



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERHITUNGAN PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN PADA RONGGA
UDARA DI DALAM ISOLASI *ETHYLENE PROPYLENE RUBBER***

SKRIPSI

DALLIH WARVIYAN

06 06 02 9391

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERHITUNGAN PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN PADA RONGGA
UDARA DI ISOLASI ETHYLENE PROPYLENE RUBBER**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

DALLIH WARVIYAN
06 06 02 9391

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Dallih Warviyan

NPM : 0606029391

Tanda Tangan :

Tanggal : 15 Juni 2010

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur saya panjatkan hanya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan rahmatNya, saya dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak dari masa perkuliahan hingga saat penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT, hanya kepada Engkau lah aku menyembah dan hanya kepada Engkau lah aku memohon.
2. Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk membimbing saya dalam penulisan skripsi ini.
3. Orang tua dan adik-adik saya yang selalu mendukung saya dalam berbagai keadaan baik dengan dukungan moril maupun materil.
4. Teman-teman Elektro 2006, yang selalu memberikan keceriaan di berbagai kesempatan. David, Andre (teman seperjuangan skripsi), all Gatrikers (peminatan paling solid :p), Adit (ketua angkatan yang rajin donlotin jurnal), pokoknya hidup Elektro 2006!
5. Radium Ikono, my old pal, NTU student who help me with his journal access and discussion about polymer..Thanks indeed bro!
6. Teman-teman asrama PPSDMS, terima kasih telah menjadikan saya bagian dari kalian..khususnya untuk Andi Kristian (mas'ul asrama yang laptopnya gua pinjem mulu, thanks so much bro!)
7. cocopet (Ialsomissthetimewhenwewentallaroundthecity).

Dan semua pihak yang telah membantu saya dalam penulisan skripsi ini namun tidak dapat saya sebutkan satu persatu, saya ucapkan terima kasih dan semoga Allah SWT membalas kebaikan semuanya. Saya sadar skripsi ini tidak luput dari kesalahan dan kekurangan, oleh karena itu saya sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, saya sangat berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat yang seluas-luasnya bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Dallih Warviyan
NPM : 0606029391
Program Studi : Elektro
Departemen : Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**PERHITUNGAN PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN
PADA RONGGA UDARA DI DALAM ISOLASI
*ETHYLENE PROPYLENE RUBBER***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 15 Juni 2010

Yang menyatakan,

(Dallih Warviyan)

ABSTRAK

Nama : Dallih Warviyan
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : PERHITUNGAN PELEPASAN MUATAN SEBAGIAN PADA RONGGA UDARA DI DALAM ISOLASI ETHYLENE PROPYLENE RUBBER

Pelepasan muatan sebagian merupakan salah satu fenomena awal dari kegagalan isolasi. Partial discharge ini disebabkan oleh ketidakhomogenan bahan isolasi yang dapat disebabkan oleh adanya *void* (rongga udara), tonjolan (*protusions*) dan *contaminants*. Pada skripsi ini akan dibahas mengenai perhitungan pelepasan muatan sebagian pada rongga udara yang ada di isolasi EPR

Kata Kunci : *void, internal partial discharge, EPR*

ABSTRACT

Name : Dallih Warviyan
Major : Electrical Engineering
Title : CALCULATION OF INTERNAL PARTIAL DISCHARGE IN VOID WITHIN ETHYLENE PROPYLENE RUBBER INSULATION

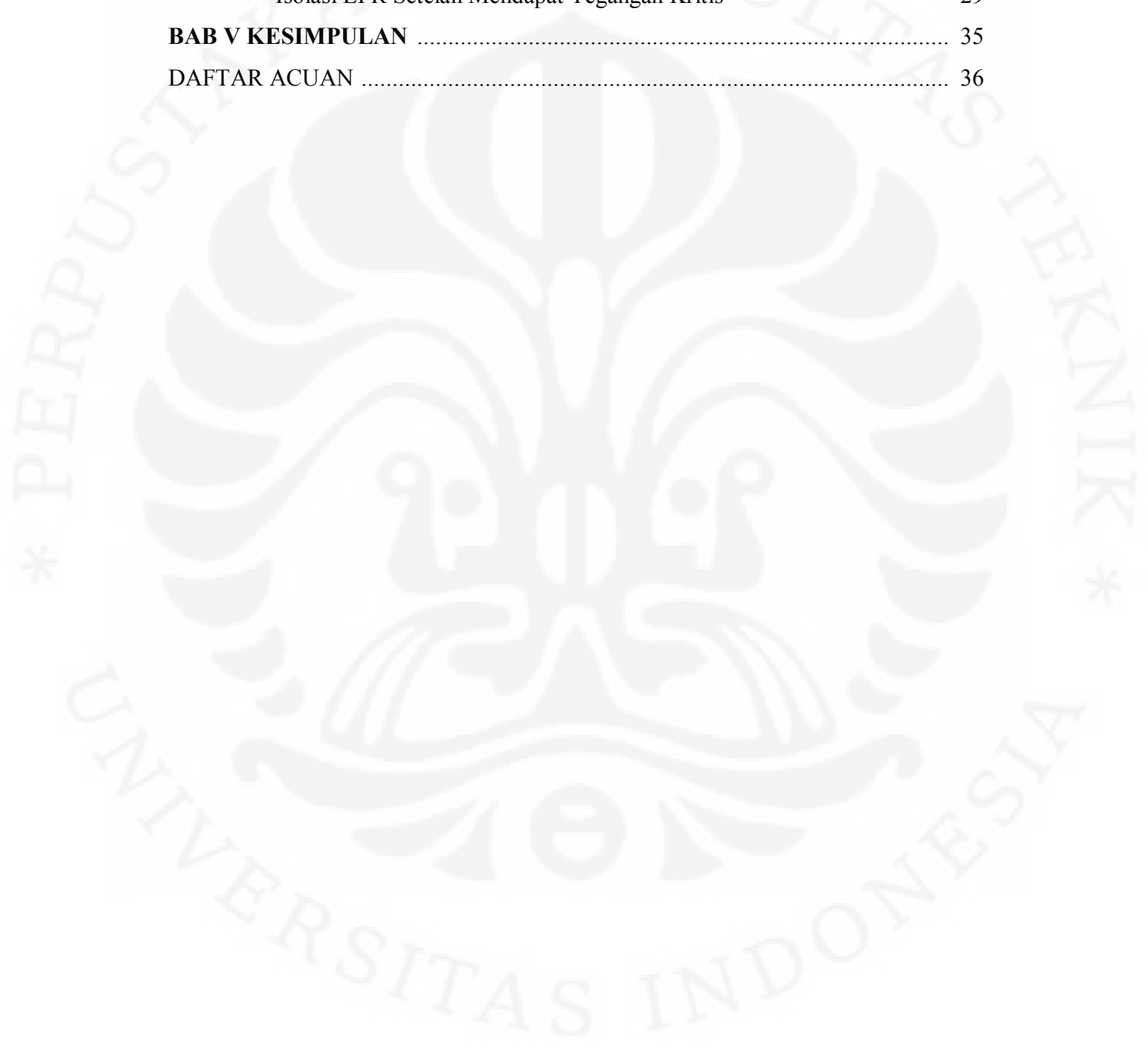
Internal partial discharge is one of the pre breakdown insulation phenomenons. This is caused by inhomogeneous of the insulation which is caused by voids, protrusions, contaminants. In this paper will be calculated about the internal partial discharge in void within ethyelen propylene rubber insulation.

Keyword : *void, internal partial discharge, EPR*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
UCAPAN TERIMA KASIH	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	iv
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Tujuan Penulisan	1
1.3 Pembatasan Masalah	2
1.4 Metodologi Penulisan	2
1.5 Sistematika Penulisan	2
BAB 2 DASAR TEORI	3
2.1 Isolasi Ethylene Propylene Rubber	3
2.2 Pengertian Pelepasan Muatan Sebagian Internal (<i>Internal Partial Discharge</i>)	4
2.3 Penyebab Terjadinya Pelepasan Muatan Sebagian Pada Sambungan Kabel Tanah	
20 kV	5
2.4 Pelepasan Muatan Sebagian Pada Pemohonan Listrik	5
BAB 3 Perhitungan Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara di	
Isolasi Ethylene Propylene Rubber	8
3.1 Model Dari Suatu Rongga	8
3.2 Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian Pada Isolasi	11
BAB 4 Analisis dan Perhitungan Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada	
Rongga Udara Di Isolasi EPR	16
4.1 Data Perhitungan	16

4.2 Metode Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara di Isolasi EPR	20
4.2.1 Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara di Isolasi EPR Sebelum Mendapat Tegangan Kritis.....	25
4.2.2 Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara di Isolasi EPR Setelah Mendapat Tegangan Kritis	29
BAB V KESIMPULAN	35
DAFTAR ACUAN	36



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Hasil Penelitian Teguh Herbasuki

Tabel 4.2 Hasil Pengamatan Diameter Rongga dan Kerapatan Rongga Udara

Tabel 4.3 Kerapatan Rongga Udara per mm² sebelum mendapat tegangan kritis

Tabel 4.4 Kerapatan Rongga Udara per mm² setelah mendapat tegangan kritis

Tabel 4.5 Diameter rongga yang lebih dari 20 µm sebelum mendapat tegangan kritis

Tabel 4.6 Diameter rongga yang lebih dari 20 µm setelah mendapat tegangan kritis

Tabel 4.7 Besarnya Pelepasan Muatan Sebagian dan Kuat Medan Listrik pada Isolasi EPR sampel 1

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 1

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 2

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 3

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 4

Tabel 4.12 Jumlah rongga dengan diameter lebih dari 20 µm dan besar pelepasan muatan sebagian

Tabel 4.13 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 1 (setelah mendapatkan tegangan kritis)

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 2 (setelah mendapatkan tegangan kritis)

Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 3 (setelah mendapatkan tegangan kritis)

Tabel 4.16 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 4 (setelah mendapatkan tegangan kritis)

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 4 (setelah mendapatkan tegangan kritis)

Tabel 4.18 Perbandingan Jumlah rongga yang berdiameter lebih dari 20 µm dengan besar pelepasan muatan sebagian

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kabel Berisolasi EPR

Gambar 2.2 Struktur Kimia EPR

Gambar 3.1 Skema rongga dalam isolasi EPR pada sambungan

Gambar 3.2 Rangkaian ekivalen bahan isolasi berongga

Gambar 3.3 Penampang Kabel Tenaga

Gambar 3.4 Rangkaian Ekivalen Rongga Udara Pada Isolasi

Gambar 3.5 Mekanisme Pelepasan Muatan Sebagian

Gambar 4.1 Sampel Pengamatan kerapatan rongga udara dan diameter rongga udara

Gambar 4.2 Model Rongga Udara Pada Isolasi EPR

Gambar 4.3 Grafik Pelepasan Muatan Sebagian terhadap Tegangan

Gambar 4.4 Grafik Pelepasan Muatan Sebagian Jumlah rongga udara

Gambar 4.5 Grafik Pelepasan Muatan Sebagian terhadap Tegangan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permintaan akan energi listrik akan semakin bertambah dari tahun-tahun. Oleh karena itu, tuntutan akan infrastruktur pembangkitan, transmisi dan distribusi tenaga listrik yang aman, andal dan ekonomis semakin meningkat. Daya yang dibutuhkan pun semakin besar.

Masalah timbul saat kita ingin menambah daya yang ingin dibangkitkan, ditransmisikan dan didistribusikan. Masalah tersebut timbul pada kualitas isolasi tenaga listrik yang harus ditingkatkan pula. Oleh karena itu, teknologi isolasi tenaga listrik pasti akan berkembang setiap tahunnya. Banyak penelitian-penelitian yang telah dilakukan mengenai teknologi isolasi ini.

Kualitas isolasi ditentukan oleh seberapa kuat isolasi tersebut tahan terhadap tekanan yang ada, baik tekanan elektrik maupun tekanan mekanik. Apabila kualitas isolasi rendah maka isolasi tersebut mudah mengalami kegagalan isolasi, begitu juga sebaliknya apabila kualitas isolasi baik maka isolasi tersebut tidak mudah mengalami kegagalan isolasi.

Sebagian besar kegagalan isolasi diawali oleh adanya pelepasan muatan sebagian (*internal partial discharge*) dalam isolasi tersebut. Faktor utama yang menyebabkan fenomena *internal partial discharge* ini adalah adanya *void* (rongga) pada isolasi polimer tersebut. *Void* dapat terjadi saat pabrikan, instalasi maupun operasi kabel. Pada skripsi ini akan dibahas mengenai perhitungan pelepasan muatan sebagian pada isolasi EPR (*ethylene propylene rubber*).

1.2 Tujuan

Tujuan dari skripsi ini adalah mengetahui besar pelepasan muatan sebagian yang terjadi di dalam sebuah kabel tenaga yang berisolasi EPR.

1.3 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada seminar ini dibatasi hanya pada perhitungan pelepasan muatan sebagian yang terjadi di dalam *void* (rongga udara) yang terdapat pada isolasi EPR sebuah kabel tenaga.

1.4 Metodologi Penulisan

Metode penulisan yang digunakan pada laporan kerja praktik ini adalah,

1. Studi literatur, yaitu dengan membaca buku-buku berkaitan dengan isolasi EPR pada kabel dan pelepasan muatan sebagian pada void di isolasi.
2. Perhitungan matematis besar dari pelepasan muatan sebagian pada void di isolasi

1.5 Sistematika Penulisan

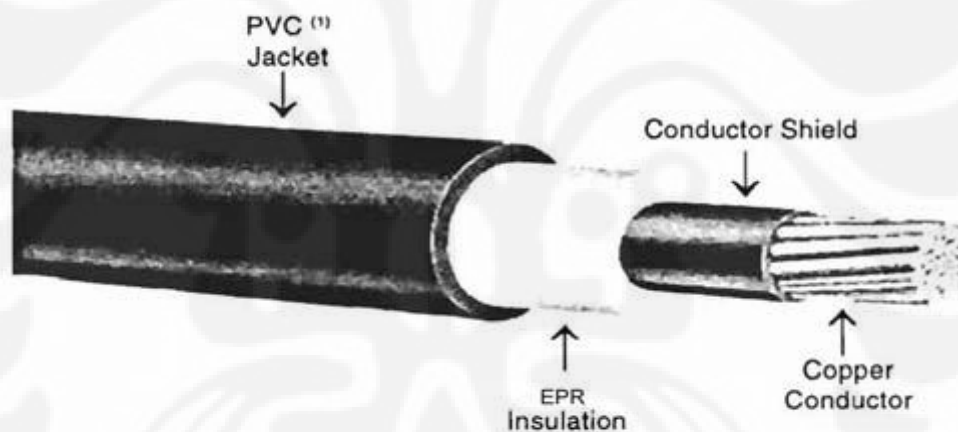
Skripsi ini dibagi menjadi lima bab yang diawali dengan Bab Satu yang menjelaskan tentang latar belakang, tujuan dari penulisan skripsi ini, batasan masalah yang diambil, metodologi studi yang dilakukan dan sistematika penulisan. Kemudian pada Bab Dua akan dijelaskan sekilas mengenai isolasi EPR dan pengertian dari pelepasan muatan sebagian. Bab Tiga perhitungan besar pelepasan muatan sebagian pada isolasi EPR yang memiliki rongga udara. Selanjutnya analisa dan penyajian data hasil perhitungan akan dijelaskan di Bab Empat. Akhirnya pada Bab Lima akan dipaparkan kesimpulan dari skripsi ini.

BAB 2

DASAR TEORI

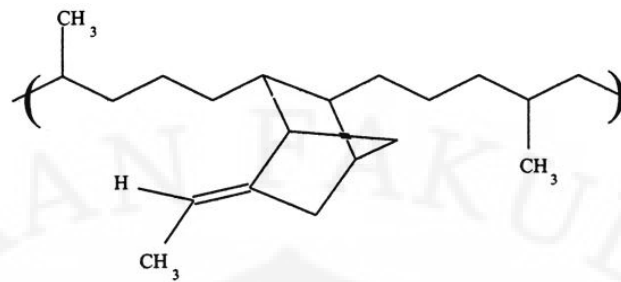
2.1 Isolasi Ethylene Propylene Rubber

Karet sintetik (*synthetic rubber*) banyak digunakan secara luas untuk berbagai keperluan, contohnya seperti industri otomotif, radiator, membrane *roofing* dan juga isolasi kabel listrik. Dalam kegunaannya untuk isolasi tenaga listrik karet sintetik khusus bernama *ethylene propylene rubber* (EPR) biasa digunakan untuk isolasi kabel tenaga ataupun sambungan kabel. Berikut adalah contoh gambar dari kabel yang berisolasi EPR [9] :



Gambar 2.1 Kabel Berisolasi EPR [9]

EPR memiliki beberapa keunggulan diantaranya adalah memiliki resistansi termal (*heat resistance*), tahan terhadap oksidasi dan tahan terhadap pengaruh cuaca. Berikut adalah struktur kimia dari EPR :



Gambar 2.2 Struktur Kimia EPR [7]

2.2 Pengertian Pelepasan Muatan Sebagian Internal (*Internal Partial Discharge*)

Pelepasan muatan sebagian internal adalah pelepasan atau perpindahan muatan listrik sesaat dalam bahan isolasi kabel dari satu tempat ke tempat lain karena adanya bahan dielektrik yang tidak homogen misalnya terdapat rongga udara. Pelepasan muatan sebagian internal terjadi bila intensitas medan listrik lokal melampaui kekuatan dielektrik (*dielectric strength*) dari bahan dielektrik yang bersangkutan, yang mengakibatkan ionisasi lokal sehingga terjadi kegagalan dari bahan dielektrik. Pelepasan muatan sebagian sering kali disertai oleh emisi cahaya, panas, dan suara, tergantung dari intensitasnya serta menyebabkan terjadinya penurunan kemampuan isolasi.

