

Pengaruh Variasi Celah Udara dan Material Terhadap Tegangan Tembus serta Medan Listrik pada Burbar dan Penghantar

Andi Dyah Harum Hardyanti¹, Tony Koerniawan^{1*}, Muhammad Ilham Amba¹, Johana Claudia Lbn Tobing¹, Ayu Febrina Rizal², Evi Suhaevi²

¹Institut Teknologi PLN Jakarta, Jl. Lebak Bulus Tengah No.5 2, RT10/RW4, Cilandak Barat, Cilandak, Jakarta Selatan 12430.

²Universitas Bung Karno, Jalan Kimia No. 20, RT.10/RW.1, Kelurahan Pegangsaan, Kecamatan Menteng, Kota Jakarta Pusat, DKI Jakarta, Indonesia 10320.

Email Korespondensi: tony.koerniawan@itpln.ac.id

Abstrak

Busbar dan penghantar merupakan komponen penting dalam sistem tenaga listrik yang memanfaatkan udara sebagai media isolasi utama pada bagian yang tidak memiliki isolasi padat. Adanya celah udara pada sambungan maupun antar konduktor dapat menyebabkan terjadinya tegangan tembus (breakdown voltage) apabila medan listrik yang terbentuk melebihi kemampuan isolasi udara. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jarak celah udara, jenis material, ketebalan busbar, dan luas penampang penghantar terhadap tegangan tembus dan medan listrik. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengujian komparatif menggunakan objek uji yang menyerupai komponen sistem tenaga listrik, yaitu busbar aluminium, busbar tembaga, penghantar AAAC, dan penghantar ACSR, dengan variasi celah udara serta konfigurasi geometri yang berbeda. Metode penelitian dilakukan melalui pengujian breakdown voltage pada media isolasi udara dengan variasi jarak celah 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm, dan 3 cm. Hasil pengujian dikoreksi terhadap kondisi udara standar menggunakan faktor koreksi udara, kemudian digunakan untuk menghitung tegangan tembus standar dan medan listrik rata-rata. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan jarak celah udara menyebabkan kenaikan nilai tegangan tembus dan penurunan medan listrik rata-rata. Pada penghantar ACSR 250 mm², nilai tegangan tembus meningkat dari 9,87 kV pada jarak 1 cm menjadi 23,95 kV pada jarak 3 cm. Pada busbar aluminium posisi 1 dengan ketebalan 0,635 cm, tegangan tembus meningkat dari 13,03 kV menjadi 28,20 kV ketika jarak celah meningkat dari 1 cm menjadi 3 cm. Perbedaan karakteristik tegangan tembus juga teramati pada variasi material, ketebalan busbar, dan konfigurasi posisi busbar, yang menunjukkan bahwa geometri elektroda dan distribusi medan listrik berpengaruh terhadap proses breakdown pada media udara. Hasil penelitian ini memberikan data eksperimental awal mengenai karakteristik tegangan tembus pada komponen yang umum digunakan dalam sistem tenaga listrik serta dapat menjadi referensi dalam perancangan jarak isolasi udara pada sambungan busbar dan penghantar.

Kata kunci: Busbar; Penghantar; Celah Udara; Tegangan Tembus; Medan Listrik.

The Effect of Air Gap and Material Variations on Breakdown Voltage and Electric Field in Busbars and Conductors

Abstract

Busbars and conductors are essential components in power systems that rely on air as the primary insulating medium in sections without solid insulation. Air gaps between conductors or connection points may lead to breakdown voltage when the resulting electric field exceeds the dielectric strength of air. This study aims to analyze the effects of air-gap distance, material type, busbar thickness, and conductor cross-sectional area on breakdown voltage and electric field characteristics. The novelty of this study lies in the comparative testing of actual power-system components, including aluminum busbars, copper busbars, AAAC conductors, and ACSR conductors, with variations in air-gap distance and geometric configurations. The research was conducted using a breakdown voltage testing method with air-gap variations of 1 cm, 1.5 cm, 2 cm, 2.5 cm, and 3 cm. The measured results were corrected to standard atmospheric conditions using an air correction factor and subsequently used to calculate standard breakdown voltage and average electric field values. The results indicate that increasing the air-gap distance leads to higher breakdown voltage and lower average electric field values. For the ACSR 250 mm² conductor, the breakdown voltage increased from 9.87 kV at a 1 cm gap to 23.95 kV at a 3 cm gap. For the 0.635 cm aluminum busbar in position 1, the breakdown voltage increased from 13.03 kV to 28.20 kV as the gap distance increased from 1 cm to 3 cm. Differences in breakdown voltage characteristics were also observed for variations in material type, busbar thickness, and busbar configuration, indicating that electrode geometry and electric field distribution influence the breakdown process in air insulation. The findings provide preliminary experimental data on breakdown voltage characteristics of components commonly used in power systems and may serve as a reference for determining air-insulation clearances in busbar and conductor connections.

Keywords: Busbar; Conductor; Air Gap; Breakdown Voltage; Electric Field.

How to Cite: Hardyanti, A. D. H., Koerniawan, T., Amba, M. I., Tobing, J. C. L., Rizal, A. F., & Suhaevi, E. (2026). Pengaruh Variasi Celah Udara dan Material Terhadap Tegangan Tembus serta Medan Listrik pada Burbar dan Penghantar. *Empiricism Journal*, 7(2), 1360-1371. <https://doi.org/10.36312/ej.v7i2.5329>



PENDAHULUAN

Pada sistem tenaga listrik, busbar maupun penghantar memiliki peran yang sangat penting karena kedua peralatan tersebut berfungsi sebagai media penyalur arus listrik baik dalam skala besar maupun kecil. Pada sambungan busbar dan penghantar sering terjadi gangguan internal akibat adanya celah udara (air gap) yang timbul karena proses pemasangan yang kurang rapat, ketidaksempurnaan kontak mekanis, atau perubahan kondisi operasi. Jika suatu tegangan diberikan pada dua buah konduktor baik pada busbar maupun penghantar yang dipisahkan oleh celah udara, maka akan terbentuk medan listrik pada celah tersebut. Jarak celah udara akan mempengaruhi besarnya tegangan puncak yang diperlukan untuk memicu pelepasan listrik. Pada medan homogen dengan suhu udara 20°C dan tekanan udara 760 mmHg, setiap satu sentimeter celah udara dapat mengalami tegangan percikan (sparkover voltage) sebesar 30 kV (Syamsir, 2001).

