

# ANALISIS *PARTIAL DISCHARGE* PADA MATERIAL POLIMER RESIN EPOKSI DENGAN MENGGUNAKAN ELEKTRODA JARUM BIDANG

Winarko Ari P.<sup>1</sup>, Abdul Syakur<sup>2</sup>, Yuningtyastuti<sup>2</sup>

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Soedharto, SH, Tembalang, Semarang 50275

## Abstrak

*Material polimer sekarang ini sangat luas digunakan sebagai isolasi kabel atau peralatan tegangan tinggi. Dalam penggunaannya, pada isolasi polimer seringkali ditemukan partial discharge (PD) yang dapat mempengaruhi penuaan isolasi polimer sehingga menyebabkan penurunan kualitas isolasi atau degradasi. Salah satu penyebab partial discharge adalah adanya protrusions (tonjolan) pada interface antara konduktor dan lapisan isolasi polimer. Partial discharge merupakan awal kegagalan isolasi polimer. Oleh karena itu, sangat perlu untuk mengetahui perilaku dari partial discharge yang terjadi pada isolasi polimer khususnya resin epoksi.*

*Tugas akhir ini melakukan penelitian PD skala laboratorium dengan menggunakan sistem elektroda jarum-bidang pada tegangan AC yang didukung dengan peralatan seperti Osiloskop Digital GDS 2104, PD detector, dan PC maka dapat diperoleh keterangan PD berupa jumlah pulsa PD dan muatan maksimum PD yang terjadi selama pengukuran. Sampel polimer yang digunakan adalah resin epoksi dan sampel diamati pada temperatur ruang (29°C) dan temperatur 40°C.*

*Berdasarkan hasil pengukuran tersebut menunjukkan bahwa jumlah pulsa PD dan muatan maksimum PD pada sampel polimer resin epoksi sebagai fungsi waktu dan fungsi tegangan menunjukkan kurva yang menaik dengan bertambahnya waktu dan tegangan yang diaplikasikan. Jumlah pulsa PD dan muatan maksimum PD juga meningkat pada pengukuran dengan temperatur 40°C dibandingkan pada temperatur 29°C.*

*Kata kunci : partial discharge, resin epoksi, elektroda jarum- bidang.*

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Penyaluran energi listrik dalam kuantitas besar dilakukan dengan menggunakan saluran udara tegangan tinggi atau ekstra tinggi. Untuk daerah yang masih jarang penduduknya dan harga tanah masih murah, penyaluran energi listrik biasanya dilakukan melalui saluran udara. Namun, di daerah metropolitan saluran udara untuk transmisi dan distribusi listrik tegangan tinggi kadangkala sulit diterapkan karena dapat mengurangi estetika ruang, berinterferensi dengan sistem telekomunikasi, memerlukan jarak aman (*right of way*) yang lebar, dan juga harga tanah yang tinggi. Alternatif untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menggunakan sistem penyaluran energi listrik bawah tanah. Beberapa alasan dapat dikemukakan antara lain, pengaruh medan elektromagnetik yang ditimbulkan oleh saluran tegangan tinggi dan ekstra tinggi dapat direduksi, keandalan serta keamanan dapat dicapai.

Dalam desain kabel bawah tanah, isolasi adalah salah satu faktor yang penting dan sekarang ini banyak jenis bahan isolasi yang telah digunakan. Faktor yang berpengaruh pada performansi kabel isolasi polimer adalah cacat (*defect*). Cacat itu dapat timbul dalam bentuk void, ketidakmurnian (*impurities*), dan tonjolan (*protrusion*) pada permukaan (*interface*) antara lapisan konduktor dan isolasi polimer sehingga dapat meninggikan tekanan medan listrik yang tinggi pada bagian yang cacat tersebut. Dalam pemakaiannya akibat adanya stress (tekanan) listrik yang terus-menerus maka akan terjadi penuaan (*aging*) isolasi polimer dan pada cacat

tersebut akan muncul peristiwa *partial discharge* (PD) dalam material isolasi polimer yang merupakan awal terjadinya *breakdown* atau kegagalan isolasi polimer. *Partial discharge* adalah peluahan listrik lokal yang hanya menjembatani sebagian isolasi di antara konduktor dan yang mungkin terjadi dekat dengan konduktor.

Analisis *partial discharge* berguna untuk mendiagnosis tingkat degradasi isolasi polimer. Fenomena *pre-breakdown* dapat dideteksi dengan pengamatan dan pengukuran pulsa *partial discharge*. Mempelajari *partial discharge* menjadi penting karena dengan mengetahui tingkat *partial discharge* suatu isolasi dapat diperkirakan kondisi isolasi. Bahkan ada upaya untuk menggunakan informasi *partial discharge* untuk memprediksi umur sisa isolasi.

Pengukuran dan pengamatan PD dapat dilakukan melalui pengamatan efek dari PD tersebut yaitu diantaranya melalui pulsa arus listrik, perubahan sifat material isolasi, suara dan radiasi sinar elektromagnetik. Pengukuran PD yang sekarang banyak digunakan adalah dengan mendeteksi pulsa arus yang ditimbulkan oleh PD tersebut. Sehingga pada tugas akhir ini pengukuran PD dilakukan dengan sistem pengukuran yang mendeteksi arus (muatan) dengan menggunakan elektroda jarum-bidang untuk memperkirakan ketahanan material isolasi terhadap PD dan menyajikan data PD berupa besar muatan tiap PD dan jumlah pulsa PD yang terjadi selama pengukuran.

