

Analisis Perbandingan Tegangan Tembus Antara Minyak Terpurifikasi dan Non Terpurifikasi Pada Transformator Unit 1 PLTA MALEA 2x45 MW

Muh. Reza Alfirdaus^{1*}, Makmur Saini² dan Sonong³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia

*E-main korespondensi: alfirdausresa6@gmail.com

Abstract: *This study aims to analyze the comparison of breakdown voltage between purified and non-purified transformer oil in the Unit 1 transformer at PLTA Malea. The research focuses on evaluating the quality of transformer oil as an insulating and cooling medium to maintain transformer performance and reliability. The research method used was an experimental method by conducting breakdown voltage (BDV) tests on transformer oil samples before and after the purification process. The testing was carried out using an Insulating Oil Tester in accordance with the IEC 60422-2013 standard, with an electrode gap of 2.5 mm, and each sample was tested six times to obtain the average breakdown voltage value. In addition, supporting tests including viscosity and moisture content measurements were conducted to evaluate the changes in the physical characteristics of the transformer oil. The results showed that the non-purified transformer oil had an average breakdown voltage of 55.11 kV, which was considered unsuitable for operation because it was below the minimum standard. After the purification process, the average breakdown voltage increased significantly to 77.95 kV and met the operational requirements based on the IEC 60422-2013 international standard. These results indicate that transformer oil purification is effective in improving dielectric strength and insulation quality, and therefore can be recommended as a preventive and corrective maintenance method to maintain transformer reliability and extend its operational lifespan.*

Keywords: *transformer oil, breakdown voltage, purification, transformer maintenance, dielectric strength*

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan tegangan tembus antara minyak transformator yang telah dipurifikasi dan yang belum dipurifikasi pada transformator Unit 1 PLTA Malea. Penelitian difokuskan pada evaluasi kualitas minyak transformator sebagai media isolasi dan pendingin guna menjaga performa serta keandalan transformator. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen melalui pengujian tegangan tembus (Breakdown Voltage/BDV) terhadap sampel minyak transformator sebelum dan sesudah proses purifikasi. Pengujian dilakukan menggunakan alat Insulating Oil Tester dengan standar pengujian IEC 60422-2013, jarak elektroda 2,5 mm, dan setiap sampel diuji sebanyak enam kali pengulangan untuk memperoleh nilai rata-rata tegangan tembus. Selain itu, dilakukan pengujian parameter pendukung berupa viskositas dan kadar air untuk mengetahui perubahan karakteristik fisik minyak transformator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa minyak transformator yang belum dipurifikasi memiliki nilai rata-rata tegangan tembus sebesar 55,11 kV sehingga dinyatakan tidak layak operasi karena berada di bawah standar minimum. Setelah dilakukan proses purifikasi, nilai rata-rata tegangan tembus meningkat menjadi 77,95 kV dan telah memenuhi standar internasional IEC 60422-2013. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses purifikasi minyak transformator efektif dalam meningkatkan kekuatan dielektrik dan kualitas isolasi minyak, sehingga direkomendasikan sebagai metode pemeliharaan preventif dan korektif untuk menjaga keandalan serta umur operasional transformator.

Kata kunci : minyak transformator, tegangan tembus, purifikasi, pemeliharaan transformator, kekuatan dielektrik

I. PENDAHULUAN

Masyarakat modern saat ini sangat membutuhkan energi listrik sebagai sarana mempermudah manusia dalam melakukan berbagai pekerjaan, karena sebagian besar aktivitas kehidupan manusia berhubungan dengan listrik. Dalam setiap kegiatan baik rumah tangga maupun industri, listrik telah menjadi sumber energi utama. Penyediaan sumber listrik harus handal dan berkesinambungan terutama pada transformator yang membutuhkan perawatan pada bagian minyak transformator [1].

Transformator adalah salah satu jenis peralatan listrik yang diperlukan dalam penyaluran tenaga listrik. Transformator (*step up*) pada unit pembangkit berfungsi untuk menaikkan tegangan yang dihasilkan oleh generator yang kemudian disalurkan ke gardu induk untuk diturunkan tegangannya

melalui transformator penurun tegangan (*step down*) menjadi tegangan menengah atau juga disebut tegangan primer [2]. Dalam pengoperasiannya, transformator memerlukan sistem isolasi yang handal, dan minyak transformator merupakan salah satu komponen isolasi yang sangat penting [3].

