

ANALISIS X-RAY DIFFRACTION KARAKTERISTIK POLUTAN PADAT DAN GAS UNTUK MENENTUKAN KUALITAS ISOLASI PADA PERMUKAAN ISOLATOR KERAMIK

Aji Suryo Alam ^{1*)}, Abdul Syakur ² dan Guntur Supriyadi ¹

¹ PT PLN (Persero) Jl Blok M – I No 135 Kebayoran Baru, Jakarta 12160, Indonesia

² Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}E-mail: aji.alam@pln.co.id

Abstrak

Salah satu peralatan yang berperan penting dalam penyaluran ketenagalistrikan adalah isolator. Fungsi dasar isolator adalah memisahkan sisi peralatan yang bertegangan dan tidak bertegangan. Isolator terpasang pada sistem transmisi dan distribusi diharapkan mampu bekerja dengan optimal, untuk menjaga keandalan penyaluran ketenagalistrikan. Tidak menutup kemungkinan isolator yang terpasang mengalami gangguan yang disebabkan karena temperatur, kelembaban dan polutan. Isolator dalam keadaan berpolutan dan dengan kondisi udara yang lembab, memungkinkan terjadi korona pada isolator. Korona yang muncul dengan frekuensi yang sering, dapat memicu terjadinya *arching discharge* yang berakhir dengan terjadinya kegagalan tegangan pada isolator tersebut. Pada studi ini dilakukan investigasi penyebab munculnya fenomena *arching discharge* isolator keramik pada Gardu Induk. Fenomena ini terjadi pada semua tipe isolator yang terpasang, baik isolator bushing, isolator gantung dan isolator tarik. Untuk mengetahui penyebab fenomena tersebut, dilakukan pengambilan data lapangan kualitas udara ambien dan polutan permukaan isolator. Polutan yang menempel pada permukaan isolator, dilakukan pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk mengetahui komposisi polutan. Dari hasil pengujian XRD didapatkan, komposisi yang dominan adalah NaCl (Sodium Chloride) 39 % kemudian disusul CaSO₄.2H₂O (Gypsum) 28,6 %.

Kata kunci: Arching Discharge; Pita Kering; X-Ray Diffraction; Sodium Chloride; Gypsum

Abstract

One of the pieces of equipment that plays an important role in the distribution of electricity is an insulator. The basic function of an insulator is to separate the live and non-voltage sides of the equipment. Insulators installed in the transmission and distribution system are expected to work optimally, to maintain the reliability of electricity distribution. The installed insulator can experience disturbances caused by temperature, humidity, and pollutants. The insulator is in a polluted state and with humid air conditions, allowing corona to occur on the insulator. Coronas that appear with frequent frequency, can trigger an arching discharge which ends with a voltage failure on the insulator. This study investigates the causes of the arching discharge phenomenon of ceramic insulators at the substation. This phenomenon occurs in all types of insulators installed, both bushing insulators, hanging insulators, and tensile insulators. To find out the cause of this phenomenon, field data were collected on ambient air quality and surface pollutants of insulators. Pollutants that stick to the surface of the insulator, XRD (X-Ray Diffraction) testing is carried out to determine the composition of pollutants. From the XRD test results, the dominant component is NaCl (Sodium Chloride) 39% then followed by CaSO₄.2H₂O (Gypsum) 28.6%.

Keywords: Arching Discharge ; Dry Bands; X-Ray Diffraction; Sodium Chloride; Gypsum

1. Pendahuluan

Kegagalan isolator dapat menyebabkan terhambatnya penyaluran kelistrikan. Isolator yang sering mengalami kegagalan biasanya isolator yang terpasang pada pasangan luar. Berbagai macam faktor yang menyebabkan kegagalan tersebut, salah satunya adalah

faktor lingkungan [1], [2]. Kondisi lingkungan dibagi beberapa tipe, seperti lingkungan industri, laut atau pantai, gurun pasir, pertanian dan campuran dari semua lingkungan [3]. Pembagian tipe lingkungan untuk mengetahui tipe polutan yang menempel di permukaan isolator. Misalnya polutan NaCl banyak ditemukan menempel di permukaan isolator yang terletak di sekitar

pantai. Polutan ini terbawa dan menempel pada isolator tergantung dari arah angin dan jarak dari pantai [4].

