

**DISERTASI**

**REKAYASA MATERIAL KARET SILIKON DENGAN PENGISI  
MIKRO/NANO UNTUK ISOLATOR LISTRIK  
TEGANGAN TINGGI**

*Engineering of Silicone Rubber Materials with Micro/Nano Filler  
for High Voltage Electrical Insulators*

**MUSTAMIN  
D053191006**



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK ELEKTRO  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**

**PENGAJUAN DISERTASI**

**REKAYASA MATERIAL KARET SILIKON DENGAN  
PENGISI MIKRO/NANO UNTUK ISOLATOR LISTRIK  
TEGANGAN TINGGI**

Disertasi  
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor  
Program Studi Doktor Ilmu Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

**MUSTAMIN  
D053191006**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**

## DISERTASI

# REKAYASA MATERIAL KARET SILIKON DENGAN PENGISI MIKRO/NANO UNTUK ISOLATOR LISTRIK TEGANGAN TINGGI

**MUSTAMIN**  
**D053191006**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Disertasi  
yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada  
Program Doktor Ilmu Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
pada tanggal, 25 Juli 2024  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui  
Promotor



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

Co-Promotor



Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU  
NIP. 19740530 199903 1 003

Co-Promotor

Prof. Dr. Paulina Taba, M.Phil.  
NIP. 19571115 198810 2 001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T.,  
M.T., IPM., ASEAN.Eng.  
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi  
S3 Teknik Elektro



Prof. Dr. Ir. Andani Achmad, M.T.  
NIP. 19601231 198703 1 022



## PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : MUSTAMIN  
Nomor mahasiswa : D05319106  
Program Studi : Doktor Ilmu Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Rekayasa Material Karet Silikon dengan Pengisi Mikro/Nano untuk Isolator Listrik Tegangan Tinggi” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof.Dr.Ir.H. Salama Manjang, M.T. sebagai *promotor*, Prof.Dr,Eng.Ir. Syafaruddin, S.T.,M.Eng.,IPU sebagai *co.promotor-1* dan Prof.Dr. Paulina Taba, M.Phil. sebagai *co.promotor-2*. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding (*2023 4th international comporence on high voltage engineering and power systems (ICHVEPS)*), volume, halaman 152-157, dan DOI:10.1109/ICHVEPS58902.2023.10257419) sebagai artikel dengan judul “*Investigation of SiO<sub>2</sub>/ATH/TiO<sub>2</sub> micro-nanofiller to improve performance of silicone rubber toward UV radiation and partial discharge on high voltage outdoor insulators*” dan Jurnal (*International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, Volume 15, Halaman 657-666, dan DOI:10.15676/ijeei.2023.15.4.10) sebagai artikel dengan judul “*Investigation of SiO<sub>2</sub>/ATH/TiO<sub>2</sub> micro-nanofiller to improve the performance of silicone rubber for high voltage outdoor insulators*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 25 Juli 2024

Yang menyatakan



  
MUSTAMIN

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.

Gagasan utama rekayasa material karet silikon dengan pengisi mikro-nano SiO<sub>2</sub>, ATH, dan TiO<sub>2</sub> untuk isolator listrik tegangan tinggi sebagai solusi dalam mengatasi kegagalan dan kerusakan isolator pada jaringan transmisi dan gardu induk yang disebabkan oleh polusi, radiasi UV, peluahan sebagian, dan busur pita kering, cuaca, dan iklim yang mengakibatkan terjadinya tegangan tembus dan kegagalan penyaluran tenaga listrik kepada konsumen. Penggunaan karet silikon dengan pengisi mikro-nano SiO<sub>2</sub>, ATH, dan SiO<sub>2</sub> dapat meningkatkan kinerja fisik, listrik, dan kimia material isolator polimer untuk isolator listrik tegangan tinggi terutama di daerah yang berpolusi berat dan beriklim tropis. Penerapan isolator polimer diharapkan dapat menekan biaya konstruksi dan meningkatkan keandalan transmisi dan distribusi tenaga listrik.

Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan disertasi, berkat bimbingan, arahan, dan motivasi berbagai pihak maka disertasi ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terima kasih kepada:

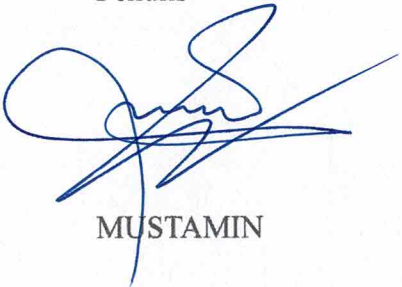
1. Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T. sebagai promotor, Prof. Dr.Eng. Ir. Syafaruddin, S.T.,M.Eng.,IPU sebagai co-promotor-1, dan Prof. Dr. Paulina Taba, M.Phil. sebagai co-promotor-2.
2. Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, M.T., Dr. Ir. Yustinus Upa Sombolayuk, M.T., Dr. Ikhlas Kitta, S.T.,M.T., Dr. Ir. Yusran, S.T.,M.T. sebagai komisi tim penguji
3. Prof. Dr. Ir. Suwarno, S.T.,M.T.,IPU, sebagai penguji eksternal, yang telah meluangkan waktunya untuk menguji dan memberikan saran yang konstruktif dalam rangka perbaikan dan penyempurnaan disertasi ini.
4. Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program doktor serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
5. Ketua Program S3 Ilmu Teknik Elektro, Prof. Dr. Ir. Andani Achmad, M.T yang telah membina dan mengarahkan dalam penyelesaian studi ini.
6. Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arief. Dipl.Eng, dan Dr. Ir. Syarifuddin Nojeng, M.Sc. yang senantiasa memberikan motivasi dan dorongan untuk melanjutkan pendidikan dan mengembangkan karier.
7. Ir. Toni Utina, M.Sc.,IPM selaku Kepala Lab. Mikrostruktur Fakultas Teknik UMI yang telah mengizinkan kami melaksanakan analisis SEM dan EDS.
8. Ir. Bambang Soemantri selaku Dirut PT. Eleska Hatekdis, saya mengucapkan terima kasih atas beasiswa yang diberikan selama menempuh program pendidikan doktor.
9. Ir. Jony Ginting selaku Dirut PT Serambi Gayo Sentosa yang telah membantu beberapa peralatan dan bahan, serta dukungan yang diperlukan dalam melaksanakan penelitian isolator polimer.



10. Marendengi Ahmad, S.T.,M.Si., Muhammad Ridwan, S.T.,M.T, dan Hamdani, S.T.,M.T. yang telah banyak membantu kami dalam pembuatan modul uji tegangan tinggi serta sistem kendalinya sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.
11. Rekan sejawat, dosen dan tenaga kependidikan Universitas Halu Oleo atas fasilitas, dukungan, dan bantuan yang diberikan selama menempuh program pendidikan doktor.

Akhirnya, kepada orang tua tercinta saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan, dan memotivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada istri dan anak-anak (kakak/adik, paman, dan handai tolang) atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Penulis

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Mustamin', with a large, stylized flourish extending to the right.

MUSTAMIN

## ABSTRAK

**MUSTAMIN.** Rekayasa Material Karet Silikon dengan Pengisi Mikro/Nano untuk Isolator Listrik Tegangan Tinggi (dibimbing oleh **Salama Manjang, Syafaruddin, Paulina Taba**)

Isolator polimer semakin banyak diterapkan pada transmisi dan distribusi daya listrik karena memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan isolator keramik dan kaca. Hambatan utama penerapan isolator polimer adalah kerusakan dan kegagalan yang disebabkan oleh polusi, radiasi UV, peluahan sebagian, busur pita kering, cuaca, dan iklim yang mengakibatkan tegangan tembus dan kegagalan distribusi tenaga listrik ke konsumen. Rekayasa material isolator polimer dari karet silikon RTV683 dengan pengisi mikro-nano  $\text{SiO}_2$ , ATH, dan  $\text{TiO}_2$  diharapkan dapat menjadi solusi dalam mengatasi kerusakan isolator dan kegagalan instalasi tenaga listrik.

Penelitian ini bertujuan untuk menemukan material isolator baru dengan komposisi dan konsentrasi optimal dalam meningkatkan daya tahan dan kekuatan sifat fisik, listrik, dan kimia sehingga dapat meningkatkan kinerja material isolator untuk isolator listrik tegangan tinggi, terutama yang berpolusi berat seperti kawasan industri, pertambangan, dan pesisir pantai. Penerapan isolator polimer diharapkan dapat menekan biaya konstruksi dan meningkatkan keandalan transmisi dan distribusi tenaga listrik terutama di daerah beriklim tropis.

Metode yang digunakan adalah melakukan rekayasa komposit dan pengisi dari bahan berkualitas terbaik berdasarkan referensi yang relevan. Komposit yang digunakan adalah karet silikon RTV683 dengan pengisi mikro-nano  $\text{SiO}_2$ , ATH, dan  $\text{TiO}_2$  yang diproduksi sesuai standar. Material isolator yang dihasilkan kemudian dilaksanakan beberapa perlakuan meliputi difusi air, kontaminan, dan peluahan korona. Pengujian dan analisis material isolator dilaksanakan sebelum dan setelah perlakuan diantaranya pengujian karakteristik fisik, listrik, dan kimia. Hasil penelitian dengan berbagai perlakuan dan analisis menunjukkan bahwa material isolator SR-C4 dari karet silikon RTV683 dengan pengisi mikro-nano  $\text{SiO}_2$ , ATH, dan  $\text{TiO}_2$  pada konsentrasi 20 wt% menunjukkan kinerja terbaik dan potensial digunakan sebagai isolator tegangan tinggi di daerah berpolusi berat dan beriklim tropis.

**Kata kunci:** RTV683, pengisi mikro-nano, difusi air, transfer hidrofobik, peluahan korona.

## ABSTRACT

**MUSTAMIN.** *Engineering of Silicone Rubber Material with Micro/Nano Filler for High Voltage Electrical Insulators (guided by Salama Manjang, Syafaruddin, Paulina Taba)*

*Polymer insulators are increasingly being applied to the transmission and distribution of electrical power because they have many advantages compared to ceramic and glass insulators. The main obstacles to the application of polymer insulators are damage and failures caused by pollution, UV radiation, partial discharge, dry band arcs, weather, and climate resulting in breakdown voltages and failures in the distribution of electrical power to consumers. Engineering a polymer insulator material from RTV683 silicone rubber with SiO<sub>2</sub>, ATH, and TiO<sub>2</sub> micro-nanofillers is expected to solve insulator damage and failures to electrical power installations.*

*This research aims to find new insulator materials with optimal composition and concentration in increasing the durability and strength of physical, electrical, and chemical properties so that they can improve the performance of insulator materials for high-voltage electrical insulators, especially those with heavy pollution such as industrial areas, mining, and coastal positions. The application of polymer insulators is expected to reduce construction costs and improve the reliability of electric power transmission and distribution, especially in tropical climates.*

*Based on relevant references, the method used is to carry out composite engineering and fillers from the best quality materials. The composite used is RTV683 silicone rubber with SiO<sub>2</sub>, ATH, and TiO<sub>2</sub> micro-nanofillers manufactured according to standards. The resulting insulator material is subjected to several treatments including water diffusion, contaminants, and corona discharge. The insulator material is tested and analyzed before and after treatment, including physical, electrical, and chemical characteristics. The results of the study with various treatments and analysis show that the SR-C4 insulator material of RTV683 silicone rubber with SiO<sub>2</sub>, ATH, and TiO<sub>2</sub> micro-nanofillers at a concentration of 20 wt% shows the best performance and has the potential to be used as a high-voltage insulator in heavily polluted and tropical climates.*

**Keywords:** *RTV683, micro-nanofillers, water diffusion, transfer hydrophobic, corona discharge*



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>PENGAJUAN DISERTASI .....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI .....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xx</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Tujuan Penelitian .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 Manfaat Penelitian.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5 Ruang Lingkup Penelitian .....</b>	<b>6</b>
<b>BAB II KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Teori Isolator Polimer .....</b>	<b>8</b>
<i>2.1.1 Pengertian isolator polimer.....</i>	<i>8</i>
<i>2.1.2 Penggolongan polimer berdasarkan asalnya.....</i>	<i>10</i>
<i>2.1.3 Sifa-sifat polimer .....</i>	<i>11</i>
<i>2.1.4 Karet silikon.....</i>	<i>13</i>
<i>2.1.5 Keunggulan dan kelemahan isolator karet silikon .....</i>	<i>15</i>
<b>2.2 Bahan dan Desain Material Isolator Polimer .....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Karet silikon RTV683 .....	17
2.2.2 Silikon dioksida ( $\text{SiO}_2$ ).....	20
2.2.3 Alumina trihidrat (ATH).....	24
2.2.4 Titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ).....	26
2.2.5 Spesifikasi bahan yang digunakan.....	28
2.2.6 Desain material isolator .....	29
2.2.7 Peracikan material isolator polimer .....	31
<b>2.3 Penelitian Terkait dan Kontribusi Hasil Penelitian (<i>State of The Art</i>) .....</b>	<b>33</b>

<b>2.4 Hipotesis Penelitian .....</b>	<b>42</b>
<b>BAB III INVESTIGASI KINERJA DIFUSI AIR ISOLATOR KARET SILIKONE DENGAN PENGISI MIKRO-NANO SiO<sub>2</sub>/ATH/TiO<sub>2</sub> UNTUK ISOLATOR LISTRIK TEGANGAN TINGGI.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1 Abstrak .....</b>	<b>44</b>
3.1.1 <i>Abstrak.....</i>	44
3.1.2 <i>Abstract.....</i>	44
<b>3.2 Pendahuluan.....</b>	<b>45</b>
3.2.1 <i>Standar uji material isolator SR terhadap kinerja difusi air.....</i>	45
3.2.2 <i>Jurnal international yang relevan .....</i>	45
3.2.3 <i>Buku-buku isolator polimer yang relevan .....</i>	46
<b>3.3 Metodologi .....</b>	<b>47</b>
3.3.1 <i>Bahan yang digunakan .....</i>	48
3.3.2 <i>Persiapan sampel material isolator SR.....</i>	48
3.3.3 <i>Perlakuan difusi air material isolator SR.....</i>	48
3.3.4 <i>Modul pengujian material isolator SR dengan perlakuan difusi air...49</i>	
<b>3.4 Hasil Pengujian dan Analisis Material Isolator SR dengan         Perlakuan Difusi Air .....</b>	<b>61</b>
3.4.1 <i>Hasil pengujian dan analisis perlakuan difusi air material                 isolator SR.....</i>	62
3.4.2 <i>Hasil pengujian dan analisis sifat hidrofobik material isolator SR                 dengan perlakuan difusi air .....</i>	63
3.4.3 <i>Hasil pengujian dan analisis kekuatan tarik dan elongasi material                 isolator SR dengan perlakuan difusi air .....</i>	65
3.4.4 <i>Hasil pengujian dan analisis kekasaran permukaan material                 isolator SR dengan perlakuan difusi air .....</i>	67
3.4.5 <i>Hasil pengujian dan analisis permitivitas material isolator SR                 dengan perlakuan difusi air .....</i>	68
3.4.6 <i>Hasil pengujian dan analisis peluahan sebagian material                 isolator SR dengan perlakuan difusi air .....</i>	71
3.4.7 <i>Hasil pengujian dan analisis tegangan tembus material isolator SR                 dengan perlakuan difusi air .....</i>	72
3.4.8 <i>Hasil pengujian dan analisis flashover material isolator SR dengan                 perlakuan difusi air .....</i>	74

3.4.9 Hasil pengujian dan analisis resistivitas material isolator SR dengan perlakuan difusi air .....	76
3.4.10 Hasil pengujian dan analisis SEM material isolator SR dengan perlakuan difusi air .....	80
3.4.11 Hasil analisis FTIR material isolator SR dengan perlakuan difusi air .....	81
<b>3.5 Analisis dan Evaluasi Kinerja Difusi Air Material Isolator SR.....</b>	<b>84</b>
3.5.1 Kinerja fisik material isolator SR dengan perlakuan difusi air .....	84
3.5.2 Kinerja listrik material isolator SR dengan perlakuan difusi air .....	87
3.5.3 Kinerja kimia material isolator SR dengan perlakuan difusi air .....	89
<b>3.6 Kesimpulan.....</b>	<b>90</b>
<b>3.7 Daftar Pustaka .....</b>	<b>92</b>
<b>BAB IV INVESTIGASI KINERJA TRANSFER HIDROFOBIAK</b>	
<b>ISOLATOR KARET SILIKONE DENGAN PENGISI MIKRO-NANO SiO<sub>2</sub>/ATH/TiO<sub>2</sub> UNTUK ISOLATOR LISTRIK TEGANGAN TINGGI .....</b>	
	<b>96</b>
<b>4.1 Abstrak .....</b>	<b>96</b>
4.1.1 Abstrak.....	96
4.1.2 Abstract.....	96
<b>4.2 Pendahuluan.....</b>	<b>97</b>
4.2.1 Standar uji material isolator polimer terhadap kinerja hidrofobik ....	97
4.2.2 Jurnal internasional yang relevan .....	100
4.2.3 Buku-buku isolator polimer yang relevan .....	101
<b>4.3 Metodologi .....</b>	<b>102</b>
4.3.1 Bahan yang digunakan .....	103
4.3.2 Persiapan sampel material isolator SR.....	103
4.3.3 Perlakuan kontaminan material isolator SR .....	103
4.3.4 Modul pengujian material isolator SR dengan perlakuan kontaminan.....	106
<b>4.4 Hasil Pengujian dan Analisis Material Isolator SR dengan Perlakuan Kontaminan .....</b>	<b>115</b>
4.4.1 Hasil pengujian dan analisis transfer hidrofobik material isolator SR dengan perlakuan kontaminan .....	116
4.4.2 Hasil pengujian dan analisis sifat hidrofobik material isolator SR dengan perlakuan kontaminan.....	118

