

SKRIPSI
SIMULASI DAN ANALISIS KINERJA MATERIAL ISOLASI
***ELASTOMER SILICONE* DENGAN *FILLER* SILIKA DAN**
ATH PADA TIRUAN IKLIM TROPIS DAN
MEDAN LISTRIK

Disusun dan diajukan oleh :

ADITYA SYAH MAULANA IBRAHIM
D041 18 1701



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN

2024



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

SIMULASI DAN ANALISIS KINERJA MATERIAL ISOLASI ELASTOMER *SILICONE* DENGAN *FILLER* SILIKA DAN ATH PADA TIRUAN IKLIM TROPIS DAN MEDAN LISTRIK

Disusun dan diajukan oleh :

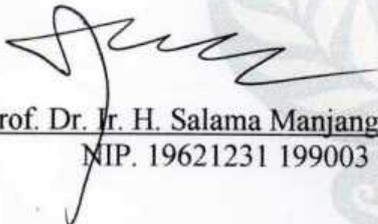
ADITYA SYAH MAULANA IBRAHIM
D041 18 1701

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 08 Mei 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama,

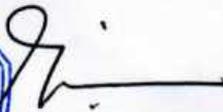
Pembimbing Pendamping,


Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T., IPM
NIP. 19621231 199003 1 024


Dr. Ir. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.
NIP. 19760914 200801 1 006

Ketua Departemen Teknik Elektro




Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., IPM
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Aditya Syah Maulana Ibrahim
NIM : D041 18 1701
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

SIMULASI DAN ANALISIS DIELEKTRIK MATERIAL ELASTOMER
SILICONE DENGAN *FILLER* SILIKA DAN ATH PADA TIRUAN IKLIM
TROPIS DAN MEDAN LISTRIK

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitnya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklasifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 08 Mei 2024

Yang Menyatakan

Aditya Syah Maulana Ibrahim



ABSTRAK

ADITYA SYAH MAULANA IBRAHIM. *Simulasi Dan Analisis Kinerja Material Elastomer Silicone Dengan Filler Silika Dan ATH Pada Tiruan Iklim Tropis Dan Medan Listrik* (dibimbing oleh Salama Manjang dan Ikhlas Kitta)

Isolator Polimer merupakan isolasi dari bahan dielektrik yang mempunyai keunggulan berupa sifat dielektrik, resistivitas *volume* dan sifat termal yang lebih baik, konstruksi relatif lebih ringan, dan tahan terhadap air (hidrofobik) namun memiliki kekurangan seperti tidak tahan terhadap perubahan cuaca/iklim. Untuk mengatasi itu penambahan bahan pengisi / *filler* silika (SiO_2) ke *elastomer silicone rubber* dapat meningkatkan ketahanan terhadap paparan sinar *ultraviolet* (UV) dan bahan pengisi ATH dapat membantu meningkatkan nilai resistansi terhadap arus bocor dan erosi. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui sifat dielektrik dan sifat hidrofobik dari kinerja material *elastomer silicone rubber* dan mengetahui pengaruh besar komposisi bahan pengisi / *filler* terhadap kinerja material. Penelitian ini dilakukan dengan pengujian penuaan pada lemari penuaan dengan diberikan pembebanan suhu/*temperature*, kelembaban, sinar UV, dan medan listrik. Untuk mengetahui sifat dielektrik dan hidrofobik dilakukan pengukuran penyerapan air (berat), sudut kontak, permitivitas, resistivitas permukaan dan *volume* yang diukur tiap siklusnya (24 jam). Adapun parameter penunjang yang diukur untuk melihat keandalan material seperti pengujian tegangan tembus, *partial discharge*, dan FTIR. Dari penelitian didapatkan bahwa pengaruh besar komposisi bahan pengisi terhadap nilai persentase penyerapan berbanding terbalik semakin banyak bahan pengisi semakin kecil nilai persentase penyerapan air nya. Pengukuran sudut kontak material didapatkan bahwa nilai terbesar terdapat badan sampel uji dengan komposisi bahan pengisi 20%, nilai permitivitas relatif pada material berkisar antara 2,8-4, dan nilai resistivitas permukaan dan *volume* tertinggi pada komposisi 20% sebesar 6,4 $\text{G}\Omega$ dan 72,2 $\text{G}\Omega\cdot\text{m}$. Pengaruh besar komposisi bahan pengisi terhadap sifat dielektrik ditunjukkan dengan pengukuran resistivitas berbanding lurus dimana semakin besar komposisi bahan pengisi semakin besar juga nilai resistivitas yang didapat maka semakin baik sifat dielektrik material. Sifat hidrofobik material juga semakin baik ditandai dengan semakin besar nilai sudut kontak terhadap penambahan bahan pengisi / *filler*.

Kata Kunci: Isolator Polimer, Bahan Pengisi, Dielektrik, Hidrofobik



ABSTRACT

ADITYA SYAH MAULANA IBRAHIM. *Simulation and Analysis Performance of Silicone Elastomer Materials with Silica and ATH Fillers in Artificial Tropical Climates and Electric Fields* (supervised by Salama Manjang and Ikhlas Kitta)

Polymer Insulators are insulation made from dielectric materials which have the advantages of better dielectric properties, volume resistivity and thermal properties, relatively lighter construction, and water resistant (hydrophobic) but have disadvantages such as not being resistant to weather/climate changes. To overcome this, the addition of silica filler (SiO_2) to silicone elastomeric rubber can increase resistance to exposure ultraviolet (UV) light and ATH filler material can help increase the value of resistance to leakage currents and erosion. The aim of this research is to determine the dielectric properties and hydrophobic properties of the performance of elastomeric silicone rubber materials and determine the major influence of filler composition on material performance. This research was carried out by testing aging in an aging chamber by subjecting it to temperature, humidity, UV light and electric fields. To determine the dielectric and hydrophobic properties, air absorption (weight), contact angle, permittivity, surface resistivity and volume were measured each cycle (24 hours). The test parameters measured to see the clarity of the material include breakdown voltage, partial discharge and FTIR tests. From the research it was found that the influence of the filler composition on the absorption percentage value was inversely proportional, the more filler the smaller the air absorption percentage value. From material contact angle measurements, it was found that the largest value was found in the body of the test sample with a filler material composition of 20%, the relative permittivity value for the surrounding material was between 2.8-4, and the highest surface and volume resistivity values at a composition of 20% were $6.4 \text{ G}\Omega$ and $72.2 \text{ G}\Omega\cdot\text{m}$. The large influence of the composition of the filler material on the dielectric properties is shown by measuring the directly proportional resistivity, where the greater the composition of the filler material, the greater the resistivity value obtained, the better the properties of the dielectric material. The hydrophobic properties of the material also get better as indicated by the greater the contact angle value with the addition of the filler.

Keywords: Polymer Insulator, Filler, Dielectric, Hydrophobic



KATA PENGANTAR

Assalamu'Alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Tiada kata yang mewakili perasaan penulis saat ini kecuali rasa syukur. Untuk itu, penulis ucapkan terima kasih kepada Tuhan Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya. Alhamdulillah atas hidayah dan inayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir Penelitian ini yang berjudul : “SIMULASI DAN ANALISIS DIELEKTRIK MATERIAL ELASTOMER *SILICONE* DENGAN *FILLER* SILIKA DAN ATH PADA TIRUAN IKLIM TROPIS DAN MEDAN LISTRIK”. Atas berkat dukungan moral dan materil yang diberikan dalam penyusunan Tugas Akhir, maka penulis mengucapkan terima kasih kepada.

1. **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.** selaku Rektor universitas Hasanuddin.
2. **Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Irsan Ramli, S.T, M.T** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Ibu **Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T** selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak **Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T** selaku pembimbing I dan Bapak **Dr. Ir. Ikhlas Kitta, S.T., M.T** selaku pembimbing II, yang telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan, ide, serta gagasan dalam penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak **Dr. Yusran, S.T., M.T** selaku penguji I dan Ibu **Dr. Fitriyanti Mayasari, S.T., M.T** selaku penguji II, yang telah meluangkan waktu dan memberikan saran dan kritikan yang membangun dalam penulisan skripsi ini, ide, serta gagasan dalam penyelesaian Proposal penelitian ini.
6. Orang tua yang selalu tiada hentinya mendoakan dan memberikan semangat, motivasi, serta dukungan kepada penulis sampai pada saat ini. Cinta dan kasih a orang tua yang mendorong penulis untuk terus maju menuju cita-cita mpian penulis.



7. Kedua saudari penulis yang tiada henti-hentinya memberikan semangat dan motivasi kepada penulis
8. Teman-teman seperjuangan Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan yang menemani penulis dalam kegiatan riset dan penelitian.
9. Pak Mustamin selaku mentor dalam penelitian isolator polimer yang senantiasa memberikan bimbingan dan arahan.
10. Teman-Teman sepenelitian Polimer khususnya Alprianto, Kak Arham, Kak Riska dan Satria yang bekerjasama dan saling mendukung dalam pengerjaan penelitian ini.
11. Teman-teman “CAL18RATOR” yang selama ini telah membantu, mendukung, dan kebersamai penulis selama perkuliahan dikampus merah putih. Teman-teman yang kebersamai “Berlari Meraih Mimpi” dan memberikan motivasi bahwa “Tak Ada yang Tak Mungkin Bila Kita Yakini”.
12. Teman-teman “UKM PANAHAN UNHAS” terkhusus nya “VOL5 SIGHT”, Faza, Widha, Iis, Jalla, Calu, Rahmat, dan Senal yang telah kebersamai penulis dalam kegiatan hobi penulis dan tidak pernah lupa untuk terus memberi semangat dan dukungan.
13. Teman-teman *squad hell* (Jentel, Alba, Rull, Caesar, Rio, Rahim, Syahbrian) atas bantuan dan momen-momen kebersamaan selama masa perkuliahan serta selalu menjadi tempat hiburan untuk penulis dikalau jenuh dalam segala proses perkuliahan dan penelitian ini.
14. Alya Aisyaira Damran yang telah membantu penulis dalam hal sponsori penulis aplikasi desain berbayar yang dibutuhkan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
15. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah bantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.



Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini jauh dari kata sempurna dan masih terdapat beberapa kekurangan, oleh karena itu besar harapan atas saran dan kritik yang membangun untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Makassar, 08 Mei 2024

Penulis



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Isolator	5
2.2 Karakteristik Isolator.....	6
2.3 Isolator Polimer.....	6
2.3.1 Struktur Kimia Isolator Polimer.....	8
2.3.2 Karakteristik dan Sifat Bahan Isolator Polimer	9
2.4 Silikon Rubber	21
2.5 Arus Bocor Permukaan Isolator.....	22
2.6 Pembentukan Sudut Kontak pada Butir Air.....	24
2.7 Tegangan Tembus	26
2.7.1 Mekanisme Tegangan Tembus	27
2.7.2 Faktor Penyebab Tegangan Tembus	28
2.8 Pengujian Tegangan Tinggi	31
2.9 Bahan Pengisi.....	32
2.9.1 Silika	32
2.9.2 Allumina trihydrate (ATH).....	35
2.10 Pengaruh <i>filler</i> terhadap Hidrofobik	37
2.11 Bahan Isolasi Di bawah Pengaruh Medan Listrik.....	38
2.11.1 Bahan Isolasi Di bawah Pengaruh Medan Listrik Bolak-balik (AC)	38
2.11.2 Bahan Isolasi Di bawah Pengaruh Medan Listrik Tunak (DC)	38
BAB III METODE PENELITIAN	40
3.1 Rancangan Penelitian.....	40
3.2 Lokasi Penelitian.....	40
3.3 Bahan dan Alat Yang Digunakan.....	40
3.3.1 Bahan	40
3.3.2 Alat.....	42
3.4 Metode Pengumpulan Data.....	44
3.5 Komposisi Bahan Sample Uji.....	45
3.6 Parameter Observasi	45
3.7 Prosedur Penelitian	46
3.8 Studi Literatur	46



3.7.2	Persiapan Alat dan Bahan	46
3.7.3	Pembuatan Material	46
3.7.4	Pengukuran Parameter Awal.....	47
3.7.5	Pengukuran Nilai Sudut Kontak	48
3.7.6	Pengukuran Berat Harian	49
3.7.8	Pengukuran Nilai Permittivitas	50
3.7.9	Pengukuran Nilai Resistivitas Permukaan dan <i>Volume</i>	51
3.7.10	Pengujian Tiruan Iklim Tropis dan Medan Listrik	52
3.7.11	Pengambilan Parameter Akhir	53
3.7.12	Analisa Hasil Pengambilan Data.....	54
3.7.13	Kesimpulan	54
3.8	Diagram Alur Penelitian	55
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		56
4.1.	Pembuatan Material	56
4.2.	Data Berat Harian ES-NSiAT	58
4.3.	Data Sudut kontak Hidrofobik ES-SiAT	64
4.4.	Data Nilai Permittivitas Relatif	68
4.5.	Data Resistivitas Permukaan.....	73
4.6.	Data Resistivitas <i>volume</i>	79
4.7.	Pengujian Tegangan tembus material ES-NSiAT.....	84
4.7.1.	Nilai Tegangan Tembus ES-NSiAT Sebelum perlakuan (<i>virgin</i>)	85
4.7.2.	Nilai Tegangan Tembus ES-NSiAT Sesudah Perlakuan (<i>aging</i>)	86
4.7.3.	Perbandingan Tegangan Tembus ES-NSiAT sebelum dan Sesudah Perlakuan (<i>aging</i>).....	87
4.8.	Pengujian <i>Partial Discharge</i> Material ES-NSiAT.....	89
4.8.1.	Pengujian <i>Partial Discharge</i> ES-NSiAT Sebelum <i>Aging</i>	90
4.8.2.	Pengujian <i>Partial Discharge</i> ES-NSiAT Sesudah <i>Aging</i>	91
4.8.3.	Perbandingan Pengujian <i>Partial Discharge</i> ES-NSiAT	92
4.9.	Pengujian FTIR (<i>Fourier Transform Infrared</i>).....	93
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		97
5.1.	Kesimpulan	97
5.2.	Saran	98
DAFTAR PUSTAKA		99
LAMPIRAN.....		103



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Desain isolator polimer	7
Gambar 2 Sketsa fleksibilitas struktur rantai polimer SIR	8
Gambar 3 Karakteristik hidrofobik pada isolator polimer	16
Gambar 4 Pemulihan (<i>recovery</i>) dan <i>transfer</i> hidrofobik.....	17
Gambar 5 Sifat hidrofobik elastomer di bawah penuaan iklim tropis alamiah.....	18
Gambar 6 Efek bahan pengisi pada difusi MMRR ke lapisan polusi	20
Gambar 7 Ikatan berulang dari <i>silicone rubber (Polydimethyl Siloxane)</i>	21
Gambar 8 Pembentukan sudut kontak antara butir air dan permukaan isolator...26	26
Gambar 9 Medan elektrik dalam dielektrik	28
Gambar 10 Grafik penyebab tegangan tembus	28
Gambar 11 Grafik tegangan terhadap waktu pengujian.....	31
Gambar 12 Grafik pengujian merusak	32
Gambar 13 Diagram alir pembuatan sampel.....	47
Gambar 14 Pengambilan data sudut kontak.....	48
Gambar 15 Chamber pengujian iklim tropis buatan	52
Gambar 16 Digram alur penelitian.....	55
Gambar 17 Grafik berat harian ES-NSiAT	60
Gambar 18 Persentase penyerapan material ES-NSiAT	62
Gambar 19 Grafik sudut kontak ES-NSiAT	66
Gambar 20 Grafik permitivitas relatif ES-NSiAT	72
Gambar 21 Grafik resistivitas permukaan material ES-NSiAT.....	77
Gambar 22 Grafik resistivitas <i>volume</i> ES-NSiAT	83
Gambar 23 Grafik tegangan tembus ES-NSiAT sebelum <i>aging</i>	85
Gambar 24 Grafik tegangan tembus ES-NSiAT sesudah <i>aging</i>	87
Gambar 25 Grafik perbandingan tegangan tembus ES-NSiAT	88
Gambar 26 Grafik <i>partial discharge</i> material ES-NSiAT sebelum <i>aging</i>	91
Gambar 27 Grafik <i>partial discharge</i> ES-NSiAT sesudah <i>aging</i>	92
Gambar 28 Grafik perbandingan <i>partial discharge</i> PD <i>value</i> (pC).....	93
Gambar 29 Grafik pengujian FTIR material ES-NSiAT	94



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Sifat isolator polimer SIR	9
Tabel 2 IEC 60479 electrical protection of person	24
Tabel 3 Bahan penelitian.....	40
Tabel 4 Alat penelitian.....	42
Tabel 5 Komposisi bahan sampel uji	45
Tabel 6 Ukuran dan sumber <i>filler</i>	45
Tabel 7 Siklus penuaan material uji	53
Tabel 8 Data luas dan ketebalan material uji	58
Tabel 9 Data berat harian material ES-NSiAT	58
Tabel 10 Persentase penyerapan berat harian material ES-NSiAT	61
Tabel 11 Data sudut kontak material ES-NSiAT.....	64
Tabel 12 Nilai kapasitansi material ES-NSiAT	68
Tabel 13 Data nilai permitivitas ES-NSiAT	70
Tabel 14 Nilai resistansi permukaan ES-NSiAT	73
Tabel 15 Data resistivitas permukaan ES-NSiAT.....	75
Tabel 16 Nilai resistansi <i>volume</i> ES-NSiAT	79
Tabel 17 Data resistivitas <i>volume</i> material ES-NSiAT.....	81
Tabel 18 Data tegangan tembus sebelum perlakuan (<i>aging</i>).....	85
Tabel 19 Data tegangan tembus sesudah perlakuan (<i>aging</i>).....	86
Tabel 20 Perbandingan tegangan tembus sebelum dan sesudah <i>aging</i> material ES-NSiAT	88
Tabel 21 Hasil pengujian <i>partial discharge</i> sebelum <i>aging</i>	90
Tabel 22 Hasil pengujian <i>partial discharge</i> sesudah <i>aging</i>	91
Tabel 23 Perbandingan <i>partial discharge</i> PD value (pC).....	92
Tabel 24 Perbandingan data persentase transmitansi material ES-NSiAT	95



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel pengujian material ES0-NSiAT 0% <i>filler</i>	103
Lampiran 2 Tabel pengujian material ES1-NSiAT 5% <i>filler</i>	104
Lampiran 3 Tabel pengujian material ES2-NSiAT 10% <i>filler</i>	105
Lampiran 4 Tabel pengujian material ES3-NSiAT 15% <i>filler</i>	106
Lampiran 5 Tabel pengujian material ES4-NSiAT 20% <i>filler</i>	107
Lampiran 6 Pengujian tegangan tembus material ES-NSiAT	108
Lampiran 7 Pengujian partial discharge material ES-NSiAT	109
Lampiran 8 Hasil pengujian FTIR material ES-NSiAT	110
Lampiran 9 Pengukuran berat material ES-NSiAT	115
Lampiran 10 Pengukuran kapasitansi material ES-NSiAT	115
Lampiran 11 Pengukuran resistansi material ES-NSiAT	116
Lampiran 12 Pengukuran sudut kontak material ES-NSiAT	117



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Isolator merupakan salah satu komponen listrik dari bahan dielektrik yang berperan penting dalam pendistribusian energi listrik. Isolator digunakan sebagai pemisah antara bagian aktif dan tidak aktif dan sebagai pendukung untuk kabel atau konduktor sehingga tidak terjadi fenomena bunga api (*flashover*) atau percikan api (*sparkover*) yang mengakibatkan terjadi kebocoran arus. Isolator tegangan menengah, tegangan tinggi, dan tegangan ekstra yang umum digunakan saat ini adalah isolator keramik dan isolator kaca. Isolator jenis ini bersifat rapat (*density*) yang tinggi, panjang, rapuh atau mudah pecah dan cenderung meningkatkan rugi-rugi yang besar, sehingga tidak lagi menguntungkan penggunaannya. Berbagai penelitian juga 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. Dalam beberapa tahun belakangan ini banyak dikembangkan jenis isolator yang baru yaitu isolator polimer.

Isolator Polimer merupakan isolasi dari bahan dielektrik yang mempunyai keunggulan dibanding dengan bahan keramik atau bahan gelas, bahan isolasi polimer memiliki keuntungan antara lain : sifat dielektrik, resistivitas *volume* dan sifat termal lebih baik, konstruksi relatif lebih ringan (rapat massa rendah), kedap air (hidrofobik), ketahanan kimia yang baik, ketahanan yang tinggi terhadap asam, serta proses pembuatan tidak memerlukan suhu yang tinggi dan relatif lebih cepat. Sedangkan kekurangannya antara lain bahan isolator polimer kurang tahan terhadap perubahan cuaca sehingga akan menyebabkan kekuatan mekanis menurun dan kerusakan fisik isolator (Hamzah Berahim,2005).

Di samping isolator polimer memiliki banyak keunggulan, Bahan polimer rentan terhadap iklim (Temperatur/suhu, Sinar UV, kelembaban), polusi, medan listrik tinggi sehingga dapat menyebabkan penuaan (*aging*). Pengaruh medan yang tinggi dapat menyebabkan erosi permukaan isolator polimer. Medan tekanan parsial antara Bahan dan atmosfer memungkinkan uap air



menembus polimer. Jumlah air yang diserap dan kecepatan difusi tergantung pada beberapa faktor dalam bahan itu sendiri, begitu juga kelembaban udara luar dan suhu sekitarnya. Sebuah fenomena. Beberapa peneliti menyebutnya efek polarisasi antar muka makroskopik yang menurunkan sifat dielektrik dan listrik isolator (Kaerner, 1995).

Untuk mengatasi masalah tersebut beberapa peneliti seperti Muhammad Tariq Nazir dkk (2018) meneliti mengenai penambahan bahan pengisi / *filler* partikel nano silika (SiO_2) ke *Silicone rubber* dapat meningkatkan ketahanan terhadap paparan sinar *ultraviolet* (UV) yang dimana dapat membuat lapisan pelindung sinar *ultraviolet* (UV) yang baik dan efektif. Pada penelitian Salama dkk (2023) juga menjelaskan penambahan bahan pengisi ATH juga dapat membantu material elastomer *silicone rubber* untuk meningkatkan nilai resistansi terhadap arus bocor dan erosi. Penambahan bahan pengisi nanopartikel *Alumina Trihydrate* (ATH) terhadap elastomer *silicone rubber* (SR) dapat meningkatkan nilai signifikan dalam hal sifat dielektrik, mekanis dan termal elastomer *silicone rubber*.

