

## Research Article

**Studi Arus Bocor Permukaan Bahan Isolasi Resin Epoksi Silane Dengan Variasi Pengisi Pasir Silika ( Dengan Polutan Pantai)**Johanadib Heri<sup>1</sup>, Yuningtyastuti<sup>2</sup>, Abdul Syakur<sup>2</sup>

1. Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

2. Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

**Abstract**

Isolasi memiliki peranan yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Isolasi sangat diperlukan untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan sehingga antara penghantar penghantar tersebut tidak terjadi lompatan listrik atau percikan, untuk itu maka diperlukan bahan isolator yang baik. Bahan isolator yang digunakan pada tegangan tinggi dapat berupa porselin, gelas dan polimer, salah satu bahan isolasi polimer yang digunakan adalah resin epoksi. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah resin epoksi yang terbuat dari diglycidyl ether of bisphenol-A (DGEBA) sebagai bahan dasar, metaphenylene diamine (MPDA) sebagai bahan pengeras dan diberi bahan pengisi sealant dan pasir silika. Komposisi bahan DGEBA dan MPDA dibuat sama yaitu masing-masing 30 gr, bahan sealant 20 gr, sedangkan bahan pengisi pasir silika dibuat variasi dari 5 gr, 10 gr, 15 gr, 20 gr, dan 25 gr. Ukuran bahan uji adalah 120 mm x 50 mm x 5 mm. Penelitian dilakukan di laboratorium menurut standar IEC 587:1984. Penelitian dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh komposisi bahan pengisi pasir silika terhadap nilai sudut kontak, dan nilai arus bocor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa resin epoksi yang digunakan pada penelitian ini dikategorikan bersifat basah sebagian. Kenaikan persentase bahan pengisi pasir silika menyebabkan penurunan nilai sudut kontak yang berarti resistansi permukaan bahan isolasi semakin menurun. Penambahan persentase bahan silika juga dapat mempercepat terjadinya peluahan pada sampel isolator, akan tetapi arus bocor yang terjadi akan menjadi semakin kecil.

**Kata kunci :** Arus bocor, DGEBA, MPDA, pasir silika.

**I. PENDAHULUAN****1.1 Latar Belakang**

Ketertarikan akan kebutuhan energi listrik dari hari kehari semakin meningkat, perlu dilakukannya suatu perencanaan dalam sistem ketenagaan yang dapat menyediakan energi listrik yang handal. Keandalan suatu sistem tenaga listrik salah satunya ditopang oleh perencanaan sistem transmisi dan distribusi yang baik. Salah satu komponen utama dari sistem distribusi dan transmisi adalah isolator. Saat ini isolator yang banyak digunakan adalah isolator jenis keramik. Namun, isolator jenis ini memiliki kelemahan dari segi mekanis yaitu berat dan permukaannya yang bersifat mudah basah, sehingga memungkinkan terjadi arus bocor pada permukaannya. Untuk itu perlu dicari alternatif bahan isolator selain keramik yang salah satunya adalah isolator dengan bahan polimer.

Pengembangan bahan isolator polimer khususnya resin epoksi sekarang ini telah digunakan secara luas sebagai isolasi peralatan tegangan tinggi karena mempunyai keunggulan konstruksinya relatif lebih ringan, dan proses pembuatan relatif lebih cepat.<sup>[2]</sup>

Dalam penggunaannya sebagai isolator pasangan luar, kondisi lingkungan memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap material isolasi. Adanya polutan di udara dapat menempel pada permukaan material dan dapat mengendap sehingga dapat mempengaruhi atau menambah kekasaran permukaan material isolator. Saat terjadi hujan larutan polutan dapat membantuk jalur konduktif yang dapat menyebabkan *Leakage Current (LC)* atau arus bocor yang

mengalir pada permukaan isolator. Adanya arus bocor tersebut dapat mengakibatkan degradasi permukaan isolator. Dengan adanya jalur yang mengalirkan arus, maka permukaan isolator akan timbul panas yang justru akan mengeringkan polutan pada permukaan isolator. Dari peristiwa tersebut muncullah daerah yang disebut pita kering (*dryband*). Adanya *dryband* memicu terjadinya pelepasan muatan ke udara dikarenakan distribusi medan listrik pada *dryband* lebih tinggi dibanding daerah lainnya. Jika *dryband* semakin meningkat, maka semakin lama akan menyebabkan terjadinya *flashover* yang merupakan kegagalan suatu isolator<sup>[1]</sup>. Dari fenomena arus bocor dan dampak yang ditimbulkan seperti di atas melatarbelakangi dilakukannya penelitian mengenai arus bocor di laboratorium, khususnya pada material polimer resin epoksi silane dengan pengisi pasir silika.

Dalam penelitian terhadap arus bocor pada permukaan isolator yang dilakukan di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada ini digunakan metode *Inclined-Plane Tracking (IPT)* yang diatur dalam IEC 587:1984. Dalam metode ini, sampel isolator diberikan cairan polutan buatan dengan aliran 0,30 ml/menit, dalam penelitian ini digunakan polutan Pantai Parangtritis.

**1.2 Tujuan**

Tujuan penelitian studi arus bocor yang mengalir pada permukaan material isolasi polimer resin epoksi silane dengan pengisi pasir silika (terkontaminasi polutan pantai) yaitu:

1. Mengetahui dan menganalisa besarnya sudut kontak hidrofobik pada material isolasi polimer resin epoksi silane dengan pengisi pasir silika dengan komposisi yang berbeda.
2. Mengetahui dan menganalisa pengaruh komposisi bahan terhadap nilai arus bocor yang mengalir pada permukaan material resin epoksi silane pengisi pasir silika dengan polutan pantai Parangtritis.
3. Mengetahui mekanisme terjadinya arus bocor pada permukaan material isolasi yang terkontaminasi.

### 1.3 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Bahan dasar material isolator yang digunakan adalah Resin Epoksi jenis *Diglycidyl Ether Bisphenol A (DGEBA)* dengan pematangan *Methaphenylene Diamine (MPDA)* dan lem kaca (silane) dengan pengisi pasir silika. Dengan dimensi bahan uji berukuran 120 mm x 50 mm x 5 mm dan dibuat pada keadaan (suhu, kelembaban, dan tekanan) ruangan.
2. Pengujian menggunakan komposisi pengisi bahan uji dengan persentase bahan pengisi pasir silika 5gr, 10gr, 15gr, 20gr dan 25gr.
3. Metode pengujian yang digunakan adalah *Inclined Plane Tracking (IPT)* yang mengacu pada *IEC 587 : 1984*.
4. Polutan yang digunakan adalah polutan buatan dengan komposisi kimia yang dibuat sama persis dengan yang terkandung dalam polutan pantai Parangtritis berdasarkan data penelitian yang dilakukan PLN pada Laporan Akhir Pekerjaan Studi dan Survey Penyusunan Peta Tingkat Intensitas Polusi serta Pedoman Pemilihan Jenis Isolator di Pulau Jawa.
5. Tidak membahas struktur kimia bahan isolator.
6. Pengujian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Elektro Teknik Tegangan Tinggi Universitas Gadjah Mada Yogyakarta dan dilakukan pada suhu ruangan, tidak membahas pengaruh suhu, kelembaban, dan tekanan terhadap arus bocor yang diamati.

## II. DASAR TEORI

### 2.1 Pengertian Isolasi<sup>[2]</sup>

Isolasi adalah sifat bahan yang berfungsi dapat memisahkan secara elektrik dua buah atau lebih penghantar listrik bertegangan yang berdekatan, sehingga tidak terjadi kebocoran arus, lompatan api (*flashover*), ataupun percikan api (*sparkover*). Isolasi mempunyai pengertian memisahkan daerah yang bertegangan dengan daerah yang tidak bertegangan.

Kemampuan bahan isolasi untuk menahan tegangan disebut kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik dari bahan isolasi sangat penting dalam hal menentukan kualitas isolator yang nantinya akan mendukung keseluruhan sistem tenaga listrik. Semakin tinggi kekuatan dielektrik bahan isolasi, semakin baik kualitasnya.

Bahan isolasi yang digunakan pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa golongan yaitu: padat, cair, dan hampa. Berdasarkan fungsinya, bahan isolasi dapat digolongkan menjadi:

1. Penyangga / penggantung (*solid support*) yaitu bahan isolasi berbentuk padat. ( contoh : keramik, polimer, kayu dan sebagainya).

2. Bahan pengisi (*filling media*) yaitu bahan isolasi berbentuk cair atau gas, misalnya minyak, bitumen, aneka gas dan udara.

3. Bahan penutup (*covering material*) yaitu bahan isolasi yang biasanya terdapat pada bagian luar, berupa bahan padat atau cair, misalnya mika, porselin atau enamel.

Suatu bahan isolasi yang baik harus mempunyai resistansi isolasi tinggi, dan kekuatan dielektrik yang baik sehingga sifat hantarannya dapat diminimalkan.

Oleh sebab itu, pemakaian isolasi harus memperhatikan faktor ekonomis tanpa mengesampingkan faktor teknisnya. Artinya pemakaian isolasi harus ekonomis namun tidak mengurangi kemampuannya sebagai isolator. Maka dengan mempertimbangkan semua faktor yang ada diharapkan tercapai suatu jaringan listrik yang baik dan aman bagi teknisi maupun masyarakat serta efisien.

### 2.2 Media Isolasi

#### 2.2.1 Bahan Padat<sup>[1]</sup>

Bahan isolasi padat digunakan pada segala macam rangkaian dan peralatan listrik untuk memisahkan satu konduktor dengan yang lainnya saat dioperasikan pada tegangan yang berbeda. Suatu bahan isolasi yang baik haruslah memiliki kerugian dielektrik yang rendah, kekuatan mekanik yang baik, bebas dari gas dan uap air di dalam bahan isolasi, tahan terhadap panas dan kimia.

Isolasi padat biasanya digunakan pada sistem yang terletak diluar dan mempunyai *space* yang luas. Aplikasi isolator padat diantaranya isolator pada tiang-tiang jaringan distribusi dan transmisi, isolator pada trafo sebagai pemisah bagian bertegangan dengan tangki trafo.

Bahan isolasi padat yang selama ini digunakan yaitu bahan porselin atau keramik dan kaca. Sekarang ini telah mulai dikembangkan bahan isolasi padat dari jenis polimer. Isolasi padat digunakan secara luas dalam peralatan sistem tenaga listrik, terutama untuk isolator pemasangan luar. Oleh sebab itu, bahan dielektrik pada isolator pemasangan luar harus memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan tidak dipengaruhi oleh kondisi sekitarnya.

Bahan seperti porselin memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi, namun dari segi mekanik, isolator berbahan dasar porselin memiliki beban yang cukup berat. Sedangkan isolator berbahan gelas memiliki sifat higroskopis pada permukaan isolator, hal ini dikarenakan adanya larutan alkali dalam komposisi gelas, sehingga konduktivitas isolator menjadi lebih besar. Kelebihannya yaitu dari segi ekonomi isolator gelas lebih murah dibanding isolator porselin.

Untuk menyelesaikan masalah mekanis yang berat dari isolator porselin dan sifat higroskopis permukaan isolator gelas, maka sebagai alternatif, dikembangkan bahan polimer.

#### 2.2.2 Bahan Cair<sup>[1]</sup>

Salah satu jenis bahan isolasi yang sering digunakan adalah bahan isolasi cair. Keunggulan bahan isolasi cair yaitu dapat mengisi seluruh volume bahan yang diisolasinya dan secara simultan akan mendisipasikan panas secara konveksi. Media minyak memiliki efisiensi 10 kali lebih baik daripada udara atau nitrogen dalam hal kemampuan disipasi panasnya saat digunakan transformator. Kekuatan dielektrik dari minyak trafo bisa mencapai orde 100 kV/cm.

Isolasi zat cair merupakan campuran dari hidrokarbon. Saat digunakan untuk isolasi listrik, isolasi cair sedapat mungkin terbebas dari uap air, hasil oksidasi dan kontaminan

lainnya. Faktor penting yang berdampak pada kekuatan dielektrik dari isolasi cair adalah keberadaan kontaminan. Keberadaan kontaminan pada minyak trafo dapat menurunkan kekuatan dielektriknya dari keadaan sebelum adanya air.

2.2.3 Bahan Gas<sup>[1]</sup>

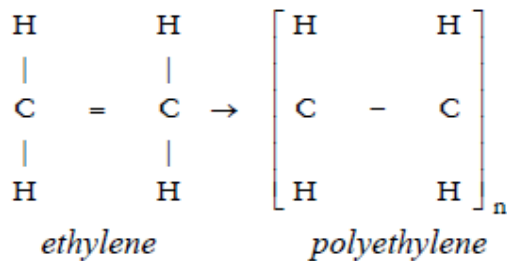
Bahan dielektrik yang paling sederhana dan paling banyak ditemukan adalah udara. Udara pada tekanan atmosfer merupakan media isolasi gas yang umum digunakan. Selain udara, gas yang digunakan untuk media isolasi adalah nitrogen (N<sub>2</sub>), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), freon (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) dan sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>).

