

Penurunan Ketahanan Isolator Gardu Induk 150 kV Semen Indonesia

Rizky Hudaya*, Gunawan, Muhamad Haddin

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang

Article Info

Article history:

Submitted January 23, 2024

Accepted February 2, 2024

Published February 5, 2024

Keywords:

Polutan semen,
resistansi,
isolator

*Cement pollutants,
resistance,
insulators.*

ABSTRACT

Gardu induk 150 kV Semen Indonesia berada satu kawasan dengan pabrik semen PT Semen Indonesia (persero) di Rembang. Perangkat tegangan tinggi gardu induk biasanya sudah memiliki karakteristik listrik yang baik. Namun ketahanan isolator listrik berubah seiring durasi operasi dan kondisi lingkungan berupa gangguan panas, kimia, mekanik. Polutan pabrik semen bersifat higroskopis dan konduktif sebab mengandung logam berat stabil seperti merkuri, timbal, nikel, kromium dan kobalt. Karakteristik isolator berupa resistansi, konduktansi dan arus bocor berpotensi memburuk akibat pengotoran permukaan hingga berpotensi *breakdown*. Penelitian ini mengkaji ketahanan isolator dengan pengaruh polutan semen secara spesifik. Metode pengukuran resistansi secara *shut down measurement* pada obyek isolator di 4 bay. Pengukuran divalidasi standart VDE (*catalogue* 228/4). Hasil pengukuran dalam kondisi basah sebelum pemeliharaan isolator keramik bay Blora 2 busbar 2 fasa R 0,94 M Ω /kV, 380 p \bar{O} , 2,1 μ A, bay Rembang 1 busbar 2 fasa R 0,42 M Ω /kV, 854 p \bar{O} , 4,8 μ A, dan bay Rembang 1 busbar 2 fasa T 0,44 M Ω /kV, 806 p \bar{O} , 4,5 μ A. Resistansi isolator karet silikon semua bay >357 M Ω /kV. Penelitian menunjukkan bahwa polutan semen secara signifikan menurunkan ketahanan isolator peralatan tegangan tinggi sehingga R<1 M Ω /kV, S<357 p \bar{O} dan I_{res}<2,01 μ A sehingga menjadikan kondisi tidak baik dan beresiko terjadi kegagalan fungsi.

Semen Indonesia's 150 kV substation located in same area as PT Semen Indonesia (Persero) cement factory in Rembang. Substation high voltage devices have good electrical characteristics. Insulators electrical resistance changes with operation duration and environmental conditions of thermal, chemical and mechanical disturbances. Cement factory pollutants are hygroscopic and conductive because contain stable heavy metals such as mercury, lead, nickel, chromium and cobalt. Insulator characteristics of resistance, conductance and leakage current have potential to deteriorate due to surface fouling and potentially breakdown. Research examines durability of insulators with influence of specific cement pollutants. Resistance measurement method using shut down measurement on insulator objects in 4 bays. Measurements validated with VDE standards (catalogue 228/4). Results in wet conditions before maintenance of ceramic insulators bay Blora 2 busbar 2 phase R 0.94 M Ω /kV, 380 p \bar{O} , 2.1 μ A. Bay Rembang 1 busbar 2 phase R 0.42 M Ω /kV, 854 p \bar{O} , 4.8 μ A. Bay Rembang 1 busbar 2 phase T 0.44 M Ω /kV, 806 p \bar{O} , 4.5 μ A. Silicon rubber insulator resistance all bays >357 M Ω /kV. Research shows cement pollutants significantly reduce the resistance of high voltage equipment insulators so that R<1 M Ω /kV, S<357 p \bar{O} and I_{res}<2.01 μ A, resulting in poor conditions and a risk of functional failure.



Corresponding Author:

Rizky Hudaya,

Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung,

Jl. Kaligawe Raya km. 4, Kota Semarang, Indonesia

Email: *rizky.hudaya@yahoo.co.id

1. PENDAHULUAN

Kegagalan isolasi pada sistem transmisi tenaga listrik salah satunya disebabkan kegagalan fungsi isolator sebagai penyekat antara daerah bertegangan dengan *ground*, sehingga terjadi *short circuit*. Kegagalan isolasi disebabkan beberapa faktor di antaranya kerusakan material, *aging* (penuaan), nilai tegangan surja yang

melebihi *basic insulation level* (BIL) isolator, dan penurunan performa isolator yang dipengaruhi oleh polutan. KEPDIR. No. : 0520 K/DIR/2014 PLN menentukan sesuai standar VDE (*catalouge* 228/4) nilai batasan resistansi minimal pada isolator sebesar $1 \text{ M}\Omega$ setiap 1 kV tegangan sistem terhadap tanah pada suhu operasi [1].

