

PENGARUH BENTUK GEOMETRI DAN JENIS LOGAM ELEKTRODA TERHADAP KARAKTERISTIK TEGANGAN TEMBUS MINYAK TRAF0 PADA ELEKTRODA SERAGAM

Muhammad Alim^{1*}, Lanto M. Kamil Amali², Taufiq Ismail Yusuf³, Yasin Mohamad⁴, Ifan Wiranto⁵, Ade Irawati Tolago⁶

^{1,2,3,4,5,6}Universitas Negeri Gorontalo; Jl. Jenderal Sudirman No. 6 Kota Gorontalo, telp: (0435) 821183

Keywords:

Geometri elektroda; IEC 60156; Material elektroda; Minyak trafo; Tegangan tembus.

Correspondent Email:

muhammadalym22@gmail.com

Abstrak. Minyak trafo berfungsi sebagai isolator dalam sistem transformator, dengan tegangan tembus sebagai indikator utama kualitasnya. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh bentuk geometri dan jenis logam elektroda terhadap nilai tegangan tembus minyak trafo sesuai standar IEC 60156. Pengujian dilakukan menggunakan elektroda berbahan tembaga, stainless steel, aluminium, dan kuningan dengan menggunakan konfigurasi elektroda pelat, setengah bola, bola, dan jarum, masing-masing diuji sebanyak tiga kali. Hasil menunjukkan bahwa elektroda pelat dari tembaga (72,1 kV) dan stainless steel (45,6 kV), serta bentuk setengah bola dan bola dari tembaga, aluminium, dan stainless steel (30,1-31,8 kV) memenuhi standar IEC. Sebaliknya, elektroda pelat dari aluminium (28,9 kV) dan kuningan (29,8 kV), bentuk setengah bola dan bola dari aluminium dan kuningan (26,7-29,2 kV), serta semua elektroda berbentuk jarum (25,3-28,2 kV) tidak memenuhi standar. Konduktivitas tinggi pada logam seperti tembaga (59,6 MS/m) dan aluminium (37,7 MS/m) cenderung meratakan medan listrik. Meskipun stainless steel memiliki konduktivitas rendah (1,4 MS/m) menunjukkan kinerja baik pada bentuk pelat, karena permukaan halus. Ujung tajam dan permukaan kasar pada logam konduktivitas rendah seperti kuningan (1,7 MS/m) menyebabkan konsentrasi medan tinggi dan tegangan tembus rendah.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. Transformer oil functions as an insulator in a transformer system, with breakdown voltage as the main indicator of its quality. This study aims to analyze the effect of the geometric shape and type of electrode metal on the breakdown voltage value of transformer oil according to the IEC 60156 standard. Tests were conducted using electrodes made of copper, stainless steel, aluminum, and brass using plate, hemispherical, spherical, and needle electrode configurations, each tested three times. The results showed that plate electrodes made of copper (72.1 kV) and stainless steel (45.6 kV), as well as hemispherical and spherical shapes made of copper, aluminum, and stainless steel (30.1-31.8 kV) met the IEC standard. In contrast, plate electrodes made of aluminum (28.9 kV) and brass (29.8 kV), hemispherical and spherical shapes made of aluminum and brass (26.7-29.2 kV), and all needle-shaped electrodes (25.3-28.2 kV) did not meet the standard. High conductivity in metals such as copper (59.6 mS/m) and aluminum (37.7 mS/m) tends to flatten the electric field. Although stainless steel has a low conductivity (1.4 mS/m), it performs well in plate form, due to its smooth surface. Sharp edges and rough surfaces in low conductivity metals such as brass (1.7 mS/m) cause high field concentrations and low breakdown voltages.

