

**KARAKTERISTIK ISOLATOR POLIMER
TEGANGAN TINGGI DI BAWAH PENUAAN TEKANAN
IKLIM TROPIS BUATAN YANG DIPERCEPAT**

***CHARACTERISTIC OF HIGH VOLTAGE POLYMER INSULATOR
UNDER ACCELERATED ARTIFICIAL TROPICAL CLIMATE
MULTI STRESS AGING***

MUSTAMIN



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2011

**KARAKTERISTIK ISOLATOR POLIMER
TEGANGAN TINGGI DI BAWAH PENUAAN TEKanan
IKLIM TROPIS BUATAN YANG DIPERCEPAT**

***CHARACTERISTIC OF HIGH VOLTAGE POLYMER INSULATOR
UNDER ACCELERATED ARTIFICIAL TROPICAL CLIMATE
MULTI STREES AGING***

MUSTAMIN



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2011

**KARAKTERISTIK ISOLATOR POLIMER
TEGANGAN TINGGI DI BAWAH PENUAAN TEKANAN
IKLIM TROPIS BUATAN YANG DIPERCEPAT**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

**Program Studi
Teknik Elektro**

Disusun dan diajukan oleh

MUSTAMIN

Kepada

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2011

TESIS

KARAKTERISTIK ISOLATOR POLIMER TEGANGAN TINGGI DI BAWAH PENYALINAN TEKANAN IKLIM TROPIS BUATAN YANG DIPERCEPAT

Disusun dan diajukan oleh

MUSTAMIN

Nomor Pokok P2700208049

**Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis
pada tanggal 4 Januari 2011
dan dinyatakan telah memenuhi syarat**

Menyetujui

Komisi Penasehat,

Prof.Dr.Ir.H.Salama Manjang,M.T

Ketua

Ketua Program Studi
Teknik Elektro,

Prof.Dr.Ir.H.Muhammad Arief,Dipl.Ing.

Anggota

Direktur Program Pascasarjana
Universitas Hasanuddin.

Prof.Dr.Ir.H.Salama Manjang,M.T

Prof. Dr. Ir. Mursalim

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mustamin
Nomor Pokok : P2700208049
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 23 Desember 2010

Yang menyatakan

Mustamin

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah kita panjatkan kehadiran Allah SWT, atas rahmat dan taufiq-Nya sehingga tugas akhir ini dapat kami susun, mudah-mudahan dapat berjalan lancar.

Gagasan yang melatarbelakangi permasalahan ini timbul dari banyaknya kendala yang dialami oleh isolator pasangan luar terhadap polusi, iklim dan cuaca yang digunakan oleh PT.PLN (persero) sehingga banyak terjadi gangguan system ketenagalistrikan terutama pada daerah berpolusi berat. Penulis bermaksud menyumbangkan beberapa konsep untuk meningkatkan kehandalan system kelistrikan di daerah beriklim tropis.

Banyak kendala yang dihadapi penulis dalam rangka penyusunan tesis ini, hanya dengan bantuan berbagai pihak, maka tesis ini dapat selesai pada waktunya. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih kepada Prof.Dr.H.Salama Manjang, MT. sebagai ketua komisi penasehat dan Prof.Dr.H.Muhammad Arief, Dipl.Ing. sebagai Anggota Komisi Penasehat atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mulai dari pengembangan minat terhadap permasalahan penelitian ini, pelaksanaan penelitiannya sampai dengan penulisan tesis ini.

Secara khusus kami mengucapkan banyak terima kasih kepada JICA Jepang yang telah memberikan bantuan financial melalui LBE Fund, serta kepada PT PLN (Persero) Wilayah Sultan Batara yang telah memberikan

beberapa sarana pendukung yang diperlukan sehingga laboratorium riset kami dapat berfungsi dengan baik. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Ir. Muhammad Ridwan,MT. yang dengan tulus membantu dalam membuat modul riset tegangan tinggi, juga kepada Adeha Saka,S.Ag yang senantiasa memberikan motivasi serta teman-teman yang tanpa lelah membantu kami dalam proses desain dan konstruksi laboratorium riset tegangan tinggi selama ini hingga semua data yang diperlukan dapat terkumpul dengan baik. Dan yang terakhir ucapan terima kasih kepada mereka yang namanya tidak tercantum tetapi telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.

Kami sadar bahwa dalam penulisan tesis ini membutuhkan banyak bantuan dari berbagai pihak dalam pembuatan modul riset hingga dalam penulisan narasi tugas akhir ini. Kami sangat berharap bantuan dan petunjuk dari stakeholder dalam mewujudkan cita-cita mulia kami. Atas partisipasi bantuannya semoga mendapat balasan yang setimpal dari Allah SWT.

Makassar, 23 Desember 2010

Mustamin

ABSTRAK

MUSTAMIN. *Karakteristik Isolator Polimer Tegangan Tinggi Dibawah Penuaan Tekanan Iklim Tropis Buatan yang Dipercepat* (dibimbing oleh **Salama Manjang** dan **Muhammad Arief**).

Penelitian isolator polimer SIR bertujuan : (1) menganalisis karakteristik arus bocor permukaan dari isolator polimer dibawah pengaruh multi tekanan buatan, (2) mengetahui faktor-faktor iklim tropis yang dapat mempengaruhi karakteristik arus bocor permukaan dari isolator polimer, (3) menentukan faktor iklim yang paling berpengaruh terhadap karakteristik arus bocor permukaan dari isolator polimer, (4) menentukan perbandingan arus bocor permukaan isolator polimer dengan isolator keramik atau isolator gelas jika digunakan di daerah beriklim tropis.

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Tegangan Tinggi UNHAS Makassar, dengan bantuan pembiayaan dari JICA LBE Fund dan PT.PLN (persero), PT.Freeport. Metode yang digunakan adalah membuat konsep desain konstruksi *chamber* dan aksesorisnya, mendesain hingga dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan fungsinya. Selanjutnya menentukan sampel Isolator yang akan digunakan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik arus bocor permukaan isolator polimer SIR jauh lebih kecil dan stabil dari pada isolator keramik dan isolator gelas dalam pengujian dengan menerima berbagai tekanan iklim tropis buatan menunjukkan bahwa arus bocor permukaan isolator polimer SIR sangat kecil untuk semua jenis pengaruh iklim tropis dengan perbandingan terkecil terjadi ketika diterpa polusi kabut garam dengan perbandingan rata-rata mencapai 1 : 3,14 : 4,26 terhadap isolator keramik dan isolator gelas. selisih arus bocor terendah rata-rata mencapai 72,03 % terhadap isolator keramik dan 58,21% terhadap isolator gelas.

Kata kunci : *“Isolator polimer SIR, penuaan, arus bocor”*

ABSTRACT

MUSTAMIN. *Characteristic of High Voltage Polymer Insulator Under Accelerated Artificial Tropical Climate Multi Stress Aging* (supervised by **Salama Manjang** and **Muhammad Arief**).

The research of polymer insulator SIR aimed at : (1) analysing the characteristic of surface leakage current of the polymer insulator under the impact of artificial multi stress, (2) investigating tropical climate factors which could influence the characteristic of the surface leakage current of the polymer insulator, (3) determining the most influential climate factor towards the characteristics of the surface leakage current of the polymer insulator, (4) determine a comparison of the surface leakage current of the polymer insulator with a ceramic insulator or a glass insulator if they were used in the area with the tropical climate.

This research was carried out in the High Voltage Laboratory, Hasanuddin University Makassar, with the financial assistance from JICA LBE Fund and PT.PLN (Ltd), PT. Freeport. The methods used were making design concept of chamber construction and it accessories, designing it so that it could function well in line with its usefulness. Then, the insulator sample, that would be used, was determined.

The tests are carried in several stages and the result of the research reveals that the characteristic of the surface leakage current of polymer insulators SIR is much smaller and more stable than ceramic insulator and glass insulator. The test, by blowing the various artificial tropical climate pressure, indicates that the surface leakage current of the polymer insulator SIR is very small for all types of the tropical climate impacts and the smallest comparison occurs when it is blown by the pollution of salty fog in which the average comparison achieves 1 : 3,14 : 4,26 towards ceramic insulator and glass insulator. The difference of the lowest leakage current reaches the average of 72,03 % towards the ceramic insulator and 58,21% towards the glass insulator.

Keywords: *“Polymer insulator SIR, aging, leakage current”*

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Tujuan Penelitian	6
1.4. Manfaat Penelitian	7
1.5. Lingkup Masalah	8
BAB II TEORI DASAR	9
2.1. Bahan Isolasi	9
2.2. Isolator Polimer SIR pada Tegangan Tinggi	12
2.3. Pengaruh <i>Filler</i> Terhadap Serapan Air dan Dielektrik Isolator Polimer	16
2.4. Struktur Kimia Isolator Polimer	18
2.5. Sifat-sifat Penting Isolator Polimer	20
2.6. Polusi pada Isolator Polimer	30
2.7. Hubungan Tingkat Polusi dan Jarak Rambat	34

2.8. Pengaruh Diameter Isolator Polimer	35
2.9. Polutan Terlarut dan Tak Larut	36
2.10. Mekanisme <i>Flashover</i> Isolator Polimer	38
BAB III METODE PENELITIAN	44
3.1. Pendekatan dan Jenis Penelitian	44
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian	47
3.3. Alat dan Bahan	47
3.4. Jenis Data Dan Sumber Data	52
3.5. Instrumen Penelitian	52
3.6. Sampel Pengujian	53
3.7. <i>Road Map</i> Penelitian	56
3.8. Kerangka Pikir	58
3.9. Teknik Pengumpulan Data	62
3.10. Tahapan Penelitian dan Jadwalnya	63
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	72
4.1. Hasil Penelitian	72
4.1.1. Hasil Pengujian Karakteristik Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Di bawah Pengaruh Tekanan Medan Listrik AC (HV)	72
4.1.2. Hasil Pengujian Karakteristik Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Di bawah Pengaruh Radiasi Ultra Violet (UV)	87
4.1.3. Hasil Pengujian Karakteristik Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Di bawah Pengaruh Tekanan Termal (°C)	93
4.1.4. Hasil Pengujian Karakteristik Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Di bawah Pengaruh	

Kelembaban (<i>Humidity</i>)	105
4.1.5. Hasil Pengujian Karakteristik Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Di bawah Pengaruh Intensitas Curah Hujan (<i>rain clean water</i>)	117
4.1.6. Hasil Pengujian Karakteristik Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Di bawah Pengaruh Kabut Garam (<i>salt fog</i>)	124
4.2. Pembahasan Hasil Penelitian	135
4.2.1. Karakteristik Arus Bocor (<i>Leakage Current</i>) Isolator Polimer SIR Di bawah Pengaruh Tekanan Medan Listrik (HV)	135
4.2.2. Karakteristik Arus Bocor (<i>Leakage Current</i>) Isolator Polimer SIR Di bawah Terpaan Radiasi Ultra Violet (UV)	138
4.2.3. Karakteristik Arus Bocor (<i>Leakage Current</i>) Isolator Polimer SIR Di bawah Pengaruh Tekanan Termal ($^{\circ}\text{C}$)	141
4.2.4. Karakteristik Arus Bocor (<i>Leakage Current</i>) Isolator Polimer SIR Di bawah Pengaruh Kelembaban Udara (%)	143
4.2.5. Karakteristik Arus Bocor (<i>Leakage Current</i>) Isolator Polimer SIR Di bawah Terpaan Intensitas Curah Hujan (mm/min)	147
4.2.6. Karakteristik Arus Bocor (<i>Leakage Current</i>) Isolator Polimer SIR Di bawah Terpaan Polusi Kabut Garam (mS/cm)	150
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	154
5.1. Kesimpulan	154
5.2. Saran-saran	156
DAFTAR PUSTAKA	157
LAMPIRAN	159

