

# THE ANALYSIS OF PARTIAL DISCHARGE (PD) FROM ELECTRICAL TREEING IN LINEAR LOW DENSITY POLYETHYLENE (LLDPE) AND HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE)

Hermawan, Abdul Syakur \*)

## Abstract

Recently, the transmission of electric energy has been developed by insulated cable. The suitable material as an insulated cable is LLDPE and HDPE. In order to understand the quality of insulation system, the measuring of PD has done. PD could begin completely insulation failure (breakdown). Therefore, it is very important to understand the characteristic of PD and the enclose event on it, because PD is a main factor which caused insulation failure.

This paper presents the result of PD measurement in the laboratory that used needle-plane electrode. It was supported by equipments such as osiloskop Digital GDS 2104 GW Instek, HPF, and RC detector. Polymer sample that used in this research is LLDPE (Linier Low Density Polyethylene) and HDPE with  $20 \times 4 \times 25 \text{ mm}^3$  dimension in each. Needle was made by steel (length 50 mm and diameter 1.15 mm), it was stick to the polymer material. The distance between needle to the plane is 5 mm. The applied voltage for each sample was 16 kVrms, 18 kVrms, 20 kVrms and 22 kVrms. The Taking of PD data was done in the first minute, 10<sup>th</sup> minute, 20<sup>th</sup> and so on until 180<sup>th</sup> minute.

The measurement result shows that the characteristic of PD number and maximum charge as a function of time and as a function of applied voltage inclined increasing both on LLDPE and HDPE. But, PD intensity in HDPE is higher than LLDPE.

Keyword : Partial Discharge, LLDPE, HDPE.

## Pendahuluan

Saluran udara untuk transmisi dan distribusi listrik tegangan tinggi ternyata menimbulkan pemandangan yang kurang baik sehingga sekarang banyak dikembangkan sistem transmisi dan distribusi bawah tanah sebagai alternatif. Dalam merencanakan suatu sistem transmisi dan distribusi daya listrik bawah tanah, isolasi adalah salah satu faktor yang penting. Dalam perkembangannya kualitas isolasi kabel makin ditingkatkan mulai dari *oil impregnated paper*, *oil filled (OF) cable* hingga yang kini banyak digunakan adalah isolasi polimer seperti *LDPE*, *HDPE*, *XLPE*, *PVC* serta *PMMA*. Namun demikian isolasi polimer pun tak lepas dari beberapa kelemahan terkait dengan performansinya.

Titik kritis yang berpengaruh pada performansi kabel polimer adalah adanya cacat. Cacat itu dapat timbul dalam bentuk *void*, ketidakmurnian dan tonjolan pada *interface* antara lapisan semikonduktor dan isolasi polimer. Akibat adanya stress listrik yang terus menerus maka akan terjadi penuaan isolasi polimer dan pada cacat ini tumbuh *electrical treeing* (pemohonan listrikk). Jika *electrical treeing* ini menjembatani isolasi, maka kegagalan isolasi akan terjadi. Fenomena *pre-breakdown* dapat dideteksi dengan pengamatan dan pengukuran pulsa *partial discharge* (PD, peluahan sebagian) yang mengiringi peristiwa *electrical treeing*.

Oleh karena itu pengetahuan tentang peranan dari setiap cacat dalam kegagalan isolasi ini sangat penting untuk mengembangkan kualitas dari isolasi kabel. LLDPE (*Linier Low Density Polyethylene*) dan HDPE (*High Density Polyethylene*) digunakan sebagai objek studi penelitian.

