk mencapai praktik berkelanjutan dan melindungi lingkungan dengan lebih baik. Trafo daya memainkan peran penting dalam sistem transmisi dan distribusi. Meningkatkan dampak lingkungan dari transformator daya dimungkinkan karena sifat-sifatnya, seperti keamanan kebakaran yang lebih tinggi, bahan yang dapat terurai secara hayati atau dapat didaur ulang, dan pemanfaatan aset yang optimal. Studi yang lebih baru telah membantu produsen untuk lebih memahami sifat listrik, termal, dan kimiawi cairan ester. Studi ini meneliti desain transformator daya yang menggunakan minyak isolasi biodegradable (berbasis ester) dan membandingkan desainnya dengan yang menggunakan minyak mineral dengan peringkat yang sama. Metodologi yang digunakan adalah studi kasus desain pendingin udara 60MVA 275/33 kV dan studi perbandingan dengan desain oli mineral. Perbandingan antara transformator dan transformator yang diisi dengan oli mineral konvensional didasarkan pada pendinginan, dielektrik, dan dimensinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendinginan membutuhkan kapasitas yang lebih besar serta dimensi transformator daya. Desain dielektrik tidak memiliki perbedaan yang signifikan di antara keduanya.

Kata kunci: Listrik, Minyak Isolasi, Trafo Daya

ABSTRACT

New eco-friendly designs, manufacturing processes, and material technologies are being adopted by the power transmission and distribution industry due to the increasing demand for zero carbon emissions to achieve sustainable practices and better protect the environment. Power transformers play an important role in transmission and distribution systems. Improving the environmental impact of power transformers is possible due to their properties, such as higher fire safety, biodegradable or recyclable materials, and optimal asset utilization. More recent studies have helped manufacturers to better understand the electrical, thermal, and chemical properties of ester liquids. This study examines the design of a power transformer using biodegradable (ester-based) insulating oil and compares its design to that using mineral oil of the same rating. The methodology used was a case study of a 60MVA 275/33 kV air-cooled design and a comparison study with a mineral oil design. The comparison between the transformer and the transformer filled with conventional mineral oil is based on cooling, dielectric, and dimensions. The results show that cooling requires larger capacity as well as dimensions of the power transformer. The dielectric design has no significant difference between the two.

Keywords : Electrical, Insulating Oil, Power Transformer



©2022 Penulis. Diterbitkan oleh Arka Institute. Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International License. (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Transformator adalah komponen vital dari sistem tenaga listrik dan diperkirakan akan menjadi lebih umum di masa depan karena kebutuhan akan energi yang lebih bersih dan kelestarian lingkungan (Indarto, 2017). Trafo masih relevan dan tetap menjadi aplikasi yang menarik dalam sistem tenaga listrik. Sangat penting untuk memproduksi transformator yang dibuat dengan baik, memiliki bahan yang unggul, dan memenuhi persyaratan keamanan lingkungan sambil tetap beroperasi dengan keandalan dan keamanan.

Minyak mineral umumnya digunakan pada transformator daya konvensional untuk insulasi dan pendinginan, tetapi penggunaannya memiliki beberapa kelemahan (Indarto, 2020). Pendingin dielektrik era baru, yang terdiri dari minyak isolasi berbasis ester, memiliki keunggulan seperti kredensial bebas karbon, tahan api, dapat terurai secara hayati, tingkat penuaan selulosa yang lebih rendah, dan kompatibilitas dengan insulasi suhu tinggi (Mehta, 2016).

Keunggulan ini sangat banyak dibandingkan minyak mineral. Desain transformator daya yang menggunakan minyak insulasi berbasis ester disajikan dalam makalah ini, dibandingkan dengan penggunaan minyak mineral. Transformator menggunakan beragam cairan sebagai konstituen seperti minyak mineral, minyak silikon dan hidrokarbon dengan berat molekul tinggi yaitu: ester sintetis dan organik (Indarto, 2019).