Minyak transformator memiliki dua fungsi utama yaitu sebagai media isolasi dan pendingin. Sebagai media isolasi, minyak harus memiliki ketahanan tegangan tembus yang memenuhi standar, sedangkan sebagai media pendingin, minyak harus mampu mentransfer panas dengan baik [4]. Kualitas minyak transformator dapat menurun seiring waktu penggunaan akibat berbagai faktor seperti kontaminasi, oksidasi, dan degradasi termal [5].

Kegagalan minyak trafo daya terjadi akibat trafo daya tersebut dipakai dalam kondisi beban yang tinggi secara terus menerus, maupun minyak yang sudah kotor atau sudah terkontaminasi dengan partikel-partikel pengotor di dalam trafo tersebut [6]. Semakin kecilnya tegangan tembus pada minyak transformator membuktikan bahwa minyak transformator mengalami gangguan dan harus di-treatment atau diganti dengan minyak transformator baru [7].

Purifikasi minyak transformator merupakan salah satu metode pemeliharaan yang dapat mengembalikan kualitas minyak transformator. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan kontaminan, mengurangi kadar air, dan meningkatkan tegangan tembus minyak [8]. Pemeliharaan minyak transformator yang tepat tidak hanya dapat memperpanjang umur transformator tetapi juga dapat menghemat biaya operasional jangka panjang [9].

II. METODE PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PLTA Malea 2×45 MW, Kabupaten Tana Toraja, Provinsi Sulawesi Selatan. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada ketersediaan transformator daya yang beroperasi secara kontinyu dan memerlukan pemeliharaan rutin. Lokasi pembangkit listrik tenaga air tersebut dapat dilihat pada Gambar 1 yang menunjukkan area power house PLTA Malea sebagai tempat dilaksanakannya penelitian.



Gambar 1. Power House PLTA MALEA 2x45 MW

B. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Insulating Oil Tester (Alat BDV)

Insulating Oil Tester digunakan untuk mengukur nilai tegangan tembus (Breakdown Voltage/BDV) pada minyak transformator. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kemampuan minyak transformator dalam menahan tegangan listrik sebelum terjadi kegagalan isolasi.

Perangkat pengujian yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.

- Spesifikasi: AC 0-100kV, maksimum 9 kali pengujian
- Standar pengujian: IEC 60422-2013



Gambar 2. Breakdown Voltage Test (BDV)

2. Wadah Minyak dan Elektroda

Wadah minyak dan elektroda digunakan sebagai tempat pengujian sampel minyak transformator pada saat pengukuran tegangan tembus. Wadah yang digunakan memiliki kapasitas 500 ml dan terbuat dari kaca tahan panas untuk menjaga kestabilan selama proses pengujian. Elektroda yang digunakan berbahan kuningan dengan bentuk elektroda jamur dan jarak antar elektroda diatur sebesar 2,5 mm sesuai dengan standar pengujian BDV. Komponen wadah minyak dan elektroda yang digunakan dalam pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.

- Kapasitas wadah: 500 ml
- Material: Kaca tahan panas
- Jarak elektroda standar: 2,5 mm
- Material elektroda: Kuningan



Gambar 3. (a)Wadah Minyak (b)Elektroda Jamur

3. Peralatan Pengujian Tambahan

Selain alat utama pengujian BDV, penelitian ini juga menggunakan beberapa peralatan pendukung untuk menguji karakteristik fisik minyak transformator, seperti viskositas dan kadar air. Peralatan tersebut meliputi viscometer untuk mengukur viskositas minyak, stirrer hotplate ceramic untuk proses pemanasan dan pengadukan sampel, oven untuk proses pengeringan dalam pengujian kadar air, serta timbangan analitik untuk mengukur massa sampel dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Peralatan pengujian tambahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat

dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.

- Viscometer (Range: 1-100 cP)
- Stirrer Hotplate Ceramic (Suhu maks: 350°C)
- Oven (Range: 50-250°C)
- Timbangan Analitik (Akurasi: 0,0001 g)



Gambar 4. (a) Viscometer (b) Stirrer Hotplate



Gambar 5. (a) Oven (b) Timbangan Analitik

C. Prosedur Pengujian

Pengujian minyak transformator dimulai dengan tahap persiapan sampel. Pengambilan sampel dilakukan pada kondisi cuaca cerah untuk menghindari kontaminasi eksternal, dengan volume sampel sebesar 500 ml untuk setiap pengujian. Selanjutnya, dilakukan pengujian tegangan tembus (BDV) dengan terlebih dahulu melakukan kalibrasi alat, pemeriksaan kabel power dan grounding, serta penyesuaian jarak elektroda menggunakan feeler gauge 2,5 mm. Sampel diaduk selama 5 menit sebelum pengujian dilakukan sesuai standar IEC, dengan setiap sampel diuji sebanyak enam kali untuk memperoleh hasil yang akurat dan konsisten.

