



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**MONITORING PARTIAL DISCHARGE PADA  
BUSHING TRANSFORMATOR**

**SKRIPSI**

**FAROUQ RAMADHAN**

**0706166610**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO**

**KEKHUSUSAN TEKNIK TENAGA LISTRIK**

**DEPOK**

**JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**MONITORING PARTIAL DISCHARGE PADA  
BUSHING TRANSFORMATOR**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik.**

**FAROUQ RAMADHAN**

**0706166610**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO**

**KEKHUSUSAN TEKNIK TENAGA LISTRIK**

**DEPOK**

**JUNI 2011**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

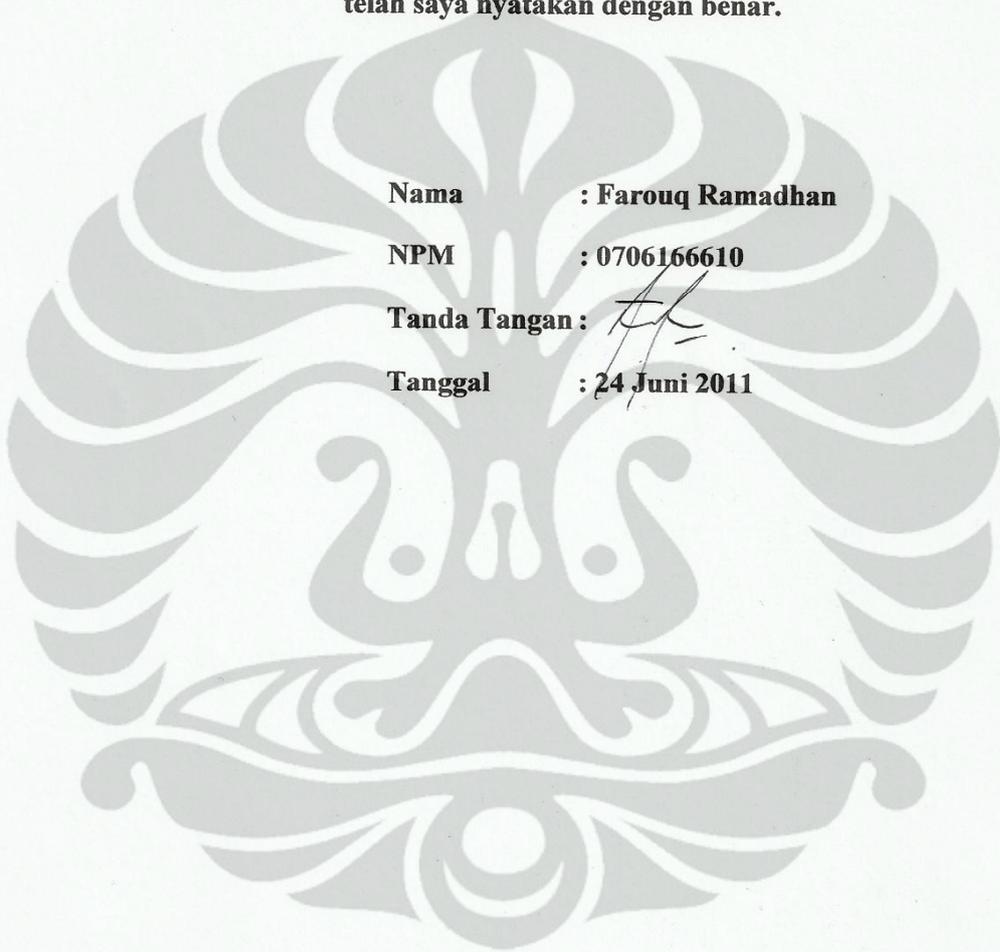
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Farouq Ramadhan**

**NPM : 0706166610**

**Tanda Tangan :** 

**Tanggal : 24 Juni 2011**



**LEMBAR PENGESAHAN**

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Farouq Ramadhan

NPM : 0706166610

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Monitoring Partial Discharge pada Bushing Transformator

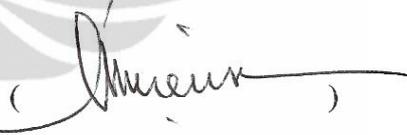
**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia**

**DEWAN PENGUJI**

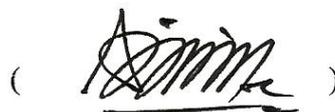
Pembimbing : Ir. I Made Ardita Y. MT

(  )

Penguji : Ir. Amien Rahardjo MT

(  )

Penguji : Aji Nur Widyanto ST.MT

(  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

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

- 1) Ir. I Made Ardita, MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- 2) Pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini;
- 3) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- 4) Sahabat-sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 24 Juni 2010

Farouq Ramadhan

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

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

Nama : Farouq Ramadhan  
NPM : 0706166610  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**Monitoring Partial Discharge pada Bushing Transformator**

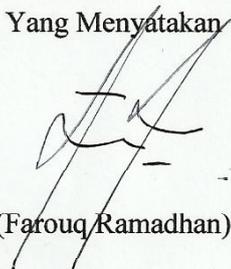
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada Tanggal: 24 Juni 2011

Yang Menyatakan



(Farouq Ramadhan)

**Universitas Indonesia**

## ABSTRAK

Nama : Farouq Ramadhan

Program Studi : Teknik Elektro

Judul : Monitoring Partial Discharge pada Bushing Transformator

Fenomena yang sering ditemukan di lapangan adalah masalah *partial discharge* pada isolasi khususnya *bushing* transformator yang seharusnya mampu untuk menahan tegangan tembus yang telah ditentukan. Namun pengukuran dan pendeteksian *partial discharge* sebagai langkah preventif masih jarang dijumpai, sehingga berakibat pada kegagalan total pada isolasi. Pada penelitian ini dibahas tentang kegagalan isolasi baik padat, cair maupun gas yang merupakan faktor penting terjadinya *partial discharge*. *Bushing* merupakan peralatan persambungan yang merupakan titik lemah dari sistem tenaga listrik dan rentan terhadap kegagalan. Sehingga disusunlah berbagai metode untuk pendeteksian *partial discharge* ini seperti Dissolved Gas Analysis (DGA), pendeteksian emisi akustik, ultrasonik dan infra merah. Pada penelitian ini digunakan kombinasi monitoring *partial discharge* dengan menggunakan metode emisi akustik dan infra merah yang menunjukkan kemunculan sinyal emisi akustik dengan frekuensi-frekuensi tinggi pada *partial discharge* dengan energi yang lebih rendah.

Kata Kunci :

*Partial Discharge*, *Bushing* Transformator, Metode Deteksi *Partial Discharge*, Emisi Akustik, Infra Merah

## ABSTRACT

Name : Farouq Ramadhan  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Monitoring Partial Discharge on Bushing Transformer

In field work, the most occurrence phenomene is partial discharge on isolation especially for isolation in bushing transformator which should able to resist the penetration voltage that have determined before. However, measurement and detection of partial discharge as preventive step is rare to do, so it can cause a total failure in isolation. This research is purposed to explain more about a total failure on solid, liquid, and gas isolation which is an important factor in partial discharge occurance. Bushing is a conjunction tool which is a weak point from electricity energy system and vulnurable with failure. Therefore, there are several method to detect partial discharge such as Dissolved Gas Analysis (DGA), acoustic emission, ultrasonic dan infra red. In this study used monitoring partial discharge with combining acoustic emission and infrared that show partial discharge of low energy create acoustic emission signal of higher frequency.

Keywords :

Partial Discharge, Bushing Transformer, Detectionfor Partial Discharge, Acoustic Emission, Infrared

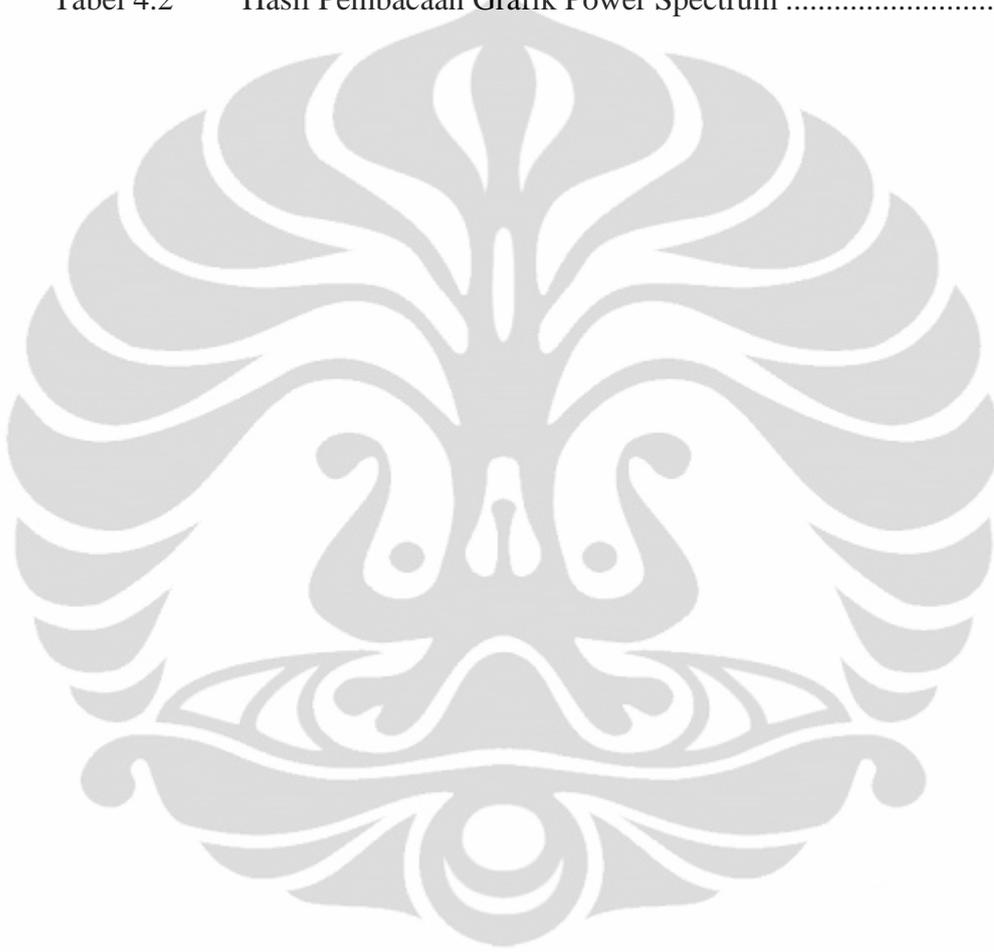
## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASITUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR RUMUS .....	xii
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metodologi Penulisan.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
<b>BAB II LANDASAN TEORI .....</b>	<b>7</b>
2.1 Kegagalan Bahan Isolasi .....	7
2.1.1 Kegagalan Isolasi Padat .....	7
2.1.2 Kegagalan Isolasi Cair .....	10
2.1.3 Kegagalan Isolasi Gas .....	13
2.2 Bushing.....	14
2.2.1 Jenis-jenis Bushing .....	15
2.2.2 Pengujian Bushing .....	16
2.2.3 Desain Bushing .....	17
2.3 Partial Discharge .....	17
2.3.1 Mekanisme Partial Discharge menurut Townsend .....	20
2.3.2 Jenis Partial Discharge .....	20

2.4	Metode Monitoring Partial Discharge.....	23
2.4.1	Dissolved Gas Analysis (DGA).....	23
2.4.2	Ultrasonic.....	26
2.4.3	Deteksi Emisi Akustik.....	26
2.4.4	Deteksi Kamera Inframerah.....	27
<b>BAB III MONITORING PARTIAL DISCHARGE.....</b>		<b>28</b>
3.1	Dissolved Gas Analysis.....	28
3.2	Ultrasonik.....	31
3.3	Deteksi Emisi Akustik.....	34
3.4	Deteksi Kamera Inframerah.....	37
<b>BAB IV ANALISIS.....</b>		<b>41</b>
4.1	Perbandingan Berbagai Metode.....	41
4.2	Analisis Penurunan Isolasi.....	44
4.3	Monitoring Bushing Transformator.....	57
<b>BAB V KESIMPULAN.....</b>		<b>59</b>
<b>DAFTAR REFERENSI.....</b>		<b>60</b>

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Hasil Pengujian DGA .....	29
Tabel 3.2 Jenis-Jenis Kegagalan DGA .....	30
Tabel 4.1 Perbandingan Keunggulan dan Kelemahan Berbagai Macam Metode Monitoring Partial Discharge .....	42
Tabel 4.2 Hasil Pembacaan Grafik Power Spectrum .....	55



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Diagram Alir Penelitian.....	4
Gambar 2.1 Grafik Kegagalan Isolasi Padat .....	8
Gambar 2.2 Bushing pada Terminal Transformator .....	14
Gambar 2.3 Penampang bushing.....	16
Gambar 2.4 Susunan partial discharge luar (konfigurasi elektroda jarum-plat) dan rangkaian ekivalennya .....	20
Gambar 2.5 Susunan partial discharge dalam (objek uji dengan rongga) dan rangkaian ekivalennya .....	22
Gambar 2.6 Duval Triagle.....	26
Gambar 3.1 Komposisi Gas-Gas Esensial pada Duval Triangle.....	30
Gambar 3.2 Cross-Correlation .....	34
Gambar 4.1 Rangkaian Pengujian Emisi Akustik pada Isolasi Minyak .....	45
Gambar 4.2 Blok Diagram Pembacaan Record Akustik.....	47
Gambar 4.3 Front Panel Pengolahan Record Akustik pada LabVIEW .....	47
Gambar 4.4 Bentuk Gelombang ( <i>waveform</i> ), Amplitude Terhadap Waktu Isolasi Minyak 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada temperatur 120 <sup>0</sup> C.....	48
Gambar 4.5 Power Spektrum Isolasi Minyak 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada Temperatur 120 <sup>0</sup> C .....	49
Gambar 4.6 Bentuk Gelombang ( <i>waveform</i> ), Amplitude Terhadap Waktu Isolasi Minyak 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada temperatur 100 <sup>0</sup> C.....	51
Gambar 4.7 Power Spectrum isolasi minyak 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada Temperatur 100 <sup>0</sup> C .....	52
Gambar 4.8 Frekuensi Puncak dan Median untuk Tegangan 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada temperatur isolasi minyak 120 <sup>0</sup> C .....	54
Gambar 4.9 Frekuensi Puncak dan Median untuk Tegangan 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada temperatur isolasi minyak 100 <sup>0</sup> C .....	55
Gambar 4.10 Grafik Pembacaan Power Spectrum.....	56
Gambar 4.11 Karakteristik <i>Ageing</i> Bushing terhadap Temperatur .....	57

## DAFTAR RUMUS

	Halaman
Rumus 2.1 Gaya yang bekerja pada suatu bahan yang berhubungan dengan Modulus Young .....	8
Rumus 2.2 Persamaan Stark dan Garton .....	9
Rumus 2.3 Kerapatan arus yang timbul berdasarkan Schottky .....	11
Rumus 2.4 Medan listrik dalam gelembung gas yang ada dalam isolasi cair	11
Rumus 2.5 Hubungan antara 2 medan dalam bola cair .....	12
Rumus 2.6 Gaya yang bekerja pada butiran dalam medan tak homogen .....	12
Rumus 2.7 Besar discharge pada PD luar .....	21
Rumus 2.8 Tegangan pada $C_1$ (konfigurasi PD dalam) .....	22
Rumus 2.9 Hubungan tegangan awal $U_e$ dengan tegangan open circuit $U_z$ (konfigurasi PD dalam) .....	22
Rumus 4.1 Fast Fourier Transform (FFT) berdasarkan Bracewell.....	46
Rumus 4.2 Nilai maksimum pada spektrum.....	53
Rumus 4.3 Frekuensi pada spektrum maksimum .....	53
Rumus 4.4 Nilai rata-rata.....	53
Rumus 4.5 Nilai rms .....	53
Rumus 4.6 Faktor puncak .....	53
Rumus 4.7 Variansi .....	53
Rumus 4.8 Frekuensi median .....	54
Rumus 4.9 Standar deviasi .....	54
Rumus 4.10 Hubungan penuaan ( <i>ageing</i> ) dan penurunan kualitas isolasi yang berubah terhadap temperatur kerja bushing.....	56

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Permintaan terhadap kelistrikan selalu bertambah dari waktu ke waktu. Untuk itu dibutuhkan peralatan kelistrikan yang handal untuk menyediakan permintaan akan listrik. Untuk meningkatkan kehandalan tersebut perencanaan terhadap pengawasan dan perawatan peralatan listrik mutlak dibutuhkan.

Keberadaan isolator dalam sistem penyaluran tenaga listrik sangat penting. Tingginya tingkat kerusakan bahan isolasi yang memiliki ketahanan elektrik rendah akan menyebabkan terjadinya tegangan tembus yang dapat merusak bahan isolasi tersebut. *Partial discharge* merupakan sebuah fenomena terjadinya kegagalan. Monitoring dan penanganan untuk pencegahan mutlak dibutuhkan untuk mengatasi kegagalan isolasi yang berujung kerusakan peralatan tenaga listrik sehingga dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas sebuah sistem tenaga listrik.

Transformator merupakan salah satu peralatan utama dalam sistem transmisi dan distribusi energi listrik. Desain dari transformator akan bergantung dari range aplikasinya, konstruksi, daya dan level tegangannya. Pada dasarnya transformator adalah suatu peralatan listrik yang mengubah daya listrik arus bolak balik (AC) pada satu level tegangan ke level tegangan yang lain berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik tanpa mengubah frekuensinya. Salah satu komponen utama yang mesti mendapatkan perhatian khusus pada transformator adalah bushing. Bushing merupakan sebuah konduktor yang menghubungkan kumparan transformator dengan jaringan luar. Bushing diselubungi dengan suatu isolator dan berfungsi sebagai pengaman hubung singkat antara kawat yang bertegangan dengan tangki transformator.