Minyak mineral adalah jenis fluida yang biasanya paling umum digunakan karena kesesuaiannya untuk tujuan tertentu (International Electrotechnical Commission, 2020), digunakan di dalam transformator daya. Kerugian utama dari minyak mineral adalah biodegradabilitas yang rendah dan api yang rendah adalah karakteristik minyak mineral (IEC, 2010). Sebaliknya, ester memiliki titik api yang tinggi dan dapat terurai secara sempurna.

Meskipun dibuang karena viskositasnya yang tinggi membuatnya cocok untuk digunakan pada transformator. Mengurangi efisiensi pendinginan dan kehilangan dielektrik yang tinggi. Mereka menunjukkan stabilitas oksidasi yang rendah dan aplikasi ini mendapat manfaat dari titik api yang lebih tinggi, kinerja termal yang lebih baik, dan kemampuan terurai secara hayati (IEC, 2013) Akibatnya, utilitas transformator menjadi lebih ramah lingkungan diklasifikasikan sebagai faktor keuntungan (Lu & Liu, 2015).

Mengoptimalkan biaya bahan sangat penting untuk memastikan kinerja transformator yang andal. Secara tradisional, penggunaan minyak mineral dalam transformator telah melampaui pentingnya minyak ester untuk insulasi transformator dan aman dari api belakangan ini. Dalam aplikasi transformator, minyak ester lebih disukai daripada minyak mineral konvensional yang berasal dari minyak bumi untuk pertimbangan lingkungan.

Sebuah studi di Rapp dalam Shen (2021) menunjukkan bahwa kemampuan impuls petir untuk bertahan dalam medan semu seragam setara dengan minyak mineral untuk cairan ester. Temuan Lars dkk. Lars (2021) menunjukkan bahwa perbedaan kekuatan kerusakan meningkat dengan ketidakhomogenan yang lebih besar, yang mengarah ke variasi yang lebih tinggi dari oli mineral. Studi ini meneliti desain transformator daya yang menggunakan minyak isolasi biodegradable (berbasis ester) dan membandingkan desainnya dengan yang menggunakan minyak mineral dengan peringkat yang sama.

METODE PENELITIAN

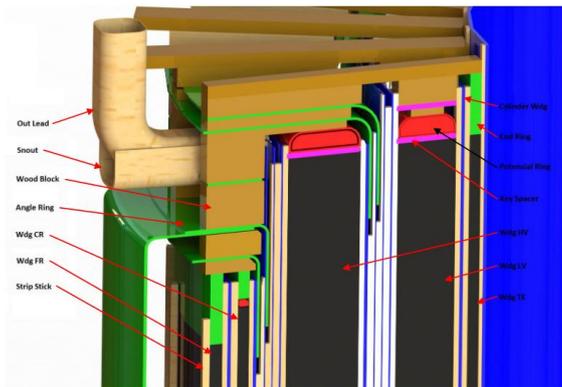
Pada bagian ini, kami membahas pertimbangan desain untuk transformator daya yang menggunakan oli mineral dan cairan ester, yang mencakup faktor-faktor seperti ketahanan dielektrik dan desain pendinginan. Tujuannya adalah untuk menarik perhatian pada perbedaan pertimbangan desain. Sejumlah studi dan studi kasus yang dipublikasikan dalam literatur, serta pengalaman produsen sendiri, digunakan untuk menetapkan aturan desain.

Berbagai parameter desain untuk desain pendinginan diestimasi dengan menggunakan model jaringan hidraulik termal. Dengan menggunakan metode elemen batas dan analisis lapangan dengan perangkat lunak, tegangan desain dielektrik ditentukan dan persamaannya diselesaikan. Margin keamanan diestimasi dengan membandingkan tegangan desain kumulatif dengan kurva desain untuk minyak mineral. Modifikasi desain oli ester dibuat untuk memastikan bahwa mereka memenuhi standar keamanan yang diperlukan untuk perubahan perilaku dibandingkan dengan oli mineral.