Pengujian viskositas dilakukan dengan memanaskan sampel pada suhu 40°C dan 50°C, kemudian pengukuran dilakukan menggunakan viscometer. Waktu alir sampel dicatat untuk perhitungan nilai viskositas secara presisi. Selanjutnya, pengujian kadar air dilakukan menggunakan metode pengeringan. Sampel pertama-tama ditimbang, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C, dan didinginkan dalam desikator sebelum penimbangan akhir. Persentase kadar air dihitung berdasarkan selisih massa sebelum dan sesudah pengeringan, sehingga memberikan informasi kuantitatif mengenai kandungan air dalam minyak trafo.

D. Metode Analisis Data

Metode analisis data pada penelitian ini dilakukan untuk mengolah dan mengevaluasi hasil pengujian tegangan tembus minyak transformator sebelum dan sesudah proses purifikasi. Analisis dimulai dengan pengolahan data secara statistik untuk mengetahui karakteristik hasil pengujian yang diperoleh. Parameter statistik yang dihitung meliputi nilai rata-rata (mean) untuk mengetahui

kecenderungan umum dari data pengujian, serta standar deviasi untuk melihat tingkat penyebaran atau variasi data terhadap nilai rata-rata. Selain itu, dilakukan perhitungan persentase perubahan nilai tegangan tembus guna mengetahui besarnya peningkatan kualitas minyak transformator setelah dilakukan proses purifikasi.

Selanjutnya dilakukan tahap evaluasi hasil dengan membandingkan nilai tegangan tembus yang diperoleh dengan standar yang ditetapkan dalam IEC 60422-2013 mengenai pemeliharaan dan evaluasi minyak isolasi pada transformator. Melalui perbandingan tersebut dapat diketahui apakah kualitas minyak transformator masih memenuhi standar operasional yang direkomendasikan. Selain itu, dilakukan analisis tren perubahan nilai tegangan tembus antara kondisi sebelum dan sesudah purifikasi untuk melihat pola peningkatan atau penurunan kualitas minyak. Hasil analisis tersebut kemudian diinterpretasikan untuk memberikan kesimpulan mengenai efektivitas proses purifikasi dalam meningkatkan kemampuan isolasi minyak transformator.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Tegangan Tembus

1. Analisis Sebelum Purifikasi

Hasil pengujian tegangan tembus minyak transformator sebelum proses purifikasi menunjukkan bahwa kualitas isolasi minyak masih berada pada tingkat yang relatif baik, namun memiliki variasi nilai yang cukup besar antar pengujian. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan alat Breakdown Voltage Test (BDV), diperoleh nilai rata-rata tegangan tembus sebesar 55,11 kV dengan ketahanan dielektrik sebesar 22,04 kV/mm. Nilai minimum yang diperoleh adalah 37,7 kV, sedangkan nilai maksimum mencapai 72,0 kV, dengan standar deviasi sebesar $\pm 10,2$ kV.

Variasi nilai tegangan tembus tersebut menunjukkan adanya ketidakseragaman kondisi minyak transformator, yang dapat disebabkan oleh adanya kandungan partikel, kadar air, atau kontaminasi lain dalam minyak isolasi. Secara umum, hasil pengujian sebelum proses purifikasi ini masih memenuhi batas minimum standar pengujian minyak transformator, namun diperlukan proses pemurnian untuk meningkatkan stabilitas dan kualitas isolasi minyak. Hasil pengujian tegangan tembus minyak transformator sebelum proses purifikasi dapat dilihat pada Gambar 6.

- Rata-rata tegangan tembus: 55,11 kV
- Ketahanan dielektrik: 22,04 kV/mm
- Nilai minimum: 37,7 kV
- Nilai maksimum: 72,0 kV
- Standar deviasi: $\pm 10,2$ kV



Gambar 6. Hasil Percobaan Pengujian Minyak Trafo Sebelum Purifikasi

2. Analisis Setelah Purifikasi

Gambar 7 menunjukkan hasil pengujian tegangan tembus minyak transformator setelah dilakukan purifikasi. Berdasarkan pengujian, nilai rata-rata tegangan tembus mencapai 77,95 kV dengan ketahanan dielektrik 31,18 kV/mm. Nilai minimum dan maksimum masing-masing adalah 60,2 kV dan 95,1 kV, sedangkan standar deviasi tercatat $\pm 10,5$ kV.

