



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS KEMAMPUAN PENGHANTARAN LISTRIK PADA  
MATERIAL ISOLASI POLIMER**

**SKRIPSI**

**M. FAKHRI OKTORANDI  
0906602780**

**DEPARTEMEN ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
DEPOK  
JANUARI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS KEMAMPUAN PENGHANTARAN LISTRIK PADA  
MATERIAL ISOLASI POLIMER**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**M. FAKHRI OKTORANDI  
0906602780**

**DEPARTEMEN ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
DEPOK  
JANUARI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar

Nama : M. Fakhri Oktorandi  
NPM : 0906602780  
Tanda Tangan



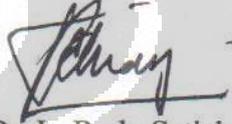
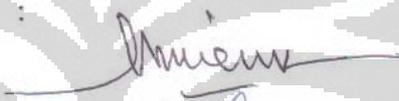
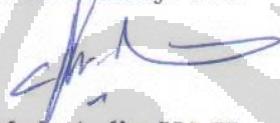
Tanggal : 19 Januari 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : M. Fakhri Oktorandi  
NPM : 0906602780  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Analisa Kemampuan Penghantaran Listrik Pada  
Material Isolasi Polimer

**Telah berhasil dipertahankan di depan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing :   
Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA.  
Penguji 1 :   
Ir. Amien Rahardjo MT.  
Penguji 2 :   
Ir. I Made Ardita Y MT.

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 19 Januari 2012

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmatNya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penyusunan skripsi dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, baik dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy DEA selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam skripsi ini. Semua staf pengajar dan para staf administrasi Program Ekstensi FT, Universitas Indonesia,
2. Orang tua, Shinta dan keluarga yang selalu mendorong dan memberikan bantuan dukungan materiil maupun moril,
3. Semua sahabat, teman-teman (tidak dapat disebut satu-persatu) yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 19 Januari 2012

Penulis

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS  
(Hasil Karya Perorangan)**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. Fakhri Oktorandi

NPM : 0906602780

Program Studi : Teknik Elektro

Departemen : Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif (No-Exclusive Royalty Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Analisis Kemampuan Penghantaran Listrik Pada Material Isolasi Polimer** beserta perangkat yang ada (bila diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (*database*), mendistribusikannya, dan menampilkan / memublikasikannya di Internet atau media lain untuk kepentingan akademis tanpa meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai Pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Di buat di: Depok

Pada tanggal: 19 Januari 2012

Yang menyatakan:



(M. Fakhri Oktorandi)

## ABSTRAK

Nama : M. Fakhri Oktorandi  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Analisis Kemampuan Penghantaran Listrik Pada Material Isolasi Polimer

Material / bahan isolasi yang digunakan pada suatu produk atau peralatan elektronik harus dipastikan tidak boleh terjadi kegagalan isolasi / kegagalan dielektrik karena itu dapat menimbulkan bahaya kepada si pengguna seperti tersengat listrik atau kebakaran. Oleh karena itu, untuk mencegah terjadinya kegagalan isolasi / kegagalan dielektrik maka penggunaan bahan / material isolasi pada suatu produk atau peralatan elektronik harus memenuhi salah satu klausul pada standar IEC 60335 tentang keselamatan pemanfaat listrik rumah tangga dan sejenis, klausul 29.2 yang berbunyi : “Jarak rambat antar elektroda tidak boleh kurang dari persyaratan yang ditentukan berdasarkan tegangan kerja, dengan memperhitungkan *material group* dan derajat polusi”. Untuk memastikan material isolasi yang digunakan tidak terjadi kegagalan isolasi maka harus dilakukan suatu pengujian yang dinamakan uji pembentukan jalur konduktif (*tracking*). Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa material isolasi elektrik yang digunakan tahan terhadap aliran lompatan listrik yang dapat mengurangi tingkat keselamatan sesuai dengan standar. Disamping itu, perlu juga dilakukan pengujian kekuatan dielektrik untuk mengetahui tegangan tembus dari material isolasi yang akan diteliti. Selain itu, pengujian ini bertujuan juga untuk membandingkan dan menganalisa bahan material isolasi mana yang paling bagus digunakan pada suatu material group yang sama. Peralatan uji yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *tracking test apparatus* dan *withstanding and insulation tester*. Adapun bahan / material isolasi yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah material isolasi dari bahan polimer yang jenisnya antara lain ABS (*Acrylonitrile butadiene styrene*), PVC (*Polyvinyl chloride*), PP (*Polypropylene*), PS (*Polystyrene*), PBT (*Polybutylene terephthalate*).

**Kata Kunci:** material isolasi, IEC 60335, uji *tracking*, uji kekuatan dielektrik

## ABSTRACT

Name : M. Fakhri Oktorandi  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Conductive Capability Analysis of Polymer Material Insulation

Insulation material which is used in a product or electronic equipment should be ensured that dielectric failure should not happen because it can cause harm to the user like an electric shock or fire. Therefore, to prevent the failure of the dielectric, insulating material on the use of a product or electronic appliances must meet one of the clauses in the IEC 60335 safety standard regarding utilization of household and similar electrical, clause 29.2 which reads: "creepage distance should not be less than working voltage, taking into account the group of materials and pollution degree ". To ensure the insulation material that used does not happen insulation failure then do a test which called a tracking test. The purpose of this test is to ensure that the electrically insulating material used is resistant to the flow of electricity leaps that can reduce the level of safety standards. In addition, the dielectric strength should also be tested to determine breakdown voltage of the insulating material which is studied. Besides that, both test also aims to compare and analyze insulating materials which are best used on a group of the same material. Test equipment which is used in this study is tracking test apparatus and withstanding insulation tester. Insulation material which is used in this research is the isolation material of the type of polymer material such as ABS (Acrylonitrile butadiene styrene), PVC (Polyvinyl chloride), PP (Polypropylene), PS (Polystyrene), and PBT (Polybutylene terephthalate).

**Key words:** insulation material, IEC 60335, tracking test, dielectric strength test

## DAFTAR ISI

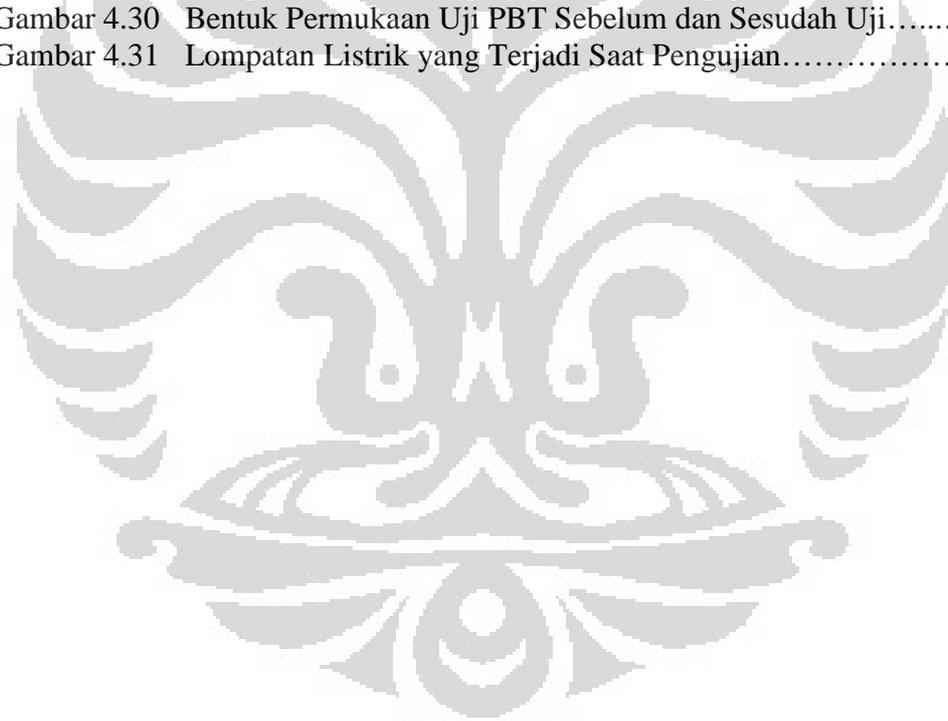
	<b>Hal</b>
Halaman Judul.....	ii
Halaman Pernyataan Orisinalitas.....	iii
Halaman Pengesahan.....	iv
Ucapan Terima Kasih.....	v
Lembar Pernyataan Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah Untuk Kepentingan Akademis.....	vi
Abstrak.....	vii
Abstract.....	viii
Daftar Isi.....	ix
Daftar Gambar.....	xi
Daftar Tabel.....	xiii
Daftar Grafik.....	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Pembatasan Masalah.....	2
1.4 Peralatan dan Bahan Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
1.6 Metode Penelitian.....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Isolator.....	5
2.2 Polimer.....	8
2.2.1 <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)</i> .....	11
2.2.2 Polipropilena (PP).....	13
2.2.3 Polistirena (PS).....	14
2.2.4 Polivinil Klorida (PVC).....	16
2.2.5 <i>Polybutylene Terephthalate (PBT)</i> .....	17
2.3 Standar IEC ( <i>International Electrotechnical Commission</i> ).....	18
2.4 Uji Pembentukan Jalur Konduktif ( <i>Tracking</i> ).....	20
2.5 Tegangan Tembus ( <i>Breakdown Voltage</i> ) Material Isolasi.....	22
2.5.1 Kekuatan Dielektrik.....	23
2.5.2 Dielektrik Padat dan Proses Kegagalannya.....	25
2.5.2.1 Kegagalan Asasi (Intrinsik).....	26
2.5.2.2 Kegagalan Elektromekanik.....	26
2.5.2.3 Kegagalan Streamer.....	27
2.5.2.4 Kegagalan Termal.....	27
2.5.2.5 Kegagalan Erosi.....	28
<b>BAB 3 METODE PENGAMBILAN DATA</b>	
3.1 Pengujian Pembentukan Jalur Konduktif ( <i>Tracking</i> ) Material Isolasi.....	29

3.1.1	Standar Pengujian Pembentukan Jalur Konduktif ( <i>Tracking</i> ).....	29
3.1.2	Prinsip Pengujian Pembentukan Jalur Konduktif ( <i>Tracking</i> ).....	30
3.1.3	Spesimen Uji.....	31
3.1.4	Kondisi Spesimen Uji.....	32
3.1.5	Alat Uji.....	32
	3.1.5.1 Elektroda.....	32
	3.1.5.2 Rangkaian Uji.....	34
	3.1.5.3 Larutan Uji.....	35
	3.1.5.4 Perangkat Penetes.....	36
	3.1.5.5 Platform Pendukung Spesimen Uji.....	36
3.1.6	Prosedur Dasar Pengujian.....	36
	3.1.6.1 Secara Umum.....	36
	3.1.6.2 Persiapan.....	37
	3.1.6.3 Prosedur Pengujian.....	37
3.1.7	Penentuan <i>Proof Tracking Index</i> (PTI).....	38
3.1.8	Penentuan <i>Comparative Tracking Index</i> (CTI).....	38
3.2	Pengujian Kekuatan Dielektrik.....	39
3.2.1	Standar Pengujian Kekuatan Dielektrik.....	39
3.2.2	Prinsip Pengujian Kekuatan Dielektrik.....	41
3.2.3	Spesimen Uji.....	41
3.2.4	Alat Uji.....	41
	3.2.4.1 <i>Withstand and Insulation Tester</i> .....	41
	3.2.4.2 Penjepit Material Isolasi.....	43
3.2.5	Prosedur Pengujian Kekuatan Dielektrik.....	43
 <b>BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA</b>		
4.1	Hasil Pengujian dan Analisis <i>Tracking</i> .....	45
	4.1.1 Hasil Pengujian <i>Tracking</i> ABS.....	45
	4.1.2 Hasil Pengujian <i>Tracking</i> PP.....	47
	4.1.3 Hasil Pengujian <i>Tracking</i> PS.....	49
	4.1.4 Hasil Pengujian <i>Tracking</i> PVC.....	51
	4.1.5 Hasil Pengujian <i>Tracking</i> PBT.....	53
	4.1.6 Analisis Hasil Pengujian <i>Tracking</i> .....	56
4.2	Hasil Pengujian dan Analisis Kekuatan Dielektrik.....	61
	4.2.1 Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik ABS.....	61
	4.2.2 Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik PP.....	63
	4.2.3 Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik PS.....	64
	4.2.4 Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik PVC.....	66
	4.2.5 Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik PBT.....	68
	4.2.6 Analisis Hasil Uji Kekuatan Dielektrik.....	71
 <b>BAB 5 KESIMPULAN.....</b>		
<b>75</b>		
 <b>DAFTAR REFERENSI.....</b>		
<b>76</b>		

## DAFTAR GAMBAR

		Hal
Gambar 2.1	Pita Energi Dari Konduktor, Isolator, dan Semikonduktor.....	5
Gambar 2.2	Polimerisasi Tambahan.....	9
Gambar 2.3	Kopolimerisasi.....	9
Gambar 2.4	Monomer Pada Polimer ABS.....	12
Gambar 2.5	Simbol Ikatan Kimia PP.....	13
Gambar 2.6	Ikatan Kimia Polistirena.....	15
Gambar 2.7	Ikatan Kimia Polivinil Klorida.....	17
Gambar 2.8	Ikatan Kimia <i>Polybutylene Terephthalate</i> (PBT).....	18
Gambar 2.9	Proses terjadinya <i>tracking</i> .....	21
Gambar 2.10	Tekanan Elektrik Dalam Dielektrik.....	24
Gambar 2.11	Variasi Tegangan Tembus dan Mekanisme Kegagalan dengan Waktu Penerapan Tegangan.....	26
Gambar 2.12	Tekanan Mekanis yang Terjadi Akibat Gaya Tarik Menarik F Antar Kedua Elektroda.....	27
Gambar 2.13	Lubang – Lubang atau Rongga – Rongga dalam Bahan Isolasi.....	28
Gambar 3.1	Penampang Elektroda.....	32
Gambar 3.2	Pengaturan Penempatan Elektroda / Spesimen Uji.....	33
Gambar 3.3	Penempatan Elektroda Pada Spesimen Uji dengan Gaya yang Diterapkan.....	34
Gambar 3.4	Rangkaian Uji.....	35
Gambar 3.5	<i>Withstanding and Insulation Tester</i> .....	42
Gambar 3.6	Bagian Alat Uji yang Digunakan Saat Uji Tegangan Tembus.....	42
Gambar 3.7	Penjepit Material Isolasi.....	43
Gambar 3.8	Konfigurasi Pengujian Kekuatan Dielektrik.....	44
Gambar 4.1	Bentuk Permukaan Uji Material ABS Sebelum dan Sesudah Uji <i>Tracking</i> .....	46
Gambar 4.2	Terjadi <i>Flashover</i> Pada Permukaan Uji.....	46
Gambar 4.3	Permukaan Uji Terbakar.....	46
Gambar 4.4	Arus Saat Terjadi <i>Tracking</i> .....	46
Gambar 4.5	Jumlah Tetesan Saat Terjadi <i>Tracking</i> .....	46
Gambar 4.6	Bentuk Permukaan Uji Material PP Sebelum dan Sesudah Uji <i>Tracking</i> .....	48
Gambar 4.7	Terjadi <i>Flashover</i> Pada Permukaan Uji.....	48
Gambar 4.8	Bentuk Permukaan Uji Material PS Sebelum dan Sesudah Uji <i>Tracking</i> .....	50
Gambar 4.9	Terjadi <i>Flashover</i> Pada Permukaan Uji.....	50
Gambar 4.10	Bentuk Permukaan Uji Material PVC Sebelum dan Sesudah Uji <i>Tracking</i> .....	52
Gambar 4.11	Terjadi <i>Flashover</i> Pada Permukaan Uji.....	52
Gambar 4.12	Permukaan Uji Terbakar.....	52
Gambar 4.13	Arus Saat Terjadi <i>Tracking</i> .....	52
Gambar 4.14	Jumlah Tetesan Saat Terjadi <i>Tracking</i> .....	52

Gambar 4.15	Bentuk Permukaan Uji Material PBT Sebelum dan Sesudah Uji <i>Tracking</i> .....	54
Gambar 4.16	Terjadi <i>Flashover</i> Pada Permukaan Uji.....	54
Gambar 4.17	Permukaan Uji Terbakar.....	54
Gambar 4.18	Arus Saat Terjadi <i>Tracking</i> .....	54
Gambar 4.19	Jumlah Tetesan Saat Terjadi <i>Tracking</i> .....	54
Gambar 4.20	Bentuk Permukaan yang Memiliki Pori – Pori Permukaan Relatif Kecil.....	59
Gambar 4.21	Bentuk Permukaan yang Memiliki Pori – Pori Permukaan Lebih Besar.....	60
Gambar 4.22	Bentuk Permukaan Uji ABS Sebelum dan Sesudah Uji.....	62
Gambar 4.23	Lompatan Listrik yang Terjadi Saat Pengujian.....	62
Gambar 4.24	Bentuk Permukaan Uji PP Sebelum dan Sesudah Uji.....	64
Gambar 4.25	Lompatan Listrik yang Terjadi Saat Pengujian.....	64
Gambar 4.26	Bentuk Permukaan Uji PS Sebelum dan Sesudah Uji.....	66
Gambar 4.27	Lompatan Listrik yang Terjadi Saat Pengujian.....	66
Gambar 4.28	Bentuk Permukaan Uji PVC Sebelum dan Sesudah Uji.....	68
Gambar 4.29	Lompatan Listrik yang Terjadi Saat Pengujian.....	68
Gambar 4.30	Bentuk Permukaan Uji PBT Sebelum dan Sesudah Uji.....	70
Gambar 4.31	Lompatan Listrik yang Terjadi Saat Pengujian.....	70

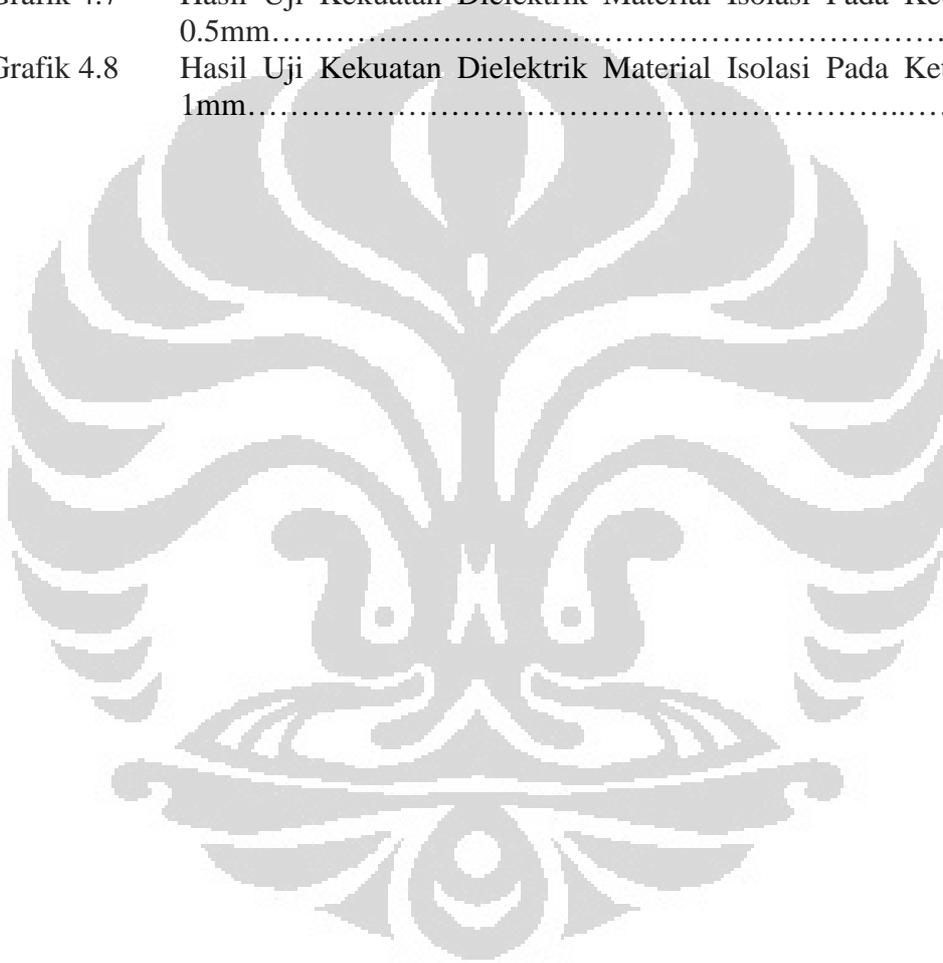


## DAFTAR TABEL

		<b>Hal</b>
Tabel 3.1	Besarnya Tegangan untuk Uji Kekuatan Dielektrik (Tegangan Tembus).....	40
Tabel 4.1	Data Hasil Pengujian <i>Tracking</i> Material ABS.....	45
Tabel 4.2	Data Hasil Pengujian <i>Tracking</i> Material PP.....	47
Tabel 4.3	Data Hasil Pengujian <i>Tracking</i> Material PS.....	49
Tabel 4.4	Data Hasil Pengujian <i>Tracking</i> Material PVC.....	51
Tabel 4.5	Data Hasil Pengujian <i>Tracking</i> Material PBT.....	53
Tabel 4.6	Data Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik Material ABS.....	61
Tabel 4.7	Data Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik Material PP.....	63
Tabel 4.8	Data Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik Material PS.....	65
Tabel 4.9	Data Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik Material PVC.....	67
Tabel 4.10	Data Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik Material PBT.....	69
Tabel 4.11	Hasil Uji Kekuatan Dielektrik Material Isolasi Pada Ketebalan 0.5mm.....	71
Tabel 4.12	Hasil Uji Kekuatan Dielektrik Material Isolasi Pada Ketebalan 1mm.....	71

## DAFTAR GRAFIK

	<b>Hal</b>
Grafik 4.1 Hasil Uji <i>Tracking</i> Material Isolasi.....	56
Grafik 4.2 Hasil Uji Kekuatan Dielektrik Material Isolasi ABS.....	61
Grafik 4.3 Hasil Uji Kekuatan Dielektrik Material Isolasi PP.....	63
Grafik 4.4 Hasil Uji Kekuatan Dielektrik Material Isolasi PS.....	65
Grafik 4.5 Hasil Uji Kekuatan Dielektrik Material Isolasi PVC.....	67
Grafik 4.6 Hasil Uji Kekuatan Dielektrik Material Isolasi PBT.....	69
Grafik 4.7 Hasil Uji Kekuatan Dielektrik Material Isolasi Pada Ketebalan 0.5mm.....	72
Grafik 4.8 Hasil Uji Kekuatan Dielektrik Material Isolasi Pada Ketebalan 1mm.....	72



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Isolator merupakan salah satu jenis material listrik yang mempunyai hambatan elektrik atau panas yang sangat tinggi sehingga dapat dipakai untuk menyekat listrik atau panas dari benda lain. Semua peralatan elektronik yang kita pakai pasti menggunakan suatu bahan / material isolasi ini untuk mengisolasi atau melindungi bagian – bagian bertegangan agar tidak menimbulkan bahaya pada saat digunakan. Adapun bahan / material isolasi yang digunakan biasanya merupakan dari bahan polimer yang jenisnya antara lain ABS (*Acrylonitrile butadiene styrene*), PVC (*Polyvinyl chloride*), PP (*Polypropylene*), PS (*Polystyrene*), dan PBT (*Polybutylene terephthalate*).

Material / bahan isolasi yang digunakan pada suatu produk atau peralatan elektronik harus dipastikan tidak boleh terjadi kegagalan isolasi / kegagalan dielektrik karena itu dapat menimbulkan bahaya kepada si pengguna seperti tersengat listrik atau kebakaran. Oleh karena itu, untuk mencegah terjadinya kegagalan isolasi / kegagalan dielektrik maka penggunaan bahan / material isolasi pada suatu produk atau peralatan elektronik harus dipastikan tahan terhadap aliran lompatan listrik yang disebabkan karena pengaruh jarak rambat dan memenuhi salah satu klausul standar IEC 60335 tentang keselamatan pemanfaat listrik rumah tangga dan sejenis yaitu klausul 29.2 yang berbunyi : “Jarak rambat antar elektroda tidak boleh kurang dari persyaratan yang ditentukan berdasarkan tegangan kerja, dengan memperhitungkan *material group* dan derajat polusi”. Jarak rambat yang dimaksud adalah jarak antara dua bagian yang bertegangan atau jarak antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang mudah tersentuh oleh si pengguna. Selain itu, untuk memastikan penggunaan material isolasi tersebut aman maka tegangan tembus, resistansi, dan ketahanan terhadap api dari bahan material isolasi yang digunakan tersebut harus diketahui.

Untuk memastikan material isolasi yang digunakan tidak terjadi kegagalan isolasi yang disebabkan karena adanya aliran lompatan listrik yang dapat

mengurangi tingkat keselamatan sesuai dengan standar, maka harus dilakukan suatu pengujian yang dinamakan uji pembentukan jalur konduktif (*tracking*). *Tracking* adalah pembentukan jalur konduktif progresif, yang dihasilkan pada permukaan material isolasi padat, karena efek gabungan dari tegangan listrik dan kontaminasi elektrolitik. Adapun standar dari pengujian *tracking* ini adalah IEC 60112. Selain itu, perlu juga dilakukan pengujian kekuatan dielektrik untuk mengetahui tegangan tembus dari material isolasi yang akan diteliti.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Analisa kemampuan penghantaran listrik pada material isolasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa bahan isolasi elektrik / listrik yang digunakan pada suatu peralatan elektronik tahan terhadap aliran lompatan listrik yang disebabkan adanya beda potensial diantara dua bagian yang bertegangan dan dapat mengurangi tingkat keselamatan sesuai dengan standar IEC. Selain itu, pengujian ini bertujuan juga untuk membandingkan dan menganalisa bahan material isolasi mana yang paling bagus digunakan pada suatu material group yang sama dilihat dari ketahanan dielektrik dan ketahanan *tracking*-nya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pemikiran dalam memilih suatu bahan isolasi yang baik pada suatu bidang industri manufaktur, khususnya pada industri manufaktur peralatan – peralatan elektronik agar bahan isolasi yang digunakan tidak mengalami kegagalan isolasi yang dapat menyebabkan bahaya bagi para konsumen / pengguna peralatan elektronik.

## 1.3 Pembatasan Masalah

Analisa kemampuan penghantaran listrik pada material isolasi ini dibatasi pada pembahasan tentang material isolasi, polimer, uji pembentukan jalur konduktif (*tracking*), tegangan tembus, dan standar pengujian yang dipakai. Adapun bahan / material yang akan diteliti merupakan komponen – komponen isolasi yang terdapat pada peralatan elektronik rumah tangga seperti kulkas, AC, setrika, dan pompa air.

