

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional
DOI: 10.22146/jnteti.v13i4.6963

Kinerja Isolator Kaca Bekas dan Berumur Terhadap Basic Insulation Level (BIL)

Naufal Hilmi Fauzan^{1,2}, Adhimas Daffa Kurnia¹, Prayudi Efendi¹, Prasetyohadi¹, Daryadi¹

¹ Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Sleman, D.I. Yogyakarta 55281, Indonesia

² Department of Electrical Engineering, College of Electrical Engineering and Computer Science, National Taiwan University of Science and Technology, Da'an District, Taipei City 106335, Taiwan (R.O.C.)

[Diserahkan: 14 Februari 2023, Direvisi: 6 April 2023, Diterima: 21 Juli 2023]

Penulis Korespondensi: Naufal Hilmi Fauzan (email: naufalhilmi.fauzan@ugm.ac.id)

INTISARI — Isolator tegangan tinggi memainkan peran penting dalam memastikan keamanan sistem listrik yang beroperasi pada tegangan tinggi. Isolator memiliki fungsi sebagai pemisah tegangan antara konduktor fase dan konduktor fase lainnya dan juga antara konduktor fase dengan *ground*. Dalam perancangan sistem tenaga listrik, *basic insulation level* (BIL) tidak dapat diabaikan. BIL merupakan batas operasional tegangan maksimum sebelum isolator mengalami *flashover*. Selain harus mampu menahan tegangan, isolator juga harus mampu menahan kondisi lingkungan, seperti suhu, kelembapan, dan polusi, yang dapat memengaruhi kinerja isolator. Pada penelitian ini, dilakukan pengujian untuk melihat kinerja isolator kaca bekas PLTU Adipala ketika dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan dibandingkan dengan nilai BIL. Pengujian dilakukan dengan empat skema, yaitu pengujian dalam kondisi baik, pengujian dengan kondisi basah, pengujian dengan kondisi diberikan polutan, dan pengujian dengan kondisi ketika isolator dengan polutan berada pada kondisi lembap. Berdasarkan pengujian, didapatkan hasil bahwa kondisi yang sangat memengaruhi kinerja isolator adalah kondisi basah dan juga kondisi berpolutan dan lembap. Pada kondisi isolator bersih yang terkena hujan, penurunan kinerja isolator sebesar 19% sampai 25%, sedangkan pada kondisi diberikan polutan dengan *equivalent salt deposit density* (ESDD) 0,113816 mg/cm² dan *non-soluble deposit density* (NSDD) 1,309962 mg/cm² serta berada pada kelembapan 90%, terjadi penurunan kinerja sebesar 41% hingga 53%. Penurunan yang sangat signifikan ini tentunya mengakibatkan kinerja isolator berada jauh di bawah standar BIL.

KATA KUNCI — Isolator, BIL, Kelembapan, ESDD, NSDD.

I. PENDAHULUAN

Isolator merupakan salah satu komponen utama pada peralatan tegangan tinggi. Isolator memiliki fungsi sebagai pemisah tegangan antara konduktor fase dan konduktor fase lainnya dan juga antara konduktor fase dengan *ground* [1]. Material penyusun isolator harus memiliki karakteristik seperti tahan terhadap suhu tertentu, kuat secara mekanis, memiliki kemampuan isolasi yang kuat, serta dapat mencegah masuknya cairan ataupun udara yang dapat menurunkan kekuatan isolasi dari isolator [2]. Material penyusun isolator dapat tersusun dari jenis material padat, cair, maupun gas, yang masing-masing memiliki nilai kekuatan dielektrik berbeda-beda. Kekuatan dielektrik dapat didefinisikan sebagai kekuatan bahan dalam menahan tegangan per satuan panjang bahan (kV/m). Isolator padat, selain dapat dibedakan berdasarkan material penyusunnya, dapat juga dibedakan berdasarkan bentuknya. Referensi [3] menyatakan bahwa terdapat beberapa profil isolator, antara lain *standard profiles*, *aerodynamic profiles*, *anti-fog profiles*, dan *alternating shed profiles*.

Secara mekanis, isolator berfungsi untuk menahan beban kawat saluran udara. Secara elektris, isolator berfungsi untuk mengisolasi saluran yang bertegangan agar tidak terjadi kebocoran arus [4]. Isolator memanfaatkan sifat dasar bahan dielektrik penyusunnya untuk menghentikan pergerakan muatan listrik, sehingga tidak akan terjadi aliran listrik [5]. Bahan dielektrik sendiri dapat digolongkan menjadi tiga jenis, yaitu bahan dielektrik padat, cair, dan gas. Setiap bahan tersebut masih dapat digolongkan lagi ke dalam jenis yang berbeda. Pemilihan bahan akan sangat bergantung pada kebutuhan pemakaian isolator itu sendiri. Makalah ini berfokus pada jenis isolator padat karena jenis isolator ini adalah jenis yang paling sering digunakan pada sistem tenaga listrik.