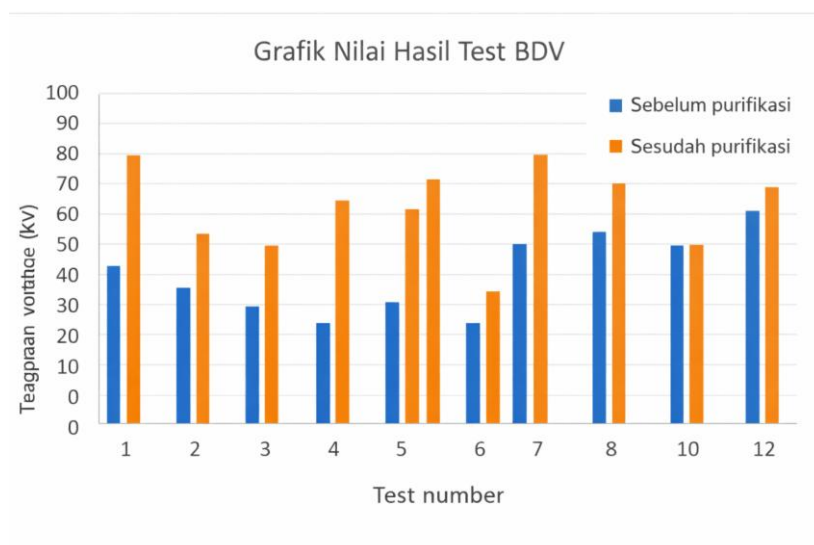
- Rata-rata tegangan tembus: 77,95 kV
- Ketahanan dielektrik: 31,18 kV/mm
- Nilai minimum: 60,2 kV
- Nilai maksimum: 95,1 kV
- Standar deviasi: $\pm 10,5$ kV



Gambar 7. Hasil Percobaan Pengujian Minyak Trafo Setelah Purifikasi

3. Perbandingan Hasil Pengujian

Gambar 8 memperlihatkan perbandingan hasil pengujian tegangan tembus (BDV) minyak transformator sebelum dan sesudah purifikasi. Dari grafik ini terlihat peningkatan yang signifikan setelah purifikasi, dengan rata-rata nilai tegangan tembus meningkat dari 55,11 kV menjadi 77,95 kV, menunjukkan efektivitas proses purifikasi dalam meningkatkan ketahanan dielektrik minyak transformator.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Nilai Hasil Test BDV Sebelum dan Sesudah Purifikasi

B. Hasil Pengujian Viskositas dan Kadar Air

1. Hasil Pengujian Viskositas

Hasil pengujian viskositas minyak trafo menunjukkan adanya penurunan setelah dilakukan purifikasi. Berdasarkan Tabel 1, viskositas pada suhu 40°C menurun dari 11 cP menjadi 10 cP, sedangkan pada suhu 50°C menurun dari 9 cP menjadi 8 cP. Penurunan viskositas ini mengindikasikan peningkatan kemampuan aliran minyak trafo setelah purifikasi, yang berpotensi meningkatkan kinerja pendinginan dan isolasi di transformator.

Tabel 1. Hasil Pengujian Viskositas Minyak Trafo

No	Temperature (°C)	Viskositas Sebelum Purifikasi (cP)	Viskositas Sesudah Purifikasi (cP)
1	40	11	10
2	50	9	8

2. Hasil Pengujian Kadar Air

Selain itu, pengujian kadar air pada minyak trafo juga menunjukkan hasil yang signifikan (Tabel 2). Sebelum purifikasi, kadar air tercatat sebesar 8,28%, dan setelah purifikasi menurun menjadi 6,82%. Penurunan kadar air ini penting karena air yang berlebih dalam minyak dapat menurunkan tegangan tembus dan mengakibatkan degradasi isolasi pada transformator.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kadar Air Minyak Trafo

No	Sampel	Parameter	Satuan	Hasil Uji
1	Sebelum Purifikasi	Kadar Air	%	8,28
2	Sesudah Purifikasi	Kadar Air	%	6,82

C. Pembahasan Komprehensif

1. Korelasi Antar Parameter

Hasil pengujian menunjukkan adanya hubungan yang signifikan antara kadar air dan tegangan tembus minyak trafo. Penurunan kadar air setelah purifikasi berbanding lurus dengan peningkatan tegangan tembus, sehingga memperkuat kemampuan isolasi transformator. Selain itu, viskositas minyak juga mempengaruhi efisiensi pendinginan; minyak dengan viskositas lebih rendah menunjukkan aliran yang lebih baik, sehingga meningkatkan perpindahan panas dari kumparan dan inti transformator. Secara keseluruhan, proses purifikasi terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas minyak dan mendukung kinerja transformator.