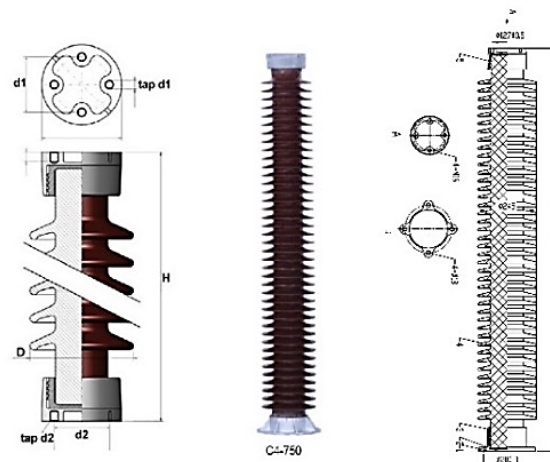
Penelitian oleh Anwar dkk. [2] meneliti pengaruh polutan tak larut terhadap ketahanan isolator dan menyimpulkan bahwa isolator berpolutan abu dari PLTU Molotabu pada kondisi kering tak berpolutan mempunyai nilai tegangan lewat denyar paling tinggi dan pada kondisi basah per polutan mempunyai nilai tegangan lewat denyar paling rendah. Tobing dan Lubis[3] menyimpulkan bahwa semakin dekat dengan sumber polutan, semakin tebal juga polutan yang menempel pada isolator. Penelitian tentang pengaruh polutan garam dan polutan lain dengan kondisi kering ataupun basah terhadap performa isolator oleh N. F. Baso[4], Darmadi dkk.[5], Fahmi dkk.[6], Armansyah[7], Darmawan dan Sakur[8], Joto dkk.[9], Sudirman [10][11], Jumari dkk.[12], Warmi dkk.[13] menyimpulkan bahwa semakin tebal polutan, semakin tinggi potensi terjadi *breakdown* isolator. Salim[14] membahas pengaruh polutan garam dan kelembaban terhadap potensi *flashover* pada isolator menyimpulkan bahwa tingkat polusi dan kelembaban mempengaruhi performa dielektrik isolator. Pada penelitian sebelumnya, Sirait[15], menjelaskan tentang bagaimana menganalisis nilai konduktivitas, resistivitas dan arus bocor pada *isolator* kaca dengan pengotor polutan semen buatan berdasarkan nilai *ambient* polutan semen di suatu daerah menyimpulkan adanya hubungan antara kondisi tebal polutan dan kondisi isolator basah atau kering mempengaruhi performa isolator. Penelitian serupa tentang pengaruh debu semen pada isolator juga dilakukan oleh Wardhani[16] menyimpulkan bahwa turunnya tegangan *breakdown* isolator karena tebalnya polutan dan dalam keadaan basah tanpa menyebutkan batasan-batasan secara spesifik.

Permasalahan polutan semen merupakan polutan yang berupa debu-debu yang mengandung semen dan terdapat di lingkungan industri semen. Polutan tersebut bersifat higroskopis dan konduktif karena mengandung logam berat stabil seperti merkuri, timbal, nikel, kromium dan kobalt. Hal ini berpotensi mempengaruhi performa: resistansi, konduktansi dan arus bocor hingga menyebabkan *breakdown* pada isolator. Tingkat polusi debu semen di desa Tegaldowo yang terletak sekitar $4,5 \text{ km}$ dari pabrik semen saja, menunjukkan angka $19,95 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dari standar maksimal $230 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Angka tersebut akan lebih besar bila diukur di lingkungan gardu induk karena letak gardu induk yang bersebelahan langsung dengan pabrik semen. Resistansi yang kecil akan menimbulkan konduktansi dan arus bocor yang besar. Hal ini menimbulkan efek *discharge* yang berlangsung terus menerus sehingga akan menyebabkan efek *treeing* atau efek timbulnya jalur rambat tegangan pada isolator menuju *ground*. Bila jalur rambat semakin mendekat ke arah *ground*, BIL akan semakin kecil hingga menyebabkan *breakdown* isolator. Meskipun sudah dilaksanakan pemeliharaan setiap 6 bulan sekali, namun *shut down measurement* dan analisa terhadap seberapa besar nilai resistansi saat terkena polutan debu semen dengan keadaan kering dan basah pada kondisi sebelum dan sesudah pemeliharaan masih belum pernah dilakukan.

Solusi dari permasalahan tersebut diperlukan uji kelayakan dengan cara pengukuran resistansi secara faktual di lokasi penelitian yang dijadikan dasar untuk perhitungan nilai konduktansi dan arus bocor resistif pada isolator keramik. Selanjutnya dilakukan perhitungan batas minimal resistansi, batas maksimal konduktansi dan batas maksimal arus bocor resistif sebagai acuan kondisi isolator keramik. Hasil dan kondisi pada isolator keramik akan dibandingkan dengan hasil resistansi dan kondisi pada isolator *lightning arrester* (LA) berbahan karet silikon untuk mengetahui performa isolator yang terbaik.

2. METODE PENELITIAN

GI 150 kV Semen Indonesia memiliki beberapa *bay* yang dijadikan obyek penelitian yaitu pada: *bay* Blora 1, *bay* Blora 2, *bay* Rembang 1 dan *bay* Rembang 2. Bagian dielektrik pada PMS merupakan isolator yang berfungsi sebagai tumpuan PMS dan penyekat antara bagian yang bertegangan dengan *ground*. Gambar 1 menunjukkan isolator keramik terpasang dengan spesifikasi teknik isolator tipe C pada Tabel 1.



Gambar 1. Isolator keramik tipe C terpasang pada GI 150 kV Semen Indonesia

Tabel 1. Spesifikasi isolator C4-750 2741 [17] GI 150 kV Semen Indonesia

Spesifikasi	Nilai
<i>Creepage distance</i>	5270 mm
<i>Cantilever failing load</i>	4 kN
<i>Torsional failing load</i>	3 kN.m
<i>Lightning impulse withstand voltage</i>	750 kV
<i>Power frequency wet withstand voltage</i>	325 kV
<i>Colour</i>	<i>Brown</i>
<i>Applicable standart</i>	IEC 60168 & IEC 60273

Polutan semen semakin lama akan semakin menumpuk dan apabila terkena air dengan intensitas rendah, terjadi pengerasan semen sehingga menempel kuat pada isolator. Semen yang mengeras bersifat higroskopis atau menyerap air. Kontaminasi polutan semen pada isolator keramik dan LA ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2. Foto isolator PMS dan isolator LA terkontaminasi polutan semen

2.1 Deskripsi Penelitian

Metode penelitian dengan pengukuran resistansi, perhitungan konduktansi dan perhitungan arus bocor. Ditentukan batas-batas yang dijadikan acuan apakah nilai masih memenuhi standar atau tidak berdasarkan pengembangan batas minimal resistansi [18], batas maksimal konduktansi dan batas maksimal arus bocor. Hasil ukur isolator keramik divalidasi dengan batas acuan sebagai evaluasi kondisi isolator keramik kemudian dibandingkan dengan kondisi isolator karet silikon.