Beberapa material padat yang sering digunakan sebagai material isolator antara lain kaca, keramik, serta bahan komposit. Saat ini, penggunaan bahan kaca sebagai bahan isolasi makin populer. Kaca memiliki nilai tahanan dielektrik sebesar 140 kV/cm, yang lebih tinggi daripada tahanan dielektrik bahan keramik, yaitu 60 kV/cm [5]. Penelitian ini difokuskan pada jenis isolator padat berbahan kaca karena jika ditinjau dari kekuatan dielektriknya, kaca lebih kuat dibandingkan dengan jenis keramik. Bentuk isolator yang diteliti adalah *anti fog profiles* karena jenis ini mulai banyak diterapkan di lapangan untuk meminimalkan terbentuknya embun pada isolator.

Selain nilai kekuatan dielektrik bahan yang harus diperhatikan, terdapat faktor penting lain dalam melakukan pemilihan isolator, yaitu *creepage distance*. *Creepage distance* dapat didefinisikan sebagai jarak minimum antara dua bagian konduktif dari kedua ujung isolator [6]. Isolator akan memiliki kekuatan isolasi yang lebih tinggi jika terjadi peningkatan nilai *creepage distance* untuk nilai kekuatan dielektrik yang sama. Dalam perhitungan nilai *creepage distance*, bahan seperti semen dan noninsulator tidak termasuk ke dalam perhitungan *creepage distance*. Makin besar *creepage distance*, makin besar pula kekuatan isolasinya, sehingga *surface discharge* yang terjadi juga akan makin kecil.

Basic insulation level (BIL) merupakan batas operasi tagangan maksimum sebelum isolator mengalami *flashover*. Tiap tegangan nominal memiliki nilai BIL masing-masing, seperti tegangan nominal 15 kV memiliki BIL 110 kV; tegangan nominal 25 kV memiliki BIL 150 kV; dan tegangan nominal 34,5 kV memiliki BIL 200 kV [7]. BIL dapat dibagi menjadi jenis BIL konvensional serta BIL statistik. BIL konvensional menunjukkan batas puncak nilai tegangan impuls

petir standar yang tidak menyebabkan kerusakan, sedangkan BIL statistik merupakan batas puncak tegangan impuls petir standar, yaitu ketika isolator memiliki kemungkinan bertahan sebesar 90% dan mengalami kegagalan sebesar 10% [8]. BIL tidak dapat diabaikan dalam merancang sistem tenaga listrik karena membantu menentukan tegangan operasi maksimal sistem dan membantu memastikan keselamatan peralatan dan personel.

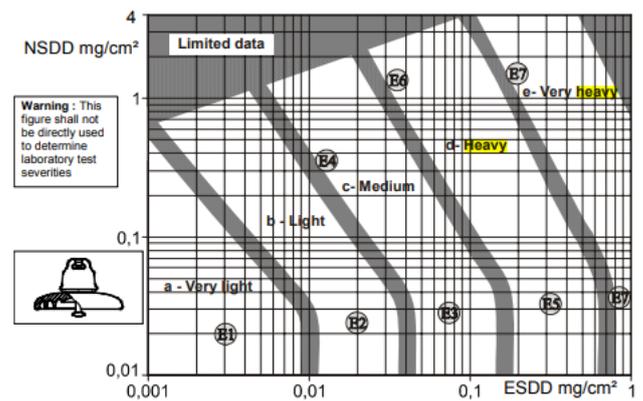
Dalam sistem listrik tegangan tinggi, *creepage distance* dan BIL saling bergantung dan harus diamati bersama untuk memastikan bahwa sistem isolasi berfungsi secara efektif dan aman. *Creepage distance* harus cukup untuk memberikan kekuatan isolasi yang diperlukan, sedangkan BIL harus cukup tinggi untuk menahan tegangan operasi maksimal sistem. Desain sistem isolasi tegangan tinggi harus memperhitungkan kondisi lingkungan, seperti suhu, kelembapan, dan polusi, yang dapat memengaruhi *creepage distance* dan BIL.

Kekuatan isolasi dari isolator dapat dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal. Faktor internal, seperti nilai kekuatan dielektrik bahan, akan sangat memengaruhi kekuatan isolasi dari isolator. Makin tinggi nilai kekuatan dielektrik bahan, makin tinggi pula kekuatan isolator untuk menahan tegangan. Selain itu, ketidaksempurnaan produksi yang memunculkan *microvoid* di dalam tubuh isolator akan memberikan pengaruh besar pada kinerja isolator. Selain faktor internal, faktor eksternal juga tidak dapat diabaikan dalam menentukan kekuatan isolasi dari isolator. Pengaruh lingkungan seperti suhu, kelembapan, kontaminasi polutan, cahaya matahari, serta butiran air yang menempel pada permukaan isolator dapat merusak isolator dan menurunkan kekuatan isolasi dari permukaan isolator [9]. Penurunan kekuatan isolasi yang berkelanjutan akan menimbulkan kerugian karena menyebabkan makin meningkatnya arus yang merambat melalui permukaan isolator, yang disebut arus bocor permukaan atau *surface discharge* [10]. *Surface discharge* yang dibiarkan dan berlangsung secara terus-menerus dapat memicu terjadinya *flashover*. *Flashover* yang terjadi secara berulang terus-menerus dapat mengakibatkan terkelupasnya lapisan glasir permukaan isolator yang akan memperburuk kekuatan isolasi isolator tersebut.

Penurunan kekuatan isolasi tentunya akan berpengaruh terhadap kemampuan isolator dalam menangani lonjakan tegangan yang dapat diakibatkan oleh faktor internal jaringan, seperti *switching surge*, maupun faktor eksternal, seperti sambaran petir. Kenaikan tegangan ini dapat memberikan dampak buruk serta dapat merusak sistem kelistrikan [3], [11].