Penelitian mencakup permasalahan tentang :

- Kemampuan suatu material isolasi yang digunakan pada peralatan elektronik dalam mengisolasi bagian yang bertegangan.
- Membandingkan material / bahan isolasi dari jenis polimer mana yang paling baik digunakan untuk mengisolasi bagian yang bertegangan pada suatu *material group* yang sama dilihat dari ketahanan *tracking* dan ketahanan dielektriknya.

#### 1.4 Peralatan dan Bahan Penelitian

Peralatan dan bahan yang diperlukan untuk melaksanakan penelitian antara lain:

- *Tracking test apparatus* yang dilengkapi dengan *liquid container*, *platinum electrode*, voltmeter, amperemeter, *drop counter / setting*, *voltage* dan *current selector*.
- Larutan garam
- *Withstanding and insulation tester*

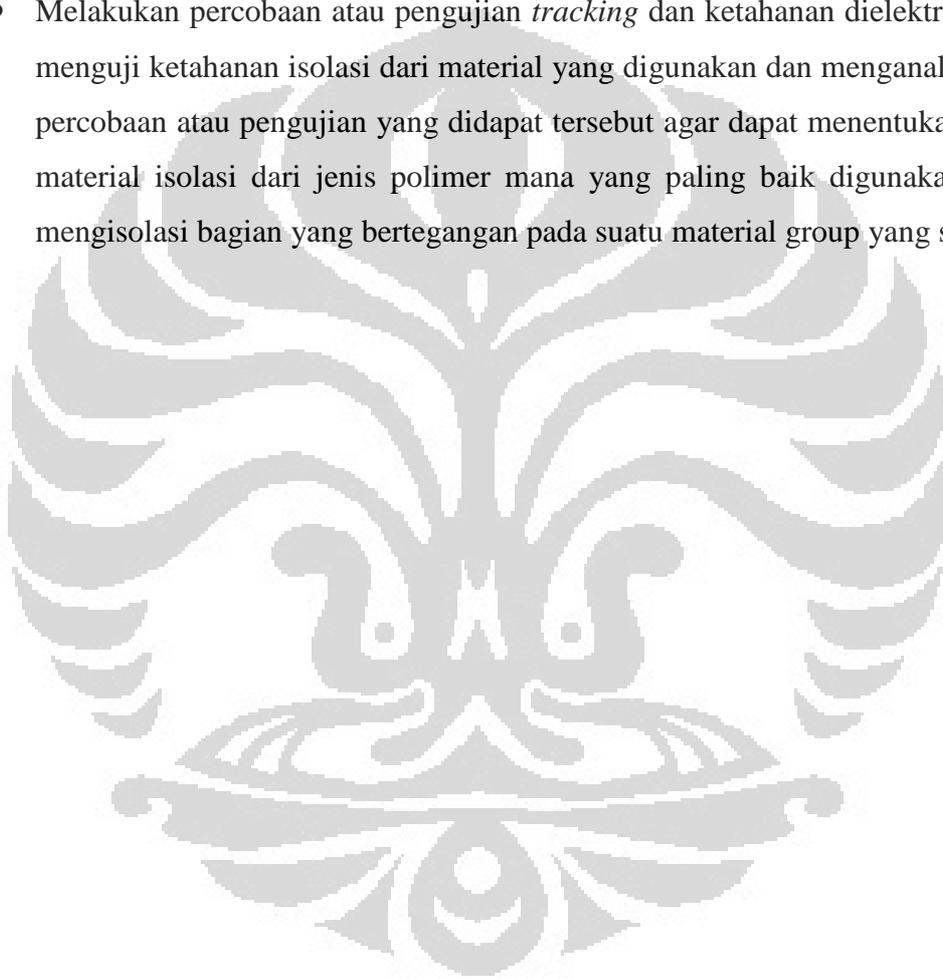
#### 1.5 Sistematika Penulisan

Pembahasan mengenai latar belakang masalah, tujuan, pembatasan masalah, peralatan dan bahan penelitian, sistematika penulisan dijelaskan dalam bab 1. Selanjutnya, pada bab 2 terdapat pembahasan tentang karakteristik material isolasi, polimer, jenis – jenis polimer, standar IEC, uji pembentukan jalur konduktif (*tracking*), dan tegangan tembus. Penjelasan mengenai standar pengujian, persiapan dan cara uji *tracking* dan kekuatan dielektrik terdapat pada bab 3. Hasil pengujian yang memaparkan ketahanan material isolasi yang diuji, analisa penyebab kegagalan isolasi pada material isolasi yang diuji, dan material isolasi dari jenis polimer mana yang paling baik terdapat bab 4. Bab 5 yang merupakan bab terakhir pada tulisan ini berisi kesimpulan dari penelitian ini.

## 1.6 Metode Penelitian

Metode penelitian dilakukan dengan beberapa cara untuk saling melengkapi dan saling mendukung, antara lain:

- Mempelajari literatur tentang material isolasi, polimer, uji *tracking*, dan tegangan tembus material isolasi, digunakan untuk memperoleh informasi mengenai materi – materi tersebut. Media yang digunakan adalah buku-buku material, standar IEC, jurnal serta sumber pustaka lainnya.
- Melakukan percobaan atau pengujian *tracking* dan ketahanan dielektrik untuk menguji ketahanan isolasi dari material yang digunakan dan menganalisa hasil percobaan atau pengujian yang didapat tersebut agar dapat menentukan bahan material isolasi dari jenis polimer mana yang paling baik digunakan untuk mengisolasi bagian yang bertegangan pada suatu material group yang sama.

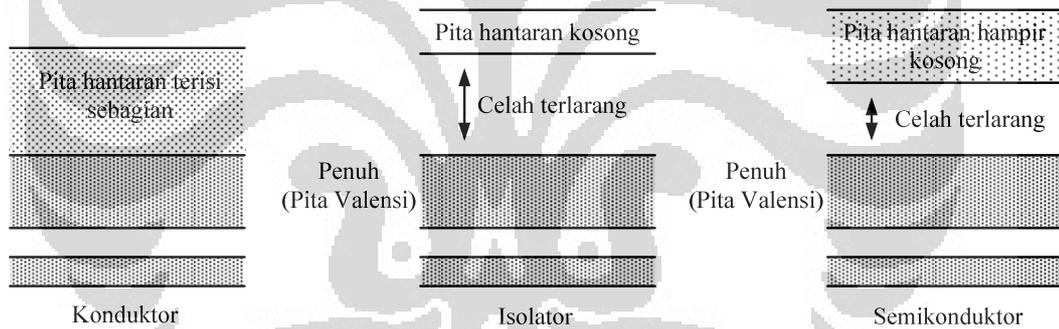


## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Isolator

Isolator merupakan salah satu jenis material listrik yang mempunyai hambatan elektrik atau panas yang sangat tinggi sehingga dapat dipakai untuk menyekat listrik atau panas dari benda lain. Material ini memiliki hambatan elektrik atau panas yang tinggi karena celah energi terlarang antara pita terisi paling atas (pita valensi) dengan pita kosong paling rendah (pita hantaran) demikian lebarnya, sehingga hanya sebagian kecil saja dari elektron – elektron yang terangsang oleh panas (pada temperatur kamar) yang dapat melompat dari pita valensi ke pita hantaran.



Gambar 2. 1 Pita energi dari konduktor, isolator, dan semikonduktor

Material isolasi terutama material isolasi padat memiliki sifat – sifat antara lain:

a. Sifat Mekanis, yang terdiri dari :

- Kekuatan tarik
- Pemuluran
- Kekuatan tekan
- Kerapuhan
- Kelenturan

b. Sifat Panas

Suhu sangat mempengaruhi sifat material isolasi, maka pada umumnya jika temperatur naik maka sifat isolasi menjadi tidak baik. Selain sifat isolasinya menurun, maka sifat mekaniknya juga terganggu sehingga dapat merusak struktur bahan / material, baik sementara maupun permanen (hangus terbakar). Jika terlalu lama berada pada suhu tinggi, mengakibatkan proses penuaan bahan dapat lebih cepat.

c. Sifat Kimia

Ketahanan kimia dari bahan sangat penting sebab beberapa bahan isolasi sangat peka terhadap pengaruh bahan – bahan kimia, misalnya gas, air, asam, basa, dan alkali. Pada tegangan tinggi dapat timbul ozon, beberapa bahan akan terpengaruh ketahanan isolasinya (karet tidak tahan terhadap ozon).

d. Hidroskopisiti

Kemampuan atau kapasitas suatu bahan untuk menarik uap air dari udara, makin sedikit kapasitas uap air yang dapat diserap maka akan semakin baik isolasi tersebut.

e. Penyerapan Air

Kemampuan atau kapasitas suatu bahan menyerap air bila bahan tersebut dimasukkan ke dalam air. Suatu bahan dikeringkan, ditimbang kemudian dicelupkan ke dalam air, setelah diangkat ditimbang lagi.

Bahan / material isolasi juga dapat disebut sebagai bahan dielektrik karena merupakan bahan yang tidak menghantarkan listrik dengan baik. Bahan dielektrik ini dapat menjadi rusak karena beberapa faktor, antara lain:

- Sifat / karakter medan listrik
- Adanya kesalahan / kerusakan dari bahan itu sendiri
- Pendinginan / pemanasan bahan dielektrik
- Proses penuaan / waktu penggunaan

Adapun jenis kerusakan yang dapat terjadi pada dielektrik padat adalah sebagai berikut: (Rudy Setiabudy, 2007, p.126)

a. Kerusakan Elektris Makroskopis (Pada Dielektrik Homogen)

Kerusakan elektrik makroskopis bahan dielektrik homogen berlangsungnya cepat sekali ( $10^{-7}$  s/d  $10^{-8}$  detik) biasa disebabkan oleh energi

panas. Getaran yang terjadi pada kisi – kisi kristal menyebabkan elektron – elektron pada atom mendapat tambahan energi. Tambahan energi ini atau energi luar tersebut dapat menyebabkan elektron – elektron lepas dari kisi – kisinya sehingga timbul kerusakan (terjadi ionisasi). Kerusakan seperti ini terjadi akibat kuat medan yang tinggi. Bahan dielektrik mempunyai kuat medan elektrik ( $E$ ) yang tinggi sekali.

b. Dielektrik yang Tidak Homogen

Ketidakhomogenan banyak disebabkan bahan dielektrik tercampur dengan unsur – unsur / bahan lainnya seperti gas, uap, air dan sebagainya. Terjadinya kerusakan dapat cepat sekali.  $E$  lebih rendah dari bahan yang homogen.

c. Kerusakan Dielektrik Akibat Elektro Kimia

Terjadi karena proses elektrolisis, sehingga menurunkan kekuatan dielektrik. Kerusakan ini terjadi pada suhu dan kelembaban yang tinggi juga. Kejadian ini merupakan proses penuaan, sehingga lama kelamaan bahan dielektrik akan menurun kemampuannya dan kemudian rusak. Biasanya proses ini disertai dengan timbulnya nitrogen oksida atau ozon yang dapat menimbulkan kerusakan pada bahan. Proses ini berjalan lambat, tidak sekaligus tetapi secara menahun.

d. Elektro Termal

Kerusakan atau retak – retak yang terdapat pada bahan dielektrik menyebabkan adanya arus bocor dan rugi dielektrik. Adanya arus bocor dan rugi dielektrik ini merupakan sumber panas dan menyebabkan temperatur naik. Selain itu kerusakan juga tergantung kepada frekuensi dan suhu ruang. Jika kuat medan naik karena tegangan dinaikkan maka temperatur juga akan naik. Oleh karena itu, dalam pelaksanaannya kita harus mengetahui dan menentukan batas termis yang tepat sehingga temperatur kritis dari bahan dielektrik untuk suatu kondisi tertentu tidak terlampaui, dalam hal ini suhu sekelilingnya juga berpengaruh. Hal lain yang mempengaruhi adalah kemampuan bahan dielektrik untuk melepas panas yang dihasilkan juga memegang peranan penting. Jika panas yang dilepas oleh permukaan adalah sama dengan panas yang ditimbulkan, maka temperatur akan konstan. Jika temperatur kritis dilampaui maka bahan akan rusak.

## 2.2 Polimer

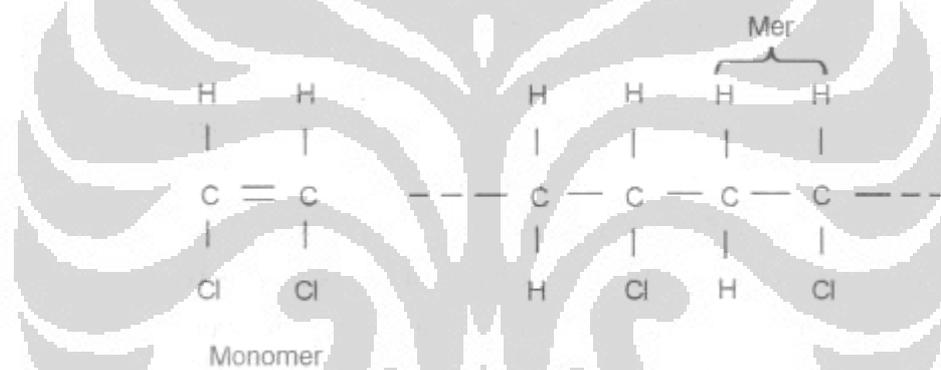
Polimer adalah sekelompok material yang dibentuk oleh rantai molekul yang dibuat dari satuan yang lebih kecil yang disebut *monomer*, yang mayoritas tergabung dengan disengaja. Kebanyakan polimer adalah material organik (kaki-karbon) yang terdiri dari molekul-molekul yang disusun dari variasi kombinasi hidrogen, oksigen, nitrogen, dan karbon. Empat elemen inilah yang biasanya paling banyak ditemukan dalam polimer organik. Karbon membentuk ikatan utama dari rantai polimer, dan unsur lainnya mengikat dirinya pada karbon tersebut. Rantai polimer ini terbelit dan membentuk gulungan tak beraturan, yang memberikan kekuatan tambahan.

Kebanyakan polimer berbasis hidrokarbon, dimana elemen-elemen karbon dan hidrogen membentuk kombinasi yang dapat diperkirakan berdasarkan hubungan  $C_nH_{2n+2}$ . Bahan petrokimia setengah jadi ini adalah bahan kimia yang dibuat dari *parafin* dalam minyak dan gas alami, yang diproses lebih lanjut menjadi produk polimer. Yang paling penting dari bahan setengah jadi ini adalah etilen. Semua ini disebut bahan setengah jadi *olefin* dan termasuk juga acetilen, propilen, butilen, isobutilen, dan butadiena.

Polimerisasi, atau penggabungan dari unit molekul yang besar dinamakan monomer, penggunaan valensi mengisi kulit terluar dari atom karbon (karbon memiliki elektron valensi 4) untuk bergabung dengan unit yang lebih kecil dan membentuk rantai molekul yang lebih besar. Agar polimerisasi terjadi maka 2 kondisi harus terpenuhi. Kondisi pertama ialah molekul harus mempunyai setidaknya 2 lokasi yang tidak memenuhi ikatan, dimana akan secara mudah bergabung dengan molekul lain. Syarat ini artinya harus memulai dengan molekul yang mempunyai ikatan ganda, seperti karbon karena molekul karbon memiliki ikatan ganda, setiap ikatan memiliki sepasang elektron bersama. Apabila salah satu ikatan antar karbon terbuka, ikatan tunggal akan muncul, meninggalkan kedua elektron lain untuk bergabung dengan atom lain. Apabila atom karbon lain melewati ikatan ganda yang telah terbuka, keduanya akan bergabung untuk membentuk rantai. Prosedur ini berlanjut, menghasilkan rantai polimer dan dinamakan polimerisasi. Prosesnya akan terus terjadi selama kondisi kedua bertemu. Kondisi kedua yang diperlukan untuk polimerisasi adalah bahwa setelah

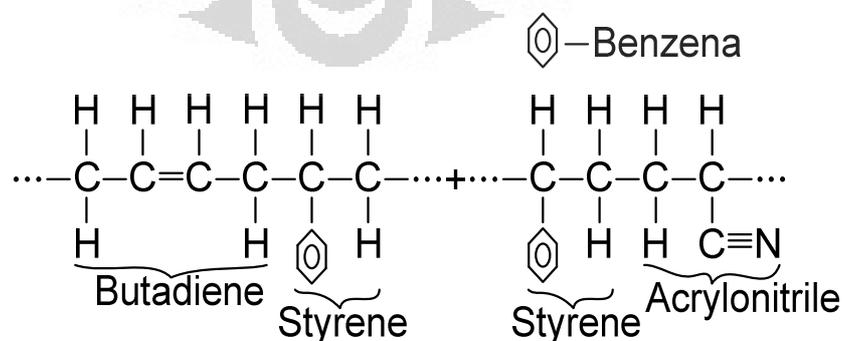
proses polimerisasi, setidaknya 2 lokasi yang terbuka harus tersedia. Rantai polimer banyak bentuknya. Bentuk rantainya membentuk urutan yang mengelilingi setiap satu dengan yang lainnya untuk kekuatan.

Polimerisasi mengambil tempat melewati penambahan polimerisasi, kopolimerisasi, atau kondensasi polimerisasi. Pada proses polimerisasi, unit molekul yang besar, monomer, ditambahkan ke monomer lain untuk membentuk rantai yang lebih besar, polimer ini (menunjukkan ke banyak bagian), dimana memiliki angka dari unit – unit yang diulang, mer. Mer merupakan unit terkecil pada suatu rantai yang bisa dikenali. Tingkatan dari polimerisasi adalah angka dari unit yang diulang yang memiliki struktur yang identik dalam rantai yang dibentuk oleh polimer. Penambahan polimerisasi hanya melibatkan 1 tipe mer. Gambar 2.2 memperlihatkan polimerisasi dengan penambahan.



Gambar 2.2 Polimerisasi tambahan

Pada kopolimerisasi, lebih dari 1 molekul membuat mer. *Acrylonitrile-butadiene-styrene* (ABS) adalah contoh dari kopolimer. Gambar 2.3 memperlihatkan proses kopolimerisasi untuk ABS polimer.



Gambar 2.3 Kopolimerisasi

Polimerisasi kondensasi melibatkan reaksi kimia dari 2 atau lebih untuk membentuk molekul yang baru. Reaksi kimia ini menghasilkan kondensasi atau nonplomerizable, biasanya air. Katalis sering dibutuhkan untuk memulai dan memelihara reaksi.

Polimer memiliki dua sifat yang digunakan untuk mengklasifikasikan bahan – bahan polimer tersebut yaitu sifat termoplastik dan termoset. Polimer yang termoplastik biasanya berupa plastik bersifat kenyal atau dapat diregangkan. Sifat ini dapat terbentuk dengan dipanaskan, didinginkan, dapat dilelehkan dan berubah bentuk menjadi bentuk yang berbeda tanpa mengubah sifat bahan dari polimer tersebut. Sifat dari bahan termoplastik ditentukan dari metode ikatan antara rantai polimer; ikatan dari bahan termoplastik sangat lemah, ikatan sekunder, seperti pada gaya van der Waals. Dengan pemberian panas dan tekanan, ikatan tersebut melemah, dan bahan dapat terbentuk seperti semula. Pada keadaan panas dan tekanan tertentu, bahan akan menjadi bentuk yang baru. Bahan polimer termoplastik yang umum adalah *acrylic*, nilon (poliamide), selulosa, polistiren, polietilen, fluorkarbon, dan vinil.

Polimer yang termoset memiliki ikatan primer yang kuat, dan biasanya terbentuk dengan kondensasi. Polimer yang termoset selain memiliki ikatan polimer yang tinggi, juga struktur penyusunnya berupa molekul yang besar. Sifat ini merupakan hasil perubahan kimiawi selama pemrosesan, berupa pemanasan ataupun adanya pemakaian katalis. Setelah terfiksasi menjadi bentuk yang keras, polimer termoset tidak dapat diregangkan dan berubah menjadi bentuk semula, karena sebagian molekul banyak yang terbuang selama proses pengembalian bentuk. Jika panasnya dinaikkan kembali, maka polimer termoset akan berubah menjadi arang, terbakar, dan terurai. Selama proses ini, bahan termoset akan menjadi kaku, dan tidak larut dalam cairan seperti rantai polimer yang berlilitan dan saling bersilangan. Contoh polimer yang termoset seperti fenol, asam amino, poliester, *epoxies*, asam alkil.

Karena gaya intramolekuler pada bahan polimer lebih lemah daripada gaya intermolekuler, deformasi (pembentukan kembali) bahan ini merupakan hasil perbedaan dan banyaknya molekul yang disebabkan pemecahan dari

ikatannya tersebut. Jika dipanaskan dan diberi tekanan, rantai polimer berubah dan saling bertumbukan. Dan ketika panas dan tekanan tersebut kita hentikan, maka akan terbentuk yang baru. (Rudy Setiabudy, 2007, p.183)

Secara umum, bahan polimer berupa bahan yang kuat, kaku, keras, dan dapat dilelehkan. Beberapa bahan dapat ditambahkan pada bahan polimer, untuk meningkatkan beberapa sifat, mengurangi biaya bahan polimer, kemampuan pembentukan dari bahan tersebut, dan atau mewarnai bahan tersebut. Bahan aditif ini dapat berupa bahan pengisi, bahan pelunak, bahan pewarna, dan pelumas.

Sifat bahan polimer juga tergantung dari bahan aditifnya, beberapa bahan ditambahkan untuk menambahkan kekuatan dari polimer; berbagai macam bahan pengisi digunakan; di antaranya bahan pewarna, dan bahan pelunak, yang dapat ditambahkan sebagai pelumas bagian dalam. Polimer termoplastik banyak digunakan pada kertas film, lembaran kertas, mistar, pipa, dan beberapa bentuk model cetakan dan bentuk yang terekstrusi. Polimer termoset tersedia dalam bentuk bubuk atau cairan. Bahan ini mengandung bahan polimer dasar, bahan pengisi (*filler*), bahan pewarna, bahan pelunak, bahan penguat (katalis), yang akan membuat saling berhubungan dan sebuah akselerator.

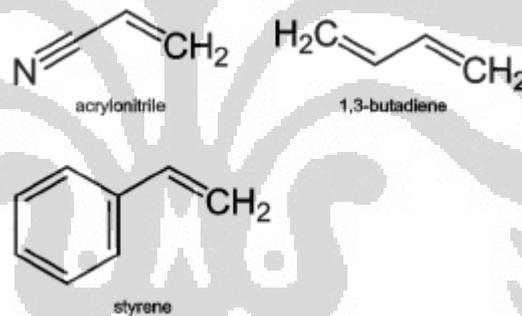
Secara umum juga, polimer berupa bahan yang ringan, isolasi listrik yang baik, isolasi panas yang bagus, dan memiliki ketahanan terhadap korosi. Menyediakan resistansi abrasi, dan memiliki resistansi terhadap serangan kimiawi. Bahan ini dapat dibuat melalui berbagai proses, dan akan menghasilkan produk yang menarik dan tersedia dalam berbagai warna. (Rudy Setiabudy, 2007)

### 2.2.1 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

*Acrylonitrile butadiene styrene* (ABS) (rumus kimia  $(C_8H_8)_x.(C_4H_6)_y(C_3H_3N)_z$ ) adalah termoplastik umum yang memiliki titik lebur kira-kira 105 °C (221°F) (*Acrylonitrile*, 2011). ABS merupakan kopolimer yang dibentuk oleh polimerisasi *styrena* dan *acrylonitrile* dalam *polibutadiene*. Proporsi dapat bervariasi antara 15-35% *acrylonitrile*, 5 sampai 30% *butadiene* dan 40 sampai 60% *styrene*. Hasilnya adalah rantai panjang *polibutadiene* yang disilang dengan rantai poly (*styrene-co- acrylonitrile*) yang lebih pendek. Kelompok nitril dari rantai yang berdekatan, menjadi polar, menarik satu sama lain dan mengikat rantai

bersama-sama, membuat ABS lebih kuat dari polistiren murni. *Styrene* ini membuat permukaan plastik mengkilap. *Butadiene*, yang mengandung karet, menyediakan ketahanan bahkan pada temperatur rendah. Untuk sebagian besar aplikasi, ABS dapat digunakan antara sifat mekaniknya yang bervariasi dengan suhu. Sifat yang dibentuk karena ketangguhan karet, di mana partikel halus elastomer didistribusikan ke seluruh rigid matriks. Produksi 1 kg ABS memerlukan setara dengan sekitar 2 kg minyak untuk bahan baku dan energi. ABS juga dapat didaur ulang.

ABS berasal dari *acrylonitrile*, *butadiene*, *styrene* dan karbon. *Acrylonitrile* adalah monomer sintetis yang dihasilkan dari *propylene* dan ammonia; *butadiene* adalah hidrokarbon petroleum yang diperoleh dari fraksi pemecahan uap C4; monomer *styrene* dibuat oleh dehidrogenasi etil *benzene-hydrocarbon* yang diperoleh dari reaksi etilena dan benzena. (*Acrylonitrile*, 2011)



Gambar 2.4 monomer pada polimer ABS

Keuntungan dari ABS adalah bahwa material ini menggabungkan kekuatan dan kekakuan dari *acrylonitrile* dan polimer *styrene* dengan ketangguhan dari karet polibutadiena.

Sifat mekanik yang paling penting dari ABS adalah ketahanan terhadap benturan dan ketangguhannya. Berbagai modifikasi dapat dibuat untuk meningkatkan ketahanan benturan, ketangguhan, dan ketahanan panas. Ketahanan benturan bisa diperkuat dengan meningkatkan proporsi polibutadiena dalam kaitannya dengan *styrene* dan juga *acrylonitrile*, meskipun ini dapat menyebabkan perubahan pada karakteristik lainnya. Ketahanan benturan tidak jatuh cepat pada suhu yang lebih rendah. Stabilitas dibawah beban sangat baik dengan beban

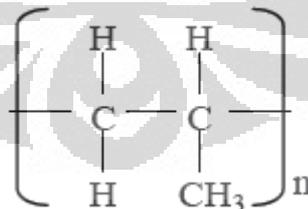
terbatas. Dengan demikian, mengubah proporsi komponen ABS dapat dilakukan dalam tingkatan yang berbeda. Dua kategori utama merupakan ABS untuk ekstrusi dan ABS untuk *injection molding*, kemudian dampak benturan tinggi dan rendah. Umumnya ABS akan memiliki karakteristik yang berguna dalam suhu 10 - 80°C (50 sampai 176°F). (*Acrylonitrile*, 2011)

Meskipun polimer ABS digunakan sebagian besar untuk tujuan mekanik, ABS juga memiliki sifat listrik yang cukup konstan melalui berbagai frekuensi. Karakteristik ini sedikit dipengaruhi oleh suhu dan kelembaban atmosfer dalam kisaran temperatur operasi yang diterima.

