

**PENGARUH POLUTAN SEMEN TERHADAP NILAI
RESISTANSI DAN ARUS BOCOR ISOLATOR TIPE C
GARDU INDUK 150 KV SEMEN INDONESIA
REMBANG**

LAPORAN TUGAS AKHIR



**DISUSUN OLEH :
RIZKY HUDAYA
NIM 30602200058**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2024

**PENGARUH POLUTAN SEMEN TERHADAP NILAI
RESISTANSI DAN ARUS BOCOR ISOLATOR TIPE C
GARDU INDUK 150 KV SEMEN INDONESIA
REMBANG**

**LAPORAN TUGAS AKHIR
DISUSUN SEBAGAI SALAH SATU SYARAT GELAR SARJANA S1
PRODI TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG**



**DISUSUN OLEH :
RIZKY HUDAYA
NIM 30602200058**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2024

FINAL PROJECT
THE EFFECT OF CEMENT POLLUTANTS ON
RESISTANCE AND LEAKAGE CURRENT VALUE OF
TYPE C INSULATOR SEMEN INDONESIA REMBANG
150 KV MAIN SUBSTATION

Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (S1)
at Departement of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Technology
Universitas Islam Sultan Agung



Arranged By :

RIZKY HUDAYA

NIM 30602200058

MAJORING OF INDUSTRIAL ENGINEERING
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
SULTAN AGUNG ISLAMIC UNIVERSITY
SEMARANG

2024

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Rizky Hudaya
NIM : 30602200058
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“PENGARUH POLUTAN SEMEN TERHADAP NILAI RESISTANSI DAN ARUS BOCOR ISOLATOR TIPE C Gardu Induk 150 KV SEMEN INDONESIA REMBANG”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, Agustus 2024

Yang Menyatakan



Rizky Hudaya

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**PENGARUH POLUTAN SEMEN TERHADAP NILAI RESISTANSI DAN ARUS BOCOR ISOLATOR TIPE C GARDU INDUK 150 KV SEMEN INDONESIA REMBANG**” ini disusun oleh:


Nama : RIZKY HUDAYA
NIM : 30602200058
Program Studi : Teknik Elektro

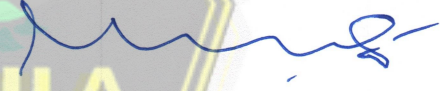
Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Jum'at
Tanggal : 30 Agustus 2024

Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. H. Gunawan, ST., MT.


Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, MT.

NIDN : 0607117101

NIDN : 0618066301

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro




Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.

NIDN : 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “PENGARUH POLUTAN SEMEN TERHADAP NILAI RESISTANSI DAN ARUS BOCOR ISOLATOR TIPE C GARDU INDUK 150 KV SEMEN INDONESIA REMBANG” ini telah dipertahankan di depan Dosen Penguji Tugas Akhir pada:

Hari : Jum'at

Tanggal : 30 Agustus 2024

Tim Penguji

Tanda Tangan

Ir. Arief Marwanto, ST., M.Eng., Ph. D., IPM.

NIDN : 0628097501

Ketua

Dr. H. Gunawan, ST., MT.

NIDN : 0607117101

Penguji I

Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, MT.

NIDN : 0618066301

Penguji II

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Rizky Hudaya
NIM : 30602200058
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“PENGARUH POLUTAN SEMEN TERHADAP NILAI RESISTANSI DAN ARUS BOCOR ISOLATOR TIPE C GARDU INDUK 150 KV SEMEN INDONESIA REMBANG”** dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/ Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung

Semarang, Agustus 2024

Yang Menyatakan



Rizky Hudaya

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas akhir ini saya persembahkan kepada:

Orang tua yang telah membesarkanku dengan penuh kasih sayang
Istri dan anak-anak yang memberikan dukungan dan kebahagiaan
Dosen–dosen Program Studi Teknik Elektro yang tak pernah lelah membagikan
ilmunya kepada anak didiknya
Teman–teman Program Studi Teknik Elektro



HALAMAN MOTTO

“Manusia hidup memang sudah ditentukan takdirnya, namun takdir tersebut merupakan sebuah patokan dari formulasi matematis yang sudah ditentukan Allah dengan inputan dari apa yang kita kerjakan sehari-hari”



KATA PENGANTAR

BismillahWalhamdulillah

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji Syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan Nikmat Iman dan Islam sehingga masih berkesempatan untuk menuntut ilmu dalam keadaan sehat wal'afiat di kampus tercinta ini. Shalawat dan Salam tercurahkan kepada baginda Rasulullah, semoga kelak kita mendapatkan syafaatnya. Aamiin Yaa Robbal alaamiin.

Penyusunan Tugas Akhir ini adalah merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada Fakultas Teknologi Industri di Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam penulisan tugas akhir ini, tentunya banyak pihak yang telah memberikan bantuan baik moril maupun materiil. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan *jazaakumullahkhoironkatsiron* dan terima kasih yang tiada hingganya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Gunarto, S.H., M.H. selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Dr. Ir. Novi Marlyana, S.T., M.T., IPU., ASEAN.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Bapak Dr. H. Gunawan, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan dorongan dalam penyusunan tugas akhir ini.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T. selaku dosen pembimbing II atas bantuan dan bimbingan dalam penulisan tugas akhir ini.
6. Seluruh dosen dan karyawan Program Studi Teknik Elektro, Universitas Sultan Agung Semarang atas ilmu, bimbingan dan bantuan hingga penulis selesai menyusun tugas akhir ini.

7. Kedua orang tua yang saya cintai, yang senantiasa memberikan doa, semangat, dukungan, perhatian, dan kasih sayang yang tiada hentinya kepada penulis dalam penyusunan tugas akhir ini.
8. Istri dan anak-anak saya yang senantiasa memberikan dukungan dan kebahagiaan.
9. Teman – teman Program Studi Teknik Elektro yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa.
10. Semua pihak yang telah terlibat, membantu, dan mendoakan dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam tugas akhir ini masih banyak kekurangan, baik dari segi materi maupun penyajiannya, sehingga kritik dan saran dari semua pihak sangat diharapkan. Akhirnya penulis sangat berharap semoga laporan ini dapat memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi para pembaca dan khususnya bagi penulis juga. *Wallahua'lam*

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Semarang, Agustus 2024

Rizky Hudaya

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
SURAT PERNYATAAN.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH.....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
HALAMAN MOTTO	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
ABSTRAK.....	xv
<i>ABSTRACT</i>	xvi
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Pembatasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Material	7
2.3 Isolator	9
2.4 Isolator Keramik Tipe C Merk CLD.....	10
2.5 <i>Creepage</i>	13

2.6	Polutan Debu Semen.....	14
2.7	<i>Ambient</i> Debu Semen Indonesia Rembang.....	15
2.8	Masa Pakai Peralatan	15
2.9	Pengukuran Resistansi	16
2.10	Konduktansi	17
2.11	Karakteristik Arus Bocor	17
2.12	Isolator <i>Cleaning Paste</i>	17
BAB III		18
METODE PENELITIAN.....		18
3.1	Model Penelitian	18
3.2	Penentuan Kriteria Dan Obyek Penelitian	19
3.3	Waktu Dan Tempat Pengujian	19
3.4	Bahan Uji	19
3.5	Peralatan Uji.....	19
3.6	Pengukuran Polarisasi Index.....	19
3.7	Pembersihan Isolator.....	21
3.8	Validasi Dan Evaluasi.....	22
BAB IV		24
HASIL DAN PEMBAHASAN.....		24
4.1	Faktor Keamanan	24
4.2	Perhitungan Tahanan Isolasi Minimal	24
4.3	Perhitungan Konduktansi Maksimal.....	24
4.4	Perhitungan Arus Bocor Maksimal.....	25
4.5	Pengukuran Tahanan Isolasi	25
4.6	Tahanan Isolasi per kV	26
4.7	Perhitungan Konduktansi.....	27
4.8	Perhitungan Arus Bocor Resistif	28
4.9	Tahanan Isolasi Isolator Karet silikon	30
4.10	Grafik Analisa.....	30
4.11	Kondisi Isolator.....	37
4.12	Analisa Data.....	42

4.13 <i>Error Analysis</i>	43
BAB V.....	45
KESIMPULAN DAN SARAN.....	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran	45
DAFTAR PUSTAKA	47
LAMPIRAN.....	50



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Energy gap</i> untuk semikonduktor dan isolator[19].....	8
Tabel 2.2 Resistivitas beberapa bahan[19].....	9
Tabel 2.3 Permittivitas beberapa bahan	10
Tabel 2.4 Polaritas beberapa bahan[19]	10
Tabel 2.5 Tahanan isolasi minimal	16
Tabel 4.1 Pengukuran tahanan isolasi semua kondisi.....	25
Tabel 4.2 Tahanan isolasi per kV	27
Tabel 4.3 Konduktansi semua kondisi	28
Tabel 4.4 Arus bocor resistif.....	29
Tabel 4.5 Hasil ukur isolator jenis karet silikon	30
Tabel 4.6 Nilai resistansi obyek di bawah standar	35
Tabel 4.7 Nilai resistansi obyek di bawah 1 M Ω /kV.....	35
Tabel 4.8 Nilai konduktansi obyek melebihi standar.....	35
Tabel 4.9 Nilai arus bocor obyek melebihi standar.....	36
Tabel 4.10 Resistansi isolator karet silikon <i>lightning arrester</i>	36



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Isolator tipe C	11
Gambar 2.2 Foto aplikasi isolator tipe C pada GI 150 kV Semen Indonesia	11
Gambar 2.3 Spesifikasi isolator tipe C pabrikan CLD[20]	12
Gambar 2.4 <i>Creepage</i> isolator	13
Gambar 2.5 Foto isolator tekontaminasi polutan semen	14
Gambar 2.6 Jarak dari pabrik semen ke desa terdekat	15
Gambar 3.1 Single line diagram obyek penelitian	18
Gambar 3.2 Alat uji tahanan isolasi tegangan tinggi	20
Gambar 3.3 Isolator kondisi basah sebelum pemeliharaan	21
Gambar 3.4 Isolator kondisi setelah pemeliharaan	21
Gambar 3.5 Isolator masih berkerak setelah dibersihkan	22
Gambar 3.6 <i>Flowchart</i> penelitian	23
Gambar 4.1 Grafik resistansi isolator keramik pada <i>bay</i> : (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2	31
Gambar 4.2 Grafik resistansi per kV <i>bay</i> : (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2	32
Gambar 4.3 Grafik konduktansi isolator keramik <i>bay</i> : (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2	33
Gambar 4.4 Grafik arus bocor isolator keramik <i>bay</i> : (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2	34
Gambar 4.5 Foto isolator keramik dan karet silikon pada kondisi sebelum pemeliharaan dalam keadaan basah	37
Gambar 4.6 Foto isolator keramik dan karet silikon pada kondisi setelah pemeliharaan	37
Gambar 4.7 Isolator <i>bay</i> Rembang 1 bus 2 sebelum pemeliharaan	38
Gambar 4.8 Isolator <i>bay</i> Rembang 1 busbar 2 sebelum pemeliharaan dalam kondisi basah	38
Gambar 4.9 Isolator <i>bay</i> Rembang 1 busbar 2 Isolator setelah pemeliharaan	39
Gambar 4.10 Isolator <i>bay</i> Blora 1 busbar 1 sebelum pemeliharaan	39
Gambar 4.11 Isolator <i>bay</i> Blora 1 busbar 1 sebelum pemeliharaan kondisi basah	40
Gambar 4.12 Isolator <i>bay</i> Blora 1 busbar 1 setelah pemeliharaan	40
Gambar 4.13 Isolator LA sebelum pemeliharaan	41
Gambar 4.14 Isolator LA setelah pemeliharaan	41

ABSTRAK

Pabrik semen PT Semen Indonesia (persero) mendapat pasokan listrik dari Gardu Induk 150 kV Semen Indonesia yang berada satu kawasan dengan lingkungan pabrik semen di kabupaten Rembang. Material gardu induk yang beroperasi umumnya telah melalui proses sertifikasi sehingga layak untuk operasi, salah satunya pada isolator. Penuaan menjadi salah satu faktor penurunan performa dari isolator selain faktor eksternal dari lingkungan. Pabrik semen memproduksi residu berupa polutan debu semen yang mengandung logam berat dan stabil seperti nikel, timbal, kobalt, merkuri dan kromium. Polutan debu semen yang menempel pada isolator secara fisik bersifat higroskopis dan secara elektrik bersifat konduktif. Penumpukan debu semen pada permukaan isolator dapat menurunkan performa isolator pada: resistansi, konduktansi dan arus bocor isolator yang lama kelamaan berpotensi terjadi *breakdown*. Penelitian ini mengkaji tentang ketahanan isolator terhadap pengaruh paparan debu semen secara spesifik pada sifat elektrik dan fisik. Metode pengukuran dilakukan secara *shut down measurement* pada obyek isolator keramik dan karet silikon pada 4 bay yang berbeda di GI 150 kV Semen Indonesia. Hasil pengukuran selanjutnya divalidasi sesuai standart VDE (*catalogue 228/4*). Berdasarkan hasil dari penelitian, ditemukan 3 titik isolator keramik yang memiliki performa tidak memenuhi standart saat kondisi basah sebelum pemeliharaan pada bay Blora 2 busbar 1 fasa S dengan nilai 0,94 M Ω /kV, 380 p \bar{U} , 2,1 μ A kemudian pada bay Rembang 1 busbar 2 fasa R & T dengan nilai fasa R 0,42 M Ω /kV, 854 p \bar{U} , 4,8 μ A dan fasa T dengan nilai 0,44 M Ω /kV, 806 p \bar{U} , 4,5 μ A. Hasil yang berbeda ditemukan pada isolator berbahan karet silikon di 4 bay yang sama dengan nilai >357 M Ω /kV. Kesimpulan dari penelitian menyatakan paparan polutan debu semen secara signifikan menurunkan performa isolator keramik yang menyebabkan nilai performa elektrik di bawah standart R<1 M Ω /kV, S>357 p \bar{U} dan I_{res}>2,01 μ A menjadikan kondisi isolator beresiko terjadi kegagalan fungsi.

