

ANALISIS KARAKTERISTIK PELUAHAN SEBAGIAN PADA MODEL VOID BERDASARKAN FUNGSI WAKTU DAN TEGANGAN DALAM POLYVINYL CHLORIDE (PVC)

Devy Martoni^[1], Ir.Yuningtyastuti^[2], Abdul Syakur, ST.MT^[3]
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl.Prof.Soedharto, SH, Tembalang, Semarang 50275
Email : dmt_expose@yahoo.co.id

Abstrak

Penyaluran tenaga listrik bawah tanah yang sekarang ini banyak dibangun harus didukung dengan sistem isolasi kabel yang baik. Salah satu bahan polimer yang cukup layak sebagai isolator dan banyak digunakan adalah isolasi kabel dengan bahan Polyvinyl Chloride (PVC). Dalam penggunaannya, isolasi kabel dapat mengalami penurunan kualitas isolasi atau degradasi sehingga tidak dapat berfungsi sebagai isolator yang baik. Salah satu penyebab utama penurunan kualitas isolasi adalah karena adanya void dalam isolasi kabel sehingga menyebabkan peluahan sebagian (Partial Discharge). Oleh karena itu, sangat perlu untuk mengetahui karakteristik dari partial discharge yang terjadi pada isolasi kabel, khususnya PVC tersebut. Dengan menggunakan sistem elektroda metoda II CIGRE, Osiloskop Digital GDS 2104, HPF, RC detector, arrester, dan PC maka akan diperoleh keterangan mengenai karakteristik jumlah PD dan muatan maksimum PD yang terjadi selama pengukuran. Dari hasil pengukuran, dapat diketahui karakteristik karakteristik jumlah pulsa PD dan muatan maksimum PD cenderung meningkat dengan bertambahnya waktu dan tegangan yang diterapkan. Dan rugi energi akibat terjadinya peluahan cenderung makin besar seiring makin tingginya tingkat degradasi isolasi kabel, tercatat selama 5700 siklus pada tegangan 4 kV_{rms}, aktifitas PD ini menyebabkan rugi energi sebesar $3,64 \times 10^{-16}$ kWh, pada tegangan 5 kV_{rms} sebesar $23,413 \times 10^{-16}$ kWh, pada tegangan 6 kV_{rms} sebesar $42,583 \times 10^{-16}$ kWh dan tegangan 7 kV_{rms} sebesar $54,259 \times 10^{-16}$ kWh.

Kata Kunci : CIGRE II, Partial Discharge, PVC dan Void.

I. PENDAHULUAN

I.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 karena pada saluran bawah tanah dibutuhkan isolasi kabel yang memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi, kekuatan mekanik yang baik, dan harus tahan terhadap suhu antara 30° hingga 100°. Banyak jenis bahan isolasi yang telah digunakan sebagai bahan isolasi kabel. Salah satunya yang banyak digunakan adalah Polyvinyl chloride (PVC) yang digunakan pertama sebagai isolasi kabel dan selubung kabel pada akhir tahun 1930. PVC banyak digunakan sebagai bahan isolasi karena sifat dan keistimewaan yang dimilikinya seperti sifat dielektrik, kekuatan, resistansi terhadap panas, busur api, cuaca ataupun tahan terhadap zat – zat kimia tertentu dan sifat – sifat lain yang mendukung aplikasinya sebagai bahan isolasi.

Kualitas isolasi yang baik mutlak diperlukan untuk menjamin keandalan dan kualitas penyaluran daya listrik ke konsumen pada penyaluran listrik bawah tanah. Tetapi, kenyataannya kegagalan atau gangguan listrik kerap terjadi yang menyebabkan berkurangnya keandalan penyaluran daya listrik. Salah satu penyebabnya adalah kejadian *Partial Discharge* atau yang disingkat PD pada void dalam material isolasi yang dapat mengawali terjadinya *breakdown* atau kegagalan isolasi.

Beberapa faktor 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, yang dapat terjadi pada proses produksi (manufaktur) kabel polimer. Akibat adanya stress listrik yang terus menerus maka akan terjadi penuaan isolasi polimer dan pada cacat ini tumbuh *electrical treeing*. Dua *ageing degradation* yang paling sering dialami pada kabel tegangan tinggi berisolasi polimer adalah *void discharge* dan *electrical treeing*. Jika *electrical treeing* ini menjembatani isolasi, maka kegagalan isolasi akan terjadi.

Untuk mempertahankan kelangsungan penyaluran energi listrik dilakukan dengan memantau ada tidaknya dan sejauh mana aktivitas dari kedua *ageing degradation* tersebut. Hal yang menguntungkan adalah bahwa baik *void discharge* maupun *electrical treeing* keduanya mengeluarkan sinyal elektrik berupa pulsa *partial discharge* yang memungkinkan pendeteksian. Sehingga 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. Dan pada tugas akhir ini pengukuran PD dilakukan dengan sistem pengukuran yang mendeteksi

[1] Mahasiswa Teknik Elektro UNDIP

[2],[3] Dosen Teknik Elektro UNDIP

arus dengan menggunakan elektroda metode II CIGRE yang merupakan metode untuk memperkirakan ketahanan material isolasi yang berbeda-beda terhadap PD dengan mengamati pengaruh lamanya waktu suatu isolasi menahan tegangan yang berbeda terhadap karakteristik PD.

1.2. Tujuan

Beberapa tujuan dari pembuatan tugas akhir ini adalah :

1. Untuk mengetahui pengaruh durasi penerapan tegangan terhadap karakteristik *Partial Discharge* (PD) pada model void dalam material isolasi polimer jenis PVC.
2. Untuk mengetahui pengaruh besarnya penerapan tegangan terhadap karakteristik *Partail Discharge* (PD) pada model void dalam material isolasi polimer jenis PVC.
3. Mengetahui rugi energi selama pengukuran yang diakibatkan oleh peristiwa *Partial Discharge* dari banyak dan besarnya muatan elektron.

1.3. Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Pengamatan pulsa *Partial discharge* dilakukan melalui osiloskop digital GDS 2104, 4 channel buatan GW Instek.
2. Sampel polimer yang digunakan dari jenis PVC sheet dengan ketebalan 0,80 mm dengan elektroda metoda II CIGRE.
3. Void yang terjadi merupakan bentuk dari tiga lapisan PVC dimana bagian tengah dari susunan tersebut adalah *spacer* yang dilubangi dengan diameter 1 cm pada bagian tengahnya sehingga ketebalannya dianggap sama untuk setiap sampel yaitu 0,80 mm.
4. Tegangan yang diterapkan adalah tegangan AC (50Hz), dengan tegangan kerja 4 kV_{rms}, 5 kV_{rms}, 6 kV_{rms}, 7 kV_{rms}.
5. PD yang terjadi tidak dipengaruhi oleh suhu, kelembaban, cahaya dan tekanan dari luar.
6. Membahas pengaruh penerapan tegangan dan lamanya waktu penerapan tegangan terhadap karakteristik PD.
7. Karakteristik *Partial discharge* yang diamati adalah jumlah pulsa dan besarnya muatan PD, tidak membahas fasa terjadinya PD.
8. Tidak membahas secara detail alat dan komponen yang digunakan dalam sistem pengukuran.

II. DASAR TEORI

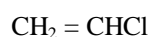
2.1. Isolasi polimer pada kabel

Struktur polimer dapat digolongkan menjadi dua jenis, yaitu :

1. Termoplastik termasuk dalam jenis ini adalah *polyethylene* (PE) dan *polyvinyl Chloride* (PVC)
2. Termoset termasuk dalam jenis ini adalah *Neoprene*, *Hypalon*, *NitrilRubber*, *Nitril Butadiene*, *Ethilen Propylene Rubber* dan *XLPE*.

2.1.1 Polyvinyl Chloride (PVC)

Polyvinyl Chloride (PVC) memiliki rumus kimia :



PVC pertama kali digunakan sebagai isolasi kawat dan kabel pada akhir tahun 1930-an sebagai pengganti karet. PVC sekarang banyak digunakan sebagai material isolasi. PVC banyak digunakan sebagai bahan isolasi kabel mulai dari tegangan rendah hingga tegangan tinggi.

