

Analisis Pengaruh Kontaminasi Debu Vulkanik Gunung Marapi terhadap Tahanan Isolasi Isolator Porselin: Studi Kasus Gardu Induk Padang Luar**Yudia Meka Seftiani^{1*}, Novizon², Ari Fitra Adhi³**¹*Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Padang, Indonesia*^{2,3}*Departemen Teknik Elektro, Universitas Andalas, Indonesia*yudia@pnp.ac.id^{1*}, novizon@gmail.com², arifitraadhi@gmail.com³*Received 31 Maret 2026 | Revised 27 Juli 2026 | Accepted 06 Agustus 2026***ABSTRAK**

Isolator porselin merupakan salah satu komponen penting pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik yang berfungsi mengisolasi penghantar sekaligus mencegah terjadinya arus bocor. Kinerja isolator dapat menurun akibat kontaminasi lingkungan, salah satunya debu vulkanik, terutama pada wilayah yang terdampak aktivitas erupsi Gunung Marapi. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kontaminasi debu vulkanik alami terhadap nilai tahanan isolasi isolator porselin 20 kV pada berbagai kondisi kelembapan. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan pengujian tahanan isolasi menggunakan insulation tester pada tegangan uji 5 kV DC. Pengujian dilakukan pada empat kondisi, yaitu isolator bersih, isolator dengan kontaminasi debu vulkanik kering, debu vulkanik lembap (16 gr debu dan 5 mL air), serta debu vulkanik basah (16 gr debu dan 10 mL air). Setiap kondisi diuji sebanyak 10 kali pengulangan dan hasil pengukuran dianalisis menggunakan statistik deskriptif berupa nilai rata-rata, standar deviasi, dan persentase penurunan tahanan isolasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai rata-rata tahanan isolasi menurun dari 1010,6 MΩ pada kondisi bersih menjadi 885,7 MΩ pada kondisi debu kering, 567,6 MΩ pada kondisi debu lembap, dan 219,8 MΩ pada kondisi debu basah. Persentase penurunan terhadap kondisi bersih berturut-turut sebesar 12,36%, 43,83%, dan 78,25%. Hasil penelitian menunjukkan adanya kecenderungan penurunan nilai tahanan isolasi seiring meningkatnya kadar air pada lapisan debu vulkanik. Temuan ini dapat menjadi informasi pendukung dalam kegiatan inspeksi dan pemeliharaan isolator pada gardu induk di wilayah yang terdampak aktivitas vulkanik.

Kata kunci: Tahanan Isolasi, Isolator Porselin, Debu Vulkanik

Porcelain insulators are essential components in electric power transmission and distribution systems, functioning to electrically isolate conductors while preventing leakage current. The performance of porcelain insulators can deteriorate due to environmental contamination, particularly volcanic ash in areas affected by the eruption of Mount Marapi. This study aims to analyze the effect of natural volcanic ash contamination on the insulation resistance of a 20 kV porcelain insulator under different moisture conditions. An experimental method was employed by measuring insulation resistance using an insulation tester with a 5 kV DC test voltage. The tests were conducted under four conditions: clean insulator, dry volcanic ash contamination, moist volcanic ash contamination (16 gr of volcanic ash with 5 mL of water), and wet volcanic ash contamination (16 gr of volcanic ash with 10 mL of water). Each condition was tested ten times, and the measurement results were analyzed using descriptive statistics, including the mean, standard deviation, and percentage reduction in insulation resistance. The results showed that the average insulation resistance decreased from 1010.6 MΩ under clean conditions to 885.7 MΩ under dry volcanic ash contamination, 567.6 MΩ under moist volcanic ash contamination, and 219.8 MΩ under wet volcanic ash contamination. Compared with the clean condition, the insulation resistance decreased by 12.36%, 43.83%, and 78.25%, respectively. The findings indicate a decreasing trend in insulation resistance as the moisture content of the volcanic ash increased. These results provide useful information for the inspection and maintenance of porcelain insulators in substations located in volcanic ash-prone areas.

Keywords: Insulation Resistance, Porcelain Insulator, Volcanic Ash

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik merupakan infrastruktur vital yang mendukung aktivitas masyarakat dan industri melalui penyediaan energi listrik yang andal dan berkelanjutan (Srivastava et al., 2022). Keandalan sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh kondisi seluruh peralatan pendukung, salah satunya isolator tegangan tinggi yang berfungsi mengisolasi penghantar bertegangan dari struktur penyangga serta menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik (Alnavis et al., 2024). Isolator porselin masih banyak digunakan pada sistem transmisi dan gardu induk karena memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, stabilitas termal yang baik, serta

karakteristik dielektrik yang memadai untuk pengoperasian pada tegangan tinggi (Fadaeasrami et al., 2022). Meskipun demikian, performa isolator tidak hanya ditentukan oleh karakteristik materialnya, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tempat isolator beroperasi (El-Shahat et al., 2023). Kontaminasi berupa debu, garam, polutan industri, maupun partikel lain yang menempel pada permukaan isolator dapat menyebabkan penurunan karakteristik isolasi (Zhao et al., 2015). Pada kondisi lembap atau setelah terkena air hujan, lapisan kontaminan akan meningkatkan konduktivitas permukaan sehingga memicu arus bocor (*surface leakage current*) yang pada kondisi tertentu dapat berkembang menjadi gangguan isolasi maupun *flashover* (Mohammadnabi & Rahmani, 2021). Dengan demikian, evaluasi karakteristik isolator pada lingkungan yang rentan terhadap kontaminasi menjadi salah satu aspek penting dalam mendukung keandalan sistem tenaga listrik (Garip et al., 2022). Salah satu sumber kontaminasi alami yang berpotensi memengaruhi karakteristik listrik isolator adalah abu vulkanik. Abu vulkanik terdiri atas partikel-partikel halus hasil erupsi gunung api yang dapat terbawa angin dan mengendap pada berbagai infrastruktur, termasuk peralatan ketenagalistrikan yang berada di ruang terbuka (Ramírez et al., 2022). Abu vulkanik memiliki konduktivitas listrik yang dapat memengaruhi sistem tenaga listrik. Pada kondisi kering, pengaruh abu vulkanik terhadap karakteristik listrik isolator relatif kecil (Wardman et al., 2012). Ketika abu vulkanik bercampur dengan kelembapan udara, air hujan maka lapisan abu menjadi lebih konduktif sehingga meningkatkan arus bocor dan menurunkan tahanan isolasi (Nagai & Nakada, 2022). Kelembapan akan mempercepat penurunan performa isolator yang terkontaminasi abu vulkanik (Chrzan et al., 2011).

Gunung Marapi di Provinsi Sumatera Barat merupakan salah satu gunung api aktif yang mengalami beberapa kali erupsi sejak tahun 2023. Aktivitas erupsi tersebut menghasilkan sebaran abu vulkanik ke berbagai wilayah di sekitarnya sesuai dengan arah dan kecepatan angin pada saat erupsi (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, 2023). Kondisi ini menunjukkan bahwa infrastruktur ketenagalistrikan yang berada di kawasan sekitar Gunung Marapi berpotensi terpapar abu vulkanik sehingga diperlukan evaluasi terhadap performa isolator sebagai bagian dari upaya menjaga keandalan sistem tenaga listrik. Dalam penelitian ini, Gardu Induk Padang Luar dipilih sebagai studi kasus karena menggunakan isolator porselin pada sistem transmisinya serta berlokasi di Padang Lua, Kabupaten Agam dengan jarak sekitar 10 km dari Gunung Marapi (Berdasarkan pemetaan *Google Maps*), sehingga relevan untuk mengevaluasi potensi pengaruh kontaminasi abu vulkanik terhadap karakteristik isolator. Dalam memahami perkembangan penelitian mengenai pengaruh kontaminasi terhadap performa isolator tegangan tinggi, dilakukan telaah terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang relevan.