Polutan yang menempel pada isolator bersifat larut dalam air dan tidak larut dalam air. Polutan berada di udara seperti SO₂, NO₂, CO₂, CO, PM dan Pb dapat membentuk lapisan konduktif pada peralatan, polutan ini dihasilkan dari campuran kimia kegiatan farmasi, perminyakan dan pabrik lainnya [5]. Beberapa polutan seperti gas yang terlarut dalam air, misal SO₂ sulit dideteksi dengan melakukan pengukuran dari permukaan isolator. Jenis kontaminan gas ini akan kembali dalam bentuk gas segera setelah permukaan isolator mengering [6]. Peningkatan gas buang seperti NH₃, NO₂, SO₂ dan aerosol (partikel) akan berakibat terjadinya hujan asam [7]. Penelitian yang sudah ada menunjukkan bahwa hujan asam yang terjadi bisa menyebabkan penurunan tingkat isolasi [8].

Selain kondisi lingkungan, kelembaban dan suhu juga berperan pada kegagalan isolator [5], [9]. Semakin tinggi kelembaban, kegagalan isolator juga mengalami kenaikan. Dengan meningkatnya kelembaban pada udara, memudahkan polutan menempel pada permukaan isolator. Hal ini akan membuat medan listrik yang ada di permukaan isolator meningkat. Dikarenakan medan listrik isolator lebih tinggi dari udara, maka bisa terjadi *flashover* pada isolator [10]. Pengamatan lapangan yang sudah dilakukan menunjukkan *flashover* akan semakin mudah terjadi apabila terdapat polutan kapur pada permukaan isolator [11]. Polutan kapur atau CaCO₃ ketika berinteraksi dengan SO₄ dan 2H₂O akan menjadi *gypsum*. *Gypsum* adalah salah satu polutan yang umum, diketahui merusak permukaan isolator, dan interaksinya dengan CO₂, CH₄, dan NO₂ sangat merusak [12].

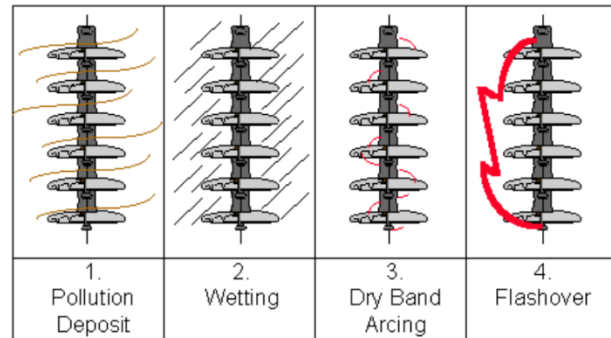
Pada studi ini dilakukan analisis terjadinya fenomena *arching discharge* pada isolator 150 kV. Untuk mendukung analisis, dilakukan pengamatan lapangan, pengambilan sampel polutan, dan pengujian kualitas udara ambien.

Pengamatan lapangan dilakukan guna mengetahui kondisi sekitar gardu induk dan spesifikasi isolator terpasang. Pengambilan sampel polutan dilakukan guna mengetahui komponen pengotor pada isolator. Pengujian kualitas udara dilakukan untuk mengetahui data meteorologi di Gardu Induk. Langkah – langkah yang sudah dilakukan, diharapkan diketahui penyebab munculnya *arching discharge* pada isolator pada Gardu Induk.

2. Metode

2.1. Fenomena terjadinya *Flashover*

Proses terjadinya *flashover* sangat dipengaruhi oleh karakteristik permukaan isolator yang bersifat menyerap air ataupun menolak air.