2.2 Masa Pakai Peralatan

Masa pakai material utama gardu induk antara 20-30 tahun berdasarkan penilaian kondisi. Sebagai acuan, digunakan nilai tengah yaitu 25 tahun. GI 150 kV Semen Indonesia telah beroperasi pada tahun 2016, sehingga usia peralatan sudah mencapai 7 tahun pada tahun 2023. Faktor keamanan ditentukan maksimal 2,5 apabila dalam keadaan baru dan dengan batas bawah yaitu minimal 1. Faktor mempunyai rentang antara 1–2,5 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1).

$$faktor = 1 + \left(\frac{\text{siswa masa pakai}}{\text{maksimal pakai}} \right) \times 1,5 \quad (1)$$

2.3 Pengukuran Resistansi

Pengukuran resistansi dilakukan dengan metode *shut down measurement* yaitu pada saat *offline* atau tidak terhubung dengan sumber tegangan listrik. Pengukuran ini menggunakan alat ukur isolasi tegangan tinggi atau lebih familier disebut Megger (merujuk pada salah satu pabrikan). Alat ukur menggunakan merek pabrikan Kyoritsu dengan tegangan uji sebesar 5000V selama 1 menit. Terdapat pendekatan yang digunakan untuk menentukan resistansi minimal (R_{min}) isolator sebagai pembanding atau bahkan digunakan untuk memodifikasi acuan resistansi minimal dari isolator[18] sesuai persamaan (2).

$$R_{min} = \frac{(1000 \times V^2 \times faktor)}{Q} \quad (2)$$

dengan: R_{min} = resistansi minimal (Ω)
 V = tegangan sistem terhadap *ground*
 Q = tegangan ukur
 1000 = konstanta
 $faktor$ = 2,5 (bila baru)

2.4 Konduktansi

Konduktansi merupakan perlawanan sifat dari resistansi. Resistansi dinyatakan dalam Ohm (Ω) dan konduktansi dinyatakan dalam Mho (\mathcal{O}). Konduktansi atau Siemens (S) dihitung sesuai persamaan (3).

$$S = \frac{1}{R} \quad (3)$$

dengan: S dan R merupakan parameter konduktansi dan resistansi.

Untuk menentukan konduktansi maksimal (S_{maks}), perlu diperhatikan variabel yang akan digunakan sebagai data perhitungan. Konduktansi maksimal merujuk pada R_{min} sesuai persamaan (2). R_{min} digunakan sebagai batas minimal maka S_{maks} digunakan sebagai batas maksimal, sehingga didapatkan persamaan (4).

$$S_{maks} = \frac{Q}{(1000 \times V^2 \times faktor)} \text{ atau } \frac{1}{R_{min}} \quad (4)$$

2.5 Arus Bocor

Arus bocor resistif (I_{res}) merupakan fenomena di mana arus tetap mengalir pada isolator walaupun nilainya sangat kecil. Hal ini sesuai hukum Ohm berdasarkan persamaan (5). Untuk menentukan batas maksimal arus bocor (I_{maks}) digunakan persamaan (6).

$$I_{res} = \frac{V}{R} \quad (5)$$

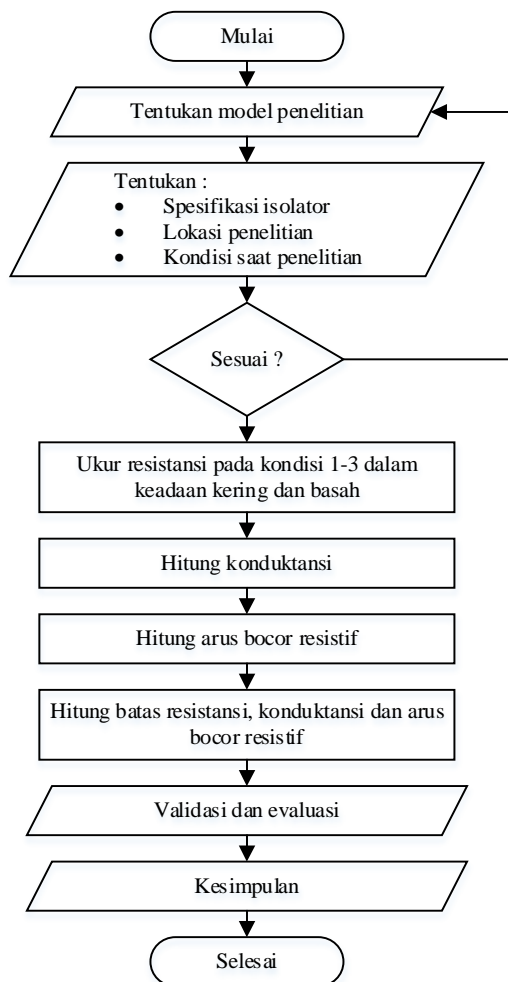
$$I_{maks} = \frac{Q^2}{(1000 \times V^2 \times faktor)} \quad (6)$$

2.6 Isolator Cleaning Paste

Isolator *cleaning paste* merupakan pasta pembersih yang mempunyai butiran *scrub* kecil di dalamnya dan mengandung minyak. Isolator *cleaning paste* akan digunakan pada kondisi pembersihan dengan pelapis. Isolator *cleaning paste* menimbulkan efek *water repellent* atau menolak air pada permukaan isolator.

