

**PENGARUH BENTUK KONTUR JARAK RAMBAT ISOLATOR  
SILICONE RUBBER TERHADAP ARUS BOCOR DAN DISTRIBUSI  
MEDAN LISTRIK**

**SKRIPSI**

**TEKNIK ELEKTRO  
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**CHARIS MAJID TEGUH P  
NIM. 145060307111010**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**MALANG**

**2018**

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**PENGARUH BENTUK KONTUR JARAK RAMBAT ISOLATOR**  
**SILICONE RUBBER TERHADAP ARUS BOCOR DAN DISTRIBUSI**  
**MEDAN LISTRIK**

**SKRIPSI**

**TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**CHARIS MAJID TEGUH P**  
**NIM. 145060307111010**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 24 Juli 2018

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Dosen Pembimbing I

Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM.  
NIP. 19730520 200801 1 013

Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.  
NIP. 19600701 199002 1 001



JUDUL SKRIPSI:

PENGARUH BENTUK KONTUR JARAK RAMBAT ISOLATOR *SILICONE RUBBER*  
TERHADAP ARUS BOCOR DAN DISTRIBUSI MEDAN LISTRIK

Nama Mahasiswa : Charis Majid Teguh P

NIM : 145060307111010

Program Studi : Teknik Elektro

Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik

KOMISI PEMBIMBING:

Ketua : Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.

TIM DOSEN PENGUJI:

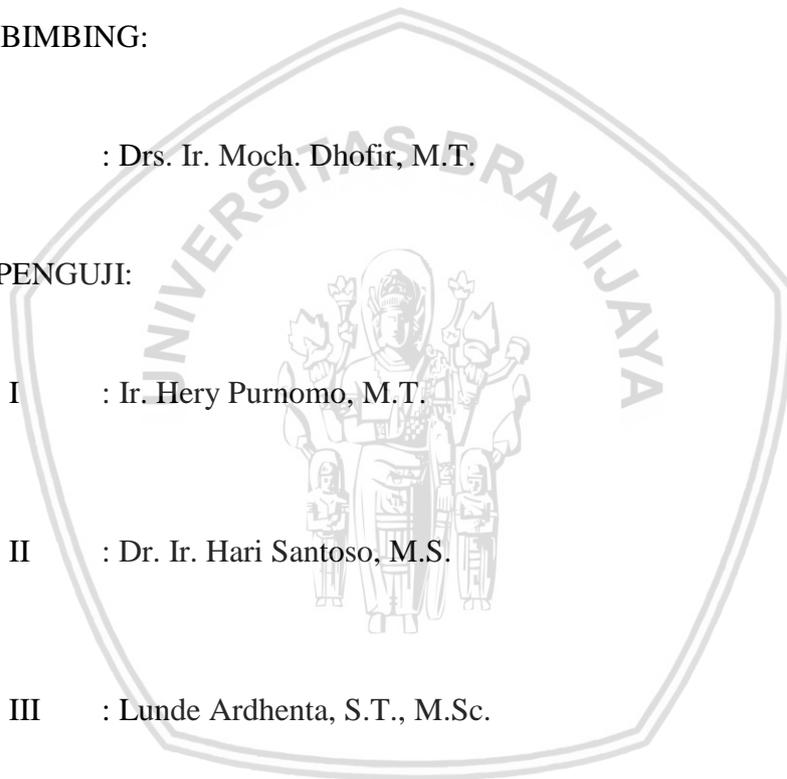
Dosen Penguji I : Ir. Hery Purnomo, M.T.

Dosen Penguji II : Dr. Ir. Hari Santoso, M.S.

Dosen Penguji III : Lunde Ardhenta, S.T., M.Sc.

Tanggal Ujian : 20 Juli 2018

SK Penguji : 1946 Tahun 2018



## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.


Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 24 Juli 2018

Mahasiswa,

Charis Majid Teguh P

NIM. 145060307111010



## RIWAYAT HIDUP

Charis Majid Teguh P, Malang, 9 Juli 1997 anak dari ayah Ir. H. Lukman Julianto, S.T., M.Sc. dan Ibu Dra. Hj. Dwi Kusuma Widayati, SD di Jakarta lulus tahun 2009, SMP dan SMA di Malang, lulus SMP tahun 2012 dan lulus SMA tahun 2014, lulus program sarjana Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2018. Pengalaman kerja sebagai asisten laboratorium di Laboratorium Tegangan Tinggi Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2016 hingga 2018.



Malang, Juli 2018

Penulis



*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada :  
Ayahanda Lukman Julianto dan Ibunda Dwi Kusuma W tercinta*



## ABSTRAK

Isolator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk mengisolasi penghantar bertegangan. Sebuah isolator dirancang agar dapat berfungsi dengan baik, yaitu memiliki tingkat arus bocor yang rendah. Bahan isolasi yang sering digunakan yaitu keramik dan kaca. Namun, saat ini telah dikembangkan bahan isolasi berjenis polimer yang memiliki kekuatan mekanik yang cukup tinggi, mudah dibentuk, memiliki massa jenis yang rendah serta memiliki kemampuan menolak air (hidrofobik). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh bentuk kontur permukaan *isolator silicone rubber* berupa jari-jari lengkungan sirip terhadap tingkat arus bocor dan distribusi medan listrik. Simulasi distribusi medan listrik dilakukan menggunakan fasilitas FEMM 4.2. Bentuk kontur isolator terdiri dari enam tipe variasi jari-jari lengkungan sirip yaitu Tipe A, Tipe B, Tipe C, Tipe D, Tipe E dan Tipe F. Dari hasil pengujian, lebar jari-jari lengkungan permukaan isolator *silicone rubber*, nilai jarak vertikal ( $s_v$ ) dan nilai jarak horizontal ( $s_h$ ) dengan nilai jarak rambat ( $s_r$ ) yang sama berpengaruh terhadap tingkat arus bocor. Pada tegangan uji 25 kV diperoleh hasil bahwa isolator Tipe A memiliki tingkat arus bocor yaitu sebesar 10,27  $\mu\text{A}$ . Sedangkan pada tegangan uji yang sama, diperoleh hasil bahwa isolator Tipe F memiliki tingkat arus bocor yaitu sebesar 18,77  $\mu\text{A}$ . Semakin lebar jari-jari lengkungan isolator maka semakin besar pula tingkat arus bocor. Selain itu, variasi nilai tegangan uji juga berpengaruh terhadap terhadap tingkat arus bocor. Pada isolator Tipe A dengan tegangan uji 5 kV memiliki tingkat arus bocor yaitu sebesar 1,88  $\mu\text{A}$ . Sedangkan pada Tipe isolator yang sama yaitu isolator Tipe A dengan tegangan uji 40 kV memiliki tingkat arus bocor tertinggi yaitu sebesar 20,73  $\mu\text{A}$ . Semakin besar nilai tegangan uji maka semakin besar tingkat arus bocor. Dan diperoleh nilai medan listrik maksimum terendah dimiliki isolator Tipe A, yaitu sebesar 1,901 kV/cm dan nilai medan listrik tertinggi dimiliki isolator Tipe F, yaitu sebesar 17,11 kV/cm.

**Kata kunci:** : jari-jari lengkungan, arus bocor, distribusi medan listrik, *silicone rubber*.

## ABSTRACT

*Isolator is an electrical equipment that serves to isolate the conductor tension. An insulator is designed to work properly, which has a low leakage current. Insulation materials that are often used are ceramics and glass. However, nowadays polymer insulators have been developed which have high mechanical strength, are easily formed, have low density and have the ability to resist water (hydrophobic). This study aims to determine the effect of surface contour shape of silicone rubber insulator in the form of radius of fin arch to leakage current level and electrical field distribution. Simulation of electric field distribution is done using FEMM 4.2 facility. The shape of the contour of the isolator consists of six types of variation of the radius of the fin fins of Type A, Type B, Type C, Type D, Type E and Type F. From the test results, the width of the radius of the surface curvature of the silicone rubber isolator, the vertical distance value ( $s_v$ ) and the horizontal distance value ( $s_h$ ) with the same creep value ( $s_r$ ) have an effect on the leakage current level. At 25 kV test voltage, it was found that Type A insulator had a leakage current level of 10.27  $\mu\text{A}$ . While at the same test voltage, the results obtained that Type F isolator has a leakage current rate of 18.77  $\mu\text{A}$ . The greater the radius of the curvature of the isolator the greater the degree of leakage current. In addition, variations in test voltage values also affect the level of leakage current. In Type A insulator with 5 kV test voltage has a leakage current rate of 1.88  $\mu\text{A}$ . While in the same type of isolator that is Type A insulator with a test voltage of 40 kV has the highest leakage current rate of 20.73  $\mu\text{A}$ . The greater the value of the test voltage the greater the leakage current level. And obtained the lowest maximum electric field value owned Type A isolator, which is equal to 1.901 kV / cm and the highest electric field value owned Type F isolator, which amounted to 17.11 kV / cm.*

**Keywords:** *curved radius, leakage current, electric field distribution, silicone rubber.*

## KATA PENGANTAR

*Bismillahirrohmanirrohim.* Alhamdulillah, puji syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga skripsi yang berjudul **PENGARUH BENTUK KONTUR JARAK RAMBAT ISOLATOR *SILICONE RUBBER* TERHADAP ARUS BOCOR DAN DISTRIBUSI MEDAN LISTRIK** ini dapat diselesaikan dengan baik dan tepat pada waktunya. Tak lepas shalawat serta salam tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi suri tauladan bagi yang mengharapkan rahmat dan hidayah-Nya.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan serta dorongan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini disampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Ibu Ir. Nurussa'adah, M.T. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Bapak Ali Mustofa, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
4. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., Msc. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya, sekaligus sebagai pembimbing akademik yang telah banyak memberikan pengarahan, bimbingan, nasehat, saran dan motivasinya.
5. Bapak Drs., Ir. Moch. Dhofir, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi dan Ketua Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi yang telah banyak memberikan bimbingan, nasehat, saran, motivasi dan masukan yang telah diberikan.
6. Semua dosen, pegawai administrasi dan laboran Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya atas segala ilmu, masukan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis.
7. Kepada ayahanda Lukman Julianto dan ibunda Dwi Kusuma W, serta saudara penulis yang sangat penulis hormati dan cintai, atas segala dukungan, motivasi, kepercayaan, cinta, dan doa yang tiada henti, hingga penulis tetap kuat dan semangat dalam menyelesaikan studi.
8. Kepada teman-teman asisten Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi yaitu Dony Darmawan P, S.T., Pegy Lestari, S.T, Albin, Agus, Dammegi, angkatan 2013, dan

angkatan 2015 yang telah menemani ketika pengujian dan memberikan semangat untuk mengerjakan skripsi.

9. Kepada semua teman-teman seperjuangan DIODA angkatan 2014 khususnya di gedung B yaitu Oliv, Sipa, Cinta, Nola, Vio, Septi, Dimas, Amrul, Anthony, Wildan, Izky, Dhani, Sekty, Anang, dan Arifin.
10. Kepada sahabat lama penulis yaitu Bayu, Selga dan Hapsari penulis yang telah menyemangati penulis dalam menyelesaikan skripsi ini .
11. Keluarga besar Divisi ELEKTROAUTO FORSCHUNGTEAM angkatan 2013, 2014 dan 2015 yang telah memberikan motivasi untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini, yang tidak mungkin saya sebutkan satu persatu.

Dalam penyusunan skripsi ini, disadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, diharapkan kritik dan saran untuk penyempurnaan tulisan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, 24 Juli 2018

Penulis

## ▲ DAFTAR ISI

	Halaman
<b>PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI.....</b>	<b>i</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>ii</b>
<b>RINGKASAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB I.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
<b>BAB II.....</b>	<b>5</b>
2.1 Isolator.....	5
2.2 Karakteristik Isolator Berbahan <i>Silicone Rubber</i> .....	5
2.3 Arus Bocor.....	7
2.4 Kegagalan Dalam Gas.....	8
2.5 Proses Dasar Ionisasi.....	9
2.6 Medan Listrik.....	10
2.7 Karakteristik Listrik bahan Isolasi.....	11
2.7.1 Kekuatan dielektrik.....	11
2.7.2 Rugi – Rugi Dielektrik.....	12
2.7.3 Pelepasan Muatan Sebagian.....	12
2.7.4 Resistansi Isolasi.....	13
2.7.5 Kerak Dielektrik.....	13
<b>BAB III.....</b>	<b>15</b>
3.1 Studi Literature.....	15
3.2 Variabel Penelitian.....	16

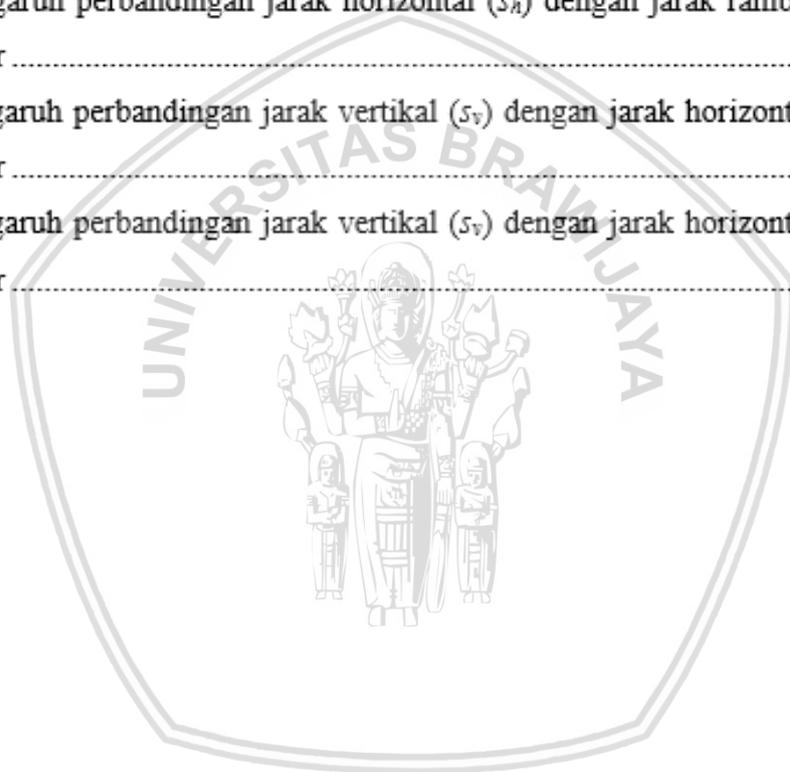
3.3	Objek Uji.....	16
3.4	Pembuatan Desain Isolator <i>Silicone rubber</i> .....	18
3.5	Rangkaian Pengujian dan Fungsi Peralatan.....	19
3.5.1	Rangkaian Pengujian Arus Bocor Permukaan Isolator <i>Silicone Rubber</i> .....	19
3.5.2	Alat dan Bahan.....	21
3.5.3	Fungsi Peralatan.....	21
3.6	Kondisi Pengujian.....	22
3.7	Pengambilan Data.....	25
3.8	Perhitungan dan Analisis.....	26
3.8.1	Analisis Nilai dan Grafik Pengujian Arus Bocor.....	26
3.8.2	Analisis Simulasi Distribusi Medan Listrik.....	27
3.9	Penarikan Kesimpulan dan Saran.....	27
<b>BAB IV</b>	.....	<b>29</b>
4.1	Tinjauan Umum.....	29
4.2	Pengujian Arus Bocor pada Permukaan Isolator <i>Silicone Rubber</i> dengan Variasi Lebar Lengkungan Sirip.....	29
4.2.1	Pengaruh Variasi Nilai Tegangan Uji terhadap Nilai Arus Bocor.....	30
4.2.3	Pengaruh Perbandingan Jarak Vertikal ( $S_v$ ) Dengan Jarak Rambut ( $S_r$ ) Terhadap Nilai Arus Bocor.....	33
4.2.4	Pengaruh Perbandingan Jarak Horizontal ( $S_h$ ) Dengan Jarak Rambut ( $S_r$ ) Terhadap Nilai Arus Bocor.....	35
4.2.5	Pengaruh Perbandingan Jarak Vertikal ( $S_v$ ) Dengan Jarak Horizontal ( $S_h$ ) Terhadap Nilai Arus Bocor.....	37
4.3	Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Isolator <i>Silicone Rubber</i> terhadap Variasi Lebar Lengkungan Sirip.....	39
4.3.1	Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Isolator <i>Silicone Rubber</i> Tipe A.....	40
4.3.2	Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Isolator <i>Silicone Rubber</i> Tipe B.....	41
4.3.3	Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Isolator <i>Silicone Rubber</i> Tipe C.....	42
4.3.4	Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Isolator <i>Silicone Rubber</i> Tipe D.....	43
4.3.5	Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Isolator <i>Silicone Rubber</i> Tipe E.....	44
4.3.6	Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Isolator <i>Silicone Rubber</i> Tipe F.....	45
4.3.7	Analisis Distribusi Medan Listrik Pada Isolator <i>Silicone Rubber</i> .....	46
<b>BAB V</b>	.....	<b>47</b>
5.1	Kesimpulan.....	47
5.2	Saran.....	48
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....	<b>49</b>

LAMPIRAN I ..... 51  
LAMPIRAN II..... 55



## DAFTAR TABEL

Nomor	Judul	Halaman
Tabel 4.1	Data hasil pengujian arus bocor pada isolator <i>silicone rubber</i> dengan variasi lengkungan .....	31
Tabel 4.2	Pengaruh perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ).....	33
Tabel 4.3	Pengaruh perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ) terhadap nilai arus bocor .....	34
Tabel 4.4	Pengaruh perbandingan jarak horizontal ( $s_h$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ) .....	35
Tabel 4.5	Pengaruh perbandingan jarak horizontal ( $s_h$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ) terhadap nilai arus bocor .....	36
Tabel 4.6	Pengaruh perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak horizontal ( $s_h$ ) terhadap nilai arus bocor .....	37
Tabel 4.7	Pengaruh perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak horizontal ( $s_h$ ) terhadap nilai arus bocor .....	38