ABS polimer tahan terhadap keasaman air, alkali, asam klorida dan fosfat pekat, *alcohol* dan minyak hewani, nabati dan mineral, tetapi mereka tidak tahan oleh asam asetat glasial, karbon tetraklorida, hidrokarbon aromatik, asam sulfat dan nitrat terkonsentrasi. Mereka larut dalam ester, keton, dan diklorida etilen. (*Acrylonitrile*, 2011)

### 2.2.2 Polipropilena (PP)

Polipropilena atau polipropena (PP) adalah sebuah polimer termo-plastik yang dibuat oleh industri kimia dan digunakan dalam berbagai aplikasi, diantaranya pengemasan, tekstil (contohnya tali, pakaian dalam termal, dan karpet), alat tulis, berbagai tipe wadah terpakaikan ulang serta bagian plastik, perlengkapan laboratorium, penguas suara, komponen otomotif, dan uang kertas polimer. (*Polipropilena*, 2011)



Gambar 2.5 Simbol ikatan kimia PP

Kebanyakan polipropilena komersial merupakan isotaktik dan memiliki kristalinitas tingkat menengah di antara polietilena berdensitas rendah dengan polietilena berdensitas tinggi; modulus Youngnya juga menengah. Melalui penggabungan partikel karet, PP bisa dibuat menjadi liat serta fleksibel, bahkan di

suhu yang rendah. Hal ini membolehkan polipropilena digunakan sebagai pengganti berbagai plastik teknik, seperti ABS. Polipropilena memiliki permukaan yang tak rata, seringkali lebih kaku daripada beberapa plastik yang lain, lumayan ekonomis, dan bisa dibuat translusen (bening) saat tak berwarna tapi tidak setransparan polistirena, akrilik maupun plastik tertentu lainnya. Bisa pula dibuat buram dan/atau berwarna-warni melalui penggunaan pigmen, Polipropilena memiliki resistensi yang sangat bagus terhadap kelelahan (bahan).

Polipropilena memiliki titik lebur  $\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $320\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), sebagaimana yang ditentukan Differential Scanning Calorimetry (DSC). (*Polipropilena*, 2011)

Umumnya ada tiga tipe PP: homopolimer, *random copolymer* dan *impact copolymer* atau kopolimer blok. Comonomer yang digunakan adalah etena. Karet etena-propilena yang ditambahkan ke homopolimer PP meningkatkan kekuatan benturan suhu rendahnya. Monomer etena berpolimer acak yang ditambahkan ke homopolimer PP menurunkan kristalinitas polimer dan membuat polimer lebih tembus pandang. (*Polipropilena*, 2011)

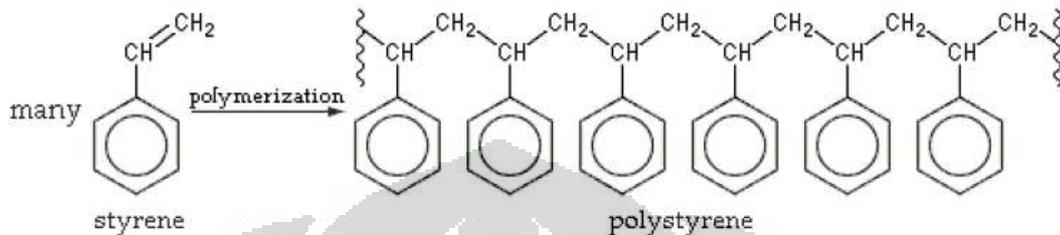
### 2.2.3 Polistirena (PS)

Polistirena adalah sebuah polimer dengan monomer stirena, sebuah hidrokarbon cair yang dibuat secara komersial dari minyak bumi. Pada suhu ruangan, polistirena biasanya bersifat termoplastik padat, dapat mencair pada suhu yang lebih tinggi. Stirena tergolong senyawa aromatik. (*Polistirena*, 2011)

Polistirena adalah zat termoplastik, yang berbentuk padat (keras) pada suhu kamar, tetapi meleleh jika dipanaskan di atas temperatur transisi kepadatannya (untuk mencetak atau ekstrusi), dan menjadi padat lagi ketika didinginkan. Polistirena murni padat tidak berwarna, merupakan plastik keras dengan fleksibilitas terbatas. Polistirena dapat dibuat transparan atau berwarna.

Susunan kimiawi dari polistiren merupakan rantai panjang hidrokarbon dengan setiap karbon lain yang terhubung ke sebuah kelompok *phenyl* (nama yang diberikan kepada cincin benzena aromatik, bila berikatan untuk substituen karbon kompleks) (*Polystyrene*, 2011). Rumus kimia polistirena adalah  $(\text{C}_8\text{H}_8)_n$ , itu mengandung unsur kimia karbon dan hidrogen. Karena merupakan hidrokarbon aromatik, polistirena dapat terbakar dengan nyala api jingga-kuning

dan menghasilkan jelaga, sedangkan hidrokarbon polimer non-aromatik seperti polietilena, terbakar dengan nyala api kuning muda (sering dengan semburat biru) dan tidak ada jelaga. Oksidasi polistiren secara keseluruhan hanya menghasilkan karbon dioksida dan uap air.



Gambar 2.6 ikatan kimia polistirena

Polistiren umumnya fleksibel dan bisa berbentuk padatan  *moldable* (mudah dibentuk) atau cairan kental. Kekuatan tarik pada polistirena terutama disebabkan oleh atraksi / tarikan jangkauan pendek van der Waals antar rantai. Karena molekul merupakan rantai hidrokarbon panjang yang terdiri dari ribuan atom, gaya menarik total antara molekul-molekul adalah besar. Kemampuan sistem yang mudah berubah di atas temperatur transisi kaca (*glass*) memungkinkan polistirena (dan polimer termoplastik pada umumnya) untuk dengan mudah melunak dan dicetak dengan penambahan panas. (*Polystyrene*, 2011)

Polistiren adalah polimer yang paling banyak digunakan. Polistiren diklasifikasikan dalam dua grup : *general-purpose* polistiren dan campuran stiren. *General-purpose* polistiren bersifat ringan, kaku, tapi material yang mudah patah ini sangat baik digunakan untuk isolasi listrik dan sebagai busa tambahan dalam isolasi termal. Polistiren adalah material yang tidak beracun, tak berbau dan tak berasa, yang banyak dijadikan sebagai tempat minuman dan makanan (Rudy Setiabudy, 2007, p.197). Selain itu, polistiren sangat stabil, dapat menyerap kelembaban yang kecil, dielektrik yang bagus, mudah terbakar, dan memiliki resistansi terhadap beberapa bahan kimia sangat kecil. (Rudy Setiabudy, 2007)

#### 2.2.4 Polivinil klorida (PVC)

Polivinil klorida, biasa disingkat PVC, adalah polimer termoplastik urutan ketiga dalam hal jumlah pemakaian di dunia, setelah polietilena dan polipropilena. Di seluruh dunia, lebih dari 50% PVC yang diproduksi dipakai dalam konstruksi. Sebagai bahan bangunan, PVC relatif murah, tahan lama, dan mudah dirangkai. PVC bisa dibuat lebih elastis dan fleksibel dengan menambahkan *plasticizer*, umumnya ftalat. PVC yang fleksibel umumnya dipakai sebagai bahan pakaian, perpipaan, atap, dan isolasi kabel listrik.

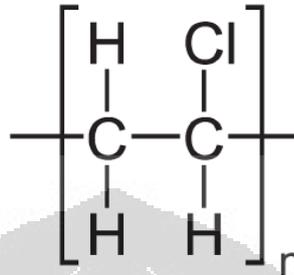
PVC diproduksi dengan cara polimerisasi monomer vinil klorida ( $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ ). Karena 57% massanya adalah klor, PVC adalah polimer yang menggunakan bahan baku minyak bumi terendah di antara polimer lainnya. (PVC, 2011)

Proses produksi yang dipakai pada umumnya adalah polimerisasi suspensi. Pada proses ini, monomer vinil klorida dan air diintroduksi ke reaktor polimerisasi dan inisiator polimerisasi, bersama bahan kimia tambahan untuk menginisiasi reaksi. Kandungan pada wadah reaksi terus-menerus dicampur untuk mempertahankan suspensi dan memastikan keseragaman ukuran partikel resin PVC. Reaksinya adalah eksotermik, dan membutuhkan mekanisme pendinginan untuk mempertahankan reaktor pada temperatur yang dibutuhkan. Karena volume berkontraksi selama reaksi (PVC lebih padat dari pada monomer vinil klorida), air secara kontinu ditambah ke campuran untuk mempertahankan suspensi. (PVC, 2011)

Ketika reaksi sudah selesai, hasilnya, cairan PVC, harus dipisahkan dari kelebihan monomer vinil klorida yang akan dipakai lagi untuk reaksi berikutnya. Lalu cairan PVC yang sudah jadi akan disentrifugasi untuk memisahkan kelebihan air. Cairan lalu dikeringkan dengan udara panas dan dihasilkan butiran PVC. Pada operasi normal, kelebihan monomer vinil klorida pada PVC hanya sebesar kurang dari 1 PPM. (PVC, 2011)

Proses produksi lainnya, seperti suspensi mikro dan polimerisasi emulsi, menghasilkan PVC dengan butiran yang berukuran lebih kecil, dengan sedikit perbedaan sifat dan juga perbedaan aplikasinya. Produk proses polimerisasi adalah PVC murni. Sebelum PVC menjadi produk akhir, biasanya membutuhkan

konversi dengan menambahkan *heat stabilizer*, *UV stabilizer*, pelumas, *plasticizer*, bahan penolong proses, pengatur termal, pengisi, bahan penahan api, biosida, bahan pengembang, dan pigmen pilihan. (PVC, 2011)



Gambar 2.7 ikatan kimia polivinil klorida

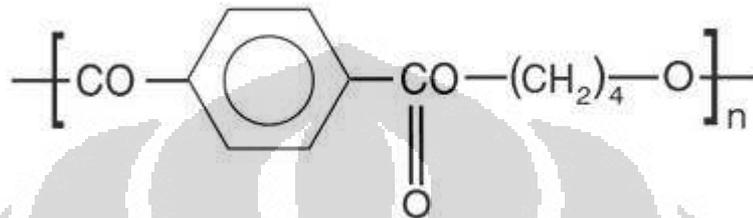
Secara umum, PVC cenderung memiliki berat ringan sampai menengah, kekuatan rendah, dan tidak gampang putus. Sifat PVC tersebut membuatnya cocok untuk berbagai macam penggunaan. PVC tahan secara biologi dan kimia, membuatnya menjadi plastik yang dipilih sebagai bahan pembuat pipa pembuangan dalam rumah tangga dan pipa lainnya di mana korosi menjadi pembatas pipa logam. Dengan tambahan berbagai bahan anti tekanan dan *stabilizer*, PVC menjadi bahan yang populer sebaga bingkai jendela dan pintu. Dengan penambahan *plasticizer*, PVC menjadi cukup elastis untuk digunakan sebagai insulator kabel.

### 2.2.5 Polybutylene terephthalate (PBT)

*Polybutylene terephthalate* (PBT) adalah rekayasa polimer termoplastik, yang digunakan sebagai isolator dalam industri listrik dan elektronik. *Polybutylene terephthalate* (PBT) merupakan polimer semi-kristal yang menggabungkan sifat mekanik dan listrik yang baik dengan ketahanan terhadap bahan kimia yang kuat. PBT tahan terhadap pelarut, menyusut sangat sedikit selama pembentukan, secara mekanik kuat, tahan panas hingga 150°C (atau 200 °C dengan penambahan glass-fiber) dan bisa dibuat tahan api untuk membuatnya tidak mudah terbakar. (*Polybutylene*, 2011)

PBT berkaitan erat dengan polyester termoplastik lain. Dibandingkan dengan PET (*polyethylene terephthalate*), PBT memiliki kekuatan dan kekakuan

sedikit lebih rendah, resistansi / ketahanan terhadap benturan sedikit lebih baik, dan temperature transisi kaca (*glass*) sedikit lebih rendah. PBT dan PET sensitif terhadap air panas diatas 60°C (140°F). PBT dan PET membutuhkan perlindungan UV jika digunakan diluar ruangan, dan sebagian besar *polyester* ini mudah terbakar, meskipun aditif dapat digunakan untuk meningkatkan perlindungan UV dan sifat mudah terbakar. (*Polybutylene*, 2011)



Gambar 2.8 ikatan kimia *Polybutylene terephthalate* (PBT)

*Polybutylene terephthalate* (PBT) memiliki stabilitas dimensi yang sangat baik, penyerapan air rendah, dan ketahanan isolasi kuat. Nilai PBT Terisi memiliki viskositas leleh dengan rentang yang lebar untuk memudahkan pengolahan dalam injeksi *molding* dan dalam teknik ekstrusi mulai dari peniupan-lelehan PBT untuk produksi tabung buffer serat optik atau liners kabel rem. Aplikasi Nilai PBT yang diperkuat termasuk pengapian otomotif dan bagian sistem kelistrikan, konektor listrik dan elektronik, soket, saklar (*switch*), dan alat rumah tangga yang menggunakan motor dan isolasi, peralatan rumah tangga, dan *handle*. PBT yang tahan api dan versi PBT yang dilumasi juga tersedia dikedua nilai diperkuat dan tidak diperkuat. Penggunaan luas dari PBT juga ditunjukkan oleh berbagai persetujuan pengaturan yang terdapat pada berbagai kelas. Ini termasuk VDE atau UL approval untuk pasar E/E atau approval FDA untuk gizi dan pasar medis. (*Polybutylene*, 2011)

### 2.3 Standar IEC (International Electrotechnical Commission)

Didirikan pada tahun 1906, IEC (International Electrotechnical Commission) merupakan organisasi terkemuka di dunia untuk penyusunan dan penerbitan Standar Internasional untuk semua teknologi elektrik, elektronik dan teknologi terkait. Ini dikenal secara kolektif sebagai "*electrotechnology*". Tujuan

dari IEC ini adalah untuk mempromosikan kerjasama internasional atas semua pertanyaan yang menyangkut standardisasi dibidang listrik dan elektronik. Oleh karena itu, IEC menerbitkan Standar Internasional. Penerbitan standar internasional ini dipercayakan kepada komite teknis, setiap komite nasional IEC yang tertarik pada subyek / judul yang ingin ditangani dapat berpartisipasi dalam persiapan pembuatan standar tersebut. IEC menyediakan *platform* untuk perusahaan, industri dan pemerintah untuk pertemuan, membahas dan mengembangkan Standar Internasional yang mereka butuhkan. IEC juga bekerjasama erat dengan *International Organization for Standardization (ISO)* sesuai dengan persyaratan yang ditentukan oleh perjanjian antara dua organisasi ini. (IEC, 2011)

Anggota IEC berasal dari seluruh dunia dan disebut dengan komite nasional. Walaupun setiap anggota berbeda, mereka memiliki dan menyepakati satu kesamaan: mereka semua mewakili seluruh rentang kepentingan elektroteknik di negara mereka, perusahaan dan bisnis, asosiasi industri, lembaga pendidikan, pemerintah dan badan pengawas. IEC juga menjangkau negara-negara industrialisasi baru melalui Program Afiliasi Negara dan dengan dibantu oleh para anggotanya, mereka membawa penyebaran IEC di lebih dari 97% dari populasi dunia. IEC juga bekerjasama dengan beberapa mitra internasional, regional dan nasional untuk menghasilkan publikasi bersama, membantu mempromosikan pentingnya standardisasi di seluruh dunia dan untuk mengkoordinasikan semua potensi tumpang tindih / ketidak sesuaian dalam suatu pekerjaan. (IEC, 2011)

Saat ini, IEC telah menghasilkan banyak standar internasional termasuk standar dibidang elektronik. Salah satunya adalah standar IEC 60335 tentang “Keselamatan Pemanfaat Listrik Rumah Tangga dan Sejenis”. Standar ini menjelaskan secara internasional mengenai perlindungan terhadap bahaya seperti listrik, mekanik, kebakaran termal, dan radiasi dari peralatan saat dioperasikan seperti dalam penggunaan normal dengan mempertimbangkan instruksi dari manufaktur. Hal ini juga mencakup situasi abnormal yang dapat terjadi pada saat penggunaan.

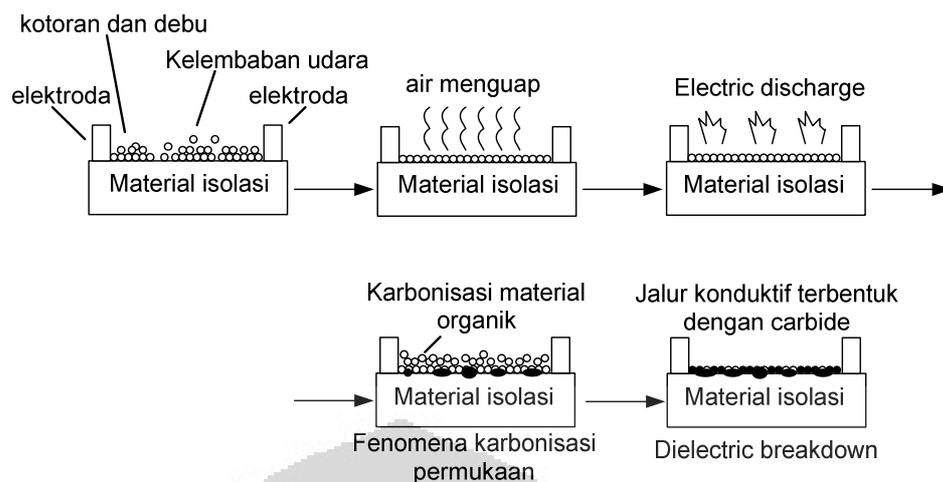
Standar IEC 60335 berkaitan dengan keselamatan (*safety*) peralatan listrik untuk keperluan rumah tangga dan sejenisnya, yang memiliki tegangan tidak lebih dari 250V untuk piranti fase tunggal dan 480V untuk peralatan lainnya. Peralatan yang tidak dimaksudkan untuk penggunaan rumah tangga normal, tetapi tetap bisa menjadi sumber bahaya bagi publik, seperti peralatan dimaksudkan untuk digunakan dengan orang awam pada toko-toko, pada industri ringan dan pertanian, berada dalam lingkup standar ini. (IEC 60335, 2001)

Standar IEC 60335 terdiri dari 32 klausul yang masing-masing klausulnya berisi tata cara pengujian yang menyangkut masalah keselamatan (*safety*) dari produk atau peralatan listrik untuk keperluan rumah tangga dan sejenis. Produk atau peralatan listrik yang diproduksi oleh manufaktur harus dikonstruksi sedemikian rupa sehingga dalam penggunaan normal dapat berfungsi dengan aman dan tidak menimbulkan bahaya untuk orang ataupun lingkungan, bahkan ketika terjadi kesalahan pada saat penggunaan normal. Secara umum prinsip ini dapat tercapai jika produk atau peralatan listrik yang di produksi tersebut memenuhi persyaratan yang relevan sesuai dengan yang ditetapkan dalam standar ini dan kesesuaiannya diperiksa dengan melakukan semua tes yang relevan.

#### **2.4 Uji Pembentukan Jalur Konduktif (Tracking)**

Uji pembentukan jalur konduktif (*tracking*) merupakan bentuk pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kemampuan dari material isolasi padat yang digunakan pada alat – alat elektronik rumah tangga. Adapun tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa material isolasi elektrik yang digunakan tahan terhadap aliran lompatan listrik yang dapat mengurangi tingkat keselamatan sesuai dengan standar. Adapun standar dari pengujian *tracking* ini adalah IEC 60112.

Pengertian dari *tracking* itu sendiri adalah pembentukan jalur konduktif progresif, yang dihasilkan pada permukaan material isolasi padat, karena efek gabungan dari tegangan listrik dan kontaminasi elektrolitik. Proses terjadinya *tracking* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.9 Proses terjadinya *tracking*

*Tracking* terjadi karena adanya kelembaban udara dimana kandungan air yang terdapat di udara ini mungkin saja mengandung kotoran dan debu yang bersifat konduktif. Kelembaban udara yang mengandung debu dan kotoran tersebut kemudian dapat menempel pada suatu material isolasi yang memisahkan dua elektroda yang menghantarkan listrik. Air yang terkandung dalam kelembaban udara tersebut dapat menguap karena panas yang berasal dari kondisi lingkungan dan meninggalkan debu dan kotoran untuk tetap menempel pada material isolasi tersebut. Debu dan kotoran yang mengandung zat-zat konduktif tersebut lama kelamaan menumpuk dan mengendap pada material isolasi yang memisahkan dua elektroda yang menghantarkan listrik sehingga menghasilkan *electrical discharge*. *Electrical discharge* (pelepasan elektrik) merupakan suatu arus listrik yang mengalir melalui material yang biasanya tidak menghantarkan listrik. *Electrical discharge* ini menghasilkan fenomena karbonisasi pada permukaan material isolasi. Karbonisasi material organik ini terjadi karena pada saat *electrical discharge*, terjadi percikan api pada permukaan isolasi yang menyebabkan permukaan isolasi tersebut sedikit terbakar. Karena terjadi proses karbonisasi ini, maka terbentuklah jalur konduktif diantara kedua elektroda tersebut dan menyebabkan kegagalan dielektrik atau kegagalan isolasi.

## 2.5 Tegangan Tembus (*Breakdown Voltage*) Material Isolasi

Tegangan tembus (*breakdown voltage*) isolator adalah tegangan minimum yang menyebabkan sebagian dari isolator menjadi konduktif secara elektrik. Tegangan tembus (*breakdown voltage*) merupakan karakteristik dari sebuah isolator yang mendefinisikan perbedaan tegangan maksimum yang dapat diterapkan pada bahan isolator sebelum terjadinya gagal dan konduksi. Bahan isolasi padat biasanya menciptakan jalur pelemahan dalam material dengan menciptakan perubahan molekul atau fisik permanen karena adanya arus mendadak.

Tegangan tembus material bukan nilai yang pasti karena merupakan bentuk kegagalan dan ada probabilitas statistik apakah material akan gagal pada tegangan yang diberikan. Nilai yang diberikan itu biasanya berupa nilai tegangan tembus rata-rata sampel yang besar. Tegangan tembus (*breakdown voltage*) juga dapat disebut 'tegangan tahan (*withstand voltage*)' di mana probabilitas kegagalan pada tegangan yang diberikan sangat rendah itu diperhitungkan, ketika merancang isolasi, bahwa bahan tersebut tidak akan gagal pada tegangan ini.

Atom dalam material isolasi memiliki elektron yang sangat terikat erat, menahan aliran elektron bebas dengan sangat baik. Namun, isolator tidak bisa menahan jumlah tegangan yang tak terbatas. Dengan suatu tegangan besar diberikan, bahan isolasi akhirnya akan menyerah pada "tekanan" listrik dan aliran elektron akan terjadi. Namun, tidak seperti situasi pada konduktor di mana arus dalam proporsi linier untuk tegangan (diberi resistensi tetap), arus melalui isolator sangat nonlinier: untuk tegangan di bawah ambang batas tertentu, hampir tidak ada elektron akan mengalir, tetapi jika tegangan melebihi ambang batas, akan ada aliran arus. Setelah arus dipaksa mengalir melalui bahan isolasi, kerusakan (*breakdown*) struktur molekul material terjadi. Setelah terjadi kerusakan (*breakdown*), material tersebut tidak bersifat sebagai isolator lagi karena struktur molekul telah diubah oleh aliran arus.

Ketebalan material isolasi memainkan peran dalam menentukan tegangan tembusnya, atau biasa dikenal sebagai kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik tertentu kadang-kadang tercantum dalam volt per mil (1 / 1000 inci), atau kilovolt per inci (dua unit yang setara), tetapi dalam prakteknya telah ditemukan bahwa

hubungan antara tegangan tembusnya dan ketebalan tidak persis linier. Namun, untuk menggunakan perkiraan kasar, nilai volt per-ketebalan dapat digunakan.

Isolasi padat mempunyai kekuatan tegangan tembus yang tinggi dibandingkan dengan isolasi cair dan gas. Jika terjadi tembus, maka isolasi padat akan rusak secara permanen sedangkan pada isolasi gas akan kembali ke sifatnya semula dan pada isolasi cair sebagian akan kembali ke sifatnya semula dan sebagian lainnya tidak.

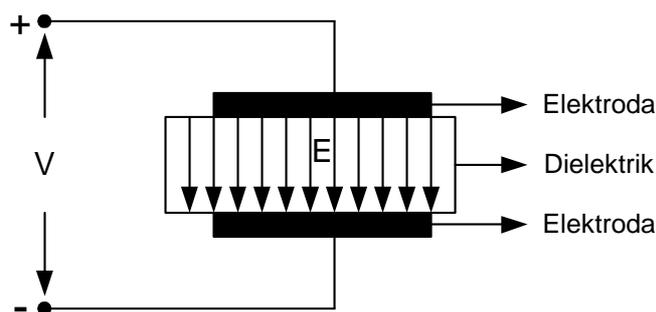
### 2.5.1 Kekuatan Dielektrik

Salah satu tujuan dari pengujian tegangan tinggi adalah untuk meneliti sifat-sifat listrik dielektrik bahan yang telah dipakai sebagai bahan isolasi peralatan listrik maupun yang masih dalam tahap penelitian. Adapun sifat-sifat listrik bahan dielektrik adalah :

- Kekuatan Dielektrik
- Konduktansi
- Rugi-rugi Dielektrik
- Tahanan Isolasi, dan
- Peluahan Parsial

Suatu bahan dielektrik tidak mempunyai elektron bebas, tetapi mempunyai elektron-elektron yang terikat pada inti atom unsur yang membentuk dielektrik tersebut. Pada Gambar 2.10 diperlihatkan suatu bahan dielektrik yang ditempatkan di antara dua elektroda piring sejajar. Bila elektroda diberi tegangan searah, maka timbul medan elektrik ( $E$ ) di dalam dielektrik. Medan elektrik ini memberi gaya kepada elektron-elektron agar terlepas dari ikatannya dan menjadi elektron bebas. Dengan kata lain, medan elektrik merupakan suatu beban bagi dielektrik yang menekan dielektrik agar berubah menjadi konduktor.

Beban yang dipikul dielektrik ini disebut juga tekanan / terpaan medan elektrik (Volt/cm). Setiap dielektrik mempunyai batas kekuatan untuk memikul tekanan elektrik.