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Berat Antara Isolator Porselin/Keramik dengan Isolator Polimer	15
Tabel 2.2	Sifat Isolator Polimer SIR	20
Tabel 2.3	Tingkat Polusi dan Lingkungannya (IEC Publication 815, SPLN 10-3B:1993)	33
Tabel 2.4	Tingkat Polusi dan Jarak Rambat Spesifik Minimum	34
Tabel 3.1	Data Teknik Sampel Isolator Polimer SIR yang Digunakan	54
Tabel 4.1	Perbandingan Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Terhadap Isolator Keramik dan Isolator Gelas Di bawah Pengaruh Medan Listrik (kV)	136
Tabel 4.2	Perbandingan Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Terhadap Isolator Keramik dan Isolator Gelas Di bawah Pengaruh Radiasi Ultra Violet (Lux)	139
Tabel 4.3	Perbandingan Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Terhadap Isolator Keramik dan Isolator Gelas Di bawah Pengaruh Tekanan Termal ($^{\circ}\text{C}$)	142
Tabel 4.4	Perbandingan Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Terhadap Isolator Keramik dan Isolator Gelas Di bawah Pengaruh Kelembaban Udara (%)	145
Tabel 4.5	Perbandingan Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Terhadap Isolator Keramik dan Isolator Gelas Di bawah Terpaan Intensitas Curah Hujan (mm/min)	148
Tabel 4.6	Perbandingan Arus Bocor Pada Isolator Polimer SIR Terhadap Isolator Keramik dan Isolator Gelas Di bawah Terpaan Polusi Kabut Garam Konduktivitas 1 s.d 17 mS/cm	151

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sketsa Fleksibilitas Struktur Rantai Polimer SIR	18
Gambar 2.2	Pemulihan (<i>recovery</i>) dan <i>Transfer</i> Sifat Hidrofobik (<i>hydrofobic</i>)	22
Gambar 2.3	Sifat Hidrofobik <i>Elastomer</i> di Bawah Penuaan Iklim Tropis Alamiah	23
Gambar 2.4	Efek Bahan Pengisi pada Difusi MMRR ke Lapisan Polusi	26
Gambar 3.1	Bagang Rancangan Penelitian	44
Gambar 3.2	Foto Peresmian Modul Riset HV di UNHAS	47
Gambar 3.3	PLC Type K7M-DR40U, Master K120S	48
Gambar 3.4	Alat Ukur Arus Bocor (Multimeter Digital)	48
Gambar 3.5	PC dan Monitor	48
Gambar 3.6	Transformator Tegangan Tinggi	49
Gambar 3.7	Alat Penstabil dan Pengontrol Tegangan	49
Gambar 3.8	Lux Meter dan Black Light	49
Gambar 3.9	Sensor Temperatur dan Kelembaban Digital	50
Gambar 3.10	Sistem <i>Air Conditioner</i>	50
Gambar 3.11	Sistem Hujan Buatan	50
Gambar 3.12	Sistem Pengatur Kelembaban Model Tekanan	51
Gambar 3.13	<i>Control Desk</i> dan Transformator	51
Gambar 3.14	Alat Ukur Konsentrasi Garam (Polusi)	52
Gambar 3.15	Sampel Isolator dalam <i>Chamber</i>	53
Gambar 3.16	Konstruksi Sampel Isolator <i>Type Suspension</i>	54

Gambar 3.17	Bagang <i>Road Map</i> Penelitian	57
Gambar 3.18	Kerangka Pikir	61
Gambar 3.19	<i>Schedule dan Prosedure Test</i> Mutu Isolator Polimer SIR Sesuai Standar IEC 1109	68
Gambar 3.20	Rangkaian ekivalen pembagi tegangan	70
Gambar 4.1	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 1 kV	73
Gambar 4.2	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 10 kV	74
Gambar 4.3	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 20 kV	75
Gambar 4.4	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 30 kV	76
Gambar 4.5	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 40 kV	77
Gambar 4.6	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 50 kV	78
Gambar 4.7	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 60 kV	79
Gambar 4.8	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 70 kV	80
Gambar 4.9	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 80 kV	81

Gambar 4.10	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 90 kV	82
Gambar 4.11	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 100 kV	83
Gambar 4.12	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 110 kV	84
Gambar 4.13	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC 120 kV	85
Gambar 4.14	Pulsa Rekaman Pulsa Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Tegangan Medan Listrik AC	86
Gambar 4.15	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Radiasi UV 56,9 Lux	88
Gambar 4.16	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Radiasi UV 80,6 Lux	89
Gambar 4.17	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Radiasi UV 116,9 Lux	90
Gambar 4.18	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Radiasi UV 159,2 Lux	91
Gambar 4.19	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Radiasi UV Bervariasi	92
Gambar 4.20	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Temperatur 20 °C	94
Gambar 4.21	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Temperatur 23 °C	95

Gambar 4.22	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Temperatur 26 °C	96
Gambar 4.23	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Temperatur 29 °C	97
Gambar 4.24	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Temperatur 32 °C	98
Gambar 4.25	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Temperatur 35 °C	99
Gambar 4.26	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Temperatur 38 °C	100
Gambar 4.27	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Temperatur 41 °C	101
Gambar 4.28	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Temperatur 44 °C	102
Gambar 4.29	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR dengan Temperatur 47 °C	103
Gambar 4.30	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Dibawah Tekanan Termal yang Bervariasi	104
Gambar 4.31	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Kelembaban 55 % RH	106
Gambar 4.32	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Kelembaban 60 % RH	107
Gambar 4.33	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Kelembaban 65 % RH	108
Gambar 4.34	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Kelembaban 70 % RH	109

Gambar 4.35	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Kelembaban 75 % RH	110
Gambar 4.36	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Kelembaban 80 % RH	111
Gambar 4.37	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Kelembaban 85 % RH	112
Gambar 4.38	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Kelembaban 90 % RH	113
Gambar 4.39	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Kelembaban 95 % RH	114
Gambar 4.40	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Kelembaban 100 % RH	115
Gambar 4.41	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh kelembaban yang Bervariasi	116
Gambar 4.42	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Intensitas Curah Hujan 0,05 (mm/min)	118
Gambar 4.43	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Intensitas Curah Hujan 0,25 (mm/min)	119
Gambar 4.44	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Intensitas Curah Hujan 0,50 (mm/min)	120
Gambar 4.45	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Intensitas Curah Hujan 0,75 (mm/min)	121

Gambar 4.46	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Intensitas Curah Hujan 1,00 (mm/min)	122
Gambar 4.47	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Intensitas Curah Hujan yang Bervariasi	123
Gambar 4.48	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Polusi Kabut Garam Konduktivitas 1 mS/cm	125
Gambar 4.49	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Polusi Kabut Garam Konduktivitas 3 mS/cm	126
Gambar 4.50	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Polusi Kabut Garam Konduktivitas 5 mS/cm	127
Gambar 4.51	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Polusi Kabut Garam Konduktivitas 7 mS/cm	128
Gambar 4.52	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Polusi Kabut Garam Konduktivitas 9 mS/cm	129
Gambar 4.53	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Polusi Kabut Garam Konduktivitas 11 mS/cm	130
Gambar 4.54	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Polusi Kabut Garam Konduktivitas 13 mS/cm	131
Gambar 4.55	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Polusi Kabut Garam Konduktivitas 15 mS/cm	132
Gambar 4.56	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Polusi Kabut Garam Konduktivitas 17 mS/cm	133

Gambar 4.57	Pulsa Rekaman Arus Bocor Permukaan Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Polusi Kabut Garam Konduktivitas yang Bervariasi	134
Gambar 4.58	Kurva Arus Bocor Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Tekanan Medan Listrik	137
Gambar 4.59	Kurva Arus Bocor Isolator Polimer SIR Di Bawah Terpaan Radiasi Ultraviolet	140
Gambar 4.60	Kurva Arus Bocor Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Tekanan Termal ($^{\circ}\text{C}$)	143
Gambar 4.61	Kurva Arus Bocor Isolator Polimer SIR Di Bawah Pengaruh Kelembaban (%)	146
Gambar 4.62	Kurva Arus Bocor Isolator Polimer SIR Di Bawah Terpaan Intensitas Curah Hujan (mm/min)	149
Gambar 4.63	Kurva Arus Bocor Isolator Polimer SIR Di Bawah Terpaan Polusi Kabut Garam (mS/cm)	152

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran.1	Hasil Pengujian Karakteristik Isolator Polimer SIR di Bawah Pengaruh Tekanan Medan Listrik	159
Lampiran.2	Hasil Pengujian Karakteristik Isolator Polimer SIR di Bawah Terpaan Radiasi Ultra Violet	166
Lampiran.3	Hasil Pengujian Karakteristik Isolator Polimer SIR di Bawah Pengaruh Tekanan Termal	190
Lampiran.4	Hasil Pengujian Karakteristik Isolator Polimer SIR di Bawah Pengaruh Kelembaban	203
Lampiran.5	Hasil Pengujian Karakteristik Isolator Polimer SIR di Bawah Terpaan Intensitas Curah Hujan	216
Lampiran.6	Hasil Pengujian Karakteristik Isolator Polimer SIR di Bawah Terpaan Polusi Kabut Garam	219

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Salah satu komponen kelistrikan yang memegang peranan penting adalah isolator sebagai peralatan pemisah bagian-bagian yang bertegangan dengan yang tidak bertegangan serta penahan dan penopang kawat saluran. Isolator listrik mulai tegangan menengah, tegangan tinggi maupun tegangan ekstra tinggi yang dipergunakan pada sistem kelistrikan di Indonesia sampai saat ini adalah isolator berbahan keramik dan gelas. Penggunaan isolator keramik/gelas pada sistem transmisi energi listrik yang cenderung bertegangan semakin tinggi tidak menguntungkan lagi karena rapat massa (*density*) keramik/gelas besar, panjang, mudah pecah dan losisnya semakin besar sehingga menyebabkan semakin tingginya biaya konstruksi dan pemeliharaan jaringan tenaga listrik.

Saat ini tegangan pada transmisi yang diterapkan di Indonesia adalah 70 kV dan 150 kV untuk Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT), serta untuk Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV, sedangkan tegangan distribusi 20 kV. Sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik merupakan urat nadi sector ketenagalistrikan untuk pengiriman energi listrik dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban,

sehingga keandalan sistem transmisi dan distribusi harus mendapat perhatian untuk menjaga kontinuitas pelayanan.

