

EFFECTS OF FLY ASH CONTAMINATION ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF CERAMIC INSULATOR SURFACES

EFEK KONTAMINASI FLY ASH TERHADAP SIFAT LISTRIK PERMUKAAN ISOLATOR KERAMIK

Moh. Rafli A. Bolilio¹, Lanto Mohamad Kamil Amali^{2*}, Yasin Mohamad³

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia
Email: moh._s1elektro@mahasiswa.ung.ac.id

²Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia
Email: kamilamali@ung.ac.id

³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia
Email: yasinmohamad@ung.ac.id

Received: May 20, 2025 Revised: May 21, 2025 Published: July 01, 2025

DOI: <https://doi.org/10.24912/tesla.v27i1.34086>

Abstract

The decrease in insulator performance due to environmental pollution, especially by fly ash produced from Steam Power Plants (PLTU). Fly ash contains conductive elements that have the potential to reduce the surface resistivity of insulators, so that it can accelerate insulation failure, especially in humid or wet conditions. Therefore, it is important to study in depth the effect of fly ash on the electrical parameters of insulators, such as surface conductivity and breakdown voltage. The main objective of this study was to determine how much impact the content of conductive elements in fly ash has on the decrease in surface resistivity of insulators. The methods used include analysis of chemical elements in fly ash, simulation of variations in pollutant solution concentration, and testing of leakage current and breakdown voltage in an AC high voltage laboratory. The results showed that fly ash from PLTU Anggrek contains conductive elements of Iron (Fe) of 1.595%, Magnesium (Mg) 0.44%, Sodium (Na) 1.45%, Calcium (Ca) 1.60%, and Sulfur (S) 0.085%. In addition, increasing the concentration of fly ash has been shown to increase the conductivity of the solution on the insulator surface and reduce the breakdown voltage, with the fastest breakdown voltage value being 38.45 kV and the leakage current reaching 0.318 mA on the wet polluted insulator surface.

Keywords: fly ash, ceramic insulator, breakdown voltage, surface conductivity, leakage current, pollution.

Abstrak

Penurunan kinerja isolator akibat polusi lingkungan, khususnya oleh fly ash yang dihasilkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Fly ash mengandung unsur-unsur konduktif yang berpotensi menurunkan resistivitas permukaan isolator, sehingga dapat mempercepat kegagalan isolasi, terutama dalam kondisi lembap atau basah. Oleh karena itu, penting untuk mengkaji secara mendalam pengaruh fly ash terhadap parameter kelistrikan isolator, seperti konduktivitas permukaan dan tegangan tembus. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar dampak kandungan unsur konduktif fly ash terhadap penurunan resistivitas permukaan isolator. Metode yang digunakan meliputi analisis unsur kimia fly ash, simulasi variasi konsentrasi larutan polutan, serta pengujian arus bocor dan tegangan tembus pada laboratorium tegangan tinggi AC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fly ash dari PLTU Anggrek mengandung unsur konduktif Besi (Fe) sebesar 1,595%, Magnesium (Mg) 0,44%, Natrium (Na) 1,45%, Kalsium (Ca) 1,60%, dan Sulfur (S) 0,085%. Selain itu, peningkatan konsentrasi fly ash terbukti meningkatkan konduktivitas larutan pada permukaan isolator serta menurunkan tegangan tembus, dengan nilai tegangan tembus tercepat sebesar 38,45 kV dan arus bocor mencapai 0,318 mA pada kondisi permukaan isolator yang terpolusi basah.

Kata Kunci: fly ash, isolator keramik, tegangan tembus, konduktivitas permukaan, arus bocor, polusi.

EFEK KONTAMINASI FLY ASH TERHADAP SIFAT LISTRIK PERMUKAAN ISOLATOR KERAMIK

PENDAHULUAN

Isolator keramik merupakan komponen penting dalam sistem kelistrikan, khususnya pada jaringan distribusi dan transmisi tenaga listrik. Fungsi utama isolator adalah untuk menahan tegangan listrik dan mencegah terjadinya arus bocor yang dapat menyebabkan kegagalan sistem atau kecelakaan. Oleh karena itu, sifat listrik permukaan isolator, seperti resistansi permukaan dan tegangan tembus permukaan, sangat menentukan keandalan dan keamanan operasi jaringan listrik [1].