### 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari pembuatan tugas akhir ini adalah :

1. Mengetahui jumlah pulsa dan muatan maksimum *partial discharge* terhadap waktu penerapan tegangan pada bahan isolasi resin epoksi selama pengukuran.
2. Mengetahui jumlah pulsa dan muatan maksimum *partial discharge* terhadap tegangan yang diaplikasikan pada bahan isolasi resin epoksi selama pengukuran.
3. Mengetahui jumlah pulsa dan muatan maksimum *partial discharge* terhadap temperatur sampel pada bahan isolasi resin epoksi selama pengukuran.

### 1.3 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Tegangan yang diterapkan adalah tegangan AC 50 Hz dengan tegangan kerja 22 kV<sub>rms</sub>, 24 kV<sub>rms</sub>, dan 26 kV<sub>rms</sub> dan dalam range waktu 120 menit.
2. Temperatur sampel pada saat pengukuran adalah temperatur ruang (29<sup>0</sup>C) dan 40<sup>0</sup>C dan PD yang terjadi tidak dipengaruhi oleh faktor lingkungan luar.
3. Pengamatan pulsa *Partial discharge* dilakukan melalui *Oscilloscope GDS 2104* dan proses pengambilan data tidak dilakukan secara *real-time*.
4. Elektroda jarum yang digunakan dianggap memiliki radius kurvatur tetap sama yaitu 3 μm.
5. Sampel polimer yang digunakan dari jenis resin epoksi dengan elektroda jarum-bidang.
6. Karakteristik PD yang diamati adalah jumlah pulsa PD dan besarnya muatan PD, tidak membahas fasa terjadinya PD.
7. Tidak membahas secara detail alat dan komponen pengukuran.

## 2. DASAR TEORI

### 2.1 Isolasi Polimer

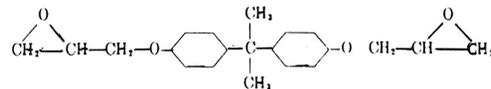
Suatu polimer merupakan zat yang terdiri atas rangkaian panjang molekul kecil (*monomer*) yang berulang-ulang membentuk molekul besar (*makromolekul*). Secara umum polimer dibagi dalam tiga kelompok yaitu : plastik, serat dan *elastomer*.

Material polimer telah dipakai selama lebih 50 tahun dan mengalami perkembangan pesat dibanding bahan lainnya. Pada tahun 1893 di London telah digunakan kabel transmisi bawah tanah 10 kV dengan isolasi kertas. Kemudian pada tahun 1911 kabel isolasi kertas yang diremisi minyak (*oil impregnated paper*) dengan tegangan 60 kV digunakan di Jerman. Sekitar tahun 1917 kabel yang terisi minyak (*oil filled cable* = OF) digunakan di Itali. Kabel OF telah digunakan dalam sistem transmisi bawah tanah lebih dari setengah abad. Jenis bahan isolasi polimer yang telah digunakan di antaranya adalah XLPE, PVC dan LDPE. Hingga saat ini kabel bawah tanah berisolasi polimer telah digunakan pada tegangan 5 kV hingga 500 kV, yang meliputi *Low Density Polyethylene*

(LDPE), *Cross Linked Polyethylene* (XLPE), *Tree-Retardent Cross Linked Polyethylene* (TRXLPE), dan *Ethylene-Propylene Rubber* (EPR)<sup>[9]</sup>.

### 2.2. Resin Epoksi

Resin epoksi adalah golongan polimer termoset di mana campuran dua komponen yang akhirnya berbentuk seperti kaca pada temperatur ruang, yang mempunyai sifat isolasi listrik yang layak dan juga mempunyai kedekatan air yang tinggi<sup>[1]</sup>. Resin epoksi sudah menjadi bagian penting dari material isolasi khususnya dalam bidang kelistrikan karena jenis polimer ini sudah dikenal lebih dari 50 tahun yang lalu.



Gambar 2.1 Struktur kimia Resin epoksi

Resin epoksi adalah kombinasi dari bisphenol A dan epichlorohydrin yang mempunyai formasi dari rentetan polimer, yang mengandung dua kelompok reaktif epoxide dan hydroxyl. Bentuk kimia resin epoksi dapat dilihat pada gambar 2.1.

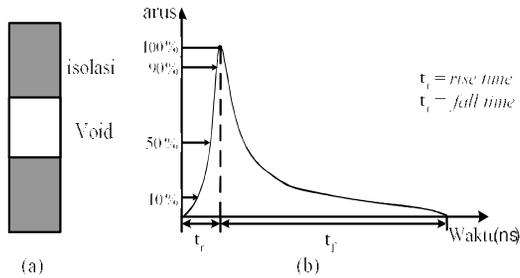
### 2.3 Peluahan Sebagian (*Partial Discharge*)

Peluahan sebagian atau *partial discharge* yang disingkat PD adalah peluahan listrik lokal yang hanya menjembatani sebagian isolasi di antara konduktor dan yang mungkin terjadi dekat dengan konduktor.

Aktivitas PD dapat disebabkan oleh beragam cacat atau penuaan seperti *voids* (rongga), *contaminants* (ketidakh murnian), *protrusions* (tonjolan), *tracking* dari *electrical trees* dan lain-lain. Sebagai tambahan yang menyebabkan penuaan elektrik, aktivitas PD juga ditandai penuaan termal, mekanik, dan lingkungan pada peralatan tegangan tinggi. Peristiwa PD tidak dengan segera menjadikan kegagalan isolasi, tetapi PD secara berangsur-angsur menurunkan kualitas isolasi dan mengikis material dielektrik yang akhirnya mendorong kearah kegagalan sempurna. PD dapat digambarkan sebagai pulsa listrik atau peluahan pada suatu rongga berisi gas atau pada sebuah permukaan dielektrik dari sistem isolasi cair, padat maupun gas. Tanaka menginvestigasi tentang cacat dari permulaan breakdown isolasi pada kabel XLPE dengan menerapkan “*pre-breakdown partial discharge detecting method (PPD method)*” pada 23 buah sampel kabel yang mempunyai ketebalan isolasi 2-3 mm. Hasil investigasi menunjukkan bahwa 74% dari kegagalan dimulai dari ketidakh murnian dalam isolasi dan 26% dimulai dari tonjolan<sup>[9]</sup>.

