

Studi Pengaruh Kelembapan dan Polutan pada Kinerja Isolator Arrester 20 kV

Naufal Hilmi Fauzan¹, Sasongko Pramonohadi², Muhammad Ariq Achnida Syam³, Rafi Ramadhana Ardiantara⁴

^{1,2,3,4} Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 55281 INDONESIA (tel.: 0274-552305; fax: 0274-552305; email: ¹naufalhilimifauzan@ugm.ac.id, ²sasongko@ugm.ac.id, ³ariq.a.s@mail.ugm.ac.id, ⁴rafi.ramadhana@mail.ugm.ac.id)

[Diterima: 2 Februari 2023, Revisi: 26 Mei 2023]
Corresponding Author: Naufal Hilmi Fauzan

INTISARI — *Arrester* merupakan sebuah perangkat yang berfungsi untuk melindungi peralatan dari kegagalan dielektrik yang disebabkan oleh impuls petir, *switching surge*, ataupun lonjakan tegangan yang melebihi kemampuan dielektrik suatu peralatan. Pada sebagian besar *arrester* dipasang alat penghitung kerja *arrester* (*event counter*) yang berfungsi untuk menghitung frekuensi *arrester* telah bekerja. Di kondisi lingkungan lembap dan polusi tinggi, pada bagian isolator sangat mudah terjadi *surface discharge*. *Surface discharge* merupakan *discharge* yang terjadi pada suatu daerah yang berhubungan langsung dengan permukaan dielektrik yang memiliki medan listrik berlebih, sehingga memicu terjadinya *discharge*. *Surface discharge* yang berlangsung secara terus-menerus dapat mengakibatkan *flashover*. *Flashover* yang mengenai bagian dari *event counter* dapat membuat *event counter* mengalami *error* sehingga tidak menunjukkan angka yang benar. Di samping itu, kinerja *event counter* akan terganggu. Untuk itu, perlu dilakukan pengujian isolator *arrester* dengan tiga skema, yaitu isolator kondisi bersih, isolator kondisi lembap, serta isolator dengan kondisi lembap dan berpolutan. Pada pengujian ini, digunakan polutan dengan nilai *equivalent salt deposit density* (ESDD) sebesar 4,69 mg/cm² dan nilai *nonsoluble deposit density* (NSDD) sebesar 1,8841 mg/cm². Berdasarkan hasil pengujian, diketahui bahwa terjadi penurunan kemampuan isolasi *arrester* dalam menahan tegangan yang diakibatkan oleh kelembapan dan polutan. Kelembapan memberikan penurunan *breakdown voltage* (BDV) sebesar 5,8 kV setiap kenaikan kelembapan 5%, sedangkan polutan memberikan penurunan BDV sebesar 59 kV ketika isolator diberi polutan.

KATA KUNCI — *Arrester*, Isolator, Tegangan *Breakdown*, Kelembapan, Polutan, NSDD, ESDD.

I. PENDAHULUAN

Arrester merupakan salah satu perangkat proteksi yang digunakan pada sistem kelistrikan, baik pada pembangkit, sistem transmisi, maupun sistem distribusi. Berdasarkan standar Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 487-2015, *arrester* berfungsi untuk melindungi peralatan lainnya dari kegagalan dielektrik yang disebabkan oleh petir atau lonjakan tegangan (*overvoltage*) di atas kemampuan dielektrik suatu perangkat [1]. *Arrester* melindungi jaringan listrik dari lonjakan tegangan listrik besar dengan membelokkan tegangan tersebut ke tempat yang tepat atau *grounding*. *Arrester* akan mengalirkan tegangan berlebih ke tanah [2]. *Arrester* memberikan jalur bagi tegangan lebih ke tanah yang memiliki nilai impedansi lebih rendah, sehingga tidak timbul tegangan lebih pada peralatan [3]. Lonjakan tegangan dapat diakibatkan oleh faktor internal ataupun faktor eksternal. Contoh penyebab lonjakan tegangan dari faktor internal adalah *switching surge*, sedangkan salah satu penyebab lonjakan tegangan dari faktor eksternal adalah sambaran petir.

Berdasarkan Gambar 1, terlihat bahwa *arrester* dapat terbagi menjadi dua bagian, yakni bagian dalam dan bagian luar. Bagian dalam dari *arrester* terdiri atas bahan semikonduktor yang merupakan gabungan antara aluminium dan ZnO. ZnO ini merupakan bahan semikonduktor yang dapat berubah menjadi konduktor apabila diberi tegangan yang sesuai dengan tegangan kerjanya. Lalu, bagian luar *arrester* merupakan bagian isolator, yang terbuat dari keramik ataupun bahan polimer.

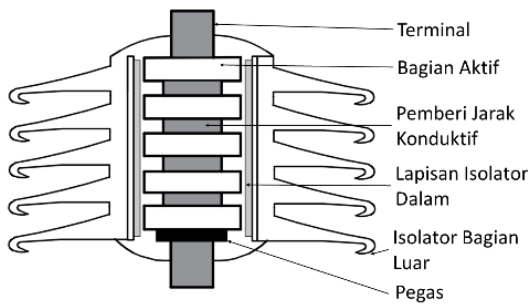
Bagian isolator *arrester* merupakan bagian terluar dari *arrester* dan merupakan bagian yang paling terdampak oleh kondisi lingkungan, seperti kelembapan, suhu, maupun polutan. Pada umumnya, untuk melihat kinerja *arrester*, dilakukan pemasangan alat penghitung kerja *arrester* (*event counter*) di bawah *arrester* agar dapat bekerja secara maksimal. Akan

tetapi, terkadang *event counter* mengalami *error* dan tidak menunjukkan angka yang tepat, sehingga pemantauan *arrester* menjadi tidak maksimal. Penyebab terjadinya *error* ini masih belum diketahui secara pasti.

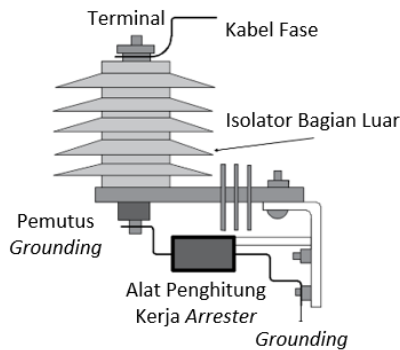
Salah satu penyebab terjadinya lonjakan tegangan adalah sambaran petir. Bahkan, pada jaringan distribusi 20 kV, lonjakan tegangan yang diakibatkan oleh sambaran petir, baik sambaran petir langsung maupun tidak langsung, dapat menyebabkan kegagalan jaringan [4], [5]. Nilai tegangan dari sambaran petir yang sangat besar tentu akan sangat berdampak pada jaringan jika tidak terdapat *arrester*. *Arrester* secara otomatis akan mengalirkan tegangan berlebih dari petir menuju tanah. Namun, nilai tegangan pada saat terjadi lonjakan tegangan dapat menjadi sangat besar, yang dapat mengakibatkan terjadinya arus bocor (dalam hal ini *surface discharge*) pada permukaan isolator dari *arrester*.