2.2. Penurunan Kualitas Isolasi

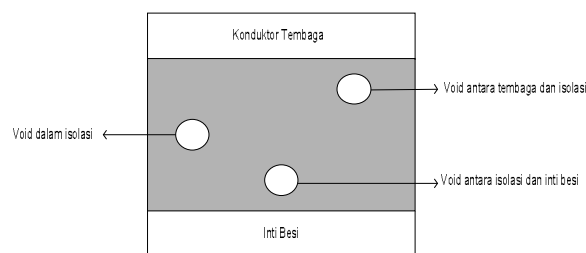
Degradasi isolasi seringkali dihubungkan dengan *partial discharge*. *Discharge* pada *interface* antara dua media disebut dengan *discharge* permukaan (*surface discharge*) dan menghasilkan *surface tracking*. Selain di permukaan, di dalam material isolasi juga terjadi *discharge* internal yang dihasilkan karena stress elektrik yang tinggi melewati sebuah *void* yang berisi udara. Stress elektrik yang tinggi ini terbentuk akibat gradien tegangan antara tegangan yang diberikan dengan *ground* potensial. *Partial discharge* yang terjadi pada sebuah *void* menyebabkan penurunan kualitas isolasi yang dapat berakibat terjadinya kegagalan.

2.3. Peluahan Sebagian (Partial Discharge atau PD)

Partial Discharge adalah peluahan elektrik pada medium isolasi yang terdapat di antara dua elektroda berbeda tegangan, dimana peluahan tersebut tidak sampai menghubungkan kedua elektroda secara sempurna.

Partial discharge yang timbul disebabkan oleh cacat dalam bentuk *void*, ketidakmurnian dan tonjolan pada *interface* antara lapisan semikonduktor dan isolasi polimer, yang dapat terjadi pada proses produksi (manufaktur) kabel polimer. Akibat adanya stress listrik yang terus menerus maka akan terjadi penuaan isolasi polimer dan pada cacat ini tumbuh *electrical treeing*. Dua *ageing degradation* yang paling sering dialami pada kabel tegangan tinggi berisolasi polimer adalah *void discharge* dan *electrical treeing*. Jika *electrical treeing* ini menjembatani isolasi, maka kegagalan isolasi akan terjadi.

Void mungkin dapat menempati antara konduktor tembaga dan dinding isolasi, internal isolasi itu sendiri, ataupun antara isolasi dan inti besi. menghasilkan gangguan isolasi sempurna, seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Cacat (void) dalam isolasi kabel

2.4. Peluahan Sebagian (PD) pada Void

Proses dasar *discharge* pada gas biasanya terjadi melalui dua proses, yaitu :

2.4.1. Pembangkitan ion

Kegagalan listrik yang terjadi di udara atau gas pertama-petama tergantung dari jumlah elektron bebas yang ada di udara atau gas tersebut. Konsentrasi elektron bebas ini dalam keadaan normal sangat kecil dan ditentukan oleh pengaruh radioaktif dari luar. Besarnya energi yang diperlukan untuk melepas 1 elektron adalah :

$$U = \frac{1}{2} m_e \cdot v_e^2 = e \cdot V \quad \dots\dots(2.1)$$

Di mana : e = Muatan elektron (coulomb)
 V = beda potensial antara kedua elektroda (volt)
 m_e = massa elektron (kg)
 v_e = kecepatan elektron (m/s).

2.4.1.1. Benturan (Collision) elektron

Dalam proses ionisasi karena benturan, sebuah elektron bebas berbenturan dengan atom atau molekul gas netral dan menyebabkan elektron baru dan ion positif. Kemudian proses ini dapat terjadi berantai dan dapat direpresentasikan sebagai berikut :



dimana A adalah atom, A^+ adalah ion positif dan e^- adalah elektron.

Jika gradien tegangan yang ada cukup tinggi maka jumlah elektron yang diionisasikan akan lebih banyak dibandingkan jumlah ion yang ditangkap menjadi molekul oksigen. Tiap-tiap elektron ini kemudian akan berjalan menuju anoda secara kontinyu, sambil membuat benturan-benturan yang kemudian akan membebaskan lebih banyak elektron.

2.4.1.2. Foto Ionisasi

Secara umum proses fotoionisasi dapat dinyatakan dengan persamaan :

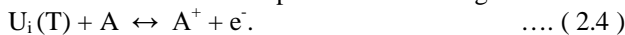


Dimana :

- A = atom atau molekul mula – mula
- A^+ = atom atau molekul yang bebas satu elektronnya
- e^- = elektron yang dibebaskan oleh proses ionisasi
- h = konstanta planck ($6,63 \times 10^{-34}$ joule)

2.4.1.2. Ionisasi termal

Pada prinsipnya tidak berbeda dengan proses ionisasi karena fotoionisasi. Perbedaannya terletak pada jenis energi yang diberikan pada atom atau molekul netral. Jika gas dipanasi hingga temperatur yang cukup tinggi, maka banyak atom netral akan memperoleh energi yang diperlukan untuk mengionisasi atom atau molekul yang mereka bentur. Proses dapat dituliskan sebagai



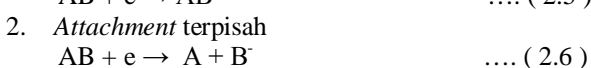
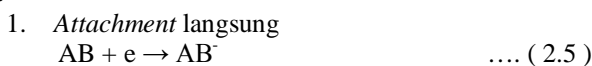
Dimana

- $U_i(T)$ = energi panas.
- A = molekul atau atom gas mula-mula
- A^+ = molekul atom yang bebas 1 elektronnya
- e^- = elektron yang dibebaskan oleh proses ionisasi.

2.4.2. Kehilangan ion

2.4.2.1. Penggabungan (attachment) elektron

Jenis benturan yang elektron menjadi bergabung pada atom dan molekul membentuk ion negatif disebut *attachment* elektron. Proses ini tergantung pada energi elektron dan jenis gas. Proses attachment terjadi dengan cara



2.4.2.2. Rekombinasi

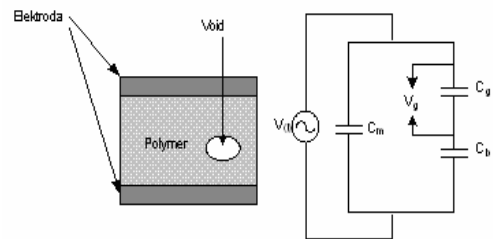
Rekombinasi adalah kebalikan dari ionisasi, yaitu bergabungnya kembali partikel bermuatan positif dan negatif tersebut diatas.

Terjadinya *void* (rongga) yang dapat menyebabkan PD sulit dihindari dalam proses pembuatan polimer, *void*

dapat terbentuk pada proses pabrikasi, instalasi maupun operasi kabel :

1. Pada pabrikasi, rongga udara terbentuk karena adanya udara yang bocor saat proses *cross-linking* dari material polimer.
2. Pada proses instalasi, seperti pada proses penyambungan kabel dimungkinkan adanya kontaminan udara sehingga terbentuk rongga udara.
3. Pada operasi kabel, seperti pada kondisi hubung singkat terjadi pembenahan termis yang besar pada kabel. Jika tekanan yang dialami melebihi batas yang dapat ditahan oleh isolasi polimer, maka ikatan polimer dapat lepas sehingga menghasilkan rongga udara.

Discharge pada *void* yang diteliti pada eksperimen dengan sampel PVC ini dapat dijelaskan dengan baik menggunakan rangkaian ekuivalen *Whitehead* untuk *discharge* pada *void* seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Rangkaian ekuivalen *void*

Void diwakili dengan kapasitor C_g yang diparalel dengan sela percik, yang mengalami peluahan, yang terjadi ketika tegangan padanya melebihi tegangan insepisi. Sementara kapasitansi isolasi yang berada pada posisi seri dengan *void* diwakili kapasitor C_b dan bagian isolasi selebihnya diwakili dengan kapasitor C_m .