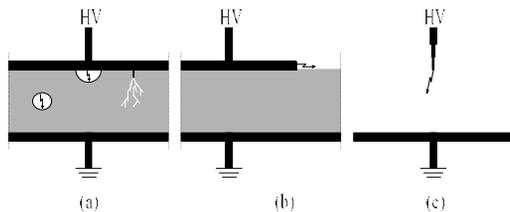
Syarat terjadinya PD yaitu adanya elektron (muatan) dan jika tekanan medan listrik yang diterapkan melebihi nilai kritis insepasi PD tersebut<sup>[5]</sup> atau bisa dikatakan tegangan yang diterapkan lebih besar dari tegangan insepasi PD. Meskipun tegangan meningkat dan mencapai tegangan percik (*spark voltage*), tidak akan ada *discharge* sampai sebuah elektron penyebab *avalanche* timbul untuk

menginisiasi PD. Ketersediaan (*availability*) dari elektron penyebab ini merupakan proses yang stokastik, yang merupakan penyebab dari ciri stokastik dari *partial discharge*.



Gambar 2.2. Model void dan pulsa *partial discharge*

Proses *partial discharge* merupakan proses yang cepat. Arus yang berhubungan dengan proses ini mempunyai tipikal *rise time* sekitar 1 ns dan *fall time* sekitar 4 ns. Ditinjau dari fisik, pulsa PD disusun oleh dua pembawa muatan yaitu pembawa muatan negatif (elektron) dan pembawa muatan positif (ion). Karena mobilitas elektron jauh lebih besar daripada ion, maka arus akibat elektron besar tetapi segera habis dan berkontribusi pada daerah *rise time*, sedangkan arus akibat ion mengalir pada periode yang lebih lama sehingga kecil dan berkontribusi pada daerah ekor<sup>[7]</sup>.



Gambar 2.3. Konsep dasar : (a) *Internal discharge* (b) *Surface discharge* (c) *Corona discharge*

*Internal discharge* terjadi pada void atau permukaan konduktor yang runcing di dalam volume material isolasi padat atau cair. *Surface discharge* atau pelepasan muatan permukaan adalah pelepasan muatan dari konduktor ke media gas atau cair dan terjadi pada permukaan material isolasi padat yang tidak tertutupi oleh konduktor, sedangkan *corona discharge* adalah peristiwa pelepasan muatan pada media isolasi cair atau gas yang berada di sekeliling kawat konduktor, terutama pada bagian yang kasar, runcing atau kotor. Korona mengeluarkan cahaya berwarna ungu muda, suara mendesis dan menimbulkan panas.

### 2.3.1 Pendeteksian dan Pengukuran *Partial Discharge*

Pendeteksian dan pengukuran kejadian PD dapat dilakukan dengan mengamati beberapa efek dari PD tersebut yaitu timbulnya pulsa arus listrik, radiasi elektromagnetik, radiasi ultrasonik, emisi cahaya ultraviolet dan perubahan fisik material isolasi. Ada beberapa alasan mengapa pengukuran PD dilakukan :

1. Mengevaluasi desain dari sistem isolasi baru, untuk menyakinkan bahwa PD tidak ada pada saat isolasi bekerja di bawah kondisi normal.
2. Meyakinkan bahwa tidak ada cacat berupa void ataupun tonjolan selama proses pabrikan sistem isolasi.
3. Meyakinkan isolasi pada peralatan tidak mengalami penurunan kualitas isolasi selama beroperasi akibat tekanan listrik, panas, mekanik dan pengaruh lingkungan.

Tujuan dari masing-masing tes ini adalah untuk menjamin bahwa peralatan memiliki *life service* yang diharapkan dan peralatan dapat beroperasi dengan baik. Jika PD yang dideteksi atau tingkat PD terlalu tinggi, maka sistem isolasi ini akan gagal secara prematur.

### 2.4 Proses Dasar Ionisasi

Peristiwa lepasnya elektron dari ikatannya disebut ionisasi yang dapat menyebabkan kegagalan listrik. Elektron dapat lepas dari ikatannya jika mendapat energi yang cukup. Di dalam medan listrik, elektron-elektron bebas akan mendapat energi yang cukup kuat, sehingga dapat merangsang timbulnya proses ionisasi. Besarnya energi tersebut :

$$U = \frac{1}{2} m_e \cdot v_e^2 = e \cdot V \quad \dots(2.3)$$

#### 2.4.1 Ionisasi karena benturan elektron

Dalam proses ionisasi karena benturan, sebuah elektron bebas berbenturan dengan atom atau molekul gas netral dan menyebabkan timbul elektron baru dan ion positif. Kemudian proses ini dapat terjadi berantai dan direpresentasikan sebagai berikut<sup>[8]</sup> :



#### 2.4.2 Ionisasi karena cahaya (*Fotoionisasi*)

Secara umum proses fotoionisasi dapat dinyatakan dengan persamaan :



#### 2.4.3 Ionisasi karena panas (*Ionisasi Termal*)

Jika gas dipanasi sampai suhu yang cukup tinggi, maka banyak atom netral akan memperoleh energi yang diperlukan untuk mengionisasikan atom-atom yang mereka bentur. Proses ini dapat dituliskan sebagai berikut :



#### 2.4.4 Rekombinasi

Rekombinasi adalah kebalikan dari ionisasi, yaitu bergabungnya kembali partikel bermuatan positif dan negatif tersebut di atas. Energi potensial dan energi kinetis dalam proses rekombinasi elektron ion atau ion-ion akan terpancar dalam bentuk kuantum radiasi ( *foton* ) yang mempunyai energi  $h \cdot \nu$ .