Surface discharge merupakan arus yang mengalir pada permukaan isolator ketika tegangan yang diterima oleh isolator melebihi kapasitas [6]–[8]. Selain tegangan, terdapat beberapa faktor lain yang memengaruhi kemungkinan terjadinya *surface discharge*, seperti polutan, suhu, kelembapan, butir-butir air pada permukaan isolator, dan hujan. Hal ini dapat menurunkan nilai resistansi isolator [7], [9]. Nilai resistansi yang berubah makin rendah mengakibatkan *surface discharge* mudah terjadi pada bagian isolator, terlebih jika diberikan tegangan yang tinggi. *Surface discharge* merupakan *discharge* yang terjadi pada suatu daerah yang berhubungan langsung dengan permukaan dielektrik yang memiliki medan listrik berlebih, sehingga memicu terjadinya *discharge* [10]. *Surface discharge* yang berlangsung secara terus-menerus dapat mengakibatkan *flashover* [11], [12].

Pada *arrester* sering dipasang *event counter*, yang berfungsi untuk menghitung frekuensi *arrester* bekerja. Gambar 2 menunjukkan skema pemasangan *arrester*.



Gambar 1. Bagian-bagian arrester.



Gambar 2. Skema pemasangan arrester dan event counter.

Fungsi dari *event counter* dapat terganggu apabila terjadi *flashover* pada bagian luar isolasi *arrester* akibat kenaikan tegangan dan mengenai bagian *event counter*. Oleh karena itu, kualitas bagian isolasi *arrester* memiliki peran penting. Pada bagian isolasi, *creepage distance* merupakan salah satu aspek yang penting. *Creepage distance* merupakan jarak minimum antara dua bagian konduktif pada isolator [13], [14]. Permukaan lain yang terdiri atas bahan seperti semen atau noninsulator tidak termasuk dalam bagian *creepage distance* [15]. Ukuran *creepage distance* akan memengaruhi tahanan isolasi. Makin panjang *creepage distance* membuat kekuatan isolasi makin tinggi, sehingga *surface discharge* yang terjadi juga makin kecil [16].

Pemakaian *arrester* secara langsung di lapangan lama-kelamaan akan menyebabkan munculnya polutan pada bagian isolasi *arrester*. Saat polutan menyerap kelembapan udara tinggi, elektrolit dari polutan akan larut, sehingga meningkatkan konduktivitas dari permukaan isolator *arrester*. Peningkatan konduktivitas ini akan mengarah pada menurunnya kekuatan isolasi *arrester* dan memunculkan kemungkinan *flashover*. Banyaknya polutan dapat diketahui dengan mengukur *equivalent salt deposit density* (ESDD) dan *nonsoluble deposit density* (NSDD) [17], [18].

ESDD merupakan salah satu metode yang populer untuk menganalisis kondisi permukaan isolator berdasarkan pengukuran konduktivitas [19]–[21]. ESDD merupakan jumlah natrium klorida (NaCl) terlarut *demineralized water* (akuades) yang berasal dari kontaminan. Untuk melakukan perhitungan ESDD, isolator yang mengandung polutan perlu dibilas dengan menggunakan akuades. Akuades yang digunakan untuk membilas isolator ini kemudian diukur nilai konduktivitasnya menggunakan *conductivity meter*. Selanjutnya, ESDD didapatkan dengan memasukkan nilai konduktivitas pada (1) dan (2). Nilai ESDD merepresentasikan berat NaCl dibagi satuan luas permukaan isolator, yang umumnya dinyatakan dalam satuan mg/cm^2 [18].

$$Sa = (5,7\sigma_{20})^{1.03} \quad (1)$$

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

dengan

σ_{20} = konduktivitas pada suhu 20 °C (S/m)

V = volume air destilasi (cm^3)

A = area pengambilan polutan pada isolator (cm^2).

NSDD merupakan nilai residu tidak larut yang berada pada bagian permukaan isolator [20], [22]. NSDD dihitung dengan menggunakan air pembilas isolator yang digunakan pada pengukuran ESDD. Air pembilas kemudian disaring menggunakan kertas saring dan dikeringkan. NSDD dinyatakan dalam satuan mg/cm^2 .

$$NSDD = 1.000 \frac{W_f - W_i}{A} = 1.000 \frac{W_p}{A} \quad (3)$$

dengan

W_f = berat kertas filter yang mengandung polutan pada kondisi kering (g)

W_i = berat kertas filter dalam kondisi bersih dan kering (g)

A = area pengambilan polutan pada isolator (cm^2).

Untuk mengetahui kemungkinan kerusakan pada *event counter* akibat terjadinya lonjakan tegangan, perlu dilakukan penelitian pada *arrester* guna melihat kinerja *arrester*. Salah satu bagian yang dapat diteliti adalah isolator. Pada penelitian ini, akan terlihat besarnya faktor lingkungan dalam memengaruhi kinerja dari isolasi *arrester*.

II. BAHAN DAN METODE

Tujuan utama penelitian ini adalah melihat pengaruh kelembapan dan polutan terhadap kinerja isolator dari *arrester*. Pada bagian ini, dipaparkan berbagai bahan dan peralatan serta metode yang digunakan dalam penelitian.

A. BAHAN DAN PERALATAN

Untuk dapat melakukan penelitian ini, ada beberapa bahan dan peralatan pendukung yang perlu disiapkan, yaitu sebagai berikut.

1) ARRESTER

Arrester merupakan objek uji pada penelitian ini. *Arrester* yang digunakan adalah *arrester* 24 kV dalam kondisi baru. *Arrester* ini memiliki isolator berbahan polimer dan bahan semikonduktor ZnO.

2) FLY ASH DAN GARAM

Bahan polutan yang digunakan adalah *fly ash* dan garam laut. Kedua jenis polutan ini merupakan jenis polutan yang biasa ditemui pada isolator yang digunakan pada PLTU di daerah pesisir pantai.