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi, \quad (1)$$

Biasanya, transformator yang menggunakan minyak dirancang dan diproduksi menggunakan kombinasi bahan seperti minyak mineral, papan tekan, dan kayu. Hal ini sangat berguna ketika celah oli antara bagian pembawa tegangan secara efektif dibagi oleh penghalang papan tekan untuk mengurangi celah keseluruhan yang diperlukan untuk perbedaan tegangan tertentu. Selain itu, cincin sudut dan tutup ditempatkan di sepanjang garis ekuipotensial di dekat elektroda tegangan tinggi ini (di ujung belitan), bersama dengan rangkaian potensial lain yang mendistribusikan medan secara seragam

sehingga mengurangi tegangan titik lokal (Indarto, 2019). Pada gambar 1, desain insulasi tipikal transformator daya berisi minyak diilustrasikan, dengan penekanan pada berbagai komponen.



Gambar 1 Struktur Isolasi Transformator Daya

Pada Tabel 1, karakteristik minyak mineral dibandingkan dengan minyak ester. Kesimpulan yang dapat diambil dari perbandingan ini adalah: minyak ester dapat terurai secara hayati (IEC, 2020). Karena titik nyala dan titik apinya yang lebih tinggi, minyak ester menunjukkan risiko kebakaran yang lebih rendah. Demikian pula, minyak mineral dan ester dapat memiliki konduktivitas termal dan panas spesifik yang serupa. Minyak ester ditemukan memiliki viskositas kinematik yang lebih tinggi daripada minyak mineral. Saat suhu naik, begitu pula perbedaannya.

Desain pendinginan transformator daya dipengaruhi oleh hal ini. Cairan ini memiliki kekuatan kerusakan yang sama dengan yang ditentukan dalam standar IEC 60156 (IEC, 2010). Meskipun demikian, masalah ini diuraikan pada bagian selanjutnya untuk memperjelas signifikansi aktual dari desain cairan ester yang menggunakan insulasi dielektrik pada transformator daya. Air dapat dilarutkan dalam cairan ester jauh lebih mudah daripada minyak mineral.

Hal ini menyiratkan bahwa cairan ester dapat mempertahankan jumlah kelembaban yang lebih besar tanpa mengurangi tegangan tembus listrik. Hal ini berdampak pada berbagai faktor, termasuk pengeringan isolasi transformator dan pemrosesan minyak ester, serta penuaan isolasi berbasis selulosa karena paparan esterol (IEC, 2013). Temperatur penguapan cairan ini identik, tetapi ester alami tidak cocok untuk digunakan di lingkungan yang dingin (Lu & Liu, 2015).

Tabel 1 Perbandingan Sifat-Sifat Minyak Mineral Dan Minyak Ester

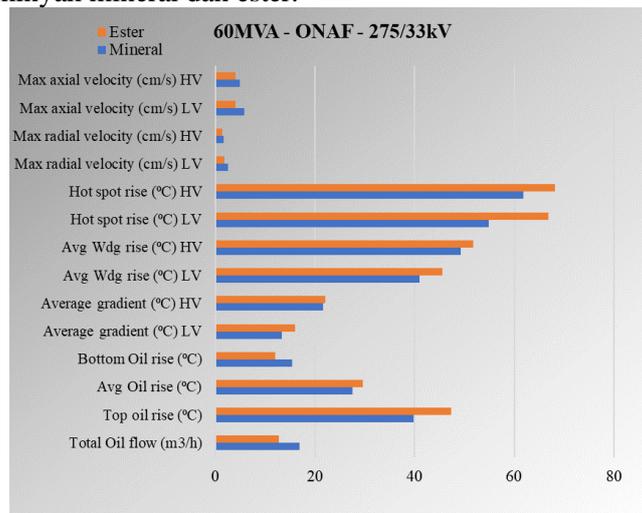
	Units	Mineral oil IEC60296)	Ester IEC61099
General Properties			
Density at 20 °C	kg/m ³	875 (Max. 895)	970 (Max. 1000)
Specific heat at 20 °C	J/kg-K	1860	1880
Thermal conductivity at 20 °C	W/m-K	0.126	0.144
Kinematic Viscosity at 40 °C	mm ² /s	9.6 (Max. 12)	28 (Max. 35)
Kinematic Viscosity at -20 °C	mm ² /s	-	1400 (Max. 3000)
Kinematic Viscosity at -30 °C	mm ² /s	1100 (Max. 1800)	-
Pour Point	°C	-51 (Max. -40)	-60 (Max. -45)
Flash Point	°C	152 (Min. 135)	26 (Min. 250)
Fire Point	°C	170	316 (Min. 300)
Fire Hazard Classification		O	K3
Biodegradability at 28 days			
OECD 301F	%	NA	>89
OECD 301D	%	< 10	-
OECD 301B	%		
Water content	mg/kg	< 20 (Max. 30)	50 (Max. 200)
Water solubility at 20 °C	ppm	55	1100