Menurut statistik, 80% kegagalan isolasi terjadi secara random atau karena kegagalan tersebut tidak terdeteksi lebih awal, atau karena tidak dilakukannya tindakan preventif pada perawatan peralatan, sedangkan 20% sisanya terjadi karena berhubungan dengan usia pemakaian alat. Hal ini menunjukkan seberapa pentingnya kegiatan monitoring terhadap peralatan listrik dilakukan untuk menekan terjadinya kegagalan akibat kurangnya perhatian terhadap unjuk kerja dan keadaan peralatan listrik yang digunakan.

Fenomena yang sering ditemukan di lapangan adalah masalah *partial discharge* pada isolasi yang seharusnya mampu untuk menahan tegangan tembus yang telah ditentukan. Namun dengan terjadinya *partial discharge* akan mengakibatkan kegagalan isolasi yang berujung pada short circuit dan akhirnya terjadi hal-hal yang tidak diinginkan seperti kebakaran dan lainnya.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang penulisan dapat diketahui bahwa rumusan masalah dari penelitian ini adalah menentukan metode yang tepat sebagai bentuk monitoring *partial discharge* pada bushing tegangan tinggi sebagai langkah pencegahan kegagalan isolasi pada peralatan tegangan tinggi.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penulisan penelitian ini adalah untuk menemukan metode pengukuran *partial discharge* yang tepat dengan menganalisa metode-metode yang sering digunakan dan melakukan perbandingan maupun kombinasi diantaranya untuk mendapatkan pengukuran *partial discharge* yang akurat sehingga penanganan kegagalan isolasi dapat dilakukan sehingga tidak mengganggu keandalan sistem tenaga listrik.

#### 1.4 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan dalam masalah yang diangkat dalam penulisan penelitian ini. Hal ini bertujuan agar penulisan yang dilakukan dapat berjalan lancar. Beberapa batasan yang telah ditetapkan yaitu sebagai berikut :

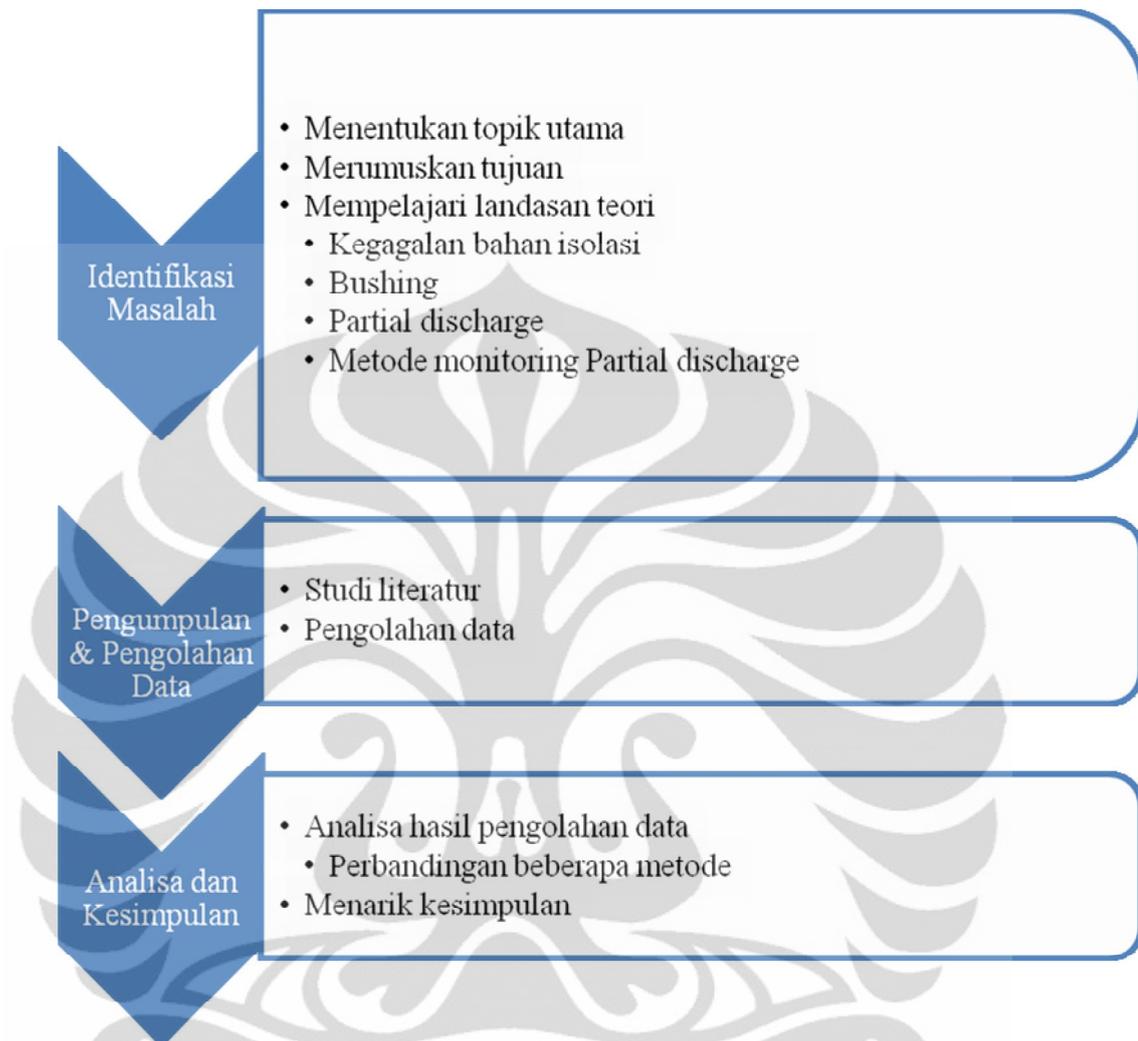
1. *Partial discharge* merupakan suatu kegagalan isolasi yang dapat terjadi pada isolasi padat, cair maupun gas.
2. Fenomena yang diteliti adalah kegagalan isolasi berupa *partial discharge* yang terjadi pada bushing transformator.

#### 1.5 Metodologi Penulisan

Metode penulisan skripsi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Diskusi dan tanya jawab dengan pembimbing yang telah ditunjuk oleh pihak Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia mengenai masalah yang timbul selama penulisan Skripsi berlangsung.
2. Studi literatur, yaitu dengan mencari buku-buku yang digunakan untuk referensi yang ada di perpustakaan.

Untuk mempermudah penyusunan dari skripsi ini, penulis membentuk sebuah diagram alir penelitian. Dibentuknya diagram penelitian ini mempunyai tujuan agar menghasilkan hasil yang sistematis sehingga hipotesis awal terhadap identifikasi masalah yang dilakukan didapatkan.



Gambar 1.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dimulai dengan identifikasi masalah sebagai bentuk perumusan awal pemilihan topik penelitian yang akan dibahas. Dilanjutkan dengan tahap perencanaan berupa rumusan tujuan, landasan teori serta sistematika penulisan penelitian yang akan di disampaikan pada bab berikutnya.

Tahap selanjutnya yang dilakukan adalah mempelajari dan penyusunan landasan teori berdasarkan masalah yang ditemukan dan memberikan analisis sebagai bentuk investigasi terhadap permasalahan *partial discharge* pada bushing yang terjadi. Dan berdasarkan data-data landasan teori yang telah didapatkan dari berbagai literatur dan bahan-

bahan yang berkaitan dengan masalah yang diangkat disusunlah berbagai metode yang memungkinkan untuk melakukan tindakan *monitoring partial discharge* pada bushing.

Dan tahap akhir yang akan dilakukan adalah melakukan perbandingan metode dari berbagai sisi tetapi akan lebih fokus pada parameter pengambilan data secara *real time* atau *offline*.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini dibagi menjadi 5 bab, yaitu pendahuluan, landasan teori, pengolahan data, analisa serta kesimpulan dan saran.

Pada bab pertama, Pendahuluan akan dibahas tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penulisan dan sistematika penulisan.

Bab dua, Landasan Teori terbagi ke dalam beberapa subbab, antara lain kegagalan isolasi, bushing, *partial discharge* dan metode monitoring *partial discharge*. Pada subbab Kegagalan Isolasi akan dijelaskan bagaimana mekanisme terjadinya kegagalan pada bahan isolasi baik isolasi padat, cair maupun gas. Pada subbab Bushing akan dijelaskan klasifikasi bushing berdasarkan material yang digunakan sebagai isolasi tegangan tinggi dan pengujiannya. Pada subbab *Partial Discharge* akan dibahas bagaimana mekanisme terjadinya *partial discharge* dan jenis-jenisnya. Sedangkan pada subbab Metode Monitoring Partial Discharge akan dibahas tentang beberapa metode yang sering digunakan sebagai bentuk monitoring terhadap *partial discharge* seperti DGA (Dissolved Gas Analysis), Ultrasonic, Deteksi Emisi Akustik serta Deteksi Kamera Infrared dan perbandingan metode-metode tersebut.

Bab tiga, Monitoring Partial Discharge memaparkan berbagai jenis metode yang digunakan sebagai alat untuk monitoring dan deteksi partial discharge. Bab empat, Analisa membahas mengenai perbandingan berbagai metode yang lazim digunakan untuk monitoring *partial discharge* untuk dapat menentukan beberapa metode yang tepat guna sebagai deteksi

awal kegagalan isolasi melalui deteksi *partial discharge*. Dan bab lima merupakan penutup dari skripsi ini yang berisi kesimpulan.



## BAB II LANDASAN TEORI

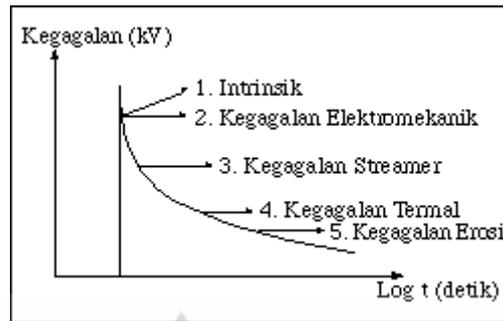
### 2.1 Kegagalan Bahan Isolasi

Isolasi adalah salah satu persoalan yang memegang peranan penting dalam teknik tenaga listrik, terutama pada persoalan teknik tegangan tinggi. Isolasi pada tegangan tinggi dimaksudkan sebagai suatu bahan yang dapat menghindarkan suatu peralatan dari kerusakan akibat lompatan arus dari suatu konduktor ke konduktor lainnya.

Kegagalan isolasi berkaitan erat dengan *partial discharge*. *Partial discharge* (pelepasan parsial) merupakan peristiwa terjadinya pelepasan bunga api listrik pada suatu bagian isolasi sebagai akibat adanya perbedaan potensial yang sangat tinggi dalam bahan isolasi tersebut. Kegagalan isolasi pada peralatan tegangan tinggi akan sangat berpengaruh pada operasi peralatan tersebut dan akan mengganggu kestabilan sistem. *Partial discharge* dapat terjadi pada material isolasi padat, cair maupun gas.

#### 2.1.1 Kegagalan Isolasi Padat

Mekanisme kegagalan pada bahan isolasi padat meliputi kegagalan asasi (intrinsik), elektro mekanik, *streamer*, *thermal* dan kegagalan erosi. Mekanisme ini merunut kepada fungsi waktu penerapan tegangannya. Hal ini ditunjukkan sebagai berikut.



Gambar 2.1 Grafik Kegagalan Isolasi Padat

(sumber : Tadjuddin)

1. Kegagalan intrinsik, kegagalan yang berhubungan dengan jenis dan suhu bahan tanpa menghiraukan berbagai faktor lain sebagai pengaruh luar seperti tekanan, bahan elektroda, ketidakmurnian dan kantong udara. Kegagalan terjadi saat tegangan dinaikkan sehingga meningkatkan tekanan listrik yang terjadi pada bahan isolasi hingga  $10^6$  volt/cm dalam waktu yang sangat singkat sekitar  $10^{-8}$  detik. Kegagalan ini terjadi pada lapisan dielektrik yang tipis dengan tegangan tinggi yang diterapkan. Dengan waktu yang singkat dan medan listrik yang tinggi memungkinkan elektron mendapatkan energi tambahan untuk melintasi *forbidden energy gap* hingga mencapai lapisan konduksi
2. Kegagalan Elektromagnet, kegagalan yang berhubungan dengan tekanan listrik pada bahan isolasi yang diakibatkan oleh perbedaan polaritas antara elektroda yang mengapit isolasi tersebut. Tekanan listrik tersebut menimbulkan tekanan mekanik yang berupa gaya yang bekerja pada suatu bahan yang berhubungan dengan Modulus Young.

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad (2.1)$$

dengan,

- Y : Modulus Young
- F : gaya yang bekerja pada bahan isolasi
- A : luas bahan isolasi yang dikenai gaya

DL : pertambahan panjang bahan isolasi

L : panjang bahan isolasi

dengan persamaan Stark dan Garton

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r = \frac{V^2}{2d^2} = Y \ln \frac{d_0}{d} \quad (2.2)$$

$\varepsilon_0 \varepsilon_r$  : permitivitas

$d_0$  : tebal isolasi sebelum dikenai tegangan

$d$  : tebal isolasi setelah dikenai tegangan

dengan persamaan diatas dapat ditentukan seberapa besar tegangan yang dapat dikenakan pada bahan isolasi tersebut sebelum terjadi kegagalan.

3. Kegagalan *Streamer*, kegagalan yang terjadi sesudah suatu banjir elektron. Sebuah elektron yang memasuki *band conduction* di katoda akan bergerak menuju anoda dibawah pengaruh medan memperoleh energi antara benturan dan kehilangan energi pada waktu membentur. Jika lintasan bebas cukup panjang maka tambahan energi yang diperoleh melebihi pengionisasi *latice*. Akibatnya dihasilkan tambahan elektron elektron pada saat terjadi benturan. Jika suatu tegangan V dikenakan terhadap elektroda bola, maka pada media yang berdekatan timbul tegangan. Karena gas mempunyai permitivitas lebih rendah dari zat padat sehingga gas akan mengalami tekanan listrik yang besar. Akibatnya gas tersebut akan mengalami kegagalan sebelum zat padat mencapai kekuatan asasinya. Karena kegagalan tersebut maka akan jatuh sebuah muatan pada permukaan zat padat sehingga medan yang tadinya seragam terganggu. Bentuk muatan pada ujung pelepasan ini dalam keadaan tertentu dapat menimbulkan medan lokal yang cukup tinggi (sekitar 10 MV/cm). karena medan ini melebihi kekuatan intrinsiknya maka akan terjadi kegagalan pada zat padat. Proses kegagalan ini terjadi sedikit demi sedikit yang dapat menyebabkan kegagalan total.

4. Kegagalan *thermal*, kegagalan yang berhubungan dengan kecepatan pembangkitan panas disuatu titik melebihi laju kecepatan pembuangannya. Sehingga terjadi penumpukan energi panas pada titik tersebut dan akan mengakibatkan keadaan tidak stabil sehingga berdampak pada kegagalan.
5. Kegagalan Erosi, kegagalan yang diakibatkan oleh ketidaksempurnaan bahan isolator yang digunakan seperti terdapat rongga dalam isolasi tersebut. Hal ini berakibat pada nilai tegangan normal kekuatan medan pada rongga dapat bernilai melebihi kekuatan kegagalan, sehingga dapat menyebabkan kegagalan. Hal ini dikarenakan rongga tersebut memiliki kekuatan medan atau kekuatan dielektrik yang berbeda dengan kekuatan dielektrik dari bahan isolasi. Kekuatan medan dalam rongga ditentukan oleh perbandingan dari permitivitas dan bentuk rongga. Pada setiap pelepasan muatan maka energi berupa panas juga dihasilkan, akumulasi panas yang berlebihan akan menghasilkan karbonisasi pada rongga tersebut sehingga merusak susunan kimia bahan isolasi tersebut.

#### 2.1.2 Kegagalan Isolasi Cair

Isolasi berupa cairan rentan terhadap pengotor maupun zat lain seperti gelembung udara, partikel asing dan lain-lain yang mengisi bahan tersebut sehingga tingkat kemurniannya tidak begitu tinggi. Tentu hal ini mengakibatkan berkurangnya ketahanan isolasi cair terhadap kegagalan. Beberapa teori yang menjelaskan mekanisme kegagalan bahan isolasi cair saat ini belum mampu menjelaskan proses kegagalan dalam zat cair yang benar-benar sesuai antara keadaan secara teoritis dan keadaan sebenarnya. Beberapa teori yang sering dikemukakan antara lain :

1. Kegagalan Elektronik, kegagalan yang diakibatkan oleh permukaan konduktor yang tidak rata sehingga memiliki bagian yang lebih

runcing yang mengakibatkan daerah tersebut memiliki kuat medan terkuat. Hal ini mengakibatkan elektron awal dilepaskan sebagai permulaan terbentuknya banjir elektron. Kemudian elektron-elektron berikutnya dihasilkan yang kemudian menyebabkan timbulnya arus konduksi dalam bahan isolasi cair pada kuat medan yang tinggi. Kerapatan arus yang timbul berdasarkan Schottky yaitu sebesar :

$$J = J_1 e^{\frac{4.44 \sqrt{E}}{T}} \quad (\text{A/cm}^2)$$

$$J_1 = AT^2 e^{-\phi/kT} \quad \text{dan} \quad E = mE_a \quad (2.3)$$

Dengan

- J : kerapatan arus konduksi
- $J_1$  : kerapatan arus termionik
- $E_a$  : kuat medan yang diterapkan
- m : faktor ketidakrataan permukaan

2. Kegagalan Kavitasi, kegagalan yang terjadi pada isolasi cair yang diakibatkan oleh adanya gelembung-gelembung udara di dalamnya. Medan listrik dalam gelembunggas yang ada dalam isolasi cair sebesar

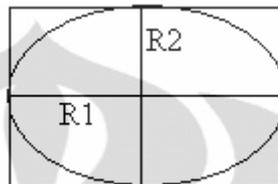
$$E_b = \frac{3 \epsilon_1 E_0}{2 \epsilon_1 + 1} \quad (2.4)$$

dimana  $\epsilon_1$  adalah permitivitas zat cair dan  $E_0$  adalah medan listrik dalam zat cair tanpa gelembung. Bila  $E_b$  sama dengan batas ionisasi gas, maka akan terjadi lucutan gelombang. Hal ini mengakibatkan dekomposisi zat cair yang mempercepat pembentukan gas dan berujung pada kegagalan isolasi.