1. PENDAHULUAN

Minyak trafo merupakan salah satu material isolasi penting pada sistem kelistrikan, terutama pada peralatan bertegangan tinggi seperti transformator daya [1]. Selain berfungsi sebagai media pendingin, minyak ini juga berperan utama sebagai isolator untuk mencegah pelepasan muatan listrik antar komponen konduktif [2]. Kualitas minyak trafo sebagai bahan isolasi umumnya dinilai melalui parameter tegangan tembus (*breakdown voltage*), yakni tegangan minimum yang menyebabkan kegagalan isolasi berupa loncatan listrik antar elektroda [3].

Keandalan transformator sangat bergantung pada kemampuan minyak dalam menahan tegangan tinggi tanpa mengalami kerusakan dielektrik [4]. Nilai tegangan tembus tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik minyak tetapi juga oleh kontrol eksternal saat pengujian, seperti geometri elektroda [5]. Geometri elektroda menetapkan distribusi medan listrik, sedangkan sifat permukaan dan termal logam elektroda juga memengaruhi tegangan tembus [6]. Elektroda simetris seperti bola-bola menghasilkan distribusi medan listrik lebih merata dan meningkatkan keandalan isolasi minyak [7]. Sebaliknya, bentuk tajam seperti jarum dapat menyebabkan konsentrasi medan tinggi lokal yang menurunkan nilai tegangan tembus [8]. Variasi logam seperti tembaga atau stainless steel juga dapat memengaruhi hasil pengujian, meskipun dibutuhkan studi lebih lanjut [9].

Standar IEC 60156 merekomendasikan pengujian tegangan tembus minyak menggunakan elektroda setengah bola berbahan stainless steel pada kondisi medan seragam. Namun, konfigurasi standar tersebut belum sepenuhnya mewakili kondisi nyata transformator yang menggunakan berbagai bentuk dan material elektroda berbeda [10]. Sementara itu, penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada pengaruh kontaminasi, suhu, atau jenis minyak, sedangkan kajian sistematis terkait pengaruh geometri dan jenis logam elektroda dalam medan seragam masih terbatas [11].

Dengan demikian, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi geometri dan jenis logam elektroda terhadap tegangan tembus minyak trafo dalam medan seragam. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan

kontribusi pada peningkatan akurasi metode pengujian serta mendukung keandalan sistem isolasi pada peralatan bertegangan tinggi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Minyak Trafo

Minyak trafo berfungsi sebagai isolator, pendingin, dan pelarut gas. Pemeliharaan rutin transformator penting untuk menjaga efisiensi, umur, dan efisiensi biaya, dengan pemeriksaan kualitas minyak sebagai prosedur utama [12].

2.2. Tegangan Tembus

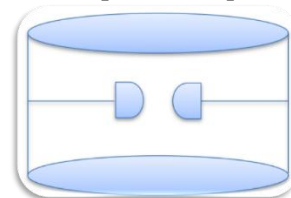
Tegangan tembus adalah tegangan maksimum yang dapat ditahan bahan isolasi sebelum terjadi pelepasan muatan listrik. Pada transformator daya, minyak berperan sebagai isolasi dan pendingin, sehingga tegangan tembus menjadi parameter penting untuk menilai kualitas minyak isolasi [13]. Menurut IEC 60156, nilai tegangan tembus minimum untuk minyak baru adalah 30 kV/2,5 mm; jika di bawah nilai ini, minyak harus diganti atau diregenerasi [14].

2.3. Elektroda Pengujian

Elektroda uji adalah salah satu bagian vital dalam alat penguji tegangan tembus (*breakdown voltage tester*), yang berfungsi untuk menyalakan mutual minyak isolasi, seperti minyak pada transformator. Jenis – jenis elektroda pada pengujian tegangan tembus adalah sebagai berikut [15]:

1. Elektroda Setengah Bola

Elektroda setengah bola adalah pasangan elektroda berbentuk setengah bola (*hemispherical*) yang digunakan pada pengujian kekuatan dielektrik cairan isolasi seperti minyak trafo. Bentuk elektroda Setengah Bola dapat dilihat pada Gambar 1.