Berbagai fenomena dapat terjadi pada isolasi gas saat suatu tegangan diterapkan. Saat tegangan yang diterapkan rendah, arus lemah mengalir diantara elektroda (namun tegangan listrik ini masih dapat ditahan). Akan tetapi, bila tegangan yang diterapkan tinggi, arus yang mengalir naik secara tajam, dan terjadilah kegagalan isolasi listrik. Lucutan api yang besar selama terjadi kegagalan isolasi menyebabkan suatu *short circuit* diantara elektroda. Nilai maksimum tegangan yang diterapkan pada media isolasi pada saat terjadinya kegagalan isolasi disebut tegangan gagal.

Terjadinya perkembangan arus yang besar saat kegagalan isolasi disebabkan oleh proses ionisasi. Elektron dan ion timbul dari atom-atom atau molekul-molekul netral, dan perpindahan elektron dan ion menuju anoda dan katoda inilah yang menyebabkan terjadinya arus yang besar.

2.3 Isolasi Polimer<sup>[2,8]</sup>

Isolasi polimer mempunyai struktur kimia terdiri atas molekul makro rantai panjang dengan ulangan unit monomer atau mer yang biasanya diberi nama awalan *poly* pada muka monomer, contoh monomer *ethylene* adalah monomer ulangan pada *polyethylene* seperti rumus kimia pada gambar 2.1.

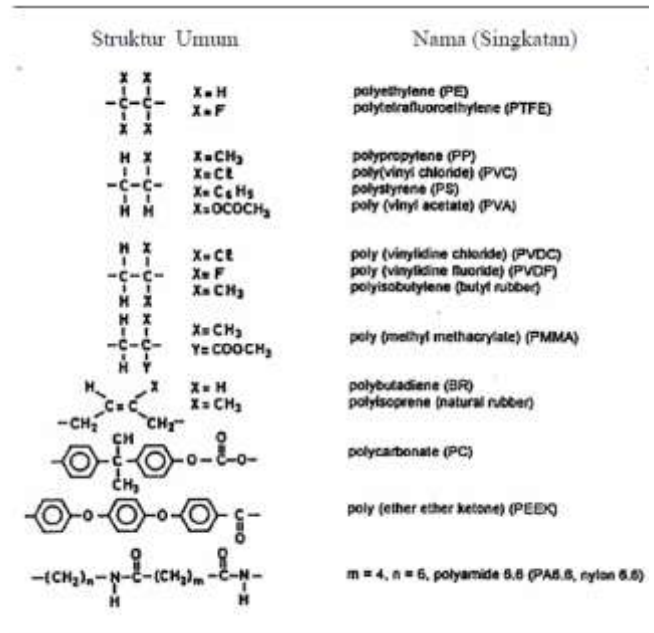


Gambar 2.1 Struktur ikatan kimia *polyethylene*

Isolasi polimer secara umum dapat dibagi kedalam dua kelompok :

1. Termoplastik (*Termoplastic Polymer*), terdiri dari ikatan fisika yang linier atau cabang molekul besar yang pada temperatur ruang atau sekeliling berbentuk padat dan akan berubah bentuknya pada temperatur lebih tinggi.
2. Termoset, pada temperatur ruang atau sekeliling berbentuk cair, dapat berbentuk padat melalui pengerasan dengan reaksi kimia antara komponen yang berbeda pada temperatur ruang. Setelah padat tidak dapat kembali cair (*irreversible*).

Bahan isolasi polimer yang dipergunakan dalam isolasi peralatan kelistrikan bersama dengan monomernya dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 struktur kimia bahan isolasi polimer

Gambar 2.2 mencakup polimer – polimer penting berdasarkan ikatan karbon (C) sepanjang rangkaian utama polimer. Hal ini dikenal sebagai *homopolimers*. Polimer *heterochain*, adalah bentuk lain dari homopolimer yang atom – atom karbon dalam rangkaian utamanya telah digantikan oleh elemen – elemen lain, dikategorikan berdasarkan karakteristik ikatan – ikatan kimia.

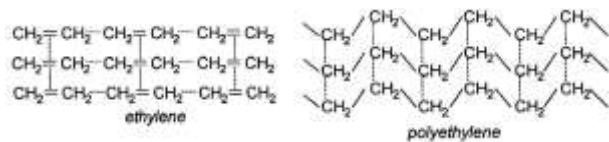
2.3.1 Pembentukan Polimer<sup>[2]</sup>

Polimer juga mempunyai ikatan – ikatan kimia di dalam rantai – rantai polimer selain mempunyai cabang – cabang. Ikatan ini diikat oleh molekul – molekul pendek, panjang atau bahkan molekul *polimeric* yang membentuk cabang – cabang yang berhubungan. Polimer terikat silang adalah satu molekul yang sangat besar dan mempunyai titik lebur di atas titik leburnya atau suhu transisi kaca. Ikatan silang diperoleh dengan beberapa cara berikut :

1. Pembentukan dengan katalis  
 Suatu katalis ditambahkan / dicampurkan ke dalam polimer, setelah pencampuran ini dibentuk sesuai cetakan tertentu, kemudian dipanaskan dan / atau diberi tekanan untuk membentuk reaksi ikatan silang. Pada beberapa kasus, katalis cukup reaktif sehingga reaksi dapat terjadi pada suhu kamar. Polimer yang tidak terikat silang dikenal sebagai *thermoplastic*. Contoh *polyethylene*, *polypropylene* dan *poly (etheretherketone)*. Jenis polimer ini dapat dibentuk menjadi bentuk lain.
2. Pembentukan dengan radiasi  
 Prosesnya hanya dapat digunakan untuk menghasilkan ikatan silang. Prosesnya hanya dapat digunakan pada bahan tipis dan dapat menyebabkan degradasi lain seperti pengurangan panjang rantai. Teknik ini hanya dapat digunakan pada aplikasi terbatas, karena membutuhkan alat tambahan yang mahal.
3. Pembentukan dengan bahan pengeras  
 Pengeras kimia dapat ditambahkan untuk menghasilkan ikatan silang. Resin epoksi adalah keluarga dari *thermoset* polimer yang dua komponen dicampur untuk menghasilkan bahan seperti kaca sehingga akan mempunyai sifat isolasi listrik yang baik.

2.3.2 Struktur polimer<sup>[2,8]</sup>

Suatu sistem polimer tersusun atas kristal – kristal padat tersebut mempunyai ikatan *interatomoic* dan intermolekul yang diberikan oleh gaya dari hubungan antar atom dan antar nolekul dari bahan. Ikatan *interatomic* dan intermolekul akan memberikan pengaruh terhadap kekuatan dari bahan. Ikatan *interatomic* akan memiliki gaya yang lebih besar daripada intermolekul. Pada gambar 2.3 dapat dilihat ikatan intermolekul dari molekul *ethylene polythelene*. Ikatan intermolekul ditunjukkan oleh garis putus – putus yang memberikan ikat yang lemah.



Gambar 2.3 Gaya intermolekul interatomic *ethylene* dan *polyethylene*

Tingkat pengkristalan akan sangat berpengaruh terhadap kekuatan fisik dari bahan polimer. Sifat kristal juga akan menentukan apakah suatu bahan bersifat elastis atau kaku. *Silicone rubber* merupakan salah satu contoh bahan yang memiliki tingkat pengkristalan yang rendah, sehingga ikatan antar molekul akan cukup lemah, yang rentan terhadap terjadinya proses degradasi. Tetapi pada bahan *silicone rubber* memiliki ikatan silang sehingga akan dapat memperbaiki struktur ikatan pada rantai kimianya.

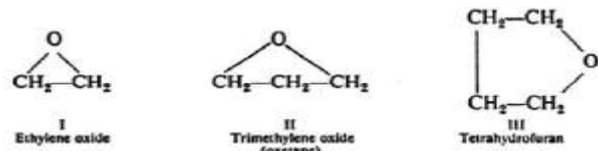
Penambahan suatu bahan pengisi seperti *carbon black* akan memperbaiki sifat fisik dari *silicone rubber* sehingga akan memiliki sifat seperti bahan dengan tingkat pengkristalan yang tinggi.

Polimer sebagai material isolasi jarang digunakan dalam keadaan murni, karena bahan tambahan dapat memperbaiki berbagai sifat bahan, Bahan tambahan tersebut menyebabkan struktur polimer akan berbeda sesuai dengan jenis bahan tambahan yang digunakan untuk tujuan aplikasi tertentu. Saetchling membagi bahan tambahan menjadi tiga kategori:<sup>[2]</sup>

1. Bahan pembantu (*auxiliaries*), digunakan selama proses pembentukan dan hanya residunya yang tertinggal. Katalis yang digunakan di dalam pengikatan silang dan sebagai agen emulsi biasanya dimasukkan di dalam kategori ini.
2. Bahan tambahan (*additives*), ditambahkan dalam konsentrasi kecil (<10%) yang mana tidak mengubah struktur polimer tetapi mempengaruhi karakteristiknya selama penggunaan yang mencakup pelumas dan *parting agents* yang mana memperbaiki karakteristik alir dan membantu cetakan membuka serta melepas, *stabilizers* untuk proteksi dari panas dan radiasi ultraviolet, anti oksidan untuk mencegah oksidasi, pelambat nyala api untuk menghambat suplai oksigen ketika dipanaskan, pigmen (tidak digunakan dalam aplikasi isolasi berkualitas tinggi), fleksibilitas untuk menaikkan ketahanan, dan lainnya seperti *antimicrobials agent* dan atistatik.
3. Bahan campuran (*compound ingredients*), digunakan dalam konsentrasi besar (10% – 70%) untuk mengubah sifat polimer selama pembuatan dan penggunaan. Bahan campuran dibedakan menjadi dua sub kategori yang mempunyai fungsi saling melengkapi : *fillers* dan *plasticisers*.

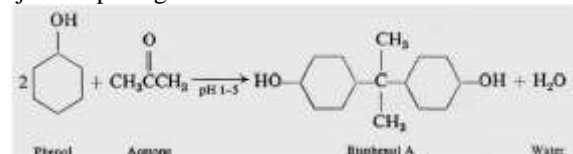
2.4 Resin Epoksi<sup>[2,8]</sup>

Resin epoksi merupakan suatu produk yang dihasilkan oleh reaksi bahan dasar dan pengeras atau, serta bahan pengisi, dapat dipergunakan sebagai material isolasi peralatan listrik. Resin epoksi merupakan polimer yang mengandung atom oksigen dengan atom carbon sehingga terbentuk *ethylene oxide (I)*, *trimethylene oxide (II)*, dan *tetrahydrofuran (III)*, seperti pada gambar 2.4.



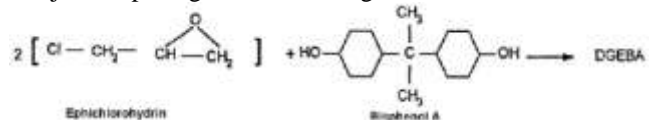
Gambar 2.4 Struktur molekul dasar resin epoksi

Bahan dasar resin epoksi yang sering banyak digunakan adalah *bisphenol A*, dan bahan ini mudah didapatkan di toko-toko bahan kimia. *Bisphenol A* adalah bahan isolasi polimer sebagai bahan dasar epoksi resin yang dihasilkan dari reaksi *phenol* dan *acetone*. Reaksi pembentukan *bisphenol A* ditunjukkan pada gambar 2.5.

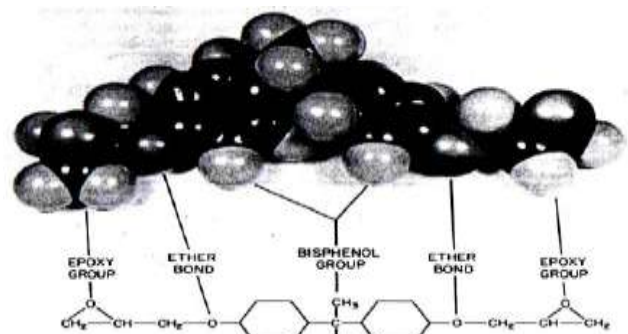


Gambar 2.5 Reaksi pembentukan *bisphenol A*

Pada perkembangannya *bisphenol A* diganti dengan isolasi polimer jenis epoksi sikloalifatik dengan bahan dasar dari *diglycidly ether of bisphenol A (DGEBA)*. Resin epoksi ini adalah kombinasi dari *bisphenol A* dan *epichlorohydrin* yang mempunyai formasi dari ikatan polimer, yang mengandung dua kelompok reaktif *epoxide* dan *hydroxyl*. Reaksi pembentukan dan model atom bahan dasar DGEBA ditunjukkan pada gambar 2.6 dan gambar 2.7.



Gambar 2.6 Reaksi pembentukan DGEBA



Gambar 2.7 Model atom DGEBA

Resin epoksi mempunyai kegunaan yang luas dalam industri teknik kimia, listrik, mekanik, dan sipil seperti perekat, cat pelapis, percetakan cor, dan benda-benda cetakan. Bahan ini terutama digunakan untuk bahan-bahan teknik seperti komponen listrik dan mekanik. Sifatnya bervariasi tergantung pada jenis, kondisi, dan percampuran dengan pengerasnya. Kelebihan resin epoksi adalah memiliki kestabilan di bawah kondisi-kondisi yang kurang baik,

sehingga sangat baik dalam meningkatkan keandalan peralatan listrik, selain itu resin epoksi memiliki dielektrik yang sempurna dan sifat-sifat mekanik yang baik.