Jika suatu tegangan AC dengan frekuensi f dan magnitude $V(t)$ diterapkan pada isolasi, maka tegangan *void* $V_g(t)$ adalah :

$$V_g(t) = \frac{C_b}{C_g + C_b} \times V(t) \quad \dots\dots(2.7)$$

Besarnya muatan *partial discharge* pada *void* dinyatakan :

$$Q_g = C_g \cdot V_g \quad \dots\dots (2.8)$$

Kapasitansi total dari seluruh isolasi polimer (C_a) adalah :

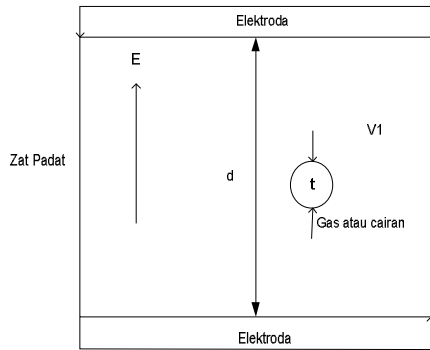
$$C_a = C_m + \frac{C_g \cdot C_b}{C_g + C_b} \quad \dots\dots (2.9)$$

$$C_a = \frac{C_g C_m + C_b C_m + C_g C_b}{C_g + C_b}$$

Keadaan dalam bahan isolasi padat itu jika dimisalkan pada gambar 2.3 memiliki tebal rongga sebesar t dan tebal dielektrik sebesar d dan permitifitas relatif zat isolasi padat adalah ϵ_r dimana $t \ll d$ pada tegangan kerja V_a maka berdasarkan besarnya :

$$V_1 = \epsilon_r \frac{t}{d} V_a \quad \dots\dots (2.10)$$

- Di mana :
- V_1 = tegangan pada rongga
 - V_a = tegangan yang diterapkan
 - ϵ_r = Permitifitas relatif zat isolasi padat



Gambar 2.3. Rongga dalam bahan isolasi

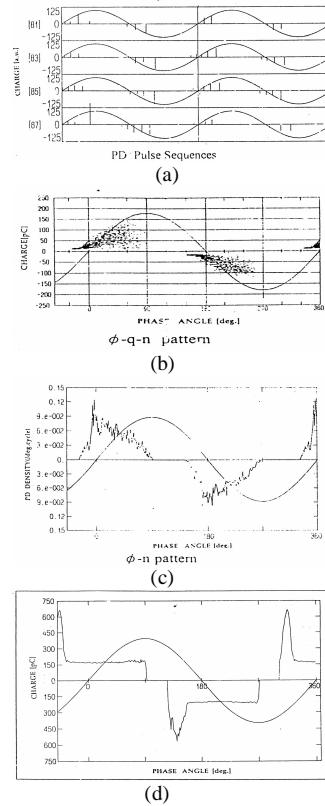
Pada waktu gas dalam rongga gagal, permukaan zat isolasi padat merupakan anoda-katoda. Benturan –benturan elektron pada anoda akan mengakibatkan terlepasnya ikatan kimiawi zat padat. Demikian pula, pemboman katoda oleh ion-ion positif akan mengakibatkan rusaknya zat isolasi padat karena kenaikan suhu,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

Jika tegangan bolak-balik $V(t)$ yang diterapkan tidak menghasilkan kegagalan, maka bentuk gelombang yang terjadi pada *void* adalah V_g . Tetapi jika tegangan V_g tersebut sudah cukup besar bagi *void*, maka akan terjadi peluahan pada V_s sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.4. Pada waktu terjadi peluahan dengan tegangan V_s , maka pada *void* timbul busur api. Busur api yang terjadi, diiringi oleh jatuhnya tegangan sampai V_r , dan mengalirnya arus $i(t)$. Busur api kemudian padam. Tegangan pada *void* kemudian naik lagi sampai terjadi kegagalan pada *void* berikutnya pada tegangan V_s . Hal ini juga terjadi pada setengah gelombang berikutnya yaitu yang negatif. *Void* akan meluahkan pada waktu tegangan *void* mencapai $-V_s$, pada waktu itu gas dalam *void* berada pada keadaan gagal. Akan tetapi walaupun tegangan pada *void* meningkat akan mencapai tegangan percik (*spark voltage*), bisa saja tidak terjadi peluahan sebagian, peluahan akan terjadi jika elektron pemicu *avalanche* tersedia untuk memulai peluahan sebagian.

Gambar 2.4. Bentuk tegangan ketika terjadi PD

2.5. Bentuk Representasi Data

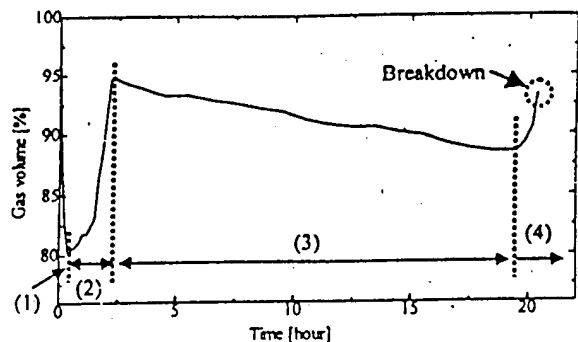
Pulsa-pulsa PD dapat direpresentasikan dalam bentuk urutan dari pulsa-pulsa tersebut pada setiap siklus atau berupa pola Φ -q-n, Φ -q dan Φ -n. imbol Φ ini adalah sudut fase dimana PD terjadi, q adalah magnitude dari PD dan n adalah jumlah dari pulsa PD.



Gambar 2. 5. Representasi pulsa PD dalam bentuk (a) urutan pulsa (b) pola Φ -q-n, (c) pola Φ -q (d) pola Φ -n

2.7. Karakteristik Partial Discharge

Beberapa penelitian yang terkait dengan partial discharge telah dilakukan dan diantaranya adalah seperti yang dilakukan oleh **T. Kondo** dan **T. Mizutani** yang meneliti tentang pola PD selama penuaan isolasi polimer jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) terkait dengan perubahan gas yang berada dalam void dielektrik. Fenomena perubahan pola PD tersebut di atas terjadi oleh karena kadar atau volume gas dalam *void* yang berubah-ubah selama penerapan tegangan. **T. Kondo** dan **T. Mizutani** telah mengadakan pengamatan terhadap besarnya volume gas dalam *void* tertutup dan hasil pengamatan menunjukkan bahwa karakteristik muatan maksimum PD dan jumlah pulsa PD dipengaruhi oleh kadar gas seperti O_2 , CO , CO_2 dan H_2O yang ada dalam void yang hadir sebagai produk dari penuaan isolasi dan reaksi kimia maupun yang sudah ada sejak awal.

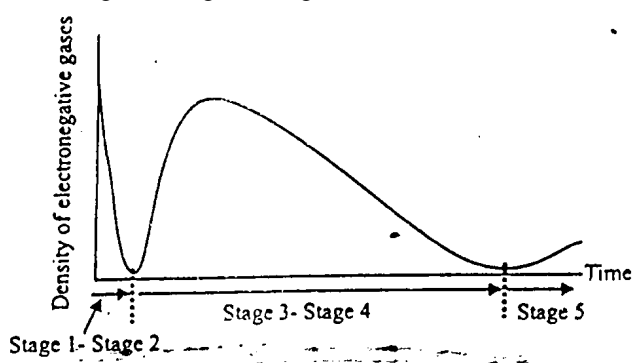


Gambar 2.6. Perubahan volume gas elektronegatif pada void dalam LDPE

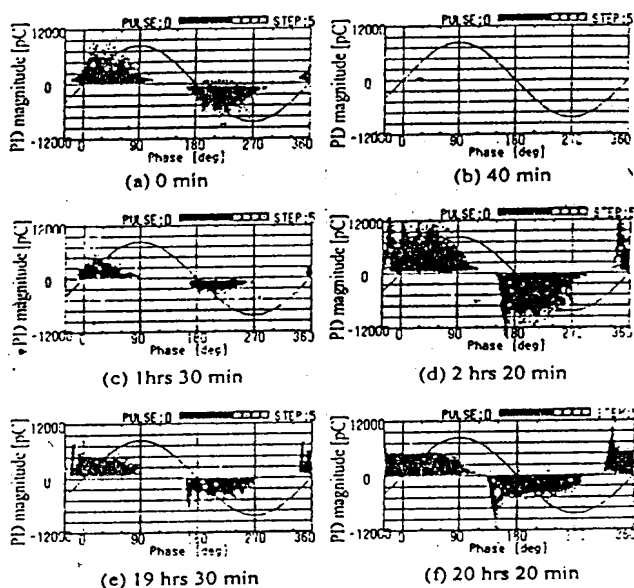
Pada gambar 2.6 di atas menunjukkan perubahan volume gas yang terukur dalam sebuah void. Perubahan tersebut dibagi menjadi 4 tahap yaitu :

1. Permulaan, volume gas dengan cepat menurun mencapai kira-kira 80 % sekitar menit ke-30.
2. Setelah 30 menit berangsur-angsur naik hingga mencapai 95 % pada menit ke -125.
3. Kemudian turun secara perlahan sampai sekitar menit ke-1030 (jam ke-17).
4. Akhirnya akan naik kembali sebelum terjadinya breakdown.