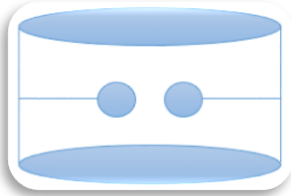


Gambar 1. Elektroda Setengah Bola

2. Elektroda Bola

Elektroda bola digunakan untuk menguji bahan isolasi (seperti minyak transformator, gas, atau udara) dengan meningkatkan tegangan secara perlahan hingga mencapai

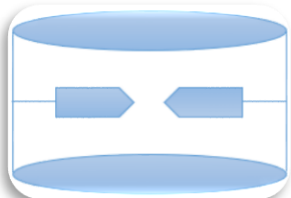
titik tembus listrik, yaitu titik di mana bahan isolasi tidak lagi dapat menahan tegangan dan mulai menghantarkan listrik. Bentuk elektroda bola dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Elektroda Bola

3. Elektroda Jarum

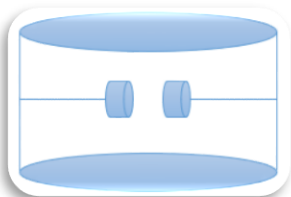
Jarum elektroda digunakan untuk mencatat kondisi ekstrem di mana tegangan tinggi pada titik kecil. Bentuk elektroda jarum dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Elektroda Jarum

4. Elektroda Pelat

Elektroda pelat digunakan untuk mengukur tegangan tembus, yaitu titik di mana bahan isolasi kehilangan kemampuan isolasinya dan mulai menghantarkan listrik. Bentuk elektroda pelat dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Elektroda Pelat

2.4. Pengaruh Material Elektroda Terhadap Tegangan Tembus

Faktor yang mempengaruhi material elektroda dalam pengujian tegangan tembus adalah sebagai berikut [16]:

1. Konduktivitas dan Resistansi

Permukaan material dengan konduktivitas tinggi (misalnya tembaga) mendukung distribusi medan yang lebih merata.

2. Keseragaman Permukaan

Permukaan elektroda yang halus membantu mengurangi titik konsentrasi medan, yang sering memicu breakdown lokal.

3. Interaksi dengan Media Isolasi

Bahan elektroda yang tahan korosi dan tidak bereaksi dengan minyak menjaga stabilitas tegangan tembus selama pengujian

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan eksperimen laboratorium tegangan tinggi dengan tahapan sistematis untuk memperoleh data tegangan tembus minyak trafo akibat variasi geometri dan jenis logam elektroda. Untuk mencapai tujuan penelitian, tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

3.1. Persiapan Alat dan Bahan

Menyiapkan seluruh peralatan uji seperti transformator tegangan tinggi, bejana uji, voltmeter HV, elektroda dengan berbagai bentuk dan bahan logam, serta sistem pengaman. Minyak trafo Nynas disiapkan dan disaring bila perlu untuk memastikan kemurniannya.

3.1.1. Alat Penelitian

Alat Penelitian dapat dilihat pada Gambar 5-8.



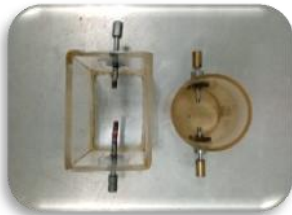
Gambar 5. HV Test Set



Gambar 6. Kapasitor



Gambar 7. Voltmeter AC Digital



Gambar 8. Bejana Uji

3.1.2. Bahan Penelitian

Alat Penelitian dapat dilihat pada Gambar 9-13.



Gambar 9. Minyak Trafo Nynas



Gambar 10. Stainless Steel



Gambar 11. Alumunium



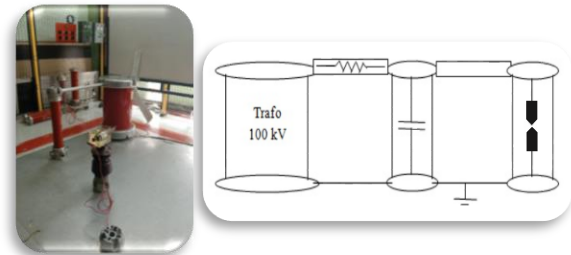
Gambar 12. Tembaga



Gambar 13. Kuningan

3.2. Membuat Rangkaian Pengujian

Pengujian dilakukan di laboratorium tegangan tinggi menggunakan sumber HVAC 100 kV. Tegangan tembus minyak trafo Nynas diukur dengan voltmeter digital terkalibrasi pada suhu ruang terjaga 28 °C. Skema pengujian dengan bentuk geometri elektroda ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Rangkaian Pengujian