Pada penerapannya, isolator kaca kebanyakan digunakan pada pemakaian luar ruangan, sehingga isolator tidak dapat terhindar dari paparan polutan serta pengaruh kelembapan lingkungan. Paparan polutan secara terus-menerus akan menyebabkan terjadinya lapisan polutan pada permukaan isolator. Dalam kondisi kering, polutan tidak terlalu memengaruhi kekuatan isolasi dari isolator. Namun, jika isolator berada pada kondisi lembap, elektrolit dari polutan dapat larut, sehingga menaikkan nilai konduktivitas permukaan isolator. Kenaikan nilai konduktivitas ini akan langsung berpengaruh terhadap penurunan kekuatan isolasi dan memunculkan kemungkinan terjadinya *flashover*, yang tentunya akan sangat memengaruhi kestabilan dan keamanan sistem tenaga listrik [12]–[14].

Tingkat keparahan polusi (*site pollution severity*) pada isolator dapat ditentukan dengan mengukur nilai *equivalent salt deposit density* (ESDD) dan *non-soluble deposit density*



Gambar 1. Site pollution severity (SPS).

(NSDD) [15], [16]. Tingkat keparahan polusi dari isolator diperlihatkan pada Gambar 1 [16].

Pengukuran ESDD akan menghasilkan data pengukuran konduktivitas polutan dalam satuan mg/cm^2 . ESDD dapat didefinisikan sebagai jumlah *sodium chloride* (NaCl) terlarut *demineralized water* (akuades) yang terdapat pada kontaminan. Pengukuran ESDD diawali dengan melakukan pemindahan kontaminan yang menempel pada permukaan isolator ke dalam 100-300 ml akuades. Akuades yang telah tercampur dengan seluruh polutan isolator akan diukur nilai konduktivitasnya menggunakan *conductivity meter*.

Selain ESDD, nilai NSDD dari polutan juga perlu diperhatikan. NSDD dapat didefinisikan sebagai nilai polutan yang tidak terlarut dalam akuades. NSDD dinyatakan dalam mg/cm^2 . Proses pengukuran NSDD diawali dengan menyaring akuades berisi polutan yang telah melalui proses pengukuran nilai konduktivitas menggunakan kertas filter. Selisih berat antara kertas filter sebelum dan sesudah dilakukan proses penyaringan akan digunakan untuk mendapatkan nilai NSDD.

Pemasangan isolator sebagian besar dilakukan pada udara terbuka, sehingga faktor lingkungan seperti polutan dan kelembapan tidak dapat diabaikan dalam mengamati kinerja isolator. Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui kinerja isolator kaca bekas yang sudah tidak dipakai dari PLTU Adipala pada berbagai kondisi lingkungan jika dibandingkan dengan BIL.

II. BAHAN DAN METODOLOGI

A. BAHAN DAN PERALATAN

1) ISOLATOR KACA

Isolator yang akan digunakan sebagai objek pengujian adalah tiga buah isolator kaca bekas yang telah mengalami beberapa kerusakan, seperti *treeing* dan keretakan pada permukaan isolator. Isolator ini merupakan isolator bekas yang sebelumnya digunakan pada jaringan 500 kV, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.

2) FLY ASH DAN GARAM

Bahan campuran antara *fly ash* sejumlah 300 gr dan garam laut sejumlah 50 gr digunakan sebagai bahan polutan. Kedua bahan dilarutkan ke dalam akuades sebanyak 300 ml untuk mendapatkan polutan cair yang kemudian disemprotkan secara merata pada permukaan isolator. Campuran antara *fly ash* dan garam dapat merepresentasikan jenis polutan tipe A, yaitu *sand-based pollution*.

3) AKUADES

Akuades berfungsi sebagai larutan pembersih pada isolator, bahan untuk membuat kabut pengatur kelembapan, serta



Gambar 2. Isolator uji.

sebagai pelarut polutan *fly ash* dan garam laut. Sifat akuades yang memiliki konduktivitas rendah dipilih agar tidak memengaruhi hasil pengujian

4) ALAT PENYEMPROT POLUTAN

Alat penyemprot polutan digunakan untuk memberikan polutan yang seragam pada permukaan isolator. Alat ini tersusun atas *spray gun* sebagai alat penyemprot polutan serta motor dan pengatur kecepatan motor melalui frekuensi, yang digunakan untuk memutar isolator dengan kecepatan yang stabil. Pemberian polutan yang seragam pada permukaan isolator dapat dicapai dengan menggabungkan keduanya. Gambar 3 menunjukkan alat pemberi polutan.

5) CONDUCTIVITY METER

Conductivity meter digunakan untuk mengukur nilai konduktivitas polutan yang menempel pada isolator. Selanjutnya, nilai konduktivitas polutan digunakan untuk mengukur nilai ESDD polutan.

6) POMPA PENURUN TEKANAN

Pompa penurun tekanan digunakan untuk mempercepat proses penyaringan polutan menggunakan kertas filter pada proses pengukuran berat polutan yang menempel di isolator.