Wilayah Indonesia yang membentang sepanjang garis khatulistiwa terdiri dari 2/3 adalah wilayah lautan. Penduduk didaerah ini sebagian besar bermukim pada dataran rendah dan pesisir pantai. Daerah ini beriklim tropis dengan faktor iklim yang sangat tinggi yaitu lama penyinaran matahari 12 jam, temperature udara antara 16-35°C, kelembaban nisbi sekitar 100% pada malam hingga pagi hari, curah hujan cukup tinggi antara 40-500 mm. selain itu, dari publikasi organisasi greenpeace mengatakan bahwa Indonesia merupakan negara yang mengalami polusi tertinggi di dunia. Kondisi lingkungan seperti ini dapat menurunkan kinerja isolator pasangan luar.

Berbagai studi mengungkapkan bahwa pada umumnya kegagalan isolator yang menyebabkan kerugian besar adalah akibat dua aspek yaitu aspek permukaan (*surface*) yang menyebabkan munculnya arus bocor permukaan dan aspek ruah (*bulk*) dengan menurunnya sifat dielektrik (ϵ_r dan $\tan \delta$) yang membuat mudahnya isolator pecah (*breakdown*) akibat sambaran petir atau switching. Aspek ruah isolator berbahan keramik dan gelas stabil terhadap penuaan, tetapi permukaannya mudah dibasahi (*wettability*) oleh kabut, embun atau hujan karena memiliki energi permukaan yang tinggi. Sifat permukaan isolator yang mudah basah (*hydrofilik*) seperti isolator keramik/gelas ini kurang menguntungkan bila dioperasikan pada daerah berkelembaban dan berpolusi tinggi seperti

di kawasan industri/perkotaan, pesisir pantai karena dapat menyebabkan korosi, meningkatnya arus bocor (*leakage current*) dan memicu terjadinya tegangan lewat denyar (*flashover*).

Sejak beberapa tahun terakhir ini material polimerik telah muncul secara bertahap dan mulai dikembangkan sebagai alternatif pengganti material keramik dan gelas. Kelebihan yang dimiliki material polimer *silicon rubber* yaitu sifat dielektrik, resistivitas volume, sifat termal, kekuatan mekanik dan ringan (**Gubanski et al, 2007**). Karena ringannya pemasangan dan pemeliharaannya lebih mudah dibandingkan material keramik dan gelas. Perbandingan berat berbagai jenis isolator berbahan polimer adalah 36,7% - 93% lebih ringan dari isolator porselen/keramik. Selain itu isolator polimer *silicone rubber* (SIR) yang memiliki sifat menolak air (*hydrophobicity*), bahkan mampu memulihkan (*recovery*) dan memindahkan (*transfer*) sifat hidrofobiknya ke lapisan polusi menyebabkan lapisan polusi ikut bersifat hidrofobik. Sifat hidrofobik dan kemampuannya mentransfer sifat tersebut ke lapisan polusi sangat bermanfaat bagi isolator listrik pasangan luar karena dalam kondisi lembab, basah atau hujan tidak akan memberi peluang terbentuknya lapisan air yang kontinu sehingga konduktivitas permukaan isolator tetap rendah dengan demikian arus bocor (*leakage current*) yang terjadi sangat kecil (**Kibbie, 2000**).

Meskipun berbagai keunggulan yang dimiliki material polimer akan tetapi material tersebut merupakan material sintesis yang umumnya

rentan terhadap iklim (intensitas radiasi uv, temperatur, kelembaban atau hujan), polusi dan terpaan medan listrik yang tinggi, sehingga dapat menyebabkan terjadinya degradasi dan selanjutnya mengakibatkan penuaan (*aging*). Penuaan material polimer pasang luar (*outdoor*) terutama disebabkan oleh energi foton yang dihasilkan oleh radiasi ultra violet (uv) dari matahari. Ketika energi foton lebih tinggi dari energi ikatan antara rantai atau antara molekul akan menyebabkan pemutusan rantai atau pembentukan ikatan silang (*crosslinking*) yang ditandai dengan perubahan mekanik seperti polimer menjadi keras dan rapuh (*brittle*) (**Spellman, 1999, Venkataraman, 2008**).

Pengaruh kelembaban dan curah hujan yang tinggi dapat mengakibatkan erosi permukaan isolator polimer. Perbedaan tekanan parsial antara bahan dan atmosfer/lingkungan memungkinkan penetrasi kelembaban ke dalam polimer. Banyaknya air yang diserap dan kecepatan proses difusi tergantung berbagai faktor di dalam bahan itu sendiri, kelembaban udara luar dan temperatur sekitar. Fenomena ini menurut beberapa peneliti disebut efek polarisasi antarmuka makroskopis (*macroscopic interface*) yang akan memperburuk sifat dielektrik dan listrik isolator (**Kaerner, 1995**). Di samping itu menyebabkan pula penurunan sifat permukaan yang dapat dilihat dengan menghilangnya sifat hidrofobik, terjadinya keretakan (*tracking*) dan erosi pada permukaan isolator yang semakin hebat serta diikuti peningkatan arus bocor permukaan, dengan demikian akan memperpendek umur pakai isolator.

Beberapa parameter penting untuk mengetahui kinerja dari isolator pasang luar, yaitu besar arus bocor yang mengalir pada permukaan isolator, sifat hidrofobitas permukaan isolator dan hasil *Scanning Electron Microscopy (SEM)* permukaan isolator serta pengembangan bahan pengisi (*filler*) dari isolator polimer telah banyak dilakukan para penelitian sejak tahun 1972 oleh Niemi dan Orbeck sampai 2009 oleh Ramivas dkk. Tugas akhir ini merupakan salah satu bagian dari penelitian tersebut yang fokus meneliti ***karakteristik elektrik dari isolator polimer yang terbuat dari elastomer silicon*** untuk mengetahui performace dari isolator tersebut dari terpaan cuaca dan iklim tropis serta polusi yang tinggi.

1.2. Rumusan Masalah

Penelitian tentang karakteristik elektrik dari isolator polimer khususnya pada daerah beriklim tropis masih belum banyak dilakukan. Karakteristik dari isolator type suspension akan kami evaluasi dengan memberikan berbagai tekanan iklim dan polusi buatan dengan merujuk pada standar IEC 1109 dan penelitian yang telah dan sedang berjalan baik dalam maupun luar negeri.

Berdasarkan latar belakang masalah yang di kemukakan di atas, maka permasalahan yang dapat dirumuskan, yaitu:

1. Bagaimana karakteristik arus bocor permukaan dari isolator polimer SIR pada berbagai faktor iklim tropis.

2. Bagaimana pengaruh faktor iklim tropis terhadap isolator polimer SIR tegangan tinggi.
3. Mengetahui faktor-faktor yang paling berpengaruh pada tegangan tembus (*breakdown*) dan penuaan (*aging*) dari suatu isolator polimer
4. Mengetahui perbandingan arus bocor permukaan isolator polimer dengan isolator keramik atau isolator gelas.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin kami capai dalam penelitian isolator polimer untuk aplikasi tegangan tinggi adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik arus bocor permukaan dari isolator polimer dibawah pengaruh multi tekanan buatan
2. Mengetahui faktor-faktor iklim tropis yang dapat mempengaruhi karakteristik arus bocor permukaan dari isolator polimer.
3. Menentukan faktor iklim yang paling berpengaruh terhadap karakteristik arus bocor permukaan dari isolator polimer.
4. Menentukan perbandingan arus bocor permukaan isolator polimer dengan isolator keramik atau isolator gelas jika digunakan di daerah beriklim tropis.

1.4. Manfaat Penelitian

Hasil Penelitian ini di harapkan dapat menjadi masukan data primer kepada stakeholder ketenagalistrikan terutama perusahaan Transmisi (Transco) dan perusahaan Distribusi (Disco) di Wilayah beriklim tropis khususnya PT.PLN (Persero) serta Industri produsen isolator dalam hal:

1. Bahan pertimbangan bagi PT.PLN (persero) dalam peningkatan kapasitas jaringan transmisi dan distribusi dengan menambah kemampuan isolator tanpa mengganti tower yang sudah terpasang.
2. Dapat menjadi bahan pertimbangan bagi PT.PLN (persero) dalam merekonstruksi isolator jaringan transmisi dan distribusi yang mengalami polusi sangat berat.
3. Bahan masukan dan informasi bagi perencana dalam membuat desain jaringan transmisi dan distribusi di daerah tropis.
4. Sebagai data primer oleh industry produsen isolator dalam membuat isolator polimer untuk daerah beriklim tropis seperti di Indonesia.
5. Penelitian ini dapat digunakan sebagai salah satu bahan studi banding bagi penelitian-penelitian lanjutan yang sejenis dalam bidang teknologi isolasi medan listrik dan medan magnet.

1.5. Lingkup Masalah

Pada penelitian ini dilakukan beberapa batasan masalah yang berhubungan dengan:

1. Penelitian karakteristik elektrik isolator polimer kami lakukan dengan asumsi bahwa karakteristik lainnya sudah cukup handal dan tidak berhubungan dengan kondisi cuaca dan iklim tropis.
2. Penelitian karakteristik elektrik isolator polimer dilakukan dengan akselerasi penuaan buatan dibawah pengaruh tekanan yang sesuai dengan kondisi cuaca dan iklim tropis.
3. Penelitian karakteristik elektrik isolator polimer difokuskan pada isolator tegangan tinggi pasangan luar (*outdoor insulators*).

BAB II

TEORI DASAR

A. Bahan Isolasi

Bahan isolasi berguna untuk menjadi isolasi diantara dua buah bahan pengantar yang mempunyai perbedaan tegangan dan juga dapat bertindak sebagai penyimpan dari muatan listrik.

Penamaan dari bahan isolasi sangat ditentukan oleh fungsi atau penerapannya. Jika fungsi utamanya sebagai pengisolasi maka dinamakan bahan isolasi, sedangkan bilamana fungsi utamanya sebagai penyimpan muatan listrik maka bahan ini dinamakan bahan dielektrik. Didalam bahan ini elektron terikat kuat pada atom nukleusnya sehingga konduksi oleh elektron tidak akan terjadi. Material ini akan menunjukkan sifatnya bila dipengaruhi oleh medan listrik. Bilamana medan listrik mempengaruhinya maka material ini akan menunjukkan suatu fenomena yang dinamakan « **Polarisasi** » yang dapat menolong menerangkan adanya penimbunan energi elektrostatik. Bilamana medan listrik berasal dari arus bolak-balik maka gejalanya adalah sangat kompleks. Oleh karena itu dalam pemakaian bahan isolasi diharuskan memilih bahan yang sesuai setelah mengetahui sifat-sifat dari masing-masing bahan dan membandingkan harga dari bahan yang akan dipilih.