Gambar 2.10 Tekanan Elektrik Dalam Dielektrik

Jika tekanan elektrik yang dipikulnya melebihi batas yang diizinkan dan berlangsung cukup lama, maka dielektrik akan menghantarkan arus atau gagal melaksanakan fungsinya sebagai isolator. Dalam hal ini dielektrik dikatakan mengalami kegagalan atau tembus listrik (*breakdown*). Tekanan elektrik tertinggi yang dapat dipikul suatu dielektrik tanpa menimbulkan dielektrik tembus listrik disebut kekuatan dielektrik.

Tidak selamanya tekanan elektrik dapat menimbulkan tembus listrik, tetapi ada dua syarat yang harus dipenuhi, yaitu :

- a. Tekanan elektrik yang dipikul dielektrik harus lebih besar atau sama dengan kekuatan dielektriknya.
- b. Lama tekanan elektrik berlangsung lebih besar atau sama dengan waktu tunda tembus dari dielektrik.

Yang dimaksud dengan waktu tunda tembus (*time lag*) adalah waktu yang dibutuhkan sejak mulai terjadinya ionisasi sampai terjadinya tembus listrik. Untuk tegangan sinusoidal frekuensi daya dan untuk tegangan searah syarat kedua di atas tidak berlaku, karena waktu puncak tegangan berlangsung dalam orde mili detik sedangkan waktu tunda tembus listrik ordenya dalam mikro detik. Tetapi untuk tegangan impuls yang durasinya dalam orde mikro detik kedua syarat tersebut harus dipenuhi. Untuk tegangan impuls sekalipun tegangan yang diberikan telah menimbulkan tekanan elektrik yang lebih besar dari kekuatan dielektrik, masih ada kemungkinan dielektrik tidak tembus. Kemungkinan ini terjadi jika tekanan elektrik yang melebihi kekuatan dielektrik itu berlangsung lebih singkat dari waktu tunda tembus listrik.

Lamanya waktu tunda tembus listrik tidak merata, oleh karena itu ditentukan dengan statistik, sehingga tekanan elektrik yang menimbulkan tembus listrik dinyatakan dalam suatu harga statistik, yaitu harga yang memberikan probabilitas tembus 50 %. Tegangan yang menyebabkan dielektrik tembus listrik disebut tegangan tembus atau *breakdown voltage*.

### 2.5.2 Dielektrik Padat dan Proses Kegagalannya

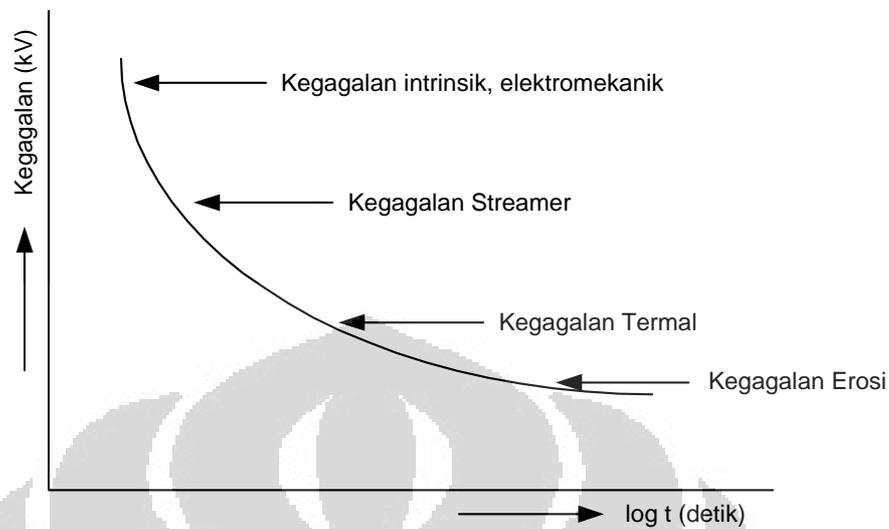
Atom-atom yang menyusun zat padat terikat kuat satu sama lain. Keistimewaan yang paling menyolok dari kebanyakan zat padat adalah atom-atomnya (atau grup-grup atom) yang tersusun oleh sebuah derajat tinggi dari urutan pola yang berulang-ulang yang teratur dalam tiga dimensi yang disebut kristalin. Zat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

Penerapan medan elektrik yang tinggi pada material dielektrik padat dapat menyebabkan gerakan pembawa muatan bebas, injeksi muatan dari elektroda-elektroda, penggandaan muatan, formasi ruang muatan dan disipasi energi dalam material. Oleh karena kondisi-kondisi tersebut, yang dapat terjadi secara tunggal atau kombinasi, maka akhirnya mengacu pada material mengalami kegagalan elektris yang disebut juga *breakdown*.

Mekanisme kegagalan pada zat padat merupakan mekanisme yang rumit dan tergantung pada lama diterapkannya tegangan pada material dielektrik tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11. Mekanisme tersebut adalah sebagai berikut :

- kegagalan asasi (intrinsik)
- kegagalan elektromekanik
- kegagalan *streamer*
- kegagalan termal

- kegagalan erosi



Gambar 2.11 Variasi tegangan tembus dan mekanisme kegagalan dengan waktu penerapan tegangan

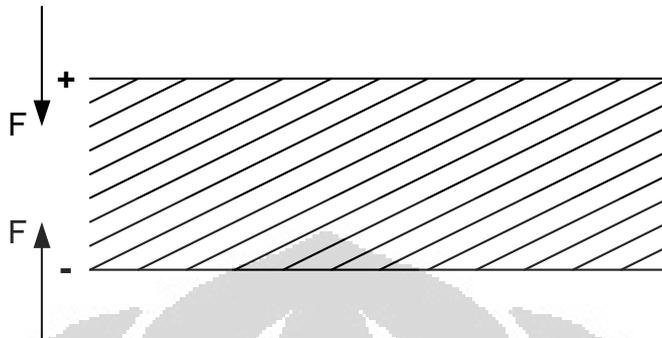
### 2.5.2.1 Kegagalan Asasi (Intrinsik)

Kegagalan asasi atau kegagalan intrinsik adalah kegagalan yang berasal dari atau disebabkan oleh jenis dan suhu bahan, dengan mengabaikan pengaruh faktor-faktor luar seperti tekanan, bahan elektroda, ketidakhomogenitas, kantong-kantong udara. Kegagalan ini terjadi jika tegangan yang diterapkan pada bahan dinaikkan sehingga tekanan listriknya mencapai nilai tertentu, yaitu  $10^6$  Volt/cm dalam waktu yang sangat singkat ( $10^{-8}$  detik). Kegagalan intrinsik ini merupakan bentuk kegagalan yang paling sederhana.

### 2.5.2.2 Kegagalan Elektromekanik

Kegagalan elektromekanik terjadi disebabkan oleh adanya perbedaan polaritas antara elektroda yang mengapit isolasi padat. Jika pada isolasi padat tersebut diberikan tegangan dengan polaritas yang berbeda, maka akan timbul tekanan (*stress*) listrik pada bahan tersebut yang dilanjutkan dengan timbulnya tekanan (*pressure*) mekanis. Tekanan mekanis ini terjadi akibat gaya tarik menarik  $F$  antar kedua elektroda tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12

untuk tekanan listrik sebesar  $10^6$  Volt/cm dan akan dihasilkan tekanan mekanis sebesar  $2-6 \text{ kg/cm}^2$ .



Gambar 2.12 Tekanan mekanis ini terjadi akibat gaya tarik menarik  $F$  antar kedua elektroda

### 2.5.2.3 Kegagalan Streamer

Jika diterapkan tegangan  $V$  pada zat padat yang terapit oleh elektroda bola-bidang, maka pada medium yang berdekatan, misalnya gas atau udara, akan timbul tegangan. Gas yang mempunyai permitivitas yang lebih rendah dari zat padat akan mengalami tekanan listrik yang besar. Akibatnya, gas atau udara tersebut akan mencapai kekuatan asasinya. Karena kegagalan tersebut maka akan jatuh sebuah muatan pada permukaan zat padat, sehingga medan yang tadinya seragam akan terganggu. Konsentrasi muatan pada ujung pelepasan ini dalam keadaan tertentu mengakibatkan timbulnya medan lokal yang cukup tinggi (sekitar  $10 \text{ MV/cm}$ ). Karena medan ini lebih besar dari kekuatan intrinsik, maka akan terjadi kegagalan pada zat padat tersebut. Proses kegagalan pada zat padat ini terjadi sedikit demi sedikit sehingga akhirnya zat padat gagal seluruhnya.

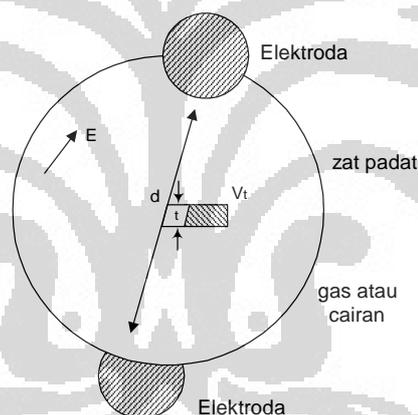
### 2.5.2.4 Kegagalan Termal

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

akan terjadi keadaan yang tidak stabil dan pada suatu saat bahan akan mengalami kegagalan. Kegagalan ini disebut kegagalan termal.

### 2.5.2.5 Kegagalan Erosi

Terjadinya kegagalan erosi disebabkan oleh keadaan zat isolasi padat yang tidak sempurna. Ketidaktersempurnaan tersebut misalnya berupa lubang-lubang atau rongga-rongga dalam bahan isolasi tersebut (Gambar 2.13), sehingga akan terisi oleh gas atau cairan yang kekuatannya lebih rendah daripada di dalam zat padat. Di samping itu, konstanta dielektrik di dalam rongga sering lebih rendah daripada dalam zat padat sehingga intensitas medan dalam rongga lebih besar daripada intensitas dalam zat padat. Oleh karena itu, mungkin saja akan terjadi tegangan kegagalan di dalam rongga tersebut, meskipun pada waktu itu diterapkan tegangan kerja normal pada zat padat.



Gambar 2.13 lubang-lubang atau rongga-rongga dalam bahan isolasi

Pada waktu gas dalam rongga gagal, permukaan zat isolasi padat merupakan katoda anoda. Benturan-benturan elektron pada anoda akan mengakibatkan terlepasnya ikatan kimiawi zat padat. Demikian pula, pemboman katoda oleh ion-ion positif akan mengakibatkan rusaknya zat isolasi padat karena kenaikan suhu, yang kemudian mengakibatkan ketidakstabilan termal. Keadaan ini menyebabkan dinding zat padat lama kelamaan rusak, rongga menjadi makin besar dan zat padat bertambah tipis. Proses ini disebut erosi dan kegagalan yang diakibatkannya disebut kegagalan erosi.

## BAB 3

### METODE PENGAMBILAN DATA

#### 3.1 Pengujian Pembentukan Jalur Konduktif (Tracking) Material Isolasi

##### 3.1.1 Standar Pengujian Pembentukan Jalur Konduktif (Tracking)

Material isolasi yang digunakan pada produk / peralatan rumah tangga harus dipastikan jarak rambatnya aman dan sesuai dengan standar IEC 60335 tentang keselamatan pemanfaat listrik rumah tangga dan sejenis, klausul 29.2 yang berbunyi : “Jarak rambat antar elektroda tidak boleh kurang dari persyaratan yang ditentukan berdasarkan tegangan kerja, dengan memperhitungkan *material group* dan derajat polusi”. Jarak rambat yang dimaksud adalah jarak antara dua bagian yang bertegangan atau jarak antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang mudah tersentuh oleh si pengguna. Tujuannya untuk memastikan bahwa bahan isolasi elektrik / listrik yang digunakan pada suatu peralatan elektronik tahan terhadap aliran lompatan listrik yang disebabkan adanya beda potensial diantara dua bagian yang bertegangan dan dapat mengurangi tingkat keselamatan sesuai dengan standar IEC.

Group material yang dimaksud dalam klausul 29.2 IEC 60335 adalah pengelompokkan material isolasi yang digunakan berdasarkan tegangan kerja dan *comparative tracking index* (CTI) yang diterapkan pada produk / material isolasi tersebut. *Comparative tracking index* (CTI) merupakan nilai numerik tegangan maksimum pada lima spesimen uji yang tahan terhadap periode uji sebanyak 50 tetes tanpa terjadi kegagalan *tracking* dan tanpa terjadi / menimbulkan api terus-menerus dan termasuk juga laporan yang terkait dengan karakteristik material saat diuji menggunakan 100 tetes atau dengan kata lain CTI merupakan tegangan uji yang digunakan saat uji *tracking*. Adapun hubungan antara group material isolasi nilai *comparative tracking index* (CTI) adalah sebagai berikut :

- material group I :  $600 \leq \text{CTI}$
- material group II :  $400 \leq \text{CTI} < 600$
- material group IIIa :  $175 \leq \text{CTI} < 400$
- material group IIIb :  $100 \leq \text{CTI} < 175$

Untuk material isolasi yang digunakan pada produk / peralatan rumah tangga yang digunakan di Indonesia umumnya di kelompokkan dalam material group IIIa karena tegangan kerja yang digunakan sebesar 220 V.

Adapun derajat polusi yang dimaksud dalam klausul 29.2 IEC 60335 merupakan tingkat pengotoran pada produk yang akan terjadi pada saat digunakan. Derajat polusi / tingkat pengotoran ini terbagi atas:

- Pengotoran tingkat 1 : tidak ada pengotoran atau hanya kering, pengotoran non-konduksi terjadi. Pengotoran tidak berpengaruh.
- Pengotoran tingkat 2 : hanya pengotoran non-konduksi terjadi, kecuali sesekali konduktif sementara yang diakibatkan oleh pengembunan.
- Pengotoran tingkat 3 : pengotoran konduktif terjadi atau pengotoran non-konduktif kering terjadi yang menjadi konduktif akibat pengembunan.
- Pengotoran tingkat 4 : pengotoran menimbulkan konduktif kuat yang disebabkan oleh debu konduktif atau hujan atau salju.

### 3.1.2 Prinsip Pengujian Pembentukan Jalur Konduktif (Tracking)

Prinsip – prinsip pengujian pembentukan jalur konduktif (*tracking*) ini diatur secara keseluruhan dalam standar IEC 60112 yang berisi tentang metode penentuan *proof* dan *comparative tracking index* untuk material isolasi padat.

Permukaan atas dari spesimen uji diletakkan pada suatu bidang datar dan mengalami suatu tekanan listrik melalui dua elektroda. Permukaan antara elektroda dikenakan sukseksi tetesan elektrolit, baik sampai terjadi hubungan arus pendek (*short circuit*), sampai menimbulkan api terus-menerus, ataupun sampai periode uji selesai.

Pengujian untuk masing – masing sampel tidak memerlukan waktu yang lama (kurang dari 1 jam) yang dilakukan dengan meneteskan 50 atau sampai 100 tetes sekitar 20 mg larutan elektrolit yang jatuh dengan interval 30 detik tiap tetesnya diantara dua elektroda platinum yang terpisah dengan jarak 4 mm pada permukaan spesimen. Suatu tegangan AC antara 100V dan 600V diberikan pada elektroda selama pengujian.

Selama pengujian, spesimen / sampel uji juga dapat terkikis atau melunak / meleleh, sehingga memungkinkan elektroda untuk menembus sampel tersebut.

Pembentukan lubang pada sampel uji selama tes harus diukur kedalaman lubangnya (uji ketebalan spesimen). Pengujian kembali dapat dilakukan dengan menggunakan spesimen uji yang lebih tebal, sampai maksimum 10 mm.

### 3.1.3 Spesimen Uji

Permukaan spesimen uji harus datar. Permukaan spesimen yang kurang datar dapat digunakan, asalkan area permukaannya cukup untuk menjamin bahwa selama pengujian tidak ada cairan mengalir di tepi spesimen uji. Permukaan datar berukuran tidak kurang dari 20 mm x 20 mm dianjurkan untuk mengurangi kemungkinan kerugian elektrolit di tepi spesimen meskipun ukuran yang lebih kecil dapat digunakan dan tidak menimbulkan kerugian elektrolit. Sebaiknya pada saat pengujian, digunakan spesimen uji yang terpisah / berbeda untuk setiap pengujian. Jika beberapa pengujian harus dibuat pada potongan uji yang sama, perhatian harus diberikan untuk memastikan bahwa titik pengujian jaraknya cukup jauh satu sama lain sehingga percikan atau uap dari titik pengujian tidak akan mencemari daerah lain yang akan diuji.

Ketebalan spesimen uji harus 3 mm atau lebih. Masing-masing potongan dari bahan boleh ditumpuk untuk mendapatkan ketebalan yang diperlukan minimal 3 mm. Nilai dari CTI yang diperoleh pada spesimen dengan ketebalan di bawah 3 mm mungkin tidak sebanding dengan yang diperoleh pada spesimen yang lebih tebal karena penjalaran panas yang lebih besar ke penopang kaca melalui spesimen uji yang tipis. Untuk alasan ini, penumpukkan spesimen uji diperbolehkan.

Spesimen uji harus memiliki permukaan yang halus dan tidak memiliki tekstur, bebas dari ketidaksempurnaan permukaan seperti goresan, noda, kotoran, dll, kecuali dinyatakan lain dalam standar produk. Jika hal ini tidak mungkin, hasilnya harus dilaporkan bersama dengan pernyataan yang menggambarkan permukaan spesimen karena karakteristik tertentu pada permukaan spesimen dapat mempengaruhi hasil yang di dapat.

Untuk pengujian komponen (*part*) produk, di mana kondisinya tidak mungkin untuk memotong spesimen uji yang sesuai dari komponen (*part*) produk tersebut, spesimen uji yang dipotong dari plak (*plaque*) yang dibentuk dari bahan

isolasi yang sama dapat digunakan. Dalam kasus ini perhatian harus diberikan untuk memastikan bahwa baik part maupun plak (*plaque*) diproduksi dengan proses fabrikasi yang sama sedapat mungkin. Penggunaan kondisi / proses fabrikasi yang berbeda dapat mengakibatkan perbedaan tingkat kinerja pada uji PTI dan CTI.

### 3.1.4 Kondisi Spesimen Uji

Untuk kondisi lingkungan, spesimen uji harus dikondisikan untuk minimal 24 jam pada  $23^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ K}$ , dengan  $(50 \pm 10) \% \text{ RH}$  kecuali dinyatakan khusus. Sedangkan untuk kondisi permukaan spesimen uji, kecuali dinyatakan lain,

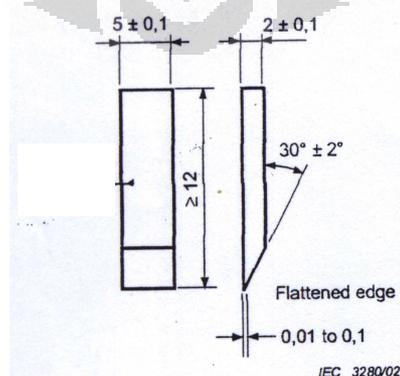
- a) pengujian harus dilakukan pada permukaan yang bersih;
- b) prosedur pembersihan yang digunakan harus dilaporkan.

Debu, kotoran, sidik jari, gemuk (*grease*), minyak, sisa cetakan atau kontaminan lainnya dapat mempengaruhi hasil. Perhatian harus diberikan ketika membersihkan benda uji untuk menghindari pelunakan, abrasi atau kerusakan lainnya pada material uji.

### 3.1.5 Alat Uji

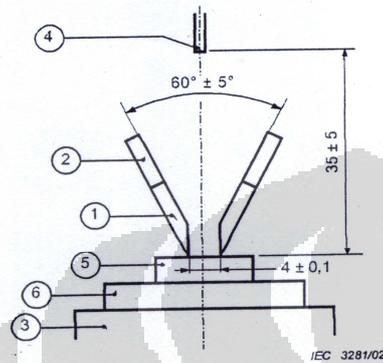
#### 3.1.5.1 Elektroda

Elektroda yang akan digunakan adalah dua elektroda platinum dengan kemurnian minimum 99%. Kedua elektroda harus memiliki ukuran penampang ( $5 \pm 0.1$ ) mm x ( $2 \pm 0.1$ ) mm, dengan ujung-ujungnya memiliki sudut  $30^{\circ} \pm 2^{\circ}$  (lihat gambar 3.1). Ujung dari elektroda tidak boleh tajam, memiliki lebar 0.01 mm sampai 0.1 mm.



Gambar 3.1 Penampang elektroda

Saat memulai pengujian, elektroda harus disusun simetris dalam bidang vertikal, sudut total antara mereka menjadi  $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$  dan dengan posisi elektroda saling berhadapan mendekati vertikal pada permukaan horizontal datar dari spesimen uji (lihat gambar 3.2). Jarak kedua elektroda pada permukaan benda uji  $4.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ .



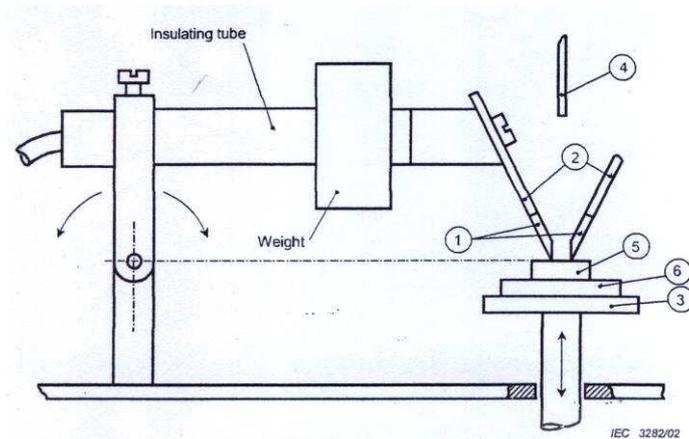
Keterangan gambar:

1. Elektroda platinum
2. Brass extension (optional)
3. Meja penopang
4. Ujung alat penetes
5. Spesimen uji
6. Penopang kaca

Gambar 3.2 Pengaturan penempatan elektroda / spesimen uji

Sebuah slip gauge logam tipis *rectangular* digunakan untuk memeriksa jarak antara elektroda. Elektroda dapat bergerak bebas dan gaya yang diberikan oleh masing-masing elektroda pada permukaan spesimen uji pada awal pengujian harus  $1.00 \text{ N} + 0.05 \text{ N}$ . Desain harus dirancang sedemikian rupa sehingga gaya diharapkan dapat tetap pada saat memulai dan selama pengujian.

Salah satu jenis pengaturan penempatan elektroda pada spesimen uji ditunjukkan pada Gambar 3.3. Gaya yang diberikan diverifikasi pada interval yang tepat. Saat pengujian dilakukan pada material isolasi di mana tingkat penetrasi elektrodanya kecil, gaya elektroda dapat dihasilkan dengan menggunakan pegas. Gravitasi dapat digunakan untuk menghasilkan gaya pada peralatan (lihat gambar 3.3).



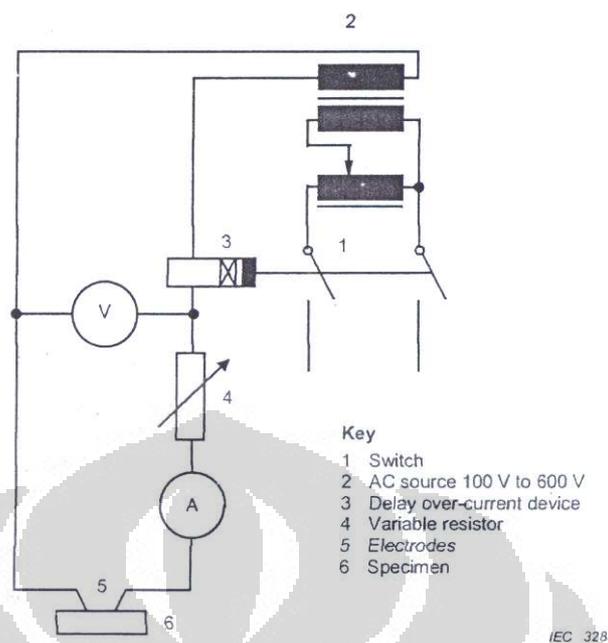
Keterangan gambar:

1. Elektroda platinum
2. *Brass extension* (optional)
3. Meja penopang
4. Ujung perangkat penetes
5. Spesimen uji
6. Penopang kaca

Gambar 3.3 Penempatan elektroda pada spesimen uji dengan gaya yang diterapkan

### 3.1.5.2 Rangkaian Uji

Elektroda harus disuplai dengan tegangan sinusoidal substansial, bervariasi antara 100V dan 600V pada frekuensi 48 Hz hingga 62 Hz. Alat pengukur tegangan harus menunjukkan nilai rms yang benar dan harus memiliki error maksimum sebesar 1,5%. Daya sumber harus tidak boleh kurang dari 0.6 kVA. Contoh dari rangkaian uji yang sesuai ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Rangkaian uji

Sebuah resistor variabel harus mampu menyesuaikan / meng-*adjust* arus antara elektroda saat *short-circuit* sampai  $(1.0 \pm 0.1)$  A dan tegangan yang ditunjukkan oleh voltmeter tidak akan turun lebih dari 10% saat arus ini mengalir. Instrumen yang digunakan untuk mengukur nilai arus *short-circuit* harus memiliki error maksimum  $\pm 3\%$ . Pasokan tegangan input ke alat uji harus cukup stabil. Perangkat arus lebih (*over-current*) akan beroperasi saat arus dengan nilai rms sebesar 0.50 A dengan toleransi relatif  $\pm 10\%$ , terjadi selama 2.00 s dengan toleransi relatif  $\pm 10\%$ .

### 3.1.5.3 Larutan Uji

Larutan yang akan dipakai terbagi dalam 2 jenis, yaitu:

- Larutan A:

Larutkan sekitar 0.1% massa amonium klorida anhidrat ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), dengan kemurnian tidak kurang dari 99.8%, dalam air de-ionisasi, memiliki konduktivitas yang tidak lebih besar dari 1 mS/m untuk memberikan tahanan jenis  $(3.95 \pm 0.05) \Omega\text{m}$  pada  $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$

- Larutan B:

Larutkan sekitar 0.1% massa amonium klorida anhidrat ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), dengan kemurnian tidak kurang dari 99.8%, dan  $0.5\% \pm 0.002\%$  dengan massa sodium-di-butyl naftalena sulfonat dalam air de-ionisasi, yang memiliki konduktivitas tidak lebih besar dari 1 mS/m, untuk memberikan resistivitas dari  $(1.98 \pm 0.05) \Omega\text{m}$  pada  $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$

Normalnya, Larutan A yang biasanya digunakan, tetapi ketika kontaminan lebih agresif diperlukan, larutan B dapat digunakan. Untuk menunjukkan bahwa larutan B digunakan, nilai CTI atau PTI harus diikuti dengan huruf "M". Konduktivitas larutan harus diukur dengan tegangan bolak - balik pada frekuensi dalam rentang 1kHz sampai 2 kHz.