## 3. Perancangan

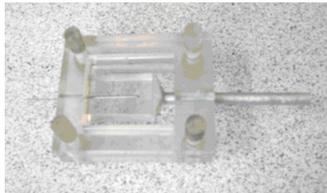
### 3.1 Bahan

Pengukuran PD dilakukan di laboratorium dengan menggunakan elektroda jarum-bidang. Elektroda jarum dengan panjang 50 mm, diameter 1 mm, radius kurvatur ujung jarum 3 $\mu$ m terbuat dari baja dan dibenamkan ke dalam sampel polimer.

Untuk elektroda bidang memiliki ukuran 25 x 10 mm dengan ketebalan 1,5 mm terbuat dari aluminium. Jarak antara kedua elektroda jarum-bidang adalah 5 mm. Sampel yang digunakan adalah resin epoksi dengan ukuran masing-masing 30 x 20 x 10 mm.



Gambar 3.1 Sampel polimer resin epoksi



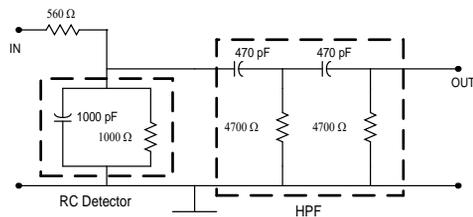
Gambar 3.2 Elektroda jarum bidang

### 3.2 Peralatan Pengukuran

#### 1. Kit Pembangkit Tegangan Tinggi

Kit pembangkit tegangan yang digunakan terdiri dari trafo uji dan panel kontrol. Jenis trafo uji yang digunakan adalah trafo *step-up* dengan kapasitas tegangan maksimal 100 kV. Panel kontrol yang digunakan terdiri dari *Operating Terminal (OT) 276* untuk panel penaik atau penurun tegangan dan *Digital Measuring Instrumen (DMI) 551* untuk panel penunjuk nilai tegangan.

#### 2. PD Detector



Gambar 3.3. Rangkaian PD Detector

Alat ini terdiri dari rangkaian *RC Detector* dan *HPF*. *RC Detector* digunakan untuk mendeteksi pulsa Partial Discharge (PD) yang terjadi pada sampel, sedangkan filter *HPF* berfungsi menapis sinyal yang diakibatkan arus berfrekuensi rendah yang bukan berasal dari PD dan meneruskan sinyal berfrekuensi tinggi yang ditimbulkan arus pulsa PD.

#### 3. Arrester

*Arrester* digunakan untuk melindungi osiloskop dari tegangan lebih yang mungkin terjadi. *Body arrester* dihubungkan ke *ground* untuk pengamanan. Alat ini berada diantara *RC detector* dengan osiloskop.

#### 4. Oscilloscope

Osiloskop yang digunakan dalam pengukuran ini adalah jenis *Digital Real-Time Oscilloscope GDS 2104* buatan GW Instek yang kompak dan *portable*,

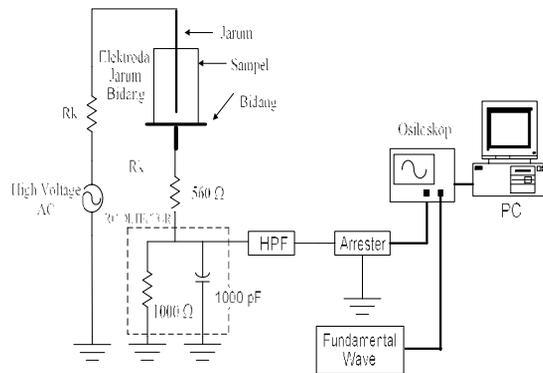
memiliki 4 channel dengan *bandwidth* 200 Mhz, laju *sampling* maksimum per chanel 1 GS/s. Panjang data yang direkam 500 titik per chanel, dengan kapasitas memori 4 KB. Osiloskop ini juga dilengkapi port USB, RS 232, dan GPIB.

#### 5. Kontrol Temperatur

Untuk membuat temperatur minyak trafo dalam chamber 40°C digunakan alat pengatur suhu dengan kontrol on-off. Elemen pemanas yang digunakan adalah *heater* 250 watt yang dicelupkan ke dalam minyak trafo dan diatur secara on-off oleh sebuah relai dan sebagai sensor suhunya adalah LM35.

### 3.3 Rangkaian Pengukuran dan Pengolahan Data

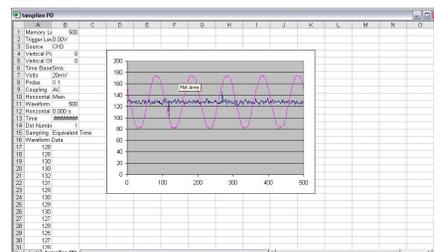
Gambar 3.5 menunjukkan rangkaian pengukuran partial discharge (PD) menggunakan elektroda jarum-bidang. Elektroda jarum dihubungkan dengan tegangan tinggi AC (50 Hz) 22 kVrms, 24 kVrms, dan 26 kVrms. Pada saat pengukuran, elektroda jarum-bidang direndam ke dalam kotak berukuran 20 x 15 x 12 cm yang berisi minyak trafo untuk mencegah terjadinya *discharge* permukaan.