3.3. Pemasangan Elektroda

Elektroda dipasang dengan bentuk geometri elektroda dan jenis logam sesuai desain eksperimen. Jarak antar elektroda diatur sesuai standar 2,5 mm, guna menghasilkan medan listrik seragam. Pemasangan elektroda dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Pemasangan Elektroda

3.4. Pengisian Minyak Trafo Kedalam Bejana Uji

Minyak trafo Nynas dituangkan ke dalam bejana uji hingga menutupi elektroda secara merata. Volume minyak dijaga konstan pada setiap pengujian. Pengisian minyak trafo kedalam bejana uji dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Pengisian Minyak Trafo Nynas

3.5. Pengujian Tegangan Tembus

- Tegangan dinaikkan secara bertahap menggunakan transformator tegangan tinggi.
- Pengamatan dilakukan hingga terjadi loncatan (breakdown) pada minyak.
- Catat nilai tegangan pada saat terjadi loncatan (tegangan tembus).
- Lakukan langkah a, b dan c pada bentuk

geometri elektroda (jarum, plat, bola, setengah bola) dan jenis logam (stainless steel, aluminium, tembaga, kuningan) dengan jarak elektroda 2,5 mm.



Gambar 17. Pengujian Tegangan Tembus

3.6. Pengolahan dan Analisis Data

- Membandingkan hasil uji tegangan tembus dengan standar IEC 156.
- Rata-ratakan hasil pengujian tegangan tembus pada tiap bentuk geometri elektroda.
- Bandingkan nilai tegangan tembus antar material dan interpretasi hasilnya secara grafik maupun deskriptif.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Tegangan Tembus

Pengujian tegangan tembus minyak trafo dilakukan untuk menilai kemampuan dielektriknya sebagai media isolasi terhadap berbagai geometri elektroda (setengah bola–setengah bola, bola–bola, jarum–jarum, dan pelat–pelat) serta jenis logam (stainless steel, tembaga, aluminium, dan kuningan). Pengujian dilakukan pada suhu ruangan 28°C. Setiap variasi diuji tiga kali agar hasil lebih representatif dan andal. Data tegangan tembus disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Tegangan Tembus Minyak Trafo

No.	Material Elektroda	Geometri Elektroda	Tegangan Tembus		
			Uji ke-1 (kV)	Uji ke-2 (kV)	Uji ke-3 (kV)
1	Stainless Steel	Setengah Bola	31,0	31,3	30,7
		Bola-Bola	31,5	32,1	31,9
		Jarum-Jarum	28,5	29	28,7
		Pelat-Pelat	45	46,2	45,5
2	Tembaga	Setengah Bola	31,5	32,1	31,6
		Bola-Bola	31,2	30,9	31,5
		Jarum-Jarum	29,5	30,2	29,9

		Pelat-Pelat	72,5	71,8	72,1
3	Aluminium	Setengah Bola	30	29,7	30,5
		Bola-Bola	26,8	26,2	27,1
		Jarum-Jarum	25,4	24,8	25,7
		Pelat-Pelat	29,2	28,8	28,7
4	Kuningan	Setengah Bola	28,7	29,5	29,2
		Bola-Bola	28,7	29,0	28,5
		Jarum-Jarum	27,9	28,2	28,4
		Pelat-Pelat	29,8	30,2	29,5

4.2. Pembahasan

Pengujian dilakukan pada minyak trafo Nynas dengan bentuk geometri elektroda dengan jenis logam elektroda. Jarak elektroda