Gambar 1. Proses terjadinya *flashover*[3]

Polutan yang menempel pada permukaan isolator terbawa oleh angin. Ketika polutan tersebut sudah menempel dan kondisi lingkungan memiliki kelembaban yang tinggi, polutan pada permukaan isolator menjadi basah. Apabila polutan tersebut bersifat tidak larut dalam air atau polutan tidak hilang secara alami oleh air hujan atau angin, maka bisa terbentuk pita kering pada permukaan isolator. Pita kering yang sudah terbentuk dan tidak dihilangkan dalam waktu yang lama, berpotensi terjadinya *flashover* pada isolator tersebut.

2.2. Pengamatan Lapangan

Pengamatan lapangan dilakukan untuk mengetahui kondisi lapangan disekitar gardu induk. Gambar 2 menunjukkan lokasi sekitar Gardu Induk dilihat dari citra satelit.



Gambar 2. Lokasi gardu induk dari bibir pantai

Gambar 2 terlihat kondisi sekitar Gardu Induk adalah proyek Pembangunan, industri pembangkit minyak dan gas, dan pantai.

Pada Gambar 3 ditunjukkan proyek pembangunan yang bersebelahan dengan Gardu Induk. Debu proyek Pembangunan berdampak pada isolator yang ditunjukkan pada Gambar 4.

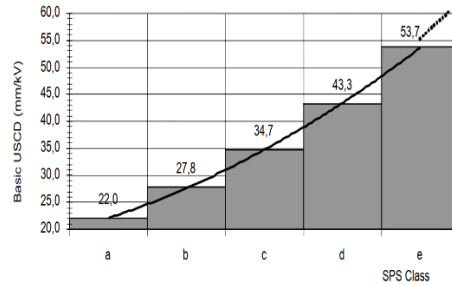


Gambar 3. Proyek pembangunan disekitar gardu induk



Gambar 4. Kondisi isolator terpasang

Isolator yang terpasang di Gardu Induk terdampak polutan yang berasal dari lokasi sekitar. Lokasi gardu induk yang berdekatan dengan pantai dan bersebelahan dengan lokasi proyek pembangunan, maka tingkat pengotor bisa dikelompokkan [13].



Gambar 5. RUSCD tingkatan pengotor SPS[14]

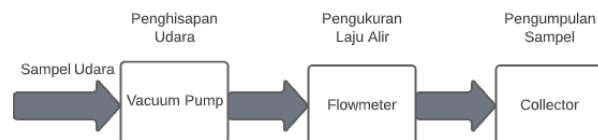
Gambar di atas menunjukkan grafik *Reference Unified Specific Creepage Distance* (RUSCD) dengan kelas *Site Pollution Severity* (SPS) dinyatakan dalam 5 kelompok pengotor, yaitu:

- Pengotor sangat ringan
- Pengotor ringan
- Pengotor sedang
- Pengotor berat
- Pengotor sangat berat

Hubungan antara kelas tingkatan pengotor (SPS) dan indeks pencemaran, sebaiknya diukur dalam periode waktu minimal satu tahun[14]. Pada penelitian yang sudah ada menunjukkan isolator pin-post mengalami penurunan tingkat isolasi tertinggi pada parameter arus bocor pada ESDD 0,04734 mg/cm² [15]. Untuk mengetahui kondisi isolator, arus bocor dianggap sebagai parameter kunci dalam memberikan informasi yang paling efisien dan menyeluruh tentang kondisi isolator [16]. Kondisi isolator akan kembali normal setelah dilakukan pembersihan polutan. Frekuensi pembersihan isolator bervariasi tergantung dari beberapa faktor seperti tingkat kontaminasi, kondisi cuaca, dan desain isolator [17].

2.3. Pengambilan Sampel Kualitas Udara Ambien

Pengambilan sampel kualitas udara ambien bertujuan untuk mengetahui data meteorologi, kandungan gas di udara dan partikel yang melayang di udara.