Kata kunci: *Isolator, polutan semen, resistansi*

ABSTRACT

Cement factory PT Semen Indonesia (Persero) gets its electricity supply from Semen Indonesia 150 kV main substation which is located in the same area as the cement factory in Rembang district. Substation materials in operation have generally gone through a certification process so that they are suitable for operation, which one is insulators. Aging is a factor in reducing the performance of insulators apart from external factors from environment. Cement factories produce residue in the form of cement dust pollutants containing heavy and stable metals such as nickel, lead, cobalt, mercury and chromium. Cement dust pollutants that stick to the insulator are physically hygroscopic and electrically conductive. Stacking of cement dust on the surface of the insulator can reduce performance of insulator in terms of: resistance, conductance and leakage current of insulator which over time has the potential for breakdown. This research examines the resistance of insulators to the effects of exposure to cement dust specifically on their electrical and physical properties. The measurement method was carried out using a shut down measurement on ceramic insulator and silicone rubber objects in 4 different bays at the 150 kV Semen Indonesia main substation. Measurement results are then validated according to VDE standards (catalogue 228/4). Based on the results of research, it was found that 3 points of ceramic insulators whose performance did not meet standards in wet conditions before maintenance in bay Blora 2 busbar 1 phase S with values of $0.94 \text{ M}\Omega/\text{kV}$, $380 \text{ p}\Omega$, $2.1 \text{ }\mu\text{A}$ then in the bay Rembang 1 busbar 2 phase R & T with an R phase value of $0.42 \text{ M}\Omega/\text{kV}$, $854 \text{ p}\Omega$, $4.8 \text{ }\mu\text{A}$ and T phase with a value of $0.44 \text{ M}\Omega/\text{kV}$, $806 \text{ p}\Omega$, $4.5 \text{ }\mu\text{A}$. Different results were found on silicone rubber insulators in the same 4 bays with values $>357 \text{ M}\Omega/\text{kV}$. The conclusion of the research states that exposure to cement dust pollutants significantly reduces the performance of ceramic insulators, causing electrical performance values below the standard $R < 1 \text{ M}\Omega/\text{kV}$, $S > 357 \text{ p}\Omega$ and $I_{res} > 2.01 \text{ }\mu\text{A}$, putting the insulator at risk of functional failure.

Key words: Insulator, cement pollutant, resistance

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kegagalan fungsi isolator sebagai material penyekat antara bagian yang bertegangan dengan area tidak bertegangan (*ground*) pada sistem transmisi tenaga listrik dapat menyebabkan *short circuit*. Faktor penyebab terjadinya kegagalan fungsi pada isolator disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya: kerusakan material isolator, bertambahnya usia pakai atau penuaan (*aging*), besarnya nilai tegangan surja yang melebihi kemampuan *basic insulation level* (BIL) pada isolator dan menurunnya performa isolator dikarenakan paparan polutan atau pengaruh lingkungan sekitar. KEPDIR 0520 K/DIR/2014 PLN menentukan nilai standar yang disesuaikan dengan standar VDE (*catalouge* 228/4) dimana batas resistansi minimal pada isolator untuk setiap 1 kV tegangan sistem terhadap *ground* pada suhu operasi sebesar 1 M Ω [1][2].

Polutan debu semen menjadi permasalahan yang terdapat pada sekitar industri semen dimana polutan semen mempunyai bentuk berupa debu-debu dari partikel semen. Kandungan pada polutan debu semen berupa logam yang berat serta stabil diantaranya merkuri, timbal, nikel, kromium dan kobalt menjadikan debu semen bersifat konduktif dan secara fisik menempel pada permukaan isolator menjadikan isolator bersifat higroskopis atau menyerap air. Paparan debu semen berpotensi besar dapat mempengaruhi performa listrik isolator: resistansi (R), konduktansi (S) dan arus bocor (I_{res}) hingga mampu menyebabkan *breakdown* pada isolator. Hasil pengukuran tingkat paparan polusi debu semen di desa Tegaldowo yang berjarak 4,5 km dari industri semen menunjukkan nilai 19,95 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dari nilai maksimal diizinkan 230 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Nilai tersebut dimungkinkan semakin besar apabila pengukuran pada sekitaran gardu induk dikarenakan letaknya di lingkungan industri semen. Nilai resistansi yang kecil secara perhitungan meningkatkan nilai konduktansi dan arus bocor dimana fenomena tersebut akan menimbulkan *discharge* secara terus menerus hingga menyebabkan *treeing* atau timbulnya jalur rambat tegangan pada permukaan atau di dalam isolator menuju tanah. Efek *treeing*

yang menimbulkan jalur rambat pada isolator menyebabkan penurunan nilai BIL hingga terjadi *breakdown*. Diperlukan *Shut down measurement* dan analisa nilai resistansi isolator karena paparan polutan debu semen pada saat sebelum dan setelah pemeliharaan dalam keadaan kering dan basah[1].

Solusi dari permasalahan paparan debu semen pada isolator diperlukan uji kelayakan dengan mengukur polarisasi index secara faktual *on site* kemudian dijadikan dasar penghitungan nilai konduktansi dan arus bocor resistif isolator keramik pemisah (PMS). Sebagai acuan kondisi performa isolator, ditentukan batas acuan minimal resistansi (R_{min}), batas maksimal konduktansi (S_{maks}) dan arus bocor resistif (I_{res}). Hasil analisa fisik dan pengukuran kondisi isolator keramik akan dibandingkan dengan analisa fisik dan hasil ukur resistansi *lightning arrester* (LA) dengan bahan karet silikon guna menentukan performa isolator yang terbaik dalam menghadapi paparan debu semen[1].

1.2 Perumusan Masalah

1. Terjadi pengotoran seiring waktu di GI 150 kV Semen Indonesia dimana dapat mempengaruhi kondisi fisik dan performa isolator material utama gardu induk salah satunya isolator tipe C pada pemisah.
2. Nilai resistansi isolator tipe C pada pemisah berpotensi mengalami penurunan sedangkan konduktansi dan arus bocor resistif pada isolator berpotensi mengalami kenaikan karena adanya pengotoran oleh debu semen.
3. Terdapat faktor lain yaitu keadaan basah dan kering serta keadaan sebelum dan sesudah pemeliharaan akan mempengaruhi besar nilai resistansi, konduktansi dan arus bocor resistif isolator.

1.3 Pembatasan Masalah

Penelitian dilakukan dengan batasan sebagai berikut :

1. Model penelitian ditetapkan sebagai isolator keramik tipe C dan isolator karet silikon pada *lightning arrester*.
2. Lokasi penelitian di PT PLN (Persero) Gardu Induk 150 kV Semen Indonesia Rembang.

3. Analisa dibatasi pada nilai resistansi, konduktansi dan arus bocor resitif dengan nilai tegangan normal fasa-*ground*.
4. Pengujian polarisasi index dilakukan selama 1 menit dan tidak digunakan sebagai nilai validitas yang sebenarnya, hanya digunakan untuk pengujian di luar *maintenance* rutin.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah:

1. Identifikasi penyebab pengotoran dan sifatnya serta mengetahui kondisi fisik isolator keramik tipe C pada PMS, isolator karet silikon pada *lightning arrester* dan lingkungan pada GI 150 kV Semen Indonesia.
2. Pengukuran polarisasi index isolator keramik dengan metode *shutdown meassurement* menggunakan *insulation tester* pada beberapa bay selama 1 menit, lalu divalidasi dengan acuan ditentukan sebagai evaluasi kondisi dari isolator keramik sealnjutnya dibandingkan dengan isolator berbahan karet silikon.
3. Pengukuran polarisasi index isolator keramik tipe C PMS GI 150 kV Semen Indonesia dalam keadaan basah dan kering, sebelum dan sesudah pemeliharaan.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini yaitu:

1. Menambah ilmu tentang pengaruh debu semen terhadap nilai resistansi, konduktansi dan arus bocor isolator tipe C.
2. Mengetahui resistansi, konduktansi dan arus bocor isolator PMS dan perhitungan batas-batas yang dijadikan nilai standart.
3. Langkah perbaikan untuk mengantisipasi terjadinya *breakdown* isolator karena polutan semen.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan Tugas Akhir ini ditulis dan disusun dalam urutan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat dari penelitian serta berisi sistematika penulisan dalam penyusunan laporan.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini membahas teori tentang material, isolator dan spesifikasinya, karakteristik isolator, peralatan yang digunakan untuk pengukuran resistansi, langkah pengukuran resistansi, perhitungan faktor keamanan, penghitungan tahanan isolasi minimal, penghitungan konduktansi, penghitungan konduktansi maksimal, penghitungan arus bocor dan penghitungan arus bocor maksimal.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini memaparkan secara detil dari penerapan dasar-dasar teori sebagai pendekatan untuk pelaksanaan penelitian dan memperoleh data sehingga data yang didapatkan dalam penelitian ini sejalan dengan kaidah ilmiah.

BAB IV DATA DAN ANALISA

Bab ini memaparkan hasil pengolahan dalam bentuk representasi bentuk grafik yang mempermudah analisa berdasarkan data yang diperoleh dari pengukuran isolator, perhitungan dan analisisnya.

BAB V PENUTUP

Bab ini menyampaikan kesimpulan penulis tentang hal - hal yang dibahas dalam tugas akhir ini dengan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya dan pengembangan sistem yang ada di lapangan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sebagai bahan rujukan dan perbandingan, tugas akhir ini menggunakan referensi dari penelitian yang telah dilaksanakan oleh beberapa peneliti dimana penelitian yang dilakukan berhubungan dengan pengaruh polutan terhadap isolator terutama pengaruh secara elektrik. Beberapa penelitian yang dijadikan rujukan:

1. Pengaruh Polutan Taklarut Terhadap Ketahanan Isolator (Studi Kasus PLTU Molotabu)[3] menyimpulkan isolator berpolutan abu dari PLTU Molotabu kondisi kering tak berpolutan nilai tegangan lewat denyar paling tinggi dan pada kondisi basah berpolutan nilai tegangan lewat denyar paling rendah.
2. Hubungan Intensitas Polusi Isolator Jaringan Distribusi di Sumatera Utara dengan Jarak Lokasi Isolator dari Pantai[4] menyimpulkan semakin dekat dengan sumber polutan, semakin tebal juga polutan yang menempel pada isolator.
3. Analisis Pengaruh Polutan NaCl pada Isolator Keramik Tipe Post Pin[5]. Berdasarkan penelitian dengan menyemprotkan variasi polutan 10gr-50gr dalam selang waktu 15 menit dan didiamkan 24 jam, hasil menunjukkan bahwa semakin tebal polutan NaCl pada isolator keramik semakin kecil tegangan *flashover* pada isolator.
4. Analisis Tahanan Isolasi Pada Isolator Porselin Dan Polimer Terhadap Polutan Garam Di Giset 500 kV Adipala Cilacap[6]. Hasil menunjukkan resistansi isolator sebesar 2950 G Ω pada kondisi terburuk dan 2382,8 G Ω pada kondisi terbaik dengan standart ditentukan pada tegangan 500 kV sebesar 500 M Ω .
5. Analisis Distribusi Medan Listrik pada Isolator Gantung Jenis Polimer Akibat Pengaruh Kontaminan[7] menyelidiki tentang distribusi medan listrik pada isolator gantung polimer saat terkontaminasi dan akan disimulasikan menggunakan perangkat lunak berbasis FEM (*Finite Element Method*).

6. Analisa Pengaruh Endapan Polutan Garam pada Isolator Terhadap Arus Bocor[8] membahas tentang pengaruh nilai arus bocor isolator karena penumpukkan polutan garam.
7. Analisis Pengaruh Jenis Kontaminan Terhadap Arus Bocor dan THD (*Total Harmonic Distortion*) pada Isolator Polimer Resin Epoksi 20 kV dengan Variasi Tegangan Uji[9] yang menguji pengaruh kontaminasi polutan terhadap arus bocor dan *total harmonic distortion* (THD) dengan variasi tegangan uji pada isolator polimer.
8. Pengaruh Efek Kontaminasi Isolator Keramik Terhadap Rugi Daya Saluran Udara Tegangan Tinggi[10] membahas tentang pengaruh polutan terhadap rugi-rugi daya pada saluran transmisi.
9. Pengaruh Kabut Garam Terhadap Kinerja Isolator 20 kV Berbahan Polimer Resin[11], Pengujian Arus Bocor Isolator 20 kV Berbahan Polimer Epoxy Resin dengan Mempertimbangkan Tekanan dan Kelembaban T-27 T-28[12] yang melakukan penelitian tentang pengaruh garam terhadap kinerja isolator *post pin*,
10. Investigasi Flashover pada Saluran Transmisi 150 kV Payakumbuh – Koto Panjang[14] memberi kesimpulan semakin tebal polutan permukaan isolator menyebabkan semakin tinggi potensi terjadi *breakdown* isolator.
11. Studi Pengaruh Kontaminasi Polusi Udara pada Isolator Tegangan Menengah 20 kV pada PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Medan[13] yang membahas tentang pengaruh polusi udara terhadap kinerja isolator 20 kV.
12. Pollution flashover under different contamination profiles on high voltage insulator: Numerical and experiment investigation[15] yang memberikan bahasan tentang potensi terjadinya *flashover* isolator karena pengaruh polutan garam dan kelembaban dengan kesimpulan tingkat polusi dan nilai kelembaban pada isolator mempengaruhi performa dielektrik isolator.
13. Analisis Perbandingan Pengaruh Debu Semen Antara Isolator Pos Pin dan Isolator Gantung Terhadap Flashover menggunakan Metode *Short Time*

Test[17] Yang menyimpulkan turunya tegangan breakdown isolator yang dikarenakan tebalnya polutan dalam keadaan kering dan basah.

14. Pengaruh Polutan Semen terhadap Nilai Konduktivitas, Nilai Resistivitas dan Arus Bocor pada Isolator Kaca dengan Pengotor Buatan[16] menjelaskan bagaimana cara menganalisa pengaruh polutan semen menggunakan pengotor buatan mengacu nilai *ambient* paparan debu semen pada suatu daerah terhadap nilai konduktivitas, resistivitas dan arus bocor.
15. Analisis Perbandingan Tahanan Isolasi dan Arus Bocor pada Isolator Berbahan *Silicon Rubber* dan Keramik Akibat Pengaruh Kontaminan Abu Vulkanik dan Belerang[18] menjelaskan pengaruh debu vulkanik terhadap tahanan isolasi dan arus bocor isolator *post* keramik dan *rubber silicone*.

2.2 Material

Material merupakan susunan dari beberapa atom dimana atom sendiri adalah bagian terkecil dari suatu materi yang terdiri dari proton, elektron dan neutron. Proton merupakan sisi positif yang ada pada atom, neutron merupakan sisi netral dan elektron merupakan sisi negatif dari suatu atom.