1. *Linier Low Density Polyethylene* (LLDPE)  
LLDPE merupakan polimer yang memiliki struktur molekul yang linier, diproduksi melalui kopolimerisasi dari *ethylene* dan *olefins* misalnya *butene*, *hexene* atau *oktene*. LLDPE mempunyai densitas sekitar 0,915-0,925 g/cm<sup>3</sup> [23]

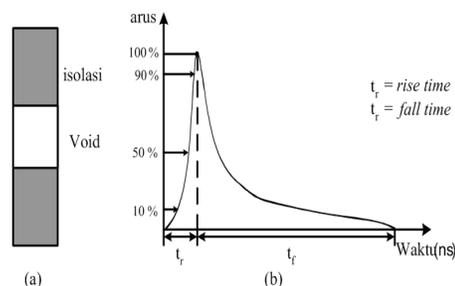
Tabel 1 Karakteristik LLDPE dan HDPE

Property	LLDPE	HDPE
Density (g/cm <sup>3</sup> )	0.915-0.925	0.95
Tensile Strength (MPa)	20	32
Flexural Modulus (GPa)	0.35	1.25
Linear Expansion (°C x 10 <sup>5</sup> )	20	12
Elongation at Break (%)	500	150
Max. Operating Temp. (°C)	50	55
Water Absorption (%)	0.01	0.02
Volume Resistivity (log ohm.cm)	16	17
Dielectric Strength (MV/m)	25	22
Dissipation Factor 1kHz	0.0003	0.0005
Dielectric Constant 1kHz	2.3	2.3
Mould Shrinkage (%)	3	3
Mould Temp. Range (°C)	20 - 60	30 - 70
Melting Temp. Range (°C)	220 - 260	220 - 310

\*) Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Undip

2. *High density polyethylene (HDPE)*  
 HDPE adalah suatu *polyethylene* termoplastik yang terbuat dari *petroleum* dan dibutuhkan sekitar 1,75 kg *petroleum* untuk membuat satu kg HDPE<sup>[23]</sup>. HDPE mempunyai densitas sekitar 0,950 g/cm<sup>3</sup>. Berat molekul rata-rata HDPE antara 40.000-300.000 MW.
3. *Partial Discharge (PD, Peluahan Sebagian)*  
 Definisi dari atau *partial discharge (PD)* atau peluahan sebagian menurut IEC 60270 adalah peluahan listrik lokal yang hanya menjembatani sebagian isolasi di antara konduktor dan yang mungkin terjadi dekat dengan konduktor. Aktivitas PD disebabkan oleh cacat dalam bentuk *void* (rongga), ketidakhomogenitas dan tonjolan atau permukaan yang runcing antara lapisan konduktor dan isolasi. 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<sup>[6]</sup>. Peluahan ini hanya menjembatani secara sebagian gap antara isolasi fasa ke ground atau isolasi antara fasa ke fasa.

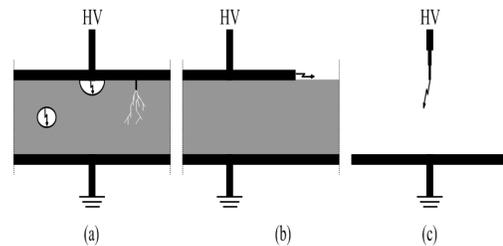
Ketika pulsa PD timbul, terdapat aliran elektron yang sangat cepat antara satu sisi *void* yang berisi gas ke sisi lainnya. Pulsa PD ini mempunyai rise time sekitar 1 ns dan berdurasi hingga ratusan ns. PD ini merupakan busur api yang cukup kecil yang terjadi dalam sistem isolasi, karena itu menjadi makin buruknya isolasi dan sering kali menghasilkan gangguan isolasi sempurna.



**Gambar 1.1.** Model *void* dan pulsa *partial discharge*

Syarat terjadinya PD yaitu adanya elektron (muatan) dan jika tekanan medan listrik yang diterapkan melebihi nilai kritis insepansi PD.

4. *Klasifikasi Partial Discharge*  
 PD diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan lokasi dan mekanisme terjadinya yaitu : *internal discharge*, *surface discharge*, dan *corona discharge*.

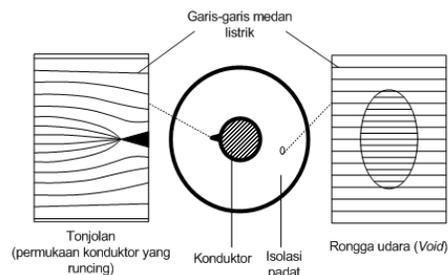


**Gambar 1.2.** Konsep dasar (a) *Internal discharge* (b) *Surface discharge* (c) *Corona discharge*

*Internal discharge* terjadi pada *void* (rongga) 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.

