

Info Publikasi:

Artikel Hasil Penelitian

doi: <https://doi.org/10.56190/jree.v3i1.55>

Dikirim : 13 Juni 2025

Diterima : 01 Juli 2025

Dipublikasikan : 02 Juli 2025

STUDI TEGANGAN TEMBUS MATERIAL ELEKTRODA DALAM MEDAN LISTRIK SERAGAM PADA MEDIUM ISOLASI UDARA**Aco Karim¹, Lanto Mohamad Kamil Amali^{*2}, Yasin Mohamad³, Jumiati Ilham⁴,
Nova Elysia Ntobuo⁵**^{1,2,3,4}Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Negeri Gorontalo⁵Fakultas MIPA, Jurusan Pendidikan IPA, Universitas Negeri GorontaloEmail: kamilamali@ung.ac.id^{*2)}

Indonesia

ABSTRACT

Breakdown voltage is one of the important parameters in an electrical insulation system that determines the limit of a medium's ability to withstand an electric field before an electric discharge (breakdown) occurs. The electrode material used in a high-voltage system greatly affects the distribution of the electric field and the resulting breakdown voltage value. Therefore, this study was conducted to examine the breakdown voltage characteristics of various types of electrode materials in a uniform electric field. This study specifically compares four types of metals, namely stainless steel, aluminum, copper, and brass, which are commonly used in electrical applications. Tests were conducted experimentally in the High Voltage Laboratory using ball-ball, needle-needle, and plate-plate electrode configurations in air. The test results show that the electrode material has a significant effect on the magnitude of the breakdown voltage. Stainless steel consistently shows the best performance with the highest breakdown voltage values in all configurations, namely 8.07 kV (balls), 8.21 kV (needles), and 6.37 kV (plates). In contrast, copper produces the lowest breakdown voltage, especially in the plate-plate configuration of 3.27 kV. Aluminum and brass showed varying results, but were still below the performance of stainless steel.

Keywords: *breakdown voltage, electrode, uniform electric field, stainless steel, aluminum, copper, brass*

ABSTRAK

Tegangan tembus merupakan salah satu parameter penting dalam sistem isolasi listrik yang menentukan batas kemampuan suatu medium dalam menahan medan listrik sebelum terjadi pelepasan muatan listrik (breakdown). Material elektroda yang digunakan dalam sistem bertegangan tinggi sangat mempengaruhi distribusi medan listrik dan nilai tegangan tembus yang dihasilkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji karakteristik tegangan tembus dari berbagai jenis material elektroda dalam medan listrik seragam. Studi ini secara khusus membandingkan empat jenis logam, yaitu stainless steel, aluminium, tembaga, dan kuningan, yang umum digunakan dalam aplikasi kelistrikan. Pengujian dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Tegangan Tinggi dengan menggunakan konfigurasi elektroda bola-bola, jarum-jarum, dan pelat-pelat pada medium udara. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material elektroda memiliki pengaruh signifikan terhadap besar tegangan tembus. Stainless steel secara konsisten menunjukkan performa terbaik dengan nilai tegangan tembus tertinggi pada semua konfigurasi, yakni 8,07 kV (bola-bola), 8,21 kV (jarum-jarum), dan 6,37 kV (pelat-pelat). Sebaliknya, tembaga menghasilkan tegangan tembus terendah, khususnya pada

konfigurasi pelat-pelat sebesar 3,27 kV. Aluminium dan kuningan menunjukkan hasil yang bervariasi, namun masih di bawah performa stainless steel.

Kata kunci: tegangan tembus, elektroda, medan listrik seragam, stainless steel, aluminium, tembaga, kuningan

1. PENDAHULUAN

Tegangan tembus (breakdown voltage) merupakan fenomena penting dalam sistem isolasi listrik yang terjadi saat medan listrik melebihi kekuatan dielektrik suatu medium, yang dalam konteks ini adalah udara, sehingga menyebabkan medium tersebut kehilangan sifat isolatifnya dan mulai menghantarkan arus listrik secara mendadak [1].