Negara Indonesia yang mempunyai wilayah luas yang terbentang sepanjang khatulistiwa terdiri dari dua pertiga lautan. Sebagian besar penduduk wilayah Indonesia, tinggal di dataran rendah dan pesisir. Wilayah ini memiliki iklim tropis dengan faktor iklim (kelembaban udara, intensitas radiasi sinar *ultraviolet*) yang berasal dari matahari. Yaitu, sinar matahari jam 12 jam, suhu antara $19,2-37^\circ\text{C}$, kelembaban relatif di sekitar 70-86,9% dan curah hujan sangat tinggi pada 1877,10 mm (BPS, 2015).

Kondisi iklim, polusi, dan paparan medan listrik menyebabkan degradasi dan penuaan isolator berikutnya. Saat proses penuaan terjadi, ketahanan air menurun dan lapisan kontaminan terbentuk di permukaan isolator. Lapisan kontaminan membuat permukaan isolator konduktif. Karena konduktivitas ini, pita kering (*dry band*) mulai muncul di permukaan isolator. Adanya pita kering menyebabkan arus bocor mengalir ke permukaan isolator sehingga menyebabkan a ini dan memperpendek umur isolator (Anisa Kusumaningrum, 2017).

Berdasarkan pembahasan diatas maka penulis akan mengangkat judul 1 yaitu “**Simulasi Dan Analisis Kinerja Material Isolasi Elastomer**



Silicone Dengan Filler Silika Dan ATH Pada Tiruan Iklim Tropis Dan Medan Listrik". Dengan pengujian pengukuran permitivitas relatif, resistivitas permukaan dan resistivitas *volume* untuk melihat sifat dielektrik dan pengukuran perubahan berat (penyerapan air) serta sudut kontak untuk melihat sifat Hidrofobik material Elastomer *Silicone* pada keadaan awal dan setelah diberikan perlakuan. Perlakuan (*aging*) yang dimaksud di sini ialah tiruan iklim tropis yang di mana terdapat elemen kelembaban, suhu/temperatur, sinar uv dan medan listrik yang diberikan di dalam perlakuan tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh karakteristik sifat dielektrik material isolasi elastomer silikon pada tiruan iklim tropis dan medan listrik?
2. Bagaimana pengaruh karakteristik sifat Hidrofobik material isolasi elastomer silikon pada tiruan iklim tropis dan medan listrik?
3. Bagaimana pengaruh besar komposisi campuran *filler* terhadap kinerja isolasi elastomer silikon?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui pengaruh karakteristik sifat dielektrik elastomer silikon pada tiruan iklim tropis dan medan listrik.
2. Untuk mengetahui pengaruh karakteristik sifat hidrofobik elastomer silikon pada tiruan iklim tropis dan medan listrik.
2. Untuk mengetahui pengaruh besar komposisi campuran *filler* terhadap kinerja material isolasi elastomer silikon.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian kali ini, diantaranya adalah sebagai berikut :

Sebagai bahan tinjauan data primer untuk PT. PLN dalam memilih olator yang akan digunakan yang akan datang.



2. Memberikan informasi mengenai kinerja isolasi material elastomer silikon dengan campuran *filler* SiO₂ dan ATH.
3. Memperoleh pengalaman bagi penulis yang diharapkan dapat berguna untuk di dunia kerja.
4. Sebagai bahan acuan dan referensi bagi penelitian-penelitian berikutnya.

1.5 Batasan Masalah

1. Bahan pengisi / *filler* yang digunakan adalah gabungan SiO₂ dan ATH.
2. Material uji yang digunakan adalah Sample isolasi Elastomer Silikon *Rubber* dengan campuran *filler* SiO₂ dan ATH yang komposisinya ialah, 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%.
3. Ketebalan dan luas sampel uji
4. Berfokus pada mengetahui sifat dielektrik (Resistivitas *volume*, Resistivitas permukaan, Permittivitas Relatif) dan hidrofobik (Sudut kontak dan Perubahan Berat) material uji dengan diberikan 4 faktor pembebanan pada perlakuan tiruan iklim tropis dan medan listrik diantaranya, suhu/temperatur, kelembaban, radiasi *ultraviolet* (UV), dan medan listrik.
5. Data penunjang penelitian hanya berfokus pada pengujian Tegangan tembus, *Partial Discharge*, dan *FTiR-Test*.
6. Perlakuan pada tiruan iklim tropis dilakukan dengan memantau 24jam untuk 1 siklus. 12 jam untuk keadaan siang hari dan 12 jam untuk keadaan malam hari.
7. Pengukuran tiap siklus nya untuk mencari perubahan berat, resistansi permukaan, resistansi *volume*, permitivitas dan sudut kontak material uji yang telah diberikan perlakuan tiruan iklim tropis dan medan listrik.
8. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Isolator

Isolator, juga disebut insulator adalah bahan yang tidak menghantarkan listrik. Bahan yang mengandung isolator antara lain kertas, plastik, karet, kaca, dan udara. Sebagian besar pentingnya konduktor listrik ditutupi oleh bahan isolasi. Dengan demikian konstruksi harus sangat diperhatikan dan bahan isolasi haruslah mempunyai kekuatan dielektrik yang baik sehingga sifat hantaran nya dapat dikurangi (Bonggas L Tobing, 2003).

Isolasi adalah sifat bahan yang berfungsi dapat memisahkan secara elektris dua atau lebih penghantar listrik bertegangan yang berdekatan, sehingga tidak terjadi kebocoran arus, tidak terjadi lompatan api atau lewat denyar (*flashover*), atau pun percikan api (*sparkover*). Sedangkan isolator adalah alat yang dipakai untuk mengisolasi. Kemampuan bahan isolasi untuk menahan tegangan disebut kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik dari bahan isolasi sangat penting dalam hal menentukan kualitas isolator yang nantinya akan mendukung keseluruhan sistem tenaga listrik. Semakin tinggi kekuatan dielektrik bahan isolasi semakin baik dipakai, terutama pada peralatan listrik tegangan tinggi (M.Toni Prasetyo, 2012).

Isolator dalam sistem tenaga listrik difungsikan sebagai penyangga kawat saluran udara dan sebagai bahan yang memisahkan antar pengantar. Isolator dalam pemakaiannya mengalami penuaan yang diakibatkan oleh pengaruh alam sekitar seperti adanya perubahan suhu, iklim radiasi sinar *ultraviolet* dan lain sebagainya. Keadaan ini menyebabkan menurunnya tingkat dielektrik isolator yang kemudian akan menimbulkan adanya gejala tegangan lewat denyar, yaitu peristiwa pelepasan / loncatan bunga api listrik yang terjadi pada suatu bagian isolasi (pada rongga dalam atau pada permukaan) sebagai akibat adanya beda potensial yang tinggi dalam isolasi tersebut dan terjadinya gejala arus bocor (Aris Kurniawan, dkk, 2017).



Menurut Dissado & Fothergill (1992), Isolator adalah bahan yang tidak bisa melakukan perpindahan muatan listrik. Dalam bahan isolator valensi elektronnya terikat kuat pada atom-atomnya. Bahan ini dipergunakan dalam alat-

alat elektronika sebagai isolator, atau penghambat mengalir nya arus listrik. Isolator berguna juga sebagai penopang beban atau pemisah antara konduktor tanpa membuat adanya arus mengalir keluar atau antara konduktor. Istilah ini juga dipergunakan untuk menamai alat yang digunakan untuk menyangga kabel transmisi listrik pada tiang listrik. Sedangkan menurut Amelya Indah Pratiwi (2013), Isolator adalah media penyekat antara bagian yang bertegangan dengan yang tidak bertegangan atau *ground* secara elektrik dan mekanik. Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi & Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi, isolator berfungsi untuk mengisolir kawat fasa dengan *tower / ground*.

2.2 Karakteristik Isolator

Karakteristik isolator secara umum dapat ditinjau dari dua segi yaitu, segi elektrik dan segi mekanis. Pada segi elektrik isolator berfungsi untuk mengisolir konduktor bertegangan dan kerangka penyangga yang dikebumikan agar tidak muncul arus listrik yang melewati rangka penyangga. Namun ada dua hal yang dapat menyebabkan sistem isolasi tersebut gagal melaksanakan fungsinya tersebut. Kegagalan elektrik pada isolator dipengaruhi oleh kelembaban dan polusi udara (Suyanto, 2010)

2.3 Isolator Polimer

Penggunaan bahan polimer untuk isolator relatif baru. Telah digunakan lebih dalam beberapa dekade terakhir sebagai pengganti isolator porselen dan isolator kaca. Hal ini karena isolator polimer memiliki beberapa keunggulan dibandingkan porselen dan kaca, antara lain: (Chezia, 2021)

1. Memiliki sifat hidrofobik yang baik.
2. Memiliki massa jenis yang lebih rendah dibandingkan isolator berbahan porselin dan gelas.
3. Memiliki sifat dielektrik dan termal yang lebih tinggi.

Tahan terhadap polusi sehingga kotoran sukar menempel pada permukaan.

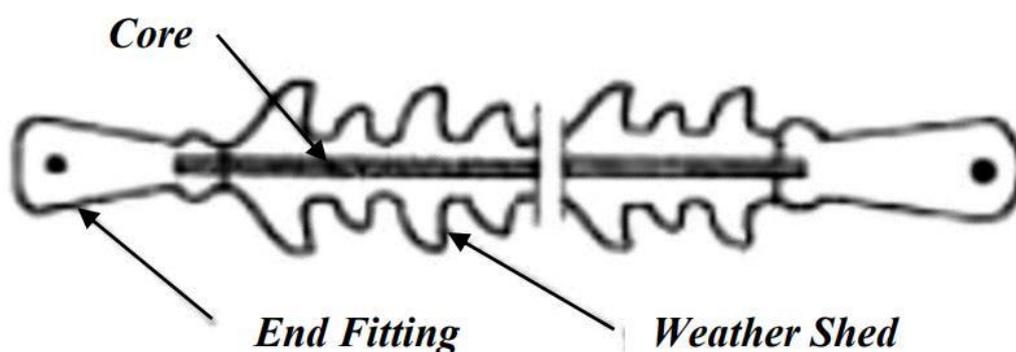


5. Tidak terdapat lubang karena bahan yang digunakan sangat rapat.

Adapun kekurangan yang dimiliki isolator polimer adalah :

- a. Ketidakcocokan bahan antarmuka yang digunakan dapat menimbulkan korosi atau keretakan.
- b. Rentan terhadap perubahan cuaca yang ekstrem.
- c. Penuaan/degradasi pada permukaan dan stress yang disebabkan oleh korona, radiasi UV, atau zat kimia dapat mengakibatkan reaksi kimia pada permukaan isolator polimer. Sehingga dapat mempercepat penuaan yang dapat menghilangkan sifat hidrofobiknya.

Pada Gambar 1 di bawah ini memperlihatkan komponen dasar isolator polimer yang terdiri dari *core* (inti), *weathersheds* (pembungkus) dan *fitting* yang terbuat dari logam dan kedua ujungnya dihubungkan dengan core.