2.1.1. Bahan isolasi dibawah pengaruh medan listrik bolak-balik (AC)

Bila sebuah kapasitor pelat yang mempunyai kapasitansi C_0 (hampa udara), dan bila medium ini digantikan oleh dielektrik dengan permitivitas ϵ_r , maka kapasitansi dari kapasitor adalah :

$$C = \epsilon_r \cdot C_0 \quad (2.1)$$

Bila tegangan bolak-balik $V = V_m \cos \omega t = (\text{Re} (V_m \cdot \epsilon^{j\omega t}))$;

Arus yang mengalir menjadi $I = j\omega \epsilon_r \cdot C_0 \cdot V$

Anggap dielektrik ini adalah bahan yang murni. Tetapi pada umumnya karena ketidakmurnian dielektrik maka ada arus mengalir antara pelat itu. Karena itu permitivitas mempunyai karakteristik sebagai besaran yang kompleks dan dapat dituliskan seperti berikut :

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.2)$$

Jadi arus kapasitor menjadi :

$$\begin{aligned} I &= j\omega (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \cdot C_0 \cdot V \\ &= \omega \epsilon_r'' \cdot C_0 \cdot V + j\omega \epsilon_r' \cdot C_0 \cdot V \end{aligned} \quad (2.3)$$

Bila medan listrik \underline{E} suatu medan yang berubah-ubah, $E = \text{Re} (\epsilon_0 \cdot E^{je})$ diterapkan pada bahan dielektrik sehingga kerapatan fluks (D) akan menjadi :

$$\underline{D} = \epsilon \cdot \underline{E}$$

Dimana

$$\epsilon = \text{Besaran kompleks } \epsilon^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'_r \text{ dan};$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon''_r$$

Jadi :

$$D = \varepsilon^* \cdot \underline{E} \quad (2.4)$$

2.1.2. Bahan isolasi dibawah pengaruh medan listrik tunak (DC)

Bila suatu bahan diletakkan pada tempat yang dipengaruhi medan listrik, maka respons dari bahan tersebut pada tingkat elektronik, atomik, molekul dan tingkat mikroskopis terhadap medan listrik yang mempengaruhinya tergantung pada kemampuan dielektrik dari bahan tersebut. misalnya pada dua buah pelat datar yang letaknya sejajar membentuk suatu kapasitor, mempunyai luas bidang datar sebesar ($A \text{ m}^2$) dan jarak antara kedua pelat itu adalah (d meter). Bilamana bahan dielektrik yang terdapat pada ruang diantara kedua pelat itu adalah udara (hampa udara) maka kapasitansi dari kapasitor tersebut sebesar:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d} \quad (2.5)$$

Dimana $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ Farad / m

Sekarang bilamana ruang diantara kedua pelat itu diisi dengan suatu bahan dielektrik, maka kapasitansi dari kedua pelat tadi menjadi :

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot A}{d} \quad (2.6)$$

Dimana

ϵ_r = Konstanta dielektrik relative terhadap hampa udara.

$$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0 \quad \text{sehingga} \quad \epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

Setiap bahan mempunyai nilai ϵ_r yang berbeda, misalkan *Silicon* (Si) $\epsilon_r = 12$, Germanium (Ge) $\epsilon_r = 16$. Nilai dari ϵ_r dapat diperoleh dengan mengukur nilai C pada waktu ϵ_0 dari C_0 dan ϵ_r dari C pada waktu ada dielektrik jadi :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (2.7)$$

Menyelidiki kemampuan dielektrik berarti juga mempelajari kemampuan ϵ . Ini di dalamnya termasuk mempelajari hal-hal berikut :

- a). Mempelajari hubungan antar bentuk *macroscopic*, konstanta dielektrik dan sifat atomik dan kebesaran *microscopic*.
- b). Mempelajari mengapa suatu bahan mempunyai nilai konstanta dielektrik yang berbeda-beda.
- c). Mempelajari pengaruh suhu pada ϵ_r untuk beberapa bahan.

Polarisasi dan kerugian dielektrik adalah fenomena yang sangat penting, dan kadang-kadang diselidiki dengan menerapkan tegangan yang mempunyai frekuensi dari nilai nol sampai frekuensi tinggi dan juga pengaruhnya terhadap perubahan suhu.

B. Isolator Polimer SIR pada Tegangan Tinggi

Isolator polimer adalah isolator yang terbuat dari susunan beberapa monomer membentuk suatu isolator sesuai dengan peruntukannya.

Isolator polimer yang akan kami gunakan adalah isolator polimer dari bahan *silicon* yang terbuat dari bahan dasar *rubber* dengan bahan pengisi (*filler*) *silicon* dan *Alumina trihidrat*.

Isolator polimer SIR yang terbuat dari elastomer *silicon* yang mempunyai sifat menolak air atau hidrofobik (*hydrophobic*) yang tinggi, bahkan mampu memulihkan dan memindahkan sifat hidrofobiknya terhadap lapisan polusi yang menempel di permukaannya ikut bersifat hidrofobik yang disebut transfer hidrofobik sehingga pada kondisi lembab tidak terbentuk lapisan air yang kontinyu yang menyebabkan konduktivitas permukaan isolator polimer tetap rendah. Sifat hidrofobik dan kemampuannya mentransfer sifat tersebut ke lapisan polusi sangat bermanfaat bagi isolator listrik pasangan luar karena dalam kondisi lembab, basah atau hujan tidak akan memberi peluang terbentuknya lapisan air yang kontinyu sehingga konduktivitas permukaan isolator tetap rendah. Dengan demikian arus bocor (*leakage current*) yang terjadi sangat kecil (**Kibbie, 2000**).

Struktur kimia *elastomer silicon* terdiri dari tulang punggung ikatan dari bahan anorganik (*silicone* dan oksigen) yang tahan terhadap penuaan, namun ikatan samping yang terdiri dari bahan organik (karbon dan hidrogen) dapat mengalami degradasi oleh terpaan dari berbagai faktor iklim seperti temperatur tinggi, kelembaban, hujan serta radiasi ultraviolet dengan intensitas tinggi sebagaimana yang dijumpai di daerah beriklim tropis seperti di Indonesia. Terpaan iklim tropis secara simultan pada

isolasi *elastomer silicon* kemungkinan akan mengakibatkan degradasi sifat-sifatnya, yang ditandai dengan perubahan warna, perubahan sifat dielektrik dan menghilangnya sifat hidrofobik, serta munculnya arus bocor yang terus meningkat sehingga pada akhirnya terjadi keretakan (*tracking*) erosi, *treeing* yang akan memperpendek umur isolator

Isolator polimer dari bahan karet silikon (*silicon rubber*) adalah bahan yang tahan terhadap temperatur tinggi, yang biasanya digunakan untuk isolasi kabel dan bahan isolasi tegangan tinggi. *Silicon rubber* ini aman digunakan pada temperatur $-55\text{ }^{\circ}\text{C} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. memiliki hambatan yang baik terhadap ozon, korona dan air. Bahan ini juga memiliki ketahanan yang baik terhadap alkohol, garam dan minyak.

Silicon rubber ($[\text{CH}_3\text{2SiO}]_n$) tersusun atas monomer-monomer *cyclic siloxane* membentuk *polydimethylsiloxane*, *silicon rubber* memiliki derajat polarisasi (n) dari 4000 sampai 10000 dan memiliki berat molekul yang tinggi. Untuk mendapatkan suatu atom *silicone* dilakukan dengan mereduksi elemen dasar dari *silicone* (SiO_2) dengan menggunakan karbon pada suatu pemanasan listrik. Reaksinya dapat ditunjukkan di bawah ini.



Penggabungan elemen *silicone* dengan *group methyl*, CH_3 dilakukan dengan mereaksikan *methyl chloride*, CH_3SiCl_2 . Selanjutnya dengan penguraian diperoleh dengan *dimethylchlorosilane* CH_2SiCl_2 atau *methylchlorosilane*. Untuk hasil yang maksimum dapat dilakukan dengan mengontrol *dimethylchlorosilane*. Silane selanjutnya dihidrolisis untuk

menghasilkan silanol, yang digunakan sebagai unsur dasar penyusunan *silicone rubber* melalui *polycondensation* dari *silanols*.

Sejak beberapa tahun terakhir ini material polimerik telah muncul secara bertahap mulai dikembangkan sebagai alternatif pengganti material porselen/keramik dan gelas. Kelebihan material polimer diantaranya adalah memiliki sifat dielektrik, resistivitas volume, sifat termal, kekuatan mekanik dan ringan (**Gubanski et al, 2007**). Karena ringannya pemasangan dan pemeliharaannya lebih mudah dibandingkan material keramik dan gelas. Perbandingan berat berbagai jenis isolator berbahan polimer adalah 36,7% - 93% lebih ringan dari isolator porselen/keramik.

Tabel 2.1. Perbandingan berat antara isolator porselin/keramik dengan isolator polimer (**Gorur, 1999**)

Jenis Isolator	Voltage (kV)	Porcelain Weight (lbs)	Nonkeramik Weight (lbs)	Weight Reduction (%)
Insulator	15	9.5	2.4	74.7
Arresters	15	6.0	3.8	36.7
Post Insulator	69	82.5	27.2	67.0
Suspension	138	119.0	8.0	93.2
Intermediate Arrester	69	124.0	28.0	77.4
Station Arrester	138	280.0	98.9	64.7

Rapat massa yang lebih rendah dimiliki oleh material polimer dibanding porselen dan gelas tersebut akan memberi peluang mendesain menara saluran transmisi tegangan tinggi/ekstra tinggi yang lebih kompak (*compact*) dengan biaya yang lebih murah, dapat didesain sebagai rentangan isolator yang tidak simetris (*asymmetric V-String*) bila tegangan

kerja ditingkatkan (*upgrades*) tanpa merubah dimensi menara transmisi yang sudah ada dan dengan disain V-string dapat pula mengurangi dampak medan magnet dan medan listrik yang sering dikhawatirkan oleh masyarakat. Karena ringannya memungkinkan juga dipergunakan sebagai pemisah fasa (*phase spacer*) guna mencegah benturan antara fasa konduktor akibat ayunan mekanis (*galloping*).

Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap performansi material isolasi polimer adalah cacat (*defect*). Cacat itu dapat timbul dalam bentuk void, ketidakmurnian (*impurities*), dan tonjolan (*protrusion*) pada permukaan (*interface*) antara lapisan semikonduktor atau konduktor dengan isolasi polimer sehingga dapat meningkatkan tekanan (*stress*) medan listrik yang tinggi pada bagian yang cacat tersebut dalam aplikasinya. Tekanan (*stress*) listrik yang terus-menerus akan menyebabkan penuaan (*aging*) isolasi polimer dan pada cacat tersebut akan tumbuh *electrical treeing* yang disertai dengan munculnya peristiwa *partial discharge* (PD) dalam material isolasi polimer yang merupakan awal terjadinya *breakdown* pada isolasi polimer.

C. Pengaruh *Filler* Terhadap Serapan Air dan Dielektrik Isolator Polimer

Isolator dari polimer *silicon* SIR adalah salah satu material polimer yang dikembangkan oleh beberapa riset untuk isolasi *outdoor* (*housing*) pada isolator campuran (*composite*) dan terminal kabel. Material isolator

polimer *silicon rubber* populer dibandingkan dengan keramik/porselin dan tipe polimer yang lain dengan pengukuran naik (*up*) terhadap penangkis air (*water-repellent*) sifat monolak air (*hydrofobicity*) yang tinggi, dapat menemukan kembali dan memindahkan sifat monolak air (*transfer hydrofobicity*) untuk lapisan polusi dan sifat dielektrik yang unggul (ϵ_r dan $\tan \delta$ adalah kecil).