## DAFTAR GAMBAR

Nomor	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Bahan isolasi diantara dua elektroda.....	9
Gambar 2.2.	Arus Pada Bahan Isolasi Padat.....	13
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian.....	16
Gambar 3.2.	Bahan isolator <i>silicone rubber</i> .....	17
Gambar 3.3.	Bahan konduktor tembaga.....	18
Gambar 3.4.	Desain isolator <i>silicone rubber</i> .....	18
Gambar 3.5.	Desain konduktor plat tembaga tampak atas.....	19
Gambar 3.6.	Rangkaian pengujian arus bocor pada permukaan isolator <i>silicone rubber</i> ...	20
Gambar 3.7.	Penarikan lebar lengkungan sirip R .....	22
Gambar 3.8.	<i>Silicone rubber</i> tanpa lengkungan (Tipe A).....	23
Gambar 3.9.	<i>Silicone rubber</i> dengan lebar lengkungan 2 cm (Tipe B) .....	23
Gambar 3.10.	<i>Silicone rubber</i> dengan lebar lengkungan 4 cm (Tipe C) .....	24
Gambar 3.11.	<i>Silicone rubber</i> dengan lebar lengkungan 6 cm (Tipe D).....	24
Gambar 3.12.	<i>Silicone rubber</i> dengan lebar lengkungan 8 cm (Tipe E) .....	24
Gambar 3.13.	<i>Silicone rubber</i> dengan lebar lengkungan 10 cm (Tipe F).....	25
Gambar 3.14.	Diagram alir pengujian tingkat arus bocor pada permukaan isolator <i>silicone rubber</i> .....	26
Gambar 4.1	Grafik nilai arus bocor isolator <i>silicone rubber</i> variasi tegangan uji.....	32
Gambar 4.2	Grafik nilai arus bocor isolator <i>silicone rubber</i> variasi lebar lengkungan sirip (R) pada tegangan uji 25 kV.....	32
Gambar 4.3	Grafik perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ) terhadap nilai arus bocor.....	34
Gambar 4.4	Grafik perbandingan jarak horizontal ( $s_h$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ) terhadap nilai arus bocor.....	36
Gambar 4.5	Grafik perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak horizontal ( $s_h$ ) terhadap nilai arus bocor.....	38
Gambar 4.6	Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe A (c).....	40
Gambar 4.7	Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe B (c).....	41

Gambar 4.8 Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe C (c) ..... 42

Gambar 4.9 Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe D (c) ..... 43

Gambar 4.10 Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe E (c) ..... 44

Gambar 4.11 Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe F (c) ..... 45



## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Pada saat ini listrik sudah menjadi salah satu kebutuhan primer dalam kehidupan manusia. Ketergantungan akan kebutuhan energi listrik dari hari kehari semakin meningkat sebanding dengan jumlah penduduk yang kian meningkat. Agar dapat memenuhi kebutuhan energi listrik tersebut, diperlukan suatu pembangkit yang memiliki tingkat keandalan yang tinggi serta ditunjang dengan sistem saluran transmisi yang baik pula untuk menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit ke gardu-gardu listrik sampai ke beban atau konsumen secara kontinyu dengan daya yang terkirim stabil. Keandalan suatu sistem tenaga listrik bergantung pada komponen-komponen yang digunakan. Salah satu komponen utama yang menjadi perhatian dari sistem transmisi dan distribusi adalah isolator.

Isolator adalah alat untuk memisahkan daerah berpotensi listrik dengan yang tidak berpotensi listrik. Dilihat dari fungsinya isolator berfungsi sebagai penopang kawat penghantar jaringan pada tiang-tiang listrik yang digunakan untuk memisahkan secara elektrik dua buah penghantar atau lebih agar tidak terjadi kebocoran arus (*leakage current*) atau loncatan bunga api (*flashover*) sehingga mengakibatkan terjadinya kerusakan pada sistem jaringan tenaga listrik (Suswanto, 2009).

Sampai saat ini, isolator yang banyak digunakan adalah isolator kaca dan isolator keramik yang masih memiliki banyak kekurangan. Kekurangan dari segi bahan, isolator tersebut mudah pecah, memiliki massa jenis yang tinggi, kekurangan terhadap perubahan resistansi permukaan ketika kondisi basah yang menyebabkan peningkatan arus bocor yang dihasilkan isolator karena sifatnya yang hidrofilik dan ketidakmampuan isolator tersebut pulih (*recovery*) dari polutan yang menempel di permukaannya. Oleh karena itu, telah dikembangkan isolator dengan bahan polimer *silicone rubber* yang mempunyai nilai keunggulan lebih banyak dari isolator kaca dan keramik. Diantaranya adalah memiliki massa jenis yang cukup ringan, memiliki sidat hidrofobik atau menolak air yang membuat bahan isolator ini juga memiliki kemampuan pulih (*recovery*) dari polutan karena ketika turun hujan air tidak akan melekat lama pada permukaan dan air akan segera jatuh beserta polutan yang telah menempel sebelumnya karena sifat hidrofobik yang dimilikinya, kinerja yang

lebih baik dalam keadaan berpolusi, dan baik dalam menahan tegangan dibandingkan dengan isolator kaca dan isolator keramik (Hackam, 1999).

Isolator berbahan *silicone rubber* juga sangat mudah divariasikan bentuknya. Dengan berbagai macam variasi bentuk dari isolator maka isolator akan memiliki nilai ketahanannya masing-masing.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh bentuk kontur jarak rambat isolator *silicone rubber* terhadap arus bocor dan distribusi medan listriknya. Pada penelitian ini, metode dan alat yang digunakan adalah sama dengan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Dini Rizkita. Yang membedakan dengan penelitian sebelumnya adalah objek uji yang digunakan. Penelitian sebelumnya menggunakan objek uji berupa isolator berbahan polietilen, sedangkan pada penelitian kali ini akan menggunakan objek uji berupa *silicone rubber* dan menggunakan beberapa variabel yaitu, besar lengkungan sirip dan nilai tegangan uji.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka didapatkan rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh bentuk kontur jarak rambat dengan variasi lebar lengkungan sirip pada permukaan isolator *silicone rubber*
2. Bagaimana pengaruh variasi tegangan tinggi AC terhadap nilai arus bocor pada permukaan isolator berbahan *silicone rubber* .
3. Bagaimana pengaruh bentuk kontur jarak rambat dengan variasi lebar lengkungan sirip isolator *silicone rubber* terhadap distribusi medan listrik pada percobaan.

## 1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Pada penelitian ini, jenis isolator yang digunakan adalah isolator *silicone rubber* yang dimodelkan dengan bahan *silicone rubber* sebagai bentuk representasi dari permukaan isolator *silicone rubber*.
2. Pada penelitian ini, bahan isolator *silicone rubber* dianggap sempurna dan tidak terdapat cacat.
3. Pada penelitian ini, tidak membahas karakteristik mekanis, dan struktur kimia dari isolator *silicone rubber*.
4. Pada penelitian ini, panjang keseluruhan isolator adalah sama namun dengan variasi lebar lengkungan isolator *silicone rubber* yang berbeda - beda.

5. Tegangan uji yang digunakan pada penelitian ini berupa tegangan AC 5-40 kV dengan frekuensi 50 Hz.
6. Pengamatan yang dilakukan adalah mengamati pengaruh bentuk kontur jarak rambat berupa lengkungan pada permukaan isolator *silicone rubber* terhadap tingkat arus bocor dan distribusi medan listrik pada permukaan isolator berbahan *silicone rubber*.
7. Pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Elektro Universitas Brawijaya.

#### 1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan karakteristik pengaruh bentuk kontur jarak rambat berupa lengkungan sirip pada permukaan isolator berbahan *silicone rubber* dengan susunan elektroda pelat-pelat terhadap tingkat arus bocor dan dengan variasi tegangan uji yang disertai dengan simulasi distribusi medan listriknya.

#### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut :

##### BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

##### BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

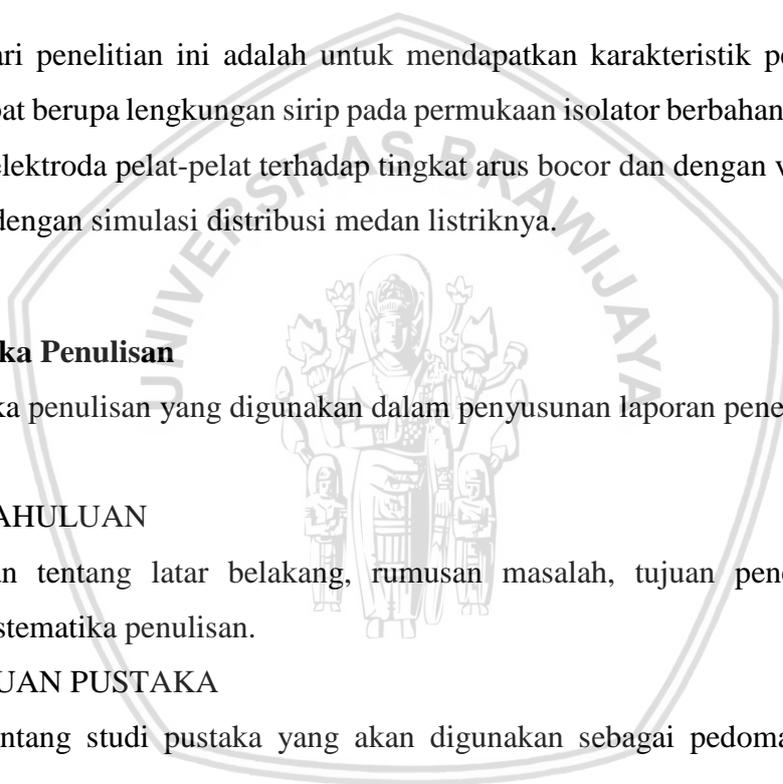
Bab ini berisi tentang studi pustaka yang akan digunakan sebagai pedoman dasar dalam penelitian ini.

##### BAB III : METODE PENELITIAN

Bab ini membahas tentang metode yang digunakan dalam penelitian, yang terdiri dari diagram alir, variabel penelitian, objek uji, pembuatan desain isolator *silicone rubber*, rangkaian pengujian, kondisi pengujian, pengambilan data, perhitungan dan analisis, serta penarikan kesimpulan dan saran.

##### BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas dan menganalisis hasil pengujian dari pengaruh bentuk kontur jarak rambat pada permukaan isolator berbahan *silicone rubber* terhadap tingkat arus bocor dan tegangan flashover yang disertai dengan distribusi medan listriknya.



## BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pengujian yang telah dilakukan.





## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Isolator

Isolator adalah alat listrik yang digunakan untuk menjalankan tugas mengisolasi yaitu memisahkan secara elektrik dua buah penghantar (atau lebih) yang berdekatan sehingga tidak terjadi kebocoran arus, atau dalam hal gradien tinggi, lompatan api (flashover) (Arismunandar, A, 2001).

Isolator mempunyai sifat atau kemampuan untuk dapat memisahkan secara elektrik dua buah penghantar atau lebih yang berdekatan sehingga arus listrik tidak mengalir dari konduktor jaringan ke tanah (Tobing, 2003)

Isolator merupakan bagian yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, untuk menentukan pilihan tentang isolator yang akan dipakai perlu mempertimbangkan syarat-syarat dari suatu isolator. Adapun syarat-syaratnya adalah sebagai berikut (Raina, dkk, 1985 : 106):

- a. Isolator harus memiliki kekuatan mekanik yang tinggi sehingga mampu menahan berat dari kawat penghantar.
- b. Memiliki ketahanan isolasi yang tinggi untuk mencegah arus bocor ke tanah.
- c. Mampu menahan variasi temperatur yang besar, yaitu isolator tidak boleh pecah ketika terkena temperatur yang tinggi selama musim kemarau dan temperatur rendah selama musim hujan.
- d. Mampu mencegah gas pada tempat-tempat yang terpolusi serta pengaruh air dan udara lembab selama musim hujan.

#### 2.2 Karakteristik Isolator Berbahan *Silicone Rubber*

*Silicone rubber* adalah polimer alami atau sintetis yang dapat divulkanisir dan memiliki sifat elastis yang tinggi. Sifat-sifat listrik *silicone rubber* bergantung pada tingkat peracikan bahan dan vulkanisir. Pengotor umum, perubahan kimia akibat penuaan, kadar air

dan variasi suhu dan frekuensi berpengaruh besar terhadap sifat listrik karet. (Naidu & Kamaraju, 1995, hal. 83)

*Silicone rubber* merupakan salah satu bahan polimer yang cocok digunakan untuk bahan isolator dibandingkan dengan bahan keramik dan kaca karena sifatnya yang baik dalam menolak air (hidrofobik).

Selain itu *silicone rubber* memiliki konduktivitas termal sekitar 0,2 W/m.K yang dapat digunakan sampai pada suhu 150 °C tanpa batasan waktu penggunaan dan hampir tidak ada perubahan dalam sifat-sifatnya, dengan demikian *silicone rubber* adalah bahan yang cocok digunakan di lingkungan yang memiliki suhu tinggi. Bahan *silicone rubber* ini memiliki sifat isolasi yang stabil pada rentang suhu yang luas. Ketika direndam dalam air, kinerjanya hampir tidak mengalami penurunan. *Silicone rubber* memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap *discharge* korona dan busur api pada tegangan tinggi serta memiliki karakteristik mekanis berupa kekuatan sobek dan kekuatan tarik sekitar 9,8 kN/m. Maka dari itu bahan *silicone rubber* menjadi bahan isolasi yang cukup ideal untuk digunakan.

Tabel 1. Sifat Bahan Isolasi *Silicone Rubber*

Tipe Bahan Karet ( <i>Rubber</i> )	Penyerapan Air (Persen)	$\epsilon_r$	Tan $\delta$	Tegangan Breakdown AC (kV/cm)	Keterbatasan Bahan
<i>Silicone Rubber</i>	0 - 3	2.6 - 3.4	0.006 - 0.02	90 - 390	Batasan suhu operasional maksimum (150°). Mudah terpengaruh oleh asam, alkali, dan senyawa yang mengandung klorin.

Sumber: (Naidu & Kamaraju, 1995, hal. 83)

Pembuatan bahan *silicone rubber* (SIR) dapat dilakukan dengan vulkanisasi PDMS yaitu pematangan (*curing*), untuk merubah molekul panjang agar saling berkaitan melalui proses kondensasi. Untuk menyesuaikan jenis isolator yang diinginkan maka dalam teknologi pembuatannya dapat menggunakan proses (Anton & Angraini, 2004).

- a. Vulkanisasi temperatur kamar (*room temperature vulcanized*, RTV) dengan bahan reaksi platinum catalyst.
- b. Vulkanisasi temperatur tinggi (*high temperature vulcanized*, HTV) dengan menggunakan bahan pemercepat benzoyl peroksida.

### 2.3 Arus Bocor

Isolator memiliki resistansi dan kapasitansi, yang diantara keduanya timbul arus konduksi. Resistansi yang tinggi pada isolator akan memperkecil nilai arus bocor. Namun, jika isolator telah mengalami kerusakan atau telah termakan usia, maka nilai resistansinya akan menjadi kecil dan pada isolator tersebut akan mengalir arus yang besar. Begitu juga dengan konduktor yang panjang akan memiliki nilai kapasitansi yang tinggi, yang akan menyebabkan tingginya arus bocor.

*Surface discharge* atau pelepasan muatan permukaan adalah pelepasan muatan dari konduktor ke media gas dan terjadi di permukaan bahan isolasi padat yang tidak tertutupi oleh konduktor. Adanya pelepasan muatan di permukaan ini menyebabkan timbulnya arus yang mengalir pada permukaan bahan isolasi padat atau yang disebut sebagai arus bocor (*leakage current*). Besarnya arus bocor juga dipengaruhi desain dan bagaimana sebuah peralatan bekerja. (Sulistyanto, 2012, hal. 227)

Tegangan pada isolator merupakan tarikan atau tekanan yang harus dilawan oleh gaya yang ada pada isolator agar tidak terjadi kegagalan pada isolator itu sendiri. Gaya perlawanan terhadap tekanan tegangan adalah gaya listrik pada isolator akibat adanya elektron-elektron yang terikat erat pada molekul bahan isolasi. Apabila ikatan ini terputus, maka isolator akan kehilangan kemampuan isolasinya. Selain elektron-elektron yang berikatan kuat tadi, terdapat sejumlah kecil elektron-elektron yang ikatannya lemah, yang bila dikenakan tegangan dapat bergerak dari molekul satu ke molekul yang lainnya, sehingga timbul arus konduksi. Arus ini disebut sebagai arus bocor.

Bila tegangan diterapkan pada isolator, maka akan timbul 3 macam arus, yaitu arus pemindahan, arus absorpsi dan arus konduksi yang sebenarnya. Arus pemindahan (*displacement current*) atau disebut juga sebagai arus pemuat, dimana jika menggunakan

tegangan DC, maka arus mengalir hanya terjadi dalam waktu singkat. Arus absorpsi merupakan arus yang tidak konstan dan nilainya turun secara perlahan. Arus absorpsi terjadi akibat dari pemoloran (*stretching*) secara perlahan dari ikatan elektron setelah pemindahan utama terjadi, sampai terjadi keseimbangan antara tekanan listrik dan gaya lawannya. Tegangan yang cukup tinggi akan dapat memutuskan ikatan elektron, sehingga arus pemuat dan arus absorpsi timbul dan berubah menjadi arus konduksi, yang bersama arus konduksi yang sebenarnya merupakan arus yang akan menyebabkan kegagalan isolasi. (Arismunandar, 1994, hal. 139)

## 2.4 Kegagalan Dalam Gas

Gas (udara) merupakan bahan isolasi alami yang banyak digunakan untuk mengisolasi peralatan tegangan tinggi. Semakin tinggi tegangan yang harus dipikul oleh bahan isolasi, maka bahan tersebut harus memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi. Kekuatan dielektrik bahan isolasi ditentukan oleh tegangan *flashover*, semakin tinggi tingkat tegangan *flashover*, maka semakin baik bahan isolator tersebut. *Flashover* adalah peristiwa tembus listrik pada udara disekitar permukaan isolator yang menimbulkan munculnya busur api disekitar permukaan isolator padat yang dapat menjembatani kedua elektroda.