Gambar 1 Desain isolator polimer

(Sumber: Chezia, 2021)

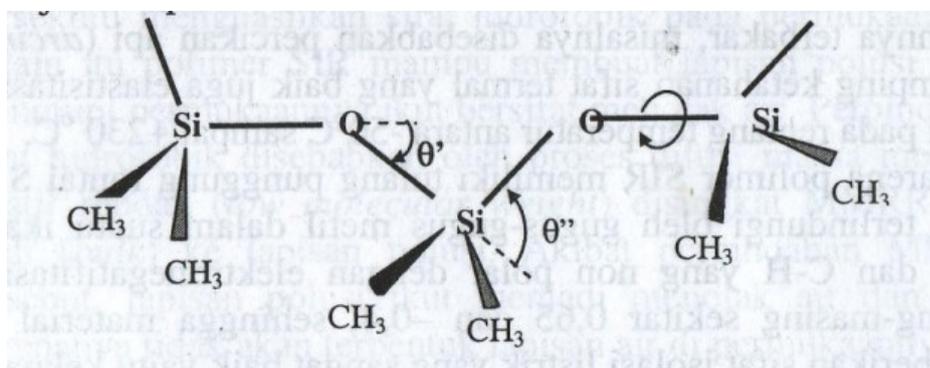
Fitting pada sebuah isolator polimer dirancang untuk mampu menahan beban yang berasal dari isolator. Sebuah *fitting* terbuat dari bahan logam tuang atau tempaan antara lain aluminium, tembaga dan baja. *Fitting* pada isolator polimer berguna sebagai pemegang dari inti, di mana pada desainnya inti diletakkan pada posisi terjepit di dalam *fitting*. Inti (*core*) pada isolator polimer berguna untuk memperkuat atau menambah kekuatan mekanik dari isolator polimer. Inti (*core*)

ari bahan *fiberglass*, yang kemudian dibungkus shed (Kusmaningrum,



2.3.1 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.



Gambar 2 Sketsa fleksibilitas struktur rantai polimer SIR

(Sumber: Mustamin,2011)

Ikatan Si-O memiliki panjang sekitar $1,6 \text{ \AA}$ 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 (Mustamin,2011).

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 Si-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 C (348 kJ/mol) pada tulang punggung ikatan polimer etilen.



kuatnya ikatan Si-O memberikan ketahanan yang tinggi dari kerusakan atau runtuhan 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*). Di samping ketahanan sifat termal yang baik juga elastisitas nya stabil pada rentang temperatur antara -50°C sampai +230°C. Polimer SIR memiliki tulang punggung rantai Si-O yang ter-lindungi 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 $\epsilon \approx 2 - 4$ dan faktor disipasi $\tan \delta = 3 - 5 \cdot 10^{-3}$.

Tabel 1 Sifat isolator polimer SIR

Property	Typical Range
Hydrophobicity (contact 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
<i>volume</i> Resistivity	10 ¹⁵ Ohm.cm
Surface resistivity	10 ¹³ Ohm
Dielectric strength (Ed)	20-25 kV/mm

Sumber: Mustamin (2011)

2.3.2 Karakteristik dan Sifat Bahan Isolator Polimer

2.3.2.1 Karakteristik Listrik Polimer

Karakteristik listrik suatu material dapat ditentukan dengan memperhatikan besaran listrik yang patut diketahui seperti:



kekuatan hancur dielektrik/bahan isolasi (kekuatan terhadap medan listrik)
tegangan listrik maksimum yang dapat ditahan suatu isolator tanpa
sifat isolasi nya dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$E = \frac{Vbd}{h} \quad (1)$$

Dengan

E = kekuatan hancur dielektrik

Vbd = Tegangan tembus dielektrik

h = ketebalatan dielektrik

2. Tahanan Isolasi

Terdiri dari tahanan jenis dan tahanan *volume* baik untuk saluran panjang maupun untuk permukaan. Tahanan jenis dan tahanan *volume* dapat diperoleh melalui persamaan:

$$\rho = \frac{(R.A)}{h} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

Dengan

ρ = Tahanan jenis

γ = Tahanan *volume*

R = Tahanan

A = Luas Permukaan

h = Panjang

Sedangkan tahanan jenis ρ_s dan tahanan *volume* γ_s permukaan dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot d}{h} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho_s}$$



Dengan;

R_s = Tahanan permukaan

d = jarak permukaan

h = panjang

2.3.2.2 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 mengaplikasikan 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 di operasi kan di luar di daerah Ukraine (Russia) selama dua sampai lima tahun. Di mana hanya isolator polimer SIR yang masih memperlihatkan sifat hidrofobik dengan sudut kontak 29° yang tinggi 116°, bahkan terlihat kenaikan sudut kontak setelah di operasikan 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) (Mustamin,2011).

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 esar EPDM adalah 85C. Isolator berbahan polimer SIR sukses diterapkan ain saluran transmisi dan distribusi sebagai pemisah antar fasa sehingga transmisi semakin kompak dengan biaya yang lebih murah karena isolator sangat ringan. Untuk meningkatkan kapasitas daya transmisi di Jerman,



sejak tahun 1995 sebagian saluran transmisi di upgrade 30 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.

2.3.2.3 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 ke dalam 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 di kondisi kan dengan kondisi alamiah dengan kelembaban suhu 50-70°C, UV 400 mm dan medan listrik 2,5 kV/cm. Hasil pengujian akan bahwa polimer SIR kurang 28 menyerap air. Absorpsi air juga g dari level dosis bahan pengisi, makin tinggi dosis bahan pengisi makin



kuat menyerap air. Nilai konstanta dielektrik (ϵ_r) dan faktor dispasi ($\tan \delta$) cenderung mengikuti pola kurva absorpsi air. Ini membuktikan efek dari air yang di absorpsi pada sifat dielektrik dengan dosis bahan pengisi yang tinggi meningkatkan nilai konstanta dielektrik dan faktor dispasi ($\tan \delta$). Hal ini akibat dari *polarisasi interfacial* di dalam material isolasi.

2.3.2.4 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 (CH_3) yang hidrofobik (Kinderberger 1989, Kim 1992). Adanya gugus-gugus metil yang berotasi bebas dan polarisabilitas ikatan Si-O, rantai siloksan mampu menyejajarkan sendiri (*align it self*) 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.

Pengujian sifat hidrofobik dimaksudkan untuk melihat sifat permukaan material, bersifat hidrofobik atau hidrofilik. Ada beberapa metode pengukuran hidrofobik telah dikembangkan oleh beberapa peneliti setelah merujuk standar STRI Guide 92/1 dan IEC TS 62073 (2016). Berdasarkan standar internasional IEC TS 62073 (*Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces*) terdapat tiga metode pengukuran hidrofobik dengan akurasi yang berbeda, tingkat kesederhanaan, ukuran dari pengukuran area permukaan dan penggunaannya. Metodenya adalah sebagai berikut (Irfan, 2020):

1. Metode Sudut Kontak (*The Contact Angle Method*)



pengujian dengan metode sudut kontak seperti ini merupakan cara yang a dengan menggunakan alat ukur goniometer yang dipasang pada bingkai rum suntik untuk meneteskan droplet ke permukaan. Kemudian dilakukan

pengambilan gambar menggunakan kamera, di belakang tetesan tadi dipasang proyektor namun tidak menyinari secara langsung, selanjutnya hasil gambar yang diperoleh diolah terlebih dahulu pada komputer atau laptop kemudian diukur sudut yang terbentuk.

Adapun hal yang perlu diperhatikan dalam menggunakan metode ini adalah:

- Spesimen uji harus ditempatkan sedatar mungkin.
- Permukaan yang diukur tidak boleh disentuh saat penetesan, setelahnya dilakukan pengukuran sesegera mungkin.
- Air yang digunakan tidak boleh mengandung kotoran, misalnya, tensida, pelarut, minyak dan lainnya.
- *Volume* tetesan berkisar $5\mu\text{L}$ - $50\mu\text{L}$, disarankan menggunakan $50\mu\text{L}$.

2. Metode Tegangan Permukaan (*The Surface Tension Method*)

Penentuan tegangan permukaan permukaan isolator didasarkan pada fenomena tersebut yang turun dari serangkaian campuran cairan organik, dengan tegangan permukaan yang meningkat secara bertahap, memiliki kemampuan berbeda untuk membasahi permukaan isolator. Setiap jejak kotoran permukaan aktif di pereaksi cair atau di permukaan dapat mempengaruhi hasil. Oleh karena itu, penting bahwa permukaan yang akan diuji tidak boleh disentuh atau digosok, bahwa semua peralatan bersih dan itu kemurnian reagen dikendalikan dengan hati-hati (Irfan, 2020).

Basahi ujung ekstrim aplikator kapas (jika aplikator kapas digunakan) dengan salah satunya campuran pereaksi atau menghapus kuas lembut yang difiksasi ke tutup botol dengan reagen. Gunakan hanya jumlah cairan minimum karena kelebihan reagen dapat mempengaruhi hasilnya.

Prosedur pengukuran yang sama kemudian digunakan dengan salah satu dari tiga aplikator. Sebarkan cairan sedikit di atas area dengan diameter sekitar 5 mm) isolator permukaan di lokasi yang dipilih. Perhatikan waktu yang diperlukan untuk cairan kontinu cakupan terbentuk pada permukaan untuk menjadi tetesan. Jika cakupan cairan terus menerus tahan selama lebih



dari 2 detik, lanjutkan ke campuran tegangan permukaan yang lebih tinggi, tetapi jika terus menerus.

Cakupan cairan pecah menjadi tetesan dalam waktu kurang dari 2 detik berlanjut ke tegangan permukaan yang lebih rendah campuran. Untuk setiap aplikasi campuran reagen baru, permukaan yang berdekatan baru harus dipilih untuk menghindari kontaminasi dari reagen yang diterapkan sebelumnya. Jika pengukuran pada area permukaan yang sama diinginkan dan mungkin tanpa gangguan, permukaan mungkin lembut dibersihkan dengan kain kering (tanpa menggunakan deterjen apapun) untuk menghilangkan reagen yang tersisa diterapkan sebelumnya. Jika pembersihan tidak dilakukan, disarankan untuk memulai dengan yang lebih rendah campuran tegangan permukaan yang lebih tinggi meminimalkan hasil yang salah karena kontaminasi dari campuran reagen yang sebelumnya diterapkan.

Ketika aplikasi kapas digunakan, aplikator yang bersih dan baru harus digunakan setiap waktu untuk menghindari kontaminasi larutan. Jika kuas lembut dimasukkan ke dalam tutup digunakan, sikat dapat dibersihkan dalam *volume* kecil reagen sebelum dimasukkan kembali ke dalam botol reagen lagi.

3. Metode Penyemprotan (*The Spray Method*)

Metode semprot didasarkan pada respons yang diberikan permukaan isolator setelah terpapar kabut air halus untuk waktu yang singkat. Hidrofobik setelah paparan kabut dievaluasi.

Standar *Hydrophobicity Classification* STRI 92/1 dan IEC 62703, dapat dilihat pada Gambar 3 berikut ini:





Gambar 3 Karakteristik hidrofobik pada isolator polimer

(Sumber : Vosloo & Macey, 2002)

Area pengujian sebaiknya sekitar 50 cm² hingga 100 cm². Rasio antara Panjang dan lebar area pengujian tidak boleh lebih besar dari 1:3. Jika persyaratan ini tidak bisa terpenuhi, ini harus dicatat dalam laporan pengukuran. Oleskan kabut dari jarak 20 cm ± 10 cm. Permukaan harus terkena kabut untuk jangka waktu 10 detik hingga 20 detik. Biasanya, itu jumlah air yang disemprotkan selama 10 detik hingga 20 detik harus cukup sehingga untuk air menetes dari Gudang. Pengukuran hidrofobik harus dilakukan di dalam 10 detik setelah penyemprotan selesai.