3) AKUADES

Akuades memiliki banyak peranan dalam penelitian ini. Akuades digunakan sebagai pelarut polutan, bahan pembuat kabut, dan bahan untuk membersihkan polutan. Penggunaan akuades ini dimaksudkan agar tidak terjadi penambahan konduktivitas yang diakibatkan oleh adanya mineral pada air.

4) PEMBERI POLUTAN

Alat pemberi polutan ini merupakan salah satu peralatan pokok pada penelitian ini. Alat ini terdiri atas beberapa bagian, seperti *spray gun*, motor, dan pengatur kecepatan motor. Alat ini akan memberikan polutan yang sudah dibuat sebelumnya pada bagian isolator *arrester* dengan cara menyemprotkannya secara merata pada objek uji. Gambar 3 menunjukkan alat pemberi polutan.



Gambar 3. Alat pemberi polutan.



Gambar 4. Chamber pengujian.

5) CONDUCTIVITY METER

Conductivity meter berfungsi untuk mengukur nilai konduktivitas polutan yang terdapat pada bagian isolator dari *arrester*. Nilai konduktivitas ini akan digunakan pada (1) dan (2) untuk mendapatkan nilai ESDD dari polutan.

6) HUMIDIFIER

Humidifier akan menghasilkan kabut dari akuades yang berfungsi untuk meningkatkan kelembapan.

7) CHAMBER

Pengujian ini sangat bergantung pada kondisi lingkungan, khususnya kelembapan. Untuk dapat membuat kelembapan bertahan pada nilai tertentu, diperlukan *chamber* yang berfungsi untuk mengisolasi kelembapan bagian dalam *chamber* dari kelembapan di lingkungan luar. *Chamber* ini memiliki dimensi 250 cm × 250 cm × 270 cm dan akan menjadi tempat pengujian *arrester*. Gambar 4 memperlihatkan *chamber* yang digunakan.

8) SENSOR KELEMBAPAN

Di dalam *chamber* dipasangkan sensor kelembapan yang terhubung dengan *humidifier*, sehingga kelembapan di dalam *chamber* dapat disesuaikan dengan kebutuhan.

B. METODE PENGUJIAN KARAKTERISTIK ARRESTER

Terdapat berbagai penyebab terjadinya *surface discharge*, di antaranya adalah kelembapan dan polutan yang menyelimuti permukaan isolator dari *arrester*. Pada penelitian ini, terlebih dahulu dilakukan pengujian karakteristik dari *arrester*. Pengujian karakteristik *arrester* ini terdiri atas dua buah pengujian sebagai berikut.

1) PENGUJIAN TEGANGAN POTONG ARRESTER

Skema pengujian pertama adalah pengujian *arrester* menggunakan tegangan impuls. Tegangan impuls digunakan untuk merepresentasikan tegangan sambaran petir. Pada skema pengujian ini, dapat dilihat karakteristik tegangan kerja *arrester* saat dikenai tegangan impuls.

2) PENGUJIAN ARUS BOCOR ARRESTER

Skema pengujian kedua adalah pengukuran besarnya arus bocor yang melewati isolasi *arrester*. Pada skema pengujian ini, dapat dilihat arus bocor terjadi pada isolasi *arrester* atau tidak.

C. METODE PENGUJIAN PENGARUH LINGKUNGAN

Setelah pengujian karakteristik *arrester* dilakukan, pengujian untuk melihat pengaruh kelembapan dan polutan dapat dilakukan. Pengujian ini terdiri atas tiga skema sebagai berikut.

1) PENGUJIAN ARRESTER DENGAN KONDISI BERSIH

Skema pengujian pertama adalah pengujian *arrester* dengan kondisi isolator dari *arrester* dalam keadaan bersih dan baik. Pada skema pengujian ini, dapat dilihat kinerja maksimum isolator pada *arrester* ketika diberi tegangan.

2) PENGUJIAN ARRESTER DENGAN TINGKAT KELEMBAPAN TINGGI

Skema pengujian kedua adalah pengujian *arrester* pada kondisi kelembapan tinggi. Pada skema ini, kelembapan lingkungan diatur dengan nilai 80%, 85%, dan 90%. Pada kelembapan tinggi, besar kemungkinan permukaan isolator *arrester* akan tertutup oleh air, sehingga menurunkan kemampuan isolator dalam menahan tegangan. Pada skema pengujian ini, dapat dilihat besarnya pengaruh kelembapan terhadap penurunan kemampuan isolator *arrester* dalam menahan tegangan.

3) PENGUJIAN ARRESTER DENGAN TINGKAT KELEMBAPAN TINGGI DAN POLUTAN

Skema pengujian ketiga adalah pengujian *arrester*, yang sebelumnya telah diberi polutan, pada kondisi kelembapan tinggi. Sama seperti skema kedua, pada skema ketiga ini nilai kelembapan diatur sebesar 80%, 85%, dan 90%. Sebelum dilakukan pengujian, *arrester* diberi polutan yang merupakan campuran dari *fly ash* dan garam laut. Pada skema ini, permukaan isolator dari *arrester* tidak hanya terselimuti oleh polutan, tetapi terselimuti pula oleh butiran air, sehingga kemampuan isolator dalam menahan tegangan akan menurun. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya *surface discharge*.

D. METODE PENGUKURAN JUMLAH POLUTAN

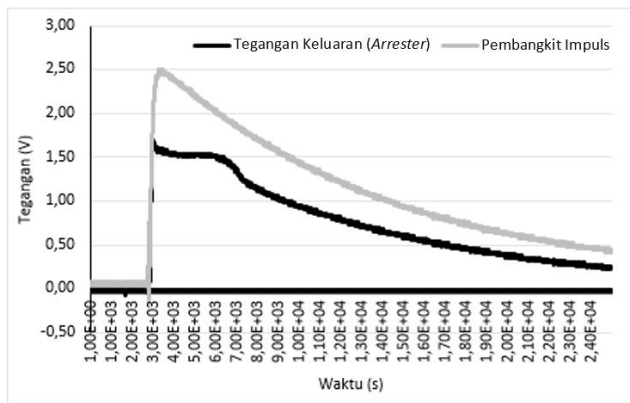
Jumlah polutan yang terdapat pada permukaan isolator dapat ditentukan dengan mengukur ESDD dan NSDD [17], [18]. Pengukuran ESDD dan NSDD untuk merepresentasikan tingkat keparahan polutan juga telah digunakan pada penelitian sebelumnya [23]–[25]. Adapun langkah pengujian ESDD dan NSDD dijelaskan sebagai berikut [13].