Proton dan neutron terletak pada bagian inti atom dan dikelilingi oleh elektron-elektron yang bergerak. Jumlah elektron mempengaruhi jenis dari material yang tersusun atas atom-atom tersebut. Elektron mampu bergerak masuk ataupun keluar dari suatu atom dengan mengisi celah bebas yang tersedia dari atom lain. Gerakan elektron inilah yang menyebabkan terjadinya arus listrik.

Klasifikasi material yang digolongkan berdasarkan kemampuan untuk mengalirkan elektron-elektron tersebut atau disebut dengan arus listrik, yaitu: konduktor, semi konduktor dan isolator.

1. Konduktor

Merupakan material yang mudah menghantarkan arus listrik. Elektron dengan bebas mampu berpindah dari suatu atom ke atom lainnya dengan mengisi lubang yang kosong dari atom lain. Jenis material ini pada atom penyusunnya mempunyai banyak lubang pada kulit terluarnya sehingga atom bersifat *acceptor*, contohnya tembaga, aluminium, besi dan sejenisnya.

2. Semi konduktor

Bahan semi konduktor mempunyai konduktivitas yang lebih rendah dari bahan konduktor. Pada bahan semi konduktor, kondisi dapat direkayasa dengan menambahkan *dopping* ataupun dengan *trigger*. *Dopping* dan *trigger* ini berfungsi sebagai penentu jenis bahan sebagai konduktor atau isolator pada sifat bahannya.

3. Isolator

Isolator merupakan material yang berfungsi sebagai penyekat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan[19]. Bahan isolator mempunyai atom yang stabil dimana atom penyusunnya hanya sedikit atau tidak ada lubang pada kulit terluarnya untuk melewatkan elektron. Contoh beberapa material isolator ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 *Energy gap* untuk semikonduktor dan isolator[20]

Material	Simbol	<i>Energy gap</i> (eV) at 25°C
<i>Silicon nitride</i>	Si ₃ N ₄	5
<i>Silicone dioxide</i>	SiO ₂	9
<i>Aluminium oxide</i>	Al ₂ O ₃	4–8
<i>Mullite</i>	2Al ₂ O ₃ 2SiO ₂	-
<i>Forserite</i>	2MgO SiO ₂	-
<i>Beryllium oxide</i>	BeO	-
<i>Aluminium nitride</i>	AlN	-
<i>Germanium</i>	Ge	0,67
<i>Copper oxide</i>	Cu ₂ O	2,1
<i>Gallium nitride</i>	GaN	3,4
<i>Gallium phosphide</i>	GaP	2,26
<i>Lead sulfide</i>	PbS	0,37
<i>Gallium arsenide</i>	GaAs	1,43
<i>Silicone</i>	Si	1,11
<i>Plastics</i>	-	6-10
<i>Diamond</i>	C	5,5

2.3 Isolator

Dijelaskan bahwa pada saluran transmisi, isolator merupakan penyekat bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan. Dalam hal umum, isolator merupakan material yang sulit menghantarkan arus listrik. Isolator mempunyai 3 sifat yaitu resistivitas, permitivitas dan polaritas.

1. Resistivitas

Resistivitas merupakan kemampuan yang dimiliki suatu material untuk menahan arus listrik. Resistivitas suatu benda tergantung dari bahan penyusunnya. Tahanan jenis suatu benda dinotasikan dengan rho (ρ), sesuai persamaan (2.1) dan beberapa contoh tahanan jenis material ditunjukkan pada Tabel 2.2.

$$R = \rho \left(\frac{l}{a} \right) \quad (2.1)$$

dengan R = Resistansi (Ω)

ρ = Resistivitas bahan (Ωm)

l = panjang penghantar (m)

a = Luas penampang (m^2)

Tabel 2.2 Resistivitas beberapa bahan[20]

Material	ρ (Ωm) at 25°C
Aluminium	$2,82 \times 10^{-8}$
Copper	$1,68 \times 10^{-8}$
Ceramics	$1,00 \times 10^{12} - 1,00 \times 10^{14}$
Alumina	$> 1,00 \times 10^{14}$

2. Permitivitas

Permitivitas merupakan ukuran pengaruh besarnya medan listrik pada bahan dielektrik. Permitivitas adalah kemampuan dari suatu bahan untuk menahan medan listrik yang mempengaruhi bahan dielektrik tersebut. Permitivitas (ϵ) dinyatakan dalam farads per meter (F/m) sesuai persamaan (2.2).

$$\epsilon = (1 + \chi) \epsilon_0 \quad (2.2)$$

dengan χ = kerentanan listrik (*susceptibility*)

ϵ_0 = permitivitas ruang hampa

Dalam pengaplikasiannya, permitivitas dinyatakan relatif daripada kondisi sebenarnya yang biasa disebut *dielectric constant* sesuai persamaan (2.3) dan permitivitas beberapa bahan ditunjukkan pada Tabel 2.3.

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (2.3)$$

Tabel 2.3 Permitivitas beberapa bahan

Material	ϵ_r
Udara	1,0006
Kayu	2-6
Hampa	1,0
<i>Silicone</i>	11,7

3. Polaritas

Polaritas merupakan kemampuan dari suatu material atau bahan isolator untuk melewatkan elektron atau arus listrik. Isolator akan menjadi konduktif jika diberi tegangan yang cukup untuk menggerakkan muatan elektron yang ada pada material tersebut. Dengan kata lain, isolator akan menjadi konduktor bila diberi tegangan yang diluar kemampuan material untuk menahan tegangan tersebut. Tegangan *breakdown* dinyatakan sebagai tegangan jatuh per jarak (V/m). Polaritas beberapa bahan ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Polaritas beberapa bahan[20]

Material	MV/m
Udara	3,0
Alumina	13,4
<i>Silicone oil</i>	10-15
<i>Fused silica</i>	25-40

2.4 Isolator Keramik Tipe C Merk CLD

Isolator yang terpasang pada PMS di GI 150 kV Semen Indonesia Rembang menggunakan isolator tipe C, dimana tipe C sendiri mempunyai bentuk yang *solid*

dengan piringan-piringan seperti payung tersusun secara vertikal dan digunakan untuk menopang PMS. Selain sebagai penopang, isolator juga digunakan sebagai pemegang kekuatan mekanis saat pengoperasian PMS posisi buka ataupun tutup.

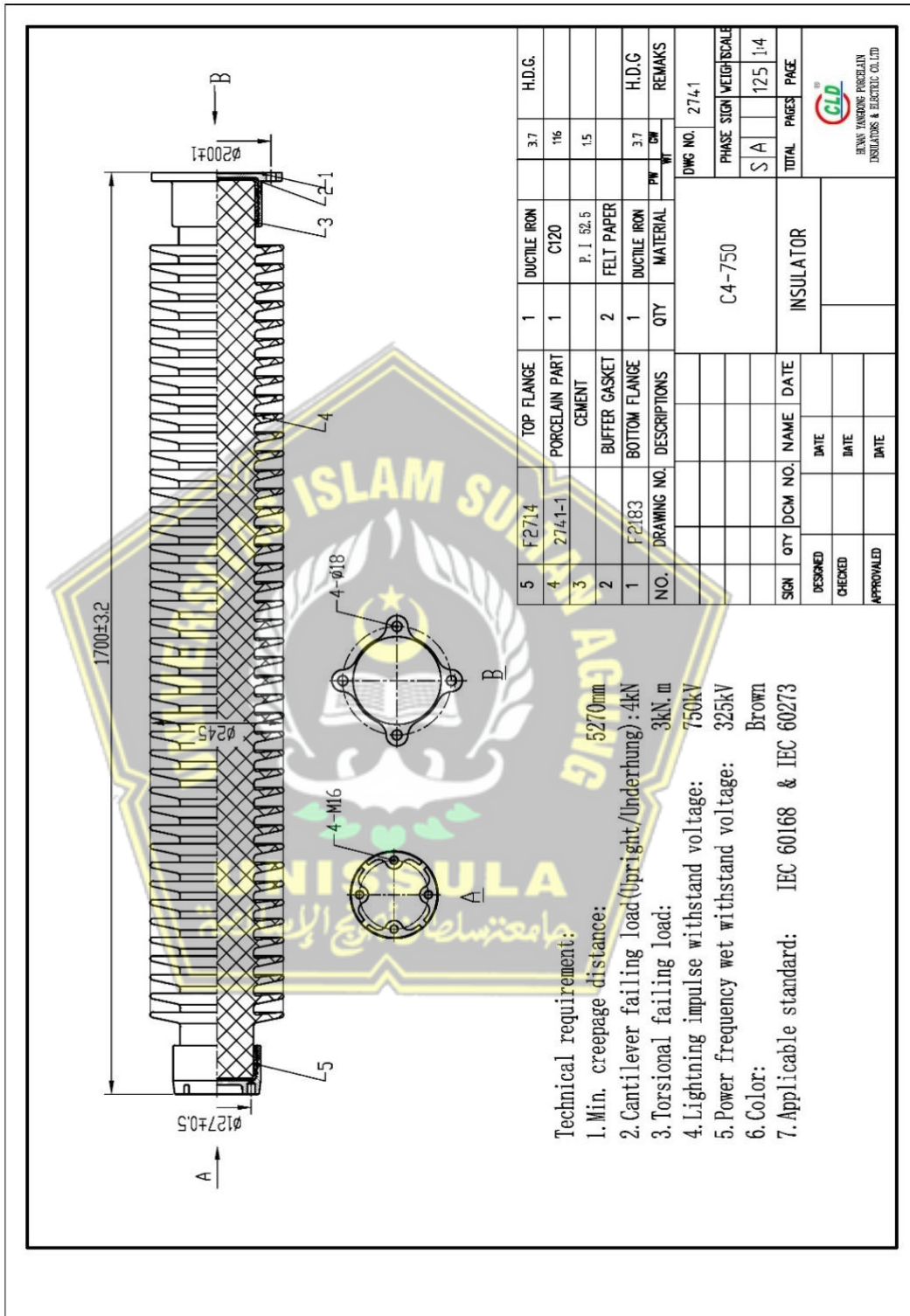
Isolator tipe C digunakan juga sebagai *post* isolator untuk menopang konduktor yang terlalu panjang pada gardu induk. Konduktor yang terlalu panjang dan berat, akan membentuk andongan yang besar, untuk itu digunakan isolator tipe C. Spesifikasi dari isolator tipe C didapatkan dengan mencari katalog produk yang telah dikomunikasikan dengan produsen[21]. Isolator tipe C ditunjukkan oleh Gambar 2.1, pengaplikasiannya ditunjukkan Gambar 2.2 dan spesifikasi isolator tipe C yang terpasang di GI 150 kV Semen Indonesia ditunjukkan Gambar 2.3.



Gambar 2.1 Isolator tipe C



Gambar 2.2 Foto aplikasi isolator tipe C pada PMS GI 150 kV Semen Indonesia

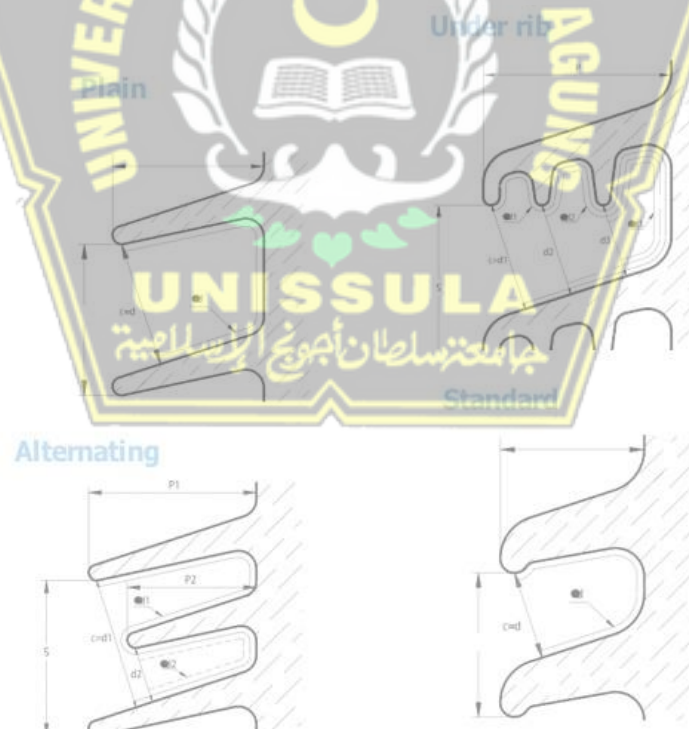


Gambar 2.3 Spesifikasi isolator tipe C pabrikan CLD[21]

2.5 Creepage

Creepage atau rambatan pada isolator merupakan kemampuan isolator untuk menahan atau mencegah terjadinya perambatan tegangan listrik melalui permukaan isolator. bentuk permukaan isolator didesain untuk berbagai kegunaan seperti ditunjukkan Gambar 2.4. Beberapa hal yang mempengaruhi desain *Creepage*:

1. *Shed*, berfungsi untuk mencegah terbentuknya jembatan oleh air hujan.
2. *Shed overhang* atau jarak antar *shed*, guna membentuk sifat *self cleaning* isolator.
3. *Creepage Distance*, merupakan jarak rambat permukaan isolator.
4. *Alternating shed*, didesain jika ada pemasangan 2 isolator yang berbeda dan dipasang berselang-seling.
5. Kemiringan *shed*, juga berfungsi untuk desain *self cleaning* pada isolator.
6. Faktor profil, untuk menentukan perbandingan anatar hasil uji pada pengukuran laboratorium dengan hasil uji saat diaplikasikan pada lokasi.



Gambar 2.4 *Creepage* isolator

Mengacu pada Gambar 2.3, isolator tipe C merk CLD dengan kode C4-750 mempunyai *Creepage Distance* sepanjang 5270 mm[21].

2.6 Polutan Debu Semen

Polutan debu semen adalah polutan berupa debu residu semen dan umumnya berada di lingkungan pabrik semen. Polutan semen itu sendiri mengandung beberapa unsur logam berat yang stabil dan mengandung racun seperti nikel, timbal, kobalt, merkuri dan kromium.

Polutan yang mengandung logam berat ini, jika menempel pada permukaan isolator, akan menyebabkan reaksi yang berantai, dimana saat hanya debu yang menempel, resistivitas dari isolator akan menurun. Saat terjadi hujan dengan intensitas rendah, maka air tidak langsung menyapu debu, namun malah akan menggumpalkan debu sehingga debu akan menempel pada isolator kemudian menjadi kerak pada isolator.