5. *Electrical Treeing (Pemohonan Listrik)*  
*Electrical treeing* merupakan salah satu degradasi pada material isolasi padat berupa kanal bercabang-cabang membentuk suatu struktur menyerupai pohon, pertama kali ditemukan oleh **D.W. Kitchin** dan **O.S. Pratt** pada 1958.

*Electrical treeing* tumbuh di daerah yang mengalami tekanan medan listrik tinggi. Medan listrik tinggi ini timbul karena adanya permukaan konduktor yang tajam/runcing, kontaminan konduktif atau karena adanya *void* di dalam material.



**Gambar 1.3.** Distribusi medan listrik pada *void* dan permukaan konduktor yang runcing<sup>[18]</sup>

*Electrical treeing* telah dipelajari di laboratorium dengan menggunakan geometri yang dapat meningkatkan tekanan medan listrik lokal seperti yang telah dilaporkan oleh Mason. Struktur khususnya adalah suatu geometri titik-bidang dengan jarum logam atau jarum semikonduktor.

Bila radius ketajaman jarum  $r$ , jarak elektroda  $d$  dan tegangan yang diterapkan  $V$  maka medan maksimum telah diturunkan oleh Mason sebesar :

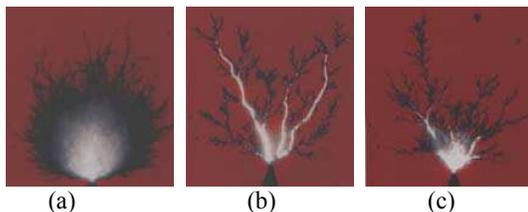
$$E_m = \frac{2V}{r \ln\left(\frac{4d}{r}\right)} \dots\dots\dots(1.1)$$

dengan :

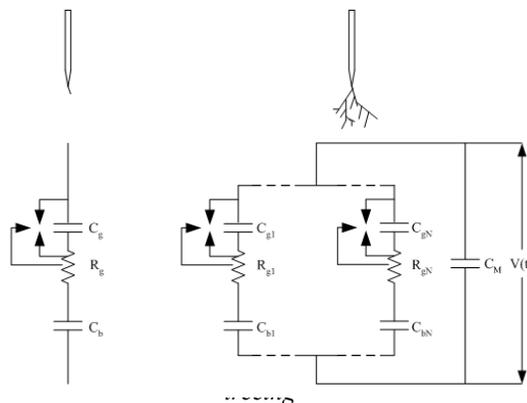
- $V$  = tegangan yang diterapkan (kV)
- $r$  = jari-jari pada bulatan ujung jarum (mm)
- $d$  = jarak antara elektroda (mm)

Medan lokal sebesar lebih dari 1MV/m dapat muncul di daerah seperti ini. Degradasi lokal akibat stress medan listrik seperti ini akan menginisiasi munculnya pemohonan listrik. Untuk memperlambat waktu terjadinya pemohonan listrik dapat dilakukan dengan membuat isolasi sehomogen mungkin, mencegah terjadinya rongga udara (*void*), membuat permukaan yang bersentuhan antara konduktor dengan isolasi sehalus mungkin sehingga tidak ada bagian yang menonjol, yang akan mengakibatkan terjadinya medan yang besar dan terpusat di satu titik.

Ada tiga sub kategori bentuk pemohonan listrik yaitu *bush type tree*, *branch type tree* dan *bush-branch type tree*.



Gambar 1.4. Bentuk dari pemohonan listrik: (a) *Bush type tree*, (b) *Branch type tree* (c) *Bush-Branch type tree*



Pengamatan menggunakan mikroskop elektron menunjukkan bahwa diameter dari rongga kanal *treeing* tersebut antara 2-5 $\mu$ m. Untuk menurunkan hubungan antara tegangan pada rongga kanal *treeing* dan tegangan yang diterapkan pada isolasi polimer, maka dapat digunakan representasi rangkaian ekivalen seperti pada gambar 1.5 di atas.