3. Kegagalan Bola Cair, kegagalan yang diakibatkan jika suatu zat isolasi mengandung sebuah bola cair dari jenis lain, maka dapat terjadi kegagalan akibat ketidakstabilan bola cair tersebut dalam medan listrik. Medan listrik akan menyebabkan tetesan bola cair yang tertahan didalam minyak memanjang searah medan listrik

tersebut. Bola cair yang dikenai medan E akan berubah bentuk menjadi sferoida dengan medan di dalamnya sebesar  $E_2$ , maka hubungan antara kedua medan adalah :

$$E_2 = \frac{\epsilon_1 E}{\epsilon_1 - (\epsilon_1 - \epsilon_2) G} \quad \text{dimana } G = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left( \frac{\gamma \cosh^{-1} \gamma}{(\gamma^2 - 1)^{1/2}} - 1 \right) \quad (2.5)$$



dan  $\gamma = \frac{E_2}{E_1}$

$\epsilon_1$  : permitivitas isolasi

$\epsilon_2$  : permitivitas zat cair

4. Kegagalan Butiran Padat, kegagalan yang disebabkan oleh adanya butiran zat padat didalam isolasi cair yang akan memulai terjadi kegagalan. Besarnya gaya yang bekerja pada butiran dalam medan tak homogen :

$$F = R^3 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \cdot \text{grad}.E \quad (2.6)$$

R : jari-jari butiran

E : gradien tegangan

Jika  $\epsilon_2 > \epsilon_1$ , maka arah gaya yang bekerja pada butiran searah dengan tekanan listrik maksimum ( $F_A$ ) sehingga gaya akan mendorong butiran ke arah bagian yang kuat dari medan. Jika  $\epsilon_2 < \epsilon_1$ , maka arah gaya berlawanan dengan tekanan listrik maksimum ( $F_B$ ), gaya ini akan besar jika  $\epsilon_2$  besar. Untuk penghantar  $\epsilon_2 \rightarrow \infty$  sehingga  $F = \frac{1}{2} R^3 \text{ grad}.E^2$ .

### 2.1.3 Kegagalan Isolasi Gas

Ion merupakan atom atau gabungan atom yang memiliki muatan listrik, ion terbentuk apabila pada peristiwa kimia suatu atom unsur

menangkap atau melepaskan elektron. Proses terbentuknya ion-ion ini disebut ionisasi. Jika diantara dua elektroda yang dimasukkan dalam media gas diterapkan tegangan  $V$  maka akan timbul suatu medan listrik  $E$  yang mempunyai besar dan arah tertentu yang akan mengakibatkan elektron bebas mendapatkan energi yang cukup kuat menuju ke arah anoda sehingga dapat merangsang timbulnya proses ionisasi.

Jika gradien tegangan yang ada cukup tinggi maka jumlah elektron yang diionisasikan akan lebih banyak dibandingkan dengan jumlah ion yang ditangkap melalui oksigen. Tiap-tiap elektron ini kemudian akan berjalan menuju anoda secara kontinyu dan selama perjalanan ini elektron-elektron tersebut juga akan membentur atom-atom lain sehingga membebaskan elektron lebih banyak lagi. Ionisasi karena benturan ini merupakan proses dasar terjadinya kegagalan isolasi udara atau gas.

Proses kegagalan dalam gas ditandai dengan adanya percikan secara tiba-tiba, percikan ini dapat terjadi karena adanya pelepasan yang terjadi pada gas tersebut. Proses dasar yang paling penting dalam kegagalan gas adalah proses ionisasi karena benturan, tetapi proses ini tidak cukup untuk menghasilkan kegagalan. Proses lain yang terjadi dalam kegagalan gas adalah mekanisme primer dan mekanisme sekunder.

Mekanisme primer banyak dipengaruhi oleh proses katoda, pada proses ini diawali dengan pelepasan elektron oleh suatu elektroda yang diuji, peristiwa ini akan mengawali terjadinya kegagalan percikan (*spark breakdown*). Elektroda yang memiliki potensial rendah (katoda) akan menjadi elektroda yang melepaskan elektron. Elektron awal yang dilepaskan oleh katoda akan memulai terjadinya banjir elektron dari permukaan katoda. Jika jumlah elektron yang dibebaskan makin lama makin banyak atau terjadinya peningkatan banjir maka arus akan bertambah dengan cepat sampai terjadi perubahan pelepasan dan peralihan pelepasan ini akan menimbulkan percikan atau kegagalan dalam gas.

## 2.2 Bushing

Bushing merupakan suatu peralatan listrik yang menyediakan titik persambungan sehingga memungkinkan aliran listrik dapat mengalir dari atau ke peralatan tenaga listrik. Bushing berfungsi sebagai pengisolasi secara elektrik antara sambungan yang menuju ke peralatan tegangan tinggi dan dinding peralatan tersebut. Bushing layaknya seperti sebuah jembatan dimana potensial listriknya merupakan panjang dari jembatan dan semakin panjang jembatan tersebut maka akan semakin mendukung isolasi hubungan dengan dinding peralatan tenaga yang dihubungkan tanahkan. Jumlah arus yang dapat mengalir pada konduktor bushing diinterpretasikan sebagai jumlah jalur lintasan pada jembatan. Jika jumlah jalur lintasan dikurangi pada lalu lintas yang padat, maka penumpukan kendaraan dalam jumlah banyak akan terjadi.



Gambar 2.2 Bushing pada Terminal Transformator

(sumber: power-technology.com)

Ada dua faktor penting yang harus diperhatikan karena mempengaruhi kinerja sebuah bushing yaitu:

1. Sistem isolasi, untuk mencegah kegagalan pada kondisi *over voltage*

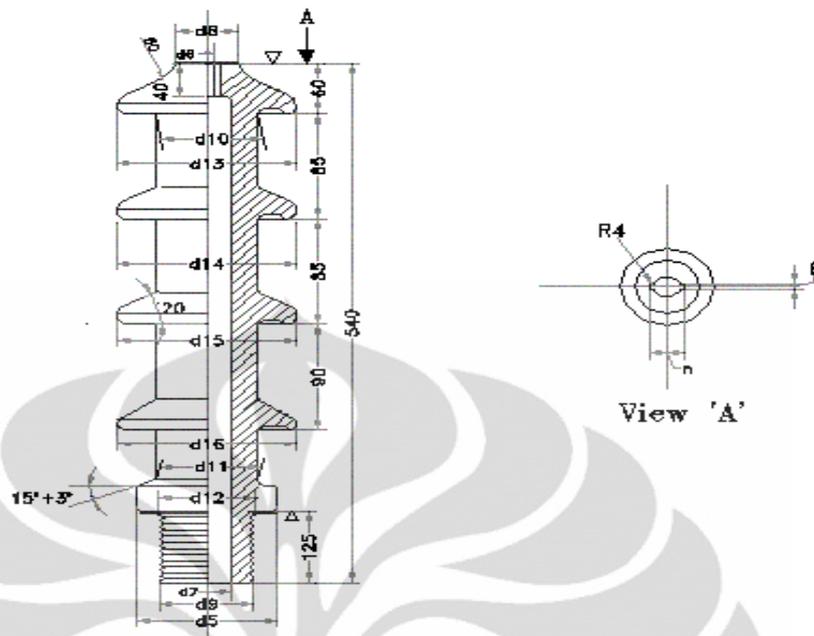
2. Lintasan konduktor, untuk mencegah kegagalan pada kondisi *over current*

*Over voltage* akan mengakibatkan *flash over* pada isolasi dan *over current* akan mengakibatkan panas berlebih pada konduktor dengan memperhatikan *losses* berupa  $I^2R$ .

### 2.2.1 Jenis-jenis Bushing

Bushing yang diaplikasikan pada tegangan tinggi seperti transformator dan *breaker* dibuat dengan berbagai macam prinsip seperti :

- a. *Composite bushing*, merupakan sebuah bushing yang isolasinya terdiri dari 2 atau lebih lapisan *coaxial* yang berbeda material isolasinya.
- b. *Compound-Filled bushing*, bushing dengan *space* antara isolasi utama dan konduktor diisi dengan senyawa yang memiliki sifat isolasi.
- c. *Condenser bushing*, merupakan bushing dengan lapisan-lapisan penghantar silender yang disusun berdasarkan *coaxial* antara material konduktor dan isolatornya. Panjang dan diameter silinder didisain sedemikian rupa untuk mengatur distribusi medan listrik dan dan permukaan luar dan dalam bushing.
- d. *Dry or unfilled type bushing*, terdiri dari tabung porselin yang tidak ada pengisi antara lapisan luar dan konduktor. Bushing jenis ini biasanya digunakan pada tegangan 25kV kebawah.
- e. *Oil-filled bushing*, bushing dengan celah antara isolasi dan permukaan dalam konduktor diisi oleh minyak isolasi.
- f. *Oil Immersed bushing*, bushing yang tersusun dari sistem isolasi utama yang merendam bushing dalam kolam minyak isolasi.
- g. *Oil-impregnated paper-insulated bushing*, bushing yang berada dalam struktur internal yang terbuat dari material selulosa *impregnated* dengan minyak.
- h. *Resin-bonded, paper insulated bushing*, bushing yang isolasi utamanya terdiri dari material selulosa yang dicampur resin.
- i. *Solid (ceramic) bushing*, bushing dengan isolasi utama terdiri dari keramik.



Gambar 2.3 Penampang bushing

(sumber: sumonexports.com)

### 2.2.2 Pengujian Bushing

Dari berbagai catatan operasi menunjukkan bahwa sekitar 90 % dari seluruh kegagalan operasi bushing disebabkan oleh embun yang masuk ke dalam bushing dengan menembus gasket yang bocor atau melalui bukaan yang lain. Inspeksi rutin jangka pendek dibutuhkan untuk menemukan retakan dan melakukan perbaikan sebagai bentuk pencegahan kegagalan isolasi bushing.

Pengujian pada bushing mutlak dilakukan untuk menentukan kemampuan dan kehandalan sebuah bushing ketika akan digunakan sebagai sebuah komponen penting dalam sistem tenaga listrik. Berikut beberapa pengujian yang penting untuk dilakukan :

- Pengujian bushing terhadap tegangan *flash over* pada kondisi kering
- Pengujian bushing terhadap tegangan *flash over* pada kondisi basah
- Pengujian bushing terhadap tegangan *flash over* pada kondisi bushing direndam didalam minyak.

- d. Pengujian kenaikan suhu bushing pada semua bagian saat kenaikan arus.
- e. Bushing lengkap dengan semua bagian logamnya dikenai uji siklus suhu.

### 2.2.3 Desain Bushing

Dalam proses desain bushing ada beberapa faktor yang mesti diperhatikan terutama faktor keamanan terhadap gejala-gejala yang mungkin timbul seperti kegagalan isolasi. Beberapa pertimbangan yang dapat digunakan dalam proses desain :

- Kondisi lingkungan dan kemungkinan kondisi ekstrim yang melebihi ekspektasi kondisi awal.
- Bahan yang digunakan dan kemungkinan-kemungkinan material dengan kualitas yang berbeda.
- Ketersediaan ahli dalam proses produksi
- Kontrol terhadap kualitas selama pembuatan
- Polusi alam dan industri

Bushing harus bebas dari rongga, gelembung dan garis-garis yang timbul pada proses pencetakan atau pengecoran (*molding*), karena hal-hal tersebut dapat membentuk sebuah area dimana peningkatan tekanan listrik terjadi sehingga kemungkinan peningkatan kegiatan *partial discharge*.

### 2.3 Partial Discharge

IEC Standard, IEC 60270 menyatakan *partial discharge* adalah “*alocalised electric discharge that only partially bridges the insulation between conductors and which may or may not occur adjacent to a conductor*”. *Partial discharge* merupakan peluahan listrik secara lokal yang menghubungkan secara parsial atau sebagian dari isolasi diantara konduktor dan yang terjadi baik dipermukaan maupun didalam.

*Partial discharge* merupakan peristiwa pelepasan/loncatan bunga api listrik (*spark*) yang terjadi pada suatu bagian isolasi baik pada rongga dalam atau pada permukaan bahan isolasi tersebut sebagai akibat adanya beda potensial yang sangat tinggi dalam isolasi tersebut. *Partial discharge* juga dapat didefinisikan sebagai akibat dari konsentrasi *electrical stress*

pada suatu lokasi didalam atau pada permukaan isolasi. Secara umum *discharge* terlihat sebagai pulsa atau signal dengan durasi jauh lebih kecil dari 1 $\mu$ s.

Energi yang dibebaskan oleh *partial discharge* akan menyebabkan penurunan kualitas (degradasi) dari bahan isolasi. Hal ini dapat berakibat terbentuknya lintasan (*track*) menyerupai pohon yang dapat di sepanjang permukaan atau bahkan menembus bahan isolasi tersebut. Lintasan yang terbentuk ini dapat berubah fungsi menjadi bahan konduksi karena adanya karbon dari hasil degradasi kualitas isolasi. Jika *partial discharge* ini terjadi secara terus menerus, maka tekanan listrik akan selalu terkonsentrasi pada ujung rambatan pohon sehingga panjang rambatannya akan semakin memanjang. *Partial discharge* terjadi pada bahan isolasi yang waktu pemakaiannya sudah lama, isolasi yang cacat atau kualitas yang buruk dari isolasi dan kegagalan isolasi ini akan terus merambat dan berkembang hingga isolasi tidak mampu lagi menahan tegangan listrik sehingga berakibat terjadinya *flasover* dan kegagalan isolasi total.

Ketika *partial discharge* terjadi, akan menghasilkan beberapa gejala timbulnya energi yang dilepaskan, beberapa bentuk dari energi tersebut antara lain :

- Elektromagnet : radio, cahaya dan panas
- Akustik : audio dan ultrasonik
- Gas : ozon dan oksida nitrat

Pengukuran *partial discharge* pada peralatan tegangan tinggi merupakan hal yang penting karena dari pengukuran akan didapatkan data yang dapat menginterpretasikan dan menentukan *reability* (kehandalan) suatu peralatan yang disebabkan oleh *ageing* (penuaan) dan resiko kegagalan yang selanjutnya dapat dianalisa.

*Partial discharge* dapat dijadikan indikator awal terjadinya kegagalan isolasi. Cacat ini kemudian terus berkembang sehingga dapat mengakibatkan kegagalan isolasi secara keseluruhan. Semakin tinggi

tegangan yang diterapkan akan semakin tinggi pula resiko kegagalan yang akan didapat. Fenomena *partial discharge* hanya terjadi pada tegangan bolak-balik (*alternating current*) dengan tegangan diatas 2000 V atau lebih.

Kuantitas dari *partial discharge* menunjukkan seberapa besar kegagalan tersebut terjadi. Ada beberapa parameter kuantitas *partial discharge* yang dapat dilihat dari sebuah pendeteksian :

- *Magnitude partial discharge*, dengan satuan milivolt (mV) atau picocoulumb (pC) yaitu ukuran atau volume kegagalan
- *Pulse count*, dengan satuan pulse per second (pps) menunjukkan jumlah atau pertumbuhan kegagalan
- Intensitas atau daya *partial discharge*, dengan satuan miliwatt (mW) yaitu sejumlah daya perusak yang dihasilkan oleh kegiatan *partial discharge*
- *Partial discharge signature*, yaitu menunjukkan fasa dan tipe dari kegagalan.

Berdasarkan magnitude *partial discharge*, ada beberapa bentuk kegagalan yang dapat terjadi, yaitu :

- 10 – 50 pC belum terjadi kegagalan isolasi,
- <300 – 500 pC awal terjadinya penurunan kualitas isolasi
- 1000 – 3000 pC perkembangan kegagalan, pada isolasi kertas sudah terjadi kegagalan sempurna
- 10.000 – 100.000 pC terjadinya kerusakan tahanan isolasi minyak.

### 2.3.1 Mekanisme Partial Discharge menurut Townsend

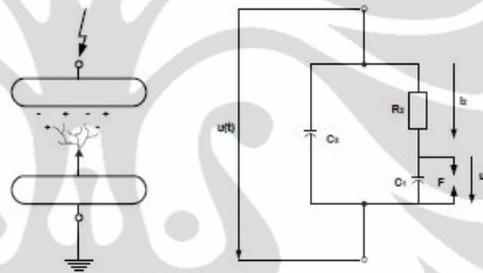
Discharge diawali dengan adanya elektron awal pada katoda, yang diperkuat oleh energi kinetik dari medan listrik merambat menuju anoda. Jika energi yang dimiliki cukup tinggi, elektron tersebut menumbuk atom lain sehingga terlepas elektron atom tersebut. Elektron kedua ini mengalami mekanisme yang sama dengan elektron sebelumnya dan berulang-berulang sehingga akan terjadi banjir elektron. Jika aliran

elektron sudah mampu menjembatani katoda dan anoda, maka terjadilah *partial discharge*.