#### **3.1.5.4 Perangkat Penetes**

Tetesan larutan uji harus jatuh pada permukaan spesimen dengan interval  $30 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$ . Tetesan akan jatuh kurang lebih terpusat diantara elektroda dari ketinggian  $35 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ . Waktu untuk jumlah 50 tetesan jatuh ke spesimen harus  $(24.5 \pm 2) \text{ min}$ . Massa dari jumlah 50 tetesan harus terletak antara 0,997 g dan 1,147 g. massa dari jumlah 20 tetesan harus terletak antara 0,380 g dan 0,480 g. Massa tetesan harus diperiksa / diukur pada interval waktu yang tepat.

#### **3.1.5.5 Platform Pendukung Spesimen Uji**

Sebuah plat kaca atau plat yang memiliki total ketebalan tidak kurang dari 4 mm dan ukuran yang sesuai harus digunakan untuk menopang / sebagai alas spesimen uji selama pengujian.

### **3.1.6 Prosedur Dasar Pengujian**

#### **3.1.6.1 Secara Umum**

Pengujian harus dilakukan pada suhu sekitar  $23 \pm 5 ^\circ\text{C}$ . Pengujian harus dilakukan pada benda uji yang tidak tercemar, tidak berminyak ataupun tidak kotor, kecuali dinyatakan khusus. Jika pada saat pengujian lubang terbentuk, hasil dari pengujian ini tetap dianggap sah, terlepas dari ketebalan spesimen uji, namun pembentukan lubang harus dilaporkan bersama dengan kedalaman lubang

(ketebalan dari benda uji atau tumpukan). Lubang yang terbentuk saat pengujian harus berukuran kurang dari 1 mm.

### 3.1.6.2 Persiapan

Sesudah setiap dilakukan pengujian, bersihkan elektroda dengan pelarut yang sesuai dan kemudian bilas dengan air terionisasi. Jika perlu, atur kembali posisi elektroda dan berikan bilasan terakhir sebelum pengujian berikutnya. Sebelum pengujian pastikan bahwa suhu elektroda cukup rendah sehingga elektroda tersebut tidak memiliki efek buruk pada sifat spesimen uji, jika perlu elektroda didinginkan terlebih dahulu.

Pastikan spesimen uji yang digunakan bebas dari segala macam kontaminasi yang dapat terlihat dan pastikan bahwa larutan yang akan digunakan sesuai dengan persyaratan konduktivitas dengan cara mengukurnya sebelum pengujian.

Tempatkan benda uji, dengan permukaan yang akan diuji menghadap ke atas dan pada posisi horizontal di meja penopang spesimen. Sesuaikan tinggi relatif spesimen uji dan posisi elektroda. Ujung elektroda menyentuh permukaan spesimen uji dan atur jarak antara kedua elektroda sebesar  $4.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ . Pastikan bahwa ujung elektroda menyentuh permukaan spesimen dengan gaya yang dibutuhkan.

Atur tegangan uji sesuai dengan standar atau spesifikasi dari material isolasi yang akan diuji yang ditetapkan dengan variasi penambahan tegangan sebesar 25 V, dan atur parameter rangkaian yang dalam hal ini merupakan sebuah resistor variabel sehingga arus pendek (*short circuit*) yang terjadi berada dalam toleransi yang diizinkan ( $1.0 \pm 0.1 \text{ A}$ ).

### 3.1.6.3 Prosedur Pengujian

Setelah persiapan selesai dilakukan, mulai sistem peneteskan sehingga tetesan larutan jatuh ke permukaan spesimen uji dan terus lanjutkan pengujian sampai salah satu kejadian berikut terjadi, yaitu :

- a. Perangkat proteksi arus lebih (*over-current*) beroperasi
- b. Spesimen uji terbakar

- c. Setidaknya 25 s setelah tetesan ke 50 (100) jatuh tanpa terjadi kondisi 'a' atau 'b'.

Setelah kondisi 'c' dinyatakan berhasil pada suatu tegangan tertentu, naikkan tegangan uji sebesar 1 tingkat (25V) dan ulangi pengujian tersebut tanpa mengganti spesimen uji yang digunakan sebelumnya. Lakukan proses tersebut sampai kondisi 'a' atau 'b' terjadi. Sebagai contoh, Jika pada pengujian pertama tegangan pengujian yang diterapkan sebesar 250 V kemudian di uji sebanyak 50 tetesan dan tidak terjadi kondisi 'a dan 'b', maka setelah tetesan ke 50 naikkan tegangan uji menjadi 275 V tanpa mengganti spesimen uji dan ulangi pengujian tersebut sampai kondisi 'a' dan 'b' terjadi pada suatu tegangan uji tertentu. Tegangan yang menyebabkan spesimen uji / material isolasi ini mengalami kondisi 'a' dan 'b' inilah yang akan menjadi bahan penilaian untuk menentukan *proof tracking index* dan *comparative tracking index*.

### **3.1.7 Penentuan *Proof Tracking Index* (PTI)**

Setelah dilakukan pengujian *tracking* selama 50 tetesan larutan elektrolit pada suatu tegangan tertentu dan terjadi kondisi dimana perangkat proteksi arus berlebih aktif atau spesimen uji tersebut terbakar, sedangkan pada pengujian sebelumnya dimana tegangan uji yang diberikan lebih kecil 25 V, material / spesimen yang diujikan tersebut tidak mengalami kegagalan maka dari tegangan pada saat material / spesimen tidak mengalami kegagalan isolasi itulah nilai PTI ditentukan. Sebagai contoh, Jika pada suatu tegangan uji sebesar 250 V terjadi kondisi dimana perangkat proteksi arus berlebih aktif atau spesimen uji tersebut terbakar, sedangkan pada saat diberi tegangan uji sebesar 225 V material / spesimen yang diujikan tidak mengalami kegagalan maka nilai PTI dari material yang diujikan tersebut adalah 225 atau biasanya dituliskan dengan 'PTI 225'.

### **3.1.8 Penentuan *Comparative Tracking Index* (CTI)**

Selain PTI, setelah dilakukan pengujian *tracking* maka hal berikutnya yang harus dilakukan adalah menentukan nilai *Comparative Tracking Index* (CTI). Penentuan *Comparative Tracking Index* (CTI) ini dilakukan untuk menentukan material group dari material isolasi yang diuji tersebut. Nilai

*Comparative Tracking Index* (CTI) ini ditentukan dari tegangan maksimum di mana lima spesimen tahan terhadap periode uji selama 50 tetes tanpa kegagalan dan apakah, pada tegangan 25 V lebih rendah dari tegangan yang diberikan pada periode uji selama 50 tetes, spesimen tahan terhadap 100 tetesan. Sebagai contoh, Jika pada suatu tegangan uji sebesar 250 V terjadi kondisi dimana perangkat proteksi arus berlebih aktif atau spesimen uji tersebut terbakar, sedangkan pada saat diberi tegangan uji sebesar 225 V dan periode uji 50 tetes, material / spesimen yang diujikan tidak mengalami kegagalan, uji kembali dengan tegangan lebih rendah sebesar 200 V dengan periode uji 100 tetes. Jika ternyata tidak mengalami kegagalan *tracking* pada periode uji 100 tetes tersebut, maka nilai CTI dari material yang diuji dituliskan dengan 'CTI 225(200)'.

## **3.2 Pengujian Kekuatan Dielektrik**

### **3.2.1 Standar Pengujian Kekuatan Dielektrik**

Dalam standar IEC 60335, selain harus tahan terhadap aliran lompatan listrik, material isolasi listrik yang digunakan pada suatu peralatan listrik rumah tangga harus memiliki kekuatan dielektrik dan resistansi isolasi yang baik pula. Tujuannya adalah untuk menjamin bahwa produk / peralatan listrik rumah tangga mempunyai kekuatan dielektrik yang cukup sehingga pada saat dioperasikan tidak menimbulkan bahaya terhadap keselamatan. Adapun standar pengujian kekuatan dielektrik ini diatur dalam IEC 60335 klausul 13.1 yang berbunyi: "Pada suhu operasi, kebocoran arus dari peralatan listrik rumah tangga tidak boleh berlebihan dan kekuatan elektriknya harus memadai" dan cara ujinya diatur dalam 13.3 yang berbunyi: "Material isolasi diberikan suatu tegangan sinusoidal yang memiliki frekuensi 50 Hz atau 60 Hz selama 1 menit". Adapun besar tegangannya dapat dilihat dari tabel dibawah ini.

Tabel 3.1 Besarnya tegangan untuk uji kekuatan dielektrik (tegangan tembus)

<i>Insulation</i>	<i>Test voltage (V)</i>			
	<i>Rated voltage<sup>a</sup></i>			<i>Working voltage (U)</i>
	SELV	$\leq 150$ V	$>150$ V and $\leq 250$ V	$>250$ V
<i>Basic insulation</i>	500	1000	1000	$1.2U + 700$
<i>Supplementary insulation</i>		1000	1750	$1.2U + 1450$
<i>Reinforced insulation</i>		2000	3000	$2.4U + 2400$

<sup>a</sup> For multi-phase appliances, the line to neutral or line to earth voltage is used for rated voltage. The test voltage for 480 V multi-phase appliances is that specified for a rated voltage in the range  $>150$  V and  $\leq 250$  V

Tegangan uji yang tertera pada tabel merupakan tegangan yang diterapkan untuk menguji kekuatan dielektrik produk / peralatan listrik rumah tangga berdasarkan pembagian jenis isolasi yang digunakan pada produk / peralatan listrik tersebut.

Dalam standar IEC 60335 isolasi listrik terbagi dalam 5 jenis, yaitu :

- Isolasi dasar, merupakan isolasi yang digunakan pada bagian bertegangan untuk memberikan perlindungan dasar terhadap sengatan listrik.
- Isolasi tambahan, merupakan isolasi independen yang digunakan selain isolasi dasar, dalam rangka untuk memberikan perlindungan terhadap sengatan listrik jika terjadi kegagalan pada isolasi dasar.
- Isolasi ganda, merupakan sistem isolasi yang terdiri dari isolasi dasar dan isolasi tambahan.
- Isolasi diperkuat, merupakan isolasi tunggal yang digunakan pada bagian bertegangan, yang memberikan tingkat proteksi terhadap sengatan listrik setara dengan isolasi ganda dalam kondisi yang ditentukan sesuai dengan standar.
- Isolasi fungsional, merupakan isolasi antara bagian konduktif beda potensial yang penting untuk berfungsinya alat.

Untuk penelitian ini sendiri, karena kita ingin mengetahui seberapa besar tegangan tembus pada material isolasi yang akan kita uji maka kita tidak menggunakan besarnya tegangan seperti yang tertera pada tabel 3.1. Kita hanya menggunakan metode pengujian yang sama sesuai dengan standar, sedangkan untuk tegangan uji yang dipakai bervariasi dari 50V – 5kV

### **3.2.2 Prinsip Pengujian Kekuatan Dielektrik**

Material isolasi yang akan diuji dijepit pada suatu penjepit uji kekuatan dielektrik. Masing – masing material isolasi yang akan diuji memiliki ketebalan yang berbeda – beda. Material isolasi yang diuji diberikan tegangan AC mulai dari 50V sampai 5 kV sesuai dengan spesifikasi alat uji yang digunakan dengan kenaikan tiap tegangannya sebesar 50V dan diberikan selama 1 menit setiap tegangannya. Jika pada nilai tegangan yang diberikan selama 1 menit material isolasi yang diuji tersebut tidak terjadi kegagalan dielektrik berupa tegangan tembus, naikan tegangan uji sebesar 1 *step* (50V) selama 1 menit kembali. Sebaliknya, jika sebelum 1 menit terjadi tegangan tembus, dalam hal ini alat uji mendeteksi secara otomatis terjadinya tegangan tembus, maka material isolasi yang diujikan tersebut dinyatakan mengalami kegagalan dielektrik pada tegangan tersebut. Kemudian lakukan pengujian kembali dengan material isolasi yang memiliki ketebalan yang berbeda.

### **3.2.3 Spesimen Uji**

Permukaan spesimen uji yang digunakan harus datar dan berukuran 10mm x 10mm dengan ketebalan yang bervariasi untuk setiap material isolasi yang akan diuji. Masing – masing material isolasi yang diuji memiliki ketebalan 0.5mm dan 1mm.

### **3.2.4 Alat Uji**

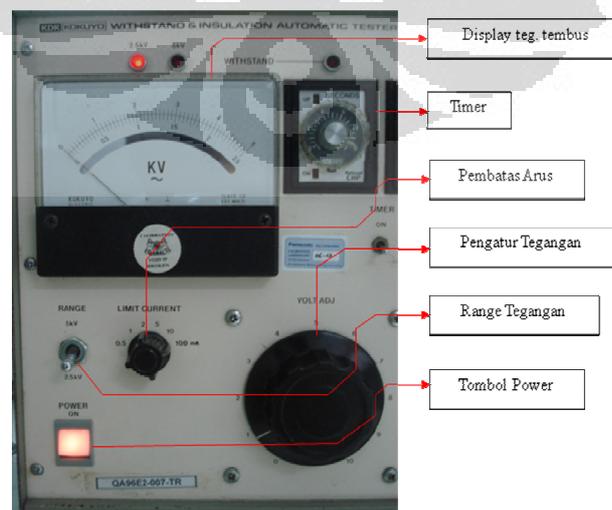
#### **3.2.4.1 Withstand and Insulation Tester**

*Withstand and insulation tester* merupakan nama alat uji yang digunakan untuk menguji kekuatan dielektrik dan resistansi suatu material isolasi. Dalam hal untuk menguji kekuatan dielektrik suatu material isolasi, alat ini mampu

memberikan tegangan uji yang bervariasi mulai dari 0V sampai 5kV. Selain itu, alat ini juga memiliki *timer* yang dapat diatur mulai dari 1 detik sampai 1 menit dan pembatas arus (*limit current*) yang bervariasi mulai dari 0.5mA, 1mA, 2mA, 5mA, 10mA, dan 100mA. *Timer* pada alat uji ini berfungsi untuk mengatur lamanya waktu pengujian. Khusus untuk penelitian ini, *timer* diatur selama 1 menit sesuai dengan lamanya pengujian yang dilakukan untuk setiap spesimen uji. Sedangkan pembatas arus (*limit current*) berfungsi untuk membatasi besarnya arus yang mengalir pada material isolasi ketika diberi tegangan. Jadi ketika suatu material isolasi yang diberikan tegangan mampu mengalirkan arus sebesar nilai yang di *setting* pada pembatas arus maka alat uji akan menyatakan material isolasi tersebut tembus pada nilai tegangan yang diberikan tersebut. Khusus untuk penelitian ini, pembatas arus (*limit current*) yang digunakan sebesar 0.5mA.



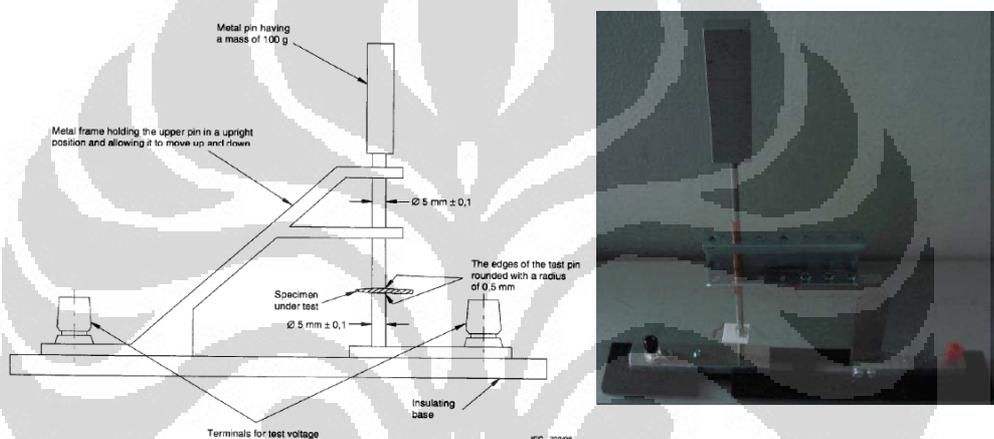
Gambar 3.5 *Withstanding and insulation tester*



Gambar 3.6 Bagian dari alat uji yang digunakan saat uji tegangan tembus

### 3.2.4.2 Penjepit Material Isolasi

Penjepit material isolasi ini merupakan alat bantu uji kekuatan dielektrik dan resistansi material isolasi yang berfungsi untuk menjepit material isolasi yang akan diuji dan mengalirkan tegangan uji melalui penjepit tersebut. Penjepit ini memiliki 2 terminal untuk masukan tegangan uji, terbuat dari bahan logam yang dapat mengalirkan arus dengan beban pemberat pada bagian atasnya yang memiliki berat 100 g. Beban tersebut menempel pada suatu batang logam berdiameter 5mm yang dapat digerakkan ke atas dan bawah berfungsi untuk menjepit material isolasi yang akan diuji seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 3.7 Penjepit material isolasi

### 3.2.5 Prosedur Pengujian Kekuatan Dielektrik

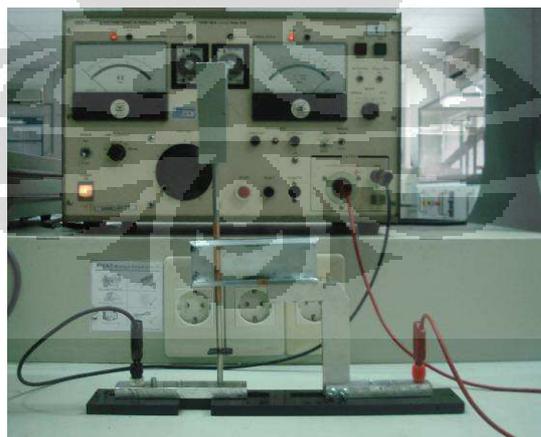
Pertama, pilih spesimen uji material isolasi dengan ketebalan yang paling kecil yaitu 0.5mm. Kemudian tempatkan material isolasi yang akan diuji pada penjepit material isolasi seperti pada gambar 3.7.

Tekan tombol power untuk menyalakan alat uji. Atur mode pengujian ke 'W' yang menandakan bahwa mode pengujian yang akan dilakukan adalah pengujian kekuatan dielektrik (*withstand*). Setelah itu, atur pembatas arus (*limit current*) sebesar 0.5mA, *timer* selama 1 menit, rentang tegangan pada posisi 5kV, dan pengatur tegangan pada posisi nol.

Setelah semua pengaturan selesai, tekan tombol start untuk mulai mengeluarkan tegangan uji dan atur tegangan uji sebesar 50V. Kemudian tekan tombol reset untuk mematikan tegangan uji yang keluar agar tidak menimbulkan

bahaya saat akan menyambungkan output tegangan uji dengan penjepit. Setelah dipastikan aman, sambungkan output tegangan uji dengan penjepit seperti pada gambar 3.8. Tekan tombol start kembali untuk memulai pengujian bersamaan dengan menekan *stopwatch* untuk menghitung waktu tembusnya material isolasi yang diuji dan tunggu sampai pengujian selesai (1 menit). Jika sebelum 1 menit terjadi tegangan tembus, maka lampu '*Withstand NG*' akan menyala dan buzzer akan berbunyi menandakan bahwa material isolasi yang diuji mengalami kegagalan dielektrik. Ketika hal tersebut terjadi langsung tekan tombol *stopwatch* untuk mengetahui pada detik ke berapa material isolasi tersebut tembus dan catat berapa besarnya tegangan tembus yang didapat. Sebaliknya, jika selama 1 menit tidak terjadi tegangan tembus, maka lampu '*GO*' akan menyala menandakan bahwa material isolasi yang diuji tidak mengalami kegagalan dielektrik pada tegangan yang diberikan.

Jika material isolasi yang diuji belum mengalami kegagalan, naikkan tegangan uji sebesar 1 *step* (50V) dan ulangi pengujian kembali. Agar tidak menimbulkan bahaya, lepas kabel output yang tersambung ke penjepit pada saat mengatur tegangan uji dan jangan sekali – kali menyentuh penjepit pada saat pengujian berlangsung (lampu '*TEST*' menyala) karena tegangan uji yang digunakan cukup besar.



Gambar 3.8 Konfigurasi pengujian kekuatan dielektrik

## BAB 4

### HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

#### 4.1 Hasil Pengujian dan Analisis Tracking

##### 4.1.1 Pengujian Tracking ABS

Tanggal pengujian : 10 – 14 Oktober 2011  
Lokasi Pengujian : Laboratorium uji PT. Panasonic MFG IND  
Spesifikasi Tegangan kerja : 220V  
Supplier : PT. A

Berikut merupakan data hasil pengujian *tracking* material ABS (*Acrylonitrile butadiene styrene*).

Tabel 4.1 Data hasil pengujian *tracking* material ABS

Tegangan uji (V)	Arus terukur tertinggi (A)	Jumlah tetesan	Kondisi permukaan	Hasil Pengujian
225	0.028	50	Tidak terbakar	OK
250	0.033	50	Tidak terbakar	OK
275	0.026	50	Tidak terbakar	OK
300	0.025	50	Tidak terbakar	OK
325	0.030	50	Tidak terbakar	OK
350	0.025	50	Tidak terbakar	OK
375	0.033	50	Tidak terbakar	OK
400	0.036	50	Tidak terbakar	OK
425	0.032	50	Tidak terbakar	OK
450	0.035	50	Tidak terbakar	OK
475	0.033	50	Tidak terbakar	OK
500	0.741	25	Terbakar	Gagal

### Bentuk permukaan uji material ABS



Sebelum uji



Sesudah uji

Gambar 4.1 Bentuk permukaan material ABS sebelum dan sesudah uji *tracking*

### Beberapa kondisi yang terjadi saat pengujian *tracking*



Gambar 4.2 Terjadi *flashover* pada permukaan uji



Gambar 4.3 Permukaan uji terbakar



Gambar 4.4 Arus saat terjadi *tracking*



Gambar 4.5 Jumlah tetesan saat terjadi *tracking*

Material ABS yang diuji ini dapat dinyatakan mengalami kegagalan isolasi (*tracking*) pada tegangan 500V, arus *tracking* yang mengalir pada permukaan sebesar 0.741A, dan jumlah tetesan ke 25. Sesaat setelah terjadi *flashover* dan *tracking* pada permukaan material tersebut, material tersebut terbakar seperti yang ditunjukkan gambar 4.3. Ini mengindikasikan bahwa material dari jenis ABS ini tidak tahan terhadap api yang timbul akibat terjadinya *flashover* pada permukaan. Akan tetapi, material ini tetap dapat dinyatakan aman dari segi *safety* (keselamatan) produk karena tegangan pada saat terjadi *tracking* jauh diatas tegangan kerja dari material tersebut yaitu sebesar 220V. Standar minimum *safety* untuk material yang bekerja pada tegangan 220V adalah PTI 225 atau CTI 225(200), sedangkan dari hasil uji *tracking* yang di dapat material ini berada pada PTI 475 atau CTI (475)450. Dari nilai PTI dan CTI tersebut material ini dapat masuk dalam *material group II* pada pengelompokkan material isolasi berdasarkan standar IEC 60335. Jadi masih sangat aman untuk digunakan pada tegangan kerja 220V.

#### 4.1.2 Hasil Pengujian Tracking PP

Tanggal pengujian : 17 – 21 Oktober 2011  
 Lokasi Pengujian : Laboratorium uji PT. Panasonic MFG IND  
 Spesifikasi Tegangan kerja : 220V  
 Supplier : PT. B

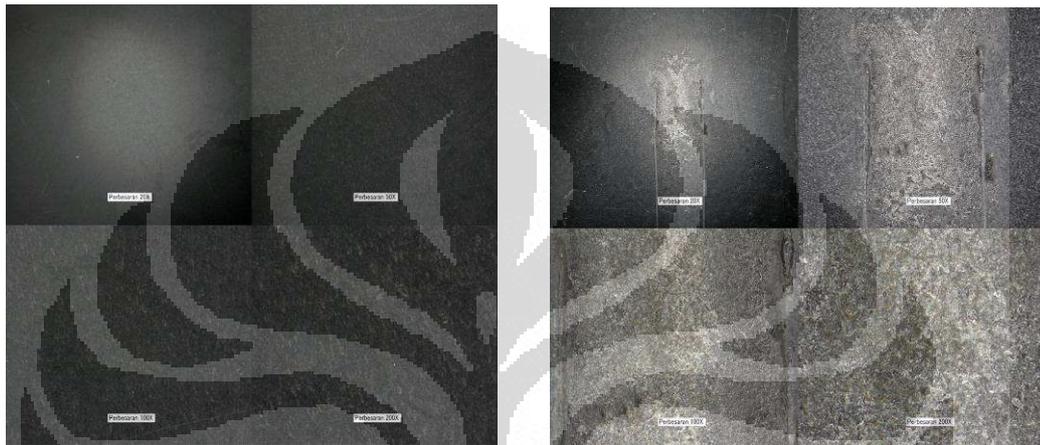
Berikut merupakan data hasil pengujian *tracking* material PP (polipropilena).

Tabel 4.2 Data hasil pengujian *tracking* material PP

Tegangan uji (V)	Arus terukur tertinggi (A)	Jumlah tetesan	Kondisi permukaan	Hasil Pengujian
225	0.025	50	Tidak terbakar	OK
250	0.028	50	Tidak terbakar	OK
275	0.030	50	Tidak terbakar	OK
300	0.031	50	Tidak terbakar	OK
325	0.035	50	Tidak terbakar	OK
350	0.033	50	Tidak terbakar	OK
375	0.033	50	Tidak terbakar	OK
400	0.035	50	Tidak terbakar	OK
425	0.036	50	Tidak terbakar	OK

450	0.035	50	Tidak terbakar	OK
475	0.033	50	Tidak terbakar	OK
500	0.038	50	Tidak terbakar	OK
525	0.037	50	Tidak terbakar	OK
550	0.043	50	Tidak terbakar	OK
575	0.045	50	Tidak terbakar	OK
600	0.041	50	Tidak terbakar	OK

#### Bentuk permukaan uji material PP



Sebelum uji

Sesudah uji

Gambar 4.6 Bentuk permukaan material PP sebelum dan sesudah uji *tracking*

#### Kondisi yang terjadi saat pengujian *tracking*



Gambar 4.7 Terjadi *flashover* pada permukaan uji

Berbeda dengan material ABS, pada material PP ini tidak terjadi *tracking* sampai tegangan dan jumlah tetesan maksimum standar uji *tracking* ini. *Flashover* dan *electrical discharge* (pelepasan elektrik) sempat terjadi beberapa kali pada

permukaan material ini seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7, hanya saja tidak menimbulkan arus *tracking* yang besar melebihi 500mA. Arus terbesar yang terukur hanya bernilai 45mA yang terjadi pada tegangan 575V. Timbulnya beberapa kali *flashover* dan *electrical discharge* ini menyebabkan permukaan diantara kedua elektroda mengalami fenomena karbonisasi akibat timbulnya percikan api yang menyebabkan permukaan isolasi tersebut sedikit terbakar seperti terlihat pada gambar 4.6. Selain itu, pada gambar 4.6 bentuk permukaan sesudah uji *tracking* terlihat adanya endapan polutan berupa garam diantara kedua elektroda. Akan tetapi, material PP tetap dapat mengisolasi kedua elektroda tersebut dengan baik sehingga *tracking* tidak terjadi pada material ini. Jadi, material PP ini dapat dinyatakan sangat aman digunakan pada tegangan kerja 220V, bahkan sampai tegangan 600V, lebih baik daripada material ABS.