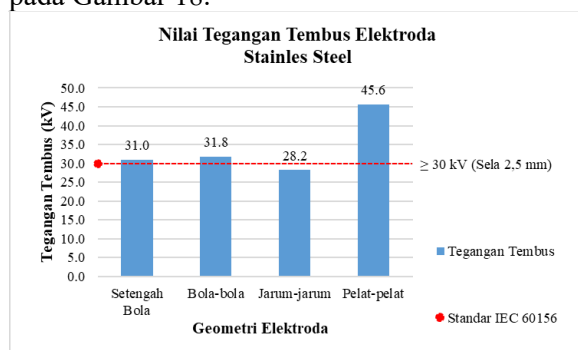
divariasikan sesuai standar IEC 60156, yaitu 2,5 mm [17]. Nilai rata-rata tegangan tembus ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Rata-Rata Tegangan Tembus Minyak Trafo

Standar IEC 60156	Material Elektroda	Geometri Elektroda	Tegangan Tembus (kV)	Keterangan
Tegangan tembus ≥ 30 kV/2,5 mm	Stainles Steel	Setengah Bola	31,0	Sesuai
		Bola-Bola	31,8	Sesuai
		Jarum-Jarum	28,2	Tidak Sesuai
		Pelat-Pelat	45,6	Sesuai
	Tembaga	Setengah Bola	31,7	Sesuai
		Bola-Bola	31,2	Sesuai
		Jarum-Jarum	29,9	Tidak Sesuai
		Pelat-Pelat	72,1	Sesuai
	Alumunium	Setengah Bola	30,1	Sesuai
		Bola-Bola	26,7	Tidak Sesuai
		Jarum-Jarum	25,3	Tidak Sesuai
		Pelat-Pelat	28,9	Tidak Sesuai
	Kuningan	Setengah Bola	29,1	Tidak Sesuai
		Bola-Bola	28,7	Tidak Sesuai
		Jarum-Jarum	28,2	Tidak Sesuai
		Pelat-Pelat	29,8	Tidak Sesuai

4.2.1. Elektroda Stainles Steel

Grafik rata-rata tegangan tembus pada geometri elektroda stainles steel ditunjukkan pada Gambar 18.

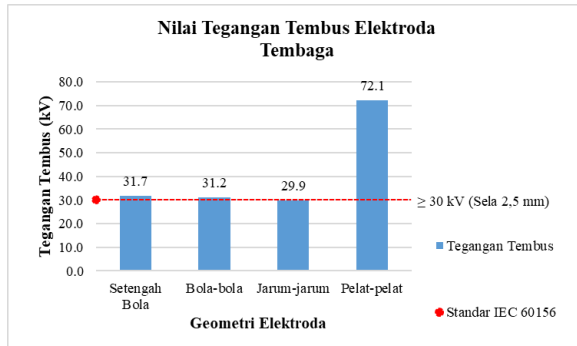


Gambar 18. Grafik Tegangan Tembus Elektroda Stainles Steel

Grafik pada Gambar 18 menunjukkan nilai tegangan tembus elektroda bebahan stainles steel dipengaruhi geometri elektroda dan konduktivitas logam. Nilai tegangan tembus elektroda pelat datar mencapai 45,6 kV, melampaui standar IEC 60156, karena distribusi medan listrik yang merata tanpa konsentrasi medan tinggi. Elektroda jarum dengan ujung tajam hanya 28,2 kV dan tidak memenuhi standar akibat konsentrasi medan yang menyebabkan pelepasan listrik mudah terjadi. Elektroda setengah bola dan bola melengkung menunjukkan tegangan tembus 31,0 kV dan 31,8 kV sehingga sesuai standar. Konduktivitas stainless steel (1,4 MS/m) mendukung distribusi medan merata meski lebih rendah dari tembaga/aluminium.

4.2.2. Elektroda Tembaga

Grafik rata-rata tegangan tembus pada geometri elektroda Tembaga ditunjukkan pada Gambar 19.