4.4.3 Hasil pengujian dan analisis permitivitas material isolator SR dengan perlakuan kontaminan.....	120
4.4.4 Hasil pengujian dan analisis peluahan sebagian material isolator SR dengan perlakuan kontaminan .....	122
4.4.5 Hasil pengujian dan analisis tegangan tembus material isolator SR dengan perlakuan kontaminan .....	123
4.4.6 Hasil pengujian dan analisis AC flashover material isolator SR dengan perlakuan kontaminan.....	125
4.4.7 Hasil pengujian dan analisis resistivitas material isolator SR dengan perlakuan kontaminan.....	126
4.4.8 Hasil pengujian dan analisis SEM material isolator SR dengan perlakuan kontaminan.....	129
4.4.9 Hasil pengujian dan analisis FTIR material isolator SR dengan perlakuan kontaminan.....	130
<b>4.5 Analisis dan Evaluasi Kinerja Transfer Hidrofobik Material Isolator SR.....</b>	<b>134</b>
4.5.1 Kinerja fisik material isolator SR dengan perlakuan kontaminan ....	134
4.5.2 Kinerja listrik material isolator SR dengan perlakuan kontaminan .	137
4.5.3 Kinerja kimia material isolator SR dengan perlakuan kontaminan..	140
<b>4.6 Kesimpulan.....</b>	<b>141</b>
<b>4.7 Daftar Pustaka .....</b>	<b>144</b>
<b>BAB V INVESTIGASI KINERJA PELUAHAN KORONA ISOLATOR KARET SILIKON DENGAN PENGISI MIKRO-NANO SIO<sub>2</sub>/ATH/TIO<sub>2</sub> UNTUK ISOLATOR LISTRIK TEGANGAN TINGGI .....</b>	
<b>5.1 Abstrak .....</b>	<b>148</b>
5.1.1 Abstrak.....	148
5.1.2 Abstract.....	148
<b>5.2 Pendahuluan.....</b>	<b>149</b>
5.2.1 Standar uji material isolator SR terhadap kinerja peluahan korona .....	149
5.2.2 Jurnal internasional yang relevan .....	150
5.2.3 Buku-buku isolator polimer dan sumber lain yang relevan .....	153
<b>5.3 Metodologi.....</b>	<b>156</b>
5.3.1 Bahan yang digunakan .....	157

5.3.2	<i>Persiapan sampel material isolator</i> .....	157
5.3.3	<i>Perlakuan peluahan korona material isolator SR</i> .....	157
5.3.4	<i>Modul pengujian material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	159
	<b>5.4 Hasil Pengujian dan Analisis Material Isolator SR dengan Perlakuan Peluahan Korona</b> .....	<b>167</b>
5.4.1	<i>Hasil pengujian dan analisis sifat hidrofobik material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	167
5.4.2	<i>Hasil pengujian dan analisis permitivitas material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	170
5.4.3	<i>Hasil pengujian dan analisis kekasaran permukaan material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	172
5.4.4	<i>Hasil pengujian dan analisis flashover material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	173
5.4.5	<i>Hasil pengujian dan analisis tegangan tembus material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	175
5.4.6	<i>Hasil pengujian dan analisis resistivitas material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	177
5.4.7	<i>Hasil pengujian dan mikro analisis SEM material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	180
5.4.8	<i>Hasil pengujian dan mikro analisis FTIR material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	181
5.4.9	<i>Hasil pengujian dan mikro analisis EDS material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	184
	<b>5.5 Analisis dan Evaluasi Kinerja Peluahan Korona Material Isolator SR</b> .....	<b>188</b>
5.5.1	<i>Kinerja fisik material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	189
5.5.2	<i>Kinerja listrik material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	191
5.5.3	<i>Kinerja kimia material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona</i> .....	194
	<b>5.6 Kesimpulan</b> .....	<b>195</b>
	<b>5.7 Daftar Pustaka</b> .....	<b>199</b>
	<b>BAB VI PEMBAHASAN UMUM</b> .....	<b>202</b>

<b>6.1 Temuan dan <i>Novelty</i> Penelitian .....</b>	<b>202</b>
<b>6.2 Dispersi Koloid pada Material Isolator SR.....</b>	<b>203</b>
<b>6.3 Pabrikasi Material Isolator SR.....</b>	<b>205</b>
<b>6.4 Perlakuan Material Isolator SR .....</b>	<b>207</b>
6.4.1 <i>Perlakuan difusi air material isolator SR.....</i>	207
6.4.2 <i>Perlakuan kontaminan material isolator SR .....</i>	208
6.4.3 <i>Perlakuan korona material isolator SR.....</i>	211
<b>6.5 Evaluasi dan Diskusi Hasil Penelitian Material Isolator Polimer..</b>	<b>213</b>
6.5.1 <i>Karakteristik fisik material isolator SR.....</i>	214
6.5.2 <i>Karakteristik listrik material isolator SR .....</i>	223
6.5.3 <i>Karakteristik kimia material isolator SR.....</i>	234
<b>BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>239</b>
7.1 <b>Kesimpulan.....</b>	<b>239</b>
7.2 <b>Saran-Saran.....</b>	<b>241</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>242</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>248</b>



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.</b> Contoh polimer alam .....	10
<b>Tabel 2.</b> Contoh polimer sintesis .....	11
<b>Tabel 3.</b> Data spesifikasi material pengisi .....	29
<b>Tabel 4.</b> Desain material isolator SR.....	30
<b>Tabel 5.</b> Evaluasi kinerja fisik material isolator polimer dengan perlakuan difusi air .....	86
<b>Tabel 6.</b> Evaluasi kinerja listrik material isolator SR dengan perlakuan difusi air .....	88
<b>Tabel 7.</b> Karakteristik radiasi UV matahari .....	97
<b>Tabel 8.</b> Evaluasi kinerja fisik material isolator SR dengan perlakuan kontaminan .....	136
<b>Tabel 9.</b> Evaluasi kinerja listrik material isolator SR dengan perlakuan kontaminan .....	139
<b>Tabel 10.</b> Komposisi unsur atau senyawa kimia pada material isolator SR .....	185
<b>Tabel 11.</b> Evaluasi kinerja fisik material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona.....	190
<b>Tabel 12.</b> Evaluasi kinerja listrik material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona.....	193
<b>Tabel 13.</b> Temuan dan novelty hasil penelitian.....	202
<b>Tabel 14.</b> Permittivitas relatif bahan .....	205
<b>Tabel 15.</b> Perbandingan sudut kontak ( $\theta$ ) material isolator SR .....	215
<b>Tabel 16.</b> Perbandingan permitivitas relatif ( $\epsilon_r$ ) material isolator SR .....	219
<b>Tabel 17.</b> Perbandingan kekuatan tarik dan elongasi material isolator SR .....	221
<b>Tabel 18.</b> Perbandingan kekasaran permukaan material isolator SR pada panjang gelombang ( $\lambda$ ) 800 $\mu\text{m}$ .....	222
<b>Tabel 19.</b> Perbandingan peluahan sebagian material isolator SR dengan tegangan uji 10 kV <sub>rms</sub> .....	225
<b>Tabel 20.</b> Perbandingan <i>AC flashover</i> material isolator SR .....	226
<b>Tabel 21.</b> Perbandingan tegangan tembus AC material isolator SR.....	230
<b>Tabel 22.</b> Perbandingan resistivitas material isolator SR .....	233

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.</b> Isolator transmisi tenaga listrik, (a) isolator kramik (b) isolator polimer, (c) isolator glas .....	9
<b>Gambar 2.</b> Struktur kimia isolator karet silikon .....	9
<b>Gambar 3.</b> Kerusakan batang inti isolator polimer .....	17
<b>Gambar 4.</b> Resin karet silikon RTV683.....	18
<b>Gambar 5.</b> <i>Hardener</i> sebagai katalisator karet silikon .....	31
<b>Gambar 6.</b> Alur proses penelitian kinerja difusi air material isolator SR.....	47
<b>Gambar 7.</b> Perlakuan difusi air material isolator SR dengan suhu terkendali .....	48
<b>Gambar 8.</b> Alat timbangan analitik tipe AUW220D material isolator SR .....	49
<b>Gambar 9.</b> Modul pengujian <i>surface roughness OLYMPUS type</i> <i>MPLAPONLEX20x</i> material isolator SR .....	50
<b>Gambar 10.</b> Alat mikropipet tipe Joanlab 50 mikroliter.....	51
<b>Gambar 11.</b> Modul pengujian <i>tensile strenght SHIMADZU type MWG-5kNA</i> material isolator SR .....	52
<b>Gambar 12.</b> Desain modul kapasitansi meter tipe CM8601A <sup>+</sup> material isolator SR.....	53
<b>Gambar 13.</b> Rangkaian ekivalen pengujian <i>PD type HV9160</i> material isolator SR.....	55
<b>Gambar 14.</b> Rangkaian ekivalen pengujian <i>BD type HV9133</i> material isolator SR.....	55
<b>Gambar 15.</b> Rangkaian ekivalen pengujian <i>AC flashover type HV9133</i> material isolator SR .....	56
<b>Gambar 16.</b> Pengukuran resistansi isolasi material isolator SR, (a) resistansi volume, (b) resistansi permukaan.....	58
<b>Gambar 17.</b> Modul pemindaian mikroskop elektron <i>JEOL type</i> <i>JCM-6000PLUS</i> material isolator SR.....	59
<b>Gambar 18.</b> Modul <i>analysis Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)</i> <i>SHIMADZU type IRPrestige-21</i> material isolator polimer .....	60
<b>Gambar 19.</b> Kinerja difusi air material isolator polimer pada, (a) suhu kamar, (b) 50 °C, dan (c) 70 °C .....	62
<b>Gambar 20.</b> Karakteristik sudut kontak dengan perlakuan difusi air, (a) suhu kamar, (b) 50 °C, dan (c) 70 °C .....	64
<b>Gambar 21.</b> Hasil uji sifat mekanik material isolator SR .....	66

<b>Gambar 22.</b> Hasil uji kekasaran permukaan material isolator SR .....	67
<b>Gambar 23.</b> Permittivitas relatif material isolator SR dengan perlakuan difusi air, (a) suhu kamar, (b) 50 °C, dan (c) 70 °C .....	70
<b>Gambar 24.</b> Nilai <i>PD</i> material isolator SR dengan perlakuan difusi air .....	72
<b>Gambar 25.</b> Tegangan tembus material isolator SR dengan perlakuan difusi air	74
<b>Gambar 26.</b> Kinerja <i>AC flashover</i> dengan perlakuan difusi air.....	75
<b>Gambar 27.</b> Resistivitas material isolator SR dengan perlakuan difusi air pada, (a) resistivitas volume, dan (b) resistivitas permukaan.....	76
<b>Gambar 28.</b> Kinerja resistivitas volume SR dengan perlakuan difusi air, (a) suhu kamar, (b) 50 °C, dan (b) 70 °C .....	78
<b>Gambar 29.</b> Kinerja resistivitas permukaan material isolator SR dengan perlakuan difusi air, (a) suhu kamar, (b) 50 °C, dan (b) 70 °C .....	79
<b>Gambar 30.</b> Mikrograf <i>SEM</i> material isolator SR, (a) SR-C1, (b) SR-C2, (c) SR-C3, (d) SR-D1, (e) SR-D2, (f) SR-D3.....	81
<b>Gambar 31.</b> Analisis <i>FTIR</i> material isolator SR sebelum dan sesudah perlakuan difusi air .....	82
<b>Gambar 32.</b> Skema radiasi UV sinar matahari (sumber <a href="https://gawpalu.id/index.php/informasi/kimia-atmosfer/radiasi-uv">https://gawpalu.id/index.php/informasi/kimia-atmosfer/radiasi-uv</a> ) .....	99
<b>Gambar 33.</b> Alur proses penelitian kinerja transfer hidrofobik material isolator polimer .....	102
<b>Gambar 34.</b> Modul pengujian transfer hidrofobik material isolator SR, (a) kondisi suhu kamar, (b) kondisi radiasi UVa.....	103
<b>Gambar 35.</b> Desain modul dan foto perlakuan kontaminan pada suhu kamar ..	104
<b>Gambar 36.</b> Modul perlakuan kontaminan dengan radiasi UVa.....	105
<b>Gambar 37.</b> Modul pengujian sudut kontak material isolator SR .....	108
<b>Gambar 38.</b> Modul pengujian permittivitas material isolator SR.....	109
<b>Gambar 39.</b> Modul pengujian <i>PD type HV9160</i> material isolator SR.....	110
<b>Gambar 40.</b> Modul pengujian <i>BD type SRF 0,5/5 TrE</i> material isolator SR.....	111
<b>Gambar 41.</b> Modul pengujian <i>flashover type HV9133</i> material isolator SR.....	112
<b>Gambar 42.</b> Modul pengujian resistansi isolasi material isolator polimer (a) resistansi volume, (b) resistansi permukaan.....	113
<b>Gambar 43.</b> Kinerja transfer hidrofobik material isolator SR dengan paparan, (a) suhu kamar, dan (b) radiasi UVa .....	117

<b>Gambar 44.</b> Karakteristik hidrofobik material isolator SR dengan paparan, (a) suhu kamar, dan (b) radiasi UVa.....	119
<b>Gambar 45.</b> Permittivitas relatif material isolator SR dengan perlakuan kontaminan.....	121
<b>Gambar 46.</b> Nilai <i>PD</i> material isolator SR dengan perlakuan kontaminan.....	123
<b>Gambar 47.</b> Karakteristik tegangan tembus AC material isolator SR dengan perlakuan kontaminan.....	124
<b>Gambar 48.</b> Karakteristik AC flashover material isolator SR dengan perlakuan kontaminan.....	125
<b>Gambar 49.</b> Resistivitas material isolator SR dengan perlakuan kontaminan, (a) resistivitas volume, (b) resistivitas permukaan .....	127
<b>Gambar 50.</b> Mikrograf <i>SEM</i> material isolator SR dengan pengisi TiO <sub>2</sub> , (a) SR-C1, (b) SR-C2, (c) SR-C3, (d) SR-D1, (e) SR-D2, (f) SR-D3. ....	129
<b>Gambar 51.</b> Spektrum <i>FTIR</i> material isolator SR dengan perlakuan kontaminan, (a) terpapar suhu kamar, (b) terpapar UVa.....	131
<b>Gambar 52.</b> Alur proses penelitian kinerja peluahan korona material isolator polimer .....	156
<b>Gambar 53.</b> Desain modul perlakuan peluahan korona.....	157
<b>Gambar 54.</b> Skematis perlakuan peluahan korona dan rangkaian pengukuran tegangan dan arus bocor .....	158
<b>Gambar 55.</b> Zona dampak peluahan korona pada material isolator, (a) setelah peluahan korona (T5), (b) setelah pemulihan hidrofobisitas (T10)	160
<b>Gambar 56.</b> Kinerja peluahan korona material isolator SR, (a) invinity (zona-1), (b) vicinity (zona-2), (c) zona-3 .....	168
<b>Gambar 57.</b> Permittivitas relatif material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona.....	171
<b>Gambar 58.</b> Hasil uji kekasaran permukaan material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona .....	173
<b>Gambar 59.</b> Kinerja <i>AC flashover</i> material isolator SR terhadap peluahan korona .....	174
<b>Gambar 60.</b> Tegangan tembus AC dengan perlakuan pelepasan korona .....	176
<b>Gambar 61.</b> Resistivitas material isolator SR dengan perlakuan peluahan korona, (a) resistivitas volume, (b) resistivitas permukaan .....	178

<b>Gambar 62.</b> Mikrograf <i>SEM</i> material isolator SR dengan pengisi $\text{TiO}_2$ , (a) SR-NF murni, (b) SR-NF korona, (c) SR-C4 murni, (d) SR-C4 korona, (e) SR-D4 murni, (f) SR-D4 korona. ....	180
<b>Gambar 63.</b> Analisis <i>FTIR</i> material isolasi SR dengan perlakuan peluahan korona .....	182
<b>Gambar 64.</b> Spektrum <i>EDS</i> setelah perlakuan peluahan korona, (a) SR-NF 120 h, (b) SR-C4 120 h, (c) SR-D4 120 h.....	186
<b>Gambar 65.</b> Skema perlakuan difusi air material isolator polimer dengan suhu terkendali .....	207
<b>Gambar 66.</b> Modul perlakuan peluahan korona .....	212

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1.</b> Sertifikat HAKI .....	248
<b>Lampiran 2.</b> Artikel jurnal internasional .....	250
<b>Lampiran 3.</b> Artikel prosiding internasional .....	260
<b>Lampiran 4.</b> Sertifikat pemateri dan partisipan .....	266
<b>Lampiran 5.</b> Data spesifikasi <i>MSDS</i> material.....	267
<b>Lampiran 6.</b> Data hasil pengujian <i>surface roughness</i> .....	269
<b>Lampiran 7.</b> Data hasil pengujian <i>tensile strenght</i> dan <i>elongation</i> .....	270
<b>Lampiran 8.</b> Data hasil pengujian <i>FTIR</i> .....	271
<b>Lampiran 9.</b> Data hasil pengujian <i>EDS</i> .....	274
<b>Lampiran 10.</b> Data hasil pengujian <i>water diffusion</i> .....	276
<b>Lampiran 11.</b> Data hasil pengujian transfer hidrofobik.....	277
<b>Lampiran 12.</b> Data hasil pengujian korona .....	278
<b>Lampiran 13.</b> Data modul tegangan tinggi <i>existing</i> .....	279
<b>Lampiran 14.</b> Data kontrol dan instrument pengujian.....	283
<b>Lampiran 15.</b> Dokumentasi dan foto-foto kegiatan .....	284
<b>Lampiran 16.</b> Daftar arti lambang dan singkatan .....	285



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Peningkatan kebutuhan energi listrik di Indonesia sangat pesat. Sehingga tegangan listrik harus dapat ditingkatkan secara maksimal untuk dapat menyalurkan tenaga listrik dengan efektif dan efisien. Sesuai dengan perkembangan teknologi isolator polimer, kemampuan teknis isolator polimer jauh lebih unggul daripada isolator kramik dan gelas, oleh karena itu isolator polimer sangat potensial untuk mendukung pembangunan transmisi tenaga listrik (Nazemi and Hinrichsen, 2015).