### 2.3.2 Jenis Partial Discharge

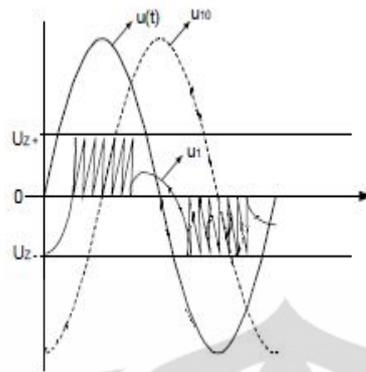
#### 1. Partial Discharge luar

Ionisasi berupa tumbukan dalam gas akan terjadi jika tegangan awal terlampaui pada elektroda yang runcing. Dalam medan yang sangat heterogen, banjir elektron menghasilkan tegangan tembus yang tidak sempurna, yang muncul kembali setelah setiap setengah siklus tegangan bolak balik. Gejala ini disebut sebagai *partial discharge* luar atau peluahan korona.



Gambar 2.4 Susunan Partial Discharge Luar  
(Konfigurasi Elektroda Jarum-Plat) dan Rangkaian Ekivalennya

Pada gambar diatas digambarkan konfigurasi elektroda plat jarum sebagai suatu rangkaian dengan *partial discharge* luar dan rangkaian ekivalen yang disederhanakan untuk *partial discharge* berbentuk pulsa. Nilai  $C_1$  menyatakan kapasitansi yang berkaitan dengan tembus ruang gas dan akan di-*discharge* jika tegangan nyala  $U_1$  dari sela F tercapai. Pembawa muatan yang terbentuk menyebabkan konduktivitas tertentu yang dinyatakan oleh  $R_2$  dalam rangkaian ekivalen.  $C_2$  merupakan kapasitansi paralel yang diinterpretasikan sebagai susunan elektroda.



Dengan asumsi  $R_2 \gg 1/\omega C_1$ , maka arus yang mengalir melalui

$R_2$  adalah  $I_2 = \frac{u(t)}{R_2}$ . Jika

tegangan uji ditulis sebagai  $u(t) = U \sin \omega t$ , maka tegangan rangkaian terbuka pada  $C_1$  pada akhir periode transien adalah

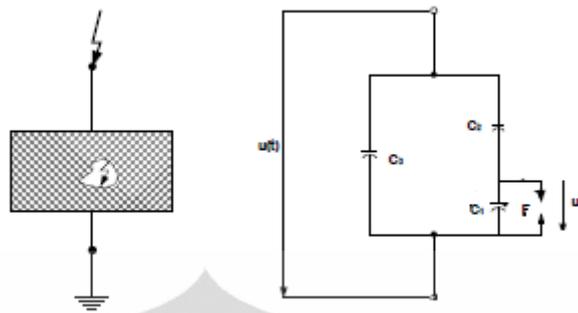
$u_{10} = \frac{\hat{U}}{\omega C_1 R_2} \sin(\omega t - \pi/2)$ . Jika tegangan puncak dari tegangan uji mencapai

tegangan mula  $\hat{U}_e = \omega C_1 R_2 U_z$ , maka tegangan nyala  $U_z$  yang muncul pada  $F$  dan  $C_1$  akan di-discharge secara bersamaan. Dengan meningkatkan tegangan tegangan  $u(t)$ , maka secara berurutan  $C_1$  akan di-charge kembali oleh tegangan yang menyerupai  $u_{10}$  sehingga  $U_z$  tercapai kembali, dan demikian seterusnya. Dari kurva yang diperoleh untuk tegangan  $U_1$  tampak bahwa impuls partial discharge terjadi terutama pada puncak tegangan uji. Muatan yang dikompensasi dalam  $F$  pada setiap discharge adalah

$$Q = C_1 U_z = \frac{\hat{U}_e}{\omega R_2} \quad (2.7)$$

## 2. Partial Discharge dalam atau Treeing

Jika di dalam dielektrik padat atau cairan dari suatu sistem isolasi terdapat rongga maka kuat medan dalam rongga akan lebih besar daripada suatu medium disekelilingnya. Jika tegangan dalam rongga melampaui tegangan nyala maka akan terjadi tembus parsial. Terutama pada tegangan bolak-balik dengan amplitudo yang mencukupi maka terjadi discharge yang berbentuk pulsa di dalam rongga. Dielektrik disekelilingnya dapat memburuk dalam jangka panjang akibat *partial discharge* ini, atau bahkan dengan kondisi tertentu dapat rusak oleh tembus sempurna akibat mekanisme erosi.



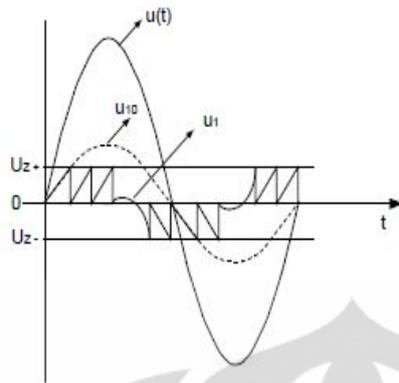
Gambar 2.5 Susunan Partial Discharge Dalam  
(Objek Uji dengan Rongga) dan Rangkaian Ekivalennya

Suatu susunan elektroda dengan *partial discharge* dalam diinterpretasikan dengan sistem isolasi dengan dielektrik padat yang mengandung rongga gas. Gambar tersebut juga memperlihatkan rangkaian ekivalen untuk *partial discharge* dalam berbentuk pulsa. Nilai  $C_1$  berhubungan dengan kapasitansi rongga yang discharge melalui  $F$  jika tegangan  $U_z$  tercapai. Nilai  $C_2$  berhubungan dengan kapasitansi yang terhubung seri dengan rongga dan  $C_3$  menyatakan kapasitansi paralel dari susunan tersebut. Untuk tegangan uji sinusoidal maka tegangan pada  $C_1$  dapat dinyatakan dengan persamaan berikut

$$u_{10} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} u(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \hat{U} \sin \omega t \quad (2.8)$$

Nilai puncak dari tegangan uji akan mencapai tegangan awal  $U_e$  ketika nilai puncak dari tegangan hubung terbuka sama dengan  $U_z$ . Dengan demikian berlaku persamaan

$$\hat{U}_e = \frac{C_1 + C_2}{C_2} U_z \quad (2.9)$$



Jika tegangan uji lebih besar dari tegangan awal maka terjadi charging  $C_1$  secara berulang. Tampak pada gambar tersebut bahwa pulsa-pulsa peluahan parsial terjadi terutama dalam daerah perpotongan tegangan uji.

Hubungan fasa yang berbeda dari *partial discharge* dalam dan luar merupakan karakteristik pembeda yang penting dari kedua gejala ini. Muatan yang dikompensasi pada *discharge* untuk setiap peluahan sebesar  $Q_1 = (C_1 + C_2)U_z$ .

## 2.4 Metode Monitoring Partial Discharge

Adanya *partial discharge* di dalam bahan isolasi dapat ditentukan oleh banyak metode seperti :

1. Dissolved Gas Analysis (DGA)
2. Ultrasonic
3. Deteksi Emisi Akustik
4. Deteksi Kamera Infrared

Metode-metode ini digunakan sebagai pendeteksian terjadinya *partial discharge* berdasarkan akibat yang ditimbulkan oleh *partial discharge* itu sendiri seperti gelombang elektromagnet, gelombang akustik, pemanasan lokal dan reaksi kimia.

### 2.4.1 Dissolved Gas Analysis (DGA)

Kegagalan isolasi berupa *partial discharge* umumnya pada isolasi cair menghasilkan gas-gas berbahaya yang biasa dikenal dengan *fault gas*. Kebanyakan *bushing* menggunakan minyak isolasi yang fungsinya sebagai pendingin juga sebagai pelarut gas-gas berbahaya agar tidak beredar bebas. Identifikasi jenis dan jumlah konsentrasi gas yang terlarut pada minyak dapat memberikan informasi akan adanya indikasi kegagalan

seperti *partial discharge*. Metode untuk mengidentifikasi dan menganalisis gas-gas terlarut ini dikenal dengan DGA (*Dissolved Gas Analysis*).

Sejumlah sampel minyak diambil dari peralatan tenaga listrik seperti bushing dan kemudian dimasukkan ke dalam peralatan uji DGA. Hasilnya adalah sejumlah data yang menunjukkan tingkat konsentrasi fault gas. Setelah diperoleh sejumlah data, dilakukan berbagai metode analisis untuk mengetahui indikasi kegagalan yang ada pada bushing yang diujikan.

Metode ini banyak digunakan pada pengujian *partial discharge* di transformator, tapi mengingat bushing juga memiliki isolasi cair yang memungkinkan gas hasil reaksi kimia *partial discharge* terlarut dalam isolasi bushing dapat dianalisis dengan metode ini. Hambatan yang dihadapi dengan metode ini adalah hasil yang didapatkan merupakan hasil yang bersifat kumulatif yang artinya hasil yang didapatkan bukan kondisi *real time* saat dilakukan pendeteksian tetapi merupakan hasil akumulasi terjadinya kegagalan berupa *partial discharge* selama bushing dioperasikan.

Pada metode ini juga terdapat beberapa metode yang digunakan dalam memprediksi kegagalan yang diindikasikan oleh jenis dan konsentrasi gas yang terjadi setelah pengukuran DGA dilakukan seperti :

1. Total Combustible Gases (TCG)
2. Key Gas Method
3. Roger's Ratio Method
4. Duval Triangle

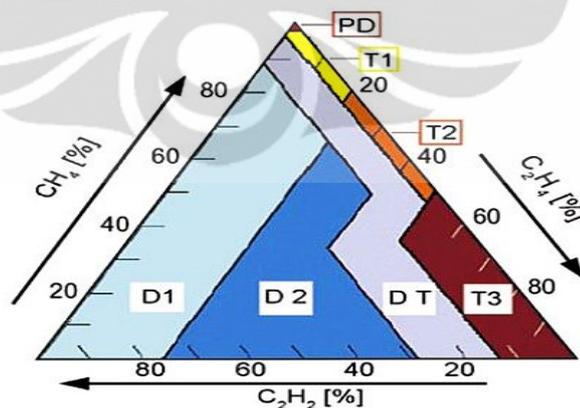
Metode Total Combustible Gases (TCG) merupakan metode yang sering digunakan untuk memprediksi kondisi operasi pada transformator. Metode ini berdasarkan standar IEEE C57-104-1991 dan ASTM D-3612. Yaitu suatu prosedur untuk menganalisis jumlah dan konsentrasi gas yang dihasilkan oleh suatu peralatan tenaga listrik seperti hidrogen, metana, karbon monoksida, etana, etilena dan asetilena. Kemudian data sample

yang didapatkan dibandingkan dengan standar yang telah ditetapkan sehingga dapat ditentukan tingkat kegagalan isolasi tersebut.

Metode Key Gases digunakan untuk memprediksi kondisi suatu isolasi dengan membandingkan komposisi *combustible gas* dan konsentrasi gas yang tinggi sebagai *key gas*. Setelah penentuan *key gas* akan dapat ditemukan diagnosis yang tepat untuk indikasi gas tersebut seperti terjadinya *arcing* atau *overheating* pada minyak.

Roger's Ratio merupakan perbandingan konsentrasi sejumlah *key gas* dalam sample isolasi minyak.

Metode Duval Triangle menggunakan konsentrasi dari 3 *key gas* untuk mendiagnosis kondisi minyak sebagai isolasi, ketiga gas tersebut yaitu  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  dan  $\text{C}_2\text{H}_2$ . Jika koordinat ketiga *key gas* terletak pada region PD, berarti *partial discharge* telah terjadi. Region T1 mengindikasikan kegagalan termal pada temperatur kurang dari  $300^\circ\text{C}$  dan T2 mengindikasikan kegagalan termal pada temperatur  $300^\circ\text{C}$  hingga  $700^\circ\text{C}$ . D1 mengindikasikan low energi discharge (*spark*) dan D2 merupakan *high energy discharge (electric arc)*. Dan zona DT merepresentasikan gabungan kegagalan termal dan elektrik.



Gambar 2.6 Duval Triagle

(sumber:Suwarno)

#### 2.4.2 Ultrasonic

Seluruh pengoperasian peralatan tenaga menghasilkan *range* suara yang luas. Komponen ultrasonik frekuensi tinggi dari suara yang dihasilkan tersebut pada dasarnya merupakan gelombang yang sangat pendek dan memiliki frekuensi tinggi dan gelombang seperti ini cenderung terarah. Oleh karena itu, gelombang ini mudah untuk dipisahkan dari *noise-noise* lain dan dapat untuk dideteksi lokasi sumber gelombang tersebut.

Ketika terjadi perubahan pada peralatan listrik dan mekanik, gelombang ultrasonik alami yang timbul dijadikan sebagai potensi peringatan sebelum terjadi kegagalan. Gelombang ultrasonik ini kemudian dapat diolah menghasilkan dua informasi berupa informasi kualitatif dan kuantitatif. Informasi kualitatif menghasilkan informasi berupa suara ultrasonik yang dapat didengar oleh kita melalui *headphone*. Sedangkan, informasi kuantitatif menghasilkan informasi berupa ukuran yang dapat dibaca. Informasi-informasi ini terdapat pada penerjemah ultrasonik yang didalamnya terjadi proses elektronik yang disebut "*heterodyning*". Didalam proses ini terjadi pengkonversian gelombang ultrasonik kedalam gelombang suara yang dapat didengar oleh manusia.

#### 2.4.3 Deteksi Emisi Akustik

Emisi akustik mengacu pada pembangkitan gelombang elastik transien pada pelepasan energi yang sangat cepat dari sumber lokal dalam suatu material. Sumber emisi ini terkait dengan gerakan dislokasi atas deformasi dan inisiasi dan perluasan *cracking* dalam struktur dalam tekanan listrik yang tinggi.

*Partial discharge* dapat membangkitkan pulsa-pulsa yang mengakibatkan timbulnya gelombang akustik akibat tekanan mekanik yang sering disebut sebagai emisi akustik yang dipancarkan keseluruhan bagian *bushing*. Gelombang akustik ini dapat dapat menembus isolasi minyak dalam *bushing* dan dapat dideteksi pada dinding *bushing*. Dengan

pengukuran waktu relatif yang dibutuhkan gelombang akustik terhadap sensor emisi akustik yang diletakkan pada dinding *bushing*, lokasi terjadinya *partial discharge* dapat ditentukan. Dengan alasan ini, deteksi dengan memanfaatkan emisi akustik dapat memberikan solusi *real time* berupa pendeteksian ada atau tidaknya *partial discharge* serta penentuan lokasi terjadinya *partial discharge*.

#### 2.4.4 Deteksi Kamera Inframerah

Teknologi kamera *infrared* merupakan salah satu peralatan teknologi yang dapat digunakan untuk kegiatan preventif pemeliharaan dan memungkinkan pengukuran temperatur dari jarak tertentu tanpa menyentuh objek yang diukur secara *scanning* serta mendeteksi perubahan temperatur hingga  $0,1^{\circ}\text{C}$ , sehingga mampu mengkondisikan bahan isolasi yang mengalami perubahan. Teknologi ini bekerja dengan cara mengukur pancaran panas suatu bahan.

Semua benda yang memiliki suhu diatas nol absolute ( $0^{\circ}\text{K}$  atau  $-273^{\circ}\text{C}$ ) memancarkan sinar radiasi dalam rentang panjang gelombang sinar infra merah, sehingga metode *infrared thermography* dengan kemampuan deteksi perubahan temperatur hingga  $0,1^{\circ}\text{C}$  akan lebih efisien dan efektif dalam mendeteksi dan melokalisasi daerah anomali dengan cara melihat langsung peta temperatur yang diperoleh. Hal-hal yang perlu untuk diperhatikan dalam melaksanakan pengukuran dengan metoda *infrared thermography* antara lain obyek permukaan sebagai target, media transmisi antara obyek target dengan instrumen dan lain sebagainya.

*Partial discharge* yang merupakan suatu bentuk kegagalan listrik yang menyebabkan hilangnya tegangan dan mengalirnya arus bocor dalam bahan isolasi tersebut tentunya menimbulkan panas yang berlebih. Panas ini tentunya dapat ditangkap oleh kamera *infrared* dan dapat dilakukan tindakan pencegahan sebelum kegagalan total pada isolasi terjadi.

## BAB III

### MONITORING PARTIAL DISCHARGE

Pengawasan kegagalan kerja peralatan seperti bushing yang dimanfaatkan pada transformator merupakan strategi pemeliharaan yang mutlak dilakukan sebagai jaminan keberlangsungan berjalannya sistem tenaga listrik. Beberapa parameter dari kegagalan isolasi *partial discharge* dapat dimanfaatkan sebagai teknik pemantauan kondisi bushing sehingga dapat digunakan untuk memprediksi adanya gejala kerusakan pada bushing seperti. Beberapa parameter yang dapat dimanfaatkan sebagai pendeteksian *partial discharge* adalah reaksi kimia, gelombang ultrasonik, emisi akustik serta pemanasan lokal pada bushing.

#### 3.1 Dissolved Gas Analysis

Pengujian DGA (Dissolved Gas Analysis) dilakukan dengan pengambilan sampel minyak pada suatu bushing yang ingin diuji dan kemudian dilakukan penguraian gas-gas terlarut pada sampel minyak tersebut. Gas-gas yang telah diuraikan tersebut diidentifikasi komponen-komponen individualnya dan pengukuran kuantitasnya (dalam satuan ppm- part per million).