7) KERTAS FILTER

Kertas filter yang digunakan memiliki diameter 47 mm, ketebalan 0,26 mm, serta ukuran pori 1,6 μm [16]. Kertas filter digunakan sebagai media pemisah antara polutan yang larut air dengan polutan yang tak larut air. Polutan yang tak larut air akan tertinggal pada kertas filter yang kemudian akan digunakan dalam pengukuran NSDD.

8) TIMBANGAN

Timbangan digunakan untuk mengukur berat polutan tak larut air yang tertinggal pada kertas filter. Nilai berat polutan tak larut air akan digunakan sebagai data untuk memperoleh nilai NSDD.

9) CHAMBER

Pengujian isolator dalam kondisi lingkungan lembap tidak mungkin dilakukan di luar ruangan karena kelembapan pada isolator akan langsung berkurang secara drastis setelah isolator mengalami *flashover*. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan *chamber* berbahan akrilik yang akan mengisolasi kelembapan di dalam *chamber* dari kelembapan luar *chamber*. *Chamber* yang digunakan memiliki dimensi 250 cm \times 250 cm \times 270 cm. Gambar 4 merupakan tampilan *chamber* yang digunakan.

10) HUMIDIFIER

Humidifier diletakkan di dalam *chamber* sebagai penghasil kabut menggunakan bahan akuades. Kabut berfungsi untuk meningkatkan kelembapan di dalam *chamber*.

11) SENSOR SUHU DAN KELEMBAPAN

Sensor suhu dan kelembapan berada di dalam *chamber* dan terintegrasi dengan *humidifier*. Selain memberikan data berupa suhu dan kelembapan, sensor ini mengatur mati dan nyalanya *humidifier* sesuai dengan tingkat kelembapan yang telah ditetapkan.



Gambar 3. Alat penyemprot polutan.



Gambar 4. Chamber tempat pengontrol kelembapan.

12) SENSOR TEKANAN UDARA

Sensor tekanan udara memberikan nilai pengukuran tekanan udara di lingkungan pengujian.

13) SPONS

Spons digunakan untuk membersihkan isolator serta untuk memindahkan polutan buatan yang telah menempel pada isolator.

14) GELAS PIALA (BEAKER GLASS)

Gelas piala digunakan sebagai tempat menampung akuades, polutan cair, serta cairan hasil pembersihan isolator.

B. METODE PENGUJIAN KETAHANAN ISOLATOR

Kondisi lingkungan di sekitar isolator kaca akan sangat memengaruhi kekuatan isolasi. Faktor lingkungan yang paling berpengaruh dan dapat dikontrol dalam pengujian adalah faktor kelembapan dan faktor polutan pada isolator. Untuk dapat mengetahui besarnya pengaruh kedua faktor tersebut, perlu dilakukan pengujian yang menggabungkan keduanya sebagai faktor perbandingan. Pada penelitian ini, isolator kaca bekas pakai dengan tipe isolator *anti-fog* dijadikan sebagai objek penelitian. Isolator ini sebelumnya digunakan pada jalur transmisi 500 kV. Pada jaringan 500 kV, digunakan isolator sebanyak 26-30 piringan. Mengacu pada [8], BIL isolator haruslah mampu menahan tegangan sebesar 3.500 kV atau setiap piringan isolator harus dapat menahan tegangan sebesar 117 kV sampai 134 kV. Berikut ini empat skema pengujian untuk melihat kinerja isolator dalam menahan tegangan.

1) PENGUJIAN KEKUATAN ISOLATOR KONDISI BERSIH DAN KERING

Skema pengujian pertama adalah dengan mengatur kondisi isolator dalam keadaan bersih tanpa polutan dan diuji dalam keadaan lingkungan kering, sehingga pada skema ini didapatkan data kinerja maksimum dari isolator ketika dikenai tegangan.

2) PENGUJIAN KEKUATAN ISOLATOR KONDISI BERSIH DAN BASAH

Skema pengujian kedua adalah dengan tetap mempertahankan kondisi bersih isolator, tetapi kali ini

pengujian dilakukan pada kondisi isolator basah, sehingga kelembapan menjadi faktor utama yang diamati. Kelembapan akibat hujan memberikan pengaruh terhadap kinerja isolator dalam menahan tegangan.

3) PENGUJIAN KEKUATAN ISOLATOR KONDISI KOTOR DAN KERING

Skema pengujian ketiga adalah dengan memberikan polutan yang homogen terhadap permukaan isolator kaca dan pengujian dilakukan dalam kondisi kering. Pada skema ini, dilihat pengaruh polutan kondisi kering terhadap kinerja isolator dalam menahan tegangan.

4) PENGUJIAN KEKUATAN ISOLATOR KONDISI KOTOR DAN LEMBAP

Skema pengujian keempat adalah dengan menggunakan isolator yang telah diberi polutan homogen dan dilakukan pengujian pada kondisi lembap. Untuk melakukan pengaturan tingkat kelembapan, pengujian dilakukan di dalam *chamber* dengan pengaturan tingkat kelembapan 90%. Pemilihan nilai kelembapan ini dimaksudkan untuk mendekati kondisi kelembapan pada saat hujan. Pada skema ini, diamati pengaruh polutan basah terhadap kinerja isolator dalam menahan tegangan.