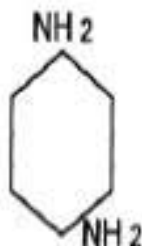
### 2.4.1 Pematangan Resin Epoksi<sup>[8]</sup>

DGEBA dijual secara komersial dalam bentuk cairan yang bening, dapat diubah menjadi produk termoset bila direaksikan dengan suatu agen pematangan, dengan vulkanisasi suhu ruangan (*room temperature vulkanized = RTV*). Agen pematangan ini disebut bahan pengeras (*hardener*).

Secara fungsi, pematangan pada resin epoksi dibedakan menjadi tiga group utama, yaitu grup *Hidroksil* (R – OH), grup *Amine*, dan grup *Acid Anhydried*. Masing – masing kelompok juga memiliki banyak jenis, setiap jenis memiliki kadar yang berbeda dalam proses pencampuran.

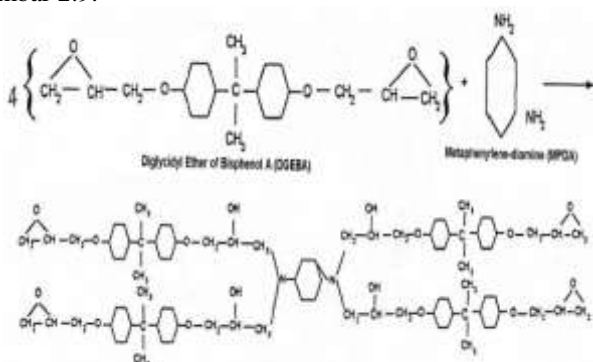
Reaksi pematangan terjadi melalui ikatan epoksi dari bahan dasar dan ikatan reaktif dari bahan pengeras. Reaksi antara bahan dasar resin epoksi dengan agen pematangan kelompok *asam anhidrida* merupakan reaksi yang lebih kompleks dibandingkan dengan agen pematangan kelompok *amine*.

Pengujian ini menggunakan agen pematangan dari grup *amine* yaitu *Metaphenyelene-diamine* (MPDA) karena MPDA ini termasuk yang paling sering digunakan sebagai agen pematangan resin epoksi. MPDA merupakan bahan berwarna kuning terang yang mempunyai berat molekul 108 dengan struktur kimia seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Struktur kimia MPDA

Pembentukan ikatan silang antara bahan dasar (DGEBA) dan bahan pengeras (MPDA) dapat dilihat seperti gambar 2.9.



Gambar 2.9 Reaksi pembentukan DGEBA + MPDA

### 2.4.2 Aplikasi resin epoksi<sup>[1]</sup>

Resin epoksi digunakan dalam banyak aplikasi industri, hal ini disebabkan oleh keserbagunaannya, beberapa contoh penerapan di masa sekarang adalah sebagai berikut :

1. Sebagai perekat untuk pesawat terbang dengan struktur sarang lebah.
2. Sebagai bahan patri dan bahan campuran dempul untuk perbaikan plastik dan logam dari kapal, automobil dan sebagainya.

3. Sebagai resin pelapis untuk aplikasi bingkai udara dan peluru, untuk struktur lilitan kawat pijar.
4. Sebagai bahan pencampur, cairan pengisi dan pelapis isolasi peralatan listrik dan elektronik.

### 2.5 Bahan pengisi isolator<sup>[2]</sup>

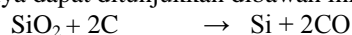
Penggunaan bahan pengisi pada suatu produk tuangan mengandung dua maksud/ tujuan secara teknis dan maksud/ tujuan secara ekonomis (*Bradley, Wright, 1967*). Secara teknis, penggunaan bahan pengisi dimaksudkan sebagai upaya memodifikasi kinerja polimer tersebut seperti untuk meningkatkan sifat mekanis (*v.d, Huir, 1991*), meningkatkan konduktivitas thermal, menurunkan ekspansi termal (*Saunders, 1937 ; Ott, 1980*) dan untuk menurunkan sifat absorpsi air (*Beyer, 1991*). Dan secara ekonomis penggunaan bahan pengisi dimaksudkan sebagai bahan upaya untuk mereduksi biaya pembuatan produk tuangan.

Seorang peneliti di Hochspnungsinstitut TU Braunschweig, Jerman (*v.d, Huir, 1991*) mengemukakan bahwa penggunaan bahan pengisi yang tinggi (lebih dari 70 %) pada suatu produk tuang tidak dapat direalisasikan. Peningkatan penggunaan bahan pengisi akan menurunkan viskositas campuran epoksi dan bahan pengisi pada saat kedua bahan tersebut dicampurkan sehingga menghambat proses peluahan gas. Oleh karena itu perlu dilakukan optimasi dosis bahan pengisi yang akan dipergunakan pada suatu produk tuangan. Bahan pengisi yang digunakan adalah karet silikon (*silicone rubber*) dan pasir silika. Bahan campuran ini digunakan untuk memperbaiki karakteristik dari isolator polimer tersebut.

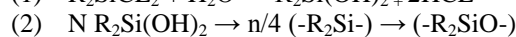
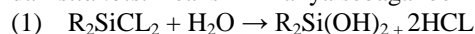
### 2.6 Silane (*silicone rubber*)<sup>[1,2]</sup>

Silane yang disebut juga *silicon rubber* adalah bahan yang tahan terhadap temperatur tinggi yang digunakan untuk isolasi kabel dan bahan isolasi tegangan tinggi. *Silicone Rubber* merupakan *polymeric synthetic* yang relatif baru penggunaannya sebagai bahan isolasi dalam bidang teknik listrik dibanding dengan polimer lainnya seperti resin epoksi atau *polyethylene*.

Karet silikon ( $[(CH_3)_2 SiO]_n$ ), tersusun atas monomer-monomer *cilicxiloxane* yang membentuk *polydimethylsiloxane* (PDMS). Karet silikon memiliki derajat polimerisasi (n) dari 4.000 sampai 10.000 dan memiliki berat molekul yang tinggi. Untuk mendapatkan suatu atom silikon dilakukan dengan menggunakan karbon pada suatu pemanasan listrik. Reaksinya dapat ditunjukkan dibawah ini:



Penggabungan elemen silikon dengan grup *methyl*,  $CH_3$  dilakukan dengan mereaksikan *methylchloride*,  $CH_3Cl$ , sehingga diperoleh *trimethylchlorosilane*,  $CH_3SiCl_2$ . Selanjutnya dari proses penguraian diperoleh *dimethylchlorosilane*,  $CH_2SiCl_2$  atau *methylchlorosilane*. Untuk mendapatkan hasil maksimum dapat diperoleh dengan mengendalikan *dimethylchlorosilane*. Silane selanjutnya dihidrolisis untuk mendapatkan silanol, yang merupakan unsur dasar penyusun karet silikon melalui *polycondensation* dari *silanols*. Reaksi kimianya sebagai berikut :



Setelah melalui reaksi polimerisasi, diperoleh karet silikon yang memiliki derajat polimerisasi yang sangat tinggi berkisar antara 300.000 sampai 1.000.000 dengan berat molekul yang sangat tinggi.

Struktur kimia karet silikon yang terdiri dari suatu tulang punggung (*backbone*) silikosan yang lebih fleksibel dibandingkan polimer lainnya. Jarak ikatan Si – O lebih panjang dibandingkan jarak ikatan C – C yang banyak ditemukan pada polimer organik. *Interfensi sterik* atau kemacetan gerak antar molekul pada struktur tersebut, dapat diperkecil. Rantai pada atom oksigen tidak terbebani oleh gugus samping. Sudut ikatan Si – O – Si ( $180^\circ - \theta$ ) -  $143^\circ$  lebih terbuka dibandingkan ikatan *tetrahedral* biasa ( $\sim 110^\circ$ ). Keadaan struktur rantai ini menurut Mark (1992) berperan untuk meningkatkan keseimbangan dan fleksibilitas rantainya. Sehingga rantai mampu melakukan suatu bentuk yang rapat (*compact*) ketika dalam keadaan tergulung acak, dan rantai siloksan yang terdapat gugus metil mampu meluruskan sendiri (*align it self*) untuk bersekutu menghasilkan sifat hidrofobik pada permukaannya.

**2.7 Pasir Silika**<sup>[12]</sup>

Silika atau dikenal dengan silikon dioksida (SiO<sub>2</sub>) merupakan senyawa yang banyak ditemui dalam bahan galian yang disebut pasir kuarsa, terdiri atas kristal-kristal silika (SiO<sub>2</sub>) dan mengandung senyawa pengotor yang terbawa selama proses pengendapan. Pasir kuarsa juga dikenal dengan nama pasir putih merupakan hasil pelapukan batuan yang mengandung mineral utama seperti kuarsa dan feldspar. Pasir kuarsa mempunyai komposisi gabungan dari SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, dan K<sub>2</sub>O, berwarna putih bening atau warna lain bergantung pada senyawa pengotornya.

Silika biasa diperoleh melalui proses penambangan yang dimulai dari menambang pasir kuarsa sebagai bahan baku. Pasir kuarsa tersebut kemudian dilakukan proses pencucian untuk membuang pengotor yang kemudian dipisahkan dan dikeringkan kembali sehingga diperoleh pasir dengan kadar silika yang lebih besar bergantung dengan keadaan kuarsa dari tempat penambangan. Pasir inilah yang kemudian dikenal dengan pasir silika atau silika dengan kadar tertentu. Silika biasanya dimanfaatkan untuk berbagai keperluan dengan berbagai ukuran tergantung aplikasi yang dibutuhkan seperti dalam industri ban, karet, gelas, semen, beton, keramik, tekstil, kertas, kosmetik, elektronik, cat, film, pasta gigi, dan lain-lain. Untuk proses penghalusan atau memperkecil ukuran dari pasir silika umumnya digunakan metode *milling* dengan *ball mill* untuk menghancurkan ukuran pasir silika yang besar-besar menjadi ukuran yang lebih kecil dan halus, silika dengan ukuran yang halus inilah yang biasanya banyak digunakan dalam industri.

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

baik terlebih pada jalan salju, mereduksi kebisingan yang ditimbulkan dan usia ban lebih panjang daripada produk ban tanpa penambahan nanosilika.

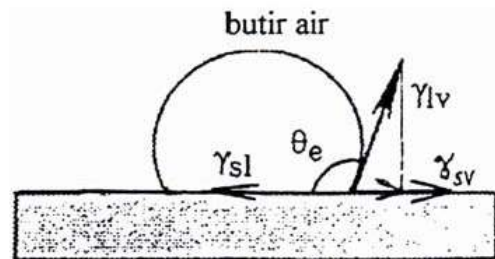
Untuk memperoleh ukuran silika sampai pada ukuran nano/ mikrosilika perlu perlakuan khusus pada prosesnya. Untuk mikrosilika biasanya dapat diperoleh dengan metode *special milling*, yaitu metode *milling* biasa yang sudah dimodifikasi khusus sehingga kemampuan untuk menghancurkannya jauh lebih efektif, dengan metode ini bahkan dimungkinkan juga memperoleh silika sampai pada skala nano. Sedangkan untuk nanosilika bisa diperoleh dengan metode-metode tertentu yang sekarang telah banyak diteliti diantaranya adalah *sol-gel process*, *gas phase process*, *chemical precipitation*, *emulsion techniques*, dan *plasma spraying & foging process* (polimerisasi silika terlarut menjadi organo silika).

Sebagai tambahan adalah bahwa utilisasi kapasitas produksi industri silika lokal belum maksimal, baru 50% dari kapasitas maksimal yang ada. Hal ini disebabkan karena produk silika lokal yang dihasilkan belum memenuhi spesifikasi yang dibutuhkan oleh pasar yaitu silika dengan ukuran sub mikron, sementara hasil produksi silika lokal berukuran  $\geq 30 \mu\text{m}$ . Dengan cadangan bahan baku silika yang melimpah dan potensi pasar yang masih terbuka lebar maka perlu dicarikan solusi agar sumber daya yang ada dapat dimanfaatkan secara optimal bagi perkembangan industri.

**2.8 Sudut Kontak**<sup>[2]</sup>

Sudut kontak merupakan sudut yang dibentuk antara permukaan bahan uji dengan air destilasi yang ditetaskan ke permukaan bahan uji. Pengukuran sudut kontak pada sampel isolator ini digunakan untuk mengetahui sifat permukaan sampel isolator saat dilewati polutan, yaitu hidrofobik atau hidrofilik. Sifat hidrofobik merupakan suatu karakteristik bahan isolasi, dalam keadaan terpolusi bahan masih mampu bersifat menolak air yang jatuh dipermukaannya.