Dalam prakteknya, isolator keramik tidak selalu berada dalam kondisi ideal. Salah satu masalah utama yang sering dihadapi adalah kontaminasi permukaan isolator akibat berbagai partikel polutan yang terbawa oleh angin dan lingkungan sekitar. Partikel-partikel tersebut dapat berasal dari berbagai sumber, salah satunya adalah fly ash, yaitu abu terbang yang merupakan limbah padat hasil pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) [2]. Fly ash memiliki sifat fisik dan kimia yang khas, seperti ukuran partikel yang sangat halus, komposisi kimia yang kompleks, serta kemampuan menyerap kelembaban dari udara [3].

Kontaminasi fly ash pada permukaan isolator dapat memengaruhi sifat listrik isolator secara signifikan. Permukaan isolator yang terkontaminasi cenderung mengalami penurunan resistansi permukaan karena keberadaan partikel konduktif dan kelembaban yang menempel pada fly ash, sehingga mempermudah jalur kebocoran arus listrik [4]. Kondisi ini meningkatkan resiko flashover, yaitu terjadinya loncatan listrik pada permukaan isolator, yang dapat mengakibatkan gangguan operasional hingga kerusakan isolator itu sendiri [5].

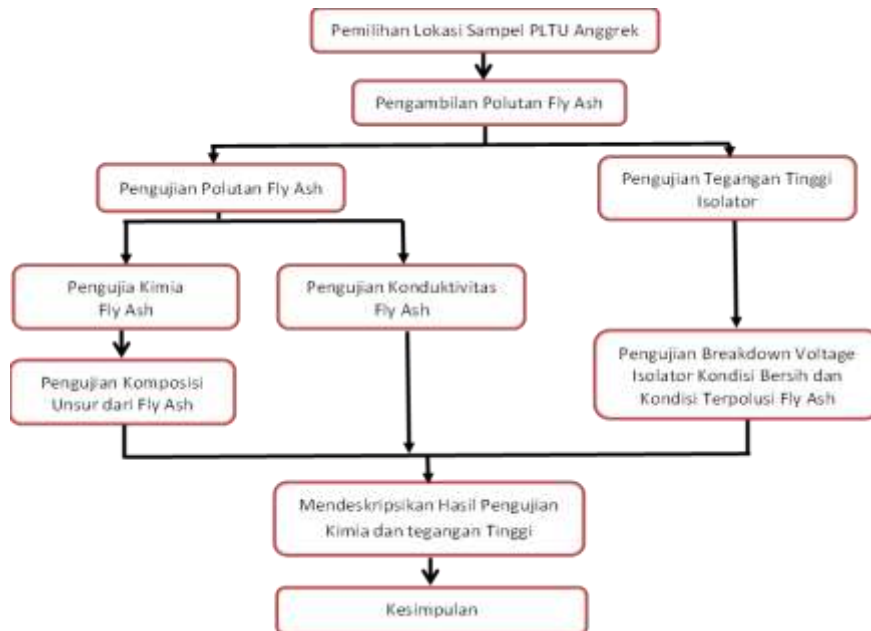
Selain itu, karakteristik fly ash yang bervariasi tergantung pada sumber batu bara dan proses pembakaran menyebabkan efek kontaminasi yang tidak seragam pada isolator. Faktor lingkungan seperti kelembaban, curah hujan, dan suhu juga berperan dalam menentukan sejauh mana fly ash mempengaruhi sifat listrik permukaan isolator keramik [6]. Oleh sebab itu, studi mengenai efek kontaminasi fly ash terhadap sifat listrik permukaan isolator keramik menjadi sangat penting untuk dilakukan, terutama dalam konteks pengoperasian jaringan listrik di daerah industri dan pembangkit listrik berbahan bakar batu bara.

Penelitian-penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa kontaminasi berbagai jenis debu dan polutan dapat menurunkan performa isolator secara signifikan [7]. Namun, studi yang secara khusus menelaah dampak fly ash masih relatif terbatas meskipun fly ash merupakan salah satu polutan yang banyak ditemukan di sekitar PLTU [8]. Beberapa penelitian mengindikasikan bahwa fly ash dapat meningkatkan konduktivitas permukaan isolator dan mempercepat proses degradasi material isolator [9]. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai mekanisme interaksi fly ash dengan permukaan isolator keramik dan dampaknya terhadap sifat listrik sangat diperlukan untuk mengembangkan strategi pencegahan dan perawatan isolator yang efektif [10].