Penerapan isolator polimer untuk peningkatan kapasitas tegangan di Indonesia perlu dikaji dengan baik untuk menghasilkan konstruksi yang efektif dan efisien. Segalah aspek kontaminann, cuaca dan iklim tropis harus dikaji secara seksama. Teknologi isolator polimer yang paling unggul saat ini adalah isolator karet silikon. Karet silikon memiliki sifat hidrofobik yang baik, dan struktur isolasi bagian dalam terlindung dari kelembaban, tidak diperlukan uji pemantauan isolasi preventif, tidak diperlukan pembersihan, dan beban kerja perawatan harian berkurang. Namun demikian pada permukaan isolator dimungkinkan adanya jamur dan menjadi tempat koloni bakteri yang dapat menurunkan sifat hidrofobik dari isolator karet silikone (Wallstro, 2005). Selain itu bahwa kemampuan transfer hidrofobik dari isolator karet silikon terjadi dengan mengeluarkan getah karet silikon dari internal sehingga lambat laun akan menyebabkan penurunan kinerja hidrofobik (Ahmadi-Joneidi, Shayegani-Akmal and Mohseni, 2017). Pada fase demikian kondisi isolator perlu dilakukan penggantian secara berkala (Du and Li, 2015; Ghoreishi, Abbasi and Jalili, 2016; Verma and Reddy, 2017).

Gardu induk dan saluran transmisi pada daerah industri dan daerah posisir banyak mengalami *flashover* pada awal musim hujan yang dapat menyebabkan pemadaman (*blackout*). Perkembangan teknologi isolator karet silikon diharapkan dapat mendukung semua peralatan yang diperlukan untuk pembangunan konstruksi dari gardu induk dan transmisi (Verma and Reddy, 2017; Nandi, Subba Reddy and Sharma, 2019). Karakteristik dari isolator karet silikon yang akan diterapkan harus dapat dipastikan mampu mengatasi kendala iklim tropis. Selain itu bahwa wilayah Indonesia yang sekitar 2/3 wilayah lautan, maka isolator polimer harus dipastikan aman untuk berbagai polusi dan garam-garaman (Manjang, Mustamin and Nagao, 2011).

Dispersi pengisi anorganik berukuran nano dalam nanodielektrik selama pembuatan sangat penting untuk perbaikan sifat listrik, dan ini telah menjadi masalah di beberapa properti yang dilaporkan. Fakta bahwa nanopartikel mudah menggumpal karena energi permukaan yang tinggi, dan teknik pencampuran konvensional tidak memecah masalah aglomerasi nanopartikel. Masalah lainnya adalah nanopartikel hidrofilik tidak cocok dengan polimer hidrofobik seperti karet silikon yang mengakibatkan interaksi antarmuka yang buruk (Verma and Reddy, 2018).

Pengisi berukuran nano khususnya debu silika (*fumed silica*) telah dimasukkan ke dalam dielektrik polimerik sejak awal penggunaannya, bukan untuk alasan meningkatkan sifat listrik, tetapi untuk meningkatkan sifat mekanik. Karet silikon banyak digunakan pada isolasi luar ruangan seperti isolator polimer, selubung arester dan bushing, sekitar 2 wt% debu silika digabungkan dalam senyawa silikon sebagai bahan penguat untuk mendapatkan kekuatan fisik. Penguatan tidak hanya berasal dari bentuk dan ukuran partikel, tetapi sebagian besar penguat berasal dari reaksi molekuler. Namun, partikel berukuran nano tidak selalu menghasilkan penguatan yang baik karena aglomerasi, tetapi kecenderungan ini secara praktis dapat diatasi sampai batas tertentu dengan memperlakukan pengisi sebelum pencampuran, sehingga memodifikasi karakteristik permukaannya secara molekuler kompatibel dengan polimer inang (Verma and Reddy, 2018).

Biaya produksi menjadi pertimbangan dalam memilih pengisi isolator polimer karena biaya yang relatif tinggi untuk pengisi berukuran nano, penggunaannya di pasar yang sangat kompetitif seperti isolasi luar ruangan sangat terbatas karena selalu mencari cara untuk mengurangi jumlah pengisi berukuran nano dan meningkatkan mikro. Jadi, sifat seperti ketahanannya terhadap peluahan sebagian dan busur pita kering biasanya diperoleh melalui pengisi non-penguat berukuran mikro, seperti tanah kuarsa atau alumina trihidrasi. Kombinasi pengisi mikro-nano merupakan cara yang layak untuk meningkatkan bahan insulasi luar ruangan (Verma and Reddy, 2018).

Studi ekstensif tentang peran pengisi, jenisnya, ukuran partikel, dan konsentrasinya, pada ketahanan erosi karet silikon yang terkena busur pita kering telah dilakukan sebelumnya, dengan banyak pekerjaan dilakukan pada pengisi berukuran mikro (Hamzah, Mariatti and Kamarol, 2018). Silika berasap berukuran nano telah banyak digunakan sebagai pengisi untuk penguatan fisik karet silikon.

Namun, karena kepentingan penguatan fisik, jumlah pengisi dibatasi kurang dari beberapa % berat (Verma and Reddy, 2018).

Tes *ASTM D2303* standar digunakan untuk mendapatkan kesetaraan dalam hal ketahanan terhadap erosi di bawah busur pita kering antara beban pengisi berukuran nano dan mikro dalam karet silikon. Dalam perbandingan ini, silika alami sebagai pengisi. Massa yang terkikis untuk sampel yang diuji di mana terbukti bahwa 10 wt% silika berukuran nano mencapai kinerja yang serupa dengan 50 wt% pengisi berukuran mikro. Juga, massa yang terkikis dari sampel karet silikon berisi 10 wt% berukuran mikro adalah sekitar satu urutan lebih tinggi dibandingkan dengan 10 wt% sampel berisi silika berukuran nano. Dibandingkan dengan pengisi berukuran mikro, pengisi berukuran nano biayanya terlalu mahal (*cost prohibited*) untuk digunakan sebagai isolasi luar ruangan. Beberapa perbandingan telah dibuat dengan menggabungkan pengisi berukuran mikro dan nano pada karet silikon (Verma and Reddy, 2018).

Jelas, dengan menggabungkan kedua pengisi berukuran mikro dan nano, peningkatan ketahanan terhadap ablasi (*ablastion*) panas diperoleh, tetapi ini hanya terjadi dengan dispersi yang baik dari pengisi berukuran nano. Formulasi komersial dari karet silikon vulkanisir suhu tinggi yang mengandung silika berukuran mikro dan nano untuk cetakan injeksi isolator telah dikembangkan. Dalam pekerjaan lain, *electrospinning* sebagai teknik untuk lebih meningkatkan dispersi pengisi berukuran nano telah menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap ablasi panas laser dari komposisi karet silikon (Verma and Reddy, 2018).

Hasil eksperimen karakteristik pelacakan dan ketahanan erosi telah dianalisis dalam  $\text{SiO}_2$  dengan pengisi berukuran nano dan SR berumur termal menggunakan pelacakan bidang miring dan uji ketahanan erosi (Du and Xu, 2014). Penampilan SR baru dan tua telah ditingkatkan dalam ketahanan erosi dan pelacakan ketika wt% pengisi ditingkatkan. Ketahanan terhadap pelacakan dan erosi berkurang secara signifikan pada spesimen SR yang berumur termal dibandingkan dengan spesimen yang masih baru. Spesimen SR juga dinilai dengan teknik analisis yang berbeda untuk memastikan sifat termal, fisik dan kimianya. Stabilitas termal spesimen SR baru dan berumur termal (*termal aging*) meningkat secara signifikan ketika wt% pengisi ditingkatkan dan hasil ini sangat sesuai dengan hasil uji bidang miring. Perubahan permukaan utama pada spesimen SR berumur termal diwujudkan dengan studi fisik. Investigasi EDS terhadap rasio C/Si dan O/Si mengkonfirmasi tingkat permukaan yang berubah pada spesimen SR yang berumur termal. Selain

itu, degradasi permukaan yang signifikan dari spesimen SR berumur termal dipastikan dengan analisis sifat kimia. Dapat dipastikan berdasarkan penelitian tersebut, pelacakan dan ketahanan erosi meningkat, dan penuaan termal ketika wt% pengisi nano ditingkatkan menyebabkan pengurangan ketahanan terhadap kinerja pelacakan dan erosi dari spesimen SR (Loganathan, Muniraj and Chandrasekar, 2014).

Pengaruh suhu terhadap pertumbuhan percabangan listrik dan aktivitas *PD* yang sesuai diselidiki pada karet silikon dengan berbagai tingkat kandungan pengisi nano oMMT. Kehadiran pengisi nano mengurangi ketergantungan suhu dari sifat-sifat kelistrikan material karet silikon sehingga aktivitas distribusi *PD* menjadi tidak sensitif terhadap perubahan suhu. Pengenalan pengisi nano 3 wt% oMMT menghambat inisiasi percabangan listrik pada kisaran suhu dengan interval 4 jam untuk setiap percobaan. Di bawah suhu tinggi, efek vulkanisasi berperan dalam memperkenalkan lebih banyak ikatan silang dalam rantai karet silikon. Oleh karena itu, di bawah suhu tinggi hingga 60 °C, percabangan listrik membutuhkan lebih banyak waktu untuk menyebar pada karet silikon RTV. Adanya gugus hidroksil pada permukaan nanopartikel menyebabkan terbentuknya ikatan hidrogen antara hidroksil dan oksigen dari tulang punggung siloksan dari material karet silikon. Ikatan hidrogen membantu memperkuat interaksi antara nanopartikel pada material polimer sehingga meningkatkan ikatan fisik. Ikatan ini meningkatkan sifat isolasi, sehingga menahan *PD*, percabangan listrik, dan degradasi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengisi nano oMMT *nanoclay* dapat digunakan sebagai bahan isolasi untuk meningkatkan ketahanan degradasi dari peluahan internal (Ahmad *et al.*, 2015).

## 1.2 Rumusan Masalah

Penelitian tentang kinerja isolator karet silikon khususnya sifat hidrofobik dan *PD* pada daerah beriklim tropis masih belum banyak dilakukan. Indonesia yang merupakan negara maritim dengan luas lautan 2/3 dari luas daratan, pertambangan, dan industri menghasilkan kontaminan dari garam dan polusi industri menjadi kendala serius dalam penerapan isolator polimer, selain itu kondisi cuaca dan iklim tropis memudahkan pertumbuhan mikroorganisme pada permukaan isolator yang dapat menyebabkan penurunan kinerja sifat hidrofobik isolator karet silikon. Penelitian karakteristik isolator karet silikon seperti sifat hidrofobik, arus bocor, *flashover* dan *PD* akan kami telitih penerapannya di daerah beriklim tropis sesuai

siklus iklim di Indonesia dengan memberikan berbagai tekanan elektromagnetik, iklim, dan polusi buatan yang dipercepat sesuai standar *IEC 1109* dan penelitian yang telah dilakukan baik dalam maupun luar negeri. Metode untuk mencegah pertumbuhan mikroorganisme dan pecabangan listrik, kinerja sifat hidrofobik, serta peningkatan *flashover*, tegangan tembus, peluahan sebagian, arus bocor, dan ketahanan terhadap radiasi UV isolator karet silikon masih sangat perlu diteliti untuk menghasilkan isolator polimer dengan kinerja terbaik dalam mengatasi kendala polusi dan iklim.

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

- 1) Bagaimana pengaruh komposisi material dan konsentrasi pengisi mikro-nano terhadap karakteristik fisik, listrik, dan kimia isolator karet silikon.
- 2) Bagaimana karakteristik fisik, listrik, dan kimia material isolator karet silikon dari pengaruh kelembaban, suhu, kontaminan, radiasi UV, dan iklim.
- 3) Bagaimana mempertahankan sifat hidrofobik, dan meningkatkan kemampuan *flashover*, tegangan tembus, dan peluahan sebagian isolator karet silikon.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Penelitian isolator polimer dengan rekayasa karet silikon terhadap komposisi dan konsentrasi pengisi bertujuan untuk :

- 1) Mengetahui pengaruh komposisi dan konsentrasi karet silikon dengan pengisi mikro-nano terhadap karakteristik fisik, listrik, dan kimia material isolator polimer.
- 2) Menganalisis kinerja difusi air, transfer hidrofobik, dan peluahan korona material isolator polimer dari pengaruh kelembaban, suhu, kontaminan, radiasi UV, dan iklim.
- 3) Mengembangkan metode mempertahankan sifat hidrofobik, dan peningkatan kinerja fisik, listrik, dan kimia isolator polimer untuk isolator tegangan tinggi.

### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat hasil penelitian ini diharapkan menjadi masukan data primer kepada pemangku kepentingan (*stakeholders*) ketenagalistrikan terutama perusahaan produsen dan penyedia tenaga listrik untuk daerah berpolusi berat dan beriklim tropis dalam hal:

- 1) Sebagai data primer oleh industri produsen isolator dalam memproduksi isolator karet silikon untuk daerah beriklim tropis seperti di Indonesia.
- 2) Bahan pertimbangan bagi pemegang kuasa usaha penyedia tenaga listrik dalam perencanaan, pembangunan, perluasan jaringan, dan peningkatan kapasitas jaringan transmisi, gardu induk dan distribusi, terutama sebagai solusi terhadap jaringan terbuka pada daerah yang berpolusi berat seperti pesisir pantai, area tambang/industri, dan daerah lembab.
- 3) Dapat menjadi referensi dalam rekayasa isolator karet silikon untuk menghindari kerusakan dan gangguan operasi sistem tenaga listrik.
- 4) Penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan studi bagi penelitian-penelitian lanjutan sejenis dalam bidang teknologi dan rekayasa isolator karet silikon.

### **1.5 Ruang Lingkup Penelitian**

Dengan pertimbangan waktu dan biaya penelitian maka ruang lingkup penelitian ini dilakukan yang berhubungan dengan:

- 1) Penelitian pengaruh komposisi dan konsentrasi pengisi mikro-nano SiO<sub>2</sub>, ATH, dan TiO<sub>2</sub> dengan material karet silikon RTV683, termasuk modul, alat, dan bahan pabrikan.
- 2) Analisis kinerja difusi air mencakup perlakuan pada suhu kamar, 50 °C dan 70 °C dengan pengujian sifat fisik, listrik dan kimia.
- 3) Analisis kinerja transfer hidrofobik mencakup perlakuan kontaminan pada suhu kamar, dan paparan radiasi UVa.
- 4) Analisis kinerja peluahan korona mencakup paparan korona dan pemulihan dalam kondisi suhu kamar.
- 5) Penelitian material isolator karet silikon dilakukan melalui rekayasa komposisi dan konsentrasi pengisi mikro-nano terbaik dengan material karet silikon untuk isolator tegangan tinggi.
- 6) Pengembangan kemampuan flashover, tegangan tembus, peluahan sebagian, dan sifat hidrofobik dengan melakukan rekayasa komposit, pengisi, dan pabrikan.
- 7) Penelitian terhadap sifat fisik, listrik, dan kimia material dilaksanakan dengan melakukan pengukuran sudut kontak, kapasitansi, resistansi, kekuatan tarik, kekasaran permukaan, flashover, tegangan tembus, peluahan sebagian, arus bocor, scanning electron microscopy (SEM) untuk memonitor perubahan morfologis, energy dispersive x-ray analysis (EDS) untuk mengamati



kehadiran unsur di atas permukaan, Fourier transform infra-red (FTIR) spectroscopy untuk menguji perubahan kimia dalam material.

## **BAB II**

### **KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN**

#### **2.1 Teori Isolator Polimer**

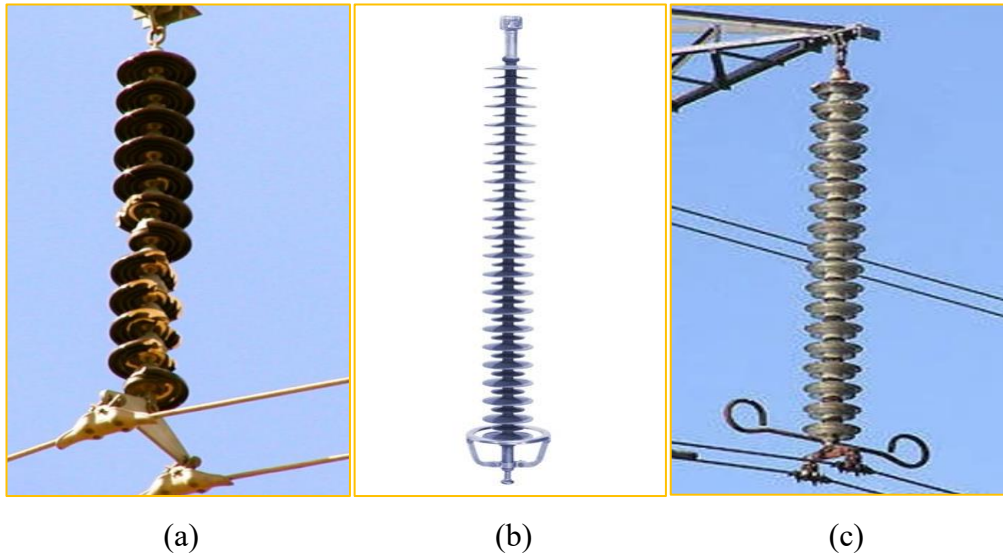
##### **2.1.1 Pengertian isolator polimer**

Polimer terdiri dari molekul yang sangat besar. Setiap molekul mengandung atom-atom yang tersusun satu demi satu seperti rantai. Susunan seperti rantai berulang dalam siklus yang teratur, sehingga struktur tersebut dapat ditulis sebagai segmen tertentu yang berulang  $n$  kali. Setiap polimer biasanya dinamai sesuai dengan bahan baku yang digunakan untuk membuatnya. Sebagai contoh: *Ethylene Polyethylene, Propylene Polypropylene, Ethylene + Propylene Ethylene Propylene Rubber, Dimethyldicloro Siloxane Dimethylsilane diol Polydimethyl siloxane*. Kata polimer adalah bahasa Yunani untuk banyak bagian, sehingga polietilen diterjemahkan menjadi banyak etilena (Bernstorff, Niedermier and Winkler, 2004).  $N$  dan  $m$  adalah ukuran berat molekul polimer. Biasanya, ketika  $n$  dan  $m$  kecil (berat molekul rendah) polimer menunjukkan sifat fisik yang rendah dan dalam beberapa kasus mungkin berupa cairan. Dengan meningkatnya  $n$  dan  $m$  (berat molekul meningkat), sifat fisik polimer meningkat. Seperti disebutkan di atas, polimer adalah molekul yang sangat besar, di mana dalam kasus EPR,  $n$  dan  $m$  dapat mencapai 1.000.000. Dalam hal karet silikon  $n$  berada di kisaran 3.000 hingga 10.000 (Bernstorff, Niedermier and Winkler, 2004).