Gambar 6. Proses pengambilan sampel udara

Tabel 1. Parameter sampel uji kualitas udara ambien

No	Parameter	Metode Acuan
1	Temperature	-
2	Kelembaban	-
3	Arah Angin Dominan	-
4	Cuaca	-
5	Sulfur Dioksida (SO ₂)	SNI 7119-7:2017
6	Karbon Monoksida (CO)	Spectrophotometry
7	Nitrogen Dioksida (NO ₂)	SNI 19-7119.2:2005
8	Timbal (Pb)	SNI 7119-4:2017
9	PM100	SNI 7119-3:2017
10	PM10	SNI 7119-15:2016
11	PM 2,5	SNI 7119-14:2016
12	Hidrokarbon	SNI 7119-13:2009
13	Oksidan (O ₃)	SNI 19-7119.8:2005

Pengambilan sampel udara ditunjukkan pada gambar 6. Sampel dihisap menggunakan *Vacuum Pump* kemudian udara diteruskan ke *Flowmeter*. Pada *Flowmeter* ini, udara diproses untuk mengetahui volume udara yang masuk. Pada tahap akhir udara yang sudah melewati *Flowmeter* dikumpulkan pada *collector*. Pada *Collector* ada penggunaan saringan, untuk menyaring gas bisa menggunakan impinger sedangkan untuk menyaring sampel dengan bentuk partikel menggunakan filter. Kemudian udara diteruskan ke *flowmeter* untuk mengetahui volume udara yang terkumpul.

Komposisi udara dan gas yang diambil berdasarkan PPRI 22 Tahun 2021 Lamp. VII dan dilakukan pengambilan selama 24 jam. Adapun parameter yang diamati tabel 1.

2.4. Pengujian Polutan

Polutan yang sudah diambil dari isolator, kemudian dilakukan pengujian menggunakan alat *X-Ray Diffraction* Merk Olympus Terra Portable XRD Analyzer.

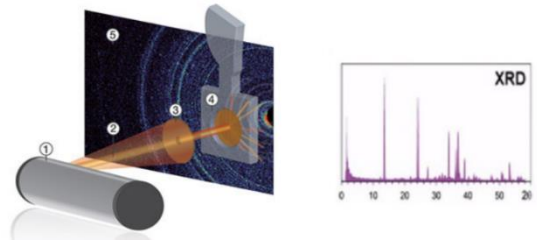


Gambar 7. Alat uji Olympus Terra Portable XRD Analyzer

Metode yang digunakan dalam pengujian adalah difraktometri serbuk. Metode ini menggunakan sampel bubuk. Informasi atau data yang diperoleh dari *X-Ray Diffraction* yaitu:

1. Grafik puncak difraksi menggambarkan kriteria kisi, selisih antar lapisan, komposisi kristal dan arah unit sel.

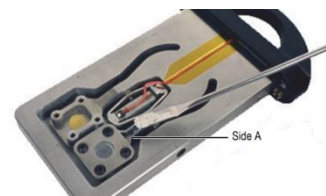
2. Puncak difraksi yang dihasilkan saat penyinaran menggambarkan posisi atom dalam unit sel.
3. Grafik puncak hasil difraksi *X-Ray* menggambarkan skala kristalit dan ketidaksempurnaan elektronik dalam kisi.



Gambar 8. Proses difraksi menggunakan sinar X-Ray

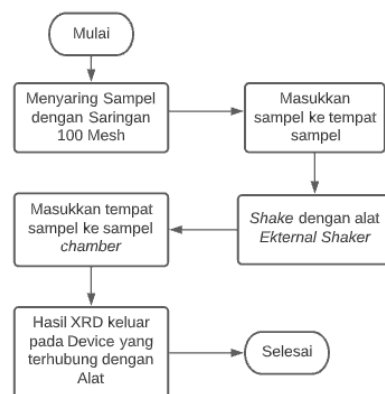
Secara umum proses pengujian dapat dilihat pada gambar 8.

1. Microfocus X-ray Tube
2. X-ray Beam
3. Collimator
4. Sample
5. CCD Detector



Gambar 9. Tempat sampel

Tempat sampel berfungsi sebagai wadah sampel yang sudah berupa bubuk untuk kemudian dimasukkan ke dalam chamber.



Gambar 10. Proses pengujian X-Ray Diffraction

Sampel uji yang sudah berupa bubuk hasil penyaringan dengan ukuran 100 mesh dimasukkan pada tempat sampel. Tempat sampel dilakukan *shaking* supaya sampel

bisa terbaca pada tempat sampel. Tempat sampel dimasukkan ke alat Terra guna dilakukan penyinaran x-ray. Dari hasil penyinaran yang sudah dilakukan menunjukkan hasil pengujian ukuran kristalin dalam material sampel.