Rongga pada kanal *treeing* diwakili dengan kapasitor  $C_g$  yang diparalel dengan sela percik (*spark gap*). Sementara kapasitansi isolasi yang berada pada posisi seri dengan rongga *treeing* diwakili kapasitor  $C_b$  dan bagian isolasi selebihnya diwakili dengan kapasitor  $C_m$ .  $R$  adalah tahanan pada sela percik, merupakan tahanan kontak saat terjadi *discharge* pada rongga yang nilainya sangat kecil. Tegangan pada  $C_g$  dapat menyebabkan terjadinya PD jika telah melebihi nilai kritisnya. Besarnya  $V_{g(t)}$  dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini

$$V_{g(t)} = \frac{C_b}{C_g + C_b} \cdot V(t) \dots\dots(1.2)$$

Keadaan rongga pada kanal *treeing* jika dimisalkan memiliki tebal rongga sebesar  $t$  dan tebal dielektrik sebesar  $d$  dan permitifitas relatif zat isolasi padat adalah  $\epsilon_r$  dengan  $t \ll d$  pada tegangan kerja  $V_a$  besarnya tegangan pada rongga :

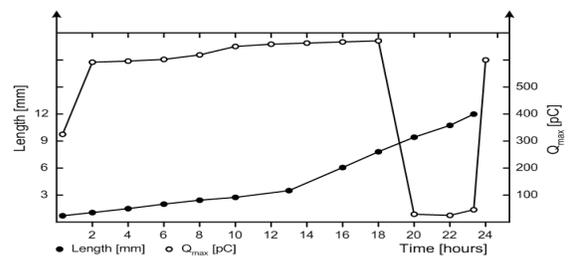
$$V_1 = \epsilon_r \frac{t}{d} V_a \dots\dots(1.3)$$

dengan :

- $V_1$  = tegangan pada rongga
- $V_a$  = tegangan yang diterapkan
- $\epsilon_r$  = Permitifitas relatif zat isolasi padat

Saat PD terjadi, maka akan terjadi loncatan busur api pada rongga kanal *treeing*. Busur api membakar material polimer sehingga menghasilkan jalur *discharge* atau jalur aliran arus permanen. Fenomena pembentuk jalur aliran arus permanen ini disebut peristiwa *electrical treeing* (pemohonan listrik). Jika *electrical treeing* ini menjembatani isolasi, maka kegagalan isolasi akan terjadi. Fenomena *pre-breakdown* dapat dideteksi dengan pengamatan dan pengukuran pulsa PD yang mengiringi peristiwa *electrical treeing* tersebut.

Gambar 1.6 adalah hubungan antara panjang *treeing* dan muatan maksimum PD yang timbul pada peristiwa *electrical treeing* tersebut berdasarkan fungsi waktu pada suatu sampel *polyethylene* menggunakan elektroda jarum.



Gambar 1.6.  $Q_{max}$  PD dan panjang *treeing* terhadap waktu

## Eksperimen

### 1. Sampel dan elektroda

Peristiwa *electrical treeing* dalam kabel tegangan tinggi pada kondisi sebenarnya di lapangan ditemukan bermula dari ketidakmurnian dalam isolasi atau ketidaksempurnaan permukaan pelindung konduktif. Oleh karena itu pengukuran PD pada peristiwa *electrical treeing* di laboratorium dengan menggunakan geometri jarum-bidang merupakan cara yang tepat untuk mempresentasikan kondisi sebenarnya. Elektroda jarum dengan panjang 50 mm, diameter 1,15 mm terbuat dari baja dan ditusukkan 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 *Linier Low Density Polyethylene* (LLDPE, densitas 0.920 g/cm<sup>3</sup>) dan *High Density Polyethylene* (HDPE, densitas 0.950 g/cm<sup>3</sup>) dengan ukuran masing-masing 20 x 4 x 25 mm.