Polimer adalah senyawa molekuler yang memiliki massa molar tinggi (berkisar dari ribuan hingga jutaan) dan terdiri dari sejumlah besar unit yang disebut monomer, yang diulang. Spesies ini disebut makromolekul karena memiliki karakteristik sebagai molekul besar yang memberikan kualitas unik dan sangat berbeda dari yang diamati lebih kecil, hanya disebabkan oleh jenis zat ini, seperti kecenderungan yang mereka miliki membentuk struktur kaca. Dengan cara yang sama, karena mereka termasuk dalam kelompok molekul yang sangat besar, kebutuhan muncul untuk memberi mereka klasifikasi, yang karenanya mereka dibagi menjadi dua jenis: polimer yang berasal dari alam, seperti karet, protein dan asam nukleat; dan yang diproduksi secara sintesis, seperti *nilon* atau *lucite*.

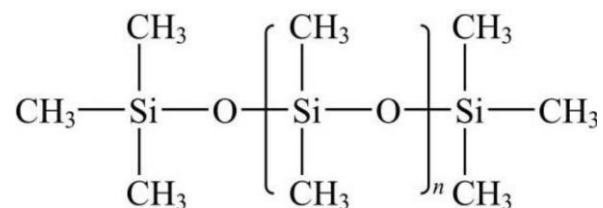
Isolator polimer adalah isolator yang dibuat dari susunan beberapa monomer untuk membentuk suatu isolator polimer dengan bentuk dan piringan (*shed*) sesuai dengan peruntukannya. Isolator polimer yang kami gunakan dalam penelitian ini adalah isolator polimer dari bahan dasar karet silikon RTV683 dengan pengisi

berukuran mikro/nano dari beberapa bahan pengisi seperti *silicon dioksida* ( $SiO_2$ ), *alumina trihydrate*  $Al(OH)_3$ , *titanium dioksida* ( $TiO_2$ ), dan *calcium carbonate* ( $CaCO_3$ ) yang disebut isolator karet silikon atau *silicon insulation rubber* (SiR) dan isolator polimer dari jenis elastomer berbagai bentuk piringan (Nandi, Subba Reddy and Sharma, 2019).



**Gambar 1.** Isolator transmisi tenaga listrik, (a) isolator kramik (b) isolator polimer, (c) isolator glas

Struktur kimia elastomer silikon terdiri dari tulang punggung ikatan dari bahan anorganik (silikon 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 suhu, kelembaban, hujan, dan radiasi ultraviolet dengan intensitas tinggi sebagaimana yang dijumpai di daerah beriklim tropis seperti di Indonesia. Terpaan iklim tropis secara simultan pada isolator polimer kemungkinan akan mengakibatkan degradasi sifat-sifatnya, yang ditandai dengan perubahan warna, penurunan berat, perubahan sifat dielektrik dan hilangnya sifat hidrofobik, meningkatkan arus bocor dan *flashover* yang terus meningkat hingga terjadi tegangan tembus. Selain itu penurunan kinerja peluahan sebagian isolator karet silikon yang dapat mempercepat penuan (Wallstro, 2005).



**Gambar 2.** Struktur kimia isolator karet silikon

Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap kinerja material isolasi polimer adalah cacat (*defect*). Cacat itu dapat timbul dalam bentuk rongga (*voids*), ketidakmurnian (*impurities*), dan tonjolan (*protrusion*) pada permukaan (*interface*) antara lapisan semikonduktor atau konduktor dengan isolasi polimer sehingga dapat meningkatkan tekanan (*stress*) medan elektromagnetik yang tinggi pada bagian yang cacat tersebut dalam penerapannya. Tekanan listrik yang terus-menerus akan mempercepat penuaan isolasi polimer dan merupakan awal *breakdown* pada isolasi polimer (Verma and Reddy, 2018).

### 2.1.2 Penggolongan polimer berdasarkan asalnya

Berdasarkan asalnya, polimer dapat dibedakan atas polimer alam dan polimer sintesis.

#### 1) Polimer Alam

Polimer alam adalah polimer yang terdapat di alam dan berasal dari makhluk hidup. Contoh polimer alam dapat dilihat pada tabel di bawah ini

**Tabel 1.** Contoh polimer alam

No	Polimer	Monomer	Polimerisasi	Contoh
1.	Pati/amilum	Glukosa	Kondensasi	Biji-bijian, akar umbi
2.	Selulosa	Glukosa	Kondensasi	Sayur, Kayu, Kapas
3.	Protein	Asam amino	Kondensasi	Susu, daging, telur, wol, sutera
4.	Asam nukleat	Nukleotida	Kondensasi	Molekul DNA dan RNA (sel)
5.	Karet alam	Isoprena	Adisi	Getah pohon karet

Sifat-sifat polimer alam kurang menguntungkan. Contohnya, karet alam kadang-kadang cepat rusak, tidak elastis, dan berombak. Hal tersebut disebabkan karena karet alam tidak tahan terhadap minyak bensin atau minyak tanah serta lama terbuka di udara. Contoh lain, sutera dan wol merupakan senyawa protein bahan makanan bakteri, sehingga wol dan sutera cepat rusak. Umumnya polimer alam mempunyai sifat hidrofilik, sukar dilebur, dan sukar dicetak, sehingga sangat sukar mengembangkan fungsi polimer alam untuk tujuan-tujuan yang lebih luas dalam kehidupan sehari-hari.

## 2) Polimer Sintesis

Polimer sintesis atau polimer buatan adalah polimer yang tidak terdapat di alam dan harus dibuat oleh manusia. Sampai saat ini, para ahli kimia polimer telah melakukan penelitian struktur molekul alam guna mengembangkan polimer sintesisnya. Dari hasil penelitian tersebut dihasilkan polimer sintesis yang dapat dirancang sifat-sifatnya, seperti tinggi rendahnya titik lebur, kelenturan dan kekerasannya, serta ketahanannya terhadap zat kimia. Tujuannya, agar diperoleh polimer sintesis yang penggunaannya sesuai yang diharapkan.

**Tabel 2.** Contoh polimer sintesis

No	Polimer	Monomer	Terdapat pada
1.	Polietena	Etena	Kantong, kabel plastik
2.	Polipropena	Propena	Tali, karung, botol plastik
3.	PVC	Vinil klorida	Pipa paralon, pelapis lantai
4.	Polivinil alcohol	Vinil alcohol	Bak air
5.	Teflon	Tetrafluoroetena	Wajan atau panci anti lengket
6.	Dakron	Metil tereftalat dan etilena glikol	Pipa rekam magnetik, kain atau tekstil (wol sintetis)
7.	Nilon	Asam adipat dan heksametilena diamin	Tekstil
8.	Polibutadiena	Butadiena	Ban motor
9.	Poliester	Ester dan etilena glikol	Ban mobil
10.	Melamin	Fenol formaldehida	Piring dan gelas melamin
11.	Epoksi resin	Metoksi benzena dan alcohol sekunder	Penyalut cat (cat epoksi)

Polimer sintesis yang telah dikembangkan guna kepentingan komersil, misalnya pembentukan serat untuk benang kain dan produksi ban yang elastis terhadap jalan raya. Ahli kimia saat ini sudah berhasil mengembangkan beratus-ratus jenis polimer sintesis untuk tujuan yang lebih luas.

### 2.1.3 Sifa-sifat polimer

#### a) Sifat Polimer dari Pengaruh Strukturnya

Polimer yaitu makro molekul yang terdiri atas banyak kelas material alami dan sintetik dengan sifat-sifat yang sangat beragam. Perbedaan kedua material

tersebut terletak pada mudah tidaknya sebuah polimer didegradasi atau dirombak oleh mikroba. Biasanya, polimer bahan sintetik akan lebih sulit diuraikan oleh mikroorganisme dibanding polimer bahan alami. Perbedaan sifat-sifat polimer tersebut dipengaruhi oleh struktur polimernya, yang meliputi :

**1) Panjang rantai polimer**

Semakin panjang rantai polimer, maka kekuatan dan titik leleh senyawanya semakin tinggi.

**2) Gaya antar molekul**

Semakin besar gaya antar molekul pada rantai polimer maka polimer akan menjadi kuat dan sukar meleleh.

**3) Percabangan**

Rantai polimer yang bercabang banyak mempunyai daya tegang rendah dan mudah meleleh.

**4) Ikatan silang antar rantai polimer**

Semakin banyaknya ikatan silang maka polimer semakin kaku dan rapuh sehingga mudah patah. Hal tersebut dikarenakan adanya Ikatan silang antar rantai polimer mengakibatkan terjadinya jaringan yang kaku dan membentuk bahan yang keras.

**5) Sifat kristalinitas rantai polimer**

Semakin tinggi sifat kristalinitas, rantai polimer akan lebih kuat dan lebih tahan terhadap bahan-bahan kimia dan enzim. Biasanya yang bersifat kristalinitas tinggi yaitu polimer dengan struktur teratur, sedangkan polimer berstruktur tidak teratur cenderung mempunyai kristalinitas rendah dan sifatnya amorf (*amorphous*).

**b) Sifat Polimer Secara Umum**

**1) Sifat termal**

Polimer sebagai isolator mempunyai sifat termal yang baik walaupun polimer bukanlah konduktor. Bila ditinjau dari jenisnya, polimer yang dipanaskan ada yang menjadi lunak namun ada pulak yang menjadi keras. Perubahan ini penting untuk bahan komponen tertentu.

**2) Sifat kelenturan**

Sifat lentur, sehingga polimer mudah diolah menjadi produk yang diinginkan. Tapi, polimer alam lebih mudah diolah sesuai keinginan dibandingkan polimer sintesis.

### 3) *Sifat ketahanan terhadap mikroorganisme*

Sifat ketahanan terhadap mikroorganisme ini biasanya dipunyai oleh polimer sintesis, sedangkan polimer alam seperti sutra, wol, dan polimer alam lainnya tidak tahan terhadap mikroorganisme.

### 4) *Sifat lainnya*

Sifat lain yang dipunyai polimer di antaranya, yakni sebagai berikut :

- Ringan, dalam artian rasio bobot/volume kecil;
- Tahan korosi dan kerusakan terhadap lingkungan yang agresif;
- Dimensinya stabil karena memiliki berat molekul besar; dan lainnya.

## 2.1.4 Karet silikon

Karet silikon (*silicone rubber*) mengandung tulang punggung silikon-oksigen berulang dan memiliki gugus metil organik yang melekat pada proporsi yang signifikan dari atom silikon oleh ikatan silikon karbon. Karet silikon diklasifikasikan sebagai senyawa organo-silikon. Hal ini disebabkan oleh ikatan yang sangat penting antara karbon (organik) dan silikon (anorganik). Karet silikon tidak anorganik karena tulang punggung silikon-oksigen, karet silikon tahan terhadap sinar matahari, panas dan fleksibel pada berbagai suhu. Tapi, tidak seperti tulang punggung EPR, ikatan silikon-oksigen rentan terhadap pembelahan heterolitik, yaitu, serangan oleh asam dan basa. Karet silikon memiliki sifat fisik yang rendah dibandingkan dengan bahan berbasis EPR. Karet silikon adalah bahan hidrofobik yang disebabkan oleh gugus organik yang melekat pada atom silikon. Karet silikon juga lebih dari 10 kali lebih permeabel terhadap kelembaban daripada karet EP. Seperti halnya EPR, banyak polimer silikon yang berbeda tersedia secara komersial, tetapi relatif sedikit yang cocok untuk aplikasi tegangan tinggi. Pengujian, analisis, dan evaluasi ekstensif diperlukan untuk memastikan kecocokan karakteristik material yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi (Bernstorff, Niedermier and Winkler, 2004).

*Silicone rubber* (SR) adalah hasil upaya berbagai perusahaan kimia di seluruh dunia untuk mencari bahan yang dapat menangani suhu ekstrem. Kemunculan pertama dari silikon elastomer datang pada tahun 1943 dan tersedia untuk konsumsi massal di seluruh dunia pada tahun 1947. Dalam beberapa dekade sejak debutnya, bahan silikon ini telah populer untuk digunakan dalam otomotif, penanganan makanan, elektronik, medis dan aplikasi konstruksi dan lain-lain. Karena karet silikon memiliki kisaran suhu kerja yang luas yang memungkinkannya menangani

suhu ekstrem tinggi dan rendah. Produk silikon juga menunjukkan tingkat ketahanan cuaca dan bahan kimia yang baik, menjadikannya ideal untuk berbagai keperluan di luar ruangan dan industri.

Silikon adalah bentuk karet yang sangat tahan lama. Faktanya, salah satu fitur unik dari karet silikon adalah dapat dibeli dalam berbagai macam durometer, atau kekerasan yang berbeda. Nilai durometer diberikan pada karet untuk menunjukkan kekerasan dan elastisitas produk yang berbeda. Karet silikon tersedia dalam durometer 40 A, 50 A, 60 A, dan 70 A. Karet silikon 40 A akan memiliki tingkat kelenturan yang lebih tinggi daripada versi 70 A yang jauh lebih keras. Memiliki produk silikon yang ditawarkan dalam berbagai format seperti ini memungkinkan bahan tersebut digunakan untuk berbagai aplikasi. Dikombinasikan dengan kemampuannya yang luar biasa untuk menahan suhu ekstrim, baik panas maupun dingin, berarti silikon dapat digunakan dalam pengaturan seperti gasket, peralatan laboratorium intensitas tinggi, bahan kompresi rendah, dan banyak lagi. Karet silikon juga memiliki keunggulan dibandingkan karet alam dalam bentuk suhu dan ketahanan kimiawi.

#### ***(a) Sifat fisik karet silikon***

Kisaran ketahanan suhu yang baik untuk berbagai kelas silikon. Karet silikon dibuat untuk bekerja dengan baik pada suhu ekstrim tinggi dan rendah. Ini adalah bahan yang umumnya stabil, dengan kisaran suhu dari  $-39,44\text{ }^{\circ}\text{C}$  hingga  $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kualitas ini membuat produk silikon ideal untuk digunakan dalam aplikasi yang melihat suhu sangat tinggi dan sangat rendah. Sifat suhu karet silikon yang mengesankan semakin ditingkatkan dengan kekuatan cuaca dan bahan kimia lainnya. Selain itu, penggunaan di luar ruangan elastomer silikon dapat menahan efek berbahaya dari elemen luar ruangan seperti ozon dan UV. Karet silikon merupakan bahan anorganik sehingga bahan organik berbahaya seperti jamur dan lumut tidak mudah terbentuk di permukaan dibandingkan dengan karet alami organik, karet silikon bertahan lebih lama saat terkena lingkungan.

#### ***(b) Sifat kimia karet silikon***

Elastomer sintesis pada awalnya dirancang untuk tahan terhadap bahan kimia, sebagai respons langsung terhadap ketidakmampuan karet alam. Sejak kedatangannya di pasaran, produk silikon telah digunakan dalam aplikasi yang melihat bahan kimia seperti asam asetat, gas amonia, natrium sulfat, dan banyak lagi. Karet silikon memiliki tingkat ketahanan kimia yang tinggi sehingga dapat



digunakan dalam lingkungan industri di mana bahan kimia digunakan atau disimpan.

Karet silikon dapat ditemukan secara alami sebagai elemen, namun sebagian besar bahan karet silikon yang digunakan dalam pengaturan komersial atau industri adalah buatan manusia. Karet silikon cair umumnya beracun bagi manusia, tetapi bahan karet silikon yang disetujui *Food and Drug Administration (21 CFR 177.2600)* dapat digunakan untuk memasak atau penyimpanan makanan. Silikon elastomer kelas *FDA* biasanya digunakan sebagai segel dalam aplikasi penanganan makanan karena dibuat dengan bahan yang sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh *FDA*. Selain itu, silikon digunakan dalam operasi kosmetik dalam bentuk implan, oleh karena itu aman untuk digunakan manusia selama digunakan secara eksternal. *FDA* memperingatkan bahwa karet silikon tidak boleh disuntikkan atau tertelan karena dapat menyebabkan masalah kesehatan serius yang dapat mengakibatkan kematian.

### **2.1.5 Keunggulan dan kelemahan isolator karet silikon**

Pada umumnya karet dan plastik sangat lemah, dan tidak tahan panas, tetapi lebih tahan terhadap HCl. Kecepatan korosi udara dimuka bumi ini sangat bervariasi tergantung kelembaban, suhu dan kontaminannya. Daerah sekitar pantai banyak mengandung garam-garam, terutama NaCl. Daerah industri banyak mengandung SO<sub>2</sub> dan sedikit H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> dan macam-macam garam tersuspensi. Oleh karena kondisi yang tidak sama tersebut, isolator polimer yang tahan iklim disuatu daerah, belum tentu tahan didaerah lain.

#### **1) Keunggulan Isolator Karet Silikon**

Isolator karet silikon dirancang dengan struktur yang kompak, kualitas tinggi dan berat adalah 1/10 dari porselen dan isolator kaca pada kelas yang sama, transportasi dan pemasangannya mudah. Sangat cocok untuk area kotor, beban tarik mekanis tinggi, bentang besar dan garis kompak. Tegangan *flashover* polusi meningkat 30% - 50% dibandingkan dengan porselen dan isolator gelas dengan *grade* yang sama. Kinerja stabil pada suhu lingkungan -60 °C ~ +200 °C, dan desain *non-breakdown* digunakan, dan tidak memerlukan pemeliharaan dalam operasi:

(1) Kinerja kontaminan yang sangat baik. Permukaan bahan isolator karet silikon tidak hanya hidrofobik dalam waktu baru, tetapi juga dalam kondisi operasi sirkuit, ketika hidrofobisitas hilang sementara, tetapi juga dapat mengembalikan hidrofobisitasnya. Air membentuk tetesan air pada permukaan material, dan lapisan

sangat tipis cairan karet silikon secara substansial menelan limbah, sehingga menghambat pembubaran spesies ionik dalam air, memberikan ketahanan permukaan yang sangat tinggi, dan mengurangi kebocoran arus dan meningkatkan tegangan *flashover*. Akibatnya, keandalan transmisi energi listrik dapat ditingkatkan dan biaya pembersihan dan perawatan isolator jelas berkurang; (2) Ketahanan yang sangat baik terhadap sinar ultraviolet, tahan korosi, dan tidak memerlukan daur ulang limbah; (3) Ukuran kecil, ringan 110 kV/100 kN berat batang isolator komposit panjang hanya 12 % dari isolator porselen 70 kN yang sesuai. Bobot yang ringan ini sangat menghemat biaya pemasangan dan transportasi. Itu cenderung bebas dari crane dan sangat cocok untuk pemasangan dan pemeliharaan perbaikan darurat garis dan jalur pegunungan yang tidak dapat diakses. Ini juga dapat menyederhanakan struktur menara dan memungkinkan mengurangi jumlah kutub rentang yang lebih besar, dan pengembangan saluran kompak; (4) Waktu produksi dan pengiriman jauh lebih pendek daripada isolator porselen; (5) Tidak memerlukan deteksi nilai resistansi isolasi; (6) Tidak ada cacat getas fitur yang tidak konduktif untuk instalasi dan transportasi, juga lebih toleran terhadap busur api daripada isolator porselen.

