



**PENGARUH POLUTAN GARAM TERHADAP TEGANGAN  
*FLASHOVER* PADA ISOLATOR BERBAHAN KERAMIK  
DAN POLIMER MENGGUNAKAN METODE  
*SLOW RATE OF RISE TEST***

**SKRIPSI**

oleh  
**Mokhamad Irfangi**  
**NIM 121910201001**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2016**



**PENGARUH POLUTAN GARAM TERHADAP TEGANGAN  
*FLASHOVER* PADA ISOLATOR BERBAHAN KERAMIK  
DAN POLIMER MENGGUNAKAN METODE  
*SLOW RATE OF RISE TEST***

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

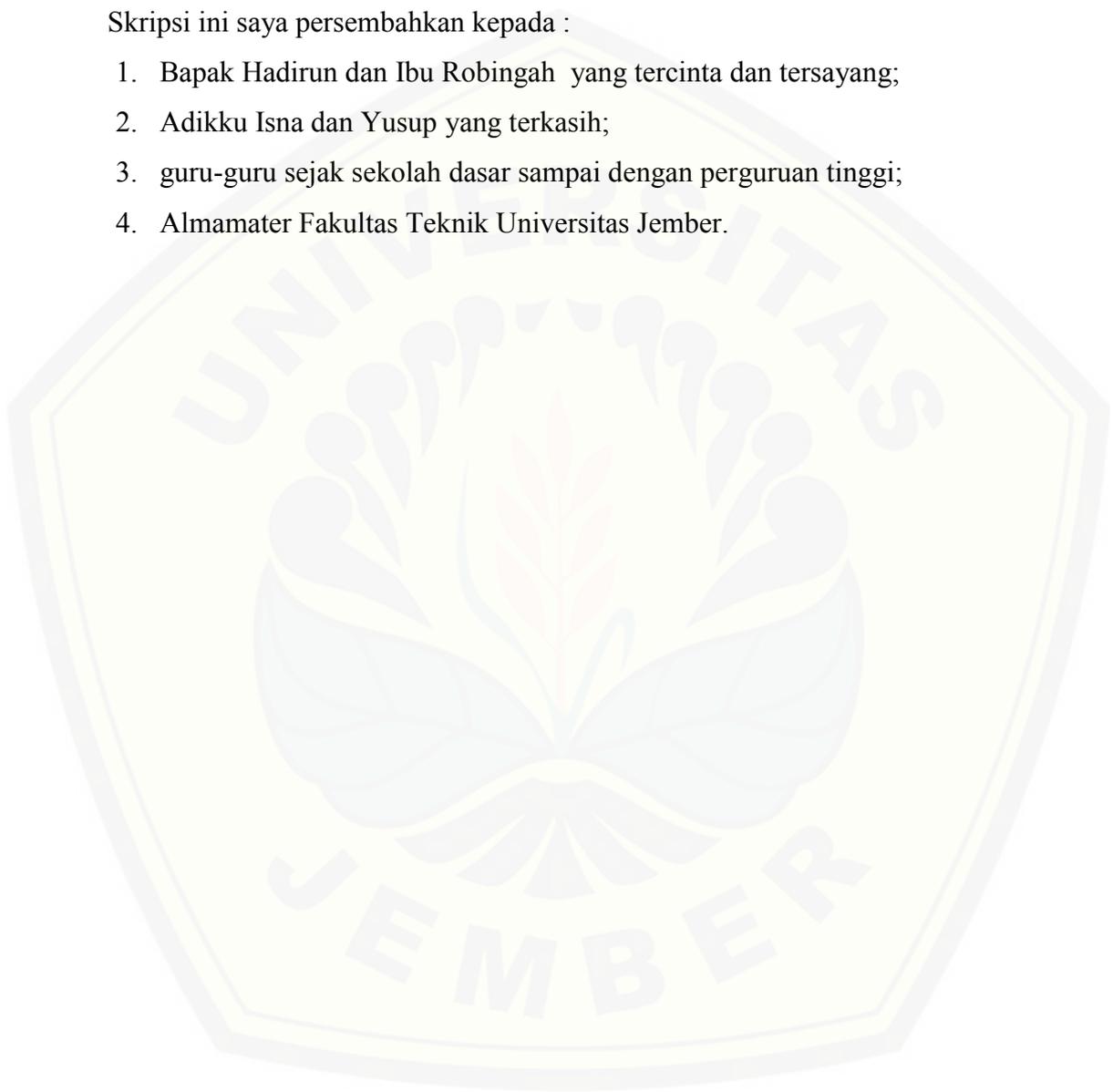
oleh  
**Mokhamad Irfangi**  
**NIM 121910201001**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2016**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan kepada :

1. Bapak Hadirun dan Ibu Robingah yang tercinta dan tersayang;
2. Adikku Isna dan Yusup yang terkasih;
3. guru-guru sejak sekolah dasar sampai dengan perguruan tinggi;
4. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.



## MOTTO

(Hai orang – orang yang beriman, mintalah pertolongan kepada Allah dengan sabar dan shalat, sesungguhnya Allah beserta orang – orang yang sabar.  
(terjemahan Surat *Al-Baqoroh* ayat 153)<sup>\*)</sup><sup>1</sup>

(Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan; Maka apabila kamu telah selesai dari sesuatu urusan, kerjakanlah dengan sungguh – sungguh urusan yang lain. (terjemahan Surat *Al-Insyirah* ayat 6 - 7)<sup>\*\*)</sup>

Sesungguhnya amalan itu tergantung niatnya, dan setiap orang memperoleh pahala sesuai dengan apa yang dia niatkan.<sup>\*\*\*)</sup>

---

<sup>\*)</sup> Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al Qur'an dan Terjemahannya*. Semarang: PT Kumudasmoro Grafindo.

<sup>\*\*)</sup> Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al Qur'an dan Terjemahannya*. Semarang: PT Kumudasmoro Grafindo.

<sup>\*\*\*)</sup> (HR. Bukhori dan Muslim).

## PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

nama : Mokhamad Irfangi

NIM : 121910201001

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul ” *Pengaruh Polutan Garam Terhadap Tegangan Flashover Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Menggunakan Metode Slow Rate Of Rise Test* ” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 16 Noperember 2016

Yang menyatakan,

Mokhamad Irfangi

NIM 121910201001

**SKRIPSI**

**PENGARUH POLUTAN GARAM TERHADAP TEGANGAN  
*FLASHOVER* PADA ISOLATOR BERBAHAN KERAMIK  
DAN POLIMER MENGGUNAKAN METODE  
*SLOW RATE OF RISE TEST***

Oleh

Mokhamad Irfangi

NIM 121910201001

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Pengaruh Polutan Garam Terhadap Tegangan *Flashover* Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Menggunakan Metode *Slow Rate Of Rise Test*” karya Mokhammad Irfangi telah diuji dan disahkan pada :

hari, tanggal : Rabu, 16 Nopember 2016

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.  
NIP 19700404 199601 1 001

Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.  
NIP 19710402 200312 1 001

Anggota II,

Anggota III,

Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T.  
NIP 19710614 199702 1 001

Samsul Bachri M., S.T., M.MT.  
NIP 19640317 199802 1 001

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M  
NIP 19661215 199503 2 001

*Pengaruh Polutan Garam Terhadap Tegangan Flashover  
Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer  
Menggunakan Metode Slow Rate Of Rise Test*

**Mokhamad Irfangi**

*Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember*

**ABSTRAK**

Tegangan *flashover* merupakan kegagalan isolasi yang disebabkan karena pembebanan medan listrik pada permukaan isolator melebihi kapasitas ketahanan elektriknya. *Flashover* ini dapat menimbulkan pemanasan dan dapat merusak isolator. Penyebab terjadinya *flashover* di antaranya yaitu karena pengotoran pada permukaan isolator berupa polutan garam. Garam merupakan bahan polutan yang sering dijumpai pada lokasi pinggiran pantai. Isolator yang diuji berupa isolator keramik dan polimer menggunakan metode yang sesuai dengan standar *American Standard Test Method*, ASTM-D149, yakni metode *Slow Rate of Rise Test* di mana metode ini dijalankan dengan menaikkan tegangan spesimen secara bertahap dengan laju tegangan konstan, mulai dari tegangan uji awal hingga spesimen mengalami tegangan tembus listrik. Terjadinya tembus listrik ini harus pada waktu lebih dari 120 detik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tegangan *flashover* akan semakin turun, seiring dengan bertambah besarnya nilai ESDD. Kemudian hasil perbandingan berupa besarnya tegangan *flashover* antara isolator keramik dan polimer baik dalam kondisi kering dan basah, serta kondisi tanpa polutan dan berpolutan, telah memberikan hasil bahwa isolator keramik lebih baik daripada isolator polimer dari segi besarnya nilai ketahanan tegangan *flashover* – nya, namun isolator polimer lebih baik kinerjanya daripada isolator keramik dari segi besarnya nilai persentase penurunan kinerja isolator.

**Kata kunci** : ESDD, garam, isolator keramik dan polimer, *Slow Rate of Rise Test*, tegangan *flashover*.

*Effect of Pollutants Salt Against Voltage Flashover  
on Insulator Made of Ceramic and Polymer  
Using Method Slow Rate of Rise Test*

**Mokhamad Irfangi**

*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
University of Jember*

**ABSTRACT**

*Voltage flashover is an insulation failure caused by the imposition of an electric field on the insulator surface electric resistance exceeds capacity. This flashover can cause heating and can damage the insulator. The cause of the occurrence of flashover first of which are due to fouling on the surface of the insulator in the form of a salt pollutants. Salt is of pollutants are often found in coastal locations. Insulators were tested in the form of ceramic insulators and polymers using methods that comply with American Standard Test Method, ASTM-D149, which is a method Slow Rate of Rise Test in which the method is carried out by raising the voltage of the specimen gradually with the pace of constant voltage, ranging from the test voltage beginning to the breakdown voltage electrical specimens. The occurrence of this electricity translucent should be on time more than 120 seconds. The results showed that the value of the voltage flashover will fall, along with increasing the value ESDD. Then the comparison results in the form of the magnitude of the voltage flashover between the ceramic insulator and polymer both in dry and wet conditions, and conditions without pollutants and berpolutan, has delivered results that ceramic insulators better than the polymer insulator in terms of the value of resistance voltage flashover - his, but the polymer insulator better performance than the ceramic insulator in terms of the value of the percentage reduction in the performance of the insulator.*

**Key word** : ESDD, ceramic and polymer insulators, salt, Slow Rate of Rise Test, voltage flashover.

## RINGKASAN

**Pengaruh Polutan Garam Terhadap Tegangan *Flashover* Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Menggunakan Metode *Slow Rate Of Rise Test*;** Mokhamad Irfangi, 121910201001; 2016: 71 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Isolator merupakan salah satu peralatan yang sangat penting dalam sistem penyaluran energi listrik. Karena pentingnya isolator dalam sistem penyaluran energi listrik, maka perlu dijaga keandalannya. Salah satu bentuk penjagaan keandalannya yaitu dengan menguji tegangan *flashover* pada isolator. Tegangan *flashover* merupakan kegagalan isolasi yang disebabkan karena pembebanan medan listrik pada permukaan isolator melebihi kapasitas ketahanan elektriknya. *Flashover* ini dapat menimbulkan pemanasan dan dapat merusak isolator. Penyebab terjadinya *flashover* di antaranya yaitu karena pengotoran permukaan isolator. Pada kasus pengotoran permukaan isolator, umumnya disebabkan karena adanya bahan polutan yang menempel pada permukaan isolator seperti bahan polutan garam. Garam merupakan bahan polutan yang sering dijumpai pada pinggiran pantai. Biasanya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berlokasi di pinggiran pantai. Sehingga pada jaringan listriknya terutama komponen berupa isolator dapat terpengaruh adanya bahan polutan garam. Untuk itu perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh bahan polutan garam terhadap isolator berbahan keramik dan polimer.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh bahan polutan garam terhadap tegangan *flashover* pada isolator berbahan keramik dan polimer menggunakan metode *Slow Rate of Rise Test*, serta untuk mengetahui hasil perbandingan antara isolator berbahan keramik dan polimer pada hasil pengujian dalam kondisi kering dan basah, serta dalam kondisi isolator tanpa polutan garam dan dalam kondisi isolator berpolutan garam dengan variasi sudut penyemprotan  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $135^\circ$  serta dengan tiga buah sudut tersebut secara langsung.

Isolator diuji menggunakan metode yang sesuai dengan standar *American Standard Test Method*, ASTM-D149. Standar pengujian ASTM-D149, yakni metode *Slow Rate of Rise Test*, yang mana metode ini dijalankan dengan menaikkan tegangan spesimen secara bertahap dengan laju tegangan konstan, mulai dari tegangan uji *start*  $V_s$  hingga spesimen mengalami tegangan tembus listrik. Hal ini ditandai dengan terjadinya suara letupan dan percikan api di permukaan isolator seiring dengan terjadinya *flashover* pada isolator. Terjadinya tembus listrik ini harus pada waktu lebih dari 120 detik sejak tegangan pengujian dikenakan pada spesimennya. Apabila dalam pengujian sekelompok spesimen, lebih dari satu spesimen yang mengalami tembus listrik pada waktu kurang dari 120 detik, perlu dilakukan tindakan sebagai berikut : tegangan uji *start*  $V_s$  dikurangi, atau laju tegangan ( $\Delta V/\Delta t$ ) diturunkan, atau mengurangi tegangan uji *start*  $V_s$  dan laju tegangan secara bersamaan. Jika lebih dari satu spesimen mengalami tembus listrik pada tegangan yang kurang dari  $1,5V_s$  maka nilai tegangan uji *start*  $V_s$  dikurangi. Jika tembus listrik terjadi pada tegangan  $2,5V_s$  dan waktu terjadinya tembus listrik lebih dari 120 detik, nilai  $V_s$  dinaikkan. Pengambilan data dilakukan dengan melakukan pengulangan sebanyak tiga kali, kemudian diambil rata-ratanya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tegangan *flashover* akan semakin turun, seiring dengan bertambah besarnya nilai ESDD. Pada isolator keramik saat ESDD sebesar  $0,027 \text{ mg/cm}^2$ , dengan tegangan *flashover* sebesar 38 kV isolator mengalami penurunan kinerja terbanyak, yakni sebesar 36,667 %, dan pada isolator polimer saat ESDD sebesar  $0,130 \text{ mg/cm}^2$ , dengan tegangan *flashover* sebesar 32,667 kV isolator mengalami penurunan kinerja terbanyak, yakni sebesar 28,47 %. Hasil perbandingan berupa besarnya tegangan *flashover* antara isolator berbahan keramik dan polimer baik dalam kondisi kering dan basah, serta kondisi tanpa polutan dan berpolutan, telah memberikan hasil bahwa isolator berbahan keramik lebih baik daripada isolator berbahan polimer dari segi besarnya nilai ketahanan tegangan *flashover* – nya, namun isolator polimer lebih baik kinerjanya daripada isolator keramik dari segi besarnya nilai persentase penurunan kinerja isolator.

## PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Polutan Garam Terhadap Tegangan *Flashover* Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Menggunakan Metode *Slow Rate Of Rise Test*”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi strata satu (S1) Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Selama penyusunan skripsi ini penulis mendapat bantuan berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah M.UM, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Bapak Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember;
3. Bapak Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S-1 Teknik Elektro Universitas Jember;
4. Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga dan memberikan dukungan materi dalam kelancaran penyusunan skripsi;
5. Bapak Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah memberikan banyak masukan untuk penyempurnaan skripsi ini;
6. Bapak Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T., selaku dosen penguji utama dan Bapak Samsul Bachri M., S.T., M.MT, selaku dosen penguji anggota yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun sehingga sangat membantu terhadap penyempurnaan skripsi ini;
7. Bapak Dr. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc. dan Bapak Naryono selaku kepala dan teknisi Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro FTI – ITS Surabaya atas segala bantuan dan bimbingannya;

8. Kedua orang tuaku terkasih, Bapak Hadirun dan Ibu Robingah yang telah memberikan segalanya, yang selalu mendoakan, mencurahkan kasih sayang, memberikan perhatian, memberi semangat yang tiada hentinya dan telah memberikan dukungan materi untuk menyelesaikan skripsi ini;
9. Adikku Isna dan Yusup yang selalu memberikan motivasi saat mulai patah semangat, memberikan dukungan lewat doa dan kesabaran serta menghibur dikala duka;
10. Partner Skripsi Farah Adibah dan Kyrana yang telah membantu dalam proses pengujian skripsi;
11. Agus Hariana Loka, Arif Puguh, Arif Wicak, Dodi, Firdaus, Hasbulloh, Sujarwo, Umam, Wisnu yang selalu menghibur dan memberikan semangat selama penulis berada di perantauan;
12. Rekan-rekan satu Bimbingan Arga, Devri, Firdaus, Ilham, dan Uden, yang telah memberikan bantuan dan masukan untuk menyelesaikan skripsi ini;
13. Teman-teman seperjuangan, SATE UJ 2012 yang telah menjadi keluarga kedua selama penulis merantau;
14. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah mendukung dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 16 Nopember 2016

Penulis

**DAFTAR ISI**

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PEMBIMBING</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>ABSTRAK</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>RINGKASAN</b> .....	ix
<b>PRAKATA</b> .....	xi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	2
<b>1.3 Tujuan Penelitian</b> .....	3
<b>1.4 Manfaat Penelitian</b> .....	3
<b>1.5 Batasan Masalah</b> .....	3
<b>1.6 Sistematika Penulisan</b> .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
<b>2.1 Isolasi</b> .....	5
<b>2.2 Isolator Saluran Udara</b> .....	5
2.2.1 Bahan-bahan Isolasi .....	5
2.2.2 Bahan Porselin (keramik) .....	5
2.2.3 Bahan Polimer Resin Epoksi .....	7
2.2.4 Klasifikasi Isolator Saluran Udara .....	8

<b>2.3 Karakteristik Isolator</b> .....	8
2.3.1 Karakteristik Elektrik .....	8
2.3.2 Karakteristik Mekanis .....	9
<b>2.4 Kegagalan Isolator</b> .....	9
2.4.1 Kegagalan Isolator dalam Melaksanakan Fungsinya .....	10
<b>2.5 Flashover Pada Isolator</b> .....	11
<b>2.6 Isolator Berpolutan</b> .....	13
2.6.1 Sifat Polutan .....	13
2.6.2 Pembentukan Polutan Pada Isolator .....	14
2.6.3 Penggolongan Tingkat Pengotoran .....	15
2.6.4 Isolator pada Kondisi Pengotoran .....	15
<b>2.7 Menghitung ESDD dan Konduktifitas</b> .....	16
<b>2.8 Metode <i>Slow Rate Of Rise Test</i> (Pengujian dengan     Kenaikan Tegangan Perlahan)</b> .....	17
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	19
<b>3.1 Tempat dan Waktu Penelitian</b> .....	19
3.1.1 Tempat Penelitian .....	19
3.1.2 Waktu Penelitian .....	19
<b>3.2 Alat dan Bahan</b> .....	20
<b>3.3 Tahap Penelitian</b> .....	21
<b>3.4 Metode Penelitian</b> .....	21
3.4.1 Studi Literatur .....	21
3.4.2 Praktek Langsung .....	21
3.4.3 Pengambilan Data .....	24
3.4.4 Analisis Data .....	25
<b>3.4 Diagram Alur Penelitian</b> .....	26
<b>BAB 4. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	27
<b>4.1 Perhitungan <i>Equivalent Salt Deposit Density</i> (ESDD)         Pada Pengujian Isolator Berbahan Keramik dan Polimer</b> .	27
<b>4.2 Hasil Pengujian Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator         Berbahan Keramik dan Polimer</b> .....	35

4.2.1 Hasil Pengujian Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik .....	35
4.2.2 Hasil Pengujian Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Polimer .....	40
<b>4.3 Perbandingan Hasil Pengujian Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer .</b> .....	<b>44</b>
4.3.1 Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik Kondisi Kering dan Basah .....	45
4.3.2 Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Polimer Kondisi Kering dan Basah .....	51
4.3.3 Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Kondisi Kering .....	57
4.3.4 Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Kondisi Basah .....	62
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	<b>68</b>
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	<b>68</b>
<b>5.2 Saran</b> .....	<b>68</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>70</b>
<b>LAMPIRAN-LAMPIRAN</b>	
<b>A. PERHITUNGAN</b> .....	<b>72</b>
<b>B. DATA HASIL PENGUJIAN</b> .....	<b>86</b>
<b>C. DOKUMENTASI PENELITIAN</b> .....	<b>102</b>

**DAFTAR TABEL**

	Halaman
2.1 Penggolongan Tingkat Pengotoran .....	15
2.2 Penggolongan Tingkat Pengotoran Berdasarkan Kondisi Geografis.....	15
3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian .....	19
4.1 Hasil Pengukuran Resistansi, ESDD, dan Tingkat Pengotoran Pada Isolator Berbahan Keramik Kondisi Kering .....	29
4.2 Hasil Pengukuran Resistansi, ESDD, dan Tingkat Pengotoran Pada Isolator Berbahan Keramik Kondisi Basah .....	31
4.3 Hasil Pengukuran Resistansi, ESDD, dan Tingkat Pengotoran Pada Isolator Berbahan Polimer Kondisi Kering .....	32
4.4 Hasil Pengukuran Resistansi, ESDD, dan Tingkat Pengotoran Pada Isolator Berbahan Polimer Kondisi Basah .....	34
4.5 Hasil Pengujian Isolator Berbahan Keramik Kondisi Kering .....	36
4.6 Hasil Pengujian Isolator Berbahan Keramik Kondisi Basah .....	38
4.7 Hasil Pengujian Isolator Berbahan Polimer Kondisi Kering .....	40
4.8 Hasil Pengujian Isolator Berbahan Polimer Kondisi Basah .....	42
4.9 Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik Kondisi Kering dan Basah .....	46
4.10 Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Polimer Kondisi Kering dan Basah .....	52
4.11 Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Kondisi Kering .....	58
4.12 Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Kondisi Basah .....	63
4.13 Hasil Pengujian Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Keramik Kondisi Tanpa Polutan .....	67

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Isolator Berbahan Keramik .....	6
2.2 Isolator Berbahan Polimer .....	7
2.3 Kegagalan Isolator .....	12
2.4 Profil Pengujian dengan Kenaikan Tegangan Perlahan .....	18
3.1 Rangkaian Pengujian Tegangan <i>Flashover</i> .....	22
3.2 Gelas Ukur dan Multimeter Untuk Pengukuran Resistansi Polutan .....	23
3.3 Bagan Alur Penelitian .....	26
4.1 Grafik Hubungan Antara ESDD dengan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Keramik Kondisi Kering .....	37
4.2 Grafik Hubungan Antara ESDD dengan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Keramik Kondisi Basah .....	39
4.3 Grafik Hubungan Antara ESDD dengan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Polimer Kondisi Kering .....	41
4.4 Grafik Hubungan Antara ESDD dengan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Polimer Kondisi Kering .....	43
4.5 Grafik Hasil Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik Kondisi Kering dan Basah .....	48
4.6 Grafik Hubungan Antara Sudut Penyemprotan dengan ESDD Pada Isolator Keramik Kondisi Kering dan Basah .....	50
4.7 Grafik Hasil Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Polimer Kondisi Kering dan Basah .....	54
4.8 Grafik Hubungan Antara Sudut Penyemprotan dengan ESDD Pada Isolator Polimer Kondisi Kering dan Basah .....	56
4.9 Grafik Hasil Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Kondisi Kering .....	61
4.10 Grafik Hasil Perbandingan Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Kondisi Basah .....	66

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Isolator merupakan salah satu peralatan yang sangat penting dalam sistem penyaluran energi listrik. Karena pentingnya isolator dalam sistem penyaluran energi listrik, maka perlu dijaga keandalannya. Salah satu bentuk penjagaan keandalannya yaitu dengan menguji tegangan *flashover* pada isolator. Secara umum, isolator memiliki dua fungsi, yaitu fungsi mekanik dan fungsi elektrik. Fungsi mekanik yaitu sebagai penopang atau penahan konduktor pada tiang penyangga. Sedangkan fungsi elektrik yaitu sebagai pembatas antara konduktor dan tiang penyangga supaya arus tidak mengalir dari konduktor ke tiang penyangga. Di Indonesia pemakaian isolator kebanyakan memakai isolator berbahan keramik, gelas, dan polimer. Masing-masing bahan tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri. Pada isolator keramik dan gelas memiliki kekurangan permukaannya mudah menyerap air, sehingga lebih mudah terjadi arus bocor pada permukaan, yang akhirnya dapat menyebabkan terjadinya tegangan *flashover*. Sedangkan pada isolator polimer memiliki kekurangan mudah terdegradasi akibat faktor lingkungan seperti radiasi sinar ultra violet, kelembaban udara, polusi udara (Yosafat, 2014). Adanya kekurangan tersebut menyebabkan terjadinya kegagalan isolasi yang disebabkan adanya pengaruh bahan polutan.

Tegangan *flashover* merupakan kegagalan isolasi yang disebabkan karena pembebanan medan listrik pada permukaan isolator melebihi kapasitas ketahanan elektriknya. *Flashover* ini dapat menimbulkan pemanasan dan dapat merusak isolator. Penyebab terjadinya *flashover* di antaranya yaitu karena pengotoran permukaan isolator, surja hubung, dan surja petir (Wardhani, 2011). Pada kasus pengotoran permukaan isolator, umumnya disebabkan karena adanya bahan polutan yang menempel pada permukaan isolator seperti bahan polutan debu, abu terbang, pasir, garam. Garam merupakan bahan polutan yang sering dijumpai pada pinggiran

pantai. Biasanya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berlokasi di pinggiran pantai. Sehingga pada jaringan listriknya terutama komponen berupa isolator dapat terpengaruh adanya bahan polutan garam. Untuk itu perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh bahan polutan garam terhadap isolator berbahan keramik dan polimer.

Pada penelitian ini, isolator akan diuji menggunakan metode yang sesuai dengan standar *American Standard Test Method*, ASTM-D149. Standar pengujian ASTM-D149 terdiri dari tiga buah metode, yaitu metode *Short Time Test*, *Step by Step Test*, dan *Slow Rate of Rise Test* (Tobing, 2012). Metode *Short Time Test* adalah pengujian yang paling umum digunakan untuk menguji kontrol kualitas. Sedangkan metode *Step by Step Test* dan *Slow Rate of Rise Test* biasanya akan menghasilkan pengujian yang kurang baik, namun akan memberikan hasil yang lebih baik jika menggunakan perbedaan bahan uji dan kemudian dibandingkan satu sama lain (ASTM D149, 2009).

Dalam hal ini peneliti memilih memakai metode *Slow Rate of Rise Test* untuk mengetahui besarnya tegangan tembus sampai terjadinya tegangan *flashover*. Metode *Slow Rate of Rise Test* yaitu dijalankan menggunakan hasil uji awal yang diperoleh dari hasil uji *Short Time Test* atau uji waktu singkat, kemudian tegangan dinaikkan perlahan hingga terjadi tegangan tembus, namun dengan syarat waktu untuk mencapai tegangan tembus harus lebih dari 120 detik. Sebelumnya telah dilakukan penelitian dengan metode *Short Time Test* dan metode *Step by Step Test* dengan bahan polutan debu semen dan abu terbang. Sehingga peneliti berharap dengan adanya penelitian ini bisa melengkapi analisis tentang tegangan *flashover* pada isolator berbahan keramik dan polimer dengan variasi bahan polutan dan metode yang diterapkan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini yang bisa didapat dari latar belakang adalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana pengaruh bahan polutan garam terhadap tegangan *flashover* pada isolator berbahan keramik dan polimer menggunakan metode *Slow Rate of Rise Test*?
- b. Bagaimana hasil perbandingan antara isolator berbahan keramik dan polimer pada hasil pengujian dalam kondisi kering dan basah, serta dalam kondisi isolator tanpa polutan garam dan dalam kondisi isolator berpolutan garam dengan variasi sudut penyemprotan  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $135^\circ$  serta dengan tiga buah sudut tersebut secara langsung?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini yang ingin dicapai oleh peneliti adalah sebagai berikut :

- a. Mengetahui pengaruh bahan polutan garam terhadap tegangan *flashover* pada isolator berbahan keramik dan polimer menggunakan metode *Slow Rate of Rise Test*.
- b. Mengetahui hasil perbandingan antara isolator berbahan keramik dan polimer pada hasil pengujian dalam kondisi kering dan basah, serta dalam kondisi isolator tanpa polutan garam dan dalam kondisi isolator berpolutan garam dengan variasi sudut penyemprotan  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $135^\circ$  serta dengan tiga buah sudut tersebut secara langsung.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini yang ingin dicapai oleh peneliti adalah sebagai berikut :

- a. Untuk melengkapi analisis tentang tegangan *flashover* pada isolator berbahan keramik dan polimer dengan variasi bahan polutan dan metode yang diterapkan.
- b. Sebagai referensi dalam upaya perbaikan keandalan kinerja isolator saat permukaan isolator terkena polutan garam.

### 1.5 Batasan Masalah

Untuk memperjelas dan menghindari meluasnya masalah, maka disebutkan batasan masalah sebagai berikut:

- a. Isolator yang digunakan pada penelitian yaitu isolator yang digunakan pada jaringan distribusi SUTM 20 kV.
- b. Diasumsikan saat proses pengujian pada permukaan isolator hanya ada bahan polutan garam NaCl.
- c. Selama proses pengujian, tekanan udara, kelembaban, suhu, dan temperatur udara dalam laboratorium diasumsikan sudah mewakili kondisi udara secara umum.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Secara garis besar penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

#### **BAB 1. PENDAHULUAN**

Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika pembahasan.

#### **BAB 2. TINJUAN PUSTAKA**

Berisi penjelesan tentang teori yang berhubungan dengan isolator, pengaruh bahan polutan terhadap tegangan *flashover* menggunakan metode *Slow Rate of Rise Test*.

#### **BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN**

Berisi tentang metode kajian yang digunakan untuk menyelesaikan skripsi.

#### **BAB 4. PEMBAHASAN**

Berisi tentang hasil pengujian tegangan *flashover* yang dipengaruhi bahan polutan garam menggunakan metode *Slow Rate of Rise Test*.

#### **BAB 5. PENUTUP**

Menguraikan kesimpulan yang didapatkan dari penelitian dan saran untuk penelitian berikutnya.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Isolasi

Isolasi adalah sifat atau bahan yang dapat memisahkan secara elektrik dua buah penghantar atau lebih yang berdekatan, sehingga tidak terjadi kebocoran arus, atau dalam hal gradien tinggi terjadi *flashover*. Sedangkan sistem isolasi adalah gabungan dari beberapa bahan isolasi yang dibangun untuk memisahkan bagian-bagian peralatan listrik yang berbeda potensial.

Isolator mempunyai sifat atau kemampuan untuk dapat memisahkan secara elektrik dua buah penghantar atau lebih yang berdekatan, sehingga arus tidak mengalir dari konduktor jaringan ke tanah. Dengan demikian konstruksi isolator sangat diperhatikan dan bahan isolasi haruslah mempunyai kekuatan dielektrik yang baik sehingga sifat hantarannya dapat dikurangi.

### 2.2 Isolator Saluran Udara

#### 2.2.1 Bahan-bahan Isolasi

Bahan isolasi yang biasa dipergunakan pada isolator saluran udara yang dioperasikan pada tegangan tinggi (di atas 1 kV) adalah bahan porselin (keramik), bahan gelas, serta bahan polimer (*composite*) (Yosafat, 2014).

#### 2.2.2 Bahan Porselin (keramik)

Porselin terbuat dari tanah liat china (*china clay*) yang terdapat di alam dalam bentuk aluminium silikat. Bahan tersebut dicampur kaolin, felspar, dan quartz. Kemudian campuran ini dipanaskan dalam tungku yang suhunya dapat diatur. Bahan porselin dibakar sampai keras, halus mengkilat, dan bebas dari lubang-lubang.

Untuk mendapatkan sifat-sifat listrik dan sifat mekanis yang baik, harus dipilih suhu pemrosesan bahan isolasi yang sesuai, karena jika bahan isolasi

diproses pada suhu yang agak rendah, sifat mekanisnya baik, tetapi bahan tetap berlubang-lubang. Sedangkan jika diproses pada suhu tinggi, lubang-lubangnya berkurang tetapi bahan menjadi rapuh.

Isolator porselin yang baik secara mekanis mempunyai kuat dielektrik sekitar 60kV/cm, kuat tekan dan kuat tariknya masing-masing 70.000 kg/cm<sup>3</sup> dan 500 kg/cm<sup>3</sup>.

Beberapa kelebihan isolator porselin / keramik yaitu stabil, mempunyai kekuatan mekanik yang baik, dan tahan lama. Disamping kelebihan-kelebihan di atas, isolator porselin juga mempunyai beberapa kekurangan, yaitu mudah pecah, berat, berlubang akibat pembuatan kurang sempurna, bentuk geometri kompleks, dan mudah terpolusi hal ini yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi yaitu *flashover*. Di bawah ini merupakan gambar isolator berbahan keramik.



Gambar 2.1 Isolator Berbahan Keramik

### 2.2.3 Bahan Polimer Resin Epoksi

Resin epoksi merupakan plastik yang menawarkan kegunaan yang luar biasa yaitu: kekuatan dielektrik tinggi, resistan kimiawi yang baik dan daya pelekatan yang baik.

Cairan resin epoksi merupakan cairan yang memiliki sifat kekentalan yang rendah, sehingga mudah bercampur (masuk tahap *thermoset*) di dalam pembuatannya. Jenis cairan resin yang lain adalah : *phenolic, polyesters, acrykics* yang dibuat dalam proses yang sama, tapi resin epoksi memiliki kelebihan yaitu konstruksi lebih ringan (rapat massa rendah), sifat dielektrik, resistifitas volume dan sifat *thermal* lebih baik, bersifat *hydrophobic* (anti air), dan proses pembuatan lebih cepat. Adapun kekurangan yang dimiliki oleh isolator polimer adalah penuaan atau degradasi pada permukaan isolator, kekuatan mekaniknya kecil atau kurang bagus, kompatibilitas material, dan kurang tahan terhadap perubahan cuaca (Rahman, 2012). Di bawah ini merupakan gambar isolator berbahan polimer.