Hubungan antara tegangan permukaan bahan padat, udara dan air dapat dilihat pada gambar 2.10



**Gambar 2.10** Ilustrasi sudut kontak pada permukaan bahan

Persamaan dasar untuk pengukuran tegangan permukaan yang padat, dengan mengukur sudut kontak, yang diberikan oleh persamaan Young berikut :

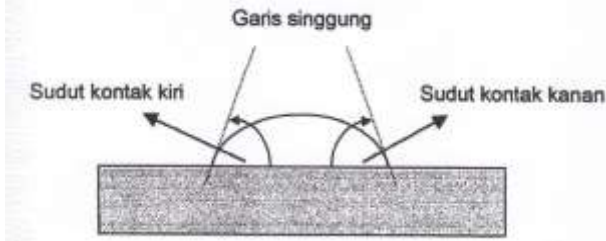
$$\gamma_{sl} = \gamma_{sv} - \gamma_{lv} \cos \theta_e \dots\dots\dots 2.1$$

Besaran – besaran dari persamaan Young  $\gamma_{sv}$ ,  $\gamma_{sl}$ ,  $\gamma_{lv}$  adalah tegangan antarmuka masing – masing dari padat/gas, padat/cair, dan cair/gas, serta  $\theta_0$  adalah sudut kontak keseimbangan. Persamaan (2.1) menunjukkan keseimbangan tetesan cairan pada permukaan.

Kuantitas ukur pembasahan dari suatu permukaan adalah sudut kontak ( $\theta$ ), yaitu sudut yang terjadi antara permukaan zat dan garis singgung cairan. Sudut kontak memberikan informasi mengenai energi permukaan, kekerasan, dan keheterogenan permukaan. Selain itu sudut

kontak juga merupakan ukuran dari suatu permukaan terkontaminasi.

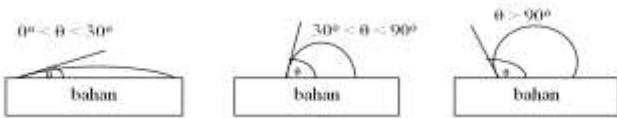
Sudut kontak dapat dicari dengan menyempatkan air ke permukaan bahan isolator dan mengamati kemampuan bahan isolator dalam membentuk tetes air serta bentuk dari tetes air itu (Swedish Transmission Research Institute, *STRI Guide 1, 92/1, Hydrophobicity Classification Guide*), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Perhitungan sudut kontak

$$\text{Sudut kontak} = \frac{\text{sudut kontak kiri} + \text{Sudut kontak kanan}}{2} \dots\dots 2.2$$

Gambar 2.12 menunjukkan klasifikasi sudut kontak yang mengklasifikasikan permukaan material dengan kuantitas sudut kontak yaitu permukaan material sangat basah (hidrofilik) bila sudut kontak cairan pada permukaannya lebih kecil dari 30°. Bila sudut kontak antara 30° sampai dengan 89°, permukaan material disebut basah sebagian (*partially wetted*). Sudut kontak lebih dari 90° disebut hidrofobik atau bersifat menolak air.



Gambar 2.12 Klasifikasi sudut kontak

**2.9 Polutan<sup>[2]</sup>**

Sebagian besar polutan dibawa oleh angin yang sangat mempengaruhi pembentukan endapan polutan pada permukaan isolator. Polutan yang terdapat di udara dapat menempel pada permukaan isolator dan akan membentuk lapisan tipis pada permukaan isolator. Terbentuknya kontaminasi dapat diuraikan sebagai berikut.

**1. Polutan Laut**

Angin yang membawa butir-butir air akan mengotori permukaan isolator yang terpasang pada saluran udara di daerah pantai. Polutan ini sebagian besar terdiri dari garam yang larut dalam air. Apabila bahan bersifat hidrofobik, maka butir-butir air yang mengandung garam tersebut akan menyelimuti permukaan isolator. Jika butir-butir air garam tersebut kering, maka titik-titik endapan polutan akan menyelimuti permukaan isolator. Jika hal ini berlangsung secara kontinyu, maka dari lapisan air dan endapan polutan akan menimbulkan busur api listrik pada permukaan, sehingga secara perlahan-lahan sifat hidrofobik bahan akan hilang.

**2. Polutan Darat**

Angin yang membawa debu dari polutan industri, debu pasir dari gurun pasir, debu gunung berapi, akan membentuk lapisan yang rata pada permukaan isolator yang terpasang pada saluran udara di daerah dekat dengan sumber polutan tersebut. Embun maupun kabut akan membasahi lapisan polutan. Interaksi antara air dan polutan akan membentuk lapisan yang padat pada permukaan isolator, sehingga akan melekat pada permukaan isolator.

Unsur polutan yang paling berpengaruh terhadap unjuk kerja isolator adalah garam yang terbawa oleh angin laut.

Lapisan garam ini bersifat konduktif terutama pada keadaan cuaca lembab, kabut, maupun hujan gerimis. Di saat kondisi cuaca demikian, akan mengalir arus bocor dari kawat fasa ke tanah melalui lapisan konduktif yang menempel pada permukaan isolator maupun pada tiang penyangga.

Lapisan polutan konduktif tersebut dapat dianggap sebagai tahanan yang menghubungkan kedua jepitan logam isolator. Tahanan lapisan polutan jauh lebih rendah dibanding tahanan dielektrik padat isolator, maka arus bocor akan mengalir melalui lapisan polutan tersebut.

Adanya arus bocor ini akan menimbulkan panas. Panas ini akan mengeringkan lapisan polutan, yaitu diawali pada daerah permukaan isolator yang dekat dengan jepitan kawat fasa, yang disebut pita kering, karena di daerah inilah konsentrasi arus lebih tinggi. Pengeringan tersebut menyebabkan tahanan di lapisan polutan di daerah pita kering semakin besar. Akibatnya beda tegangan pada daerah ini semakin besar dan kuat medan listriknya juga semakin besar. Apabila kuat medan listrik ini melebihi kekuatan dielektrik udara, maka terjadi busur api. Busur api ini menyebabkan lapisan polutan yang kering mengalami hubung singkat, sehingga arus bocornya semakin besar. Arus bocor ini akan memanaskan lapisan polutan yang masih basah, dan proses ini akan berulang sampai terjadi busur api yang menghubungkan kedua jepitan logam, yaitu kawat fasa dan kawat yang dibumikan, maka terjadilah lewat denyar pada isolator.

**2.10 Arus bocor permukaan bahan isolasi<sup>[1,2]</sup>**

Arus bocor permukaan bahan isolasi saluran udara pemasangan luar tergantung dari kondisi polutan yang menyebabkan kontaminasi permukaan. Polutan dapat berasal dari daerah pinggir laut / pantai, industri, debu vulkanik, tergantung pada iklim dan kondisi cuaca. Pembasahan lapisan kontaminasi oleh karena kelembaban yang tinggi, butir – butir air, mengakibatkan elektrolit yang konduktif, sehingga resistansi permukaan akan menjadi kecil, dan kemudian akan mengalir arus bocor permukaan. Arus bocor ini memberikan informasi tentang kuantitas kontaminasi dari polutan pada permukaan, juga menentukan bagaimana pengaruh kinerja lewat denyarnya. Lewat denyar terjadi karena peluahan pada pita kering melalui permukaan yang basah sebelum tegangan sama dengan nol. Jika arus bocor cukup tinggi terjadi peluahan terus menerus yang akhirnya timbul lompatan api (lewat denyar).

**2.10.1 Pembentukan Pita Kering<sup>[1]</sup>**

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

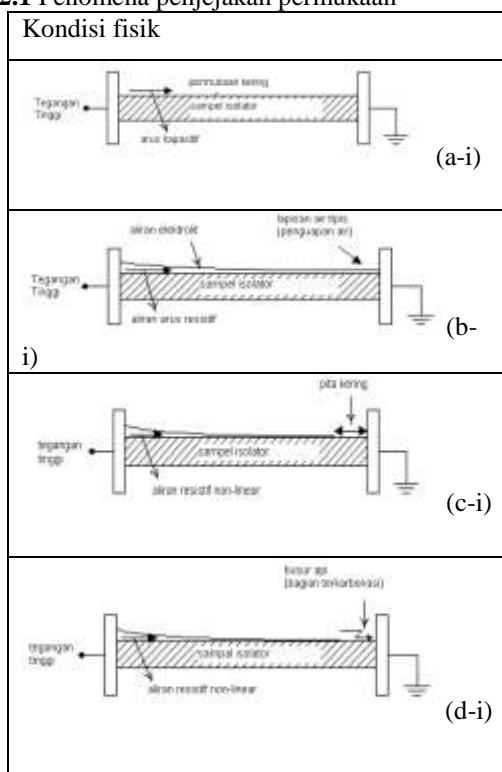
Proses penguapan akibat adanya arus bocor akan menyebabkan naiknya temperatur lapisan. Jika pemanasan oleh arus bocor sudah tidak menyebabkan kenaikan temperatur lagi, maka proses pengeringan telah selesai, dan

terbentuklah pita kering pada permukaan isolator tersebut. Jika pita kering yang terbentuk semakin banyak, maka lebar pita kering akan bertambah. Hal ini juga akan memperpanjang busur api. Hal ini berlangsung secara kontinyu sehingga dapat melingkupi permukaan isolator dan akan mengakibatkan terjadinya *flashover*.

**2.10.2 Karakteristik Arus Bocor<sup>[1]</sup>**

Terjadinya perluasan jalur karbon sepanjang permukaan isolator disebabkan karena adanya lucutan listrik yang berkesinambungan, lucutan ini akan menyebabkan terjadinya arus bocor. Besarnya arus bocor tergantung pada tekanan listrik, lingkungan dan juga tingkat kontaminasi permukaan isolator. Proses fenomena penjejakan permukaan (*surface tracking*) dari perkembangan arus bocor dan lengkung pita kering ditunjukkan pada tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Fenomena penjejakan permukaan



Transisi dari arus bocor sampai terjadinya *flashover* dapat digolongkan kedalam tahapan yang berbeda. Selama kondisi kering, permukaan isolator memiliki impedansi tinggi dan arus bocor kapasitif yang sangat rendah mengalir dipermukaan seperti ditunjukkan pada (gambar (a-i)). Ketika permukaan isolator sepenuhnya dibasahi aliran elektrolit sebagai kontaminan, arus bocor resistif dengan magnitudo yang lebih tinggi mulai mengalir melalui film konduktif. Arus bocor tidak seragam ini disebabkan karena film konduktif yang tidak terdistribusi merata. Dalam keadaan pengujian, isolator dipasang sedemikian rupa sehingga elektrolit mengalir dari elektroda tegangan tinggi ke elektroda pentanahan dan demikian menghasilkan kepadatan arus bocor tertinggi di daerah ini seperti digambarkan pada gambar (b-i). Panas yang dihasilkan dari arus bocor ini menguapkan sebagian cairan dan menyebabkan terbentuknya pita kering (gambar (c-i)). Karena impedansi pita kering yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan sisa impedansi lapisan air, seluruh tegangan aplikasi melintasi isolator

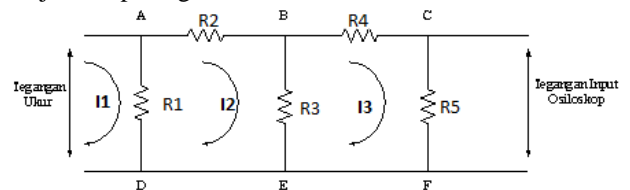
muncul di pita kering dan menghasilkan gradien tegangan yang lebih tinggi. Jika medan lokal sesaat ini melebihi nilai dadal (*breakdown*), pelepasan dimulai seperti digambarkan pada gambar (d-i). Busur api tercipta dari peluahan listrik permukaan dan menguraikan struktur molekul sampel isolasi membentuk jalur karbon. Pada pengujian ini terjadi bunga api kecil terus menerus dan jalur karbon akan menyebar ke elektroda tegangan tinggi.

**2.10.3 Faktor yang Mempengaruhi Arus Bocor<sup>[1,6]</sup>**

Secara umum, bahan polimer kehilangan hidrofobitasnya beberapa derajat setelah terkena listrik dan tekanan lingkungan seperti radiasi ultra violet dan variasi suhu. Perubahan hidrofobitas permukaan ini mempengaruhi besarnya arus bocor yang terjadi. Selain itu tingkat arus bocor juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang banyak jenis partikel kontaminannya, kontaminan yang berbeda memberikan tingkat arus bocor yang berbeda karena perbedaan komponen ion elektrolitnya.

**2.10.4 Mekanisme Pengujian Arus Bocor<sup>[1,2]</sup>**

Pengujian arus bocor ini bertujuan untuk mendapatkan data yang berupa nilai arus bocor dari bahan resin epoksi, untuk melakukan pengamatan ini maka dibutuhkan osiloskop sebagai alat bantu. Input tegangan yang masuk ke dalam osiloskop harus sesuai dengan karakteristik kemampuan osiloskop tersebut. Piranti pengamanan dan perlindungan bagi osiloskop diperlukan untuk membatasi tegangan besar yang masuk ke dalam osiloskop, yaitu dengan cara memasang rangkaian pembagi tegangan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13.