Performa listrik yang luar biasa dan kekuatan mekanik yang tinggi. Kekuatan tarik batang gelas epoksi beban internal 2 kali lebih tinggi daripada baja biasa, yaitu 8~10 kali lebih tinggi daripada kekuatan bahan porselen, yang secara efektif meningkatkan keandalan operasi yang aman. Kinerja anti-fouling yang baik, flash anti-polusi yang kuat, dan tegangan tahan basah dan tegangan tahan polusi adalah 2~2,5 kali daripada insulator porselen rambat yang sama. Tidak perlu dibersihkan, bisa beroperasi dengan aman pada polusi berat. Ukuran kecil dan ringan (hanya 1/6~1/9 dari isolator porselen pada tegangan yang sama). Struktur yang ringan untuk transportasi dan pemasangan yang mudah.

Karet silikon memiliki sifat hidrofobik yang baik, dan struktur keseluruhan bagian dalam isolasi terlindung dari kelembaban, tidak diperlukan uji pemantauan isolasi preventif, tidak diperlukan pembersihan, dan beban kerja perawatan harian berkurang. Memiliki kinerja isolasi yang baik dan ketahanan yang kuat terhadap korosi listrik. Memiliki ketahanan terhadap kebocoran dan mencapai level *TMA4.5*. Ini memiliki ketahanan penuaan yang baik, ketahanan korosi dan tahan suhu rendah yang dapat digunakan di area  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Memiliki ketahanan benturan yang kuat dan tahan guncangan, anti-rapuh dan ketahanan mulurnya baik, tidak mudah patah, anti lentur, kekuatan torsional yang

tinggi, dapat menahan tekanan internal, tahan ledakan yang kuat, dapat ditukar dengan isolator porselen dan kaca. Produk seri isolator silikon komposit lebih unggul daripada isolator porselen dalam hal sifat mekanik dan listrik, dan memiliki margin keselamatan operasional yang besar yang merupakan produk yang baru untuk saluran listrik.

## 2) *Kelemahan Isolator Karet Silikon*

Insiden kerusakan batang inti isolator polimer menimbulkan ancaman serius terhadap operasi saluran transmisi yang aman dan stabil. Dalam kombinasi dengan 220 kV saluran insulator komposit insiden batang inti fraktur, inspeksi visual, uji kinerja, inspeksi anatomi dan uji bahan isolator yang rusak dan batch produk yang sama dilakukan, dan penyebab serta mekanisme batang inti isolator fraktur dianalisis.



**Gambar 3.** Kerusakan batang inti isolator polimer

Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur ujung isolator memiliki cacat dan kinerja penyegelan yang buruk, yang menyebabkan serat kaca mandrel korosi dengan larutan asam dan secara bertahap menghasilkan proses korosi. Di bawah aksi bersama korosi asam lemah dan stres, sifat mekanik terus berkurang. Mandrel rusak, mengingat fenomena fraktur mandrel rapuh dan sifat mekanis jangka panjang yang buruk, direkomendasikan untuk mengganti insulator komposit struktur baji menjadi struktur *batch crimping*, dan memperkuat penyegelan fitting akhir dan selubung, dan penggunaan serat bebas boron. Batang inti tahan asam.

## 2.2 Bahan dan Desain Material Isolator Polimer

### 2.2.1 Karet silikon RTV683

Karet silikon (*silicone rubber RTV683*) merupakan salah satu polimer sintesis dalam bentuk resin cair yang dapat diperoleh pada toko bangunan dan peralatan

medis. *Silicone rubber RTV683* (disingkat SR) sangat cocok digunakan untuk membuat segala macam cetakan (*mold*) dengan tingkat kesulitan tinggi. Selain itu karet silikon banyak diteliti untuk keperluan isolasi tenaga listrik, dengan melakukan rekayasa bahan adaptif untuk meningkatkan kinerja sesuai kebutuhannya.

Polimer sintesis atau polimer buatan adalah polimer yang tidak terdapat di alam dan harus dibuat oleh manusia. Sampai saat ini, para ahli kimia polimer telah melakukan penelitian struktur molekul alam guna mengembangkan polimer sintesisnya. Dari hasil penelitian tersebut dihasilkan polimer sintesis yang dapat dirancang sifat-sifatnya, seperti tinggi rendahnya titik lebur, kelenturan dan kekerasannya, serta ketahanannya terhadap zat kimia. Tujuannya, agar diperoleh polimer sintesis yang penggunaannya sesuai yang diharapkan.



**Gambar 4.** Resin karet silikon RTV683

Karet silikon mengandung tulang punggung silikon-oksigen berulang dan memiliki gugus metil organik yang melekat pada proporsi yang signifikan dari atom silikon oleh ikatan silikon karbon. Karet silikon diklasifikasikan sebagai senyawa organo-silikon. Hal ini disebabkan oleh ikatan yang sangat penting antara karbon (organik) dan silikon (anorganik). Karet silikon tidak anorganik karena tulang punggung silikon-oksigen, karet silikon tahan terhadap sinar matahari, panas, dan fleksibel pada berbagai suhu. Karet silikon memiliki sifat fisik yang rendah dibandingkan dengan bahan berbasis EPR. Karet silikon adalah bahan hidrofobik. Ini disebabkan oleh gugus organik yang melekat pada

atom silikon. Banyak polimer silikon yang berbeda tersedia secara komersial, tetapi relatif sedikit yang cocok untuk aplikasi tegangan tinggi. Pengujian, analisis, dan evaluasi ekstensif diperlukan untuk memastikan kecocokan karakteristik material yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi (Bernstorff, Niedermier and Winkler, 2004).

Polimer sintesis yang telah dikembangkan guna kepentingan komersil seperti RTV48, RTV52, dan RTV 683, dan masih banyak lainnya. Ahli kimia saat ini sudah berhasil mengembangkan beratus-ratus jenis polimer sintesis untuk tujuan yang lebih luas. Salah satu dari jenis polimer yang kami gunakan dalam penelitian ini adalah *silicone rubber RTV683* dengan melakukan rekayasa komposisi dan konsentrasi pengisi dalam meningkatkan kinerja fisik, listrik, dan kimia untuk isolator listrik tegangan tinggi.

Kelebihan komposit karet silikon RTV683 yang dapat dimanfaatkan sebagai isolator listrik, yaitu :

1. Dapat mencetak seluruh motif dari model dengan sempurna, bahkan dengan motif yang rumit sekalipun.
2. *Mold* lebih mudah dilepas dari modelnya, karena ada tambahan *release agent* atau dilapisi kertas adhesive.
3. Dapat digunakan untuk reproduksi dengan jumlah lebih banyak karena lebih tahan terhadap bahan reproduksi.

Secara umum cara pembuatan material isolator listrik dengan komposite karet silikon RTV 683, yaitu :

1. Siapkan model yang akan dibuat duplikatnya terlebih dahulu. Model bisa terbuat dari apa saja, misalnya : lilin, plaster, beton, resin, kayu, logam, plastik, porselain, keramik, kaca, batu alam, maupun dari bahan karet silikon itu sendiri. Kemudian model dibersihkan, bagian model yang rusak ditutup dengan pengisi (*plasticine*). Model yang terbuat dari kaca/porselain/karet silikon harus dioles dengan vaseline atau sabun cair sebelum digunakan.
2. Siapkan kotak / tempat untuk menuang karet silikon RTV683. Bila ada rongga, tutup dengan *plasticine*. Kemudian letakkan model di bagian tengah.
3. Aduk karet silikon RTV683 sebelum digunakan dan kocok botol katalisator. Timbang karet silikon RTV683 dan katalisator dengan tepat. Pemakaian katalisator sebesar 3-4%. Misal : Karet silikon RTV683 sebanyak 1 kg, maka katalisator yang digunakan sebanyak 30-40 gram. Semakin banyak

katalisator (*catalyst*) yang digunakan, maka karet silikon akan semakin cepat mengeras (*cured*), tapi akan mengurangi kualitas dari karet silikon tersebut. Jadi katalisator yang terlalu banyak akan mengurangi kualitas cetakan.

4. Aduk rata karet siliko RTV 683 dengan katalisator.

### 2.2.2 Silikon dioksida (SiO<sub>2</sub>)

Silikon dioksida, juga dikenal sebagai silika, adalah oksida silikon dengan rumus kimia SiO<sub>2</sub>, paling umum ditemukan di alam sebagai kuarsa atau pasir dan di berbagai organisme hidup. Kuarsa adalah satu-satunya polimorf silika yang stabil di permukaan bumi. Kejadian metastabil dari bentuk tekanan tinggi *coesite* dan *stishovite* telah ditemukan di sekitar struktur benturan dan terkait dengan *eklogit* yang terbentuk selama metamorfosis tekanan ultra-tinggi. Bentuk *tridimit* dan *kristobalit* bersuhu tinggi diketahui dari batuan vulkanik yang kaya silika. Di banyak belahan dunia, silika adalah penyusun utama pasir. Silika adalah salah satu kelompok bahan yang paling kompleks dan paling melimpah sebagai senyawa dari beberapa mineral dan sebagai produk sintesis. Berbagai bentuk silikon dioksida dapat diubah ke bentuk lainnya dengan pemanasan dan perubahan tekanan. Contoh penting termasuk kuarsa leburan, silika berasap, silika gel, dan *aerogel*. Ini digunakan dalam bahan struktural, mikro elektronika sebagai isolator listrik, dan sebagai komponen dalam industri makanan dan farmasi. Silikon dioksida (SiO<sub>2</sub>) tersedia dalam bentuk bubuk halus (nano) dengan ukuran partikel kurang dari 150 nm. Silikon dioksida (SiO<sub>2</sub>) yang kami gunakan dalam penelitian ini ada 2 dimensi yaitu SiO<sub>2</sub> ukuran mikro dan nano dengan spesifikasi

Nama produk	: <i>Silikon dioxide</i>
Nama kimia	: <i>Silikon dioxide</i>
Rumus kimia	: SiO <sub>2</sub>
Titik lebur	: 1713 °C
Titik didih	: 2230 °C
Titik nyala	: 2230 °C
Massa molar	: 60,08 g/mol
Kepadatan	: 2,56 g/cm <sup>3</sup>
Permitivitas relatif	: 3,9
Penggunaan	: <i>Saintific research and depelopment</i>

Silikon dioksida tersedia dalam bentuk bubuk halus (nano) dengan ukuran partikel kurang dari 150 nm. Menghirup silika kristal yang halus bersifat racun dan dapat menyebabkan peradangan pada paru-paru, silikosis, bronkitis, kanker paru-paru, dan penyakit autoimun sistemik, seperti lupus dan artritis reumatoid. Menghirup silikon dioksida amorf dalam dosis tinggi menyebabkan peradangan jangka pendek tidak permanen dan dapat sembuh.

#### **a) Struktur**

Silikon dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) memiliki sejumlah bentuk kristal yang berbeda (polimorf) selain bentuk amorf. Dengan pengecualian *stishovite* dan *fibrous silica*, semua bentuk kristal melibatkan unit  $\text{SiO}_4$  tetrahedral yang dihubungkan bersama oleh simpul bersama. Panjang ikatan silikon-oksigen bervariasi antara berbagai bentuk kristal; misalnya panjang ikatannya 161 pm pada  $\alpha$ -kuarsa, sedangkan pada  $\alpha$ -tridymite panjang ikatannya berkisar 154~171 pm. Sudut Si-O-Si juga bervariasi antara nilai rendah  $140^\circ$  pada  $\alpha$ -tridimit, hingga  $180^\circ$  pada  $\beta$ -tridimit, serta  $144^\circ$  pada  $\alpha$ -kuarsa.

Silika berserat memiliki struktur yang mirip dengan  $\text{SiS}_2$  dengan rantai tetrahedra  $\text{SiO}_4$  yang berbagi tepi. Sebaliknya, *stishovite*, bentuk bertekanan tinggi, memiliki struktur seperti rutil di mana silikon berkoordinasi 6. Densitas *stishovite* adalah  $4,287 \text{ g/cm}^3$ , dibandingkan dengan  $\alpha$ -kuarsa, bentuk tekanan rendah yang paling padat, yang memiliki massa jenis  $2,648 \text{ g/cm}^3$ . Perbedaan densitas dapat dianggap berasal dari peningkatan koordinasi karena panjang ikatan Si-O terpendek dalam *stishovite* (empat panjang ikatan Si-O 176 pm dan dua lainnya 181 pm) lebih besar daripada panjang ikatan Si-O (161 pm) dalam  $\alpha$ -kuarsa. Perubahan koordinasi meningkatkan ionisitas ikatan Si-O. Lebih penting lagi, setiap penyimpangan dari parameter standar ini merupakan perbedaan atau variasi mikrostruktur, yang mewakili pendekatan pada padatan amorf, *vitreous*, atau kaca.

Satu-satunya bentuk stabil dalam kondisi normal adalah  $\alpha$ -kuarsa, di mana silikon dioksida kristal biasanya ditemukan. Di alam, pengotor dalam kristal  $\alpha$ -kuarsa dapat menimbulkan warna. Mineral bersuhu tinggi, kristobalit dan tridimit, memiliki kepadatan dan indeks refraksi yang lebih rendah daripada kuarsa. Karena komposisinya identik, alasan perbedaan harus ada pada peningkatan jarak dalam mineral bersuhu tinggi. Seperti umumnya dengan banyak zat, semakin tinggi suhunya, semakin jauh jarak atom karena energi getaran meningkat. Transformasi dari  $\alpha$ -kuarsa menjadi  $\beta$ -kuarsa terjadi secara tiba-tiba pada suhu  $573^\circ\text{C}$ . Karena transformasi disertai dengan perubahan volume yang signifikan, transformasi dapat

dengan mudah menyebabkan rekahan keramik atau batuan yang melewati batas suhu ini.

Mineral bertekanan tinggi, *seifertit*, *stishovite*, dan *coesite*, memiliki kepadatan dan indeks refraksi yang lebih tinggi daripada kuarsa. Hal ini mungkin disebabkan oleh kompresi kuat atom yang terjadi selama pembentukannya, sehingga menghasilkan struktur yang lebih padat. *Faujasite-silica* adalah bentuk lain dari silika kristal. Ini diperoleh dengan *dealuminasi zeolit* yang sangat stabil dan rendah natrium dengan kombinasi asam dan perlakuan termal. Produk yang dihasilkan mengandung lebih dari 99% silika, dan memiliki kristalinitas tinggi dan luas permukaan (lebih dari 800 m<sup>2</sup>/g). *Faujasite-silica* memiliki stabilitas panas dan asam yang sangat tinggi. Misalnya, ia mempertahankan tingkat tinggi dari tatanan molekul atau kristalinitas jarak jauh bahkan setelah mendidih dalam asam klorida pekat.

Silika cair menunjukkan beberapa karakteristik fisik yang mirip dengan yang diamati dalam cairan : ekspansi suhu negatif, kepadatan maksimum pada suhu ~5000 °C, dan kapasitas panas minimum. Kepadatannya menurun dari 2,08 g/cm<sup>3</sup> pada 1950 °C menjadi 2,03 g/cm<sup>3</sup> pada 2200 °C.

Molekul SiO<sub>2</sub> dengan struktur linier dihasilkan ketika molekul silikon monoksida SiO, dikondensasi dalam material argon yang didinginkan dengan helium bersama dengan atom oksigen yang dihasilkan oleh pelepasan gelombang mikro. Silikon dioksida dimerik (SiO<sub>2</sub>)<sub>2</sub> dibuat dengan mereaksikan O<sub>2</sub> dengan material silikon monoksida dimer yang diisolasi (Si<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Dalam silikon dioksida dimer ada dua atom oksigen yang menjembatani antara atom silikon dengan sudut Si-O-Si 94 ° dengan panjang ikatan 164,6 pm dan panjang ikatan Si-O terminal adalah 150,2 pm. Panjang ikatan Si-O adalah 148,3 pm, dibandingkan dengan panjang 61 pm dalam α-kuarsa. Energi ikatan diperkirakan 621,7 kJ/mol.

### **b) Penggunaan**

Penggunaan struktural, sekitar 95 % dari penggunaan komersial silikon dioksida (pasir) terjadi di industri konstruksi, misalnya untuk produksi beton semen Portland. Endapan tertentu dari pasir silika, dengan ukuran dan bentuk partikel yang diinginkan serta tanah liat yang diinginkan dan kandungan mineral lainnya, penting untuk pengecoran pasir produk logam. Titik leleh silika yang tinggi memungkinkannya digunakan dalam aplikasi seperti pengecoran besi; pengecoran pasir modern terkadang menggunakan mineral lain untuk alasan lain.

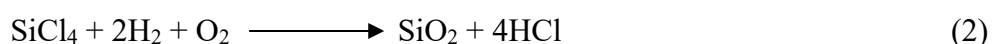


Silika kristal digunakan dalam rekahan hidraulik pada formasi yang mengandung minyak padat dan gas serpih. Prekursor kaca dan silikon, Silika adalah bahan utama dalam produksi sebagian besar kaca. Saat mineral lain dilebur dengan silika, prinsip Depresi Titik Beku menurunkan titik leleh campuran dan meningkatkan fluiditas. Suhu transisi gelas SiO<sub>2</sub> murni sekitar 1475 K. Ketika silikon dioksida SiO<sub>2</sub> cair didinginkan dengan cepat, ia tidak mengkristal, tetapi mengeras sebagai kaca. Karena itu, sebagian besar glasir keramik memiliki silika sebagai bahan utamanya.

Geometri struktural silikon dan oksigen dalam kaca mirip dengan geometri pada kuarsa dan kebanyakan bentuk kristal silikon dan oksigen lainnya dengan silikon yang dikelilingi oleh tetrahedra pusat oksigen. Perbedaan antara kaca dan bentuk kristal muncul dari konektivitas unit tetrahedral. Silikon dioksida digunakan untuk menghasilkan unsur silikon. Prosesnya melibatkan reduksi karbotermik dalam tungku busur listrik.