Kerak tersebut yang permukaannya tidak licin atau kasar, mempunyai sifat dapat menampung air atau higroskopis. Hal tersebut akan sangat menurunkan resistansi dari isolator. Penurunan resistansi isolator dapat menyebabkan arus bocor bernilai besar, dimana arus bocor bernilai besar tersebut akan berdampak pada penurunan BIL pada isolator. Dampak dari penurunan BIL isolator, akan menyebabkan *breakdown*. Polutan semen dapat menjadi kerak yang menempel pada isolator tipe C sedangkan pada isolator karet silikon dalam keadaan basah, air tidak menggumpalkan debu semen seperti ditunjukkan Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Foto isolator terkontaminasi polutan semen

2.7 Ambient Debu Semen Indonesia Rembang

Ambient debu semen merupakan banyaknya kontaminasi debu semen terhadap pencemaran udara yang berada pada lingkungan. Hasil pengukuran yang dilaksanakan kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (LHK) pada semester awal 2023 menunjukkan bahwa emisi debu desa Tegaldowo dengan jarak sekitar 4,5 Km dari industri semen seperti yang ditunjukkan Gambar 2.6 sebesar $19,95 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dari standar maksimal yang diizinkan sebesar $230 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ [22]. Kondisi ini bisa lebih tinggi angkanya di lingkungan pabrik semen. Data tersebut dapat digunakan sebagai dasar untuk perhitungan seberapa tebal penumpukan debu selama beberapa periode waktu. Data tersebut juga dapat dipergunakan untuk menentukan frekuensi pemeliharaan isolator dalam kurun waktu satu tahun guna mencegah penumpukan debu yang berlebihan pada isolator.



Gambar 2.6 Jarak dari pabrik semen ke desa terdekat

2.8 Masa Pakai Peralatan

Setiap peralatan atau material utama gardu induk yang digunakan, mempunyai standart masa pakai. Acuan masa pakai ini digunakan untuk menentukan batas maksimal pemakaian peralatan tersebut karena secara umum dinilai terjadi pemburukan kondisi. Namun hal tersebut sifatnya tidak mutlak, berdasarkan [2] dan wawancara dengan narasumber, usia pakai peralatan pada gardu induk mempunyai rentang 20-30 tahun dan juga didasarkan *assesment*

kondisi secara rutin. Masa pakai acuan, digunakan nilai 25 tahun. Faktor keamanan bernilai antara 1–2,5 dan dapat dikalkulasi menggunakan persamaan (2.4).

$$faktori = 1 + \left(\frac{\text{sisu masu pakai}}{\text{maksimal pakai}} \right) \times 1,5 \quad (2.4)$$

2.9 Pengukuran Resistansi

Resistansi isolator diukur menggunakan metode shut down measurement atau pengukuran saat tidak bertegangan. Pengukuran menggunakan alat ukur *insulation tester* tegangan tinggi pabrikan merk kyoritsu dengan tegangan uji sebesar 5000 V dengan durasi 1 menit.

KEPDIR. No : 0520 K/DIR/2014 PLN, acuan untuk tahanan isolasi minimal sebesar 1 M Ω /kV seperti ditunjukkan Tabel 2.5. Pengukuran menggunakan *insulation tester*, kondisi isolator harus mempunyai nilai resistansi minimal 1 M Ω untuk setiap 1 kV tegangan sistem terhadap *ground* pada suhu saat operasi. Disesuaikan dengan standart VDE (*catalogue 228/4*).

Tabel 2.5 Tahanan isolasi minimal

Tegangan fasa-fasa	Tegangan fasa-tanah	Tahanan isolasi minimal
500 kV	289 kV	289 M Ω
150 kV	87 kV	87 M Ω
70 kV	41 kV	41 M Ω

Pendekatan yang digunakan untuk menentukan nilai resistansi minimal (R_{min}) isolator yang digunakan untuk penilaian kondisi dari isolator[23] berdasarkan persamaan (2.5).

$$R_{min} = \frac{(1000 \times V^2 \times faktori)}{Q} \quad (2.5)$$

dengan R_{min} = resistansi minimal (Ω)

V = tegangan pada sistem terhadap tanah

1000 = konstanta

Q = tegangan injeksi alat ukur

$faktori$ = 2,5 (apabila baru)

2.10 Konduktansi

Resistansi merupakan tahanan sedangkan konduktansi adalah perlawanan sifat dari resistansi. Resistansi dinyatakan dengan satuan Ω (Ohm) sedangkan konduktansi atau Siemens (S) dinyatakan dalam satuan Mho . Konduktansi dapat ditentukan dengan persamaan (2.6).

$$S = \frac{1}{R} \quad (2.6)$$

dengan S dan R merupakan parameter konduktansi dan resistansi.

Untuk menentukan konduktansi maksimal (S_{maks}), diperlukan beberapa variabel sebagai dasar perhitungan. Nilai konduktansi maksimal merujuk pada R_{min} yang telah dihitung. R_{min} digunakan sebagai batas minimal sedangkan S_{maks} digunakan sebagai batas maksimal, sehingga didapatkan persamaan (2.7).

$$S_{maks} = \frac{Q}{(1000 \times V^2 \times faktor)} \text{ atau } \frac{1}{R_{min}} \quad (2.7)$$

2.11 Karakteristik Arus Bocor

Arus bocor resistif (I_{res}) merupakan fenomena dimana arus akan mengalir melalui permukaan isolator walaupun dengan nilai yang sangat kecil. Fenomena ini sesuai hukum Ohm dimana nilai arus akan muncul saat tegangan listrik diberikan beban atau resistansi. Untuk menghitung arus bocor (I_{res}) menggunakan persamaan (2.8) dan menentukan batas maksimal arus bocor (I_{maks}) digunakan persamaan (2.9).

$$I_{res} = \frac{V}{R} \quad (2.8)$$

$$I_{maks} = \frac{Q^2}{(1000 \times V^2 \times faktor)} \quad (2.9)$$

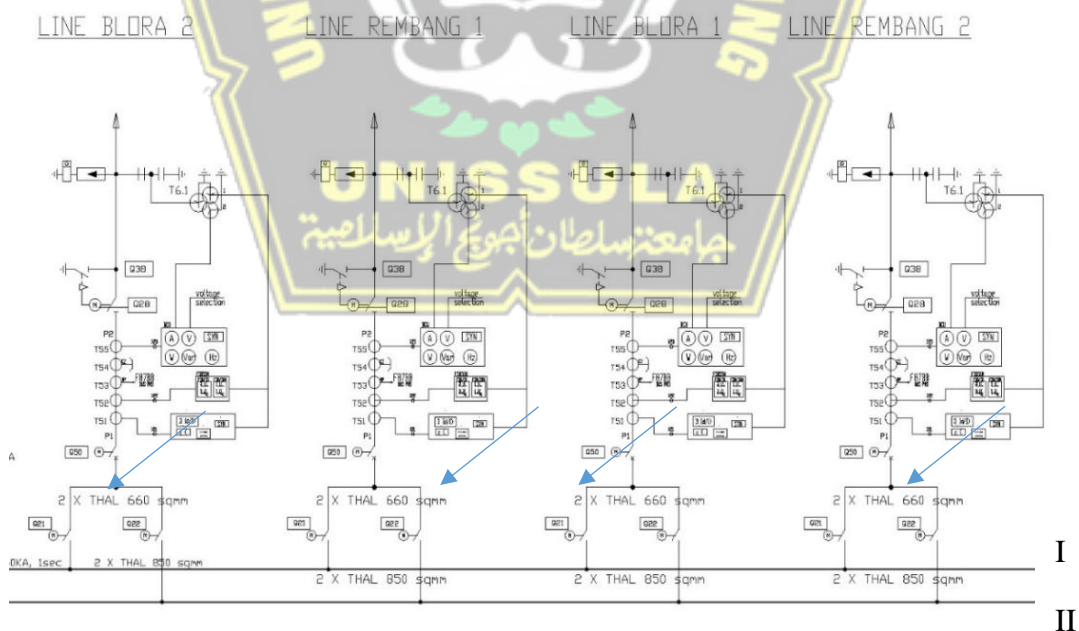
2.12 Isolator Cleaning Paste

Material isolator *cleaning paste* yang digunakan untuk membersihkan isolator berupa pasta pembersih dengan kandungan minyak untuk melapisi isolator dan butiran *scrub* kecil untuk membersihkan permukaan isoaltor. Efek *water repellent* pada isolator *cleaning paste* digunakan untuk pengkondisian isolator pada kondisi pembersihan dengan pelapis.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Model Penelitian

Model penelitian digunakan sebagai pedoman agar penelitian berjalan sesuai dengan alur yang ditetapkan untuk mendapatkan hasil penelitian yang sesuai dengan tujuan utama dari penelitian. Penelitian ditetapkan mulai dari penentuan model penelitian, dilanjutkan penentuan obyek yang diteliti, pengukuran nilai resistansi obyek dengan kondisi sebelum dipelihara (K_1), setelah dipelihara tanpa pelapis (K_2) dan setelah dipelihara dengan pelapis (K_3) saat keadaan kering dan keadaan basah, melakukan penghitungan nilai konduktansi dan arus bocor resistif, dilanjutkan dengan menentukan batas acuan resistansi minimal, konduktansi maksimal dan arus bocor maksimal kemudian dievaluasi dengan acuan batas nilai yang ditentukan, terakhir penarikan kesimpulan hasil penelitian. Lokasi penelitian sesuai Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Single line diagram obyek penelitian

3.2 Penentuan Kriteria Dan Obyek Penelitian

Obyek penelitian ditujukan pada isolator tipe C PMS dan pada isolator *lightning arrester*. Obyek dengan kriteria mengalami paparan polutan debu semen yang signifikan dan intens. Obyek berlokasi berhadapan langsung dengan industri semen.

3.3 Waktu Dan Tempat Pengujian

Pengujian dilaksanakan pada *bay* Rembang 1 *busbar* 2, Rembang 2 *busbar* 2, Blora 1 *busbar* 1, Blora 2 *busbar* 1 GI 150 kV Semen Indonesia. Pengambilan data dilaksanakan pada saat adanya pemadaman atau *shut down measurement*. Pengukuran secara faktual dengan durasi 1 menit, kondisi cuaca yang cerah, nilai suhu *ambient* sebesar 31° C dan nilai *humidity* sebesar 52%.

3.4 Bahan Uji

Pengujian dilakukan pada isolator berbahan keramik tipe C yang digunakan pada PMS *busbar*. Isolator keramik PMS merk CLD kode produk C4-750, tipe 2741 dengan *creepage distance* sepanjang 5270 mm. Pengujian selanjutnya pada isolator LA berbahan karet silikon.

3.5 Peralatan Uji

Peralatan yang digunakan untuk pengujian polarisasi index menggunakan *insulation tester* merk kyoritsu model 8152 dengan maksimal tegangan uji sebesar 5000 Volt seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. Higrometer sebagai pengukur kelembaban dan suhu lingkungan & thermometer sebagai alat pengukur suhu.

3.6 Pengukuran Polarisasi Index

Pengukuran polarisasi index harus memperhatikan beberapa hal supaya hasil pengukuran lebih akurat tanpa adanya intrvensi tegangan induksi. Bagian yang bersifat konduktif pada PMS harus ditanahkan terlebih dahulu supaya tegangan sisa dan tegangan induksi terbuang ke tanah. Pengukuran tahanan isolasi dilaksanakan dengan prosedur:

1. Cek baterai alat ukur tahanan isolasi.
2. Memasang kabel *ground* dan kabel *line insulation tester*.
3. Memasang kepala kabel *ground* ke *grounding* PMS.
4. Memasang kepala kabel *line* ke bagian *hot* PMS.
5. Melilih tegangan injek pada posisi 5000 Volt.
6. Menekan tombol “*Test*” kemudian putar untuk menahan posisi tombol tetap pada posisi “*Test*”.
7. Menunggu selama minimal 1 menit.
8. Menuliskan hasil tahanan isolasi yang tertera.
9. Mentanahkan kembali tegangan sisa injek *insulation tester*.



Gambar 3.2 Alat uji tahanan isolasi tegangan tinggi

Pengukuran dilaksanakan dengan beberapa kondisi dari isolator, yaitu pada kondisi kering sebelum pemeliharaan, basah sebelum pemeliharaan, kering setelah pemeliharaan dan basah setelah pemeliharaan. Pengambilan sampel uji minimal pada isolator keramik PMS fasa R, S, T dan isolator karet silikon pada LA fasa R, S, T.