Apabila tegangan yang diberikan pada konduktor melebihi kuat medan kritis disruptifnya, maka akan terjadi proses ionisasi pada udara di sekitar permukaan konduktor. Proses ini menyebabkan elektron keluar dari permukaan konduktor sehingga membentuk pelepasan muatan listrik. Tegangan awal yang menyebabkan proses tersebut disebut tegangan inepsi. Pada kondisi tertentu, kegagalan isolasi dapat menyebabkan terjadinya tegangan tembus (breakdown voltage) yang ditandai dengan munculnya flashover maupun sparkover. Flashover merupakan lompatan api yang terjadi di dekat atau sepanjang permukaan isolasi, sedangkan sparkover merupakan percikan listrik yang terjadi melalui media udara akibat kegagalan dielektrik pada celah udara (Supriono, 2014; Syuhada, 2021). Dalam penelitian ini, fenomena yang dikaji lebih difokuskan pada mekanisme tegangan tembus udara (sparkover) yang terjadi akibat adanya celah antar konduktor pada konfigurasi busbar dan penghantar.

Partial Discharge merupakan pelepasan muatan listrik yang terjadi pada sebagian daerah isolasi akibat adanya perbedaan potensial yang tinggi (Reid dkk., 2011). Energi yang dilepaskan akibat Partial Discharge dapat menurunkan kualitas isolasi sehingga pada kondisi tertentu dapat berkembang menjadi kegagalan isolasi total dan menyebabkan flashover. Pada sambungan busbar, kondisi kontak yang kurang baik dapat menimbulkan kenaikan suhu yang melebihi batas standar, yaitu 50°C. Kenaikan suhu tersebut dapat disebabkan oleh pemilihan material yang kurang sesuai, luas kontak yang tidak optimal, atau pemasangan yang kurang rapat sehingga menimbulkan resistansi kontak yang tinggi. Kondisi ini dapat memicu pelepasan listrik dan memperbesar risiko terjadinya sparkover (Suherman & Burmansyah, 2018). Pada sistem Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM), proses Partial Discharge juga menjadi salah satu penyebab utama kegagalan isolasi kabel (Jurjani, 2016). Oleh karena itu, kajian mengenai pengaruh celah udara terhadap tegangan tembus menjadi penting karena fenomena tersebut berkaitan langsung dengan keandalan sambungan pada peralatan sistem tenaga listrik.

Penelitian terdahulu telah banyak mengkaji fenomena tegangan tembus dan Partial Discharge pada berbagai konfigurasi elektroda maupun sistem isolasi. Penelitian yang berjudul "Kajian Tegangan Tembus dan Medan Listrik pada Elektroda Model Tembaga dan Aluminium pada Media Isolasi Udara" melakukan pengujian pada elektroda model dengan variasi jarak antar elektroda dan jenis material untuk mengetahui karakteristik breakdown voltage dan medan listrik (Syuhada, 2021). Penelitian lain dalam Jurnal Teknik berjudul "Analisis dan Risiko Partial Discharge pada Kabel Tegangan Menengah" berfokus pada pengaruh pelepasan muatan terhadap kegagalan kabel menggunakan metode Oscillating Wave Test System (OWTS) (Jurjani, 2016). Selain itu, penelitian dalam Jurnal POLEKTRO berjudul "Pengujian Partial Discharge Konfigurasi Jarum- Plat pada Isolasi Udara Menggunakan Metode Electric Detecting Impedance (RC)" mengkaji parameter magnitude, frekuensi, dan fasa sebagai indikator terjadinya Partial Discharge pada konfigurasi elektroda jarum-plat (Diva dkk., 2020).

Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah memberikan kontribusi penting dalam memahami fenomena tegangan tembus dan Partial Discharge, sebagian besar masih

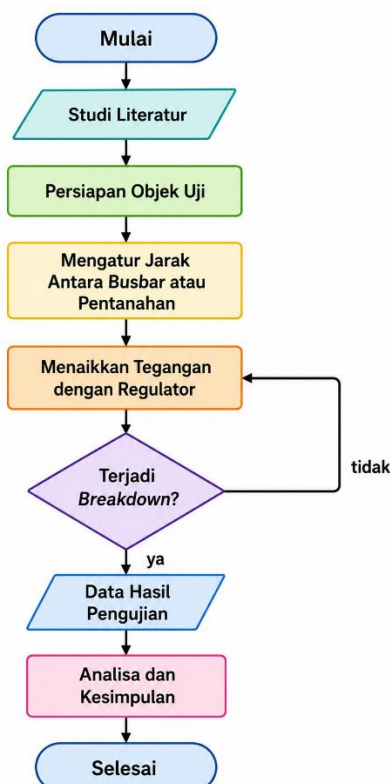
menggunakan model elektroda laboratorium sederhana atau berfokus pada sistem isolasi kabel. Kajian yang menggunakan objek uji yang menyerupai komponen aktual sistem tenaga listrik, seperti busbar dan penghantar distribusi, masih relatif terbatas. Selain itu, penelitian sebelumnya belum banyak membandingkan secara langsung karakteristik tegangan tembus pada busbar aluminium, busbar tembaga, penghantar AAAC, dan penghantar ACSR dengan mempertimbangkan pengaruh variasi celah udara, ketebalan busbar, luas penampang penghantar, serta konfigurasi posisi sambungan. Padahal, parameter-parameter tersebut memiliki pengaruh terhadap distribusi medan listrik dan kemungkinan terjadinya tegangan tembus pada kondisi operasi nyata.

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada pengujian komparatif tegangan tembus udara menggunakan objek uji yang menyerupai komponen sistem tenaga listrik, yaitu busbar aluminium, busbar tembaga, penghantar AAAC, dan penghantar ACSR, dengan variasi celah udara, ketebalan busbar, luas penampang penghantar, serta konfigurasi posisi busbar. Pendekatan ini berbeda dari penelitian sebelumnya yang lebih banyak menggunakan elektroda model sederhana atau berfokus pada Partial Discharge pada sistem kabel. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai karakteristik tegangan tembus pada komponen yang umum digunakan dalam sistem tenaga listrik.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis pengaruh jarak celah udara terhadap tegangan tembus dan medan listrik; (2) membandingkan karakteristik tegangan tembus pada busbar aluminium dan busbar tembaga; (3) menganalisis pengaruh ketebalan busbar terhadap nilai tegangan tembus; (4) menganalisis pengaruh luas penampang penghantar AAAC dan ACSR terhadap karakteristik medan listrik dan tegangan tembus; serta (5) mengevaluasi pengaruh konfigurasi posisi busbar terhadap terjadinya breakdown voltage akibat fenomena sparkover pada media isolasi udara.