Teknik ini terdiri dari pembasahan permukaan isolator dengan air kemudian mengambil gambar dengan menggunakan kamera. Selanjutnya dibandingkan dengan gambar standar internasional yang telah dikeluarkan oleh STRI Guide 92/1 dan IEC 62073 seperti pada Gambar 3, dimungkinkan untuk mengidentifikasi model hidrofobik pada permukaan.

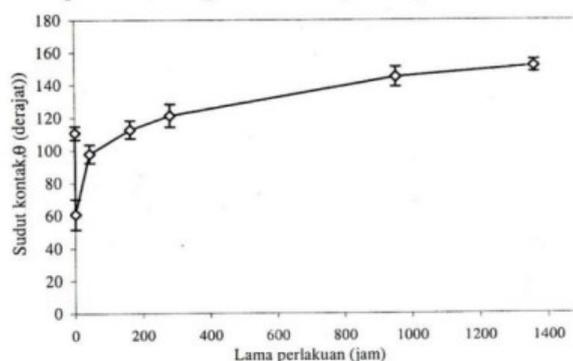
Klasifikasi ini dibuat dalam enam kelas hidrofobitas (HC 1-6) yang dapat dilihat pada Gambar 8, yang merupakan gambar standar internasional yang telah dikeluarkan oleh STRI Guide 92/1 dan IEC 62073. Untuk HC 1 mengidentifikasi sifat sepenuhnya hidrofobik dan HC 6 mengidentifikasi sifat sepenuhnya hidrofilik. (Vosloo & Macey, 2002).



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 di atas permukaannya setebal 0,5 mm. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa saat diberikan polusi pada permukaan polimer SIR, hidrofobik nya 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 ke lapisan polusi. Setelah 150 jam perlakuan, sudut kontak sudah berada 22 pada nilai 113°. Artinya pemindahan sifat hidrofobik secara sempurna kelapisan polusi SiO₂ 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 4



Gambar 4 Pemulihan (*recovery*) dan *transfer* hidrofobik

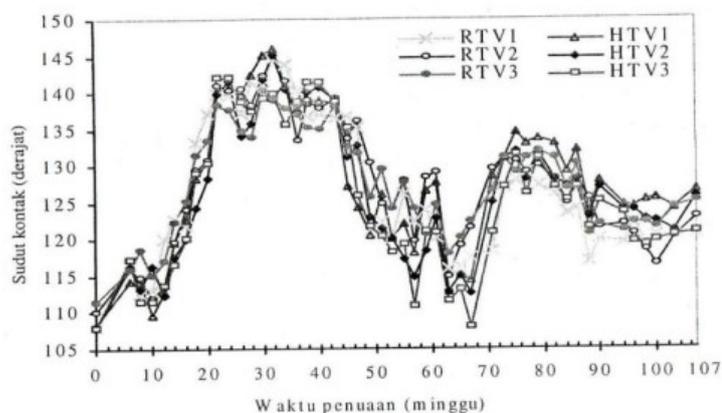
(Sumber: Salama,1999)

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



im tersebut, dilakukan pula suatu pengujian dengan menempatkan sampel-ari polimer SIR yang diberi bahan pengisi dengan dosis yang berbeda-beda se di bawah pengaruh iklim tropis alamiah selama 107 minggu. Hasil

eksperimen tersebut terlihat bahwa semua jenis sampel masih 23 menunjukkan sifat hidrofobik yang tinggi $> 107^\circ$ (sudut kontak masih lebih besar dari sudut kontak di saat masih baru). Ini menunjukkan pengaruh terpaan iklim tropis tidaklah menyebabkan kehilangan sifat hidrofobik material polimer SIR (Salama, 2010).



Gambar 5 Sifat hidrofobik elastomer di bawah penuaan iklim tropis alamiah

(Sumber: Salama,1999)

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 tercuci nya polusi oleh hujan di permukaan 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 ketahanan nya 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.



ukuran sudut kontak tetesan air di permukaan material dengan dosis pengisi bervariasi yang belum mengalami penuaan (*virgin*) tidak sama, tergantung jumlah dosis bahan pengisi yang diberikan. Material uji kelompok RTV

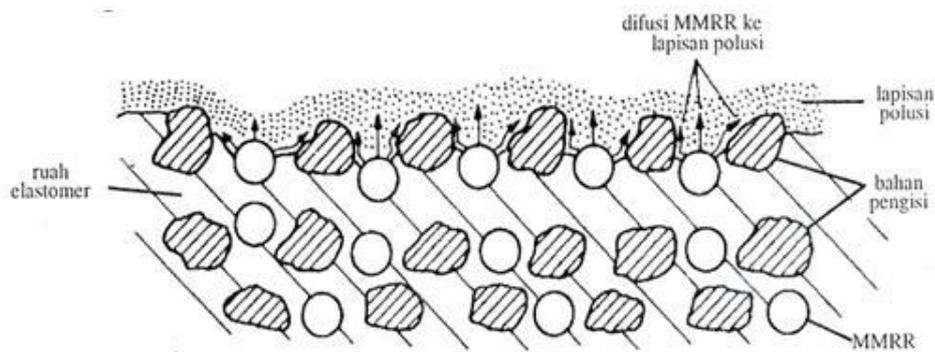
yang berdosis lebih tinggi (29,2%) menghasilkan nilai sudut kontak yang lebih tinggi $111 \pm 1,8^\circ$ dibanding yang berdosis lebih rendah (18%) dengan nilai sudut kontak $108 \pm 2^\circ$. Namun untuk material uji kelompok HTV rujukan (*virgin*) dengan penambahan dosis bahan pengisi yang bervariasi 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 5 berikut ini.





Gambar 6 Efek bahan pengisi pada difusi MMRR ke lapisan polusi

(Sumber: Chaezia,2021)

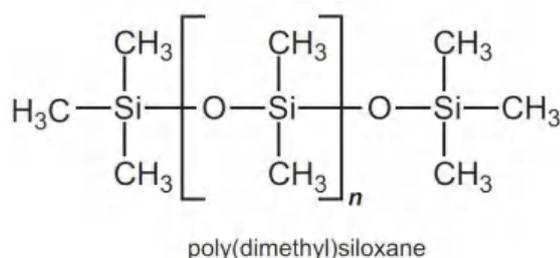
Proses difusi MMRR ke lapisan polusi sangat kecil dipengaruhi oleh radiasi UV. Faktor penyebabnya diperkirakan perbedaan gradien konsentrasi MMRR di dalam ruah (*bulk*) dengan permukaan dan dengan kenaikan temperatur mempercepat reaksi difusi MMRR. Pengaruh temperatur terhadap kecepatan difusi MMRR ke 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-garam 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.



2.4 Silikon Rubber

Silicone rubber adalah elastomer (bahan mirip karet) yang terdiri dari silikon- silikon polimer itu sendiri mengandung karbon, hidrogen, dan oksigen. *silicone* rubber banyak digunakan dalam industri, dan ada beberapa formulasi. Elastomer silikon merupakan polimer sintesis yang masih relatif baru penggunaannya sebagai material isolasi polimer pada isolator listrik tegangan tinggi/ekstra tinggi pasangan luar (*outdoor*) (Salama, 2007) . *Silicone* rubber sering terdiri dari satu atau dua bagian polimer, dan mungkin berisi pengisi (*filler*) untuk meningkatkan sifat atau mengurangi biaya. *silicone* rubber umumnya non-reaktif, stabil, dan tahan terhadap lingkungan yang ekstrem dan suhu dari -55°C sampai 300°C , dengan tetap mempertahankan sifat manfaatnya. Karena sifat-sifat dan kemudahan manufaktur dan pembentukan nya, *silicone* rubber dapat ditemukan dalam berbagai macam produk termasuk isolator tegangan tinggi dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Wahyu Agung, 2022).



Gambar 7 Ikatan berulang dari *silicone rubber* (*Polydimethyl Siloxane*)

(Sumber: Wahyu,2022)

Karet silikon merupakan bahan isolasi yang tahan terhadap suhu tinggi. Secara garis besar karet silikon dibedakan menjadi dua jenis yaitu (Timco & Rubber, 2016):

1. *High Temperatur Vulcanizing* (HTV). Bahan ini dapat digunakan pada suhu 55°C – 200°C , biasanya digunakan untuk isolasi kabel dan bahan isolator tegangan tinggi. Sifat yang dimiliki karet silikon jenis HTV ini adalah tahan terhadap alkohol, garam dan minyak, memiliki tahanan yang baik terhadap ozon, korona dan air.



2. *Room Temperatur Vulcanizing* (RTV). Bahan ini dibuat pada suhu 25⁰C – 80⁰C dan biasanya digunakan untuk melapisi isolator keramik.

2.5 Arus Bocor Permukaan Isolator

Nilai tahanan permukaan isolator dalam keadaan bersih sangat besar. Akan tetapi jika terbentuk lapisan polutan pada permukaan isolator akan menyebabkan turunnya nilai tahanan permukaan. Ketika lapisan polutan mengalami pembasahan, maka tahanan nya pun semakin turun. Penurunan tahanan ini akan memperbesar arus bocor permukaan isolator. Semakin meningkatnya arus bocor akan menimbulkan proses penguapan. Pada daerah yang memiliki rapat arus terbesar akan terbentuk pita kering. Daerah pita kering memiliki tahanan yang lebih besar dibanding dengan daerah lainnya sepanjang lapisan polutan. Keadaan ini memungkinkan terjadinya pelepasan muatan pada daerah pita kering (Piah, Mohamed Afendi bin Mohamed, 2004).

Proses penguapan akibat adanya arus bocor akan menyebabkan naiknya temperatur lapisan. Jika pemanasan oleh arus bocor sudah tidak menyebabkan kenaikan temperatur lagi, maka proses pengeringan telah selesai, dan terbentuklah pita kering pada permukaan isolator tersebut. Jika pita kering yang terbentuk semakin banyak, maka lebar pita kering akan bertambah. Hal ini juga akan memperpanjang busur api. Hal ini berlangsung secara kontinyu sehingga dapat melingkupi permukaan isolator dan akan mengakibatkan terjadinya *flashover* (Piah, et al., 2003).

Setiap jejak kotoran bereaksi aktif cair di permukaan dapat mempengaruhi hasil. Oleh karena itu permukaan yang akan diuji tidak boleh disentuh atau digosok, semua peralatan bersih dan kemurnian reagen dikendalikan dengan hati-hati. Metode ini merupakan perpanjangan dari IEC 60674-2: 1988 spesifikasi untuk film plastik untuk listrik. Metode pengujian yang digunakan untuk menentukan tegangan permukaan film polietilen dan polipropilen. Metode ini kan adopsi jumlah cairan yang lebih besar untuk mencakup rentang permukaan yang lebih luas, yang perlu dilakukan pengukuran pada kedua



isolator hidrofobik dan hidrofilik. Mungkin ada batasan dalam menggunakan metode ini pada permukaan insulator yang tercemar.

Pengukuran tegangan permukaan, memberikan nilai akurat hidrofobik pada area yang diukur asalkan variasi spasial dalam hidrofobik kompatibel dengan area yang diperlukan untuk pengukuran, cukup mudah dilakukan, membutuhkan tindakan pencegahan keamanan tertentu, mungkin sulit digunakan jika permukaan ditutupi dengan lapisan yang melekat secara longgar polusi, dapat dipengaruhi oleh interaksi antara beberapa jenis pencemaran permukaan dan agen pengukur dapat terjadi, dan memerlukan banyak pengukuran jika evaluasi lengkap permukaan isolator dibutuhkan (Wahyu Agung,2022).