1) PENGUJIAN ESDD

Pengujian ESDD diawali dengan melakukan pencucian *arrester* menggunakan 100 ml sampai 300 ml akuades. Pencucian dilakukan secara perlahan untuk meminimalkan tidak tertampungnya polutan. Setelah *arrester* bersih dari polutan, cairan akuades dipindahkan pada gelas ukur dan dilakukan pengujian konduktivitas menggunakan *conductivity meter*. Berdasarkan hasil pengujian konduktivitas ini, ESDD dapat dihitung menggunakan (1) dan (2).

2) PENGUJIAN NSDD

Pengujian NSDD dilakukan untuk mengetahui jumlah polutan yang tidak larut. Untuk mendapatkan nilai NSDD, dilakukan penyaringan larutan pengujian menggunakan kertas saring. Sebelum dilakukan penyaringan, kertas saring ditimbang terlebih dahulu untuk mengetahui beratnya. Setelah proses penyaringan selesai, kertas saring dan polutan yang tersaring kemudian dimasukkan ke dalam oven untuk menghilangkan kadar air. Selanjutnya, kertas saring dan polutan ditimbang untuk mengetahui berat akhir kertas beserta polutan. Berat polutan dihitung menggunakan (4).



Gambar 5. Grafik tegangan impuls.

TABEL I
TEGANGAN KELUARAN GENERATOR IMPULS

| No | Tegangan (kV) | No | Tegangan (kV) |
|-----------|---------------|----------|---------------|
| 1 | 69,97 | 6 | 67,72 |
| 2 | 67,16 | 7 | 66,88 |
| 3 | 69,13 | 8 | 66,88 |
| 4 | 69,13 | 9 | 68,56 |
| 5 | 69,97 | 10 | 68,56 |
| Rata-rata | | 68,40 kV | |

$$W_p = W_f - W_i \quad (4)$$

dengan

W_p = berat polutan

W_f = berat kertas filter yang mengandung polutan pada kondisi kering (g)

W_i = berat kertas filter dalam kondisi bersih dan kering (g).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

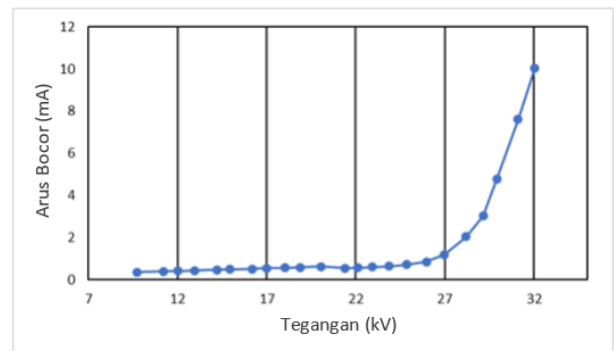
A. PENGUJIAN TEGANGAN POTONG ARRESTER

Pengujian yang pertama kali dilakukan adalah pengujian karakteristik *arrester*, yaitu pengujian tegangan potong *arrester*. Dengan pengujian ini, kinerja *arrester* dalam memotong tegangan impuls dapat terlihat. Untuk melakukan pengujian ini, *arrester* dihubungkan dengan pembangkit impuls. Pembangkit impuls akan mengeluarkan tegangan impuls sebagaimana disajikan pada Tabel I. Tegangan ini jauh lebih besar daripada tegangan kerja *arrester*, yakni sebesar 24 kV.

Dari pengujian ini, akan tampak nilai tegangan ketika *arrester* memotong tegangan impuls yang diberikan. Gambar 5 menunjukkan grafik tegangan impuls yang dihasilkan oleh generator impuls dan tegangan impuls setelah terpotong oleh *arrester*.

Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa grafik impuls telah terpotong. Penurunan tegangan terjadi karena tegangan mengalir melalui *arrester* dan disalurkan ke *ground*. Pengujian ini dilakukan sebanyak sepuluh kali untuk melihat secara akurat nilai tegangan potong dari *arrester* yang diujikan. Pada pengukuran, terdapat faktor pengali sebesar 28,1 kV untuk setiap 1 V pengukuran. Hal ini terjadi karena terdapat rangkaian pembagi tegangan pada rangkaian pengukuran. Tabel II merupakan data tegangan potong dari *arrester*.

Berdasarkan data pada Tabel II, dapat terlihat bahwa nilai rata-rata tegangan potong dari *arrester* pada saat diberi tegangan impuls adalah 46,73 kV. Nilai ini menjadi tegangan maksimum acuan dari bagian isolasi pada *arrester*.

Gambar 6. Grafik arus bocor *arrester*.TABEL II
TEGANGAN POTONG ARRESTER

| No | Tegangan Potong (kV) | No | Tegangan Potong (kV) |
|-----------|----------------------|----------|----------------------|
| 1 | 47,49 | 6 | 47,49 |
| 2 | 47,49 | 7 | 46,08 |
| 3 | 46,65 | 8 | 46,08 |
| 4 | 46,65 | 9 | 45,52 |
| 5 | 47,49 | 10 | 46,37 |
| Rata-rata | | 46,73 kV | |

B. PENGUJIAN ARUS BOCOR ARRESTER

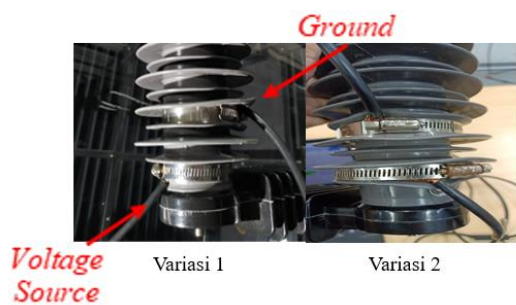
Pengujian kedua yang dilakukan adalah pengujian arus bocor *arrester*. Arus bocor yang diukur adalah arus yang mengalir menuju *ground* pada saat *arrester* sedang bersifat sebagai isolator. Untuk mengukur arus bocor, digunakan sensor yang dipasang pada saluran *grounding arrester*. Sensor yang terpasang akan mendeteksi besar arus yang mengalir menuju *ground*. Gambar 6 menunjukkan hasil pengujian arus bocor.

Nilai arus bocor pada *arrester* makin meningkat seiring dengan kenaikan tegangan. Berdasarkan Gambar 6, nilai arus bocor mulai meningkat secara signifikan pada tegangan 27 kV dan nilai arus bocor terakhir yang dapat diukur adalah pada tegangan 32 kV. Hal ini menyatakan bahwa untuk dapat mengubah bahan ZnO yang terdapat pada bagian dalam *arrester* menjadi bersifat konduktif, diperlukan tegangan lebih besar dari 32 kV. Pada tegangan lebih dari 32 kV, *arrester* sudah bersifat konduktif, sehingga dapat mengalirkan tegangan menuju *ground*.