**Gambar 2.13** Rangkaian pembagi tegangan

Berdasarkan rangkaian pada gambar 2.13 dapat dilakukan perhitungan untuk mengetahui besarnya arus  $I_1$  dengan nilai tegangan input osiloskop  $V$  melalui persamaan berikut :

Loop ABED :  $( I_1 - I_2 ) R_1 = I_2 R_2 + ( I_2 - I_3 ) R_3$  .....(2.3)

Loop BCFE:  $( I_2 - I_3 ) R_3 = I_3 ( R_4 + R_5 )$  .....(2.4)

$I_3 R_5 = V_{CF}$  .....(2.5)

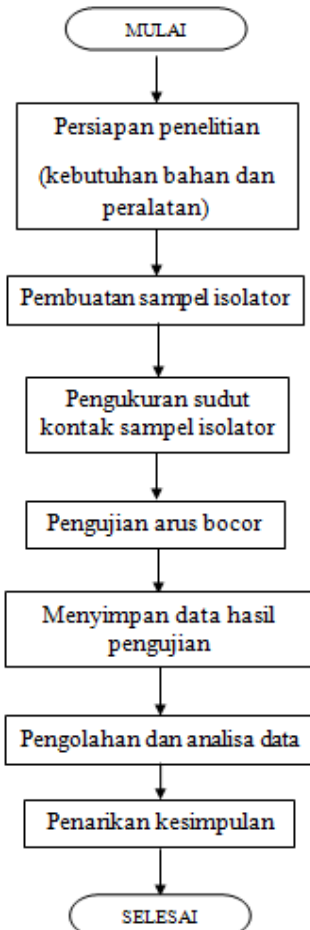
Persamaan – persamaan tersebut dapat digunakan untuk mendapatkan arus bocor sesuai dengan rangkaian pengujian dimana  $I_3$  mewakili nilai arus bocor ( $I_{lc}$ ) yang diamati dan  $V_{CF}$  menunjukkan nilai tegangan yang terbaca osiloskop.

**III. METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 Diagram alir penelitian**

Pada percobaan dilakukan langkah – langkah pelaksanaan penelitian yang dapat dilihat pada gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

**3.2 Bahan uji**

Bahan uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bahan dasar polimer resin epoksi jenis *DGEBA* (*Diglycidyl Ether of Bisphenol A*), bahan pematang / pengeras *MPDA* (*Metaphenylenediamine*).



Gambar 3.2 Resin epoksi dan bahan pengeras

2. Bahan pengisi yaitu *Silicone rubber* atau *Silane* atau biasa disebut lem kaca, dipasaran dikenal dengan *Sealant*.



Gambar 3.3 *Silicon rubber* atau lem kaca

3. Pasir silika
4. Polutan berupa polutan pantai Parangtritis

**Tabel 3.1** Komposisi Polutan Parangtritis

Nama Unsur	Komponen Polutan	Data polutan (ppm)	Berat polutan (mg)
K <sup>+</sup>	KCl	1,1	2,0872
Na <sup>+</sup>	NaCl	183,3	466,2196
Ca <sup>++</sup>	CaCl <sub>2</sub>	35,135	97,4996
Mg <sup>++</sup>	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	28,807	243,6592

**3.3 Peralatan Pengujian**

Peralatan yang digunakan terdiri atas peralatan untuk mencetak bahan uji, peralatan untuk mengukur sudut kontak, dan peralatan pengukuran arus bocor, serta peralatan lain yang digunakan selama penelitian.

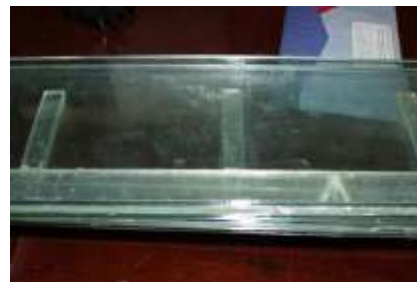
1. Seperangkat alat pencetak bahan uji  
Terdiri atas cetakan kaca yang dilapisi mika, timbangan, gelas kaca untuk mencampur bahan, dan sendok untuk mengaduk. Cetakan ini berukuran panjang 400 mm dan lebar 70 mm dengan sekat 10 mm.



Gambar 3.4. Gelas kaca



Gambar 3.5. Timbangan



Gambar 3.6. Cetakan kaca

2. Seperangkat alat pengukur sudut kontak  
Alat yang digunakan untuk mengukur sudut kontak yaitu kotak sumber cahaya, gelas, pipet tetes dengan volume 50 µl.



Gambar 3.7. Kotak sumber cahaya



**Gambar 3.8.** Pipet volume 0.05 ml/50 µl

Daya motor : 30 W, AC 90V-260V, 50/60 Hz  
 Kecepatan : 0.1 – 100 rpm  
 Kecepatan aliran air : 0.07 – 380 ml/min  
 Diameter Pipa : 16 mm  
 Kontrol kecepatan : *membrane keypad*  
 Dimensi : 232 x 142 x 149  
 Berat : 2.3 kg

3. Seperangkat alat pengukuran arus bocor  
 Alat-alat yang digunakan untuk pengukuran arus bocor terdiri atas:

a. Elektroda



**Gambar 3.9.** Elektroda atas



**Gambar 3.10.** Elektroda bawah

Elektroda yang digunakan yaitu elektroda atas dan elektroda bawah yang terbuat dari aluminium. Elektroda ini yang dijepit pada bahan uji.

b. Support 45°

Fungsi support adalah untuk meletakkan bahan uji yang telah dijepit bahan uji dengan kemiringan 45°.

c. Transformator

Spesifikasi trafo yang digunakan yaitu:

Frekuensi : 50 Hz  
 Kapasitas : 5 kVA  
 Tegangan primer : 100/200 V  
 Tegangan sekunder : 50.000 V



**Gambar 3.11.** Transformator

d. Pompa peristaltik

Pompa ini digunakan untuk mengalirkan polutan ke permukaan bahan uji yang kecepatannya konstan yaitu 0,3 ml. Pompa peristaltik yang digunakan adalah Longer Pump BT100-2J dengan *pump head* tipe YZII15. Spesifikasi pompa ini yaitu:



**Gambar 3.12.** Pompa peristaltic

e. Alat ukur

Alat ukur yang digunakan yaitu multimeter dan osiloskop. Multimeter ini dilengkapi dengan *probe* tegangan tinggi dengan skala 1 : 1000 yang digunakan untuk mengukur tegangan yang dikenakan pada bahan uji. Sedangkan osiloskop digunakan untuk mengukur tegangan output rangkaian pembagi tegangan.



**Gambar 3.13.** osiloskop GW-Instek GDS-2104

Spesifikasi osiloskop yang digunakan yaitu sebagai berikut.

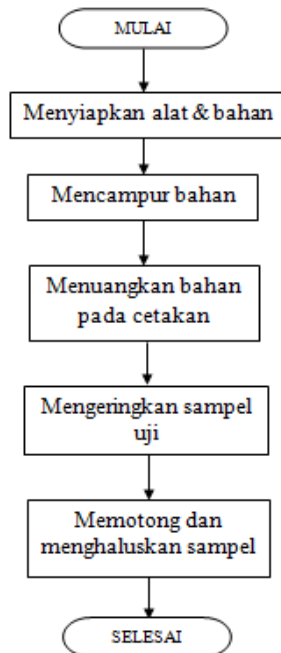
Tipe : GW instek GDS 2104 series  
 Bandwidth : 100 MHz  
 Chanel input : 4 buah  
 Time sampling : 1 GSa/s real time dan 25 G Sa/s equivalent-time sampling  
 Transfer Data : Data USB *Host/Device* yang mensupport USB printer dan USB *flash drive*

f. Peralatan pendukung

Peralatan pendukung yang digunakan yaitu kamera foto yang berfungsi untuk mengambil gambar selama pengukuran / pengujian; alat ukur keadaan udara yang terdiri atas termometer yang dipakai untuk mengukur suhu udara, barometer untuk mengukur tekanan udara, dan higrometer untuk mengukur kelembaban udara; komputer / laptop yang digunakan untuk menyimpan data dari osiloskop dan juga digunakan untuk mengolah data pengukuran / pengujian.

### 3.4 Pembuatan dan Pencetakan Bahan Uji

Pembuatan dan pencetakan bahan uji dapat dilihat pada gambar 3.10 berikut.



Gambar 3.14 Diagram alir pembuatan sampel

Langkah-langkah untuk membuat sampel bahan yang akan di uji berdasarkan gambar 3.14 yaitu sebagai berikut.

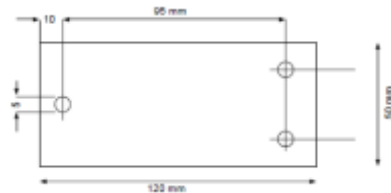
1. Menyiapkan alat dan bahan  
Alat yang diperlukan dalam proses pembuatan sampel meliputi cetakan kaca, mangkuk untuk mencampur bahan, sendok plastik untuk mengaduk, dan timbangan digital. Sebelum cetakan digunakan dilapisi mika terlebih dahulu dengan maksud agar bahan tidak lengket pada cetakan dan agar memperoleh permukaan bahan yang halus. Sedangkan bahan yang disiapkan yaitu resin epoksi (*DGEBA* dan *MPDA*) dan lem kaca atau silane serta pasir silika.
2. Mencampur bahan  
Terlebih dahulu mencampur pasir silika dengan *DGEBA* dan diaduk hingga tercampur rata, setelah itu dicampur *sealant* kemudian dicampur lagi hingga tercampur rata. Setelah itu dicampur dengan *MPDA* kemudian diaduk kembali sampai mendapatkan campuran yang merata. Komposisi tiap bahan dapat dilihat pada tabel berikut. Untuk setiap variasi komposisi bahan dapat dibuat menjadi 3 sampel uji.

Tabel 3.2 Komposisi bahan penyusun sampel uji

Tipe	Pasir Silika	Komposisi Sampel		
		<i>DGEBA</i>	<i>MPDA</i>	<i>Sealant</i>
Variasi 1	5 gram	30 gram	30 gram	20 gram
Variasi 2	10 gram	30 gram	30 gram	20 gram
Variasi 3	15 gram	30 gram	30 gram	20 gram
Variasi 4	20 gram	30 gram	30 gram	20 gram
Variasi 5	25 gram	30 gram	30 gram	20 gram

Berdasarkan tabel 3.2 di atas dapat diketahui bahwa perbedaan sampel uji dibedakan berdasarkan berat pasir silika yang digunakan. Untuk bahan *DGEBA* dan *MPDA* memiliki berat yang sama.

3. Menuangkan bahan pada cetakan kaca  
Penuangan bahan dilakukan setelah semua bahan tercampur dengan rata. Untuk setiap kali cetak dapat dibuat 3 sampel dengan ukuran 120 mm x 50 mm x 5 mm. Setelah penuangan, memastikan permukaan bahan bebas dari *void* yang timbul pada saat proses pengadukan.
4. Mengeringkan sampel uji  
Bahan yang sudah dicetak dibiarkan selama 24-36 jam dalam suhu ruangan untuk mendapatkan bahan uji yang padat dan kering.
5. Memotong dan menghaluskan bahan sesuai ukuran  
Bahan yang telah kering kemudian dipotong untuk mendapatkan dimensi 120 mm x 50 mm x 5 mm. Kemudian menghaluskan sisi-sisi sampel agar lebih rata. Sampel kemudian dilubangi menggunakan bor dengan diameter mata bor 50 mm. Lubang-lubang ini berfungsi untuk meletakkan elektroda beserta elemen rakitnya.



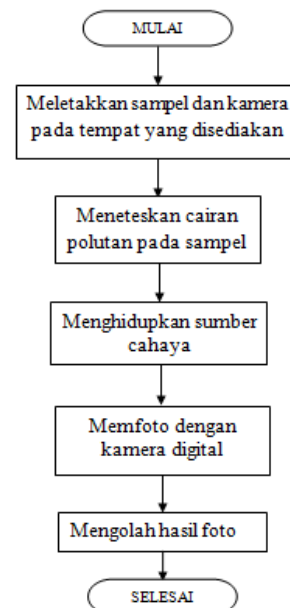
Gambar 3.15 Dimensi bahan uji



Gambar 3.16 Sampel isolator pengujian

### 3.5 Pengujian Sudut Kontak

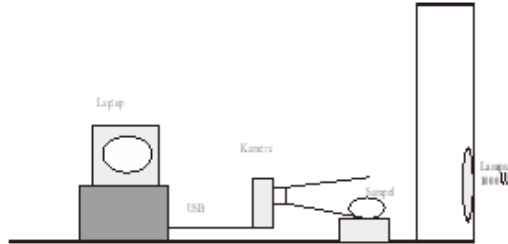
Pengujian sudut kontak ini dimaksudkan untuk mengetahui sifat permukaan bahan uji. Sifat yang dimaksud yaitu sifat hidrofobik. Jika sudut yang didapat semakin besar, artinya besar kemungkinan bahan tersebut memiliki sifat hidrofobik. Semakin hidrofobik suatu permukaan bahan, maka semakin besar pula kekuatan bahan untuk menahan air agar tidak masuk ke dalam bahan.