Dalam sistem kelistrikan bertegangan tinggi, khususnya dalam kondisi medan listrik seragam, udara sebagai medium isolasi banyak digunakan karena ketersediaannya yang melimpah dan sifat dielektriknya yang cukup baik dalam tekanan normal [2]. Namun, kemampuan udara dalam menahan tegangan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kelembapan, tekanan udara, dan terutama sifat material elektroda yang bersentuhan langsung dengan medan listrik tersebut [3]. Penelitian ini berfokus pada karakteristik tegangan tembus dalam udara antara elektroda logam seperti stainless steel (SS), kuningan (Brass), tembaga (Cu) dan aluminium (Al), yang masing-masing memiliki karakteristik konduktivitas listrik, kekasaran permukaan, dan ketahanan oksidasi yang berbeda [4] [5]. Misalnya, tembaga memiliki konduktivitas tinggi yang memungkinkan pembentukan medan tajam di ujung elektroda, berpotensi menurunkan tegangan tembus udara [6], sementara stainless steel, meskipun lebih tahan korosi, memiliki struktur permukaan yang cenderung kasar akibat lapisan pasivasi alami yang terbentuk, sehingga dapat memicu ionisasi lebih awal [7]. Studi menunjukkan bahwa kekasaran mikro pada permukaan elektroda menyebabkan non-uniformitas lokal medan listrik, yang mendorong terjadinya pelepasan muatan awal (pre-breakdown discharge) pada udara sebelum tegangan tembus tercapai secara keseluruhan [8]. Dalam medan listrik seragam, distribusi potensial pada udara antara dua elektroda sangat tergantung pada bentuk dan material elektroda tersebut, karena fenomena seperti efek ujung (tip effect) dan konsentrasi muatan dapat menimbulkan lonjakan medan di area tertentu [9]. Selain itu, udara sebagai medium juga sangat sensitif terhadap partikel debu dan kelembapan, yang bisa menurunkan kekuatan dielektriknya, bahkan hingga 30% dalam kondisi lingkungan lembap [10] [11]. Untuk menganalisis karakteristik tegangan tembus secara akurat, maka pengujian dilakukan dalam kondisi atmosfer standar dengan kelembapan terkontrol dan suhu ruangan stabil agar efek dari variabel lingkungan diminimalkan [12]. Dalam pendekatan eksperimental, tegangan tembus diukur dengan menaikkan tegangan AC perlahan antara elektroda hingga terjadi loncatan listrik di udara, yang ditandai oleh kilatan atau suara letupan disertai perubahan mendadak atau lonjakan tegangan [13]. Hasil dari pengujian ini penting dalam pengembangan sistem isolasi udara terbuka di mana pemilihan material elektroda yang tepat dapat memperpanjang usia isolasi udara dan mengurangi risiko flashover [14].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif untuk mengkaji karakteristik tegangan tembus (breakdown voltage) pada berbagai bentuk geometri elektroda dan jenis material elektroda, yaitu stainless steel (SS), kuningan (Brass), tembaga (Cu) dan aluminium (Al), dalam kondisi medan listrik seragam dan menggunakan medium udara sebagai media isolasi. Konfigurasi bentuk elektroda digunakan dalam pengujian yaitu elektroda bola-bola, pelat-pelat dan jarum-jarum. Adapun bentuk geometri serta jenis material elektroda tersebut diperlihatkan pada Gambar 1. Elektroda Pengujian.



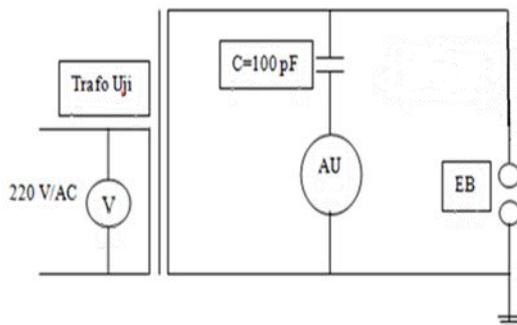
Gambar 1. Elektroda pengujian

Keempat material logam elektroda pengujian disiapkan dalam dimensi yang diperlihatkan pada Tabel 1. Ukuran Geometris Elektroda Uji

Tabel 1. Ukuran Geometris Elektroda Uji

Elektroda	Diameter (cm)				Tebal (cm)				Panjang (cm)			
	SS	Al	Cu	Brass	SS	Al	Cu	Brass	SS	Al	Cu	Brass
Bola	1.9	2.9	1.5	2.4								
Jarum	1.4	1.4	1.4	4.5					5.1	4.8	4.7	4.6
Pelat	4.9	4.4	4.5	1.4	5	1.1	9	9				

Pengujian dilakukan pada laboratorium tegangan tinggi menggunakan HVAC (High Voltage Alternating Current) power supply berkapasitas hingga 100 kV, dan pengukuran tegangan tembus dilakukan dengan voltmeter digital terkalibrasi. Suhu ruangan dijaga agar tetap konstan pada suhu 28 ± 2 °C. Adapun skema rangkaian pengujian tegangan tembus dari pengujian elektroda seragam pada medium udara ditunjukkan pada Gambar 2. Skema Pengujian Elektroda.