Gambar 2.2 Isolator Berbahan Polimer

#### 2.2.4 Klasifikasi Isolator Saluran Udara

Menurut penggunaannya dan konstruksinya, isolator pemasangan luar (*outdoor insulator*) atau isolator saluran udara (*overhead insulator*) diklasifikasikan menjadi isolator pasak (*pin type insulator*), isolator piring (*suspension insulator*), isolator batang panjang (*long rod insulator*), isolator pos saluran (*line post insulator*), dan isolator pos pin (*pin post insulator*).

### 2.3 Karakteristik Isolator

#### 2.3.1 Karakteristik Elektrik

Karakteristik elektrik dari isolator yang dimaksud adalah kemampuan menahan *flashover* dan arus bocor. Isolator yang terpasang pada jaringan udara sangat mudah dipengaruhi oleh perubahan kondisi lingkungan udara sekitar. Perubahan-perubahan tersebut dapat mempengaruhi kinerja dari isolator, yaitu kemampuan isolator menahan tegangan. Apabila di permukaan isolator terbentuk lapisan polutan akan mempengaruhi kinerja dari isolator tersebut. Kinerja isolator juga akan berbeda apabila permukaan isolator dalam kondisi basah dan dalam kondisi kering (Setiaji, 2012).

Isolator terdiri dari bahan isolasi yang diapit oleh elektroda-elektroda. Dengan demikian, maka isolator terdiri dari sejumlah kapasitansi. Karena kapasitansi ini, maka distribusi tegangan pada sebuah rentengan isolator menjadi tidak seragam. Potensial pada ujung yang terkena tegangan (ujung yang memegang kawat penghantar) adalah paling besar (Yosafat, 2014).

Karakteristik elektrik suatu isolator dinilai dari tegangan *flashover* yang terdiri dari tegangan-tegangan *flashover* frekuensi rendah, impuls, dan tembus merusak (*puncture*).

1. Tegangan *flashover* frekuensi rendah kering (*dry power frequency flashover voltage*) adalah tegangan *flashover* yang terjadi bila tegangan diterapkan di antara kedua elektroda isolator yang bersih dan kering permukaannya, nilainya konstan serta merupakan nilai dasar dari karakteristik isolator.

2. Tegangan *flashover* frekuensi rendah basah (*wet power frequency flashover voltage*) adalah tegangan *flashover* yang terjadi bila tegangan diterapkan di antara dua elektroda isolator yang basah karena hujan atau sengaja dibasahi.
3. Tegangan *flashover* impuls (*impuls flashover voltage*) adalah tegangan *flashover* yang terjadi bila tegangan impuls dengan gelombang standar diterapkan. Menurut standar IEC besarnya gelombang impuls standar adalah  $1,2 \times 50 \text{ ms}$ . Karakteristik impuls terbagi atas polaritas positif dan negatif. Biasanya, tegangan dengan polaritas positif yang dipakai (memberikan nilai *flashover* lebih rendah). Untuk polaritas positif, tegangan *flashover* basah dan kering sama.
4. Tegangan tembus (*puncture*) merupakan tegangan tembus yang menyebabkan kerusakan bahan isolasinya. Sedangkan kerusakan bagian isolator yang disebabkan oleh pemanasan lebih tidak dikategorikan sebagai *puncture*.

### 2.3.2 Karakteristik Mekanis

Karakteristik mekanis suatu isolator ditandai dengan kekuatan mekanisnya, yaitu beban mekanis terendah yang mengakibatkan isolator tersebut rusak. Kekuatan mekanis ini ditentukan dengan membebani isolator dengan beban yang bertambah secara bertahap hingga isolator terlihat rusak.

Isolator harus memiliki kekuatan mekanis guna memikul beban mekanis penghantar yang diisolasi. Bahan isolasi sebagai bagian utama sebuah isolator, mempunyai sifat sebagai besi cor, dengan kuat tekan (*compressive strength*) yang besar dan kuat tarik (*tensile strength*) yang lebih kecil. Untuk porselin, kuat tariknya  $400\text{-}900 \text{ kg/cm}^2$ , sedangkan kuat tekannya 10 kali lebih besar.

Gaya tarik terhadap isolator yang telah dipasang relatif besar, sehingga kekuatan bahan isolasi dan bagian-bagian yang disemenkan padanya harus dibuat lebih besar dari kekuatan bagian-bagian logamnya.

## 2.4 Kegagalan Isolator

Secara garis besar isolator tegangan tinggi mempunyai dua fungsi, yaitu fungsi mekanik dan elektrik. Secara mekanik, isolator untuk mendukung atau

menahan konduktor pada tegangan tinggi, sedangkan secara elektrik isolator berfungsi sebagai pemisah, yaitu untuk mencegah mengalirnya arus dari penghantar ke tanah atau ke menara penopang saluran udara. Pada saluran transmisi atau distribusi kegagalan isolasi dapat disebabkan oleh hal-hal sebagai berikut:

1. Isolator pecah, disebabkan pemuaihan yang tidak merata dan kontraksi yang terjadi di dalam semen, baja, dan bahan porselin. Kegagalan ini juga bisa disebabkan pergantian musim yang mencolok dan pemanasan berlebih.
2. Bahan isolasi berlubang-lubang. Lubang terjadi karena bahan porselin diproses pada suhu rendah hingga mudah menyerap air. Kejadian ini menurunkan kekuatan isolasi dan arus merambat melalui isolator.
3. Ketidakmurnian bahan isolasi. Di tempat yang mengalami ketidakmurnian bahan isolasi pun akan terjadi kebocoran.
4. Bahan tidak dapat mengkilap, sehingga air akan tetap tinggal padanya, lalu menyebabkan penimbunan debu dan kotoran membentuk lapisan yang bersifat menghantar dan memperpendek jarak rayap (*creepage-distance*).
5. Tekanan secara mekanis, misalnya karena penumpukkan isolator. Jika bahannya kurang kuat dapat menyebabkan isolator pecah.

Tembus (*puncture*) dan *flashover*. *Flashover* yaitu pelepasan muatan destruktif (bersifat merusak) yang melintasi pada seluruh bagian permukaan isolator. Pelepasan muatan ini disebabkan pembebanan medan listrik pada permukaan isolator melebihi harga ketahanan elektriknya. *Flashover* menimbulkan pemanasan dan ini dapat merusak isolator. Penyebabnya yaitu pengotoran permukaan isolator, surja hubung, dan surja petir. Sedangkan tembus (*puncture*) adalah pelepasan muatan destruktif pada bagian isolasi isolator, khusus terjadi pada isolator padat saja.

#### 2.4.1 Kegagalan Isolator Dalam Melaksanakan Fungsinya

Kegagalan-kegagalan isolator dalam melaksanakan fungsinya dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

1. Kegagalan tembus (*breakdown*), biasanya disebabkan oleh faktor luar seperti sambaran petir. Persoalan ini dapat ditanggulangi oleh pengaman tanduk

- sehingga tidak mengenai isolator. Akibat kegagalan tembus (*breakdown*), karakteristik elektrik dari isolator tidak dapat pulih seperti semula dan sebagian isolator mengalami kerusakan mekanik sehingga tidak dapat digunakan kembali.
2. Kegagalan *flashover*, umumnya bergantung pada tahanan permukaan dan bentuk isolator. Kegagalan ini biasanya disebabkan oleh kondisi lingkungan. Peristiwa *flashover* menyebabkan terjadinya kerusakan pada permukaan isolator.

### 2.5 *Flashover* Pada Isolator

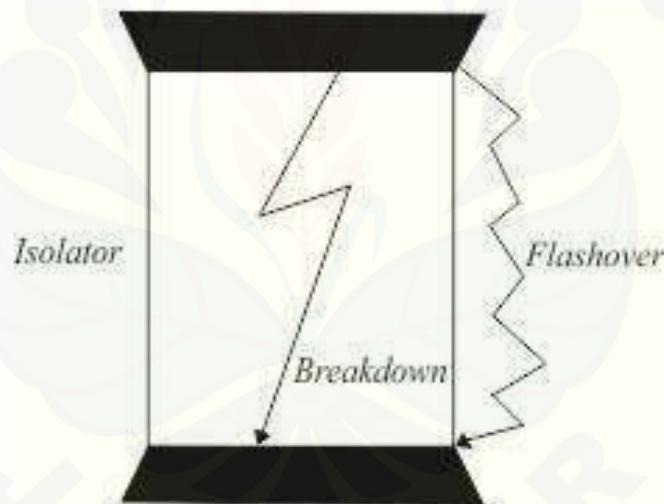
*Flashover* adalah gangguan eksternal yang terjadi pada permukaan isolator atau proses *flashover* pada permukaan suatu isolator yang disebabkan oleh berbagai faktor, diantaranya suhu, kelembaban, dan lingkungan sekitarnya (debu, asap pabrik, dan polutan garam). *Flashover* yang terjadi pada permukaan isolator padat disebabkan oleh tegangan yang harus ditahan oleh permukaan isolator melebihi kemampuannya (Setiaji, 2012). Tegangan *flashover* adalah nilai atau ukuran tegangan yang dapat ditahan isolator sampai terjadinya *flashover*.

Tegangan *flashover* disebabkan polusi berbeda-beda terutama tergantung pada solubilitas material, dapat larut terhadap air walaupun jumlah materialnya pada permukaan isolator adalah sama. Solubilitas ini tergantung pada jenis komponen dapat larut (Amali, 2012).

Dalam keadaan bersih, nilai tahanan isolator sangat besar. Apabila terbentuk lapisan pengotor pada permukaan akan menyebabkan turunnya nilai tahanan isolator. Ketika lapisan pengotor mengalami pembasahan, nilai tahanan menjadi semakin turun. Penurunan tahanan ini akan memperbesar arus bocor yang mengalir melalui permukaan isolator. Meningkatnya arus bocor akan menimbulkan terjadinya proses penguapan. Pada tempat yang mendapatkan rapat arus terbesar akan terbentuk pita kering karena lapisan pengotor pada daerah ini lebih cepat kering. Daerah pita kering mempunyai tahanan yang lebih besar jika dibandingkan daerah terkotori lainnya. Keadaan ini menyebabkan terjadinya peluahan muatan (*discharge*) melintasi pita kering. Bila busur api memanjang melintasi seluruh permukaan isolator maka akan terjadi *flashover* (Amali, 2012).

Di Indonesia pada musim kemarau terjadi penumpukan partikel-partikel kontaminan pada permukaan isolator dengan jenis dan tingkat kontaminan yang berbeda-beda. Sesuai dengan kondisi sekitar isolator itu dipasang, semakin jauh dari pantai, semakin kecil *Equivalent Salt Deposit Density* (ESDD) nya. Tegangan *flashover* pada permukaan isolator kering lebih tinggi dari pada tegangan *flashover* pada udara lembab, sehingga dalam keadaan basah atau lembab isolator mudah terjadi *flashover*.

Kegagalan tegangan pada isolator dapat dibedakan dalam dua kejadian, yaitu kegagalan tegangan tembus (*puncture voltage*) dan kegagalan permukaan yang berupa *flashover*. Tegangan gagal *flashover* lebih rendah dari tegangan gagal tembus. Apabila isolator mengalami tegangan tembus, maka isolator dapat mengalami kerusakan total (hancur) (Rahman, 2012).



Gambar 2.3 Kegagalan Isolator

Kegagalan *flashover* berawal dari terbentuknya pita kering (*dry band*). Terbentuknya lapisan konduktif di permukaan isolator diakibatkan oleh adanya polutan yang menempel. Lapisan ini yang menyebabkan mengalirnya arus bocor (*leakage current*). Dengan mengalirnya arus bocor, terjadi pemanasan di lapisan tersebut. Lapisan ini dapat membentuk pita kering akibat dialiri arus bocor secara terus menerus. Pada tegangan tertentu, kondisi ini dapat menyebabkan pelepasan muatan melintasi pita kering. Pelepasan muatan dapat memanjang sehingga

terbentuk busur listrik (*arc*) dan terjadi *flashover* yang melalui seluruh permukaan isolator (Yosafat, 2014).

## 2.6 Isolator Berpolutan

### 2.6.1 Sifat Polutan

Polutan yang dapat mempengaruhi tahanan permukaan isolator dibagi menjadi dua jenis, polutan yang bersifat konduktif dan polutan yang bersifat inert.

#### 2.6.1.1 Polutan Yang Bersifat Konduktif

Polutan yang bersifat konduktif yaitu polutan yang mampu menghantarkan arus listrik. Terdiri dari garam-garam yang mampu terurai menjadi ion-ion misalnya NaCl, MgCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, dan lain sebagainya. Dalam suatu larutan garam-garam tersebut mudah terurai dan dapat mempengaruhi tahanan permukaan pada isolator, karena garam-garam tersebut akan membentuk suatu lapisan konduktif pada permukaan isolator.

Adanya polusi garam ini mempengaruhi terjadinya tahanan permukaan pada isolator. Garam yang sukar larut lebih kecil pengaruhnya pada terjadinya tahanan permukaan dibandingkan dengan garam yang mudah larut. Beberapa komponen konduktif pada daerah industri yang dapat larut membentuk larutan asam yang bersifat konduktif, misalnya gas SO<sub>2</sub>, yang membentuk H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

#### 2.6.1.2 Polutan Yang Bersifat Inert

Polutan yang bersifat lembam merupakan bagian dari zat padat yang tidak terurai menjadi ion-ion dalam larutan, namun komponen ini dapat menyebabkan ketahanan permukaan isolator. Zat-zat seperti SiO<sub>2</sub>, tanah liat (kaolin) dapat membentuk suatu ikatan mekanis untuk mengikat komponen-komponen konduktif. Ikatan mekanis yang terbentuk akan mempersulit proses pencucian isolator. Perbedaan tingkat pengotoran antara permukaan atas dengan permukaan bawah akan terlihat pada isolator yang banyak mengandung komponen yang bersifat lembam.

Polutan lembam terbagi menjadi dua sifat yakni *hydrophilic* dan *hydrophobic*. Komponen *hydrophilic* dapat meningkatkan tingkat kebasahan permukaan isolator karena kemampuannya menyerap air, contohnya tanah liat dan semen. Sedangkan komponen *hydrophobic* menurunkan tingkat kebasahan isolator, karena sifat kedap air, contohnya lemak dan oli (minyak), yang menyebabkan air tidak dapat menempel pada permukaan isolator sehingga lapisan konduktif yang terbentuk tidak kontinyu.

Penyebab terbesar dari terbentuknya tahanan permukaan adalah polutan yang bersifat konduktif. Konduktifitas polutan per satuan luas dapat dinyatakan dengan ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*). Dimana menurut IEEE banyaknya ESDD ini dapat dibedakan menjadi sangat ringan, ringan, sedang, dan berat, tergantung pada kondisi sekelilingnya.

#### 2.6.2 Pembentukan Polutan Pada Isolator

Sebagian besar zat pengotor, baik yang bersifat konduktif maupun bersifat lembam dibawa oleh angin ke permukaan isolator. Hal ini berarti bahwa arah angin sangat mempengaruhi pola pembentukan endapan pada permukaan isolator. Pada daerah yang mempunyai arah angin relatif tetap, maka tumpukan zat pengotor biasanya lebih banyak terdapat di daerah permukaan isolator yang terbentuknya tidak beraturan.

Pengumpulan partikel-partikel yang dibawa angin sangat dipengaruhi oleh besarnya medan elektrostatis, terutama pada bagian-bagian yang mengalami stress tegangan besar, yaitu di sekitar pasak isolator gantung. Pengaruh ini terutama terlihat pada isolator tegangan tinggi searah yang mempunyai polaritas tetap. Pemanasan oleh arus bocor yang mengalami stress tegangan tinggi menghalangi proses pencucian oleh alam dan mempertinggi permukaan zat pengotor. Pada isolator dengan tegangan bolak-balik dengan arus bocor lebih besar dibandingkan pengaruh medan elektrostatis. Medan elektrostatis akan mengikat partikel-partikel melalui proses polarisasi begitu menyentuh permukaan isolator.

Berdasarkan lama pembentukan lapisan pengotor pada permukaan isolator, proses pengotoran dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu pengotoran cepat (*rapid*

*pollution*) yang terjadi dalam keadaan angin kencang, seperti topan, badai, hujan batu, dan lain sebagainya, pengotor dapat mengumpul pada permukaan isolator dengan sangat cepat dan kondisi pengotoran yang berlangsung lama disebut pengotoran biasa (*ordinary pollution*).

### 2.6.3 Penggolongan Tingkat Pengotoran

Menurut standar IEEE tingkat pengotoran pada isolator dapat digolongkan seperti pada tabel di bawah ini :

Tabel 2.1 Penggolongan Tingkat Pengotoran

Tingkat Pengotoran	ESDD (mg/cm <sup>2</sup> )
Sangat Ringan	0 – 0,03
Ringan	0,03 – 0,06
Sedang	0,06 – 0,1
Berat	> 0,1

Sedangkan menurut standar IEC 815 penggolongan tingkat pengotoran isolator yang dipengaruhi kondisi geografis di suatu tempat adalah sebagai berikut

Tabel 2.2 Penggolongan Tingkat Pengotoran Berdasarkan Kondisi Geografis

Tingkat Pengotoran	ESDD (mg/cm <sup>2</sup> )
Ringan	0,03 – 0,06
Sedang	0,1 – 0,2
Berat	0,3 – 0,6
Sangat Berat	> 0,6

### 2..6.4 Isolator Pada Kondisi Pengotoran

Isolator pada transmisi tegangan tinggi yang terkontaminasi akan memiliki konduktansi yang berbeda-beda. Konduktansi lapisan pengotor dipengaruhi oleh kelembaban udara, tebal lapisan dan jenis bahan pengotor. Semakin besar konduktansi dari lapisan pengotor maka arus bocor yang terjadi akan semakin besar. Hal ini berhubungan dengan besarnya arus yang mengalir pada permukaan isolator.