Selain aspek teknis, pemahaman tentang kontaminasi fly ash juga penting dalam konteks lingkungan dan kesehatan masyarakat. Limbah fly ash yang tidak dikelola dengan baik tidak hanya berpotensi merusak peralatan listrik, tetapi juga mencemari udara dan tanah di sekitar PLTU [11]. Oleh karena itu, penelitian ini juga memiliki nilai tambah dalam membantu merumuskan kebijakan pengelolaan limbah fly ash yang ramah lingkungan serta mendukung keberlanjutan operasional jaringan listrik.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian adalah metode studi kasus dan eksperimen pada laboratorium tegangan tinggi dan kimia. Alur metode penelitian dapat dilihat pada flowchart berikut:



Gambar 1. Flowchart Penelitian

1. Sampel penelitian.

Sampel fly ash diperoleh dari PLTU Anggrek di Gorontalo Utara, pada koordinat 0 48° 57,6 - 0 54° 53,9 LU dan 122 44° 16,8 - 122 49° 33,5 BT

2. Pengambilan Sampel.

Sampel polutan fly ash diambil dari permukaan isolator keramik tipe post yang telah dipasang selama dua bulan di area Gardu Induk PLTU Anggrek.



Gambar 2. Pengambilan Sampel Polutan Fly Ash PLTU Anggrek

3. Penentuan Kandungan Kimia dari Polutan Fly Ash.

Untuk mengidentifikasi komposisi kimia dari polutan fly ash, penelitian ini dilakukan di laboratorium kimia. Sebelum pengujian, studi literatur dan jurnal dilakukan untuk mengidentifikasi unsur kimia yang menyebabkan kegagalan isolator, khususnya yang terkait dengan komposisi kimia. Referensi penentuan kandungan kimia fly ash diperoleh dari jurnal internasional bereputasi yang terindeks Scopus dan diterbitkan oleh Elsevier [12]. Berdasarkan referensi tersebut, kandungan kimia fly ash

EFEK KONTAMINASI FLY ASH TERHADAP SIFAT LISTRIK PERMUKAAN ISOLATOR KERAMIK

akan diuji menggunakan Spektrofotometer untuk mendapatkan kuantitas unsur kimia dalam larutan fly ash

Pengujian kandungan dan konduktivitas polutan fly ash dilakukan melalui beberapa tahap. Pertama, sampel fly ash dan gelas ukur disiapkan dan disterilkan. Gelas ukur kemudian diisi dengan 200 ml air destilasi, lalu fly ash dimasukkan ke dalamnya. Campuran diaduk hingga fly ash terlepas sempurna dari kapas, dan larutan yang tercampur ditampung kembali ke dalam gelas ukur untuk dianalisis



Gambar 3. Polutan Fly Ash

Pengukuran kuantitas unsur dilakukan dengan menambahkan zat-zat tertentu untuk setiap unsur yang akan dicari kuantitasnya dalam larutan. Selain itu, konduktivitas air destilasi yang bercampur dengan polutan fly ash diukur menggunakan konduktometer.



Gambar 4. Penentuan Konduktifitas Fly Ash menggunakan Konduktometer

4. Pengujian Tegangan Tembus dan Arus Bocor pada Isolator menggunakan Polutan Fly Ash.

Pengujian permukaan isolator dilakukan untuk mengetahui tegangan tembus dan arus bocor akibat polutan fly ash pada 4 kondisi permukaan isolator sebagai berikut:

a) Kondisi permukaan bersih kering.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan tembus dan arus bocor permukaan isolator dalam kondisi bersih dan kering.



Gambar 5. Kondisi Isolator Bersih Kering

b) Kondisi permukaan bersih basah

Pengujian dilakukan untuk mengetahui tegangan tembus dan arus bocor isolator dalam kondisi bersih dan basah, dengan penyemprotan air mineral murni secara merata.