2.7 Model Penelitian

Model penelitian ditetapkan untuk memperoleh alur penelitian yang jelas sehingga mendapatkan hasil sesuai tujuan utama penelitian. Penelitian dilakukan dari penentuan model penelitian, penentuan data obyek penelitian, pengukuran resistansi pada kondisi 1-3 dalam keadaan kering dan basah, perhitungan konduktansi, perhitungan arus bocor resistif pada isolator kemudian perhitungan batas acuan resistansi, konduktansi dan arus bocor resistif selanjutnya dilaksanakan validasi, evaluasi dan terakhir ditarik kesimpulan hingga mendapatkan hasil penelitian. Model penelitian yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Flowchart penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran resistansi dengan 3 kondisi: K_1 untuk kondisi sebelum pemeliharaan, K_2 untuk kondisi setelah pemeliharaan tanpa *isolator cleaning paste* dan K_3 untuk kondisi setelah pemeliharaan menggunakan *isolator cleaning paste*. Setiap kondisi dalam keadaan: K untuk kering dan B untuk basah. Pengukuran faktual dengan waktu 1 menit, cuaca cerah, suhu *ambient* 31°C dan *humidity* 52% pada *bay* Blora 1, *bay* Blora 2, *bay* Rembang 1 dan *bay* Rembang 2 dengan obyek isolator PMS dan isolator *lightning arrester* fasa R, S, dan T.

Variabel dasar perhitungan diambil dari tegangan injek sebesar 5630V (tegangan uji terbesar), tegangan normal sistem sebesar 87000V (*fasa-ground*). Nilai resistansi digunakan untuk perhitungan konduktansi dengan persamaan (3) dan arus bocor resistif dengan persamaan (5). Perhitungan faktor keamanan berdasarkan usia peralatan menggunakan persamaan (1). Standar dihitung sebagai acuan kelayakan resistansi menggunakan persamaan (2), konduktansi menggunakan persamaan (4) dan arus bocor resistif menggunakan persamaan (6).

Faktor dapat dihitung dengan persamaan (1).

$$faktor = 1 + \left(\frac{18}{25}\right) \times 1,5$$

$$faktor = 2,08$$

Standar minimal resistansi dapat dihitung dengan persamaan (2).

$$R_{min} = \frac{1000 \times 87000^2 \times 2,08}{5630}$$

$$R_{min} = 2,796 \text{ G}\Omega \text{ atau } 2,8 \text{ G}\Omega$$

Standar maksimal konduktansi dan arus bocor resistif dapat dihitung dengan persamaan (4) dan (6).

$$S_{maks} = \frac{1}{(2,8 \text{ G}\Omega)}$$

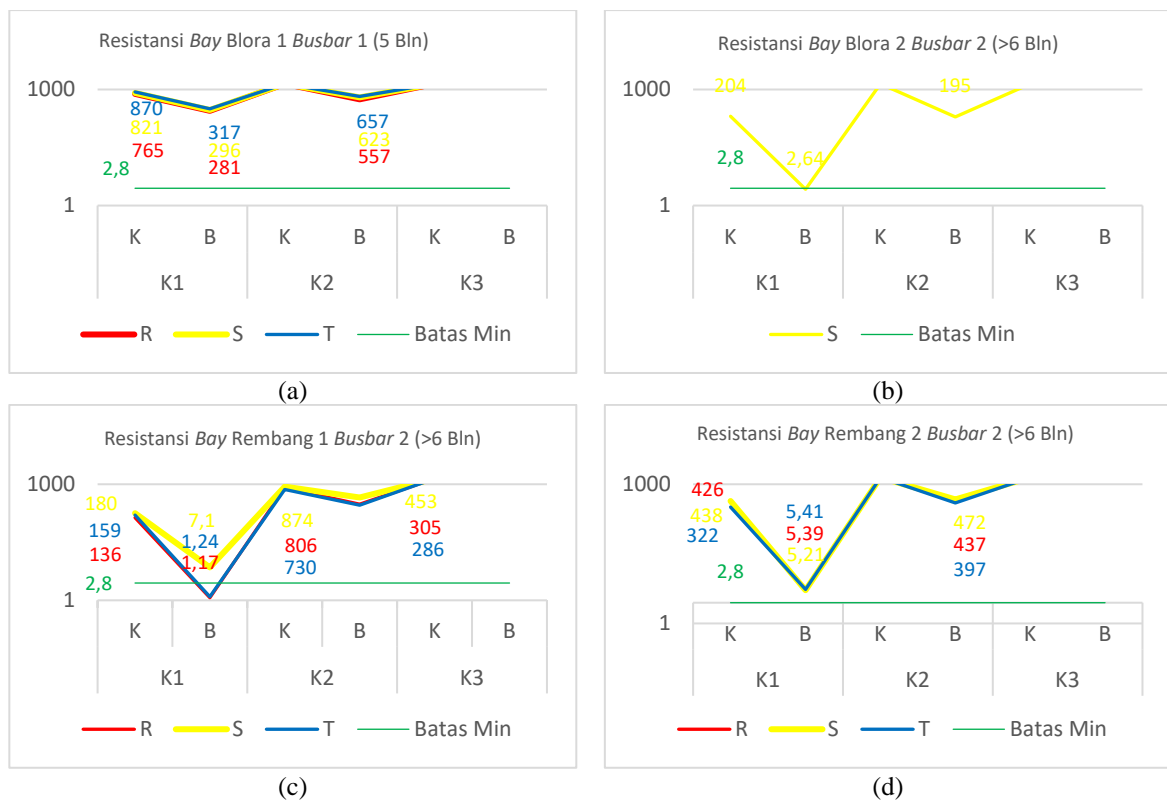
$$S_{maks} = 3,57 \times 10^{-10} \text{ S}$$