METODE

Pengambilan data penelitian dilakukan pada Laboratorium Teknologi dan Peralatan Tegangan Tinggi ITPLN. Data yang didapat secara langsung akan dibandingkan dengan referensi teori yang didapat serta melakukan studi bimbingan kepada dosen pembimbing menyangkut pembahasan dan permasalahan penelitian. Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Mei 2021 sampai dengan Juli 2021.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengkaji karakteristik tegangan tembus (breakdown voltage) pada media isolasi udara dengan objek uji berupa busbar aluminium, busbar tembaga, penghantar AAAC, dan penghantar ACSR. Pengujian difokuskan pada fenomena sparkover udara yang terjadi akibat adanya celah (air gap) antar konduktor. Tegangan uji yang digunakan adalah tegangan AC frekuensi daya (50 Hz) yang diberikan secara bertahap hingga terjadi tegangan tembus. Oleh karena itu, seluruh nilai tegangan tembus yang diperoleh dalam penelitian ini merupakan nilai breakdown voltage pada kondisi tegangan AC, bukan tegangan impuls maupun tegangan DC.

Objek uji busbar dan penghantar dipotong dengan panjang masing-masing 6 cm, sedangkan silinder penyangga dipotong sepanjang 5 cm. Variabel penelitian meliputi jarak celah udara, jenis material konduktor, ketebalan busbar, luas penampang penghantar, dan konfigurasi posisi busbar. Variasi jarak celah udara yang digunakan dalam penelitian adalah 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm, dan 3 cm. Variasi ini digunakan secara konsisten pada seluruh objek uji untuk mengamati pengaruh jarak terhadap nilai tegangan tembus dan medan listrik rata-rata yang dihasilkan.

Busbar dirancang dalam dua konfigurasi posisi yang berbeda. Pada posisi pertama, busbar dipasang sejajar menggunakan silinder penyangga yang dilubangi pada bagian tengah sehingga objek uji dapat dipasang secara simetris. Pada posisi kedua, salah satu sisi silinder dilubangi menggunakan bor sehingga baut, mur, dan ring dapat digunakan untuk membentuk konfigurasi posisi yang berbeda. Penghantar AAAC dan ACSR dipasang menggunakan konfigurasi penghantar yang menyerupai kondisi sambungan konduktor pada sistem tenaga listrik.



Gambar 2. Posisi 1 Busbar



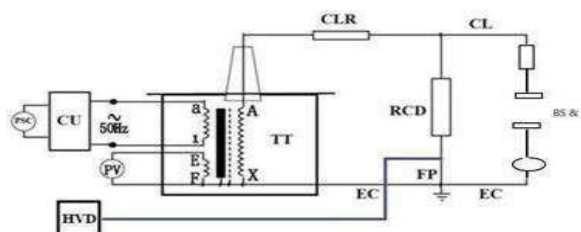
Gambar 3. Posisi 2 Busbar



Gambar 4. Posisi Penghantar

Sebelum pengujian dilakukan, seluruh permukaan objek uji dibersihkan untuk meminimalkan pengaruh kontaminasi permukaan terhadap tegangan tembus. Pengukuran jarak antar konduktor dilakukan menggunakan jangka sorong dengan ketelitian sesuai spesifikasi alat ukur. Setiap kondisi pengujian dilakukan secara berulang untuk memperoleh hasil yang lebih representatif dan mengurangi pengaruh fluktuasi akibat kondisi lingkungan maupun variasi lokal medan listrik.

Prosedur pengujian dilakukan dengan memasang objek uji pada discharge rod dalam posisi saling berhadapan. Selanjutnya dilakukan pengukuran temperatur ruangan, tekanan udara, dan kelembapan relatif sebelum pengujian dimulai. Setelah jarak antar objek uji diatur sesuai variabel yang ditentukan, objek uji dihubungkan dengan sumber tegangan AC melalui sistem pembangkitan tegangan tinggi dan High Voltage Divider. Tegangan dinaikkan secara bertahap melalui control unit hingga terjadi tegangan tembus (breakdown voltage). Nilai tegangan saat terjadinya sparkover dicatat sebagai tegangan tembus untuk kondisi pengujian tersebut.



Gambar 5. Rangkaian Pengujian

Data yang diperoleh merupakan data primer berupa nilai tegangan tembus pada berbagai variasi jarak, jenis material, ketebalan busbar, luas penampang penghantar, dan konfigurasi posisi objek uji. Data tersebut dianalisis secara kuantitatif untuk menentukan pengaruh masing-masing variabel terhadap karakteristik breakdown voltage dan medan listrik rata-rata.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Tegangan Tembus

Untuk memperoleh data dilakukan pengujian di Laboratorium Teknologi dan Peralatan Tegangan Tinggi IT-PLN Jakarta yaitu berupa data tegangan sampai terjadinya tegangan tembus, suhu lalu akan melakukan perhitungan yaitu mencari nilai faktor koreksi udara, tegangan uji isolator pada keadaan udara standar dan medan listrik. Pada pengujian ini menggunakan metode *Breakdown Voltage* dengan variabel pengaruh jarak, karakteristik ketebalan busbar dan luas penampang penghantar serta karakteristik jenis bahan dari busbar dan penghantar.

Seluruh data yang digunakan sebagai dasar analisis dalam penelitian ini harus disajikan secara lengkap, termasuk data busbar aluminium ketebalan 0,3 cm, penghantar ACSR 450 mm², serta objek uji lainnya yang digunakan dalam pembahasan. Penyajian data yang lengkap diperlukan agar seluruh kesimpulan yang diambil dapat ditelusuri dan diverifikasi berdasarkan hasil pengujian yang tersedia.