Gambar 2.8 menunjukkan perubahan pola PD selama pengukuran yang dilakukan oleh Teruyoshi Mizutani dan Takeshi Kondo. Dari jumlah dan muatan PD yang dihasilkan ternyata mempunyai kecenderungan yang mirip dengan perubahan volume gas. Sementara itu kadar gas elektronegatif itu sendiri sebanding dengan volume gas yang terjadi, sehingga Mizutani T dan Kondo Takeshi memberikan perkiraan perubahan kepadatan atau kadar gas elektronegatif sebagaimana gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7. Perkiraan kadar gas elektronegatif dalam volume gas dalam void



Gambar 2.8. Perubahan pola PD selama pengukuran

III. SISTEM PENGUKURAN DAN PENGOLAHAN DATA

Peralatan yang digunakan dalam mendukung penelitian ini, antara lain : *Personal Computer (PC)*, *Universal Serial Bus (USB)*, *Digital Storage Oscilloscope GDS 2104 Four Channel buatan Good Will Instrument (GW Instek)*, *Arester*, *RC detector*, *HPF*, *Elektroda II*

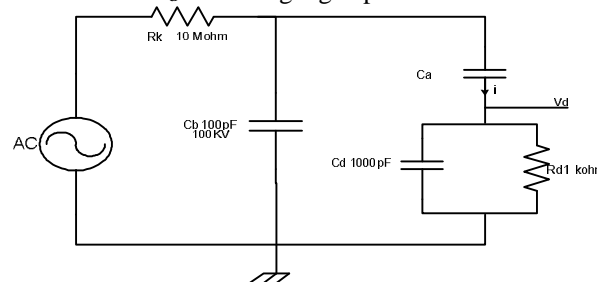
CIGRE, Kit pembangkit tegangan tinggi variable, sumber tegangan AC 220 V dan software *Microsoft Excel*.

1. RC Detector

Alat ini terdiri dari rangkaian resistor dan kapasitor yang diparalel dan digunakan untuk mendeteksi pulsa PD yang terjadi pada sample dan mendeteksi sinyal yang ditransmisikan ke sebuah *High Pass Filter (HPF)* sehingga mendapatkan informasi mengenai sudut fasa dari tegangan sinusoidal fundamental 50 Hz yang dibangkitkan secara simultan atau bersamaan dengan tegangan yang diterapkan. Rangkaian RC ini berfungsi sebagai integrator pulsa arus PD menjadi tegangan sesuai dengan persamaan:

$$V_d = \frac{1}{C_d} \int i(t) dt \quad \dots (3.1)$$

Dimana $i(t)$ adalah arus pulsa PD. C_d adalah kapasitor detektor dan V_d adalah tegangan pulsa PD.



Gambar 3.1. Konfigurasi sistem pengukuran PD

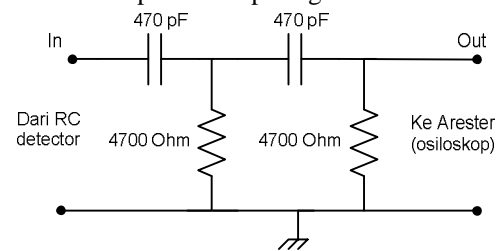
Dimana :

- R_k = Resistor ukur
- C_b = kapasitor ukur
- C_a = Kapasitor sample
- R_d = resistor detektor
- I = Arus pulsa PD
- q = muatan PD
- V_d = Tergangan PD

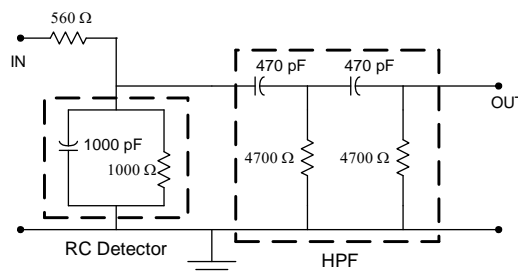
2. High Pass Filter (HPF)

Untuk memastikan kualitas pengukuran pulsa PD digunakan High Pass Filter (HPF). Rangkaian HPF berfungsi untuk melewati pulsa PD. HPF juga digunakan untuk mengeliminir noise sehingga data pengukuran menjadi lebih valid.

Rangkaian HPF dapat dilihat pada gambar berikut ini

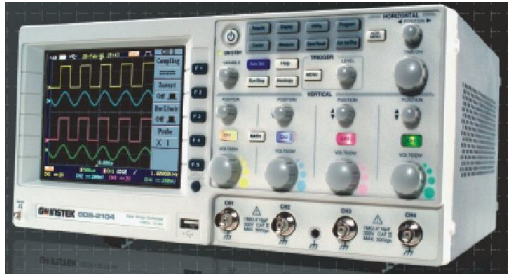


Gambar 3.2. Rangkaian ekuivalen HPF



Gambar 3.3. Rangkaian RC Detector dan HPF

3. Osiloskop



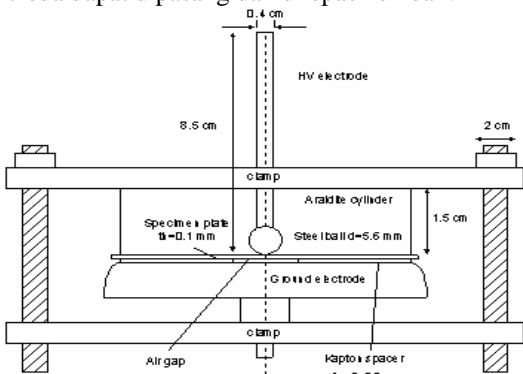
Gambar 3.4. Osiloskop GDS 2104

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 *sample* 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.

Osiloskop ini berguna untuk menampilkan bentuk pulsa arus yang sampai ke ground sehingga dapat diketahui besarnya tegangan partial discharge dan dikoneksikan pada komputer menggunakan USB yang kemudian akan merekam peristiwa terjadinya PD pada sampel PVC. Dan osiloskop ini, dilengkapi dengan port USB sehingga dapat dilakukan pengambilan data dengan menghubungkan *flashdisk* dengan USB, dan akan didapatkan data dalam bentuk .csv atau microsoft excel.

4. Elektroda II CIGRE

Sistem elektroda metode II CIGRE yang digunakan dalam percobaan ini dapat dilihat pada gambar 3.5. Elektroda tegangan tinggi berbentuk bola ditempatkan tepat di atas sampel percobaan untuk memastikan medan elektrik yang tidak homogen dalam rongga. Dengan cara demikian terdapat sebuah konsentrasi tinggi *discharge* dalam area terbatas pada permukaan sampel uji coba. Untuk memungkinkan penggantian sampel dengan bahan dan dimensi yang berbeda-beda, *clamp* bagian atas pada elektroda dapat dipasang dan dilepas kembali.