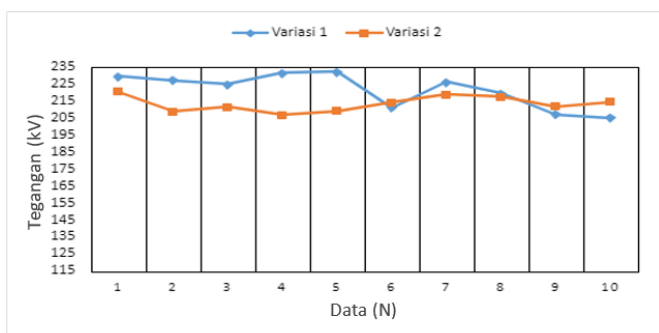
C. PENGUJIAN KEKUATAN ISOLATOR KONDISI BERSIH

Pengujian *surface discharge* yang pertama adalah pengujian pada *arrester* dengan kondisi isolasi bersih dan pada kondisi ruangan ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $RH = 45\text{-}65\%$). Pengukuran ini dimaksudkan untuk melihat kemampuan maksimal dari isolasi *arrester* yang diujikan. Pengujian ini dilakukan menggunakan bantuan dua buah elektrode tambahan. Elektrode ini berfungsi sebagai sumber tegangan dan *ground*. Dengan adanya elektrode ini, akan terjadi *surface discharge* di antara kedua elektrode ketika nilai beda tegangan dari kedua elektrode tersebut sudah melebihi kekuatan isolasi dari *arrester*. Gambar 7 menunjukkan penambahan elektrode pada bagian isolasi *arrester*.

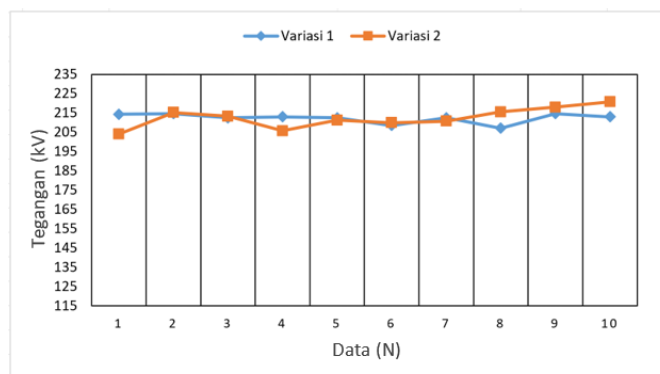
Pada isolator *arrester* ini terdapat 18 buah sirip, dengan komposisi sembilan sirip besar dan sembilan sirip kecil. Jarak antara kedua elektrode adalah sejauh tiga buah sirip. Terdapat dua variasi jarak antar elektrode yang digunakan. Variasi 1 adalah kedua elektrode terpisahkan oleh dua buah sirip besar dan satu sirip kecil, sedangkan variasi 2 adalah kedua elektrode terpisahkan oleh dua buah sirip kecil dan satu buah sirip besar. Metode ini digunakan untuk melihat nilai kekuatan isolasi sirip



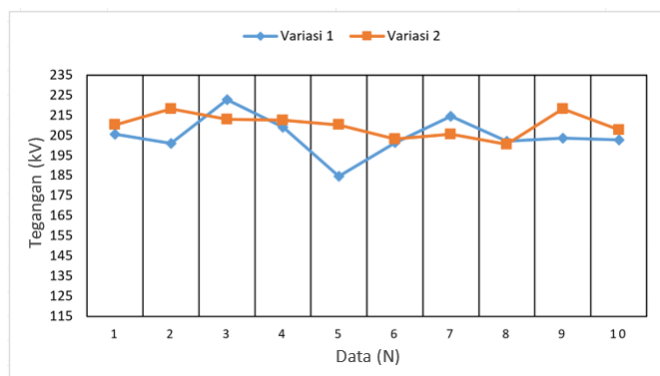
Gambar 7. Pemasangan elektrode tambahan.



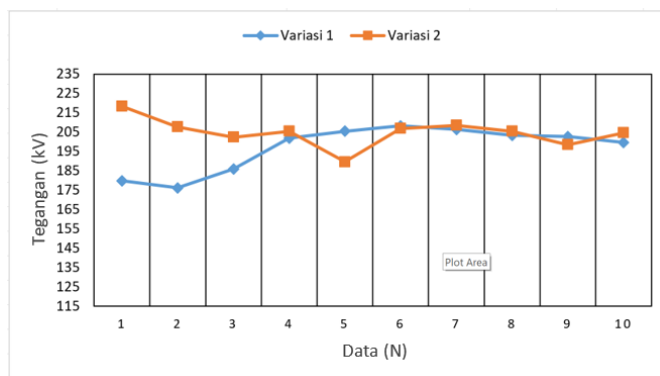
Gambar 8. Grafik BDV pada keadaan bersih.



Gambar 9. Grafik BDV pada kelembapan 80%.



Gambar 10. Grafik BDV pada kelembapan 85%.



Gambar 11. Grafik BDV pada kelembapan 90%.

besar maupun sirip kecil. Ketiga buah sirip yang digunakan merepresentasikan nilai kekuatan isolasi pada sirip-sirip lainnya yang ada pada isolasi *arrester*.

Pengujian dilakukan sebanyak sepuluh kali. *Arrester* ditempatkan di dalam *chamber* yang memiliki suhu 25 °C dan kelembapan 60%. Hasil pengujian diperlihatkan pada Gambar 8.

Berdasarkan Gambar 8, terlihat bahwa pada variasi 1, nilai tegangan breakdown (*breakdown voltage*, BDV) cenderung fluktuatif jika dibandingkan dengan variasi 2. Pada variasi 1, nilai maksimum BDV adalah 229,83 kV dan nilai minimumnya sebesar 205,23 kV. Sementara itu, pada variasi 2, nilai BDV cenderung stabil, dengan nilai maksimum 220,88 kV dan nilai minimum 207,70 kV. Berdasarkan 20 data yang didapatkan pada kedua variasi tersebut, diperoleh nilai BDV rata-rata dari isolasi *arrester* dengan kondisi bersih yang diuji pada kondisi ruangan sebesar 217,66 kV. Nilai BDV pada kondisi bersih ini dijadikan sebagai kemampuan maksimum acuan isolator dalam menahan tegangan.