Untuk bahan polimer penurunan kemampuan isolasi dapat disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu:

1. Penurunan kemampuan isolasi polimer tingkat rendah akibat mekanisme mikroskopik penuaan, seperti penuaan fisik, penuaan kimia, penuaan listrik, dan kombinasi antara penuaan mekanik dan elektrik.
2. Penurunan kemampuan isolasi akibat adanya medan listrik pada tegangan nominal (kerja) seperti kegagalan panas, kegagalan elektromekanik dan kegagalan karena pelepasan muatan sebagian.

Kedua faktor penurunan kemampuan isolasi diatas hanyalah merupakan proses terhadap suatu kegagalan isolasi bahan isolasi polimer adalah ketidaksempurnaan bahan isolasi tersebut, misalnya adanya rongga yang terjadi sejak permulaan pabrikan pembuatan bahan tersebut. Rongga ini akan terisi oleh bahan lain seperti

gas atau cairan yang memiliki kekuatan kegagalan yang lebih rendah dari bahan isolasi, yang berarti bahwa konstanta dielektrik di dalam rongga (ϵ_v berkisar ≈ 1) menjadi lebih rendah dari konstanta dielektrik bahan isolasi (ϵ_r berkisar ≈ 3). Keadaan ini akan mengakibatkan intensitas medan listrik dalam rongga menjadi lebih besar dari pada intensitas bahan isolasi. Oleh karena itu, memungkinkan terjadinya kegagalan tegangan di dalam rongga karena gas atau cairan di dalam rongga sudah tidak mampu lagi menahan kuat medan listrik tersebut, walaupun hanya diterapkan tegangan nominal. Kejadian ini yang biasanya disebut sebagai pelepasan muatan sebagian internal dalam bahan isolasi.

2.3 Penyebab Terjadinya Pelepasan Muatan Sebagian Pada Sambungan Kabel Tanah 20 kV

Gejala pelepasan muatan sebagian terjadi terutama akibat adanya rongga pada isolasi sambungan. Adanya medan listrik pada rongga tersebut akan mengakibatkan gradien tegangan listrik yang secara bertahap akan mengakibatkan kegagalan isolasi.

Beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya pelepasan muatan sebagian pada sambungan kabel tanah 20 kV adalah:

1. Kecerobohan pada saat penyiapan kabel yang akan disambung.
2. Kebersihan pelaksanaan penyambungan kabel.
3. Pelaksanaan instalasi yang tidak sempurna.
4. Waktu pendinginan hasil instalasi yang belum memadai.
5. Timbulnya degradasi tingkat rendah pada sambungan kabel termasuk penuaan fisik, penuaan kimiawi, dan penuaan elektrik serta penuaan kombinasi mekanis dan elektrik.

2.4 Pelepasan Muatan Sebagian Pada Pemohonan Listrik

Pemohonan listrik merupakan salah satu degradasi pada bahan isolasi padat berupa struktur mirip pohon, bercabang-cabang akibat medan listrik tak seragam yang sangat tinggi pada antarmuka (interface) antara bahan isolasi dengan konduktor atau induksi dari rongga atau ketidakhomogenitas dalam bahan. Pemohonan listrik akan berkembang terus dan menjembatani kedua elektroda melalui bahan

isolasi sehingga kegagalan isolasi tak dapat dihindari. Pemohonan listrik merupakan degradasi pada bahan isolasi padat yang paling berbahaya dan paling sering dijumpai. Hampir semua kegagalan isolasi padat disebabkan oleh pemohonan listrik ini. Pada saat pemohonan listrik ini berkembang, sebagaimana halnya pada rongga, pelepasan muatan sebagian juga dipancarkan. Hal yang menguntungkan adalah bahwa pola pelepasan muatan sebagian pada rongga berbeda dengan pada pemohonan listrik. Di samping itu, pelepasan muatan sebagian pada rongga maupun pada pemohonan listrik berubah sesuai dengan tingkat degradasi bahan isolasi padat yang sedang menahan medan elektrik tinggi. Pemohonan listrik ditemukan tumbuh pada daerah medan listrik tinggi pada isolasi akibat adanya zat pengotor dan ketidakteraturan struktur. Pelapisan isolasi EPR pada konduktor saat melakukan penyambungan kabel tanah sering terjadi cacat. Cacat tersebut dapat berupa:

- a. Rongga, yaitu lubang-lubang kosong berupa gelembung udara.
- b. Kotoran-kotoran, seperti logam dan bahan-bahan serat yang menimbulkan medan listrik tinggi sehingga bahan isolasi tersebut menjadi terlalu panas dan memburuk (*contaminants*).
- c. Tonjolan lapisan semikonduktor (*protision*) yang mengakibatkan tidak meratanya medan listrik dalam isolasi sehingga memperendah tegangan tembus.
- d. Ketidakseragaman mikroskopis dalam bahan isolasi (*inhomogenitas*).

Pelepasan muatan sebagian dalam rongga dapat menimbulkan degradasi struktur permukaan yang pada dasarnya adalah pemohonan listrik (*electrical tree*). Ada tiga kategori pemohonan, yaitu *tree like tree* atau *tree like branch*, *tree like bush* dan *bus-branch*. Ketiga bentuk ini dapat diilustrasikan pada gambar 3.4. *Branch tree* mempunyai range diameter 10 μm – 30 μm di batang hingga sekitar 1 μm di ujung runcing filamen saluran. *Tree bush branch* pada dasarnya merupakan *bush tree* dengan satu atau lebih cabang proyeksi. Di samping pemohonan listrik, sambungan kabel bawah tanah EPR yang diinstalasikan kemungkinan besar juga mengalami kerusakan isolasi berupa timbulnya pemohonan air (*water tree*) pada rongganya. Medan listrik yang tinggi terlokalisasi di suatu tempat pada

sambungan kabel sehingga air masuk ke dalam lapisan EPR melalui proses difusi. Proses ini dipercepat oleh adanya gradien suhu, perbedaan tekanan uap dalam sambungan, dan polarisasi dalam molekul-molekul air. Air yang terkonsentrasi ini membentuk elektroda air dan menaikkan gradien potensial. Bila mengalami vibrasi dalam medan listrik bolak-balik maka ujung elektroda air itu akan menghasilkan tekanan yang berulang-ulang sehingga menyebabkan retak yang akan terus bertambah bercabang-cabang.

Berdasarkan arah pembentukannya, pemohonan air terdiri atas [3]:

a. Vented Tree

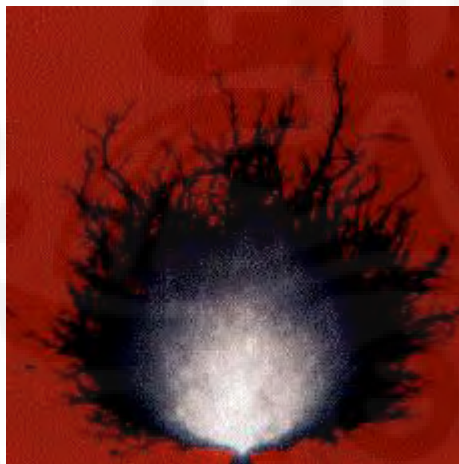
Pemohonan tumbuh dari permukaan bahan isolasi menuju sisi lain isolasi sepanjang sumbu kuat medan listrik.

b. Bow – tie Tree

Pemohonan tumbuh dari bagian tengah isolasi menuju ke arah permukaan isolasi dalam dua arah yang berlawanan sepanjang garis-garis medan listrik.

Berdasarkan bentuknya, pemohonan terdiri atas [6] :

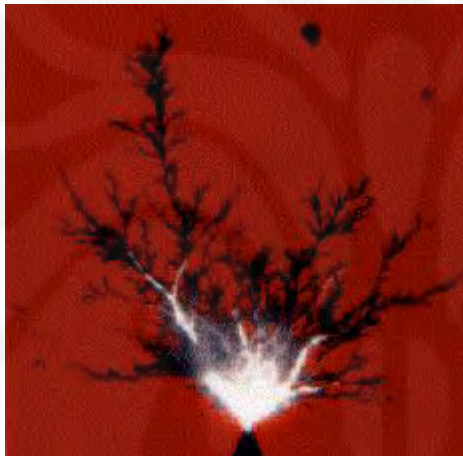
a. *Bush-type tree*



b. *Branch-type tree*



c. *Bush-branch type tree*



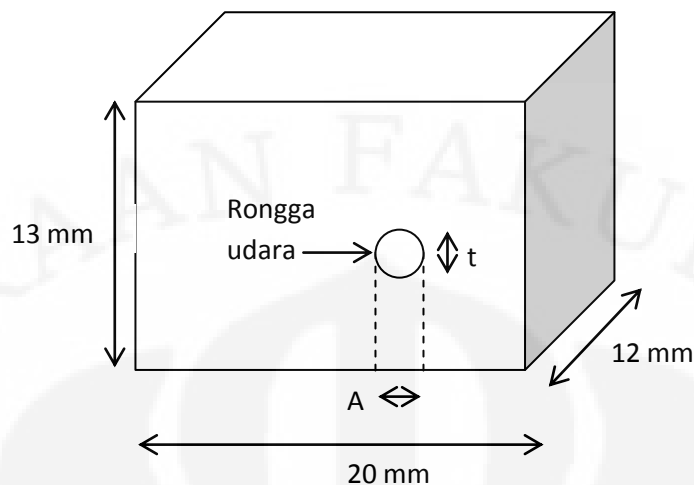
Rongga yang mengalami pemohonan air akan semakin bertambah besar ukurannya. Bila suatu saat nanti terjadi ionisasi, maka akan timbul korona yang mengakibatkan pelepasan muatan sebagian di dalam rongga.

BAB 3

Perhitungan Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara di Isolasi Ethylene Propylene Rubber

3.1 Model Dari Suatu Rongga [1]

Bila di dalam isolasi EPR pada sambungan kabel terdapat rongga yang berisi udara sehingga terjadi dua bahan dielektrik yang berada dalam suatu tegangan nominal kabel, dengan mengasumsikan konduktor dari sambungan kabel tersebut sebagai elektroda anoda dan pita jaket sambungan yang dihubungkan dengan pita tembaga sebagai elektroda katoda maka bila sambungan kabel tersebut diberi tegangan akan terjadi medan listrik antara konduktor dan pita tembaga dimana bahan isolasi dengan rongga yang berisi udara merupakan bahan dielektrik yang mempunyai permitivitas yang berbeda. kekuatan dielektrik udara dalam rongga lebih rendah daripada kekuatan dielektrik isolasi sambungan kabel sehingga dapat dikatakan bahwa tegangan gagal udara dalam rongga lebih rendah dari tegangan gagal isolasi sambungan kabel. Selain itu, konstanta dielektrik udara dalam rongga (ϵ_c) lebih kecil dari konstanta dielektrik isolasi sambungan kabel (ϵ_a , untuk EPR nilainya adalah 2,24), maka kuat medan dalam rongga lebih besar dari kuat medan isolasi sambungan kabel. Oleh karena itu, kemungkinan akan terjadi tegangan gagal di dalam rongga tersebut walaupun pada saat itu hanya diterapkan tegangan kerja (nominal) saja.



Gambar 3.1 Skema rongga dalam isolasi EPR

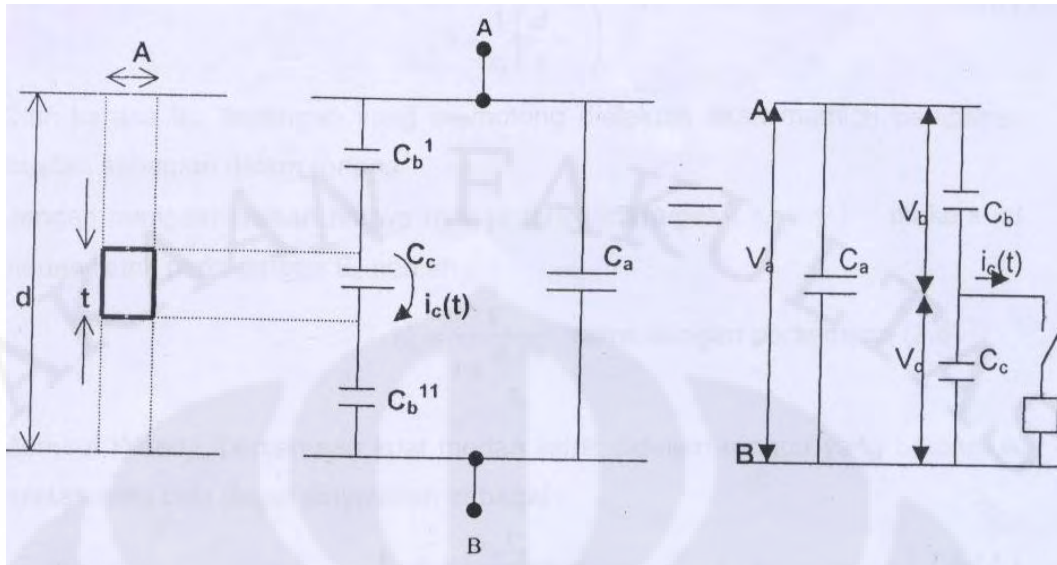
Dalam kondisi gambar di atas (gambar 3.1) dapat dinyatakan dengan rangkaian seperti pada gambar 3.2. Dengan menganalogikan konduktor sebagai anoda, isolator dengan rongga udara sebagai dua bahan dielektrik dan pita jaket tembaga sebagai katoda maka dapat diuraikan terjadinya Pelepasan Muatan Sebagian Internal, dimana C_a = kapasitansi isolasi EPR pada sambungan kabel yang tebalnya d , C_c = kapasitansi rongga udara yang tebalnya t dan C_b = kapasitansi isolasi EPR yang sebaris dengan rongga. Maka kuat medan listrik pada rongga (E_c) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_c = \frac{V_a}{t + (d - t) \frac{\epsilon_c}{\epsilon_b}}$$

Dimana : E_c = kuat medan listrik pada rongga (Volt/mm)

V_a = Tegangan yang diterapkan (Volt)

ϵ_b = konstanta dielektrik isolasi EPR



Gambar 3.2 Rangkaian ekivalen bahan isolasi berongga [3]

Untuk gambar 3.2 dapat diuraikan sebagai berikut:

Dengan mengasumsikan bahwa rongga terisi udara / gas ($\epsilon_b = 1$), maka tekanan atau kuat medan listrik pada rongga adalah E_c , dengan memperlakukan rongga sebagai kapasitansi seri dengan bagian yang lain dari bahan dielektrik (ϵ_b), maka persamaan kapasitansinya adalah:

$$C_b = \frac{\epsilon_0 \epsilon_b A}{d - t}$$

dan

$$C_c = \frac{\epsilon_0 A}{t}$$

dimana A = luas penampang isolasi dalam m^2 .

Tegangan pada rongga menjadi:

$$V_c = \frac{C_b}{C_c + C_b} V_a$$

$$V_c = \frac{V_a}{1 + \frac{1}{\epsilon_b} \left(\frac{d}{t} - 1 \right)}$$

Oleh karena itu, tegangan yang memotong dielektrik akan memicu pelepasan muatan sebagian dalam rongga.