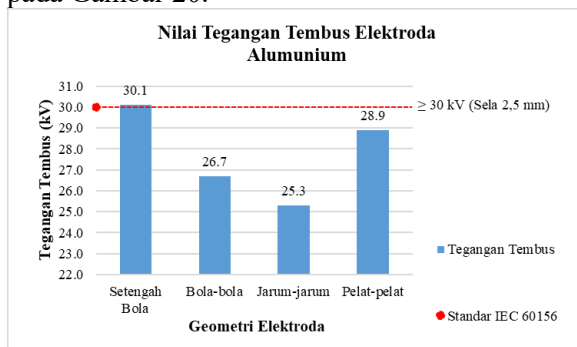


Gambar 19. Grafik Tegangan Tembus Elektroda Tembaga

Grafik pada Gambar 19 menunjukkan nilai tegangan tembus elektroda berbahan tembaga dipengaruhi geometri elektroda dan konduktivitas logam. Elektroda pelat-pelat dengan permukaan datar memiliki tegangan tertinggi (72,1 kV) memenuhi standar IEC 60156 (≥ 30 kV) karena distribusi medan listrik merata. Elektroda jarum yang runcing menghasilkan tegangan terendah (28,2 kV) akibat konsentrasi medan tinggi dan mudah pelepasan listrik, sehingga tidak memenuhi standar. Elektroda setengah bola (31,7 kV) dan bola (31,2 kV) dengan permukaan membulat memenuhi standar karena konsentrasi medan lebih rendah. Konduktivitas tembaga yang tinggi, sekitar 59,6 MS/m membantu meratakan medan listrik, namun bentuk elektroda lebih dominan memengaruhi tegangan tembus.

4.2.3. Elektroda Alumunium

Grafik rata-rata tegangan tembus pada geometri elektroda Alumunium ditunjukkan pada Gambar 20.

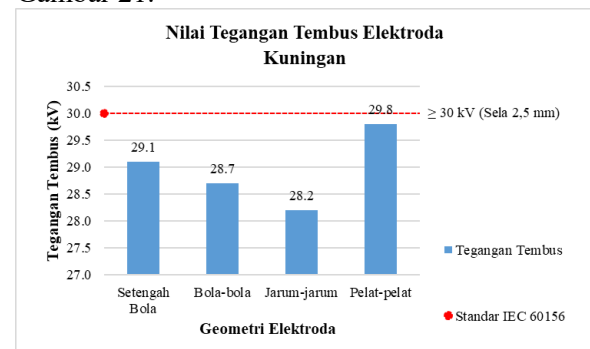


Gambar 20. Grafik Tegangan Tembus Elektroda Alumunium

Grafik pada Gambar 20 menunjukkan nilai tegangan tembus elektroda berbahan alumunium dipengaruhi geometri elektroda dan konduktivitas logam. Elektroda setengah bola memiliki tegangan tertinggi 30,1 kV dan memenuhi standar IEC 60156 (≥ 30 kV) karena permukaan membulat dengan radius kelengkungan besar yang mengurangi konsentrasi medan listrik. Elektroda pelat-pelat dengan permukaan datar memiliki tegangan tembus 28,9 kV, sedikit di bawah standar, kemungkinan karena ketidaksempurnaan permukaan. Elektroda bola-bola dan jarum-jarum memiliki tegangan tembus masing-masing 26,7 kV dan 25,3 kV, keduanya di bawah standar, terutama jarum karena ujung runcing yang menimbulkan konsentrasi medan tinggi dan mempercepat pelepasan listrik. Konduktivitas aluminium yang relatif tinggi (37,7 MS/m) membantu mencegah penumpukan medan listrik berlebih, namun perbedaan tegangan tembus lebih dipengaruhi oleh geometri dan kondisi permukaan elektroda. Elektroda dengan permukaan halus dan radius kelengkungan besar cenderung memiliki tegangan tembus lebih tinggi.