$$I_{maks} = \frac{5630^2}{(1000 \times 87000^2 \times 2,08)}$$

$$I_{maks} = 2,01 \mu\text{A}$$

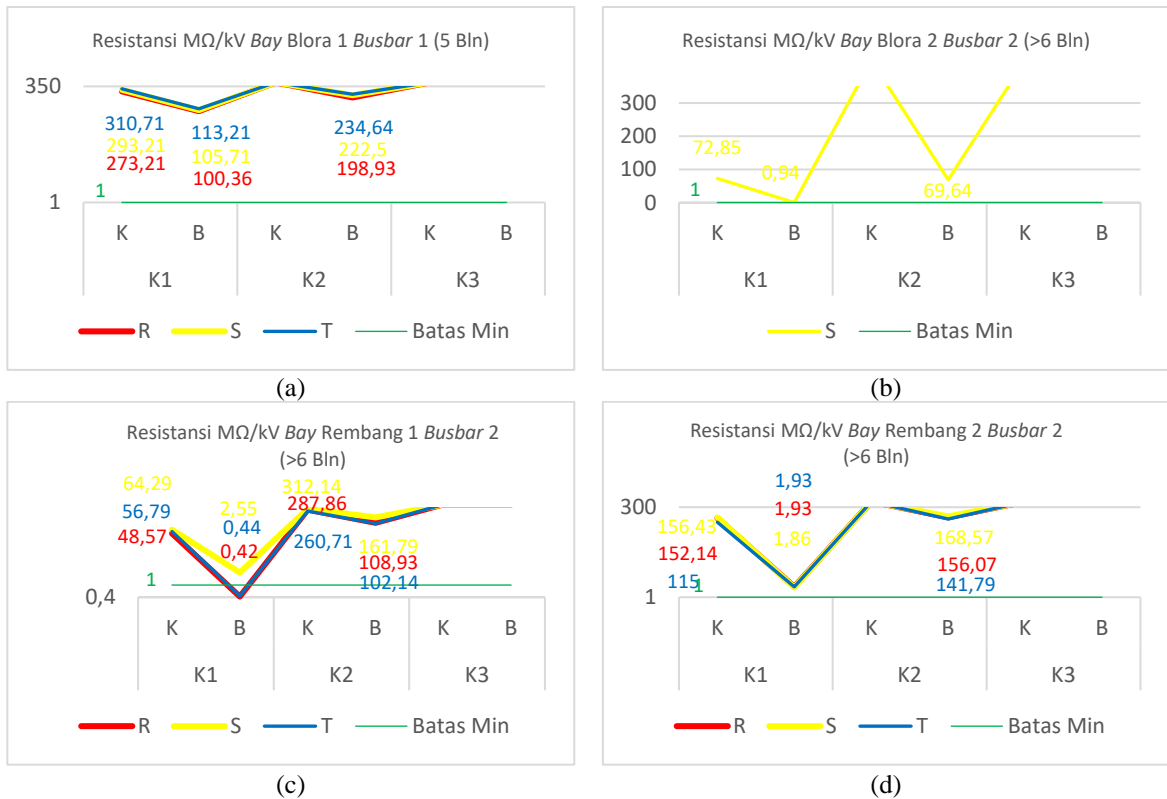
Hasil pengukuran dan perhitungan isolator keramik disajikan dalam bentuk grafik. Garis horizontal hijau menunjukkan batas minimal, *axis X* untuk kondisi, *axis Y* untuk nilai. Garis grafik warna merah menunjukkan fasa R, garis kuning menunjukkan fasa S dan garis biru menunjukkan fasa T.

Grafik pada Gambar 4 menunjukkan resistansi dari isolator keramik yang diukur secara faktual di lokasi GI 150 kV Semen Indonesia. Gambar 4(b) dan Gambar 4(c) menunjukkan beberapa obyek mempunyai resistansi di bawah standar sebesar 2,8 G Ω pada K_1 (kondisi sebelum pemeliharaan) dalam keadaan basah.