Penelitian terdahulu telah menunjukkan adanya hubungan antara kontaminasi permukaan isolator, khususnya abu vulkanik dan polutan lingkungan, dengan perubahan karakteristik kelistrikan isolator tegangan tinggi. Wardman et al. (2012) menunjukkan bahwa abu vulkanik memiliki konduktivitas yang dapat memengaruhi kinerja sistem tenaga, namun penelitian tersebut belum secara khusus menguji ketahanan isolasi terhadap kondisi kontaminasi abu vulkanik. Selanjutnya, Tobing (2016) menemukan bahwa keberadaan abu vulkanik dan kelembapan pada isolator porselin dapat meningkatkan arus bocor, yang menunjukkan bahwa kondisi lingkungan dan kelembapan memiliki peran penting terhadap penurunan kinerja isolator. Penelitian Ramírez et al. (2022) juga menunjukkan bahwa paparan abu vulkanik dapat menurunkan karakteristik dielektrik isolator gantung. Sementara itu, Salem et al. (2022) membuktikan bahwa kontaminasi pada permukaan isolator porselin dapat menyebabkan peningkatan *leakage current* (arus bocor). Hasil serupa ditunjukkan oleh El-Shahat et al. (2023), yang menyatakan bahwa polutan lingkungan pada permukaan isolator dapat meningkatkan risiko kegagalan isolasi.

Berdasarkan penelitian terdahulu dapat diketahui bahwa penelitian mengenai pengaruh kontaminasi terhadap karakteristik isolator tegangan tinggi telah banyak dilakukan dengan berbagai jenis kontaminan, seperti garam, polutan industri, debu gurun dan abu vulkanik. Sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa kontaminasi pada permukaan isolator dapat meningkatkan konduktivitas permukaan, memperbesar arus bocor, serta menurunkan karakteristik dielektrik dan keandalan isolasi. Namun, fokus penelitian terdahulu umumnya masih terbatas pada pengukuran arus bocor, karakteristik dielektrik, atau simulasi distribusi medan listrik. Selain itu, penelitian yang secara khusus mengevaluasi perubahan nilai tahanan isolasi isolator porselin menggunakan sampel abu vulkanik alami hasil erupsi Gunung Marapi masih sangat terbatas. Penelitian terdahulu juga belum banyak mengkaji pengaruh variasi tingkat kelembapan kontaminan, yaitu pada kondisi kering, lembap, dan basah, padahal kondisi tersebut sering dijumpai pada lingkungan gardu induk di wilayah tropis akibat perubahan cuaca. Dengan demikian, masih terdapat *research gap* berupa belum tersedianya data empiris mengenai pengaruh abu vulkanik alami Gunung Marapi dengan variasi tingkat kelembapan terhadap nilai tahanan isolasi isolator porselin. Berdasarkan *research gap* tersebut, kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan sampel abu vulkanik alami hasil erupsi Gunung Marapi sebagai media kontaminasi untuk mengevaluasi perubahan nilai tahanan isolasi isolator porselin milik Gardu Induk Padang Luar. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini tidak hanya membandingkan kondisi isolator bersih dan terkontaminasi, tetapi juga menganalisis pengaruh tiga tingkat kelembapan

kontaminan, yaitu kering, lembap, dan basah. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi data empiris yang mendukung strategi inspeksi, pembersihan, dan pemeliharaan isolator pada gardu induk di wilayah yang berpotensi terpapar abu vulkanik sehingga keandalan sistem tenaga listrik dapat tetap terjaga.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh kontaminasi debu vulkanik terhadap nilai tahanan isolasi isolator porselin milik Gardu Induk Padang Luar. Pengujian dilakukan dengan memberikan perlakuan berupa empat kondisi permukaan isolator, yaitu isolator bersih (tanpa kontaminasi), isolator terkontaminasi debu vulkanik kering, isolator terkontaminasi debu vulkanik lembap, dan isolator terkontaminasi debu vulkanik basah. Pada setiap kondisi dilakukan pengukuran nilai tahanan isolasi menggunakan *insulation resistance tester* sesuai prosedur pengujian yang telah ditetapkan. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis secara deskriptif dan kuantitatif untuk mengevaluasi pengaruh tingkat kelembapan debu vulkanik terhadap perubahan nilai tahanan isolasi isolator porselin. Metode penelitian ini terdiri atas (1) desain dan lokasi penelitian, (2) spesifikasi isolator, (3) pengambilan dan karakterisasi debu vulkanik, (4) alat dan konfigurasi pengujian, (5) persiapan kondisi kontaminasi, (6) pengendalian suhu dan kelembapan, (7) prosedur pengukuran, serta (8) metode analisis data.

A. Desain Penelitian

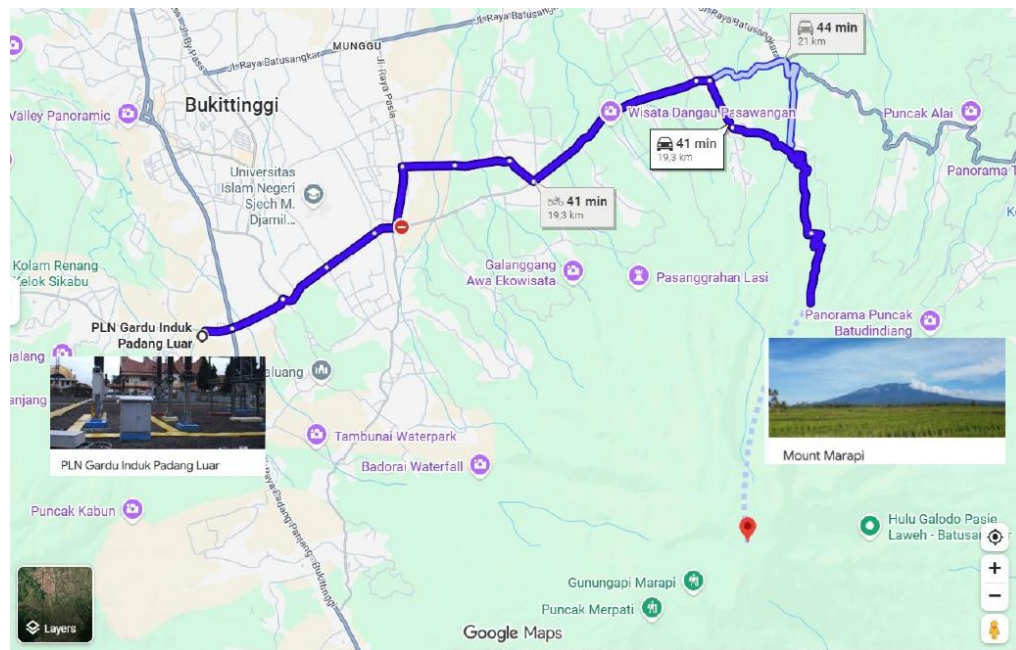
Penelitian ini menerapkan rancangan eksperimen satu faktor yaitu kondisi kontaminasi debu vulkanik pada permukaan isolator porselin. Variabel bebas adalah kondisi kontaminasi debu vulkanik yang terdiri atas empat tingkat perlakuan, sedangkan variabel terikat adalah nilai tahanan isolasi isolator porselin. Seluruh perlakuan dilakukan pada objek uji yang sama dengan prosedur pengujian yang identik untuk meminimalkan pengaruh variabel di luar penelitian. Setiap kondisi perlakuan diuji sebanyak sepuluh kali pengulangan sehingga diperoleh data yang konsisten. Rancangan perlakuan penelitian disusun untuk membandingkan perubahan nilai tahanan isolasi akibat perbedaan tingkat kelembapan debu vulkanik. Kondisi isolator bersih digunakan sebagai nilai acuan, sedangkan tiga kondisi kontaminasi digunakan untuk mengevaluasi pengaruh keberadaan debu vulkanik pada berbagai tingkat kelembapan terhadap karakteristik isolasi isolator porselin. Rancangan perlakuan penelitian ditunjukkan pada tabel 1. Rancangan perlakuan pada tabel 1 digunakan sebagai acuan dalam pelaksanaan seluruh tahapan pengujian tahanan isolasi isolator porselin.