Pada pembangunan (*erection*) biasanya isolator ada didalam rangkaian *linear (outdoor)* udara yang bertegangan tinggi, karena itu, pengaruh serapan air dari kelembaban yang tinggi atau hujan pada material isolator polimer akan dapat mempengaruhi kekuatan dielektrik yang ditandai dengan penambahan dari factor rugi-rugi tangent ($\tan \delta$) dan *permittivity relative* (ϵ_r).

Stabilitas material polimer terhadap degradasi sebagai hasil dari *aging* diperkuat dengan *filler miscible* untuk material polimer dengan susunan yang khusus. Daya rentang isolasi polimer *silicon* tanpa *filler* adalah rendah sebab kekuatan antara kekuatan molekul adalah rendah. Untuk menambah daya rentang dan menambah kekerasan (*hardness*) dapat digunakan *filler silica* (SiO_2) (**Ackermann, 1989**). *Filler* lain seperti *aluminatrihydrate* (ATH $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) yang ditambah pada isolasi polimer *silicon* akan memberikan daya tahan (*endurance*) untuk erosi dan *tracking* (**Gorur, 1991**).

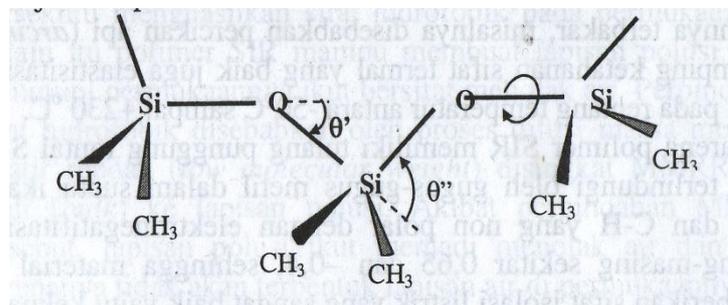
Kombinasi isolasi polimer *silicon* dengan kedua tipe dari *filler* akan menambah kekuatan mekanik dan pada waktu yang sama menambah

daya tahan untuk membangkitkan panas dengan *arcing electric* sampai tua (*old*), menekan arus yang bocor dan juga mengikuti kejadian dari tegangan *flashover* (Chyme, 1994).

Tetapi pengaruh tambahan *filler* memungkinkan sifat-sifat fisik polimer dapat dimodifikasi dengan masalah *phenomena ridge plane (interface)* antara *filler* dengan material polimer itu sendiri (Ritchie, 1972). Pengaruh konsentrasi *filler* terhadap serapan air dan kelakuan (*behavior*) sifat dielektrik ($\tan \delta$ dan ϵ_r) isolasi polimer (*silicon rubber*) memegang peranan sangat penting dalam peningkatan kinerja isolator polimer.

D. Struktur Kimia Isolator Polimer

Struktur kimia polimer SIR memiliki suatu tulang punggung (*backbone*) rantai siloksan yang lebih fleksibel dibanding dengan polimer jenis lainnya. Kelebihan fleksibilitas yang dimiliki polimer SIR dapat dijelaskan dengan melihat struktur rantai seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Sketsa fleksibilitas struktur rantai polimer SIR

Ikatan Si-O memiliki panjang sekitar $1,64 \text{ \AA}$ yang sangat spesifik dibandingkan panjang ikatan C-C sekitar $1,54 \text{ \AA}$ yang banyak ditemukan

pada polimer organik. Rantai pada atom oksigen tak terbebani oleh gugus samping, karena itu *interferensi sterik* atau hambatan berotasi antar molekul kecil. Sudut ikatan Si-O-Si ($180^\circ - \theta$) $\sim 143^\circ$ artinya lebih terbuka dibandingkan ikatan *tetrahedral* biasa ($\sim 110^\circ$). Struktur rantai seperti ini berfungsi meningkatkan keseimbangan dan fleksibilitas dinamik rantainya. Dengan demikian maka rantai mampu melakukan suatu bentuk yang rapat (*compact*) ketika dalam keadaan tergulung acak (**Mark, 1992**).

Jika diperhatikan pada rantai polimer SIR, tidak terdapat atom karbon pada tulang punggung rantai tetapi hanya terdapat pada gugus samping. Susunan struktur tersebut menunjukkan struktur semiorganik dengan energi ikatan tinggi pada ikatan S-O dan akan memberikan kestabilan termal yang sangat tinggi pula. Energi ikatan Si-O (445 kJ/mol) lebih tinggi sekitar 25 % dari energi ikatan yang dimiliki oleh ikatan C-C (348 kJ/mol) pada tulang punggung ikatan polimer etilen.

Kuatnya ikatan Si-O memberikan ketahanan yang tinggi dari kerusakan atau pemutusan rantai akibat pengaruh lingkungan dan korona ataupun medan tinggi, dan memiliki kemiripan dengan gelas/kuarsa yaitu tidak muncul lapisan konduktif bila bahannya terbakar, misalnya disebabkan percikan api (*arcing*). Disamping ketahanan sifat termal yang baik juga elastisitasnya stabil pada rentang temperatur antara -50°C sampai $+230^\circ\text{C}$.

Polimer SIR memiliki tulang punggung rantai Si-O yang terlindungi oleh gugus-gugus metil dalam suatu ikatan Si-C dan C-H yang non polar dengan elektronegatifitasnya masing-masing sekitar 0,65 dan -0,4,

sehingga material ini memberikan sifat isolasi listrik yang sangat baik yaitu kekuatan dielektrik $E_d = 20-25$ kV/mm, resistivitas volume $\rho = 10^{15}$ Ω cm (tanpa bahan pengisi), permitivitas relatif $\epsilon_r \approx 2 - 4$ dan faktor disipasi $\tan \delta = 3 - 5 \cdot 10^{-3}$. Sifat-sifat isolasi polimer SIR seperti terlihat pada Tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2. Sifat isolator polimer SIR

Property	Typical range
Hydrophobicity (contac angle)	105° -140°
Density	1,1 – 1,6 g/cm
Hardness shore A	20 - 80
Constant of dielectric (ϵ_r)	2 - 4
Dissipasi factor ($\tan \delta$)	3 - 5.10 ⁻³
Volume resistivity	10 ¹⁵ Ohm.cm
Surface resistivity	10 ¹³ Ohm
Dielectric strength (E_d)	20 – 25 kV/mm

E. Sifat-sifat Penting Isolator Polimer

Karakteristik isolator polimer sangat ditentukan oleh sifat-sifat yang melekat pada bahan isolator polimer yang merupakan daya dukung terhadap kinerja isolator polimer SIR. beberapa sifat-sifat isolator yang sangat penting diketahui dalam aplikasi teknik tegangan tinggi, yaitu:

2.5.1. Sifat Hidrofobik

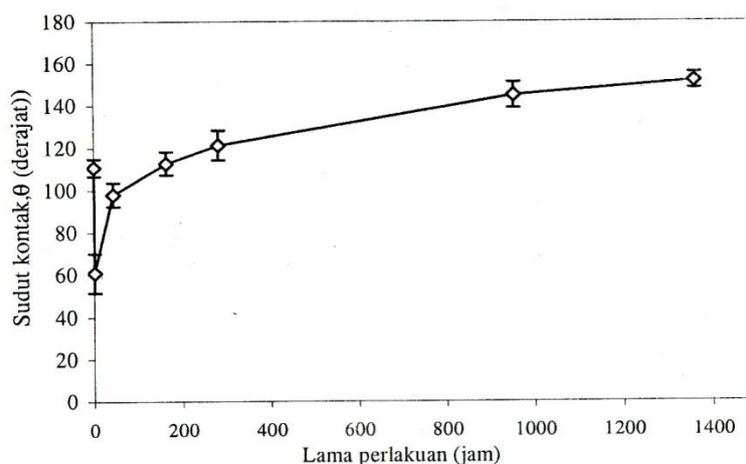
Salah satu sifat yang terpenting yang dimiliki polimer SIR adalah kemampuannya menolak serangan air (*water repellent*), karena komposisi struktur kimianya lebih banyak didominasi oleh gugus metil hidrokarbon

(CH₃) yang hidrofobik (**Kinderberger 1989, Kim 1992**). Adanya gugus-gugus metil yang berotasi bebas dan polarisabilitas ikatan Si-O, rantai siloksan mampu menyejajar sendiri (*align itself*) untuk bersekutu menghasilkan sifat hidrofobik pada permukaannya. Selain itu polimer SIR mampu membuat lapisan polusi yang menutupi permukaannya ikut bersifat menolak air. Perpindahan sifat hidrofobik disebabkan oleh proses difusi massa molekul relatif rendah (*low molecular weight*) disingkat MMRR dari ruah (*bulk*) ke lapisan polusi. Akibat perpindahan MMRR tersebut, lapisan polusi ikut menjadi menolak air dan oleh karenanya tidak akan terbentuk lapisan air di permukaannya.

Penelitian perilaku sifat hidrofobik permukaan telah berhasil dilakukan dengan teknik pengukuran sudut kontak tetesan air. Material uji polimer SIR dibuat dengan metode vulkanisasi temperatur ruang (RTV) dan metode vulkanisasi temperatur tinggi (HTV) dengan campuran komposisi bahan pengisi (*filler*) yang bervariasi (**Salama, 1999**). Pengujian kekuatan transfer hidrofobik juga dilakukan dengan memberikan polusi buatan dari tepung SiO₂ diatas permukaannya setebal 0,5 mm.

Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa saat diberikan polusi pada permukaan polimer SIR, hidrofobiknya menurun tajam kemudian secara berangsur-angsur mulai terjadi pemulihan. Setelah satu jam, hasil pengukuran sudut kontak menunjukkan nilai 60,5° yang berarti reaksi massa molekul relatif rendah (MMRR) dari polimer SIR mulai berpindah kelapisan polusi. Setelah 150 jam perlakuan, sudut kontak sudah berada

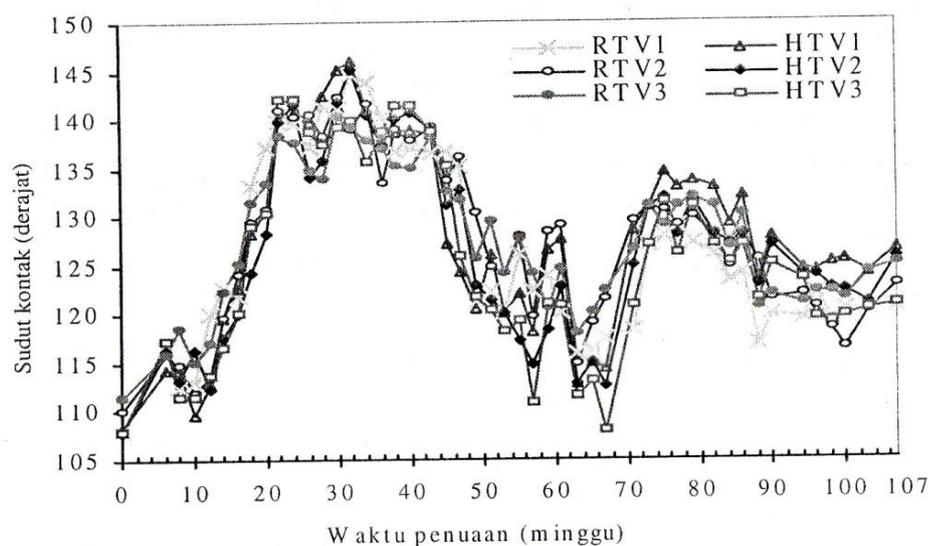
pada nilai 113° . Artinya pemindahan sifat hidrofobik secara sempurna kelapisan polusi SiO_2 pada ketebalan 0,5 mm mampu dicapai hanya sekitar seminggu. Bahkan setelah perlakuan 1300 jam tampak lapisan polusi lebih hidrofobik dibandingkan SIR yang bersih dengan sudut kontak tetesan air mencapai 152° , sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Pemulihan (*recovery*) dan *transfer* sifat hidrofobik