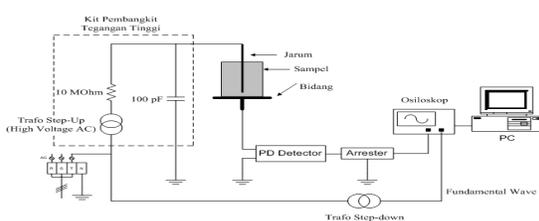
Gambar 2.1. Sampel polimer LLDPE dan HDPE



Gambar 2.2. Elektroda jarum bidang

### 2. Sistem Pengukuran

Elektroda jarum dihubungkan dengan tegangan tinggi AC (50 Hz) 16 kVrms, 18 kVrms, 20 kVrms dan 22 kVrms. Pada saat pengukuran, elektroda jarum-bidang direndam ke dalam boks berukuran 30 x 20 x 20 cm yang berisi minyak trafo untuk mencegah terjadinya *discharge* permukaan. PD yang muncul pada sampel dideteksi dengan *RC detector*



Gambar 2.3 Rangkaian Pengukuran PD

Keluaran dari *RC detector* adalah hasil integrasi dari gelombang arus PD terhadap waktu dan dengan demikian tegangan keluaran ini sebanding dengan muatan PD.

$$V_{out} \sim q$$

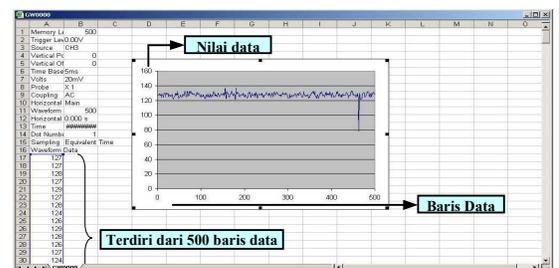
Keluaran *RC detector* dihubungkan ke *Channel 3* osiloskop melalui arrester, sementara *Channel 1* digunakan untuk mendapatkan *fundamental Wave*. Osiloskop diatur pada 20 mV/div, 5 kS/s, *trigger level* 0.00 V, posisi horizontal 0.00 s. Dengan menggunakan port USB maka dapat merekam kejadian PD menggunakan PC melalui program *FreeWave* secara *real-time*, namun data yang direkam hanya berupa video (.wmv). Data PD yang akan diolah, pengambilan datanya dilakukan secara manual, yaitu 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.

### Hasil Pengukuran

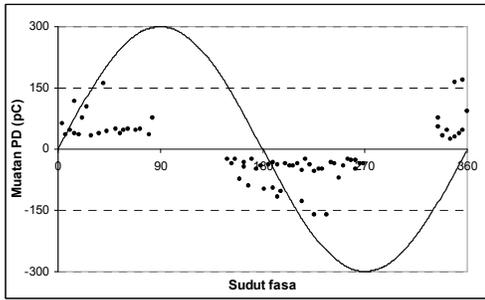
Pulsa-pulsa PD hasil pengukuran ini dapat direpresentasikan pada bidang fasa tegangan dalam bentuk urutan pulsa PD atau berupa pola  $\phi$ -q-n. Simbol  $\phi$  adalah sudut fasa dimana PD terjadi, q adalah muatan pulsa PD dan n adalah jumlah pulsa PD. Gambar 3.3 menunjukkan urutan pulsa PD berupa pola  $\phi$ -q-n dalam suatu siklus pada *electrical treeing* 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 3.1. Tampilan pulsa PD pada layar osiloskop



Gambar 3.2. File hasil eksekusi (.csv) dan tampilan pulsa PD-nya

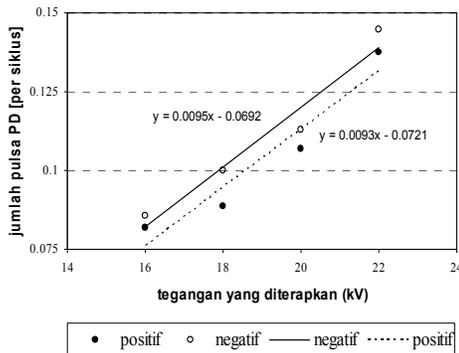


**Gambar 3.3.** Bentuk representasi Pulsa PD pada *electrical treeing* hasil pengukuran

### Analisis Dan Pembahasan

#### 1. Karakteristik Jumlah Pulsa Pd Sebagai Fungsi Tegangan

Degradasi yang paling penting dalam material polimer dapat disebabkan akibat adanya medan elektrik E yang tinggi. Medan tinggi yang dihasilkan tergantung dari tegangan yang diterapkan.