Analisis kondisi bushing berdasarkan hasil pengujian DGA dilakukan dengan menginterpretasikan data-data yang didapatkan dengan berbagai metode yang ada, tetapi untuk lebih fokus terhadap fenomena *partial discharge* (PD) yang terjadi pada bushing digunakan metode “*Duval Triangle*” yang dengan mudah dapat dilihat apakah fenomena PD sudah terjadi apa belum. Metode ini diciptakan oleh Michael Duval pada tahun 1974. Dengan hanya memperhatikan kondisi khusus konsentrasi dari metana ( $\text{CH}_4$ ), etilen ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) dan asetilen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ). Total ketiga gas ini adalah 100%. Perubahan komposisi dari ketiga gas ini menunjukkan kondisi fenomena kegagalan yang mungkin terjadi pada bushing yang diujikan.

Data

Tabel 3.1 Hasil Pengujian DGA

Dissolved Gas	Phase A	Phase B	Phase C
Methane(CH <sub>4</sub> )	50	58	62
Ethylene(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	18	19	20
Acetylene(C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	0	0	0
CO <sub>2</sub>	4820	6440	5480
CO	167	227	172

<sup>[2]</sup>Data percobaan dikutip dari “The Electricity Council Research Center, UK” oleh M.K Domun.

Pengolahan DataPhasa A

$$\begin{aligned} \text{Total Gas} &= \text{metana (CH}_4\text{)} + \text{etilen (C}_2\text{H}_4\text{)} + \text{asetilen (C}_2\text{H}_2\text{)} \\ &= 50 \text{ ppm} + 18 \text{ ppm} + 0 \text{ ppm} = 68 \text{ ppm} \end{aligned}$$

$$\% \text{ metana (CH}_4\text{)} = 50/68 \times 100\% = 73.6\%$$

$$\% \text{ etilen (C}_2\text{H}_4\text{)} = 18/68 \times 100\% = 26.4\%$$

$$\% \text{ asetilen (C}_2\text{H}_2\text{)} = 0/68 \times 100\% = 0\%$$

Phasa B

$$\begin{aligned} \text{Total Gas} &= \text{metana (CH}_4\text{)} + \text{etilen (C}_2\text{H}_4\text{)} + \text{asetilen (C}_2\text{H}_2\text{)} \\ &= 58 \text{ ppm} + 19 \text{ ppm} + 0 \text{ ppm} = 77 \text{ ppm} \end{aligned}$$

$$\% \text{ metana (CH}_4\text{)} = 58/77 \times 100\% = 75.3\%$$

$$\% \text{ etilen (C}_2\text{H}_4\text{)} = 19/77 \times 100\% = 24.7\%$$

$$\% \text{ asetilen (C}_2\text{H}_2\text{)} = 0/77 \times 100\% = 0\%$$

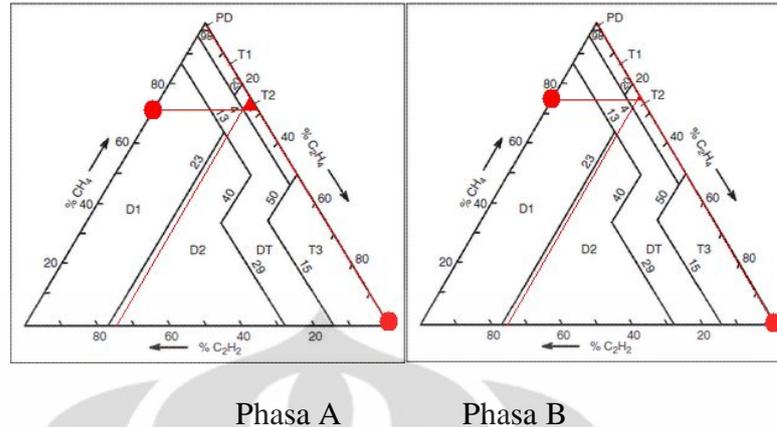
Phasa C

$$\begin{aligned} \text{Total Gas} &= \text{metana (CH}_4\text{)} + \text{etilen (C}_2\text{H}_4\text{)} + \text{asetilen (C}_2\text{H}_2\text{)} \\ &= 62 \text{ ppm} + 20 \text{ ppm} + 0 \text{ ppm} = 82 \text{ ppm} \end{aligned}$$

$$\% \text{ metana (CH}_4\text{)} = 62/82 \times 100\% = 75.6\%$$

$$\% \text{ etilen (C}_2\text{H}_4\text{)} = 20/82 \times 100\% = 24.4\%$$

$$\% \text{ asetilen (C}_2\text{H}_2\text{)} = 0/82 \times 100\% = 0\%$$



Gambar 3.1 Komposisi Gas-Gas Esensial pada Duval Triangle

### Hasil

Setelah dilakukan perhitungan terhadap konsentrasi 3 gas utama yaitu metana ( $\text{CH}_4$ ), etilen ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) dan asetilen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) yang terlarut dalam sample minyak bushing yang diujikan, maka dengan menggunakan metode Duval Triangle dapat ditentukan bentuk kegagalan yang terjadi.

Diagnosis kegagalan yang terjadi dapat dilihat bagaimana ketiga gas esensial tersebut saling berkontribusi sehingga akan didapatkan daerah yang dilingkupi konsentrasi ketiga gas yang mengindikasikan jenis kegagalan yang terjadi.

Tabel 3.2 Jenis-Jenis Kegagalan pada Monitoring DGA

Simbol	Kegagalan	Contoh
PD	<i>Partial Discharge</i>	Pelepasan muatan (discharge) dari plasma dingin (corona) pada gelembung gas (menyebabkan pengendapan X-wax pada isolasi kertas) ataupun tipe percikan (menyebabkan proses perforasi / kebolongan pada kertas yang bisa saja sulit untuk dideteksi)
D1	<i>Discharges of Low Energy</i>	PD tipe percikan / spark (menyebabkan perforasi karbon pada isolasi kertas dalam skala yang lebih besar). Arcing pada energi rendah memacu perforasi karbon pada permukaan isolasi kertas sehingga muncul banyak partikel karbon pada minyak (terutama akibat pengoperasian tap-changer)

Tabel 3.2 Jenis-Jenis Kegagalan pada Monitoring DGA (lanjutan)

Simbol	Kegagalan	Contoh
D2	<i>Discharges of High Energy</i>	Discharge yang menyebabkan kerusakan dan karbonisasi yang meluas pada kertas minyak). Pada kasus yang lebih ekstrim terjadi penggabungan metal (metal fusion), pemutusan (tripping) peralatan dan pengaktifan alarm gas.
T1	<i>Thermal Fault, <math>T &lt; 300^{\circ}\text{C}</math></i>	Isolasi kertas berubah warna menjadi coklat pada temperatur $>200^{\circ}\text{C}$ (T1) dan pada temperatur $>300^{\circ}\text{C}$ terjadi karbonisasi kertas munculnya formasi partikel karbon pada minyak (T2)
T2	<i>Thermal Fault, <math>300 &lt; T &lt; 700^{\circ}\text{C}</math></i>	
T3	<i>Thermal Fault, <math>T &lt; 700^{\circ}\text{C}</math></i>	Munculnya formasi partikel karbon pada minyak secara meluas, pewarnaan pada metal ( $200^{\circ}\text{C}$ ) ataupun penggabungan metal ( $>1000^{\circ}\text{C}$ )
DT	<i>Discharge of Energy and Thermal Fault</i>	Keberadaan gagal pada bagian D dan T , gabungan bentuk kegagalan.

### 3.2 Ultrasonik

Kegiatan *partial discharge* juga menghasilkan suatu gelombang ultrasonik yaitu gelombang suara yang memiliki frekuensi diatas 0,3 GhZ hingga 30 GhZ, frekuensi diatas ambang pendengaran manusia. Gelombang ultrasonik merupakan suatu getaran mekanik, bukan radiasi elektromagnet sehingga akan menghasilkan panjang gelombang yang berbeda pada material yang berbeda.

Metode pengukuran ultrasonik pertama kali diterapkan pada switchgear dan kemudian dikembangkan sebagai peralatan monitoring transformator. Untuk menerapkan metode ultrasonik tentunya sinyal frekuensi yang dihasilkan oleh aktifitas *partial discharge* harus ditangkap oleh sebuah sensor. Keuntungan utama dengan menggunakan metode ultrasonik adalah memiliki sensitivitas yang tinggi yang dikarenakan jaranganya sumber gangguan eksternal pada rentang frekuensi kerja dari ultrasonik itu sendiri yaitu berkisar 400 MhZ.

Karena beberapa keunggulan yang dimiliki oleh metode ultrasonik sebagai peralatan untuk monitoring kegiatan *partial discharge* sehingga pengembangannya selalu dilakukan. Selain memiliki keunggulan sensitivitas yang tinggi, metode ultrasonik juga memiliki keunggulan

lainnya seperti cenderung mudah untuk direalisasikan pemantauan secara *online*, dapat mendeteksi lokasi terjadinya *partial discharge*, dan hasil monitoring memberikan data informasi yang lebih banyak.

Namun pengembangan kearah penentuan besarnya nilai luahan *partial discharge* dari karakteristik gelombang ultrasonik sangat sedikit. Sehingga studi terhadap mekanisme pembentukan gelombang ultrasonik oleh *partial discharge* tidak terlalu didapatkan, oleh karena itu hubungan antara *partial discharge* dan karakteristik gelombang ultrasonik tidak dapat diperoleh. Hal ini berarti studi yang lebih kompleks terhadap pembangkitan gelombang ultrasonik oleh *partial discharge* hanya bertahan pada panduan teori yang sudah ada saja.

#### Data

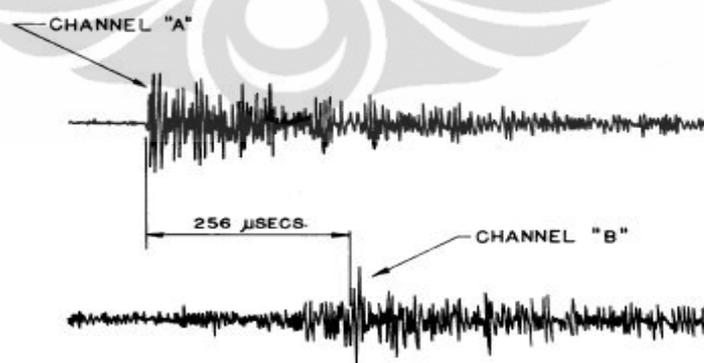
Sensor ultrasonik ditempatkan pada dinding bushing dimaksudkan agar signal ultrasonik yang dihasilkan oleh *partial discharge* pada isolasi bushing dapat dideteksi oleh sensor. *Noise-noise* yang muncul pada rentang operasi signal ultrasonik diklasifikasikan menjadi *noise* mekanik, *noise* elektrik dan *noise* elektromagnetik. *Noise* mekanik antara lain getaran yang dihasilkan kegiatan magnetisasi inti besi pada transformator, operasi *switching*, serta suara benturan seperti suara hujan, pasir dan lain-lain. *Noise* elektrik antara lain ditimbulkan oleh corona pada *transmission line*, dan operasi *switching*. Sedangkan gelombang elektromagnet seperti gelombang TV dan radio yang mengganggu sebagai *noise* melalui kabel koneksi rangkaian alat pengukur. Segala bentuk *noise-noise* tersebut dapat dihilangkan dengan merancang bandpass yang tepat untuk pengolahan data signal ultrasonik yang diterima oleh sensor.

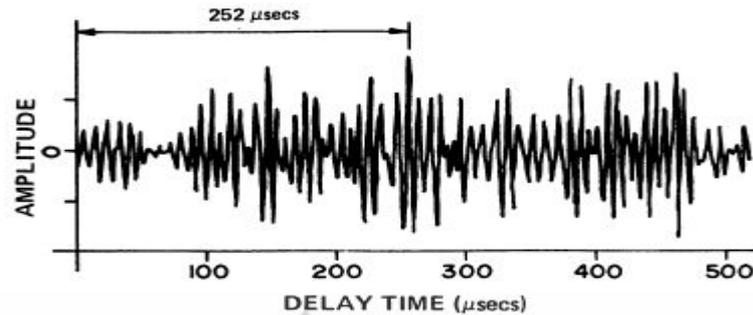
#### Pengolahan Data

Saat ini metode monitoring dengan memanfaatkan sinyal ultrasonik merupakan kelanjutan dari monitoring secara *offline* yang telah memberikan peringatan terlebih dahulu akan adanya aktifitas *partial*

*discharge* seperti monitoring secara visual dengan menggunakan inframerah yang mendeteksi suhu kerja bushing atau dengan menggunakan metode gas terlarut (*Dissolved Gas Analysis*). Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan metode ini merupakan tindak lanjut perlakuan yang harus dilakukan untuk memperkirakan lokasi kegiatan *partial discharge* yang terjadi berdasarkan hasil deteksi yang didapatkan.

Beberapa sensor ultrasonik ditempatkan sedemikian rupa pada dinding bushing untuk mendeteksi signal ultrasonik yang timbul sehingga magnitude beserta lokasi *partial discharge* dapat ditentukan. Untuk menentukan lokasi sumber kegagalan dilakukan dengan teknik *cross-correlation*, yaitu teknik yang memanfaatkan waktu tunda (*time delay*) signal ultrasonik yang mencapai sensor-sensor yang telah ditempatkan. Masing-masing signal diproses pada korelator dan dimanipulasi dengan cara salah satu sinyal dibentuk tertinggal oleh sinyal lainnya dan kemudian dilakukan perkalian antar amplitudo sehingga akan lebih jelas terlihat seberapa besar perbedaan *time delay* sinyal-sinyal tersebut.





Gambar 3.2 Cross- Correlation

(sumber : Paul Bourke)

### Hasil

Setelah time delay antara sinyal-sinyal tersebut didapatkan dari metode *cross correlation* dalam beberapa arah yang berbeda maka dapat dilakukan perhitungan lokasi sumber kegagalan dengan metode triangulasi yaitu proses pencarian koordinat dan jarak sebuah titik dengan mengukur sudut antara titik tersebut dan dua titik referensi lainnya yang sudah diketahui posisi dan jarak antara keduanya dengan penentuan koordinat dan jarak dengan menggunakan hukum sinus.

### 3.3 Deteksi Emisi Akustik

Saat ini metode deteksi dan monitoring dengan menggunakan deteksi emisi akustik sering digunakan sebagai metode pengukuran yang digunakan dalam diagnosa sistem isolasi peralatan listrik. Pengukuran dapat dilakukan tanpa memadamkan sistem listrik yang sedang beroperasi atau yang sedang berjalan, dan informasi yang dapat diperoleh dari deteksi emisi akustik lebih kompleks jika dibandingkan dengan beberapa metode konvensional yaitu melingkupi intensitas, ukuran serta lokasi terjadinya *partial discharge*.

Beberapa keterbatasan yang dimiliki oleh pengujian deteksi *partial discharge* konvensional terutama pada masalah lokasi terjadinya dapat dianalisa dengan menggunakan pengujian emisi akustik. Selain signal akustik yang berasal dari *partial discharge*, emisi akustik juga dihasilkan

oleh beberapa sumber kerusakan lainnya seperti kerusakan secara thermal, elektrik maupun lingkungan. Dan yang menjadi perhatian khusus adalah menghilangkan noise-noise yang dapat mengurangi keakuratan pengukuran *partial discharge* yang diinginkan.

Berbagai sumber signal emisi akustik yang mungkin timbul di daerah pengukuran bushing transformator dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Berasal dari sumber listrik seperti terjadinya *partial discharge*, *arcing*, transien selama operasi *switching* berlangsung dan lain-lain.
- b. Berasal dari sumber panas seperti *hot spot* dan lain-lain.
- c. Berasal dari sumber mekanis seperti operasi *line tap changer* (LTC), pelepasan beban dan lain-lain.
- d. Berasal dari sumber lingkungan seperti hujan, angin dan lain-lain.
- e. *Electro Magnetic Interference* (EMI).

Berbagai sumber-sumber akustik diatas menghasilkan emisi akustik dengan berbagai karakteristik yang berbeda-beda. Hal ini tentu membantu dalam pengukuran karena dengan mengetahui karakteristik masing-masing sumber akustik maka pemilahan sumber emisi akustik yang berasal dari *partial discharge* dapat ditentukan dan emisi akustik dari sumber lain dapat dianggap sebagai noise yang dapat dibuang atau diabaikan. Karakteristik penting yang dapat digunakan untuk mengklasifikasikan berbagai sumber emisi akustik antara lain amplitudo, frekuensi dan *waveform*.

#### Data

Untuk melakukan pengukuran dengan metode emisi akustik, diperlukan berbagai peralatan untuk membantu pengukuran dan analisis terhadap hasil yang telah didapatkan, yaitu sebagai berikut :

- a. Sensor emisi akustik terbuat dari bahan piezoelektrik yang dapat beroperasi pada rentang frekuensi 10 kHz hingga 1,2 MHz yang terintegrasi dengan amplifier penguat daya sinyal yang ditangkap.

- b. Kabel dan konektor
- c. *Digital signal processing card*
- d. *Software* pendukung yang cocok untuk menganalisis data untuk mendeteksi lokasi secara 3 dimensi dari kegagalan yang terjadi.

### Pengolahan Data

Masalah utama dalam analisis emisi akustik adalah bagaimana menentukan estimasi parameter-parameter sinyal akustik itu sendiri, hal ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik luasan yang terjadi pada isolasi.