Dengan mengasumsikan bahwa rongga terisi udara / gas ($\epsilon_c = 1$), maka kuat medan listrik pada rongga E_c adalah:

$$E_c = \frac{V_a}{1 + \frac{d-t}{\epsilon_b}}$$

Menurut Weedy, persamaan kuat medan listrik di dalam rongga yang berbentuk bulatan atau bola dapat dinyatakan sebagai:

$$E_c = \frac{3\epsilon_a E_b}{(\epsilon_c + 2\epsilon_b)}$$

Untuk $\epsilon_b \gg \epsilon_c$, maka persamaan di atas menjadi:

$$E_c = \frac{3}{2} E_b$$

Persamaan (3.12) dipergunakan sebagai perhitungan pendekatan untuk kuat medan listrik E_c di dalam rongga. Bila udara dalam rongga terjadi kegagalan (breakdown), tegangan pada kapasitansi C_c akan turun sebesar ΔV_c dalam waktu sekitar 10^{-7} detik dan akhirnya pelepasan muatan akan padam. Dengan adanya penurunan tegangan sebesar ΔV_c , maka akan diperoleh rugi muatan pada kapasitansi efektif sebesar:

$$\Delta Q = \Delta V_c \left(\frac{C_c C_b}{C_c + C_b} \right)$$

Penurunan muatan ini akan diisi kembali dengan muatan dari kapasitansi C_a sehingga mengakibatkan penurunan tegangan V_a sebesar ΔV_a .

$$\Delta V_c \left(\frac{C_c C_b}{C_c + C_b} \right) = C_a \Delta V_a$$

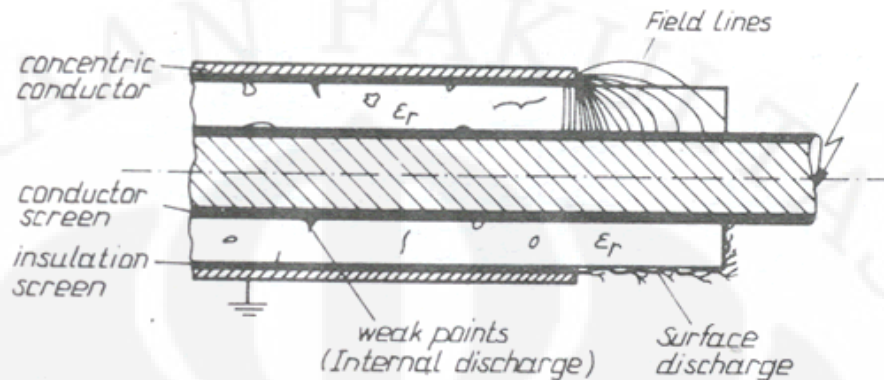
Untuk $C_b \ll C_c$, karena harga kapasitansi C sebanding dengan (A/d) , maka didapat:

$$\Delta V_c \frac{C_c}{C_a} = \Delta V_a$$

3.2 Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian Pada Isolasi

Kegagalan isolasi akibat pelepasan muatan sebagian dapat disebabkan oleh berbagai macam sebab seperti rongga-rongga yang berisi udara (*void* atau *cavity*), partikel-partikel pengotor (*contaminant*) yang terdapat di bahan isolasi serta tonjolan (*protrusion*) akibat tidak sempurnanya bahan konduktor yang dapat

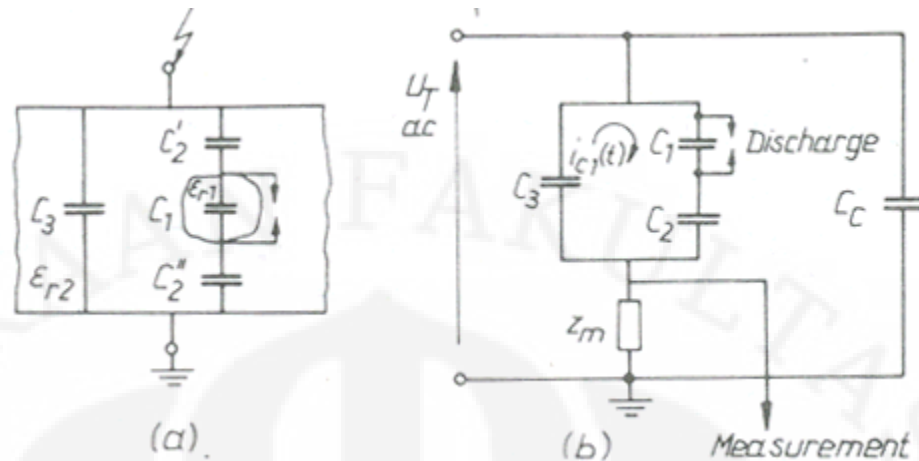
disebabkan oleh proses fabrikasi kabel tersebut ataupun tekanan mekanis dari luar. Berikut adalah gambar penampang kabel tenaga :



Gambar 3.3 Penampang Kabel Tenaga [8]

Dengan perkembangan teknologi modern saat ini proses fabrikasi dari kabel tenaga bertegangan menengah maupun tegangan tinggi sudah dapat meminimalisasi keberadaan rongga-rongga udara, namun tidak dapat dihilangkan sepenuhnya akibatnya keberadaan rongga udara di isolasi hampir selalu ada. Diameter dari rongga udara ini dapat bervariasi ukurannya dari mikrometer (μm) hingga millimeter (mm).

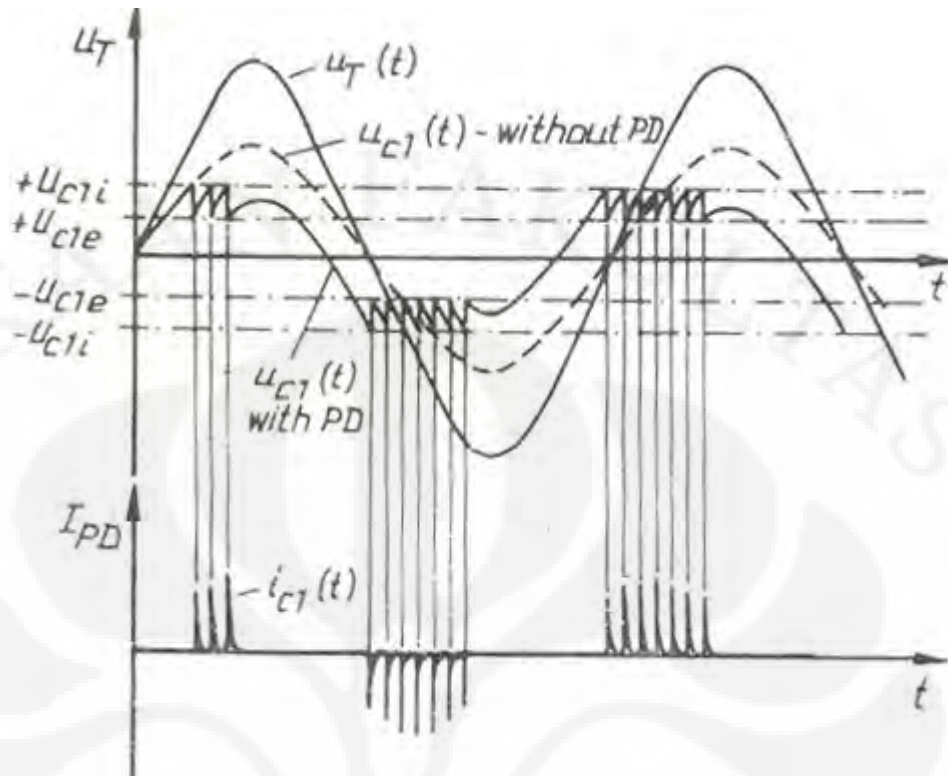
Rongga-rongga udara ini memiliki kekuatan dielektrik yang lebih rendah dibandingkan dengan isolasi disekitarnya. Rongga udara ini pun memiliki kuat medan listrik yang lebih tinggi dibandingkan dengan kuat medan listrik bahan isolasi disekitarnya. Berikut adalah rangkaian ekivalen dari rongga udara yang terdapat di isolasi kabel.



Gambar 3.4 Rangkaian Ekivalen Rongga Udara Pada Isolasi [8]

Rongga udara dapat digantikan oleh kapasitansi C_1 dan C_3 merupakan total kapasitansi bahan isolasi. Jika permitivitas relative dari rongga udara C_1 lebih rendah dibandingkan dengan permitivitas relative bahan isolasi maka tekanan listrik pada rongga udara dapat bertambah. Tidak hanya rongga udara yang dapat menyebabkan peningkatan medan listrik lokal, namun tonjolan tajam dari tidak sempurnanya sisi-sisi konduktor dapat menyebabkan meningkatnya medan listrik lokal.

C_2 merupakan kapasitansi dari bahan isolasi yang sejajar dengan rongga udara. Tegangan yang diterapkan dituliskan sebagai U_T . Berikut merupakan grafik dari mekanisme terjadinya pelepasan muatan sebagian :



Gambar 3.5 Mekanisme Pelepasan Muatan Sebagian [8]

Tegangan yang diterapkan merupakan tegangan bolak-balik berfrekuensi 50 Hz. Pada saat diberi tegangan pada sampel pengujian, C_1 yang merupakan kapasitansi void terisi muatan (*charged*). Apabila tegangan pada C_1 telah melampaui tegangan *breakdown* dari rongga udara tersebut maka C_1 akan mengalami pelepasan muatan (*discharged*) dan timbul arus i_{C1} . Arus yang timbul dari pelepasan muatan ini berlangsung dalam waktu singkat dalam kisaran nanosekon. Kemudian pada siklus negatif dari kurva sinusoidal tegangan yang diterapkan akan terjadi hal yang sama.

Dengan mengasumsikan tegangan *breakdown* pada C_1 adalah U_{C1} , maka besarnya U_{C1} adalah sebagai berikut [8] :

$$U_{C1} = \frac{C_2}{C_2 + C_1} \cdot U_T$$

Tegangan jatuh (*voltage drop*) pada saat pelepasan muatan terjadi pada C_1 dapat dituliskan sebagai berikut [8] :

$$\Delta U_{c1} = \frac{C2}{C3 + C2} \cdot U_{c1}$$

Apabila kita mengasumsikan bahwa tegangan jatuh pada sampel pengujian (ΔU_T) maka kita dapat menuliskan [8] :

$$\Delta U_T = U_T \cdot \frac{C2^2}{(C3 + C2) \cdot (C1 + C2)}$$

Sehingga besarnya muatan pada saat terjadinya pelepasan muatan sebagian adalah sebagai berikut [8] :

$$q_{c1} = \Delta U_{c1} \cdot \left[C1 + \frac{C2 \cdot C3}{C2 + C3} \right]$$

BAB 4

Analisis dan Perhitungan Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara Di Isolasi EPR

4.1 Data Perhitungan

Data perhitungan yang akan digunakan dalam penulisan ini merupakan hasil penelitian dari Teguh Herbasuki [3]. Pada penelitian tersebut dilakukan pengamatan mengenai besarnya diameter rongga udara pada isolasi *ethylene propylene rubber* (EPR) dan kerapatan rongga rata-rata per mm² sebelum diberi tegangan dan setelah diberikan tegangan pada sampel pengujian. Tegangan yang diterapkan terhadap sampel dinaikkan perlahan dengan variasi 2 kV, 4 kV, 6 kV, 8 kV, dst. Saat tegangan yang diterapkan terhadap sampel mencapai tegangan kritisnya (sesaat sebelum tegangan gagal), besar tegangan yang diterapkan terhadap sampel ditahan selama 60 detik. Kemudian dinaikkan kembali hingga mencapai tegangan gagalnya.

Berikut adalah data hasil penelitiannya :

Tabel 4.1 Hasil Penelitian Teguh Herbasuki [3]

Sampel	Tegangan Kritis (kV/cm)	Tegangan Gagal (kV/cm)
1	44.20	45.72
2	30.47	32.25
3	27.90	29.00
4	22.94	24.12

Sampel-sampel pengujian diatas diambil dari sambungan kabel 20 kV yang memakai isolasi utama berupa *ethylene propylene rubber* (EPR) yang masih baru (belum mendapatkan tegangan kerja yang sebesar 20 kV) dan isolasi EPR yang sudah pernah mendapatkan tegangan kerja 20 kV.

Sampel 1 merupakan bahan isolasi EPR yang baru dan belum diberikan tegangan kerja. Sedangkan sampel 2, 3 dan 4 telah mengalami tegangan kerja

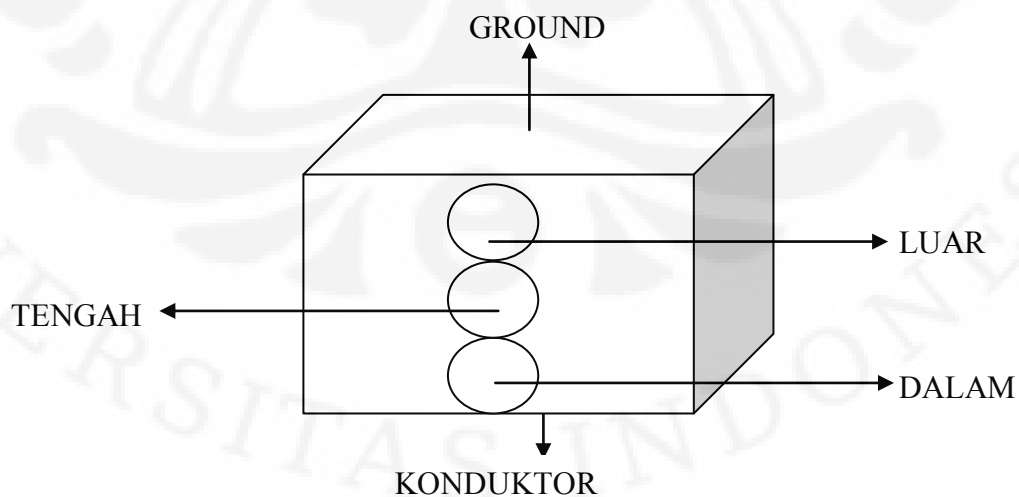
selama beberapa waktu. Dapat dilihat bahwa sampel 1 (sampel yang belum diberi tegangan kerja) masih cukup tinggi tegangan gagalnya dibandingkan dengan tegangan gagal sampel-sampel yang lain.

Setelah diberikan tegangan terhadap setiap sampel, maka dilakukan pengamatan besarnya diameter rongga udara yang ada di sampel-sampel tersebut dan kerapatan rongga rata-rata per mm^2 masing-masing sampel. Berikut adalah data hasil pengamatannya :

Tabel 4.2 Hasil Pengamatan Diameter Rongga dan Kerapatan Rongga Udara [3]

Sampel	Sebelum Diberikan Tegagan Kritis		Setelah Diberikan Tegangan Kritis	
	Jumlah Rongga Rata-rata (per mm^2)	Diameter rongga terbesar (μm)	Jumlah Rongga Rata-rata (per mm^2)	Diameter rongga terbesar (μm)
1	82	35	73	44
2	101	62	87	98
3	105	82	90	148
4	92	111	78	170

Kerapatan rongga rata-rata pada tabel diatas merupakan rata-rata kerapatan rongga dari tiga bagian pada suatu sampel. Untuk lebih jelasnya berikut adalah gambar dari sampel pengujian :



Gambar 4.1 Sampel Pengamatan kerapatan rongga udara dan diameter rongga udara [3]

Pengamatan kerapatan rongga udara dilakukan di tiga bagian yakni bagian dalam (bagian paling dekat dengan konduktor), bagian luar (bagian paling dekat dengan *ground* atau tanah) dan bagian tengah (bagian yang berada diantara keduanya). Setelah dilakukan pengamatan disetiap bagiannya, kemudian dirata-ratakan untuk mendapat kerapatan rongga udara rata-rata untuk masing-masing sampel. Berikut adalah kerapatan rongga udara per mm^2 baik sebelum mendapatkan tegangan kritis, maupun setelah mendapatkan tegangan kritis :

Tabel 4.3 Jumlah Rongga Udara per mm^2 sebelum mendapat tegangan kritis [3]

Sampel	Bagian			Rata-rata
	Luar	Tengah	Dalam	
1	86	81	79	82
2	101	97	104	101
3	107	102	106	105
4	98	83	93	92

Tabel 4.4 Jumlah Rongga Udara per mm^2 setelah mendapat tegangan kritis [3]

Sampel	Bagian			Rata-rata
	Luar	Tengah	Dalam	
1	82	68	63	73
2	89	85	87	87
3	92	91	87	90
4	84	79	71	78

Untuk pengamatan diameter rongga terbesar dilakukan dengan cara mengukur diameter rongga udara di setiap bagian (luar, tengah, dalam) menggunakan *measurement microscope*, kemudian mengambil yang diameternya paling besar untuk tiap sampel. Teguh Herbasuki pada penelitiannya mengasumsikan bahwa besar diameter rongga dikatakan cukup besar untuk memicu terjadinya pelepasan muatan sebagian adalah sebesar lebih dari $20 \mu\text{m}$. Sehingga pada tabel berikut ini yang ditampilkan hanyalah rongga-rongga udara yang berdiameter lebih dari $20 \mu\text{m}$ dan rongga-rongga yang berdiameter lebih dari $20 \mu\text{m}$ inilah yang nantinya

akan menjadi bahan perhitungan besar pelepasan muatan sebagian baik sebelum diberikan tegangan kritis, maupun setelah diberikan tegangan kritis. Berikut adalah rongga-rongga udara yang berdiameter lebih dari 20 μm yang terdapat I setiap bagian (luar, tengah, dalam) pada setiap sampelnya (1, 2, 3, 4) :

Tabel 4.5 Diameter rongga yang lebih dari 20 μm sebelum mendapat tegangan kritis [3]

No. Sampel	Besar Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Jumlah Rongga dengan diameter lebih dari 20 μm
1 - L	21; 21; 21; 21; 22; 24; 30; 32	18
1 - T	32; 34	
1 - D	21; 21; 22; 22; 24; 28; 34; 35*	
2 - L	21; 22; 30; 34; 36;38; 42; 44; 52; 56; 62*	27
2 - T	21; 22; 42; 52	
2 - D	21; 21; 21; 21; 22; 22; 24; 24; 30; 32; 38; 38	
3 - L	24; 24; 24; 34; 36; 38; 38; 46; 46; 48; 48; 48; 58; 64; 66; 72; 78; 82*	33
3 - T	21; 21; 21; 21; 22; 28; 32; 40; 42; 44	
3 - D	22; 26; 34; 42; 54	
4 - L	21; 21; 21; 21; 21; 22; 22; 22; 32; 32; 34; 40; 42; 42; 42; 46; 46; 48; 48; 58; 66; 72; 78; 111*	48
4 - T	21; 22; 22; 23; 24; 24; 28; 32; 41; 42; 62	
4 - D	22; 26; 34; 36; 42; 42; 54; 58; 58; 62; 63; 64; 74	

* diameter rongga terbesar di masing-masing sampel

Tabel 4.6 Diameter rongga yang lebih dari 20 μm setelah mendapat tegangan kritis [3]

No. Sampel	Besar Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Jumlah Rongga dengan diameter lebih dari 20 μm
1 - L	21; 21; 21; 21; 22; 24; 30; 32; 32; 32; 36; 38; 38; 42	30
1 - T	32; 42; 44	
1 - D	21; 21; 22; 22; 24; 28; 32; 32; 34; 35; 40; 42; 42	
2 - L	38; 38; 40; 42; 42; 42; 44; 44; 52; 56; 62; 84; 98	33
2 - T	24; 28; 42; 44; 52; 58	
2 - D	24; 24; 24; 26; 26; 26; 28; 28; 34; 36; 38; 58; 80; 88	
3 - L	28; 30; 32; 32; 42; 42; 42; 48; 48; 52; 52; 54; 82; 82; 113; 148	33
3 - T	22; 23; 24; 24; 28; 32; 64; 74	
3 - D	22; 22; 24; 42; 54; 54; 64; 98; 128	
4 - L	38; 46; 46; 48; 48; 48; 58; 64; 66; 72; 78; 144; 156; 168; 170	33
4 - T	28; 30; 32; 40; 42; 44; 62; 88	
4 - D	46; 48; 48; 52; 52; 68; 68; 68; 73; 76	

* diameter rongga terbesar di masing-masing sampel

Dimana :

L = bagian luar isolasi

T = bagian tengah isolasi

D = bagian dalam isolasi

4.2 Metode Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara di Isolasi EPR

Seperti yang telah dijelaskan diatas bahwa pada penulisan ini akan dilakukan perhitungan besar pelepasan muatan sebagian yang terjadi di rongga-rongga udara yang terdapat pada isolasi EPR. Rongga-rongga yang akan dihitung besar

pelepasan muatannya adalah rongga dengan diameter seperti pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 dengan cara perhitungan seperti yang akan dijelaskan sebagai berikut.