2.5. Evaluasi Spesifikasi Isolator

Evaluasi yang dilakukan untuk melihat jarak rambat isolator yang terpasang pada gardu induk. Adapun spesifikasi dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi isolator

No	Deskripsi	Nilai
1	Desain	Post
2	Penggunaan	Outdoor
3	Rating Tegangan	170 kV
4	Bahan Isolator	Porselin
5	Jarak Rambat	31 mm/kV
6	Jarak Rambat	5270 mm

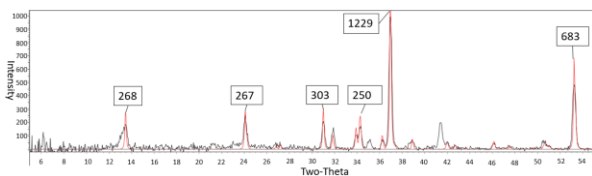
Dalam hal kegagalan elektrik isolator, spesifikasi isolator yang diamati adalah jarak rambat isolator. Jarak rambat isolator harus sesuai dengan kriteria berdasarkan lingkungan [18].

Tabel 3. Kriteria jarak rambat berdasarkan tingkat polusi

Tingkat Polusi	Jarak Rambat (mm/kV)
Sangat Ringan	12,7
Ringan	16
Sedang	20
Berat	25
Sangat Berat	31

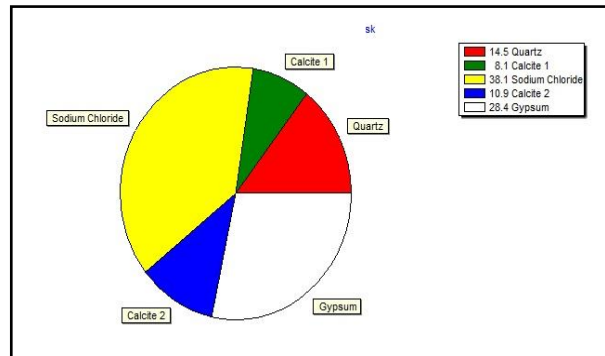
3. Hasil dan Pembahasan

Dari hasil pengamatan lapangan, lokasi gardu induk berada di dekat pantai, proyek pembangunan dan bersebelahan dengan PLTMG (Pembangkit Listrik Tenaga Minyak dan Gas). Lokasi yang berada disekitar gardu induk, ada kemungkinan debu tanah, garam dan pengotor dari keluaran pembangkit menempel di permukaan isolator. Untuk mengetahui lebih detail, maka dilakukan pengambilan sampel polutan dan dilakukan pengujian XRD. Adapun hasil pengujian XRD ditunjukkan pada gambar 11 dan tabel 4.



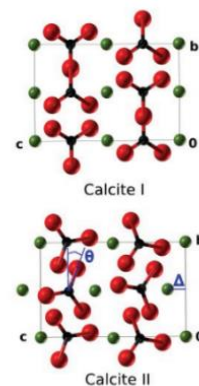
Gambar 11. Spektrum komposisi polutan

Gambar 11 adalah hasil pengujian X-Ray Diffraction. Hasil pengujian menunjukkan spectrum tertinggi sebesar 1229. Spectrum unsur kimia yang ditampilkan pada gambar 11 dapat dilakukan analisis lebih lanjut. Hasil analisis ditunjukkan pada gambar 12.



Gambar 12. Komposisi hasil pembacaan spektrum

Gambar 12 menunjukkan polutan yang ada pada isolator, yaitu Sodium Chloride, Gypsum, Quartz, Calcite. Polutan yang paling dominan pada permukaan isolator adalah Sodium Chloride (NaCl), kemudian polutan Gypsum (CaSO₄.2H₂O). Pada Gambar 12 Calcite 1 dan Calcite 2 adalah senyawa dengan susunan kimia yang sama CaCO₃. Calcite akan mengalami beberapa fase transisi apabila diperlakukan dengan tekanan yang berbeda, fase transisinya yaitu calcite II, III dan VI. Pada tekanan 1.7 Gpa calcite akan mengalami transisi menjadi calcite 2 [19].