Permukaan yang kotor akan mengalami drop tegangan sehingga menyebabkan terjadinya arus bocor. Jika tegangan mencapai harga tertentu maka pada lapisan pengotor akan terjadi arus dengan kerapatan arus yang besar, dan menyebabkan terjadinya pengeringan. Peristiwa ini akan berlangsung terus menerus dan menyebabkan terjadinya pengeringan lapisan-lapisan lembab di sekitarnya. Arus yang cukup besar akan menimbulkan bunga api parsial yang lebih besar dan apabila dapat menjembatani elektroda-elektroda dari isolator maka akan terjadi *flashover*. Dengan demikian tahanan permukaan pada isolator yang terkontaminasi tergantung dari konduktansi lapisan pengotor yaitu tingkat kekotoran, komposisi pengotor, dan lain-lain.

## 2.7 Menghitung ESDD dan Konduktivitas

Pengukuran ini dilakukan untuk mengamati besarnya nilai ESDD, hubungannya dengan komposisi polutan yang diberikan, besarnya konduktivitas, yang berhubungan dengan tegangan *flashover*, serta pengaruh yang berhubungan dengan ketebalan polutan. Sebelum melakukan pengukuran konduktivitas semua peralatan yang digunakan dibersihkan terlebih dahulu, agar terhindar dari polutan lain. Setelah itu dilaksanakan pekerjaannya.

Pengukuran konduktivitas air, baik yang mengandung polutan ( $\sigma_2$ ) maupun yang tidak ( $\sigma_1$ ), pada suhu tertentu, kemudian dihitung dalam persamaan 2.1

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - 0,02277 (\theta - 20)] \dots \dots \dots (2.1)$$

dimana :  $\sigma_{20}$  = konduktivitas pada suhu 20<sup>0</sup> C ( $\mu$ S/cm)

$\sigma_{\theta}$  = konduktivitas pada suhu ruangan

$\theta$  = suhu ruangan

Sesudah didapat konduktivitas pada suhu 20<sup>0</sup> C, selanjutnya dihitung konduktivitas garam dalam persen, menggunakan persamaan 2.2

$$D = \frac{(5,7 \times 10^{-4} \times \sigma_{20})^{1,03}}{10} \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana : D = konsentrasi garam NaCl (%)

$\sigma_{20}$  = konduktivitas garam pada suhu 20<sup>0</sup> C ( $\mu$ S/cm)

Setelah diperoleh konduktivitas pada suhu 20<sup>0</sup> C dan konsentrasi garam, kemudian dihitung nilai ESDD nya menggunakan persamaan 2.3

$$ESDD = 10 \times V \times \frac{(D_2 - D_1)}{S} \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana : ESDD = *Equivalent Salt Deposit Density* (mg/cm<sup>2</sup>)

V = volume air pencuci (ml)

D<sub>1</sub> = ekuivalen konsentrasi garam dan air sebelum ada polutan (%)

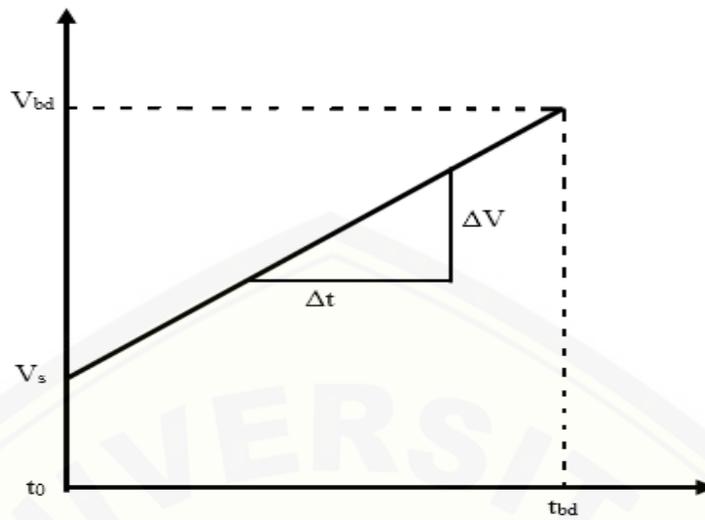
D<sub>2</sub> = ekuivalen konsentrasi garam dan air sesudah ada polutan (%)

S = luas permukaan isolator (cm<sup>2</sup>)

## 2.8 Metode *Slow Rate Of Rise Test* (Pengujian Dengan Kenaikan Tegangan Perlahan)

Profil tegangan pengujian ditunjukkan pada Gambar 2.4. Laju tegangan dipilih salah satu dari yang disarankan pada Gambar 2.4 ini. Cara menentukan tegangan *start* V<sub>s</sub> sama seperti metode pengujian bertangga yakni dengan menetapkan tegangan tembus specimen, menurut pengujian waktu singkat (V<sub>bd</sub>) atau menurut pengalaman dalam pengujian-pengujian yang sudah pernah dilakukan, kemudian dihitung perkiraan tegangan uji awal V<sub>s</sub> = 0,5 V<sub>bd</sub>. Pengujian dilakukan dengan menaikkan tegangan spesimen secara bertahap dengan laju tegangan konstan, mulai dari tegangan *start* V<sub>s</sub> hingga spesimen mengalami tegangan tembus listrik. Terjadinya tembus listrik ini harus pada t<sub>bd</sub> > 120 detik sejak tegangan pengujian dikenakan pada spesimennya.

Apabila dalam pengujian sekelompok spesimen, lebih dari satu spesimen yang mengalami tembus listrik pada waktu kurang dari 120 detik, perlu dilakukan tindakan sebagai berikut : tegangan uji *start* V<sub>s</sub> dikurangi, atau laju tegangan (ΔV/Δt) diturunkan, atau mengurangi tegangan *start* dan laju tegangan secara bersamaan. Jika lebih dari satu spesimen mengalami tembus listrik pada tegangan yang kurang dari 1,5V<sub>s</sub> maka nilai tegangan *start* V<sub>s</sub> dikurangi. Jika tembus listrik terjadi pada tegangan 2,5V<sub>s</sub> dan waktu terjadinya tembus listrik lebih dari 120 detik, nilai V<sub>s</sub> dinaikkan.



Gambar 2.4 Profil Pengujian Dengan Kenaikan Tegangan Perlahan

Laju Tegangan  $\Delta V / \Delta t$  (V/s)

1

Pembatasan

2

$t_{bd} > 120$  detik

5

$V_{bd} \geq 1,5 V_s$

10

12,5

20

25

50

100

**BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 Tempat dan Waktu Penelitian**

Tempat dan waktu pelaksanaan penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut.

**3.1.1 Tempat Penelitian**

Penelitian dilaksanakan Laboratorium Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember dan Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya setelah pelaksanaan seminar proposal.

**3.1.2 Waktu Penelitian**

Waktu penelitian dilaksanakan selama kurang lebih enam bulan, berikut adalah tabel jadwal kegiatan penelitian.

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

No.	Kegiatan	Bulan / Minggu											
		I				II				III			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi literatur	■											
2	Mengurus perijinan		■										
3	Menyiapkan alat dan bahan			■	■								
4	Pengujian laboratorium				■	■							
5	Pengambilan data					■	■						
6	Analisis data							■	■				
7	Membuat laporan									■	■	■	■

### 3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Satu set peralatan pembangkit tegangan tinggi  
Digunakan untuk mengukur tegangan tembus listrik.
2. Isolator berbahan keramik  
Isolator yang digunakan sebagai spesimen pengujian.
3. Isolator berbahan polimer  
Isolator yang digunakan sebagai spesimen pengujian.
4. Polutan berupa garam NaCl  
Polutan yang digunakan, diasumsikan sebagai larutan air murni dengan larutan garam NaCl yang kemudian dicampurkan, dengan konduktivitas tertentu.
5. Alat penyemprot  
Digunakan untuk membasahi isolator.
6. Termometer suhu  
Digunakan untuk mengukur suhu ruangan laboratorium.
7. Timbangan  
Digunakan untuk mengukur berat polutan yang akan digunakan dalam eksperimen.
8. Kapas  
Digunakan untuk membersihkan isolator sebelum atau sesudah diberikan polutan.
9. Multimeter  
Digunakan untuk mengukur resistansi pada larutan garam NaCl dan larutan air murni.
10. Gelas ukur  
Digunakan untuk meletakkan air murni dan garam NaCl.
11. Alat pengering  
Digunakan untuk mengeringkan isolator setelah disemprot polutan garam sebelum dilakukannya pengujian.
12. Alat pencatat waktu seperti *stopwatch*  
Digunakan untuk mencatat lamanya waktu pengujian.

### 13. Alat dokumentasi

Digunakan untuk dokumentasi saat dilakukannya proses pengujian, baik berupa foto atau video.

### 3.3 Tahap Penelitian

Adapun tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian ini ialah:

1. Tahap studi literatur.
2. Tahap perlakuan alat dan bahan.
3. Tahap praktek langsung dan pengambilan data.
4. Tahap analisis hasil perbandingan.
5. Tahap pengambilan kesimpulan hasil penelitian.

### 3.4 Metode Penelitian

Empat metode yang digunakan dalam penelitian ini terbagi menjadi dua, yaitu:

#### 3.4.1 Studi Literatur

Metode studi literatur ini dilakukan untuk lebih memahami permasalahan dan teori dasar mengenai terjadinya *flashover* yang terjadi pada bahan isolasi yang dipakai dalam pengujian yakni isolator berbahan keramik dan polimer. Selain itu studi literatur ini dilakukan untuk memahami karakteristik isolator berbahan keramik dan polimer yang terpengaruhi oleh polutan garam NaCl dengan perlakuan kondisi yang berbeda yaitu kondisi kering dan basah.

#### 3.4.2 Praktek Langsung

Praktek langsung dilakukan untuk mendapatkan data-data dari hasil uji di laboratorium tentang tegangan *flashover* isolator berbahan keramik dan polimer dengan adanya pengaruh bahan polutan garam NaCl. Terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan sebelum melakukan pengujian di laboratorium untuk pengambilan data, diantaranya yaitu:

a. Pembersihan Bahan Uji

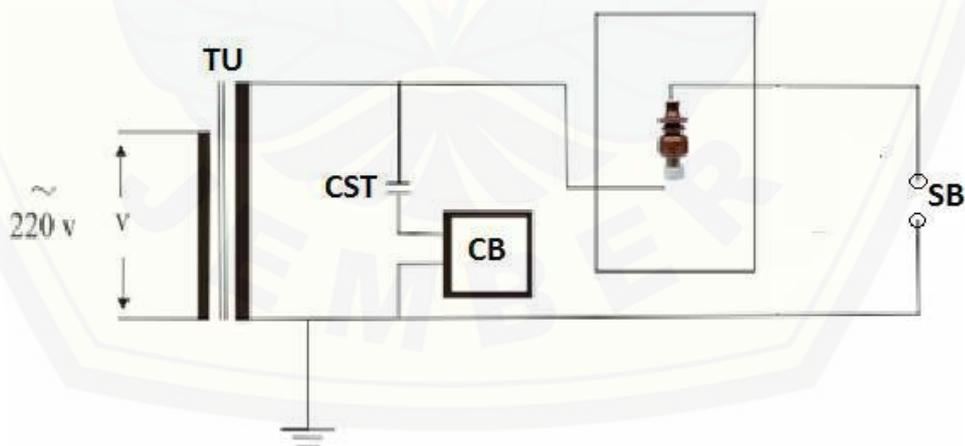
Isolator yang akan di uji harus benar-benar dalam kondisi kering dan bersih sebelum dipakai dalam proses pengujian. Isolator harus dicuci sampai bersih dan dikeringkan, supaya isolator yang akan di uji benar-benar bebas dari kotoran atau polutan lain yang menempel.

b. Perlakuan Terhadap Isolator Berbahan Keramik dan Polimer

Sebelum dilakukan pengujian, isolator berbahan keramik dan polimer terlebih dahulu mengalami beberapa perlakuan, yaitu harus dibersihkan, kemudian isolator disemprotkan dengan larutan garam NaCl dengan alat penyemprot polutan pada salah satu sisi permukaan isolatornya, dengan variasi sudut penyemprotan  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $135^\circ$  serta dengan penyemprotan tiga buah sudut langsung yakni  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $135^\circ$ .

c. Pengujian Tegangan *Flashover*

Isolator berbahan keramik dan polimer sebagai bahan pengujian akan di uji kekuatan dielektriknya dengan menguji tegangan *flashover*-nya terhadap perubahan konsentrasi polutan dalam kondisi isolator kering dan basah. Pengujian dilakukan dengan menggunakan gelombang sinus tegangan tinggi AC, hingga terjadi tegangan *flashover* pada bahan yang diuji.



Gambar 3.1 Rangkaian Pengujian Tegangan *Flashover*

Keterangan :

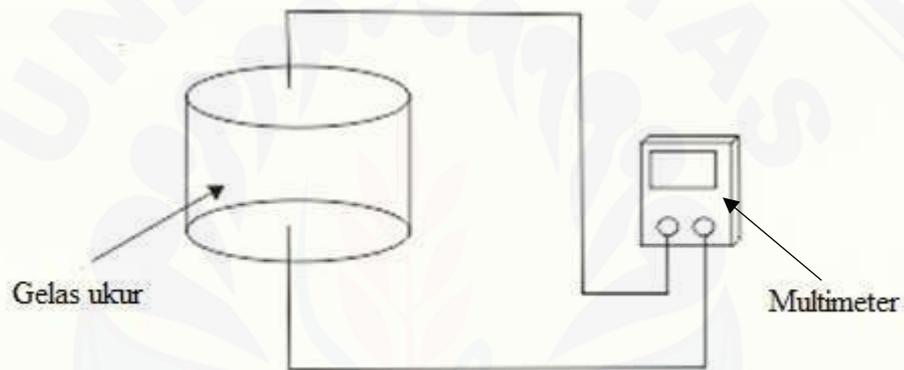
TU = Transformator uji tegangan tinggi 220 V / 100 kV

CST = Kapasitor

- CB = Kotak kontrol  
 SB = Sela bola

d. Penentuan Resistansi dari Polutan Yang Menempel pada Isolator

Penentuan resistansi dilakukan dengan membersihkan seluruh polutan yang menempel pada isolator dan dilarutkan ke dalam air sebanyak 200 cc sehingga menjadi larutan yang homogen antara NaCl dan H<sub>2</sub>O kemudian dimasukkan ke suatu gelas ukur yang telah tersedia di Laboratorium yang berdimensi  $l = 13,3$  cm dan  $d = 7,6$  cm kemudian dilakukan pengukuran resistansi.



Gambar 3.2 Gelas Ukur dan Multimeter Untuk Pengukuran Resistansi Polutan

e. Perhitungan Konduktivitas Polutan

Perhitungan konduktivitas polutan dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{l}{R \times A} \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana :

$\sigma$  = konduktivitas polutan ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

$l$  = tinggi gelas ukur (cm)

$R$  = resistansi polutan ( $\Omega$ )

$A$  = luas penampang melintang gelas ukur ( $\text{cm}^2$ )

Dimensi gelas ukur yang digunakan dalam pengujian konduktivitas mempunyai diameter pada lempeng elektroda sebesar 7,6 cm sehingga luas penampang gelas ukurnya yaitu  $A = 45,365 \text{ cm}^2$  dan tinggi  $l = 13,3 \text{ cm}$ . Setelah diperoleh nilai resistansi dari polutan, diperoleh dengan cara diukur resistannya dengan multimeter, kemudian dapat dengan menggunakan rumus diatas maka dapat ditentukan besarnya nilai konduktivitasnya, sehingga dapat pula ditentukan besarnya nilai ESDD dari masing-masing konsentrasi.

f. Pembangkitan Tegangan Tinggi AC

Untuk membangkitkan tegangan tinggi AC, dapat digunakan transformator *step-up* dengan sisi primer 220 V dari jala-jalan PLN dan sisi sekundernya bisa menaikkan sampai tegangan 100 kV.

### 3.4.3 Pengambilan Data

Untuk pengambilan data pengujian meliputi tahap-tahap sebagai berikut:

1. Untuk pengujian ketahanan isolator dengan metode *Slow Rate Of Rise Test* diperlukan dengan menaikkan tegangan spesimen secara bertahap dengan laju tegangan konstan, mulai dari tegangan *start*  $V_s$  hingga spesimen mengalami tegangan tembus listrik baik pada kondisi kering maupun basah. Hal ini ditandai dengan terjadinya suara letupan dan terjadinya percikan api di permukaan isolator seiring dengan terjadinya *flashover* pada isolator. Terjadinya tembus listrik ini harus pada  $t_{\text{flashover}} > 120$  detik sejak tegangan pengujian dikenakan pada spesimennya.
2. Kadar polutan garam yang diasumsikan sebagai larutan garam NaCl dalam penyemprotan saat melakukan pengujian isolator memiliki kadar 200 gram / 500 ml.
3. Pengambilan data diawali dengan menetapkan tegangan tembus spesimen, menurut pengujian waktu singkat ( $V_{\text{flashover}}$ ) atau menurut pengalaman dalam pengujian-pengujian yang sudah pernah dilakukan, kemudian dihitung perkiraan tegangan uji *start*  $V_s = 0,5 V_{\text{flashover}}$ .