Hasil penelitian beberapa peneliti pada berbagai material polimer jenis lain seperti *epoksi*, EPDM, *polietilen*, *polipropilen* dan *polivinilklorid* cenderung menghilang sifat hidrofobik permukaannya setelah diterpa oleh berbagai faktor iklim terutama radiasi uv dari matahari, kelembaban atau air hujan. Karena itu untuk mengetahui ketahanan sifat hidrofobik *silicon rubber* terhadap berbagai faktor iklim tersebut, dilakukan pula suatu pengujian dengan menempatkan sampel-sampel dari polimer SIR yang diberi bahan pengisi dengan dosis yang berbeda-beda diekspose di bawah pengaruh iklim tropis alamiah selama 107 minggu. Hasil eksperimen tersebut terlihat bahwa semua jenis sampel masih

menunjukkan sifat hidrofobik yang tinggi $> 107^\circ$ (sudut kontak masih lebih besar dari sudut kontak disaat masih baru). Ini menunjukkan pengaruh terpaan iklim tropis tidaklah menyebabkan kehilangan sifat hidrofobik material polimer SIR (**Salama, 2010**).



Gambar 2.3. Sifat hidrofobik elastomer di bawah penuaan iklim tropis alamiah

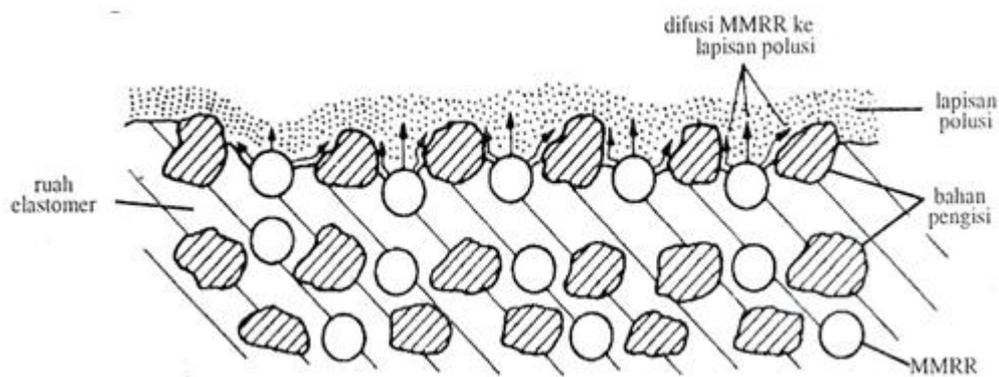
Bahkan sifat hidrofobik semakin tinggi saat debu polusi lingkungan banyak mengotori permukaan sampel. Endapan polusi semakin lama semakin banyak terakumulasi sehingga permukaan SIR bertambah kasar menyebabkan nilai sudut kontak lebih tinggi mencapai 145° (HTV1). Perilaku turun naiknya sudut kontak hanyalah mengikuti penumpukan dan terucinya polusi oleh hujan dipermukaan material. Pola kenaikan dan penurunan nilai sudut kontak tersebut merupakan fenomena *transfer* dan pemulihan (*recovery*) sifat hidrofobik oleh massa molekul relatif rendah (MMRR) dari dalam ruah (*bulk*) ke permukaan *silicon rubber* dan polusi.

Kekasaran permukaan yang semakin bertambah dengan penambahan endapan polusi juga memberi kontribusi dalam peningkatan sudut kontak.

Salah satu peran bahan pengisi yang ditambahkan pada polimer SIR adalah untuk meningkatkan ketahanannya terhadap keretakan dan erosi oleh tekanan lingkungan atmosfer dan pembebanan panas yang tinggi akibat busur pita kering (*dry band arcing*) jika diterapkan sebagai material isolator tegangan tinggi pasangan luar. Hasil pengukuran sudut kontak tetesan air dipermukaan material dengan dosis bahan pengisi bervariasi yang belum mengalami penuaan (*virgin*) tidak sama, tergantung jumlah dosis bahan pengisi yang diberikan. Material uji kelompok RTV yang berdosis lebih tinggi (29,2%) menghasilkan nilai sudut kontak yang lebih tinggi $111 \pm 1,8^\circ$ dibanding yang berdosis lebih rendah (18%) dengan nilai sudut kontak $108 \pm 2^\circ$. Namun untuk material uji kelompok HTV rujukan (*virgin*) dengan penambahan dosis bahan pengisi yang bervariasi tidak menunjukkan perbedaan nilai sudut kontak yang signifikan. Perbedaan sudut kontak yang terjadi pada material uji sebelum penuaan (*virgin*) disebabkan oleh perbedaan tingkat kekasaran permukaan (**Salama, 2010**). Permukaan RTV yang berbahan pengisi dosis tinggi lebih kasar dari permukaan RTV yang berbahan pengisi dosis rendah sehingga menyebabkan sudut kontak yang lebih tinggi. Sementara pada kelompok HTV (*virgin*) memiliki tingkat kekasaran permukaan yang hampir sama, sehingga menghasilkan nilai sudut kontak yang tidak banyak mengalami perbedaan.

Efek perbedaan dosis bahan pengisi terhadap sifat hidrofobik masing-masing material uji SIR adalah perbedaan kemampuan mentransfer dan pemulihan (*recovery*) sifat hidrofobiknya ke lapisan polusi setelah mengalami penuaan akibat perubahan musim. Material uji berbahan pengisi dosis tinggi (72%) mempunyai kecenderungan lebih cepat mentransfer hidrofobiknya ke lapisan polusi. Namun musim hujan yang berkepanjangan mengakibatkan kemampuan memulihkan sifat hidrofobiknya mulai menurun dengan penurunan sudut kontak. Sementara material uji kelompok HTV yang berdosis bahan pengisi terendah 48% masih memberikan sudut kontak tertinggi.

Memperbanyak dosis bahan pengisi dapat menghambat laju kehilangan berat. Namun bahan pengisi berdosis tinggi dapat mengurangi kemampuan difusi MMRR ke permukaan (**Hackam, 1996**). Hal ini ditunjukkan pada material uji berbahan pengisi dosis tinggi (72%) semakin lama penuaan semakin lambat pemulihan sifat hidrofobiknya. Penyebabnya diduga karena kerapatan partikel-partikel bahan pengisi, akibat penuaan akan mengalami pergeseran lebih banyak ke permukaan sebagaimana ditunjukkan dari hasil pengukuran SEM, sehingga menghambat reorientasi rantai dan laju difusi MMRR ke permukaan dan lapisan polusi, keadaan ini dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.4. berikut ini.



Gambar 2.4. Efek bahan pengisi pada difusi MMRR ke lapisan polusi

Proses difusi MMRR ke lapisan polusi sangat kecil dipengaruhi oleh radiasi UV. Faktor penyebabnya diperkirakan perbedaan gradien konsentrasi MMRR di dalam ruah (*bulk*) dengan permukaan dan dengan kenaikan temperatur mempercepat reaksi difusi MMRR. Pengaruh temperatur terhadap kecepatan difusi MMRR ke lapisan polusi juga pernah dipublikasikan oleh **Kindersberger (1989)** bahwa semakin tinggi temperatur semakin cepat transfer sifat hidrofobik dan juga tergantung pula dari ketebalan lapisan polusi. Kenaikan temperatur oleh sinar matahari dan ketebalan lapisan polusi serta level dosis bahan pengisi yang memberikan kontribusi terhadap kecepatan *transfer* dan *recovery* hidrofobik.

Lingkungan yang mengandung kontaminasi garam-garaman juga sering menjadi penyebab melemahnya sifat hidrofobik sehingga menyebabkan turunnya resistansi permukaan isolator. Pengujian secara intensif telah dilakukan oleh **Hackam** dengan menguji hubungan perubahan sudut kontak dengan resistansi permukaan *silicon rubber* di

dalam lemari kabut-garam (*salt-fog*) selama 4 siklus yang berbeda-beda. Hasil penelitiannya menunjukkan penurunan sudut kontak material isolasi polimer SIR ternyata hanya bersifat temporer (sementara). Ketika perlakuan kabut bergaram dihentikan dan dibiarkan di udara, sudut kontak berangsur-angsur mulai mengalami kenaikan seperti semula dan juga diikuti kenaikan resistansi permukaan ke keadaan semula. Fenomena ini disebut proses pemulihan (*recovery*) hidrofobik polimer SIR.

2.5.2. Sifat Dielektrik

Sifat dielektrik merupakan suatu keadaan yang menggambarkan sifat kekuatan isolasi sebagai material isolasi kelistrikan. Sifat ini digambarkan oleh permitivitas relatif (ϵ_r) dan faktor disipasi ($\tan\delta$). Sifat dielektrik bahan polimer kebanyakan mengalami penurunan akibat penuaan terutama karena difusi molekul-molekul air dari kelembaban atau hujan kedalam bahan polimer. Polimer SIR dengan struktur kimia yang dimiliki sebagian besar terdiri dari gugus metil yang hidrofobik sehingga material ini tidak banyak menyerap air. Namun dengan adanya bahan pengisi yang dikandung memberi peluang molekul air terdifusi diantara partikel-partikel bahan pengisi dengan polimer.

Tingkat absorpsi air dan kaitannya dengan perubahan sifat dielektrik dilakukan pengujian penuaan buatan yang dipercepat di dalam suatu lemari pengujian yang dapat dikondisikan dengan kondisi alamiah dengan kelembaban 70-95%, suhu 50-70°C, UV 400 mm dan medan listrik 2,5 kV/cm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa polimer SIR kurang

menyerap air. Absorpsi air juga tergantung dari level dosis bahan pengisi, makin tinggi dosis bahan pengisi makin kuat menyerap air. Nilai konstanta dielektrik (ϵ_r) dan faktor disipasi ($\tan\delta$) cenderung mengikuti pola kurva absorpsi air. Ini membuktikan efek dari air yang diabsorpsi pada sifat dielektrik dengan dosis bahan pengisi yang tinggi meningkatkan nilai konstanta dielektrik ϵ_r dan faktor disipasi ($\tan\delta$). Hal ini akibat dari *polarisasi interfacial* didalam material isolasi.