Tabel 1. Rancangan Perlakuan Pengujian Tahanan Isolasi Isolator Porselin

Kondisi Pengujian	Perlakuan	Tujuan Pengujian	Jumlah Pengujian
Bersih	Isolator tanpa kontaminasi debu vulkanik	Nilai acuan	10 Kali
Debu Kering	Permukaan isolator diberi debu vulkanik kering	Mengetahui Pengaruh Kontaminasi awal	10 Kali
Debu Lembap	Permukaan isolator diberi debu vulkanik lembap	Mengetahui Pengaruh kelembapan sedang	10 Kali
Debu Basah	Permukaan isolator diberi debu vulkanik basah	Mengetahui Pengaruh kelembapan tinggi	10 Kali

B. Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan isolator porselin milik Gardu Induk (GI) Padang Luar sebagai objek penelitian. Pengujian dilakukan terhadap isolator yang tidak sedang terpasang pada sistem transmisi sehingga seluruh proses pemberian kontaminasi dan pengukuran tahanan isolasi dapat dilakukan secara terkendali tanpa memengaruhi operasi gardu induk. Gardu Induk Padang Luar merupakan gardu induk tegangan tinggi 150 kV yang berlokasi di Nagari Padang Lua, Kecamatan Banuhampu, Kabupaten Agam, Provinsi Sumatera Barat. GI Padang Luar mulai beroperasi pada tahun 1989 dan berfungsi sebagai salah satu gardu induk utama dalam sistem interkoneksi Sumatera Barat dengan transformator daya berkapasitas 1x20 MVA dan tegangan operasi 150/20 kV. Secara geografis, lokasi gardu induk berada pada kawasan dataran tinggi dengan elevasi sekitar 963 meter di atas permukaan laut dan berjarak sekitar 10 km dari Gunung Marapi berdasarkan hasil pemetaan menggunakan *Google Maps*. Gambar 1 menyajikan peta lokasi penelitian yang menunjukkan posisi Gardu Induk Padang Luar terhadap Gunung Marapi di Provinsi Sumatera Barat.



Gambar 1. Peta Lokasi Gardu Induk Padang Luar

C. Spesifikasi Isolator

Isolator merupakan salah satu komponen utama pada sistem tenaga listrik yang berfungsi memberikan isolasi listrik antara konduktor bertegangan dengan struktur penyangga yang terhubung ke tanah, sekaligus menopang beban mekanis konduktor maupun peralatan gardu induk (Salem, Lau, Ishak, et al., 2022). Pada gardu induk tegangan tinggi, isolator harus mampu mempertahankan kekuatan dielektrik terhadap tegangan operasi, tegangan lebih akibat petir maupun switching, serta mampu menahan pengaruh lingkungan seperti kelembapan, polusi, garam laut, debu industri, dan abu vulkanik (IEC 60383-1:2023). Material isolator yang umum digunakan pada gardu induk terdiri atas porselin, kaca, dan polimer komposit. Diantara ketiga material tersebut, isolator porselin masih banyak digunakan pada gardu induk karena memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, stabil terhadap temperatur, memiliki umur operasi yang panjang, serta tahan terhadap radiasi ultraviolet (Merga Tullu et al., 2022). Isolator porselin terbuat dari material keramik yang tersusun atas campuran kaolin, feldspar, dan kuarsa yang dibakar pada temperatur tinggi sehingga memiliki kekuatan mekanik yang baik, stabilitas termal, serta karakteristik isolasi listrik yang tinggi (Kluss et al., 2019a). Namun demikian, sifat permukaan porselin yang bersifat hidrofilik menyebabkan kontaminan lebih mudah menempel pada permukaan isolator (Belhouchet et al., 2019). Apabila kontaminan tersebut bercampur dengan kelembapan atau air hujan, akan terbentuk lapisan elektrolit yang meningkatkan konduktivitas permukaan sehingga menyebabkan kenaikan arus bocor dan penurunan tahanan isolasi (Irmea Sinisuka & Abdurahman Djauhari, 2010).

Objek penelitian ini berupa isolator porselin tipe *station post insulator* yang berasal dari Gardu Induk Padang Luar. Isolator tersebut digunakan sebagai isolator penyangga (*support insulator*) pada peralatan gardu induk kelas tegangan 150 kV. Pengujian dilakukan menggunakan isolator yang tidak sedang terpasang pada sistem sehingga seluruh proses pemberian kontaminasi debu vulkanik dan pengukuran tahanan isolasi dapat dilaksanakan secara aman tanpa memengaruhi kontinuitas operasi gardu induk. Sebelum pengujian dilakukan, isolator diperiksa secara visual untuk memastikan tidak terdapat kerusakan fisik seperti retak, pecah, cacat glasir, maupun kontaminasi permanen yang dapat memengaruhi hasil pengukuran. Karakteristik isolator yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada tabel 1.

Spesifikasi pada tabel 2 menunjukkan karakteristik umum *station post insulator* yang digunakan pada gardu induk kelas tegangan 150 kV. Isolator jenis ini memiliki beberapa *sheds* yang berfungsi memperpanjang *creepage distance* sehingga mampu meningkatkan kemampuan isolasi permukaan terhadap pengaruh kontaminasi dan kelembapan (Agüero-Barrantes & Hain, 2024; Sanyal et al., 2020).

Tabel 2. Spesifikasi Isolator yang digunakan pada Penelitian

Parameter	Spesifikasi
Jenis isolator	<i>Station Post Insulator</i>
Material	Porselin
Sistem Tegangan	150 kV
Kelas Isolasi	170 kV
Frekuensi Normal	50 Hz
Bentuk	6 <i>sheds</i>
Tinggi Isolator	950 mm
Diameter Maksimum <i>Shed</i>	280 mm
Jumah Piring (<i>Shed</i>)	6 buah
<i>Creepage Distance</i>	4300 mm
<i>Dry Arcing Distance</i>	1100 mm
<i>Cantilever Distance</i>	12 kN
<i>Material Fitting</i>	<i>Galvanized Steel</i>
Warna	Coklat
Permukaan	<i>Glazed Porcelain</i>
Berat	28 kg
Standar Acuan	IEC 60168, IEC 60273, IEC 60383-1

Gambar 2 memperlihatkan bentuk fisik isolator porselin yang digunakan sebagai objek penelitian.



Gambar 2. Isolator Porselin yang Digunakan

D. Pengambilan dan Karakterisasi Debu Vulkanik

Debu vulkanik yang digunakan dalam penelitian ini merupakan debu hasil erupsi Gunung Marapi pada Desember 2023. Sampel debu dikumpulkan secara langsung pada saat kejadian erupsi menggunakan meja kaca yang diletakkan di ruang terbuka di halaman rumah peneliti sebagai media penampung deposisi debu vulkanik. Penggunaan permukaan kaca bertujuan untuk memperoleh sampel debu yang tidak bercampur dengan tanah maupun material lain sehingga karakteristik debu tetap terjaga. Pengambilan sampel dilakukan setiap kali terjadi deposisi abu vulkanik selama periode erupsi. Setelah permukaan meja kaca tertutup oleh abu vulkanik dalam jumlah yang memadai, sampel dikumpulkan secara hati-hati menggunakan alat yang bersih, kemudian segera dimasukkan ke dalam toples yang bersih dan kering. Seluruh sampel yang diperoleh selama periode pengambilan selanjutnya disimpan dalam wadah tertutup pada suhu ruang hingga digunakan sebagai bahan kontaminasi dalam pengujian. Sebelum digunakan, sampel debu diperiksa secara visual untuk memastikan tidak terdapat material asing seperti daun, ranting, maupun partikel berukuran besar. Debu vulkanik yang digunakan memiliki tekstur halus dengan warna abu-abu kecokelatan dan selanjutnya ditimbang menggunakan timbangan digital sesuai massa yang ditentukan pada setiap perlakuan pengujian.