Kekuatan atau tingkat tegangan *flashover* dari bahan isolasi padat menjadi bahan pertimbangan dalam perancangan konstruksi isolator. Hal ini dikarenakan tingkat tegangan *flashover* dipengaruhi oleh jenis bahan, konstruksi dan ukuran bahan isolasi padat, udara disekitar dan tegangan yang diterapkan. Sehingga konstruksi dari bahan isolator harus dapat meminimalkan tegangan *flashover* atau dapat dikatakan tembus terjadi pada udara, bukan pada bahan isolasi padat.

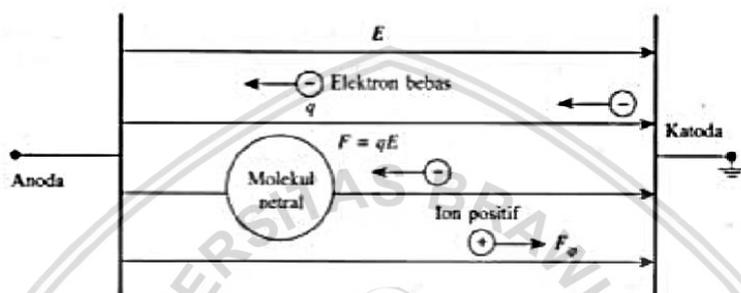
Pada bahan isolasi tidak mampu menahan tegangan yang diterapkan, maka akan terjadi pelepasan muatan (lucutan, *discharge*), atau dengan kata lain telah terjadi kegagalan isolasi. Dalam proses pelepasan muatan gas terjadi mekanisme pembangkitan atau kehilangan ion. Pembangkitan ion terjadi dengan cara benturan elektron, fotoionisasi, ionisasi oleh benturan ion positif, ionisasi termal, pelepasan elektron, dan ionisasi kumulatif. Sedangkan kehilangan ion terjadi dengan cara penggabungan elektron, rekombinasi dan difusi. (Arismunandar, 1983, hal. 5)

Terdapat dua jenis pelepasan dalam gas, yaitu pelepasan bertahan sendiri (*self sustaining*) dan pelepasan tak bertahan sendiri (*non self sustaining*). Pada mekanisme kegagalan dalam gas, terjadi proses peralihan dari pelepasan tak bertahan ke berbagai jenis pelepasan bertahan sendiri, atau yang disebut sebagai percikan (*spark*). Telah dikenal dua

mekanisme kegagalan gas, yaitu mekanisme Townsend dan mekanisme streamer. (Arismunandar, 1983, hal. 27)

## 2.5 Proses Dasar Ionisasi

Bahan isolasi udara yang ideal tidak memiliki elektron-elektron bebas, sehingga tidak ada arus yang mengalir di udara. Namun dalam kenyataannya, udara memiliki elektron bebas dan ion-ion yang jumlahnya sangat sedikit. Keberadaan elektron bebas ini merupakan pengaruh dari radiasi ultraviolet, radiasi radioaktif, radiasi sinar kosmis dan sebagainya (Tobing, 2012, hal. 26)



Gambar 2.1. Bahan isolasi diantara dua elektroda

Sumber: (Tobing, 2012, hal. 26)

Pada Gambar 2.1 Menunjukkan suatu bahan isolasi yang ditempatkan di antara dua elektroda piring sejajar. Bila elektroda diberi tegangan searah sebesar  $V$ , maka pada bahan isolasi akan timbul medan listrik ( $E$ ) yang arahnya dari anoda ke katoda. Medan listrik ini menimbulkan gaya ( $F$ ) pada elektron yang terikat pada inti atom bahan isolasi, sehingga elektron terlepas dari inti atom. Medan listrik juga menimbulkan gaya pada elektron bebas yang ada pada bahan isolasi, yang menyebabkan elektron bebas bergerak menuju anoda. Dalam perjalanan menuju anoda, elektron bebas membentur molekul netral bahan isolasi, atau yang disebut sebagai ionisasi benturan. Proses ini menghasilkan elektron bebas baru dan ion positif. Jika pada benturan ini tidak terjadi proses ionisasi, maka benturan akan mengeksitasi elektron yang terikat pada molekul netral. Medan listrik yang timbul berupaya mengubah sifat bahan isolasi menjadi konduktif, sehingga medan listrik menjadi beban bagi isolator. Beban elektrik ini dinyatakan dalam kuat medan listrik. (Tobing, 2012, hal. 26)

## 2.6 Medan Listrik

Medan listrik adalah suatu daerah (ruang) di sekitar muatan yang masih dipengaruhi oleh gaya elektrik. Pada setiap titik dalam medan listrik terdapat suatu kuantitas yang

menyatakan tingkat kekuatan medan tersebut, yang disebut kuat medan listrik (E). Oleh Michael Faraday medan listrik digambarkan sebagai vektor garis, medan listrik yang keluar dari muatan positif dan masuk ke muatan negatif. Kuat medan listrik yang semakin besar digambarkan dengan garis medan yang semakin panjang. Kuat medan listrik (E) di sebuah titik adalah gaya persatuan muatan yang dialami oleh sebuah muatan di titik tersebut. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon R^2} \hat{a}_r \dots\dots\dots (2-1)$$

Kuat medan listrik dalam elektroda ialah:

$$\vec{E} = \frac{F}{Q_2} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon R^2} \hat{a}_r \dots\dots\dots (2-2)$$

Distribusi medan listrik adalah persebaran medan listrik pada ruang yang terdapat di antara elektroda positif (anoda) dan negatif (katoda). Distribusi medan listrik mempunyai tingkat intensitas yang berbeda pada tiap titik dalam jarak sela.

Intensitas medan listrik akan memberikan tekanan listrik pada suatu bahan dielektrik yang disebut *stress* listrik. Sedangkan kekuatan maksimum bahan dalam menahan stress listrik agar tidak terjadi tembus disebut kekuatan dielektrik bahan. Kekuatan dielektrik dan tekanan listrik dinyatakan dalam besaran kV/cm. Bentuk distribusi medan listrik sangat menentukan besarnya intensitas medan listrik pada setiap titik yang artinya juga menentukan besarnya nilai tegangan tembus. Besarnya intensitas medan listrik pada sebuah titik adalah:

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta x} \dots\dots\dots (2-3)$$

keterangan:

E = intensitas medan listrik pada sebuah titik (kV/cm)

$\Delta U$  = beda potensial antar dua titik yang berdekatan (kV)

$\Delta x$  = jarak antar dua titik yang berdekatan (cm)

Bentuk distribusi medan listrik dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu distribusi medan listrik seragam (homogen) dan tidak seragam (non-homogen). Bentuk distribusi medan listrik menentukan besarnya intensitas medan listrik pada setiap titik yang artinya juga

menentukan besarnya nilai tegangan tembus. Ukuran seragam tidaknya distribusi medan listrik dapat dinyatakan dengan besar nilai efisiensi medannya, dimana besar faktor efisiensi medan listrik bergantung pada bentuk geometris dari susunan elektroda dan dapat diketahui dari nilai efisiensi medan listrik yang didefinisikan Schwaiger yaitu:.

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maks}} \dots\dots\dots (2-4)$$

Pada penelitian ini, susunan elektroda menggunakan pelat-pelat yang merupakan susunan elektroda homogen. Susunan elektroda yang menghasilkan medan listrik homogen memiliki nilai  $\eta \approx 1$ , sedangkan pada susunan elektroda yang menghasilkan medan listrik non homogen memiliki nilai  $\eta < 1$ . (Dachlan, Harry Soekotjo, dkk, 2008, pp. 2-3).

Karena tegangan tembus pada sela elektroda dapat ditentukan yaitu:

$$U_d = E_d \times s \times \eta \dots\dots\dots (2-5)$$

keterangan:

Ud = tegangan tembus pada susunan elektroda (kV)

Ed = kuat medan listrik yang menyebabkan terjadi tembus (kV/cm)

s = jarak sela (cm)

maka dapat disimpulkan, bentuk finial petir yang runcing akan memberikan tegangan tembus yang lebih kecil dan lebih cepat dibandingkan bentuk finial yang kurang runcing.

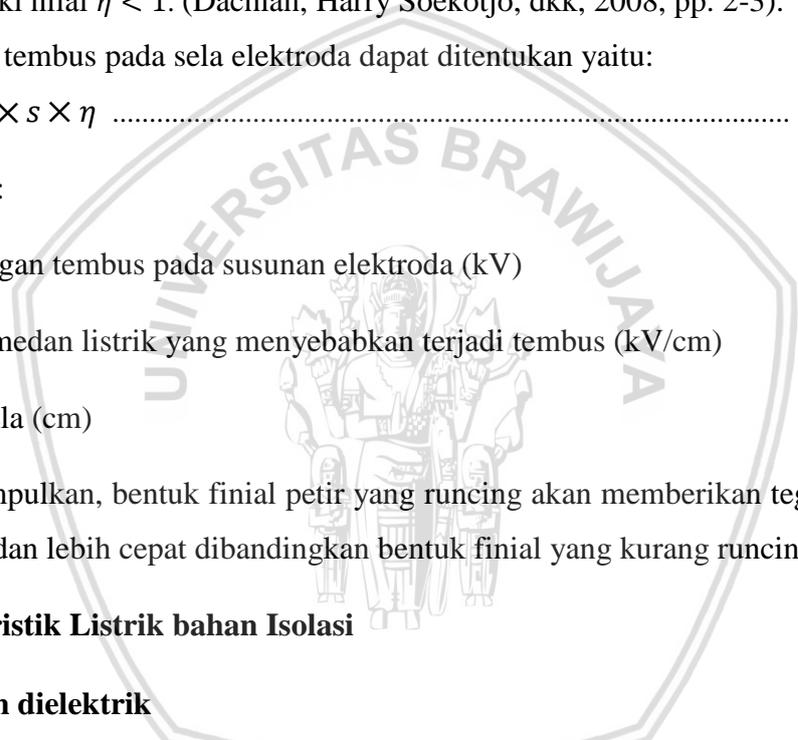
## 2.7 Karakteristik Listrik bahan Isolasi

### 2.7.1 Kekuatan dielektrik

Setiap bahan isolasi memiliki kemampuan untuk memikul besarnya kuat medan listrik. Jika kuat medan listrik yang dipikul berlangsung cukup lama dan besarnya melebihi batas, maka pada bahan isolasi akan mengalir arus yang tinggi dan terjadi kegagalan isolasi. Dalam hal ini bahan isolasi mengalami tembus listrik (electrical breakdown). Kuat medan listrik tertinggi yang dapat dipikul oleh bahan isolasi dan tidak menimbulkan adanya tembus listrik disebut sebagai kekuatan dielektrik. (Tobing, 2012, hal. 26)

### 2.7.2 Rugi – Rugi Dielektrik

Pada suatu bahan isolasi yang diberi tegangan AC akan timbul rugi-rugi daya yang disebut dengan rugi-rugi dielektrik. Sumber rugi-rugi dielektrik yaitu rugi-rugi pada resistansi bahan isolasi ( $i^2R$ ), rugi-rugi pada resistansi kontak antara dua bahan isolasi yang



berdampingan, pelepasan pada rongga udara di dalam bahan isolasi dan adanya rugi-rugi dipol. Rugi-rugi dipol merupakan panas akibat adanya gesekan antar molekul dipol ketika mengikuti arah medan listrik yang terjadi pada bahan isolasi. Rugi-rugi dielektrik murni diakibatkan oleh rugi-rugi pada resistansi bahan isolasi (rugi-rugi konduktif) dan rugi-rugi dipol. Namun rugi-rugi konduktif relatif kecil dibandingkan rugi-rugi dipol, sehingga rugi-rugi dipol dianggap sebagai penyebab timbulnya rugi-rugi dielektrik. (Tobing, 2012, hal. 29)

Bahan isolasi terpolarisasi oleh medan elektrik yang mengakibatkan berubahnya molekul-molekul menjadi dipol-dipol. Rugi-rugi dipol merupakan rugi-rugi akibat adanya gesekan antar dipol. Rugi-rugi dielektrik tiap bahan isolasi berbeda, bergantung pada jenis bahan isolasi. Untuk membedakan rugi-rugi dielektrik suatu jenis bahan isolasi dengan jenis bahan isolasi lain, maka dimunculkan faktor rugi-rugi dielektrik atau disebut dengan  $\tan \delta$ . Rugi-rugi dielektrik hanya terjadi pada bahan isolasi yang dikenai tegangan AC. Semakin tinggi frekuensi tegangan AC, maka semakin tinggi pula gesekan antar dipol. Namun frekuensi yang terlalu tinggi tidak dapat meningkatkan rugi-rugi dielektrik. (Tobing, 2012, hal. 30-31)

Rugi-rugi dielektrik dapat menimbulkan panas pada isolator. Panas yang terjadi dapat menaikkan suhu bahan isolasi. Semakin besar rugi-rugi dielektrik, maka kenaikan suhu bahan isolasi juga semakin tinggi. Jika suhu ini berlangsung cukup lama maka akan mempercepat penuaan bahan isolasi tersebut. (Tobing, 2012, hal. 32)

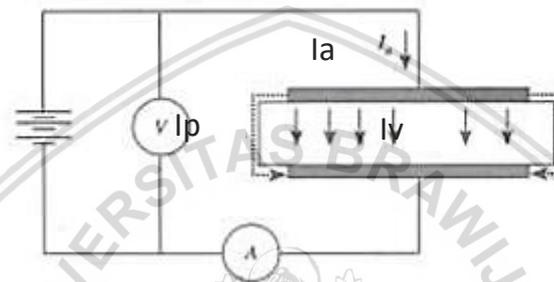
### 2.7.3 Pelepasan Muatan Sebagian

Pada proses produksi isolator padat, dimungkinkan terjadi kesalahan yang mengakibatkan timbulnya rongga udara di dalam isolator. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya pelepasan muatan sebagian (*partial discharge*), yaitu pelepasan muatan elektrik pada media isolasi yang terdapat diantara dua elektroda yang bertegangan tetapi pelepasan muatan tersebut tidak sampai menghubungkan kedua elektroda secara sempurna. Kekuatan dielektrik udara pada rongga ini lebih kecil dibandingkan kekuatan dielektrik bahan isolasi padat. Permittivitas udara lebih kecil dibanding permittivitas bahan isolasi padat. Sehingga ketika bahan isolasi padat tersebut dikenai tegangan, maka kuat medan listrik yang timbul pada rongga udara lebih besar dibandingkan kuat medan listrik pada bahan isolasi padat. Pada kondisi ini, tembus listrik hanya terjadi pada rongga udara atau dapat dikatakan tembus listrik hanya terjadi pada sebagian dari sistem isolasi. (Tobing, 2012, hal. 3435)

### 2.7.4 Resistansi Isolasi

Resistansi isolasi Pada suatu bahan isolasi yang diberi tegangan DC, maka akan timbul arus yang mengalir pada bahan isolasi tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Arus yang mengalir, yaitu arus permukaan ( $I_p$ ) dan arus volume ( $I_v$ ). Arus permukaan adalah arus yang mengalir pada permukaan bahan isolasi, sedangkan arus volume mengalir melalui volume bahan isolasi. Nilai arus sumber merupakan penjumlahan dari arus permukaan dan arus volume, atau dapat dituliskan dalam persamaan 6. berikut.

$$I_a = I_v + I_p \quad (6)$$



Gambar 2.2. Arus Pada Bahan Isolasi Padat

Sumber: (Tobing, 2012, hal. 38)

Hambatan yang dialami oleh arus yang mengalir pada bahan isolasi, yaitu resistansi volume ( $R_v$ ) yang dialami oleh arus volume dan resistansi permukaan ( $R_p$ ) yang dialami oleh arus permukaan. Adanya arus absorpsi, mengakibatkan pengukuran resistansi isolator bergantung pada waktu pengukuran. Selain itu, resistansi dipengaruhi oleh kelembapan, temperatur dan bentuk elektroda. Bahan isolasi yang baik memiliki arus absorpsi yang kecil. (Tobing, 2012, hal. 38-41)

### 2.7.5 Kerak Dielektrik

Kerak dielektrik merupakan jejak arus pada permukaan isolator. Jejak ini timbul karena adanya arus rambat atau arus bocor yang menyebabkan panas dan terjadi penguraian kimia pada bahan isolasi. Besarnya arus rambat ditentukan oleh resistansi permukaan bahan isolasi, yang merupakan pengaruh dari kelembapan, temperatur, tekanan dan kandungan polusi di sekitar isolator. Suatu bahan isolasi harus mampu menahan arus bocor agar tidak menimbulkan pemburukan pada isolator. Terbentuknya kerak dielektrik dapat menyebabkan lajur konduktif. Lajur ini menimbulkan peningkatan tekanan medan listrik pada isolator. Panas akibat arus

rambat juga dapat menimbulkan erosi dielektrik tanpa didahului kerak konduktif. (Tobing, 2012, hal. 42)