2.5.3. Sifat Termal

Kekuatan termal suatu material isolator mutlak dimiliki. Kejadian tegangan lewat denyar (*flashover*) melalui permukaan dapat menimbulkan panas yang tinggi di bagian permukaan. Jika hal ini terjadi berulang-ulang akan menyebabkan kerusakan (*tracking*) yang berdampak terhadap penurunan resistansi permukaan. Hasil pengujian sifat termal Polimer SIR dengan menggunakan *termografimetrik* dapat memberikan kestabilan termal sampai mencapai suhu 260°C. Bahkan polimer SIR kelompok RTV masih stabil sampai 300°C.

Beberapa tahun terakhir ini di beberapa negara sudah memulai mengoperasikan isolator polimer komposit dalam upaya meningkatkan keandalan dan mengurangi kehilangan daya listrik di saluran transmisi dan distribusi . Oleh **Gutman** berhasil menguji beberapa isolator berbahan polimer dan gelas/porselin yang dioperasikan di luar di daerah **Ukraine** (Russia) selama dua sampai lima tahun. Dimana hanya isolator polimer SIR yang masih memperlihatkan sifat hidrofobik dengan sudut kontak

yang tinggi 116° , bahkan terlihat kenaikan sudut kontak setelah dioperasikan lima tahun. Isolator polimer jenis lain seperti *Ethylene Propylene*, *Polyolephin* mengalami penurunan sudut kontak (79°) bahkan isolator gelas/porselin memperlihatkan sudut kontak 0° (basah keseluruhan).

Sementara itu hasil penelitian oleh **Sherif** dan **Vlastos** yang juga melakukan pengujian beberapa jenis isolator selama (5 tahun) yang dioperasikan pada tegangan 800 kV AC di stasium pengujian **Annaberg** (Swedia) dibawah kondisi cuaca yang berbeda-beda dan kondisi lingkungan polusi yang tinggi. Arus bocor (*leakage current*) terjadi paling kecil pada isolator polimer SIR. Ini menunjukkan bahwa dengan adanya aktivitas massa molekul relatif rendah (MMRR) SIR mentransfer hidrofobiknya ke polusi telah menghambat terjadinya lapisan air dipermukaan SIR yang terpolusi.

Vosslo dkk (2001) memasang isolator suspensi dari polimer jenis EPDM dan SIR serta gelas/porselin di jaringan transmisi 88 kV di Afrika selama 12 bulan. Arus bocor permukaan terkecil diperlihatkan oleh isolator polimer SIR 5C, Gelas 33C terbesar EPDM adalah 85C.

Isolator berbahan polimer SIR sukses diterapkan pada disain saluran transmisi dan distribusi sebagai pemisah antar fasa sehingga desain transmisi semakin kompak dengan biaya yang lebih murah karena isolator polimer sangat ringan. Untuk meningkatkan kapasitas daya transmisi di **Jerman**, sejak tahun 1995 sebagian saluran transmisi di *upgrade*

ke tegangan yang lebih tinggi dari tegangan 245 kV menjadi 420 kV dengan hanya mengganti isolator konvensional (porselen) dengan isolator komposit dari polimer SIR tanpa merubah menara transmisi. Di **Australia** sejak tahun 2001 mulai mengoperasikan isolator polimer SIR dengan biaya lebih murah 30% dari isolator konvensional porselen (**Gubanski 2007**). Demikian pula di **Amerika utara** kini terus melakukan penggantian post isolator konvensional dengan isolator polimer SIR pada jaringan tegangan menengah dengan hanya menggunakan konstruksi tiang (*pole*) yang sederhana tanpa menggunakan *crossarms*.

Kini material isolator polimer SIR ini mulai pula banyak digunakan sebagai *housing* pada transformator arus, *bushing*, *surge arrester* sampai tegangan 500 kV untuk menggantikan material keramik/gelas yang mudah pecah terutama untuk gardu induk yang berada di daerah yang sering terjadi gempa bumi. Selain itu terbukti mampu pula menurunkan aktivitas *flashover* yang sering menjadi gangguan di daerah-daerah yang berpolusi tinggi.

F. Polusi Pada Isolator Polimer

Salah satu komponen utama jaringan transmisi dan distribusi energi listrik adalah isolator. Isolator yang terpasang pada ruang terbuka banyak mengalami persoalan polusi. Beberapa bulan atau tahun sejak pemasangannya pada ruang terbuka, pada permukaan isolator dapat menempel polutan yang bersifat permanen. Intensitas polutan pada

isolator tersebut tergantung kepada tingkat pencemaran udara dan unsur polutan yang terkandung dalam udara yang menerpa isolator.

Pada umumnya, polusi pada isolator menurut sumbernya dapat dibagi dalam empat kategori (*IEC Publication 815, SPLN 10-3B: 1993*), yaitu:

2.6.1. Polusi dari laut.

Tingkat polusi maksimum dari isolator sangat berhubungan dengan jarak lokasi dari laut. Makin jauh dari laut makin sedikit penumpukan yang terjadi. Polusi ini terbawa ke permukaan isolator oleh angin. Pada kondisi tertentu seperti angin topan atau badai, sering terjadi penumpukan polutan dalam jumlah yang sangat besar pada permukaan isolator. Zat polutan yang berasal dari laut berupa komponen konduktif yang bersifat larut yang terdiri dari garam-garam seperti *Natrium Chlorida* (NaCl), *Magnesium Chlorida* (MgCl) dan *Natrium Nitrat* (NaNO₃).

2.6.2. Polusi dari industri.

Komposisi kimia dari polutan jenis ini sangat beragam dan bisa membentuk lapisan yang menempel kuat pada permukaan isolator, seperti: jelaga dan asap dari cerobong pabrik serta debu dari pabrik semen dan tambang.

2.6.3. Polusi dari daerah padang pasir.

Timbunan polutan tak larut (*Non Soluble Deposit Density, NSDD*) pada daerah padang pasir pada umumnya lebih banyak dari pada di daerah polusi laut. Pada daerah tertentu seringkali terjadi kombinasi dari

keduanya, seperti pada daerah berpasir yang dekat pantai. Garam laut dapat menempel pada permukaan isolator dan terlapis oleh debu yang terbawa dari padang pasir. Pada daerah tersebut besarnya ESDD dan NSDD bisa melebihi $1,0 \text{ mg/cm}^2$ (*IEC Publication 815*).

2.6.4. Polusi dari gunung berapi.

Polutan yang berasal dari letusan gunung berapi berbentuk debu-debu dari berbagai ukuran dengan senyawa utama *silica* (SiO_2) dan *aluminatrihidrat* (Al_2O_3). Nilai NSDD pada daerah ini dapat mencapai $0,8 \text{ mg/cm}^2$.

Polusi pada isolator akan menyebabkan peningkatan arus bocor pada permukaan isolator. Pada keadaan yang lebih parah bahkan dapat menimbulkan lompatan busur api listrik. Untuk mengurangi terjadinya arus bocor ini, pada tahap perancangan biasanya penempatan jaringan dan gardu induk diusahakan cukup jauh dari sumber polusi, pemilihan bentuk dan ukuran isolator yang sesuai dengan tingkat polusi setempat, dilakukan pencucian isolator atau diberikan lapisan bahan tertentu pada permukaan isolator. Dengan teknologi isolator polimer SIR dengan bahan pengisi (*filler*) kombinasi dari *silica* dan *Aluminatrihidrat* memberikan karakteristik dielektrik yang sangat baik untuk kendala polusi yang berat. Sehingga kendala yang dialami oleh isolator keramik dan isolator gelas di daerah berpolusi berat tidak menjadi persolan yang harus dihindari lagi. Tingkat polusi berdasarkan kondisi lingkungan disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Tingkat polusi dan lingkungannya

Tingkat polusi	Contoh ciri lingkungan yang khas
I. Ringan	<ul style="list-style-type: none"> - Kawasan tanpa industri dan dengan kepadatan rumah rendah yang dilengkapi sarana pembakaran - Kawasan dengan kepadatan industri rendah atau kepadatan rumah rendah tetapi sering terkena angin dan/atau hujan - Kawasan pertanian ¹⁾ - Kawasan pegunungan <p>Semua kawasan ini harus terletak paling sedikit 10 - 20 km dari laut dan bukan kawasan terbuka bagi hembusan angin langsung dari laut²⁾</p>
II. Sedang	<ul style="list-style-type: none"> - Kawasan dengan industri yang tidak secara khusus menghasilkan asap polusi dan/atau dengan kepadatan rumah sedang yang dilengkapi sarana pembakaran. - Kawasan dengan kepadatan rumah tinggi dan/atau kepadatan industri tinggi, tetapi sering terkena angin dan/atau hujan. - Kawasan terbuka bagi angin dari laut tetapi tidak terlalu dekat dengan pantai (paling sedikit berjarak beberapa kilometer)²⁾
III. Berat	<ul style="list-style-type: none"> - Kawasan dengan kepadatan industri yang tinggi dan pinggiran kota besar dengan kepadatan sarana pembakaran tinggi yang menghasilkan polusi. - Kawasan dekat laut atau dalam setiap keadaan terbuka bagi hembusan angin yang relatif kencang dari laut ²⁾
IV. Sangat Berat	<ul style="list-style-type: none"> - Kawasan yang umumnya terkena debu konduktif dan asap industri yang khususnya menghasilkan endapan konduktif yang tebal. - Kawasan yang umumnya sangat dekat dengan pantai dan terbuka bagi semburan air laut atau hembusan angin yang sangat kencang dan terpolusi dari laut. - Kawasan padang pasir, yang ditandai dengan tidak adanya hujan untuk jangka waktu lama, terbuka bagi angin kencang yang membawa pasir dan garam serta terkena kondensasi yang tetap.

Sumber : (IEC Publication 815, SPLN 10-3B:1993)

G. Hubungan Tingkat Polusi dan Jarak Rambut

Jarak rambut adalah jarak terpendek sepanjang permukaan isolator antara dua bagian konduktif. Isolator polimer SIR dapat memperpendek jarak rambut dari isolator tegangan tinggi. Jarak rambut spesifik minimum dapat diturunkan sekecil mungkin, sehingga kendala medan listrik pada isolator polimer menjadi teratasi dengan sangat baik. Jarak rambut spesifik nominal minimum dalam mm/kV (fase ke fase) adalah seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Tingkat polusi dan jarak rambut spesifik minimum

Tingkat polusi	Jarak rambut spesifik minimum (mm/kV)
I (ringan)	16
II (sedang)	20
III (berat)	25
IV (sangat berat)	31

Sumber: (*IEC Publication 815, SPLN 10-3B: 1993*)

Dalam kawasan terpolusi ringan jarak rambut spesifik mungkin lebih rendah dari 16 mm/kV masih dapat digunakan tergantung pada pengalaman di lapangan dimana jarak rambut spesifik minimum adalah 12 mm/kV. Pada kawasan dengan intensitas polusi sangat besar, jarak rambut minimal spesifik 31 mm/kV mungkin tidak memadai. Nilai jarak rambut spesifik yang lebih tinggi dapat digunakan tergantung pada pengalaman di lapangan dan/atau pada hasil uji laboratorium.

Agar penerapan konsep jarak rambat spesifik berhasil dengan baik, parameter dimensional tertentu yang mencirikan karakteristik isolator harus diperhitungkan. Berdasarkan pengalaman di lapangan dan pengujian di laboratorium, jarak rambat spesifik ini tergantung dari profil isolator, diameter dan posisi isolator dalam pemakaiannya.