Pengujian Busbar Aluminium dengan Ketebalan 0,635 cm pada Posisi 1

Objek yang diuji berupa busbar aluminium dengan ketebalan 0,635 cm yang dimulai dari jarak 1 cm dengan suhu 27,7°C dengan tekanan udara standar 760 mmHg. Maka dibutuhkan perhitungan faktor koreksi udara untuk mendapatkan hasil tegangan tembus standar dengan persamaan (3.1):

$$\delta = (0,386 \times P) / (273 + T)$$

$$\delta = (0,386 \times 760 \text{ mmHg}) / (273 + 27,7^\circ\text{C})$$

$$\delta = 0,975590289$$

Lalu menghitung nilai tegangan uji pada keadaan udara standar menggunakan persamaan (3.2):

$$V_s = V / \delta$$

$$V_s = 12,708 \text{ kV} / 0,975590289$$

$$V_s = 13,02595991 \text{ kV}$$

Lalu menghitung nilai medan listrik dengan menggunakan persamaan (3.3):

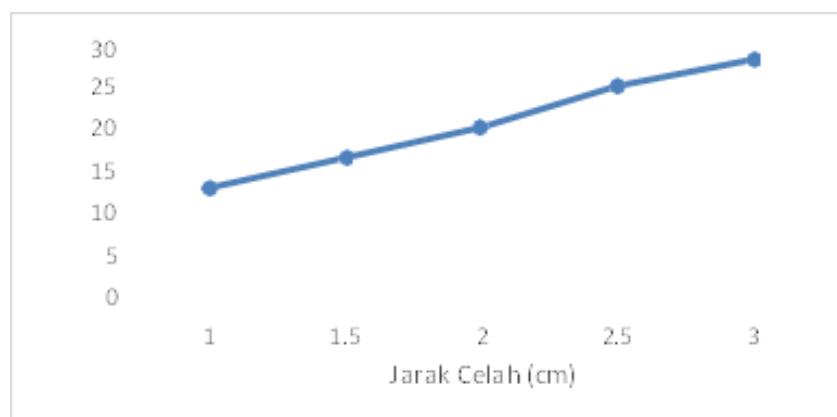
$$E = V_s / d$$

$$E = 13,02595991 \text{ kV} / 1 \text{ cm}$$

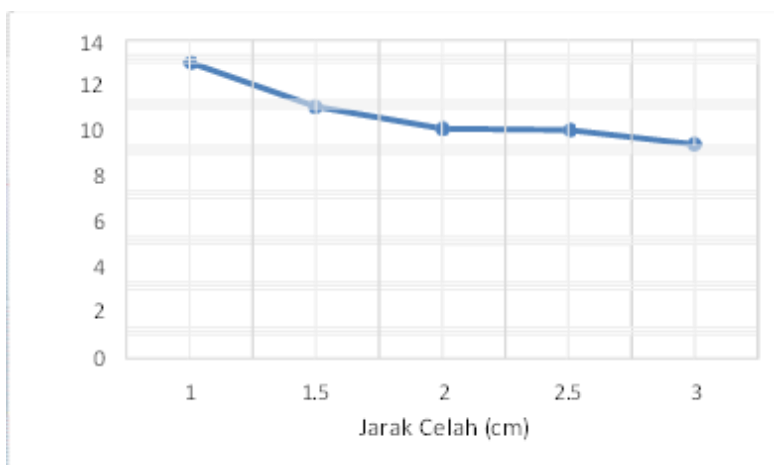
$$E = 13,02595991 \text{ kV/cm}$$

Tabel 1. Hasil perhitungan tegangan tembus pada busbar aluminium 0,635 cm dengan posisi 1.

Jarak Celah (cm)	Objek Uji	Suhu (°C)	V (kV)	Vs (kV)	Faktor Koreksi Medan Listrik Udara	
1	Busbar	27,7	12.708	13.02595991	0.975590289	13.0259599
1,5	Aluminium	27,7	16.2	16.60533133	0.975590289	11.0702209
2	0,635 cm	27,7	19.7	20.19290292	0.975590289	10.0964515
2,5	pada posisi	27,8	24.506	25.12750477	0.975265957	10.0510019
3	1	27,8	27.502	28.19948732	0.975265957	9.39982911



Gambar 6. Grafik tegangan standar terhadap jarak celah pada busbar aluminium 0.635 cm dengan posisi 1



Gambar 7. Grafik medan listrik terhadap jarak celah pada busbar aluminium 0.635 cm dengan posisi 1

Berdasarkan data tersebut, jarak celah yang semakin besar mengakibatkan energi yang dibutuhkan untuk terjadinya tegangan tembus juga semakin besar. Sebaliknya, semakin besar jarak antar objek uji maka semakin kecil nilai medan listriknya karena ruang muatan listrik semakin luas dan tidak rapat.

Pengujian Busbar Tembaga dengan Ketebalan 0,5 cm pada Posisi 1

Objek yang diuji berupa busbar tembaga dengan ketebalan 0,5 cm dimulai dari jarak 1 cm dengan suhu 28°C.

$$\delta = (0,386 \times 760 \text{ mmHg}) / (273 + 28^\circ\text{C}) = 0,97461794$$

$$V_s = 11,9 \text{ kV} / 0,97461794 = 12,20991274 \text{ kV}$$

$$E = 12,20991274 \text{ kV} / 1 \text{ cm} = 12,20991274 \text{ kV/cm}$$

Tabel 2. Hasil perhitungan tegangan tembus pada busbar tembaga 0,5 cm dengan posisi 1

Jarak Celah (cm)	Objek Uji	Suhu (oC)	V (kV)	Vs (kV)	Faktor Koreksi Udara	Medan Listrik
1	Busbar	28	11.9	12.20991274	0.97461794	12.20991274
1,5	Tembaga	28	14.856	15.2428961	0.97461794	10.16193073
2	0,5 cm pada	28,2	15.414	15.82593673	0.973970784	7.912968367
2,5	posisi	28	24.49	25.1277952	0.97461794	10.05111808



Gambar 8. Grafik tegangan standar terhadap jarak celah pada busbar tembaga 0.5cm dengan posisi 1

Dalam melakukan penelitian terjadinya perubahan suhu ruangan akibat ketika membangkitkan tegangan tinggi sehingga terjadi kenaikan temperatur ruangan. Temperatur mempengaruhi nilai tegangan tembus jika semakin tinggi suhu udara maka semakin cepat juga terjadinya tegangan tembus hal ini mengakibatkan tegangan tembus yang diberikan selanjutnya semakin kecil. Hal ini diamati pada jarak celah 2 cm, di mana terjadi kenaikan temperatur 0,2°C yang menyebabkan semakin cepatnya terjadi tegangan tembus.

Pengaruh Jenis Bahan (Aluminium vs Tembaga)

Dengan tebal yang sama, membandingkan antara pengujian menggunakan bahan aluminium dan bahan tembaga dapat diamati jenis bahan tembaga memiliki nilai tegangan tembus yang lebih rendah dibanding dengan busbar aluminium. Hal ini karena pada busbar tembaga memiliki daya hantar listrik yang tinggi jika dibandingkan dengan aluminium sesuai

dengan hambatan jenis (resistivitas) yang dimiliki oleh bahan. Tembaga memiliki resistivitas sebesar $1,72 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ sedangkan aluminium sebesar $2,75 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$. Jika suatu bahan memiliki resistivitas yang tinggi maka sifat bahan untuk menghambat arus semakin besar sehingga membutuhkan tegangan yang semakin besar untuk menghasilkan flashover.