Gambar 3.5 Rangkaian sistem pengukuran PD

PD yang muncul pada sampel dideteksi dengan *RC detector*. Keluaran dari *RC detector* adalah hasil integrasi dari gelombang arus PD terhadap waktu dan dengan demikian tegangan keluaran ini sebanding dengan muatan PD<sup>[10]</sup>.

$$V_{out} \sim q$$



Gambar 3.6 File hasil eksekusi data tampilan pulsa PD-nya

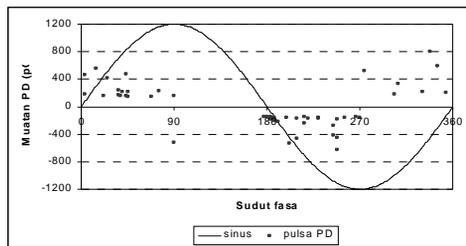
Osiloskop diatur pada 20 mV/div, 5 kS/s, *trigger level* 0.00 V, posisi horizontal 0.00 s. Pengambilan datanya dilakukan dengan menghubungkan *flashdisk* pada port USB osiloskop. Data ini berupa *file* berekstensi .csv yang dapat diolah menggunakan

software Microsoft Excell untuk menunjukkan pulsa PD yang terukur oleh osiloskop.

### 3.4 Bentuk Representasi Data

Pulsa-pulsa PD hasil pengukuran ini dapat direpresentasikan pada bidang fasa tegangan dalam bentuk urutan pulsa PD atau berupa pola  $\phi$ -q-n. Simbol  $\phi$  adalah sudut fasa dimana PD terjadi, q adalah muatan pulsa PD dan n adalah jumlah pulsa PD.

Gambar 3.7 menunjukkan urutan pulsa PD berupa pola  $\phi$ -q-n dalam suatu hasil pengukuran dengan tegangan 22 kVrms menit ke-1. Setiap titik merepresentasikan sebuah pulsa PD, koordinat titik tersebut menyatakan besar muatan dan posisi fasa dimana PD terjadi. Semakin padat jumlah titik-titiknya semakin besar densitas PD.



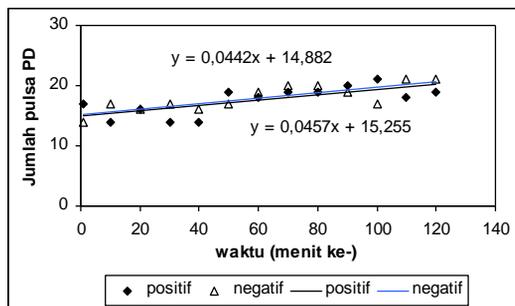
Gambar 3.7. Bentuk representasi Pulsa PD

## 4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Karakteristik PD terhadap Waktu

#### 4.1.1 Karakteristik Jumlah Pulsa PD

Gambar 4.1 menunjukkan karakteristik jumlah pulsa PD hasil pengukuran sebagai fungsi waktu pada tegangan 24 kVrms pada suhu ruang (29°C).



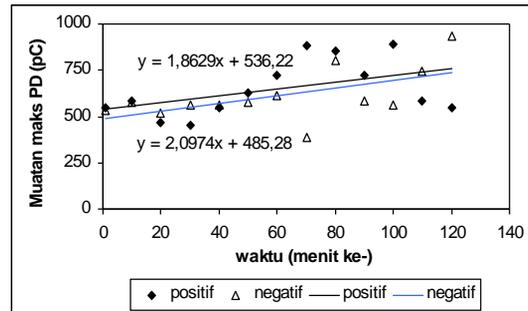
Gambar 4.1 Jumlah pulsa PD sebagai fungsi waktu

Berdasarkan gambar 4.1 terlihat bahwa peristiwa *partial discharge* (PD) pada bahan resin epoksi menggunakan elektroda jarum bidang muncul pada siklus positif maupun negatif. Jumlah pulsa PD baik positif maupun negatif berubah selama waktu penerapan tegangan. Secara umum dapat diketahui bahwa karakteristik jumlah pulsa PD positif maupun negatif cenderung mengalami kenaikan seiring dengan lamanya waktu penerapan tegangan. Fenomena bertambahnya jumlah pulsa PD dapat dijelaskan sebagai berikut : jika di antara kedua elektroda diterapkan tegangan maka akan timbul medan listrik di antara kedua elektroda tersebut yang mempunyai besar dan arah tertentu. Dalam polimer

padat perolehan energi oleh elektron dari medan listrik akan memicu proses eksitasi, rekombinasi, dan juga dapat membangkitkan radiasi ultraviolet, serta sejumlah elektron akan memperoleh cukup energi untuk mengionisasi polimer. Elektron – elektron akan terionisasi dan memiliki energi kinetik yang cukup untuk memungkinkan mengionisasi atom netral dalam polimer bila bertumbukan, dengan adanya ionisasi ini maka muncul elektron dan ion positif baru, kemudian elektron itu akan memulai proses serupa untuk menghasilkan dua elektron dan ion positif baru dan seterusnya. Jika proses ini berlangsung terus-menerus seiring pertambahan waktu maka elektron akan terus bertambah yang memungkinkan PD lebih mudah terjadi. Peristiwa pulsa *partial discharge* yang terjadi selama pengukuran bersifat stokastik, hal ini dapat diakibatkan dari ketersediaan elektron pemicu untuk memulai PD merupakan proses stokastik. Perkembangan PD sangat ditentukan oleh proses ionisasi, rekombinasi elektron-ion, dan adanya *attachment* elektron.