Dari rumus yang telah diuraikan pada Bab 3 maka kita dapat menerapkannya untuk mengetahui besarnya pelepasan muatan pada keempat sampel isolasi EPR diatas diatas.

$$q = U_T \cdot \frac{C_2^2}{(C_3 + C_2) \cdot (C_1 + C_2)} \cdot \left[C_1 + \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3} \right]$$

q = besarnya pelepasan muatan sebagian (pC)

U_T = tegangan yang diterapkan pada sampel (V)

C_1 = kapasitansi rongga udara (F)

C_2 = kapasitansi isolasi yang sejajar dengan rongga udara (F)

C_3 = kapasitansi total dari bahan isolasi (F)

Pada bab sebelumnya pun sudah dijelaskan tentang besar kapasitansi C_1 , C_2 dan C_3 . Kapasitansi-kapasitansi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{t}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d - t}$$

$$C_3 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$$

A = luas penampang (m^2)

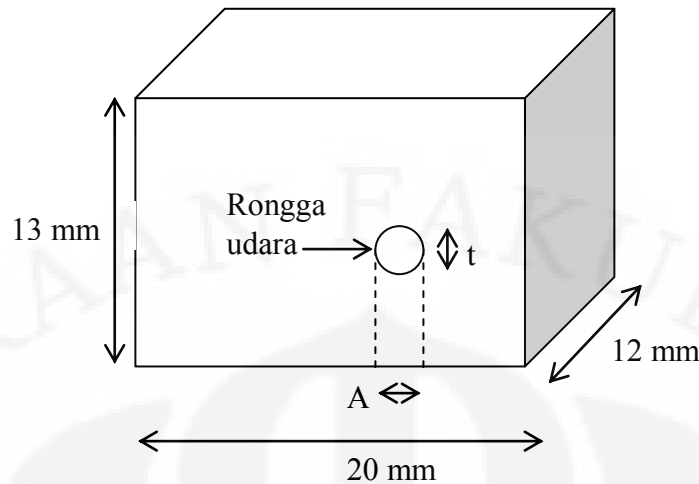
d = tebal isolasi (mm) = 13 mm

t = diameter rongga udara (mm)

ϵ_0 = 8.85×10^{-12} F/m

ϵ_r = permitivitas bahan isolasi (EPR = 2.24)

Berikut adalah gambar untuk menggambarkan rongga udara yang berada di isolasi EPR :



Gambar 4.2 Model Rongga Udara Pada Isolasi EPR

Apabila kita menganggap bahwa rongga udara berbentuk sferis (bola) maka A (luas peampang) merupakan luas lingkaran yang jari-jarinya merupakan jari-jari dari rongga udara. Untuk sampel 1 dimana diameter rongga terbesarnya adalah $35 \mu\text{m}$, maka jari-jarinya adalah $17.5 \mu\text{m}$. Oleh karena itu kita dapat menghitung luas penampangnya :

$$\begin{aligned} A &= \pi r^2 \\ &= \frac{22}{7} \cdot (17.5 \mu\text{m})^2 \\ &= 9.625 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Tebal isolasi (d) adalah sebesar 13 mm , maka kita pun dapat menghitung besar kapasitansi C_1 , C_2 dan C_3 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{\epsilon_0 \cdot A}{t} \\ &= \frac{8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \cdot 9.63 \times 10^{-10} \text{ m}^2}{3.50 \times 10^{-5} \text{ m}} \\ &= 2.434 \times 10^{-16} \text{ F} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon r \cdot A}{d - t} \\ &= \frac{8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \cdot 2.24 \cdot 9.63 \times 10^{-10} \text{ m}^2}{13.00 \times 10^{-3} \text{ m} - 3.50 \times 10^{-5} \text{ m}} \\ &= 1.472 \times 10^{-18} \text{ F} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_3 &= \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d} \\
 &= \frac{8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \cdot 2.24 \cdot 9.63 \times 10^{-10} \text{ m}^2}{13.00 \times 10^{-3} \text{ m}} \\
 &= 1.468 \times 10^{-18} \text{ F}
 \end{aligned}$$

Apabila kita terapkan tegangan pada sampel pengujian sebesar 18 kV, maka kita dapat menghitung besarnya pelepasan muatan sebagian yang terjadi pada rongga udara yang memiliki diameter sebesar 35 μm pada sampel 1, adalah sebesar :

$$\begin{aligned}
 q &= U_T \cdot \frac{C_2^2}{(C_3 + C_2) \cdot (C_1 + C_2)} \cdot \left[C_1 + \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3} \right] \\
 &= 18 \times 10^{-3} \text{ V} \times \frac{(1.472 \times 10^{-18} \text{ F})^2}{(1.468 \times 10^{-18} \text{ F} + 1.472 \times 10^{-18} \text{ F}) \cdot (2.434 \times 10^{-16} \text{ F} + 1.472 \times 10^{-18} \text{ F})} \\
 &\quad \times \left[2.434 \times 10^{-16} \text{ F} + \left(\frac{1.472 \times 10^{-18} \text{ F} \cdot 1.468 \times 10^{-18} \text{ F}}{1.472 \times 10^{-18} \text{ F} + 1.468 \times 10^{-18} \text{ F}} \right) \right] \\
 &= 1.322 \times 10^{-14} \text{ C} \\
 &= 0.013 \times 10^{-12} \text{ C} \\
 &= 0.013 \text{ pC}
 \end{aligned}$$

Kita lihat bahwa besarnya pelepasan muatan sebagian pada rongga udara yang berdiameter 35 μm dan diberi tegangan terapan sebesar 18 kV adalah sebesar 0.013 pC. Namun, itu hanyalah besar pelepasan muatan sebagian yang terjadi pada rongga udara tersebut saja. Apabila kita anggap pelepasan muatan sebagian merupakan fenomena yang dapat terjadi secara serentak didalam beberapa rongga udara yang ada didalam suatu bahan isolasi, maka kita dapat menuliskannya sebagai berikut :

$$q_{total} = \sum_{i=1}^n q_i$$

Q_{total} merupakan hasil penjumlahan besarnya pelepasan muatan sebagian yang terjadi di rongga-rongga udara yang terdapat di setiap bagian (luar, dalam, tengah) pada masing-masing sampel. Dimana n adalah jumlah rongga yang berdiameter lebih dari 20 μm yang terdapat pada suatu sampel isolasi.

Kita perhatikan sampel nomor 1. Sampel tersebut dibagi menjadi 3 bagian yaitu, bagian luar, tengah dan dalam. Pada bagian luar terdapat 8 rongga udara yang diameternya lebih dari 20 μm (21 μm ; 21 μm ; 21 μm ; 21 μm ; 22 μm ; 24 μm ; 30 μm ; 32 μm). Bagian tengah terdapat 2 rongga (32 μm ; 34 μm) dan bagian dalam terdapat 8 rongga udara (21 μm ; 21 μm ; 22 μm ; 22 μm ; 24 μm ; 28 μm ; 34 μm ; 35 μm). Sehingga total seluruh rongga yang berdiameter lebih dari 20 μm adalah 18 rongga. Melalui perhitungan yang telah dijabarkan sebelumnya, maka kita dapat mengetahui besarnya pelepasan muatan sebagian untuk masing-masing rongga pada sampel nomor 1. Setelah itu, maka kita dapat menjumlahkan keseluruhan besar pelepasan muatan sebagian pada 18 rongga (yang diameternya lebih dari 20 μm) yang terdapat sampel nomor 1.

Tabel 4.7 Besarnya Pelepasan Muatan Sebagian pada Isolasi EPR sampel 1

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)
1	Luar	21	0.005
		21	0.005
		21	0.005
		21	0.005
		22	0.005
		24	0.006
		30	0.01
		32	0.011
	Tengah	32	0.011
		34	0.013
	Dalam	21	0.005
		21	0.005
		22	0.005
		22	0.005
		24	0.006
		28	0.008
		34	0.013
		35	0.013
TOTAL			0.136

Kita dapat lihat bahwa besarnya q total pada sampel 1 adalah sebesar 0.136 pC pada tegangan 18 kV. Perhitungan yang sama juga dilakukan pada sampel-sampel yang lain yakni sampel 2, 3 dan 4. Dengan variasi tegangan yang diberikan kepada setiap sampel sebesar 18 kV, 20 kV, 22 kV dan 24 kV, serta pada saat tegangan kritis dan tegangan gagalnya. Data tegangan kritis dan tegangan gagal setiap sampelnya dapat dilihat pada Tabel 4.1. Perhitungan pelepasan muatan sebagian pun juga dilakukan untuk sampel isolasi EPR yang telah mendapat tegangan kritis. Besarnya rongga udara untuk sampel isolasi EPR yang telah mendapat tegangan kritis dapat dilihat pada Tabel 4.5.

4.2.1 Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara di Isolasi EPR Sebelum Mendapat Tegangan Kritis

Setelah melakukan perhitungan pada setiap sampel maka akan didapat hasil perhitungan seperti berikut ;

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 1

Tegangan (kV)	18	20	22	24	44.2 (tegangan kritis)	45.72 (tegangan gagal)
Besar Pelepasan Muatan Sebagian (pC)	0.136	0.149	0.166	0.179	0.334	0.343

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 2

Tegangan (kV)	18	20	22	24	30.47 (tegangan kritis)	32.25 (tegangan gagal)
Besar Pelepasan Muatan Sebagian (pC)	0.360	0.396	0.439	0.476	0.604	0.641

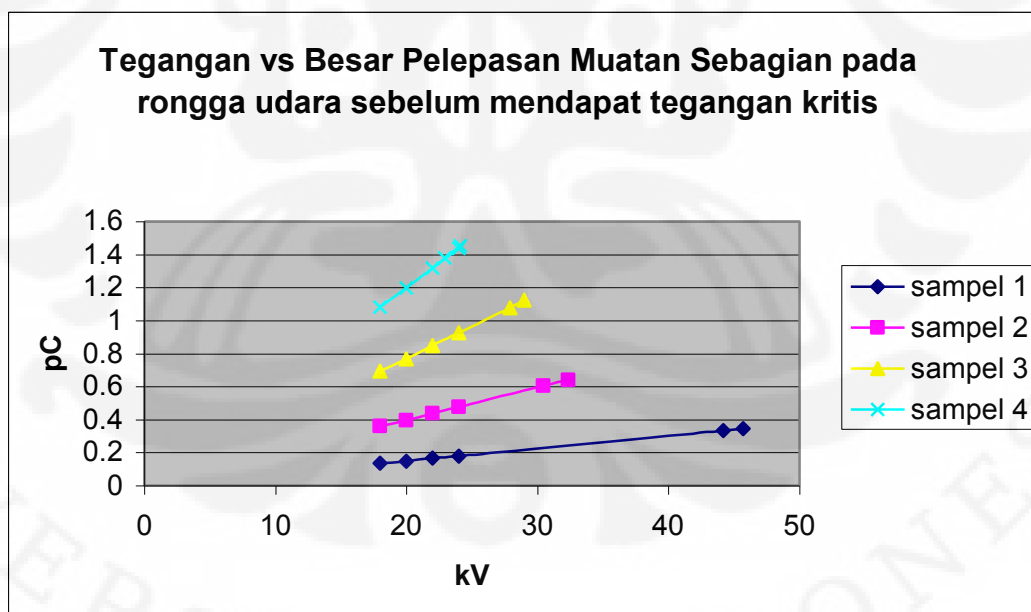
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 3

Tegangan (kV)	18	20	22	24	27.90 (tegangan kritis)	29.00 (tegangan gagal)
Besar Pelepasan Muatan Sebagian (pC)	0.694	0.769	0.848	0.925	1.078	1.123

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 4

Tegangan (kV)	18	20	22	24	22.94 (tegangan kritis)	24.12 (tegangan gagal)
Besar Pelepasan Muatan Sebagian (pC)	1.080	1.199	1.319	1.439	1.378	1.453

Berikut adalah grafik besarnya pelepasan muatan sebagian terhadap tegangan yang diterapkan :

**Gambar 4.3 Grafik Pelepasan Muatan Sebagian terhadap Tegangan**

Dari grafik diatas maka kita dapat melihat hubungan antara tegangan yang diterapkan dengan besarnya pelepasan muatan sebagian. Makin besar tegangan

yang diterapkan maka akan semakin besar pula pelepasan muatan sebagian yang terjadi di sampel tersebut. Namun apabila kita membandingkan antar sampel (mis. Sampel 1 dengan 4). Pada sampel 1 ketika diberi tegangan kritis yaitu sebesar 44.2 kV besar pelepasan muatan sebagiannya adalah 0.334 pC. Sedangkan pada sampel 4 ketika diberi tegangan kritis sebesar 22.94 kV besar pelepasan muatan sebagiannya adalah 1.078 pC. Pada sampel 4 terjadi pelepasan muatan sebagian yang lebih besar dibandingkan dengan sampel 1, walaupun pada sampel satu diberi tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel 4. Mengapa hal ini dapat terjadi? Ada faktor lain yang menentukan besarnya pelepasan muatan sebagian, yakni jumlah rongga-rongga udara yang terdapat pada suatu isolasi, khususnya rongga udara yang berdiameter lebih dari 20 μm (dianggap besarnya rongga udara yang mampu memicu terjadinya pelepasan muatan sebagian).

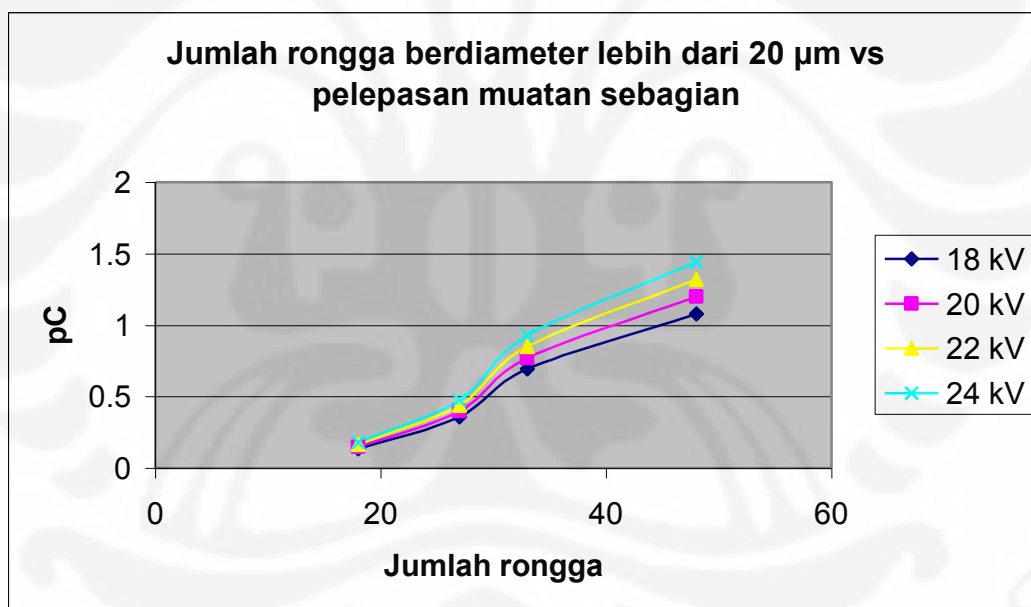
Kita dapat melihat bahwa pada sampel 1 sebelum diberi tegangan kritis memiliki jumlah rongga udara yang berdiameter lebih dari 20 μm sebanyak 18 rongga, sedangkan sampel 4 memiliki 48 rongga. Pada tingkat tegangan terapan yang sama (mis. 20 kV) besarnya pelepasan muatan sebagian yang terjadi pada sampel 1 adalah sebesar 0.149 pC, sedangkan sampel 4 sebesar 1.199 pC yang notabene lebih besar dari sampel 1. Oleh karena itu, maka kita dapat katakan bahwa pada tingkat tegangan terapan yang sama, apabila semakin banyak rongga udara yang berdiameter lebih dari 20 μm terdapat pada suatu isolasi, maka besarnya pelepasan muatan sebagian yang terjadi pada isolasi tersebut akan semakin meningkat.