	Units	Mineral oil IEC60296)	Ester IEC61099
Electrical Properties			
Breakdown strength, 2.5 mm	kV	40-60 (Min. 30)	>75 (Min. 45)
Permittivity at 20 °C		2.2	3.2

HASIL DAN PEMBAHASAN

Cooling Design

Parameter penting yang mengatur desain pendinginan adalah viskositas cairan pendingin. Viskositas fluida berbasis ester lebih tinggi daripada oli mineral, seperti yang tercantum dalam Tabel 1. Viskositas yang lebih tinggi menghasilkan laju dan kecepatan aliran yang berkurang, sehingga menghasilkan gradien dan kenaikan suhu yang lebih tinggi. Selain itu, kapasitas panas yang lebih rendah dan berkurangnya aliran oli menyebabkan perbedaan suhu yang besar di sepanjang ketinggian belitan. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2 dengan membandingkan berbagai parameter pendinginan di antara keduanya untuk transformator berpendingin oli-alami (ON) yang dihitung menggunakan model jaringan hidraulik termal. Untuk tujuan perbandingan, semua parameter desain lainnya dijaga agar tidak berubah antara desain minyak mineral dan ester.



Gambar 2 Parameter Desain Pendinginan Untuk Desain ON 60 MVA Dengan Oli Mineral & Ester.

Data pada gambar 2 menunjukkan bahwa ketebalan saluran radial minimum untuk pendinginan fluida ester harus lebih besar daripada yang digunakan dalam kasus oli mineral untuk mendapatkan nilai yang sebanding untuk parameter pendinginan yang berbeda. Pada belitan LV dengan desain 200 MVA, jika salah satu dari dua saluran radial yang berurutan dibuat 4 mm, gradien, kenaikan belitan rata-rata, dan kenaikan titik panas ditemukan berubah menjadi 17,85 ° C, 52,16 ° C, dan 62,95 ° C, secara berurutan. Nilai-nilai ini secara signifikan lebih dekat dengan yang dihitung dengan oli mineral dan saluran radial 3 mm di LV, seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.

Data pada gambar 2 juga menunjukkan bahwa, secara umum, kenaikan suhu oli teratas lebih tinggi 2-5 ° C, gradien belitan rata-rata lebih tinggi 2-5 ° C, kenaikan belitan rata-rata bisa lebih tinggi 5-7 ° C, dan kenaikan titik panas belitan bisa lebih tinggi > 10 ° C dalam beberapa kasus, dibandingkan dengan oli mineral. Oleh karena itu, dalam kasus transformator yang diisi ester, meningkatkan efisiensi desain pendinginan akan membutuhkan pedoman desain, seperti ketebalan saluran radial minimum, ketebalan saluran aksial minimum, dan jumlah lintasan pemandu oli yang harus ditinjau dan direvisi.