D. PENGUJIAN KEKUATAN ISOLATOR KONDISI BERSIH DAN LEMBAP

Pengujian *surface discharge* yang kedua adalah pengujian pada kondisi isolasi bersih dengan faktor lingkungan lembap. Pengujian ini dimaksudkan untuk melihat pengaruh dari kelembapan lingkungan terhadap kemampuan isolator dalam menahan tegangan. Pada pengujian ini, nilai kelembapan pada *chamber* diubah-ubah dengan variasi kelembapan 80%, 85%, dan 90%. Kelembapan ini diatur menggunakan *humidifier* yang telah diisi akuades. Pada pengujian ini, ditinjau pengaruh dari kelembapan ekstrem terhadap pengurangan kemampuan isolasi dalam menahan tegangan.

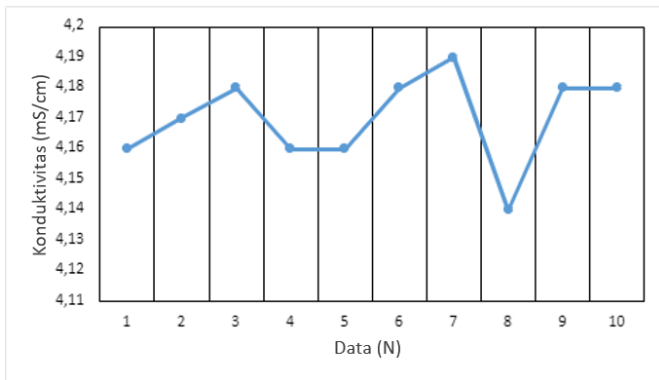
Seperti pada pengujian sebelumnya, dalam pengujian ini digunakan dua buah elektrode bantu. Jarak antar elektrode sama seperti pada pengujian sebelumnya. Pengujian dilakukan sebanyak sepuluh kali. Sebelum pengujian dilakukan, kelembapan *chamber* diatur dan *chamber* dидiamkan terlebih dahulu beberapa saat untuk memastikan bahwa kelembapan dalam *chamber* telah merata. Gambar 9 sampai Gambar 11

memperlihatkan hasil pengujian *surface discharge* pada kondisi lembap.

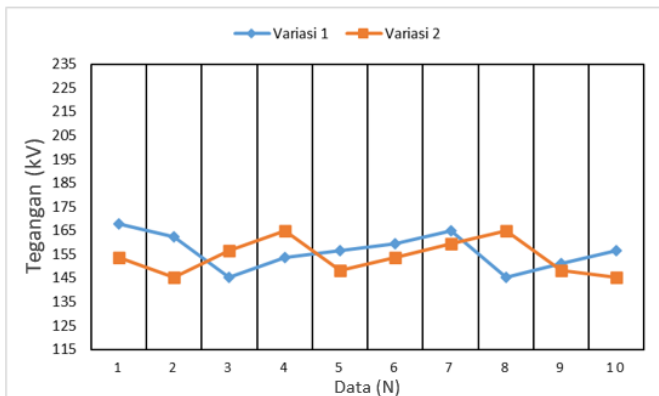
Berdasarkan Gambar 9 sampai Gambar 11, terlihat bahwa terdapat perbedaan nilai BDV pada setiap kondisi kelembapan. Terjadi penurunan nilai BDV, meskipun tidak signifikan. Hal ini juga terlihat dari nilai rata-rata BDV pada setiap tingkat kelembapan. Pada kelembapan 80%, nilai BDV sebesar 212,4 kV; pada kelembapan 85%, nilai BDV sebesar 207,3 kV, dan pada kelembapan 90%, nilai BDV adalah 200,8 kV. Jika dibandingkan dengan nilai BDV pada pengujian *arrester* dalam kondisi bersih dan pada kondisi ruangan, terlihat adanya penurunan BDV seiring dengan peningkatan kelembapan di dalam *chamber*. Kondisi ini sesuai dengan penelitian sebelumnya [26].

E. PENGUJIAN ESDD DAN NSDD

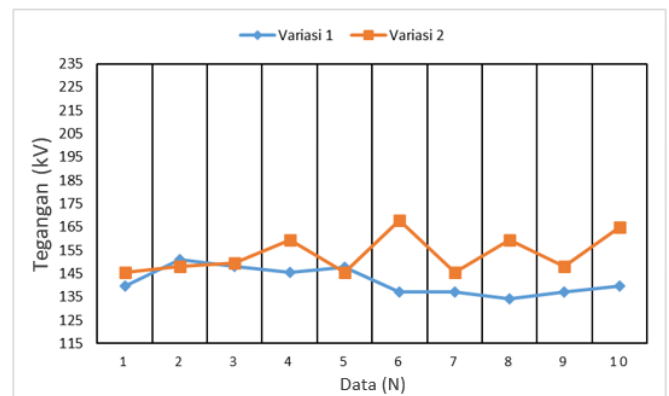
Pengukuran ESDD dan NSDD dimaksudkan untuk melihat jumlah polutan yang terdapat pada bagian isolator. Untuk mendapatkan nilai ESDD, dilakukan pengujian konduktivitas sebanyak sepuluh kali dengan hasil seperti pada Gambar 12.



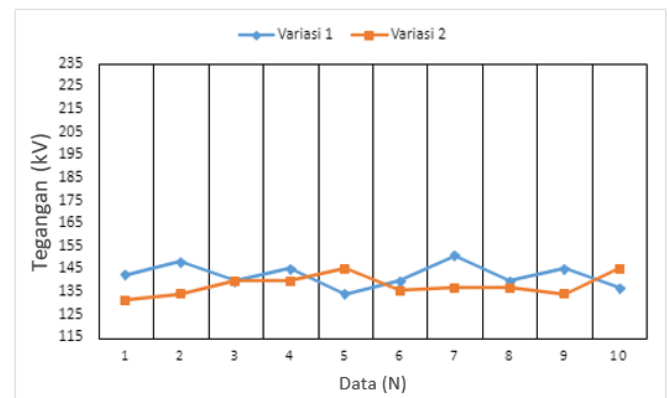
Gambar 12. Data konduktivitas.



Gambar 13. Grafik BDV pada kondisi kotor dan kelembapan 80%.



Gambar 14. Grafik BDV pada kondisi kotor dan kelembapan 85%.



Gambar 15. Grafik BDV pada kondisi kotor dan kelembapan 90%.