C. METODE PENGUKURAN JUMLAH POLUTAN

Kinerja isolator, yang dapat dilihat berdasarkan nilai tegangan *breakdown* (*breakdown voltage*, BDV), dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah tingkat keparahan polutan yang terukur dalam ESDD dan NSDD. Makin tinggi nilai keduanya, nilai resistansi isolator akan menurun, sehingga BDV isolator akan makin menurun pula [17]. Untuk mengukur tingkat keparahan polutan pada permukaan isolator, perlu dilakukan pengujian nilai ESDD dan NSDD [18], [19]. Langkah-langkah yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut [16].

1) PENGUJIAN ESDD

Pengujian ESDD diawali dengan melakukan pemindahan polutan dari permukaan isolator dengan menggunakan 100 - 300 ml akuades dan spons. Spons dibasahi menggunakan akuades supaya polutan pada permukaan isolator lebih mudah menempel pada spons. Kemudian, permukaan isolator dilap menggunakan spons tadi. Spons yang telah berisikan polutan diperas ke dalam larutan akuades di dalam gelas ukur. Pencucian dilakukan secara perlahan untuk meminimalkan tidak tertampungnya polutan. Proses pengelapan dilakukan secara berulang sampai isolator bersih dari polutan. Cairan akuades yang telah berisikan polutan kemudian diuji konduktivitasnya menggunakan *conductivity meter*. Berdasarkan hasil konduktivitas ini, ESDD dapat dihitung menggunakan (1) dan (2).

$$Sa = (5,7\sigma_{20})^{1,03} \quad (1)$$

$$ESDD = Sa \frac{V}{A} \quad (2)$$

dengan Sa adalah Salinitas (kg/m^3), σ_{20} merupakan konduktivitas pada suhu 20°C (S/m), ESDD adalah *equivalent salt deposit density* (mg/cm^2), V adalah volume air destilasi (cm^3), dan A merupakan area pengambilan polutan pada isolator (cm^2).

2) PENGUJIAN NSDD

Pengujian ESDD berkaitan dengan polutan yang larut air, sedangkan pengujian NSDD berkaitan dengan polutan yang tidak larut dalam air. Proses pengukuran NSDD dilakukan

menggunakan larutan hasil pengujian dari proses pengukuran ESDD. Inti pengujian NSDD adalah mengukur berat polutan tidak larut air. Hal ini dapat dicapai dengan menyaring akuades yang telah berisikan polutan hasil proses pengujian ESDD menggunakan kertas filter. Dari selisih nilai keduanya akan didapatkan nilai berat polutan. Untuk mempercepat proses penyaringan, digunakan pompa penurun tekanan dengan cara memperbesar perbedaan tekanan di antara kedua sisi kertas filter. Setelah selesai proses penyaringan, untuk mempercepat proses pengeringan, kertas filter dimasukkan ke dalam oven. Berat kertas filter dibandingkan antara kondisi sebelum menyaring dengan sesudah menyaring polutan.

$$NSDD = 1000 \frac{Wf - Wi}{A} = 1000 \frac{Wp}{A} \quad (3)$$

$$Wp = Wf - Wi \quad (4)$$

dengan NSDD yaitu *non-soluble deposit density* (mg/cm^2), Wp merupakan berat polutan (gram), Wf adalah berat kertas filter yang mengandung polutan pada kondisi kering (gram), Wi adalah berat kertas filter dalam kondisi bersih dan kering (gram), dan A adalah area pengambilan polutan pada isolator (cm^2).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. PENGUJIAN KEKUATAN ISOLATOR KONDISI BERSIH DAN KERING

Pengujian pertama yang dilakukan adalah mengukur kekuatan isolator kaca dalam kondisi tanpa adanya polutan dan juga kondisi lingkungan yang kering. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan maksimum isolator dalam menahan tegangan. Isolator yang telah dibersihkan menggunakan akuades diuji sebanyak sepuluh kali. Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa nilai BDV dari isolator A dan B relatif lebih stabil dibandingkan dengan isolator C yang lebih fluktuatif. Berdasarkan pengujian, didapatkan nilai rata-rata BDV pada isolator A sebesar 94 kV, isolator B sebesar 97 kV, dan isolator C sebesar 100 kV. Nilai tersebut akan menjadi acuan kemampuan maksimum isolator pada pengujian ini.

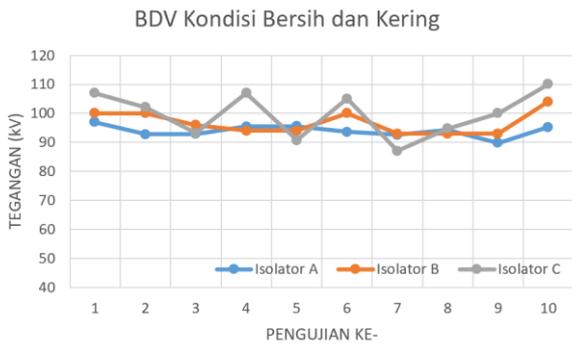
B. PENGUJIAN KEKUATAN ISOLATOR KONDISI BERSIH DAN BASAH

Pengujian selanjutnya adalah menguji kinerja isolator dengan kondisi permukaan bersih, tetapi diuji dalam kondisi basah. Isolator diuji sebanyak sepuluh kali. Pengujian ini dilakukan pada saat hujan dengan kelembapan pada pengujian isolator A sebesar 87,3%, isolator B sebesar 88,5%, dan isolator C sebesar 93%. Terlihat pada Gambar 6 bahwa nilai BDV pada setiap isolator menurun jika dibandingkan pada pengujian sebelumnya. Berdasarkan pengujian, nilai BDV pada isolator A sebesar 74,46 kV, isolator B sebesar 79,48 kV, dan isolator C sebesar 75,13k V.