Mekanisme terjadinya kerak dielektrik mirip dengan mekanisme terjadinya pelepasan pada isolator terpolusi. Kerak dielektrik terjadi pada isolator pasangan luar dan dalam. Terjadinya kerak dielektrik dipengaruhi oleh sifat material bahan isolator; bentuk dan kehalusan permukaan konduktor bertegangan yang dipikul oleh isolator; dan lingkungan sekitar isolator. Kerak dielektrik ini dapat memicu terjadinya pelepasan sempurna. (Tobing, 2012, hal. 42)



## BAB III

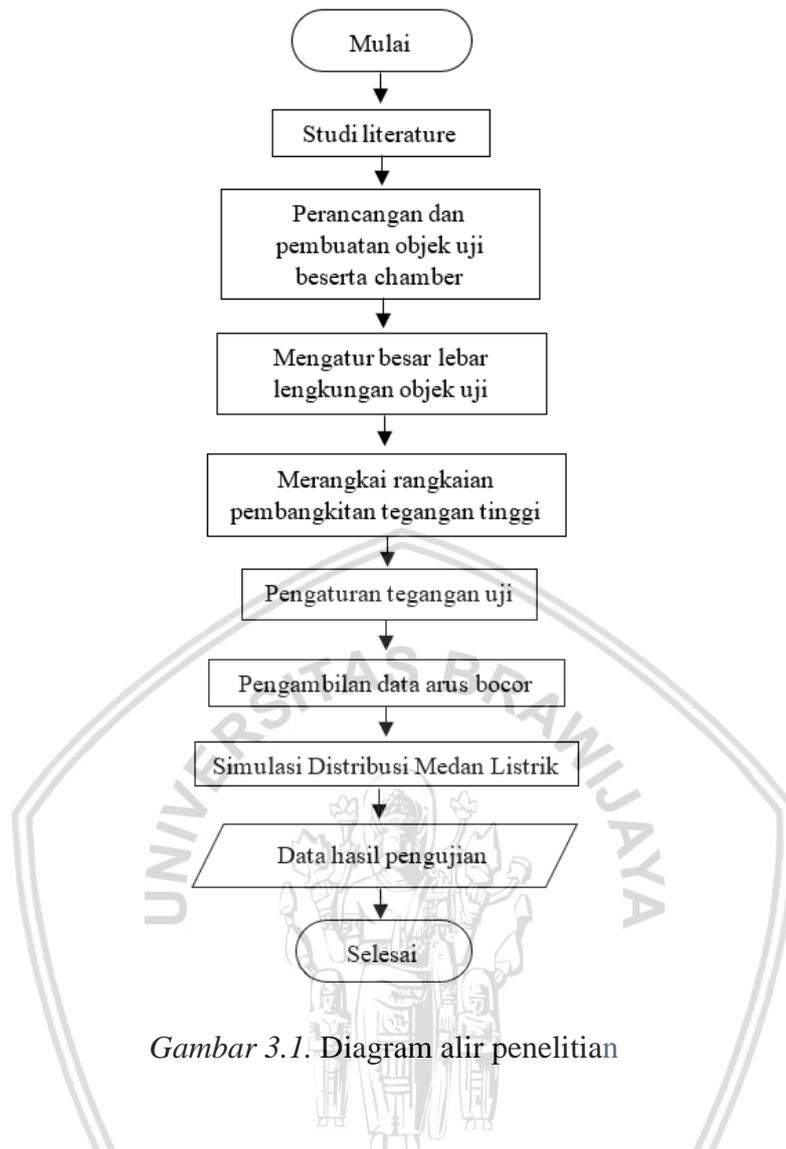
### METODE PENELITIAN

Suatu isolator padat tidak dirancang untuk tembus melintasi bahan isolasi tersebut, namun tembus terjadi melalui permukaan bahan, yaitu melalui udara. Menurut Schwaiger, tembus melalui medium udara dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu jarak sela udara, besar medan dan bentuk distribusi medannya. Bentuk distribusi medan ditentukan oleh bentuk kontur permukaan isolator dan bentuk elektroda. Apabila bentuk elektroda yang digunakan tetap, maka distribusi medan pada permukaan isolator ditentukan oleh bentuk kontur permukaan isolator dan konstanta dielektrik isolator padat yang digunakan. (Warno, 2003, hal. 26)

Metode penelitian yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah dengan melakukan pengukuran tingkat arus bocor dan distribusi medan listrik pada isolator berbahan *silicone rubber* jarak rambat berkotur yang berupa variasi lebar lengkungan sirip isolator *silicone rubber*. Pada metode penelitian ini akan dibahas mengenai diagram alir penelitian, studi literature, variabel penelitian, objek uji, pembuatan desain isolator *silicone rubber*, rangkaian pengujian, kondisi pengujian, pengambilan data, perhitungan dan analisis, serta penarikan kesimpulan dan saran.

#### 3.1 Studi Literature

Mempelajari berbagai buku referensi, jurnal yang berkaitan, skripsi penelitian sebelumnya dan beberapa sumber di internet. Diagram alir penelitian ini disajikan pada *Gambar 3.1*



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

### 3.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini ada beberapa variabel yang akan diamati, antara lain yaitu pengaruh bentuk kontur berupa variasi panjang lengkungan sirip pada isolator *silicone rubber* terhadap arus bocor pada permukaan isolator *silicone rubber*, pengaruh variasi tegangan uji terhadap arus bocor pada permukaan isolator *silicone rubber* dan pengaruh kontur variasi panjang lengkungan sirip pada isolator *silicone rubber* terhadap simulasi distribusi medan listriknya.

### 3.3 Objek Uji

Langkah pertama sebelum memulai pengujian adalah menentukan objek uji, objek uji yang digunakan pada penelitian ini adalah isolator *silicone rubber*. Isolator *silicone rubber* yang digunakan diharuskan masih dalam kondisi baik dan tidak mengalami cacat berupa goresan ataupun retak.

*Silicone rubber* yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 1 lembar dengan panjang sebesar 36 cm dan lebar 12 cm yang memiliki keseluruhan luas masing-masing lembar sebesar 432 cm<sup>2</sup> dan tebal *silicone rubber* sebesar 0,5 cm. Pada pinggir isolator *silicone rubber* diberi plat tembaga sebagai elektroda pada isolator seperti isolator tegangan tinggi pada umumnya.

Sebelum dilakukannya pengujian, permukaan isolator *silicone rubber* dibersihkan terlebih dahulu dari kandungan polutan. Karena kandungan polutan yang ada pada permukaan isolator *silicone rubber* dapat mempengaruhi kekuatan dielektrik isolator *silicone rubber* ketika pengujian. Pembersihan isolator *silicone rubber* ini dilakukan dengan cara mencuci seluruh permukaan isolator *silicone rubber* dengan menggunakan air bersih kemudian seluruh permukaan isolator tersebut dikeringkan dengan menggunakan kain kering yang lembut. Permukaan isolator *silicone rubber* yang bersih dapat meningkatkan performansi kinerja isolator tersebut dalam hal menahan arus bocor yang terjadi pada permukaan isolator *silicone rubber*. Isolator yang bersih mempunyai resistansi permukaan yang besar dibandingkan dengan isolator dalam keadaan terkontaminasi polutan.

Oleh karena itu, sebelum melakukan pengujian sebaiknya isolator *silicone rubber* dibersihkan terlebih dahulu dari polutan yang ada dipermukaan isolator tersebut. Bahan dari isolator *silicone rubber* dan konduktor berupa tembaga yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat pada *Gambar 3.2* dan *Gambar 3.3*.



*Gambar 3.2.* Bahan isolator *silicone rubber*

Sumber: <http://www.faprerubber.com/Silicone.html>

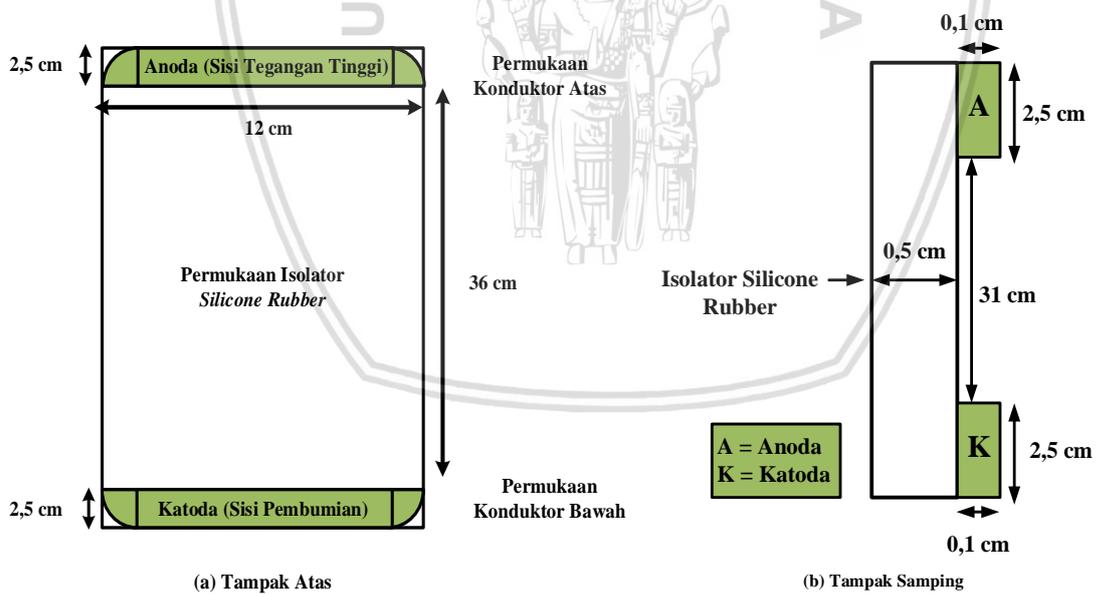


Gambar 3.3. Bahan konduktor tembaga

Sumber: <http://www.kencotubes.com/Copper.html>

### 3.4 Pembuatan Desain Isolator *Silicone rubber*

Pembuatan desain isolator *silicone rubber* ini adalah menggunakan bahan *silicone rubber sheet* dengan tebal 0,5 cm yang didesain untuk merepresentasikan permukaan isolator pin *silicone rubber*. Serta desain plat tembaga dengan tebal 1 mm yang didesain sedemikian rupa agar dapat digunakan sebagai konduktornya. Desain isolator *silicone rubber* dapat dilihat pada Gambar 3.4. Desain konduktor plat tembaga dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.4. Desain isolator *silicone rubber*



*Gambar 3.5.* Desain konduktor plat tembaga tampak atas

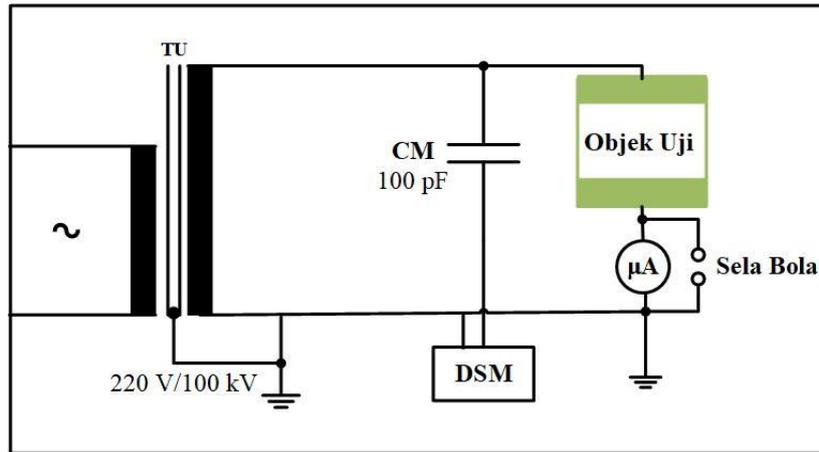
Pada *Gambar 3.4 (a)* memperlihatkan desain isolator tampak dari atas, sedangkan pada *Gambar 3.4 (b)* memperlihatkan desain isolator tampak dari samping. Dari desain isolator tersebut terdapat konduktor berbentuk persegi panjang yang salah satu sisi ujungnya telah di tumpulkan agar tidak ada bagian yang lancip seperti pada *Gambar 3.5* yang dapat membuat peningkatan medan di salah satu bagian saja juga digambarkan dengan warna hijau di bagian sisi atas dan sisi bawah, bagian sisi atas tersebut diberi nama permukaan anoda atas dan sisi bawah diberi nama permukaan katoda yang terbuat dari bahan tembaga murni dengan panjang 2,5 cm, lebar 12 cm dengan ketebalan 1 mm. Tembaga murni ini digunakan karena memiliki sifat sebagai penghantar yang baik. Pelat tembaga bagian atas (anoda) akan dihubungkan dengan tegangan tinggi (*high voltage*), sedangkan pada pelat tembaga bagian bawah (katoda) akan dihubungkan dengan sistem pembumian (*ground*) dan keduanya akan dihubungkan dengan penjepit. Permukaan isolator *silicone rubber* yang mulanya dalam kondisi rata (*flat*) tanpa ada lengkungan akan diberikan lebar lengkungan sebesar R untuk mengetahui perubahan pada besarnya nilai arus bocor beserta distribusi medannya.

### **3.5 Rangkaian Pengujian dan Fungsi Peralatan**

Sebelum pengujian dilakukan, langkah awal yang harus dilakukan adalah membuat rangkaian pengujian, mengetahui alat dan bahan, serta fungsi dari peralatannya. Berikut adalah rangkaian yang akan digunakan untuk pengujian dan fungsi peralatannya.

#### **3.5.1 Rangkaian Pengujian Arus Bocor Permukaan Isolator *Silicone Rubber***

Berikut ini adalah gambar skematik rangkaian pengujian tingkat arus bocor pada permukaan isolator *silicone rubber*:



Gambar 3.6. Rangkaian pengujian arus bocor pada permukaan isolator *silicone rubber*

Sumber: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro-UB

Pada pengujian ini, trafo yang digunakan adalah trafo uji dengan kapasitas tegangannya sampai 100 kV dengan daya keluaran sebesar 5 kVA, dan frekuensi sebesar 50 Hz. Trafo uji ini digunakan untuk membangkitkan tegangan tinggi AC, dengan tegangan sisi primer sebesar 220 volt dan tegangan sisi sekundernya dapat diatur dengan *control desk*. Pada rangkaian pengujian yang terdapat pada Gambar 3.6, sisi sekunder trafo uji dihubungkan dengan CM (pembagi tegangan kapasitif) dan isolator *silicone rubber* sebagai objek uji. Dimana CM berfungsi sebagai pembagi tegangan kapasitif dan sebagai pengaman DSM (alat ukur tegangan tinggi AC) dengan menurunkan tegangan yang akan masuk ke DSM. Kemudian objek uji yang berupa isolator *silicone rubber* dihubungkan dengan *amperemeter digital* yang diparalel dengan sela bola dan kemudian dibumikan. *Amperemeter digital* tersebut berfungsi untuk mengukur tingkat arus bocor pada permukaan isolator *silicone rubber* akibat dari variasi bentuk kontur berupa lengkungan pada permukaan isolator *silicone rubber*.

Besarnya tingkat arus bocor yang terukur pada *amperemeter digital* merupakan arus yang merepresentasikan arus yang mengalir pada permukaan isolator *silicone rubber* tersebut. Tegangan yang diberikan pada isolator akan memberikan *feedback* berupa arus bocor yang nilainya sebanding dengan tegangan uji yang diberikan. Pada setiap tahap pemberian tegangan akan dibiarkan selama 1 menit dan diukur kembali tingkat arus bocornya. Hal ini dilakukan sebanyak tiga kali untuk satu tahap tegangan uji, setelah itu diambil nilai rata-ratanya.

### 3.5.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan untuk membuat rangkaian pada penelitian ini adalah:

- a. Isolator *silicone rubber* : Objek uji penelitian

- b. *HV Transformer* (Trafo Uji) : 220 V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz
- c. CM : Pembagi tegangan kapasitif (100 pF)
- d. DSM : Alat ukur tegangan tinggi AC
- e. Sela Bola : Susunan elektroda bola-bola
- i. *Chamber* : Ruang uji
- f. *Amperemeter Digital* : Alat ukur arus listrik (arus bocor)

### 3.5.3 Fungsi Peralatan

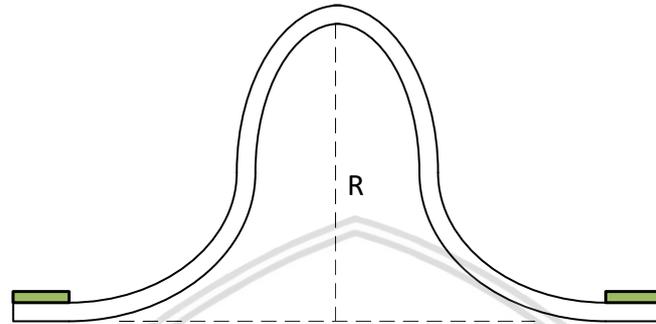
Adapun fungsi dari peralatan-peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperti berikut:

- a. Isolator *silicone rubber*, sebagai objek uji yang akan diteliti.
- b. *HV Transformer* (Trafo Uji), berfungsi untuk menaikkan tegangan sampai batas 100 kV, dengan daya sebesar 5 kVA, dan frekuensi sebesar 50 Hz.
- c. DSM, merupakan alat ukur yang berada di *control desk* dan sebagai pengukur tegangan tinggi AC.
- d. Sela Bola, digunakan sebagai indikator tembus pada penelitian dan pengaman pada *amperemeter digital*.
- e. *Amperemeter Digital*, adalah alat ukur arus listrik dan pada penelitian ini berfungsi sebagai alat ukur arus bocor.
- f. *Chamber*, adalah ruang uji yang digunakan dalam penelitian berfungsi sebagai pemberi tekanan mekanis pada isolator *silicone rubber* agar dapat tercipta suatu lengkungan yang dapat di atur sesuai dengan macam variasi lengkungan yang telah direncanakan serta menjadi pelindung operator yang melakukan penelitian dan digunakan untuk melindungi objek uji agar aman.