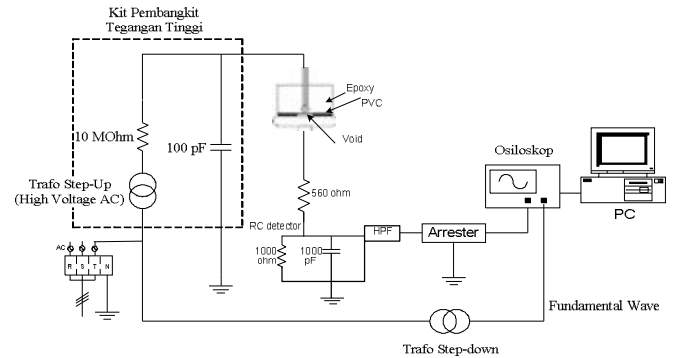


Gambar 3.5. Sistem elektroda metode II CIGRE pada percobaan

5. Arrester

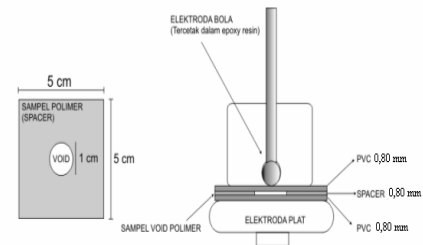
Arrester digunakan untuk melindungi osiloskop dari tegangan lebih yang mungkin terjadi; produksi DEHN UGKF/BNC German. *Body* arrester dihubungkan ke *ground* untuk pengamanan. Alat ini berada di antara *RC detector* dengan osiloskop dan dipasang pada *channel* yang digunakan pada osiloskop.

Peralatan pengukuran tersebut kemudian dirangkai untuk keperluan pengukuran. Gambar 3.6 menunjukkan rangkaian pengukuran PD pada *void* menggunakan sistem elektroda metode II CIGRE.



Gambar 3.6. Rangkaian pengukuran *partial discharge*

Sampel yang digunakan adalah *polyvinile chloride* (PVC) yang dimensi dan bahan dan susunan elektrodanya ditunjukkan dalam gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7. Susunan sampel dan elektroda

Elektroda bagian atas pada gambar 3.7 adalah elektroda bola dari metoda II CIGRE dengan diameter 5 mm yang sudah tercetak dalam resin padat, sedangkan bagian bawah adalah elektroda bidang atau plat yang terbuat dari logam *stainless steel*.

Sampel void dalam PVC di atas dibuat dengan menumpuk 3 buah lapisan PVC sejenis dengan ketebalan 0,80 mm dimana salah satu lapisan yaitu lapisan kedua atau tengah merupakan *spacer*. *Spacer* dengan ketebalan 0,80 mm ini, pada bagian tengahnya dibuat lubang lingkaran dengan diameter 1 cm yang merupakan void buatan itu sendiri.

Dalam pengukurannya, elektroda bola sebagai fasa pengukurannya tepat ditempatkan tepat ditengah susunan PVC, yaitu tepatnya di atas void dan elektroda bidang sebagai ground. Untuk mencegah agar ketiga lembaran PVC tersebut tidak bergeser selama pengukuran dan membentuk ruang atau void tertutup maka sampel void PVC dijepit dengan kedua elektroda melalui mur yang ada pada *holder CIGRE*.

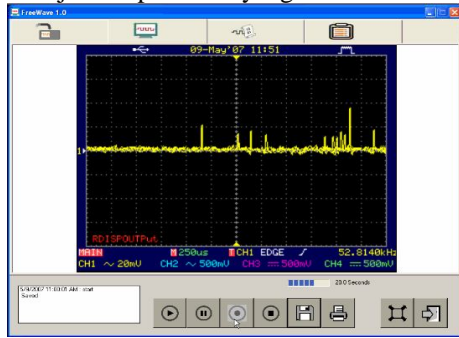
3.1. Mekanisme Pengujian dan Pengolahan Data

Pengukuran PD pada penelitian ini, menggunakan elektroda metode II CIGRE, elektroda II CIGRE dihubungkan dengan tegangan tinggi AC (50 Hz) 4kV_{rms} yang merupakan tegangan insepasi, yaitu tegangan dimana PD pertama kali muncul. PD yang muncul pada sampel dideteksi dengan *RC detector* yang berfungsi sebagai integrator. Keluaran dari *RC detector* adalah hasil integrasi dari gelombang arus PD terhadap waktu dan dengan demikian tegangan keluaran ini sebanding dengan muatan PD.

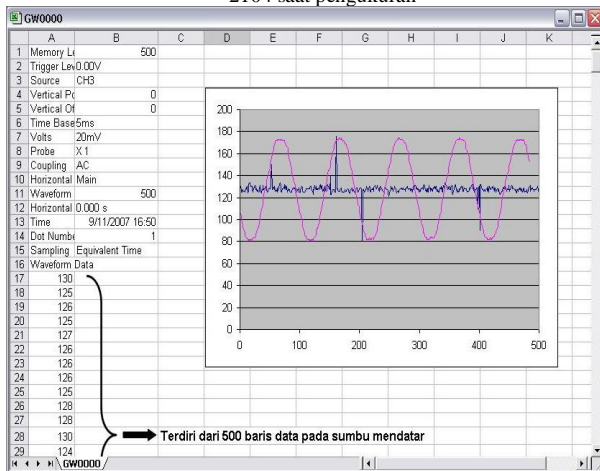
$$V_{out} \sim q$$

Kemudian dari *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 USB maka dapat merekam kejadian PD menggunakan PC melalui program FreeWave secara *real-time*, namun data yang direkam hanya berupa video (.wmv). Sedangkan data PD yang akan diolah (.csv) 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.



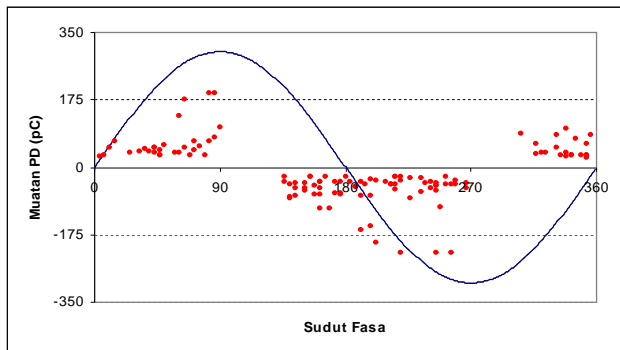
Gambar 3.8. Tampilan pulsa PD pada komputer dari Osiloskop GDS 2104 saat pengukuran



Gambar 3.9. File hasil eksekusi (.csv), terdiri dari 500 baris data dan tampilan pulsa Pdnya

3.2. Bentuk Representasi pulsa PD

Pulsa-pulsa PD hasil pengukuran ini dapat direpresentasikan pada bidang fasa tegangan dalam bentuk urutan pulsa PD atau berupa pola ϕ -q-n. Simbol ϕ adalah sudut fasa dimana PD terjadi, q adalah muatan pulsa PD dan n adalah jumlah pulsa PD. Setiap titik merepresentasikan sebuah pulsa PD. Makin tinggi titik berarti makin besar muatan pulsa PD yang terjadi, begitu juga semakin padat jumlah titiknya semakin banyak PD yang terjadi.



Gambar 3.10. Bentuk urutan pulsa PD pada void dengan elektroda metode II CIGRE

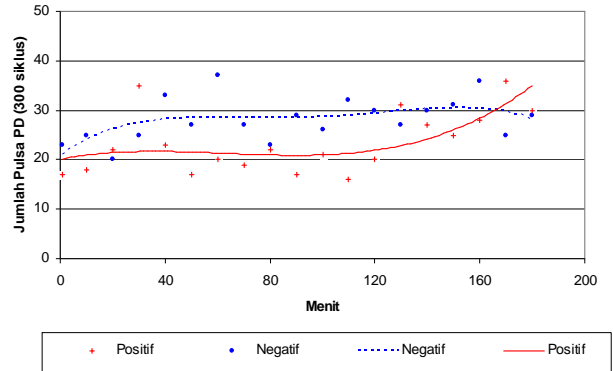
IV. HASIL PENGUKURAN DAN ANALISIS

Membahas hasil penelitian pengukuran PD pada void untuk jenis polimer PVC. Pembahasan yang dilakukan adalah mengenai karakteristik PD sebagai fungsi waktu dan fungsi tegangan.