#### 4.1.3 Hasil Pengujian Tracking PS

Tanggal pengujian : 24 – 28 Oktober 2011  
 Lokasi Pengujian : Laboratorium uji PT. Panasonic MFG IND  
 Spesifikasi Tegangan kerja : 220V  
 Supplier : PT. C

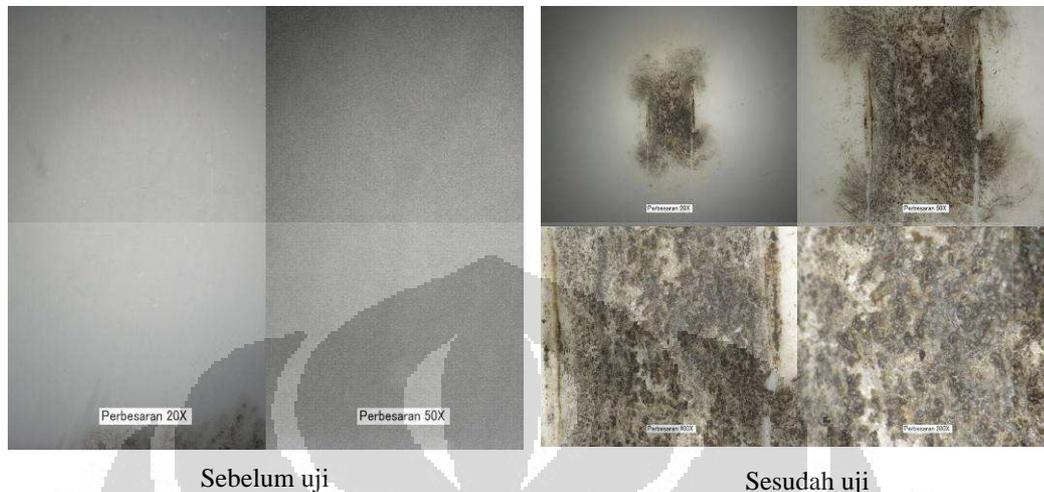
Berikut merupakan data hasil pengujian *tracking* material PS (Polistirena).

Tabel 4.3 Data hasil pengujian *tracking* material PS

Tegangan uji (V)	Arus terukur tertinggi (A)	Jumlah tetesan	Kondisi permukaan	Hasil Pengujian
225	0.030	50	Tidak terbakar	OK
250	0.035	50	Tidak terbakar	OK
275	0.033	50	Tidak terbakar	OK
300	0.034	50	Tidak terbakar	OK
325	0.035	50	Tidak terbakar	OK
350	0.036	50	Tidak terbakar	OK
375	0.028	50	Tidak terbakar	OK
400	0.033	50	Tidak terbakar	OK
425	0.040	50	Tidak terbakar	OK
450	0.038	50	Tidak terbakar	OK
475	0.036	50	Tidak terbakar	OK
500	0.035	50	Tidak terbakar	OK
525	0.037	50	Tidak terbakar	OK
550	0.043	50	Tidak terbakar	OK
575	0.039	50	Tidak terbakar	OK

600	0.045	50	Tidak terbakar	OK
-----	-------	----	----------------	----

### Bentuk permukaan uji material PS



Sebelum uji

Sesudah uji

Gambar 4.8 Bentuk permukaan material PS sebelum dan sesudah uji *tracking*

### Kondisi yang terjadi saat pengujian *tracking*



Gambar 4.9 Terjadi *flashover* pada permukaan uji

Sama dengan material PP, pada material PS ini, *tracking* juga tidak terjadi sampai tegangan dan jumlah tetesan maksimum standar uji *tracking*. *Flashover* dan *electrical discharge* (pelepasan elektrik) juga sempat terjadi beberapa kali pada permukaan material ini seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.9, hanya saja tidak menimbulkan arus *tracking* yang besar melebihi 500mA. Arus terbesar yang terukur hanya bernilai 45mA yang terjadi pada tegangan 600V. Timbulnya beberapa kali *flashover* dan *electrical discharge* ini, juga menyebabkan

permukaan diantara kedua elektroda mengalami fenomena karbonisasi akibat timbulnya percikan api yang menyebabkan permukaan isolasi tersebut sedikit terbakar seperti terlihat pada gambar 4.8 sehingga timbul bekas hangus diantara kedua elektroda tersebut. Akan tetapi, material PS tetap dapat mengisolasi kedua elektroda tersebut dengan baik sehingga *tracking* tidak terjadi pada material ini. Jadi, sama dengan material PP, material PS ini dapat dinyatakan sangat aman digunakan pada tegangan kerja 220V, bahkan sampai tegangan 600V, lebih baik daripada material ABS.

#### 4.1.4 Hasil Pengujian Tracking PVC

Tanggal pengujian : 3 – 7 Oktober 2011  
 Lokasi Pengujian : Laboratorium uji PT. Panasonic MFG IND  
 Spesifikasi Tegangan kerja : 250V  
 Supplier : PT. D

Berikut merupakan data hasil pengujian *tracking* material PVC (Polivinil klorida).

Tabel 4.4 Data hasil pengujian *tracking* material PVC

Tegangan uji (V)	Arus terukur tertinggi (A)	Jumlah tetesan	Kondisi permukaan	Hasil Pengujian
250	0.035	50	Tidak terbakar	OK
275	0.083	50	Tidak terbakar	OK
300	0.061	50	Tidak terbakar	OK
325	0.033	50	Tidak terbakar	OK
350	0.032	50	Tidak terbakar	OK
375	0.033	50	Tidak terbakar	OK
400	0.037	50	Tidak terbakar	OK
425	0.065	50	Tidak terbakar	OK
450	0.032	50	Tidak terbakar	OK
475	0.031	50	Tidak terbakar	OK
500	0.036	50	Tidak terbakar	OK
525	0.743	33	Terbakar	Gagal

### Bentuk permukaan uji material PVC



Sebelum uji

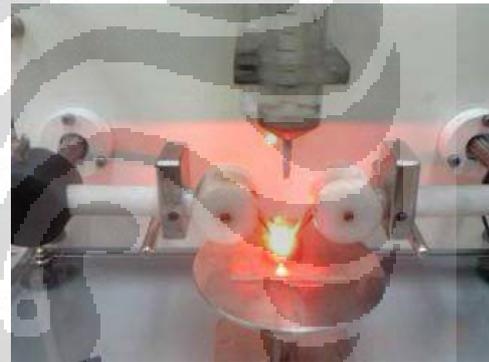
Sesudah uji

Gambar 4.10 Bentuk permukaan material PVC sebelum dan sesudah uji *tracking*

### Beberapa kondisi yang terjadi saat pengujian *tracking*



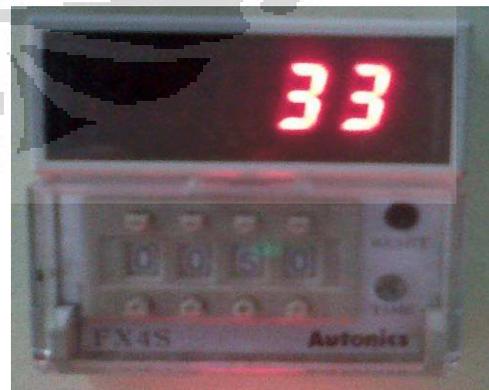
Gambar 4.11 Terjadi *flashover* pada permukaan uji



Gambar 4.12 Permukaan uji terbakar



Gambar 4.13 Arus saat terjadi *tracking*



Gambar 4.14 Jumlah tetesan saat terjadi *tracking*

Berbeda dengan material ABS, PP, dan PS, material PVC yang diuji ini dinyatakan mengalami kegagalan isolasi (*tracking*) pada tegangan 525V, arus *tracking* yang mengalir pada permukaan sebesar 0.743A, dan jumlah tetesan ke 33. Sama dengan material ABS, sesaat setelah terjadi *flashover* dan *tracking* pada permukaan material PVC tersebut, material terbakar seperti yang ditunjukkan gambar 4.10. Ini mengindikasikan juga bahwa material dari jenis PVC ini tidak tahan terhadap api yang timbul akibat terjadinya *flashover* pada permukaan. Akan tetapi, material ini tetap dapat dinyatakan aman dari segi *safety* (keselamatan) produk karena tegangan pada saat terjadi *tracking* jauh diatas tegangan kerja dari material tersebut yaitu sebesar 220V. Hasil uji *tracking* yang di dapat material ini berada pada PTI 500 atau CTI (500)475, lebih baik daripada hasil uji *tracking* material ABS. Dari nilai PTI dan CTI tersebut material ini dapat masuk dalam *material group II* pada pengelompokkan material isolasi berdasarkan standar IEC 60335 yang berarti masih sangat aman untuk digunakan pada tegangan kerja 220V, sama dengan material – material sebelumnya.

#### 4.1.5 Hasil Pengujian Tracking PBT

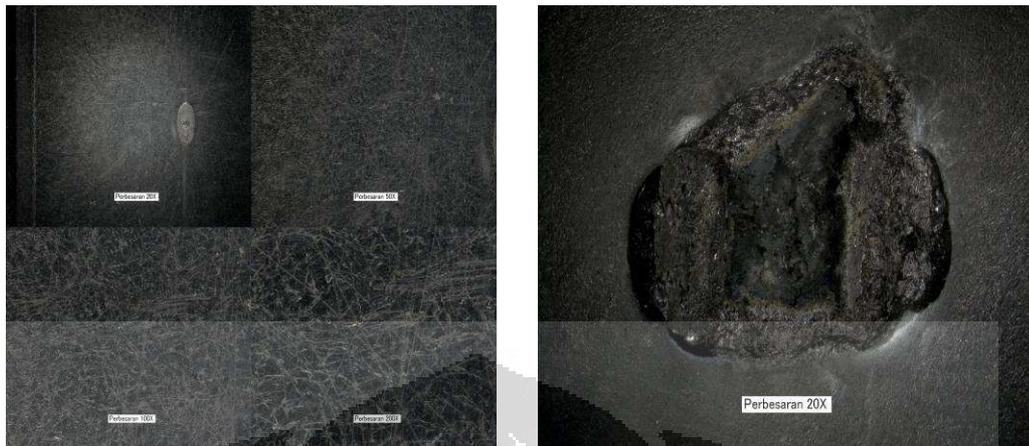
Tanggal pengujian : 26 – 30 September 2011  
 Lokasi Pengujian : Laboratorium uji PT. Panasonic MFG IND  
 Spesifikasi Tegangan kerja : 300V  
 Supplier : PT. E

Berikut merupakan data hasil pengujian *tracking* material PBT (*Polybutylene terephthalate*).

Tabel 4.5 Data hasil pengujian *tracking* material PBT

Tegangan uji (V)	Arus terukur tertinggi (A)	Jumlah tetesan	Kondisi permukaan	Hasil Pengujian
300	0.038	50	Tidak terbakar	OK
325	0.034	50	Tidak terbakar	OK
350	0.036	50	Tidak terbakar	OK
375	0.030	50	Tidak terbakar	OK
400	0.033	50	Tidak terbakar	OK
425	0.033	50	Tidak terbakar	OK
450	0.030	50	Tidak terbakar	OK
475	0.030	50	Tidak terbakar	OK
500	0.870	9	Terbakar	Gagal

### Bentuk permukaan uji material PBT



Sebelum uji

Sesudah uji

Gambar 4.15 Bentuk permukaan material PBT sebelum dan sesudah uji *tracking*

### Beberapa kondisi yang terjadi saat pengujian *tracking*



Gambar 4.16 Terjadi *flashover* pada permukaan uji



Gambar 4.17 Permukaan uji terbakar



Gambar 4.18 Arus saat terjadi *tracking*

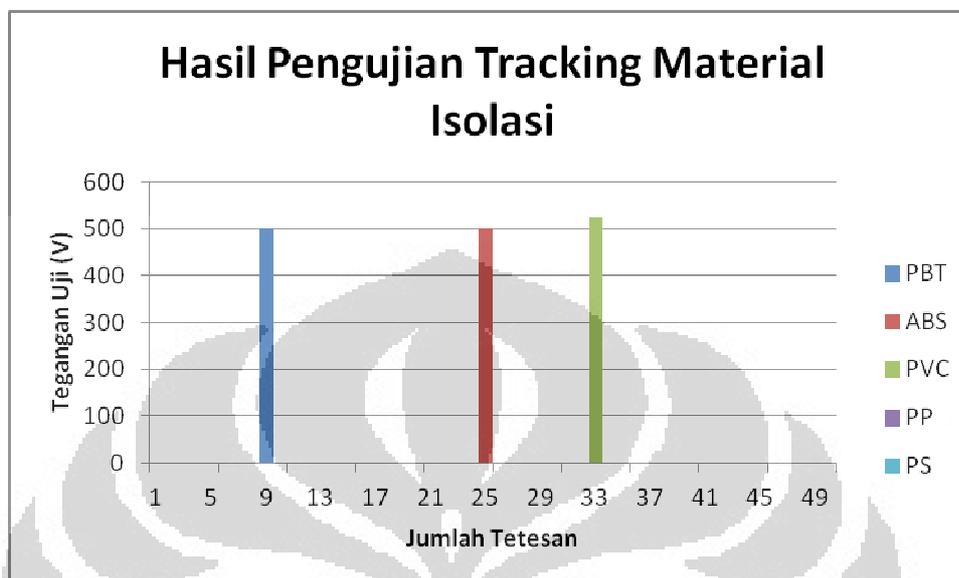


Gambar 4.19 Jumlah tetesan saat terjadi *tracking*

Hasil yang berbeda dengan material ABS, PP, PS, dan PVC juga didapat oleh material PBT. Material PBT yang diuji ini dinyatakan mengalami kegagalan isolasi (*tracking*) pada tegangan yang sama dengan ABS yaitu sebesar 500V, tetapi arus *tracking* dan jumlah tetesannya berbeda. Arus *tracking* yang mengalir pada permukaan sebesar 0.870A, lebih besar dari material – material sebelumnya, dan jumlah tetesan ke 9. Sama dengan material ABS dan PVC, sesaat setelah terjadi *flashover* dan *tracking* pada permukaan material PBT tersebut, material juga terbakar seperti yang ditunjukkan gambar 4.17. Ini mengindikasikan juga bahwa material dari jenis PBT ini tidak tahan juga terhadap api yang timbul akibat terjadinya *flashover* pada permukaan. Akan tetapi, material ini tetap dapat dinyatakan aman dari segi *safety* (keselamatan) produk karena tegangan pada saat terjadi *tracking* juga jauh diatas tegangan kerja dari material tersebut yaitu sebesar 220V. Sama dengan material ABS, hasil uji *tracking* yang di dapat material ini berada pada PTI 475 atau CTI (475)450, akan tetapi material ini dinyatakan lebih buruk daripada hasil uji *tracking* material ABS karena terjadi pada jumlah tetesan yang lebih sedikit. Dari nilai PTI dan CTI tersebut material ini dapat masuk dalam *material group II* pada pengelompokkan material isolasi berdasarkan standar IEC 60335 yang berarti masih sangat aman untuk digunakan pada tegangan kerja 220V, sama dengan material – material sebelumnya.

#### 4.1.6 Analisis Hasil Pengujian Tracking

Hasil pengujian *tracking* dari kelima material isolasi tersebut dapat digambarkan dalam grafik dibawah ini.



Grafik 4.1 Hasil uji *tracking* material isolasi

Untuk membandingkan hasil pengujian *tracking* dari kelima material yang diuji, parameter yang dilihat adalah tegangan uji dan jumlah tetesan larutan elektrolit saat terjadi *tracking*. Semakin besar tegangan uji dan jumlah tetesan saat terjadi *tracking* maka material isolasi tersebut semakin baik ketahanannya terhadap aliran lompatan listrik.

Dari grafik 4.1 hasil pengujian *tracking* material isolasi dapat dilihat bahwa dari kelima material yang diuji tersebut, material dari jenis PBT lah yang paling rendah ketahanan terhadap aliran lompatan listriknya karena material ini sudah mengalami *tracking* pada tegangan uji 500V dan tetesan elektrolit ke-9. Sama dengan material PBT, material ABS juga sudah mengalami *tracking* pada tegangan uji 500V, hanya saja material ABS ini masih bisa tahan terhadap aliran lompatan listrik sampai tetesan elektrolit ke-25. Jadi dapat dikatakan bahwa material ABS ini masih lebih baik jika dibandingkan dengan PBT.

Untuk material PVC tahan terhadap terjadinya *tracking* sampai tegangan 525V, tetesan elektrolit ke-33. Jadi dapat dikatakan bahwa material PVC ini lebih baik ketahanan *tracking*-nya daripada material PBT dan ABS. Sedangkan untuk

material isolasi yang paling baik ketahanan *tracking*-nya dari ke-5 material yang diuji adalah PP dan PS karena kedua material tahan terhadap aliran lompatan listrik (*tracking*) sampai tegangan uji maksimal yaitu 600V.

Sesuai dengan standar, setiap satu jenis material harus memiliki 5 spesimen uji dimana masing – masing spesimen uji tersebut harus dilakukan pengujian. Dengan kata lain, satu jenis material harus diuji sampai lima kali pengujian. Akan tetapi, data hasil uji *tracking* masing – masing material yang ditampilkan pada skripsi ini adalah data hasil uji terendah yang di dapat dari lima kali pengujian masing – masing material tersebut. Hal ini dilakukan untuk mengindikasikan bahwa pada tegangan dan jumlah tetesan larutan elektrolit terendah yang didapat material tersebut sudah dapat mengalami *tracking*. Selain itu, hasil uji yang didapat dari lima kali pengujian tersebut tidak bisa dipastikan sama persis atau mendekati, bahkan hasil uji yang didapat bisa sangat berbeda karena bentuk pori – pori permukaan dari masing – masing spesimen uji tidak ada yang sama persis walaupun diambil dari bagian yang sama, sehingga ketahanan isolasi terhadap akumulasi polutan yang diberikan pun berbeda.

Resistansi suatu permukaan isolator yang terkontaminasi dinyatakan dengan (IEC,1989) :

$$R = \rho_s . FF \quad (4.1)$$

dimana :

$\rho_s$  : resistivitas permukaan isolator

FF : faktor bentuk isolator

$$FF = \int_0^L \frac{dl}{\pi D(l)} \quad (4.2)$$

dengan :

L : jarak rambat isolator

dl : elemen jarak rambat isolator

D(l) : diameter permukaan pada dl

Besarnya arus bocor yang mengalir pada permukaan isolator dinyatakan dengan :

$$I_b = \frac{V_{uji}}{R} \quad (4.3)$$

dimana :

$I_b$  : arus bocor pada permukaan isolator

$V_{uji}$  : tegangan uji yang diberikan

$R$  : resistansi permukaan isolator

Konduktivitas permukaan total isolator menurut IEC(1991) adalah:

$$\sigma_s = I_b \cdot \frac{FF}{V_{uji}} \quad (4.4)$$

maka, besarnya arus bocor permukaan isolator yang terkontaminasi adalah:

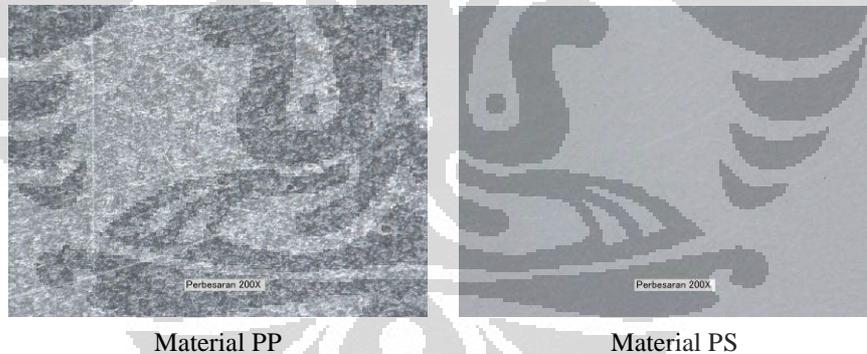
$$I_b = \sigma_s \frac{V_{uji}}{FF} \quad (4.5)$$

Dilihat dari rumus 4.1 sampai 4.5, salah satu faktor yang mempengaruhi proses kegagalan isolator adalah konduktivitas permukaan isolator yang disebabkan akumulasi polutan yang terjadi dipermukaan isolator berupa kontaminasi lingkungan, dapat dinyatakan dengan ESDD (Equivalent Salt Deposit Density/Rapat Endapan Garam Ekivalent). Esdd adalah suatu larutan elektrolit yang berasal dari polutan garam ataupun debu industri yang menempel pada permukaan isolator. Penumpukan lapisan polutan dalam waktu lama bila mengalami pembasahan akan menurunkan tahanan permukaan, ditandai oleh makin membesarnya arus bocor yang mengalir dipermukaan isolator. Peningkatan arus bocor akan menyebabkan pemanasan dan penguapan disekitar lintasan pergerakan muatan yang bersifat sangat konduktif sehingga terbentuk pita kering (dry band). Pita kering merupakan lintasan bagi proses peluahan muatan (discharge). Dengan demikian, intensitas medan menjadi sangat besar sehingga terjadilah lucutan muatan, maka pada bagian yang resistansinya lebih besar akan terhubung secara parallel akibatnya akan mengalir arus bocor pada permukaan. Apabila pita kering memanjang lebih luas melintasi seluruh permukaan isolator dalam waktu lama dan menghubungkan kedua elektroda yang dipisahkannya maka terjadilah *flashover* melalui permukaan isolator tersebut.

Terjadinya *tracking* pada suatu material isolasi disebabkan karena adanya endapan kontaminasi akibat akumulasi polutan pada permukaan isolator tersebut. Suatu material isolasi yang mengalami *flashover* akibat endapan kontaminasi, banyak dipengaruhi oleh kadar endapan pada permukaan isolator tersebut

sehingga diperlukan waktu untuk mencapai tingkat endapan yang berbahaya. Dengan adanya endapan yang makin lama makin banyak, maka akan timbul suatu lapisan tipis pada permukaan isolator, sehingga menyebabkan berkurangnya kekuatan isolasi dan membentuk jalur konduktif pada permukaan tersebut.

Perbedaan hasil *tracking* dari kelima material yang diuji tersebut karena perbedaan kemampuan masing – masing material dalam menyerap kontaminasi yang diberikan, dalam hal ini adalah larutan 0.1% massa amonium klorida anhidrat ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). Material isolasi yang memiliki permukaan yang halus dan pori – pori permukaan yang kecil seperti material PP dan PS, kemampuan penyerapan terhadap kontaminasi yang diberikan lebih rendah sehingga sampai tegangan dan jumlah tetesan maksimum standar pengujian tidak terjadi *tracking*. Sedangkan untuk material isolasi yang memiliki pori – pori permukaan yang lebih besar seperti ABS, PVC, dan PBT, kemampuan penyerapan terhadap kontaminasi yang diberikan lebih besar karena kontaminasi yang berupa larutan garam tersebut dapat mengendap pada pori – pori permukaan sehingga jalur konduktif diantara kedua elektroda dapat terbentuk dan terjadilah *tracking*.



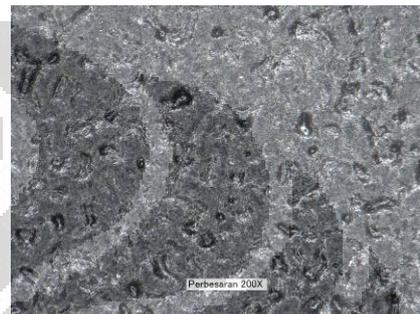
Gambar 4.20 Bentuk permukaan yang memiliki pori – pori permukaan relatif kecil



Material ABS



Material PBT



Material PVC

Gambar 4.21 Bentuk permukaan yang memiliki pori – pori permukaan lebih besar

Selain akumulasi polutan, tegangan dan jarak rambat antara kedua elektroda juga mempengaruhi terjadinya *tracking*. Setiap kenaikan esdd berupa polutan garam pada kondisi lembab akan menyebabkan ion-ion garam terurai membentuk jalur konduktif. Apabila tegangan listrik yang diterapkan pada sampel uji semakin tinggi ditambah dengan jarak rambat antara kedua elektroda yang cukup kecil yaitu hanya 4mm maka elektron-elektron molekul konduktif akan bergerak menyebabkan mengalirnya arus bocor. Arus bocor yang mengalir melalui jalur konduktif akan menimbulkan panas, sehingga terbentuk pita kering pada permukaan sampel. Pada kondisi ini resistansi jalur konduktif bertambah besar. Jika permukaan sampel basah kembali akibat kelembaban atau tetesan elektrolit maka resistansi jalur konduktif akan menurun dan arus bocor akan bertambah besar sehingga kemungkinan terjadinya *tracking* akan semakin besar pula.