### 3.6 Kondisi Pengujian

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan sebelum melakukan pengujian, salah satunya adalah kondisi ruang uji, kondisi ruang uji sebisa mungkin disamakan dengan kondisi seperti yang ada di lapangan. Serta kebersihan isolator juga harus diperhatikan agar tidak membuat hasil pengukuran menjadi tidak valid. Pada pengujian ini objek uji yang digunakan yaitu lembaran *silicone rubber* yang telah didesain seperti pada *Gambar 3.3* serta penarikan lebar lengkungan digambarkan seperti pada *Gambar 3.7*.

Pada pengujian ini, terdapat jarak rambat ( $s_r$ ), dimana jarak rambat ( $s_r$ ) merupakan jarak antara konduktor atas dengan konduktor bawah. Pada kondisi pengujian ini, walaupun tiap tipe isolator berbeda-beda lengkungannya tetapi dari semua tipe isolator tersebut memiliki jarak rambat ( $s_r$ ) yang sama yaitu sebesar 31 cm. Terdapat enam variasi lengkungan yang digunakan yaitu sesuai dengan Tabel 3.1 berikut :



Gambar 3.7. Penarikan lebar lengkungan sirip R

Tabel 3.1 Variasi lebar lengkungan sirip isolator *silicone rubber*

Tipe Isolator	R (cm)
Tipe A	0
Tipe B	2
Tipe C	4
Tipe D	6
Tipe E	8
Tipe F	10

Kondisi pengujian ini sesuai dengan rangkaian pada Gambar 3.8, Gambar 3.9, Gambar 3.10, Gambar 3.11, Gambar 3.12, dan Gambar 3.13. Pada pengujian ini juga menggunakan



ruang uji (*chamber*) yang berfungsi untuk melingkupi dan memberi lengkungan sirip pada isolator *silicone rubber*. Isolator bagian bawah dihubungkan dengan sisi tegangan tinggi, sedangkan bagian atas isolator dibumikan.

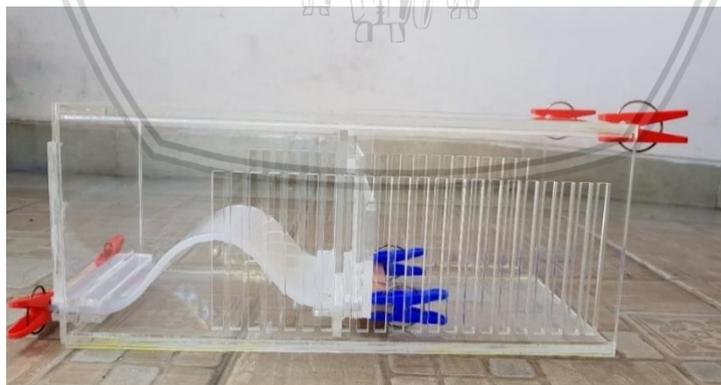
*Gambar 3.8. Silicone rubber tanpa lengkungan (Tipe A)*

Pada pengujian ini terdapat enam variasi bentuk objek uji, yang pada Tipe A ini objek uji yang berupa *silicone rubber* tidak diberikan lengkungan permukaan sama sekali yaitu berupa 0 cm.



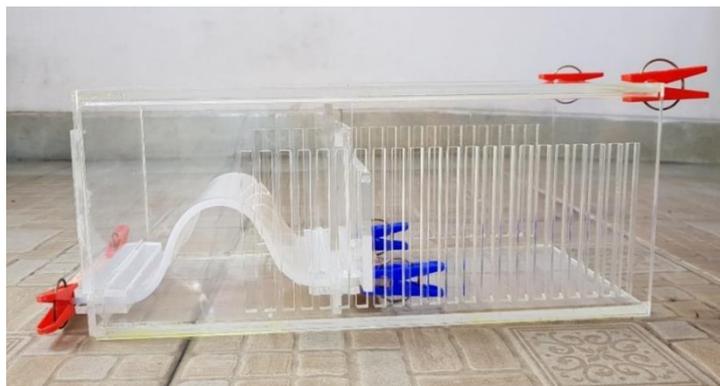
*Gambar 3.9. Silicone rubber dengan lebar lengkungan 2 cm (Tipe B)*

Pada pengujian ini terdapat enam variasi bentuk objek uji, yang pada Tipe B ini objek uji yang berupa *silicone rubber* diberikan lebar lengkungan permukaan sebesar 2 cm.



*Gambar 3.10. Silicone rubber dengan lebar lengkungan 4 cm (Tipe C)*

Pada pengujian ini terdapat enam variasi bentuk objek uji, yang pada Tipe C ini objek uji yang berupa *silicone rubber* diberikan lebar lengkungan permukaan sebesar 4 cm.



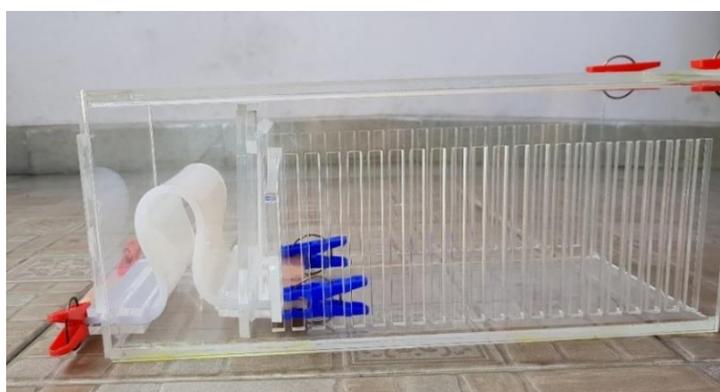
Gambar 3.11. *Silicone rubber* dengan lebar lengkungan 6 cm (Tipe D)

Pada pengujian ini terdapat enam variasi bentuk objek uji, yang pada Tipe D ini objek uji yang berupa *silicone rubber* diberikan lebar lengkungan permukaan sebesar 6 cm.



Gambar 3.12. *Silicone rubber* dengan lebar lengkungan 8 cm (Tipe E)

Pada pengujian ini terdapat enam variasi bentuk objek uji, yang pada Tipe E ini objek uji yang berupa *silicone rubber* diberikan lebar lengkungan permukaan sebesar 8 cm.



Gambar 3.13. *Silicone rubber* dengan lebar lengkungan 10 cm (Tipe F)

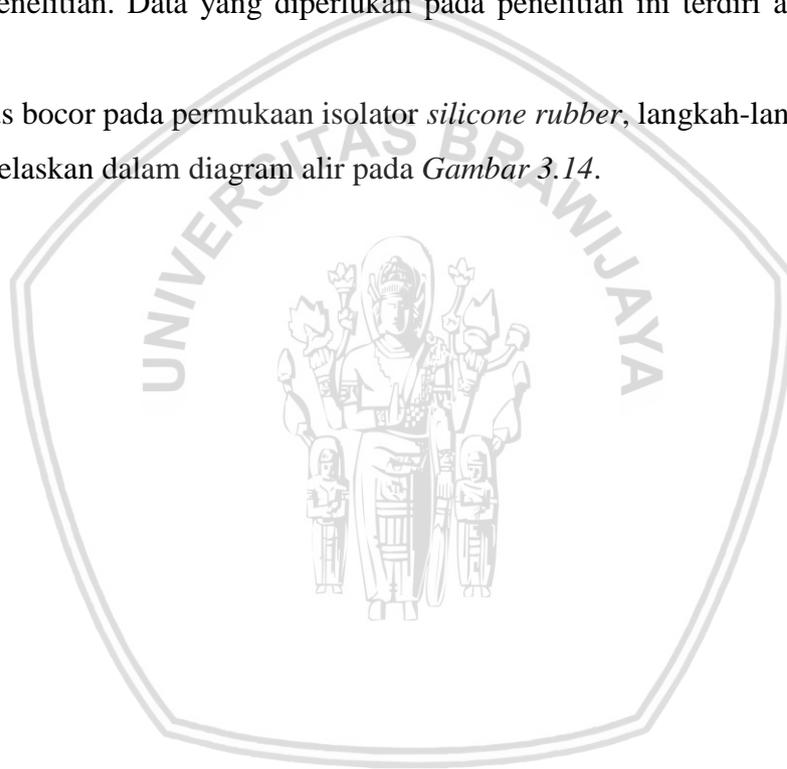
Pada pengujian ini terdapat enam variasi bentuk objek uji, yang pada Tipe F ini objek uji yang berupa *silicone rubber* diberikan lebar lengkungan permukaan sebesar 10 cm.

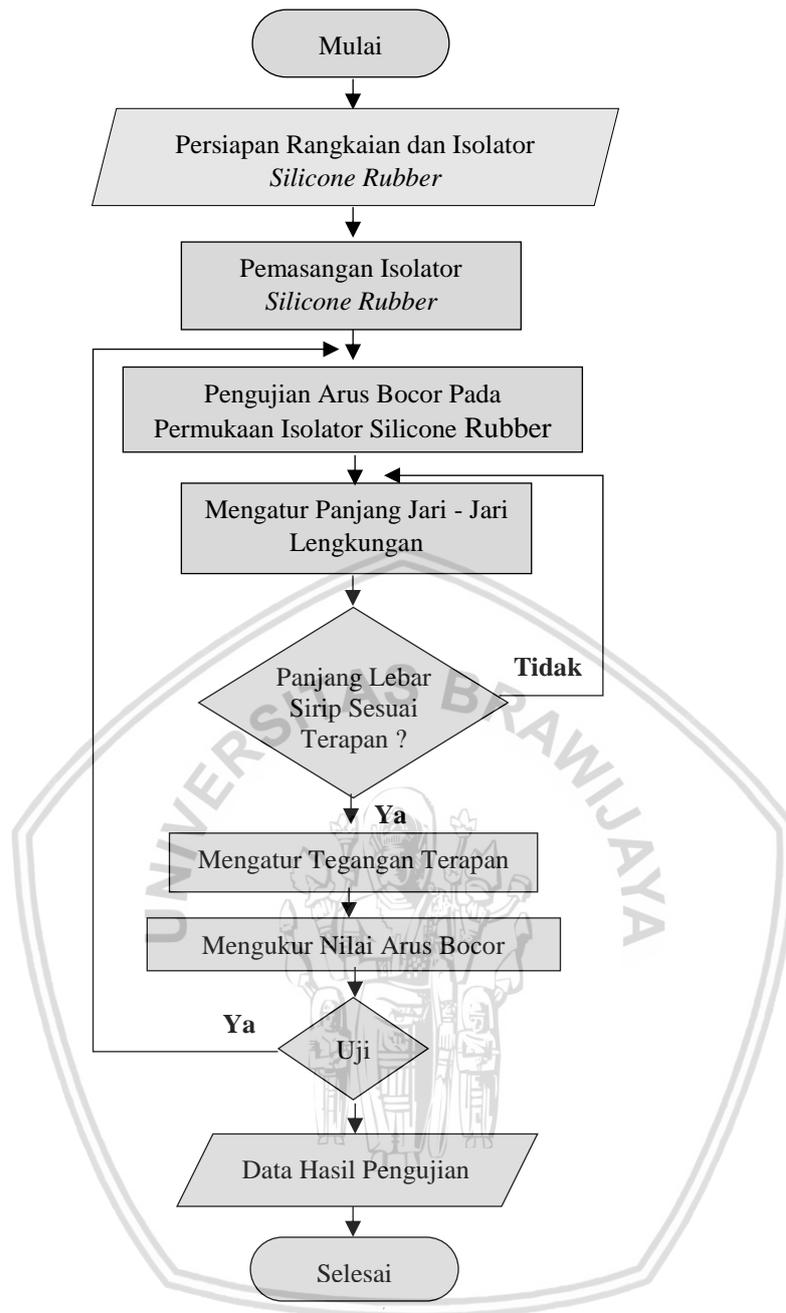
Seperti yang terlihat pada *Gambar 3.8*, *Gambar 3.9*, *Gambar 3.10*, *Gambar 3.11*, *Gambar 3.12* dan *Gambar 3.13* terdapat enam macam variasi besar lebar lengkungan sirip, yaitu Tipe A, Tipe B, Tipe C, Tipe D, Tipe E, dan Tipe F dimana masing-masing bagian memiliki ukuran permukaan yang sama yaitu 36 cm x 12 cm.

### 3.7 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh data-data yang diperlukan dalam menyelesaikan penelitian. Data yang diperlukan pada penelitian ini terdiri atas data primer yang meliputi:

1. Tingkat arus bocor pada permukaan isolator *silicone rubber*, langkah-langkah pengujian ini akan dijelaskan dalam diagram alir pada *Gambar 3.14*.





Gambar 3.14. Diagram alir pengujian tingkat arus bocor pada permukaan isolator *silicone rubber*

### 3.8 Perhitungan dan Analisis

#### 3.8.1 Analisis Nilai dan Grafik Pengujian Arus Bocor

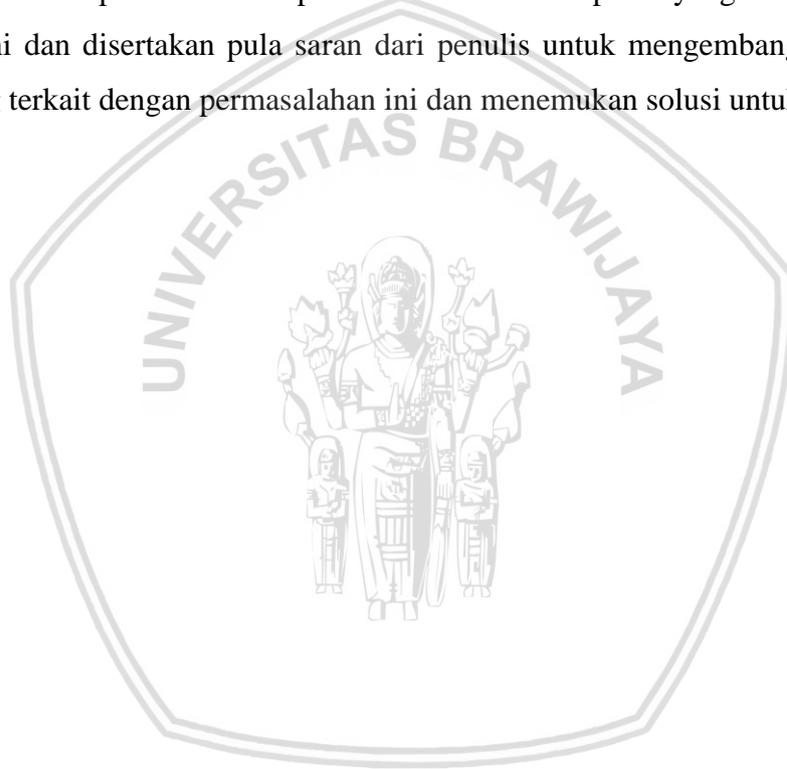
Analisis nilai arus bocor akan dilakukan dari ketiga hasil pengujian arus bocor pada isolator *silicone rubber* dengan permukaan berkontur berupa lengkungan sirip yaitu dengan cara hasil ketiga pengujian tersebut akan dirata-rata pada setiap nilai tegangan uji. Setelah hasil telah dirata-rata maka barulah grafik dapat dibuat dan dari grafik tersebut kita dapat menarik suatu hasil analisis yang berkaitan.

### 3.8.2 Analisis Simulasi Distribusi Medan Listrik

Analisis distribusi medan listrik akan dilakukan dengan cara melakukan simulasi distribusi medan listrik menggunakan *software Finite Element Method Magnetics* atau yang biasa disebut FEMM 4.2. Setelah didapatkan gambar kuat medan, grafik kuat medan, dan tabel nilai medan listrik maksimum, maka kita dapat menarik suatu hasil analisis yang berkaitan.

### 3.9 Penarikan Kesimpulan dan Saran

Dari analisis dan pembahasan dapat ditarik suatu kesimpulan yang merupakan intisari dari penelitian ini dan disertakan pula saran dari penulis untuk mengembangkan penelitian kedepannya yang terkait dengan permasalahan ini dan menemukan solusi untuk permasalahan ini.





## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, maka akan dilakukan penganalisisan dan pembahasan terhadap data tersebut.

#### 4.1 Tinjauan Umum

Kontur berupa lengkungan sirip pada permukaan isolator *silicone rubber* dapat mempengaruhi unjuk kerja isolator *silicone rubber*. Dimana semakin besar lengkungan sirip mengakibatkan turunnya nilai kuat medan listrik di area lengkungan. Lengkungan sirip pada permukaan isolator *silicon rubber* ini menggambarkan sirip-sirip pada isolator pin ataupun pos. Bentuk kontur berupa lengkungan sirip pada permukaan isolator *silicon rubber* juga mempengaruhi hasil pengujian dari arus bocor. Untuk mengetahui besar arus bocor yang mengalir pada permukaan isolator tersebut, maka diperlukan suatu pengujian di laboratorium dengan menyamakan kondisi yang ada di lapangan.

Hasil nilai arus bocor pada pemberian kontur pada permukaan isolator *silicone rubber* ini bersifat probabilistik. Pengujian tersebut dilakukan dengan menggunakan metode rekayasa mekanis, yaitu dengan cara memberikan tekanan (*tension*) pada kedua sisi isolator *silicone rubber* agar tercipta bentuk kontur berupa lengkungan yang lebarnya dapat diatur sesuai dengan kebutuhan pengujian.