Persyaratan yang harus dipenuhi semua peralatan instrumentasi pengukuran dan monitoring adalah harus mampu memberikan informasi untuk menilai kondisi operasi peralatan yang sedang diuji. Untuk itu dibutuhkan filter untuk mengurangi *noise* dari sumber-sumber yang tidak diinginkan. Juga dibutuhkan pertimbangan-pertimbangan yang tepat dalam pemilihan sensor emisi akustik yang akan digunakan karena *partial discharge* menghasilkan sinyal akustik dengan rentang frekuensi yang sangat luas. Namun secara umum energi akustik dihasilkan dalam rentang frekuensi yang dapat didengar. Sinyal akustik merupakan sinyal yang memiliki pita yang lebar, ketika sinyal akustik menabrak suatu medium ada beberapa sinyal yang dipantulkan dan dibelokkan sesuai dengan frekuensi sinyal tersebut.

Ketika sinyal emisi akustik tertangkap oleh sensor pertama kali, menandakan bahwa kondisi fenomena *partial discharge* telah berlangsung. Untuk mendapatkan hasil yang menunjukkan hal yang sebenarnya terjadi maka diperlukan optimasi antara bandwidth dan sensitivitas sensor yang digunakan. Agar didapatkan sensitivitas yang maksimum dari sensor maka sensor harus ditempatkan sedemikian rupa menempel pada dinding bushing dengan bahan pelapis yang sangat tipis agar mengurangi pengaruh

pembelokan sinyal emisi akustik yang mungkin saja terjadi sebelum sinyal tersebut ditangkap oleh sensor. Sinyal yang ditangkap oleh sensor kemudian perlu diperkuat agar pembacaan terhadap magnitude sinyal tersebut dapat dibaca dengan mudah, dengan penambahan komponen amplifier yang ditempatkan dekat dengan sensor yang bertujuan agar meminimalkan interferensi gelombang elektromagnet juga sebagai penguat sinyal.

#### Hasil

Dengan memanfaatkan emisi akustik yang dihasilkan oleh *partial discharge*, dapat dilakukan analisis mendasar terhadap beberapa parameter seperti dengan melihat karakteristik kemunculan *partial discharge* dengan memperhatikan karakter sinyal emisi akustik yang secara simultan periodik atau secara acak.

### **3.4 Deteksi Kamera Inframerah**

Salah satu cara termudah untuk memantau unjuk kerja suatu peralatan khususnya bushing adalah dengan melihat secara visual bagaimana kondisi temperatur bushing tersebut. Monitoring dengan memanfaatkan gelombang infra merah yang dipancarkan oleh panas yang merupakan efek yang ditimbulkan oleh kegiatan *partial discharge* merupakan salah satu cara yang dapat ditempuh untuk deteksi awal terjadinya kegagalan isolasi khususnya bushing transformator. Walaupun panas yang terjadi dapat berasal dari sumber-sumber lain selain *partial discharge*, tetapi dengan metode ini dapat dilakukan kajian terhadap gejala degradasi kualitas isolasi dan faktor pemicu kerusakan bushing. Inframerah merupakan metode yang mudah karena dapat memberikan gambaran peralatan listrik khususnya bushing untuk dimonitoring saat kondisi sedang beroperasi.

Prinsip yang dimanfaatkan oleh metode deteksi inframerah adalah dengan memanfaatkan perbedaan suhu dari bagian-bagian bushing yang memancarkan sinar inframerah yang berbeda-beda intensitasnya. Semakin tinggi suhu suatu bahan, semakin tinggi pula intensitas sinar inframerah

yang dipancarkan. Dengan menggunakan kamera inframerah, pengukuran pancaran energi panas pada bushing dikonversikan menjadi suatu peta temperatur yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan investigasi lanjutan terhadap fenomena *partial discharge*.

Prinsip kerja kamera inframerah adalah dengan menangkap gelombang inframerah yang diradiasikan oleh objek, mengolahnya serta menampilkan suhu dan *termogram* objek ukur.

### Data

Permukaan bushing yang menjadi target pendeteksian panas harus langsung terlihat pada layar kamera dan tidak terhalang oleh benda lainnya walaupun memiliki pancaran radiasi yang cukup sebagai pendeteksian untuk mendapatkan keakuratan data. Media antara subjek yang diperiksa dan kamera sebagai instrumen pemeriksaan bukan media *vacum* melainkan media normal namun ada beberapa hal yang perlu diperhatikan seperti waktu pengambilan yang dapat mempengaruhi hasil yang didapatkan seperti panasnya matahari yang terlalu tinggi yang dapat mempengaruhi akibat refleksi sinar matahari pada kamera dan akan memberikan gambaran temperatur yang berbeda.

### Pengolahan Data

Menurut standar yang dikeluarkan oleh ANSI dan IEEE tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara temperatur yang diperbolehkan dalam operasi bushing maupun transformator. Standar bushing C57.1900 menyatakan bahwa minyak transformator tidak boleh melebihi rata-rata  $95^{\circ}\text{C}$  dalam waktu 24 jam. Sedangkan untuk standar transformator C57.1200 menyatakan bahwa suhu rata-rata lingkungan  $30^{\circ}\text{C}$  dan rata-rata kenaikan suhu belitan transformator tidak lebih dari  $65^{\circ}\text{C}$ . Hal ini berarti bahwa suhu minyak transformator bagian atas hanya diperbolehkan rata-rata mencapai suhu  $95^{\circ}\text{C}$  dan dapat mencapai maksimum pada suhu  $105^{\circ}\text{C}$ .

ANSI / IEEE C57.19.00-1991

1. Suhu ambient udara tidak di atas 40°C atau dibawah -30°C
2. Suhu isolasi minyak transformator di mana ujung bawah bushing terbenam dan permukaan mounting bushing tidak melebihi rata-rata 95°C selama periode 24 jam

#### ANSI / IEEE C57.12.00-1993

1. Pendingin suhu udara terbatas ketika berpendingin udara, suhu udara pendingin (suhu ruang) tidak boleh melebihi 40°C, dan suhu udara rata-rata pendinginan untuk setiap periode 24 jam tidak boleh melebihi 30°C.
2. Rata-rata kenaikan suhu belitan bagian atas tidak boleh melebihi 65°C ketika diuji sesuai dengan C57.12.90-1999 .

#### ANSI / IEEE C57.12.10-1997

1. Batas atas suhu isolasi cair padattransformator harus cocok beroperasi pada rentang temperatur dari -20°C sampai 105°C, asalkan tingkat cair telah benar disesuaikan dengan tingkat 25°C.

Tentunya ada beberapa jenis bushing yang memiliki standard kemampuan tahanan terhadap suhu yang lebih tinggi sesuai dengan spesifikasi yang diberikan.

#### Hasil

Hasil *scanning* dengan menggunakan kamera inframerah akan menunjukkan gambaran berupa objek yang diukur dengan tampilan dalam warna yang sesuai dengan suhu objek. Radiasi inframerah yang dicuplik terletak pada rentang panjang gelombang tertentu dengan suhu yang terukur adalah suhu permukaan objek.

Selama dilakukannya scanning terhadap bushing, akan banyak ditemukan hasil-hasil yang dapat dijadikan dasar tindakan yang akan diambil selanjutnya untuk perawatan maupun perbaikan. Level minyak juga dapat dideteksi dengan menggunakan infra merah pada bushing transformator karena lilitan transformator menghasilkan sumber panas

yang dapat memanaskan minyak pada tangki maupun bushing transformator. Bushing memiliki ruang kosong yang tidak terisi minyak pada bagian atas, sehingga jika panas pada minyak bushing lebih tinggi daripada ruang kosong tersebut maka akan terlihat level minyak pada saat scanning dengan menggunakan inframerah.



## BAB IV ANALISIS

### 4.1 Perbandingan Berbagai Metode

Dalam pengelolaan dan pengembangan kegiatan monitoring *partial discharge* pada bushing transformator memerlukan perencanaan yang strategis, yaitu suatu struktur sasaran yang saling mendukung dan melengkapi menuju ke arah tujuan yang menyeluruh sebagai pemantauan kondisi isolasi bushing. Agar dapat menentukan strategi dan sasaran tersebut sehingga tersusun langkah-langkah yang efektif dan efisien maka disusunlah analisis berupa penentuan keunggulan dan kelemahan masing-masing metode.

*Bushing* yang diaplikasikan pada tegangan tinggi merupakan komponen yang paling rentan mengalami kerusakan khususnya yang digunakan pada transformator. Sudah sejak lama teknologi untuk monitoring kondisi isolasi bushing baik secara *online* maupun *offline* dikembangkan. Tetapi karena kegagalan isolasi yang terjadi berlangsung sangat cepat sehingga pengujian secara *offline* yang berkala tidak mampu untuk mendeteksi secara dini kegagalan yang terjadi. Sehingga pengembangan lebih lanjut mengenai teknologi monitoring secara *online* selalu dikembangkan untuk mendapatkan keakuratan, keandalan dan kemampuan mendiagnosis suatu kegagalan yang terjadi sehingga tindakan pencegahan dapat dilakukan sedini mungkin.

Kelemahan lainnya yang dapat ditemukan pada monitoring secara *offline* (*periodic testing*) ialah jika pada hasil monitoring ditemukan adanya indikasi *partial discharge* telah terjadi, maka hasil tersebut tidak mampu untuk menjawab beberapa pertanyaan penting sebagai langkah awal dilakukannya tindakan preventif seperti, kapan mula terjadinya kegagalan dan seberapa cepat penurunan unjuk kerja bushing atau jika

ingin lebih spesifik lagi tidak hanya kecepatan perubahan tetapi juga percepatan perubahan dari sampel bushing yang diujikan.

Dengan menggunakan pengujian DGA (*Dissolved Gas Analysis*) hasil yang didapatkan dapat digunakan sebagai pendeteksian dini akan adanya kegagalan yang mungkin terjadi pada bushing. Namun uji DGA juga memiliki kelemahan yaitu diperlukan tingkat kemurnian yang tinggi dari sampel minyak yang diujikan karena alat uji DGA memiliki sensitivitas yang tinggi sehingga sedikit saja terdapat pengotor pada sampel maka akan mempengaruhi bahkan menurunkan tingkat akurasi dari hasil pengujian itu sendiri.

Sedangkan dengan menggunakan pengujian yang bersifat *online*, yang memanfaatkan gelombang ultrasonik dan emisi akustik yang dihasilkan oleh kegiatan *partial discharge* dapat memberikan informasi yang lebih akurat serta lebih detail terhadap fenomena tersebut. Dibutuhkan pengembangan teknologi untuk mendapatkannya karena terdapat banyak faktor yang dapat mengurangi keakuratan pemantauan secara online seperti *device accuracy* yang masih rendah, *noise* dari lingkungan dan sistem yang mengganggu pemantauan kondisi bushing serta variasi sistem tegangan juga menjadi faktor penting dalam kegiatan monitoring.

Tabel 4.1 Perbandingan Keunggulan dan Kelemahan Berbagai Macam Metode Monitoring Partial Discharge

Metode	Keunggulan	Kelemahan
<b>Dissolved Gas Analysis</b>	Dapat memberikan informasi yang lebih luas terhadap gejala-gejala yang timbul dari peralatan yang diperiksa	Diperlukan tingkat kemurnian yang tinggi Tidak mampu memberikan info detail

Tabel 4.1 Perbandingan Keunggulan dan Kelemahan  
Berbagai Macam Metode Monitoring Partial Discharge (lanjutan)

Metode	Keunggulan	Kelemahan
<p><b>Ultrasonik</b> Sensor tersambung ke tap bushing Tambahkan sensor pada kawat ground</p>	<p>Sensitivitas tinggi Dapat dikalibrasi Perkiraan lokasi sumber partial discharge Analisis dengan menggunakan pola penyebaran data</p>	<p>Sensitif terhadap noise</p>
<p><b>Emisi Akustik</b> (Dengan menggunakan piezo accelerometer sebagai sensor pada sisi luar bushing)</p>	<p>Mudah untuk diinstall pada bushing, pada bagian eksternal Dihasilkan trend yang menunjukkan degradasi peralatan Tidak rentan terhadap noise Kemungkinan didapatkan lokasi terjadinya kegagalan</p>	<p>Sensitivitas rendah Bergantung terhadap lokasi kegagalan dan internal desain peralatan. Butuh waktu yang cukup lama dalam penginstalan</p>
<p><b>Inframerah</b></p>	<p>Dengan sistem optik, objek yang kecil dapat diukur Transient suhu yang terjadi dapat dideteksi .</p>	<p>Yang terukur hanya suhu permukaan objek Perlu diagnosa lebih lanjut jika panas yang terukur melebihi ambang batas yg diperbolehkan.</p>

## 4.2 Analisis Penurunan Isolasi

Penurunan kualitas bahan isolasi oleh *partial discharge* adalah fenomena suatu proses aliran kejadian dari dimulainya pembentukan lubang diikuti oleh munculnya *tracking/treeing* dan akhirnya mencapai kegagalan dielektrik.

### Dissolved Gas Analysis

Metode analisis gas terlarut merupakan teknik konvensional yang telah sejak lama digunakan sebagai pendeteksi beberapa jenis kegagalan yang terjadi pada isolasi cair yang menghasilkan gas yang berbeda pada setiap jenis kegagalan yang menunjukkan fungsi dari suhu pada lokasi kegagalan tersebut.

### Ultrasonik & Emisi Akustik

Karakteristik Emisi Akustik sebagai bentuk *partial discharge* terhadap temperatur kerja dan tegangan yang diterapkan pada isolasi minyak bushing transformator.

Peralatan yang digunakan dalam pengujian :

1. 1 buah transformator penguji 100 kV / 10 kVA (TEO 100 / 10)
2. 3 buah connecting rod (V)
3. 2 buah connecting cup (K)
4. 2 buah floor pedestal (F)
5. 1 buah support insulator (IS)
6. 1 buah measuring spark gap (MF)
7. 1 buah earthing / grounding switch (ES)
8. 1 buah measuring capacitor 100 kV, 100 pF (CM)
9. 1 buah induktor variabel
- 10.1 buah tahanan variabel
- 11.1 buah elektrode (EL)
- 12.2 buah elektrode tipe lempengan
13. Kabel pengontrol jarak antar elektrode OT 275 – AKF

14. Instrumen pengukuran digital (DMI 551)

15. Microphone Sonic Gear DM 120

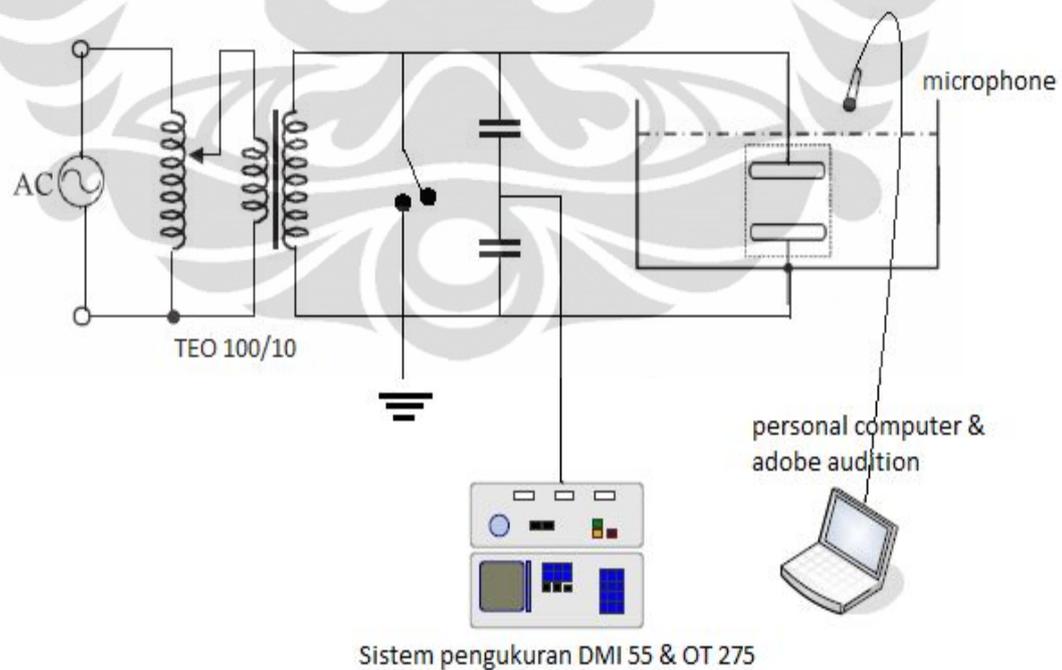
Spesifikasi microphone Sonic Gear DM 120

Mic elemen	: condenser
Respon frekuensi	: 50 Hz – 13000 Hz
Sensitivitas	: -58 dB - +3dB
Standar tegangan operasi	: 3 V
Range operasi	: 2-8 V
Konsumsi arus	: 350 mA
S/N ratio	: > 50 dB
Konektor	: 3.5 mm male plug
Panjang cord	: 2.5 m

16. Software adobe audition 3.0

17. Software National Instrument LabView 2009

18. Thermometer infra merah



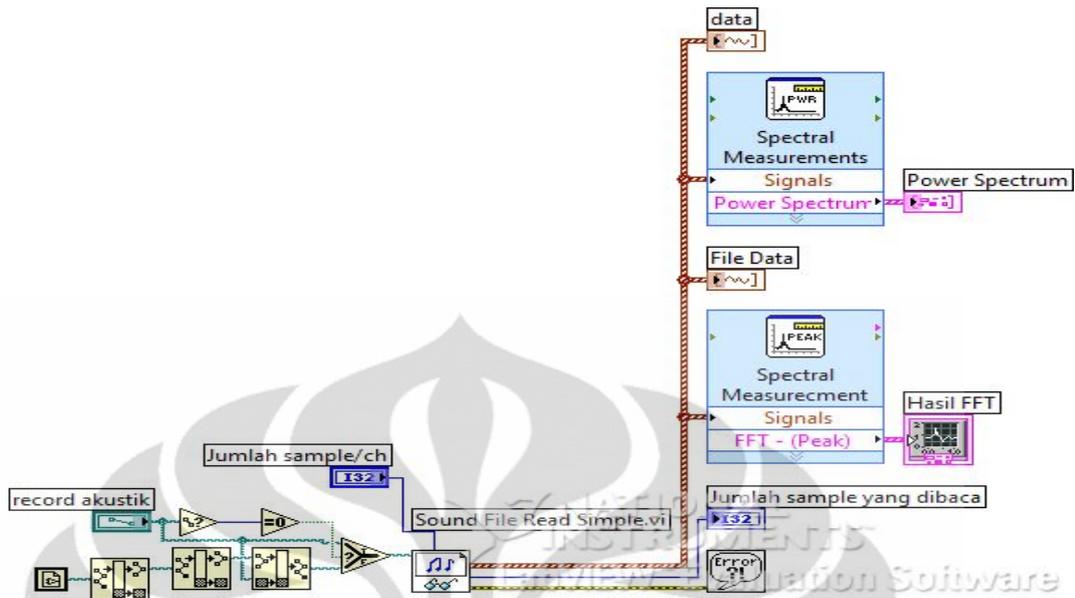
Gambar 4.1 Rangkaian Pengujian Emisi Akustik pada Isolasi Minyak

Pada percobaan ini digunakan isolasi sampel minyak baru yang belum digunakan sebelumnya. Perlakuan yang dilakukan pada sampel adalah dengan menaikkan terlebih dahulu temperaturnya hingga mencapai suhu 120<sup>0</sup>C dan 100<sup>0</sup>C. Pada masing-masing suhu akan diterapkan tegangan uji 2 kV, 6 kV, 12 kV yang pada setiap tegangan uji akan di rekam emisi akustik yang dihasilkan dengan menggunakan mikrofon sesuai dengan gambar rangkaian pengujian dengan bantuan adobe audition 3.0. Dan kemudian hasil rekaman tersebut diolah dengan menggunakan LabView 2009.