Sampel 1 merupakan sampel yang belum diberi pembebanan (baru) sehingga paling sedikit memiliki rongga udara yang diameternya lebih dari 20 μm . Hal ini menyebabkan besarnya pelepasan muatan sebagiannya juga paling kecil jika dibandingkan dengan sampel-sampel yang lain. Pelepasan muatan sebagian paling besar terjadi pada sampel 4, hal ini dikarenakan sampel 4 memiliki jumlah rongga udara yang diameternya lebih dari 20 μm . Untuk lebih jelasnya, mari kita lihat tabel yang menunjukkan hubungan antara jumlah rongga udara yang memiliki diameter lebih dari 20 μm dengan besarnya pelepasan muatan sebagian pada tingkat tegangan yang sama :

Tabel 4.12 Jumlah rongga dengan diameter lebih dari 20 μm dan besar pelepasan muatan sebagian

Sampel	Jumlah rongga berdiameter lebih dari 20 μm	Besarnya Pelepasan Muatan Sebagian pada Tegangan 18 kV (pC)	Besarnya Pelepasan Muatan Sebagian pada Tegangan 20 kV (pC)	Besarnya Pelepasan Muatan Sebagian pada Tegangan 22 kV (pC)	Besarnya Pelepasan Muatan Sebagian pada Tegangan 24 kV (pC)
1	18	0.136	0.149	0.166	0.179
2	27	0.36	0.396	0.439	0.476
3	33	0.694	0.769	0.848	0.925
4	48	1.08	1.199	1.319	1.439

Berikut adalah grafik besarnya pelepasan muatan sebagian terhadap jumlah rongga pada suatu sampel :



Gambar 4.4 Grafik Pelepasan Muatan Sebagian Jumlah rongga udara

Kita dapat lihat bahwa pada tingkat tegangan yang sama makin banyak jumlah rongga udara pada suatu isolasi maka besarnya pelepasan muatan sebagian pada isolasi tersebut makin besar.

4.2.2 Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara di Isolasi EPR Setelah Mendapat Tegangan Kritis

Setelah melakukan perhitungan dengan cara yang sama, maka kita akan mendapatkan hasil perhitungan sebagai berikut :

Tabel 4.13 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 1 (setelah mendapatkan tegangan kritis)

Tegangan (kV)	18	20	22	24
Besar Pelepasan Muatan Sebagian (pC)	0.327	0.838	1.327	2.107

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 2 (setelah mendapatkan tegangan kritis)

Tegangan (kV)	18	20	22	24
Besar Pelepasan Muatan Sebagian (pC)	0.359	0.930	1.475	2.338

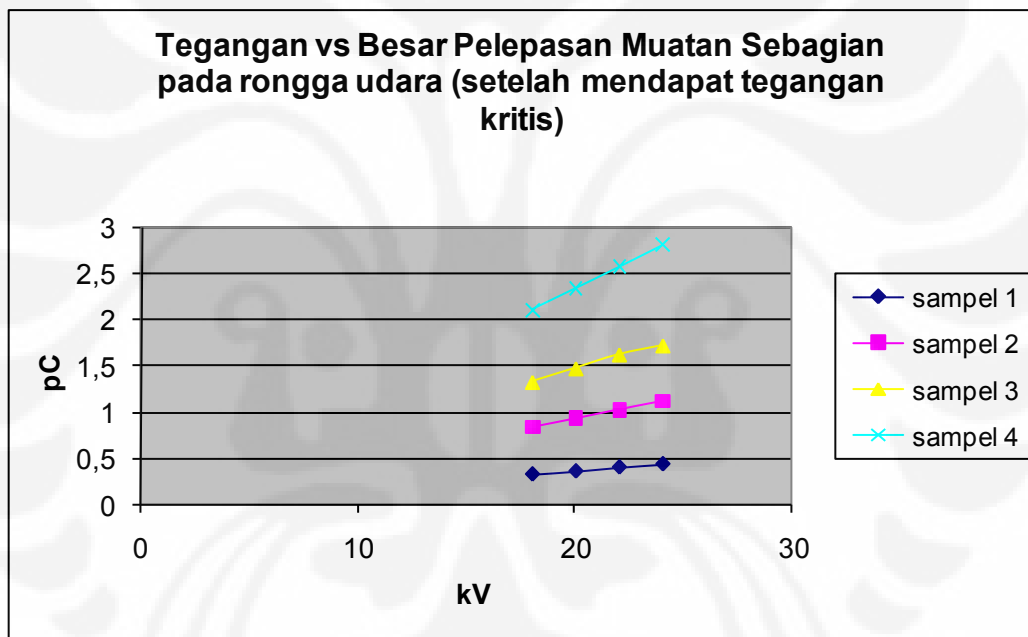
Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 3 (setelah mendapatkan tegangan kritis)

Tegangan (kV)	18	20	22	24
Besar Pelepasan Muatan Sebagian (pC)	0.401	1.027	1.625	2.571

Tabel 4.16 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 4 (setelah mendapatkan tegangan kritis)

Tegangan (kV)	18	20	22	24
Besar Pelepasan Muatan Sebagian (pC)	0.434	1.117	1.724	2.810

Berikut adalah grafik yang menggambarkan besarnya pelepasan muatan sebagian pada setiap sampel setelah diberikan tegangan kritis :



Gambar 4.5 Grafik Pelepasan Muatan Sebagian terhadap Tegangan

Dapat kita lihat dari grafik di atas bahwa kecenderungan besarnya pelepasan muatan sebagian pada rongga udara yang terdapat pada setiap sampel adalah meningkat seiring dengan naiknya tegangan yang diterapkan terhadap sampel tersebut.

4.2.3 Perbandingan Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara di Isolasi EPR Sebelum Mendapat Tegangan Kritis dan Setelah Mendapat Tegangan Kritis

Berikut merupakan tabel perbandingan antara besar pelepasan muatan sebagian pada rongga udara di isolasi EPR sebelum mendapat tegangan kritis dan setelah mendapat tegangan kritis :

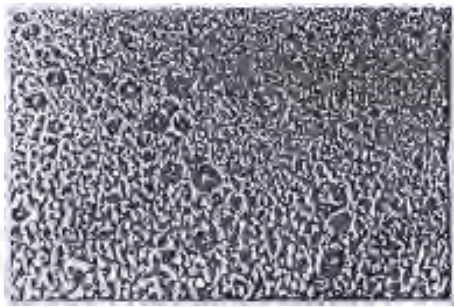
Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian untuk Sampel 4 (setelah mendapatkan tegangan kritis)

Sampel	Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara di Isolasi EPR (pC)							
	18 (kV)		20 (kV)		22 (kV)		24 (kV)	
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
1	0.136	0.327	0.149	0.359	0.166	0.401	0.179	0.434
2	0.360	0.838	0.396	0.930	0.439	1.027	0.476	1.117
3	0.694	1.327	0.769	1.475	0.848	1.625	0.925	1.724
4	1.080	2.107	1.199	2.338	1.319	2.571	1.439	2.810

Dapat kita lihat pada Tabel 4.17 bahwa setelah mendapat tegangan kritis besarnya pelepasan muatan sebagian akan meningkat. Pada sampel 1 dengan tegangan terapan yang sama misalnya sebesar 18 kV, besarnya pelepasan muatan sebagian sebelum diberi tegangan kritis adalah sebesar 0.136 pC, sedangkan sesudah diberi tegangan kritis adalah sebesar 0.327 pC.

Hal ini dapat disebabkan karena jumlah rongga udara (khususnya rongga udara yang berdiameter lebih dari 20 μm yang dapat memicu pelepasan muatan bagian) pada sampel yang telah diberi tegangan kritis bertambah banyak dan diameternya pun bertambah besar. Apabila kita lihat pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4, kerapatan rongga udara per mm^2 memang menurun setelah sampel diberi tegangan kritis. Namun, jumlah rongga udara yang besar diameternya lebih dari 20 μm bertambah banyak. Ini menyebabkan rongga-rongga udara yang dapat memicu terjadinya pelepasan muatan sebagian bertambah banyak, sehingga pelepasan muatan sebagian di rongga udara yang terdapat pada sampel isolasi pun

akan semakin besar magnitudenya. Untuk lebih jelasnya kita dapat melihat foto struktur mikro isolasi EPR hasil penelitian Teguh Herbasuki berikut :

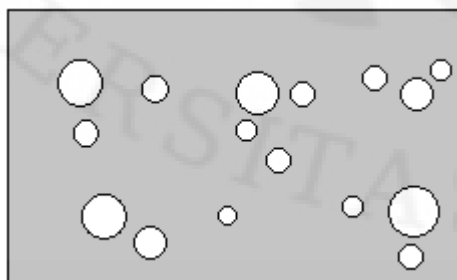


Gambar 4.5 Foto mikrostruktur sampel 1 bagian luar sebelum diberi tegangan kritis

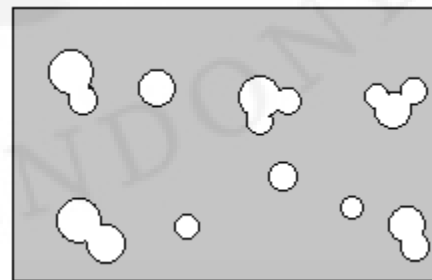


Gambar 4.6 Foto mikrostruktur sampel 1 bagian luar setelah diberi tegangan kritis

Gambar diatas adalah hasil foto struktur mikro dari sampel penelitian Teguh Herbasuki yaitu sampel 1 bagian luar (sisi terluar isolasi). Gambar 4.5 adalah sampel 1 yang difoto sebelum diberi tegangan kritis sedangkan gambar 4.6 adalah foto mikrostruktur dari sampel 1 setelah diberi tegangan kritis. Dapat kita lihat dari kedua gambar diatas bahwa setelah diberi tegangan kritis diameter dari rongga udara yang terdapat pada sampel tersebut akan bertambah besar, sedangkan kerapatan rongga udaranya per mm^2 cenderung untuk berkurang. Hal ini dikarenakan aktivitas pelepasan muatan sebagian yang terjadi di rongga udara secara bertahap mengerosi sisi-sisi dari rongga udara tersebut, sehingga apabila ini terjadi secara terus-menerus maka diameter dari rongga udara tersebut dapat bertambah lebar. Apabila terdapat dua rongga udara yang berdekatan dan diameter keduanya bertambah lebar secara bertahap akibat adanya erosi sisi-sisi rongga oleh pelepasan muatan sebagian, maka tidak menutup kemungkinan bahwa kedua rongga ini bergabung menjadi satu dan membentuk rongga yang lebih besar. Berikut adalah ilustrasi dari proses di atas :



Gambar 4.7 Representasi rongga udara sebelum diberi tegangan kritis



Gambar 4.8 Representasi rongga udara setelah diberi tegangan kritis

Gambar 4.7 adalah keadaan rongga udara saat sampel belum diberi tegangan kritis, sedangkan gambar 4.8 keadaan saat setelah diberi tegangan kritis. Dapat dilihat bahwa kerapatan rongga udara per mm² menurun setelah diberi tegangan kritis, hal ini dikarenakan ada beberapa rongga udara yang bergabung menjadi satu membentuk rongga udara dengan diameter yang lebih besar. Jumlah rongga udara yang berdiameter lebih dari 20 µm pun bertambah jumlahnya dikarenakan diameter setiap rongga bertambah besar akibat adanya erosi sisi-sisi rongga oleh pelepasan muatan sebagian yang terjadi terus menerus.

Kita lihat presentase kenaikan jumlah rongga udara yang berdiameter lebih dari 20 µm dengan presentase kenaikan besar pelepasan muatan sebagian pada rongga udara suatu sampel pada tabel berikut :

Tabel 4.18 Perbandingan Jumlah rongga yang berdiameter lebih dari 20 µm dengan besar pelepasan muatan sebagian

Sampel	Jumlah Rongga berdiameter lebih dari 20 µm		Kenaikan Jumlah Rongga udara yang berdiameter lebih dari 20 µm (%)	Kenaikan rata-rata besarnya pelepasan muatan sebagian (%)
	Sebelum	Sesudah		
1	18	30	66.67	141.35
2	27	33	22.22	134.06
3	33	33	0.00	90.26
4	48	33	-31.25	95.07

Kita lihat pada Tabel 4.18 pada sampel 3 menunjukkan angka 0 % dan -31.25 % berturut-turut. Hal ini menunjukkan bahwa pada sampel 3 tidak ada perubahan jumlah rongga udara berdiameter lebih dari 20 µm, sedangkan pada sampel 4 terjadi penurunan jumlah rongga udara. Walaupun begitu, kedua sampel ini menunjukkan kenaikan 90.26% dan 95.07% secara berturut-turut karena walaupun jumlah rongga udara yang ada di kedua sampel ini tidak berubah bahkan menurun, tetapi diameter terbesar rongga udara yang ada di kedua sampel ini bertambah besar setelah diberi tegangan kritis sebagaimana bisa dilihat dalam Tabel 4.5 dan 4.6. Oleh karena itu selain jumlah rongga udara yang mempengaruhi besar dari pelepasan muatan sebagian dalam suatu isolasi,

diameter rongga tersebut juga mempengaruhi besarnya pelepasan muatan sebagian yang ada di suatu isolasi.

Sampel 1 menunjukkan kenaikan pelepasan muatan sebagian yang paling besar yakni 141.35 %. Hal ini dapat disebabkan karena sampel 1 pun yang memiliki kenaikan jumlah rongga udara yang berdiameter lebih dari 20 μm paling besar. Begitu pula dengan sampel 2 dimana kenaikan jumlah rongga udara diikuti dengan kenaikan pelepasan muatan sebagian di sampel tersebut.

Pada hasil perhitungan diatas besarnya pelepasan muatan sebagian tidaklah begitu besar hanya berkisar antara 0.1 – 1.5 pC pada saat sebelum diberi tegangan kritis dan sebesar 0.3 pC – 2.8 pC saat setelah diberi tegangan kritis. Hal ini dapat disebabkan karena :

- a. Tidak diperhitungkannya sumber-sumber lain dari pelepasan muatan sebagian, yang dihitung hanyalah yang terjadi di rongga rongga udara pada isolasi.
- b. Pada penelitian Teguh Herbasuki digunakan elektroda jarum untuk menerapkan tegangan pada isolasi, maka *electrical stress* pada isolasi tidaklah seragam, namun pada perhitungan diatas *electrical stress* pada bahan isolasi dianggap seragam.
- c. Besar diameter rongga udara pada penelitian ini berkisar antara 21 μm – 111 μm jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan tebal isolasi yang diujikan
- d. Perhitungan yang dilakukan hanyalah perhitungan terhadap pelepasan muatan sebagian pada satu waktu tertentu, sedangkan dalam satu gelombang sinusoidal tegangan bolak-balik dapat terjadi beberapa kali pelepasan muatan sebagian baik dalam siklus positif ataupun siklus negatif.