Parameter desain termal untuk desain pendinginan yang diarahkan minyak hampir identik. Hal ini memerlukan tinjauan dan revisi pedoman desain pendinginan untuk memastikan efisiensi dan keandalan desain pendinginan yang optimal. Dari perspektif pengguna, adopsi pendinginan yang diarahkan oli untuk transformator dengan peringkat yang lebih tinggi akan menghasilkan jejak desain pendinginan optimal yang hampir identik dengan desain oli mineral. Meskipun penelitian terbaru meningkatkan pemahaman kita tentang cairan ester dalam hal kinerja dielektriknya, dengan tidak

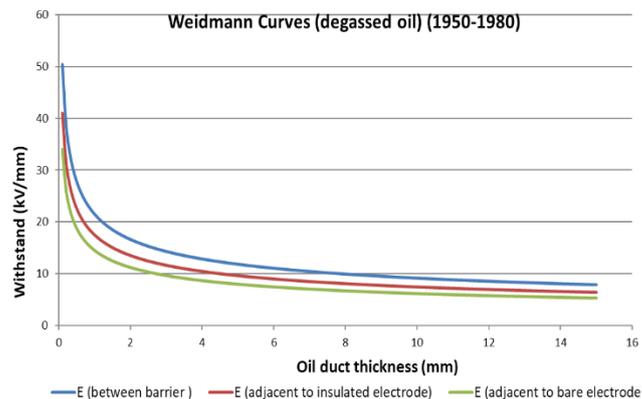
adanya teori kerusakan yang mapan untuk cairan, tidak seperti gas, pemahaman sepenuhnya tentang sifat-sifat kerusakan tetap menantang.

Dielectric Design

Demikian pula, transformator yang dibuat dengan minyak ester harus mampu menangani arus AC, impuls petir, dan lonjakan sakelar yang sama dengan transformator yang diisi minyak mineral konvensional. Tegangan tembus dalam cairan mineral dan ester terbukti memiliki nilai yang sama ketika diukur menurut IEC 60156, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Martin dkk. [10] mendokumentasikan kerusakan cairan ini melalui metode pengukuran yang berbeda. Dilaporkan bahwa ester dan minyak mineral memiliki medan yang homogen dan tegangan tembus, tegangan awal pengosongan parsial (tegangan saat proses pengosongan dimulai), dan kerusakan impuls (0.9400 hingga 0.1250000000). Selain itu, hal ini menunjukkan variasi dalam pola pengosongan parsial. Sebuah studi di Rapp dalam Shen (2021) menunjukkan bahwa kemampuan impuls petir untuk bertahan dalam medan semu seragam setara dengan minyak mineral untuk cairan ester.

Meski begitu, penelitian telah mengungkapkan bahwa cairan ester memiliki tingkat tegangan yang jauh lebih rendah daripada minyak mineral, sehingga menghasilkan aliran yang lebih cepat (Nguyen, 2010; Lars, 2021). Selain itu, tegangan tembus ditemukan lebih rendah pada cairan ini karena jaraknya yang panjang, dan cairan ini tidak dapat menahan impuls jangka pendek sebaik oli mineral. Hal ini berlaku untuk bentuk gelombang polaritas positif dan negatif. Temuan Lars dkk. Lars (2021) menunjukkan bahwa perbedaan kekuatan kerusakan meningkat dengan ketidakhomogenan yang lebih besar, yang mengarah ke variasi yang lebih tinggi dari oli mineral. Kasus-kasus lain telah dilaporkan di masa lalu (Liu, 2011). Singkatnya, kinerja dielektrik fluida ester mirip dengan minyak mineral untuk medan yang homogen. Di bawah distribusi medan yang tidak homogen, perbedaan kinerja dielektrik menjadi lebih jelas ketika ada celah panjang dalam minyak.