#### 4.1.2 Karakteristik Muatan Maksimum PD

Gambar 4.2 menunjukkan karakteristik muatan maksimum PD sebagai fungsi waktu pada tegangan 22 kVrms pada kondisi suhu ruang (29°C).



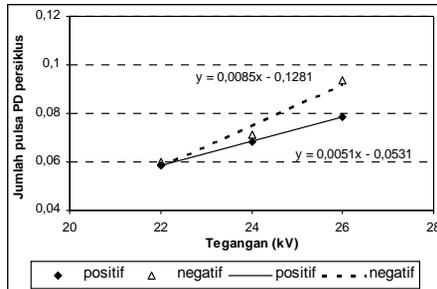
Gambar 4.2 Muatan maksimum PD sebagai fungsi waktu

Dari gambar 4.2 dapat dilihat muatan maksimum PD siklus positif maupun negatif mengalami fluktuasi, tetapi secara umum mengalami kenaikan seiring bertambahnya waktu. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut : ketika tegangan tinggi diterapkan maka bahan polimer akan mengalami tekanan medan listrik tinggi. Semakin lama waktu penerapan tegangan maka semakin banyak perulangan siklus tegangan AC positif dan negatif. Proses tersebut adalah proses perulangan muatan yang terinjeksi dan terekstrasi. Pembawa muatan diinjeksi dan diekstrasi ke dalam dielektrik polimer selama fase positif dan negatif tegangan AC. Jika level muatan yang diinjeksikan melebihi level potensial barrier yang terbentuk pada interface antara daerah elektroda dan dielektrik maka akan terjadi *partial discharge*. *Partial discharge* akan menyebabkan degradasi akibat pemboman ion atau juga akibat reaksi kimia. Benturan-benturan elektron pada anoda akan mengakibatkan terlepasnya ikatan kimiawi zat padat. Demikian pula, pemboman katoda

oleh ion-ion positif akan mengakibatkan rusaknya zat isolasi padat karena kenaikan temperatur akibat *discharge* sehingga mengakibatkan ketidakstabilan termal.

## 4.2 Karakteristik PD terhadap Tegangan

### 4.2.1 Karakteristik Jumlah Pulsa PD



Gambar 4.3 Pengaruh tegangan terhadap jumlah pulsa PD

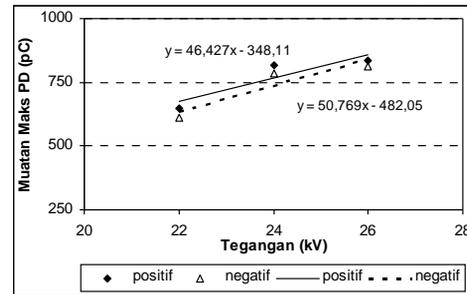
Pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa jumlah pulsa PD meningkat baik PD pada siklus positif maupun PD siklus negatif seiring dengan kenaikan nilai tegangan terapan. Peningkatan jumlah pulsa PD siklus positif dan negatif tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut : ketika tegangan yang diterapkan dinaikkan, maka kuat medan listrik akan bertambah, sehingga energi ionisasi makin besar yang mengakibatkan semakin banyak elektron yang lepas dari ikatannya. Elektron ini memungkinkan mengionisasi atom gas netral dalam rongga kanal *treeing* bila bertumbukan. Ionisasi menghasilkan elektron dan ion positif berikutnya. Semakin besar kuat medan listrik yang diterapkan, proses ionisasi atau pelepasan elektron dari ikatannya semakin menghebat sehingga terjadi banjir (*avalanche*) elektron<sup>[20]</sup> yang menyebabkan meningkatnya jumlah muatan. Jumlah PD meningkat disertai dengan meningkatnya tegangan yang diterapkan.

Adapun jumlah pulsa PD siklus negatif tampak lebih banyak daripada jumlah pulsa PD siklus positif. Ini dikarenakan saat siklus negatif, elektroda jarum berpolaritas negatif, sehingga elektron mula berasal dari elektroda jarum. Demikian sebaliknya, saat siklus positif elektroda jarum berpolaritas positif, elektron mula berasal dari polimer atau gas yang berada di sekitar elektroda<sup>[5]</sup>. Karena energi ionisasi elektroda jarum lebih kecil dibanding polimer atau gas maka memungkinkan elektron pada elektroda jarum jauh lebih mudah keluar untuk mengawali terjadinya PD.

### 4.1.2 Karakteristik Muatan Maksimum PD

Dari gambar 4.4 di atas dapat diamati bahwa jika tegangan yang diterapkan dinaikkan, maka muatan maksimum PD mengalami peningkatan. Suwarno, Abdul Syakur, Joko W dan Redy M<sup>[27]</sup> telah meneliti pengaruh tegangan terhadap besarnya muatan maksimum PD pada sampel PVC, PMMA dan LDPE dan didapatkan kesimpulan yang sama. Ketika tegangan yang diterapkan dinaikkan, maka kuat medan listrik akan bertambah, sehingga energi

ionisasi yang diterima elektron untuk lepas dari ikatannya makin besar. Berdasarkan persamaan 2.3, muatan elektron sebanding dengan energi ionisasi yang diterimanya, maka makin besar energi ionisasi makin besar juga muatan elektron yang mengalir.

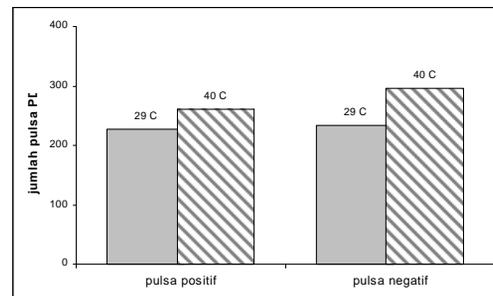


Gambar 4.4 Pengaruh tegangan terhadap muatan maksimum rata-rata.