Gambar 6. Kondisi Isolator Bersih Basah

c) Kondisi permukaan terpolusi kering

Pengujian dilakukan untuk mengetahui tegangan tembus dan arus bocor isolator dalam kondisi terpolusi dan kering, dengan polutan fly ash PLTU Anggrek yang dikeringkan pada permukaan isolato



Gambar 7. Kondisi Isolator terpolusi kering

d) Kondisi permukaan terpolusi basah

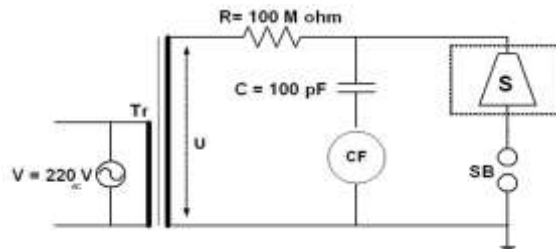
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan tembus dan arus bocor permukaan isolator dalam kondisi terpolusi dan basah. Air yang digunakan untuk pembasahan adalah air mineral dan disemprotkan pada permukaan isolator uji secara merata [13] [14].



Gambar 8. Kondisi Isolator terpolusi basah

EFEK KONTAMINASI FLY ASH TERHADAP SIFAT LISTRIK PERMUKAAN ISOLATOR KERAMIK

Eksperimen untuk mengukur tegangan tembus dan arus bocor permukaan isolator keramik tipe post dalam kondisi bersih-kering dan terpolusi, ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Diagram rangkaian pengujian tegangan tembus dan arus bocor

HASIL DAN DISKUSI

A. Komposisi Kimia Fly Ash

Hasil analisis kimia menunjukkan bahwa Fly Ash PLTU Anggrek mengandung unsur Besi (Fe) sebesar 1,595%, Magnesium (Mg) sebesar 0,44%, Natrium (Na) sebesar 1,45%, Kalsium (Ca) sebesar 1,60%, Sulfur (S) sebesar 0,085%. Adapun kandungan Kalsium (Ca), Besi (Fe), dan Natrium (Na) merupakan yang tertinggi dalam sampel Fly Ash tersebut. Unsur-unsur kimia diatas diduga dipengaruhi oleh jenis batu bara yang digunakan, proses pembakaran serta kondisi lingkungan sekitar PLTU.

B. Konduktivitas Larutan Fly Ash

Pengukuran konduktivitas larutan fly ash menggunakan alat ukur Conductivity Meter. Adapun hasil pengukuran secara umum menunjukkan bahwa konduktivitas meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi Fly Ash. Larutan dengan konsentrasi 0,10 g/l memiliki konduktivitas 110 $\mu\text{S/cm}$, konsentrasi 0,20 g/l memiliki konduktivitas 510 $\mu\text{S/cm}$, konsentrasi 0,30 g/l memiliki konduktivitas 1277 $\mu\text{S/cm}$, konsentrasi 0,40 g/l memiliki konduktivitas 2860 $\mu\text{S/cm}$ sedangkan larutan dengan konsentrasi 0,50 g/l memiliki konduktivitas 4130 $\mu\text{S/cm}$. Hal ini menunjukkan bahwa unsur-unsur kimia dalam Fly Ash bersifat konduktif, sehingga meningkatkan kemampuan larutan untuk menghantarkan listrik.

C. Tegangan Tembus dan Arus Bocor Permukaan Isolator

Pengujian tegangan tembus dan arus bocor permukaan isolator dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Universitas Negeri Gorontalo. Laboratorium ini dilengkapi dengan peralatan khusus untuk menguji dan menganalisis perilaku isolator dalam kondisi ekstrem. Pengujian tegangan tembus dan arus bocor permukaan isolator dilakukan dengan simulasi kondisi nyata yang mungkin dihadapi oleh isolator di lapangan seperti kondisi isolator yang bersih, basah, terpolusi kering, dan terpolusi basah yang semuanya mencerminkan berbagai kondisi lingkungan yang dapat terjadi di lapangan.

1. Kondisi Bersih Kering

Pada kondisi isolator yang bersih dan kering, tanpa adanya polutan maupun kelembapan, pengujian menunjukkan bahwa arus bocor permukaan berada pada nilai yang sangat rendah. Hal ini menunjukkan bahwa permukaan isolator memiliki resistansi tinggi terhadap aliran arus, dengan nilai arus bocor sebesar 0,011 mA. Isolator dalam kondisi ini berfungsi sesuai dengan desainnya, menahan tegangan tinggi dengan baik.