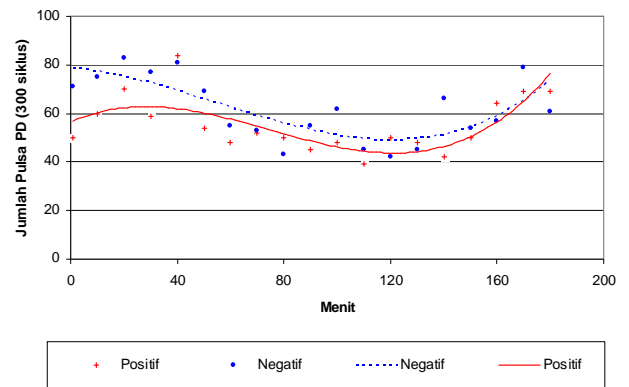
4.1. Karakteristik Jumlah Pulsa

4.1.1. Karakteristik Jumlah Pulsa PD Sebagai fungsi waktu

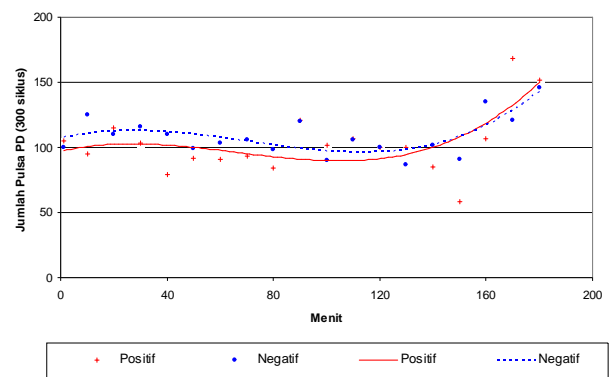
Dari data hasil pengukuran, pada tegangan 4kV_{rms}, 5kV_{rms}, 6kV_{rms} dan 7 kV_{rms}, didapatkan karakteristik jumlah pulsa PD pada void PVC, seperti pada gambar 4.1, 4.2, 4.3 dan 4.4 berikut:



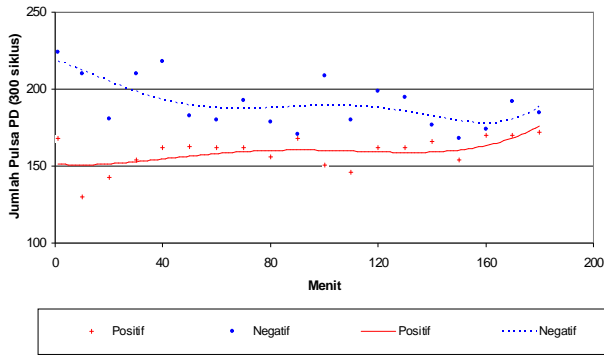
Gambar 4.1. Karakteristik jumlah pulsa PD pada Void PVC tegangan 4kV_{rms}



Gambar 4.2. Karakteristik jumlah pulsa PD pada Void PVC tegangan 5kV_{rms}



Gambar 4.3. Karakteristik jumlah pulsa PD pada Void PVC tegangan 6kV_{rms}

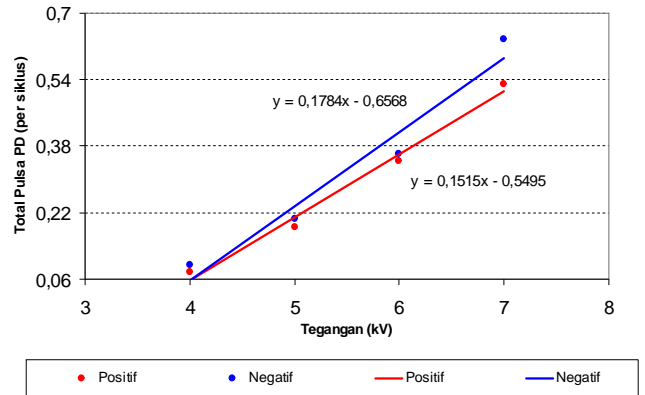


Gambar 4.4. Karakteristik jumlah pulsa PD pada Void PVC tegangan $7kV_{rms}$

Berdasarkan gambar 4.1, 4.2, 4.3 dan 4.4 pulsa PD pada void dapat muncul pada peluahan siklus positif maupun negatif. Masing-masing siklus menunjukkan jumlah pulsa PD yang berbeda. Karakteristik jumlah pulsa PD pada siklus positif maupun negatif cenderung mengalami kenaikan seiring dengan lamanya waktu penerapan tegangan. Fenomena bertambahnya jumlah pulsa PD terhadap waktu dapat dijelaskan bahwa pada saat medan listrik diberikan terjadi ionisasi elektron. Elektron-elektron akan terionisasi dan memiliki energi kinetik yang cukup untuk memungkinkannya mengionisasi atom netral dalam atom gas 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. Perubahan jumlah PD yang terjadi selama pengukuran bersifat stokastik, hal ini dapat diakibatkan antara lain oleh adanya proses rekombinasi yaitu proses bersatunya kembali elektron dan anion sehingga terjadi pemadaman PD temporer yang menyebabkan jumlah pulsa PD turun.

4.1.2. 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 ini tergantung dari tegangan yang diterapkan. Jika suatu tegangan diterapkan antara dua elektroda (anoda dan katoda), maka arus akan bergerak menuju katoda sesuai dengan Bergeraknya elektron. Sementara itu gerakan elektron merupakan fungsi dari tegangan yang arahnya berlawanan dengan gerakan arus listrik. Sehingga 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. Gambar 4.5 berikut ini merupakan grafik karakteristik jumlah pulsa PD sebagai fungsi tegangan.



Gambar 4.5. Pengaruh tegangan terhadap jumlah pulsa PD

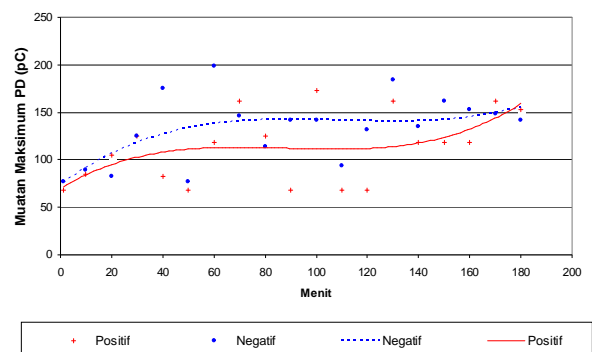
Pada gambar 4.5, dapat dilihat bahwa jumlah pulsa PD cenderung meningkat baik PD siklus positif maupun PD siklus negatif seiring dengan kenaikan nilai tegangan terapan. Peningkatan jumlah pulsa PD siklus positif dan negatif tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut : ketika tegangan yang diterapkan dinaikkan, maka kuat medan elektrik akan bertambah, elektron akan bergerak dipercepat karenanya sehingga elektron memiliki energi kinetik yang besar pula. Energi kinetik yang dimiliki elektron ini memungkinkan mengionisasi atom gas dalam void bila bertumbukan, ionisasi ini akan menghasilkan elektron berikutnya. Semakin besar kuat medan elektrik yang diterapkan, proses ionisasi akan semakin meningkat sehingga terjadi banjir (*avalanche*) yang menyebabkan meningkatnya jumlah muatan seperti tampak pada gambar 4.5 di atas.

Adapun jumlah pulsa PD siklus negatif tampak lebih banyak daripada jumlah pulsa PD siklus positif. Ini dikarenakan saat siklus negatif, elektroda bola berpolaritas negatif, sehingga elektron mula berasal dari elektroda bola. Demikian sebaliknya, saat siklus positif elektroda bola berpolaritas positif, elektron mula berasal dari polimer PVC atau gas yang berada disekitar elektroda. Karena energi ionisasi elektroda bola lebih kecil dibanding polimer atau gas maka memungkinkan elektron pada elektroda bola jauh lebih mudah keluar untuk mengawali terjadinya PD.