4.3 Perhitungan Kuat Medan Listrik Pada Rongga Udara dan Kuat Medan Listrik Pada Isolasi EPR

Rongga-rongga udara yang terdapat dalam isolasi EPR menyebabkan ketidakseragaman medan listrik pada isolasi tersebut. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan kuat medan listrik pada rongga udara dan kuat medan listrik

pada isolasi EPR itu sendiri. Kuat medan listrik pada rongga udara dapat dituliskan sebagai berikut :

$$E_{rongga} = \frac{V_a}{t + (d - t) \frac{\epsilon_c}{\epsilon_b}}$$

V_a = tegangan yang diterapkan pada sampel (kV)

t = diameter rongga (cm)

d = tebal isolasi (cm)

ϵ_c = konstanta dielektrik rongga (udara = 1)

ϵ_b = konstanta dielektrik EPR = 2.24

Untuk rongga udara berdiameter 0.0035 cm (35 μ m) dan tebal isolasi 1.3 cm (13 mm), serta diberi tegangan sebesar 18 kV, maka kuat medan listrik yang terdapat pada rongga tersebut adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} E &= \frac{18kV}{0.0035cm + (1.3cm - 0.0035cm) \frac{1}{2.24}} \\ &= 30.91kV / cm \end{aligned}$$

Maka, besarnya kuat medan listrik pada rongga yang berdiameter 35 μ m dan tebal isolasi 13 mm, serta diberi tegangan sebesar 18 kV adalah sebesar 30.91 kV/cm. Dari hasil perhitungan ini kita dapat menghitung berapa besarnya kuat medan listrik yang ada pada isolasi EPR yang memiliki tebal sebesar 13 mm. Kuat medan listrik pada isolasi EPR adalah sebagai berikut :

$$E_{isolasi} = \frac{(\epsilon_c + 2\epsilon_b)}{3\epsilon_b} \cdot E_{rongga}$$

Oleh karena itu kita dapat menghitung besarnya kuat medan listrik pada isolasi EPR tersebut. Berikut perhitungannya :

$$\begin{aligned} E_{isolasi} &= \frac{(1 + 2 \cdot 2.24)}{3 \cdot 2.24} \cdot 30.91kV / cm \\ &= 25.21kV / cm \end{aligned}$$

Maka, besarnya kuat medan listrik pada isolasi EPR setebal 13 mm dan terdapat rongga udara di dalamnya yang berdiameter 35 μ m serta diterapkan tegangan sebesar 18 kV adalah sebesar 25.21 kV/cm.

Dari perhitungan ini kita dapat melihat bahwa terdapat ketidakseragaman medan listrik pada suatu isolasi apabila terdapat rongga udara didalamnya. Kuat medan listrik pada rongga udara lebih besar dibandingkan dengan kuat medan listrik pada isolasi. Berikut adalah tabel yang menunjukkan kuat medan listrik pada rongga udara yang terdapat pada sampel 1 pada tegangan 18 kV :

Tabel 4.19 Kuat Medan Listrik Pada Rongga Udara dan Kuat Medan Listrik Pada Isolasi EPR

Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)	Kuat Medan Listrik dalam Isolasi EPR (kV/cm)
Luar	21	0.005	30.95	25.24
	21	0.005	30.95	25.24
	21	0.005	30.95	25.24
	21	0.005	30.95	25.24
	22	0.005	30.95	25.24
	24	0.006	30.94	25.23
	30	0.01	30.93	25.22
	32	0.011	30.92	25.22
Tengah	32	0.011	30.92	25.22
	34	0.013	30.92	25.21
Dalam	21	0.005	30.95	25.24
	21	0.005	30.95	25.24
	22	0.005	30.95	25.24
	22	0.005	30.95	25.24
	24	0.006	30.94	25.23
	28	0.008	30.93	25.22
	34	0.013	30.92	25.21
	35	0.013	30.91	25.21

Kita dapat melihat bahwa perbandingan antara diameter rongga udara dengan kuat medan listrik adalah berbanding terbalik. Makin kecil diameter suatu rongga, maka makin besar kuat medan listrik yang ada di rongga tersebut. Kita juga melihat bahwa besarnya pelepasan muatan sebagian berbanding terbalik dengan

medan listrik di rongga udara tersebut. Walaupun semakin kecil medan listriknya, besarnya pelepasan muatan sebagian mengalami peningkatan.

Berikut adalah hasil perhitungan medan listrik pada rongga udara berdiameter kurang dari μm beserta hasil perhitungan besarnya pelepasan muatan sebagian :

Tabel 4.19 Kuat Medan Listrik Pada Rongga Udara berdiameter kurang dari 20 μm

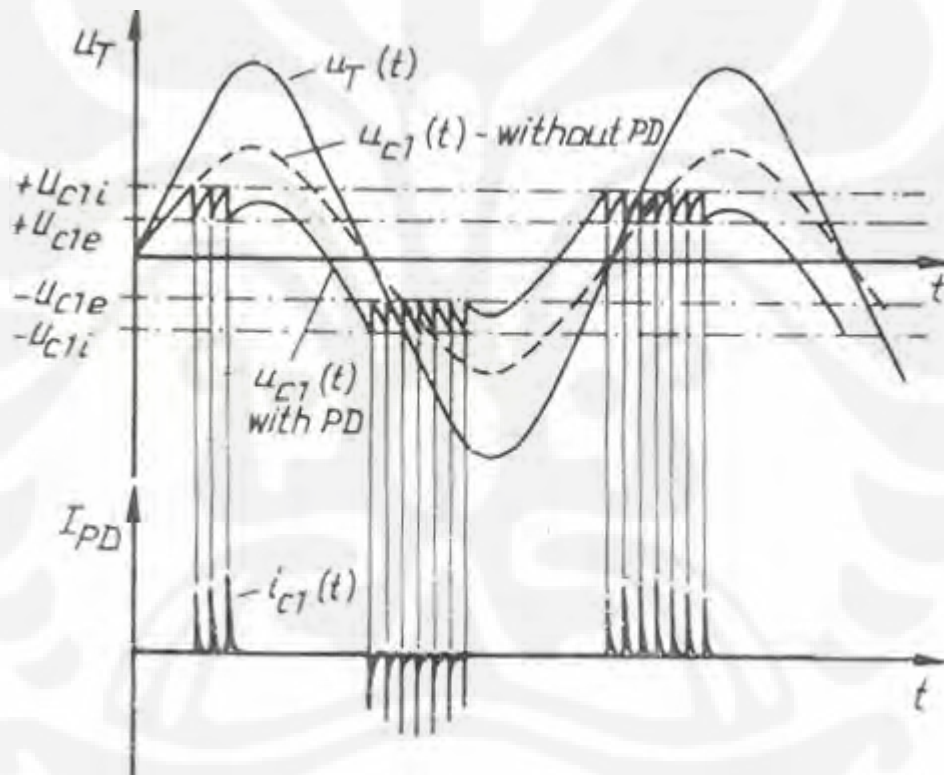
Diameter Rongga yang kurang dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)	Kuat Medan Listrik dalam Isolasi EPR (kV/cm)
15	0.002	30.97	25.26
16	0.003	30.97	25.25
17	0.003	30.97	25.25
18	0.004	30.96	25.25
19	0.004	30.96	25.25

Pada penelitan Teguh Herbasuki, penulis mengasumsikan bahwa rongga yang berdiameter kurang dari 20 μm tidak memungkinkan untuk terjadinya pelepasan muatan sebagian. Namun apabila kita tinjau dari besarnya medan listrik yang terdapat pada rongga udara dan mengasumsikan bahwa besarnya kekuatan tembus udara adalah sebesar 30 kV/cm, maka berdasarkan tabel di atas rongga udara yang berdiameter kurang dari 20 μm memungkinkan untuk terjadinya pelepasan muatan sebagian karena telah melebihi kekuatan tembus udara.

Analisis yang dilakukan dengan meninjau hubungan diameter rongga udara dengan besarnya medan listrik pada rongga udara dan isolasi EPR menggambarkan bahwa ada ketidakseragaman medan listrik pada isolasi yang berongga. Serta juga dapat melakukan perkiraan awal apakah pada rongga tersebut dapat terjadi pelepasan muatan sebagian atau tidak. Namun, analisis ini belum bisa menggambarkan hubungan diameter rongga udara dengan besarnya pelepasan muatan sebagian. Oleh karena itu akan dilakukan, perhitungan besarnya tegangan pelepasan muatan sebagian (*inception voltage*) serta jatuh tegangan yang saat terjadinya pelepasan muatan sebagian.

4.5 Perhitungan Tegangan Pelepasan Muatan Sebagian dan Perhitungan Jatuh Tegangan Saat Terjadinya Pelepasan Muatan Sebagian

Tegangan pelepasan muatan sebagian atau yang biasa disebut dengan *inception voltage* merupakan besarnya tegangan pada rongga udara yang dapat memicu terjadinya pelepasan muatan sebagian. Pada saat terjadi pelepasan muatan sebagian tegangan pada rongga udara akan jatuh hingga besar tegangan tertentu dan akhirnya pelepasan muatan sebagian pada rongga udara tersebut berakhir. Besar tegangan pada rongga udara setelah terjadinya pelepasan muatan sebagian biasa disebut dengan *extinction voltage*. Untuk lebih jelasnya kita dapat melihat gambar grafik berikut :



Tabel 4.9 Mekanisme Pelepasan Muatan Sebagian [8]

Dari grafik diatas kita dapat melihat bahwa pelepasan muatan sebagian terjadi saat tegangan pada rongga udara sebesar U_{c1} yaitu *inception voltage* dan berakhir saat tegangan pada rongga udara sebesar U_{e1} yaitu *extinction voltage*. Adapun besarnya pelepasan muatan sebagian yang terjadi pada rongga adalah sebesar [1] :

$$\begin{aligned} q &= C_2 \cdot \Delta V \\ &= C_2 \cdot (U_{c1} - U_{e1}) \end{aligned}$$

q = besar pelepasan muatan sebagian (pC)

C_2 = kapasitansi isolasi yang sejajar dengan rongga udara (F)

U_{c1} = *inception voltage* (V)

U_{e1} = *extinction voltage* (V)

Adapun besarnya tegangan pelepasan muatan sebagian U_{c1} dan jatuh tegangan pada rongga udara saat terjadinya pelepasan muatan sebagian adalah sebagai berikut [8] :

$$U_{c1} = U_T \cdot \frac{C_2}{C_2 + C_1}$$

$$\Delta V = U_{c1} \cdot \frac{C_2}{C_2 + C_3}$$

U_t = tegangan yang diterapkan pada sampel isolasi (kV)

C_1 = kapasitansi rongga udara (F)

C_2 = kapasitansi isolasi yang sejajar dengan rongga udara (F)

C_3 = kapasitansi isolasi EPR (F)

Berikut adalah hasil perhitungan tegangan pelepasan dan jatuh tegangan yang terjadi pada rongga udara pada rongga-rongga udara yang terdapat pada sampel 1 dan tegangan terapan sebesar 18 kV :

Tabel 4.20 Tegangan Pelepasan Muatan Sebagian dan Jatuh Tegangan Pada saat terjadi Pelepasan muatan sebagian

Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Tegangan Pelepasan Muatan Sebagian (Volt)	Jatuh Tegangan Pada Saat terjadi Pelepasan Muatan Sebagian (Volt)
Luar	21	0.005	65.00	32.53
	21	0.005	65.00	32.53
	21	0.005	65.00	32.53
	21	0.005	65.00	32.53
	22	0.005	68.09	34.07
	24	0.006	74.27	37.17
	30	0.01	92.78	46.44
	32	0.011	98.95	49.53
Tengah	32	0.011	98.95	49.53
	34	0.013	105.11	52.62
Dalam	21	0.005	65.00	32.53
	21	0.005	65.00	32.53
	22	0.005	68.09	34.07
	22	0.005	68.09	34.07
	24	0.006	74.27	37.17
	28	0.008	86.61	43.35
	34	0.013	105.11	52.62
	35	0.013	108.19	54.17

Kita dapat melihat pada tabel diatas bahwa makin besar diameter sebuah rongga udara maka akan semakin besar pula tegangan pelepasan muatan sebagiannya dan jatuh tegangan pada saat terjadinya pelepasan muatan sebagian juga semakin besar. Yang mempengaruhi besarnya pelepasan muatan sebagian adalah jatuh tegangan saat terjadinya pelepasan muatan sebagian. Ini dapat kita lihat apabila kita bandingkan 2 rongga berdiameter berbeda misalnya rongga berdiameter 21 μm dan 35 μm . Tegangan pelepasan muatan sebagiannya lebih besar rongga udara yang berdiameter 35 μm (108.19 Volt) dibandingkan dengan rongga berdiameter 21 μm (65 Volt), sehingga pelepasan muatan sebagian lebih

cepat terjadi pada rongga udara dengan tegangan pelepasan muatan sebagian yang lebih kecil. Namun besar pelepasan muatan sebagiannya lebih besar rongga berdiameter 35 μm (0.013 pC) dibandingkan dengan rongga yang berdiameter 20 μm (0.005 pC), karena jatuh tegangannya lebih besar rongga yang berdiameter 35 μm (54.17 Volt) dibandingkan dengan rongga yang berdiameter 20 μm (32.53 Volt) sehingga pelepasan muatan sebagian pada rongga berdiameter 35 μm lebih lama terjadi dibandingkan dengan rongga berdiameter 20 μm .

Berikut adalah hasil perhitungan tegangan pelepasan muatan sebagian dan jatuh tegangan pada saat terjadinya pelepasan muatan sebagian pada rongga udara yang berdiameter kurang dari 20 μm :

Tabel 4.21 Tegangan Pelepasan Muatan Sebagian dan Jatuh Tegangan Pada saat terjadi Pelepasan muatan sebagian pada rongga berdiameter kurang dari 20 μm

Diameter Rongga yang kurang dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Tegangan Pelepasan Muatan Sebagian (Volt)	Jatuh Tegangan Pada Saat terjadi Pelepasan Muatan Sebagian (Volt)
15	0.002	46.46	23.24
16	0.003	49.55	24.79
17	0.003	52.64	26.34
18	0.004	55.73	27.89
19	0.004	58.82	29.43

Kita lihat bahwa pada rongga berdiameter kurang dari 20 μm jatuh tegangannya relatif kecil apabila dibandingkan dengan rongga yang berdiameter lebih dari 20 μm sehingga pelepasan muatan sebagiannya juga relatif kecil dibandingkan dengan rongga udara yang berdiameter lebih dari 20 μm .

BAB 5

Kesimpulan

1. Rongga udara yang berdiameter lebih dari 20 μm memiliki jatuh tegangan pada saat pelepasan muatan sebagian pada rongga tersebut (ΔV) yang lebih besar dibandingkan dengan rongga udara yang berdiameter kurang dari 20 μm .
2. Jatuh tegangan pada saat pelepasan muatan sebagian pada rongga tersebut (ΔV) berbanding lurus dengan besarnya pelepasan muatan sebagian serta juga berbanding lurus dengan diameter rongga udara.
3. Setelah diberi tegangan kritis besarnya pelepasan muatan sebagian mengalami kenaikan hingga lebih dari 100%.
4. Jumlah rongga udara dapat menurun seiring dengan membesarnya diameter rongga udara akibat adanya erosi sisi-sisi rongga udara sehingga dua buah rongga udara yang berdekatan dapat bergabung menjadi satu, sehingga pelepasan muatan sebagian dapat meningkat.
5. Jumlah rongga udara dan diameter rongga udara dengan aktivitas pelepasan muatan sebagian pada rongga udara tersebut saling mempengaruhi satu sama lain.

DAFTAR ACUAN

- [1] Dissado, L.A, & Fothergill, J.C. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. London: Peter Peregrinus Ltd, 1992.
- [2] Kuffel, E, & Zaengl, W.S. *High Voltage Engineering*. Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt: Pergamon Press, 1084.
- [3] Herbasuki, Teguh. *Studi Pengaruh Rongga Pada Isolasi Ethylene Propylene Rubber Terhadap Kegagalan Isolasi Pada Sambungan Kabel Tanah 20 kV*. Tesis Program Studi Ilmu Teknik Elektro Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik Universitas Indonesia, 2001.
- [4] Sapulete, Renville. *Pengaruh Internal Partial Discharge Terhadap Kegagalan Isolasi*. Tesis Program Studi Ilmu Teknik Elektro Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik Universitas Indonesia, 1998.
- [5] *Kotak Sambung Kabel Tanah 20 kV dan Permasalahannya*. PLN Distribusi Jakarta Raya dan Tangerang.
- [6] Champion, J.V, Dodd, J.S & Alison, J.M. *The correlation between partial dishcharge behaviour and the spatial and temporal development of electrical trees grown in epoxy resin*. J. Phys. D: Appl. Phys. 29 2689, 1996
- [7] Riedel, John A & Laan, Robert Vander .*Ethylene Propylene Rubbers*.Norwalk : R.T. Vanderbilt Co., Inc,1990.
- [8] <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/HighVoltageEngg/lecture12/slide2.htm>
- [9] *EPR PVC Power Cable 2400 Volts*. USA Wire & Cable, Inc.