3.7 Pembersihan Isolator

Isolator keramik sebelum dibersihkan pada saat kondisi basah, debu semen menyerap air pada isolator keramik berbeda dengan isolator karet silikon, walaupun keadaan kotor dan diberi air, debu semen tidak menyerap air seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Isolator kondisi basah sebelum pemeliharaan

Isolator keramik dibersihkan dari kerak debu semen yang menempel dengan cara dikerok menggunakan benda tajam supaya kerak terkelupas. Hal ini dilakukan dengan teliti dan dengan hati-hati. Teliti dalam arti harus benar-benar terkelupas keraknya dan bersih, hati-hati supaya tidak melukai permukaan isolator. Isolator karet silikon cukup dibersihkan dengan air dan dilap sampai bersih seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Isolator kondisi setelah pemeliharaan

Apabila pembersihan tidak dilakukan dengan teliti, maka akan terjadi penumpukan polutan yang semakin tebal, dan kerak yang menempel akan semakin sulit dibersihkan. Jika tidak hati-hati, permukaan isolator akan terjadi lecet atau tergores. Dampaknya, polutan yang menempel, akan mengisi goresan tersebut, dan menempel semakin dalam seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Isolator masih berkerak setelah dibersihkan

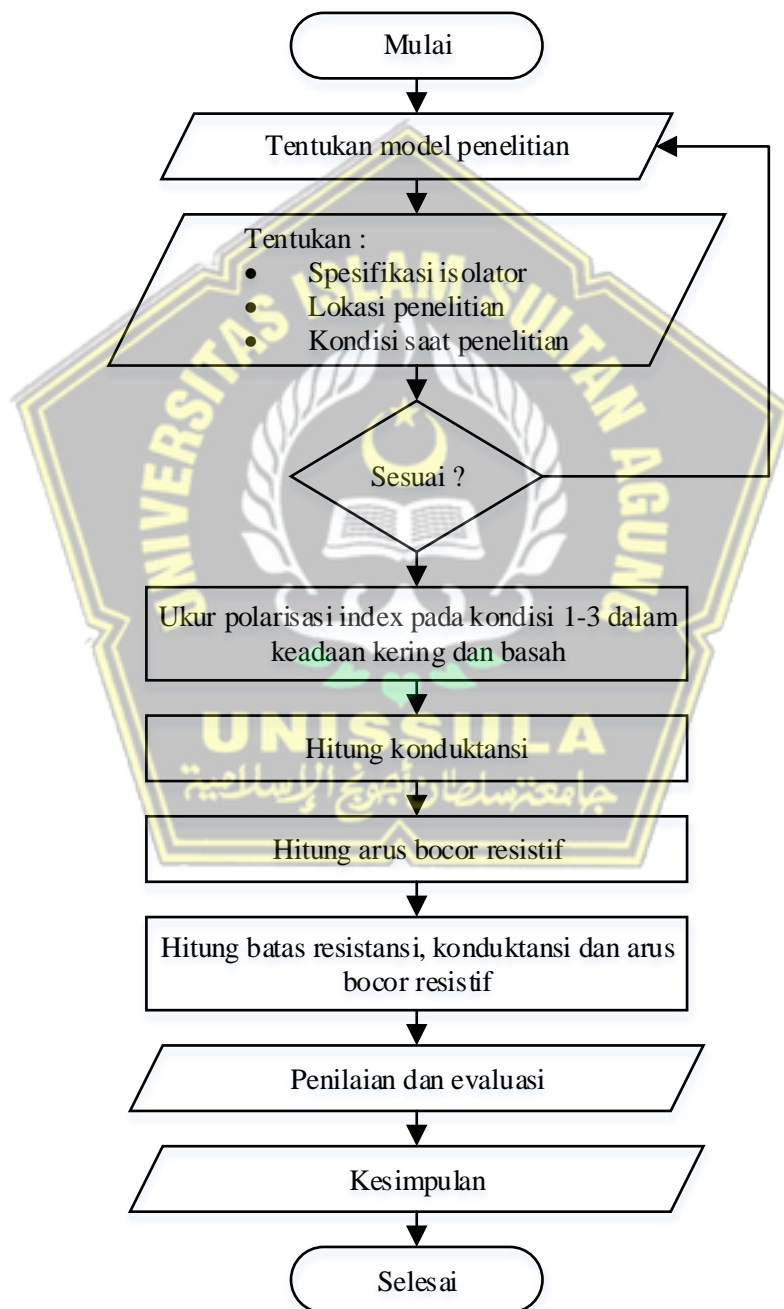
Tidak hanya sebatas dibersihkan dari kerak, isolator kemudian dibersihkan dengan isolator *cleaning paste* yang berfungsi membersihkan secara *deep clean* karena mengandung *scrub*. Tidak hanya membersihkan, isolator *cleaning paste* juga memberi lapisan minyak yang bersifat *water repellent* walaupun hanya beberapa minggu penggunaan.

3.8 Validasi Dan Evaluasi

Membuat analisa dan penilaian tentang bagaimana hasil dari pengukuran tahanan isolasi yang telah dilaksanakan. Hasil dari pengukuran akan dibandingkan dengan nilai tahanan isolasi minimal sehingga menunjukkan apakah isolator berada pada kondisi diatas nilai tahanan isolasi minimal atau dibawahnya serta menilai kondisi isolator saat sebelum dan sesudah pemeliharaan kemudian dari hasil analisa, akan ditarik kesimpulan dan evaluasi untuk membuat rekomendasi waktu yang tepat untuk melaksanakan pemeliharaan isolator. Isolator pada LA

diperlakukan dengan kondisi dan analisa yang sama yang kemudian dibandingkan kondisi elektrik dan fisik dari isolator keramik dan isolator karet silikon.

Hasil dari analisa dapat digunakan juga untuk menentukan tingkat kritikal dari isolator apakah hanya perlu pemeliharaan atau butuh dilaksanakan penggantian yang baru atau menggunakan bahan material isolator yang lebih tahan terhadap polutan debu semen. Penelitian mengacu pada *flowchart* ditunjukkan Gambar 3.6.



Gambar 3.6 *Flowchart* penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Faktor Keamanan

Rentang usia pakai material utama gardu induk berada di usia 20-30 tahun berdasarkan *assesment* kondisi peralatan dengan nilai median sebagai acuan menggunakan masa pakai 25 tahun. Gardu induk 150 kV Semen Indonesia beroperasi sejak tahun 2016, ditentukan peralatan pada tahun 2023 berusia 7 tahun. Nilai maksimal faktor keamanan adalah 2,5 untuk keadaan baru dan batas bawah bernilai 1. Penentuan faktor dengan rentang 1–2,5 berdasarkan persamaan (2.4)

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

$$f_{faktor} = 2,08$$

4.2 Perhitungan Tahanan Isolasi Minimal

Tahanan isolasi minimal dihitung untuk mendapatkan batas minimal tahanan isolasi. Batas minimal digunakan untuk acuan asumsi nilai resistansi isolator minimal. Perhitungan berdasarkan persamaan R_{min} . Perhitungan resistansi minimal menggunakan variabel tegangan normal sistem terhadap tanah sebesar 87 kV atau 87000 V, tegangan injek sebesar 5630 V (tegangan injek maksimal), sesuai dengan persamaan (2.5).

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

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

4.3 Perhitungan Konduktansi Maksimal

Untuk menentukan konduktansi maksimal (S_{maks}), diperlukan beberapa variabel sebagai dasar perhitungan. Konduktansi maksimal mengacu kepada R_{min} yang telah diketahui. R_{min} digunakan sebagai acuan batas minimal maka S_{maks} digunakan sebagai acuan batas maksimal, didapatkan persamaan (2.7).

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

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

4.4 Perhitungan Arus Bocor Maksimal

Untuk menentukan nilai arus bocor maksimal acuan, seperti yang dihitung untuk menentukan acuan tahanan isolasi minimal dapat dihitung dari nilai variabel tegangan uji (Q) sebesar 5630 V (berdasarkan tegangan uji tertinggi dari beberapa pengukuran), tegangan sistem terhadap *ground* (V) sebesar 87000 V (nilai tegangan operasi normal terhadap tanah). Mengacu pada persamaan (2.9).

$$I_{maks} = \frac{5630^2}{1000.87000^2.2,08}$$

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

4.5 Pengukuran Tahanan Isolasi

Data diambil dari nilai tahanan isolasi dalam keadaan kering sebelum pemeliharaan dan kondisi basah dengan mengalirkan air dari isolator bagian atas menggunakan air sehingga secara alami turun ke bawah dan membasahi isolator. Keadaan ini dinyatakan terburuk karena air tidak menyapu polutan secara langsung namun malah membuatnya menggumpal. Hasil ukur ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Pengukuran tahanan isolasi semua kondisi

No	Penghantar (Interval)	Fasa	Teg. (V)	K1 (GΩ)		K2 (GΩ)		K3 (GΩ)	
				K	B	K	B	K	B
1	Blora 2 Busbar 1 (>6 Bln)	S	5620	204	2,64	OL	195	OL	OL
2	Rembang 1	R		136	1,17	806	305	OL	OL
3	Busbar 2 (>6 Bln)	S	5620	180	7,1	874	453	OL	OL
4		T		159	1,24	730	286	OL	OL
5	Rembang 2	R		426	5,39	OL	437	OL	OL
6	Busbar 2 (>6 Bln)	S	5630	438	5,21	OL	472	OL	OL
7		T		322	5,41	OL	397	OL	OL
8	Blora 1 Busbar	R		765	281	OL	557	OL	OL
9	1 (5 Bln)	S	5620	821	296	OL	623	OL	OL
10		T		870	317	OL	657	OL	OL

4.6 Tahanan Isolasi per kV

Tahanan isolasi per kV dimaksudkan untuk mempermudah perbandingan antara hasil ukur dengan acuan nilai tahanan isolasi minimal yaitu 1 MΩ/kV. Dengan hasil tahanan isolasi minimal dari perhitungan sebelumnya yaitu sebesar 2,8 GΩ, dimana hal ini menyatakan 2,8 GΩ/ 2,8 MV. Untuk menghitung tahanan isolasi per kV dari hasil ukur, cukup menggunakan persamaan (3.1).

$$R_{konv} = \frac{R_{ukur}}{R_{min}} \quad (3.1)$$

Hasil ukur pada *bay* Blora 2 busbar 1 fasa S, hasil ukur untuk sebelum dibersihkan, setelah dibersihkan tanpa pelapisan setelah dibersihkan dengan pelapis dalam keadaan kering dan basah tertera pada Tabel 4.1.

Nilai sebelum dibersihkan keadaan kering:

$$R_{konv} = \frac{204}{2,8}$$

$$R_{konv} = 72,85 \text{ G}\Omega/\text{MV} \text{ atau } 72,8 \text{ M}\Omega/\text{kV} \text{ (diatas standart)}$$

Nilai sebelum dibersihkan keadaan basah:

$$R_{konv} = \frac{2,64}{2,8}$$

$$R_{konv} = 0,94 \text{ G}\Omega/\text{MV} \text{ atau } 0,94 \text{ M}\Omega/\text{kV} \text{ (dibawah standart)}$$

Keadaan kering setelah pemeliharaan tanpa pelapis:

$$R_{konv} = \frac{>1000}{2,8}$$

$$R_{konv} = > 357 \text{ G}\Omega/\text{MV} \text{ atau } > 357 \text{ M}\Omega/\text{kV} \text{ (diatas standart)}$$

Keadaan basah setelah pemeliharaan tanpa pelapis:

$$R_{konv} = \frac{195}{2,8}$$

$$R_{konv} = 69,64 \text{ G}\Omega/\text{MV} \text{ atau } 69,64 \text{ M}\Omega/\text{kV} \text{ (diatas standart)}$$

Keadaan kering setelah pemeliharaan dengan pelapis:

$$R_{konv} = \frac{>1000}{2,8}$$

$$R_{konv} = > 357 \text{ G}\Omega/\text{MV} \text{ atau } > 357 \text{ M}\Omega/\text{kV} \text{ (diatas standart)}$$

Keadaan basah setelah pemeliharaan dengan pelapis:

$$R_{konv} = \frac{>1000}{2,8}$$

$$R_{konv} = > 357 \text{ G}\Omega/\text{MV} \text{ atau } > 357 \text{ M}\Omega/\text{kV} \text{ (diatas standart)}$$

Hasil perhitungan dituangkan kedalam bentuk tabel. Tabel 4.2 menunjukkan hasil konversi tahanan isolasi per kV. Beberapa obyek di bawah standar 1 MΩ/kV.

Tabel 4.2 Tahanan isolasi per kV

No	Penghantar (Interval)	Fasa	K1 (MΩ/kV)		K2 (MΩ/kV)		K3 (MΩ/kV)	
			K	B	K	B	K	B
1	Blora 2	S	72,85	0,94	>357	69,64	>357	>357
2	Rembang 1	R	48,57	0,42	287,8	108,9	>357	>357
3	Busbar 2 (>6	S	64,29	2,55	312,1	161,7	>357	>357
4	Bln)	T	56,79	0,44	260,7	102,1	>357	>357
5	Rembang 2	R	152,1	1,93	>357	156,1	>357	>357
6	Busbar 2 (>6	S	156,4	1,86	>357	168,5	>357	>357
7	Bln)	T	115	1,93	>357	141,7	>357	>357
8	Blora 1	R	273,2	100,3	>357	198,9	>357	>357
9	Busbar 1 (5	S	293,2	105,7	>357	222,5	>357	>357
10	Bln)	T	310,7	113,2	>357	234,6	>357	>357

4.7 Perhitungan Konduktansi

Berdasarkan persamaan (2.6) variabel nilai resistansi digunakan untuk nilai acuan perhitungan. Sampel perhitungan ditentukan pada bay Blora 2 PMS busbar

1. Hasil perhitungan dituangkan pada Tabel 4.3 dengan satuan piko Mho (pΩ).

Keadaan kering sebelum pemeliharaan:

$$S = \frac{1}{204}$$

$$S = 4,9 \times 10^{-12} \Omega$$

Keadaan basah sebelum pemeliharaan:

$$S = \frac{1}{2,64}$$

$$S = 3,8 \times 10^{-10} \Omega$$

Keadaan kering setelah pemeliharaan tanpa pelapis:

$$S = \frac{1}{>1000}$$

$$S = < 10 \times 10^{-13} \Omega$$

Keadaan basah setelah pemeliharaan tanpa pelapis:

$$S = \frac{1}{195}$$

$$S = 5,1 \times 10^{-12} \bar{U}$$

Keadaan kering setelah pemeliharaan dengan pelapis:

$$S = \frac{1}{>1000}$$

$$S = < 10 \times 10^{-13} \bar{U}$$

Keadaan basah setelah pemeliharaan dengan pelapis:

$$S = \frac{1}{>1000}$$

$$S = < 10 \times 10^{-13} \bar{U}$$

Tabel 4.3 menunjukkan konduktansi dengan satuan pikoMho (p \bar{U}) pada obyek penelitian semua *bay*.

Tabel 4.3 Konduktansi semua kondisi

No	Penghantar (Interval)	Fasa	K1 (p \bar{U})		K2 (p \bar{U})		K3 (p \bar{U})	
			K	B	K	B	K	B
1	Blora 2 Busbar 1	S	4,9	380	<1	5,1	<1	<1
2	Rembang 1 Busbar 2 (>6 Bln)	R	7,3	854	1,2	3,2	<1	<1
3		S	5,5	140	1,1	2,2	<1	<1
4	Rembang 2 Busbar 2 (>6 Bln)	T	6,2	806	1,3	3,4	<1	<1
5		R	2,3	185	<1	2,2	<1	<1
6	Blora 1 Busbar 1 (5 Bln)	S	2,2	191	<1	2,1	<1	<1
7		T	3,1	184	<1	2,5	<1	<1
8	Blora 1 Busbar 1 (5 Bln)	R	1,3	3,5	<1	1,7	<1	<1
9		S	1,2	3,3	<1	1,6	<1	<1
10		T	1,1	3,1	<1	1,5	<1	<1

4.8 Perhitungan Arus Bocor Resistif

Perhitungan arus bocor resistif (I_{res}) berdasarkan nilai resistansi isolator dan tegangan uji 5620 V-5630 V. Tabel 4.4 menunjukkan arus bocor resistif semua *bay* dengan satuan mikro Ampere (μ A). Sampel pada *bay* Blora 2 PMS busbar 1 fasa S berdasarkan persamaan (2.8).