E. Alat dan Konfigurasi Pengujian

Pengujian tahanan isolasi dilakukan menggunakan *insulation resistance tester* sebagai alat utama untuk mengukur nilai tahanan isolasi isolator porselin. Pengukuran dilakukan pada kondisi tanpa tegangan operasi (*off-line*) sehingga tidak mengganggu sistem kelistrikan Gardu Induk Padang Luar. Selain *insulation resistance tester*, digunakan beberapa peralatan pendukung untuk menyiapkan kondisi kontaminasi debu

vulkanik, mengendalikan lingkungan pengujian, serta mendokumentasikan hasil penelitian. Seluruh alat yang digunakan dalam penelitian disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Alat yang digunakan dalam Penelitian

No	Alat	Spesifikasi	Fungsi	Jumlah
1	<i>Insulation Resistance Tester</i> Kyoritsu KEW 3125A	5 kV DC	Mengukur nilai tahanan isolasi isolator porselin	1 unit
2	<i>Thermo Hygrometer Digital</i>	Rentang suhu -10–50 °C, Kelembapan 10-99% RH	Mengukur suhu dan kelembapan lingkungan selama pengujian	1 unit
3	Timbangan Digital	Ketelitian 0,01 gram	Menimbang massa debu vulkanik	1 unit
4	Botol Spray	Kapasitas ±500 mL	Menyemprotkan air secara merata pada permukaan debu vulkanik untuk menghasilkan kondisi lembap dan basah	1 buah
5	Gelas ukur	Kapasitas 100 mL	Mengukur volume air	1 buah
6	Klem Penghubung	Klem logam	Menghubungkan kabel uji <i>insulation tester</i> dengan terminal isolator agar kontak Listrik stabil selama pengukuran	1 buah
7	Laptop	<i>Microsoft excel</i>	Mengolah dan menganalisis data hasil pengujian menggunakan Microsoft Excel.	1 buah
8	Kuas halus	Lebar ±2 inci	Mengaplikasikan debu vulkanik pada permukaan isolator sesuai perlakuan pengujian	1 buah
9	Kain lap/ <i>microfiber</i>	Kain lembut, bersih dan tidak meninggalkan serat	Membersihkan permukaan isolator sebelum dan sesudah pengujian agar kondisi awal setiap pengujian seragam	1 buah
10	Kawat penghantar tembaga	Panjang ±15 cm, diameter ±0,8 mm	Menghubungkan terminal <i>insulation resistance tester</i> dengan bagian kepala isolator selama pengukuran	1 buah

Penelitian ini menggunakan beberapa peralatan utama dan pendukung untuk menunjang proses pengujian tahanan isolasi isolator porselin. Konfigurasi peralatan yang digunakan pada proses pengujian tahanan isolasi isolator porselin ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Konfigurasi Peralatan Pengujian Tahanan Isolasi Isolator Porselin

Gambar 3 menunjukkan konfigurasi pengujian tahanan isolasi isolator porselin. Selama pengujian, isolator diposisikan secara vertikal menggunakan penyangga berbahan isolasi untuk menjaga kestabilan posisi serta meminimalkan kemungkinan terjadinya kebocoran arus melalui media penyangga. Terminal positif *insulation resistance tester* dihubungkan pada fitting logam di bagian bawah isolator, sedangkan terminal negatif dihubungkan ke bagian kepala isolator menggunakan kawat penghantar sebagai titik kontak pengukuran.

Bahan yang digunakan dalam penelitian terdiri atas debu vulkanik Gunung Marapi sebagai media kontaminasi serta air bersih untuk membentuk variasi kondisi kontaminasi pada permukaan isolator. Rincian bahan yang digunakan disajikan pada tabel 4.

Tabel 4. Bahan Pengujian Penelitian

No	Bahan	Spesifikasi	Fungsi	Keterangan
1	Sample Debu Vulkanik Gunung Marapi	Sampel debu hasil erupsi Gunung Marapi periode Desember 2023–Januari 2024 yang dikumpulkan menggunakan media kaca dan disimpan dalam wadah tertutup	Sebagai media kontaminasi pada permukaan isolator porselin	±480 gram
2	Air Bersih	Air bersih	Digunakan untuk menghasilkan kondisi debu vulkanik lembap dan basah	1 liter

Pada tabel 5, debu vulkanik digunakan sebagai bahan utama untuk mensimulasikan kontaminasi permukaan isolator, sedangkan air bersih digunakan untuk memperoleh variasi kondisi kontaminasi berupa debu kering, debu lembap, dan debu basah sesuai dengan rancangan perlakuan penelitian.

F. Persiapan Kondisi Kontaminasi

Sebelum proses pengujian dilakukan, isolator porselin terlebih dahulu dicuci menggunakan air mengalir untuk menghilangkan debu, kotoran maupun kontaminan yang menempel pada permukaan isolator. Isolator dibersihkan menggunakan kain *microfiber* yang bersih, kering dan tidak meninggalkan serat hingga seluruh permukaan isolator kering. Prosedur pembersihan dan pengeringan dilakukan sebelum setiap perlakuan untuk memastikan seluruh pengujian diawali dengan kondisi permukaan isolator yang seragam serta mencegah pengaruh sisa kontaminasi dari perlakuan sebelumnya. Debu vulkanik yang telah disiapkan kemudian ditimbang menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,01 gram. Pada setiap perlakuan digunakan 16 gram debu vulkanik sehingga massa kontaminan tetap pada seluruh kondisi pengujian. Massa debu yang sama digunakan untuk memastikan bahwa perubahan nilai tahanan isolasi dipengaruhi oleh kondisi kontaminasi, bukan oleh perbedaan jumlah debu yang diaplikasikan. Debu yang telah ditimbang selanjutnya diaplikasikan secara merata pada permukaan enam piring (*shed*) isolator menggunakan kuas halus, baik pada sisi atas setiap piring, menggunakan kuas halus hingga terbentuk lapisan kontaminasi yang seragam. Berdasarkan dimensi isolator dengan diameter maksimum sekitar 280 mm dan jumlah enam piring, luas permukaan yang menerima kontaminasi diperkirakan sekitar 0,06m² setiap piringnya. Luas permukaan tersebut digunakan sebagai acuan dalam menentukan massa debu yang diaplikasikan sehingga seluruh permukaan isolator memperoleh lapisan kontaminasi yang relatif merata.

Penelitian ini menggunakan empat kondisi pengujian, yaitu kondisi bersih, debu vulkanik kering, debu vulkanik lembap, dan debu vulkanik basah. Pada kondisi bersih, isolator tidak diberikan kontaminasi debu sehingga digunakan sebagai nilai acuan. Pada kondisi debu kering, sebanyak 16 gram debu vulkanik diaplikasikan secara merata tanpa penambahan air. Untuk memperoleh kondisi debu lembap dan debu basah, air bersih ditambahkan menggunakan botol spray secara merata pada permukaan debu. Kondisi debu lembap diperoleh dengan penambahan 5 mL air, sedangkan kondisi debu basah diperoleh dengan penambahan 10 mL air. Setelah penambahan air, isolator didiamkan selama 5 menit agar air tersebar secara merata sebelum dilakukan pengukuran tahanan isolasi. Massa debu dan volume air ditetapkan berdasarkan kebutuhan untuk menghasilkan lapisan kontaminasi yang mampu menutupi seluruh permukaan enam piring isolator secara merata serta memberikan perbedaan kondisi kering, lembap, dan basah yang dapat diamati secara visual. Penelitian ini menggunakan satu buah isolator porselin sebagai objek pengujian untuk seluruh perlakuan. Setiap kondisi pengujian dilakukan sebanyak 10 kali pengulangan. Setelah seluruh pengulangan pada satu kondisi selesai dilakukan, isolator kembali dicuci menggunakan air mengalir, dikeringkan menggunakan kain *microfiber*, kemudian diperiksa secara visual untuk memastikan tidak terdapat sisa debu vulkanik sebelum diberikan perlakuan berikutnya. Prosedur ini dilakukan untuk mencegah terjadinya efek sisa kontaminasi (*carry-over effect*) antarperlakuan sehingga setiap kondisi pengujian memiliki kondisi awal yang sama.

G. Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan faktor yang ditetapkan untuk mengendalikan proses pengujian serta mengevaluasi pengaruh perlakuan terhadap hasil pengukuran. Pada penelitian ini, variabel dibedakan menjadi variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol agar perubahan nilai tahanan isolasi yang

diamati terutama disebabkan oleh perlakuan kontaminasi debu vulkanik. Rincian variabel penelitian disajikan pada tabel 5.

Tabel 5. Variabel Penelitian

No	Jenis Variabel	Variabel	Keterangan
1	Variabel Bebas	Kondisi kontaminasi debu vulkanik	Perlakuan berupa kondisi bersih, debu vulkanik kering, debu vulkanik lembap, dan debu vulkanik basah.
2	Variabel Terikat	Nilai tahanan isolasi	Nilai tahanan isolasi isolator porselin yang diukur menggunakan <i>insulation resistance tester</i> .
3	Variabel Kontrol	Jenis isolator	Isolator porselin yang sama digunakan pada seluruh pengujian.
		Tegangan Pengujian	Tegangan pengujian <i>insulation tester</i> dibuat tetap sebesar 5kV
		Massa debu vulkanik	Tetap sebesar 16 gram pada setiap perlakuan.
		Waktu Pendiaman	Tetap selama 5 menit sebelum pengukuran.
		Suhu dan kelembapan lingkungan	Dipantau menggunakan <i>thermo-hygrometer</i> dan dicatat selama pengujian.
		Metode aplikasi debu	Debu diaplikasikan menggunakan kuas halus secara merata pada seluruh permukaan isolator.
		Jumlah pengulangan pengujian	Setiap kondisi diuji sebanyak 10 kali.

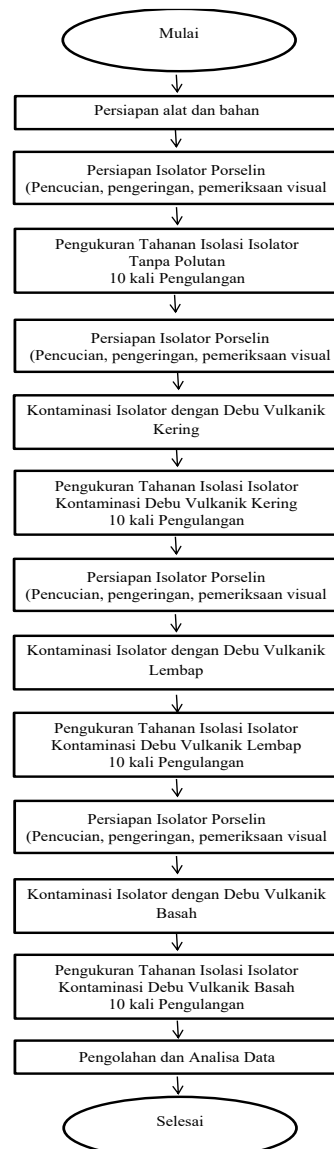
Berdasarkan tabel 5, kondisi kontaminasi debu vulkanik ditetapkan sebagai variabel bebas karena merupakan perlakuan yang diberikan pada isolator porselin. Nilai tahanan isolasi menjadi variabel terikat yang diamati sebagai respon terhadap setiap perlakuan, sedangkan variabel kontrol dijaga tetap selama pengujian untuk memastikan bahwa perubahan nilai tahanan isolasi terutama dipengaruhi oleh perbedaan kondisi kontaminasi debu vulkanik.

H. Pengendalian Suhu dan Kelembapan

Suhu dan kelembapan lingkungan merupakan faktor yang dapat memengaruhi nilai tahanan isolasi isolator porselin (Kluss et al., 2019b). Oleh karena itu, selama proses pengujian dilakukan pemantauan terhadap kedua parameter tersebut menggunakan *thermo-hygrometer* digital. Pengukuran suhu dan kelembapan dilakukan sebelum setiap pengujian dan hasilnya dicatat sebagai data pendukung penelitian. Seluruh pengujian dilaksanakan di dalam ruangan tanpa menggunakan sistem pendingin udara (*air conditioner*) untuk meminimalisir pengaruh perubahan kondisi lingkungan, seluruh rangkaian pengujian dilakukan pada ruangan yang sama, dalam rentang waktu yang relatif singkat, serta terhindar dari paparan sinar matahari langsung, hujan, dan aliran udara yang dapat memengaruhi kondisi permukaan isolator selama pengujian. Data suhu dan kelembapan lingkungan tidak digunakan sebagai variabel perlakuan, tetapi sebagai variabel kontrol yang dipantau selama penelitian. Dengan demikian, perubahan nilai tahanan isolasi yang diperoleh diharapkan dipengaruhi oleh variasi kondisi kontaminasi debu vulkanik pada permukaan isolator, bukan oleh perubahan kondisi lingkungan selama proses pengujian.

I. Prosedur Pengukuran

Prosedur pengukuran tahanan isolasi dilakukan secara sistematis untuk memperoleh data yang konsisten pada setiap kondisi pengujian. Seluruh pengujian menggunakan prosedur yang sama sehingga hasil pengukuran dapat dibandingkan secara objektif. Diagram alir prosedur pengukuran ditunjukkan pada gambar 6.

**Gambar 6. Diagram Alir Penelitian**

Gambar 6 menunjukkan diagram alir penelitian yang menggambarkan urutan pelaksanaan pengujian tahanan isolasi isolator porselin pada kondisi bersih, debu vulkanik kering, debu vulkanik lembap, dan debu vulkanik basah. Seluruh pengujian dilakukan menggunakan satu isolator yang sama dengan proses pencucian dan pengeringan di antara setiap perlakuan. Pengukuran tahanan isolasi dilakukan menggunakan tegangan uji DC sebesar 5 kV. Nilai tahanan isolasi dibaca setelah tegangan diberikan selama 60 detik. Setiap kondisi pengujian dilakukan sebanyak 10 kali pengulangan dengan jeda sekitar 2 menit antar pengukuran untuk menghilangkan pengaruh muatan sisa pada isolator. Pada kondisi debu vulkanik lembap dan debu vulkanik basah, pengukuran dilakukan setelah isolator didiamkan selama 5 menit sejak penyemprotan air agar kelembapan terdistribusi secara merata pada lapisan debu. Setelah seluruh pengulangan pada satu kondisi selesai, isolator dicuci menggunakan air mengalir, dikeringkan menggunakan kain *microfiber*, kemudian didiamkan sekitar 10 menit hingga permukaan benar-benar kering sebelum diberikan perlakuan berikutnya.

J. Parameter dan Standar Pengujian

Pengujian tahanan isolasi pada penelitian ini dilakukan menggunakan *insulation resistance tester* Kyoritsu Model KEW 3125A dengan tegangan uji 5 kV DC. Seluruh parameter pengujian dibuat tetap pada setiap perlakuan agar hasil pengukuran dapat dibandingkan secara objektif. Selain itu, pengujian mengacu pada standar nasional dan internasional yang berkaitan dengan pengukuran tahanan isolasi serta evaluasi kinerja isolator pada kondisi terkontaminasi.

Berdasarkan tabel 6, seluruh parameter pengujian ditetapkan tetap pada setiap perlakuan untuk menjamin konsistensi hasil pengukuran.