Gambar 13. Volume Calcite yang terkompresi dengan nilai 54,7 Å/F.U mengalami perubahan struktur menjadi Calcite 2[20]

Dari gambar spektrum dan komposisi polutan yang ditunjukkan pada Gambar 12 diketahui komposisi unsur yang membentuk senyawa tersebut seperti pada tabel di bawah ini.

Tabel 4. Hasil pengukuran kualitas udara ambien

Phase		Quartz SiO ₂	Calcite CaCO ₃	NaCl	Gypsum CaSO ₄ .2H ₂ O
Elemen	Total	13,9	18,5	39	28,6
Si	6,49	6,49	-	-	-
O	32,21	7,4	8,89	-	15,93
Na	15,53	-	-	15,35	-
Cl	23,66	-	-	23,66	-
Ca	14,07	-	7,42	-	6,65
C	2,22	-	2,22	-	-
S	5,32	-	-	-	5,32
H	0,67	-	-	-	0,67

Pada tabel 4 terlihat unsur dalam pembentukan senyawa Quartz, Calcite, Sodium Chloride, dan Gypsum. Unsur yang paling dominan dalam pembentukan senyawa adalah Oksigen (O), Chloride (Cl), Natrium (Na) dan Calcite (Ca). Pada penelitian yang sudah dilakukan menunjukkan CaCO₃ dan SiO₂ ditemukan pada bahan alam (pasir dan batuan) yang diambil dari beberapa daerah [21]. Komponen Gypsum (CaSO₄.2H₂O) merupakan komposisi kimia yang tidak mudah larut dalam air [22]. Penelitian yang sudah dilakukan, polutan yang tak larut dalam air membuat tegangan *flashover* menurun [23].

Untuk memastikan kondisi udara dan tidak adanya polutan gas yang mempengaruhi terjadinya *arching discharge*, maka dilakukan pengujian kualitas udara ambien selama 24 jam. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengukuran data meteorology

Parameter	Waktu	Hasil
Temperature (°C)	06.00 - 09.00	27.9
	09.00 - 12.00	31.3
	14.00 - 17.00	32.2
	17.00 - 22.00	29.3
	22.00 - 00.00	27.3
	00.00 - 03.00	26.2
	03.00 - 06.00	26.2
Kelembaban (%)	06.00 - 09.00	76
	09.00 - 12.00	56
	14.00 - 17.00	50
	17.00 - 22.00	62
	22.00 - 00.00	74
	00.00 - 03.00	83
	03.00 - 06.00	84
Arah Angin	06.00 - 09.00	West
	09.00 - 12.00	West
	14.00 - 17.00	East
	17.00 - 22.00	East
	22.00 - 00.00	East
	00.00 - 03.00	North
	03.00 - 06.00	North
Cuaca	06.00 - 09.00	Cloudy
	09.00 - 12.00	Sunny
	14.00 - 17.00	Sunny
	17.00 - 22.00	Cloudy
	22.00 - 00.00	Cloudy
	00.00 - 03.00	Cloudy
	03.00 - 06.00	Cloudy

Dari tabel 5 terlihat temperature tertinggi adalah 32,2 °C dan kelembaban tertinggi sebesar 84 % pada jam 03.00 – 06.00. Berdasarkan data arah angin pada jam 14.00 – 06.00 angin mengarah ke gardu induk. Dapat dilihat pada

Gambar 2, lokasi gardu induk berada pada semenanjung, sehingga terdampak polutan dari laut yang dibawa oleh angin ke arah timur dan angin yang ke arah utara.