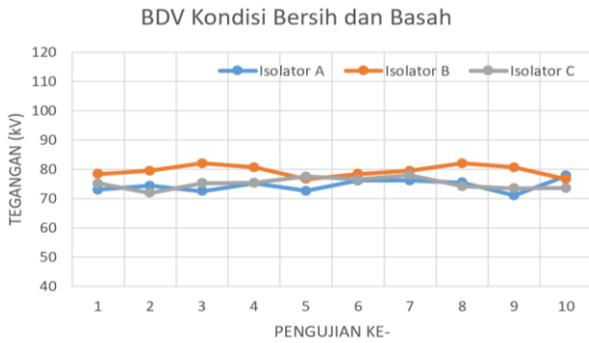
Nilai rata-rata yang didapatkan pada pengujian kondisi hujan menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan kondisi kering. Terlihat bahwa isolator C mengalami penurunan kinerja paling besar. Hal ini terjadi karena pada pengujian, isolator C memiliki kelembapan tertinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa kenaikan kelembapan dan kondisi basah menurunkan kinerja isolator.

C. HASIL PENGUJIAN ESDD DAN NSDD

Pengukuran ESDD dan NSDD akan memberikan data berupa kuantitas polutan yang terdapat pada permukaan isolator. Nilai ESDD dipengaruhi oleh data nilai konduktivitas,



Gambar 5. Tegangan breakdown pada kondisi bersih dan kering.



Gambar 6. Tegangan breakdown pada kondisi bersih dan hujan.

TABEL I
PARAMETER PENGUKURAN ESDD DAN NSDD

Parameter	Isolator A	Isolator B	Isolator C
Konduktivitas (S/m)	0,3	0,284	0,12
Volume akuades (cm ³)	400	400	400
Luas permukaan (cm ²)	5.772	5.772	5.772
Berat polutan (g)	9,9167	7,5611	6,4568

volume akuades, serta luas area permukaan isolator, sedangkan data NSDD dipengaruhi oleh data berat polutan serta luas area permukaan isolator. Nilai yang dibutuhkan untuk mengukur ESDD dan NSDD disajikan pada Tabel I.

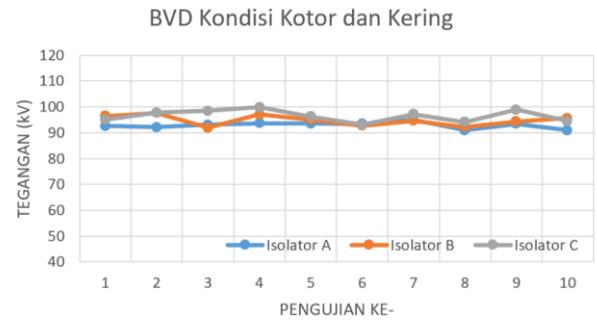
Setelah semua data yang dibutuhkan diperoleh, pengukuran ESDD dan NSDD dapat dilakukan menggunakan (1) sampai (3). Hasil perhitungan ESDD dan NSDD ditunjukkan pada Tabel II.

Jika digolongkan berdasarkan tingkat keparahan polusi sesuai dengan Gambar 1, ketiga isolator dapat digolongkan ke dalam tingkat keparahan *heavy*. Tingkat keparahan ini biasanya dijumpai pada kawasan pesisir pantai, gurun, daerah kering, serta daerah perindustrian yang berpolusi.

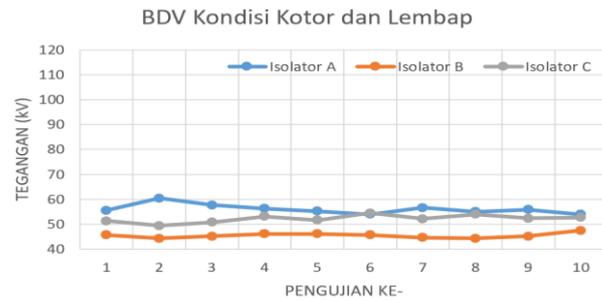
D. PENGUJIAN KEKUATAN ISOLATOR KONDISI KOTOR DAN KERING

Setelah pengujian isolator dalam kondisi bersih, dilakukan pengujian isolator dengan adanya faktor polutan. Pada pengujian ini, isolator diberi polutan berupa campuran *fly ash* dan garam. Isolator diuji sebanyak sepuluh kali dalam kondisi kering. Pada Gambar 7 teramati bahwa isolator A memiliki nilai BDV yang paling stabil dalam sepuluh kali pengambilan data dibandingkan dengan kedua isolator lainnya. Nilai rata-rata BDV kondisi isolator dengan polutan dan kondisi kering pada isolator A adalah sebesar 92,85 kV, isolator B sebesar 94,75 kV, dan isolator C sebesar 96,49 kV.

Nilai yang didapatkan tidak jauh berbeda dengan pengujian kondisi isolator bersih kondisi kering. Hal ini menunjukkan bahwa faktor polutan tidak memberikan dampak yang



Gambar 7. Tegangan breakdown pada kondisi kotor dan kering.