Selanjutnya, tegangan tembus pada kondisi ini juga berada pada titik tertinggi sebesar 80,97 kV dimana isolator dapat bertahan pada tegangan hingga nilai tersebut tanpa terjadinya breakdown atau loncatan listrik.

Kondisi bersih dan kering mencerminkan situasi ideal, di mana isolator menunjukkan kinerja terbaik tanpa gangguan eksternal seperti kelembapan atau kontaminasi polutan.

2. Kondisi Bersih Basah.

Pada kondisi bersih basah, tegangan tembus isolator sebesar 76,78 kV mengalami penurunan dibandingkan dengan kondisi bersih kering. Penurunan ini disebabkan oleh adanya lapisan air di permukaan isolator, yang menurunkan resistansi permukaan dan memudahkan terjadinya aliran arus bocor. Meskipun tegangan tembus masih berada dalam batas aman, penurunan tersebut menunjukkan bahwa kelembapan dapat mempengaruhi kemampuan isolator dalam menahan tegangan tinggi.

Arus bocor permukaan pada kondisi bersih basah sebesar 0,012 mA, seiring dengan turunnya resistansi permukaan akibat lapisan air. Peningkatan arus bocor ini menunjukkan bahwa isolator cenderung mengalami kebocoran arus yang lebih besar dalam kondisi basah, yang dapat mempengaruhi kinerjanya, terutama di lingkungan yang lembab atau hujan.

3. Kondisi Terpolusi Basah

Pada kondisi terpolusi basah, di mana isolator terkena polusi fly ash dari PLTU Anggrek yang kemudian dibasahi, terjadi penurunan tegangan tembus yang sangat signifikan dibandingkan dengan kondisi bersih basah atau bersih kering sebesar 38,45 kV. Fly ash yang menempel pada permukaan isolator menurunkan resistansi permukaan, sementara kelembapan air semakin memperburuk konduktivitas permukaan. Hal ini menyebabkan isolator lebih mudah mengalami breakdown pada tegangan yang lebih rendah. Penurunan tegangan tembus ini sangat mencolok, menunjukkan bahwa polusi fly ash, ketika terbasahi, dapat secara drastis mempengaruhi daya tahan isolator terhadap tegangan tinggi.

Arus bocor permukaan pada kondisi terpolusi basah sebesar 0,318 mA. Fly ash yang menempel pada isolator, bersama dengan kelembapan, meningkatkan konduktivitas permukaan secara signifikan, sehingga memungkinkan arus bocor yang lebih besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa polusi basah, seperti fly ash yang terbasahi, dapat menyebabkan isolator lebih rentan terhadap arus bocor yang lebih besar, yang berisiko menurunkan keandalan sistem kelistrikan.

4. Kondisi Terpolusi Kering

Pada kondisi terpolusi kering, isolator yang terkontaminasi fly ash tanpa kelembapan menunjukkan penurunan tegangan tembus yang lebih kecil dibandingkan dengan kondisi terpolusi basah yakni sebesar 50,44 kV, tetapi tetap ada penurunan yang jelas dibandingkan dengan kondisi bersih. Fly ash yang menempel pada permukaan isolator mengurangi resistansi permukaan, meskipun efeknya tidak sebesar pada kondisi basah. Meskipun tegangan tembus masih dapat dipertahankan dalam batas yang relatif aman, penurunan ini menunjukkan bahwa keberadaan polusi kering dapat memengaruhi performa isolator, terutama dalam hal ketahanan terhadap tegangan tinggi.

Arus bocor pada kondisi terpolusi kering meningkat meskipun tidak setinggi pada kondisi basah. Fly ash tetap menyebabkan peningkatan konduktivitas permukaan isolator, memungkinkan terjadinya arus bocor, meskipun tidak seberat pada kondisi terpolusi basah. Ini menandakan bahwa polusi kering juga dapat mempengaruhi kemampuan isolator dalam menghalangi aliran arus bocor, meskipun dampaknya lebih kecil dibandingkan dengan polusi basah.