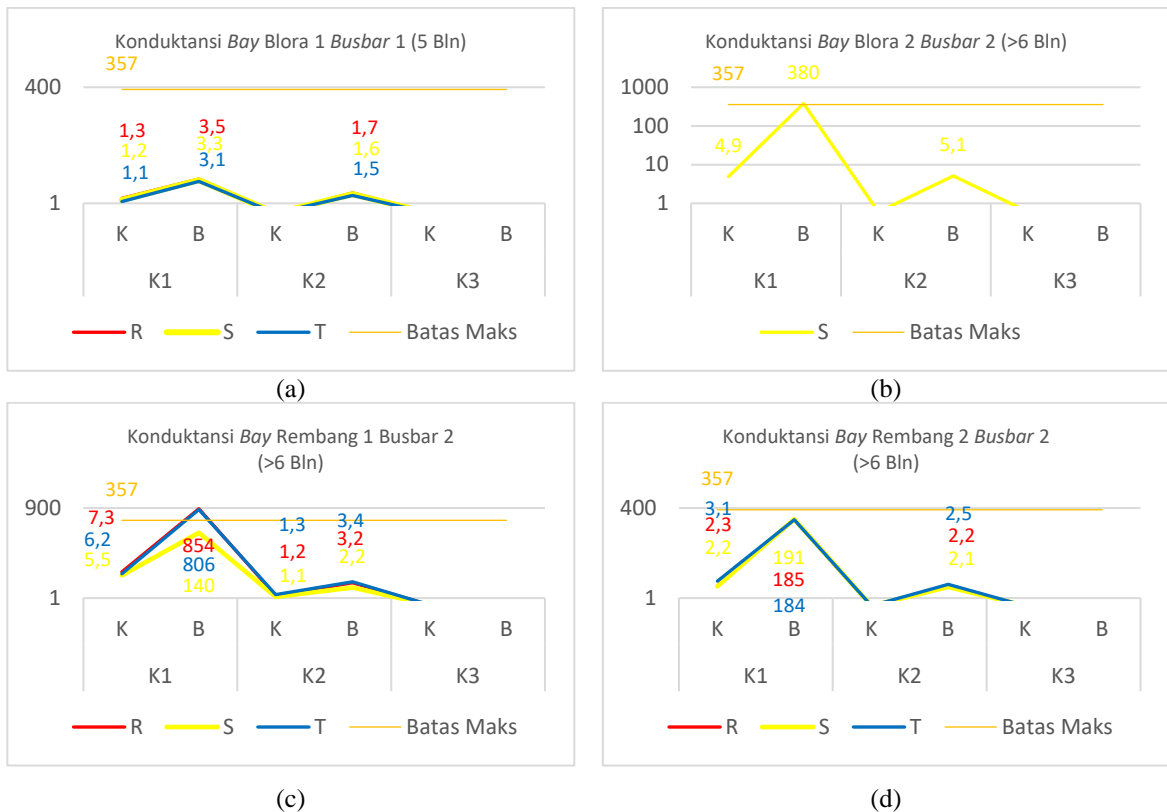


Gambar 4. Grafik resistansi isolator keramik pada *bay*: (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2

Gambar 5 menunjukkan bahwa garis horizontal hijau menjadi batas minimal resistansi yang dikonversi ke satuan 1 MΩ/kV. Konversi dengan membagi semua hasil dengan 2,8 GΩ merujuk pada resistansi minimal. Gambar 5(b) dan 5(c) menunjukkan beberapa obyek isolator keramik dengan nilai berada di bawah standar 1 MΩ/kV pada K₁ (kondisi sebelum pemeliharaan) dalam keadaan basah.



Gambar 5. Grafik resistansi per kV bay: (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2



Gambar 6. Grafik konduktansi isolator keramik bay: (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2

Gambar 6 menunjukkan hasil perhitungan konduktansi pada obyek isolator keramik. Garis jingga digunakan sebagai batas maksimal konduktansi sebesar 357 p Ω . Gambar 6(b) dan Gambar 6(c) menunjukkan beberapa obyek mempunyai konduktansi melebihi batas maksimal di atas 357 p Ω pada K₁ (kondisi sebelum pemeliharaan) dalam keadaan basah.

Gambar 7 menunjukkan arus bocor isolator keramik dengan satuan nano Ampere (nA) diperoleh dari perhitungan menggunakan persamaan (5) berdasarkan pada nilai hasil ukur resistansi dan tegangan injek alat ukur sebesar 5630 V saat dilakukan pengukuran. Hasil perhitungan disajikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah analisa. Garis jingga menunjukkan batasan nilai maksimal arus bocor sebesar 2010 nA. Gambar 7(b) dan Gambar 7(c) menunjukkan beberapa obyek mempunyai arus bocor melebihi batas maksimal pada K₁ (kondisi sebelum pemeliharaan) dalam keadaan basah.



Gambar 7. Grafik arus bocor isolator keramik bay: (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2

Gambar 4(b) dan Gambar 4(c) menunjukkan resistansi beberapa obyek isolator keramik berada di bawah 2,8 G Ω yang dituangkan pada Tabel 2. Gambar 5(b) dan Gambar 5(c) menunjukkan resistansi beberapa obyek isolator keramik yang mempunyai nilai di bawah 1 M Ω /kV dituangkan pada Tabel 3. Gambar 6(b) dan Gambar 6(c) menunjukkan beberapa obyek isolator keramik yang mempunyai nilai konduktansi melebihi 357 p Ω tertuang pada Tabel 4. Gambar 7(b) dan Gambar 7(c) menunjukkan obyek isolator keramik yang mempunyai arus bocor melebihi 2010 nA tertuang pada Tabel 5.

Tabel 2 Nilai resistansi obyek di bawah standar

Bay	Busbar	Fasa	Kondisi	Keadaan	Nilai (G Ω)	Batas (G Ω)
Blora 2	2	R	K ₁	B	2,64	$\geq 2,8$
Rembang 1	2	R	K ₁	B	1,17	$\geq 2,8$
Rembang 1	2	T	K ₁	B	1,24	$\geq 2,8$

Tabel 3. Nilai resistansi obyek di bawah 1 M Ω /kV

Bay	Busbar	Fasa	Kondisi	Keadaan	Nilai (M Ω /kV)	Batas (M Ω /kV)
Blora 2	2	R	K ₁	B	0,94	≥ 1
Rembang 1	2	R	K ₁	B	0,42	≥ 1
Rembang 1	2	T	K ₁	B	0,44	≥ 1

Tabel 4. Nilai konduktansi obyek melebihi standar

Bay	Busbar	Fasa	Kondisi	Keadaan	Nilai (p Ω)	Batas (p Ω)
Blora 2	2	R	K ₁	B	380	≤ 357
Rembang 1	2	R	K ₁	B	854	≤ 357
Rembang 1	2	T	K ₁	B	806	≤ 357

Tabel 5. Nilai arus bocor obyek melebihi standar.

Bay	Busbar	Fasa	Kondisi	Keadaan	Nilai (nA)	Batas (nA)
Blora 2	2	R	K ₁	B	2128	≤2010
Rembang 1	2	R	K ₁	B	4803	≤2010
Rembang 1	2	T	K ₁	B	4532	≤2010

Melihat hasil analisa dari variabel nilai resistansi, konduktansi dan arus bocor isolator keramik yang menunjukkan kondisi tidak memenuhi standar berada pada kondisi K₁ (kondisi sebelum pemeliharaan) dalam keadaan basah. Nilai-nilai selanjutnya menunjukkan kondisi di atas standar setelah dibersihkan dan dilapisi dengan isolator *cleaning paste*. Data menunjukkan bahwa polutan debu semen sangat mempengaruhi nilai dari resistansi, konduktansi dan arus bocor pada isolator keramik. Pembersihan polutan dapat meningkatkan nilai resistansi hingga mencapai nilai OL atau di atas 1 TΩ dari nilai terendah 1,17 GΩ, konduktansi di bawah 1 pΩ dari nilai tertinggi 854 pΩ dan nilai arus bocor resistif di bawah 5,6 nA dari nilai tertinggi 4803 nA. Data menunjukkan bahwa interval waktu 5 bulan mempunyai performa lebih baik dari yang di atas 6 bulan dikarenakan penumpukan debu semen yang semakin tebal saat di atas 6 bulan, serta kondisi iklim di Rembang sendiri di mana di atas 6 bulan sudah terjadi hujan.