Gambar 8. Tegangan breakdown pada kondisi kotor dan lembap.

TABEL II
HASIL PERHITUNGAN ESDD DAN NSDD

Hasil Pengukuran	Isolator A	Isolator B	Isolator C
ESDD (mg/cm ²)	0,120426	0,113816	0,046864
NSDD (mg/cm ²)	1,718070	1,309962	1,118642

signifikan pada kinerja isolator apabila berada pada kondisi kering. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya, yaitu adanya polutan tanpa disertai dengan kelembapan udara yang tinggi tidak akan berpengaruh signifikan pada perubahan nilai BDV [20].

E. PENGUJIAN KEKUATAN ISOLATOR KONDISI KOTOR DAN LEMBAP

Pengujian isolator selanjutnya adalah menguji isolator dengan polutan dalam keadaan lingkungan dengan kelembapan tinggi. Pengujian ini berbeda dengan skema pengujian isolator bersih kondisi hujan karena jika pengujian dilakukan pada kondisi hujan, dikhawatirkan polutan dapat tersapu oleh hujan. Untuk mengatasinya, pengujian dilakukan di dalam *chamber* yang terdapat *humidifier* di dalamnya. Pengujian dilakukan pada nilai kelembapan udara yang dijaga pada nilai 90%.

Pada Gambar 8 terlihat bahwa ketiga isolator mengalami penurunan kinerja yang sangat signifikan jika dibandingkan dengan pengujian pertama. Pada pengujian ini, nilai rata-rata BDV pada isolator A adalah sebesar 56,07 kV, isolator B sebesar 45,48 kV, dan isolator C sebesar 52,21 kV.

Nilai yang didapatkan pada pengujian ini adalah nilai BDV terendah dari keempat pengujian yang dilakukan. Jika dibandingkan dengan pengujian pertama, terjadi penurunan kinerja sebesar 41% pada isolator A, 53% pada isolator B, dan 48% pada isolator C. Nilai BDV isolator mengalami penurunan yang signifikan saat mendapatkan faktor gabungan dengan adanya polutan dan kelembapan tinggi, sesuai dengan penelitian sebelumnya [21], [22].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan terhadap tiga isolator *anti-fog* yang sebelumnya digunakan pada jaringan