Berdasarkan data pengukuran konduktivitas pada Gambar 12, setelah dilakukan perhitungan menggunakan (1) dan (2), diperoleh nilai rata-rata ESDD sebesar $4,69 \text{ mg/cm}^2$ pada isolasi dari *arrester*. Jumlah tersebut tentunya sangat besar, sehingga dapat mengakibatkan penurunan yang besar juga pada nilai BDV. Selain itu, pada perhitungan NSDD, jumlah polutan yang terdapat pada bagian isolator sebanyak $4,25 \text{ g}$. Dengan menggunakan (3), diperoleh nilai NSDD sebesar $1,8841 \text{ mg/cm}^2$.

F. PENGUJIAN KEKUATAN ISOLATOR KONDISI KOTOR DAN LEMBAP

Pengujian yang ketiga adalah pengujian pada kondisi isolasi kotor dengan lingkungan lembap. Pada pengujian ini, kelembapan pada *chamber* diubah-ubah, dengan variasi nilai yaitu 80%, 85%, dan 90%. Polutan yang diberikan pada bagian permukaan isolasi *arrester* berupa campuran garam dengan *fly ash*. Kelembapan diatur dengan menggunakan *humidifier* yang telah diisi akuades. Pada pengujian ini, ditinjau pengaruh kelembapan dan polutan terhadap pengurangan kemampuan isolasi dalam menahan tegangan.

Seperti pada pengujian sebelumnya, dalam pengujian ini digunakan dua elektrode bantu. Jarak antar elektrode sama seperti pada pengujian sebelumnya. Pengujian dilakukan sebanyak sepuluh kali. Sebelum pengujian dilakukan, kelembapan *chamber* diatur dan *chamber* didiamkan terlebih dahulu beberapa saat untuk memastikan bahwa kelembapan dalam *chamber* telah merata. Gambar 13 sampai dengan Gambar 15 merupakan hasil pengujian *surface discharge* pada kondisi lembap dan kondisi isolasi kotor.

Berdasarkan pengujian ESDD dan NSDD, besar polutan yang terkandung pada *arrester* saat dilakukannya pengujian ini termasuk dalam kondisi berat, dengan nilai ESDD sebesar $4,69 \text{ mg/cm}^2$ dan NSDD sebesar $1,8841 \text{ mg/cm}^2$.

Dari Gambar 13 sampai Gambar 15, terlihat bahwa terdapat perbedaan nilai BDV pada setiap variasi kelembapan. Nilai BDV menurun seiring dengan kenaikan kelembapan udara di dalam *chamber*. Hal ini juga terlihat dari hasil nilai rata-rata BDV pada setiap tingkat kelembapan. Pada kelembapan 80%, nilai BDV sebesar $155,2 \text{ kV}$; pada kelembapan 85%, nilai BDV sebesar $147,5 \text{ kV}$; dan pada kelembapan 90%, nilai BDV adalah sebesar $140,1 \text{ kV}$. Jika dibandingkan dengan nilai BDV pada pengujian *arrester* dalam kondisi bersih dan lembap, terlihat perbedaan nilai BDV yang sangat signifikan. Selisih nilai BDV pada pengujian ini, dibandingkan dengan pengujian sebelumnya, adalah sebagai berikut. Pada kelembapan 80%, nilai BDV berkurang sebesar $56,7 \text{ kV}$; pada kelembapan 85%, nilai BDV berkurang sebesar $59,8 \text{ kV}$; dan pada kelembapan 90%, nilai BDV berkurang sebesar $60,7 \text{ kV}$. Dari selisih nilai tersebut, terlihat bahwa makin besar kelembapan, makin besar penurunan nilai BDV. Hal ini terjadi karena pada kelembapan yang tinggi, elektrolit dari polutan akan larut, sehingga nilai konduktivitas meningkat. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya [26], [27].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan kemampuan isolator dalam menahan tegangan. Penurunan kemampuan ini diakibatkan oleh faktor kelembapan dan faktor polutan yang membuat nilai konduktivitas isolator meningkat. Berdasarkan data, penurunan kemampuan isolator terbesar diakibatkan oleh polutan, yang dapat menurunkan nilai BDV sebesar 59 kV . Penurunan tersebut terjadi ketika isolator diberi pengotor dengan nilai ESDD sebesar $4,69 \text{ mg/cm}^2$ dan NSDD sebesar $1,8841 \text{ mg/cm}^2$. Sementara itu, kelembapan menurunkan nilai BDV sebesar $5,8 \text{ kV}$ seiring kenaikan kelembapan sebesar 5%.