Pengujian Busbar Tembaga 0,5 cm pada Posisi 2 (Overlapping)

Pada posisi 2 ini busbar saling tumpang tindih atau *overlapping* sepanjang 0 cm (normal) dan sepanjang 1 cm, dengan jarak antar busbar 0.2 cm sampai 1 cm.

Tabel 3. Hasil perhitungan tegangan tembus pada busbar tembaga 0.5 cm posisi 2 berhimpit 0 cm

Jarak Celah (cm)	Objek Uji	Suhu (°C)	V (kV)	Vs (kV)	Faktor Koreksi Udara	Medan Listrik
0,2	Busbar	28	2.644	2.712857922	0.97461794	13.5642896
0,4	Tembaga 0,5	28.3	2.756	2.830593128	0.973647527	7.07648282
0,6	cm keadaan	28.3	3.582	3.678949414	0.973647527	6.13158236
0,8	berhimpit 0	28.3	4.63	4.75531429	0.973647527	5.94414286
1	cm	28.4	5.746	5.90347832	0.973324486	5.90347832

Tabel 4. Hasil perhitungan tegangan tembus pada busbar tembaga 0.5 cm berhimpit 1 cm

Jarak Celah (cm)	Objek Uji	Suhu (°C)	V (kV)	Vs (kV)	Faktor Koreksi Udara	Medan Listrik
0.2	Busbar	28.2	1.812	1.860425416	0.973970784	9.30212708
0.4	Tembaga 0,5	28	2.588	2.655399509	0.97461794	6.63849877
0.6	cm dengan	28	3.43	3.519327788	0.97461794	5.86554631
0.8	keadaan	28.2	4.43	4.548391055	0.973970784	5.68548882
1	berhimpit 1 cm	28.2	5.39	5.534046905	0.973970784	5.5340469

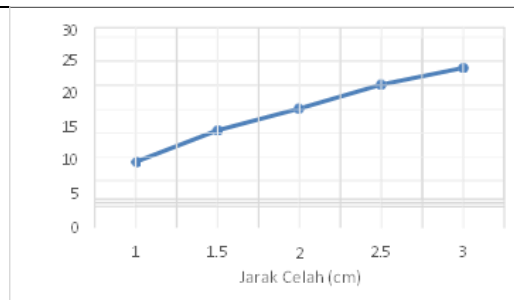
Jika diamati antara nilai tegangan tembus dalam keadaan normal dengan *overlapping* sepanjang 1 cm terdapat perbedaan yaitu lebih besar nilai tegangan tembus pada keadaan normal. Hal ini sesuai dengan kedudukan garis gaya listrik pada hukum Gauss. Luas sisi normal merupakan lebar busbar dikali tebal busbar sehingga nilainya kecil, sedangkan luas sisi *overlapping* merupakan panjang busbar yang *overlapping* dikali lebar busbar sehingga nilai luas sisinya lebih besar. Karena nilai luas sisi posisi normal kecil maka tegangan tembusnya besar (berbanding terbalik).

Pengujian Penghantar ACSR (450 mm² dan 250 mm²)

Objek yang diuji berupa 2 penghantar ACSR dengan luas penampang yang sama dimulai dari jarak 1 cm dengan suhu 28°C.

Tabel 5. Hasil perhitungan tegangan tembus pada penghantar ACSR luas penampang 250 mm²

Jarak Celah (cm)	Objek Uji	Suhu (°C)	V (kV)	Vs (kV)	Faktor Koreksi Udara	Medan Listrik
z1	2 penghantar	28.4	9.61	9.87337742	0.973324486	9.87337742
1,5	ACSR yang	28.4	14.21	14.59944778	0.973324486	9.732965185
2	memiliki	28.4	17.398	17.87482002	0.973324486	8.937410008
2,5		28.5	20.89	21.46964481	0.973001658	8.587857922
3		28.5	23.302	23.94857172	0.973001658	7.98285724



Gambar 9. Grafik tegangan tembus terhadap jarak celah ACSR dengan luas penampang 250 mm²

Jika dibandingkan dengan pengujian ACSR 450 mm², semakin besar diameter penghantar maka semakin besar juga nilai tegangan tembusnya. Dengan rumus:

$$R = \rho \times (l / A)$$

semakin besar diameter penghantar menyebabkan nilai luas penampang penghantar semakin besar dan memperkecil nilai resistansinya. Sesuai dengan hukum Ohm, hal ini menyebabkan nilai tegangan tembus pada ACSR 450 mm² lebih besar dibanding ACSR 250 mm².