Desain transformator yang menggunakan oli mineral telah ditetapkan dengan baik untuk sifat dielektriknya. Desain insulasi transformator daya yang menggunakan minyak mineral dikenakan kriteria volume dan permukaan, kurva desain Weidmann, kriteria tegangan kumulatif (dan akhirnya kriteria streamer), jika memungkinkan. Semua parameter kemudian diterapkan secara terpisah. Biasanya, metodologi yang paling umum untuk membandingkan tegangan kumulatif dan kekuatan medan awal pelepasan parsial yang terkait diwakili oleh kurva desain seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3 Contoh kurva desain untuk oli mineral.

$$\% \text{ safety margin} = \frac{(\text{strength} - \text{stress}) * 100}{\text{strength}} \quad (2)$$

Pendekatan empirisnya adalah mengikuti kurva desain oli mineral untuk oli ester, dengan beberapa penyesuaian untuk memperhitungkan margin keamanan yang diperlukan. Aturan jarak aman ditetapkan dengan menerapkan persamaan (2). Perhatian khusus harus diberikan pada area dengan distribusi tegangan medan yang tidak seragam, seperti insulasi ujung, pintu keluar timah, timah oli curah, koneksi pengubah keran, dan ujung bushing. Aturan desain ini bervariasi di antara produsen, tergantung pada pengetahuan dan pengalaman mereka. Pada Tabel 2, margin keamanan untuk desain

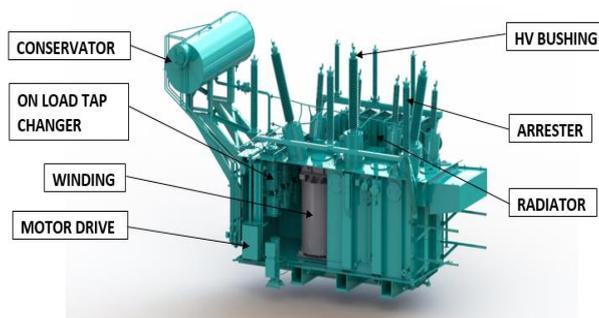
ester dan oli mineral disajikan di samping, dengan yang pertama memiliki persentase yang lebih rendah daripada yang terakhir.

Tabel 2 Persentase perbedaan margin keamanan antara desain oli ester dan oli mineral

Insulation Location	Difference in safety margin between the ester and mineral oil designs
Radial gap between windings	10%
Electrical stress in conductor paper	10%
Impulse withstand between discs	10%
End clearance	10%
Clearance in lead system (path >20 mm)	25%
Clearance to tank (path > 20 mm)	30%
Along the creepage path	30%

Bagian ini menguraikan data yang terkait dengan desain pendinginan, yang menunjukkan bahwa penggunaan oli ester dalam aplikasi transformator daya menyebabkan kenaikan suhu yang lebih tinggi karena viskositas yang lebih rendah dan kecepatan oli yang lebih besar di dalam tabung pendingin aksial dan radial. Mengoptimalkan desain pendinginan melibatkan pertimbangan faktor-faktor seperti ketebalan minimum saluran radial dan aksial, ketinggian rata-rata per bagian belitan per lintasan pemandu oli, dan pemilihan sistem pendingin untuk peringkat MVA yang lebih tinggi. Pendekatan ini dikenal sebagai pengoptimalan efisiensi.

Untuk nilai jaminan yang serupa, jejak desain pendinginan keseluruhan lebih besar dengan transformator yang diisi ester (terutama dalam desain ON). Desain dielektrik pada transformator yang diisi dengan minyak ester mengikuti kurva desain transformator minyak mineral bebas PD, tetapi tidak memiliki kriteria desain yang diverifikasi, sehingga tidak diperlukan faktor rating tambahan. Resistensi minyak ester terhadap minyak mineral untuk tegangan impuls durasi pendek lebih rendah, terutama untuk celah minyak jangka panjang dan bidang yang tidak homogen. Akibatnya, margin keamanan desain dielektrik harus dinaikkan. Jumlah celah isolasi internal pasti akan meningkat. Ukuran dan berat transformator secara keseluruhan akan bertambah. Lonjakan yang lebih signifikan diamati pada transformator dengan kapasitas dan tegangan yang lebih besar.



Gambar 4 - Tata letak transformator;

Gambar 4 menunjukkan pertimbangan parameter desain kritis transformator untuk oli ester dan oli mineral, dan membandingkan bobotnya untuk peringkat dan jaminan transformator yang berbeda. Desain oli ester biasanya memiliki jejak keseluruhan yang lebih besar saat bekerja dengan transformator tegangan tinggi.