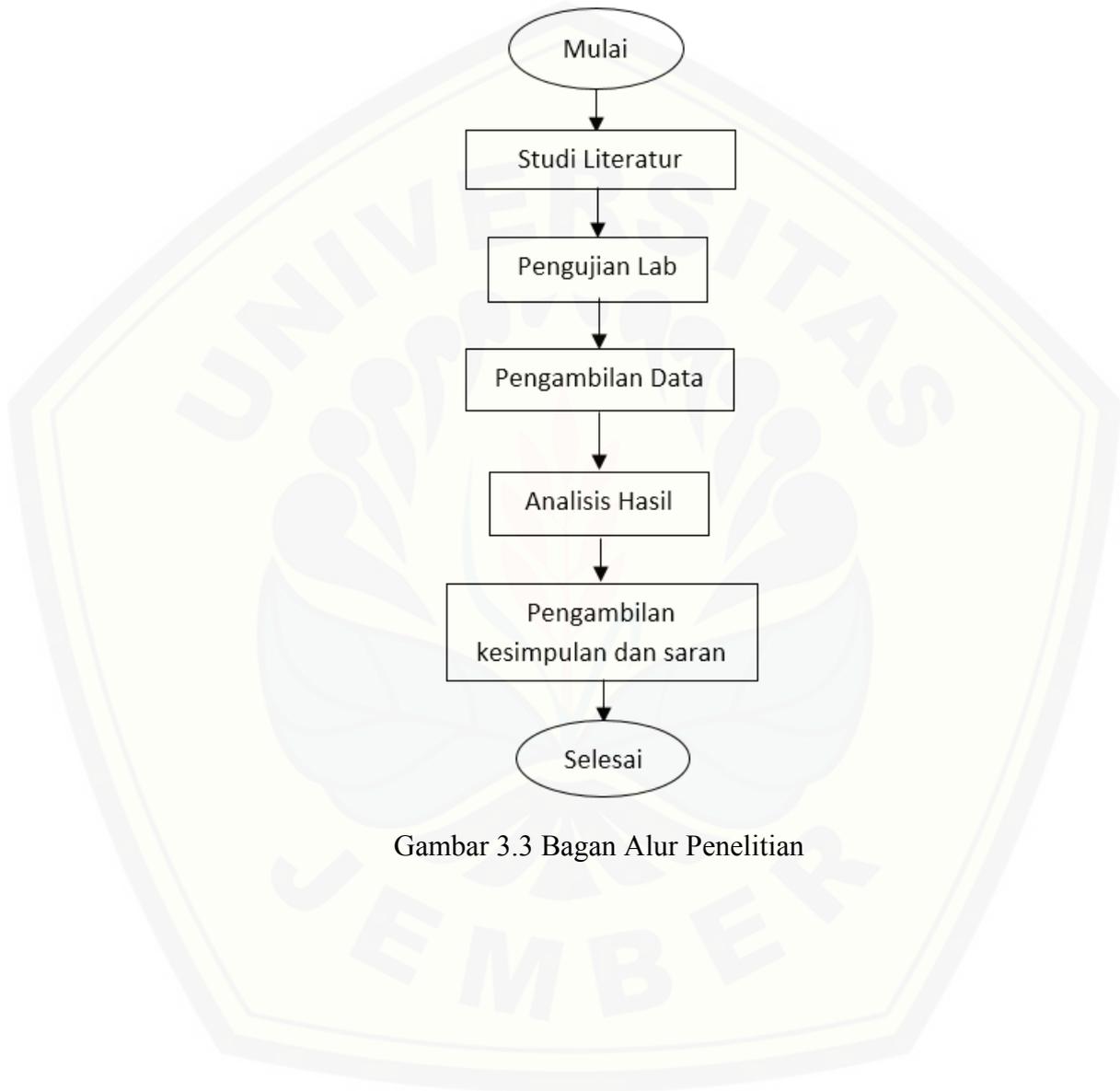
4. Apabila dalam pengujian sekelompok spesimen, lebih dari satu spesimen yang mengalami tembus listrik pada waktu kurang dari 120 detik, perlu dilakukan tindakan sebagai berikut:
  - a. Tegangan uji *start*  $V_s$  dikurangi, atau laju tegangan ( $\Delta V/\Delta t$ ) diturunkan, atau mengurangi tegangan *start* dan laju tegangan secara bersamaan.
  - b. Jika lebih dari satu spesimen mengalami tembus listrik pada tegangan yang kurang dari  $1,5V_s$  maka nilai tegangan *start*  $V_s$  dikurangi.
  - c. Jika tembus listrik terjadi pada tegangan  $2,5V_s$  dan waktu terjadinya tembus listrik lebih dari 120 detik, nilai  $V_s$  dinaikkan.
5. Kemudian mencatat besarnya tegangan dan waktu tembus listrik yang terjadi pada saat pengujian.
6. Setelah di uji isolatornya, kemudian isolator di cuci menggunakan air pencuci (air destilasi) sebanyak 200 ml. Untuk cara pencuciannya yaitu :
  - a. Isolator dicuci dengan menggunakan tiga buah kain kasa dengan ukuran 16 cm x 16 cm. Sebelumnya terlebih dahulu air pencuci di ukur nilai resistansinya.
  - b. Proses pencucian isolator dilakukan di sebuah baskom yang sudah dibersihkan dengan air destilasi.
  - c. Air pencuci dipakai setengahnya untuk mencuci tahap awal dengan menggunakan kain kasa, dan setengahnya digunakan untuk pencucian tahap akhir.
  - d. Setelah isolator dicuci, air cucian, kain kasa diletakkan pada baskom, kemudian di ukur nilai resistansinya.
7. Pengambilan data dilakukan dengan melakukan pengulangan sebanyak tiga kali, kemudian diambil rata-ratanya.

#### 3.4.4 Analisis Data

Analisis data penelitian dari pengaruh polutan garam terhadap tegangan *flashover* pada isolator berbahan keramik dan polimer dengan menggunakan metode *Slow Rate Of Rise Test* dilakukan dengan melihat hasil data pengujian yang selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Berdasarkan analisis ini akan

diperoleh kesimpulan mengenai kelayakan isolator berbahan keramik dan polimer yang terkontaminasi oleh polutan garam dalam kondisi kering dan basah.

### 3.5 Diagram Alur Penelitian



Gambar 3.3 Bagan Alur Penelitian

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan dapat diperoleh beberapa kesimpulan antara lain :

1. Penggunaan metode *slow rate of rise test* untuk pengujian tegangan *flashover* pada isolator berbahan keramik dan polimer dengan adanya pengaruh polutan garam telah memberikan hasil bahwa nilai tegangan *flashover* akan semakin turun, seiring dengan bertambah besarnya nilai ESDD. Pada isolator keramik saat ESDD sebesar  $0,027 \text{ mg /cm}^2$ , dengan tegangan *flashover* sebesar 38 kV isolator mengalami penurunan kinerja terbanyak, yakni sebesar 36,667 %, dan pada isolator polimer saat ESDD sebesar  $0,130 \text{ mg /cm}^2$ , dengan tegangan *flashover* sebesar 32,667 kV isolator mengalami penurunan kinerja terbanyak, yakni sebesar 28,47 %.
2. Hasil perbandingan berupa besarnya tegangan *flashover* antara isolator berbahan keramik dan polimer baik dalam kondisi kering dan basah, serta kondisi tanpa polutan dan berpolutan, telah memberikan hasil bahwa isolator berbahan keramik lebih baik daripada isolator berbahan polimer dari segi besarnya nilai ketahanan tegangan *flashover* – nya, namun isolator polimer lebih baik kinerjanya daripada isolator keramik dari segi besarnya nilai persentase penurunan kinerja isolator.

### 5.2 Saran

Berikut ini adalah merupakan saran – saran yang dapat penulis kemukakan berkaitan dengan penelitian yang telah dilakukan dan untuk penelitian lebih lanjut.

1. Untuk mendapatkan hasil karakteristik yang lebih baik, sebaiknya pengujian menggunakan variasi polutan yang berbeda, tidak hanya satu macam polutan saja, misal polutan garam, lumut, pasir, debu perkotaan, debu perindustrian dengan metode pengujian yang sama, dan perlakuan yang sama juga.

2. Untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk memakai metode pengujian tiga sekaligus, yakni metode *Short Time Test*, *Step by Step Test* dan *Slow Rate of Rise Test*, sehingga diperoleh hasil analisis yang lebih baik, dan dapat diperoleh hasil perbandingan dari ketiga buah metode tersebut.



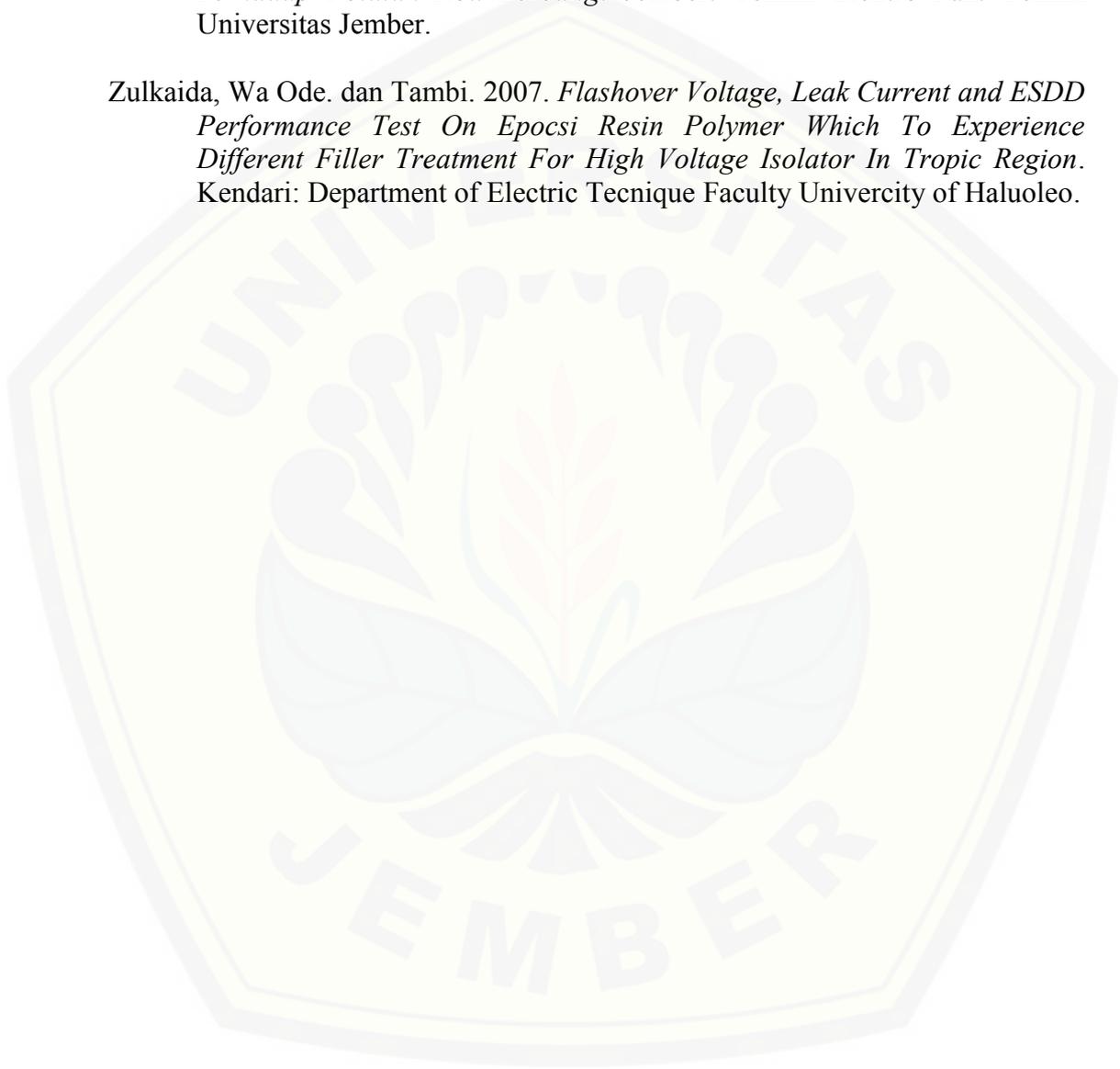
**DAFTAR PUSTAKA**

- Anonim, 2009. *Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies*. USA: ASTM International.
- Amali, Lanto, M. L. 2012. *Analisis Pengujian Arus Bocor Line Post Insulator 70 kV yang Terkontaminasi Polutan Industri*. Gorontalo: Teknik Elektro Fak. Teknik Universitas Negeri Gorontalo.
- Rahman, Hafidz., Syakur, Abdul., Yuningtyastuti. 2012. *Pengaruh Equivalent Salt Deposit Density (ESDD) Terhadap Tegangan Flashover dan Arus Bocor pada Isolator Berbahan Resin Epoksi Silane dengan Pengisi Bahan Pasir Silika*. Semarang: Teknik Elektro Fak. Teknik Universitas Diponegoro.
- Setiaji, Muhammad, E. D., Yuningtyastuti., Syakur, Abdul. 2012. *Pengujian Tegangan Flashover dan Arus Bocor pada Isolator 20 kV Berbahan Resin Epoksi Silane Silika Kondisi Basah dan Kering*. Semarang: Teknik Elektro Fak. Teknik Universitas Diponegoro.
- Steven, Rudy, Simon. 2008. *Pengaruh Polutan Terhadap Tahanan Permukaan Isolator Epoxy Resin*. Depok: Fakultas Teknik Departemen Teknik Universitas Indonesia.
- Suyanto, Muhammad. 2010. *Pengujian Isolator Pin-Post 20 kV Terkontaminasi Garam Mengakibatkan Arus Bocor Flashover Pada Permukaan*. Jogjakarta: Jurusan Teknik Elektro IST AKPRIND Jogjakarta.
- Tobing, Bonggas, L. 2012. *Dasar-dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT. Gelora Aksara Pratama.
- Tobing, Bongas, L. dan Lubis, Mustafriend. 2007. *Hubungan Intensitas Polusi Isolator Jaringan Distribusi di Sumatra Utara dengan Jarak Lokasi Isolator di Pantai*. Medan: Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik USU.
- Wardhani, Arfianti Kusuma. 2011. *Analisis Perbandingan Pengaruh Debu Semen Antara Isolator Pos Pin dan Isolator Gantung Terhadap Flashover Menggunakan Metode Short Time Test*. Jember: Teknik Elektro Fak. Teknik Universitas Jember.

Wasiluddin, Muhammad. 2010. *Analisa Pengaruh Polutan Garam Terhadap Arus Bocor pada Isolator Gantung*. Jember: Teknik Elektro Fak. Teknik Universitas Jember.

Yosafat, Fery Indra. 2014. *Penggunaan Metode Step By Step Test Untuk Membandingkan Flashover Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Terhadap Polutan Abu Terbang*. Jember: Teknik Elektro Fak. Teknik Universitas Jember.

Zulkaida, Wa Ode. dan Tambi. 2007. *Flashover Voltage, Leak Current and ESDD Performance Test On Epoksi Resin Polymer Which To Experience Different Filler Treatment For High Voltage Isolator In Tropic Region*. Kendari: Department of Electric Technique Faculty University of Haluoleo.



**LAMPIRAN - LAMPIRAN****LAMPIRAN A. PERHITUNGAN**

Diketahui :

$$d = 7,6 \text{ cm}$$

$$\theta = 28^\circ \text{ C}$$

$$l = 13,3 \text{ cm}$$

$$R_{\text{air destilasi}} = 793 \ \Omega$$

$$S_{\text{keramik}} = 2300,25 \text{ cm}^2$$

$$R_{\text{polutan keramik}} = 510 \ \Omega$$

$$S_{\text{polimer}} = 560,774 \text{ cm}^2$$

$$R_{\text{polutan polimer}} = 533,667 \ \Omega$$

$$v = 200 \text{ cc}$$

**1. Perhitungan pada isolator berbahan keramik**

Pertama menghitung nilai luas penampang melintang pada gelas ukur

$$A = \pi r^2$$

$$A = 45,365 \text{ cm}^2$$

Setelah itu menghitung konduktivitas dalam kondisi air tanpa polutan dan air berpolutan

$$\sigma = \frac{l}{R \times A}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{air tanpa polutan}} &= \frac{13,3}{793 \times 45,365} \\ &= 369,710 \ \mu\text{S/cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{air berpolutan}} &= \frac{13,3}{510 \times 45,365} \\ &= 574,863 \ \mu\text{S/cm} \end{aligned}$$

Setelah itu menghitung konduktivitas pada keadaan standar yakni pada suhu 20°

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - 0,02277 (\theta - 20)]$$

$$\begin{aligned} \sigma_{20 \text{ air tanpa polutan}} &= 369,710 [1 - 0,02277 (28 - 20)] \\ &= 302,364 \ \mu\text{S/cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{20 \text{ air berpolutan}} &= 574,863 [1 - 0,02277 (28 - 20)] \\ &= 470,146 \ \mu\text{S/cm} \end{aligned}$$

Setelah itu menghitung konsentrasi garam dalam persen

$$D = \frac{(5,7 \times 10^{-4} \times \sigma_{20})^{1,03}}{10}$$

$$D_1 (\text{air tanpa polutan}) = \frac{(5,7 \times 10^{-4} \times 302,364)^{1,03}}{10}$$

$$= 0,016 \%$$

$$D_2 (\text{air berpolutan}) = \frac{(5,7 \times 10^{-4} \times 470,146)^{1,03}}{10}$$

$$= 0,026 \%$$

Setelah itu menghitung nilai ESDD

$$ESDD = 10 \times V \times \frac{(D_2 - D_1)}{S}$$

$$ESDD = 10 \times 200 \times \frac{(0,026 - 0,016)}{2300,25}$$

$$= 0,008 \text{ mg/cm}^2$$

Dari hasil nilai ESDD yang diperoleh yakni sebesar  $0,008 \text{ mg/cm}^2$  maka ESDD tersebut masuk dalam kategori pengotoran sangat ringan.