2. Implikasi Praktis

Perbaikan sifat fisik dan kimia minyak memiliki dampak langsung terhadap keandalan transformator. Dengan kadar air yang lebih rendah dan viskositas yang optimal, transformator menjadi lebih stabil dalam operasi. Hal ini memungkinkan optimasi interval pemeliharaan serta memberikan pedoman operasional yang lebih aman dan efisien, mengurangi risiko kegagalan dini dan downtime yang tidak direncanakan.

3. Analisis Ekonomis

Purifikasi minyak trafo juga memberikan manfaat ekonomis yang nyata. Penurunan frekuensi perawatan dan perpanjangan umur minyak berkontribusi pada penghematan biaya pemeliharaan. Analisis cost-benefit menunjukkan bahwa investasi dalam purifikasi dapat sebanding dengan pengurangan biaya jangka panjang dan peningkatan umur operasional transformator, sehingga memberikan nilai tambah yang signifikan bagi pengelolaan aset listrik.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa purifikasi minyak trafo memberikan peningkatan signifikan pada kualitas listrik dan sifat fisik minyak. Nilai tegangan

tembus minyak sebelum purifikasi tercatat rata-rata 55,11 kV, yang masih di bawah standar, sementara setelah purifikasi meningkat menjadi 77,95 kV atau naik sebesar 41,4%, sehingga memenuhi persyaratan IEC 60422-2013 (>60 kV). Selain itu, karakteristik fisik minyak juga mengalami perbaikan, di mana viskositas menurun sekitar 9–11% pada berbagai suhu pengujian dan kadar air berhasil diturunkan dari 8,28% menjadi 6,82%, atau sekitar 17,6%. Secara praktis, proses purifikasi terbukti efektif dalam meningkatkan kemampuan isolasi minyak transformator, mendukung pemeliharaan rutin, memperpanjang umur operasional transformator, serta menyediakan acuan yang dapat digunakan untuk penentuan jadwal pemeliharaan yang lebih optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Ujung Pandang dan PLTA MALEA atas dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suherman, E., & Akbar, M. (2020). Analisis Karakteristik Minyak Transformator Starlite 400 kVA Terhadap Tegangan Tembus. *Teknik Elektro Universitas Darma Persada*, X(1), 91-99.
- [2] Widyastuti, C., & Wisnuaji, R. A. (2019). Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator Di PT. PLN (Persero) Bogor. *Elektron: Jurnal Ilmiah*, 11(2), 75-78.
- [3] Sandi, D. (2022). Analisis Metode Purifikasi Dalam Mendaur Ulang Minyak Trafo Di Lingkungan PT. PLN (Persero). Tugas Akhir Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Batanghari.
- [4] Mubarak (2022). Studi Penentuan Kualitas Minyak Transformator Berdasarkan Tegangan Tembus. *Jurnal Teknik Elektro*.
- [5] Rahman, M. F., et al. (2023). Analysis of the Effect of Transformer Oil Purification on the Transformer Breaking Voltage. 20(2), 6-9.
- [6] Oksa Winanta, I. N., Amrita, A. A. N., & Ariastina, W. G. (2019). Studi Tegangan Tembus Minyak Transformator. *Jurnal SPEKTRUM*, 6(3), 10.
- [7] Rosyidi, N., & Deki. (2021). Pengujian Tegangan Tembus Pada Minyak Trafo. *Sinusoida*, XXIII No.(2), 1-31.
- [8] Salvi, S., & Jape, A. P. P. (2017). Study of Transformer Oil Purification. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4(3), 20-23.
- [9] Gultom, T. T., Immanuel, S., & Gatot, J. (2022). Purified Oil Machine Sebagai Alat Untuk Maintenance Minyak Trafo. *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 5(1), 1-5.
- [10] Aribowo, D., Wiryadinata, R., & Alexander, D. (2014). Care and Maintenance System Generator Transformer 20KV-150KV. *Jurnal Electrician*.