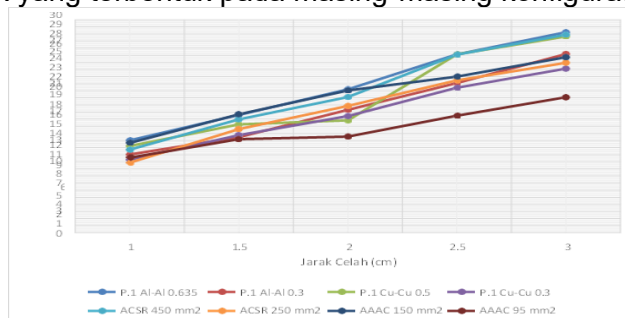
Pembahasan

Analisis Pengaruh Jarak terhadap Tegangan Tembus dan Medan Listrik

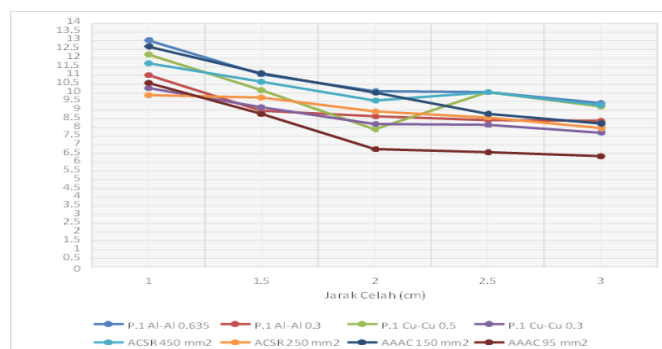
Berdasarkan hasil pengujian pada seluruh objek uji, baik busbar maupun penghantar, variasi jarak celah udara sebesar 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm, dan 3 cm menunjukkan bahwa jarak celah udara berpengaruh langsung terhadap nilai tegangan tembus. Secara umum, semakin besar jarak celah udara antar konduktor, semakin besar pula tegangan yang diperlukan untuk memicu terjadinya pelepasan muatan listrik pada media udara. Fenomena ini sesuai dengan konsep dasar kegagalan dielektrik gas, yaitu bahwa proses breakdown terjadi ketika medan listrik yang terbentuk mampu mempercepat elektron bebas sehingga terjadi ionisasi tumbukan dan terbentuk avalanche elektron yang berkembang menjadi kanal konduktif di antara elektroda (Meek & Craggs, 1978; Kuffel et al., 2000; Naidu & Kamaraju, 2013). Teori Townsend dan hukum Paschen juga menjelaskan bahwa tegangan tembus gas dipengaruhi oleh tekanan udara, jarak antar elektroda, serta kondisi permukaan dan geometri elektroda (Townsend, 1915; Cobine, 1958; Gallagher, 1983).

Kecenderungan meningkatnya tegangan tembus pada jarak celah yang lebih besar juga dapat dijelaskan melalui hubungan antara tegangan, jarak, dan medan listrik rata-rata. Pada celah udara yang lebih panjang, lintasan ionisasi yang harus dibentuk oleh elektron menjadi lebih besar, sehingga diperlukan tegangan total yang lebih tinggi untuk menghasilkan pelepasan muatan yang berkelanjutan. Namun, nilai medan listrik rata-rata yang dihitung melalui persamaan $E = V_s/d$ cenderung menurun ketika jarak celah diperbesar. Hal ini terjadi karena kenaikan tegangan tembus tidak selalu sebanding secara linier dengan pertambahan jarak, terutama pada konfigurasi elektroda praktis yang tidak sepenuhnya homogen seperti busbar dan penghantar berpilin. Pada kondisi medan tidak homogen, distribusi medan listrik sangat dipengaruhi oleh bentuk elektroda, radius kelengkungan, luas permukaan yang saling berhadapan, serta adanya titik-titik lokal dengan intensitas medan tinggi (Peek, 1929; Kuffel et al., 2000; Naidu & Kamaraju, 2013).

Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan dua kecenderungan utama. Pertama, peningkatan jarak celah udara meningkatkan nilai tegangan tembus karena dibutuhkan energi dan tegangan yang lebih besar untuk membentuk jalur konduksi melalui udara. Kedua, medan listrik rata-rata menurun seiring bertambahnya jarak celah karena nilai medan dihitung sebagai perbandingan antara tegangan tembus standar dan jarak antar elektroda. Kecenderungan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa karakteristik breakdown pada udara tidak hanya ditentukan oleh jarak, tetapi juga oleh tekanan, temperatur, kelembapan, bentuk elektroda, serta kondisi permukaan elektroda (Syamsir, 2001; Supriono, 2014; Syuhada, 2021). Oleh karena itu, interpretasi hasil tegangan tembus pada busbar dan penghantar perlu mempertimbangkan aspek jarak celah sekaligus distribusi medan listrik yang terbentuk pada masing-masing konfigurasi objek uji.



Gambar 10. Grafik perbandingan tegangan standar terhadap jarak celah pada busbar aluminium posisi 1



Gambar 11. Grafik perbandingan medan listrik terhadap jarak celah pada busbar aluminium posisi 1

Analisis Pengaruh Ketebalan Busbar terhadap Tegangan Tembus

Perbandingan hasil pengujian antara busbar aluminium dengan ketebalan 0,635 cm dan busbar aluminium dengan ketebalan 0,3 cm menunjukkan bahwa ketebalan busbar memberikan pengaruh terhadap nilai tegangan tembus. Pada jarak celah dan jenis material yang sama, busbar dengan ketebalan lebih besar cenderung memiliki nilai tegangan tembus yang lebih tinggi dibandingkan busbar yang lebih tipis. Perbedaan ini tidak hanya berkaitan dengan kemampuan konduktor dalam menghantarkan arus, tetapi juga dengan perubahan geometri elektroda yang memengaruhi distribusi medan listrik di sekitar celah udara. Dalam sistem tegangan tinggi, bentuk dan dimensi elektroda merupakan faktor penting karena dapat menentukan tingkat homogenitas medan listrik dan intensitas medan lokal pada bagian tepi atau sudut elektroda (Kuffel et al., 2000; Naidu & Kamaraju, 2013).

Busbar dengan ketebalan lebih besar memiliki luas penampang dan bidang permukaan yang lebih besar sehingga distribusi muatan pada permukaan konduktor dapat menjadi lebih tersebar. Sebaliknya, busbar yang lebih tipis cenderung memiliki efek tepi yang lebih dominan, terutama pada bagian sudut atau permukaan yang berhadapan langsung dengan celah udara. Konsentrasi medan listrik pada daerah tepi dapat mempercepat proses ionisasi udara dan menurunkan tegangan yang diperlukan untuk memulai pelepasan muatan. Hal ini sejalan dengan konsep medan listrik tidak seragam, di mana bagian elektroda dengan radius kelengkungan lebih kecil atau permukaan lebih tajam dapat menghasilkan intensitas medan lokal yang lebih tinggi dibandingkan permukaan yang lebih lebar dan lebih tumpul (Peek, 1929; Meek & Craggs, 1978; Gallagher, 1983).

Dengan demikian, nilai tegangan tembus yang lebih tinggi pada busbar aluminium 0,635 cm dapat dikaitkan dengan pengaruh dimensi dan geometri busbar terhadap distribusi medan listrik pada celah udara. Penjelasan ini lebih tepat dibandingkan hanya mengaitkan tegangan tembus dengan kapasitas arus busbar, karena fenomena breakdown pada media udara terutama ditentukan oleh kekuatan dielektrik udara dan intensitas medan listrik lokal di antara elektroda. Oleh karena itu, dalam perancangan sambungan busbar, aspek ketebalan, bentuk tepi, jarak celah, dan kualitas permukaan perlu diperhatikan untuk mengurangi kemungkinan munculnya medan listrik lokal yang berlebihan dan memicu terjadinya sparkover (Supriono, 2014; Syuhada, 2021).