Selain faktor polutan dan alam, faktor usaha pembersihan saat pemeliharaan isolator juga menentukan resistansi selanjutnya. Jika tidak dibersihkan sampai pada keadaan kerak terkelupas bahkan tidak dibersihkan dengan isolator *cleaning paste*, akan terjadi penumpukan debu semakin tebal. Selain karena menurunnya fungsi *self cleaning* pada isolator keramik, permukaan isolator sudah tidak licin yang membuat polutan semakin terperangkap. Hal tersebut dibuktikan isolator keramik bay Rembang 1 busbar 2 dengan hasil ukur yang menunjukkan performa kurang optimal pada kondisi sebelum pemeliharaan keadaan basah karena pembersihan isolator periode sebelumnya tidak maksimal dan mengakibatkan kerak pada isolator semakin tebal ditambah dengan interval pemeliharaan di atas 6 bulan. Kondisi performa isolator keramik bay Rembang 1 busbar 2 berbanding terbalik dengan kondisi dan hasil uji pada isolator bay Blora 1 busbar 1. Isolator bay Blora 1 busbar 1 dibersihkan secara maksimal pada periode sebelumnya dengan interval pemeliharaan hanya 5 bulan sehingga performa isolator keramik pada kondisi sebelum pemeliharaan keadaan basah masih menunjukkan kondisi layak pakai.

Isolator berbahan karet silikon pada *lightning arrester* dijadikan pembandingan performa isolator keramik dengan isolator berbahan karet silikon. Pengukuran resistansi isolator karet silikon dilakukan pada 4 bay dengan waktu yang sama, cara pengukuran yang sama, besar tegangan uji yang sama dan perlakuan kondisi yang sama. Hasil pengukuran resistansi dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Resistansi isolator karet silikon *lightning arrester*

Bay	Peralatan	Fasa	Kondisi	Keadaan	Nilai (GΩ)	Batas (GΩ)
Blora 1	LA	R-S-T	K ₁ -K ₃	K-B	<i>Over Load</i>	≥2,8
Blora 2	LA	R-S-T	K ₁ -K ₃	K-B	<i>Over Load</i>	≥2,8
Rembang 1	LA	R-S-T	K ₁ -K ₃	K-B	<i>Over Load</i>	≥2,8
Rembang 2	LA	R-S-T	K ₁ -K ₃	K-B	<i>Over Load</i>	≥2,8

Tabel 6 memperlihatkan bahwa isolator berbahan karet silikon dengan kondisi dan perlakuan yang sama, mempunyai nilai *over load* atau di atas 1 TΩ dan dikatakan mempunyai performa yang lebih unggul dari isolator berbahan keramik dalam menghadapi polutan debu semen. Nilai resistansi yang tinggi dipengaruhi karena isolator karet silikon bersifat *water repellent* walaupun tanpa pelapis. Pengujian membuktikan saat pada kondisi K₁ (kondisi sebelum pemeliharaan) dalam keadaan basah, air tidak meresap ataupun menggumpalkan debu semen namun air langsung jatuh seperti efek daun talas. Isolator saat akan dikondisikan pada kondisi K₂ (kondisi setelah pemeliharaan), sangat mudah dibersihkan dan tidak ada sama sekali terjadi pengerasan semen atau menempelnya semen pada isolator walaupun dengan interval pemeliharaan yang sama. Sifat isolator karet silikon yang lebih unggul dalam menghadapi polutan debu semen dapat menjadi pertimbangan solusi jangka panjang untuk meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik di GI 150 kV Semen Indonesia. Gambar 8 menunjukkan kondisi isolator keramik dan karet silikon sebelum dilakukan pemeliharaan. Gambar 9 memperlihatkan kondisi isolator keramik dan karet silikon setelah dilakukan pemeliharaan.



Gambar 8. Foto isolator keramik dan karet silikon pada kondisi sebelum pemeliharaan dalam keadaan basah



Gambar 9. Foto isolator keramik dan karet silikon pada kondisi setelah pemeliharaan

4. KESIMPULAN

Polutan debu semen yang mengandung unsur logam menurunkan nilai resistansi isolator, meningkatkan konduktansi dan meningkatkan arus bocor resistif pada isolator. Resistansi isolator pada *bay* Blora 2 busbar 2 fasa R, *bay* Rembang 1 busbar 2 fasa R dan *bay* Rembang 1 busbar 2 fasa T dengan kondisi sebelum pemeliharaan keadaan basah menunjukkan performa yang tidak memenuhi standar. Interval pemeliharaan lebih dari 6 bulan mempunyai tingkat risiko tertinggi *breakdown* pada isolator jika dibandingkan dengan interval pemeliharaan kurang dari 6 bulan. Isolator berbahan karet silikon mempunyai keunggulan dari sifat bahan yang *water repellent* dan performa elektrik yang lebih baik dibandingkan dengan isolator berbahan keramik. Keunggulan isolator karet silikon dalam menghadapi polutan debu semen dapat menjadi solusi keandalan isolator jangka panjang untuk GI 150 kV Semen Indonesia atau gardu induk dengan permasalahan yang sama. Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan pengujian gangguan surja sebagai pengganti variabel tegangan fasa-ground untuk menentukan ketahanan isolator. Metode untuk mengetahui nilai arus bocor dapat dilakukan secara *online* atau bertegangan menggunakan *leakage current monitoring* (LCM). Dengan menggunakan LCM, arus bocor terukur dapat dikonsentrasikan pada arus bocor resistif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan kepada karyawan PT PLN (Persero) UPT Semarang yang telah membantu dalam pengumpulan data untuk penelitian.