Tabel 6. Parameter Pengujian

No	Parameter	Nilai
1	Objek uji	Isolator porselin 20 kV
2	Alat ukur	<i>Insulation resistance tester Kyoritsu Model KEW 3125A</i>
3	Tegangan pengujian	5 kV DC
4	Lama pemberian tegangan	60 Detik
5	Jumlah pengulangan pengujian	10 kali pada setiap kondisi
6	Jeda antar pengukuran	2 menit
7	Kondisi pengujian	Bersih, debu vulkanik kering, debu vulkanik lembap, debu vulkanik basah
8	Massa debu vulkanik	16 gram
9	Volume air	0 mL, 5 mL, 10 mL sesuai kondisi pengujian
10	Besaran yang diukur	Nilai tahanan isolasi ($M\Omega/G\Omega$)
11	Suhu lingkungan	Dicatat menggunakan <i>thermo-hygrometer</i> selama pengujian
12	Kelembapan relatif	Dicatat menggunakan <i>thermo-hygrometer</i> selama pengujian

Selain parameter pengujian, penelitian ini juga mengacu pada beberapa standar nasional dan internasional yang berkaitan dengan karakteristik isolator porselin, pengujian tahanan isolasi, serta evaluasi kinerja isolator pada kondisi terkontaminasi. Standar-standar tersebut digunakan sebagai acuan dalam pelaksanaan pengujian dan interpretasi hasil penelitian sebagaimana disajikan pada tabel 7.

Tabel 7. Standar Pengujian

No	Standar	Keterangan
1	PUIL 2020	Acuan nasional mengenai keselamatan instalasi listrik dan prinsip pengujian tahanan isolasi.
2	IEC 60383-1	Sebagai acuan karakteristik dan persyaratan isolator porselin untuk sistem tegangan di atas 1 kV.
3	IEC 60507	Sebagai acuan metode pengujian isolator tegangan tinggi pada kondisi permukaan yang terkontaminasi polutan buatan.
4	IEC 60815	Sebagai referensi evaluasi pengaruh tingkat kontaminasi terhadap kinerja isolator tegangan tinggi di lingkungan tercemar. (<i>IEC 60815-3</i> , n.d.)

K. Analisis Data

Data yang diperoleh dari hasil pengukuran tahanan isolasi isolator porselin pada setiap kondisi pengujian dianalisis menggunakan analisis statistik deskriptif. Analisis dilakukan untuk mengetahui kecenderungan perubahan nilai tahanan isolasi akibat kontaminasi debu vulkanik pada berbagai tingkat kelembapan. Setiap kondisi pengujian dilakukan sebanyak 10 kali pengulangan, sehingga diperoleh data yang representatif untuk dianalisis. Tahapan analisis data pada penelitian yaitu :

1. Nilai rata-rata (*Mean*)

Nilai rata-rata digunakan untuk mengetahui kecenderungan nilai tahanan isolasi pada setiap kondisi pengujian.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

dengan:

$\bar{x}$: Nilai rata-rata tahanan isolasi ($M\Omega$)

x_i : Hasil pengukuran ke- i

n : Jumlah pengukuran

2. Standar Deviasi

Standar deviasi digunakan untuk mengetahui tingkat penyebaran data hasil pengukuran terhadap nilai rata-ratanya.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

dengan:

SD : Standar deviasi

x_i : Hasil pengukuran

$\bar{x}$: Rata-rata

3. Persentase Penurunan Tahanan Isolasi

Persentase penurunan digunakan untuk mengetahui besarnya penurunan nilai tahanan isolasi akibat kontaminasi debu vulkanik dibandingkan dengan kondisi isolator bersih.

$$\% \text{ Penurunan} = \frac{R_{\text{bersih}} - R_{\text{kontaminasi}}}{R_{\text{bersih}}} \times 100\% \quad (3)$$

dengan:

R_{bersih} : Rata-rata tahanan isolasi kondisi bersih

$R_{\text{kontaminasi}}$: Rata-rata tahanan isolasi setelah kontaminasi

4. Penyajian Data

Data hasil pengukuran disajikan dalam bentuk tabel yang memuat seluruh hasil pengukuran, nilai rata-rata $\pm$ standar deviasi, serta grafik hubungan antara kondisi kontaminasi debu vulkanik dan nilai tahanan isolasi. Pembahasan dilakukan secara deskriptif berdasarkan perubahan nilai rata-rata, simpangan baku, dan persentase penurunan tahanan isolasi pada setiap kondisi pengujian.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

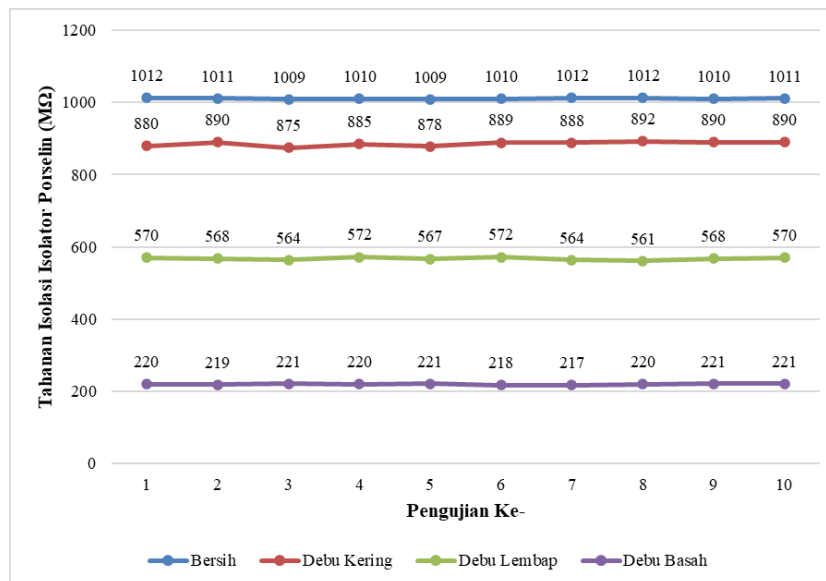
1. Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Porselin

Pengujian tahanan isolasi isolator porselin dilakukan pada empat kondisi, yaitu kondisi bersih (tanpa kontaminasi debu vulkanik), debu vulkanik kering, debu vulkanik lembap, dan debu vulkanik basah. Setiap kondisi diuji sebanyak 10 kali pengulangan dengan parameter pengujian yang sama. Hasil pengukuran tahanan isolasi pada masing-masing kondisi disajikan pada tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi Isolator Porselin

Pengujian	Bersih (M Ω)	Kering (M Ω)	Lembap (M Ω)	Basah (M Ω)
1	1012	880	570	220
2	1011	890	568	219
3	1009	875	564	221
4	1010	885	572	220
5	1009	878	567	221
6	1010	889	572	218
7	1012	888	564	217
8	1012	892	561	220
9	1010	890	568	221
10	1011	890	570	221
<i>Mean $\pm$ SD</i>	1010,6 $\pm$ 1,17	885,7 $\pm$ 5,87	567,6 $\pm$ 3,75	219,8 $\pm$ 1,48

Berdasarkan tabel 9, nilai tahanan isolasi pada setiap kondisi pengujian menunjukkan kecenderungan menurun seiring perubahan kondisi kontaminasi debu vulkanik. Nilai tahanan isolasi tertinggi diperoleh pada kondisi isolator bersih dengan rentang hasil pengukuran 1009–1012 M Ω . Setelah permukaan isolator diberi kontaminasi debu vulkanik, nilai tahanan isolasi menurun menjadi 875–892 M Ω pada kondisi debu kering, 561–572 M Ω pada kondisi debu lembap, dan 217–221 M Ω pada kondisi debu basah. Hasil pengukuran pada setiap kondisi memiliki penyebaran data yang relatif kecil, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai standar deviasi yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengukuran berulang dilakukan secara konsisten pada setiap kondisi pengujian. Untuk mempermudah perbandingan nilai tahanan isolasi pada keempat kondisi tersebut, data hasil pengukuran disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 7.