Analisis Pengaruh Jenis Bahan (Aluminium dan Tembaga)

Hasil perbandingan antara busbar aluminium dan busbar tembaga menunjukkan bahwa jenis material berpengaruh terhadap karakteristik tegangan tembus yang diperoleh. Pada konfigurasi dan jarak celah yang sebanding, busbar tembaga menunjukkan nilai tegangan tembus yang lebih rendah dibandingkan busbar aluminium. Perbedaan ini dapat dikaitkan dengan sifat listrik material, terutama resistivitas dan konduktivitas listrik. Tembaga memiliki resistivitas sebesar $1,72 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ sedangkan aluminium sebesar $2,75 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$. Jika suatu bahan memiliki resistivitas yang tinggi maka sifat bahan untuk menghambat arus semakin besar sehingga membutuhkan tegangan yang semakin besar untuk menghasilkan flashover.

Namun, dalam konteks tegangan tembus udara, pengaruh material tidak dapat dijelaskan hanya melalui resistivitas. Tegangan tembus pada celah udara lebih dominan dipengaruhi oleh kuat medan listrik, geometri elektroda, kondisi permukaan, tekanan, temperatur, dan kelembapan udara (Kuffel et al., 2000; IEC 60060-1, 2025; Naidu & Kamaraju,

2013). Material konduktor berperan melalui sifat permukaan, tingkat kehalusan, oksidasi, serta kemampuan distribusi muatan pada permukaan elektroda. Aluminium, misalnya, mudah membentuk lapisan oksida pada permukaannya, sedangkan tembaga memiliki karakteristik permukaan dan konduktivitas yang berbeda. Perbedaan kondisi permukaan ini dapat memengaruhi proses emisi elektron awal dan pembentukan pelepasan muatan pada celah udara (Meek & Craggs, 1978; Gallagher, 1983).

Dengan demikian, nilai tegangan tembus yang lebih rendah pada busbar tembaga dapat dipahami sebagai hasil dari kombinasi antara konduktivitas material, kondisi permukaan elektroda, serta distribusi medan listrik pada konfigurasi pengujian. Dalam sistem praktis, pemilihan material busbar tidak hanya didasarkan pada kemampuan hantar arus, tetapi juga harus mempertimbangkan aspek mekanis, termal, kualitas sambungan, ketahanan korosi, dan keamanan isolasi udara pada jarak bebas antar konduktor (Rahmawati, 2013; SPLN, 1981; S. N. Indonesia & B. S. Nasional, 2000).

Analisis Posisi 2 Busbar (Overlapping)

Pada pengujian busbar posisi 2, dilakukan perbandingan antara kondisi normal tanpa tumpang tindih dan kondisi overlapping sepanjang 1 cm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai tegangan tembus pada kondisi normal lebih besar dibandingkan kondisi overlapping. Perbedaan ini menunjukkan bahwa konfigurasi posisi busbar berpengaruh terhadap distribusi medan listrik pada celah udara. Dalam teori medan elektrostatik, distribusi medan listrik pada dua elektroda tidak hanya bergantung pada besar tegangan dan jarak, tetapi juga pada luas bidang yang saling berhadapan, bentuk elektroda, serta orientasi permukaan elektroda (Kuffel et al., 2000; Naidu & Kamaraju, 2013).

Pada kondisi overlapping, bidang permukaan busbar yang saling berhadapan menjadi lebih luas sehingga distribusi medan listrik pada daerah celah dapat berubah. Konfigurasi ini memungkinkan terbentuknya daerah dengan medan listrik yang lebih terkonsentrasi pada bagian tepi atau ujung bidang tumpang tindih. Efek tepi tersebut dapat mempercepat terjadinya ionisasi lokal dan menurunkan tegangan yang diperlukan untuk memicu sparkover. Dalam sistem medan tidak homogen, pelepasan muatan sering kali diawali pada daerah dengan intensitas medan tertinggi, khususnya pada sudut, tepi tajam, atau permukaan dengan ketidakaturan mikroskopis (Peek, 1929; Meek & Craggs, 1978; Gallagher, 1983).

Hasil ini menunjukkan bahwa sambungan busbar yang memiliki bagian bertumpuk atau permukaan yang saling berhadapan perlu dirancang dengan memperhatikan jarak bebas, kualitas kontak mekanis, dan bentuk permukaan sambungan. Walaupun overlapping dapat memperluas bidang kontak secara mekanis, konfigurasi tersebut juga dapat mengubah distribusi medan listrik di sekitar sambungan. Apabila celah udara kecil terbentuk di antara permukaan yang bertumpuk, daerah tersebut berpotensi menjadi lokasi awal pelepasan muatan, terutama ketika terdapat ketidaksempurnaan kontak, kontaminasi permukaan, atau peningkatan temperatur akibat resistansi kontak (Suherman & Burmansyah, 2018; Supriono, 2014). Oleh karena itu, hasil pengujian ini menegaskan pentingnya desain geometri sambungan busbar dalam mencegah terjadinya tegangan tembus pada media isolasi udara.

Analisis Luas Penampang pada Penghantar (ACSR dan AAAC)

Pada pengujian penghantar, variabel diameter atau luas penampang memberikan pengaruh yang signifikan. Semakin besar diameter penghantar maka semakin besar juga nilai tegangan tembusnya. Dengan mengacu pada persamaan:

$$R = \rho \times (l / A)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar luas penampang penghantar, semakin kecil resistansi penghantar untuk panjang dan jenis material yang sama. Namun, pada pengujian tegangan tembus udara, pengaruh luas penampang tidak hanya berkaitan dengan penurunan resistansi, tetapi juga dengan perubahan diameter dan radius kelengkungan permukaan penghantar. Penghantar dengan diameter lebih besar memiliki radius kelengkungan yang lebih besar sehingga intensitas medan listrik lokal pada permukaannya cenderung lebih rendah dibandingkan penghantar berdiameter kecil pada tegangan yang sama. Dalam teori tegangan tinggi, konduktor dengan radius lebih kecil lebih mudah menghasilkan konsentrasi medan listrik tinggi, sehingga lebih rentan memicu korona

atau pelepasan awal pada media udara (Peek, 1929; Kuffel et al., 2000; Naidu & Kamaraju, 2013).

Perbedaan karakteristik antara penghantar ACSR dan AAAC juga dapat dikaitkan dengan struktur dan komposisi materialnya. ACSR merupakan penghantar aluminium berinti baja yang dirancang untuk menggabungkan konduktivitas aluminium dengan kekuatan mekanis baja, sedangkan AAAC menggunakan paduan aluminium berkekuatan tinggi yang memiliki karakteristik mekanis dan ketahanan korosi tertentu. Data teknis penghantar overhead menunjukkan bahwa ACSR terdiri atas lapisan aluminium yang dipilin mengelilingi inti baja, sedangkan AAAC umumnya tersusun dari kawat paduan aluminium berkekuatan tinggi. Perbedaan struktur pilinan, diameter luar, kekasaran permukaan, dan komposisi material tersebut dapat memengaruhi distribusi medan listrik lokal pada permukaan penghantar.