REFERENSI

- [1] K. No. : 0520 K/DIR/2014 PLN, “Buku Pedoman Pemeliharaan Pemisah,” Jakarta: PT PLN (Persero), 2014.
- [2] A. Anwar, L. M. K. Amali, dan Y. Mohamad, “Pengaruh Polutan Taklarut Terhadap Ketahanan Isolator (Studi Kasus PLTU Molotabu),” *Jambura Journal of Electrical And Electronics Engineering*, vol. 1, no. 2, hal. 55–61, Okt. 2019. <https://doi.org/10.37905/jjee.v1i2.2883>
- [3] B. L. Tobing dan Mustafriend Lubis, “Hubungan Intensitas Polusi Isolator Jaringan Distribusi di Sumatera Utara dengan Jarak Lokasi Isolator dari Pantai,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 7, no. 2, Jan. 2008. <https://doi.org/10.9744/jte.7.2.63-67>
- [4] N. F. Baso, “Analisis Pengaruh Polutan NaCl pada Isolator Keramik Tipe Post Pin,” *Jurnal Teknologi Elekterika*, vol. 5, no. 1, hal. 7, 2021. <https://doi.org/10.31963/elekterika.v5i1.2852>

- [5] A. C. Darmadi, K. Kholistianingsih, dan P. Yulianto, "Analisis Tahanan Isolasi pada Isolator Porselin dan Polimer Terhadap Polutan Garam di Gistet 500 kV Adipala Cilacap," *Teodolita Media Komunikasi Ilmiah di Bidang Teknik*, vol. 23, no. 2, hal. 42–55, Jan. 2023. <https://doi.org/10.53810/jt.v23i2.455>
- [6] D. Fahmi, I. M. Yulistya, D. A. Asfani, dan Y. Afif, "Analisis Distribusi Medan Listrik pada Isolator Gantung Jenis Polimer Akibat Pengaruh Kontaminan," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 4, no. 2, hal. 182, 2015. <https://doi.org/10.25077/jnte.v4n2.158.2015>
- [7] Armansyah, "Analisa Pengaruh Endapan Polutan Garam pada Isolator Terhadap Arus Bocor," *Journal of Electrical Technology*, vol. 6, no. 2, hal. 76-84, 2021.
- [8] E. Darmawan dan A. Syakur, "Analisis Pengaruh Jenis Kontaminan Terhadap Arus Bocor dan THD (Total Harmonic Distortion) pada Isolator Polimer Resin Epoksi 20 kV dengan Variasi Tegangan Uji," *Transient*, vol. 4, no. 3, hal. 532–541, 2015. <https://doi.org/10.14710/transient.v4i3.532-541>
- [9] Ruwah Joto, D. Dhesah Kharisma, Tresna Umar Syamsuri, dan Aly Imron, "Pengaruh Efek Kontaminasi Isolator Keramik Terhadap Rugi Daya Saluran Udara Tegangan Tinggi," *Elposys Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 10, no. 3, hal. 167–171, 2023. <https://doi.org/10.33795/elposys.v10i3.4222>
- [10] S. Syam. dan S. Kurniati, "Pengaruh Kabut Garam Terhadap Kinerja Isolator 20 kV Berbahan Polimer Resin Epoxy," *Jurnal Media Elektro*, vol. 1, no. 2, hal. 41–44, 2012, <https://doi.org/10.35508/jme.v1i2.6261>
- [11] S. Syam. dan S. Kurniati, "Pengujian Arus Bocor Isolator 20 kV Berbahan Polimer Epoxy Resin dengan Mempertimbangkan Tekanan dan Kelembaban T-27 T-28," *Seminar Nasional Sains dan Teknik*, vol. 2012, hal. 27–30, 2012. <https://doi.org/10.31219/osf.io/kjwq9>
- [12] Jumari, Joslen Sinaga, dan Sudirman Zega, "Studi Pengaruh Kontaminasi Polusi Udara pada Isolator Tegangan Menengah 20 kV pada PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Medan," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9, no. 1, hal. 31–43, 2020.
- [13] M. Warmi, Yusreni Fauzan, F. R. Yanti, M. A. Azzahra, dan A. Ahmad, "Investigasi Flashover pada Saluran Transmisi 150 kV Payakumbuh – Koto Panjang," *Sinarint*, hal. 177–184, 2022.
- [14] A. A. Salem et al., "Pollution flashover under different contamination profiles on high voltage insulator: Numerical and experiment investigation," *IEEE Access*, vol. 9, hal. 37800–37812, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3063201>
- [15] E. Adriani Sirait, "Pengaruh Polutan Semen terhadap Nilai Konduktivitas, Nilai Resitivitas dan Arus Bocor pada Isolator Kaca dengan Pengotor Buatan," *Skripsi*, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya Palembang, Indonesia, 2020.
- [16] A. Kusuma Wardhani, "Analisis Perbandingan Pengaruh Debu Semen Antara Isolator Pos Pin dan Isolator Gantung Terhadap Flashover menggunakan Metode Short Time Test," *Skripsi*, Teknik Elektro, Universitas Jember, 2011.
- [17] Eric, "Specification Insulator C4-750," *Insulator*, Hunan: Yang Dong, 2023.
- [18] B. Pengembangan Latihan Kerja, "Pengukuran Listrik/Elektronika," Materi Diklat, Serang: Kementerian Tenaga Kerja, 2014.