Tabel 6. Hasil pengukuran kualitas udara ambien

No	Parameter	Waktu Pengukuran	Hasil	Batasan
1	Sulfur Dioxide (SO ₂)	24 Jam	34	75
2	Carbon Monoxide (CO)	8 Jam	1006	4000
3	Nitrogen Dioxide (NO ₂)	24 Jam	37	65
4	Oxidant (O ₃)	1 Jam	70	150
5	Hydrocarbon (HC)	3 Jam	11.5	160
6	Particle < 100 µm	24 Jam	65	230
7	Particle < 10 µm	25 Jam	33	75
8	Particle < 2,5 µm	26 Jam	18	55
9	Lead (Pb)	27 Jam	0.3	2

Dari hasil pengukuran kualitas udara ambien dapat dilihat, gas yang membentuk hujan asam diudara masih dalam batasan aman untuk lingkungan manusia atau dengan kata lain udara tidak bersifat asam. Partikel yang melayang diudara paling banyak adalah partikel dengan ukuran 100 µm. Partikel yang melayang di udara membawa polutan dari pantai atau debu pembangunan dan menempel ke permukaan isolator.

Ketika polutan yang bersifat larut dalam air dan tidak larut dalam air menempel pada permukaan isolator, dapat memicu kenaikan medan listrik pada isolator. Hal ini bisa diperburuk dengan jarak rambat isolator, maka dari itu perlu dipastikan spesifikasi isolator yang terpasang. Penentuan kelas polutan berdasarkan Gambar 5, kategori polutan yang berada pada isolator masuk dalam kategori polutan sangat berat. Untuk mengetahui jarak rambat isolator sudah sesuai dengan referensi, maka dapat dihitung kriteria jarak rambat dari persamaan berikut ini.

$$Koreksi\ USCD = RUSCD \times K_a \times K_{ad} \quad (1)$$

dimana,

USCD = Unified Spesific Creepage Ditanse

RUSCD = Reference Unified Creepage Distance

K_a = Tegangan Rating per fasa (kV)

K_{ad} = 1

$$USCD = 53,7 \times (170\text{ kV}/\sqrt{3}) \times 1 = 5270\text{ mm}$$

Karena polutan masuk dalam kategori sangat berat, sehingga nilai RUSCD sebesar 53,7. Parameter K_a adalah tegangan rating isolator terpasang sebesar 170 kV per fasa. Nilai K_{ad} pada umumnya adalah 1. Hasil perhitungan di atas memberikan nilai jarak rambat minimum yang harus digunakan isolator adalah 5270 mm. Jarak rambat

ini sudah sesuai dengan spesifikasi isolator yang terpasang dilapangan, dapat dilihat pada Tabel 2.

4. Kesimpulan

Kualitas permukaan isolator ditentukan oleh polutan yang menempel pada permukaan isolator. Karakteristik polutan pada lingkungan gardu induk yang berada dekat dengan pantai, lokasi proyek pembangunan dan pembangkit minyak dan gas menjadi faktor pendukung menurunnya kualitas isolator yang bisa menyebabkan kegagalan kerja isolator. Hal ini ditunjukkan pada hasil pengujian polutan menggunakan *X-Ray Diffraction*. Senyawa pada polutan tertinggi adalah NaCl (Sodium Chlorida) sebesar 39 % kemudian disusul dengan senyawa CaSO₄.2H₂O (Gypsum) sebesar 28,6 %. Senyawa NaCl merupakan senyawa yang larut dalam air, sedangkan senyawa CaSO₄.2H₂O merupakan senyawa yang tidak larut dalam air. Laju peningkatan per tahun pengotor kedua tipe polutan tersebut ditunjukkan sebagai ESDD dan NSDD [14].

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar – besarnya dan penghargaan yang setinggi – tingginya pada pihak yang sudah berkontribusi dalam studi ini, baik dalam pengambilan data maupun penulisan.