LAMPIRAN A

Hasil Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian Pada Rongga Udara di Isolasi EPR

Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Tegangan 18 kV (sebelum diberi tegangan kritis)

Sampel 1

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
1	Luar	21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		24	0.006	30.94
		30	0.01	30.93
		32	0.011	30.92
	Tengah	32	0.011	30.92
		34	0.013	30.92
	Dalam	21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		24	0.006	30.94
		28	0.008	30.93
		34	0.013	30.92
TOTAL			0.136	

Sampel 2

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)	
2	Luar	21	0.005	30.95	
		22	0.005	30.95	
		30	0.01	30.93	
		34	0.013	30.92	
		36	0.014	30.91	
		38	0.016	30.90	
		42	0.019	30.89	
		44	0.02	30.89	
		52	0.029	30.86	
		56	0.034	30.85	
	Tengah	21	0.005	30.95	
		22	0.005	30.95	
		42	0.019	30.89	
		52	0.029	30.86	
	Dalam	21	0.005	30.95	
		21	0.005	30.95	
		21	0.005	30.95	
		21	0.005	30.95	
		22	0.005	30.95	
		22	0.005	30.95	
		24	0.006	30.94	
		24	0.006	30.94	
		30	0.01	30.93	
		32	0.011	30.92	
		38	0.016	30.90	
	38	0.016	30.90		
	TOTAL			0.36	

Sampel 3

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (ρC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
3	Luar	24	0.006	30.94
		24	0.006	30.94
		24	0.006	30.94
		34	0.012	30.92
		36	0.014	30.91
		38	0.016	30.90
		38	0.016	30.90
		46	0.023	30.88
		46	0.023	30.88
		48	0.025	30.87
		48	0.025	30.87
		48	0.025	30.87
		58	0.036	30.84
		64	0.044	30.83
		66	0.047	30.82
		72	0.056	30.80
	78	0.066	30.79	
	82	0.073	30.77	
	Tengah	21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		28	0.008	30.93
		32	0.011	30.92
		40	0.017	30.90
		42	0.019	30.89
		44	0.021	30.89
	Dalam	22	0.005	30.95
		26	0.007	30.94
34		0.012	30.92	
42		0.019	30.89	
54		0.031	30.86	
TOTAL			0.694	

Sampel 4

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
4	Luar	21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		32	0.011	30.92
		32	0.011	30.92
		34	0.012	30.92
		40	0.017	30.90
		42	0.019	30.89
		42	0.019	30.89
		42	0.019	30.89
		46	0.023	30.88
		46	0.023	30.88
		48	0.025	30.87
		48	0.025	30.87
		58	0.036	30.84
		66	0.047	30.82
	72	0.056	30.80	
	78	0.066	30.79	
	111	0.133	30.69	
	Tengah	21	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		23	0.006	30.95
		24	0.006	30.94
		24	0.006	30.94
		28	0.008	30.93
		32	0.011	30.92
		41	0.018	30.89
42		0.019	30.89	
62		0.042	30.83	

Dalam	22	0.005	30.95
	26	0.007	30.94
	34	0.012	30.92
	36	0.014	30.91
	42	0.019	30.89
	42	0.019	30.89
	54	0.031	30.86
	58	0.036	30.84
	58	0.036	30.84
	62	0.042	30.83
	63	0.043	30.83
	64	0.044	30.83
	74	0.059	30.80
TOTAL			1.08

Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Tegangan 20 kV (sebelum diberi tegangan kritis)

Sampel 1

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (μC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
1	Luar	21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		22	0.006	34.39
		24	0.007	34.38
		30	0.011	34.36
		32	0.012	34.36
	Tengah	32	0.012	34.36
		34	0.014	34.35
	Dalam	21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		22	0.006	34.39
		22	0.006	34.39
		24	0.007	34.38
		28	0.009	34.37
		34	0.014	34.35
35		0.015	34.35	
TOTAL			0.149	

Sampel 2

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
2	Luar	21	0.005	34.39
		22	0.006	34.39
		30	0.011	34.36
		34	0.014	34.35
		36	0.016	34.34
		38	0.017	34.34
		42	0.021	34.32
		44	0.023	34.32
		52	0.032	34.29
		56	0.038	34.28
		62	0.046	34.26
	Tengah	21	0.005	34.39
		22	0.006	34.39
		42	0.021	34.32
		52	0.032	34.29
	Dalam	21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		22	0.006	34.39
		22	0.006	34.39
		24	0.007	34.38
		24	0.007	34.38
		30	0.011	34.36
		32	0.012	34.36
		38	0.017	34.34
		38	0.017	34.34
		TOTAL		

Sampel 3

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
3	Luar	24	0.007	34.38
		24	0.007	34.38
		24	0.007	34.38
		34	0.014	34.35
		36	0.016	34.34
		38	0.017	34.34
		38	0.017	34.34
		46	0.025	34.31
		46	0.025	34.31
		48	0.028	34.30
		48	0.028	34.30
		48	0.028	34.30
		58	0.04	34.27
		64	0.049	34.25
		66	0.052	34.25
		72	0.062	34.23
		78	0.073	34.21
		82	0.081	34.19
	Tengah	21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		22	0.006	34.39
		28	0.009	34.37
		32	0.012	34.36
		40	0.019	34.33
		42	0.021	34.32
		44	0.023	34.32
	Dalam	22	0.005	34.39
		26	0.008	34.38
34		0.014	34.35	
42		0.021	34.32	
54		0.035	34.28	
TOTAL			0.769	

Sampel 4

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
4	Luar	21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		22	0.006	34.39
		22	0.006	34.39
		22	0.006	34.39
		32	0.012	34.36
		32	0.012	34.36
		34	0.014	34.35
		40	0.019	34.33
		42	0.021	34.32
		42	0.021	34.32
		42	0.021	34.32
		46	0.025	34.31
		46	0.025	34.31
		48	0.028	34.30
		48	0.028	34.30
		58	0.04	34.27
	66	0.052	34.25	
	72	0.062	34.23	
	78	0.073	34.21	
	111	0.148	34.10	
	Tengah	21	0.005	34.39
		22	0.006	34.39
		22	0.006	34.39
		23	0.006	34.39
24		0.007	34.38	
24		0.007	34.38	
28		0.009	34.37	
32		0.012	34.36	
41		0.02	34.33	
42		0.021	34.32	
62	0.046	34.26		

Dalam	22	0.005	34.39
	26	0.008	34.38
	34	0.014	34.35
	36	0.016	34.34
	42	0.021	34.32
	42	0.021	34.32
	54	0.035	34.28
	58	0.04	34.27
	58	0.04	34.27
	62	0.046	34.26
	63	0.048	34.26
	64	0.05	34.25
	74	0.066	34.22
TOTAL			1.199

Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Tegangan 22 kV (sebelum diberi tegangan kritis)

Sampel 1

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
1	Luar	21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		24	0.008	37.82
		30	0.012	37.80
		32	0.014	37.79
	Tengah	32	0.014	37.79
		34	0.015	37.79
	Dalam	21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		24	0.008	37.82
		28	0.01	37.81
		34	0.015	37.79
		35	0.016	37.78
TOTAL			0.166	

Sampel 2

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
2	Luar	21	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		30	0.012	37.80
		34	0.015	37.79
		36	0.017	37.78
		38	0.019	37.77
		42	0.023	37.76
		44	0.026	37.75
		52	0.036	37.72
		56	0.041	37.71
	Tengah	21	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		42	0.023	37.76
		52	0.036	37.72
	Dalam	21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		24	0.008	37.82
		24	0.008	37.82
		30	0.012	37.80
		32	0.014	37.79
		38	0.019	37.77
		38	0.019	37.77
	TOTAL			0.439

Sampel 3

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
3	Luar	24	0.008	37.82
		24	0.008	37.82
		24	0.008	37.82
		34	0.015	37.79
		36	0.017	37.78
		38	0.019	37.77
		38	0.019	37.77
		46	0.028	37.74
		46	0.028	37.74
		48	0.03	37.73
		48	0.03	37.73
		48	0.03	37.73
		58	0.044	37.70
		64	0.054	37.68
		66	0.058	37.67
		72	0.068	37.65
		78	0.08	37.63
		82	0.089	37.61
	Tengah	21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		28	0.01	37.81
		32	0.014	37.79
		40	0.021	37.76
		42	0.023	37.76
		44	0.026	37.75
	Dalam	22	0.006	37.83
		26	0.009	37.81
34		0.015	37.79	
42		0.023	37.76	
54		0.038	37.71	
TOTAL			0.848	

Sampel 4

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
4	Luar	21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		32	0.014	37.79
		32	0.014	37.79
		34	0.015	37.79
		40	0.021	37.76
		42	0.023	37.76
		42	0.023	37.76
		42	0.023	37.76
		46	0.028	37.74
		46	0.028	37.74
		48	0.03	37.73
		48	0.03	37.73
		58	0.044	37.70
	66	0.058	37.67	
	72	0.068	37.65	
	78	0.08	37.63	
	111	0.163	37.51	
	Tengah	21	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		23	0.007	37.82
		24	0.008	37.82
24		0.008	37.82	
28		0.01	37.81	
32		0.014	37.79	
41		0.022	37.76	
42		0.023	37.76	
62	0.051	37.68		

Dalam	22	0.006	37.83
	26	0.009	37.81
	34	0.015	37.79
	36	0.017	37.78
	42	0.023	37.76
	42	0.023	37.76
	54	0.038	37.71
	58	0.044	37.70
	58	0.044	37.70
	62	0.051	37.68
	63	0.052	37.68
	64	0.054	37.68
	74	0.072	37.64
TOTAL		1.319	

Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Tegangan 24 kV (sebelum diberi tegangan kritis)

Sampel 1

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
1	Luar	21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		22	0.007	41.27
		24	0.008	41.26
		30	0.013	41.24
		32	0.015	41.23
	Tengah	32	0.015	41.23
		34	0.017	41.22
	Dalam	21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		22	0.007	41.27
		22	0.007	41.27
		24	0.008	41.26
		28	0.011	41.24
		34	0.017	41.22
	35	0.018	41.22	
TOTAL			0.179	

Sampel 2

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
2	Luar	21	0.006	41.27
		22	0.007	41.27
		30	0.013	41.24
		34	0.017	41.22
		36	0.019	41.21
		38	0.021	41.20
		42	0.025	41.19
		44	0.028	41.18
		52	0.039	41.15
		56	0.045	41.13
		62	0.055	41.11
	Tengah	21	0.006	41.27
		22	0.007	41.27
		42	0.025	41.19
		52	0.039	41.15
	Dalam	21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		22	0.007	41.27
		22	0.007	41.27
		24	0.008	41.26
		24	0.008	41.26
		30	0.013	41.24
		32	0.015	41.23
		38	0.021	41.20
		38	0.021	41.20
TOTAL			0.476	

Sampel 3

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
3	Luar	24	0.008	41.26
		24	0.008	41.26
		24	0.008	41.26
		34	0.017	41.22
		36	0.019	41.21
		38	0.02	41.20
		38	0.02	41.20
		46	0.03	41.17
		46	0.03	41.17
		48	0.033	41.17
		48	0.033	41.17
		48	0.033	41.17
		48	0.033	41.17
		58	0.048	41.13
		64	0.059	41.10
		66	0.063	41.10
		72	0.075	41.07
		78	0.088	41.05
	82	0.097	41.03	
	Tengah	21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		22	0.007	41.27
		28	0.011	41.24
		32	0.014	41.23
		40	0.023	41.20
		42	0.025	41.19
		44	0.028	41.18
	Dalam	22	0.007	41.27
26		0.01	41.25	
34		0.016	41.22	
42		0.025	41.19	
54		0.042	41.14	
TOTAL			0.921	

Sampel 4

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
4	Luar	21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		22	0.007	41.27
		22	0.007	41.27
		22	0.007	41.27
		32	0.015	41.23
		32	0.015	41.23
		34	0.017	41.22
		40	0.023	41.20
		42	0.025	41.19
		42	0.025	41.19
		42	0.025	41.19
		46	0.03	41.17
		46	0.03	41.17
		48	0.033	41.17
		48	0.033	41.17
		58	0.048	41.13
	66	0.063	41.10	
	72	0.075	41.07	
	78	0.088	41.05	
	111	0.178	40.92	
	Tengah	21	0.006	41.27
		22	0.007	41.27
		22	0.007	41.27
		23	0.008	41.26
		24	0.008	41.26
24		0.008	41.26	
28		0.011	41.24	
32		0.015	41.23	
41		0.024	41.19	
42		0.025	41.19	
62	0.055	41.11		

Dalam	22	0.007	41.27
	26	0.01	41.25
	34	0.017	41.22
	36	0.019	41.21
	42	0.025	41.19
	42	0.025	41.19
	54	0.042	41.14
	58	0.048	41.13
	58	0.048	41.13
	62	0.055	41.11
	63	0.057	41.11
	64	0.059	41.10
	74	0.079	41.06
TOTAL		1.439	

Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Tegangan Kritis

Sampel 1

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
1	Luar	21	0.012	76.01
		21	0.012	76.01
		21	0.012	76.01
		21	0.012	76.01
		22	0.013	76.00
		24	0.015	75.99
		30	0.024	75.94
		32	0.027	75.93
	Tengah	32	0.027	75.93
		34	0.031	75.91
	Dalam	21	0.012	76.01
		21	0.012	76.01
		22	0.013	76.00
		22	0.013	76.00
		24	0.015	75.99
		28	0.021	75.96
		34	0.031	75.91
	35	0.032	75.91	
TOTAL			0.334	

Sampel 2

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)	
2	Luar	21	0.008	52.40	
		22	0.009	52.39	
		30	0.016	52.35	
		34	0.021	52.33	
		36	0.024	52.32	
		38	0.026	52.31	
		42	0.032	52.29	
		44	0.035	52.28	
		52	0.049	52.24	
		56	0.057	52.22	
	62	0.07	52.19		
	Tengah	21	0.008	52.40	
		22	0.009	52.39	
		42	0.032	52.29	
		52	0.049	52.24	
	Dalam	21	0.008	52.40	
		21	0.008	52.40	
		21	0.008	52.40	
		21	0.008	52.40	
		22	0.009	52.39	
		22	0.009	52.39	
		24	0.011	52.38	
		24	0.011	52.38	
		30	0.016	52.35	
		32	0.019	52.34	
		38	0.026	52.31	
		38	0.026	52.31	
		TOTAL			0.604

Sampel 3

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
3	Luar	24	0.01	47.96
		24	0.01	47.96
		24	0.01	47.96
		34	0.019	47.92
		36	0.022	47.91
		38	0.024	47.90
		38	0.024	47.90
		46	0.035	47.86
		46	0.035	47.86
		48	0.039	47.85
		48	0.039	47.85
		48	0.039	47.85
		58	0.056	47.81
		64	0.069	47.78
		66	0.073	47.77
		72	0.087	47.75
		78	0.102	47.72
		82	0.113	47.70
	Tengah	21	0.007	47.98
		21	0.007	47.98
		21	0.007	47.98
		21	0.007	47.98
		22	0.008	47.97
		28	0.013	47.95
		32	0.017	47.93
		40	0.027	47.89
		42	0.03	47.88
		44	0.032	47.87
	Dalam	22	0.008	47.97
		26	0.011	47.95
34		0.019	47.92	
42		0.03	47.88	
54		0.049	47.83	
TOTAL			1.078	

Sampel 4

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
4	Luar	21	0.006	39.45
		21	0.006	39.45
		21	0.006	39.45
		21	0.006	39.45
		21	0.006	39.45
		22	0.007	39.44
		22	0.007	39.44
		22	0.007	39.44
		32	0.014	39.41
		32	0.014	39.41
		34	0.016	39.40
		40	0.022	39.38
		42	0.024	39.37
		42	0.024	39.37
		42	0.024	39.37
		46	0.029	39.35
		46	0.029	39.35
		48	0.032	39.35
		48	0.032	39.35
		58	0.046	39.31
	66	0.06	39.28	
	72	0.071	39.26	
	78	0.084	39.24	
	111	0.17	39.11	
	Tengah	21	0.006	39.45
		22	0.007	39.44
		22	0.007	39.44
		23	0.007	39.44
		24	0.008	39.44
24		0.008	39.44	
28		0.011	39.42	
32		0.014	39.41	
41		0.023	39.37	
42		0.024	39.37	
62	0.053	39.30		

Dalam	22	0.006	39.44
	26	0.009	39.43
	34	0.016	39.40
	36	0.018	39.39
	42	0.024	39.37
	42	0.024	39.37
	54	0.04	39.32
	58	0.046	39.31
	58	0.046	39.31
	62	0.053	39.30
	63	0.055	39.29
	64	0.056	39.29
	74	0.075	39.25
TOTAL		1.378	

Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Tegangan Gagal

Sampel 1

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
1	Luar	21	0.012	78.62
		21	0.012	78.62
		21	0.012	78.62
		21	0.012	78.62
		22	0.013	78.61
		24	0.016	78.60
		30	0.025	78.55
		32	0.028	78.54
	Tengah	32	0.028	78.54
		34	0.032	78.52
	Dalam	21	0.012	78.62
		21	0.012	78.62
		22	0.013	78.61
		22	0.013	78.61
		24	0.016	78.60
		28	0.021	78.57
		34	0.032	78.52
35	0.034	78.52		
TOTAL			0.343	

Sampel 2

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
2	Luar	21	0.009	55.46
		22	0.009	55.45
		30	0.017	55.41
		34	0.022	55.39
		36	0.025	55.38
		38	0.028	55.37
		42	0.034	55.35
		44	0.037	55.34
		52	0.052	55.29
		56	0.061	55.27
		62	0.074	55.24
	Tengah	21	0.009	55.46
		22	0.009	55.45
		42	0.034	55.35
		52	0.052	55.29
	Dalam	21	0.009	55.46
		21	0.009	55.46
		21	0.009	55.46
		21	0.009	55.46
		22	0.009	55.45
		22	0.009	55.45
		24	0.011	55.44
		24	0.011	55.44
		30	0.017	55.41
		32	0.02	55.40
		38	0.028	55.37
		38	0.028	55.37
		TOTAL		

Sampel 3

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
3	Luar	24	0.01	49.86
		24	0.01	49.86
		24	0.01	49.86
		34	0.02	49.81
		36	0.023	49.80
		38	0.025	49.79
		38	0.025	49.79
		46	0.037	49.75
		46	0.037	49.75
		48	0.04	49.74
		48	0.04	49.74
		48	0.04	49.74
		58	0.059	49.69
		64	0.071	49.67
		66	0.076	49.66
		72	0.09	49.63
		78	0.106	49.60
		82	0.117	49.58
	Tengah	21	0.008	49.87
		21	0.008	49.87
		21	0.008	49.87
		21	0.008	49.87
		22	0.008	49.86
		28	0.014	49.84
		32	0.018	49.82
		40	0.028	49.78
		42	0.031	49.77
		44	0.034	49.76
	Dalam	22	0.008	49.86
		26	0.012	49.85
34		0.02	49.81	
42		0.031	49.77	
54		0.051	49.71	
TOTAL			1.123	

Sampel 4

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
4	Luar	21	0.006	41.48
		21	0.006	41.48
		21	0.006	41.48
		21	0.006	41.48
		21	0.006	41.48
		22	0.007	41.47
		22	0.007	41.47
		22	0.007	41.47
		32	0.015	41.43
		32	0.015	41.43
		34	0.017	41.43
		40	0.023	41.40
		42	0.026	41.39
		42	0.026	41.39
		42	0.026	41.39
		46	0.031	41.38
		46	0.031	41.38
		48	0.033	41.37
		48	0.033	41.37
		58	0.049	41.33
	66	0.063	41.30	
	72	0.075	41.28	
	78	0.088	41.25	
	111	0.179	41.13	
	Tengah	21	0.006	41.48
		22	0.007	41.47
		22	0.007	41.47
23		0.008	41.47	
24		0.008	41.47	
24		0.008	41.47	
28		0.011	41.45	
32		0.015	41.43	
41		0.024	41.40	
42		0.026	41.39	
62	0.056	41.32		

Dalam	22	0.007	41.47
	26	0.01	41.46
	34	0.017	41.43
	36	0.019	41.42
	42	0.026	41.39
	42	0.026	41.39
	54	0.042	41.35
	58	0.049	41.33
	58	0.049	41.33
	62	0.056	41.32
	63	0.057	41.31
	64	0.059	41.31
	74	0.079	41.27
TOTAL			1.453

Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Tegangan 18 kV (setelah diberi tegangan kritis).