## 4.2 Hasil Pengujian dan Analisis Kekuatan Dielektrik

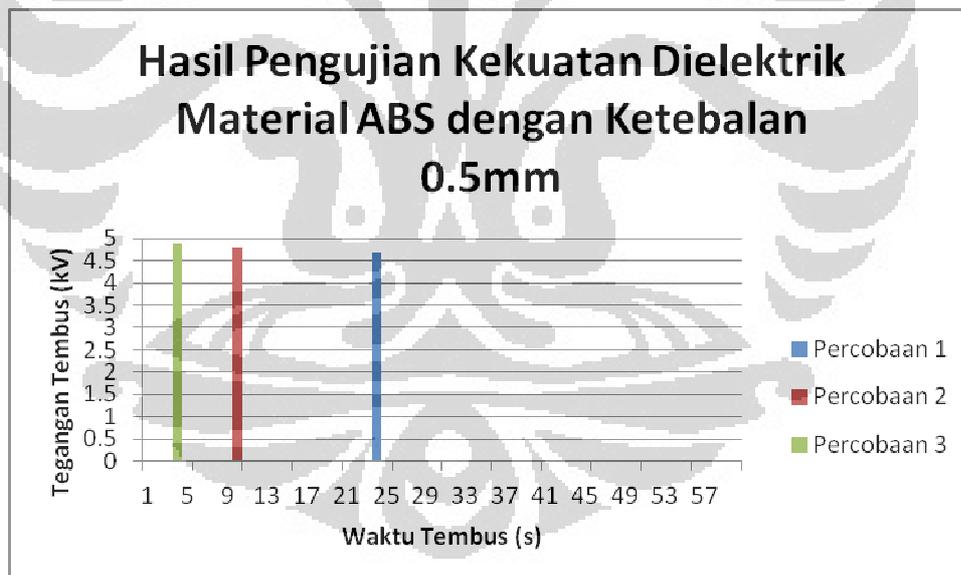
### 4.2.1 Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik ABS

Tanggal pengujian : 7 – 8 November 2011  
 Lokasi Pengujian : Laboratorium uji PT. Panasonic MFG IND  
 Supplier : PT. A

Berikut merupakan data hasil pengujian kekuatan dielektrik material ABS (*Acrylonitrile butadiene styrene*).

Tabel 4.6 Data hasil pengujian kekuatan dielektrik material ABS

Tebal material (mm)	Percobaan 1		Percobaan 2		Percobaan 3		Rata – rata	
	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Teg. tembus rata – rata (kV)	Waktu tembus rata – rata (s)
0.5	4.7	24.53	4.8	10.15	4.9	4.43	4.8	13.04
1	Tidak tembus	-	Tidak tembus	-	Tidak tembus	-	Tidak tembus	-

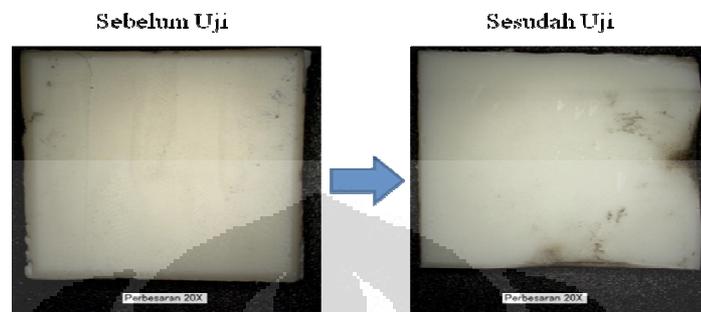


Grafik 4.2 Hasil uji kekuatan dielektrik material isolasi ABS

Dari tabel 4.6 dan grafik 4.2 terlihat bahwa dari tiga kali percobaan / pengujian pada ketebalan 0.5mm, material ABS ini tembus pada tegangan yang cukup bervariasi antara 4.7 kV sampai 4.9 kV dengan waktu tembus yang berbeda. Semakin tinggi tegangan tembusnya maka waktu tembusnya pun semakin cepat. Sedangkan pada material ABS yang memiliki ketebalan 1mm,

material tersebut tidak tembus sampai tegangan maksimum alat uji yang digunakan yaitu 5 kV.

Berikut merupakan gambar permukaan uji sebelum dan sesudah pengujian kekuatan dielektrik ini dilakukan.



Gambar 4.22 Bentuk permukaan uji ABS sebelum dan sesudah uji

Dari gambar 4.22 terlihat bahwa bentuk permukaan ABS sesudah dilakukan pengujian sedikit hangus dan meleleh pada bagian sisinya. Hal ini dikarenakan pada saat tegangan yang diberikan mampu menembus material tersebut, terjadi aliran lompatan listrik yang besar dan cukup panas melewati permukaan material tersebut sehingga tampak bekas hangus seperti pada gambar 4.22. Berikut merupakan gambar pada saat terjadinya tegangan tembus.



Gambar 4.23 Lompatan listrik yang terjadi saat pengujian

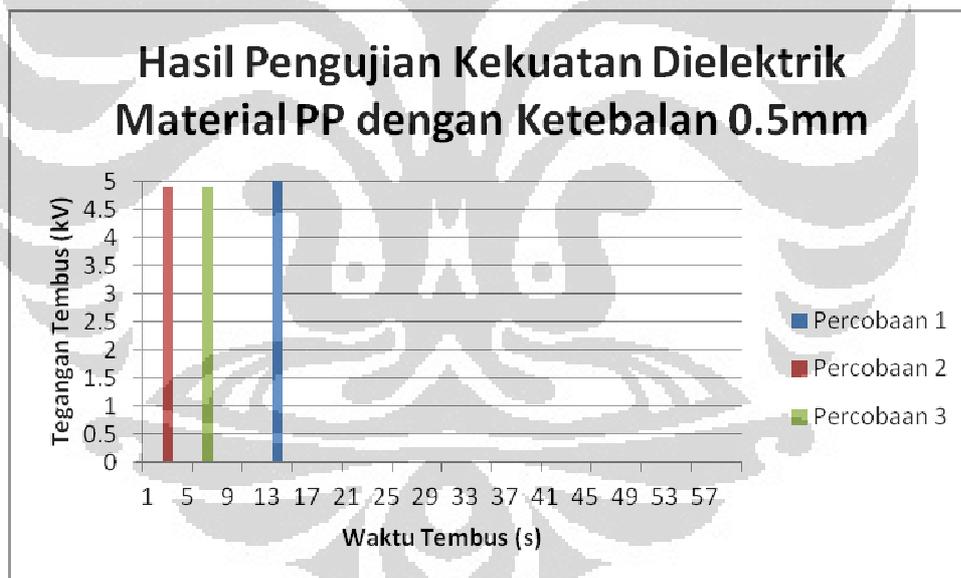
#### 4.2.2 Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik PP

Tanggal pengujian : 9 – 10 November 2011  
 Lokasi Pengujian : Laboratorium uji PT. Panasonic MFG IND  
 Supplier : PT. B

Berikut merupakan data hasil pengujian kekuatan dielektrik material PP (Polipropilena).

Tabel 4.7 Data hasil pengujian kekuatan dielektrik material PP

Tebal material (mm)	Percobaan 1		Percobaan 2		Percobaan 3		Rata – rata	
	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Teg. tembus rata – rata (kV)	Waktu tembus rata – rata (s)
0.5	5.0	14.36	4.9	2.89	4.9	6.98	4.93	8.08
1	Tidak tembus	-	Tidak tembus	-	Tidak tembus	-	Tidak tembus	-

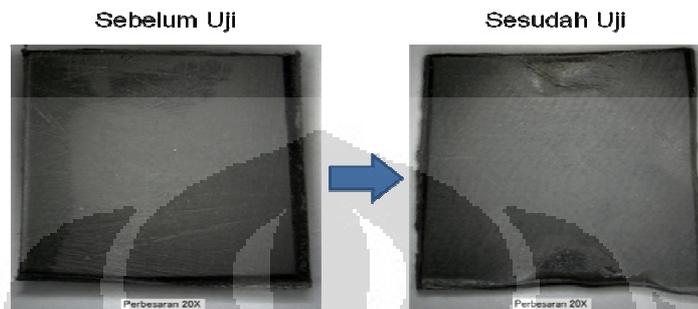


Grafik 4.3 Hasil uji kekuatan dielektrik material isolasi PP

Dari tabel 4.7 dan grafik 4.3 terlihat bahwa dari tiga kali percobaan / pengujian pada ketebalan 0.5mm, material PP ini tembus pada tegangan 4.9 kV dan 5.0 kV dengan waktu tembus yang berbeda. Berbeda dengan material ABS yang berlaku hubungan semakin tinggi tegangan tembusnya maka waktu tembusnya pun semakin cepat, pada material ini hal tersebut tidak terjadi karena justru pada tegangan yang lebih besar waktu tembus yg didapat malah semakin

lama. Hal ini dapat disebabkan karena perbedaan ikatan elektron pada sampel uji. Sedangkan pada material ABS yang memiliki ketebalan 1mm, material tersebut tidak tembus sampai tegangan maksimum alat uji yang digunakan yaitu 5 kV.

Berikut merupakan gambar permukaan uji sebelum dan sesudah pengujian kekuatan dielektrik ini dilakukan.



Gambar 4.24 Bentuk permukaan uji PP sebelum dan sesudah uji

Sama dengan material ABS, dari gambar 4.24 terlihat bahwa bentuk permukaan PP sesudah dilakukan pengujian sedikit hangus dan meleleh pada bagian sisinya. Berikut merupakan gambar pada saat terjadinya tegangan tembus.



Gambar 4.25 Lompatan listrik yang terjadi saat pengujian

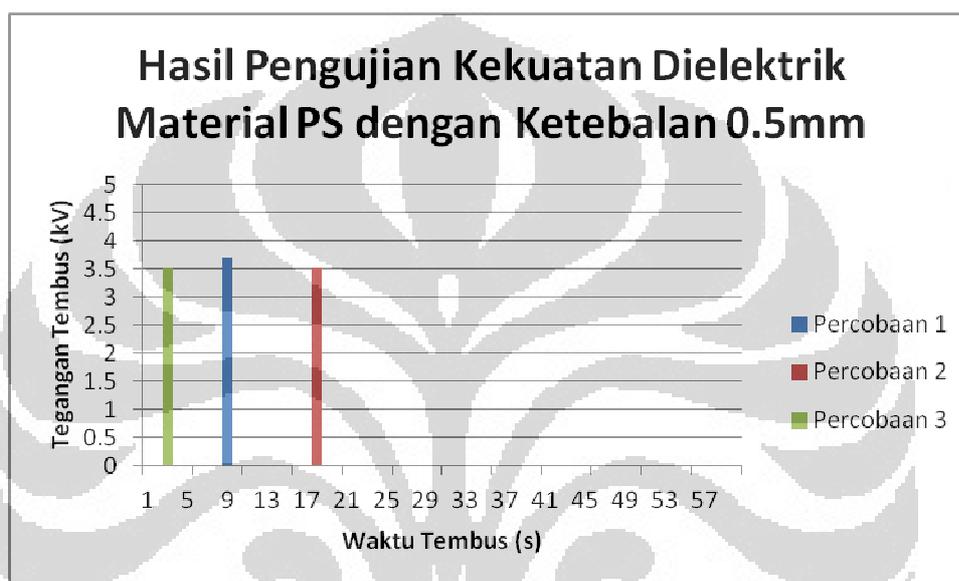
#### 4.2.3 Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik PS

Tanggal pengujian	: 14 – 15 November 2011
Lokasi Pengujian	: Laboratorium uji PT. Panasonic MFG IND
Supplier	: PT. C

Berikut merupakan data hasil pengujian kekuatan dielektrik material PS (Polistirena).

Tabel 4.8 Data hasil pengujian kekuatan dielektrik material PS

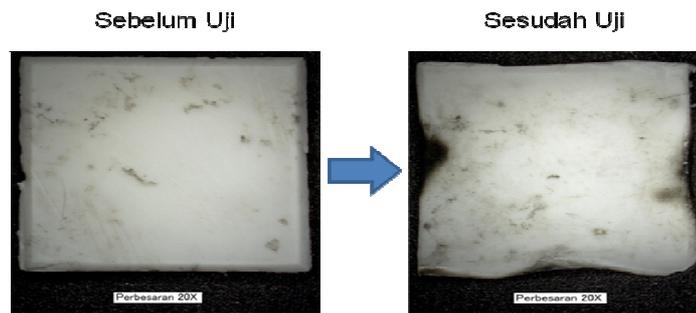
Tebal material (mm)	Percobaan 1		Percobaan 2		Percobaan 3		Rata – rata	
	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Teg. tembus rata – rata (kV)	Waktu tembus rata – rata (s)
0.5	3.7	9.47	3.5	17.62	3.5	3.22	3.57	10.10
1	Tidak tembus	-	Tidak tembus	-	Tidak tembus	-	Tidak tembus	-



Grafik 4.4 Hasil uji kekuatan dielektrik material isolasi PS

Dari tabel 4.8 dan grafik 4.4 terlihat bahwa dari tiga kali percobaan / pengujian pada ketebalan 0.5mm, material PS ini tembus pada tegangan 3.5 kV dan 3.7 kV dengan waktu tembus yang juga bervariasi. Dilihat dari besarnya tegangan tembus, material PS ini memiliki ketahanan dielektrik yang lebih kecil dibandingkan dengan material sebelumnya yaitu ABS dan PP. Akan tetapi, material PS dengan ketebalan 1mm, relatif memiliki ketahanan dielektrik yang sama dengan material ABS dan PP karena material tersebut tidak tembus sampai tegangan maksimum alat uji yang digunakan yaitu 5 kV.

Berikut merupakan gambar permukaan uji sebelum dan sesudah pengujian kekuatan dielektrik ini dilakukan.



Gambar 4.26 Bentuk permukaan uji PS sebelum dan sesudah uji

Sama dengan material – material sebelumnya, dari gambar 4.26 terlihat bahwa bentuk permukaan PS sesudah dilakukan pengujian sedikit hangus dan meleleh pada bagian sisinya. Berikut merupakan gambar pada saat terjadinya tegangan tembus.



Gambar 4.27 Lompatan listrik yang terjadi saat pengujian

#### 4.2.4 Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik PVC

Tanggal pengujian : 3 – 4 November 2011

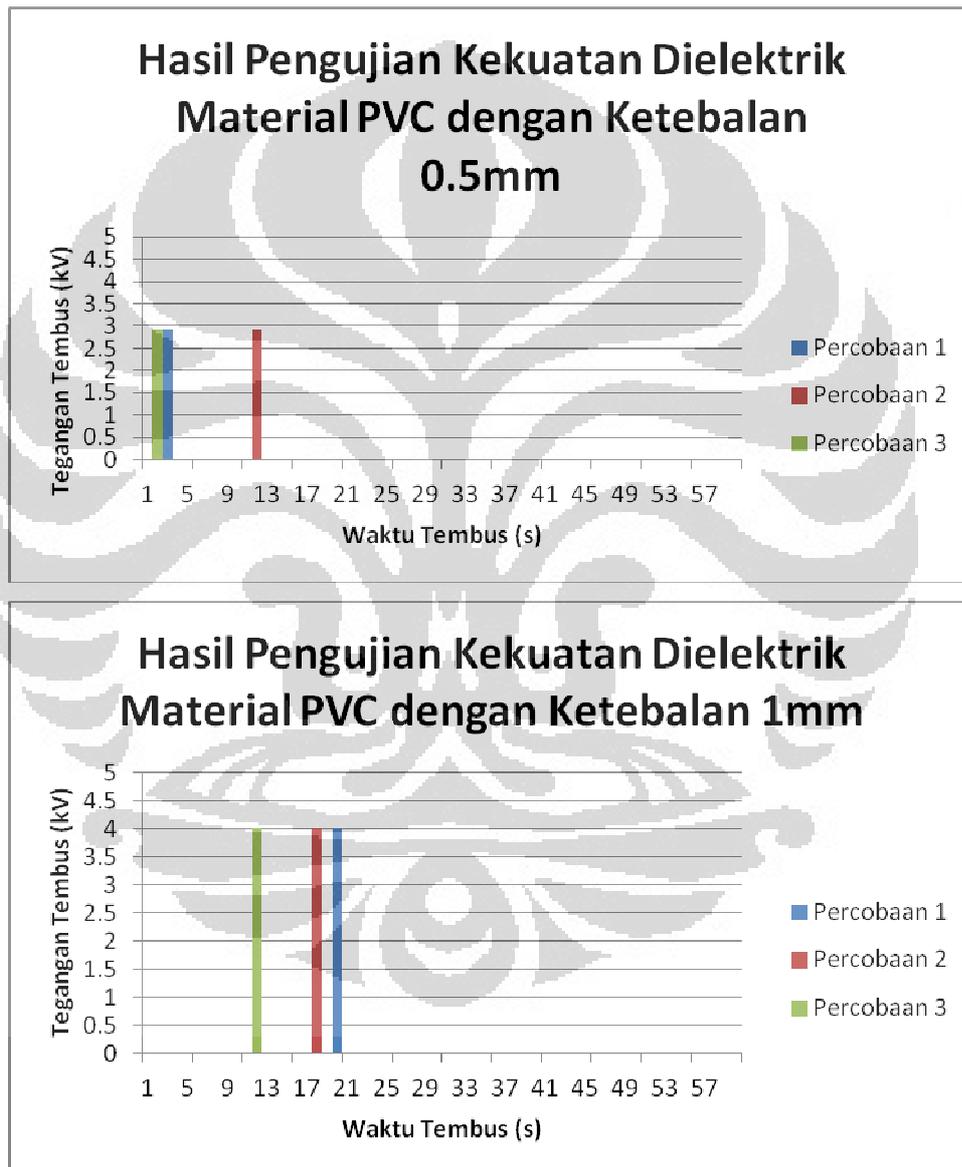
Lokasi Pengujian : Laboratorium uji PT. Panasonic MFG IND

Supplier : PT. D

Berikut merupakan data hasil pengujian kekuatan dielektrik material PVC (Polivinil klorida).

Tabel 4.9 Data hasil pengujian kekuatan dielektrik material PVC

Tebal material (mm)	Percobaan 1		Percobaan 2		Percobaan 3		Rata – rata	
	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Teg. tembus rata – rata (kV)	Waktu tembus rata – rata (s)
0.5	2.9	2.88	2.9	11.53	2.9	2.32	2.9	5.58
1	4.0	19.72	4.0	17.78	3.9	12.69	3.97	16.73

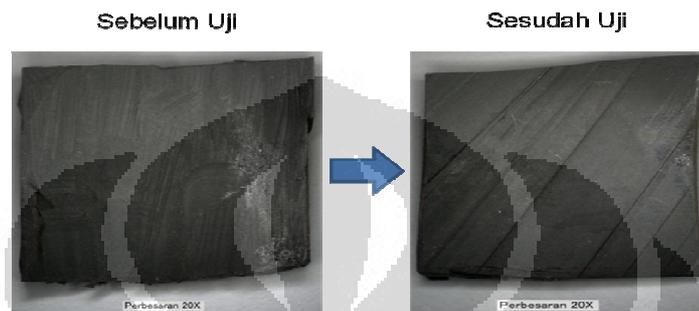


Grafik 4.5 Hasil uji kekuatan dielektrik material isolasi PVC

Dari tabel 4.9 dan grafik 4.5 terlihat bahwa material PVC yang diuji dapat tembus pada ketebalan 0.5mm dan 1mm. Dari tiga kali percobaan / pengujian

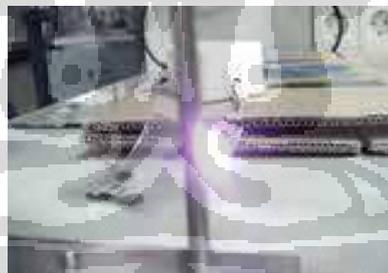
pada ketebalan 0.5mm, material PVC ini tembus pada tegangan 2.9 kV dengan waktu tembus yang bervariasi. Sedangkan pada material yang memiliki ketebalan 1mm, tembus pada tegangan 3.9 kV dan 4.0 kV dengan waktu tembus yang bervariasi juga.

Berikut merupakan gambar permukaan uji sebelum dan sesudah pengujian kekuatan dielektrik ini dilakukan.



Gambar 4.28 Bentuk permukaan uji PVC sebelum dan sesudah uji

Dari gambar 4.28 terlihat bahwa bentuk permukaan PVC sesudah dilakukan pengujian sedikit hangus dan meleleh pada bagian sisinya. Berikut merupakan gambar pada saat terjadinya tegangan tembus.



Gambar 4.29 Lompatan listrik yang terjadi saat pengujian

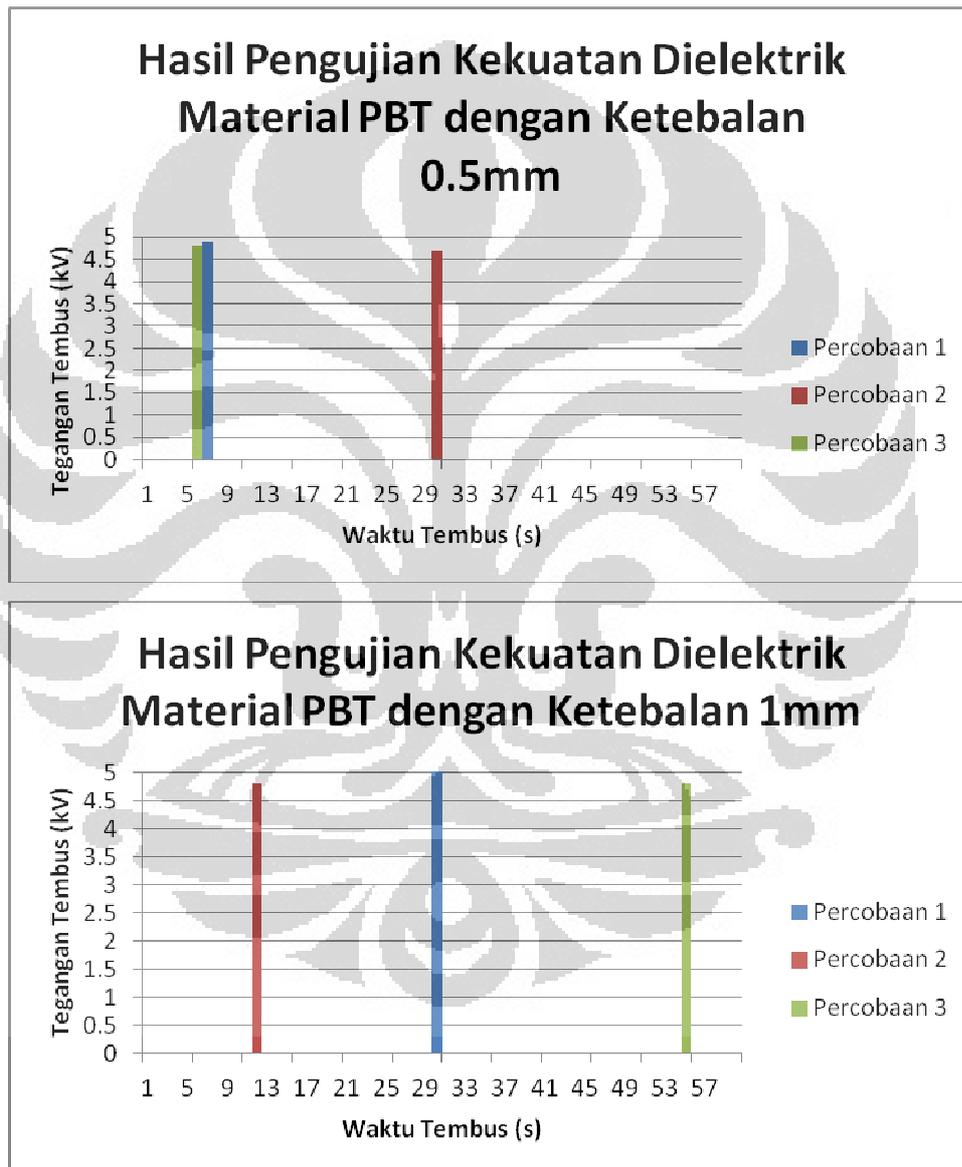
#### 4.2.5 Hasil Pengujian Kekuatan Dielektrik PBT

Tanggal pengujian	: 1 – 2 November 2011
Lokasi Pengujian	: Laboratorium uji PT. Panasonic MFG IND
Supplier	: PT. E

Berikut merupakan data hasil pengujian kekuatan dielektrik material PBT (*Polybutylene terephthalate*).

Tabel 4.10 Data hasil pengujian kekuatan dielektrik material PBT

Tebal material (mm)	Percobaan 1		Percobaan 2		Percobaan 3		Rata – rata	
	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Tegangan tembus (kV)	Waktu tembus (s)	Teg. tembus rata – rata (kV)	Waktu tembus rata – rata (s)
0.5	4.9	6.74	4.7	29.80	4.8	5.70	4.8	14.08
1	5.0	29.74	4.8	12.47	4.8	55.08	4.87	32.43

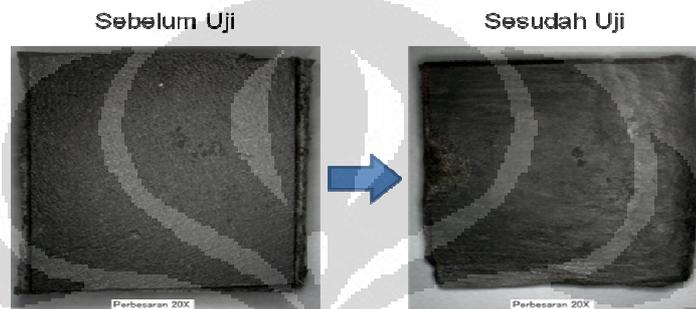


Grafik 4.6 Hasil uji kekuatan dielektrik material isolasi PBT

Sama dengan material PVC, dari tabel 4.10 dan grafik 4.6 terlihat bahwa material PBT yang diuji dapat tembus juga pada ketebalan 0.5mm dan 1mm.

Akan tetapi, besarnya tegangan tembus yang didapat dari material ini lebih besar daripada tegangan tembus pada material PVC. Dari tiga kali percobaan / pengujian pada ketebalan 0.5mm, material PBT ini tembus pada tegangan 4.7 kV, 4.8 kV dan 4.9 kV dengan waktu tembus yang bervariasi. Sedangkan pada material yang memiliki ketebalan 1mm, tembus pada tegangan 5.0 kV dan 4.8 kV dengan waktu tembus yang bervariasi juga.

Berikut merupakan gambar permukaan uji sebelum dan sesudah pengujian kekuatan dielektrik ini dilakukan.



Gambar 4.30 Bentuk permukaan uji PBT sebelum dan sesudah uji

Dari gambar 4.30 terlihat bahwa bentuk permukaan PBT sesudah dilakukan pengujian sedikit hangus dan meleleh pada bagian sisinya. Berikut merupakan gambar pada saat terjadinya tegangan tembus.



Gambar 4.31 Lompatan listrik yang terjadi saat pengujian

#### 4.2.6 Analisis Hasil Uji Kekuatan Dielektrik

Perbandingan hasil uji kekuatan dielektrik dari kelima material isolasi dapat dilihat dari tabel berikut.