Gambar 7. Grafik Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi Isolator Porselin pada Berbagai Kondisi Kontaminasi Debu Vulkanik

Berdasarkan gambar 7, pola hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai tahanan isolasi pada setiap kondisi pengujian relatif stabil selama 10 kali pengulangan. Variasi hasil pengukuran pada setiap kondisi juga relatif kecil, yang menunjukkan bahwa prosedur pengujian dilakukan secara konsisten pada setiap pengulangan. Grafik juga memperlihatkan kecenderungan penurunan nilai tahanan isolasi seiring perubahan kondisi kontaminasi debu vulkanik dari kondisi bersih, debu kering, debu lembap, hingga debu basah. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar air pada lapisan debu vulkanik berpengaruh terhadap penurunan tahanan isolasi isolator porselin. Pada kondisi debu kering, partikel debu yang menempel pada permukaan isolator mulai mengurangi kemampuan permukaan isolator dalam mempertahankan sifat isolasinya, meskipun belum membentuk jalur penghantar yang kontinu. Ketika kadar air meningkat pada kondisi debu lembap dan debu basah, air melarutkan sebagian kandungan mineral yang terdapat pada debu vulkanik sehingga lapisan kontaminan menjadi lebih konduktif. Kondisi tersebut mempermudah terbentuknya jalur arus bocor permukaan (*surface leakage current*) yang menyebabkan nilai tahanan isolasi semakin menurun.

Hasil penelitian ini sejalan dengan teori karakteristik isolator tegangan tinggi yang menyatakan bahwa kontaminasi permukaan dan keberadaan kelembapan merupakan faktor yang memengaruhi kinerja isolasi. Lapisan kontaminan yang kering umumnya masih memiliki konduktivitas yang rendah, sedangkan peningkatan kadar air menyebabkan konduktivitas lapisan kontaminan meningkat sehingga arus bocor permukaan lebih mudah terbentuk. Kondisi tersebut mengakibatkan kemampuan isolator dalam menahan arus listrik menurun dan nilai tahanan isolasi menjadi lebih rendah dibandingkan kondisi permukaan yang bersih. Hasil penelitian ini juga menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan penelitian terdahulu mengenai pengaruh kontaminasi terhadap karakteristik kelistrikan material isolasi. Ezuber et al. (2020) melaporkan bahwa karakteristik kontaminan dan kondisi lingkungan memengaruhi degradasi sifat kelistrikan material, sedangkan IEC 60815 menjelaskan bahwa kelembapan pada lapisan kontaminan dapat meningkatkan konduktivitas permukaan isolator sehingga memperbesar kemungkinan terjadinya arus bocor. Meskipun penelitian ini menggunakan kontaminan berupa debu vulkanik Gunung Marapi, pola penurunan tahanan isolasi yang diperoleh menunjukkan kecenderungan yang serupa dengan hasil penelitian sebelumnya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa isolator yang terpapar debu vulkanik memerlukan perhatian lebih, terutama setelah terjadi hujan atau peningkatan kelembapan udara. Pada kondisi tersebut, lapisan debu yang semula relatif kering dapat berubah menjadi lapisan yang lebih konduktif sehingga memperbesar kemungkinan terbentuknya arus bocor pada permukaan isolator. Oleh karena itu, inspeksi kondisi isolator serta pembersihan secara berkala menjadi salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk menjaga keandalan sistem isolasi pada gardu induk yang berada di wilayah terdampak erupsi gunung api.

2. Analisis Statistik Deskriptif

Berdasarkan data hasil pengujian dilakukan analisis statistik deskriptif yang meliputi nilai rata-rata, nilai minimum, nilai maksimum, standar deviasi, dan persentase penurunan tahanan isolasi, hal ini bisa dilihat pada tabel 9.

Tabel 9. Statistik Deskriptif

Kondisi Isolator	Mean (MΩ)	Min (MΩ)	Max (MΩ)	Standar Deviasi	Penurunan Tahanan Isolasi (%)
Bersih (Tanpa Polutan)	1010,6	1009	1012	1,17	0
Debu Vulkanik Kering	885,7	875	892	5,87	12,36
Debu Vulkanik Lembab	567,6	561	572	3,75	43,84
Debu Vulkanik Basah	219,8	217	221	1,48	78,25

Berdasarkan tabel 10, nilai tahanan isolasi mengalami penurunan seiring meningkatnya kadar air pada debu vulkanik. Kondisi isolator bersih memiliki nilai rata-rata tertinggi sebesar $1010,6 \pm 1,17$ MΩ, sedangkan kondisi debu vulkanik basah memiliki nilai rata-rata terendah sebesar $219,8 \pm 1,48$ MΩ. Persentase penurunan tahanan isolasi meningkat dari 12,36% pada kondisi debu kering menjadi 43,83% pada kondisi debu lembab, dan mencapai 78,25% pada kondisi debu basah. Nilai standar deviasi yang relatif kecil pada seluruh kondisi menunjukkan bahwa variasi hasil pengukuran antar pengulangan relatif rendah.

3. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan adanya kecenderungan penurunan nilai tahanan isolasi isolator porselin seiring meningkatnya kadar air pada lapisan debu vulkanik. Dibandingkan dengan kondisi isolator bersih, rata-rata nilai tahanan isolasi menurun sebesar 12,36% pada kondisi debu vulkanik kering, 43,83% pada kondisi debu vulkanik lembab, dan mencapai 78,25% pada kondisi debu vulkanik basah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi kelembapan pada lapisan kontaminan berhubungan dengan semakin besarnya penurunan nilai tahanan isolasi. Pada kondisi debu vulkanik kering, partikel debu hanya menempel pada permukaan isolator tanpa adanya lapisan air yang menghubungkan antarpartikel. Akibatnya, jalur arus bocor (*surface leakage current*) yang terbentuk pada permukaan isolator masih terbatas sehingga penurunan nilai tahanan isolasi relatif kecil. Ketika debu berada pada kondisi lembab, keberadaan air pada lapisan debu diduga mulai melarutkan sebagian kandungan mineral dalam abu vulkanik sehingga lapisan kontaminan menjadi lebih konduktif. Kondisi tersebut berpotensi mempermudah terbentuknya jalur arus bocor pada permukaan isolator, sehingga nilai tahanan isolasi menurun lebih besar dibandingkan kondisi debu kering. Penurunan terbesar diperoleh pada kondisi debu vulkanik basah dengan nilai rata-rata tahanan isolasi sebesar 219,8 MΩ. Pada kondisi ini, lapisan debu yang telah jenuh air diduga membentuk jalur konduktif yang lebih kontinu pada permukaan isolator sehingga arus bocor permukaan lebih mudah mengalir. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberadaan air pada lapisan kontaminan berperan penting dalam menurunkan kemampuan isolator mempertahankan tahanan isolasinya. Pada sistem tenaga listrik, kondisi ini berpotensi meningkatkan kemungkinan terjadinya *surface discharge* maupun *flashover*, terutama apabila isolator beroperasi di lingkungan dengan tingkat kelembapan tinggi atau setelah terjadi hujan.