Sampel 1

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
1	Luar	21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		24	0.006	30.94
		30	0.01	30.93
		32	0.011	30.92
		32	0.011	30.92
		32	0.011	30.92
		36	0.014	30.91
		38	0.016	30.90
		38	0.016	30.90
		42	0.019	30.89
		T	32	0.011
	42		0.019	30.89
	44		0.021	30.89
	D	21	0.005	30.95
		21	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		24	0.006	30.94
		28	0.008	30.93
		32	0.011	30.92
		32	0.011	30.92
		34	0.013	30.92
		35	0.013	30.91
		40	0.017	30.90
		42	0.019	30.89
	TOTAL			0.327

Sampel 2

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
2	Luar	38	0.016	30.90
		38	0.016	30.90
		40	0.017	30.90
		42	0.019	30.89
		42	0.019	30.89
		42	0.019	30.89
		44	0.021	30.89
		44	0.021	30.89
		52	0.029	30.86
		56	0.034	30.85
		62	0.042	30.83
		84	0.076	30.77
		98	0.104	30.73
	Tengah	24	0.006	30.94
		28	0.008	30.93
		42	0.019	30.89
		44	0.021	30.89
		52	0.029	30.86
		58	0.036	30.84
	Dalam	24	0.006	30.94
		24	0.006	30.94
		24	0.006	30.94
		26	0.007	30.94
		26	0.007	30.94
		26	0.007	30.94
		28	0.008	30.93
		28	0.008	30.93
		34	0.012	30.92
		36	0.014	30.94
		38	0.016	30.90
		58	0.036	30.84
		80	0.069	30.78
		88	0.084	30.76
TOTAL			0.838	

Sampel 3

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
3	Luar	28	0.008	30.93
		30	0.01	30.93
		32	0.011	30.92
		32	0.011	30.92
		42	0.019	30.89
		42	0.019	30.89
		42	0.019	30.89
		48	0.025	30.87
		48	0.025	30.87
		52	0.029	30.86
		52	0.029	30.86
		54	0.032	30.86
		82	0.073	30.77
		82	0.073	30.77
		113	0.138	30.68
	148	0.237	30.58	
	Tengah	22	0.005	30.95
		23	0.006	30.95
		24	0.006	30.94
		24	0.006	30.94
		28	0.008	30.93
		32	0.011	30.92
		64	0.044	30.83
		74	0.059	30.80
	Dalam	22	0.005	30.95
		22	0.005	30.95
		24	0.006	30.94
		42	0.019	30.89
		54	0.032	30.86
		54	0.032	30.86
64		0.044	30.83	
98		0.104	30.73	
128	0.177	30.64		
TOTAL			1.327	

Sampel 4

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
4	Luar	38	0.016	30.90
		46	0.023	30.88
		46	0.023	30.88
		48	0.025	30.87
		48	0.025	30.87
		48	0.025	30.87
		58	0.036	30.84
		64	0.044	30.83
		66	0.047	30.82
		72	0.056	30.80
		78	0.066	30.79
		144	0.225	30.60
		156	0.264	30.56
		168	0.306	30.53
	170	0.313	30.52	
	Tengah	28	0.008	30.93
		30	0.01	30.93
		32	0.011	30.92
		40	0.017	30.90
		42	0.019	30.89
		44	0.021	30.89
		62	0.042	30.83
		88	0.084	30.76
	Dalam	46	0.023	30.88
		48	0.025	30.87
		48	0.025	30.87
		52	0.029	30.86
		52	0.029	30.86
		68	0.05	30.82
		68	0.05	30.82
		68	0.05	30.82
	73	0.058	30.80	
76	0.062	30.79		
TOTAL			2.107	

Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Tegangan 20 kV (setelah diberi tegangan kritis).

Sampel 1

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
1	Luar	21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		22	0.006	34.39
		24	0.007	34.38
		30	0.011	34.36
		32	0.012	34.36
		32	0.012	34.36
		32	0.012	34.36
		36	0.016	34.34
		38	0.017	34.34
		38	0.017	34.34
		42	0.021	34.32
	T	32	0.012	34.36
		42	0.021	34.32
		44	0.023	34.32
	D	21	0.005	34.39
		21	0.005	34.39
		22	0.006	34.39
		22	0.006	34.39
		24	0.007	34.38
		28	0.009	34.37
		32	0.012	34.36
		32	0.012	34.36
		34	0.014	34.35
		35	0.015	34.35
40	0.019	34.33		
42	0.021	34.32		
TOTAL			0.359	

Sampel 2

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
2	Luar	38	0.017	34.34
		38	0.017	34.34
		40	0.019	34.33
		42	0.021	34.32
		42	0.021	34.32
		42	0.021	34.32
		44	0.023	34.32
		44	0.023	34.32
		52	0.032	34.29
		56	0.038	34.28
		62	0.046	34.26
		84	0.085	34.19
		98	0.115	34.14
	Tengah	24	0.007	34.38
		28	0.009	34.37
		42	0.021	34.32
		44	0.023	34.32
		52	0.032	34.29
		58	0.04	34.27
	Dalam	24	0.007	34.38
		24	0.007	34.38
		24	0.007	34.38
		26	0.008	34.38
		26	0.008	34.38
		26	0.008	34.38
		28	0.009	34.37
		28	0.009	34.37
		34	0.014	34.35
		36	0.016	34.38
		38	0.017	34.34
		58	0.04	34.27
		80	0.077	34.20
88	0.093	34.17		
TOTAL			0.930	

Sampel 3

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
3	Luar	28	0.009	34.37
		30	0.011	34.36
		32	0.012	34.36
		32	0.012	34.36
		42	0.021	34.32
		42	0.021	34.32
		42	0.021	34.32
		48	0.028	34.30
		48	0.028	34.30
		52	0.032	34.29
		52	0.032	34.29
		54	0.035	34.28
		82	0.081	34.19
		82	0.081	34.19
	113	0.154	34.09	
	148	0.264	33.98	
	Tengah	22	0.006	34.39
		23	0.006	34.39
		24	0.007	34.38
		24	0.007	34.38
		28	0.009	34.37
		32	0.012	34.36
		64	0.049	34.25
	74	0.066	34.22	
	Dalam	22	0.006	34.39
		22	0.006	34.39
		24	0.007	34.38
		42	0.021	34.32
54		0.035	34.28	
54		0.035	34.28	
64		0.049	34.25	
98		0.115	34.14	
128	0.197	34.05		
TOTAL			1.475	

Sampel 4

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
4	Luar	38	0.017	34.34
		46	0.025	34.31
		46	0.025	34.31
		48	0.028	34.30
		48	0.028	34.30
		48	0.028	34.30
		58	0.04	34.27
		64	0.049	34.25
		66	0.052	34.25
		72	0.062	34.23
		78	0.073	34.21
		144	0.25	33.99
		156	0.293	33.96
		168	0.34	33.92
	170	0.348	33.91	
	Tengah	28	0.009	34.37
		30	0.011	34.36
		32	0.012	34.36
		40	0.019	34.33
		42	0.021	34.32
		44	0.023	34.32
		62	0.046	34.26
		88	0.093	34.17
	Dalam	46	0.025	34.31
		48	0.028	34.30
		48	0.028	34.30
		52	0.032	34.29
		52	0.032	34.29
		68	0.056	34.24
		68	0.056	34.24
68		0.056	34.24	
73	0.064	34.22		
76	0.069	34.21		
TOTAL			2.338	

Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Tegangan 22 kV (setelah diberi tegangan kritis).

Sampel 1

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
1	Luar	21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		24	0.008	37.82
		30	0.012	37.80
		32	0.014	37.79
		32	0.014	37.79
		32	0.014	37.79
		36	0.017	37.78
		38	0.019	37.77
		38	0.019	37.77
		42	0.023	37.76
	T	32	0.014	37.79
		42	0.023	37.76
		44	0.026	37.75
	D	21	0.006	37.83
		21	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		24	0.008	37.82
		28	0.01	37.81
		32	0.014	37.79
		32	0.014	37.79
		34	0.015	37.79
		35	0.016	37.78
		40	0.021	37.76
		42	0.023	37.76
		42	0.023	37.76
TOTAL			0.401	

Sampel 2

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
2	Luar	38	0.019	37.77
		38	0.019	37.77
		40	0.021	37.76
		42	0.023	37.76
		42	0.023	37.76
		42	0.023	37.76
		44	0.026	37.75
		44	0.026	37.75
		52	0.036	37.72
		56	0.041	37.71
		62	0.051	37.68
		84	0.093	37.61
		98	0.127	37.56
	Tengah	24	0.007	37.82
		28	0.01	37.81
		42	0.023	37.76
		44	0.026	37.75
		52	0.036	37.72
		58	0.044	37.70
	Dalam	24	0.008	37.82
		24	0.008	37.82
		24	0.008	37.82
		26	0.009	37.81
		26	0.009	37.81
		26	0.009	37.81
		28	0.01	37.81
		28	0.01	37.81
		34	0.015	37.79
		36	0.017	37.81
		38	0.019	37.77
		58	0.044	37.70
		80	0.085	37.62
		88	0.102	37.59
TOTAL			1.027	

Sampel 3

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
3	Luar	28	0.01	37.81
		30	0.012	37.80
		32	0.014	37.79
		32	0.014	37.79
		42	0.023	37.76
		42	0.023	37.76
		42	0.023	37.76
		48	0.03	37.73
		48	0.03	37.73
		52	0.036	37.72
		52	0.036	37.72
		54	0.039	37.71
		82	0.089	37.61
		82	0.089	37.61
		113	0.169	37.50
	148	0.29	37.38	
	Tengah	22	0.006	37.83
		23	0.007	37.82
		24	0.008	37.82
		24	0.008	37.82
		28	0.01	37.81
		32	0.014	37.79
		64	0.054	37.68
		74	0.072	37.64
	Dalam	22	0.006	37.83
		22	0.006	37.83
		24	0.008	37.82
		42	0.023	37.76
		54	0.039	37.71
		54	0.039	37.71
64		0.054	37.68	
98		0.127	37.56	
128	0.217	37.45		
TOTAL			1.625	

Sampel 4

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
4	Luar	38	0.019	37.77
		46	0.028	37.74
		46	0.028	37.74
		48	0.03	37.73
		48	0.03	37.73
		48	0.03	37.73
		58	0.044	37.70
		64	0.054	37.68
		66	0.058	37.67
		72	0.069	37.65
		78	0.08	37.63
		144	0.274	37.39
		156	0.322	37.35
		168	0.374	37.31
		170	0.383	37.30
	Tengah	28	0.01	37.81
		30	0.012	37.80
		32	0.014	37.79
		40	0.021	37.76
		42	0.023	37.76
		44	0.026	37.75
		62	0.051	37.68
		88	0.102	37.59
	Dalam	46	0.028	37.74
		48	0.03	37.73
		48	0.03	37.73
		52	0.036	37.72
		52	0.036	37.72
		68	0.061	37.66
		68	0.061	37.66
68		0.061	37.66	
73		0.07	37.65	
76	0.076	37.63		
TOTAL			2.571	

Besar Pelepasan Muatan Sebagian Pada Tegangan 24 kV (setelah diberi tegangan kritis).

Sampel 1

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
1	Luar	21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		22	0.007	41.27
		24	0.008	41.26
		30	0.013	41.24
		32	0.015	41.23
		32	0.015	41.23
		32	0.015	41.23
		36	0.019	41.21
		38	0.021	41.20
		38	0.021	41.20
		42	0.025	41.19
	T	32	0.015	41.23
		42	0.025	41.19
		44	0.028	41.18
	D	21	0.006	41.27
		21	0.006	41.27
		22	0.007	41.27
		22	0.007	41.27
		24	0.008	41.26
		28	0.011	41.24
		32	0.015	41.23
		32	0.015	41.23
		34	0.017	41.22
		35	0.018	41.22
40	0.023	41.20		
42	0.025	41.19		
42	0.025	41.19		
TOTAL			0.434	

Sampel 2

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
2	Luar	38	0.02	41.20
		38	0.02	41.20
		40	0.023	41.20
		42	0.025	41.19
		42	0.025	41.19
		42	0.025	41.19
		44	0.028	41.18
		44	0.028	41.18
		52	0.039	41.15
		56	0.045	41.13
		62	0.055	41.11
		84	0.102	41.03
		98	0.138	40.97
	Tengah	24	0.008	41.26
		28	0.011	41.24
		42	0.025	41.19
		44	0.028	41.18
		52	0.039	41.15
		58	0.048	41.13
	Dalam	24	0.008	41.26
		24	0.008	41.26
		24	0.008	41.26
		26	0.01	41.25
		26	0.01	41.25
		26	0.01	41.25
		28	0.011	41.24
		28	0.011	41.24
		34	0.017	41.22
		36	0.019	41.25
		38	0.021	41.20
		58	0.048	41.13
		80	0.092	41.04
88	0.112	41.01		
TOTAL			1.117	

Sampel 3

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
3	Luar	28	0.011	41.24
		30	0.013	41.24
		32	0.015	41.23
		32	0.015	41.23
		42	0.025	41.19
		42	0.025	41.19
		42	0.025	41.19
		48	0.033	41.17
		48	0.033	41.17
		52	0.039	41.15
		52	0.039	41.15
		54	0.042	41.14
		82	0.097	41.03
		82	0.097	41.03
		113	0.184	40.91
	148	0.316	40.78	
	Tengah	22	0.007	41.27
		23	0.008	41.26
		24	0.008	41.26
		24	0.008	41.26
		28	0.011	41.24
		32	0.015	41.23
		64	0.015	41.10
	74	0.079	41.06	
	Dalam	22	0.007	41.27
		22	0.007	41.27
		24	0.008	41.26
		42	0.025	41.19
		54	0.042	41.14
		54	0.042	41.14
64		0.059	41.10	
98		0.138	40.97	
128	0.236	40.86		
TOTAL			1.724	

Sampel 4

Sampel	Bagian	Diameter Rongga yang lebih dari 20 μm (μm)	Hasil perhitungan q (pC)	Kuat Medan Listrik dalam Rongga (kV/cm)
4	Luar	38	0.021	41.20
		46	0.031	41.17
		46	0.031	41.17
		48	0.033	41.17
		48	0.033	41.17
		48	0.033	41.17
		58	0.048	41.13
		64	0.059	41.10
		66	0.063	41.10
		72	0.075	41.07
		78	0.088	41.05
		144	0.299	40.79
		156	0.352	40.75
		168	0.408	40.70
	170	0.418	40.69	
	Tengah	28	0.011	41.24
		30	0.013	41.24
		32	0.015	41.23
		40	0.023	41.20
		42	0.025	41.19
		44	0.028	41.18
		62	0.055	41.11
		88	0.112	41.01
	Dalam	46	0.031	41.17
		48	0.033	41.17
		48	0.033	41.17
		52	0.039	41.15
		52	0.039	41.15
68		0.067	41.09	
68		0.067	41.09	
68		0.067	41.09	
73		0.077	41.07	
76	0.083	41.06		
TOTAL			2.81	