4.2.4. Elektroda Kuningan

Grafik rata-rata tegangan tembus pada geometri elektroda Kuningan ditunjukkan pada Gambar 21.



Gambar 21. Grafik Tegangan Tembus Elektroda Kuningan

Grafik pada Gambar 21 menunjukkan nilai tegangan tembus elektroda berbahan kuningan dipengaruhi geometri elektroda dan konduktivitas logam. Nilai tegangan tembus elektroda kuningan dengan berbagai geometri (setengah bola, bola-bola, jarum-jarum, dan pelat-pelat) berkisar antara 28,2–29,8 kV, di bawah standar IEC 60156 (≥ 30 kV untuk celah 2,5 mm). Hal ini disebabkan oleh permukaan

elektroda yang kasar, kemungkinan adanya oksida atau kontaminan, dan konduktivitas rendah (1,7 MS/m), yang menyebabkan konsentrasi medan listrik tinggi di titik tertentu. Elektroda berbentuk jarum menghasilkan tegangan tembus terendah, sedangkan pelat menghasilkan yang tertinggi. Sebaliknya, elektroda dari tembaga, aluminium, dan stainless steel, dengan konduktivitas lebih tinggi dan permukaan lebih halus, mampu mendistribusikan medan listrik lebih merata dan menghasilkan tegangan tembus yang memenuhi atau melampaui standar IEC.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat di simpulkan sebagai berikut:

1. Nilai tegangan tembus minyak trafo nynas dipengaruhi oleh geometri elektroda dan konduktivitas logam.
2. Elektroda pelat datar dari tembaga (72,1 kV) dan stainless steel (45,6 kV), serta elektroda setengah bola dan bola dari tembaga, aluminium, dan stainless steel dengan tegangan tembus antara 30,1 kV hingga 31,8 kV memenuhi standar IEC 60156. Sedangkan, elektroda pelat dari aluminium (28,9 kV) dan kuningan (29,8 kV), setengah bola dan bola dari kuningan dan aluminium (26,7–29,2 kV), serta semua elektroda jarum dari berbagai logam dengan tegangan tembus antara 25,3 kV hingga 28,2 kV tidak memenuhi standar IEC.
3. Konduktivitas logam seperti tembaga (59,6 MS/m) dan aluminium (37,7 MS/m) umumnya membantu meratakan medan listrik, sehingga mendukung peningkatan tegangan tembus. Meskipun stainless steel memiliki konduktivitas lebih rendah (sekitar 1,4 MS/m), hasil pengujian menunjukkan bahwa elektroda berbahan ini tetap menghasilkan tegangan tembus yang tinggi, terutama pada bentuk pelat, kemungkinan karena faktor lain seperti geometri yang stabil dan permukaan yang halus. Sebaliknya, ujung tajam dan permukaan kasar, terutama pada logam berkonduktivitas rendah seperti kuningan (1,7 MS/m), menyebabkan konsentrasi medan tinggi dan penurunan tegangan tembus.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak laboratorium tegangan tinggi yang telah memberikan fasilitas dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini, serta kepada dosen pembimbing dan rekan-rekan yang turut memberikan masukan, arahan, dan bantuan sehingga penelitian serta penulisan jurnal ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Karthik, R. S. S. Nuvvula, C. Dhanamjayulu, and B. Khan, "Appropriate analysis on properties of various compositions on fluids with and without additives for liquid insulation in power system transformer applications," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–19, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-68714-y.
- [2] M. Seghir, T. Seghier, B. Zegnini, and A. Rabhi, "Breakdown voltage measurement in insulating oil of transformer according to IEC standards," *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 681, no. September 2020, pp. 543–551, 2021, doi: 10.1007/978-981-15-6259-4_57.
- [3] M. Hussain, F. A. Mir, and M. A. Ansari, "Nanofluid transformer oil for cooling and insulating applications: A brief review," *Appl. Surf. Sci. Adv.*, vol. 8, p. 100223, 2022, doi: 10.1016/j.apsadv.2022.100223.
- [4] D. Gea, H. Gunawan, and D. Lesmana, "Analysis of Power Transformer Oil Insulation Capability Against Breakdown Voltage Due to Temperature and Loading," *J. Comput. Sci. Inf. Technol. Telecommun. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 807–816, 2025, doi: 10.30596/jcositte.v6i1.23674.
- [5] G. Rallis, R. Sarathi, and G. Danikas, "Dielectric Strength of Transformer Oil of Various Qualities," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 201–205, 2021, doi: 10.25103/jestr.141.24.
- [6] P. S. Pakianathan and R. V. Maheswari, "Breakdown Voltage Prediction by Utilizing the Behavior of Natural Ester for Transformer Applications," *Intell. Autom. Soft Comput.*, vol. 35, no. 3, pp. 2717–2736, 2023, doi: 10.32604/iasc.2023.029950.
- [7] S. Abdi, N. Harid, B. B. Achraf, A. Haddad, and A. Boubakeur, "Comprehensive Assessment of Transformer Oil After Thermal Aging: Modeling for Simultaneous Evaluation of Electrical and Chemical Characteristics," *Energies*, vol. 18, no. 8, pp. 1–16, 2025, doi: 10.3390/en18081915.
- [8] M. F. Rahman, P. Nirgude, and N. R. Burjupati, "Effect of irregular-shaped Cu particles on transformer oil PD characteristics under