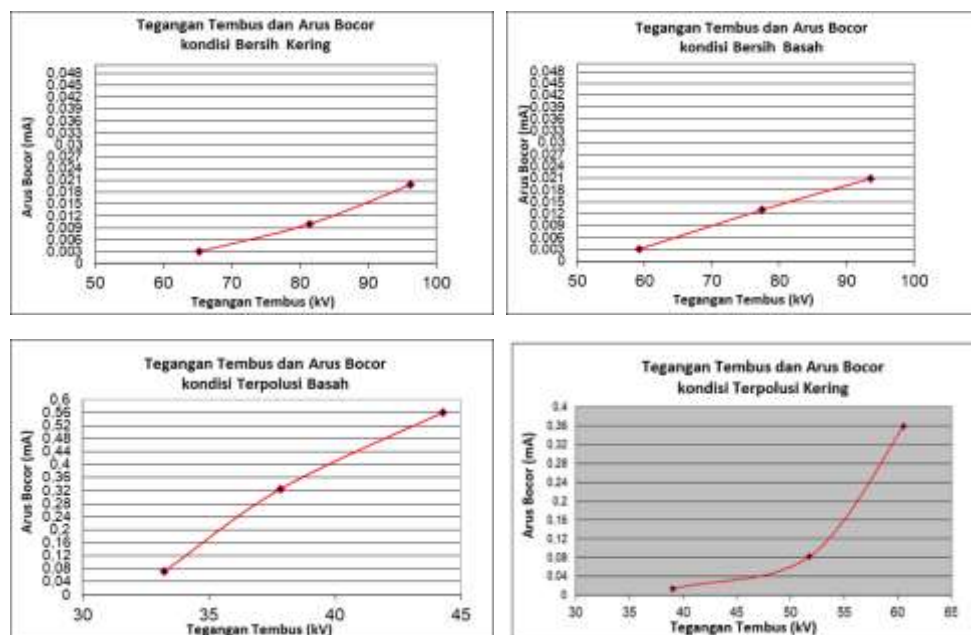
EFEK KONTAMINASI FLY ASH TERHADAP SIFAT LISTRIK PERMUKAAN ISOLATOR KERAMIK

Hasil pengujian terhadap tegangan tembus dan arus bocor permukaan isolator disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mempermudah analisis perbandingan antar kondisi pengujian. Pengujian dilakukan pada empat kondisi lingkungan, yaitu bersih kering, bersih basah, terpolusi kering, dan terpolusi basah dengan material polusi berupa fly ash dari PLTU Anggrek.

Tabel 1. Nilai Tegangan Tembus dan Arsu Bocor dari Isolator Uji

Pengujian	Parameter Uji							
	Bersih Kering		Bersih Basah		Terpolusi Kering		Terpolusi Basah	
	V (kV)	I _L (mA)	V (kV)	I _L (mA)	V (kV)	I _L (mA)	V (kV)	I _L (mA)
1	65.27	0.003	59.24	0.003	39.06	0.014	33.24	0.071
2	81.43	0.010	77.49	0.013	51.75	0.082	37.85	0.325
3	96.23	0.020	93.62	0.024	60.51	0.359	44.27	0.560
Rata-rata	80.97	0.011	76.78	0.012	50.44	0.151	38.45	0.318

Dalam tabel hasil pengujian, terlihat bahwa nilai tegangan tembus tertinggi terdapat pada kondisi bersih kering, sedangkan nilai terendah terdapat pada kondisi terpolusi basah. Sebaliknya, nilai arus bocor tertinggi tercatat pada kondisi terpolusi basah, sedangkan arus bocor terendah terjadi pada kondisi bersih kering. Pola ini menunjukkan bahwa keberadaan fly ash, terutama dalam kondisi lembab atau basah, secara signifikan menurunkan ketahanan isolator terhadap tegangan tinggi dan meningkatkan konduktivitas permukaannya.



Gambar 10. Hubungan Tegangan Tembus dan Arus Bocor

Grafik yang disajikan memperlihatkan tren penurunan tegangan tembus dan peningkatan arus bocor seiring dengan meningkatnya tingkat polusi dan kelembaban pada

permukaan isolator. Grafik ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan sangat berpengaruh terhadap performa isolator, terutama ketika terpapar polusi fly ash dalam keadaan basah. Penurunan resistansi permukaan akibat kelembaban dan partikel polusi mempercepat terjadinya arus bocor dan menurunkan batas tegangan isolator sebelum mengalami breakdown.