Keadaan kering sebelum pemeliharaan:

$$I_{res} = \frac{5620 V}{204 \times 10^9 \Omega}$$

$$I_{res} = 27,5 \text{ nA}$$

Keadaan basah sebelum pemeliharaan:

$$I_{res} = \frac{5620 V}{2,64 \times 10^9 \Omega}$$

$$I_{res} = 2,1 \text{ } \mu\text{A}$$

Keadaan kering setelah pemeliharaan tanpa pelapis:

$$I_{res} = \frac{5620 V}{>1000 \times 10^9 \Omega}$$

$$I_{res} = < 5,6 \text{ nA}$$

Keadaan basah setelah pemeliharaan tanpa pelapis:

$$I_{res} = \frac{5620 V}{190 \times 10^9 \Omega}$$

$$I_{res} = 29,5 \text{ nA}$$

Keadaan kering setelah pemeliharaan dengan pelapis:

$$I_{res} = \frac{5620 V}{>1000 \times 10^9 \Omega}$$

$$I_{res} = < 5,6 \text{ nA}$$

Keadaan basah setelah pemeliharaan dengan pelapis:

$$I_{res} = \frac{5620 V}{>1000 \times 10^9 \Omega}$$

$$I_{res} = < 5,6 \text{ nA}$$

Tabel 4.4 Arus bocor resistif

No	Penghantar (Interval)	Fasa	K1 (μA)		K2 (μA)		K3 (μA)	
			K	B	K	B	K	B
1	Blora 2 Busbar 1	S	27,5 ^{E-3}	2,1	<5,6 ^{E-3}	29,5 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}
2	Rembang 1	R	41,3 ^{E-3}	4,8	7 ^{E-3}	18,2 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}
3	Busbar 2 (>6 Bln)	S	31,2 ^{E-3}	7,9 ^{E-2}	6,4 ^{E-3}	12,4 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}
4		T	35,3 ^{E-3}	4,5	7,7 ^{E-3}	19,7 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}
5	Rembang 2	R	13,2 ^{E-3}	1,04	<5,6 ^{E-3}	12,9 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}
6	Busbar 2 (>6 Bln)	S	12,9 ^{E-3}	1,08	<5,6 ^{E-3}	11,9 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}
7		T	17,5 ^{E-3}	1,04	<5,6 ^{E-3}	14,2 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}
8	Blora 1 Busbar 1 (5 Bln)	R	7,3 ^{E-3}	20 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	10,1 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}
9		S	6,8 ^{E-3}	19 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	9 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}
10		T	6,5 ^{E-3}	17,7 ^{E-}	<5,6 ^{E-3}	8,6 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}	<5,6 ^{E-3}

4.9 Tahanan Isolasi Isolator Karet silikon

Dalam penelitian ini, diambil sampel dari isolator dengan bahan lain yang terdapat pada gardu induk yang sama dan mempunyai kondisi polutan yang sama yaitu pada isolator yang pada *lightning arrester* (LA) terpasang. Pengukuran isolator pada LA diberlakukan kondisi yang sama dengan isolator tipe C yang menjadi obyek utama penelitian ini. Pengukuran dilaksanakan pada *bay* Rembang 1, Rembang 2, Blora 1, Blora 2 Fasa R, S, T GI 150 kV Semen Indonesia. Tabel 4.5 menunjukkan hasil pengukuran tahanan isolasi pada isolator karet silikon.

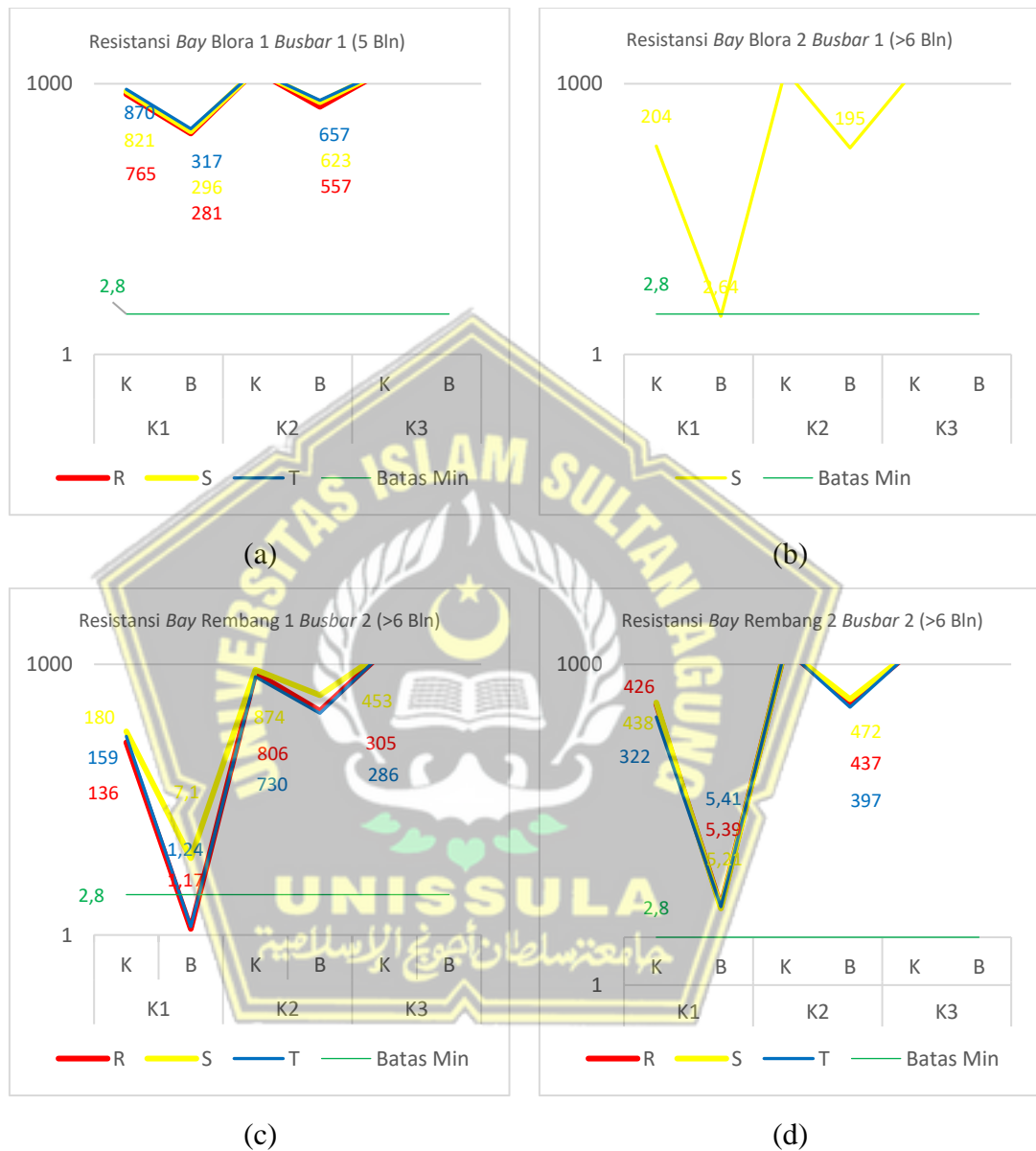
Tabel 4.5 Hasil ukur isolator jenis karet silikon

No	Penghantar (Interval)	Fasa	Teg. (V)	K1 (GΩ)		K2 (GΩ)		K3 (GΩ)	
				K	B	K	B	K	B
1	Rembang 1	R		OL	OL	OL	OL	OL	OL
2	Busbar 2 (>6	S	5620	OL	OL	OL	OL	OL	OL
3	Bln)	T		OL	OL	OL	OL	OL	OL
4	Rembang 2	R		OL	OL	OL	OL	OL	OL
5	Busbar 2 (>6	S	5630	OL	OL	OL	OL	OL	OL
6	Bln)	T		OL	OL	OL	OL	OL	OL
7	Blora 1 Busbar	R		OL	OL	OL	OL	OL	OL
8	1 (5 Bln)	S	5620	OL	OL	OL	OL	OL	OL
9		T		OL	OL	OL	OL	OL	OL

4.10 Grafik Analisa

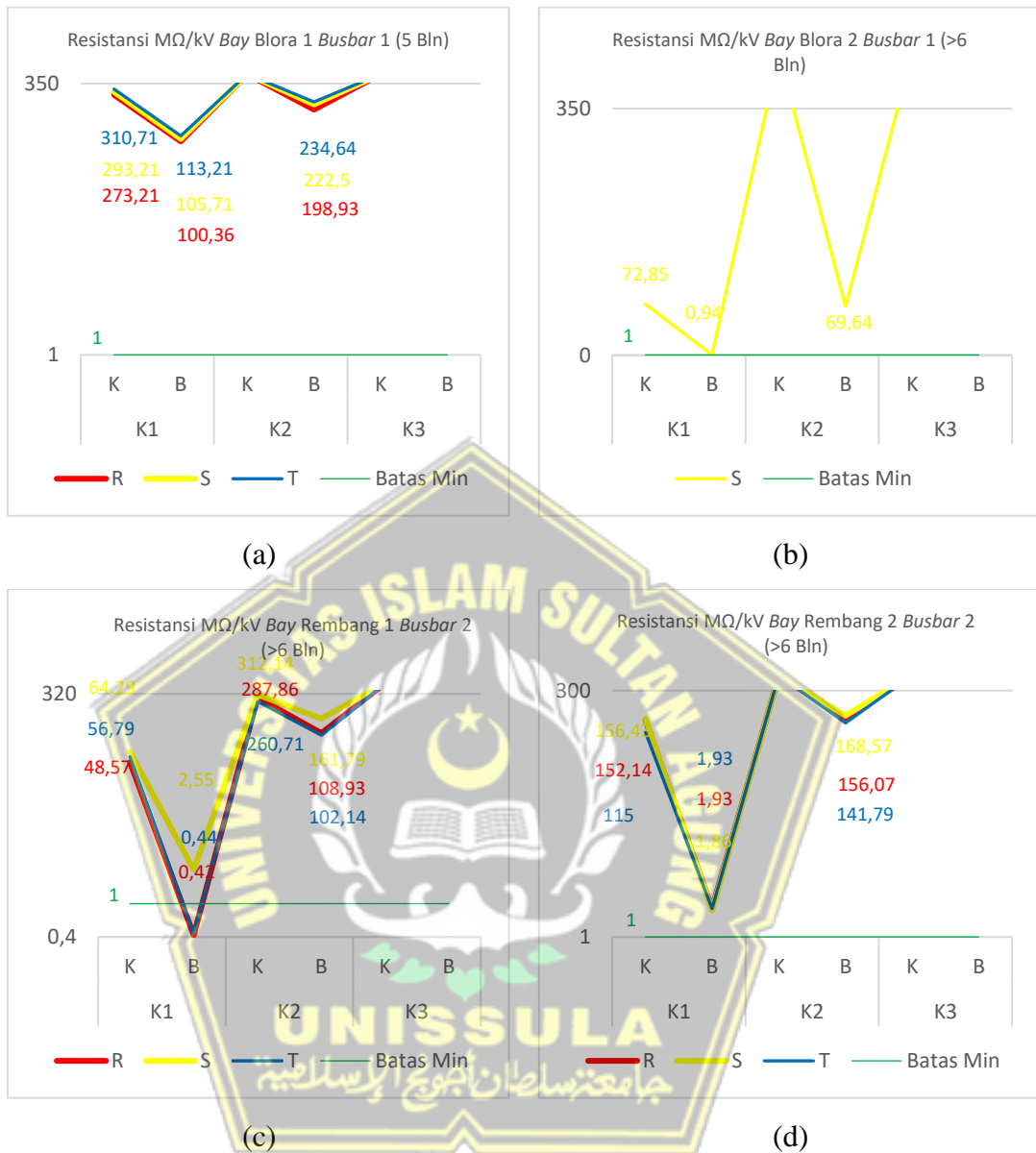
Pengukuran resistansi isolator dilakukan di lokasi *bay* Blora 1, *bay* Blora 2, *bay* Rembang 1 dan *bay* Rembang 2 pada obyek isolator keramik tipe C PMS busbar dan isolator karet silikon *lightning arrester* arah *line* fasa R, S, dan T dengan 3 kondisi: K₁ adalah kondisi sebelum dipelihara, K₂ adalah kondisi setelah dipelihara tanpa isolator *cleaning paste* sedangkan K₃ adalah kondisi setelah dipelihara menggunakan isolator *cleaning paste*. Kondisi 1-3 diperlakukan 2 keadaan: K adalah keadaan kering dan B adalah keadaan basah. Hasil dari pengukuran dan penghitungan isolator keramik disajikan dalam grafik dengan *Axis* X untuk kondisi, *axis* Y untuk nilai, garis merah untuk fasa R, garis kuning untuk

fasa S dan garis biru untuk fasa T. Pengukuran secara faktual selama 1 menit, dengan cuaca yang cerah, nilai suhu lingkungan 31°C dan nilai *humidity* 52%.