#### 4.2 Pengujian Arus Bocor pada Permukaan Isolator *Isolator Silicone Rubber* dengan Variasi Lengkungan Sirip

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh bentuk kontur berupa lengkungan sirip pada permukaan isolator *silicone rubber* terhadap arus bocor ketika diberi tegangan uji. Pengujian arus bocor pada permukaan isolator *silicone rubber* dilakukan sesuai dengan diagram alir pengujian, dimana permukaan isolator *silicone rubber* dipastikan bersih dari segala kontaminan yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran serta memperhitungkan

kondisi lingkungan pengujian yang meliputi tingkat kelembapan dan suhu ruang yang sama pada tiap kali melakukan pengujian agar tidak mempengaruhi hasil pengukuran. Untuk mengetahui nilai arus bocor pada permukaan isolator *silicone rubber*, maka isolator *silicone rubber* akan diuji dengan beberapa variabel diantaranya adalah menguji pengaruh variasi nilai tegangan uji terhadap nilai arus bocor, pengaruh variasi lengkungan permukaan isolator *silicone rubber* terhadap nilai arus bocor, pengaruh perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ) terhadap nilai arus bocor, pengaruh perbandingan jarak horizontal ( $s_h$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ) terhadap nilai arus bocor, dan perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak horizontal ( $s_h$ ) terhadap nilai arus bocor. Pengujian arus bocor pada permukaan isolator *silicone rubber* tersebut dilakukan dengan memberikan bentuk kontur berupa lengkungan pada permukaan isolator *silicone rubber* dengan enam variasi lengkungan, yaitu 0 cm (Tipe A), 2 cm (Tipe B), 4 cm (Tipe C), 6 cm (Tipe D), 8 cm (Tipe E) dan 10 cm (Tipe F).

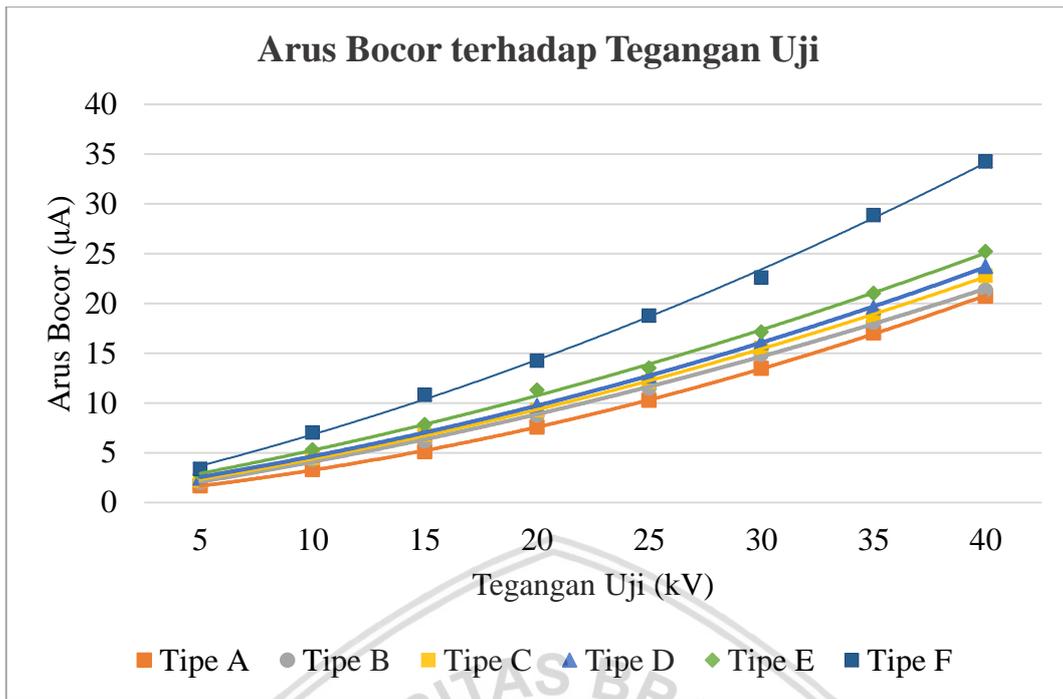
#### 4.2.1 Pengaruh Variasi Nilai Tegangan Uji terhadap Nilai Arus Bocor

Isolator *silicone rubber* Tipe A, Tipe B, Tipe C, Tipe D, Tipe E dan Tipe F memiliki lengkungan berbeda-beda tetapi memiliki jarak rambat ( $s_r$ ) yang sama. Pada saat pengujian isolator tersebut dilakukan beberapa pengujian menggunakan delapan macam variasi nilai tegangan uji yaitu 5 kV hingga 40 kV. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh bentuk kontur permukaan isolator terhadap arus bocor ketika diberi variasi nilai tegangan uji. Pada Tabel 4.1 ditunjukkan pengaruh dari adanya variasi nilai tegangan uji pada berbagai macam tipe bentuk isolator terhadap nilai arus bocor yang timbul.

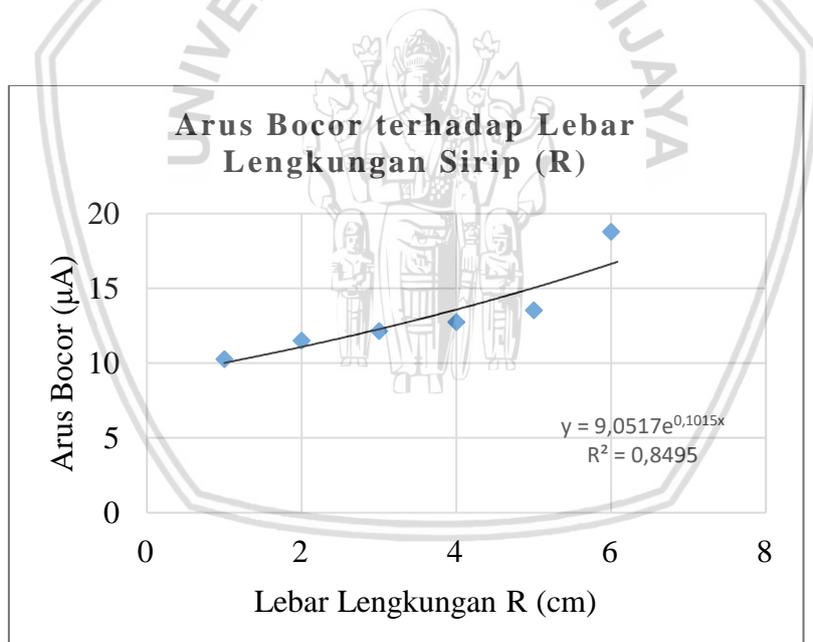
Tabel 4.1 Data hasil pengujian arus bocor pada isolator *silicone rubber* dengan variasi lengkungan

Tegangan Uji (kV)	Arus Bocor ( $\mu\text{A}$ )					
	Tipe A	Tipe B	Tipe C	Tipe D	Tipe E	Tipe F
5	1,67	2,03	2,23	2,47	2,80	3,37
10	3,33	4,33	4,50	4,77	5,30	7,03
15	5,10	6,17	6,83	7,03	7,83	10,83
20	7,60	8,77	9,27	9,73	11,30	14,27
25	10,27	11,50	12,13	12,73	13,53	18,77
30	13,47	14,90	15,53	16,07	17,13	22,60
35	17,03	18,10	18,77	19,57	21,03	28,87
40	20,73	21,33	22,77	23,73	25,23	34,27

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa nilai arus bocor pada permukaan tiap tipe bentuk isolator mengalami peningkatan seiring dengan pertambahan nilai variasi tegangan uji yang diberikan. Dan berdasarkan pada Tabel 4.1 dapat dibuat grafik untuk mengetahui pengaruh pengaruh dari adanya variasi nilai tegangan uji pada berbagai macam tipe bentuk isolator terhadap nilai arus bocor yang timbul seperti pada *Gambar 4.1*. Serta pengambilan data untuk tegangan 25 kV yang digunakan untuk membuat grafik pengaruh nilai lengkungan terhadap nilai arus bocor seperti pada *Gambar 4.2*.



Gambar 4.1 Grafik nilai arus bocor isolator *silicone rubber* variasi tegangan uji



Gambar 4.2 Grafik nilai arus bocor isolator *silicone rubber* variasi lebar lengkungan sirip (R) pada tegangan uji 25 kV

Dari grafik pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai variasi tegangan uji yang diberikan, maka semakin tinggi pula nilai dari arus bocor yang mengalir pada permukaan isolator *silicone rubber*. Dan pada level tegangan yang sama, dapat diketahui juga bahwa semakin besar nilai lengkungan sirip yang diberikan pada permukaan isolator *silicone rubber*, maka semakin besar pula nilai dari pengukuran arus bocor pada



permukaan isolator *silicone rubber*. Dapat diketahui pada Tabel 4.1 bahwa nilai arus bocor tertinggi dimiliki oleh isolator Tipe F yang memiliki lengkungan yang paling besar yaitu sebesar 10 cm dengan peningkatan arus bocor pada tiap varaisi tegangannya yaitu kurang lebih sebesar 3 hingga 6  $\mu\text{A}$  dan nilai arus bocor terendah dimiliki oleh isolator Tipe A yang memiliki lengkungan paling kecil atau tidak memiliki lengkungan sama sekali yaitu sebesar 0 cm dengan peningkatan arus bocor pada tiap varaisi tegangannya yaitu kurang lebih sebesar 1,5 - 4  $\mu\text{A}$ .

#### 4.2.3 Pengaruh Perbandingan Jarak Vertikal ( $s_v$ ) Dengan Jarak Rambut ( $s_r$ ) Terhadap Nilai Arus Bocor

Tingkat arus bocor pada isolator *silicone rubber* Tipe A, Tipe B, Tipe C, Tipe D, Tipe E dan Tipe F berbeda-beda meskipun memiliki jarak rambut ( $s_r$ ) yang sama yaitu sebesar 31 cm. Hal ini dikarenakan bentuk kontur permukaan isolator tersebut berbeda-beda, masing-masing memiliki jarak vertikal ( $s_v$ ) dan jarak horizontal ( $s_h$ ) yang berbeda-beda pula. Nilai perbandingan dari nilai jarak vertikal ( $s_v$ ) dan jarak horizontal ( $s_h$ ) disebut sebagai  $x$ . Pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 ditunjukkan nilai perbandingan  $x$  dan pengaruhnya terhadap nilai arus bocor yang timbul pada tegangan uji 25 kV.

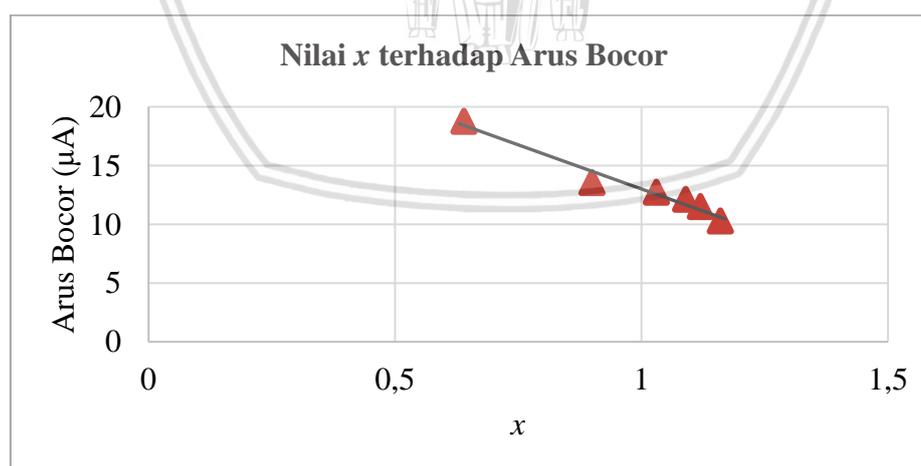
Tabel 4.2 Pengaruh perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak rambut ( $s_r$ )

Tipe Isolator	R (cm)	Jarak Vertikal ( $s_v$ ) (cm)	$x$
Tipe A	0	36	1,16
Tipe B	2	35	1,12
Tipe C	4	34	1,09
Tipe D	6	32	1,03
Tipe E	8	28	0,90
Tipe F	10	20	0,64

Tabel 4.3 Pengaruh perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ) terhadap nilai arus bocor

Type Isolator	$x$	Arus Bocor ( $\mu\text{A}$ )
Type A	1,16	10,27
Type B	1,12	11,5
Type C	1,09	12,13
Type D	1,03	12,73
Type E	0,90	13,53
Type F	0,64	18,77

Berdasarkan Tabel 4.3 dapat diketahui bahwa arus bocor tertinggi dimiliki oleh isolator Tipe F yang memiliki lengkungan sebesar 10 cm dengan nilai  $x$  sebesar 0,64 dan nilai arus bocor terendah dimiliki oleh isolator Tipe A yang memiliki lengkungan sebesar 0 cm dan nilai  $x$  sebesar 1,16. Semakin besar lengkungan sirip maka semakin kecil nilai perbandingan nilai jarak vertikal ( $s_v$ ) dan jarak rambat ( $s_r$ ). Berdasarkan pada Tabel 4.3 dapat dibuat grafik untuk mengetahui pengaruh perbandingan  $x$  terhadap nilai arus bocor yang timbul pada tegangan uji 25 kV.



Gambar 4.3 Grafik perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ) terhadap nilai arus bocor

Dari grafik pada *Gambar 4.3* dapat disimpulkan bahwa pada jarak rambat yang sama, semakin besar nilai perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dan jarak rambat ( $s_r$ ) maka nilai dari arus bocor yang timbul akan semakin kecil.

#### 4.2.4 Pengaruh Perbandingan Jarak Horizontal ( $S_h$ ) Dengan Jarak Rambat ( $S_r$ ) Terhadap Nilai Arus Bocor

Tingkat arus bocor pada isolator *silicone rubber* Tipe A, Tipe B, Tipe C, Tipe D, Tipe E dan Tipe F berbeda-beda meskipun memiliki jarak rambat ( $s_r$ ) yang sama yaitu sebesar 31 cm. Hal ini dikarenakan bentuk kontur permukaan isolator tersebut berbeda-beda, masing-masing memiliki jarak vertikal ( $s_v$ ) dan jarak horizontal ( $s_h$ ) yang berbeda-beda pula. Nilai perbandingan dari nilai jarak horizontal ( $s_h$ ) dan jarak rambat ( $s_r$ ) disebut sebagai  $y$ . Pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 ditunjukkan nilai perbandingan  $y$  dan pengaruhnya terhadap nilai arus bocor yang timbul pada tegangan uji 25 kV.

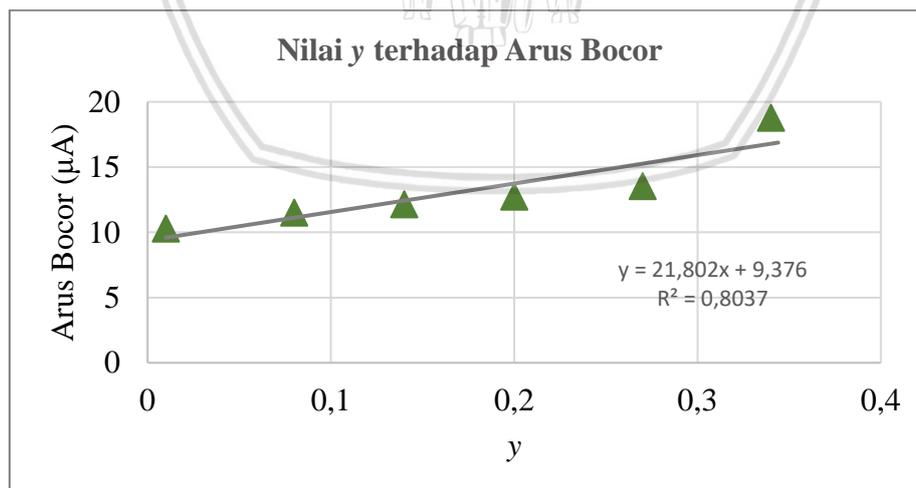
Tabel 4.4 Pengaruh perbandingan jarak horizontal ( $s_h$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ )

Type Isolator	R (cm)	Jarak Horizontal ( $s_h$ ) (cm)	$y$
Tipe A	0	0,5	0,01
Tipe B	2	2,5	0,08
Tipe C	4	4,5	0,14
Tipe D	6	6,5	0,20
Tipe E	8	8,5	0,27
Tipe F	10	10,5	0,34

Tabel 4.5 Pengaruh perbandingan jarak horizontal ( $s_h$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ) terhadap nilai arus bocor

Type Isolator	y	Arus Bocor ( $\mu\text{A}$ )
Type A	0,01	10,27
Type B	0,08	11,5
Type C	0,14	12,13
Type D	0,20	12,73
Type E	0,27	13,53
Type F	0,34	18,77

Berdasarkan Tabel 4.7 dapat diketahui bahwa nilai arus bocor tertinggi dimiliki oleh isolator Tipe F yang memiliki lengkungan sebesar 10 cm dengan nilai y sebesar 0,34 dan nilai arus bocor terendah dimiliki oleh isolator Tipe A yang memiliki lengkungan sebesar 0 cm dan nilai y sebesar 0,01. Semakin besar lengkungan sirip maka semakin besar pula nilai perbandingan nilai jarak horizontal ( $s_h$ ) dan jarak rambat ( $s_r$ ). Berdasarkan pada Tabel 4.7 dapat dibuat grafik untuk mengetahui pengaruh perbandingan y terhadap nilai arus bocor yang timbul pada tegangan uji 25 kV.



Gambar 4.4 Grafik perbandingan jarak horizontal ( $s_h$ ) dengan jarak rambat ( $s_r$ ) terhadap nilai arus bocor

Dari grafik pada *Gambar 4.4* dapat disimpulkan bahwa pada jarak rambat yang sama, semakin besar nilai perbandingan jarak horizontal ( $s_h$ ) dan jarak rambat ( $s_r$ ) maka nilai dari arus bocor yang timbul akan semakin besar.