Adapun muatan maksimum PD negatif tampak lebih kecil daripada muatan maksimum PD positif. Ini dikarenakan saat siklus negatif, elektroda jarum berpolaritas negatif, sehingga elektron mula berasal dari elektroda jarum. Demikian sebaliknya, saat siklus positif elektroda jarum berpolaritas positif sehingga elektron mula berasal dari polimer atau gas yang berada di sekitar elektroda<sup>[5]</sup>. Karena energi ionisasi elektroda jarum lebih kecil dibanding polimer atau gas maka berdasarkan persamaan 2.3, saat terjadi pelepasan muatan (*discharge*), muatan elektron mula yang berasal dari elektroda jarum akan lebih kecil dibanding muatan elektron mula yang berasal dari polimer atau gas yang berada di sekitar elektroda dan ini terjadi saat siklus negatif.

## 4.3 Jumlah Pulsa dan Muatan Maksimum PD terhadap Temperatur

### 4.3.1 Karakteristik Jumlah Pulsa PD



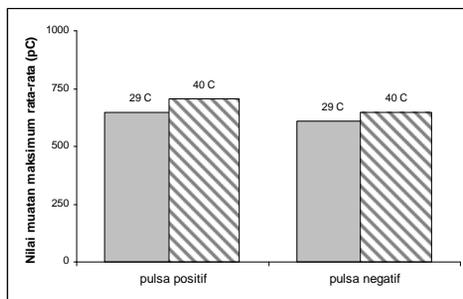
Gambar 4.5 Jumlah pulsa PD pada tegangan 22 kVrms

Gambar 4.5 menunjukkan kurva jumlah pulsa PD tegangan 22 kVrms yang diamati pada temperatur 29°C. Jumlah pulsa PD yang diamati masing-masing adalah jumlah pulsa PD positif dan negatif pada setiap siklus. Hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa peristiwa PD dipengaruhi oleh temperatur.

Dengan menaikkan temperatur (dari 29°C menjadi 40°C) maka jumlah PD pun semakin banyak seiring bertambahnya waktu. Dalam percobaan yang telah dilakukan dengan menaikkan temperatur sebesar 11°C yaitu pada temperatur 40°C, berarti memberikan suatu energi termal pada elektron dalam suatu atom

polimer. Energi termal ini dapat digunakan oleh elektron pada orbit terluar (elektron valensi) untuk terionisasi dan menjadi elektron bebas. Jika energi termal yang diberikan pada elektron valensi melebihi energi ionisasi, maka kelebihan energi ini akan merupakan energi kinetik bagi elektron bebas tersebut. Sehingga elektron bebas ini dapat bergerak dan pergerakannya dipercepat oleh adanya medan listrik yang diterapkan. Elektron bebas ini dalam jumlah tertentu akan dapat membentuk suatu *avalanche* (banjiran) elektron, proses terjadinya banjir elektron disebabkan ionisasi karena panas, jika polimer dipanasi sampai suhu yang cukup tinggi maka banyak elektron akan memperoleh energi yang diperlukan untuk mengionisasikan atom-atom yang mereka bentur. Ini menyebabkan elektron-elektron tersebut tidak hanya memperoleh energi dari medan listrik saja tetapi juga memperoleh energi dari pemanasan, kemudian akan dapat menimbulkan *partial discharge* dalam polimer. Jadi semakin tinggi temperatur suatu polimer akan semakin banyak jumlah *partial discharge* yang muncul.

#### 4.3.2 Karakteristik Muatan Maksimum PD



Gambar 4.6 Nilai muatan maksimum rata-rata PD pada tegangan 22 kVrms

Gambar 4.6 menunjukkan kurva nilai muatan maksimum rata-rata PD positif dan negatif pada tegangan dengan temperatur berbeda selama pengukuran. Muatan maksimum PD yang diamati masing-masing adalah muatan maksimum PD positif dan negatif pada setiap siklus. Dengan perubahan temperatur (dari 29 °C menjadi 40 °C) maka akan terjadi perubahan terhadap besar muatan maksimum PD. Dengan adanya kenaikan temperatur sebesar 11°C pada material isolasi polimer dan seiring dengan bertambahnya waktu muatan maksimum *partial discharge* yang terjadi semakin besar. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut : jika temperatur dinaikkan akan terjadi peningkatan energi termal yang diperlukan untuk merangsang gerakan vibrasi yang cukup untuk menyebabkan pergerakan elektron valensi (terluar) dan akhirnya bahan akan mengalami ketidakteraturan struktur molekul sehingga semakin mudah munculnya *partial discharge*. Muatan maksimum PD negatif sedikit lebih kecil daripada muatan maksimum PD positif. Ini dikarenakan saat siklus negatif, elektroda jarum berpolaritas negatif, sehingga elektron mula berasal dari elektroda jarum. Demikian sebaliknya, saat siklus positif elektroda

jarum berpolaritas positif sehingga elektron mula berasal dari polimer atau gas yang berada di sekitar elektroda. Karena energi ionisasi elektroda jarum lebih kecil dibanding polimer atau gas maka berdasarkan persamaan 2.13, saat terjadi pelepasan muatan (*discharge*), muatan elektron mula yang berasal dari elektroda jarum akan lebih kecil dibanding muatan elektron mula yang berasal dari polimer atau gas yang berada di sekitar elektroda dan ini terjadi saat siklus negatif.