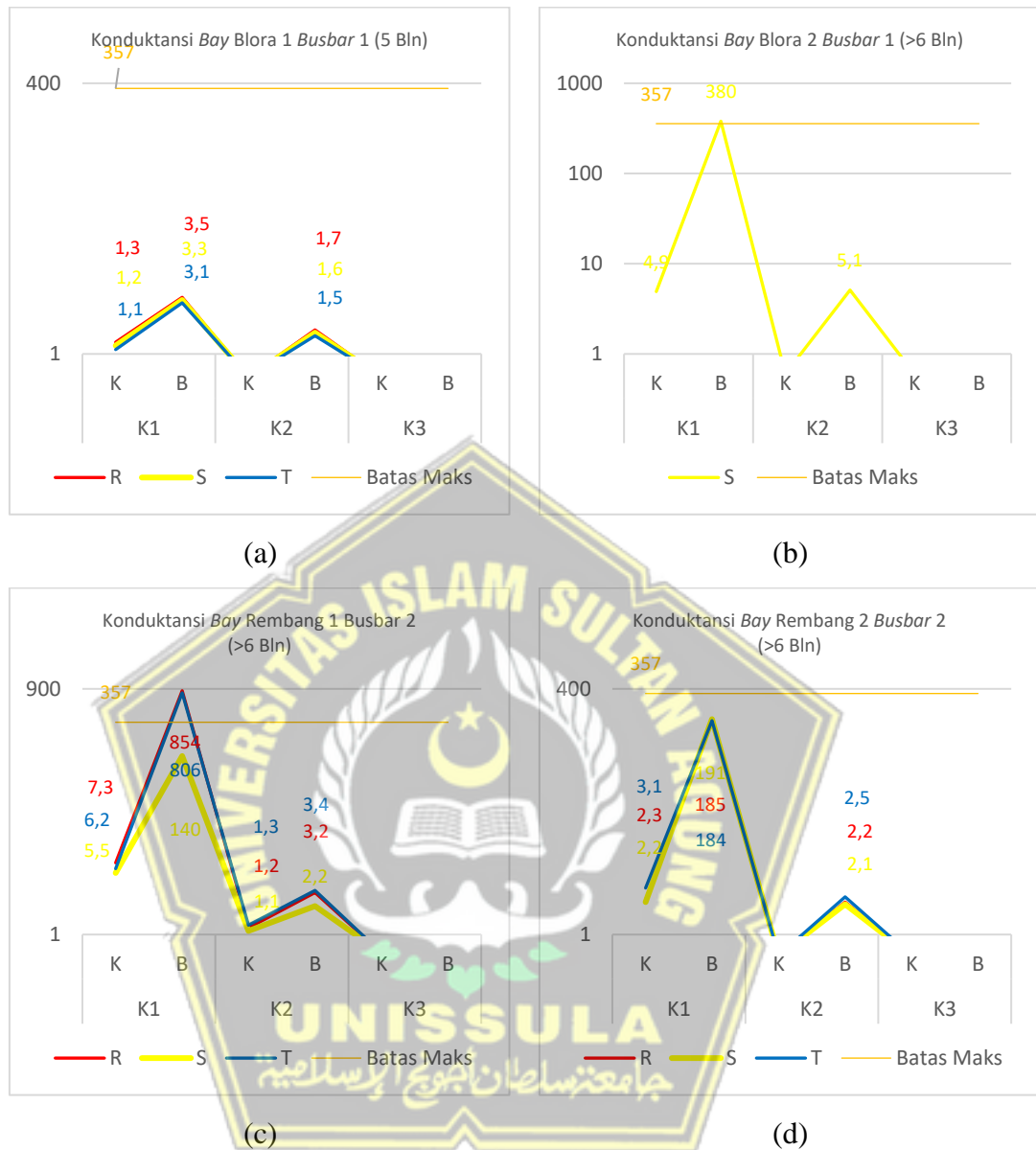
Gambar 4.1 Grafik resistansi isolator keramik pada bay: (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2

Gambar 4.1 memperlihatkan hasil pengukuran resistansi faktual pada isolator keramik di GI 150 kV Semen Indonesia. Gambar 4.1(b) menunjukkan 1 obyek dan Gambar 4.1(c) menunjukkan 2 obyek bernilai di bawah acuan minimal 2,8 G Ω (garis hijau) saat K₁ (kondisi sebelum dipelihara) keadaan B (basah).



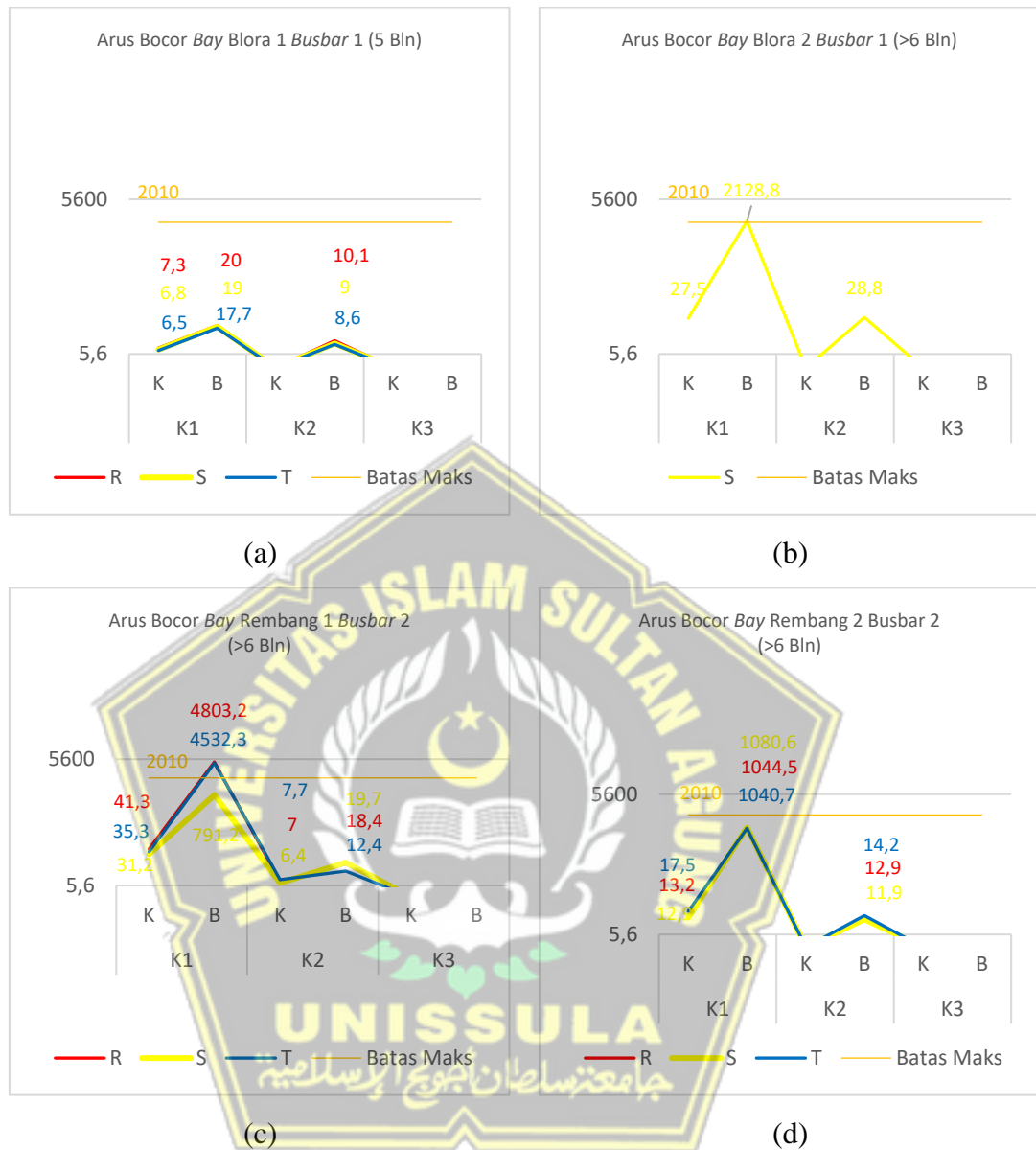
Gambar 4.2 Grafik resistansi per kV bay: (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2

Gambar 4.2 memperlihatkan garis hijau sebagai batasan minimal yang telah dikonversi ke nilai 1 MΩ/kV. Konversi dihitung dengan membagi hasil ukur dengan 2,8 GΩ berdasarkan resistansi minimal. Gambar 4.2(b) menunjukkan 1 obyek dan Gambar 4.2(c) menunjukkan 2 obyek isolator berada di bawah nilai standar 1 MΩ/kV pada K₁ (kondisi sebelum dipelihara) keadaan B (basah).



Gambar 4.3 Grafik konduktansi isolator keramik bay: (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2

Gambar 4.3 memperlihatkan hasil dari perhitungan konduktansi dari data hasil ukur resistansi isolator keramik dengan garis jingga menunjukkan batas maksimal konduktansi 357 p Ω . Gambar 4.3(b) menunjukkan 1 obyek dan Gambar 4.3(c) menunjukkan 2 obyek memiliki nilai melewati batas acuan maksimal konduktansi >357 p Ω pada K₁ (kondisi sebelum dipelihara) keadaan B (basah).



Gambar 4.4 Grafik arus bocor isolator keramik bay: (a) Blora 1, (b) Blora 2, (c) Rembang 1, (d) Rembang 2

Gambar 4.4 memperlihatkan hasil dari perhitungan arus bocor berdasarkan dari data hasil ukur resistansi isolator keramik dengan garis jingga menunjukkan batas maksimal arus bocor 2010 nA. Nilai arus bocor isolator keramik dinyatakan dalam satuan nano Ampere (nA) berdasarkan perhitungan dengan persamaan I_{res} dengan tegangan injek 5630 V secara faktual. Hasil penghitungan disajikan kedalam bentuk grafik guna mempermudah analisa. Gambar 4.4(b) menunjukkan 1

obyek dan Gambar 4.4(c) menunjukkan 2 obyek yang bernilai melebihi batas acuan arus bocor maksimal pada K_1 (kondisi sebelum dipelihara) keadaan B (basah).

Tabel 4.6 merangkum obyek isolator keramik yang memiliki nilai resistansi $< 2,8 \text{ G}\Omega$ sesuai dengan Gambar 4.1(b) dan Gambar 4.1(c). Tabel 4.7 merangkum obyek isolator keramik dengan nilai resistansi $< 1 \text{ M}\Omega/\text{kV}$ berdasarkan Gambar 4.2(b) dan Gambar 4.2(c). Tabel 4.8 merangkum hasil perhitungan konduktansi dari isolator keramik yang memiliki nilai $> 357 \text{ p}\Omega$ mengacu pada Gambar 4.3(b) dan Gambar 4.3(c). Tabel 4.9 merangkum beberapa obyek isolator keramik yang memiliki nilai arus bocor $> 2010 \text{ nA}$ sesuai dengan Gambar 4.4(b) dan Gambar 4.4(c).

Tabel 4.6 Nilai resistansi obyek di bawah standar

Bay	Busbar	Fasa	Kondisi	Keadaan	Nilai ($\text{G}\Omega$)	Batas ($\text{G}\Omega$)
Blora 2	1	S	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 4.7 Nilai resistansi obyek di bawah $1 \text{ M}\Omega/\text{kV}$

Bay	Busbar	Fasa	Kondisi	Keadaan	Nilai ($\text{M}\Omega/\text{kV}$)	Batas ($\text{M}\Omega/\text{kV}$)
Blora 2	1	S	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 4.8 Nilai konduktansi obyek melebihi standar

Bay	Busbar	Fasa	Kondisi	Keadaan	Nilai ($\text{p}\Omega$)	Batas ($\text{p}\Omega$)
Blora 2	1	S	K_1	B	380	≤ 357
Rembang 1	2	R	K_1	B	854	≤ 357
Rembang 1	2	T	K_1	B	806	≤ 357

Tabel 4.9 Nilai arus bocor obyek melebihi standar

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

Tabel 4.10 menunjukkan hasil pengukuran nilai resistansi isolator karet silikon pada *lightning arrester* dengan lokasi 4 bay yang sama, waktu, metode, besar tegangan uji, dan kondisi yang sama dengan isolator keramik. Hasil pengukuran isolator karet silikon akan dijadikan pembandingan performa listrik 2 isolator dengan bahan yang berbeda.

Tabel 4.10 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	Over	≥2,8
					Load	
Blora 2	LA	R-S-T	K ₁ -K ₃	K-B	Over	≥2,8
					Load	
Rembang 1	LA	R-S-T	K ₁ -K ₃	K-B	Over	≥2,8
					Load	
Rembang 2	LA	R-S-T	K ₁ -K ₃	K-B	Over	≥2,8
					Load	

Gambar 4.5 memperlihatkan kondisi permukaan isolator berbahan keramik dan berbahan karet silikon sebelum dipelihara. Isolator keramik sebelum dipelihara menunjukkan permukaan yang tertutupi polutan semen. Polutan semen basah terlihat bersifat higroskopis atau menyerap air. Gambar 4.6 memperlihatkan kondisi dari isolator keramik dan isolator karet silikon setelah dipelihara. Kondisi isolator keramik masih meninggalkan kerak semen, namun kondisi isolator LA sangat bersih tanpa meninggalkan kerak semen yang menempel.



Gambar 4.5 Foto isolator keramik dan karet silikon pada kondisi sebelum pemeliharaan dalam keadaan basah



Gambar 4.6 Foto isolator keramik dan karet silikon pada kondisi setelah pemeliharaan

4.11 Kondisi Isolator

Kondisi isolator dimaksud adalah kondisi lamanya isolator terpapar hingga pemeliharaan atau dibersihkan kembali, serta tingkat kebersihan saat proses pembersihan. Kondisi pembasahan isolator juga mempengaruhi besaran nilai resistansi, konduktansi dan arus bocor pada isolator.

Beberapa kondisi dari isolator, ditampilkan dalam beberapa kondisi terpapar polutan, setelah pemeliharaan tanpa pelapis dan setelah pemeliharaan dengan pelapis. Menilik dari grafik yang telah dipaparkan, akan diambil sampel foto kondisi dari isolator yang mempunyai nilai cukup dan mempunyai nilai yang bagus sebagai perbandingan. Gambar 4.7, Gambar 4.8, Gambar 4.9 merupakan kondisi isolator *bay* Rembang 1 bus 2 dengan waktu pemeliharaan diatas 6 bulan.



Gambar 4.7 Isolator bay Rembang 1 bus 2 sebelum pemeliharaan



Gambar 4.8 Isolator bay Rembang 1 busbar 2 sebelum pemeliharaan dalam kondisi basah



Gambar 4.9 Isolator *bay* Rembang 1 *busbar* 2 Isolator setelah pemeliharaan

Gambar 4.10, Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 merupakan kondisi isolator *bay* Blora 1 *busbar* 1. interval waktu pemeliharaan 5 bulan pada *bay* Blora 1. Kondisi memperlihatkan perbedaan yang sangat signifikan setelah pemeliharaan pada isolator keramik.



Gambar 4.10 Isolator *bay* Blora 1 *busbar* 1 sebelum pemeliharaan



Gambar 4.11 Isolator *bay* Blora 1 *busbar* 1 sebelum pemeliharaan kondisi basah



Gambar 4.12 Isolator *bay* Blora 1 *busbar* 1 setelah pemeliharaan

Sebagai tambahan data untuk analisis, berbeda dengan 2 kondisi isolator sebelumnya dimana kondisi isolator LA yang berbahan karet silikon pada Tabel 4.10, nilai tahanan isolasi menunjukkan OL atau diatas $1000\text{ G}\Omega$ pada setiap kondisi. Gambar 4.8 dan Gambar 4.10 menunjukkan kondisi isolator karet silikon pada LA sebelum dan setelah pemeliharaan. Pada kondisi setelah pemeliharaan, terlihat tidak ada kerak semen yang menempel pada isolator.