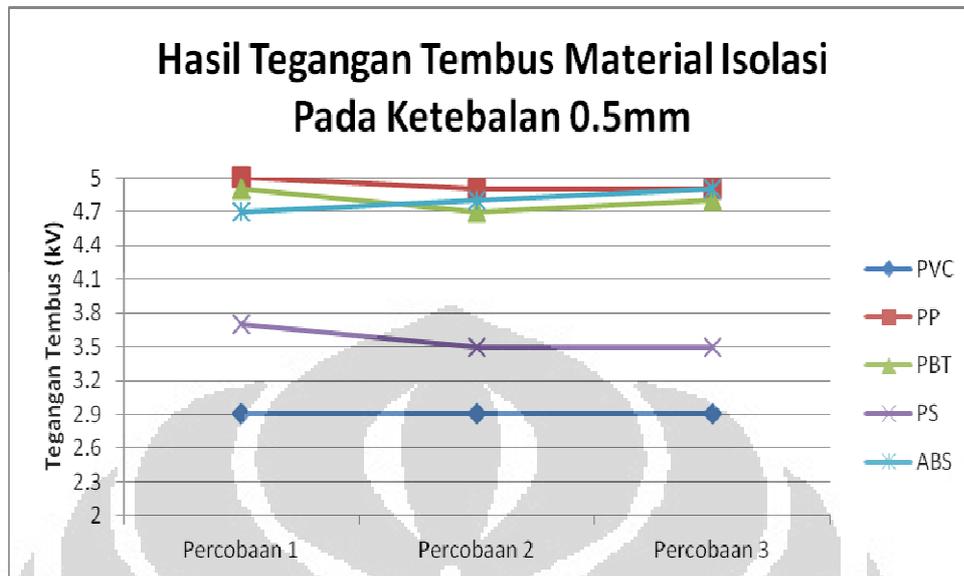
Tabel 4.11 Hasil uji kekuatan dielektrik material isolasi pada ketebalan 0.5mm

Tegangan Tembus (kV)	Jenis Material				
	ABS	PP	PS	PVC	PBT
Teg. Tembus 1	4.7	5.0	3.7	2.9	4.9
Teg. Tembus 2	4.8	4.9	3.5	2.9	4.7
Teg. Tembus 3	4.9	4.9	3.5	2.9	4.8
Rata – rata	4.8	4.93	3.57	2.9	4.8

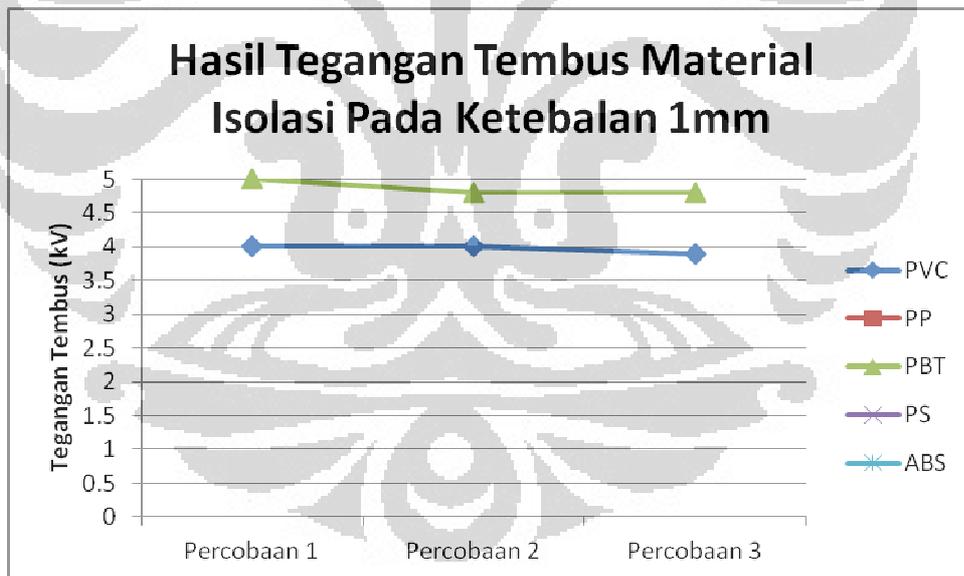
Tabel 4.12 Hasil uji kekuatan dielektrik material isolasi pada ketebalan 1mm

Tegangan Tembus (kV)	Jenis Material				
	ABS	PP	PS	PVC	PBT
Teg. Tembus 1	Tidak tembus	Tidak tembus	Tidak tembus	4.0	5.0
Teg. Tembus 2	Tidak tembus	Tidak tembus	Tidak tembus	4.0	4.8
Teg. Tembus 3	Tidak tembus	Tidak tembus	Tidak tembus	3.9	4.8
Rata – rata	Tidak tembus	Tidak tembus	Tidak tembus	3.97	4.87

Hasil pengujian kekuatan dielektrik dari kelima material isolasi tersebut dapat digambarkan dalam grafik dibawah ini.



Grafik 4.7 Hasil uji kekuatan dielektrik material isolasi pada ketebalan 0.5mm



Grafik 4.8 Hasil uji kekuatan dielektrik material isolasi pada ketebalan 1mm

Material isolasi yang memiliki tegangan tembus yang besar menandakan bahwa material tersebut memiliki ketahanan dielektrik yang baik. Jadi, semakin besar tegangan tembus dari suatu material isolasi, semakin baik pula ketahanan dielektriknya.

Perbandingan hasil uji kekuatan dielektrik dari kelima material isolasi dengan ketebalan 0.5mm dapat dilihat pada tabel 4.11 dan grafik 4.7. Dari tabel 4.11 dan grafik 4.7 terlihat dari kelima material isolasi yang diuji, material PP memiliki nilai rata – rata tegangan tembus yang paling besar yaitu 4.93 kV; di ikuti dengan material ABS dan PBT memiliki rata – rata tegangan tembus yang sama besar yaitu 4.8 kV; material PS memiliki rata – rata tegangan 3.57 kV; material PVC memiliki rata – rata tegangan tembus yang paling kecil yaitu 2.9 kV. Sedangkan untuk ketebalan 1mm, dari tabel 4.12 dan grafik 4.8 terlihat, untuk material ABS, PP, dan PS tidak tembus pada tegangan uji maksimal yaitu 5 kV; material PBT tembus pada tegangan rata – rata 4.87 kV; material PVC tembus pada tegangan rata – rata yang paling kecil yaitu 3.97 kV.

Isolator dapat bertahan terhadap tegangan listrik bergantung pada kekuatan hancur dielektrik. Tegangan listrik maksimum yang dapat ditahan suatu isolator tanpa merusak sifat isolasinya ini dinyatakan dengan rumus :

$$E = \frac{V_{bd}}{h} \quad (4.6)$$

dengan :

$E$  = kekuatan hancur dielektrik (kV/mm)

$V_{bd}$  = tegangan tembus dielektrik / material isolasi (kV)

$h$  = ketebalan dielektrik (mm)

dimana untuk material polimer :

$$h = d^n \quad (4.7)$$

dengan :

$d$  = ketebalan (mm)

$n$  = konstanta dari keadaan yang diuji, tergantung dari macam benda uji

nilai  $n = 0$  untuk tegangan arus searah dan  $n$  berkisar 0.3 sampai 0.5 untuk tegangan bolak – balik.

Kekuatan hancur dielektrik yang dirumuskan pada persamaan 4.6 merupakan kekuatan ikatan atom polimer pada masing – masing material. Perbedaan ketahanan dielektrik dari kelima material isolasi ini dikarenakan perbedaan kekuatan ikatan atom polimer tersebut. Atom dalam material isolasi memiliki elektron yang sangat terikat erat, menahan aliran elektron bebas dengan sangat baik. Namun, isolator tidak bisa menahan jumlah tegangan yang tak

terbatas. Dengan suatu tegangan besar diberikan, bahan isolasi akhirnya akan menyerah pada "tekanan" listrik dan aliran elektron akan terjadi. Setelah arus dipaksa mengalir melalui bahan isolasi, maka kerusakan (*breakdown*) struktur molekul material terjadi. Kerusakan struktur molekul material menyebabkan material isolasi ini tidak bersifat isolator lagi untuk sementara waktu.

Dari hasil percobaan yang telah dilakukan, kelima material yang diuji ini akan kembali berubah menjadi isolator kurang lebih sekitar 30 menit sampai 1 jam setelah pengujian dilakukan. Hal ini disebabkan struktur molekul material yang telah rusak karena tegangan yang diberikan, kembali membentuk ikatan – ikatan polimer sehingga material tersebut kembali bersifat isolator. Akan tetapi, kemampuan isolasinya berkurang dari sebelumnya karena ikatan – ikatan polimernya tidak kembali secara sempurna. Hal ini disebabkan karena ada bagian permukaan yang hangus dan meleleh akibat timbulnya api berupa lompatan listrik pada saat terjadi tegangan tembus seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.22, 4.24, 4.26, 4.28, dan 4.30. Hangus dan melelehnya kelima material uji ini karena material – material ini bersifat termoplastik.

Polimer yang bersifat termoplastik pada dasarnya memiliki ikatan antar polimer yang lemah. Sehingga jika diberi suatu tegangan listrik atau panas, ikatan antar polimer tersebut semakin melemah dan polimer tersebut dapat berubah bentuk seperti menjadi hangus atau meleleh. Bahkan jika diberi panas dan tekanan tertentu, material tersebut dapat berubah menjadi bentuk yang baru. Hal inilah yang menyebabkan kemampuan isolasi dari material yang diuji berkurang dari kondisi sebelum dilakukan pengujian.

Dari tabel 4.11, 4.12 dan persamaan 4.6 dapat dilihat juga bahwa ketebalan suatu material isolasi berpengaruh juga terhadap kekuatan dielektriknya. Semakin tebal material isolasi yang diuji, maka nilai tegangan tembus yang didapat juga semakin besar. Hal ini disebabkan karena semakin tebal permukaan uji suatu material maka nilai resistansi dari material tersebut semakin besar pula sehingga material tersebut mampu menahan tegangan yang lebih besar daripada material yang memiliki ketebalan yang lebih kecil.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

Berdasarkan data dan analisa hasil pengujian yang telah diperoleh maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Dilihat dari segi keselamatan (*safety*), dapat dipastikan bahwa kelima material isolasi yang telah diuji yaitu material ABS, PP, PS, PVC, dan PBT, cukup aman digunakan pada tegangan kerja 220V karena hasil uji yang didapat jauh diatas standar (*safety*) yang ditentukan.
2. Dilihat dari kedua parameter uji yang telah dilakukan yaitu pengujian *tracking* dan pengujian kekuatan dielektrik, material yang memiliki ketahanan isolasi yang paling baik diantara kelima material yang diuji (ABS, PP, PS, PVC, dan PBT) adalah material isolasi PP (Polipropilena).

## DAFTAR REFERENSI

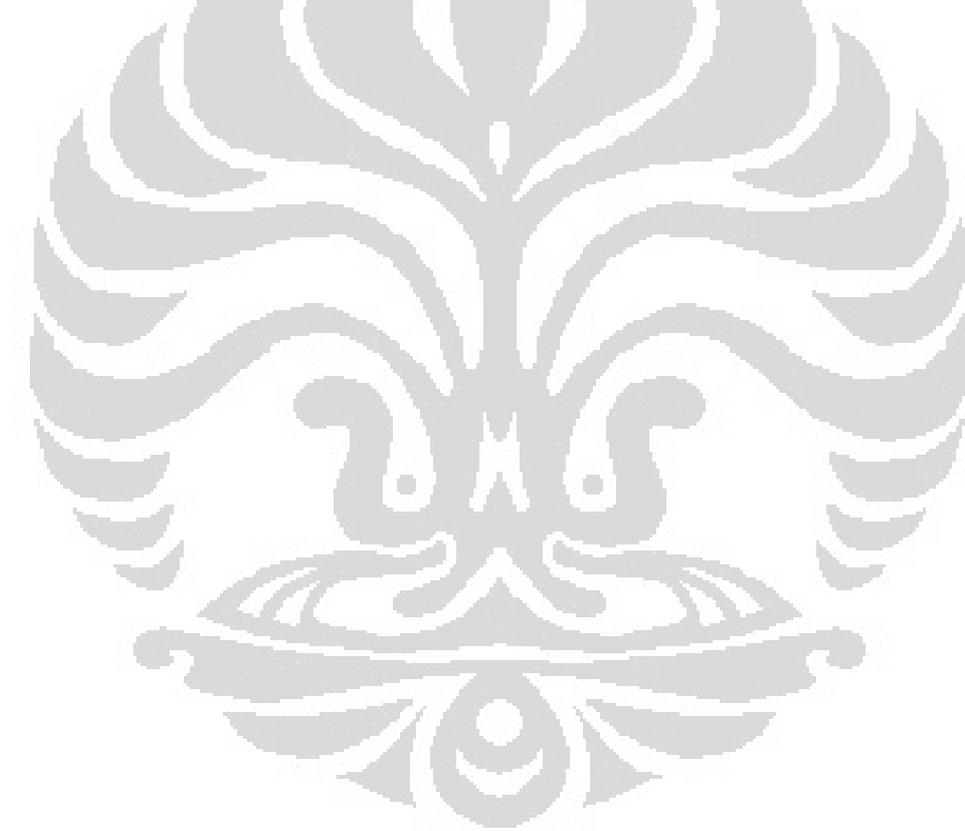
- Acrylonitrile butadiene styrene.* (2011). January 18, 2011. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=404000439>
- Arifianto. (2008). *Analisis Karakteristik Termal Pada Kabel Berisolasi Berselubung PVC Tegangan Pengenal 300 / 500V.* January 13, 2012. <http://lontar.ui.ac.id>
- Dielektrik padat. (2011). June 30, 2011. <http://modalholong.files.wordpress.com/2011/03/>
- International Electrotechnical Commission.* (2011). May 22, 2011. <http://www.iec.ch>
- International Electrotechnical Commission. (2001). *IEC 60335-1, Household and similar electrical appliances – safety.*
- International Electrotechnical Commission. (2003). *IEC 60112, Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials.*
- Sedyadi, Djoko., Tumiran, and Hamzah Berahim. (2001). *Pengaruh Kontaminan Terhadap Arus Bocor Pada Isolator Gantung.* Desember 2, 2011. [i-lib.ugm.ac.id/jurnal/download.php?dataId=8537](http://i-lib.ugm.ac.id/jurnal/download.php?dataId=8537)
- Setiabudy, Rudy. (2007). *Material teknik listrik.* Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press) .
- Suryanto, Agus., T. Haryono, and Tumiran. (2005). *Efek Polutan Garam Pada Kegagalan Tegangan Isolator Gantung dengan Analisis Data Memakai Program Bantu Matlab.* Desember 2, 2011. [i-lib.ugm.ac.id/jurnal/download.php?dataId=6771](http://i-lib.ugm.ac.id/jurnal/download.php?dataId=6771)
- Polipropilena.* (2011). February 10, 2011. <http://id.wikipedia.org/w/index.php?oldid=3377121>
- Polybutylene terephthalate.* (2011). January 18, 2011. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=399081610>
- Polybutylene terephthalate (PBT).* (2011). November 8, 2011. <http://www.dowell.com.hk/whatisPBT.htm>
- Polystyrene.* (2011). January 18, 2011. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=408467500>

*Polistirena.* (2011). February 10, 2011. <http://id.wikipedia.org/w/index.php?oldid=3853697>

Prihatnolo, Sasmito Teguh., Abdul Syakur, ST, MT., and Mochammad Facta, ST, MT. (2011). *Pengukuran Tegangan Tembus Dielektrik Udara Pada Berbagai Sela dan Bentuk Elektroda dengan Variasi Temperatur Sekitar.* November 11, 2011. [www.elektro.undip.ac.id/el\\_kpta/upload/L2F302524\\_MTA.pdf](http://www.elektro.undip.ac.id/el_kpta/upload/L2F302524_MTA.pdf)

*PVC (polivinil klorida).* (2011). January 18, 2011. <http://id.wikipedia.org/w/index.php?oldid=3596040>

Zulkaida, Wa Ode., & Tambi. (2007). *Flashover Voltage, Leak Current and ESDD Performance Test On Epoksi Resin Polymer Which To Experience Different Filler Treatment For High Voltage Isolator In Tropic Region.* Desember 5, 2011. [jurnal.unhalu.ac.id/.../FLASHOVER%20VOLTAGE..](http://jurnal.unhalu.ac.id/.../FLASHOVER%20VOLTAGE..)





# LAMPIRAN

# MATERIAL PROPERTIES OF ABS POLYMERS

## Mechanical Properties

Quantity	Value	Unit
Young's modulus	2275 - 2900	MPa
Shear modulus	700 - 1050	MPa
Tensile strength	41 - 60	MPa
Elongation	5 - 25	%
Compressive strength	60 - 86	MPa
Fatigue	11 - 22	MPa
Impact strength	0.56 - 2.2	J/cm

## Physical Properties

Quantity	Value	Unit
Thermal expansion	50 - 85	e-6/K
Thermal conductivity	0.17 - 0.188	W/m.K
Specific heat	1260 - 1675	J/kg.K
Glass temperature	105 - 105	°C
Service temperature	-20 - 80	°C
Density	1060 - 1080	kg/m <sup>3</sup>
Resistivity	1e+15 - 2.7e+20	Ohm.mm <sup>2</sup> /m
Breakdown potential	14 - 20	kV/mm
Dielectric loss factor	0.003 - 0.03	
Refraction index	1.6 - 1.6	
Shrinkage	0.4 - 0.7	%
Water absorption	0.2 - 0.45	%

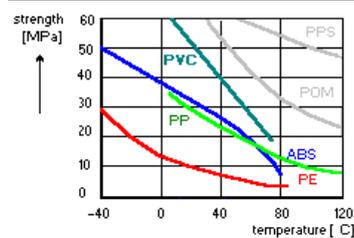
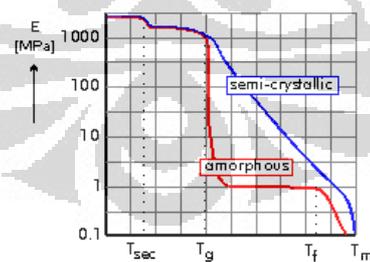
## Environmental Data

Quantity	Value	Unit
Eco indicator 95	2.81	mPt
EPS	1040	mELU
Ex (in) / Ex (out)	3.09324009324009	MJ/MJ
GER	86.71	MJ
Raw materials input	22.800271	kg
Solid	0.121583	kg
Eco indicator 99	0.4	Pt
Environmental remarks	Figures for the production of 1 kg of ABS in Europe. Average data for 1995.	

## General

Remarks	Market price regranulates 0.80 to 1.05 EURO/kg.
---------	---

## SAMPLE: COMMODITY POLYMERS



# MATERIAL PROPERTIES OF PP POLYMERS

## Mechanical Properties

Quantity	Value	Unit
Young's modulus	1100 - 1550	MPa
Shear modulus	300 - 500	MPa
Tensile strength	30 - 38	MPa
Elongation	200 - 700	%
Compressive strength	38 - 55	MPa
Fatigue	24 - 24	MPa
Bending strength	32 - 50	MPa
Impact strength	0.27 - 1.1	J/cm

## Physical Properties

Quantity	Value	Unit
Thermal expansion	58 - 150	e-6/K
Thermal conductivity	0.12 - 0.22	W/m.K
Specific heat	1.927 - 2	J/kg.K
Melting temperature	165 - 165	°C
Glass temperature	-10 - -10	°C
Service temperature	-10 - 105	°C
Density	902 - 906	kg/m <sup>3</sup>
Resistivity	1e+21 - 1e+21	Ohm.mm <sup>2</sup> /m
Breakdown potential	50 - 65	kV/mm
Dielectric loss factor	0.001 - 0.001	
Friction coefficient	0.3 - 0.5	
Refraction index	1.49 - 1.49	
Shrinkage	1 - 2.5	%
Water absorption	0.01 - 0.01	%

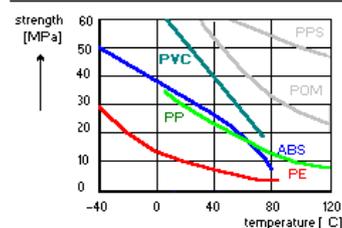
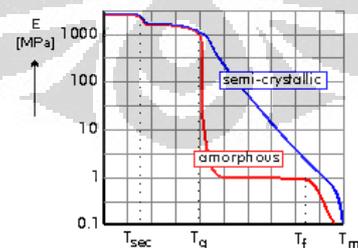
## Environmental Data

Quantity	Value	Unit
Eco indicator 95	2.82	mPt
EPS	846	mELU
Ex (in) / Ex (out)	1.77521237203224	MJ/MJ
GER	82	MJ
Raw materials input	4.7773	kg
Solid	0.03103	kg
Eco indicator 99	0.38	Pt
Environmental remarks	Average data of 14 European production plants. LCA from extraction to production of PP granules. Feedstock fuels calculated with E-Oil=40MJ/kg, Egas = 38MJ/kg.	

## General

Remarks	Price recycled material 0.46 - 0.53 EURO/kg. PP is not or difficult to bond with an adhesive. Bonding is only possible with cyano-acrylate after the application of a primer. With cyano-acrylate it is not possible to bond glass, stone and concrete.
---------	---

## SAMPLE: COMMODITY POLYMERS



# MATERIAL PROPERTIES OF PS POLYMERS

## Mechanical Properties

Quantity	Value	Unit
Young's modulus	1800 - 2500	MPa
Shear modulus	730 - 1050	MPa
Tensile strength	26 - 48	MPa
Elongation	25 - 60	%
Compressive strength	27.5 - 62	MPa
Fatigue	4 - 20	MPa
Bending strength	42 - 95	MPa
Impact strength	0.27 - 5	J/cm

## Physical Properties

Quantity	Value	Unit
Thermal expansion	34 - 70	e-6/K
Thermal conductivity	0.12 - 0.18	W/m.K
Specific heat	1340 - 1465	J/kg.K
Service temperature	-40 - 75	°C
Density	1040 - 1050	kg/m <sup>3</sup>
Resistivity	1e+17 - 0	Ohm.mm <sup>2</sup> /m
Breakdown potential	40 - 100	kV/mm
Dielectric loss factor	0.0004 - 0.002	
Shrinkage	0.4 - 0.7	%
Water absorption	0.05 - 0.6	%

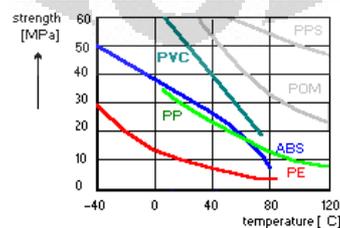
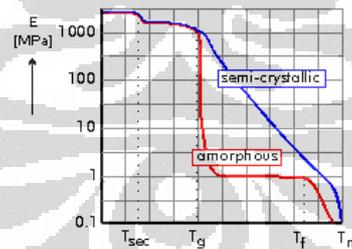
## Environmental Data

Quantity	Value	Unit
Eco indicator 95	2.803	mPt
EPS	1200	mELU
Ex (in) / Ex (out)	3.78494623655914	MJ/MJ
GER	100.5	MJ
Raw materials input	201.712063	kg
Solid	0.03776	kg
Eco indicator 99	0.488	Pt
Environmental remarks	Data from about 10 plants producing 700000 tonne Polystyrene in 1994.	

## General

Remarks	High Impact Polystyrene is often mentioned as SB (styrene-butadiene). HIPS is also available as foam and reinforced with glass. Price recycled material 0.68 - 0.74 EURO/ kg
---------	--

## SAMPLE: COMMODITY POLYMERS



# MATERIAL PROPERTIES OF PVC POLYMERS

## Mechanical Properties

Quantity	Value	Unit
Young's modulus	2410 - 4140	MPa
Tensile strength	34.5 - 62	MPa
Elongation	2 - 40	%
Compressive strength	55 - 90	MPa
Fatigue	7 - 8	MPa
Impact strength	0.22 - 1	J/cm

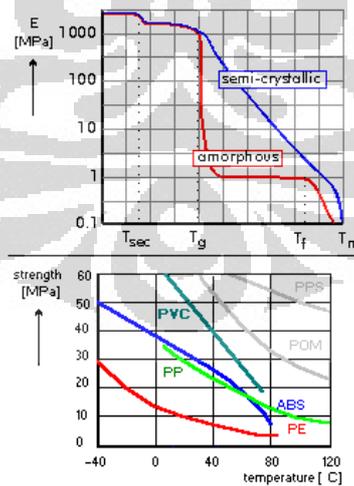
## Physical Properties

Quantity	Value	Unit
Thermal expansion	50 - 80	e-6/K
Thermal conductivity	0.126 - 0.293	W/m.K
Specific heat	840 - 1170	J/kg.K
Glass temperature	80 - 90	°C
Service temperature	-10 - 70	°C
Density	1350 - 1550	kg/m <sup>3</sup>
Resistivity	1e+21 - 5e+23	Ohm.mm <sup>2</sup> /m
Breakdown potential	16.7 - 51.2	kV/mm
Dielectric loss factor	0.007 - 0.02	
Friction coefficient	0.45 - 0.55	
Refraction index	1.52 - 1.55	
Shrinkage	0.2 - 2.5	%
Water absorption	0.07 - 0.4	%

## Environmental Data

Quantity	Value	Unit
Eco indicator 95	2.95	mPt
EPS	550	mELU
Ex (in) / Ex (out)	2.76510416666667	MJ/MJ
GER	54.94	MJ
Raw materials input	117.919479	kg
Solid	0.010791	kg
Eco indicator 99	0.219	Pt
Environmental remarks	Inputs and outputs associated with the production of 1 kg suspension (general purpose) PVC granulate in Europe averaged over all the polymerisation processes	

## SAMPLE: COMMODITY POLYMERS



# MATERIAL PROPERTIES OF PBT POLYMERS

## Mechanical Properties

Quantity	Value	Unit
Young's modulus	2600 - 2700	MPa
Shear modulus	900 - 900	MPa
Tensile strength	40 - 60	MPa
Bending strength	85 - 125	MPa
Impact strength	0.5 - 0.5	J/cm
Yield strength	15 - 200	MPa

## Physical Properties

Quantity	Value	Unit
Thermal expansion	50 - 70	e-6/K
Thermal conductivity	0.25 - 0.25	W/m.K
Specific heat	1000 - 1000	J/kg.K
Glass temperature	60 - 60	°C
Service temperature	-30 - 120	°C
Density	1290 - 1310	kg/m <sup>3</sup>
Resistivity	1e+20 - 1e+20	Ohm.mm <sup>2</sup> /m
Breakdown potential	42 - 42	kV/mm
Dielectric loss factor	0.002 - 0.02	
Friction coefficient	0.21 - 0.25	
Refraction index	1.55 - 1.55	
Shrinkage	0.8 - 2	%
Water absorption	0.5 - 0.6	%

## General

Remarks	No resistance against strong acids, phenol, lyes and hot water.
---------	---

## SAMPLE: ENGINEERING POLYMERS