Dengan demikian, nilai tegangan tembus yang lebih tinggi pada penghantar dengan penampang lebih besar, seperti ACSR 450 mm² dibandingkan ACSR 250 mm², dapat dijelaskan melalui kombinasi antara luas penampang, diameter luar penghantar, radius kelengkungan permukaan, serta karakteristik material dan struktur pilinannya. Interpretasi ini memperkuat pemahaman bahwa fenomena breakdown pada penghantar udara tidak hanya dipengaruhi oleh parameter listrik seperti resistansi, tetapi juga oleh bentuk geometris dan kondisi permukaan konduktor. Oleh karena itu, dalam perancangan jarak bebas antar penghantar, faktor luas penampang, diameter luar, jenis penghantar, dan konfigurasi sambungan perlu dipertimbangkan secara bersamaan agar risiko sparkover dapat diminimalkan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi jarak celah udara berpengaruh signifikan terhadap nilai tegangan tembus dan medan listrik pada busbar maupun penghantar. Semakin besar jarak celah udara antar konduktor, semakin besar pula tegangan tembus yang diperlukan untuk memicu terjadinya sparkover pada media isolasi udara. Sebaliknya, nilai medan listrik rata-rata cenderung menurun seiring bertambahnya jarak celah karena tegangan standar terbagi pada ruang celah yang lebih besar. Selain jarak, karakteristik material, ketebalan busbar, luas penampang penghantar, dan konfigurasi posisi busbar juga memengaruhi proses terjadinya tegangan tembus. Busbar dengan ketebalan lebih besar cenderung memiliki tegangan tembus yang lebih tinggi dibandingkan busbar yang lebih tipis karena perbedaan dimensi dan distribusi medan listrik pada permukaan konduktor. Perbedaan antara material aluminium dan tembaga menunjukkan bahwa sifat konduktivitas, kondisi permukaan, dan geometri elektroda turut menentukan karakteristik breakdown pada celah udara. Pada penghantar ACSR dan AAAC, luas penampang yang lebih besar menghasilkan tegangan tembus yang lebih tinggi karena diameter dan radius kelengkungan penghantar memengaruhi konsentrasi medan listrik di sekitar permukaan konduktor. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa tegangan tembus pada media udara tidak hanya dipengaruhi oleh jarak celah, tetapi juga oleh kombinasi antara material, dimensi, konfigurasi geometris, dan distribusi medan listrik pada objek uji.

REKOMENDASI

Berdasarkan hasil penelitian ini, perancangan sambungan busbar dan penghantar pada sistem tenaga listrik perlu memperhatikan jarak bebas udara minimum, jenis material, ketebalan busbar, luas penampang penghantar, serta konfigurasi sambungan agar risiko terjadinya sparkover dapat diminimalkan. Pada aplikasi praktis, sambungan busbar sebaiknya dibuat dengan kontak mekanis yang rapat, permukaan yang bersih, dan geometri yang tidak menimbulkan konsentrasi medan listrik berlebihan pada bagian tepi atau sudut konduktor. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar pengujian dilakukan dengan jumlah pengulangan yang lebih banyak, variasi kelembapan dan tekanan udara yang lebih luas, serta pengamatan terhadap kondisi permukaan konduktor sebelum dan sesudah pengujian. Selain itu, analisis numerik menggunakan simulasi distribusi medan listrik, misalnya dengan metode elemen hingga, dapat ditambahkan untuk memperkuat interpretasi hasil eksperimen. Data pengujian untuk seluruh objek, termasuk variasi busbar aluminium 0,3 cm, penghantar ACSR 450 mm², dan penghantar AAAC, juga perlu disajikan secara lengkap agar hubungan antara

jarak, material, dimensi, tegangan tembus, dan medan listrik dapat dianalisis secara lebih menyeluruh dan terverifikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Cobine, J. D. (1958). *Gaseous Conductors: Theory and Engineering Applications*. Dover Publications.
- Diva, dkk. (2020). Pengujian Partial Discharge Konfigurasi Jarum Plat pada Isolasi Udara Menggunakan Metode Electric Detecting Impedance (RC). *Jurnal POLEKTRO*.
- Gallagher, T. J. (1983). *Simple Dielectric Liquids: Mobility, Conduction and Breakdown*. Clarendon Press.
- IEC 60060-1. (2025). *High-voltage test techniques—Part 1: General terminology and test requirements*. International Electrotechnical Commission.
- Jurjani, F. (2016). *Analisis dan Resiko Partial Discharge pada Kabel Tegangan Menengah* (hal. 16–28).
- Kuffel, E., Zaengl, W. S., & Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering: Fundamentals* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Meek, J. M., & Craggs, J. D. (1978). *Electrical Breakdown of Gases*. Wiley.
- Naidu, M. S., & Kamaraju, V. (2013). *High Voltage Engineering* (5th ed.). McGraw Hill Education.
- Naidu, M. S., & Kamaraju, V. (2013). *High voltage engineering* (5th ed.). McGraw Hill Education.
- Peek, F. W. (1929). *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Rahmawati, Y. (2013). Studi Kelayakan Busbar Gardu Trafo Tiang 20 kV (Baru) pada Jurusan Teknik Elektro FT UMY (hal. 59–67).
- Reid, dkk. (2011). *Analisis Partial Discharge pada Isolasi Konduktor*.
- S. N. Indonesia, & B. S. Nasional. (2000). *Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000)*.
- SPLN. (1981). *SPLN 41-7:1981* (hal. 1–20).
- Suherman, E., & Burmansyah, R. (2018). Pengujian kenaikan suhu pada perangkat hubung bagi tegangan rendah di Lembaga Masalah Kelistrikan. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Darma Persada*, 8(1), 10.
- Supriono. (2014). *Buku Ajar Teknik Tegangan Tinggi*.
- Syamsir. (2001). *Landasan Teori Teknik Tegangan Tinggi*.
- Syuhada, D. I. O. A. (2021). *Kajian Tegangan Tembus Dan Medan Listrik Pada Elektroda Model Tembaga Dan Aluminum Pada Media Isolasi Udara* [Skripsi, Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan].
- Townsend, J. S. (1915). *Electricity in Gases*. Oxford University Press.