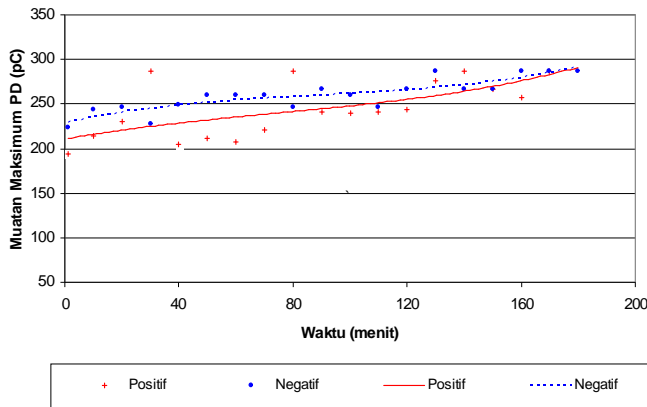
4.2. Karakteristik Muatan Maksimum PD

4.2.1. Karakteristik Muatan Maksimum PD Sebagai Fungsi Waktu

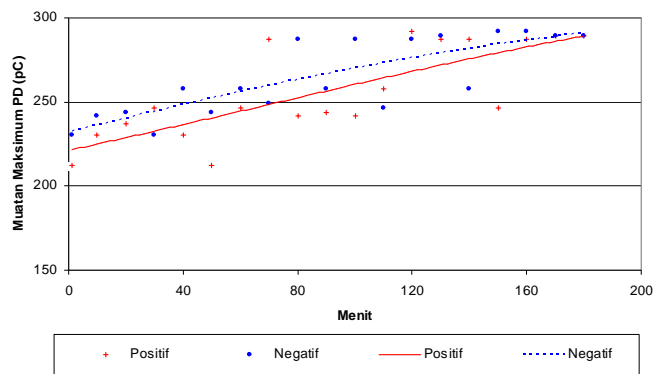
Gambar 4.6, 4.7, 4.8 dan 4.9 menunjukkan karakteristik muatan maksimum PD hasil pengukuran sebagai fungsi waktu pada tegangan $4 kV_{rms}$, $5 kV_{rms}$, $6 kV_{rms}$, $7 kV_{rms}$.



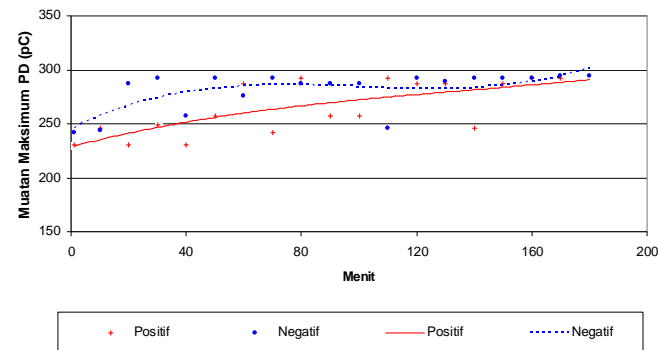
Gambar 4.6 Karakteristik muatan maksimum pulsa PD pada void dalam PVC tegangan $4 kV_{rms}$



Gambar 4.7 Karakteristik muatan maksimum pulsa PD pada void dalam PVC tegangan 5 kV_{rms}



Gambar 4.8 Karakteristik muatan maksimum pulsa PD pada void dalam PVC tegangan 6 kV_{rms}



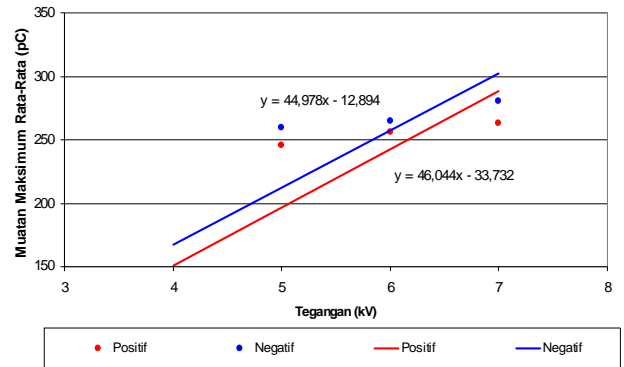
Gambar 4.9 Karakteristik muatan maksimum pulsa PD pada void dalam PVC tegangan 7 kV_{rms}

Dari gambar 4.6, 4.7, 4.8 dan 4.9 menunjukkan karakteristik muatan maksimum PD. Secara umum muatan maksimum PD positif maupun negatif mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu. Saat terjadi PD, maka akan terjadi loncatan atau pelepasan busur api pada rongga. Pada waktu gas dalam rongga gagal, permukaan zat isolasi padat merupakan anoda-katoda. Benturan –benturan elektron pada anoda akan mengakibatkan terlepasnya ikatan kimiawi zat padat. Demikian pula, pemboman katoda oleh ion-ion positif akan mengakibatkan rusaknya zat isolasi padat karena kenaikan suhu, yang kemudian mengakibatkan ketidakstabilan termal. Keadaan ini menyebabkan dinding zat padat lama-kelamaan rusak, rongga menjadi semakin besar dan zat padat bertambah tipis. Proses ini disebut erosi dan kegagalan yang diakibatkan disebut kegagalan erosi. Sehingga berdasarkan persamaan 2.10 maka

tegangan pada rongga akan semakin besar dan muatan maksimum PD pun semakin besar.

4.2.2. Karakteristik Muatan Maksimum PD Sebagai Fungsi Tegangan

Gambar 4.10 menunjukkan pengaruh tegangan terhadap karakteristik muatan maksimum PD positif dan negatif



Gambar 4.10 . Pengaruh tegangan terhadap muatan maksimum rata – rata

Dari gambar 4.10 di atas dapat diambil kesimpulan bahwa jika tegangan yang diterapkan dinaikkan, maka muatan maksimum PD mengalami peningkatan pada muatan positif maupun muatan negatif. Suwarno, Abdul Syukur, Joko W dan Redy M^[15] telah meneliti pengaruh tegangan terhadap besarnya muatan maksimum PD pada sampel PVC, PMMA dan LDPE dan didapatkan kesimpulan yang sama. 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 2.1, muatan elektron sebanding dengan energi ionisasi yang diterimanya, maka makin besar energi ionisasi makin besar juga muatan elektron yang mengalir.

Karakteristik muatan maksimum ini juga telah diteliti oleh T. Kondo dan T. Mizutani dengan mengambil sampel isolasi berupa LDPE dan dalam laporannya disebutkan bahwa terjadinya PD yang pertama kali dianggap karena peningkatan molekul-molekul seperti CO₂ dan H₂O dalam void. Gas-gas elektronegatif dapat menangkap (*attachment*) elektron-elektron bebas yang dibangkitkan oleh PD sebelum polaritas tegangan yang diterapkan berubah dan oleh karenanya menyebabkan kenaikan *time-lag* yaitu waktu antara tegangan inisiasi gas dengan tegangan minimum yang diperlukan untuk terjadinya PD. Suatu *Over voltage* karena sebuah *time-lag* menjadikan magnitude muatan pulsa PD yang besar.

4.3. Perhitungan Rugi Daya Partial Discharge

Selama pengukuran dilakukan maka terjadi peluahan yang merupakan mengalirnya elektron atau arus dari elektroda tegangan tinggi ke ground melalui dielektrik (PVC). Elektron dapat keluar dari elektroda karena mendapatkan energi yang memaksa elektron melepaskan ikatannya. Energi tersebut merupakan medan listrik yang sengaja diterapkan pada elektroda.

Besarnya energi yang diperlukan untuk melepas 1 elektron adalah dirumuskan sebagaimana persamaan :

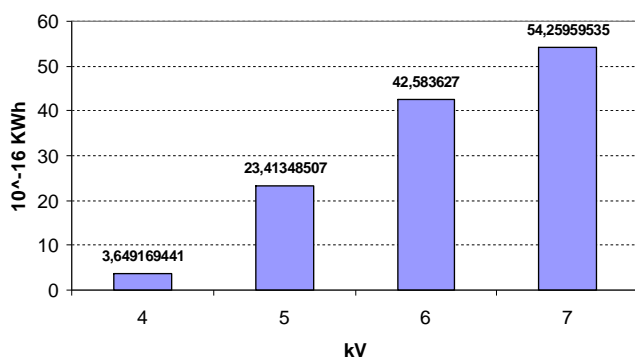
$$U = \frac{1}{2} m_e \cdot v_e^2 = e \cdot V \quad \dots (4.1)$$