## 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

1. *Partial discharge* (PD) muncul pada siklus positif dan negatif, jumlah pulsa PD negatif lebih banyak daripada jumlah pulsa PD positif.
2. Jumlah pulsa *partial discharge* (PD) dan muatan maksimum PD terhadap waktu menunjukkan kurva yang memiliki kecenderungan sedikit meningkat seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1 dan 4.2.
3. Jumlah pulsa PD dan muatan maksimum rata-rata PD berdasarkan fungsi tegangan menunjukkan kurva yang naik. Pada tegangan 22 kV<sub>rms</sub>, 24 kV<sub>rms</sub>, dan 26 kV<sub>rms</sub>, memperlihatkan jumlah PD dan muatan maksimum rata-rata yang semakin bertambah seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3 dan 4.4.
4. Jumlah pulsa PD pada temperatur polimer 40°C sebagai fungsi tegangan mengalami kenaikan dibandingkan pada temperatur 29°C seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5 dan muatan maksimum rata-rata PD pada temperatur polimer 40°C juga mengalami kenaikan dibandingkan pada temperatur 29°C seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6.

### 5.2 Saran

1. Dalam penelitian PD selanjutnya diperlukan pengukuran yang *real-time* (berkesinambungan dan simultan) dengan menggunakan komputer sebagai alat kontrol dan software yang lebih baik sehingga data yang diperoleh lebih banyak dan tanpa jeda. Bila hal ini bisa dilakukan maka perkembangan pulsa dan pola PD dapat diamati lebih baik.
2. Penelitian PD terhadap material isolasi polimer selanjutnya dengan mencoba menggunakan dimensi berbeda, posisi sampel berbeda, bentuk cacat yang lain seperti adanya rongga dalam isolasi, ketidakhomogenan isolasi karena ada material lain, dan kondisi lingkungan yang berbeda seperti kelembaban, tekanan, dan variasi temperatur (dengan kondisi temperatur rendah).

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Berahim, H., K. T. Sirait, and Harry Prabowo, "Influence of The Filler Treatment on Dielectric Properties of Silane Epoxy Resin in Tropical Climate", *Proceeding of the 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Bali-Indonesia, 1998.
- [2] Bonggas, L.T., *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- [3] Dissado, L.A., Fothergill J.C., *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Material and Devices Series 9, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1992.
- [4] Boggs, S., John Densley, "Fundamentals of Partial Discharge in the Context of Field Cable Testing", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 16, No.5, September, 2000.
- [5] Hazmi, A., Suwarno, "Pengukuran Partial Discharge Pada Pemohonan Listrik Ko-Polimer Etylene Acrylic Acid (EAA)", *Jurnal Teknik Tegangan Tinggi Indonesia*, FOSTU, Vol. 4, No. 2, Juli 2002.
- [6] Rosario, S., "Temperature Dependence of Epoxy Resistance to PD", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.2, No.4, August 2005.
- [7] Nugroho, P.S., *Studi pengukuran peluahan sebagian pada pemohonan Listrik dan Void dalam LDPE*, Tugas Akhir S-1, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2000.
- [8] Beaty, Wayne, *Electrical Engineering Materials Reference Guide*, McGraw Hill Publishing Company, New York, 1990.
- [9] Suwarno, *Study on electrical treeing and partial discharge in Polymeric Insulating Materials*, A Dissertation for The Doctor Degree at School of Engineering, Nagoya University, Japan, 1996.
- [10] Syakur, A., dan Suwarno "Karakteristik Partial Discharge Void pada Kelembaban Tinggi", *Jurnal Teknik Tegangan Tinggi Indonesia*, FOSTU, Vol. 4, No. 2, Juli 2002.
- [11] Naidu, V Kamraju, *High Voltage Engineering*, Second Edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1995.
- [12] Munandar A., *Teknik Tegangan Tinggi*, Ghalia, Indonesia. Jakarta, 1983.
- [13] Kurnianto, R., *Studi Pengaruh Temperatur Pada Karakteristik Pemohonan Listrik Dalam Polymer*, Tesis S-2, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 1998.
- [14] Morshuis, P.H.F., *Partial Discharge Mechanism*, Delft University Press, Netherlands, 1993.
- [15] Schifani, R., "Temperature Dependence of Epoxy Resistance to PD", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 2 No. 4, 1995.
- [16] Schifani, R., R. Candela and P. Romano, "On PD Mechanism at High Temperature in Voids Included in an Epoxy Resin", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 8 No. 4, 2001.
- [17] Tillar Shugg, *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*, IEEE Press, USA, 1995.
- [18] Syamsir, A., *Dasar Pembangkitan dan Pengukuran Teknik Tegangan Tinggi*, Salemba Teknika, Jakarta, 2001.
- [19] Syakur, A., Windarto, J., Suwarno dan Redy, M., "Pengukuran Partial Discharge (PD) pada Bahan Isolasi Polimer untuk Mendeteksi Kerusakan Isolasi pada Peralatan Tegangan Tinggi dengan Menggunakan Software Labview", *Makalah seminar Nasional Ketenagalistrikan 2005 – Semarang*.

## BIODATA MAHASISWA



**Winarko Ari Prasajo**  
**(L2F003549)**

Lahir di Jakarta, 04 September.  
Mahasiswa (Strata-1) jurusan  
Teknik Elektro Fakultas Teknik  
Universitas Diponegoro Semarang  
konsentrasi teknik tenaga listrik.

Semarang, Mei 2009

Mengetahui,

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir. Yuningtyastuti  
NIP 131 285 569

Abdul Syakur, ST, MT  
NIP. 132 231 132