#### 4.2.5 Dan Perbandingan Jarak Vertikal ( $S_v$ ) Dengan Jarak Horizontal ( $S_h$ ) Terhadap Nilai Arus Bocor

Tingkat arus bocor pada isolator *silicone rubber* Tipe A, Tipe B, Tipe C, Tipe D, Tipe E dan Tipe F berbeda-beda meskipun memiliki jarak rambat ( $s_r$ ) yang sama yaitu sebesar 31 cm. Hal ini dikarenakan bentuk kontur permukaan isolator tersebut berbeda-beda, masing-masing memiliki jarak vertikal ( $s_v$ ) dan jarak horizontal ( $s_h$ ) yang berbeda-beda pula. Nilai perbandingan dari nilai jarak vertikal ( $s_v$ ) dan jarak horizontal ( $s_h$ ) disebut sebagai  $z$ . Pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 ditunjukkan nilai perbandingan  $z$  dan pengaruhnya terhadap nilai arus bocor yang timbul pada tegangan uji 25 kV.

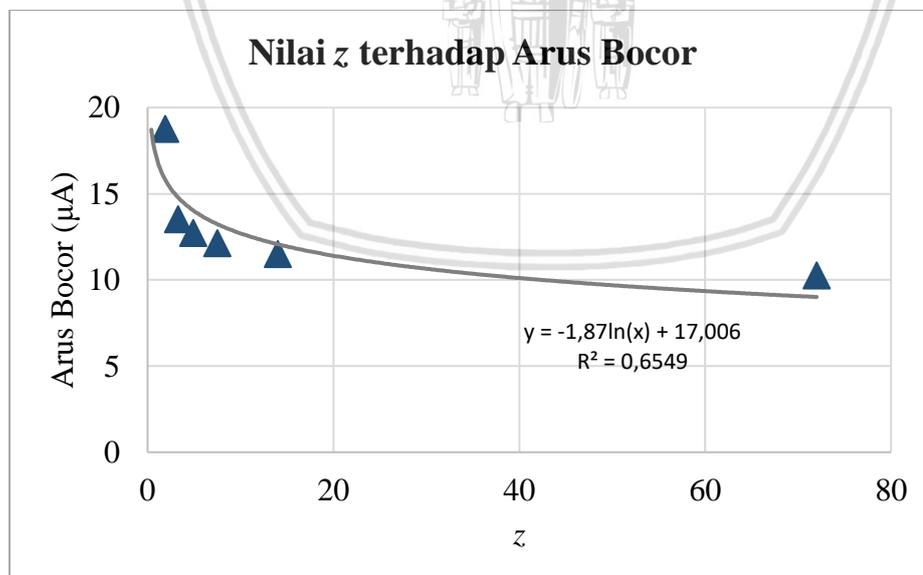
Tabel 4.6 Pengaruh perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak horizontal ( $s_h$ ) terhadap nilai arus bocor

Tipe Isolator	R (cm)	Jarak Vertikal ( $s_v$ ) (cm)	Jarak Horizontal ( $s_h$ ) (cm)	$z$	
Tipe A	0	36	0,5	72,00	
Tipe B	2	35	2,5	14,00	
Tipe C	4	34	4,5	7,50	
Tipe D	6	32	6,5	4,92	
Tipe E	8	28	8,5	3,29	
Tipe F	10	20	10,5	1,90	

Tabel 4.7 Pengaruh perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak horizontal ( $s_h$ ) terhadap nilai arus bocor

Tipe Isolator	$z$	Arus Bocor ( $\mu\text{A}$ )
Tipe A	72,00	10,27
Tipe B	14,00	11,5
Tipe C	7,50	12,13
Tipe D	4,92	12,73
Tipe E	3,29	13,53
Tipe F	1,90	18,77

Berdasarkan Tabel 4.8 dapat diketahui bahwa arus bocor tertinggi dimiliki oleh isolator Tipe F yang memiliki lengkungan sebesar 10 cm dengan nilai  $z$  sebesar 1,90 dan nilai arus bocor terendah dimiliki oleh isolator Tipe A yang memiliki lengkungan sebesar 0 cm dan nilai  $z$  sebesar 10,27. Semakin besar lengkungan sirip maka semakin kecil nilai perbandingan nilai jarak vertikal ( $s_v$ ) dan jarak horizontal ( $s_h$ ). Berdasarkan pada Tabel 4.8 dapat dibuat grafik untuk mengetahui pengaruh perbandingan  $z$  terhadap nilai arus bocor yang timbul pada tegangan uji 25 kV.



Gambar 4.5 Grafik perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak horizontal ( $s_h$ ) terhadap nilai arus bocor

Dari grafik pada *Gambar 4.5* dapat disimpulkan bahwa pada jarak rambat yang sama, semakin besar nilai perbandingan jarak vertikal ( $s_v$ ) dan jarak horizontal ( $s_h$ ) maka nilai dari arus bocor yang timbul semakin kecil.

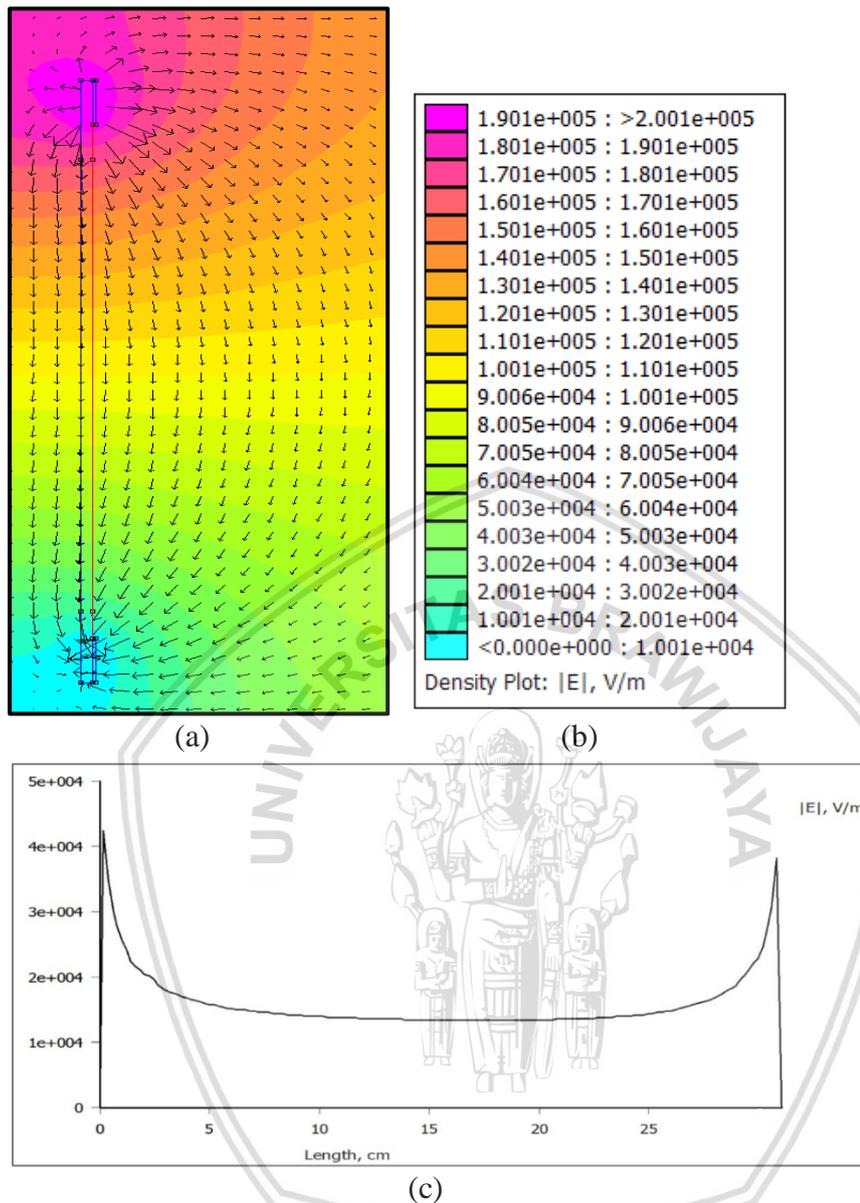
### 4.3 Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Isolator *Silicone Rubber* terhadap Variasi Lengkungan Sirip

Distribusi medan listrik adalah persebaran medan listrik pada ruang yang terdapat di antara elektroda positif (anoda) dan negatif (katoda). Distribusi medan listrik mempunyai tingkat intensitas yang berbeda pada tiap titik dalam jarak sela.

Untuk mengetahui distribusi medan listrik pada permukaan isolator *silicone rubber* berkontur lengkungan sirip, maka pada pengujian ini diadakan simulasi distribusi medan listrik. Simulasi dilakukan untuk setiap bentuk isolator variasi panjang sirip menggunakan *software Finite Element Method Magnetics* atau yang biasa disebut FEMM 4.2. *Problem Type* yang digunakan pada simulasi adalah *axisymmetric problem*, karena bentuk geometri isolator pada dasarnya merupakan bentuk simetris rotasional. Bentuk geometri elektroda berupa bola-bola dengan diameter sebesar.....cm. Dengan permitivitas relatif masing-masing medium yaitu untuk  $\epsilon_r$  elektroda = 1,  $\epsilon_r$  udara = 1, dan  $\epsilon_r$  *silicone rubber* = 3,6. Tegangan yang digunakan dalam simulasi sebesar 5 kV.

Hasil simulasi distribusi medan listrik dari isolator *Silicone Rubber* variasi lengkungan sirip yaitu isolator Tipe A, Tipe B, Tipe C, Tipe D, Tipe E, dan Tipe F ditampilkan pada gambar berikut ini. Penggambaran bentuk isolator pada *software* FEMM 4.2 sesuai dengan bentuk asli penampang isolator.

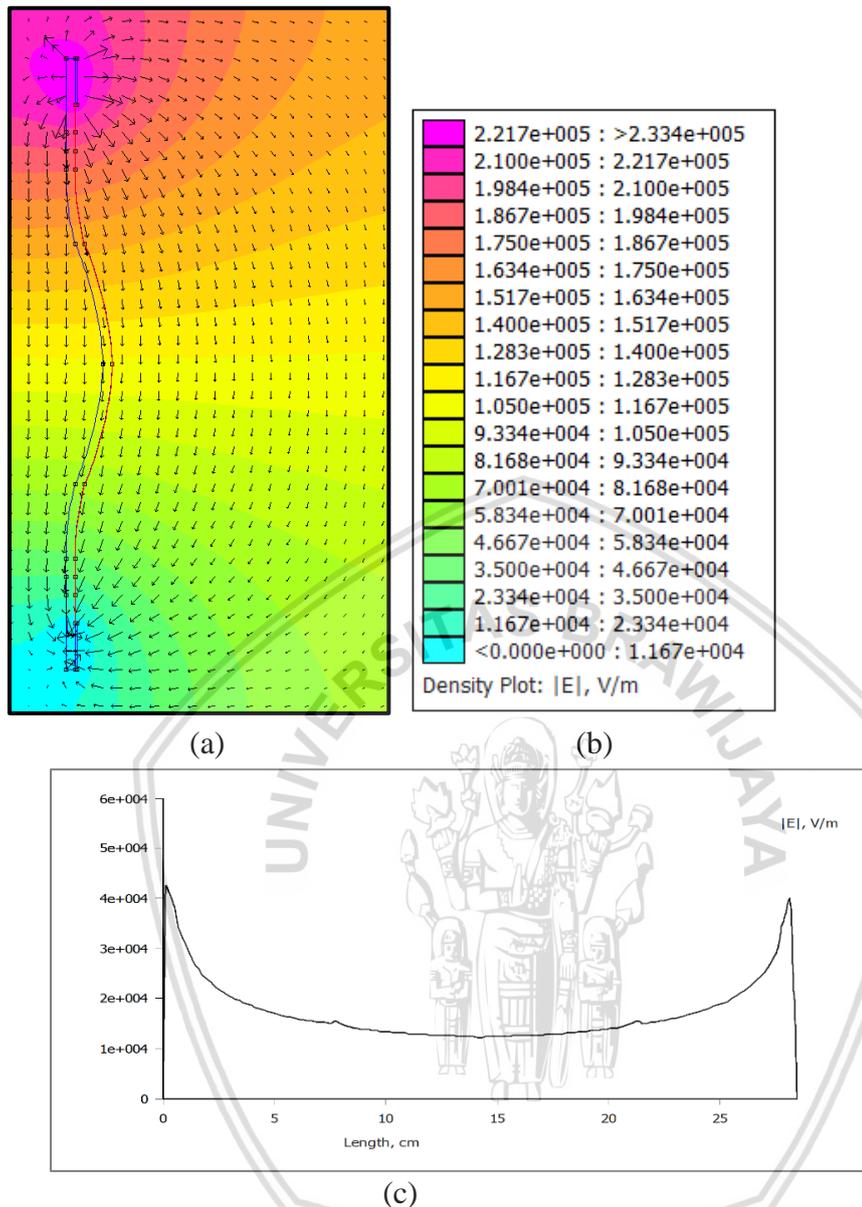
### 4.3.1 Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Isolator *Silicone Rubber* Tipe A



Gambar 4.6 Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe A (c)

Pada Gambar 4.6 (a) ditampilkan distribusi medan listrik isolator Tipe A, dimana warna merah dibagian atas merupakan sisi tegangan tinggi yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang tinggi dan warna biru dibagian bawah merupakan sisi pentanahan yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang rendah. Nilai kuat medan listrik di sepanjang permukaan isolator *silicone rubber* ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.6 (c), dengan kuat medan listrik maksimum sebesar 1,901 kV/cm yang dapat kita lihat pada . Gambar 4.6 (b).

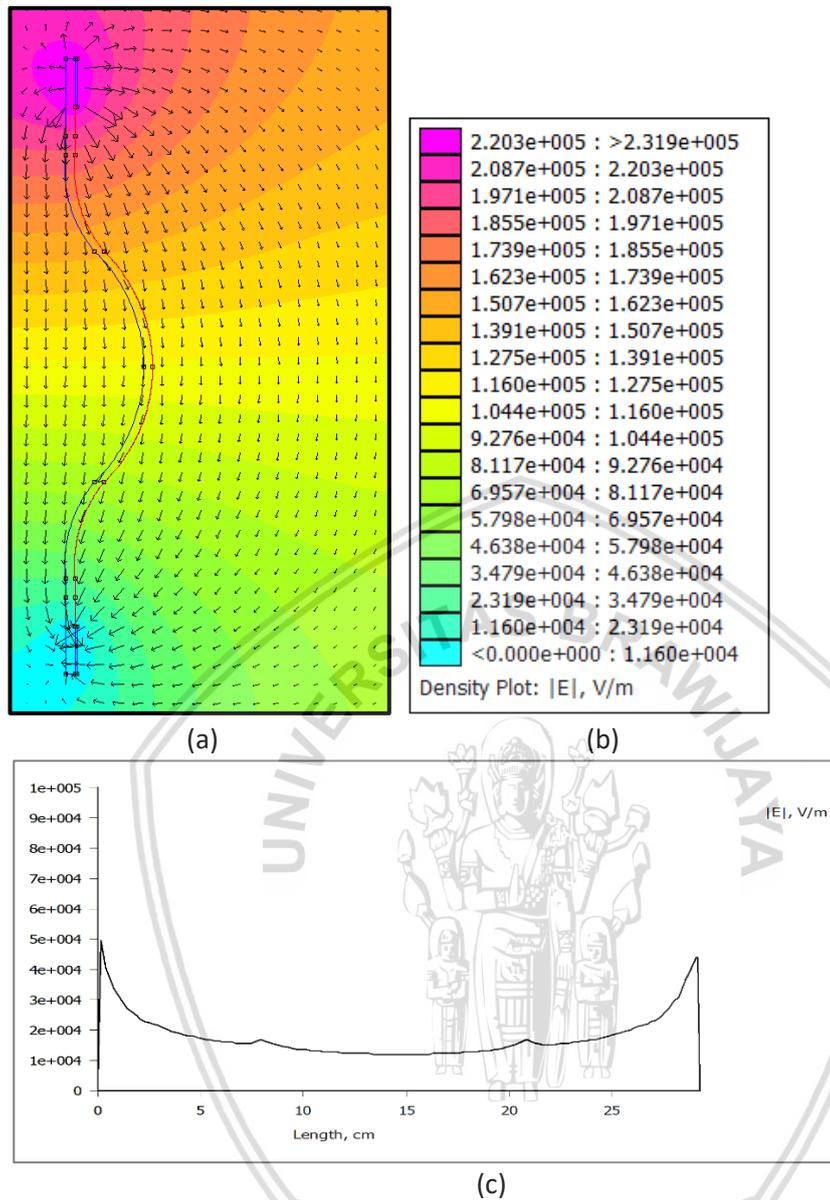
### 4.3.2 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Isolator *Silicone Rubber* Tipe B



Gambar 4.7 Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe B (c)

Pada Gambar 4.7 (a) ditampilkan distribusi medan listrik isolator Tipe B, dimana warna merah dibagian atas merupakan sisi tegangan tinggi yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang tinggi dan warna biru dibagian bawah merupakan sisi pentanahan yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang rendah. Nilai kuat medan listrik di sepanjang permukaan isolator *silicone rubber* ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.7 (c), dengan kuat medan listrik maksimum sebesar 2,217 kV/cm yang dapat kita lihat pada Gambar 4.7 (b).