Keterangan :

- Trafo : Trafo tegangan tinggi, 220 V/100 kV
- C : Kapasitor tegangan tinggi, 100 pF
- EB : Elektroda Pengujian jarak 2,5 mm
- AU : Alat ukur tegangan tembus (kV)

Gambar 2. Rangkaian Pengujian Elektroda

Jarak antar elektroda pengujian untuk masing-masing bentuk 2,5 mm. Dalam setiap pengujian, tegangan dinaikkan secara bertahap dengan laju 1 kV/s hingga terjadi loncatan listrik (breakdown), yang ditandai dengan suara letupan atau kilatan cahaya kecil yang terjadi pada elektroda yang diuji disertai lonjakan tegangan yang terdeteksi oleh alat ukur. Nilai tegangan saat terjadi loncatan dicatat sebagai tegangan tembus [13]. Untuk menjaga keakuratan data, pengujian dilakukan sebanyak 10 kali untuk setiap jenis logam dan bentuk elektroda, sehingga diperoleh total 120 data (4 logam × 3 bentuk × 10 pengujian).

Data hasil eksperimen dianalisis dengan referensi literatur terkait fenomena ionisasi dan pelepasan muatan dalam sistem elektroda logam untuk memvalidasi kesesuaian eksperimen dengan teori yang ada [8] [15]

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian tegangan tembus dilakukan di laboratorium tegangan tinggi AC, dilengkapi dengan peralatan yang mampu menghasilkan tegangan tinggi AC hingga 100 kV pada frekuensi 50 Hz. Kondisi pengujian dipertahankan pada suhu ruangan stabil sekitar 28°C, dengan asumsi bahwa fluktuasi suhu tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil pengujian. Elektroda bola-bola dirancang untuk menghasilkan distribusi medan listrik yang homogen, elektroda jarum-jarum untuk medan yang terfokus, dan elektroda pelat-pelat untuk medan seragam pada permukaan yang lebih luas. Nilai rata-rata tegangan tembus yang diperoleh dari pengujian menunjukkan variasi yang signifikan tergantung pada material dan konfigurasi elektroda yang digunakan.

1. Elektroda Bola-Bola

Hasil pengujian tegangan tembus untuk konfigurasi elektroda bola-bola disajikan pada Tabel 2. Tegangan Tembus Rata-rata Elektroda Bola-Bola

Tabel 2. Tegangan Tembus Rata-rata Elektroda Bola-Bola.

Tegangan tembus (kV)			
Stainless steel	Kuningan	Tembaga	aluminium
8.07	4.19	6.02	6.34

Dari Tabel 1, terlihat bahwa elektroda berbahan stainless steel menunjukkan nilai tegangan tembus rata-rata tertinggi sebesar 8.07 kV. Ini diikuti oleh aluminium (6.34 kV), tembaga (6.02 kV), dan kuningan dengan nilai terendah sebesar 4.19 kV. Perbedaan signifikan ini menunjukkan bahwa stainless steel memiliki kemampuan menahan tegangan tertinggi sebelum terjadinya breakdown pada konfigurasi bola-bola.

Faktor-faktor yang berkontribusi terhadap perbedaan ini meliputi emisivitas permukaan, kekasaran permukaan, dan efek geometri elektroda. Stainless steel umumnya memiliki permukaan yang lebih halus dibandingkan kuningan, tembaga, dan aluminium. Permukaan yang lebih halus dapat mengurangi konsentrasi medan listrik di ujung elektroda, sehingga meningkatkan tegangan tembus. Emisivitas permukaan material juga bervariasi, dengan stainless steel memiliki rentang 0.1-0.8, kuningan 0.03-0.61, tembaga 0.02-0.88, dan aluminium 0.02-0.94. Efek geometri, seperti diameter elektroda, juga memengaruhi distribusi medan listrik. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan diameter elektroda bola-bola dapat meningkatkan tegangan tembus.