*Silica fume* adalah bubuk ultra halus yang dikumpulkan sebagai produk sampingan dari produksi paduan silikon dan *ferrosilicon*. Ini terdiri dari partikel bola amorf (non-kristal) dengan diameter partikel rata-rata 150 nm, tanpa percabangan produk pirogenik (Loganathan, Muniraj and Chandrasekar, 2014). Penggunaan utamanya adalah sebagai material *pozzolanic* untuk beton performa tinggi. *Silica fume*, juga dikenal sebagai silika pirogenik, dibuat dengan membakar SiCl<sub>4</sub> dalam api hidrogen yang kaya oksigen untuk menghasilkan "asap" dari SiO<sub>2</sub>.



Itu juga dapat diproduksi dengan menguapkan pasir kuarsa dalam busur listrik 3000 °C. Kedua proses tersebut menghasilkan tetesan mikroskopis silika amorf yang menyatu menjadi partikel sekunder tiga dimensi yang bercabang, seperti rantai, yang kemudian menggumpal menjadi partikel tersier, bubuk putih dengan kerapatan curah yang sangat rendah (0,03-0,15 g/cm<sup>3</sup>) dan dengan demikian luas permukaan tinggi. Partikel bertindak sebagai agen pengental thixotropic, atau sebagai agen anti-penggumpalan, dan dapat diolah untuk membuatnya hidrofilik atau hidrofobik untuk aplikasi air atau cairan organik.

Silika hidrofobik digunakan sebagai komponen penghilang busa. Dalam kapasitasnya sebagai bahan tahan api, ini berguna dalam bentuk serat sebagai pelindung termal suhu tinggi. Silika digunakan dalam ekstraksi DNA dan RNA karena kemampuannya untuk mengikat asam nukleat di bawah keberadaan

*chaotrop*. *Aerogel* silika digunakan di pesawat ruang angkasa Stardust untuk mengumpulkan partikel luar angkasa. Silika murni (silikon dioksida), bila didinginkan sebagai kuarsa leburan menjadi kaca tanpa titik leleh yang sebenarnya, dapat digunakan sebagai serat kaca untuk fiberglass.

### 2.2.3 Alumina trihidrat (ATH)

Produksi tahunan *alumina trihydrate*  $\text{Al}(\text{OH})_3$  adalah sekitar 100 juta ton yang hampir semuanya diproduksi melalui proses bayer. Proses bayer melarutkan bauksit (*aluminium ore*) dalam natrium hidroksida pada suhu tinggi. Alumina trihidrat kemudian dipisahkan dari padatan yang tersisa setelah proses pemanasan. Padatan yang tersisa setelah *alumina trihydrate* dihilangkan sangat beracun dan menimbulkan masalah lingkungan.

Aplikasi, lebih dari 90 % dari semua alumina trihidrat yang diproduksi diubah menjadi *aluminium oxide* (alumina) yang digunakan untuk memproduksi aluminium. Sebagai penghambat api, alumina trihidrat secara kimiawi ditambahkan ke molekul polimer atau dicampur dengan polimer untuk menekan dan mengurangi penyebaran api melalui plastik.

*Alumina trihydrate* (ATH) memiliki sejumlah nama umum yang digunakan di seluruh industri kimia yang meliputi: *hidrat alumina*, *alumina hidrat*, *aluminium trihidroksida*, *ATH*, *aluminium hidrat* dan *aluminium hidroksida*. Alumina trihidrat adalah zat padat berwarna putih, tidak berbau, berbentuk tepung. Alumina trihidrat menunjukkan kelarutan yang sangat rendah dalam air tetapi dianggap *amfoter*, artinya ia akan larut dalam asam atau alkali kuat. Penggunaan alumina trihidrat yang paling umum adalah untuk produksi logam aluminium. Ini juga digunakan sebagai pengisi penghambat api dan penekan asap dalam polimer seperti produk karet dan alas karpet.

Alumina trihidrat tersedia dalam berbagai tingkatan digunakan sebagai bahan vulkanisir dan faktor pengawet di unit pengolahan karet. Bahan kimia ini juga digunakan untuk menghasilkan pigmen berbasis titanium dioksida. Ini memiliki atribut pemadam asap tinggi yang membuatnya menjadi bahan tahan api yang ideal. Kandungan racun bentuk bebas, bahan kimia ini digunakan sebagai bagian tak terpisahkan dari kabel dan kabel PVC dan PU untuk kapasitas pencegahan asapnya.

*Alumina trihydrate* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) adalah penghambat api yang paling banyak digunakan di dunia karena keserbagunaan dan biaya rendah. Tersedia dalam berbagai ukuran partikel, dapat digunakan dalam berbagai macam polimer pada

suhu pemrosesan di bawah 220 °C. ATH tidak beracun, bebas halogen, inert kimiawi, dan memiliki abrasivitas rendah. Manfaat tambahannya adalah ketahanan busur dan lintasan dalam plastik yang terkena busur listrik, tahan asam, dan penekan asap. Pada suhu sekitar 220 °C, ATH mulai membusuk secara endotermis dan melepaskan sekitar 35 % dari beratnya sebagai uap air.



Alumina trihidrat bertindak sebagai *heat sink* sehingga memperlambat proses pirolisis dan mengurangi laju pembakaran. Uap air yang dilepaskan memiliki efek tambahan untuk mengencerkan gas pembakaran dan asap beracun (Deng, Hackam and Cherney, 1995).

Sebelum diskusi hasil yang diperoleh deskripsi singkat alumina trihidrat tampak appropriate. Tes berikut, pada dasarnya, didasarkan pada karya E.A. Woycheshin dan I. Soblev. Alumina trihidrat adalah pengisi mineral yang menawarkan keuntungan dari retardasi api dan suspensi asap di sebagian besar aplikasi plastik. Selain itu, sebagai pengisi dalam isolator polimer, ia memberikan manfaat tambahan dari ketahanan busur dan lintasan. Ini tersedia dalam sejumlah tingkatan, yang mengandung berbagai jumlah pengotor dan berbagai ukuran diameter partikel rata-rata dari bahan kasar (>45 µm) hingga produk yang sangat halus kurang dari satu mikron (<1 µm). Dalam komposisinya, alumina trihidrat sebenarnya bukan hidrat, melainkan alumina hidroksida kriristalin, Al(OH)<sub>3</sub>. Alumina trihidrat larut dalam air dan tidak dapat larut. Pada pemanasan sampai suhu 220 °C alumina trihidrat terurai secara endotermik menjadi alumina dan air sesuai persamaan.



Nilai alumina trihidrat silan yang dirawat juga tersedia secara komersial untuk tujuan referensi, kelas ATH yang tersedia secara komersial dianalisis menggunakan FTIR. Dari spektrum terbukti bahwa aluminium trihidrat intensitas penyerapan di daerah 3700 ~ 3200 cm<sup>-1</sup> dengan puncak jarak dekat 3620 cm<sup>-1</sup>, 3530 cm<sup>-1</sup>, 3450 cm<sup>-1</sup>, dan 3390 cm<sup>-1</sup>. Penyerapan lemah terjadi sekitar 1635 cm<sup>-1</sup>. Selain itu, spektrum FTIR alumina trihidrat menunjukkan penyerapan yang kuat dekat 1040 cm<sup>-1</sup>, 795 cm<sup>-1</sup>, dan 740 cm<sup>-1</sup> dan penyerapan sedang pada 965 cm<sup>-1</sup> dan 910 cm<sup>-1</sup>, masing-masing. Sesuai dengan temuan F.Scholl.

Spesifikasi aluminium trihidrate Al(OH)<sub>3</sub> yang kami gunakan dalam penelitian ini adalah :

Nama produk : *Aluminium trihydrate*

Nama kimia	: <i>Aluminium hydroxide</i>
Rumus kimia	: $\text{Al}(\text{OH})_3$
Titik leleh	: 300 °C
Titik didih	: 2500 ~ 3000 °C
Titik nyala	: 2500 ~ 3000 °C
Massa molar	: 79,89 g/mol
Kepadatan	: 2,42 g/cm <sup>3</sup>
Permitivitas relatif	:
Penggunaan	: <i>Saintific research and depelopment</i>

#### 2.2.4 Titanium dioksida (TiO<sub>2</sub>)

Titanium adalah salah satu logam paling umum di bumi, tetapi tidak terjadi secara alami dalam bentuk unsur ini. Titanium dioksida (TiO<sub>2</sub>) dikenal sebagai titanium (IV) oksida atau titania adalah senyawa alami yang dibuat saat titanium bereaksi dengan oksigen di udara. Sebagai oksida, titanium ditemukan dalam mineral di kerak bumi. Itu juga ditemukan dengan elemen seperti senyawa dari *ilmenit*, *rutil*, dan *anatase*, termasuk kalsium dan zat besi. Rumus kimianya adalah TiO<sub>2</sub>, yang berarti terdiri dari satu atom titanium dan dua atom oksigen. Ia memiliki nomor registrasi CAS (*Chemical Abstracts Service*) 13463-67-7. TiO<sub>2</sub> biasanya dianggap inert secara kimiawi, artinya tidak bereaksi dengan bahan kimia lain dan zat stabil, oleh karena itu dapat digunakan di banyak industri berbeda untuk berbagai aplikasi.

Titanium dioksida dimanfaatkan secara luas untuk berbagai keperluan seperti cat, pelindung sinar matahari, dan pewarna makanan. Apabila digunakan sebagai pigmen, senyawa ini disebut putih titanium, *pigment white 6 (PW6)* atau *CI 77891*. Adapun sebagai pewarna makanan, senyawa ini memiliki nomor *EE171*. Pada tahun 2014, senyawa ini diproduksi sebanyak lebih dari 9 juta metrik ton di seluruh belahan dunia. Produk ini berbentuk bubuk, memiliki kualitas stabil yang tinggi, dan diterima secara luas di Eropa, AS, Asia Tenggara, Afrika, dan Timur Tengah. Dapat diaplikasikan pada pengecatan & pelapisan (*painting & coating*), konstruksi, keramik, tinta, plastik (*plastic*), karet (*rubbers*), kulit (*leather*), kertas, kosmetik, dan lain-lain.

TiO<sub>2</sub> mempunyai tiga jenis bentuk kristal diantaranya: rutil (*tetragonal*), anatase (*tetragonal*), dan brookite (*ortorombik*). Diantara ketiganya, TiO<sub>2</sub> kebanyakan berada dalam bentuk rutil dan anatase dimana kedua bentuk ini

mempunyai struktur tetragonal. Secara termodinamik struktur kristal anatase lebih stabil dibandingkan rutile.

Titanium dioksida adalah senyawa anorganik putih, yang telah digunakan selama sekitar 100 tahun dalam berbagai produk yang beragam. Sifatnya yang tidak beracun, tidak reaktif dan bercahaya, yang dapat meningkatkan putih dan kecerahan banyak bahan. Saat digunakan sebagai pelapis cat di bagian luar bangunan di iklim hangat dan tropis, kualitas  $\text{TiO}_2$  yang putih dan menyerap cahaya dapat menghemat energi karena mengurangi kebutuhan AC. Sebagai nanomaterial, ini juga dapat digunakan sebagai katalis DeNOx penting dalam sistem gas buang untuk mobil, truk dan pembangkit listrik, sehingga meminimalkan dampak lingkungannya.

Sifat fisik titanium dioksida yaitu :

- a) Titanium dioksida memiliki sejumlah karakteristik unik yang membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi.
- b) Titanium dioksida memiliki massa molar : 79,866 g/mol, kepadatan: 4,23 g/cm<sup>3</sup>, titik leleh 1.843 °C dan titik didih 2.972 °C, sehingga terjadi secara alami sebagai padatan, dan bahkan dalam bentuk partikelnya, ia tidak larut dalam air.  $\text{TiO}_2$  juga merupakan isolator.
- c) Tidak seperti bahan putih lainnya yang mungkin tampak agak kuning dalam cahaya karena  $\text{TiO}_2$  dapat menyerap sinar UV, ia memiliki tampilan tampak putih murni.
- d) Yang penting, titanium dioksida juga memiliki indeks bias yang sangat tinggi (kemampuannya untuk menyebarkan cahaya), bahkan lebih tinggi dari berlian. Ini membuatnya menjadi bahan yang sangat cerah dan bahan yang ideal untuk penggunaan desain estetika.

Sifat penting lainnya dari titanium dioksida adalah dapat menunjukkan aktivitas fotokatalitik di bawah sinar UV. Ini membuatnya efektif untuk pemurnian lingkungan, untuk berbagai jenis lapisan pelindung, sterilisasi dan permukaan anti-fogging, dan bahkan dalam terapi kanker.

- a) Brilian. Kecemerlangan, kekuatan warna, *opacity* dan *pearlescence* tidak seperti zat lainnya.
- b) Tahan. Stabilitas terhadap panas, cahaya, dan pelapukan mencegah degradasi cat, lapisan film, dan penggetasan plastik.
- c) Pelindung. Kemampuan untuk menyebarkan cahaya dan menyerap radiasi UV membuat  $\text{TiO}_2$  menjadi bahan penting untuk tabir surya, melindungi kulit dari sinar UV penyebab kanker yang berbahaya.

d) Kuat. Digunakan sebagai fotokatalis pada panel surya sekaligus mereduksi polutan di udara.

TiO<sub>2</sub> memiliki kualitas yang berbeda tergantung pada tingkat pigmen (mikro) atau tingkat sangat halus (nano). Kedua bentuk tersebut tidak berasa, tidak berbau dan tidak dapat larut. Partikel TiO<sub>2</sub> tingkat mikro berukuran sekitar 200-350 nm dan bentuk ini menyumbang 98 % dari total produksi. Ini digunakan terutama untuk penghamburan cahaya dan aplikasi opasitas permukaan, seperti cat sebagai dasar untuk berbagai cat warna atau sebagai putih 'cemerlang' yang berdiri sendiri. TiO<sub>2</sub> nano terdiri dari partikel primer berukuran kurang dari 100 nm. Di kelas ini, titanium dioksida transparan dan menawarkan sifat penghamburan dan penyerap UV yang lebih baik dibandingkan dengan TiO<sub>2</sub> tingkat mikro dengan ukuran partikel yang lebih besar.

Titanium dioksida tersedia dalam bentuk nano dengan ukuran partikel kurang dari 100 nm dan mikro dengan ukuran partikel berkisar 200-350 nm (Fairus *et al.*, 2017). Spesifikasi TiO<sub>2</sub> yang kami gunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

Nama produk	: <i>Titanium dioxide</i>
Nama kimia	: <i>Titanium dioxide</i>
Rumus kimia	: TiO <sub>2</sub>
Titik leleh	: 1830 ~ 1850 °C (1855°C)
Titik didih	: 2500 ~ 3000 °C (2750°C)
Titik nyala	: 2500 ~ 3000 °C
Massa molar	: 79,89 g/mol
Kepadatan	: 4,26 g/cm <sup>3</sup>
Permitivitas relatif	: 86 ~ 173
Penggunaan	: <i>Saintific research and depelopment</i>

### 2.2.5 Spesifikasi bahan yang digunakan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah komposit karet silikon RTV683 yang dipasok oleh CV. Intraco dan dukungan dari PT. Serambi Gayo Sentosa. Sedangkan bahan pengisi menggunakan SiO<sub>2</sub>, ATH, dan TiO<sub>2</sub> dengan spesifikasi dan karakteristik fisik sesuai tabel 3.

Spesifikasi partikel diatas ditentukan berdasarkan data sertifikasi produk dan hasil pengujian dari Badan Riset Nasional (BRIN). Ada produk pengisi kami impor langsung dari negara asalnya, sedangkan beberapa lainnya kami beli secara online

melalui *market place*. Khusus komposit karet silikon kami dibantu oleh mitra industri dan beberapa tambahan kami beli dari toko peralatan kesehatan.

**Tabel 3.** Data spesifikasi material pengisi

<b>Partikel</b>	<b>Ukuran partikel</b>	<b>Shape</b>	<b>Pemasok</b>
TiO <sub>2</sub>	~ 20 nm	<i>amorphous</i>	Poshopku
ATH	20 ~ 30 nm	<i>amorphous</i>	Shanghai Xinglu Chemical Technology Co., Ltd.
SiO <sub>2</sub>	8,19 ~ 8,57 μm	<i>amorphous</i>	HW
SiO <sub>2</sub>	20 ~ 30 nm	<i>hexagonal</i>	Nanomaterial, China

Unsur kimia yang digunakan meliputi titanium (Ti), silikon (Si), aluminium (Al), karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O) dengan spesifikasi masing-masing berikut ini:

- \* Titanium (Ti) : massa atom = 47,90, kerapatan = 4,5 kg/m<sup>3</sup>, karakteristik x-ray = 4,508 keV pada pita pertama dan 0,452 keV pada pita ke-2
- \* Silikon (Si) : massa atom = 28,09, kerapatan = 2,42 kg/m<sup>3</sup>, karakteristik x-ray = 1,739 keV
- \* Aluminium (Al) : massa atom = 36,98, kerapatan = 2,70 kg/m<sup>3</sup>, karakteristik x-ray = 1,486 keV
- \* Karbon (C) : massa atom = 12,01, kerapatan = 2,25 kg/m<sup>3</sup>, karakteristik x-ray = 0,277 keV
- \* Hidrogen (H) : massa atom = 1,01, kerapatan = 0,08 kg/m<sup>3</sup>, karakteristik x-ray tidak ada
- \* Oksigen (O) : massa atom = 16,00, kerapatan = 1,57 kg/m<sup>3</sup>, karakteristik x-ray = 0,525 keV.

### 2.2.6 Desain material isolator

Semua alat dan bahan yang akan digunakan harus dipersiapkan, cukup, lengkap, dan dapat digunakan dengan baik sesuai prosedur. Sampel yang digunakan dijelaskan pada tabel 4.