## 2. Perhitungan pada isolator berbahan polimer

Pertama menghitung nilai luas penampang melintang pada gelas ukur

$$A = \pi r^2$$

$$A = 45,365 \text{ cm}^2$$

Setelah itu menghitung konduktivitas dalam kondisi air tanpa polutan dan air berpolutan

$$\sigma = \frac{l}{R \times A}$$

$$\sigma_{\text{air tanpa polutan}} = \frac{13,3}{793 \times 45,365}$$

$$= 369,710 \text{ } \mu\text{S/cm}$$

$$\sigma_{\text{air berpolutan}} = \frac{13,3}{533,667 \times 45,365}$$

$$= 549,369 \text{ } \mu\text{S/cm}$$

Setelah itu menghitung konduktivitas pada keadaan standar yakni pada suhu 20°

$$\begin{aligned}\sigma_{20} &= \sigma_{\theta} [1 - 0,02277 (\theta - 20)] \\ \sigma_{20 \text{ air tanpa polutan}} &= 369,710 [1 - 0,02277 (28 - 20)] \\ &= 302,364 \mu S/cm \\ \sigma_{20 \text{ air berpolutan}} &= 549,369 [1 - 0,02277 (28 - 20)] \\ &= 449,296 \mu S/cm\end{aligned}$$

Setelah itu menghitung konsentrasi garam dalam persen

$$\begin{aligned}D &= \frac{(5,7 \times 10^{-4} \times \sigma_{20})^{1,03}}{10} \\ D_1 \text{ (air tanpa polutan)} &= \frac{(5,7 \times 10^{-4} \times 302,364)^{1,03}}{10} \\ &= 0,016 \% \\ D_2 \text{ (air berpolutan)} &= \frac{(5,7 \times 10^{-4} \times 449,296)^{1,03}}{10} \\ &= 0,025 \%\end{aligned}$$

Setelah itu menghitung nilai ESDD

$$\begin{aligned}ESDD &= 10 \times V \times \frac{(D_2 - D_1)}{S} \\ ESDD &= 10 \times 200 \times \frac{(0,025 - 0,016)}{2300,25} \\ &= 0,029 \text{ mg/cm}^2\end{aligned}$$

Dari hasil nilai ESDD yang diperoleh yakni sebesar 0,029 mg/cm<sup>2</sup> maka ESDD tersebut masuk dalam kategori pengotoran sangat ringan.

### 3. Perhitungan Persentase Penurunan Kinerja Isolator

Persentase penurunan kinerja isolator keramik dan polimer, saat kondisi isolator bersih tanpa polutan dan kondisi isolator terkena polutan, menggunakan rumus :

$$\text{Persentase penurunan} = \frac{T_{tp} - T_p}{T_{tp}} \times 100 \%$$

Keterangan :  $T_{tp}$  = Tegangan *flashover* tanpa polutan

$T_p$  = Tegangan *flashover* berpolutan

1. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,008 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{88-84}{88} \times 100 \%$  = 4,545 %
2. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,015 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{88-81}{88} \times 100 \%$  = 7,954 %
3. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,017 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{88-77,333}{88} \times 100 \%$  = 12,122 %
4. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,011 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{88-82}{88} \times 100 \%$  = 6,818 %
5. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,017 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{88-78}{88} \times 100 \%$  = 11,363 %
6. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,023 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{88-75}{88} \times 100 \%$  = 14,772 %
7. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,008 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{88-83,667}{88} \times 100 \%$  = 4,924 %
8. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,016 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{88-77}{88} \times 100 \%$  = 12,5 %
9. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,019 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{88-74}{88} \times 100 \%$  = 15,909 %
10. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,020 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{88-74,667}{88} \times 100 \%$  = 15,151 %

11. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,027 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{88-68,333}{88} \times 100 \% = 22,349 \%$
12. Isolator keramik kering berpolutan dengan ESDD = 0,037 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{88-65}{88} \times 100 \% = 26,136 \%$
13. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,010 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{60-58}{60} \times 100 \% = 3,333 \%$
14. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,012 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{60-56}{60} \times 100 \% = 6,667 \%$
15. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,016 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{60-50}{60} \times 100 \% = 16,667 \%$
16. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,015 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{60-51,333}{60} \times 100 \% = 14,445 \%$
17. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,019 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{60-48}{60} \times 100 \% = 20 \%$
18. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,022 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{60-46}{60} \times 100 \% = 23,333 \%$
19. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,012 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{60-52}{60} \times 100 \% = 13,333 \%$
20. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,016 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{60-50}{60} \times 100 \% = 16,667 \%$
21. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,019 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{60-46,667}{60} \times 100 \% = 22,222 \%$
22. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,022 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{60-46}{60} \times 100 \% = 23,333 \%$
23. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,025 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{60-43}{60} \times 100 \% = 28,333 \%$

24. Isolator keramik basah berpolutan dengan ESDD = 0,027 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{60-38}{60} \times 100 \% = 36,667 \%$
25. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,029 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{65-63,333}{65} \times 100 \% = 2,565 \%$
26. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,048 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{65-61,667}{65} \times 100 \% = 5,128 \%$
27. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,064 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{65-59,333}{65} \times 100 \% = 8,718 \%$
28. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,042 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{65-62}{65} \times 100 \% = 4,615 \%$
29. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,070 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{65-59}{65} \times 100 \% = 9,231 \%$
30. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,090 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{65-56,667}{65} \times 100 \% = 12,82 \%$
31. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,040 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{65-63,333}{65} \times 100 \% = 2,565 \%$
32. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,056 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{65-60}{65} \times 100 \% = 7,692 \%$
33. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,089 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{65-57,333}{65} \times 100 \% = 11,795 \%$
34. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,083 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{65-61,667}{65} \times 100 \% = 5,128 \%$
35. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,114 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{65-58}{65} \times 100 \% = 10,769 \%$
36. Isolator polimer kering berpolutan dengan ESDD = 0,160 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{65-53,667}{65} \times 100 \% = 17,435 \%$

37. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,033 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{45,667-44}{45,667} \times 100 \% = 3,65 \%$
38. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,068 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{45,667-42}{45,667} \times 100 \% = 8,03 \%$
39. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,088 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45° =  $\frac{45,667-40}{45,667} \times 100 \% = 12,409 \%$
40. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,051 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{45,667-42,33}{45,667} \times 100 \% = 7,301 \%$
41. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,073 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{45,667-39,333}{45,667} \times 100 \% = 13,87 \%$
42. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,087 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 90° =  $\frac{45,667-36,667}{45,667} \times 100 \% = 19,708 \%$
43. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,035 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{45,667-43}{45,667} \times 100 \% = 5,84 \%$
44. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,042 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{45,667-40,333}{45,667} \times 100 \% = 11,68 \%$
45. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,081 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 135° =  $\frac{45,667-38}{45,667} \times 100 \% = 16,789 \%$
46. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,079 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{45,667-41}{45,667} \times 100 \% = 10,22 \%$
47. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,106 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{45,667-36,333}{45,667} \times 100 \% = 20,44 \%$
48. Isolator polimer basah berpolutan dengan ESDD = 0,130 mg/cm<sup>2</sup> dengan sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° =  $\frac{45,667-32,667}{45,667} \times 100 \% = 28,47 \%$

#### 4. Perhitungan Persamaan Grafik Menggunakan Rumus Interpolasi Kuadrat

$$y = y_1 \frac{(x - x_2)(x - x_3)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)} + y_2 \frac{(x - x_1)(x - x_3)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)} + y_3 \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)}$$

$$P_1 = (x_1, y_1); P_2 = (x_2, y_2); P_3 = (x_3, y_3)$$

##### 1. Perhitungan Persamaan Grafik Hubungan Antara ESDD dengan Tegangan *Flashover* pada Isolator Keramik Kondisi Kering

$$P_1 = (0,020, 74,667); P_2 = (0,027, 68,333); P_3 = (0,037, 65)$$

$$y = 74,667 \frac{(x - 0,027)(x - 0,037)}{(0,020 - 0,027)(0,020 - 0,037)} + 68,333 \frac{(x - 0,020)(x - 0,037)}{(0,027 - 0,020)(0,027 - 0,037)} + 65 \frac{(x - 0,020)(x - 0,027)}{(0,037 - 0,020)(0,037 - 0,027)}$$

$$y = 74,667 \frac{(x^2 - 0,064x + 0,000999)}{(0,000119)} + 68,333 \frac{(x^2 - 0,057x + 0,00074)}{(-0,00007)} + 65 \frac{(x^2 - 0,047x + 0,00054)}{(0,00017)}$$

$$y = 74,667 (8403,361x^2 - 537,815x + 8,395) + 68,333 (-14285,714x^2 + 814,288x - 10,571) + 65 (5882,353x^2 - 276,471x + 3,177)$$

$$y = (627453,756x^2 - 40157,033x + 626,830) + (-976185,695x^2 + 55642,605x - 722,348) + (382352,945x^2 - 17970,615x + 206,505)$$

$$y = 33621,006x^2 - 2485,043x + 110,987$$

2. Perhitungan Persamaan Grafik Hubungan Antara ESDD dengan Tegangan *Flashover* pada Isolator Keramik Kondisi Basah

$$P_1 = (0,022 , 46) ; P_2 = (0,025 , 43) ; P_3 = (0,027 , 38)$$

$$y = 46 \frac{(x - 0,025)(x - 0,027)}{(0,022 - 0,025)(0,022 - 0,027)} + 43 \frac{(x - 0,022)(x - 0,027)}{(0,025 - 0,022)(0,025 - 0,027)} + 38 \frac{(x - 0,022)(x - 0,025)}{(0,027 - 0,022)(0,027 - 0,025)}$$

$$y = 46 \frac{(x^2 - 0,052x + 0,000675)}{(0,000015)} + 43 \frac{(x^2 - 0,049x + 0,000594)}{(-0,000006)} + 38 \frac{(x^2 - 0,047x + 0,00055)}{(0,000010)}$$

$$y = 46 (66666,667x^2 - 3466,667x + 45) + 43 (-166666,667x^2 + 8166,667x - 99) + 38 (100000x^2 - 4700x + 55)$$

$$y = (3066666,682x^2 - 159466,682x + 2070) + (-7166666,681x^2 + 351166,681x - 4257) + (3800000x^2 - 178600x + 2090)$$

$$y = -300000x^2 + 13100x - 97$$

3. Perhitungan Persamaan Grafik Hubungan Antara ESDD dengan Tegangan *Flashover* pada Isolator Polimer Kondisi Kering

$$P_1 = (0,083 , 61,667) ; P_2 = (0,114 , 58) ; P_3 = (0,160 , 53,667)$$

$$y = 61,667 \frac{(x - 0,114)(x - 0,160)}{(0,083 - 0,114)(0,083 - 0,160)} \\ + 58 \frac{(x - 0,083)(x - 0,160)}{(0,114 - 0,083)(0,114 - 0,160)} \\ + 53,667 \frac{(x - 0,083)(x - 0,114)}{(0,160 - 0,083)(0,160 - 0,114)}$$

$$y = 61,667 \frac{(x^2 - 0,274x + 0,01824)}{(0,002387)} + 58 \frac{(x^2 - 0,243x + 0,01328)}{(-0,001426)} \\ + 53,667 \frac{(x^2 - 0,197x + 0,009462)}{(0,003542)}$$

$$y = 61,667 (418,936x^2 - 114,789x + 7,641) + 58 (-701,262x^2 + 170,407x - 9,313) + 53,667 (282,326x^2 - 55,618x + 2,671)$$

$$y = (25834,526x^2 - 7078,693x + 471,198) + (-40673,196x^2 + 9883,606x - 540,154) + (15151,598x^2 - 2984,851x + 143,344)$$

$$y = 312,919x^2 - 179,938x + 74,388$$

#### 4. Perhitungan Persamaan Grafik Hubungan Antara ESDD dengan Tegangan *Flashover* pada Isolator Polimer Kondisi Basah

$$P_1 = (0,079 , 41) ; P_2 = (0,106 , 36,333) ; P_3 = (0,130 , 32,667)$$

$$y = 41 \frac{(x - 0,106)(x - 0,130)}{(0,079 - 0,106)(0,079 - 0,130)} \\ + 36,333 \frac{(x - 0,079)(x - 0,130)}{(0,106 - 0,079)(0,106 - 0,130)} \\ + 32,667 \frac{(x - 0,079)(x - 0,106)}{(0,130 - 0,079)(0,130 - 0,106)}$$

$$y = 41 \frac{(x^2 - 0,236x + 0,01378)}{(0,001377)} + 36,333 \frac{(x^2 - 0,209x + 0,01027)}{(-0,000648)} \\ + 32,667 \frac{(x^2 - 0,185x + 0,008374)}{(0,001224)}$$

$$y = 41 (726,216x^2 - 171,387x + 10,007) + 36,333 (-1543,210x^2 + 322,531x - 15,849) + 32,667 (816,993x^2 - 151,144x + 6,842)$$

$$y = (29774,856x^2 - 7026,867x + 410,287) + (-56069,449x^2 + 11718,519x - 575,842) + (26688,710x^2 - 4937,421x + 223,508)$$

$$y = 394,117x^2 - 245,769x + 57,953$$

5. Perhitungan Persamaan Grafik Hubungan Antara Sudut Penyemprotan dengan ESDD pada Isolator Keramik Kondisi Kering

$$P_1 = (45, 0,008) ; P_2 = (90, 0,011) ; P_3 = (135, 0,008)$$

$$y = 0,008 \frac{(x - 90)(x - 135)}{(45 - 90)(45 - 135)} + 0,011 \frac{(x - 45)(x - 135)}{(90 - 45)(90 - 135)} \\ + 0,008 \frac{(x - 45)(x - 90)}{(135 - 45)(135 - 90)}$$

$$y = 0,008 \frac{(x^2 - 225x + 12150)}{(4050)} + 0,011 \frac{(x^2 - 180x + 6075)}{(-2025)} \\ + 0,008 \frac{(x^2 - 135x + 4050)}{(4050)}$$

$$y = 0,008 (0,0002469x^2 - 0,0556x + 3) + 0,011 (-0,0004938x^2 + 0,0889x - 3) + 0,008 (0,0002469x^2 - 0,0333x + 1)$$

$$y = (0,0000019752x^2 - 0,0004448x + 0,024) + (-0,0000054318x^2 + 0,0009779x - 0,033) + (0,0000019752x^2 - 0,0002664x + 0,008)$$

$$y = -0,0000014814x^2 + 0,0002667x - 0,001$$

6. Perhitungan Persamaan Grafik Hubungan Antara Sudut Penyemprotan dengan ESDD pada Isolator Keramik Kondisi Basah

$$P_1 = (45, 0,010) ; P_2 = (90, 0,015) ; P_3 = (135, 0,012)$$

$$y = 0,010 \frac{(x-90)(x-135)}{(45-90)(45-135)} + 0,015 \frac{(x-45)(x-135)}{(90-45)(90-135)} + 0,012 \frac{(x-45)(x-90)}{(135-45)(135-90)}$$

$$y = 0,010 \frac{(x^2 - 225x + 12150)}{(4050)} + 0,015 \frac{(x^2 - 180x + 6075)}{(-2025)} + 0,012 \frac{(x^2 - 135x + 4050)}{(4050)}$$

$$y = 0,010 (0,0002469x^2 - 0,0556x + 3) + 0,015 (-0,0004938x^2 + 0,0889x - 3) + 0,012 (0,0002469x^2 - 0,0333x + 1)$$

$$y = (0,000002469x^2 - 0,000556x + 0,030) + (-0,000007407x^2 + 0,0013335x - 0,045) + (0,0000029628x^2 - 0,0003996x + 0,012)$$