2. Elektroda Jarum-jarum

Hasil pengujian tegangan tembus untuk konfigurasi elektroda jarum-jarum ditampilkan pada Tabel 3. Tegangan Tembus Rata-rata Elektroda Jarum-Jarum

Tabel 3. Tegangan Tembus Rata-rata Elektroda Jarum-Jarum

Tegangan tembus (kV)			
Stainless steel	Kuningan	Tembaga	aluminium
6.37	5.81	3.27	4.90

Pada konfigurasi jarum-jarum, elektroda stainless steel kembali menunjukkan nilai tegangan tembus tertinggi sebesar 8.21 kV. Aluminium menempati posisi kedua dengan 8.04 kV, diikuti oleh tembaga 6.96 kV, dan kuningan dengan nilai terendah 6.69 kV.

Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh sifat fisis dan termal bahan elektroda, seperti konduktivitas termal dan kekasaran permukaan. Bahan dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi, seperti tembaga, cenderung mengalami pemanasan lebih cepat pada ujung elektroda, yang dapat menyebabkan pelepasan parsial dan menurunkan tegangan tembus. Sebaliknya, stainless steel dengan konduktivitas termal yang lebih rendah, cenderung memiliki tegangan tembus yang lebih tinggi karena pemanasan ujung elektroda yang lebih lambat. Kekasaran permukaan elektroda juga penting; permukaan yang lebih halus, seperti pada stainless steel, mengurangi konsentrasi medan listrik di ujung elektroda dan meningkatkan tegangan tembus.

3. Elektroda Pelat-pelat

Hasil pengujian tegangan tembus untuk konfigurasi elektroda pelat-pelat disajikan pada Tabel 4. Tegangan Tembus Rata-rata Elektroda Pelat-Pelat.

Tabel 4. Tegangan Tembus Rata-rata Elektroda Pelat-Pelat

Tegangan tembus (kV)			
Stainless steel	Kuningan	Tembaga	aluminium
6.37	5.81	3.27	4.90

Pada konfigurasi pelat-pelat, stainless steel kembali menunjukkan nilai tegangan tembus tertinggi sebesar 6.37 kV. Kuningan menempati urutan berikutnya dengan 5.81 kV, diikuti oleh aluminium 4.90 kV, dan tembaga dengan nilai terendah hanya 3.27 kV.

Perbedaan nilai tegangan tembus pada konfigurasi pelat-pelat juga dipengaruhi oleh sifat fisis dan termal dari masing-masing bahan elektroda. Meskipun stainless steel bukan konduktor listrik terbaik, stabilitas termal yang tinggi dan permukaan yang relatif halus membantu mengurangi konsentrasi medan listrik di tepi elektroda. Sebaliknya, tembaga dengan konduktivitas listrik yang tinggi lebih mudah menghantarkan panas, sehingga lebih rentan terhadap pelepasan muatan lokal yang dapat menurunkan tegangan tembus secara keseluruhan. Hasil ini menegaskan bahwa sifat material elektroda sangat berperan penting dalam menentukan kinerjanya dalam pelepasan muatan, sehingga pemilihan bahan elektroda yang tepat krusial dalam aplikasi kelistrikan.

Pengujian tegangan tembus pada berbagai material (stainless steel, kuningan, tembaga, aluminium) dan konfigurasi elektroda (bola-bola, jarum-jarum, pelat-pelat) memberikan gambaran yang jelas mengenai performa tiap material dalam menahan medan listrik tinggi sebelum terjadinya breakdown. Secara umum, dari ketiga konfigurasi elektroda, stainless steel secara konsisten menunjukkan nilai tegangan tembus tertinggi, menandakan kestabilan material ini dalam berbagai bentuk elektroda. Aluminium dan tembaga menunjukkan performa yang kompetitif, sementara kuningan cenderung memberikan nilai lebih rendah, terutama pada elektroda bola-bola dan jarum.