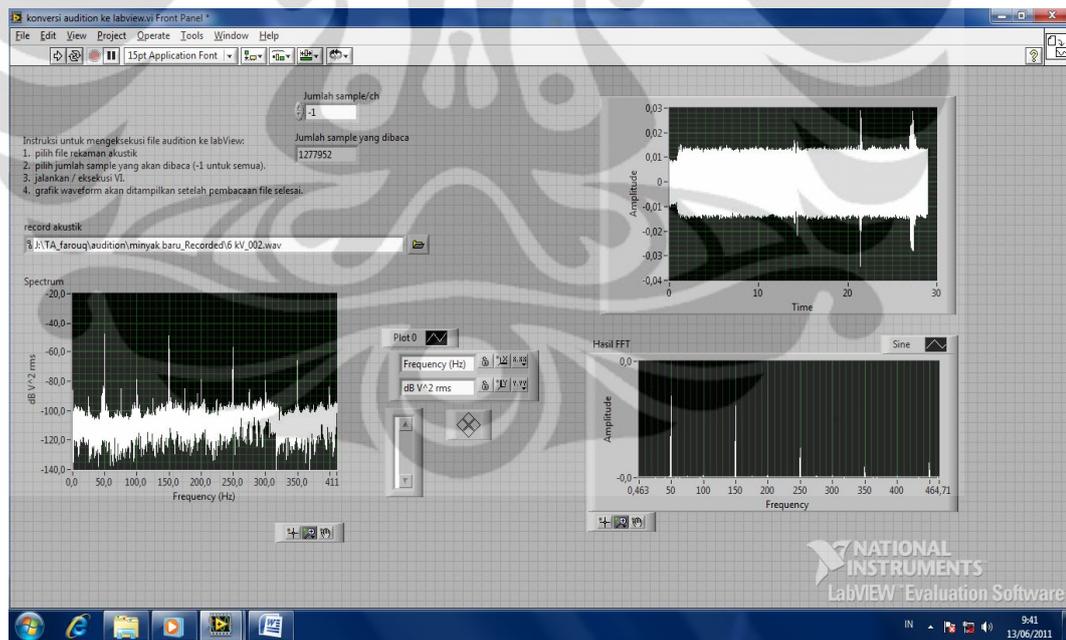
Rekaman yang dilakukan dengan adobe audition kemudian dibaca dan diolah oleh LabView untuk didapatkan *waveform* dan *power spectrum* dari emisi akustik yang telah direkam untuk mempermudah analisa yang dilakukan. Untuk mendapatkan frekuensi fundamnetal dan penyebarannya di sepanjang *power spektrum* dari emisi akustik yang telah direkam perlu di bentuk sebuah transformasi yang mampu melakukan *filter* terhadap noise-noise sehingga pembacaan akan lebih mudah terhadap grafik yang yang dihasilkan. Fast Fourier Transform (FFT) dapat dikalkulasi secara numerik berdasarkan Bracewell [6]

$$F(v) = \frac{1}{n} \sum_{\tau=1}^n f(\tau) \exp \left[ -2\pi i \left( \frac{v}{n} \right) \tau \right] \quad (4.1)$$

dimana  $F(v)$  merupakan diskrit Fourier Transform dan  $v$  adalah data vektor yang terdiri dari  $n = 1+2^m$  elemen,  $m$  merupakan sebuah integer.

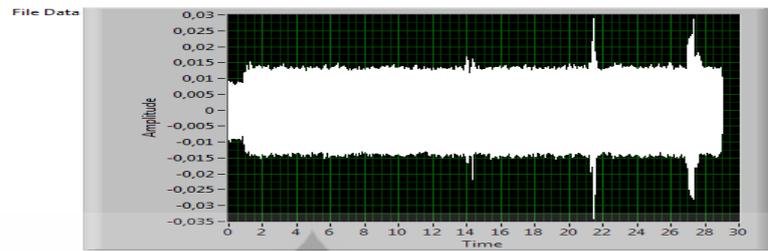


Gambar 4.2 Blok Diagram Pembacaan Record Akustik

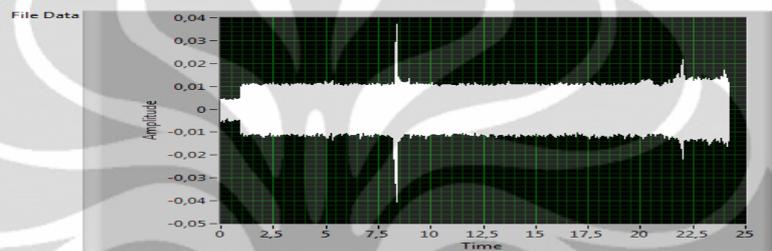


Gambar 4.3 Front Panel Pengolahan Record Akustik pada LabVIEW

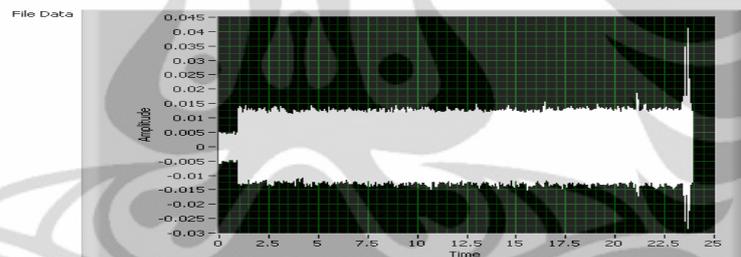
Sample minyak dengan temperature  $120^{\circ}\text{C}$



(a) 6 kV

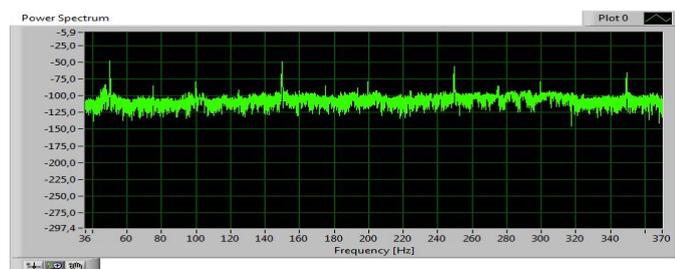


(b) 12 kV

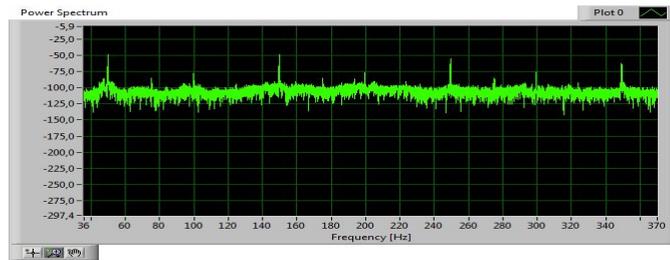


(c) 24 kV

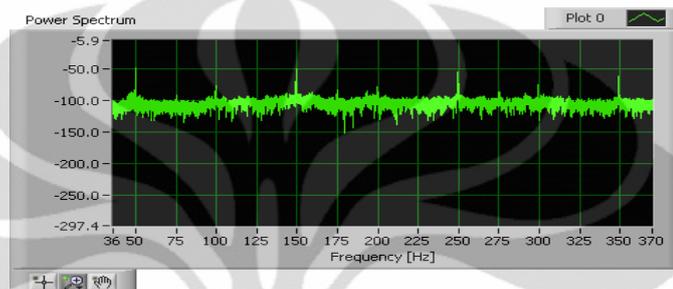
Gambar 4.4 Bentuk Gelombang (*waveform*), Amplitude Terhadap Waktu Isolasi Minyak 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada temperatur  $120^{\circ}\text{C}$



(a) 6 kV



(b) 12 kV



(c) 24 kV

Gambar 4.5 Power Spectrum isolasi minyak 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada temperatur  $120^{\circ}\text{C}$

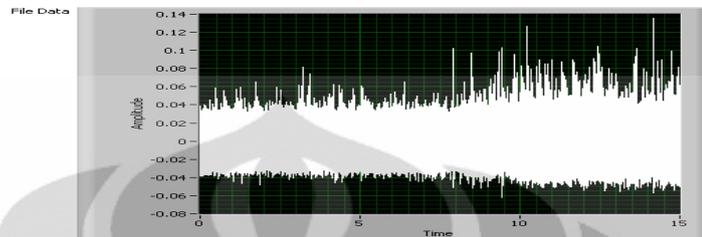
Pada pengolahan *power spectrum* 6 kV, frekuensi-frekuensi yang terdeteksi oleh mikrofon pada 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz dan 350 Hz. Frekuensi fundamental diperlihatkan oleh frekuensi 50 Hz dan 150 Hz dengan sound level mencapai -50 dBFS dan frekuensi lainnya memiliki sound level kurang dari -55 dBFS.

Pada pengolahan *power spectrum* 12 kV, frekuensi-frekuensi yang terdeteksi oleh mikrofon pada 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz dan 350 Hz. Frekuensi fundamental diperlihatkan oleh frekuensi 50 Hz dan 150 Hz dengan sound level mencapai -50 dBFS dan frekuensi lainnya memiliki sound level kurang dari -55 dBFS.

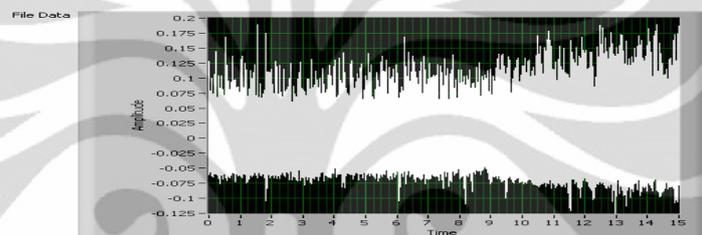
Pada pengolahan *power spectrum* 24 kV, frekuensi-frekuensi yang terdeteksi oleh mikrofon pada 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 300 Hz dan 350 Hz. Frekuensi fundamental diperlihatkan oleh frekuensi 50 Hz

150 Hz dan 250 Hz dengan sound level mencapai -50 dBFS dan frekuensi lainnya memiliki sound level kurang dari -55 dBFS.

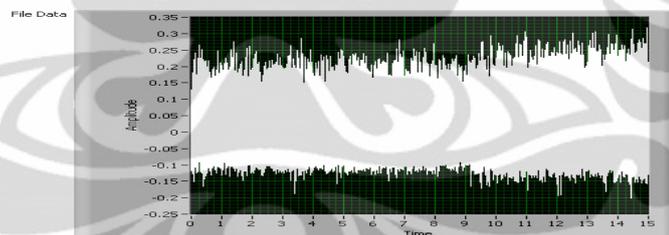
Sample minyak dengan temperature 100<sup>0</sup>C



(a)

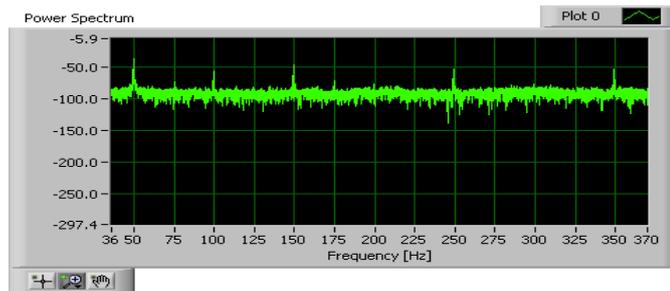


(b)

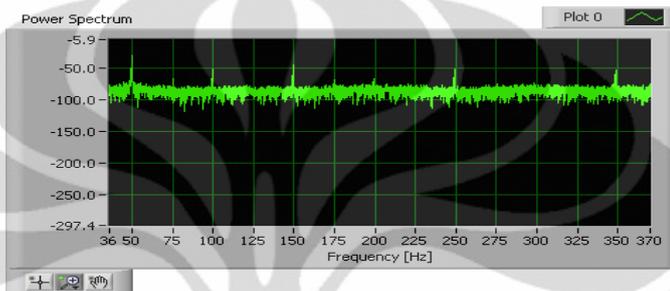


(c)

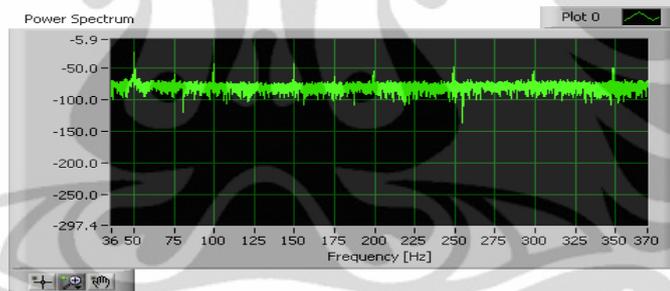
Gambar 4.6 Bentuk Gelombang (*waveform*), Amplitude Terhadap Waktu Isolasi Minyak 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada temperatur 100<sup>0</sup>C



(a) 6 kV



(b) 12 kV



(c) 24 kV

Gambar 4.7 Power Spectrum isolasi minyak 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada temperatur  $100^{\circ}\text{C}$

Pada pengolahan *power spectrum* 6 kV, frekuensi-frekuensi yang terdeteksi oleh mikrofon pada 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz dan 350 Hz. Frekuensi fundamental diperlihatkan oleh frekuensi 50 Hz dan 150 Hz dengan sound level mencapai -50 dBFS dan frekuensi lainnya memiliki sound level kurang dari -55 dBFS.

Pada pengolahan *power spectrum* 12 kV, frekuensi-frekuensi yang terdeteksi oleh mikrofon pada 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz dan 350 Hz.

Frekuensi fundamental diperlihatkan oleh frekuensi 50 Hz dan 150 Hz dengan sound level mencapai -50 dBFS dan frekuensi lainnya memiliki sound level kurang dari -55 dBFS.

Pada pengolahan *power spectrum* 24 kV, frekuensi-frekuensi yang terdeteksi oleh mikrofon pada 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200Hz, 250 Hz, 300 Hz dan 350 Hz. Frekuensi fundamental diperlihatkan oleh frekuensi 50 Hz 150 Hz dan 250 Hz dengan sound level mencapai -50 dBFS dan frekuensi lainnya memiliki sound level kurang dari -55 dBFS.

Pada hasil percobaan memperlihatkan, semakin tinggi tegangan yang diterapkan akan semakin banyak pula frekuensi fundamental yang bermunculan, begitu pula dengan temperatur yang diterapkan, semakin tinggi temperatur, semakin banyak pula frekuensi fundamental yang muncul walaupun besarnya tidak terlalu signifikan. Frekuensi fundamental yang terbaca merupakan kelipatan dari 50 Hz.

#### Pembahasan

Fenomena munculnya pulsa *partial discharge* yang ditandai dengan muncul emisi akustik terjadi saat keadaan isolasi menuju ke tahap kegagalan (*breakdown stage*). Signal *partial discharge* yang terekam merupakan sinyal random, dimana sinyal tersebut tidak terbatas terhadap waktu (*infinite*) sehingga energi dari sinyal tersebut juga tidak terbatas. Untuk itu dibentuklah *power spectrum* dari sinyal untuk menggambarkan distribusi *power* dari sinyal dengan berbagai sudut dalam domain frekuensi.