Gambar 4.13 Isolator LA sebelum pemeliharaan



Gambar 4.14 Isolator LA setelah pemeliharaan

4.12 Analisa Data

Data yang tersaji hasil pengukuran resistansi, perhitungan konduktansi dan arus bocor resistif isolator keramik menunjukkan pada 4 bay di GI 150 kV Semen Indonesia yang diteliti, terdapat 3 obyek isolator memiliki kondisi tidak memenuhi nilai acuan yang ditetapkan dan beberapa obyek berada pada kondisi kurang optimal saat saat berada pada K₁ (sebelum dipelihara) dalam keadaan B (basah). Nilai pada saat K₂ (setelah dipelihara tanpa pelapis) dan K₃ (setelah dipelihara dengan pelapis) menunjukkan peningkatan performa yang sangat signifikan baik dalam keadaan kering ataupun basah. Polutan debu semen dari data yang tersaji sangat mempengaruhi fluktuasi nilai resistansi, konduktansi dan arus bocor isolator berbahan keramik. Pemeliharaan isolator mampu meningkatkan nilai resistansi, konduktansi dan arus bocor resistif berturut-turut naik >1 TΩ atau OL dari terendah 1,17 GΩ, konduktansi turun <1 pS dari tertinggi 854 pS dan arus bocor resistif turun <5,6 nA dari tertinggi 4803 nA. Interval pemeliharaan 5 bulan memiliki performa yang terbaik daripada isolator dengan interval waktu pemeliharaan 6 bulan atau lebih. Hal tersebut dikarenakan semakin lama interval waktu pemeliharaan, semakin tebal pula penumpukkan debu semen ditambah dengan pengerasan semen yang menempel pada permukaan isolator karena cuaca di Rembang di atas 6 bulan terjadi pergantian musim kemarau atau musim hujan.

Faktor penentu kondisi isolator selain faktor polutan dan kondisi alam adalah faktor usaha pemeliharaan isolator karena akan menentukan nilai resistansi saat kondisi setelah dipelihara atau saat sebelum interval pemeliharaan selanjutnya. Isolator yang tidak dibersihkan secara optimal terutama pengelupasan kerak semen yang menempel pada permukaan isolator atau tanpa menggunakan isolator *cleaning paste*, menyebabkan penumpukkan debu yang semakin tebal. Permukaan isolator yang berkerak semen, menyebabkan penurunan fungsi *self cleaning* isolator dimana debu akan semakin menempel, ditambah dengan saat hujan air akan terperangkap oleh kerak yang menempel. Proses tersebut akan berlangsung berkelanjutan dan berulang apabila pembersihan isolator kurang optimal. Sifat higroskopis dapat menurunkan nilai resistansi terbukti pada isolator keramik bay Rembang 1 busbar 2 menunjukkan performa yang kurang optimal pada K₁ (sebelum dipelihara) dalam

keadaan B (basah) disebabkan pembersihan isolator pada periode sebelumnya kurang optimal mengakibatkan kerak bertumpuk dan menebal jika interval pemeliharaan >6 bulan. Berdasarkan data, kondisi isolator keramik *bay* Rembang 1 *busbar* 2 berbeda dengan isolator *bay* Blora 1 *busbar* 1 dikarenakan isolator *bay* Blora 1 *busbar* 1 dibersihkan secara optimal dengan interval waktu pemeliharaan hanya 5 bulan sehingga performa isolator keramik pada K_1 (sebelum dipelihara) dalam keadaan B (basah) menunjukkan kondisi normal pada umumnya.

Tabel 4.10 memperlihatkan isolator dengan bahan karet silikon pada kondisi dan perlakuan sama dengan isolator berbahan keramik, saat pengukuran resistansi menunjukkan *over load* atau bernilai $>1 T\Omega$ sehingga dapat disimpulkan isolator berbahan karet silikon memiliki performa lebih unggul dibandingkan isolator berbahan keramik dalam menghadapi paparan polutan debu semen. Isolator karet silikon mempunyai sifat *water repellent* meskipun tanpa menggunakan pelapis dimana penelitian membuktikan pada saat kondisi pada K_1 (sebelum dipelihara) dalam keadaan B (basah), air tidak meresap dan juga tidak menggumpalkan debu semen namun air yang menyentuh permukaan isolator langsung jatuh seperti efek pada daun talas. Penelitian juga membuktikan saat akan dikondisikan pada K_2 (kondisi setelah dipelihara), isolator mudah dibersihkan dan tidak menunjukkan adanya debu semen yang menempel pada permukaan isolator meskipun dengan interval waktu pemeliharaan yang sama dengan isolator keramik. Sifat dari isolator berbahan karet silikon yang dinilai lebih unggul dalam menghadapi paparan polutan debu semen mampu menjadi solusi jangka panjang guna meningkatnya keandalan sistem penyaluran tenaga listrik GI 150 kV Semen Indonesia.

4.13 Error Analisis

Error analisis ditunjukkan pada nilai injek saat pengukuran. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi dari *battery*. Persentase *error* pada tegangan uji yang variasinya sebesar 5620 V dan 5630 V. Nilai tersebut mempengaruhi besarnya nilai acuan tahanan isolasi minimal, nilai acuan konduktansi minimal dan nilai acuan arus bocor maksimal. Besarnya *error* dihitung dengan persamaan (4.1).

$$\%V_{error} = \frac{V_{injek\ acuan} - V_{injek\ non\ acuan}}{V_{injek\ non\ acuan}} \times 100\% \quad (4.1)$$

Dari persamaan (4.1) dapat dihitung *error* yang terdapat pada penelitian.

$$\%V_{error} = \frac{5630 - 5620}{5620} \times 100\%$$

$$\%V_{error} = 0,17\%$$

Dari persentase nilai *error* diatas, didapatkan nilai yang sangat kecil hanya sebesar 0,17% pada setiap nilai perhitungan konduktansi dan arus bocor yang menggunakan tegangan injek 5620 V.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penurunan nilai polarisasi index isolator keramik GI 150 kV Semen Indonesia disebabkan oleh paparan polutan debu semen dengan kandungan unsur logam. Pada *bay* Blora 2 busbar 1 fasa S, *bay* Rembang 1 busbar 2 fasa R dan T pada kondisi sebelum dipelihara dalam keadaan basah mempunyai nilai resistansi di bawah batas acuan resistansi minimal yang ditentukan sesuai hasil ukur faktual di lokasi. Pemeliharaan dengan interval waktu di atas 6 bulan beresiko paling tinggi mengalami *breakdown* isolator dibandingkan interval waktu pemeliharaan di bawah 6 bulan. Berdasarkan hasil analisa dan pengamatan fisik, isolator dengan bahan karet silikon memiliki performa elektris lebih baik dari isolator keramik begitu pula sifat isolator berbahan karet silikon yang *water repellent* lebih unggul dalam menghadapi paparan polutan debu semen dan hujan. Performa isolator karet silikon yang lebih unggul dinilai mampu untuk menjadi solusi jangka panjang untuk insatalasi GI 150 kV Semen Indonesia dalam menghadapi paparan polutan debu semen yang ada di lingkungan pabrik semen PT Semen Indonesia (persero) atau untuk gardu induk yang memiliki kondisi dan permasalahan yang sama. Penelitian ini dapat dilanjutkan dan dikembangkan dengan mengganti variabel tegangan operasi dengan tegangan surja guna mengetahui batas minimal resistansi untuk menghadapi lonjakan tegangan dari surja. Metode pengukuran arus bocor juga dapat dilakukan secara *on line* atau dalam keadaan bertegangan menggunakan *leakage current monitoring* (LCM). LCM dapat mengukur arus bocor yang terkonsentrasi arus bocor resistif. Penentuan batas acuan maksimal arus bocor menggunakan persamaan yang ditentukan.

5.2 Saran

1. Pembersihan isolator memperhatikan interval waktu maksimal 6 bulan untuk menghindari kondisi isolator yang tidak memenuhi batas nilai acuan saat terkena faktor pembasahan.

2. Pembersihan isolator semaksimal mungkin dengan tidak menyisakan kerak yang dapat merubah permukaan isolator menjadi bersifat higroskopis karena kerak semen yang mengeras.
3. Pelapisan isolator dengan isolator *cleaning paste* sangat dianjurkan. Walaupun bersifat sementara, namun dapat mendukung sifat *self cleaning* pada isolator.
4. Berdasarkan hasil analisa, dapat direkomendasikan untuk pemilihan isolator berbahan karet silikon sebagai pengganti isolator dengan bahan keramik karena ketahanannya dalam menghadapi paparan polutan debu semen.
5. Penelitian ini masih bisa dikembangkan dengan menghitung resiko terjadinya *flash over* pada isolator dengan menghitung besarnya tegangan surja, baik surja petir maupun surja hubung sebagai variabel untuk menentukan nilai acuan penilaian kondisi isolator.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Hudaya and M. Haddin, "Penurunan Ketahanan Isolator Gardu Induk 150 kV Semen Indonesia," vol. 6, no. 1, pp. 39–48, 2024.
- [2] K. No : 0520 K/DIR/2014 PLN, *Buku Pedoman Pemeliharaan PMS*. Jakarta: PT PLN (Persero), 2014.
- [3] A. Anwar, L. . K. Amali, and Y. Mohamad, "Pengaruh Polutan Taklarut Terhadap Ketahanan Isolator (Studi Kasus PLTU Molotabu)," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 55–61, Oct. 2019, doi: 10.37905/jjee.v1i2.2883.
- [4] B. L. Tobing dan Mustafriend Lubis, "Hubungan Intensitas Polusi Isolator Jaringan Distribusi di Sumatera Utara dengan Jarak Lokasi Isolator dari Pantai," *J. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, Jan. 2008, doi: 10.9744/jte.7.2.63-67.
- [5] N. F. BASO, "Analisis Pengaruh Polutan NaCl Pada Isolator Keramik Tipe Post Pin," *J. Teknol. Elekterika*, vol. 5, no. 1, p. 7, 2021, doi: 10.31963/elekterika.v5i1.2852.
- [6] A. C. Darmadi, K. Kholistianingsih, and P. Yulianto, "Analisis Tahanan Isolasi Pada Isolator Porselin Dan Polimer Terhadap Polutan Garam Di Gistet 500 Kv Adipala Cilacap," *Teodolita Media Komunkasi Ilm. di Bid. Tek.*, vol. 23, no. 2, pp. 42–55, Jan. 2023, doi: 10.53810/jt.v23i2.455.
- [7] D. Fahmi, I. M. Yulistya, D. A. Asfani, and Y. Afif, "Analisis Distribusi Medan Listrik pada Isolator Gantung Jenis Polimer akibat Pengaruh Kontaminan," *J. Nas. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 2, p. 182, 2015, doi: 10.25077/jnte.v4n2.158.2015.
- [8] Armansyah, "Analisa Pengaruh Endapan Polutan Garam Pada Isolator Terhadap Arus Bocor," 2021.
- [9] E. Darmawan and 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, pp. 532–541, 2015, doi: <https://doi.org/10.14710/transient.v4i3.532-541>.

- [10] Ruwah Joto, D. Dhesah Kharisma, Tresna Umar Syamsuri, and Aly Imron, "Pengaruh Efek Kontaminasi Isolator Keramik Terhadap Rugi Daya Saluran Udara Tegangan Tinggi," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 3, pp. 167–171, 2023, doi: 10.33795/elposys.v10i3.4222.
- [11] S. S and S. K. A, "Pengaruh Kabut Garam Terhadap Kinerja Isolator 20 Kv Berbahan Polimer Resin Epoxy," *J. Media Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 41–44, 2012, doi: 10.35508/jme.v1i2.6261.
- [12] S. S and S. K. A, "Pengujian Arus Bocor Isolator 20 Kv Berbahan Polimer Epoxy Resin Dengan Mempertimbangkan Tekanan Dan Kelembaban T-27 T-28," vol. 2012, no. Sainstek, pp. 27–30, 2012, doi: <https://doi.org/10.31219/osf.io/kjwq9>.
- [13] Jumari, Joslen Sinaga, and Sudirman Zega, "Studi Pengaruh Kontaminasi Polusi Udara Pada Isolator Tegangan Menengah 20 kV Pada PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Medan," *J. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 1, pp. 31–43, 2020.
- [14] M. Warmi, Yusreni Fauzan, F. R. Yanti, M. A. Azzahra, and A. Ahmad, "Investigasi Flashover Pada Saluran Transmisi 150 kV Payakumbuh – Koto Panjang," *Sinarint*, pp. 177–184, 2022.
- [15] A. A. Salem *et al.*, "Pollution flashover under different contamination profiles on high voltage insulator: Numerical and experiment investigation," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 37800–37812, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063201.
- [16] E. Adriani Sirait, "Pengaruh Polutan Semen terhadap Nilai Konduktivitas, Nilai Resitivitas dan Arus Bocor pada Isolator Kaca dengan Pengotor Buatan," 2020.
- [17] A. Kusuma Wardhani, "Analisis Perbandingan Pengaruh Debu Semen Antara Isolator Pos Pin Dan Isolator Gantung Terhadap Flashover Menggunakan Metode Short Time Test," 2011.
- [18] K. Rolando Naisbitt, "Analisis Perbandingan Tahanan Isolasi dan Arus Bocor pada Isolator Berbahan Silicon Rubber dan Keramik Akibat Pengaruh Kontaminan Abu Vulkanik dan Belerang," 2018.

- [19] P. Corporate University, *Asesmen Peralatan PMS*. Jakarta: PT PLN (Persero), 2014.
- [20] T. W. M. Salih, *Insulation Materials*. Republic of Iraq: Department of Engineering of Materials Al-Mustansiriyah University, 2016.
- [21] Eric, "Specification Insulator C4-750," in *Insulator*, Hunan: Yang Dong, 2023.
- [22] Solotruster.com, "Warga Gunem Rembang Keluhkan Debu Tambang, PT Semen Gresik Angkat Bicara." Accessed: Oct. 10, 2023. [Online]. Available: <https://solotruster.com/read/51241/Warga-Gunem-Rembang-Keluhkan-Debu-Tambang-PT-Semen-Gresik-Angkat-Bicara>
- [23] B. Pengembangan Latihan Kerja, *Pengukuran Listrik/Elektronika*. Serang: Kementrian Tenaga Kerja, 2014.