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa material dan konfigurasi elektroda mempengaruhi tegangan tembus pada isolasi udara. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa logam-logam tersebut, khususnya tembaga dan aluminium, telah lama digunakan dalam aplikasi kelistrikan karena kemampuan konduktivitas listriknya yang baik serta ketahanan terhadap degradasi akibat paparan medan listrik tinggi. Temuan-temuan ini juga diperkuat oleh beberapa penelitian misalnya penelitian yang dilakukan oleh Hussian *et al.* 2022 menunjukkan bahwa bahan elektroda mempengaruhi tegangan tembus pada isolasi udara dimana perubahan kelembaban dapat mempengaruhi tegangan tembus pada elektroda jenis rod-to-rod dan sphere-to-sphere [16]. Penelitian yang dilakukan oleh Akin *et al.* 2022 menunjukkan bahwa konfigurasi elektroda dan bahan elektroda mempengaruhi tegangan tembus pada berbagai jenis material isolasi [17]. Kemiripan hasil pengujian laboratorium ini dengan temuan literatur ilmiah memberikan validasi yang kuat terhadap

keandalan material logam sebagai bahan utama dalam komponen sistem tegangan tinggi. Pemilihan material yang tepat, didukung oleh data empiris dan hasil penelitian terdahulu, merupakan faktor kunci dalam menjamin keselamatan dan efisiensi sistem kelistrikan bertegangan tinggi.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, disimpulkan bahwa material elektroda memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai tegangan tembus udara pada berbagai konfigurasi elektroda. Secara konsisten, stainless steel menunjukkan performa terbaik dengan nilai tegangan tembus tertinggi pada konfigurasi bola-bola (8,07 kV), jarum-jarum (8,21 kV), dan pelat-pelat (6,37 kV). Sebaliknya, tembaga cenderung menghasilkan tegangan tembus terendah, khususnya pada konfigurasi pelat-pelat (3,27 kV). Hasil ini mengindikasikan bahwa stainless steel adalah material yang paling efektif untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan tegangan tembus yang tinggi, sementara kuningan dan aluminium menunjukkan performa yang bervariasi namun umumnya lebih rendah dibandingkan stainless steel.

Saran

Eksperimen lebih lanjut dapat dilakukan dengan konfigurasi elektroda yang lebih bervariasi atau yang tak seragam untuk mengetahui bagaimana bentuk elektroda mempengaruhi distribusi medan listrik dan tegangan tembus udara

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan ilmu yang telah diberikan selama proses penyusunan penelitian ini. Terima kasih juga saya sampaikan kepada seluruh staf Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Gorontalo, atas bantuan, dukungan teknis, serta fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian. Segala kontribusi dan dukungan yang diberikan sangat berarti dan membantu kelancaran penelitian ini. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan menjadi amal jariyah dan mendapatkan balasan dari Tuhan Yang Maha Esa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. M. Meek and J. D. Craggs, *Electrical Breakdown of Gases*. John Wiley & Sons., 1978.
- [2] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering*. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [3] Y. Liu, "Study on Breakdown Probability of Multimaterial Electrodes in EDM," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1155/2018/2961879>.
- [4] C. Serafim, "Plasma treated metals and vacuum breakdown behaviour," 2025.
- [5] S. Gopalakannan and T. Senthilvelan, "No Title," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, 2021.
- [6] C. Haron, "Copper and graphite electrodes performance in electrical discharge machining," *J. Mater. Process. Technol.*, 2008.
- [7] Y. Pachaury and P. Tandon, "An overview of Electrical Discharge Machining of Ceramics," *J. Manuf. Process.*
- [8] Q. Yang, "Electrode material effect on breakdown and space charge," 2016, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4948441>.
- [9] A. Ratkus, "Vacuum arc breakdown in pure copper electrodes," 2024.
- [10] S. Ray, "An Introduction to High Voltage Engineering," *PHI Learn.*, 2013.
- [11] I. I. Kalyatskii, G. M. Kassirov, and G. V Smirnov, "Prib Tekh," 1974.
- [12] *IEEE Guide for the Design and Testing of Oil-Immersed Transformers*. IEEE Power Engineering Society, 2013.

- [13] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers*. Cengage Learning, 2010.
- [14] C. P. Mohanty, *Intelligent approach for EDM using QPSO*. Engineering Science and Technology, 2017.
- [15] Y. Liu, *Breakdown probability of multimaterial electrodes*. in Materials Science and Engineering, 2018.
- [16] M. Hussian, "Analysis of DC Breakdown Characteristics in Different Types Electrodes," 2022, [Online]. Available: Academia.edu
- [17] S. Akin, "Analysis of breakdown mechanism based on contact area and field enhancement factor of different electrode-material combinations," *Int. J. Energy Res.*, 2022.