**Gambar 4.1.** Pengaruh tegangan terhadap jumlah pulsa PD

Jika tegangan yang diterapkan berubah maka medan listrik akan berubah dan berpengaruh terhadap gerak elektron. Ini menunjukkan bahwa tegangan memiliki peranan yang penting dalam proses ionisasi yang juga berarti berpengaruh terhadap karakteristik PD.

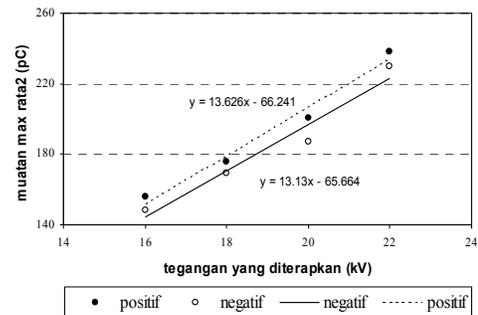
Pada gambar 4.1, dapat dilihat bahwa jumlah pulsa PD meningkat baik PD pada siklus positif maupun PD siklus negatif seiring dengan kenaikan nilai tegangan terapan. Ketika tegangan yang diterapkan dinaikkan, maka kuat medan elektrik akan bertambah, sehingga energi ionisasi makin besar yang mengakibatkan semakin banyak elektron yang lepas dari ikatannya. Elektron ini memungkinkan mengionisasi atom gas netral dalam rongga kanal *treeing* bila bertumbukan menghasilkan elektron dan ion positif berikutnya. Semakin besar kuat medan elektrik yang diterapkan, proses ionisasi atau pelepasan elektron dari ikatannya semakin menghebat sehingga terjadi banjir (*avalanche*)

elektron yang menyebabkan meningkatnya jumlah muatan.

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 LLDPE atau gas yang berada disekitar elektroda. 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.

#### 2. Karakteristik Muatan Maksimum Pada Sebagai Fungsi Tegangan

Dari gambar 4.2 di atas dapat diambil kesimpulan bahwa jika tegangan yang diterapkan dinaikkan, maka muatan maksimum PD mengalami peningkatan. Abdul Syakur, Suwarno, Joko W dan Redy M telah meneliti pengaruh tegangan terhadap besarnya muatan maksimum PD pada sampel PVC, PMMA dan LDPE dan didapatkan kesimpulan yang sama.



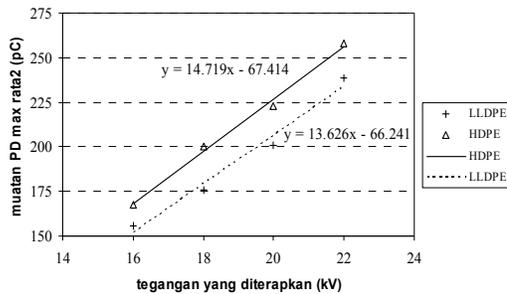
**Gambar 4.2.** Pengaruh tegangan terhadap muatan maksimum rata-rata.

Sebagaimana dijelaskan di depan bahwa gerakan elektron merupakan fungsi dari tegangan. Ketika tegangan yang diterapkan dinaikkan, maka kuat medan elektrik akan bertambah, sehingga energi ionisasi yang diterima elektron untuk lepas dari ikatannya makin besar. Berdasarkan persamaan 1.4, muatan elektron sebanding dengan energi ionisasi yang diterimanya, maka makin besar energi ionisasi makin besar juga muatan elektron yang mengalir.