$$y = -0,0000019752x^2 + 0,0003779x - 0,003$$

7. Perhitungan Persamaan Grafik Hubungan Antara Sudut Penyemprotan dengan ESDD pada Isolator Polimer Kondisi Kering

$$P_1 = (45, 0,029) ; P_2 = (90, 0,042) ; P_3 = (135, 0,040)$$

$$y = 0,029 \frac{(x-90)(x-135)}{(45-90)(45-135)} + 0,042 \frac{(x-45)(x-135)}{(90-45)(90-135)} \\ + 0,040 \frac{(x-45)(x-90)}{(135-45)(135-90)}$$

$$y = 0,029 \frac{(x^2 - 225x + 12150)}{(4050)} + 0,042 \frac{(x^2 - 180x + 6075)}{(-2025)} \\ + 0,040 \frac{(x^2 - 135x + 4050)}{(4050)}$$

$$y = 0,029 (0,0002469x^2 - 0,0556x + 3) + 0,042 (-0,0004938x^2 + 0,0889x - 3) + \\ 0,040 (0,0002469x^2 - 0,0333x + 1)$$

$$y = (0,0000071601x^2 - 0,0016124x + 0,087) + (-0,0000207396x^2 + 0,0037338x - \\ 0,126) + (0,000009876x^2 - 0,001332x + 0,040)$$

$$y = -0,0000037035x^2 + 0,0007894x + 0,001$$

8. Perhitungan Persamaan Grafik Hubungan Antara Sudut Penyemprotan dengan ESDD pada Isolator Polimer Kondisi Basah

$$P_1 = (45, 0,033) ; P_2 = (90, 0,051) ; P_3 = (135, 0,035)$$

$$y = 0,033 \frac{(x-90)(x-135)}{(45-90)(45-135)} + 0,051 \frac{(x-45)(x-135)}{(90-45)(90-135)} \\ + 0,035 \frac{(x-45)(x-90)}{(135-45)(135-90)}$$

$$y = 0,033 \frac{(x^2 - 225x + 12150)}{(4050)} + 0,051 \frac{(x^2 - 180x + 6075)}{(-2025)} \\ + 0,035 \frac{(x^2 - 135x + 4050)}{(4050)}$$

$$y = 0,033 (0,0002469x^2 - 0,0556x + 3) + 0,051 (-0,0004938x^2 + 0,0889x - 3) + \\ 0,035 (0,0002469x^2 - 0,0333x + 1)$$

$$y = (0,0000081477x^2 - 0,0018348x + 0,099) + (-0,0000251838x^2 + 0,0045339x - \\ 0,153) + (0,0000086415x^2 - 0,0011655x + 0,035)$$

$$y = -0,0000083946x^2 + 0,0015336x - 0,019$$

**LAMPIRAN B. DATA HASIL PENGUJIAN**

Tanggal Pengujian : 18-19 dan 27-29 April 2016

Suhu Ruang Laboratorium : 28° C

**1. Hasil Pengujian Tegangan *Flashover* pada Isolator Berbahan Keramik Kondisi Kering**

No.	Kondisi	Variabel	V <sub>s</sub> (kV)	ΔV/Δt (V/s)	t <sub>flashover</sub> (s)	Pengulangan			V <sub>flashover</sub> rata-rata
						V <sub>flashover</sub> I (kV)	V <sub>flashover</sub> II (kV)	V <sub>flashover</sub> III (kV)	
1	Tanpa polutan	-	45	100	430	88	88	88	88
2	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°	I	45	100	390	84	84	84	84
		II	45	100	360	81	81	81	81
		III	45	100	330	78	77	77	77,333
3	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 90°	I	45	100	370	82	82	82	82
		II	45	100	330	78	78	78	78
		III	45	100	300	75	75	75	75
4	Berpolutan dengan	I	45	100	380	83	84	84	83,667
		II	45	100	320	77	77	77	77

	penyemprotan sudut 135°	III	45	100	290	74	74	74	74
5	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°, 90°, dan 135°	I	45	100	290	74	75	75	74,667
		II	45	100	240	69	68	68	68,333
		III	45	100	210	66	64	65	65

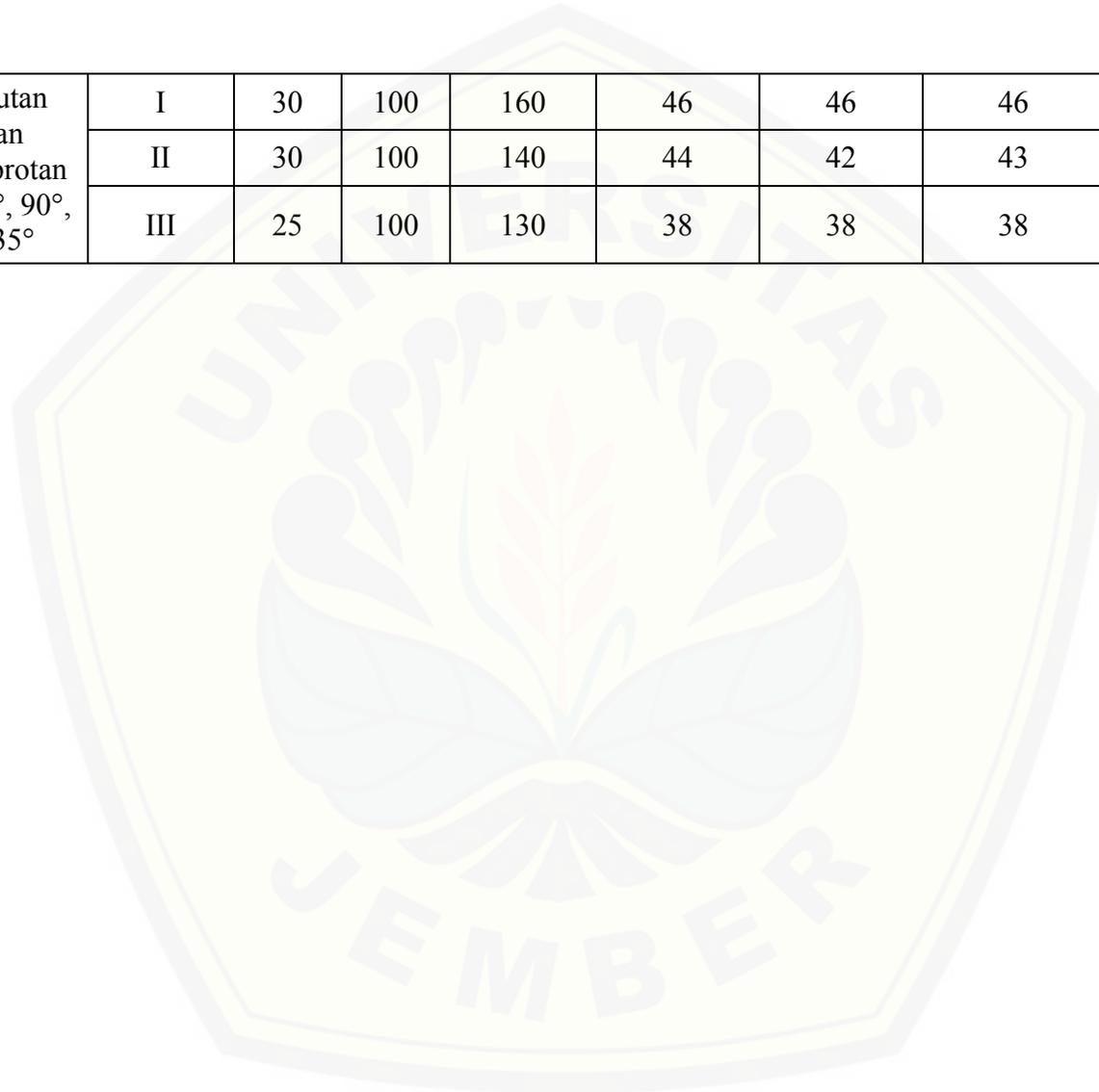
Tanggal Pengujian : 18-19 dan 27-29 April 2016

Suhu Ruangan Laboratorium : 28° C

## 2. Hasil Pengujian Tegangan *Flashover* pada Isolator Berbahan Keramik Kondisi Basah

No.	Kondisi	Variabel	V <sub>s</sub> (kV)	ΔV/Δt (V/s)	t <sub>flashover</sub> (s)	Pengulangan			V <sub>flashover</sub> rata-rata
						V <sub>flashover</sub> I (kV)	V <sub>flashover</sub> II (kV)	V <sub>flashover</sub> III (kV)	
1	Tanpa polutan	-	30	100	300	60	60	60	60
2	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°	I	30	100	280	58	58	58	58
		II	30	100	260	56	56	56	56
		III	30	100	200	50	50	50	50
3	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 90°	I	30	100	200	50	52	52	51,333
		II	30	100	180	48	48	48	48
		III	30	100	160	46	46	46	46
4	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 135°	I	30	100	220	52	52	52	52
		II	30	100	200	50	50	50	50
		III	30	100	160	46	47	47	46,667

5	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°, 90°, dan 135°	I	30	100	160	46	46	46	46
		II	30	100	140	44	42	43	43
		III	25	100	130	38	38	38	38



Tanggal Pengujian : 18-19 dan 27-29 April 2016  
 Suhu Ruangan Laboratorium : 28° C  
 Luas Permukaan Isolator : 2300,25 cm<sup>2</sup>  
 Dimensi Gelas Ukur : Panjang = 13,3 cm Diameter = 7,6 cm  
 Volume Air Pencuci : 200 cc

**3. Hasil Pengukuran Resistansi, dan Perhitungan Konduktivitas, Konsentrasi Garam, ESDD, serta Tingkat Pengotoran Pada Permukaan Isolator Berbahan Keramik Kondisi Kering**

No.	Kondisi	Variabel	Pengulangan			Rata – rata ( $\Omega$ )	Konduktivitas ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Konsentrasi Garam (%)	ESDD ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	Tingkat Pengotoran
			R <sub>I</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>II</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>III</sub> ( $\Omega$ )					
1	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°	I	512	508	510	510	470,146	0,026	0,008	Sangat ringan
		II	404	398	390	397,333	603,460	0,033	0,015	Sangat ringan
		III	377	360	365	367,333	652,744	0,036	0,017	Sangat ringan
2	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 90°	I	451	440	445	445,333	538,416	0,030	0,011	Sangat ringan
		II	375	360	370	368,333	650,972	0,036	0,017	Sangat ringan
		III	313	304	310	309	775,969	0,043	0,023	Sangat ringan

3	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 135°	I	501	496	490	495,667	483,741	0,026	0,008	Sangat ringan
		II	391	385	378	384,667	623,330	0,034	0,016	Sangat ringan
		III	348	340	334	340,667	703,838	0,039	0,019	Sangat ringan
4	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°, 90°, dan 135°	I	340	331	328	333	720,043	0,040	0,020	Sangat ringan
		II	280	285	280	281,667	851,269	0,047	0,027	Sangat ringan
		III	235	220	225	226,667	1057,827	0,060	0,037	Ringan

Tanggal Pengujian : 18-19 dan 27-29 April 2016  
 Suhu Ruangan Laboratorium : 28° C  
 Luas Permukaan Isolator : 2300,25 cm<sup>2</sup>  
 Dimensi Gelas Ukur : Panjang = 13,3 cm Diameter = 7,6 cm  
 Volume Air Pencuci : 200 cc

**4. Hasil Pengukuran Resistansi, dan Perhitungan Konduktivitas, Konsentrasi Garam, ESDD, serta Tingkat Pengotoran Pada Permukaan Isolator Berbahan Keramik Kondisi Basah**

No.	Kondisi	Variabel	Pengulangan			Rata – rata ( $\Omega$ )	Konduktivitas ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Konsentrasi Garam (%)	ESDD ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	Tingkat Pengotoran
			R <sub>I</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>II</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>III</sub> ( $\Omega$ )					
1	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°	I	480	475	478	477,667	501,970	0,027	0,010	Sangat ringan
		II	437	430	430	432,333	554,606	0,030	0,012	Sangat ringan
		III	378	375	373	375,333	638,831	0,035	0,016	Sangat ringan
2	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 90°	I	391	386	386	387,667	618,506	0,034	0,015	Sangat ringan
		II	350	340	344	344,667	695,670	0,038	0,019	Sangat ringan
		III	330	318	316	321,333	746,187	0,041	0,022	Sangat ringan

3	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 135°	I	450	433	438	440,333	544,530	0,030	0,012	Sangat ringan
		II	390	370	375	378,333	633,766	0,035	0,016	Sangat ringan
		III	354	344	340	346	692,990	0,038	0,019	Sangat ringan
4	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°, 90°, dan 135°	I	320	316	312	316	758,780	0,042	0,022	Sangat ringan
		II	300	288	290	292,667	819,274	0,046	0,025	Sangat ringan
		III	280	283	276	279,667	857,357	0,048	0,027	Sangat ringan

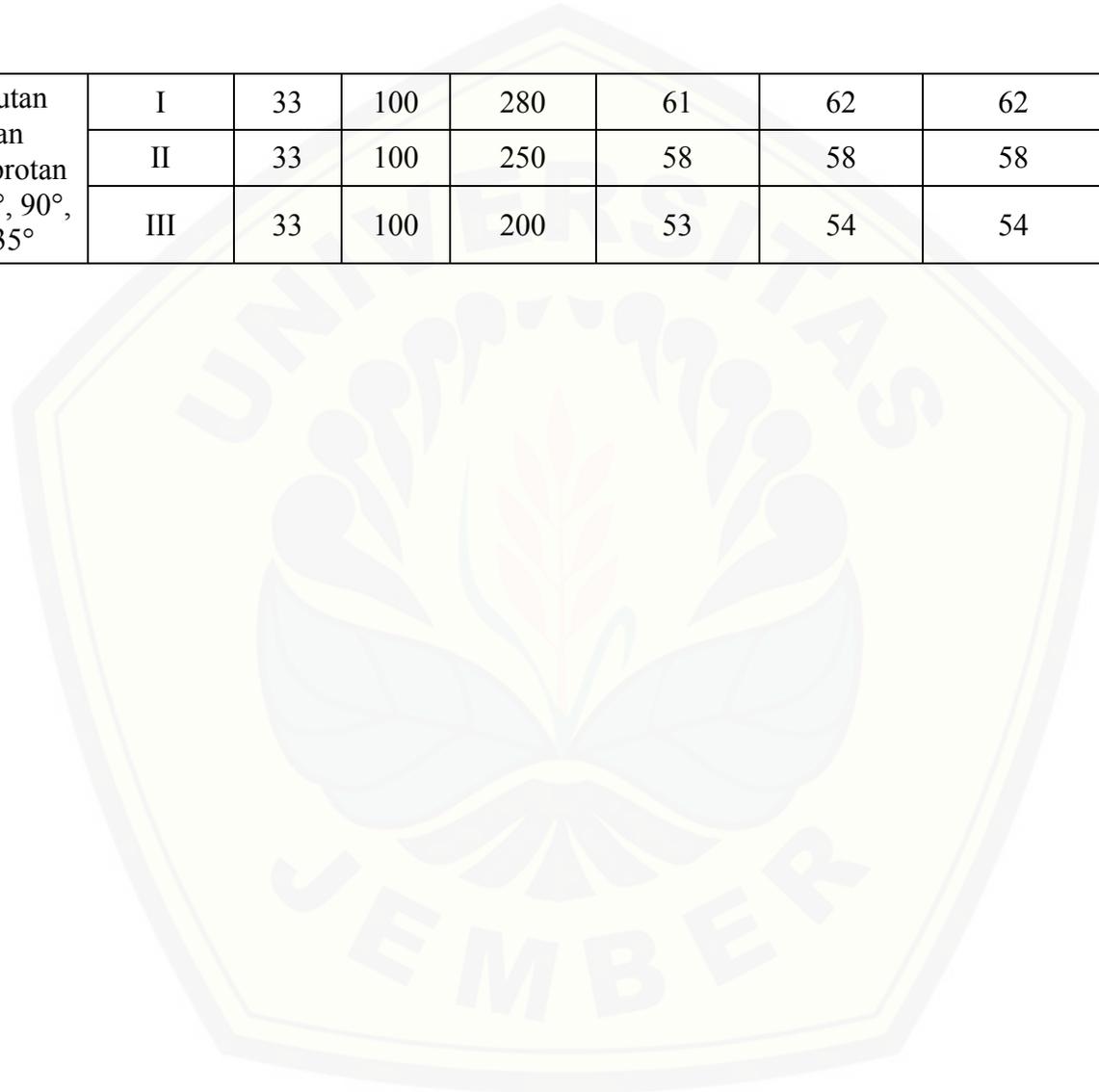
Tanggal Pengujian : 18-19 dan 27-29 April 2016

Suhu Ruangan Laboratorium : 28° C

### 5. Hasil Pengujian Tegangan *Flashover* pada Isolator Berbahan Polimer Kondisi Kering

No.	Kondisi	Variabel	V <sub>s</sub> (kV)	ΔV/Δt (V/s)	t <sub>flashover</sub> (s)	Pengulangan			V <sub>flashover</sub> rata-rata
						V <sub>flashover I</sub> (kV)	V <sub>flashover II</sub> (kV)	V <sub>flashover III</sub> (kV)	
1	Tanpa polutan	-	33	100	320	65	65	65	65
2	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°	I	33	100	310	64	63	63	63,333
		II	33	100	290	62	62	61	61,667
		III	33	100	270	60	59	59	59,333
3	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 90°	I	33	100	290	62	62	62	62
		II	33	100	260	59	59	59	59
		III	33	100	239	56	57	57	56,667
4	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 135°	I	33	100	310	64	63	63	63,333
		II	33	100	270	60	60	60	60
		III	33	100	250	58	57	57	57,333