Perhitungan Arus Bocor:

$$I_{\text{bocor}} = \frac{V}{R} \quad (4)$$

Keterangan:

I_{bocor} = Arus Bocor (mA)

V = Tegangan (kV)

R = Tahanan Permukaan (Ω)

2.5.1 Standar Nilai Arus Bocor

Nilai arus bocor untuk isolator saat ini belum ditetapkan oleh organisasi standardisasi mana pun. Alasan utamanya adalah isolator selalu dipasang pada ketinggian sehingga kriteria arus bocor isolator lebih didasarkan pada kehandalan operasi sistem tenaga daripada keamanan. Oleh sebab itu, tidak ada batas yang pasti untuk nilai maksimum arus bocor isolator yang diperbolehkan bagi isolator apa saja. Sebagai gantinya, batasan nilai arus bocor yang ada biasanya ditetapkan oleh perusahaan energi listrik dari negara yang bersangkutan. Batas nilai arus bocor tentu bermacam-macam nilainya pada antar negara dan bahkan di negara itu sendiri. Batas ini ditentukan berdasarkan tipe isolator yang digunakan, rating

dan batasan rugi - rugi saluran yang diperbolehkan. Umumnya batas nilai arus bocor atau spike yang diperbolehkan adalah 100 mA, meski pun nilai-nilai yang harus diperhatikan pada kondisi cuaca kering dari beberapa mikro meter hingga 50 mA



dan pada kondisi cuaca hujan arus bocor lonjakan dapat mencapai 50 mA atau lebih tapi tetap dianggap aman.

Mengacu pada IEC 60950-1 "Safety Standard" dimana arus bocor yang diizinkan untuk peralatan sensitif di perangkat kesehatan maksimal 3,5 mA. Berhubungan dengan hal tersebut, apabila arus bocor pada isolator tidak sengaja dikenai oleh manusia pada tiang penghantar dan terjadi tegangan sentuh, maka dapat menimbulkan efek sebagai berikut berdasarkan IEC 60479 "*Electrical Protection Of Person*".

Tabel 2 IEC 60479 electrical protection of person

Batasan	Efek Pada Tubuh
Daerah 1 (0,1 - 0,5 mA)	Jantung tidak terpengaruh sama sekali bahkan dalam jangka waktu lama
Daerah 2 (0,5 - 10 mA)	Jantung bereaksi dan rasa kesemutan muncul di permukaan kulit
(10 mA - 200 mA)	Jantung tahan sampai jangka waktu maksimal 2 detik saja
Daerah 3 (200 - 500 mA)	Jantung merasakan kesengatan kuat dan terasa sakit, jika melewati 0,5 detik termasuk dalam daerah bahaya
Daerah 4 (di atas 500 mA)	Jantung akan rusak dan secara permanen dapat merusak sistem peredaran darah yang berakibat kematian

(Sumber: IEC 60479)

2.6 Pembentukan Sudut Kontak pada Butir Air

Sudut kontak (θ) adalah sudut yang terbentuk antara permukaan isolator dengan air destilasi pada permukaan isolator. Sudut kontak di definisikan sebagai sudut yang terbentuk antara dua garis. Garis pertama merupakan batas antara udara air yang ditetaskan sedangkan garis kedua merupakan batas antara zat cair padat yang ditetesi. Ketika cairan ditetaskan diatas padatan pada udara maka beberapa saat setelah penetesan maka cairan tersebut akan dalam



keadaan se-timbang sehingga terbentuk sebuah sudut yang disebut sebagai sudut kontak.

Hydrophobicity adalah kemampuan sebuah bahan dalam menolak air, bahkan mampu memulihkan (*recovery*) dan memindahkan (*transfer*) sifat hidrofobik nya ke lapisan polutan sehingga polutan tersebut ikut memiliki sifat hidrofobik. Sifat hidrofobik permukaan bahan isolasi dapat dilihat dari besar sudut kontak antara permukaan bahan isolasi yang terkontaminasi bersamaan dengan tetesan air yang mengenai permukaan bahan isolasi tersebut. Pada awal terkontaminasi, sudut kontak bahan isolasi tersebut akan menurun tetapi akan meningkat secara bertahap setelah sifat hidrofobik bahan telah ter-transfer ke permukaan.

Sifat hidrofobik pada suatu permukaan isolator mempengaruhi besar sudut kontak air pada permukaan isolator. Sifat hidrofobik berguna agar permukaan isolator tetap memiliki konduktivitas yang rendah, sehingga nilai arus bocor yang mengalir relatif lebih kecil. Besar sudut kontak yang terbentuk mempengaruhi besar arus bocor dan medan listrik pada permukaan isolator. Hal ini pun mampu menginisiasi penurunan kekuatan elektrik isolator.

Besar sudut kontak air pada suatu permukaan dapat dibagi menjadi tiga macam, yaitu (Yusrizal, 2014):

1. Hampir Tidak Basah (hidrofobik)

Sudut kontak yang terbentuk antara butir air dan permukaan isolator adalah lebih dari 90 derajat dan kurang dari 180 derajat.

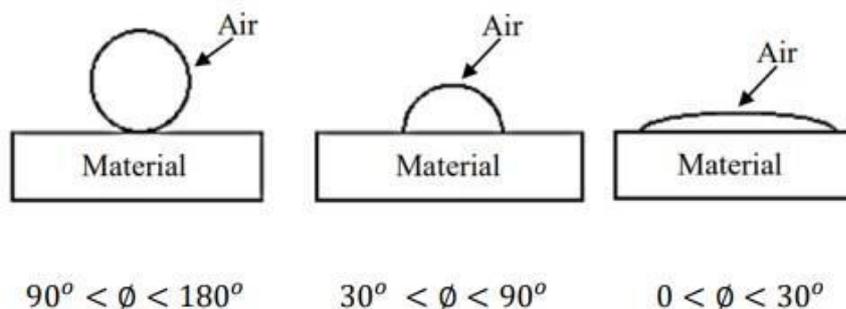
2. Basah Sebagian

Sudut kontak yang terbentuk antara butir air dan permukaan isolator adalah 30 derajat hingga 90 derajat.

3. Basah Keseluruhan (hidrofilik)

Sudut kontak yang terbentuk antara butir air dan permukaan isolator adalah hingga kurang dari 30 derajat





Gambar 8 Pembentukan sudut kontak antara butir air dan permukaan isolator

(Sumber: Chezia,2021)

2.7 Tegangan Tembus

Fenomena ini disebabkan karena adanya faktor luar seperti sambaran petir dan terbentuknya lapisan kontaminan pada permukaan isolator. Lapisan kontaminan tersebut mengakibatkan penurunan tegangan tembusnya. Hal ini diakibatkan kemampuan listrik isolator berkurang. Kegagalan ini mengakibatkan karakteristik isolator tidak dapat kembali pulih seperti semula, dan sebagian isolator mengalami kerusakan mekanik sehingga tidak dapat digunakan kembali.

Atom-atom yang menyusun zat padat terikat kuat satu sama lain. Keistimewaan yang paling menyolok dari kebanyakan zat padat adalah atom-atomnya (atau grup-grup atom) yang tersusun oleh sebuah derajat tinggi dari urutan pola yang berulang-ulang yang teratur dalam tiga dimensi yang disebut kristalin. Zat padat yang atom-atomnya disusun dalam sebuah model yang tidak beraturan disebut non-kristalin atau tak berbentuk. Oleh karena sebagian besar dari sistem pengisolasi komersial adalah zat padat, studi kegagalan dielektrik padat menjadi sangat penting pada studi isolasi (Pesa & Murdiya, 2017).

Penerapan medan elektrik yang tinggi pada material dielektrik padat dapat menyebabkan gerakan pembawa muatan bebas, injeksi muatan dari elektroda-elektroda, penggandaan muatan, formasi ruang muatan dan disipasi energi dalam material. Oleh karena kondisi-kondisi tersebut, yang dapat terjadi secara tunggal berbinasi, maka akhirnya mengacu pada material mengalami kegagalan yang disebut juga *breakdown*. Apabila terpaan elektrik yang dipikul isolasi batas tersebut dan terpaan berlangsung cukup lama, maka dielektrik akan



menghantar arus atau gagal melaksanakan fungsinya sebagai isolator. Dalam hal ini dielektrik disebut tembus listrik atau *breakdown*.

Medan listrik merupakan suatu beban yang menekan dielektrik agar berubah sifat dari isolator menjadi konduktor. Setiap dielektrik mempunyai batas kekuatan untuk memikul terpaan medan listrik.

2.7.1 Mekanisme Tegangan Tembus

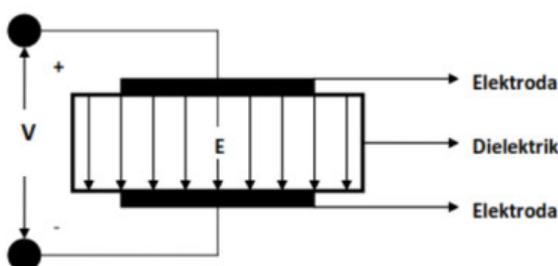
Mekanisme terjadinya tegangan tembus listrik bermula dari bahan dielektrik. Suatu dielektrik tidak mempunyai elektron-elektron bebas, melainkan elektro-elektron yang terikat pada inti atom unsur yang membentuk dielektrik tersebut. Setiap dielektrik mempunyai batas kekuatan untuk memikul terpaan elektrik. Pada Gambar 9 ditunjukkan suatu bahan dielektrik yang ditempatkan di antara dua elektroda piring sejajar. Bila elektroda diberi tegangan searah V , maka timbul medan listrik (E) di dalam dielektrik. Medan elektrik ini memberi gaya kepada elektron-elektron agar terlepas dari ikatannya dan menjadi elektron bebas. Dengan kata lain, medan listrik merupakan suatu beban yang menekan dielektrik agar berubah sifat menjadi konduktor. Jika terpaan elektrik yang dipikulnya melebihi batas tersebut dan terpaan berlangsung cukup lama, maka dielektrik akan menghantar arus atau gagal melaksanakan fungsinya sebagai isolator. Dalam hal ini dielektrik disebut tembus listrik atau *breakdown*. Terpaan elektrik tertinggi yang dapat dipikul suatu dielektrik tanpa menimbulkan dielektrik tembus listrik disebut kekuatan dielektrik. Jika suatu dielektrik mempunyai kekuatan dielektrik E_k , maka terpaan elektrik yang dapat dipikulnya adalah $\leq E_k$.

Jika terpaan elektrik yang dipikul elektrik melebihi E_k , maka di dalam dielektrik akan terjadi proses ionisasi berantai yang akhirnya dapat membuat dielektrik mengalami tembus listrik. Proses ini membutuhkan waktu dan lamanya tidak tentu tetapi bersifat statistik. arus listrik pendek yang mengalir dalam saluran gas ter ionisasi dapat menimbulkan percikan api. Saluran tersebut terbentuk dari berantai elektron yang ter akselerasi pada medan listrik di mana molekul gas ter ionisasi. Sebagai akibat ionisasi, 2 elektron tetap bebas yang pada a ter akselerasi oleh medan listrik dan atom baru kembali mengalami ionisasi. Waktu yang dibutuhkan sejak mulai terjadi



ionisasi sampai terjadi tembus listrik disebut waktu tunda tembus (*time lag*). Jadi tidak selamanya terpaan elektrik dapat menimbulkan tembus listrik, tetapi ada dua syarat yang harus dipenuhi, yaitu (Chezia, 2021) :

1. Terpaan elektrik yang dipikul dielektrik harus lebih besar atau sama dengan kekuatan dielektrik nya.
2. Lama terpaan elektrik berlangsung lebih besar atau sama dengan waktu tunda tembus.