Gambar 3.17 Diagram alir pengujian sudut kontak

Langkah pengujian sudut kontak berdasarkan gambar 3.17 yaitu sebagai berikut,

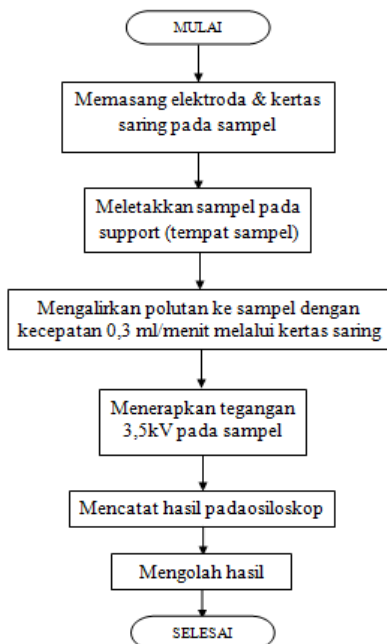
1. Meletakkan sampel dan menghidupkan kamera, keduanya diposisikan sedemikian rupa sehingga pada layar kamera, permukaan sampel tampak seperti garis lurus.
2. Meneteskan air sebanyak 50 µl. Air yang diteteskan ini berupa cairan polutan.
3. Menghidupkan sumber cahaya agar ketika diambil foto, titik air pada permukaan sampel tampak jelas.
4. Memfoto dengan kamera digital, sehingga hasilnya dapat langsung dimasukkan ke dalam komputer dan mengolah hasil foto untuk mendapatkan besar sudut kontak yang terukur.



Gambar 3.18 Rangkaian pengujian sudut kontak

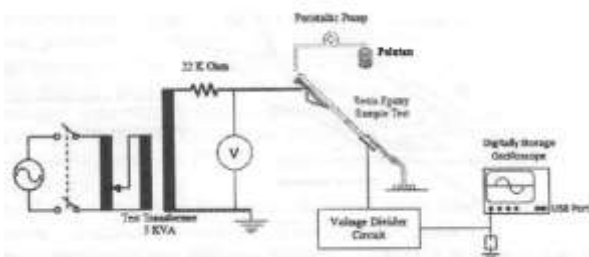
### 3.6 Pengujian Arus Bocor

Langkah – langkah pengujian arus bocor dapat dilihat pada gambar 3.19 dibawah ini.



Gambar 3.19 Diagram alir pengujian arus bocor

Untuk gambar rangkaian pengujian arus bocor ditunjukkan pada gambar 3.20 dibawah ini.



Gambar 3.20 Rangkaian pengujian arus bocor

Untuk pengujian arus bocor masing-masing sampel dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Meletakkan elektroda atas dan bawah pada sampel. Pada elektroda atas, sebelum dipasang pada sampel diberi kertas saring sebanyak 8 layer. Kemudian meletakkan sampel tersebut pada support sehingga bagian permukaan sampel menghadap ke bawah dengan sudut 45° terhadap sumbu horizontal.



Gambar 3.21 Pemasangan sampel isolator

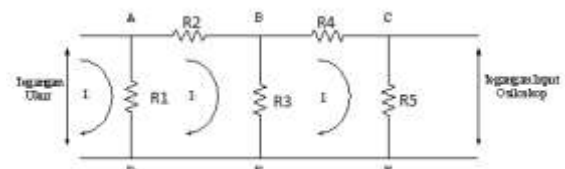
2. Mengatur kecepatan aliran polutan pada 0,3 ml/menit, kemudian mengalirkan ke sampel melalui kertas saring. Fungsi dari penggunaan kertas saring ini adalah agar terjadi aliran kontaminan yang *uniform* dari elektroda atas sampai elektroda bawah sebelum tegangan diaplikasikan.

Tabel 3.3 Nilai resistansi resistor seri

Tegangan test (kV)	Tegangan yang dianjurkan (kV)	Kecepatan aliran polutan (ml/min)	Resistansi resistor seri (kΩ)
1,0 – 1,75	-	0,075	1
2,0 – 2,75	2,5	0,15	10
3,0 – 3,75	3,5	0,30	22
4,0 – 4,75	4,5	0,60	33
5,0 – 5,75	-	0,90	33

Standar IEC 587:1984.

3. Melakukan pemeriksaan untuk memastikan bahwa polutan mengalir tepat pada permukaan bahan uji melalui ujung elektroda atas menuju elektroda bawah.
4. Menerapkan tegangan 3,5 kV pada sampel, yang didapatkan dari pembangkit tegangan tinggi melalui elektroda atas, sedangkan elektroda bawah dihubungkan dengan peralatan ukur.
5. Mengukur arus bocor menggunakan osiloskop. Untuk mengatasi tegangan besar masuk ke dalam osiloskop, maka digunakan rangkaian pembagi tegangan seperti gambar 3.22.



Gambar 3.22 Rangkaian pembagi tegangan

Berdasarkan gambar 3.22 dan dengan persamaan (2.3) sampai persamaan (2.5), dengan nilai resistansi pada rangkaian pembagi tegangan adalah sebagai berikut :  $R_1 = 680 \Omega$ ,  $R_2 = 920 \Omega$ ,  $R_3 = 100 \Omega$ ,  $R_4 = 820 \Omega$ , dan  $R_5 = 10K \Omega$ , maka besarnya arus  $I_1$  berdasarkan nilai tegangan input osiloskop  $V_{CF}$  dapat dicari sebagai berikut :

Loop ABED

$$\begin{aligned} (I_1 - I_2) R_1 &= I_2 R_2 + (I_2 - I_3) R_3 \\ (I_1 - I_2) 680 &= I_2 \cdot 920 + (I_2 - I_3) \cdot 100 \\ 680 I_1 - 1700 I_2 + 100 I_3 &= 0 \end{aligned}$$

Loop BCFE :

$$\begin{aligned} (I_2 - I_3) R_3 &= I_3 (R_4 + R_5) \\ (I_2 - I_3) 100 &= I_3 (820 + 10.000) \\ 100 I_2 &= 10920 I_3 \\ I_2 &= 109,2 I_3 \\ I_3 R_5 &= V_{CF} \end{aligned}$$

Dengan memasukkan nilai resistans kedalam persamaan diatas maka akan dihasilkan :  $680 I_1 = 1700 I_2 - 100 I_3$  dan  $I_2 = 109,2 I_3$

Dengan melakukan substitusi pada persamaan diatas, akan diperoleh nilai:

$$\begin{aligned} 680 I_1 - 1700 (109,2 I_3) + 100 I_3 &= 0 \\ 680 I_1 &= 185540 I_3 \\ I_1 &= 272,853 I_3 \end{aligned}$$

Maka dengan persamaan :

$$\begin{aligned} V_{CF} &= I_3 R_5 \\ V_{CF} &= I_3 \cdot 10.000 \\ V_{CF} &= (I_1 / 272,853) \cdot 10.000 \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh persamaan :

$$I_1 = 0,0272853 V_{CF} \dots\dots\dots 3.1$$

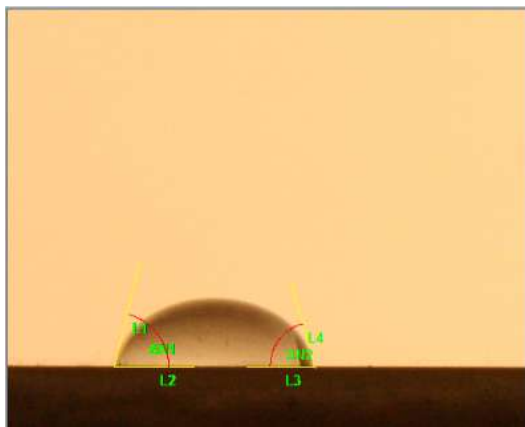
Dengan  $I_1$  mewakili nilai arus bocor yang terjadi, dan  $V_{CF}$  menunjukkan nilai tegangan yang terbaca di osiloskop.

Mencatat hasil pengukuran dan melakukan perbandingan untuk setiap pengujian.

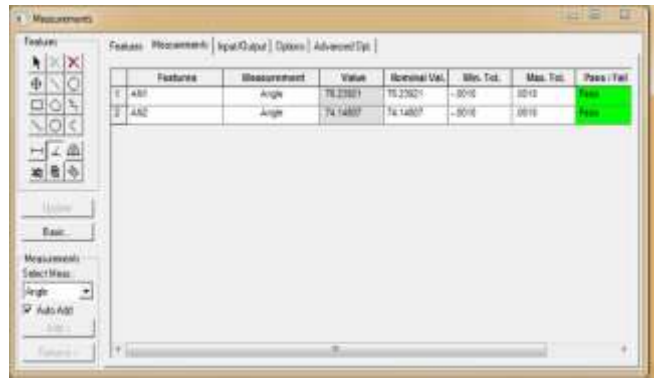
**IV. ANALISIS DAN PENGUJIAN**

**4.1 Hasil Pengukuran dan Analisa Sudut Kontak**

Besarnya sudut kontak permukaan bahan terhadap tetesan cairan polutan diperoleh berdasarkan hasil pengamatan langsung melalui pemotretan kamera digital yang kemudian dihubungkan dengan komputer atau laptop. Hasil pemotretan ditampilkan dalam bentuk ukur proyektor berskala, selanjutnya sudut kontak pada sisi kiri dan kanan sampel uji diukur dengan software busur drajat . Contoh perhitungan sudut kontak hidrofobik adalah sebagai berikut :



Gambar 4.1 Profil tetesan air



Gambar 4.2 perhitungan sudut kontak

Berdasarkan data pada gambar 4.2 diperoleh hasil sebagai berikut.

Sudut kontak kiri =  $76,239^0$   
 Sudut kontak kanan =  $74,148^0$

Maka, berdasarkan persamaan 4.1 diperoleh :

$$\begin{aligned} \text{Sudut kontak} &= \frac{\text{sudut kontak kiri} + \text{Sudut kontak kanan}}{2} \dots\dots\dots 4.1 \\ &= \frac{76,239 + 74,148}{2} \\ &= 75,193^0 \end{aligned}$$

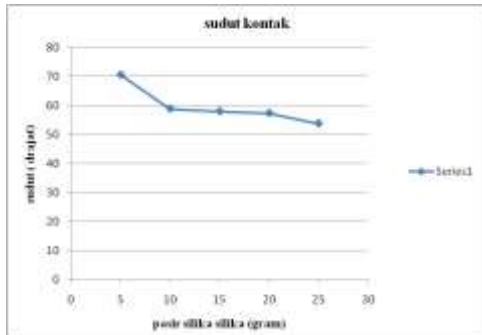
Dengan cara yang sama hasil pengukuran dan perhitungan sudut kontak untuk bahan pengujian resin epoksi silane dengan pengisi pasir silika yang divariasi beratnya dapat dilihat pada tabel 4.1

**Tabel 4.1** Hasil pengujian sudut kontak

Pasir silika	sudut kiri	sudut kanan	sudut total
<b>5gr</b>			
S1	76,239	74,148	75,1935
S2	71,131	67,932	69,5315
S3	71,2	63,178	67,189
rata rata			<b>70,638</b>
<b>10gr</b>			
S1	58,392	61,189	59,7905
S2	59,3	56,309	57,8045
S3	60,751	57,144	58,9475
rata rata			<b>58,8475</b>
<b>15gr</b>			
S1	55,864	53,429	54,6465
S2	60,724	62,241	61,4825
S3	60,642	54,968	57,805
rata rata			<b>57,978</b>
<b>20gr</b>			
S1	59,216	56,514	57,865
S2	55,732	57,692	56,712
S3	58,671	56,309	57,49
rata rata			<b>57,3556</b>
<b>25gr</b>			
S1	51,34	52,835	52,0875
S2	57,942	55,898	56,92
S3	52,989	51,745	52,367
rata rata			<b>53,792</b>

Dari hasil pengukuran sudut kontak tabel 4.1 yang telah dilakukan menunjukkan nilai rata - rata berada pada kisaran  $53,792^0 - 70,638^0$ , masih berada diantara kisaran  $40^0 - 80^0$  yang dapat dikategorikan bersifat *partially wetted* (basah sebagian). Sudut kontak yang paling besar ada pada resin epoksi dengan pasir silika 5gr seperti terlihat pada tabel 4.1.

Dari hasil perhitungan tabel 4.1 grafik diatas maka dapat dibuat grafik hubungan antara bahan pasir silika dengan sudut seperti pada gambar 4.3 sebagai berikut :



Gambar 4.3 Grafik sudut kontak

Dari grafik gambar 4.3 maka dapat dilihat bahwa, penambahan persentase bahan pengisi pasir silika cenderung membuat nilai sudut kontak suatu bahan semakin kecil, karena pasir silika mempunyai sifat menyerap air, yang menyebabkan berkurangnya sifat hidrofobik suatu bahan, sifat hidrofobik ini mempunyai nilai yang berbanding lurus dengan nilai sudut kontak suatu bahan, semakin baik sifat hidrofobik suatu bahan maka nilai sudut kontak akan semakin besar, sedangkan bila sifat hidrofobik suatu bahan itu jelek, maka nilai sudut kontak suatu bahan akan kecil.

**4.2 Hasil Pengukuran dan Analisa Arus Bocor**

Pada penelitian ini, digunakan polutan pantai parangtritis dengan kecepatan 0,3 ml/menit mengalir dipermukaan isolator polimer resin epoksi melalui kertas saring yang telah dijepitkan diantara bahan uji dan elektroda tegangan tinggi menuju ke elektroda pentanahan. Elektroda tegangan tinggi diberi tegangan AC 3,5 kV.