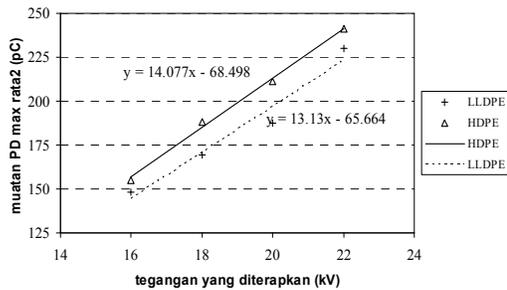
Adapun muatan maksimum PD negatif tampak lebih kecil daripada muatan maksimum PD positif. Ini dikarenakan saat siklus negatif, elektroda jarum berpolaritas negatif, sehingga elektron mula berasal dari elektroda jarum. Demikian sebaliknya, saat siklus positif elektroda jarum berpolaritas positif sehingga elektron mula berasal dari polimer LLDPE atau gas yang berada disekitar elektroda.

Karena energi ionisasi elektroda jarum lebih kecil dibanding polimer atau gas maka muatan elektron mula yang berasal dari elektroda jarum akan lebih kecil.

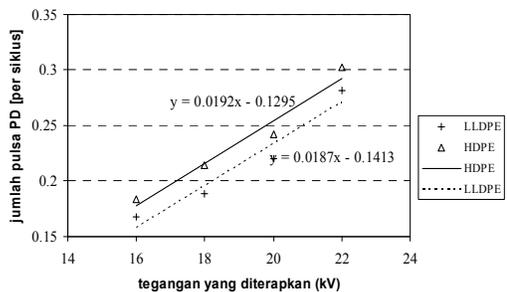
### 3. Perbandingan Intensitas PD Sebagai Fungsi Tegangan



**Gambar 4.3.** Perbandingan muatan maksimum rata-rata PD siklus positif LLDPE dengan HDPE



**Gambar 4.4.** Perbandingan muatan maksimum rata-rata PD siklus negatif LLDPE dengan HDPE



**Gambar 4.5.** Perbandingan jumlah pulsa PD LLDPE dengan HDPE

Dari gambar 4.3, 4.4 dan 4.5 diatas dapat disimpulkan bahwa karakteristik muatan maksimum dan karakteristik jumlah pulsa PD LLDPE sama dengan HDPE yaitu mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan tegangan yang diterapkan. Namun intensitas PD (jumlah pulsa dan besarnya muatan) pada material HDPE lebih tinggi daripada LLDPE. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, intensitas PD akan meningkat sesuai dengan tingkat degradasi / kerusakan bahan isolasi polimer

yang sedang menahan medan elektrik tinggi. Makin besar intensitas PD berarti makin tinggi juga tingkat kerusakan yang terjadi dalam bahan isolasi. Jadi dapat disimpulkan bahwa tingkat kerusakan material HDPE lebih tinggi daripada LLDPE saat diterapkan tegangan yang sama selama 180 menit. Tingkat kerusakan isolasi ini sangat dipengaruhi oleh kemampuan suatu bahan isolasi dalam menahan medan elektrik tinggi yang diterapkan kepadanya, ini berarti kemampuan material LLDPE dalam menahan medan elektrik tinggi -yang ditimbulkan oleh elektroda jarum- lebih baik daripada HDPE. Grafik karakteristik muatan maksimum dan karakteristik jumlah pulsa PD HDPE juga memiliki gradien yang lebih besar (lebih curam) yang berarti laju pertambahan atau kenaikan intensitas PD-nya lebih cepat daripada LLDPE. Jika intensitas PD dikorelasikan dengan tingkat kerusakan isolasi maka dapat disimpulkan bahwa laju kerusakan isolasi terhadap tegangan pada material HDPE lebih cepat daripada LLDPE.