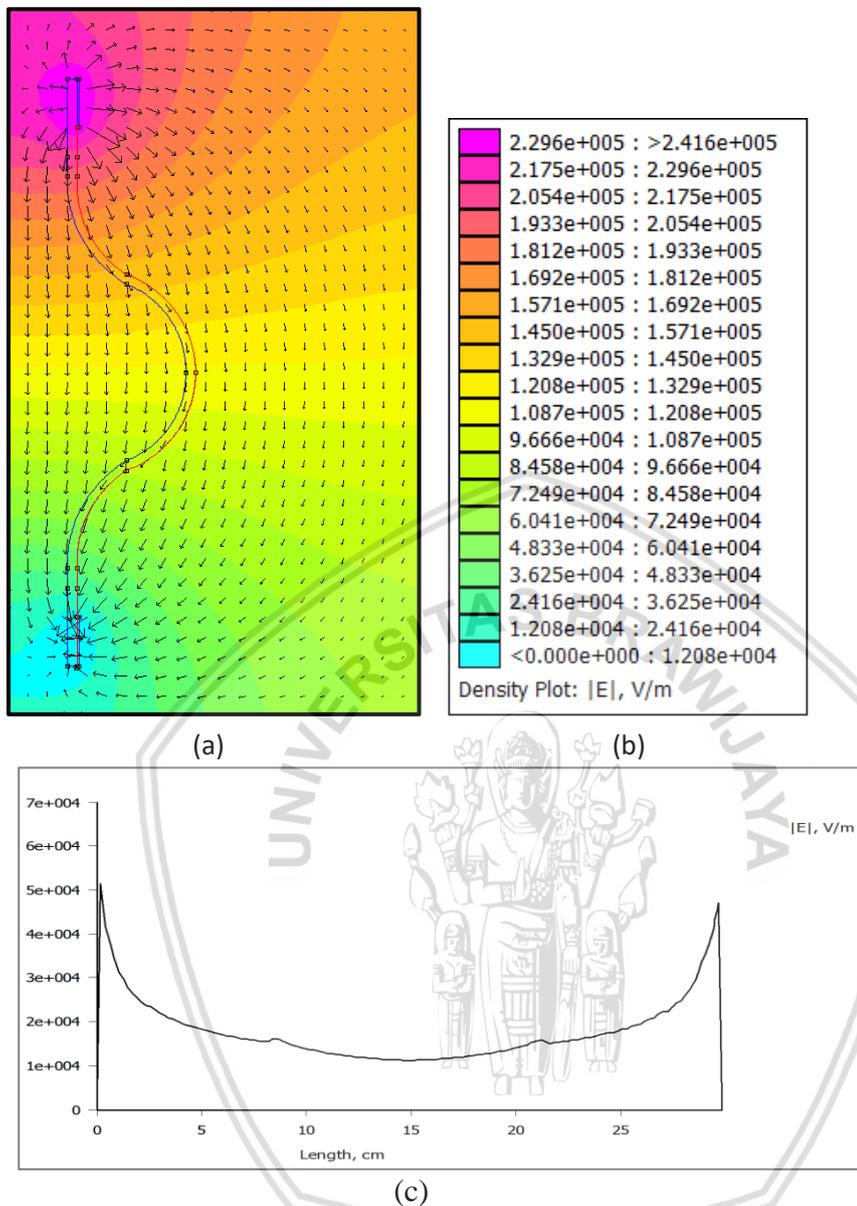
### 4.3.3 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Isolator *Silicone Rubber* Tipe C



Gambar 4.8 Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe C (c)

Pada Gambar 4.8 (a) ditampilkan distribusi medan listrik isolator Tipe C, dimana warna merah dibagian atas merupakan sisi tegangan tinggi yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang tinggi dan warna biru dibagian bawah merupakan sisi pentanahan yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang rendah. Nilai kuat medan listrik di sepanjang permukaan isolator *silicone rubber* ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.8 (b), dengan kuat medan listrik maksimum sebesar 2,203 kV/cm yang dapat kita lihat pada Gambar 4.8 (c).

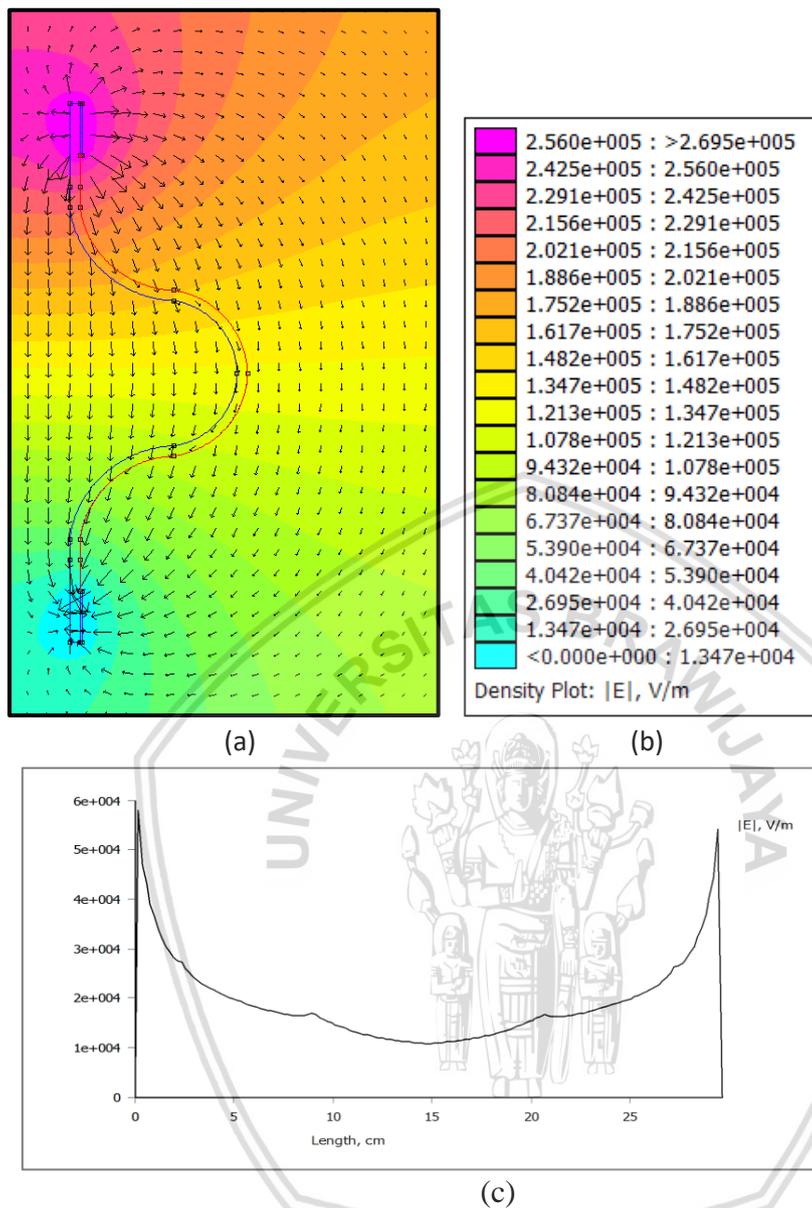
#### 4.3.4 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Isolator *Silicone Rubber* Tipe D



Gambar 4.9 Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe D (c)

Pada Gambar 4.9 (a) ditampilkan distribusi medan listrik isolator Tipe D, dimana warna merah dibagian atas merupakan sisi tegangan tinggi yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang tinggi dan warna biru dibagian bawah merupakan sisi pentanahan yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang rendah. Nilai kuat medan listrik di sepanjang permukaan isolator *silicone rubber* ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.9 (b), dengan kuat medan listrik maksimum sebesar 2,296 kV/cm yang dapat kita lihat pada Gambar 4.9 (c).

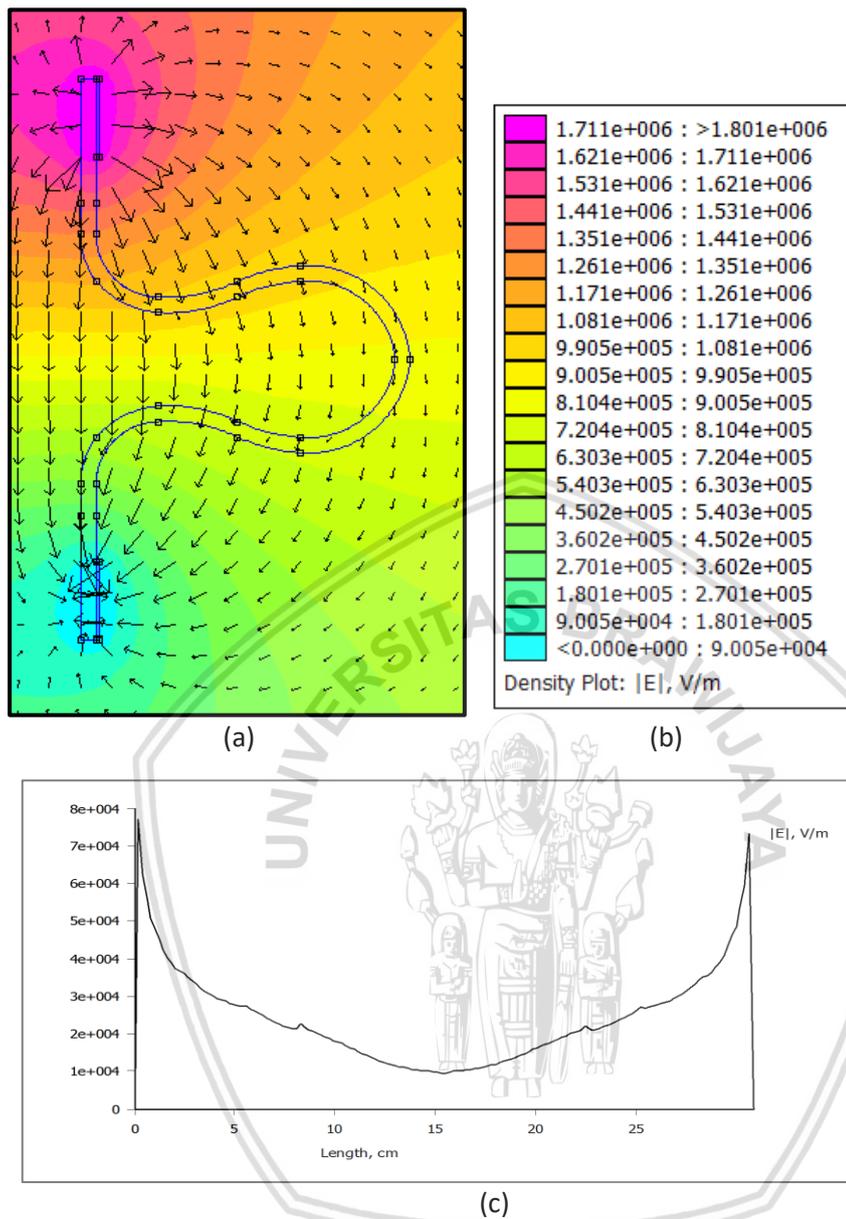
#### 4.3.5 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Isolator *Silicone Rubber* Tipe E



Gambar 4.10 Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe E (c)

Pada Gambar 4.10 (a) ditampilkan distribusi medan listrik isolator Tipe E, dimana warna merah dibagian atas merupakan sisi tegangan tinggi yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang tinggi dan warna biru dibagian bawah merupakan sisi pentanahan yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang rendah. Nilai kuat medan listrik di sepanjang permukaan isolator *silicone rubber* ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.10 (b), dengan kuat medan listrik maksimum sebesar 2,560 kV/cm yang dapat kita lihat pada Gambar 4.10 (c).

#### 4.3.6 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Isolator *Silicone Rubber* Tipe F



Gambar 4.11 Distribusi medan listrik (a), nilai medan maksimum (b), dan grafik kuat medan listrik isolator Tipe F (c)

Pada Gambar 4.11 (a) ditampilkan distribusi medan listrik isolator Tipe F, dimana warna merah dibagian atas merupakan sisi tegangan tinggi yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang tinggi dan warna biru dibagian bawah merupakan sisi pentanahan yang menunjukkan bahwa distribusi medan listrik yang rendah. Nilai kuat medan listrik di sepanjang permukaan isolator *silicone rubber* ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.11 (b), dengan kuat medan listrik maksimum sebesar 17,11 kV/cm yang dapat kita lihat pada Gambar 4.11 (c).

#### 4.3.7 Analisis Distribusi Medan Listrik Pada Isolator *Silicone Rubber*

Dari simulasi distribusi medan listrik, diperoleh bahwa nilai kuat medan listrik maksimum terendah dimiliki oleh isolator Tipe A, yaitu sebesar 1,901 kV/cm sedangkan nilai kuat medan maksimum tertinggi dimiliki oleh isolator Tipe F, yaitu sebesar 17,11 kV/cm. Dapat disimpulkan bahwa pada tegangan dan jarak rambat ( $s_r$ ) yang sama, semakin besar jarak vertikal ( $s_v$ ) maka semakin kecil kuat medan maksimumnya dan semakin kecil jarak horizontal ( $s_h$ ) maka semakin kecil pula kuat medan maksimumnya. Jarak vertikal ( $s_v$ ) ini menunjukkan ketebalan isolator, semakin besar jarak vertikal ( $s_v$ ) maka semakin tebal isolator. Sehingga semakin tebal isolator maka semakin kuat isolator untuk menahan tekanan listrik yang diberikan.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis pada pembahasan sebelumnya, maka pada penelitian ini dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Pada pengujian variasi lebar lengkungan sirip, dengan jarak rambat ( $s_r$ ) yang sama, diperoleh hasil bahwa semakin besar nilai variasi lengkungan pada permukaan isolator *silicone rubber* maka semakin besar pula tingkat arus bocor, semakin besar nilai jarak vertikal ( $s_v$ ) maka semakin kecil tingkat arus bocor. Semakin besar nilai jarak horizontal maka semakin besar pula tingkat arus bocor. Semakin besar nilai perbandingan antara nilai jarak vertikal ( $s_v$ ) dengan jarak horizontal ( $s_h$ ) maka semakin kecil tingkat arus bocor.
2. Pada pengujian variasi tegangan uji maka semakin besar nilai variasi tegangan uji yang diberikan maka semakin besar pula tingkat arus bocor.
3. Distribusi medan listrik pada isolator *silicone rubber* tidak merata. Dari hasil simulasi , untuk variasi lengkungan sirip tipe A memiliki kuat medan maksimum terendah, dan untuk variasi lengkungan sirip tipe F memiliki kuat medan maksimum tertinggi. Dan pada nilai variasi tegangan uji dan jarak rambat ( $s_r$ ) yang sama, semakin besar jarak vertikal ( $s_v$ ) maka semakin kecil kuat medan maksimumnya dan semakin kecil jarak horizontal ( $s_h$ ) maka semakin kecil pula kuat medan maksimumnya.

## 5.2 Saran

Setelah penelitian ini dilakukan, ada beberapa hal yang perlu disempurnakan dalam penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Pada penelitian berikutnya, dapat dilakukan penelitian isolator berkontur dengan lengkungan yang terkontaminasi pada permukaan isolator *silicone rubber* terhadap tingkat arus bocor dan tegangan *flashover*.
2. Pada penelitian selanjutnya, faktor tekanan udara dan temperatur ikut serta diperhitungkan agar data yang didapatkan menjadi lebih akurat.
3. Pada penelitian berikutnya, dapat dilakukan penelitian dengan metode yang sama namun dengan besar lebar lengkungan yang lebih besar dan beragam polanya.



## DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, Artono. 2001. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta : Penerbit Pradnya Paramita.
- Anton & T. Angrain. 2004. Karakteristik Permukaan Bahan Isolator Karet Silikon Terhadap Kemampuan Menolak Air. *Skripsi*. Tidak Dipublikasikan. Padang: Penerbit Universitas Negeri Padang.
- Aslimeri, dkk. 2008. *Teknik Transmisi Tenaga Listrik Jilid 2*. Jakarta : Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah Departemen Pendidikan Nasional.
- Berahim, Hamzah dan Prabowo, Harry.2007."Kajian Kinerja Isolasi Karet Silikon Sebagai bahan Isolator Tegangan Tinggi di daerah Tropis".,Proceedings NTK,Universitas Hasanudin Makassar
- Dachlan, Harry Soekotjo, dkk. 2008. *Pengaruh Sudut Keruncingan Dan Diameter Finial Franklin Terhadap Distribusi Medan Listrik Dan Tingkat Tegangan Tembus*. Jurnal EECCIS Vol. II, No. 1.
- Hackam, R. 1999. Outdoor HV Composite Polymeric Insulator, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 6(V):557-585.
- Kind, D. 1985. *High voltage Insulation Technology*. Jerman: Y. Narayana Rao.
- Kind, D. 1993. *Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Terjemahan K.T. Sirait. Bandung: Intitut Teknologi Bandung.
- Krzma, A. S., Albano, M. & Haddad, A. (2015) . *Comparative Performance of 11kV Silicone Rubber Insulators using Artificial Pollution Tests. IEEE International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. :1-6.
- Naidu, M. S. dan V. Kamaraju, 1995, *High Voltage Engineering 2nd Edition*.
- Raina, dkk. 1985. *Transmission and Distribution of Electriccal Power*, New Delhi: Graw Hill Publishing Company Limited.
- Suswanto, D. 2009. *Sistem Distribusi Tegangan Listrik*. Padang : Penerbit Universitas Negeri Padang.
- Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. 2005. *Characteristic properties of Silicone Rubber*

*Compounds*, Japan.

Tobing L, Bonggas. 2012. *Dasar-Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Jakarta : Penerbit Erlangga.

Tobing L, Bonggas. 2012. *Peralatan Tegangan Tinggi* . Jakarta : Penerbit Erlangga.

Young, Hugh D., dkk. 2013. *Fisika Universitas*, edisi 10, jilid 2. Jakarta: Erlangga.