5	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°, 90°, dan 135°	I	33	100	280	61	62	62	61,667
		II	33	100	250	58	58	58	58
		III	33	100	200	53	54	54	53,667



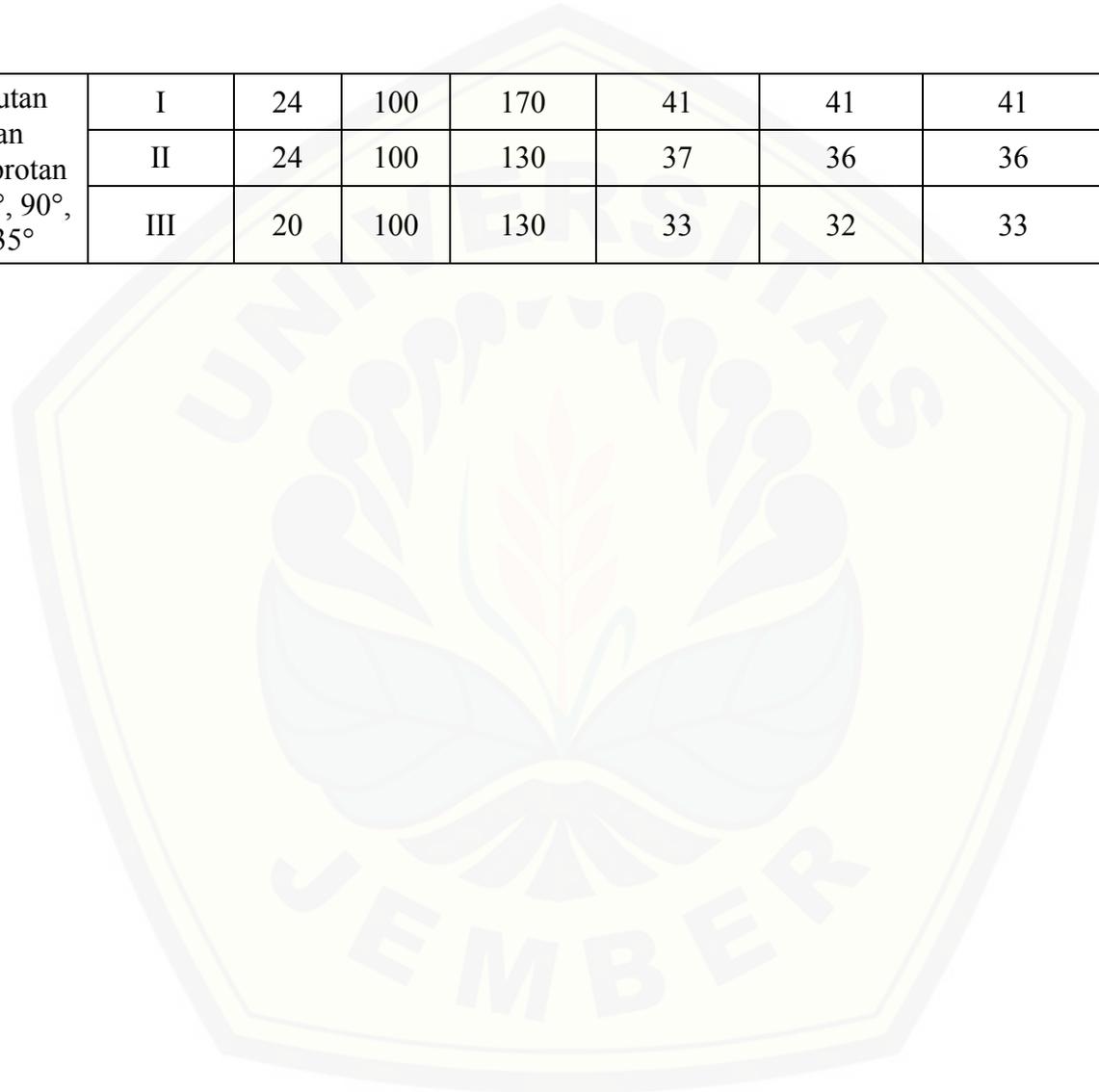
Tanggal Pengujian : 18-19 dan 27-29 April 2016

Suhu Ruangan Laboratorium : 28° C

#### 6. Hasil Pengujian Tegangan *Flashover* pada Isolator Berbahan Polimer Kondisi Basah

No.	Kondisi	Variabel	V <sub>s</sub> (kV)	ΔV/Δt (V/s)	t <sub>flashover</sub> (s)	Pengulangan			V <sub>flashover</sub> rata-rata
						V <sub>flashover</sub> I (kV)	V <sub>flashover</sub> II (kV)	V <sub>flashover</sub> III (kV)	
1	Tanpa polutan	-	24	100	210	45	46	46	45,667
2	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°	I	24	100	200	44	44	44	44
		II	24	100	180	42	42	42	42
		III	24	100	160	40	40	40	40
3	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 90°	I	24	100	190	43	42	42	42,333
		II	24	100	160	40	39	39	39,333
		III	24	100	130	37	37	36	36,667
4	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 135°	I	24	100	190	44	43	42	43
		II	24	100	160	40	41	40	40,333
		III	24	100	140	38	38	38	38

5	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°, 90°, dan 135°	I	24	100	170	41	41	41	41
		II	24	100	130	37	36	36	36,333
		III	20	100	130	33	32	33	32,667



Tanggal Pengujian : 18-19 dan 27-29 April 2016  
 Suhu Ruangan Laboratorium : 28° C  
 Luas Permukaan Isolator : 560,774 cm<sup>2</sup>  
 Dimensi Gelas Ukur : Panjang = 13,3 cm Diameter = 7,6 cm  
 Volume Air Pencuci : 200 cc

**7. Hasil Pengukuran Resistansi, dan Perhitungan Konduktivitas, Konsentrasi Garam, ESDD, serta Tingkat Pengotoran Pada Permukaan Isolator Berbahan Polimer Kondisi Kering**

No.	Kondisi	Variabel	Pengulangan			Rata – rata ( $\Omega$ )	Konduktivitas ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Konsentrasi Garam (%)	ESDD ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	Tingkat Pengotoran
			R <sub>I</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>II</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>III</sub> ( $\Omega$ )					
1	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°	I	537	534	530	533,667	449,296	0,025	0,029	Sangat ringan
		II	447	440	440	442,333	542,068	0,030	0,048	Ringan
		III	389	385	385	386,333	620,642	0,034	0,064	Sedang
2	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 90°	I	470	470	465	468,333	511,974	0,028	0,042	Ringan
		II	370	367	365	367,333	652,744	0,036	0,070	Sedang
		III	323	321	318	320,667	747,737	0,041	0,090	Sedang

3	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 135°	I	484	480	481	481,667	497,801	0,027	0,040	Ringan
		II	416	412	409	412,333	581,507	0,032	0,056	Ringan
		III	324	321	323	322,667	743,102	0,042	0,089	Sedang
4	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°, 90°, dan 135°	I	340	337	331	336	713,614	0,040	0,083	Sedang
		II	282	275	273	276,667	866,654	0,048	0,114	Berat
		III	227	219	213	219,667	1091,536	0,061	0,160	Berat

Tanggal Pengujian : 18-19 dan 27-29 April 2016  
 Suhu Ruangan Laboratorium : 28° C  
 Luas Permukaan Isolator : 560,774 cm<sup>2</sup>  
 Dimensi Gelas Ukur : Panjang = 13,3 cm Diameter = 7,6 cm  
 Volume Air Pencuci : 200 cc

**8. Hasil Pengukuran Resistansi, dan Perhitungan Konduktivitas, Konsentrasi Garam, ESDD, serta Tingkat Pengotoran Pada Permukaan Isolator Berbahan Polimer Kondisi Basah**

No.	Kondisi	Variabel	Pengulangan			Rata – rata ( $\Omega$ )	Konduktivitas ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Konsentrasi Garam (%)	ESDD ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	Tingkat Pengotoran
			R <sub>I</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>II</sub> ( $\Omega$ )	R <sub>III</sub> ( $\Omega$ )					
1	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°	I	517	512	507	512	468,309	0,026	0,033	Ringan
		II	377	373	370	373,333	642,254	0,035	0,068	Sedang
		III	329	323	321	324,333	739,285	0,041	0,088	Sedang
2	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 90°	I	433	431	427	430,333	557,183	0,031	0,051	Ringan
		II	365	360	360	361,667	662,970	0,037	0,073	Sedang
		III	331	324	324	326,333	734,754	0,041	0,087	Sedang

3	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 135°	I	510	503	498	503,667	476,057	0,026	0,035	Ringan
		II	473	470	465	469,333	510,883	0,028	0,042	Ringan
		III	342	342	337	340,333	704,529	0,039	0,081	Sedang
4	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°, 90°, dan 135°	I	349	345	340	344,667	695,670	0,039	0,079	Sedang
		II	293	291	286	290	826,808	0,046	0,106	Berat
		III	258	254	251	254,333	942,758	0,053	0,130	Berat

LAMPIRAN C. DOKUMENTASI PENELITIAN



Isolator Berbahan Keramik



Isolator Berbahan Polimer



Peralatan Pembangkit Tegangan Tinggi



Kontrol Box Tipe 27



Isolator Polimer Diuji



Isolator Keramik Dikeringkan



Peneliti Sedang Mengatur Kontrol Box



Isolator Keramik Diuji



Isolator Polimer Dikeringkan

**A. Isolator Berbahan Keramik Kondisi Kering**

No.	Kondisi	Variabel	Dokumentasi
1	Tanpa polutan	-	
2	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°	I	
		II	

			
		<p>III</p>	
<p>3</p>	<p>Berpolutan dengan penyemprotan sudut 90°</p>	<p>I</p>	
		<p>II</p>	

			
		III	
4	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 135°	I	
		II	

			
		<p>III</p>	
<p>5</p>	<p>Berpolutan dengan penyemprotan sudut <math>45^\circ</math>, <math>90^\circ</math>, dan <math>135^\circ</math></p>	<p>I</p>	

		II	
		III	

**B. Isolator Berbahan Keramik Kondisi Basah**

No.	Kondisi	Variabel	Dokumentasi
1	Tanpa polutan	-	

			
	<p>Berpolutan dengan</p>	<p>I</p>	
		<p>II</p>	

2	penyemprotan sudut 45°		
		III	
		I	

3	Berpolutan dengan penyemprotan sudut $90^\circ$	II	
		III	
		I	

<p>4</p>	<p>Berpolutan dengan penyemprotan sudut 135°</p>	<p>II</p>	
		<p>III</p>	
		<p>I</p>	

5	Berpolutan dengan penyemprotan sudut $45^\circ$ , $90^\circ$ , dan $135^\circ$	II	
		III	

### C. Isolator Berbahan Polimer Kondisi Kering

No.	Kondisi	Variabel	Dokumentasi
1	Tanpa polutan	-	

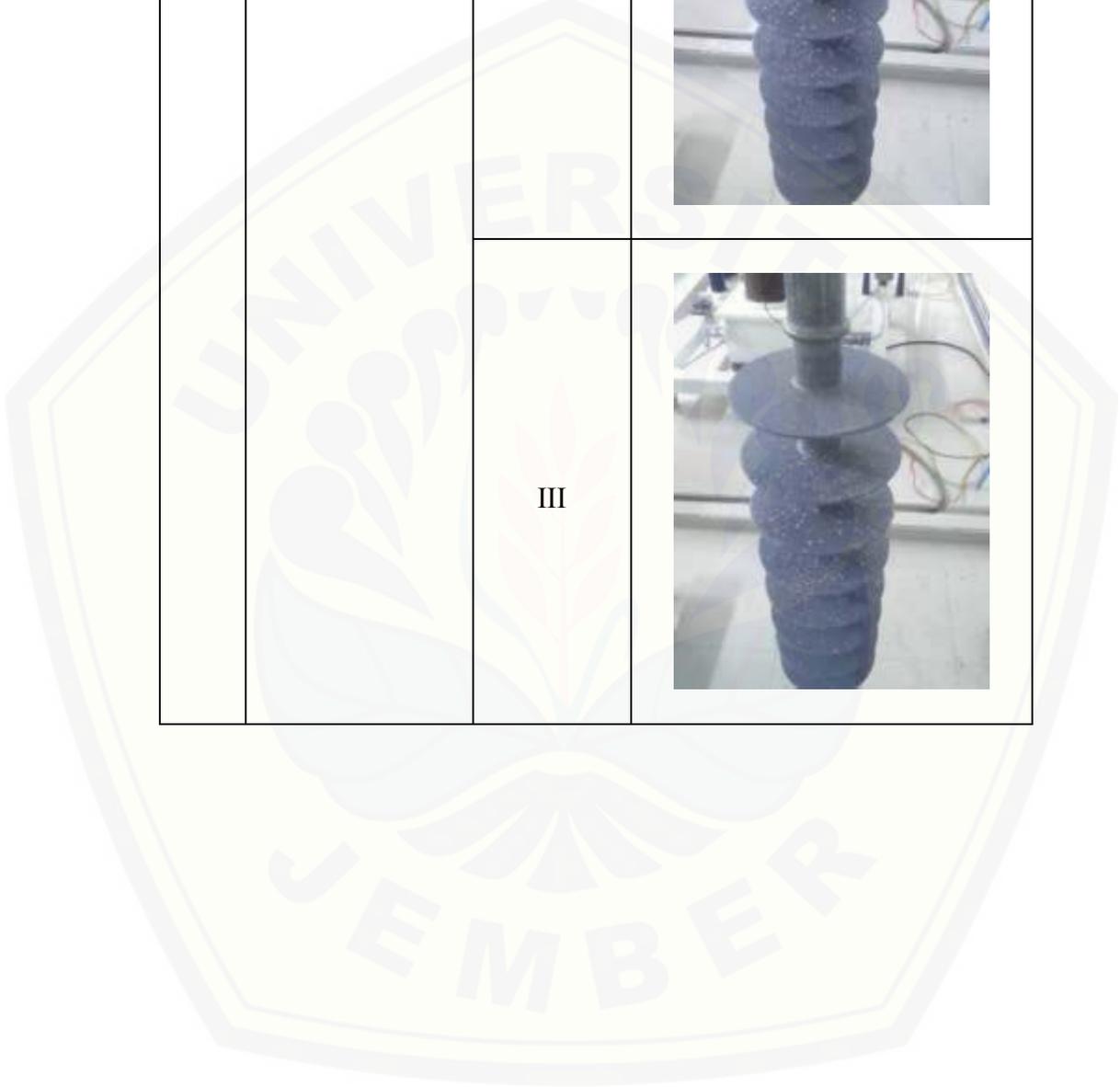
			
<p>2</p>	<p>Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°</p>	<p>I</p>	

		II	
		III	
3	Berpolutan dengan penyemprotan sudut $90^\circ$	I	

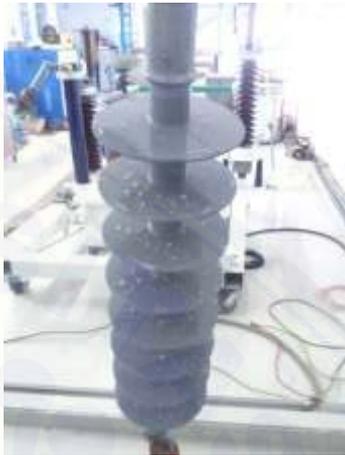
		<p>II</p>	
		<p>III</p>	
<p>4</p>	<p>Berpolutan dengan penyemprotan sudut <math>135^\circ</math></p>	<p>I</p>	

		<p>II</p>	
		<p>III</p>	
<p>5</p>	<p>Berpolutan dengan penyemprotan sudut <math>45^\circ</math>, <math>90^\circ</math>, dan <math>135^\circ</math></p>	<p>I</p>	

		II	
		III	

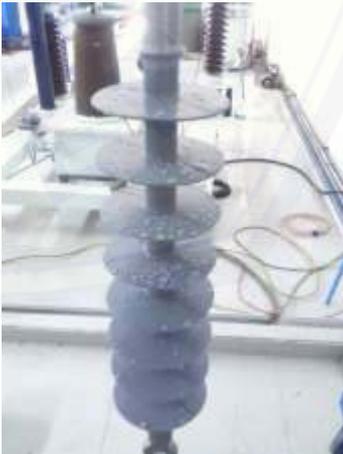


**D. Isolator Berbahan Polimer Kondisi Basah**

No.	Kondisi	Variabel	Dokumentasi
1	Tanpa polutan	-	
2	Berpolutan dengan penyemprotan sudut 45°	I	

		<p>II</p>	
		<p>III</p>	
<p>3</p>	<p>Berpolutan dengan penyemprotan sudut 90°</p>	<p>I</p>	

		<p>II</p>	
		<p>III</p>	
<p>4</p>	<p>Berpolutan dengan penyemprotan sudut <math>135^\circ</math></p>	<p>I</p>	

		<p>II</p>	
		<p>III</p>	
<p>5</p>	<p>Berpolutan dengan penyemprotan sudut <math>45^\circ</math>, <math>90^\circ</math>, dan <math>135^\circ</math></p>	<p>I</p>	

		II	
		III	