Pengisi mikro SiO<sub>2</sub> (*amorphous*, ukuran partikel 8,19~8,57 μm, HW Nanomaterial, China), pengisi nano SiO<sub>2</sub> (*hexagonal*, ukuran partikel 20~30 nm, HW Nanomaterial, China), pengisi nano ATH (*amorphous*, ukuran partikel 20~30 nm, Shanghai Xinglu Chemical Technology Co., Ltd.), dan pengisi nano TiO<sub>2</sub> (*amorphous*, ukuran partikel 20 nm, Poshopku) dikeringkan dalam oven selama 48 jam pada 60 °C untuk menghilangkan kadar air. Setiap pengisi yang telah

dikeringkan ditimbang dengan *electronic balance type SS-A1000* pada suhu kamar dan diaduk dengan spatula selama 1 menit untuk memastikan dispersi koloid merata. Selanjutnya, ditambahkan karet silikon (RTV683, Momentive, USA) dan diaduk dengan mixer dalam keadaan vakum (*balon wisk*, kecepatan P1 dan P3 masing-masing selama 5 menit dan 25 menit). Setelah itu, ditambahkan *hardener* (RTV683, Momentive, USA) dengan perbandingan sekitar 1:10 kemudian di mixer (*balon wisk*, kecepatan P1 dan P5 masing-masing selama 1 menit dan 4 menit) dalam keadaan vakum untuk mengeluarkan gelembung udara yang terjadi akibat kavitasi dari ikatan silang karet silikon (Mustamin *et al.*, 2023).

**Tabel 4.** Desain material isolator SR

Kode Sampel	Komposisi Pengisi	Konsentrasi Pengisi (wt %)
SR-ID	<i>Silicone rubber from the industry</i>	
SR-A1	<i>micro SiO<sub>2</sub>+ nano ATH</i>	5
SR-A2	<i>micro SiO<sub>2</sub>+ nano ATH</i>	10
SR-A3	<i>micro SiO<sub>2</sub>+ nano ATH</i>	15
SR-A4	<i>micro SiO<sub>2</sub>+ nano ATH</i>	20
SR-B1	<i>micro/nano SiO<sub>2</sub>+ nano ATH</i>	5
SR-B2	<i>micro/nano SiO<sub>2</sub>+ nano ATH</i>	10
SR-B3	<i>micro/nano SiO<sub>2</sub>+ nano ATH</i>	15
SR-B4	<i>micro/nano SiO<sub>2</sub>+ nano ATH</i>	20
SR-C1	<i>micro SiO<sub>2</sub>+ nano ATH+ nano TiO<sub>2</sub></i>	5
SR-C2	<i>micro SiO<sub>2</sub>+ nano ATH+ nano TiO<sub>2</sub></i>	10
SR-C3	<i>micro SiO<sub>2</sub>+ nano ATH+ nano TiO<sub>2</sub></i>	15
SR-C4	<i>micro SiO<sub>2</sub>+ nano ATH+ nano TiO<sub>2</sub></i>	20
SR-D1	<i>micro/nano SiO<sub>2</sub>+ nano ATH+ nano TiO<sub>2</sub></i>	5
SR-D2	<i>micro/nano SiO<sub>2</sub>+ nano ATH+ nano TiO<sub>2</sub></i>	10
SR-D3	<i>micro/nano SiO<sub>2</sub>+ nano ATH+ nano TiO<sub>2</sub></i>	15
SR-D4	<i>micro/nano SiO<sub>2</sub>+ nano ATH+ nano TiO<sub>2</sub></i>	20

Akhirnya, adonan karet silikon dimasukkan dalam cetakan tanpa tekanan selama 24 jam. Cetakan dilapisi dengan kertas *adhesive* untuk menjaga profil permukaan dan ketebalan material isolator. Setelah adonan kering menjadi material isolator, selanjutnya dipotong sesuai desain pengujian yang diperlukan, dicuci dengan alkohol 96 % dan dikuring dalam oven pada suhu 60 °C selama 24 jam untuk menghilangkan uap air pada material isolator. Prosedur ini digunakan untuk membuat material isolator SR dengan pengisi mikro-nano SiO<sub>2</sub>, ATH, dan TiO<sub>2</sub> komposisi dan konsentrasi pengisi 0 wt%, 5 wt%, 10 wt%, 15 wt%, dan 20 wt% (Mustamin, Manjang and Taba, 2023).



## 2.2.7 Peracikan material isolator polimer

### (1) Karet Silikon

Langkah yang paling penting dalam peracikan adalah pemilihan karet silikon (*elastomer*) sebagai polimer dasar. Pemilihan *elastomer* harus didasarkan pada sifat yang diinginkan dari prosesibilitas *elastomer* itu (Bernstorf, Niedermier and Winkler, 2004).

### (2) Agen vulkanisir

Agen vulkanisir adalah bahan yang digunakan untuk menyebabkan reaksi kimia, menghasilkan ikatan silang molekul elastomer. Melalui ikatan silang kimia, senyawa elastomer diubah dari bahan yang lembut dan lengket menjadi bahan yang kaku dan stabil suhu. Ada banyak jenis agen vulkanisir atau curing yang digunakan. Peroksida organik adalah yang paling banyak digunakan untuk isolasi tegangan tinggi (Bernstorf, Niedermier and Winkler, 2004).



**Gambar 5.** *Hardener* sebagai katalisator karet silikon

*Hardener* merupakan bahan kimia yang ditambahkan kedalam karet silikon sebagai katalisator (*catalyst*) untuk membantu proses ikatan silang unsur-unsur kimia didalam karet silikon. Semakin banyak konsentrasi *hardener* maka proses pengikatan silang akan lebih cepat kering (*cured*) akan tetapi penambahan *hardener* yang terlalu banyak akan merusak rantai polimer sehingga mengurangi kualitas produk. Konsentrasi *hardener* sekitar 3~4 wt% karet silikon yang akan diproduksi.

*Hardener* ini selain sebagai katalisator bisa juga memberikan warna dari material isolator yang akan diproduksi, tersedia beberapa warna *hardener* yaitu clear, merah, kuning, biru, dll. Dalam penelitian ini *hardener* yang digunakan sesuai dengan material ikutan dari karet silikon RTV683 sebagai satu paket produk komersila.

### (3) Koagen

Koagen melindungi ikatan silang yang sudah ada antara polimer dan agen vulkanisir agar tidak terkoyak. Ini memastikan bahwa ikatan tidak rusak secepat ikatan baru yang dihasilkan (Bernstorff, Niedermier and Winkler, 2004).

Ada dua jenis koagen: tipe I dan tipe II. Koagen tipe I meningkatkan kecepatan (*speed*) dan tingkat kekakuan (*stiffness*) senyawa. Koagen tipe II meningkatkan keadaan kecepatan tetapi tidak mempengaruhi tingkat kekakuan senyawa (Bernstorff, Niedermier and Winkler, 2004).

### (4) Anti degradan

Anti-degradan digunakan untuk memperlambat kerusakan senyawa karet yang diprakarsai oleh oksigen, ozon, panas, dan cahaya (Bernstorff, Niedermier and Winkler, 2004).

Dalam pemilihan anti-degradan, faktor-faktor yang harus dipertimbangkan, yaitu : 1) jenis perlindungan yang diinginkan, 2) aktivitas kimia, 3) persistensi (volatilitas dan ekstraktabilitas), 4) perubahan warna dan pewarnaan (Bernstorff, Niedermier and Winkler, 2004)

### (5) Alat bantu pemrosesan

Alat bantu pemrosesan (*processing aids*) ditambahkan ke senyawa karet untuk membantu aliran (*mold flow*) dan pelepasan (*release*), serta membantu dalam pencampuran senyawa (Bernstorff, Niedermier and Winkler, 2004).

### (6) Pengisi

Pengisi (*filler*) digunakan untuk memperkuat *elastomer* dasar yang dapat meningkatkan sifat fisik atau memberikan karakteristik pemrosesan tertentu. Ada dua jenis pengisi yaitu memperkuat dan memperpanjang. Jenis penguat dapat meningkatkan kekuatan tarik, modulus, kekuatan sobek dan ketahanan abrasi suatu senyawa. Pengisi yang memperpanjang adalah bahan pemuatan atau yang tidak penguat (*non-reinforcing*). Ini dapat digunakan untuk memberikan beberapa properti yang diinginkan. Alumina trihidrat digunakan di hampir semua senyawa isolator untuk memberikan ketahanan tinggi terhadap pelacakan listrik dan mudah terbakar (Bernstorff, Niedermier and Winkler, 2004).

### (7) Agen kopling

Agen kopling memberikan ikatan kimia antara pengisi dan *elastomer*. Agen kopling adalah jembatan antara alumina trihidrat dan polimer. Ini dapat sangat meningkatkan sifat listrik, modulus dan kekuatan tarik (Bernstorf, Niedermier and Winkler, 2004).

### (8) Plasticizer dan pelembut

Plasticizer dan pelembut (*plasticizers and softeners*) digunakan untuk membantu pencampuran, memodifikasi viskositas atau memberikan fleksibilitas pada suhu rendah. Banyak bahan dalam kelompok ini juga dapat dianggap sebagai alat bantu pengolahan (Bernstorf, Niedermier and Winkler, 2004).

### (9) Material tujuan khusus

Bahan tujuan khusus digunakan untuk tujuan tertentu yang biasanya tidak diperlukan di sebagian besar senyawa karet. Agen anti jamur, agen peniup, pewarna, re-odoran, bahan silikon Ohio Brass dan bahan yang membantu kompatibilitas silikon ke material adalah contoh bahan tujuan khusus (Bernstorf, Niedermier and Winkler, 2004).

## 2.3 Penelitian Terkait dan Kontribusi Hasil Penelitian (*State of The Art*)

Manfaat dari penelitian diharapkan dapat mengetahui dan meningkatkan kinerja dari isolator polimer ketika diterapkan pada isolator luar ruangan tegangan tinggi pada daerah berpolusi berat dan beriklim tropis. Daerah berpolusi berat seperti kawasan industri, pertambangan, dan pesisir pantai. Penelitian isolator karet silikon telah banyak dilakukan oleh para peneliti isolator polimer pada jaringan terbuka sebagai berikut :

- 1) Azizi, Sohrab; Momen, Gelareh; Ouellet-Plamondon, Claudiane; David, Eric, " *Performance improvement of EPDM and EPDM/silicone rubber composites using modified fumed silica, titanium dioxide and graphene additives* " in **Polymer Testing**, vol. 84, pp. 160-281, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.106281. Dalam pekerjaan ini, komposit polimer dibuat dari monomer etilen propilena diena (EPDM) dan karet silikon (S) dengan aditif silika berasap yang dimodifikasi (MFS), titanium dioksida (TiO<sub>2</sub>) dan graphene. Penampilan dielektrik dan termal dari komposit berbasis EPDM dipelajari. Peningkatan konstanta elektrik dan kekuatan kerusakan dielektrik AC diamati untuk komposit karet EPDM yang mengandung aditif MFS, TiO<sub>2</sub>, dan graphene. Selain itu, penggabungan aditif menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam stabilitas termal (30~50 °C) dan

konduktivitas termal komposit. Kombinasi dari berbagai perbaikan ini memberikan keuntungan kinerja yang sesuai pada komposit polimer untuk digunakan dalam aplikasi isolasi (Azizi *et al.*, 2020).

- 2) M. T. Nazir *et al.*, "*Investigation on dry band arcing induced tracking failure on nanocomposites of EPDM matrix*" **2019 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)**, Guangzhou, China, 2019, pp. 309-312, doi: 10.1109/ICEMPE.2019.8727291. Monomer etilen propilena diena (EPDM) adalah salah satu bahan yang paling menonjol untuk aplikasi insulasi listrik luar ruangan karena kinerja kontaminansi yang lebih baik di lapangan. Namun, EPDM rentan terhadap depolimerisasi termal karena penumpukan suhu di permukaan selama busur pita kering yang memulai pelacakan berkarbonisasi. Makalah ini menyelidiki umur pelacakan dan distribusi termal dari material EPDM berisi nano-BN yang difungsikan. Partikel BN (50 nm) diperoleh untuk pembuatan nanokomposit EPDM. Uji bidang miring menurut IEC 60587 dilakukan; Metode tegangan pelacakan 2 diadopsi dengan tegangan awal yang diterapkan 3 kV dan laju aliran 0,25 kV/jam sampai terjadi kegagalan. Hasil pengukuran menunjukkan nanokomposit menunjukkan waktu kegagalan pelacakan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk murni EPDM dan secara linier meningkat dengan penambahan BN. Selain itu, suhu permukaan maksimum sangat berkurang dalam nanokomposit yang mungkin disebabkan oleh stabilitas termal dan konduktivitas termal yang lebih baik. Selanjutnya, nano-BN meningkatkan luas permukaan partikel dalam nanokomposit karena jarak antar partikel yang lebih kecil yang memberikan penghalang yang lebih baik untuk busur pita kering (Bar *et al.*, 2016).
- 3) Nazir, M. Tariq; Phung, B. T.; Sahoo, Animesh; Yu, Shihu; Zhang, Yuanyuan; Li, Shengtao, "*Surface Discharge Behaviours, Dielectric and Mechanical Properties of EPDM based Nanocomposites containing Nano-BN*" in **Applied Nanoscience**, vol. 9, no. 8, pp. 1981-1989, 2019, doi: 10.1007/s13204-019-00986-7. Pelepasan permukaan sering terjadi antara konduktor dielektrik padat dan tegangan tinggi yang merupakan salah satu mode kegagalan isolasi utama. Dalam makalah ini, karakteristik debit permukaan (pola fase diselesaikan, besaran dan laju pengulangan) dari nanokomposit EPDM / BN dipelajari. Juga diteliti adalah respon dielektrik, resistivitas volume dan sifat mekanik. Partikel boron nitrida yang dimodifikasi permukaan (BN: 50 nm) diperoleh untuk

pembuatan nanokomposit. Sampel terkena luahan permukaan menggunakan IEC, konfigurasi elektroda dan pengukuran PD dilakukan sesuai dengan standar IEC 60270. Hasil eksperimen menyatakan bahwa perilaku PD bergantung pada pemuatan nanopartikel di EPDM. Tegangan awal PD meningkat dengan peningkatan konten pengisi hingga 7wt% dan parameter terintegrasi pengosongan jauh lebih rendah. Nanopartikel tertanam memperkuat resistansi dari nanokomposit, yang dapat membantu mengurangi medan listrik bersih di celah udara dan dengan demikian mengurangi intensitas PD. Nilai permitivitas pada frekuensi daya mengikuti tren peningkatan yang serupa hingga 5 wt% kemudian turun sementara kerugian dielektrik adalah yang terendah untuk 1 wt%. Peningkatan yang konsisten dalam resistivitas volume dan hasil uji mekanis diamati dengan kandungan BN (Nazir *et al.*, 2019).

- 4) Nazir Muhammad Tariq; Phung Bao Toan, “*Accelerated ultraviolet weathering investigation on micro/nano SiO<sub>2</sub> filled silicone rubber composites*” in **High Voltage**, volume 3, issue 4 (2018) DOI :10.1049/hve.2018.5004. Penelitian menjelaskan penambahan partikel mikro/nano-silika (SiO<sub>2</sub>) dapat meningkatkan ketahanan polidimetilsiloksan murni terhadap efek sinergis UV, suhu dan tegangan tinggi. Empat jenis komposit (U-SIR, M-SIR, MN-SIR dan N-SIR) dibuat dengan menambahkan partikel mikro dan / atau nano-silika dan kemudian mengalami degradasi multi-tegangan di kamar uji. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ada perubahan warna permukaan dalam bentuk warna pucat kekuningan dan resistensi yang signifikan terhadap pengurangan hidrofobisitas ditawarkan oleh N-SIR dan MN-SIR diikuti oleh M-SIR dan U-SIR. Pemindaian mikroskop elektron dan temuan kekasaran permukaan menyatakan bahwa N-SIR dan MN-SIR menawarkan ketahanan yang sangat baik terhadap paparan *pengisi* dan peningkatan kekasaran permukaan. Ada sedikit penurunan tingkat absorbansi gugus fungsi Si(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> dan Si-O-Si dari komposit tetapi yang menarik, tingkat absorbansi gugus hidrofilik hidroksil ditemukan lebih tinggi di U-SIR secara komparatif. Selanjutnya, pengukuran respon dielektrik menunjukkan sensitivitas yang cukup besar terhadap pelapukan dengan N-SIR dan MN-SIR memberikan kerugian dielektrik terendah. Hasil menunjukkan bahwa penambahan nano-silika dan mikro-silika ke SIR murni dapat meningkatkan

ketahanan pelapukan UV secara signifikan dengan membangun lapisan pelindung UV yang efektif (Nazir and Phung, 2018).