Pengamatan ini menggunakan osiloskop sebagai alat bantu. Nilai yang ditunjukkan pada osiloskop merupakan tegangan masukan osiloskop dari rangkaian pembagi tegangan. Rangkaian pembagi tegangan diperlukan untuk mengatasi input tegangan besar masuk ke osiloskop.

Besarnya nilai arus bocor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.1) sebagai berikut ini :

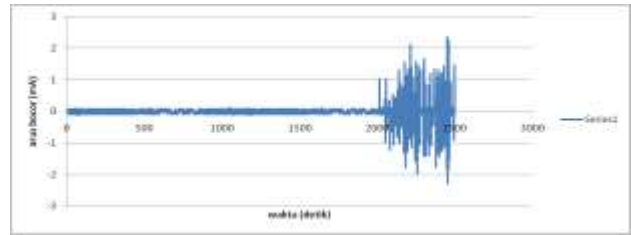
$$I_1 = 0,0272853 V_{CF}$$

Dengan :  $I_1 =$  arus bocor (mA)

$V_{CF} =$  tegangan yang terbaca di osiloskop (mV)

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, maka hasil pengujian resin epoksi silane dengan pengisi pasir silika dapat diperoleh hasil sebagai berikut :

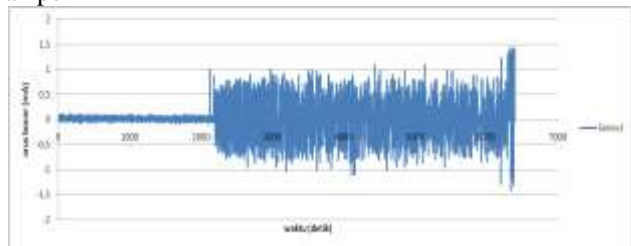
Komposisi berat pasir silika 5 gram  
Sampel 1



Gambar 4.4 Grafik hasil pengukuran arus bocor pada sampel 1 komposisi silika 5gr

Hasil pengujian resin epoksi sampel 1 ini menunjukkan lucutan muatan terjadi pada detik ke- 2015,2 yang ditandai dengan adanya perubahan magnitude arus bocor secara mendadak. Kemudian terjadi peluahan listrik berkali-kali sampai terjadi kegagalan isolasi. Kegagalan isolasi ini ditandai dengan proses pembakaran pada permukaan bahan uji yang membentuk jalur karbon permanen. Pada sampel ini hingga detik ke 2000, belum terjadi / terbentuk jalur konduksi utuh dari elektroda tegangan tinggi ke elektroda pentanahan.

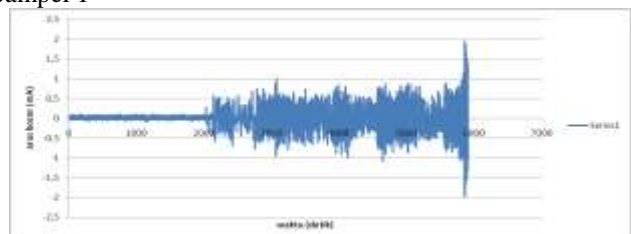
Sampel 2



Gambar 4.5 Grafik hasil pengukuran arus bocor pada sampel 2 komposisi silika 5gr

Hasil pengujian arus bocor resin epoksi pada sampel 2 menunjukkan telah terjadi lucutan muatan pada detik ke- 2127,8 yang ditandai dengan adanya perubahan magnitude arus bocor secara mendadak. Dan kemudian diikuti dengan terbentuknya jalur konduksi utuh yang disebabkan oleh terbakarnya bahan isolasi. Proses pembakaran pada permukaan bahan isolasi ini kemudian membentuk jalur karbon permanen pada permukaan bahan isolasi resin epoksi yang kemudian disebut dengan penjejakan permukaan.

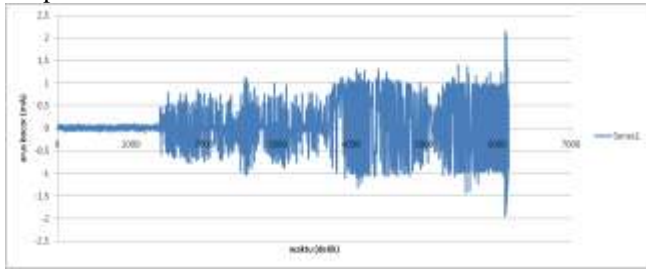
Komposisi berat pasir silika 10 gram  
Sampel 1



Gambar 4.6 Grafik hasil pengukuran arus bocor pada sampel 1 komposisi silika 10gr

Gambar 4.6 merupakan hasil pengujian resin epoksi dengan variasi silika 10 gram. Pada sampel 1 ini terjadi peluahan listrik pada detik ke- 2031,6 yang ditandai dengan perubahan magnitude arus bocor secara mendadak dan kemudian dengan proses pembakaran yang ditunjukkan dengan bentuk gelombang sinus. Proses pembakaran pada bahan isolasi ini kemudian membentuk jalur karbon permanen pada permukaan bahan isolasi resin epoksi yang selanjutnya disebut dengan penjejakan permukaan.

Sampel 2

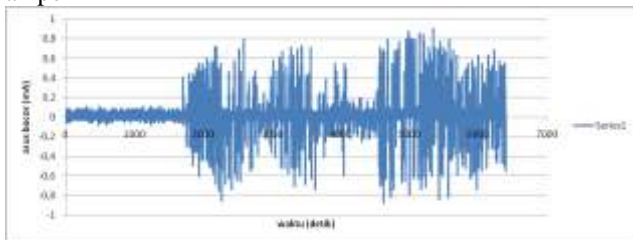


**Gambar 4.7** Grafik hasil pengukuran arus bocor pada sampel 2 komposisi silika 10gr

Pada pengujian resin epoksi sampel 2 ini terjadi terjadi lucutan muatan pada detik ke- 1401,4 yang ditandai dengan adanya perubahan magnitude arus bocor secara mendadak dan kemudian diikuti dengan kegagalan isolasi yang terus menerus yang ditandai dengan terjadinya pembakaran pada bahan isolasi resin epoksi.

Komposisi berat pasir silika 15 gram

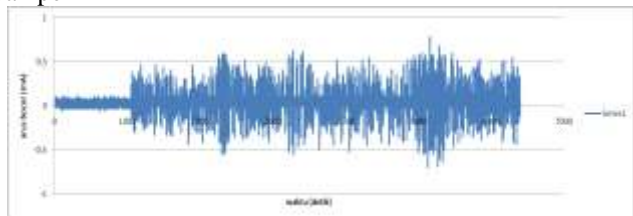
Sampel 1



**Gambar 4.8** Grafik hasil pengukuran arus bocor pada sampel 1 komposisi silika 15gr

Gambar 4.8 merupakan hasil pengujian arus bocor dengan bahan pengisi pasir silika 15 gram. Pada sampel 1 ini penerapan tegangan tinggi 3,5 kV dan aliran polutan pantai parangtritis menyebabkan terjadinya kegagalan isolasi yang di dahului dengan terjadinya pelucutan muatan secara mendadak pada detik ke- 1708,6. Sama dengan sampel sebelumnya, pelucutan muatan secara mendadak ini menyebabkan kegagalan isolasi yang kemudian diikuti dengan terjadinya pembakaran, ditandai dengan bentuk gelombang sinus pada gambar. Proses pembakaran pada permukaan bahan isolasi ini kemudian membentuk jalur karbon permanen pada permukaan bahan isolasi resin epoksi yang kemudian disebut dengan penjejakan permukaan.

Sampel 2



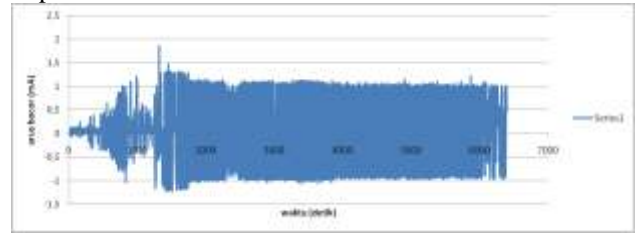
**Gambar 4.9** Grafik hasil pengukuran arus bocor pada sampel 2 komposisi silika 15gr

Fenomena yang hampir sama juga diperoleh dari hasil pengujian arus bocor resin epoksi pada gambar 4.9 sampel 2. Perbedaannya hanya terletak pada durasi terjadinya pelucutan muatan sampai terjadinya kegagalan isolasi. Pada sampel 2 terjadi pelucutan muatan pada detik ke- 1053,2 yang ditandai dengan adanya perubahan magnitude arus bocor secara mendadak, kemudian diikuti dengan terjadinya kegagalan

isolasi yaitu terjadinya pembakaran pada permukaan bahan isolasi.

Komposisi berat pasir silika 20 gram

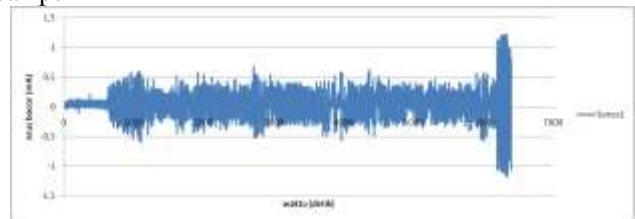
Sampel 1



**Gambar 4.10** Grafik hasil pengukuran arus bocor pada sampel 1 komposisi silika 20gr

Gambar 4.10 merupakan hasil pengujian arus bocor dengan variasi bahan pengisi pasir silika 20 gram. Hasil pengujian arus bocor resin epoksi sampel 1, dengan penerapan tegangan tinggi 3,3 kV dan polutan pantai menyebabkan terjadinya pelucutan muatan dan terjadi hingga beberapa kali sampai pada akhirnya terjadi kegagalan isolasi. Kegagalan isolasi ini ditunjukkan dengan bentuk gelombang arus sinusoidal, yang berarti arus mengalir dari elektroda pentanahan ke elektroda tegangan tinggi. Arus bocor ini kemudian diikuti dengan terjadinya pembakaran permukaan bahan isolasi.

Sampel 2

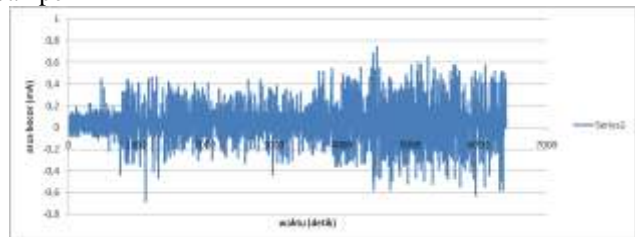


**Gambar 4.11** Grafik hasil pengukuran arus bocor pada sampel 2 komposisi silika 20gr

Pada pengujian arus bocor resin epoksi sampel 2, terjadi lucutan muatan pada polaritas negatif yang kemudian diikuti beberapa kali pelucutan muatan hingga pada akhirnya terjadi kegagalan isolasi pada. Saat terjadi pelucutan muatan ini, terjadi pembakaran bahan isolasi, ditandai dengan tampilan gelombang. Proses pembakaran pada permukaan bahan isolasi ini kemudian membentuk jalur permanen pada permukaan bahan isolasi, yang selanjutnya disebut dengan penjejakan permukaan.

Komposisi berat pasir silika 25 gram

Sampel 1

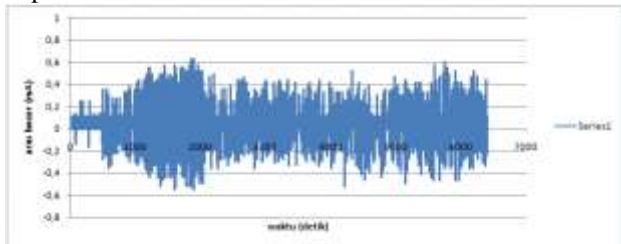


**Gambar 4.12** Grafik hasil pengukuran arus bocor pada sampel 1 komposisi silika 25gr

Gambar 4.12 merupakan hasil pengujian arus bocor resin epoksi dengan variasi bahan pengisi pasir silika 25 gram. Gambar ini menunjukkan bahwa penerapan tegangan 3,5 kV dan polutan yang dialirkan di bahan isolasi dapat

menyebabkan terjadinya pelucutan listrik, ditandai dengan perubahan magnitudo arus bocor, pelucutan listrik ini terjadi beberapa kali sehingga pada akhirnya menyebabkan terjadinya kegagalan isolasi. Proses pelucutan ini diikuti dengan terjadinya pembakaran pada permukaan bahan isolasi.

Sampel 2



Gambar 4.13 Grafik hasil pengukuran arus bocor pada sampel 2 komposisi silika 25gr

Pada gambar 4.13 merupakan hasil pengujian arus bocor resin epoksi silika 25 gram sampel 2. Gambar ini menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan sampel 1. Pada detik detik awal terjadi pelucutan muatan untuk pertama kali, kemudian terjadi lagi pelucutan muatan hingga beberapa kali, proses pelucutan muatan ini diikuti dengan terjadinya proses pembakaran sampai pada akhirnya terjadi kegagalan isolasi pada sampel isolator. Kegagalan isolasi ini menunjukkan bahwa telah terjadi jalur konduksi tumpah antara elektroda pentanahan dan elektroda tegangan tinggi.