H. Pengaruh Diameter Isolator Polimer

Berbagai hasil uji coba laboratorium menunjukkan bahwa kinerja isolator gantung yang diterpa polusi akan menurun dengan bertambahnya diameter rata-rata (D_m). Untuk menaikkan jarak rambat digunakan faktor k_D yang merupakan fungsi diameter isolator (*IEC Publication 815, SPLN 10-3B: 1993*).

$D_m < 300 \text{ mm}$	$k_D = 1,0$
$300 < D_m < 500 \text{ mm}$	$k_D = 1,1$
$D_m \geq 500 \text{ mm}$	$k_D = 1,2$

Meskipun demikian, nilai-nilai ini dapat berbeda sesuai hasil uji yang berbeda (hasil lapangan atau hasil uji laboratorium). Oleh karena itu faktor koreksi ini harus digunakan dengan hati-hati.

Untuk profil tertentu, diameter rata-rata D_m ditentukan dengan:

$$D_m = \frac{\int_0^{l_t} D(l) dl}{l_t} \quad (2.9)$$

dimana:

$$l_t = \text{jarak rambat total isolator}$$

$D(l)$ = nilai diameter pada jarak rambat l , yang diukur dari 1 (satu) elektroda

Rumus di atas secara umum dapat didekati dengan hubungan sederhana sebagai berikut :

Sirip reguler,

$$D_m = \frac{D_e + D_i}{2} \quad (2.10)$$

dimana:

D_e = diameter luar sirip isolator

D_i = diameter dalam isolator

Sirip berselang-seling,

$$D_m = \frac{D_{e1} + D_{e2} + 2D_i}{4} \quad (2.12)$$

dimana: D_{e1} = diameter luar sirip isolator yang lebih besar

D_{e2} = diameter luar sirip isolator yang lebih kecil

I. Polutan Terlarut dan Tak Larut

Zat polutan yang mempengaruhi ketahanan permukaan suatu isolator dapat digolongkan menjadi dua komponen yaitu komponen yang bersifat larut dan komponen yang bersifat tidak larut. **Komponen yang bersifat larut** merupakan komponen konduktif yang terdiri dari garam-garam yang dapat terurai menjadi ion-ion dalam suatu larutan, seperti *Natrium Chlorida* (NaCl), *Magnesium Chlorida* (MgCl) dan *Natrium Nitrat* (NaNO₃). Lapisan garam yang menempel pada permukaan luar isolator akan menyebabkan

resistivitas isolator menurun atau konduktivitas isolator naik. Kuantitas garam yang menempel pada permukaan isolator disebut ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*) yang menyatakan banyaknya deposit polutan larut per luas area (mg/cm^2).

Komponen tak larut adalah bagian dari zat padat yang tidak dapat terurai menjadi ion-ion dalam larutan, tetapi komponen ini dapat mengurangi ketahanan listrik pada isolator, seperti debu, tanah liat (*kaolin*), *tonoko* dan *bentonit*. Polutan jenis ini diwakili oleh parameter NSDD (*Non-Soluble Salt Deposit Density*) yang menyatakan banyaknya deposit polutan tak larut per luas area (mg/cm^2).

a) Nilai ESDD dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$ESDD = \frac{S_a \cdot V_d}{A_{ins}} \quad (2.13)$$

dimana: ESDD = *Equivalent Salt Deposit Density*, mg/cm^2

S_a = Kadar garam NaCl, kg/m^3

V_d = Volume air destilasi, cm^3

A_{ins} = Luas bagian permukaan isolator tempat pengambilan sampel polutan, cm^2

b) Nilai NSDD dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$NSDD = \frac{M_2 - M_1}{A_{ins}} \quad (2.14)$$

dimana:

NSDD = *Non-soluble Salt Deposit Density*, mg/cm^2

M_1 = Massa kapas kering bersih (tanpa polutan), mg

M_2 = Massa kapas kering terkontaminasi (berpolutan), mg
 A_{ins} = Luas bagian permukaan isolator tempat pengambilan sampel polutan, cm^2

J. Mekanisme *Flashover* Isolator Polimer

Tegangan *flashover* disebabkan polusi berbeda-beda terutama tergantung pada solubilitas material dapat-larut terhadap air walaupun jumlah material dapat-larut pada permukaan isolator adalah sama. Solubilitas ini tergantung pada jenis komponen dapat-larut (Jauhari,E,2005).

1.1 Mekanisme *Flashover*

Dalam keadaan bersih, nilai tahanan isolator sangat besar. Apabila terbentuk lapisan pengotor pada permukaan isolator 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 mendapat 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 pelepasan muatan (*discharge*) melintasi pita kering. Bila busur

api memanjang melintasi seluruh permukaan isolator maka akan terjadi *flashover*.

1.2 Mekanisme Pembentukan Lapisan Pengotor

Sebagian besar zat pengotor, baik yang bersifat konduktif maupun bersifat lembab dibawah 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 bentuknya 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 gantungan isolator. Pengaruh ini terutama terlihat pada isolator tegangan tinggi searah (HVDC) yang mempunyai polaritas tetap. 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, dsb., polusi dapat mengumpul pada permukaan isolator dengan sangat cepat dan pengotoran biasa (*ordinary pollution*) yaitu kondisi pengotoran yang berlangsung lama.

1.3 Proses Pembasahan Lapisan Pengotor

a. Kondensasi (Pengembunan).

Pengembunan terjadi bila temperatur permukaan isolator lebih rendah dari titik embun air untuk kondisi cuaca tertentu. Pada malam hari dalam keadaan cuaca cerah, permukaan isolator akan kehilangan panas melalui proses radiasi. Jika temperatur permukaan terus turun hingga lebih kecil dari titik pengembunan, akan terbentuk titik-titik air (embun) pada permukaan isolator.

b. Tumbukan butiran-butiran air dengan permukaan isolator.

Kondisi kabut akan tercapai jika kelembaban relatif udara adalah 100% dan kelebihan kelembaban membentuk butiran-butiran kecil yang membasahi permukaan jika bersentuhan. Butiran-butiran air ini dipengaruhi oleh kekuatan gravitasi, yang menyebabkan turun sebagai hujan rintik-rintik. Laju pembasahan tergantung pada kerapatan tetesan, arah, dan kecepatan gerak angin.

c. Penyerapan air oleh lapisan pengotor.

Pembasahan ini terjadi melalui lapisan pengotor yang bersifat menyerap air. Lapisan pengotor ini akan menyerap air dari udara, tetapi tidak terjadi reaksi kimia. Butiran-butiran air yang menyentuh permukaan lapisan dengan cepat meluas ke seluruh permukaan isolator lalu diserap.

d. Difusi kimia.

Tekanan uap suatu cairan ditentukan oleh suhunya, jika ia berada dalam keadaan murni. Sedangkan dalam bentuk larutan, tekanan uapnya ditentukan oleh konsentrasi dan temperturnya. Air pada permukaan isolator melarutkan zat pengotor pada lapisan sehingga konsentrasi larutan pada permukaan isolator berbeda dengan konsentrasi larutan pada udara sekitarnya. Perbedaan ini menyebabkan terjadinya proses difusi. Jika konsentrasi larutan pada permukaan isolator lebih tinggi dari konsentrasi larutan udara sekitarnya, maka uap akan tertarik oleh lapisan permukaan isolator. Air yang terserap ini akan membuat larutan menjadi encer sehingga menurunkan perbedaan konsentrasi. Akibatnya laju penyerapan air menurun. Pembasahan oleh difusi kimia ini dapat diabaikan.

1.4 Pembentukan pita kering (*dry band arcing*)

Dalam prakteknya, studi tentang pembentukan pita kering sangat rumit, karena dipengaruhi oleh faktor geometri isolator, ketidakseragaman pengotor, dan keanekaragaman keadaan lingkungan. Persoalan ini dapat dipermudah dengan menggunakan suatu isolator datar yang permukaannya dikotori merata sehingga prinsip pembentukan pita kering dapat diterangkan.

Peristiwa penguapan air merupakan awal dari pembentukan pita kering. Perbedaan temperatur 2-3 °C di atas temperatur lingkungan sudah

cukup untuk mengawali pembentukan pita kering. Penguapan air akan menurunkan ketebalan lapisan dan menaikkan resistivitas permukaan pengotor.

Pemanasan oleh arus-bocor akan menaikkan temperatur lapisan. Bila temperatur lapisan pengotor telah mengalami *flashover* hingga tercapai temperatur kritis, maka proses penguapan akan menyebabkan kenaikan resistivitas lapisan pengotor. Jika pemanasan lebih lanjut tidak menyebabkan kenaikan temperatur lagi, berarti telah tercapai keadaan jenuh dan proses pengeringan selesai. Terbentuklah pita kering pada permukaan isolator.

Dari hasil percobaan yang dilakukan oleh **Loeberg** dan **Salthouse**, dibuktikan bahwa makin rendah resistivitas suatu permukaan isolator, makin kecil pula tegangan yang diperlukan untuk memulai pembentukan pita kering. Karena resistivitas listrik yang rendah merupakan penghantar panas yang baik dan mempercepat kenaikan temperatur dan pembentukan pita kering. Berarti pada tegangan yang tetap, kenaikan konduktivitas permukaan akan mempercepat pembentukan pita kering.

1.5 Pelepasan muatan melalui pita kering

Terbentuknya pita kering akan membuat distribusi tegangan pada permukaan isolator semakin tidak merata. Nilai tahanan pita kering jauh lebih besar dibanding tahanan bagian permukaan isolator lainnya. Jika beberapa pita kering terbentuk, biasanya dalam beberapa detik sebuah pita kering menjadi yang paling dominan dan menahan hampir seluruh

tegangan yang diberikan. Lebar pita kering akan terus berubah sampai stress tegangan yang ditahannya cukup untuk memulai pelepasan muatan melalui pita kering.

1.6 Pemanjangan busur pelepasan muatan

Busur pelepasan muatan yang melintasi pita kering dapat memanjang melingkupi seluruh permukaan isolator, sehingga terjadi *flashover* pada permukaan isolator.

Walkins dan **Baghdadi** mengemukakan suatu teori mekanime perpanjangan busur pelepasan muatan yang diberi nama *Discharge Elongation by Ionisation and Succesive Formation*, yaitu perpanjangan busur pelepasan muatan dengan ionisasi dan pembentukan akar secara berturut-turut. Teori ini menyatakan bahwa pemanjangan busur disebabkan oleh jejak ionisasi baru yang timbul pada ujung busur pelepasan muatan. Ionisasi baru ini akibat pengaruh temperatur dan medan listrik yang timbul pada daerah tersebut sangat tinggi. Arus akan mengalir melalui jejak ionisasi di muka ujung busur. Konduktivitas jejak ionisasi baru akan naik dengan pembesaran arus yang mengalir, sementara konduktivitas jejak-jejak elektrolit tetap. Jadi secara perlahan-lahan arus total akan dialirkan ke jejak ionisasi baru. Peristiwa ini menghasilkan pemanjangan busur berlangsung secara *diskrit*.