Massa debu vulkanik dijaga tetap sebesar 16 gram untuk setiap perlakuan sehingga ketebalan lapisan kontaminan dibuat relatif sama pada seluruh kondisi pengujian. Dengan demikian, perbedaan nilai tahanan isolasi yang diperoleh terutama dikaitkan dengan perubahan kondisi kelembapan debu vulkanik, bukan akibat perbedaan jumlah kontaminan yang diaplikasikan. Meskipun demikian, pada kondisi lapangan ketebalan lapisan abu vulkanik dapat bervariasi bergantung pada intensitas erupsi, arah angin, dan lamanya paparan sehingga dapat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik isolasi. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Salem, Lau, Rahiman, et al., 2022) yang melaporkan bahwa peningkatan kelembapan pada permukaan isolator diikuti oleh meningkatnya arus bocor dan menurunnya performa isolasi. Demikian pula, (Chandrasekar et al., 2009) menyatakan bahwa abu vulkanik yang mengendap pada permukaan isolator dapat menurunkan karakteristik isolasi akibat terbentuknya lapisan kontaminan. Perbedaan penelitian ini terletak pada penggunaan debu vulkanik alami hasil erupsi Gunung Marapi serta pengujian pada tiga kondisi kelembapan, yaitu kering, lembab, dan basah, sehingga hasil penelitian lebih merepresentasikan kondisi yang mungkin terjadi pada isolator gardu induk di wilayah terdampak erupsi.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa kontaminasi debu vulkanik pada permukaan isolator porselin berhubungan dengan penurunan nilai tahanan isolasi, dan penurunan tersebut semakin besar seiring meningkatnya kadar air pada lapisan debu vulkanik. Nilai rata-rata tahanan isolasi pada kondisi isolator bersih sebesar 1010,6 M Ω , kemudian menurun menjadi 885,7 M Ω pada kondisi debu vulkanik kering, 567,6 M Ω pada kondisi debu vulkanik lembap, dan 219,8 M Ω pada kondisi debu vulkanik basah. Dibandingkan dengan kondisi bersih, persentase penurunan tahanan isolasi masing-masing sebesar 12,36%, 43,83%, dan 78,25%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi debu vulkanik basah menghasilkan penurunan nilai tahanan isolasi paling besar dibandingkan kondisi pengujian lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan air pada lapisan debu vulkanik berkaitan dengan menurunnya kemampuan permukaan isolator dalam mempertahankan tahanan isolasi.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena pengujian dilakukan menggunakan satu spesimen isolator porselin dengan pengulangan pengukuran pada setiap kondisi kontaminasi. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menggambarkan kecenderungan perubahan nilai tahanan isolasi pada kondisi yang diuji dan masih memerlukan penelitian lanjutan dengan jumlah spesimen yang lebih banyak, variasi jenis isolator, serta parameter pengujian yang lebih lengkap, seperti pengukuran arus bocor dan konduktivitas lapisan kontaminan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agüero-Barrantes, P., & Hain, A. (2024). Structural Performance of Porcelain Insulators in Overhead Railway Power Systems: Experimental Evaluations and Findings. *Infrastructures*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/infrastructures9080138>
- Alnavis, N. B., Wirawan, R. R., Solihah, K. I., & Nugroho, V. H. (2024). Energi listrik berkelanjutan: Potensi dan tantangan penyediaan energi listrik di Indonesia. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, 1(2). <https://doi.org/10.61511/jimese.v1i2.2024.544>
- Belhouchet, K., Bayadi, A., Belhouchet, H., & Romero, M. (2019). Improvement of mechanical and dielectric properties of porcelain insulators using economic raw materials. *Boletín de La Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, 58(1), 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.05.004>
- Chandrasekar, S., Kalaivanan, C., Cavallini, A., & Montanari, G. C. (2009). *S. Chandrasekar et al.: Investigations on Leakage Current and Phase Angle Characteristics of Porcelain and Polymeric Insulator Investigations on Leakage Current and Phase Angle Characteristics of Porcelain and Polymeric Insulator under Contaminated Conditions*.
- Chrzan, K. L., Vosloo, W. L., & Holtzhausen, J. P. (2011). Leakage current on porcelain and silicone insulators under sea or light industrial pollution. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(3), 2051–2052. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2123470>
- El-Shahat, M., Al-Naimi, I., & Tag-Eldin, E. (2023). Risk Probabilistic Characteristics for Contaminated Porcelain Insulator in the Egyptian Sinai Desert. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/6662939>
- Fadaeeasrami, H., Faghihi, F., Olamaei, J., & Mohammadnezhadshourkaei, H. (2022). FEM analysis of polluted 230 kV porcelain insulators by introducing new asymmetrical contamination: Elliptical ring-shaped. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108274>
- Garip, S., Özdemir, Ş., & Altın, N. (2022). Power system reliability assessment - A review on analysis and evaluation methods. *Journal of Energy Systems*, 6(3), 401–419. <https://doi.org/10.30521/jes.1099618>
- Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V. Part 1, Ceramic or glass insulator units for a.c. systems : definitions, test methods and acceptance criteria = Isolateurs pour lignes aériennes de tension nominale supérieure à 1000 V. Partie 1: éléments d'isolateurs en matière céramique ou en verre pour systèmes à courant alternatif - définitions, méthodes d'essai et critères d'acceptation.* (2023). International Electrotechnical Commission.

- International Electrotechnical Commission. (2025). IEC TS 60815-2:2025: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions—Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems. Geneva: IEC.
- Irmea Sinisuka, N., & Abdurahman Djauhari, M. (2010). *Leakage Current and Pollutant Properties of Porcelain Insulators from the Geothermal Area* (Vol. 8, Number 1).
- Kluss, J., Chalaki, M. R., Whittington, W., Rhee, H., Whittington, S., & Yadollahi, A. (2019a). Porcelain insulation – defining the underlying mechanism of failure. *High Voltage*, 4(2), 81–88. <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0004>
- Kluss, J., Chalaki, M. R., Whittington, W., Rhee, H., Whittington, S., & Yadollahi, A. (2019b). Porcelain insulation – defining the underlying mechanism of failure. *High Voltage*, 4(2), 81–88. <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0004>
- Merga Tullu, A., Terfasa, T. T., Zerfe, E. A., Tadesse, M., Beyene, E., Abebe, A. M., & Adoshe, D. M. (2022). Effect of cullet on firing temperature and dielectric properties of porcelain insulator. *Heliyon*, 8(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08922>
- Mohammadnabi, S., & Rahmani, K. (2021). Influence of humidity and contamination on the leakage current of 230-kV composite insulator. *Electric Power Systems Research*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107083>
- Nagai, M., & Nakada, S. (2022). Impact on the Electric Infrastructure Due to Volcanic Ash from a Hydrovolcanic Eruption of Aso Volcano in 2016. *Journal of Disaster Research*, 17(5), 829–838. <https://doi.org/10.20965/jdr.2022.p0829>
- Ramírez, J., Vasconez, F. J., López, A., Valencia, F., Quilumba, F., Vásconez Müller, A., Hidalgo, S., & Bernard, B. (2022). Impact of volcanic ash from Cotopaxi-2015 and Tungurahua-2016 eruptions on the dielectric characteristics of suspension insulators, Ecuador. *Journal of Applied Volcanology*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s13617-022-00117-y>
- Salem, A. A., Lau, K. Y., Ishak, M. T., Abdul-Malek, Z., Al-Gailani, S. A., Al-Ameri, S. M., Mohammed, A., Alashbi, A. A. S., & Ghoneim, S. S. M. (2022). Monitoring Porcelain Insulator Condition Based on Leakage Current Characteristics. *Materials*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/ma15186370>
- Salem, A. A., Lau, K. Y., Rahiman, W., Abdul-Malek, Z., Al-Gailani, S. A., Rahman, R. A., & Al-Ameri, S. (2022). Leakage current characteristics in estimating insulator reliability: experimental investigation and analysis. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17792-x>
- Sanyal, S., Kim, T., Yi, J., Koo, J. Bin, Son, J. A., & Choi, I. H. (2020). Failure trends of high-voltage porcelain insulators depending on the constituents of the porcelain. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(2), 694. <https://doi.org/10.3390/app10020694>
- Srivastava, I., Bhat, S., Vardhan, B. V. S., & Bokde, N. D. (2022). Fault Detection, Isolation and Service Restoration in Modern Power Distribution Systems: A Review. In *Energies* (Vol. 15, Number 19). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15197264>
- Wardman, J. B., Wilson, T. M., Bodger, P. S., Cole, J. W., & Johnston, D. M. (2012). Investigating the electrical conductivity of volcanic ash and its effect on HV power systems. *Physics and Chemistry of the Earth*, 45–46, 128–145. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.09.003>
- Zhao, S., Jiang, X., & Xie, Y. (2015). Evaluating the contamination level of polluted insulators based on the characteristics of leakage current. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 25(10), 2109–2123. <https://doi.org/10.1002/etep.1951>