KESIMPULAN

Penggunaan minyak ester sebagai media isolasi dan pendingin untuk transformator daya tegangan tinggi dan berkapasitas tinggi menimbulkan beberapa tantangan dalam desain transformator daya, terutama dalam hal kriteria desain pendinginan dan dielektrik. Untuk desain pendinginan, perbedaan utama dapat diamati pada aliran alami media pendingin internal (ON) pada transformator. Dalam banyak kasus, perbandingan hasil eksperimen dengan minyak mineral memberikan beberapa wawasan tentang perilaku cairan ester di bawah penerapan jenis tegangan yang berbeda. Secara umum,

perilaku dielektrik ditemukan sebanding dengan oli mineral, kecuali untuk celah oli yang panjang dengan distribusi medan yang tidak homogen. Secara keseluruhan, peningkatan margin keselamatan dipertahankan untuk memastikan keandalan. Selain itu, penggunaan oli ester mengubah kriteria pemilihan beberapa aksesoris dan material. Semua faktor ini, jika digabungkan, menghasilkan jejak yang lebih besar dalam hal bobot dan dimensi untuk desain oli ester dibandingkan dengan desain oli mineral dengan peringkat dan parameter yang sama. Peningkatan ini menjadi lebih signifikan seiring dengan meningkatnya level tegangan dan kapasitas MVA transformator.

DAFTAR PUSTAKA

- Cargil, FR3 fluid: Acceptable delivery specifications, . 2021: <https://www.cargill.com/bioindustrial/fr3-fluid/fr3-fluid-technical-details>.
- International Electrotechnical Commission. (2020). IEC Standard 60296, Fluids for Electrotechnical Applications—Mineral Insulating Oils for Electrical Equipment.
- IEC, I. (2010). 61099 Insulating liquids-Specifications for unused synthetic organic esters for electrical purposes.
- IEC, I. (2013). 62770 Fluids for electrotechnical applications-Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment.
- Indarto, A., Garniwa, I., Setiabudy, R., & Hudaya, C. (2017, July). Total cost of ownership analysis of 60 MVA 150/120 kV power transformer. In *2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering* (pp. 291-295). IEEE.
- Indarto, A., Murti, A. W., Husnayain, F., Garniwa, I., Rahardjo, A., & Hudaya, C. (2020). Influence of different adhesives on partial discharge in power transformer winding cylinder insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27(3), 964-970.
- Indarto, A., Setiabudy, R., Rahmatullah, R., Garniwa, I., & Hudaya, C. (2019, April). The effects of vacuum and oil impregnation duration on partial discharge of 167 MVA 500/150 kV single phase power transformer. In *2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)* (pp. 61-65). IEEE.
- Lars, L., Qiang, L., Olivier, L., Stefan, T., Inge, M., Rainer, F., ... & Attila, G. (2021). Dielectric performance of insulating liquids for transformers.
- LIU, Q., electrical performance of ester liquids under impulse voltage for application in power transformers, Ph.D. dissertation, in Faculty of Engineering and Physical Sciences. 2011, The University of Manchester: Manchester.
- Lu, W., & Liu, Q. (2015). Effect of cellulose particles on impulse breakdown in ester transformer liquids in uniform electric fields. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(5), 2554-2564.
- Martin, R., et al., Experiences in service with new insulating liquids. Cigré Technical Brochure, 2010. 436.
- Mehta, D. M., Kundu, P., Chowdhury, A., Lakhiani, V. K., & Jhala, A. S. (2016). A review of critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part II. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(3), 1705-1712.
- Nguyen, N. M., Lesaint, O., Bonifaci, N., Denat, A., & Hassanzadeh, M. (2010, October). A comparison of breakdown properties of natural and synthetic esters at high voltage. In *2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (pp. 1-4). IEEE.
- Shen, Z., Wang, F., Wang, Z., & Li, J. (2021). A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110783.