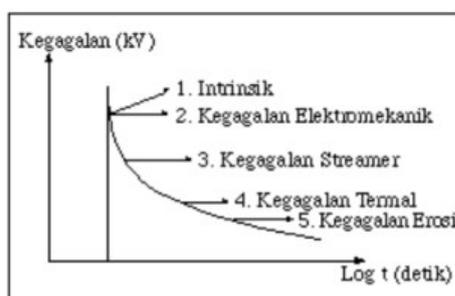


Gambar 9 Medan elektrik dalam dielektrik

(Sumber: Chezia,2021)

2.7.2 Faktor Penyebab Tegangan Tembus

Penyebab terjadinya tegangan tembus terdiri dari beberapa jenis menurut waktu penerapan tegangan nya terdapat pada gambar berikut :



Gambar 10 Grafik penyebab tegangan tembus

(Sumber: Abraham,2017)

Dari Gambar 10 dapat dilihat bahwa semakin tinggi tegangan keagalannya maka semakin singkat waktu terjadinya kegagalan tersebut. Hal ini sesuai dengan asas yang berlaku dalam bidang tegangan tinggi. Seperti diketahui setiap zat terdiri dari molekul-molekul. Setiap molekul terdiri dari atom-atom, yang terdiri dari elektron-elektron. Jika pada zat padat tersebut diterapkan suatu



medan listrik E , maka zat padat tersebut akan mengalami tekanan listrik (*electric stress*). Adapun faktor-faktor penyebab tegangan tembus antara lain (Arismunandar, 1983) :

1. Kegagalan Intrinsik (Asasi)

Kegagalan intrinsik atau kegagalan asasi adalah kegagalan yang berasal dari atau disebabkan oleh jenis dan suhu bahan, dengan menghilangkan pengaruh faktor-faktor luar, seperti tekanan, bahan elektroda, ketidakmurnian, kantong-kantong udara. Kegagalan intrinsik terjadi jika tegangan yang diterapkan pada bahan dinaikkan sehingga tekanan listriknya mencapai nilai tertentu, yaitu 106 volt/cm dalam waktu yang sangat singkat, yaitu 10^{-8} detik. Karena waktu gagal yang sangat singkat, maka jenis kegagalan ini disebut kegagalan elektronik. Kegagalan intrinsik merupakan bentuk kegagalan yang paling sederhana. Beberapa pendekatan telah dilakukan untuk meramalkan nilai kritis medan yang menyebabkan terjadinya kegagalan asasi, tetapi hingga kini belum diperoleh penyelesaian yang memuaskan.

2. Kegagalan Elektromekanik

Terjadinya kegagalan elektromekanik disebabkan oleh adanya perbedaan polaritas antara elektroda yang mengapit zat isolasi padat. Jika pada zat padat yang terletak di antara dua elektroda pelat diberikan tegangan dengan polaritas yang berbeda, maka akan timbul tekanan listrik pada bahan tersebut. Tekanan listrik yang terjadi akan menyebabkan timbulnya tekanan mekanis. Tekanan mekanis terjadi akibat gaya tarik-menarik F antar kedua elektroda tersebut. Untuk tekanan listrik sebesar 106 volt/cm akan dihasilkan tekanan mekanis sebesar 2-6 kg/cm².

3. Kegagalan Streamer

Dalam keadaan tertentu yang terkendali, dan dalam medan yang benar-benar seragam dengan elektroda-elektroda yang terbenam dalam zat padat (yang diuji), kegagalan dapat terjadi sesudah satu banjiran (*avalanche*). Sebuah elektron nasuki ban hantaran (*band conduction*) di katoda akan bergerak menuju ke anoda. Di bawah pengaruh medan memperoleh energi antara benturan dan memperoleh energi pada waktu membentur. Jika lintasan bebas cukup panjang maka



tambahan energi yang diperoleh melebihi pengionisasi kisi (*latice*). Akibatnya dihasilkan tambahan elektron pada saat terjadi benturan. Jika suatu tegangan V dikenakan terhadap elektroda bola, maka pada media yang berdekatan (gas atau udara) timbul tegangan. Karena gas mempunyai permitivitas lebih rendah dari zat padat sehingga gas akan mengalami tekanan listrik yang besar. Akibatnya gas tersebut akan mengalami kegagalan sebelum zat padat mencapai kekuatannya. Karena kegagalan tersebut maka akan jatuh sebuah muatan pada permukaan zat padat sehingga medan yang tadinya seragam akan terganggu. Bentuk muatan pada ujung pelepasan ini dalam keadaan tertentu dapat menimbulkan medan lokal yang cukup tinggi (sekitar 10 MV/cm). Karena medan ini melebihi kekuatan intrinsik maka akan terjadi kegagalan pada zat padat. Proses kegagalan ini terjadi sedikit demi sedikit yang dapat menyebabkan kegagalan total.

4. Kegagalan Termal

Bila suatu medan diterapkan dalam suatu zat padat pada suhu normal, maka arus konduksi yang terjadi dalam bahan pada umumnya kecil. Dalam hal ini tidak akan terjadi apa-apa dalam zat padatnya, walaupun E sudah cukup besar. Panas yang dibangkitkan oleh arus sebagian akan disalurkan keluar, dan sebagian akan digunakan untuk menaikkan suhu bahan. Tetapi, jika kecepatan pembangkitan panas di suatu titik dalam bahan melebihi laju pembuangan panas keluar, maka akan terjadi keadaan tidak stabil dan pada suatu saat bahan akan mengalami kegagalan. Kegagalan ini disebut kegagalan termal.

5. Kegagalan Erosi

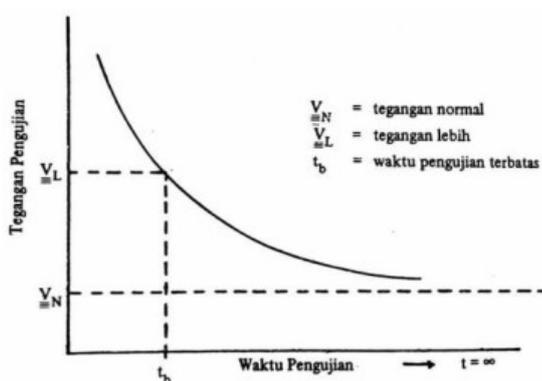
Terjadi kegagalan erosi disebabkan oleh keadaan zat isolasi padat yang tidak sempurna. Ketidaktersempurnaan tersebut misalnya, berupa lubang-lubang atau rongga-rongga dalam bahan isolasi tersebut, sehingga akan terisi oleh gas atau cairan yang kekuatannya lebih rendah daripada di dalam zat padat. Di samping itu, konstanta dielektrik di dalam rongga sering lebih rendah dari pada dalam zat padat, sehingga intensitas medan dalam rongga lebih besar dari pada di dalam zat padat. Oleh karena itu, mungkin saja akan terjadi tegangan tinggi di dalam rongga tersebut, meski pun pada waktu itu diterapkan tegangan normal pada zat padat.



2.8 Pengujian Tegangan Tinggi

Pengujian tegangan tinggi pada umumnya diperlukan untuk mengetahui apakah peralatan tegangan tinggi yang diuji masih memenuhi standar kualitas dan kebutuhan yang di spesifikasikan pada peralatan tersebut. Lingkup studi teknik tegangan tinggi mencakup semua masalah seperti studi tentang korona, teknik isolasi, tegangan lebih pada sistem tenaga listrik, proteksi tegangan lebih, dll. Dengan begitu banyaknya masalah yang mencakup tegangan tinggi, maka dibutuhkan lah pengujian tegangan tinggi dengan maksud sebagai berikut (Abraham, 2017):

1. Menemukan bahan yang kualitas nya tidak baik atau kesalahan pada pembuatan.



Gambar 11 Grafik tegangan terhadap waktu pengujian

(Sumber: Abraham,2017)

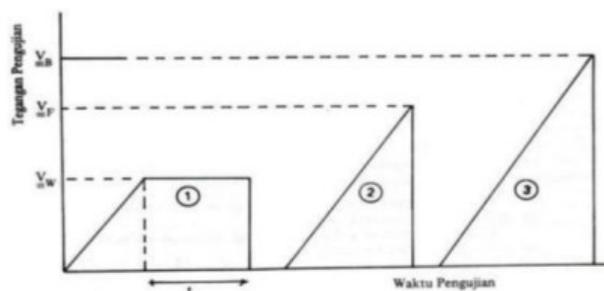
2. Berdasarkan Gambar 11, memberikan jaminan bahwa alat-alat listrik dapat dipakai pada tegangan normalnya untuk waktu yang tak terbatas.
3. Berdasarkan Gambar 11, memberikan jaminan bahwa isolasi alat-alat listrik tahan terhadap tegangan lebih untuk waktu terbatas.

Pengujian tegangan tinggi dapat dikelompokkan berdasarkan dampak pengujian terhadap benda uji yaitu:

- a. Pengujian tidak merusak: pengukuran tahanan isolasi, pengukuran factor



ektrik, pengukuran korona, pengukuran konduktivitas, pemetaan medan dsb.



Gambar 12 Grafik pengujian merusak

(Sumber: Chezia,2021)

b. Pengujian bersifat merusak

- Pengujian Ketahanan (*Withstand Test*)

Berdasarkan Gambar 12, pengujian ketahanan pada tegangan V_w selama t menit. Sebuah tegangan tertentu diterapkan untuk waktu yang ditentukan. Bila tidak terjadi lompatan api (*flashover, disruptive discharge*). Maka pengujian nya dianggap memuaskan

- Pengujian Pelepasan Muatan (*Discharge Test*)

Berdasarkan Gambar 12. pengujian lompatan dengan tegangan lompatan V_f . Tegangannya dinaikkan sehingga terjadi pelepasan pada benda yang diuji. Sudah barang tentu tegangan pelepasan ini lebih tinggi dari tegangan ketahanan. Pengujian nya dapat dilakukan dalam suasana kering (udara biasa) dan suasana basah (menirukan keadaan hujan).

- Pengujian Kegagalan (*breakdown Test*)

Berdasarkan Gambar 12. pengujian kegagalan dengan tegangan gagal V_b . Tegangan dinaikkan sampai terjadi kegagalan di dalam benda yang diuji. Terdapat tiga jenis tegangan tinggi yang akan diukur dalam pengujian tegangan tinggi, yaitu tegangan tinggi bolak-balik, tegangan tinggi searah, dan tegangan tinggi impuls.

2.9 Bahan Pengisi



ilika

ilika adalah suatu mineral yang penyusun utamanya berupa silikon (SiO_2). Silika tersusun dari dua unsur yang terdiri dari silikon (Si) dan

oksigen (O₂) di mana keduanya merupakan unsur yang paling banyak di alam. Diperkirakan 60% dari kerak bumi ini tersusun dari silika. Silika yang ada di bumi ini biasanya ditemukan dalam bentuk silikat (Abdul, 2015).