Secara umum, hasil pengujian arus bocor bahan uji pada penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Selama pengujian, terjadi peluahan listrik yang merupakan suatu bentuk kegagalan listrik. Kegagalan ini menyebabkan hilangnya tegangan dan mengalirnya arus pada permukaan bahan isolasi. Arus mengalir pada jalur konduksi yang terbentuk dari elektroda pentanahan menuju elektroda tegangan tinggi yang disebut dengan jejak ( track ). Proses peluahan listrik ini dapat diamati dari gelombang yang terekam pada osiloskop.
2. Peluahan listrik dapat menyebabkan terjadinya percikan api yang memicu terjadinya karbonisasi dan penguapan di permukaan bahan isolasi sehingga terjadi jalur karbon permanen. Proses ini kumulatif dan berkesinambungan, dan kegagalan isolasi terjadi ketika jalur terkarbonasi terbentuk antar elektroda. Jalur karbon inilah yang merupakan jalur konduksi pada bahan isolasi. Fenomena ini sering disebut penjejakan permukaan.

Dari hasil pengujian arus bocor diatas, maka dapat dibuat sebuah tabel hasil pengujian seperti pada tabel 4.2 yang menunjukkan nilai arus bocor yang terjadi dan waktu terjadinya peluahan pertama

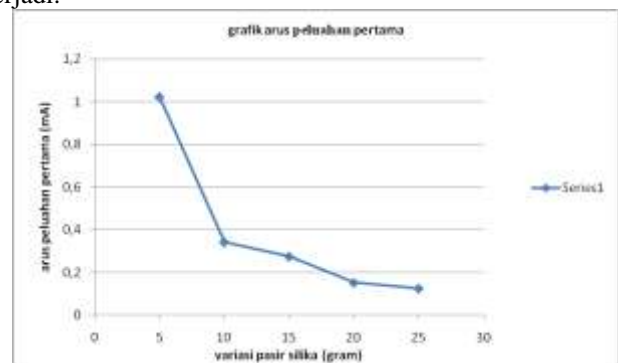
Tabel 4.2 hasil pengujian arus bocor

Variasi	Kode Sampel	Arus peluahan pertama (mA)	Waktu peluahan Pertama (detik)	Arus bocor rata-rata (mA)
<b>Silika 5 gram</b>				
	1	1,0368414	2015,2	0,83220165
	2	1,0095561	2127,8	0,7367031
	rata-rata	<b>1,02319875</b>	<b>2071,5</b>	<b>0,784452375</b>
<b>Silika 10 gram</b>				
<b>gram</b>				

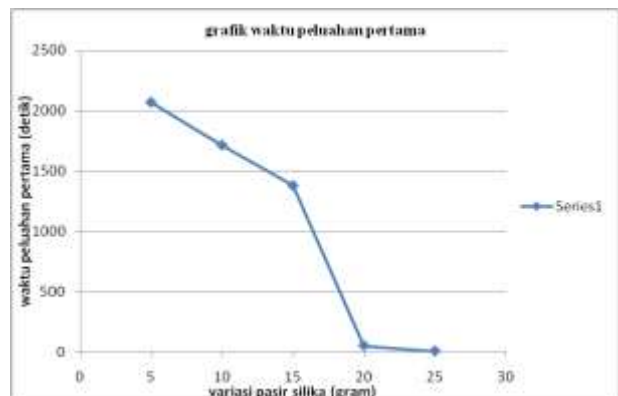
1	0,272853	2031,6	0,6275619
2	0,4092795	1401,4	0,6548472
rata-rata	<b>0,34106625</b>	<b>1716,5</b>	<b>0,64120455</b>
<b>Silika 15 gram</b>			
1	0,4092795	1708,6	0,4911354
2	0,1364265	1053,2	0,64120455
rata-rata	<b>0,272853</b>	<b>1380,9</b>	<b>0,566169975</b>
<b>Silika 20 gram</b>			
1	0,1909971	52,2	0,6275619
2	0,1091412	56,8	0,3915996
rata-rata	<b>0,15006915</b>	<b>54,5</b>	<b>0,50958075</b>
<b>Silika 25 gram</b>			
1	0,1364265	12	0,3274236
2	0,1091412	5,6	0,0818559
rata-rata	<b>0,12278385</b>	<b>8,8</b>	<b>0,20463975</b>

Dari tabel 4.2 hasil pengukuran diatas maka dapat dikatakan bahwa peningkatan nilai / persentase dari bahan pengisi pasir silika pada bahan resin epoksi silane dapat memperkecil nilai arus bocor yang terjadi, akan tetapi disisi lain penambahan pasir silika ini dapat mempercepat terjadinya peluahan listrik pada bahan sampel isolator resin epoksi ini.

Gambar grafik 4.14, 4.15 dan 4.16 adalah grafik yang diperoleh dari tabel di atas yang menunjukkan perbandingan antara nilai arus peluahan pertama dengan variasi pengisi pasir silika dan grafik waktu terjadinya peluahan terhadap variasi pengisi pasir silika, serta arus bocor rata-rata yang terjadi.

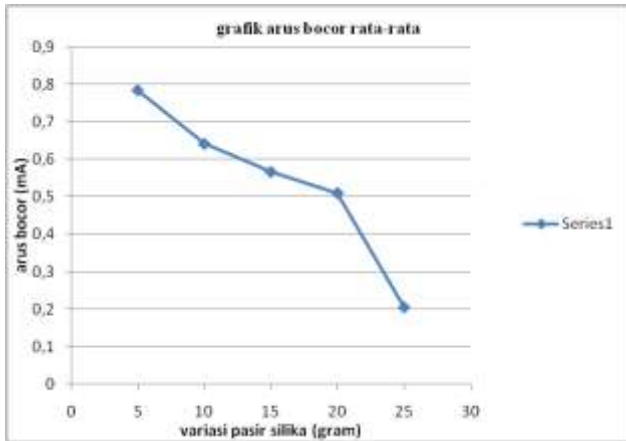


Gambar 4.14 Grafik arus peluahan pertama



Gambar 4.15 Grafik waktu peluahan pertama





Gambar 4.16 Grafik arus bocor rata-rata

Dari ketiga gambar grafik 4.15, 4.16 dan 4.17 dapat dilihat bahwa gambar grafik cenderung memiliki trend menurun, semakin banyak bahan pengisi pasir silika maka arus bocor yang terjadi semakin kecil, pada sampel isolator resin epoksi silane dengan pengisi silika 25 gram, nilai arus bocor yang terjadi nilainya paling kecil dibandingkan dengan sampel isolator yang berbahan pengisi pasir silika 5 gram, 10 gram, 15 gram dan 20 gram. Hal ini dapat terjadi karena arus bocor akan mengalir ke bagian yang bersifat konduktif pada permukaan isolator saat isolator dikenai beda tegangan. Bila isolator dalam keadaan lembab bagian permukaan isolator yang berpolutanlah yang paling konduktif sehingga arus bocor akan mengalir pada bagian ini. Mengalirnya arus bocor yang terus-menerus ini akan menimbulkan adanya tegangan *flashover*, apabila terjadi berulang kali akan menimbulkan panas pada permukaan bahan isolator. Karena campuran bahan ini sangat mudah terbakar, pada saat pencampuran bahan isolasi dengan polutan akan melelehkan bahan resin epoksi. Tetapi peristiwa ini tidak melelehkan bahan pengisi pasir silika karena bahan ini tahan dan tidak dapat leleh dalam panas sehingga sifat resistivitas bahan akan tetap. Oleh karena itu, untuk bahan yang memiliki komposisi bahan pengisi pasir silika yang lebih banyak mempunyai nilai resistivitas yang lebih besar. Nilai resistansi pada bahan isolator terhadap arus bocor berbanding terbalik sehingga semakin besar nilai resistansi maka besarnya arus bocor semakin kecil. Jadi dapat dikatakan bahwa peningkatan nilai komposisi dari bahan pengisi pasir silika pada bahan resin epoksi silane dapat memperkecil nilai arus bocor pada bahan isolasi.

Disisi lain penambahan pasir silika dapat mempercepat terjadinya peluahan listrik, pada sampel dengan pengisi silika 25 gram memiliki waktu untuk terjadi peluahan listrik relatif lebih cepat dibandingkan sampel yang lainnya. Hal ini bisa terjadi karena semakin banyak komposisi bahan pengisi pasir silika di dalam campuran bahan resin epoksi, menyebabkan semakin turunnya sifat menolak air (*hydrofobik*) di dalam permukaan bahan sampel isolator tersebut. Sehingga hal ini menyebabkan sifat gaya tarik menarik antara molekul – molekul di permukaan bahan isolator dengan kontaminan polutan semakin tinggi. Hal ini menyebabkan ketahanan permukaan bahan isolasi semakin turun, sehingga proses terjadinya arus bocor bahan yang diberi komposisi bahan pengisi pasir silika lebih banyak akan semakin cepat dibandingkan dengan bahan yang diberi komposisi bahan

pengisi pasir silika lebih sedikit di dalam campuran bahan isolator resin epoksi.

## V. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data yang diperoleh dan hasil analisa data yang diolah, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penambahan komposisi bahan pengisi pasir silika menyebabkan penurunan sudut kontak hal ini ditunjukkan oleh hasil pengujian pada tabel 4.1.
2. Peningkatan komposisi bahan pengisi pasir silika dapat mempercepat proses terjadinya peluahan listrik yang merupakan awal dari proses kegagalan isolasi, hal ini dapat dilihat pada tabel 4.2 hasil pengujian arus bocor.
3. Peningkatan komposisi bahan pengisi pasir silika dapat memperkecil nilai arus bocor pada bahan isolasi resin epoksi silane.
4. Pola penjejukan pada bahan isolasi resin epoksi ini terjadi dari elektroda tegangan rendah ke tegangan tinggi. Hal ini disebabkan karena arah aliran elektron secara aktual adalah dari elektroda negatif ke elektroda positif.

### 5.2 Saran

Adapun saran yang diberikan oleh penulis adalah sebagai berikut :

1. Pada saat pencetakan sampel sedapat mungkin dihindari adanya voip (gelembung) dengan cara melakukan pencampuran bahan dengan benar dan dilakukan dengan cepat.
2. Pada saat pengujian arus bocor, sumber tegangan dibuat selalu stabil agar hasil yang didapatkan maksimal.

## Daftar Pustaka

- [1] Anggraini, Ika Novia., “Pengaruh Komposisi Bahan Isolasi Resin Epoksi dengan Bahan Pengisi Silicone Rubber terhadap Proses Tracking dan Erosi”, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2010.
- [2] Berahim, Hamzah., 2005, “Metodologi Untuk Mengkaji Kinerja Isolasi Polimer Resin Epoksi Silane Sebagai Material Isolator Tegangan Tinggi di Daerah Tropis”, Disertasi Fakultas Ilmu Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada.
- [3] Berahim, Hamzah., “Pengaruh Silane Sebagai Bahan Pengisi Terhadap Kinerja Material Isolator RTV Resin Epoksi Di Daerah Beriklim Tropis”, Seminar Nasional & Workshop Tegangan Tinggi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2002.
- [4] British Standar, BSI., 1986 “Metode for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion of Electrical insulating materials used under severe ambient conditions”, IEC 587 :1982.
- [5] Eklund, A. et.al., 1995, ”Conditioning of Silicone Rubber Insulators : Loss and Recovery of Hydrophobicity”, 9th ISH, Graz, Austria.
- [6] Haryono, T, CH. Sri Kristiningsih, “Pengaruh Suhu Terhadap Kinerja Material Isolasi Epoksi Resin Dalam Kondisi Bersih”, Seminar Nasional & Workshop Tegangan Tinggi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2002.
- [7] Latief, Melda dan Suwarno, “Unjuk Kerja Permukaan Isolator Pasangan Luar Polimer Epoxy Resin 20 kV

- pada Berbagai Kondisi Lingkungan”, Seminar Nasional Teknik Ketenagalistrikan, 2005.
- [8] Lee Henry, Kris Neville, 1957, ”Epoxy Resins Their Application And Technology”, McGraw-Hill Book Company, INC, New York Toronto London.
- [9] Prasajo, Winarko Ari, Abdul Syakur, dan Yuningtyastuti, “Analisis Partial Discharge pada Material Polimer Resin Epoksi dengan Menggunakan Elektroda Jarum Bidang”, Penelitian, Universitas Diponegoro, Semarang, 2009.
- [10] Salama, M. Arif, “Efek Bahan Pengisi (Filler) Pada Absorpsi Air Dan Dielektrik Material Isolasi Elastomer Silikon”, Universitas Hasanuddin.
- [11] Syakur, Abdul, Hamzah Berahim, Tumiran, Rochmadi, ”Experimental Investigation on Electrical Tracking of Epoxy Resin Compound with Silicone Rubber”, High Voltage Engineering, vol.37 No.11, 2011.
- [12] Rahmawati, Risa S, “Struktur Padatan Silikon Dioksida”, Makalah jurusan Pengajaran Kimia Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [13] Tobing, Bonggas L., “Peralatan Tegangan Tinggi”, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- [14] Yohan, V.S, Hamzah Berahim, M. Isnaeni, “Pengujian Karakteristik Bahan Isolasi Resin Epoksi Terkontaminasi Polutan Industri”, Seminar Nasional & Workshop Tegangan Tinggi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2002.