Dilakukan perbandingan hasil perekaman sinyal emisi akustik antara tegangan yang diterapkan dan temperatur isolasi yang diberikan terhadap *power spectrum* yang dihasilkan. Pengujian dilakukan dengan perlakuan yang berbeda terhadap temperatur dan tegangan yang diberikan. Frekuensi sampling dari perekaman sinyal akustik yang digunakan yaitu 14400 Hz. Emisi akustik dialisis dalam domain frekuensi, frekuensi pada magnitude puncak dalam *power spectrum* dan frekuensi median dikalkulasi pada temperatur dan tegangan yang berbeda. Frekuensi puncak adalah frekuensi

dengan kontribusi power tertinggi, sedangkan frekuensi median adalah frekuensi dimana setengah dari power sinyal berada pada frekuensi terendah dan setengah lagi pada frekuensi tertinggi. Gambar 4.8 menunjukkan frekuensi puncak dan median untuk tegangan yang berbeda pada temperatur isolasi minyak 120<sup>0</sup>C. Gambar 4.9 menunjukkan frekuensi puncak dan median untuk tegangan yang berbeda pada temperatur isolasi minyak 100<sup>0</sup>C.

Penentuan nilai frekuensi puncak dan median dilakukan dengan membaca grafik power spectrum dan mengikuti beberapa persamaan berikut:

Nilai maksimum pada spektrum

$$E_{\max} \quad (4.2)$$

Frekuensi pada spektrum maksimum

$$f_{\max} \quad (4.3)$$

Nilai rata-rata

$$E_{\text{av}} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} E(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} df} \quad (4.4)$$

Nilai rms

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\int_{f_1}^{f_2} E^2(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} df}} \quad (4.5)$$

Peak factor

$$W\{E(f)\} = \frac{E_{\max}}{E_{\text{rms}}} \quad (4.6)$$

Variansi

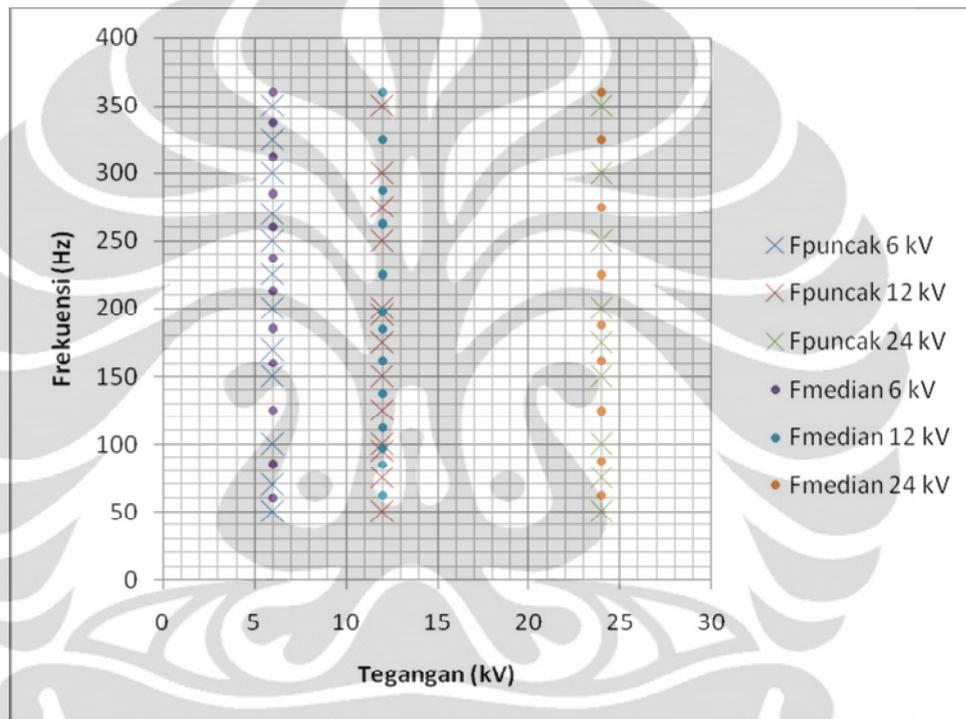
$$\delta^2(f) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} [E(f) - E_{\text{av}}(f)]^2 df}{\int_{f_1}^{f_2} E_{\text{av}}(f) df} \quad (4.7)$$

Frekuensi median

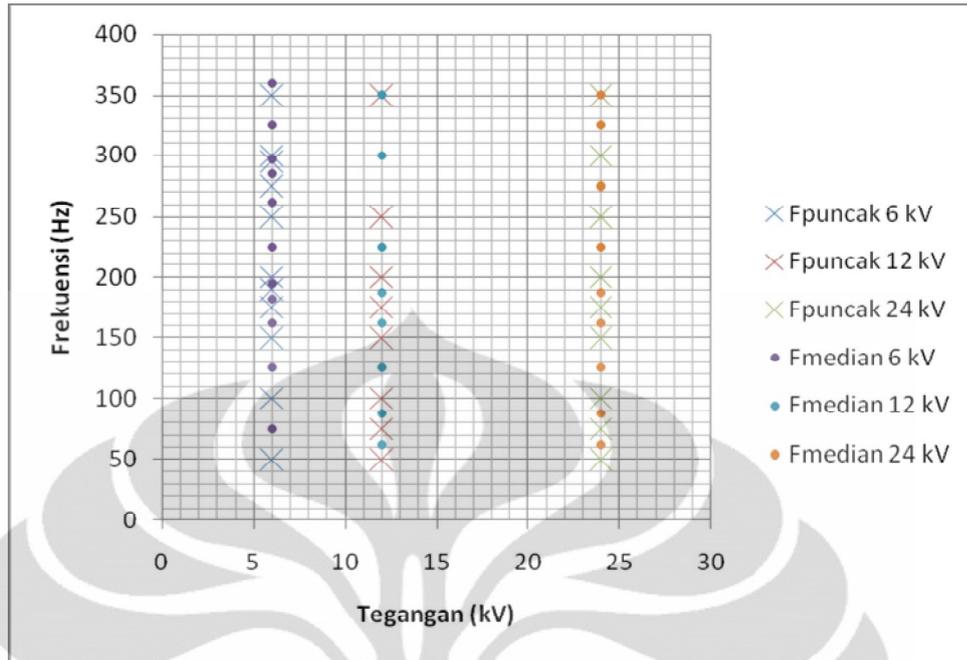
$$f_m = 2 \int_{f_1}^{f_m} E(f) df = \int_{f_1}^{f_2} E(f) df \quad (4.8)$$

Standar deviasi

$$\delta = \sqrt{\sigma^2} \quad (4.9)$$



Gambar 4.8 Frekuensi Puncak dan Median untuk Tegangan 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada temperatur isolasi minyak 120<sup>0</sup>C

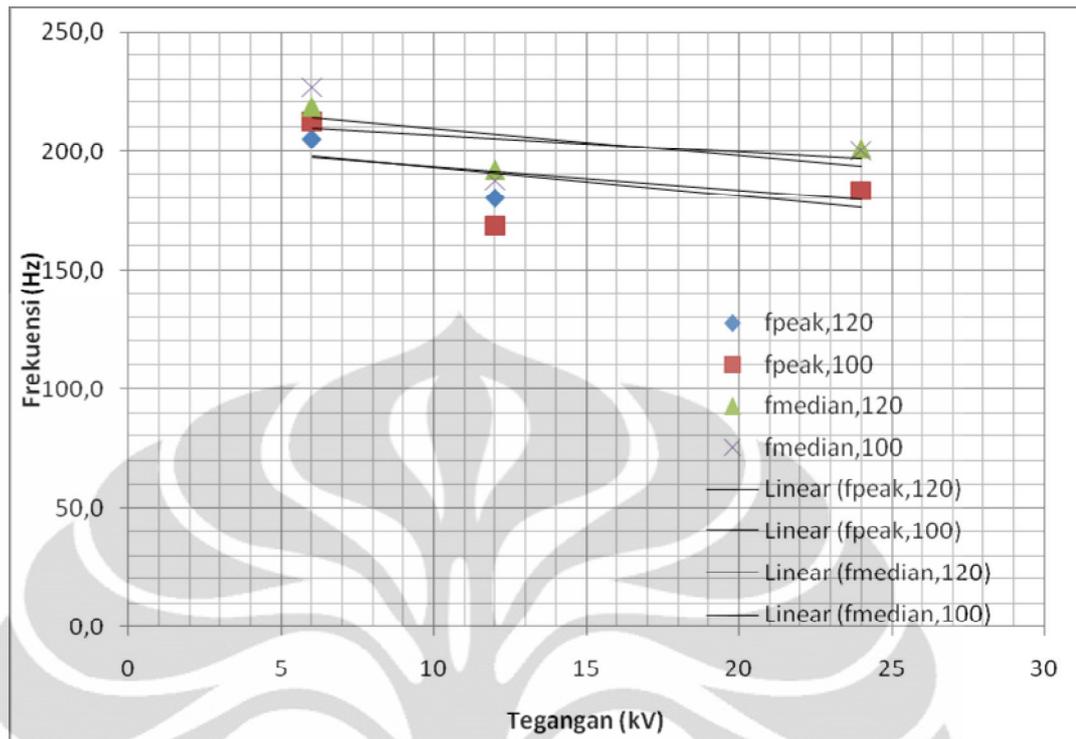


Gambar 4.9 Frekuensi Puncak dan Median untuk Tegangan 6 kV, 12 kV dan 24 kV pada temperatur isolasi minyak 100°C

Tabel 4.2 Hasil Pembacaan Grafik Power Spectrum

Temperatur→	120° C			100° C		
Tegangan→	6 kV	12 kV	24 kV	6 kV	12 kV	24 kV
Parameter↓						
Rata-Rata Frekuensi Puncak (Hz)	205.0	180.0	183.3	212.3	168.8	183.3
Rata-Rata Frekuensi Median (Hz)	218.3	192.3	201.1	226.8	187.5	200.0
Standar deviasi Frekuensi Puncak (Hz)	99.4	92.8	102.3	91.5	98.9	102.3
Standar deviasi Frekuensi Median (Hz)	98.1	95.1	90.9	88.1	100.4	101.9

Fenomena *partial discharge* dapat dijelaskan dengan melakukan pengawasan terhadap emisi akustik. *Partial discharge* dengan energi rendah menghasilkan frekuensi yang tinggi sedangkan *partial discharge* dengan energi tinggi menghasilkan frekuensi yang lebih rendah <sup>[6]</sup>.



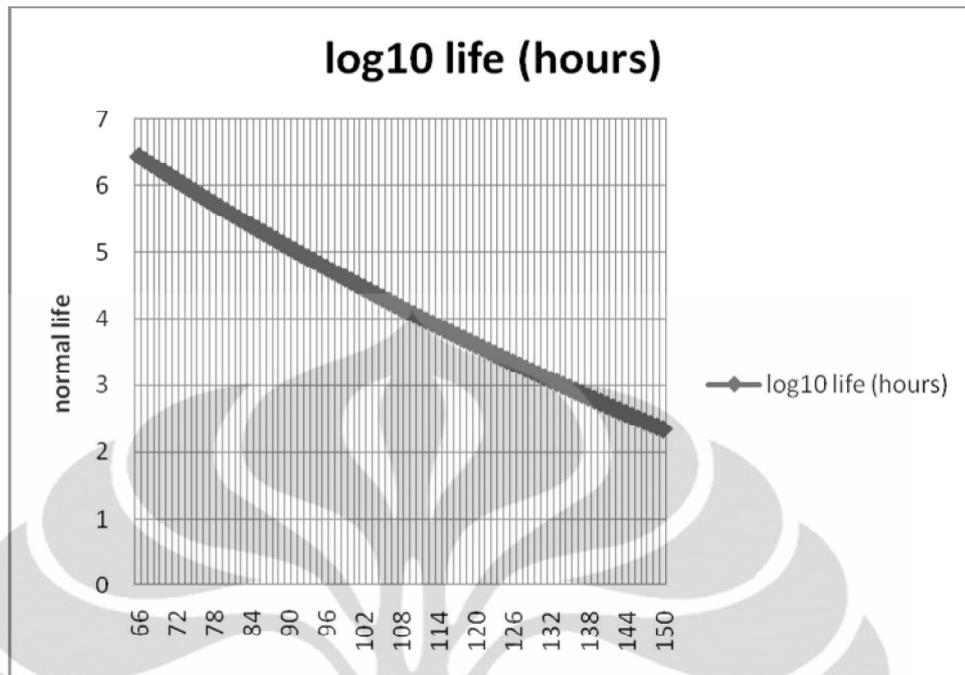
Gambar 4.10 Grafik Pembacaan Power Spectrum

### Inframerah

Hubungan penuaan (*ageing*) dan penurunan kualitas isolasi yang berubah terhadap temperatur kerja bushing dapat ditunjukkan dengan pendekatan teori reaksi rata-rata Arrhenius, yang menyatakan bahwa logaritma dari umur penggunaan merupakan fungsi resiprokal dari temperatur absolute (IEEE Std C57.19.100-1995) :

$$\text{Log}_{10} (\text{hours life}) = \left[ \frac{6972,15}{T} \right] - 14,133 \quad (4.10)$$

dimana T merupakan temperatur absolute dalam  $^{\circ}\text{K}$  ( $\Theta_{\text{HS}} + 273$ )



Gambar 4.11 Karakteristik *Ageing* Bushing terhadap Temperatur

### 4.3 Monitoring Bushing Transformator

Tindakan preventif seperti halnya monitoring untuk pendeteksian partial discharge memang mutlak untuk dilakukan untuk mengurangi kemungkinan-kemungkinan terjadinya kegagalan isolasi bushing yang berujung pada kecelakaan maupun kegagalan operasi transformator. Namun, pemeliharaan dalam bentuk pengawasan dan inspeksi terhadap peralatan juga memiliki resiko kegagalan karena tidak menutup kemungkinan bahwa umur suatu bushing tidak tercapai karena adanya kesalahan yang tidak terdeteksi baik pada saat desain awal, pembuatan maupun saat pengoperasiannya.

Bushing dirancang dan dibuat sebagai suatu unit yang tertutup agar polutan tidak mampu masuk ke dalam bushing sehingga bushing memiliki umur yang panjang dengan pengecualian kemungkinan oksigen dan kelembapan udara saja yang bisa memasuki minyak bushing. Perbandingan isolasi minyak dan isolasi kertas pada bushing jauh lebih kecil dibandingkan pada transformator, sehingga dibutuhkan kekuatan

dielektrik minyak yang lebih tinggi pada bushing. Untuk itu perlu dilakukannya monitoring terhadap kegiatan partial discharge pada bushing sebagai langkah awal.

Kegagalan *partial discharge* yang terjadi pada bushing dapat direlevansikan dengan kejadian yang terjadi pada transformator karena jenis isolasi yang digunakan relatif hampir sama hanya saja volumenya yang berbeda. Seberapa cepat kegagalan ini terjadi sangat bergantung pada ukuran dan tipe kegagalan yang terjadi, lokasi kegagalan isolasi, kenaikan temperatur di atas ketentuan operasional yang diperbolehkan, serta besarnya volume minyak sebagai media isolasi.

Pada dasarnya teknologi monitoring diperkenalkan dan diterapkan agar dapat memberikan peringatan yang tepat waktu sehingga bushing yang dicurigai dapat dievaluasi lebih lanjut dengan beberapa tes tambahan. Pemantauan bushing secara *online* memberikan informasi yang sangat berharga dan oleh karena itu dapat memberikan keuntungan tambahan dalam strategi pemeliharaan. Tujuan utama monitoring secara online adalah untuk menemukan bushing yang gagal operasi, menentukan jenis kegagalan utamanya dan pada akhirnya memprediksi masa pakai yang tersisa untuk mempersiapkan bushing penggantinya.

Korelasi antara tiap metode dapat digunakan dalam pemantauan kondisi bushing. Masing-masing metode memiliki keunggulan dan kelemahan, sehingga dengan penggabungan beberapa metode sebagai alat pemantauan kondisi bushing akan didapatkan hasil yang lebih akurat dan andal.

## BAB V

### KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan analisis penurunan isolasi dengan menggunakan kombinasi metode deteksi emisi akustik dan infra merah sebagai metode monitoring *partial discharge* pada bushing transformator didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Isolasi minyak dengan suhu  $100^{\circ}\text{C}$  memunculkan rata-rata frekuensi puncak yang lebih tinggi yaitu 180,0 Hz dibandingkan dengan isolasi minyak dengan suhu  $120^{\circ}\text{C}$  yaitu 168,8 Hz pada tegangan terapan 12 kV.
2. Dengan kenaikan tegangan terapan yang diberikan maka kemunculan frekuensi-frekuensi puncak pada power spektrum berada pada frekuensi-frekuensi yang lebih rendah yaitu 205.0 Hz pada tegangan 6 kV, 180.0 Hz pada tegangan 12 kV dan 183.3 Hz pada tegangan 24 kV pada kondisi temperatur  $100^{\circ}\text{C}$ .

## DAFTAR REFERENSI

- Chapman, Stephen. 2002. *Electrical Machinery and Power System Fundamental*. New York: McGraw-Hill.
- Domun, M.K. *Condition Monitoring of 132 kV Bushing*, United Kingdom : The Electricity Council Research Centre
- Davit A.Nattrass, *Partial Discharge Measurement and Interpretation*, IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 1988, vol. 4 No.13
- Gulski Edward. *Digital Analysis of Partial Discharges*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2 No. 5, October 1995
- Halmshaw R. 1987. *Non-destructive Testing*. London: Edward Arnold
- Kundu, Prasanta. N.K Kishore. A.K Sinha. *Frequency domain Analysis of Acoustic Signals for Classification of Partial Discharge*, IEEE Annual report Conference, 2007, hal 146-149
- Naidu M S, V Kamaraju, *High Voltage Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Suwarno, *Dissolved Gas Analysis of Transformer Oils: Effects of electric arc*. Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems, Lisbon, Portugal, September 22-24, 2006
- Tajuddin. 1998. *Partial Discharge dan Kegagalan Bahan Isolasi*, (online),(<http://elektroindonesia.com/elektro/energi13.html>, diakses 28 Oktober 2010).