Dengan perkembangan teknologi, mulai banyak aplikasi penggunaan *silica* pada industri semakin meningkat terutama dalam penggunaan *silica* pada ukuran partikel yang kecil sampai skala mikron atau bahkan *nano silica*. Kondisi ukuran partikel bahan baku yang diperkecil membuat produk memiliki sifat yang berbeda yang dapat meningkatkan kualitas. Sebagai salah satu contoh *silica* dengan ukuran mikron banyak diaplikasikan dalam *material building*, yaitu sebagai bahan campuran pada beton. Rongga yang kosong di antara partikel semen akan diisi oleh *mikro silica* sehingga berfungsi sebagai bahan penguat beton (*mechanical property*) dan meningkatkan daya tahan (*durability*). Ukuran lainnya yang lebih kecil adalah *nanosilica* banyak digunakan pada aplikasi di industri ban, karet, cat, kosmetik, elektronik dan keramik. Sebagai salah satu contoh adalah pada produk ban dan karet secara umum. Manfaat dari penambahan *nanosilica* pada ban akan membuat ban memiliki daya lekat yang lebih baik terlebih pada jalan salju, mereduksi kebisingan yang ditimbulkan dan usia ban lebih panjang daripada produk ban tanpa penambahan nano silika (Heri, J., dkk., 2012).

silika digunakan sebagai bahan pengisi dalam pembuatan isolator listrik isolator polimer *silicone rubber* untuk meningkatkan kekuatan termal dan juga kekuatan mekaniknya. Ada beberapa sifat silika yang berkontribusi terhadap sifat isolator yang baik adalah sebagai berikut :

1. **Tahan terhadap suhu yang tinggi.** *Silica* memiliki titik leleh yang sangat tinggi, sehingga isolator yang mengandung *silica* dapat bertahan pada suhu tinggi dan tidak mudah rusak.
2. **Kekuatan dan kekerasan.** *Silica* memiliki kekerasan dan kekuatan yang baik, untuk membantu meningkatkan kekuatan dan daya tahan isolator.
3. **Sifat dielektrik.** *Silica* memiliki sifat dielektrik yang baik untuk isolator strik dan mengurangi kemungkinan terjadinya arus bocor.



4. **Stabilitas kimia.** *Silica* stabil secara kimia dan tidak bereaksi dengan banyak bahan kimia, sehingga isolator yang mengandung *silica* tidak mudah terdegradasi.
5. **Tahan terhadap kelembaban.** Meskipun *silica* memiliki kecenderungan untuk menyerap kelembaban dari lingkungannya, isolator yang mengandung *silica* dapat dirancang sedemikian rupa untuk tahan terhadap kelembaban.
6. **Biodegradasi.** *Silica* tidak dapat terurai secara alami dan tidak berkontribusi pada pencemaran lingkungan.

Namun, terdapat beberapa kekurangan dari yang perlu dipertimbangkan ketika menggunakan bahan pengisi *silica* dalam isolator polimer *silicone rubber* yaitu :

1. **Pengaruh terhadap sifat pemrosesan.** Penggunaan bahan pengisi *silica* dalam isolator polimer *silicone rubber* dapat mempengaruhi sifat pemrosesan material. Bahan pengisi *silica* cenderung memiliki sifat pengentalan, yang dapat mempersulit proses pencampuran dan pembentukan suatu isolator.
2. **Perubahan kekuatan dielektrik.** Penggunaan bahan pengisi *silica* dapat mengurangi kekuatan dielektrik material yang artinya isolator polimer *silicone rubber* yang mengandung silika mungkin memiliki suatu kekuatan dielektrik yang lebih rendah dibandingkan dengan material polimer murni (Nazir, M. T., Phung, B. T., & Hoffman, M., 2016).

Silika adalah salah satu bahan anorganik yang memiliki kelebihan sifat yaitu memiliki kestabilan tinggi terhadap pengaruh mekanik, temperatur, dan kondisi keasaman. Silika merupakan bahan kimia yang pemanfaatannya dan aplikasinya sangat luas mulai bidang elektronik, mekanik, medis, seni hingga bidang-bidang lainnya. Senyawa silika mempunyai sifat-sifat sebagai berikut



Sifat fisik silika 7 Silika memiliki beberapa sifat unik yang tidak dimiliki oleh senyawa anorganik lainnya seperti, sifat adsorpsi dan pertukaran ion yang baik, kestabilan mekanik dan termal tinggi, mudah

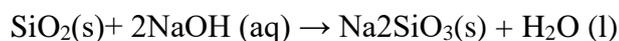
dimodifikasi dengan senyawa kimia tertentu untuk meningkatkan kinerjanya. Silika mampu digunakan sebagai adsorben karena memiliki gugus silanol (SiOH) dan gugus siloksan (Si-O-Si) serta memiliki pori-pori yang luas dan luas permukaan yang khas.

b. Sifat kimia silika

1. Silika bersifat stabil terhadap hidrogen kecuali fluorin dan juga inert terhadap semua asam kecuali HF, dengan HF bereaksi menurut persamaan reaksi :



2. Basa pekat misalnya NaOH dalam kondisi panas secara perlahan dapat mengubah silika menjadi silikat yang larut dalam air. Reaksi:



Senyawa yang dikenal sebagai silikon dioksida (SiO_2) adalah senyawa yang biasa ditemukan dalam mineral yang disebut pasir kuarsa, yang terdiri dari kristal silikon dioksida (SiO_2) dan mengandung pengotor yang terbawa selama proses pengendapan. Pasir kuarsa, juga dikenal sebagai pasir putih, merupakan hasil pelapukan batuan yang mengandung mineral penting seperti kuarsa dan feldspar. Pasir kuarsa memiliki komposisi komposit SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , dan K_2O (Wahyu Agung 2022).

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* silika (SiO_2).

2.9.2 Alumina trihydrate (ATH)



filler lain seperti alumina trihydrate (ATH $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) yang ditambahkan ke polimer *silicon* akan memberikan daya tahan (*endurance*) untuk erosi yang lebih lama. Kombinasi isolasi polimer *silicon* dengan kedua tipe dari *filler* akan meningkatkan 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*. Tetapi pengaruh tambahan *filler* memungkinkan sifat-sifat fisik polimer dapat di modifikasi dengan masalah *phenomena ridge plane (interface)* antara *filler* dengan material polimer itu sendiri. Pengaruh konsentrasi *filler* terhadap serapan air dan kelakuan (*behavior*) sifat dielektrik isolasi polimer (*silicon rubber*) memegang peranan sangat penting dalam peningkatan kinerja isolator polimer (Mustamin 2011).

Bahan pengisi ATH sering digunakan dalam isolator polimer *silicone rubber* karena kelebihan dan kekurangan yang dimilikinya. Berikut beberapa kelebihan penggunaan bahan pengisi ATH dalam isolator polimer *silicone rubber* sebagai berikut :

1. Ketahanan terhadap api.

Apabila terjadi *flashover* atau terjadi pemanasan di atas permukaannya, bahan ini akan melepaskan H₂O atau air dalam bentuk uap yang berfungsi untuk mendinginkan area tersebut dan memadamkan busur api. Ini membantu meningkatkan ketahanan isolator polimer *silicone rubber* terhadap api dan memperlambat penyebaran api.

2. Ketahanan dielektrik.

Penggunaan bahan pengisi ATH dalam isolator polimer *silicone rubber* dapat meningkatkan ketahanan dielektrik material sehingga dapat menahan tegangan listrik yang tinggi dan mencegah terjadinya arus bocor.

3. Stabilitas termal.

ATH memiliki sifat tahan panas yang baik, yang membantu meningkatkan termal isolator polimer *silicone rubber*. Isolator dapat digunakan rentang suhu yang lebih luas tanpa mengalami penurunan kinerjanya.

Selain itu, kekurangan pada bahan pengisi (*filler*) ATH dalam *silicone rubber* sebagai berikut :

Kekuatan mekanik yang rendah.



Salah satu kekurangan utama penggunaan bahan pengisi ATH adalah adanya pengurangan kekuatan mekanik isolator polimer *silicone rubber*. Partikel-partikel pengisi ini dapat mengurangi kekuatan dan kekakuan material, sehingga membuatnya lebih rentan deformasi dan retak.

2. Pengaruh terhadap warna dan transparansi.

Penggunaan bahan pengisi ATH dapat mempengaruhi warna dan transparansi isolator polimer. ATH biasanya memiliki warna putih atau abu-abu, sehingga dapat mengurangi kejernihan atau transparansi bahan jika digunakan dalam jumlah yang signifikan. Partikel pengisi ini dapat menghambat transmisi cahaya, sehingga membuat isolator menjadi lebih buram atau berubah warna (Nazir, M. T., Phung, B. T., & Hoffman, M., 2016).

2.10 Pengaruh *filler* terhadap Hidrofobik

Pemulihan hidrofobisitas, sudut kontak hidrofobik *filler* lebih tinggi daripada komposit ber*filler* di bawah daerah ujung jarum setelah 48 jam terpapar korona. Dalam komposisi yang terisi, *filler* dapat bertindak sebagai pelindung. Selain itu, pemulihan hidrofobisitas karena adanya *filler*. Efek perlindungan yang ditingkatkan ini dapat meningkatkan ketahanan tetapi hal itu memicu dampak negatif pada pemulihan hidrofobisitas. Pelepasan korona dan injeksi muatan dapat mengubah komponen kimiawi dari lapisan permukaan polimer dan menyebabkan hilangnya hidrofobisitas permukaan SiR. Hilangnya hidrofobisitas permukaan mempercepat pembentukan lapisan konduktif, menghasilkan peningkatan arus bocor dan pelepasan pita kering. Insiden *flashover* dapat terjadi, mengikuti perkembangan terus-menerus dari pelepasan pita kering. Namun, hidrofobisitas permukaan dapat pulih setelah beberapa jam dari periode kering dan bebas busur. Penelitian telah membuktikan bahwa pemulihan hidrofobisitas permukaan

oleh *Transfer* polimer. Pemulihan hidrofobisitas isolator menjadi utama untuk keamanan dan keandalan saluran transmisi (Manjang & dkk,



2.11 Bahan Isolasi Di bawah Pengaruh Medan Listrik

2.11.1 Bahan Isolasi Di bawah 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:

$$C = \epsilon_r \cdot C_0 \quad (5)$$

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:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (6)$$

Jadi arus kapasitor menjadi

$$\begin{aligned} I &= j\omega(\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \cdot C_0 \cdot V \\ &= \omega\epsilon_r'' \cdot C_0 \cdot V + j\omega\epsilon_r' \cdot C_0 \cdot V \end{aligned} \quad (7)$$

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

$D = \epsilon \cdot E$; di mana:

$\epsilon =$ besaran kompleks $\epsilon_r' = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$

$\epsilon_r' = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'$ dan;

$\epsilon_r'' = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r''$

Jadi:

$$D = \epsilon^* \cdot E \quad (8)$$

2.11.2 Bahan Isolasi Di bawah Pengaruh Medan Listrik Tunak (DC)



Bila suatu bahan diletakkan pada tempat yang dipengaruhi medan listrik, respon dari bahan tersebut pada tingkat elektronik, atomik, molekuler, dan mikroskopis terhadap medan listrik yang memengaruhinya 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 dan kapasitor tersebut sebesar:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (9)$$

Dimana $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ Farad/m

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

$$C_0 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (10)$$

Dimana:

ϵ_r =konstanta dielektrik relative terhadap hampa udara

$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ sehingga $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$

Setiap bahan mempunyai nilai ϵ_r , yang berbeda, misalkan Silicon (Si) :

$\epsilon_r = 12$, germanium (Ge) $\epsilon_r = 16$. Nilai dan ϵ_r dapat diperoleh dengan mengukur nilai C pada waktu ϵ_0 dan C_0 , ϵ_r dari C pada waktu ada dielektrik jadi:

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (11)$$