- varying electrode configurations,” *IET Sci. Meas. Technol.*, 2019.
- [9] Q. Yang, Y. Jin, W. Sima, and M. Liu, “Effect of the electrode material on the breakdown voltage and space charge distribution of propylene carbonate under impulse voltage,” *AIP Adv.*, vol. 6, no. 4, 2016, doi: 10.1063/1.4948441.
 - [10] H. Akca, O. Aarikan, C. Kocatepe, C. F. Kumru, and R. Ayaz, “Breakdown Strength Analysis of the Transformer Oe6-06,” *Conf. Pap.*, no. August, pp. 1343–1347, 2013.
 - [11] D. Gunawan, M. Suyanto, and W. Handajadi, “Pengujian Tegangan Tembus Minyak Trafo Dengan Elektroda Setengah Bola, Batang dan Jarum,” *J. Elektr. Vol. 2 No.2*, vol. 2, pp. 70–78, 2015.
 - [12] M. Alim, A. Gunawan, L. M. K. Amali, and A. I. Tolago, “Uji Kelayakan Minyak Jarak Sebagai Bahan Isolasi Cair Pada Transformator,” *J. Media Elektr.*, vol. 19, no. 3, pp. 139–143, 2022, doi: 10.59562/metrik.v19i3.5464.
 - [13] N. Rosyidi and Deki, “Pengujian Tegangan Tembus Pada Minyak Trafo,” *Sinusoida*, vol. XXIII No., no. 2, pp. 1–31, 2021.
 - [14] IEC 60156, “International Standard,” vol. 2025, 2025.
 - [15] S. Rahayu, R. Okvasari, and R. A. Diantari, “Pengujian Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator 60 MVA Di GIS Kebun Jeruk,” *J. Ilm. SUTET*, vol. 9, no. 1, pp. 46–55, 2019, doi: 10.33322/sutet.v9i1.495.
 - [16] L. M. K. Amali, M. Yasin, T. I. Yusuf, and N. E. Ntobuo, “Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Trafo Shell Diala B Menggunakan Material Elektroda Berbahan Stainles Steel, Kuningan, Tembaga Dan Alumunium,” *J. Renew. Energy Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 7–10, 2024, doi: 10.56190/jree.v2i1.24.
 - [17] C. P. Maharani, I. M. A. Nrratha, S. I. Nugroho, and A. Hasibuan, “PENGUJIAN TEGANGAN TEMBUS MINYAK TRAFO PADA BAY TRAFO 1 DI GI 150 kV TANJUNG,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 3, 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4347.