### Penutup

Berdasarkan hasil pengukuran dan pembahasan yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan yang bisa didapat adalah sebagai berikut :

1. Karakteristik jumlah pulsa dan muatan maksimum PD cenderung meningkat karena pengaruh tegangan yang semakin meningkat
2. Intensitas PD pada material LLDPE lebih rendah daripada HDPE
3. Pada LLDPE ketika diberikan perlakuan tegangan tinggi maka akan terjadi kerusakan molekul (putusnya rantai molekul). Akibat kerusakan molekul ini muncul retakan yang menandakan adanya kerusakan fisik pada polimer. Kerusakan fisik ini merupakan peristiwa *electrical treeing*.

### Daftar Pustaka

1. 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.
2. Nugroho, P.S., "Studi Pengukuran Peluahan Sebagian Pada Pemohonan Listrik dan Void Dalam LDPE", Tugas Akhir S-1, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2000.
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. Kind, D. and Harner K, *High Voltage Insulation Technology*, Firedr Vieweg & Sohn, 1985.
5. Munandar A., DR., "Teknik Tegangan Tinggi", Pradnya Paramita, Jakarta, 2001.
6. Paoletti, G.J., *Partial Discharge Theory and Technologies Related to Traditional Testing Methods of Large Rotating Apparatus*, AISE Steel technology. 2000.

7. Qureshi, M.I. Al Arainy, A.A., Malik N.H., *Electrical Insulation in Power System*, Marcel Dexter, Inc., New York, 1998.
8. Otte R.R. *Properties Of Non-Uniform Electric Fields That Contribute To Partial Discharges*. A Thesis for the Bachelor's of Science Degree of The Ohio State University, 2006.
9. Morshuis, P.H.F., *Partial Discharge Mechanism*, Delft University Press, Netherlands, 1993.
10. Syakur, A., and Suwarno, *PD Behavior in A Void in Polyvinyl Chloride (PVC) Under High Humidity Condition*, Universitas Diponegoro. Semarang 2005.
11. 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.
12. M D Noskov<sup>1</sup>, M Sack<sup>2</sup>, A S Malinovski<sup>1</sup> and A J Schwab<sup>2</sup>, *Measurement and Simulation of Electrical Tree Growth and Partial Discharge Activity in Epoxy Resin*, <sup>1</sup>High-Voltage Research Institute, Polytechnical University of Tomsk, Lenin avenue 2a, 634050 Tomsk, Russia, <sup>2</sup>Institute of Electric Energy Systems and High-Voltage Technology (IEH), University of Karlsruhe, Kaiserstrasse 12, D-76128 Karlsruhe, Germany.
13. Ronald P.H., dan Suwarno, "Simulasi Pemohonan Listrik (*Electrical Treeing*) pada Isolasi Polimer dengan Menggunakan Metode *Cellular Automata*", Departemen Teknik Elektro ITB, Bandung.
14. R. Vogelsang, B. Fruth, T. Farr, K. Fröhlich, *Detection of Electrical Tree Propagation by Partial Discharge Measurements*, High Voltage Laboratory of the Swiss Federal Institute of Zürich, Switzerland.
15. Santoro, "Karakteristik Peluahan Sebagian Pada Model Void Berdasarkan Fungsi Waktu Dalam *Polyvinyl Chloride (PVC)* Menggunakan Elektroda Metode II CIGRE", Tugas Akhir S-1, Universitas Diponegoro, Semarang, 2007.
16. Bonggas, L.T., "Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi", PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
17. Tillar Shugg, *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*, IEEE Press. USA. 1995.
18. Peschke, R., R von Olshausen, *Cable systems for High and Extra-High Voltage*, MCD Verlag Publicis, Berlin, October 1999.
19. Naidu, V Kamraju, *High Voltage Engineering*, Second Edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1995.
20. Hazmi, A., Suwarno, "Pengukuran *Partial Discharge* Pada Pemohonan Listrik Ko-Polimer *Ethylene Acrylic Acid (EAA)*", *Jurnal Tegangan Tinggi Indonesia*", FOSTU, Vol.4 No.2, Juli 2002.
21. Silverstein, R.M., Clayton Bassler, Morrill, T.C., *Spectrometric Identification of Organic Compounds*, USA, 2001.
22. ...., <http://www.azom.com/Materials.asp?>
23. ...., <http://en.wikipedia.org>