transmisi 50 kV, terlihat bahwa dalam pengujian kondisi terbaiknya, isolator seluruhnya sudah berada di bawah standar BIL sebesar 117 kV – 134 kV. Seharusnya isolator harus dapat menahan tegangan BIL dalam kondisi terburuk (kotor dan lembap). Selain itu, didapatkan pula bahwa polutan dalam kondisi kering tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja isolator dalam menahan tegangan. Akan tetapi, jika polutan tersebut dalam kondisi basah/lembap, kinerja isolator akan menurun secara drastis. Pada percobaan ini, didapatkan hasil bahwa kinerja isolator dapat turun hingga 53% ketika diberi polutan dengan ESDD 0,113816 mg/cm² dan NSDD 1,309962 mg/cm², dengan kelembapan 90%.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini dikerjakan dan ditulis dengan tidak terdapat konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Naufal Hilmi Fauzan; metodologi, Naufal Hilmi Fauzan; analisis formal, Naufal Hilmi Fauzan and Adhimas Daffa Kurnia; investigasi, Naufal Hilmi Fauzan; kurasi data, Adhimas Daffa Kurnia, Prayudi Efendi, Daryadi, Prasetyohadi; penulisan—penyusunan draf asli, Naufal Hilmi Fauzan, Adhimas Daffa Kurnia, and Prayudi Efendi; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Naufal Hilmi Fauzan; visualisasi, Adhimas Daffa Kurnia and Prayudi Efendi; pengawasan, Naufal Hilmi Fauzan; administrasi proyek, Naufal Hilmi Fauzan; akuisisi pendanaan, Naufal Hilmi Fauzan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Direktorat Penelitian Universitas Gadjah Mada yang telah mendukung kegiatan penelitian ini. Terima kasih disampaikan juga kepada rekan sejawat di Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Universitas Gadjah Mada dan Laboran Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi yang sudah mendukung secara penuh, serta kepada seluruh tim yang telah membantu dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] S. Hardi, Y. Tarigan, H. Zulkarnaen, dan A. Hasibuan, "Influence of artificial pollutants on disc insulators under dry and wet conditions on leakage current and flashover voltage," dalam *2019 3rd Int. Conf. Elect. Telecommun. Comput. Eng. (ELTICOM)*, 2019, hal. 174–178, doi: 10.1109/ELTICOM47379.2019.8943858.
- [2] A.T. Wilder dan R. Casalini, "Dielectric heating of commercial insulation materials," dalam *2020 IEEE Elect. Insul. Conf. (EIC)*, 2020, hal. 521–524, doi: 10.1109/EIC47619.2020.9158743.
- [3] Y. Zhang, S. Xie, C. Zhang, dan X. Zhao, "Effect of impact capacitor on overvoltage in neutral bus of converter station," dalam *2018 5th Int. Conf. Elect. Electron. Eng. (ICEEE)*, 2018, hal. 101–105, doi: 10.1109/ICEEE2.2018.8391309.
- [4] T. Juliandhy, T. Haryono, dan Suharyanto, "Efek kegagalan alat flue gas desulphur terhadap tegangan lewat denyar isolator," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 3, no. 2, hal. 142–145, Mei 2014.
- [5] N.M. Aljamali, M.M. Al Najim, dan A.J. Alabbasy, "Types of electrical insulators and their electrical applications," *J. Digit. Integr. Circuits Elect. Devices*, vol. 6, no. 3, hal. 18–23, Sep.-Des. 2021.
- [6] H. Ye, R. Liu, dan X. Cheng, "Research on insulator creepage distance measurement based on feature extraction," dalam *2019 6th Int. Conf. Inf. Sci., Control Eng. (ICISCE)*, 2019, hal. 1127–1130, doi: 10.1109/ICISCE48695.2019.00227.
- [7] *IEEE Standard for Performance Characteristics and Dimensions for High Current Power Transformer Bushings with Rated Continuous Current in Excess of 5000 A in Bus Enclosures*, IEEE Standard C57.19.04-2018, 2018.
- [8] *IEEE Guide for Recommended Electrical Clearances and Insulation Levels in Air Insulated Electrical Power Substations*, IEEE Standard 1427-2020, 2020.
- [9] P.N. Utami, A. Syakur, dan Hermawan, "Leakage current characteristics of 20 kV epoxy resin insulators under variation humidity," dalam *2018 5th Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Elect. Eng. (ICITACEE)*, 2018, hal. 264–267, doi: 10.1109/ICITACEE.2018.8576957.
- [10] X. Ma, Y. Meng, Y. Du, dan K. Wu, "Investigation of surface charge distribution and its influence on characteristics of dielectric barrier discharge," dalam *2018 12th Int. Conf. Prop. Appl. Dielect. Mater. (ICPADM)*, 2018, hal. 1065–1069, doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401228.
- [11] M.H. Park, J.S. Kwak, M.G. Jeong, dan S.J. Shim, "Research on the measurement method of conducted emissions of surge for the protection of substation facilities by switching surge," dalam *2022 6th Int. Conf. Elect. Power Equip. Switch. Technol. (ICEPE-ST)*, 2022, hal. 414–417, doi: 10.1109/ICEPE-ST51904.2022.9757071.
- [12] C. Liu dkk., "Flashover performance of porcelain post insulator with full-clad booster shed," dalam *2018 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. (T&D)*, 2018, hal. 1–9, doi: 10.1109/TDC.2018.8440283.
- [13] X. Kong dkk., "Effects of air humidity and hanging angle on accumulation characteristics of pollution particles on anti-icing polymer insulators," dalam *2019 2nd Int. Conf. Elect. Mater. Power Equip. (ICEMPE)*, 2019, hal. 508–511, doi: 10.1109/ICEMPE.2019.8727394.
- [14] Y. Suzantry H dan Suharyanto, "Pengaruh radiasi UV buatan terhadap kerusakan permukaan bahan isolasi resin epoksi silane," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 2, no. 4, hal. 299–306, Nov. 2013.
- [15] P. Vinod, M.S. Babu, R. Sarathi, dan S. Kornhuber, "Classification of polluted silicone rubber micro nanocomposites based on ESDD using ANN," dalam *2021 9th IEEE Int. Conf. Power Syst. (ICPS)*, 2021, hal. 1–5, doi: 10.1109/ICPS52420.2021.9670252.
- [16] *Selection and Dimensioning of High-voltage Insulators Intended for Use in Polluted Conditions-Part 1: Definitions, Information and General Principles*, IEC TS 60815-1:2008, 2008.
- [17] R. Vinothkumar, G. Kannayeram, dan G. Shunmugalakshmi, "Investigation of natural and artificial contamination on various types of insulators," dalam *2015 Int. Conf. Innov. Inf. Embed. Commun. Syst. (ICIIECS)*, 2015, hal. 1–6, doi: 10.1109/ICIIECS.2015.7192933.
- [18] W. Shi dkk., "Analysis on the natural pollution characteristics of metal-oxide surge arrester with different external insulation material," dalam *2020 5th Asia Conf. Power Elect. Eng. (ACPEE)*, 2020, hal. 2237–2241, doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136496.
- [19] J. Dey, S. Dutta, A. Baral, dan S. Chakravorti, "Leakage current monitoring of suspension insulator for effective determination of ESDD," dalam *2019 8th Int. Conf. Power Syst. (ICPS)*, 2019, hal. 1–6, doi: 10.1109/ICPS48983.2019.9067562.
- [20] M.G. Gebremichael, J.M. Bikorimana, dan J. Desmet, "Flashover voltage variations of glass and porcelain insulators with different contaminants," dalam *2022 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2022, hal. 1–4, doi: 10.1109/PowerAfrica53997.2022.9905277.
- [21] Y. Liu dkk., "Influence of pollution degree and humidity on surface discharge characteristics of insulators," dalam *2021 3rd Asia Energy Elect. Eng. Symp. (AEEES)*, 2021, hal. 175–178, doi: 10.1109/AEEES1875.2021.9403084.
- [22] N.L. Praba dan L. Kalaivani, "Analysing the performance for outer shed insulator with non-uniform pollution," dalam *2019 5th Int. Conf. Elect. Energy Syst. (ICEES)*, 2019, hal. 1–4, doi: 10.1109/ICEES.2019.8719285.