Dari persamaan ini dapat dihitung besarnya energi yang hilang dan ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Rugi Energi Akibat PD

kV	4		5		6		7	
	10 ⁻¹² Joule	10 ⁻¹⁶ kWh	10 ⁻¹² Joule	10 ⁻¹⁶ kWh	10 ⁻¹² Joule	10 ⁻¹⁶ kWh	10 ⁻¹² Joule	10 ⁻¹⁶ kWh
1	33,55	0,09	236,21	0,65	535,14	1,48	1265,45	3,51
10	40,27	0,11	389,44	1,08	628,84	1,74	813,58	2,26
20	41,16	0,11	378,66	1,05	695,74	1,932	810,30	2,25
30	103,83	0,28	317,18	0,88	675,20	1,87	784,89	2,18
40	67,73	0,18	411,95	1,14	653,23	1,81	895,90	2,48
50	38,24	0,10	396,97	1,10	532,11	1,47	1078,93	2,99
60	89,72	0,24	367,07	1,019	717,78	1,99	992,64	2,75
70	59,45	0,16	402,72	1,11	616,79	1,71	880,15	2,44
80	60,56	0,16	394,66	1,096	588,59	1,63	954,38	2,65
90	47,55	0,13	405,84	1,12	724,35	2,01	1279,60	3,55
100	69,42	0,19	558,08	1,55	715,23	1,98	1189,00	3,30
110	45,61	0,12	371,89	1,03	706,55	1,96	1092,99	3,03
120	53,58	0,14	508,90	1,41	797,33	2,21	1123,51	3,12
130	122,85	0,34	526,72	1,46	707,61	1,96	1004,13	2,78
140	75,60	0,21	715,00	1,98	775,00	2,15	1032,54	2,86
150	83,81	0,23	547,09	1,51	793,47	2,20	953,18	2,64
160	76,80	0,21	477,93	1,32	1209,32	3,35	1038,91	2,88
170	112,17	0,31	598,23	1,66	1725,40	4,79	1078,38	2,99
180	91,70	0,25	423,54	1,17	1531,08	4,25	1268,06	3,52
Total	1313,69	3,64	8428,18	23,41	15328,87	42,58	19536,61	54,27

*1 Joule = 2,778. 10⁻⁷ kWh.



Gambar 4.11. Grafik rugi energi PD PVC

Berdasarkan grafik perkembangan rugi energi PD pada gambar 4.11 di atas tampak bahwa rugi energi pada PVC yang cenderung makin naik sebanding dengan kenaikan tegangan yang diterapkan untuk 19 kali pencuplikan pada masing-masing tegangan yang diterapkan sesuai dengan persamaan 4.1. Semakin besar tegangan yang diterapkan antara dua elektroda maka elektron akan mendapatkan energi yang besar untuk mengionisasi partikel lain dalam gas sehingga lama – kelamaan jumlah elektron semakin banyak dan akan menyebabkan terjadinya peluahan. Energi yang diperlukan elektron untuk mengionisasi partikel lain inilah yang menimbulkan terjadinya peluahan sehingga akan terjadi

rugi energi karena mengalirnya elektron dari tegangan tinggi menuju ground melalui dielektrik.

V. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengukuran dan pembahasan yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan yang bisa didapat dari laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Karakteristik PD dipengaruhi oleh tegangan dan waktu yang diterapkan pada bahan isolasi
2. Rata-rata jumlah pulsa PD negatif lebih besar daripada PD positif .
3. Karakteristik jumlah pulsa PD dan muatan maksimum berdasarkan fungsi waktu menunjukkan kurva yang menaik.
4. Karakteristik jumlah pulsa PD cenderung meningkat karena pengaruh tegangan. Pada tegangan 4 kV_{rms}, 5 kV_{rms}, 6 kV_{rms}, 7 kV_{rms}, memperlihatkan jumlah PD yang semakin bertambah.
5. Energi yang hilang saat pengambilan data PD pada PVC,yaitu untuk tegangan 4 kV_{rms} sebesar 3,649 x 10⁻¹⁶ kWh dalam 19 kali pencuplikan (5700 siklus) atau rata-rata 0,064175 x 10⁻¹⁸ kWh tiap siklus, untuk tegangan 5 kV_{rms} sebesar 23,413 x 10⁻¹⁶ kWh, pada tegangan 6 kV_{rms} sebesar 42,584 x 10⁻¹⁶ kWh dan pada tegangan 7 kV_{rms} sebesar 54,273 x 10⁻¹⁶ kWh

5.2. Saran

Berikut ini adalah beberapa saran yang dapat kami kemukakan bagi para pembaca yang berminat melanjutkan untuk menyempurnakan penelitian tentang isolasi polimer pada umumnya dan PVC pada khususnya di waktu mendatang.

1. Penelitian terhadap material isolasi polimer selanjutnya dilakukan dengan perlakuan kondisi yang berbeda seperti variasi tegangan, suhu, kelembaban, dan tekanan sebagaimana kondisi saat polimer PVC digunakan dalam ketenagalistrikan.
2. Hendaknya penelitian juga dilakukan pada material isolasi yang memiliki bentuk cacat yang lain seperti adanya tonjolan dipermukaan isolasi, ketidakmurnian isolasi karena ada material lain .
3. Sampel lain dapat digunakan misalnya dari jenis bahan isolasi cair maupun gas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A,Syamsir.,*Dasar Pembangkitan dan Pengukuran Teknik Tegangan Tinggi*, Salemba Teknika, Jakarta,2001
- [2] Boogs, S. and Densely, J.,*Fundamentals of Partial Discharge in Context of Field Cable Testing*, IEEE electrical insulation Magazine. September/Okttober-2000 vol.16 No.5
- [3] Dissado, L.A. and Fothergil, J.C.,*Electrical Degradation And Breakdown In Polymers*, Peter Peregrinus.Ltd,London,UK,1992
- [4] Kind, D. and Hermann K., *High Voltage Insulation Technology*, Firedr Vieweg & Sohn,1985
- [5] Mizutani, T., and Kondo, T., PD Pattern and PD current shapes of a void in LDPE. *Proceeding of The 6th International Convergence on Properties and Applications of Dielectric Material* June 21-26.Xian,China
- [6] Munandar A., *Teknik Tegangan Tinggi*, Ghalia, Indonesia.,Jakarta,1983
- [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]Paoletti.,G.J., *Partial Discharge Theory and technologies related to traditional testing methods of large rotating apparatus*, AISE Steel technology,2000
- [9] Qureshi,M.I. Al Arainy,A.A, Malik N.H., *Electrical Insulation in Power System*, Marcel Dexter.inc, New York, 1998
- [10]Rudi,K.,*Studi Pengaruh Temperatur Pada Karakteristik Pemohonan Listrik Dalam Polimer*, Tesis S-2, ITB,Bandung1998
- [11]Santoro,*Karakteristik Peluahan Sebagian Pada Model Void Berdasarkan Fungsi Waktu dalam PVC Menggunakan Metode Elektroda II CIGRE*, Tugas Akhir S-1,Universitas Diponegoro,2006
- [12] Sulasno.,*Teknik dan Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, Badan Penerbit Universitas Diponegoro, Semarang, 2004
- [13]Suwarno.,*Study on electrical treeingand partial discharge in Polymeric Insulating Materials*, A Dissertation for The Doctor Degree at School of Engineering, Nagoya University, Japan, 1996
- [14]Syakur, A., *PD Behavior in A Void in Polyvinyl Chloride (PVC) Under High Humidity Condition*, Tesis S-2, ITB, Bandung
- [15] 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
- [16] Tanaka,T, “*Internal Partial Discharge and Material Degradation*,” Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan.
- [17]Tillar Shugg., *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*, IEEE Press,USA,1995
- [18] Tobing, L B., *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*,Gramedia Pustaka Utama,Jakarta,2002
- [19]Zahra, F. and Nema, R.S.,*Study of Corona Pulses in Air Solid interface*, *Convergence record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Virginia USA,1998
- [20] _____, <http://www.elektroindonesia.com/ener13a>.

BIODATA



DEVY MARTONI (L2F 003 493).
Lahir di Bengkulu Selatan, 21 Desember 1986. Mahasiswa jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro (Strata S-1) – Semarang dengan konsentrasi Ketenagaan.

Semarang, Januari 2008

Mengetahui.

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir. Yuningtyastuti
NIP. 131 285 569

Abdul Syakur, ST.MT
NIP. 132 231 132