Referensi

- [1]. S. A. Sokolovsky and V. G. Santotsky, "Environmental impact on the insulation of 10 kV distribution power lines," *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Annual Report*, vol. 1, pp. 56–59, 1998.
- [2]. A. Bojovschi, T. V. Quoc, H. N. Trung, D. T. Quang, and T. C. Le, "Environmental effects on HV dielectric materials and related sensing technologies," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 5, 2019.
- [3]. Cigre 158. "Polluted insulators a review of current knowledge" June, 2000.
- [4]. M. A. Salam, H. Goswami, and Z. Nadir, "Determination of equivalent salt deposit density using wind velocity for a contaminated insulator," *J Electrostat*, vol. 63, no. 1, pp. 37–44, 2005.
- [5]. C. S. Venkataraman, B. R. Prabhakar, and M. R. Nandagopal, "Effect of humidity on the power frequency flashover voltage of insulators and gaps at varying temperature conditions," *IEE-IERE Proceedings - India*, vol. 14, no. 6, p. 237, 1976.
- [6]. F. M. Couquelet *et al.*, "Application of Insulators in the contaminated Environment," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 5, pp. 1676–1695, 1979.
- [7]. T. Budiwati, D. A. Tanti, and A. Indrawati, "Identifikasi Sumber Polutan Berdasarkan Trayektori Massa Udara di Semarang," *Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, LAPAN*, pp. 244–254, 2016.
- [8]. Hartono, "Analisa Pengaruh Tingkat Keasaman Hujan Asam Terhadap Kegagalan Tegangan Isolator," pp. 24–25, 2005.
- [9]. R. M. Arias Velásquez and J. V. Mejía Lara, "Bushings failure in power transformers and the influence of moisture with the spectroscopy test," *Eng Fail Anal*, vol. 94, pp. 300–312, Dec. 2018.
- [10]. P. Unahalekhaka and S. Phonkaphon, "Influences of Relative Humidity on the Electric Field and Potential on Suspension Insulator String," *Energy Procedia*, vol. 89, pp. 110–119, 2016.
- [11]. R. M. Arias Velásquez, "Insulation failure caused by special pollution around industrial environments," *Eng Fail Anal*, vol. 102, pp. 123–135, Aug. 2019.
- [12]. I. J. A. Carreño-Marquez and J. Camarillo-Cisneros, "Gypsum crystals pollutants: DFT and van der Waals interactions study on its surface deterioration," *Comput Theor Chem*, vol. 1187, Oct. 2020.
- [13]. IEC/TS 60815-2, "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems," *Manual*, vol. 9, no. October, pp. 1–2, 2008
- [14]. IEC 60815-1. "Technical Specification Selection And Dimensioning Of High-Voltage Insulators Intended For Use In Polluted Conditions-Part 2: Ceramic And Glass Insulators For A.C. Systems," 2008.
- [15]. J. Teknologi and E. Uda, "Studi Pengaruh Kontaminasi Polusi Udara Pada Isolator Tegangan Menengah 20 Kv Pada Pt Pln (Persero) Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (Up3) Medan."2020.
- [16]. Ali. A. Salem "A New Flashover Prediction on Outdoor Polluted Insulator Using Leakage Current Harmonic Components."2018.
- [17]. IEEE Power Engineering Society. Transmission and Distribution Committee., IEEE-SA Standards Board., and Institute of Electrical and Electronics Engineers., *IEEE guide for cleaning insulators*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005.
- [18]. IEC 60815-1, "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles," *International Electrotechnical Commission*, pp. 1–2, 2018.
- [19]. T. Pippinger *et al.*, "Puzzling calcite-III dimorphism: Crystallography, high-pressure behavior, and pathway of single-crystal transitions," *Phys Chem Miner*, vol. 42, no. 1, pp. 29–43, Jan. 2015.
- [20]. D. Carrasco-Busturia, "The temperature - pressure phase diagram of the calcite I - calcite II phase transition: A first-principles investigation," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 154, Jul. 2021.
- [21]. M. Munasir, T. Triwikantoro, M. Zainuri, and D. Darminto, "Uji Xrd Dan Xrf Pada Bahan Meneral (Batu Dan Pasir) Sebagai Sumber Material Cerdas (Caco3 Dan Sio2)," *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, vol. 2, no. 1, p. 20, 2012.
- [22]. F. Wirsching, "Calcium Sulfate," *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2000.
- [23]. M. T. Prasetyo, *Evaluasi Metode Pengukuran Kondisi Isolator Dalam Keadaan Bertegangan*, vol. 2, pp. 22–28, 2013.