Dengan demikian, baik tabel maupun grafik memberikan gambaran visual dan kuantitatif yang jelas mengenai efek fly ash pada isolator, dimana kandungan unsur konduktif dalam fly ash mengakibatkan penurunan sifat isolasi listrik permukaan isolator, terutama pada kondisi lembab, yang dapat mengakibatkan menurunnya keandalan dan keamanan operasional sistem kelistrikan

KESIMPULAN

Hasil penelitian disimpulkan bahwa kandungan unsur konduktif utama dalam fly ash dari PLTU Anggrek, yaitu Kalsium (Ca) sebesar 1,60%, Besi (Fe) sebesar 1,595%, dan Natrium (Na) sebesar 1,45%, secara signifikan mempengaruhi peningkatan konduktivitas larutan fly ash. Pengukuran konduktivitas menunjukkan kenaikan drastis dari 110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada konsentrasi 0,10 g/l hingga mencapai 4130 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada konsentrasi 0,50 g/l. Kenaikan konduktivitas ini berbanding lurus dengan penurunan resistivitas permukaan isolator keramik, yang terlihat dari pengujian tegangan tinggi di laboratorium, di mana tegangan tembus tertinggi sebesar kondisi bersih kering menurun secara signifikan pada kondisi terpolusi basah. Sebaliknya, arus bocor permukaan isolator mencapai nilai tertinggi pada kondisi terpolusi basah dan terendah pada kondisi bersih kering, mengindikasikan peningkatan konduktivitas permukaan akibat kontaminasi fly ash.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan dan arahnya, Staf dan jajaran PLTU Anggrek serta kepada keluarga dan teman-teman atas dukungan moral dan motivasi yang tiada henti. Tak lupa, penulis juga berterima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam pengujian dan penyediaan data, sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat dan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Singh, "Surface Electrical Properties of Ceramic Insulators," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 4, pp. 2101-2108, 2016.
- [2] J. Lee et al., "Characterization of Fly Ash from Coal-Fired Power Plants," Fuel Processing Technology, vol. 141, pp. 1-10, 2015.
- [3] M. R. Rahman and S. Kumar, "Physical and Chemical Properties of Fly Ash: Influence on Electrical Insulation," Journal of Environmental Sciences, vol. 47, pp. 58-66, 2017.
- [4] T. Nakamura, "Effect of Contaminants on the Electrical Performance of Outdoor Insulators," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 3, pp. 1231-1238, 2014.
- [5] H. Zhang and W. Chen, "Flashover Phenomena on Polluted Insulator Surfaces," Electrical Insulation Magazine, vol. 32, no. 6, pp. 24-32, 2016.
- [6] S. Y. Kim et al., "Environmental Effects on Insulator Surface Pollution," Environmental Engineering Science, vol. 34, no. 2, pp. 85-92, 2017.

- [7] P. D. Johnson, "Pollution Effects on High Voltage Insulators," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 56, pp. 103-110, 2014.
- [8] R. A. Malik et al., "Impact of Fly Ash Deposition on Electrical Insulation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 212, pp. 1458-1466, 2019.
- [9] L. S. Wong and M. T. Tan, "Degradation of Ceramic Insulators by Fly Ash Contamination," *Ceramics International*, vol. 43, no. 12, pp. 9534-9542, 2017.
- [10] K. Patel, "Mitigation Techniques for Fly Ash Pollution on Electrical Insulators," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147620-147628, 2020.
- [11] D. Sharma and A. Gupta, "Environmental Impacts of Fly Ash from Thermal Power Plants," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 15, pp. 18256-18264, 2020.
- [12] Arpita Bhatt et al, "Physical, Shemical, and Geotechnical properties of coal fly ash: A global review". *Journal Case Studies in Construction Materials* Vol 11. Published by Elsevier Ltd. 2019
- [13] Ghunem, R. A., & El-Hag, A. H, "Effect of Pollution and Humidity on Leakage Current of Polymeric Insulators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(2), 660–667.2012
- [14] Gorur, R. S., Cherney, E. A., & Hackam, R, "The Electrical Performance of Polymeric Insulating Materials Under Salt-Fog Conditions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3), 1157–1165.1988
- [15] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, "Manufacturing Processes for Engineering Materials," Second Ed. Addison-Wesley Publishing Company, New York, USA, 1992.