- 5) M. Fairus, M. Hafiz, N. S. Mansor, M. Kamarol and M. Jaafar, "*Comparative study of SiR/EPDM containing nano-alumina and titanium dioxides in electrical surface tracking*" in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 24, no. 5, pp. 2901-2910, Oct. 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006414. Kombinasi bahan polimer, seperti karet silikon (SiR) dan monomer etilena propilena diena (EPDM), menjadi salah satu potensi pengembangan isolator polimer baru dengan karakteristik unggul. SiR/EPDM dengan perbandingan persentase berat 50:50 menghasilkan sifat listrik dan mekanik komposit polimer yang optimal. Namun, studi tentang campuran yang seimbang ini dengan pengisi nanos inklusi tetap terbatas dan belum sepenuhnya dieksplorasi. Dalam penelitian ini, campuran SiR/EPDM dibuat dengan dua jenis pengisi nano, yaitu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan  $\text{TiO}_2$ . Konsentrasi pembebanan pengisi nano untuk masing-masing spesimen adalah 1, 2, 3, 4, dan 5 Vol%. Pengaruh pengisi nano  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan  $\text{TiO}_2$  dengan konsentrasi pemuatan yang berbeda pada karakteristik pelacakan permukaan diselidiki. Hasil percobaan menunjukkan bahwa penambahan pengisi nano ke komposit SiR/EPDM secara signifikan meningkatkan kinerja hambatan pelacak permukaan listrik, sehingga memperlambat proses penuaan atau meminimalkan kerusakan pada permukaan. Selain itu, hasil eksperimen menunjukkan bahwa SiR/EPDM yang diisi dengan 1% Vol dari pengisi nano  $\text{Al}_2\text{O}_3$  memiliki kinerja waktu pelacakan yang lebih baik daripada SiR/EPDM yang diisi dengan 2% Vol dari pengisi nano  $\text{TiO}_2$ . Waktu pelacakan dan karakteristik konduktivitas termal dari kedua nanokomposit lebih tinggi dibandingkan dengan SiR/EPDM yang tidak terisi (Fairus *et al.*, 2017).
- 6) Xue, Yang; Li, Xiao-fei; Zhang, Dong-hai; Wang, Hao-sheng; Chen, Yun; Chen, Yun-fa, "*Comparison of ATH and  $\text{SiO}_2$  pengisis filled silicone rubber composites for HTV insulators*," in **Composites Science and Technology**, vol. 155, pp. 137-143, 2018, doi: 10.1016/j.compscitech.2017.12.006. Untuk meningkatkan sifat listrik dan mekanik karet silikon (SiR) di bidang isolasi tegangan tinggi, pengisi konvensional seperti aluminium hidroksida (ATH), silika berasap dan silika endapan telah digunakan selama bertahun-tahun. Dalam pekerjaan ini, komposit SiR yang diisi dengan ATH,  $\text{SiO}_2$  tidak teratur (IS) dan bola  $\text{SiO}_2$  (SS) dibuat dengan pencampuran mekanis, dan pengaruh

jenis pengisi dan bentuk pengisi terhadap sifat mekanik, listrik dan termal komposit SiR diselidiki secara sistematis. Dibandingkan dengan komposit ATH-SiR, komposit SS-SiR menunjukkan sifat listrik dan mekanik yang lebih baik. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan tarik komposit SS-SiR mencapai 6,6 MPa, hampir 2 kali lipat dibandingkan komposit ATH-SiR. Berdasarkan hasil *loss tangent* yang dikombinasikan dengan pengamatan permukaan fraktur tarik, interaksi antar muka antara pengisi SiO<sub>2</sub> dan SiR lebih kuat dibandingkan antara ATH dan SiR, dan dispersi lebih baik pada komposit pengisi SiO<sub>2</sub> yang diisi SiR daripada pada komposit yang diisi ATH. Kekuatan tembus komposit ATH-SiR hanya 18,9 kV mm<sup>-1</sup>, sedangkan komposit IS-SiR dan SS-SiR masing-masing adalah 24,9 kV mm<sup>-1</sup> dan 24,8 kV mm<sup>-1</sup>. Diantara ketiga komposit SiR tersebut, komposit SS-SiR memiliki permitivitas dielektrik dan rugi dielektrik yang paling rendah. Dibandingkan dengan komposit ATH-SiR, komposit SiR yang diisi pengisi SiO<sub>2</sub> memiliki konduktivitas termal yang lebih rendah mulai dari 30 °C hingga 150 °C, tetapi menunjukkan ketahanan penuaan busur pita kering yang lebih baik karena stabilitas termal yang baik dan sifat konduksi termal pada suhu tinggi. Selain itu, komposit SS-SiR menunjukkan ketahanan penuaan busur yang lebih baik daripada komposit IS-SiR (Xue *et al.*, 2018).

- 7) Hamzah, M. S.; Mariatti, M.; Kamarol, M, “Breakdown characteristics of grafted polypropylene in PP/EPDM hybrid nanocomposite for electrical insulator applications” in **Polymer Bulletin** (2017). doi : 10.1007/s00289-017-2167-z. Dalam studi ini, *pengisi* hibrida yang terdiri dari amonium polifosfat (APP) dan nanoclay secara terpisah ditanamkan dalam campuran 50% *polypropylene (PP)/ polypropylenegrafted maleic anhydride (PP-g-MAH)* dan 50% campuran *ethylene propylene diene monomer (EPDM)*. Beberapa formulasi nanokomposit hibrid *APP-nanoclay* yang diisi PP-g-MAH/PP/EPDM disiapkan dengan menggunakan mixer internal dan dicetak menggunakan cetakan kompresi untuk menghasilkan sampel uji. Pengaruh pembebanan PP-gMAH (2, 4, 6, dan 8 vol.%) pada sifat mudah terbakar dan isolasi listrik dari nanokomposit hibrida PP/EPDM yang diisi dengan nanoclay APP diselidiki. Penambahan 8 vol.% PP-g-MAH meningkatkan kekuatan kerusakan dielektrik dari *nanocomposites hybrid PP/EPDM hybrid APP-nanoclay*. Konstanta dielektrik dan kehilangan dielektrik dari nanokomposit PP/EPDM ditemukan berkurang saat beban PP-g-MAH meningkat.

Pengukuran sudut kontak menunjukkan bahwa hidrofobisitas nanokomposit *hybrid PP-g-MAH/PP/EPDM* berisi *APP-nanoclay* meningkat. Hasil uji mudah terbakar menunjukkan bahwa penambahan PP-g-MAH sedikit mengurangi laju pembakaran dan indeks oksigen terbatas pada nanokomposit hibrid *APP – nanoclayfilled PP-gMAH/PP/EPDM* (Hamzah, Mariatti and Kamarol, 2018).

- 8) D. Kavitha, T. K. Sindhu and T. N. P. Nambiar, "*Impact of permittivity and concentration of pengisi nanoparticles on dielectric properties of polymer nanocomposites*" in **IET Science, Measurement & Technology**, vol. 11, no. 2, pp. 179-185, 3 2017, doi: 10.1049/iet-smt.2016.0226. Sifat kelistrikan isolator polimer dapat ditingkatkan dengan menambahkan *pengisi nano* permitivitas tinggi (*high-permittivity nanofillers*). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh permitivitas pengisi, ukuran, bentuk, konsentrasi dan jarak antar partikel terhadap sifat listrik dari nanokomposit. Nanokomposit dibuat dengan empat jenis pengisi dan dengan berbagai konsentrasi dan pengaruh berbagai parameter pengisi pada permitivitas, kekuatan rusak (*breakdown strength*) dan tangen kerugian dari nanokomposit dianalisis. Simulasi medan listrik digunakan untuk mendemonstrasikan peningkatan volume daerah medan listrik yang ditingkatkan yang mempengaruhi kuat tembus dalam waktu singkat. Pengaruh parameter pengisi pada sifat listrik komposit ditunjukkan melalui analisis eksperimental dan teoritis (Kavitha, Sindhu and Nambiar, 2017).
- 9) M. Tariq Nazir; B.T. Phung; Mark Hoffman, "*Performance of silicone rubber composites with SiO<sub>2</sub> micro/nano-filler under AC corona discharge*" in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, Vol. 23, No. 5; October 2016. DOI : 10.1109/TDEI.2016.005858. Insulator luar kamar sering terkena peluahan korona dan masalahnya menjadi lebih umum dengan meningkatnya penggunaan level tegangan transmisi yang lebih tinggi. Untuk isolator polimer, paparan peluahan koroana seperti itu dapat mengubah struktur kimia polimer dan menurunkan sifat hidrofobik permukaan. Makalah ini menyelidiki efek *pengisi* mikro dan / atau nano pada komposit karet silikon dalam menekan kerusakan tersebut. Empat jenis sampel dibuat: karet silikon murni (PR), karet silika/silikon berukuran mikron 30wt% (MC), 27,5wt% mikron + 2,5wt% nano silika/karet silikon (NMC), dan 5wt% nano silika/komposit karet silikon (NC). Sampel dipapar korona AC menggunakan



pengaturan elektroda jarum ke *ground-plane*. Hasil percobaan dianalisis berdasarkan lima metode pengukuran yang berbeda: peluahan sebagian, pemulihan kehilangan hidrofobik, Mikroskopi Elektron Pemindaian, kekasaran permukaan, dan spektroskopi inframerah transformasi Fourier. Hasil menunjukkan bahwa NC menunjukkan ketahanan yang kuat terhadap peluahan sebagian dan kehilangan hidrofobitas. Di area di bawah ujung jarum, kehilangan hidrofobitas yang lebih tinggi dan pemulihan yang lebih tinggi diamati dibandingkan dengan wilayah sekitarnya. Variasi dalam kekasaran permukaan, munculnya *crackles*, *void*, *pit*, permukaan pecah menjadi struktur blok dan kerusakan struktur kimia karet silikon sangat terhambat di NC dibandingkan dengan PR, MC dan NMC. Berdasarkan hasil NMC, ditemukan bahwa penambahan silika berukuran nano dapat menjadi pendekatan yang menarik untuk meningkatkan ketahanan korona dari karet silikon dengan pengisi silika berukuran mikron (Nazir, Phung and Hoffman, 2016).

- 10) Ahmad, Mohd Hafizi; Bashir, Nouruddeen; Buntat, Zolkafle; Arief, Yanuar Z.; Abd Jamil, Abdul Azim; Mohamed Piah, Mohamed Afendi; Suleiman, Abubakar A.; Dodd, Steve; Chalashkanov, Nikola, “*Suhu effect on electrical treeing and partial discharge characteristics of silicone rubber-based nanocomposites*” in **Journal of Nanomaterial**, volume 2015 (2015), DOI : 10.1155/2015/962767. Studi ini menyelidiki percabangan listrik dan aktivitas peluahan sebagian (PD) pada fase yang terkait dalam suhu kamar, bahan sampel karet silikon vulkanisir/ *organomontmorillonite* nanokomposit pada rentang suhu untuk menilai pengaruh suhu pada konsentrasi *pengisi* yang berbeda di bawah tegangan AC. Sampel disiapkan dengan tiga tingkat kandungan *pengisi nano*: 0wt%, 1wt%, dan 3wt%. Percabangan listrik dan aktivitas PD dari sampel ini diselidiki pada suhu 20 °C, 40 °C, dan 60 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik percabangan kelistrikan berubah seiring dengan peningkatan suhu. Waktu awal percabangan berkurang pada 20 °C karena dinamika muatan kamar, dan waktu tumbuh percabangan meningkat pada 40 °C karena bertambahnya jumlah struktur jaringan ikatan silang yang disebabkan oleh proses vulkanisasi. Pada suhu 60 °C, lebih banyak sifat yang ditingkatkan dan diperkuat dari sampel nanokomposit berbasis karet silikon terjadi. Hal ini menyebabkan peningkatan waktu awal percabangan listrik dan waktu pertumbuhan percabangan listrik. Namun, karakteristik PD, khususnya sudut fase rata-rata terjadinya distribusi pelepasan positif dan negatif, tidak

sensitif terhadap variasi suhu. Ini mencerminkan stabilitas yang ditingkatkan dalam sifat listrik nanokomposit dibandingkan dengan polimer dasar (Ahmad *et al.*, 2015).

- 11) N. Loganathan, C. Muniraj and S. Chandrasekar, "*Tracking and erosion resistance performance investigation on nano-sized SiO<sub>2</sub> filled silicone rubber for outdoor insulation applications,*" in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 21, no. 5, pp. 2172-2180, Oct. 2014, doi: 10.1109/TDEI.2014.003892.

Makalah ini membahas karakteristik pelacakan dan ketahanan erosi dari bahan perawan dan karet silikon tua (SiR) yang diisi SiO<sub>2</sub> berukuran nano di bawah tegangan AC dengan amonium klorida sebagai kontaminan sesuai prosedur pengujian IEC-60587. Variasi karakteristik dalam waktu pelacakan, penurunan berat dan kedalaman erosi dari spesimen murni dan umur SiR SiO<sub>2</sub> berukuran nano dianalisa untuk mengevaluasi erosi relatif dan ketahanan pelacakan komposit. Variasi statistik dari waktu pelacakan dievaluasi dengan analisis Weibull. Studi *thermo gravimetry-derivative thermo gravimetric (TG-DTG)* dilakukan untuk memahami sifat termal dari bahan SiR berisi SiO<sub>2</sub> berukuran nano dengan persentase bobot pengisi yang berbeda (wt %). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kinerja termal spesimen murni dan umur SiR yang terisi nano meningkat ketika %wt pengisi ditingkatkan. *Scanning Electron Microscope (SEM)* dengan *Energy Dispersive X-ray (EDS)* dan *spektroskopi Fourier Transform Infra-Red (FTIR)* digunakan untuk menyelidiki sifat fisik dan kimia dari komposit SIR murni dan berumur. Teramati bahwa pelacakan dan ketahanan erosi meningkat ketika konsentrasi nano-pengisi meningkat baik pada komposit SiR yang baru maupun yang sudah tua. Juga penuaan termal sedikit mengurangi pelacakan dan ketahanan erosi dari komposit SIR berisi nano (Loganathan, Muniraj and Chandrasekar, 2014).

- 12) M. H. Ahmad, M. A. M. Piah, Y. Z. Arief, N. Bashir, N. Chalashkanov and S. J. Dodd, "*Suhu dependance of PD from electrical trees grown in silicone rubber based nanocomposites*" **2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)**, Bologna, 2013, pp. 816-819, doi: 10.1109/ICSD.2013.6619843. Makalah ini menjelaskan serangkaian percobaan untuk menilai ketergantungan suhu pada aktivitas pelepasan sebagian fase selama pertumbuhan pohon listrik di dalam suhu ruangan bahan

nanokomposit karet silikon vulkanisir organo-Montmorillonite (oMMT). Partikel pengisi dibuat dengan memperlakukan MMT dengan alkilamonium sebelum mendispersi dalam karet silikon untuk membentuk nanokomposit silikon / organo-Montmorillonit. Sampel disiapkan dengan tiga tingkat kandungan pengisi nano, 0wt%, 1wt% , dan 3wt% untuk menilai pengaruh konsentrasi pengisi yang berbeda pada proses pohon listrik dan aktivitas PD yang sesuai di bawah listrik AC 50Hz yang diterapkan. Hasilnya menunjukkan bahwa pengenalan 1wt% nano-pengisi meningkatkan waktu awal pohon listrik dan menurunkan laju pertumbuhan pohon listrik. Ditemukan juga bahwa karakteristik PD, terutama sudut fasa rata-rata terjadinya distribusi pelepasan positif dan negatif, menjadi tidak sensitif terhadap variasi suhu. Ini mencerminkan stabilitas yang ditingkatkan dalam sifat listrik komposit nano dibandingkan dengan polimer dasar. Inisiasi dan pertumbuhan pohon ditemukan tertekan dalam kasus nanokomposit 3wt% sejauh pertumbuhan pohon listrik tidak terjadi selama durasi pengujian (4 jam) (Ahmad *et al.*, 2013).

- 13) J. V. Vas, B. Venkatesulu and M. J. Thomas, "*Tracking and erosion of silicone rubber nanocomposites under DC voltages of both polarities*" in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 19, no. 1, pp. 91-98, February 2012, doi: 10.1109/TDEI.2012.6148506. Peningkatkan kinerja pelacakan dan erosi dari isolator karet silikon (SR) luar kamar yang digunakan dalam saluran transmisi daya HV, pengisi anorganik berukuran mikron biasanya ditambahkan ke material SR dasar. Selain itu, isolator yang digunakan pada saluran transmisi dc tegangan tinggi dirancang untuk meningkatkan jarak rambat untuk mengurangi masalah pelacakan dan erosi. Standar ASTM D2303 memberikan prosedur untuk menemukan pelacakan dan ketahanan erosi dari sampel material *weathershed* isolator polimer luar kamar dalam kondisi laboratorium untuk tegangan ac. Dalam makalah ini, pelacakan bidang miring (IP) dan uji erosi yang mirip dengan ASTM D2303 dilakukan di bawah tegangan dc positif dan negatif untuk sampel karet silikon yang diisi dengan partikel berukuran mikro dan nano untuk memahami fenomena yang terjadi selama pengujian tersebut. Alumina trihydrate berukuran mikro dan nano ditambahkan ke material karet silikon untuk meningkatkan ketahanan terhadap pelacakan dan erosi. Arus bocor selama pengujian dan massa yang terkikis di akhir pengujian dimonitor. Studi *scanning electron microscopy (SEM)* dan

*energy dispersive Xray (EDX)* dilakukan untuk memahami dispersi *pengisi* dan perubahan morfologi permukaan pada sampel nanokomposit dan mikrokomposit. Hasilnya menunjukkan bahwa nano komposit berkinerja lebih baik daripada mikro komposit bahkan untuk pengisian pengisi yang kecil (4wt%) untuk tegangan dc positif dan negatif. Terlihat juga bahwa kinerja pelacakan dan erosi karet silikon lebih baik di bawah tegangan dc negatif dibandingkan dengan tegangan dc positif. Studi EDX menunjukkan migrasi ion yang berbeda ke permukaan sampel selama tes IP di bawah tegangan dc positif yang menyebabkan kinerja yang lebih rendah dibandingkan dengan kinerja di bawah dc negatif (Vas, Venkatesulu and Thomas, 2012).

- 14) Linjie Zhao, ; Chengrong Li, ; Jun Xiong, ; Shuqi Zhang, ; Jisha Yao, ; Xiujuan Chen, “*Online Hidrofobicity Measurement for Silicone Rubber Insulators on Transmission Lines*” in **IEEE Transactions on Power Delivery**, volume 24, issue 2, (2009). DOI : 10.1109/TPWRD.2008.2005654. Makalah ini menyajikan teknik pengukuran hidrofobisitas online untuk isolator karet silikon (SiR) pada saluran transmisi dan hasil uji lapangannya. Berdasarkan metode klasifikasi hidrofobisitas (HC), perangkat pengukur hidrofobisitas online dikembangkan, yang terdiri dari penyemprot yang dapat dikontrol, kamera video dan perangkat lunak analisis hidrofobisitas. Pemeriksaan hidrofobisitas online dilakukan untuk isolator SiR yang tercemar di tiga jalur transmisi ac di utara China selama lebih dari satu tahun dengan menggunakan perangkat. Beberapa isolator SiR yang dioperasikan selama 8 tahun dianalisis di laboratorium dengan menggunakan mikroskop elektron scanning dan spektroskopi inframerah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hidrofobisitas permukaan isolator SiR sangat bervariasi dengan musim. Kami juga menemukan bahwa struktur mikro polutan secara signifikan mempengaruhi perpindahan hidrofobik, dan bahwa fenomena penuaan terjadi pada permukaan bahan pelapis cuaca dari isolator SIR yang beroperasi selama 8 tahun. Diusulkan untuk memperkuat pemeriksaan hidrofobisitas untuk isolator SIR dalam pelayanan (Zhao *et al.*, 2009).

## 2.4 Hipotesis Penelitian

**“Material isolator karet silikon dengan komposisi dan konsentrasi pengisi mikro-nano yang tepat dapat meningkatkan kinerja dan memperpanjang umur pakai isolator polimer”.** *Silicone rubber insulator*

*materials with the right micro-nanofiller composition and concentration can improve performance and extend the service life of polymer insulators.*