KONFLIK KEPENTINGAN

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

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Naufal Hilmi Fauzan dan Sasongko Pramohadi; metodologi, Naufal Hilmi Fauzan dan Sasongko Pramohadi; analisis formal, Naufal Hilmi Fauzan; investigasi, Sasongko Pramohadi; sumber daya, Naufal Hilmi Fauzan; kurasi data, Muhammad Ariq Achnida Syam; penulisan—penyusunan draf asli, Naufal Hilmi Fauzan; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Naufal Hilmi Fauzan dan Sasongko Pramohadi; visualisasi, Rafi Ramadhana Ardiantara; pengawasan, Sasongko Pramohadi; 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, rekan sejawat di Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Universitas Gadjah Mada, Laboran Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi yang sudah mendukung secara penuh, dan kepada seluruh tim yang telah membantu dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] *IEEE Standard for the Electrical Protection of Communications Facilities Serving Electric Supply Locations -- General Considerations*, IEEE Std 487, IEEE Standard Association, New York, AS, 2015, doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7172981.
- [2] S. Das, R. Ghosh, S. Dalai, dan B. Chatterjee, "Study on the Effect of Moisture Ingression into Metal Oxide Surge Arrester Using Leakage Current Analysis," *2017 3rd Int. Conf. Condition Assess. Techn. Elect. Syst. (CATCON)*, 2017, hal. 330–334, doi: 10.1109/CATCON.2017.8280239.
- [3] D.E. Yunida, "Tegangan Residu Keping Arester sebagai Fungsi dari Cacah Keping Arester," *J. Nas. Tek. Elekt., Teknol. Inf.*, Vol. 3, No. 3, hal. 231–235, Agu. 2014, doi: 10.22146/jnteti.v3i3.93.
- [4] E. Perdana, S. Hidayat, dan R. Zoro, "Lightning Protection System on Overhead Distribution Line Using Multi Chamber Arrester," *2nd IEEE Conf. Power Eng., Renew. Energy (ICPERE) 2014*, 2014, hal. 70–74, doi: 10.1109/ICPERE.2014.7067246.
- [5] X. Xie, X. Tao, S. Pang, dan Y. Chen, "Lightning Overvoltage Simulation Research of Typical 35kV Overhead Lines," *2021 IEEE Int. Conf. Adv. Elect. Eng., Comput. Appl. (AEECA)*, 2021, hal. 191–196, doi: 10.1109/AEECA52519.2021.9574417.
- [6] J.P. Holtzhausen (1992) "High Voltage Insulators," [Online], http://www.idconline.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/highvoltage.pdf, tanggal akses: 22-Nov-2022.
- [7] D.G. Crosby, *Environmental Toxicology and Chemistry*. New York, AS: Oxford University Press, Inc., 1998.
- [8] X. Ma, Y. Meng, Y. Du, dan K. Wu, "Investigation of Surface Charge Distribution and Its Influence on Characteristics of Dielectric Barrier Discharge," *2018 12th Int. Conf. Prop., Appl. Dielectr. Mater. (ICPADM)*, 2018, hal. 1065–1069, doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401228.
- [9] Z. Zhijin dkk., "Characterization of Silicone Rubber Degradation under Salt-Fog Environment with AC Test Voltage," *IEEE Access*, Vol. 7, hal. 66714–66724, Mei 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917700.
- [10] E. Kuffel, W.S. Zaengl, dan J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, 2nd ed. Oxford, Inggris: Butterworth-Heinemann: 2000.
- [11] L. Fan, Y. Rui, Y. Wang, dan Y. Yin, "The Study of Surface Flashover Affected by Corona Discharging via Non-invasive Surface Potential Measurement," *2020 Int. Symp. Elect. Insul. Mater. (ISEIM)*, 2020, hal. 490–493.
- [12] C. Liu dkk., "Flashover Performance of Porcelain Post Insulator with Full-Clad Booster Shed," *2018 IEEE/PES Transmiss., Distrib. Conf., Expo. (T&D)*, 2018, hal. 1–5, doi: 10.1109/TDC.2018.8440283.
- [13] H. Ye, Z. Zhong, dan R. Liu, "Research on Insulator Creepage Distance Measurement Based on Edge Detection," *2019 IEEE 3rd Inf. Technol. Netw. Electron., Automat. Control Conf. (ITNEC)*, 2019, hal. 2219–2223, doi: 10.1109/ITNEC.2019.8729175.
- [14] H. Ye, R. Liu, dan X. Cheng, "Research on Insulator Creepage Distance Measurement Based on Feature Extraction," *2019 6th Int. Conf. Inf. Sci., Control Eng. (ICISCE)*, 2019, hal. 1127–1130, doi: 10.1109/ICISCE48695.2019.00227.
- [15] D.A. Sulistyanto, H. Hermawan, dan A. Syakur, "Analisis Arus Bocor dan Tegangan Flashover pada Isolator Suspensi 20 KV 3 Sirip dengan 4 Tipe Sirip Berbahan Polimer Resin Epoksi Silane Silika," *Transient: J. Ilm. Tek. Elekt.*, Vol. 1, No. 4, hal. 226–232, Des. 2012, doi: 10.14710/TRANSIENT.V1I4.226-232.
- [16] L. Ming, L. Yangyang, dan H. Jianlin, "Influence of Sheds Damage on the AC Pollution Flashover Performance of Different Voltage Class Composite Insulators," *IEEE Access*, Vol. 8, hal. 84713–84719, Apr. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991117.
- [17] H. Li, Y. Song, G. Liu, dan Y. Liu, "Study on the Different Law Between NSDD and ESDD in Natural Environment," *2009 IEEE 9th Int. Conf. Prop., Appl. Dielectr. Mater.*, 2009, hal. 690–692, doi: 10.1109/ICPADM.2009.5252337.
- [18] IEC, Jenewa, Swiss. Selection and Dimensioning of High-Voltage Insulators Intended for Use in Polluted Conditions-Part 1: Definitions, Information and General Principles, (2008). Tanggal akses: 22-Nov-2022. [Online]. <https://webstore.iec.ch/publication/3573>
- [19] A. Banik, S. Dalai, dan B. Chatterjee, "Condition Monitoring of Overhead Line Insulator by Measuring Surface Leakage Current," *2014 Annu. IEEE India Conf. (INDICON)*, 2014, hal. 1–5, doi: 10.1109/INDICON.2014.7030540.
- [20] J. Dey, S. Dutta, A. Baral, dan S. Chakravorti, "Leakage Current Monitoring of Suspension Insulator for Effective Determination of ESDD," *2019 8th Int. Conf. Power Syst. (ICPS)*, 2019, hal. 1–6, doi: 10.1109/ICPS48983.2019.9067562.
- [21] C. Xuezheng dkk., "Natural Pollution Characteristics Analysis of XP-70 Insulators Based on ESDD and Microscopic Particle Image Analysis Method," *2020 Tsinghua - HUST-IET Elect. Eng. Acad. Forum*, 2020, hal. 1–8, doi: 10.1049/cp.2020.0007.
- [22] E.A. Feilat dan A. Al-Maqrashi, "ESDD- and DDDG-Based Assessment of Insulator Pollution Levels in Oman," *2011 IEEE GCC Conf., Exhib. (GCC)*, 2011, hal. 593–596, doi: 10.1109/IEEGGCC.2011.5752602.
- [23] W. Shi dkk., "Analysis on the Natural Pollution Characteristics of Metal-Oxide Surge Arrester with Different External Insulation Material," *2020 5th Asia Conf. Power, Elect. Eng. (ACPEE)*, 2020, hal. 2237–2241, doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136496.
- [24] Z. Yan, Y. Wang, R. Huang, dan L. Tian, "Study on Natural Contamination Depositing Characteristics of Insulator of EHV Transmission Line in High Altitude Salt Lake Area," *2019 IEEE 3rd Int. Elect., Energy Conf. (CIEEC)*, 2019, hal. 979–984, doi: 10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019370.
- [25] S. Gao dkk., "Study on the Surface Contamination of Insulators with Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Technique," *2018 Int. Conf. Power Syst. Technol. (POWERCON)*, 2018, hal. 3417–3422, doi: 10.1109/POWERCON.2018.8601766.
- [26] R. Vinothkumar, G. Kannayeram, dan G. Shunmugalakshmi, "Investigation of Natural and Artificial Contamination on Various Types of Insulators," *2015 Int. Conf. Innov. Inf. Embed., and Commun. Syst. (ICIIECS)*, 2015, hal. 1–6. doi: 10.1109/ICIIECS.2015.7192933.
- [27] N.L. Praba dan L. Kalaivani, "Analysing the Performance for Outer Shed Insulator with Non-Uniform Pollution," *2019 Fifth Int. Conf. Elect. Energy Syst. (ICEES)*, 2019, hal. 1–4. doi: 10.1109/ICEES.2019.8719285.