

# ANALISIS KARAKTERISTIK *BREAKDOWN VOLTAGE* PADA DIELEKTRIK MINYAK *SHELL DIALA B* PADA SUHU 30<sup>0</sup>C-130<sup>0</sup>C

Wahyu Kunto Wibowo<sup>[1]</sup>, Ir. Yuningtyastuti<sup>[2]</sup>, Abdul Syakur, S.T. M.T.<sup>[3]</sup>

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang 50275

Email : [wahyukuntowibowo@yahoo.com](mailto:wahyukuntowibowo@yahoo.com)

**Abstrak** - Pada peralatan tegangan tinggi, bahan dielektrik atau disebut juga sebagai bahan isolasi sangat dibutuhkan untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan sehingga antar penghantar yang bertegangan tersebut tidak terjadi hubung singkat yang dapat menyebabkan lompatan api atau percikan. Salah satu peralatan tegangan tinggi yang digunakan dalam sistem tenaga listrik adalah transformator tenaga. Pada transformator tenaga, digunakan suatu bahan dielektrik yaitu minyak trafo yang berfungsi untuk memisahkan dua atau lebih penghantar yang bertegangan dan sebagai pendingin dari trafo itu sendiri. Minyak trafo termasuk jenis bahan dielektrik cair berupa minyak. Dielektrik cair mempunyai kerapatan 1000 kali lebih besar daripada dielektrik gas sehingga kekuatan dielektriknya lebih tinggi daripada dielektrik gas. Menurut standar SPLN 49-1 dengan metode uji IEC 156, tegangan tembus minyak trafo pada suhu 30<sup>0</sup>C adalah 30 kV pada pengujian dengan jarak sela 2,5 mm. Sedangkan menurut standar SPLN 49-1 dengan metode uji IEC 296, suhu 130<sup>0</sup>C adalah titik didih dari minyak trafo.

Pada pengujian yang dilakukan, akan diteliti karakteristik tegangan tembus yang muncul pada dielektrik minyak trafo jenis shell diala B terhadap pengaruh perubahan suhu antara 30<sup>0</sup>C sampai dengan 130<sup>0</sup>C dengan cara melakukan pengukuran tegangan tembus menggunakan elektroda setengah bola-setengah bola dan elektroda bola-bola yang diterapkan tegangan uji berupa tegangan tinggi bolak-balik (AC) frekuensi 50 Hz untuk mendapatkan karakteristik tegangan tembus minyak trafo shell diala B terhadap perubahan jarak sela dan suhu minyak.

Kata kunci : tembus dielektrik, dielektrik minyak, tegangan tinggi bolak-balik (AC)

## I. PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Pada peralatan tegangan tinggi, bahan dielektrik atau disebut juga sebagai bahan isolasi sangat dibutuhkan untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan sehingga antar penghantar yang bertegangan tersebut tidak terjadi hubung singkat yang dapat menyebabkan lompatan api atau percikan. Salah satu peralatan tegangan tinggi yang digunakan dalam aplikasi tegangan tinggi adalah transformator. Pada transformator, untuk memisahkan penghantar-penghantar yang bertegangan digunakan suatu bahan dielektrik yaitu minyak trafo.

Minyak trafo adalah suatu bahan dielektrik selain memisahkan penghantar-penghantar yang bertegangan berfungsi juga sebagai pendingin dari trafo itu sendiri. Minyak trafo termasuk jenis bahan dielektrik cair berupa minyak. Dielektrik cair mempunyai kerapatan 1000 kali lebih besar daripada dielektrik gas sehingga kekuatan dielektriknya lebih tinggi daripada dielektrik gas. Kelebihan lain dari dielektrik cair yaitu mempunyai kemampuan untuk memperbaiki diri sendiri jika terjadi suatu pelepasan muatan (discharge)<sup>[1]</sup>.

Menurut standar IEC 156, tegangan tembus minyak trafo pada suhu 30<sup>0</sup>C adalah 30 kV pada pengujian dengan jarak sela 2,5 mm dan titik didih minyak trafo menurut standar SPLN 49-1 dengan metode uji IEC 296 adalah 130<sup>0</sup>C. Pada pengujian yang dilakukan, akan diteliti karakteristik tegangan tembus (*breakdown voltage*) yang timbul pada dielektrik minyak trafo jenis *shell diala B* terhadap pengaruh perubahan suhu antara 30<sup>0</sup>C sampai dengan 130<sup>0</sup>C dengan cara pengujian

menggunakan elektroda uji yang diterapkan tegangan uji berupa tegangan tinggi bolak-balik (AC) frekuensi 50 Hz. Jenis pengujian yang dilakukan berupa pengujian merusak sampai terjadi tembus dielektrik (*breakdown*). Pengujian dilakukan melalui pengamatan terhadap bahan uji dengan selang waktu tertentu sampai terjadi peristiwa tembus isolasi.

### Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini yaitu untuk mengetahui dan menganalisis tegangan tembus minyak trafo *shell diala B* murni dalam kondisi minyak baru diambil dari tempat penyimpanan terhadap pengaruh perubahan suhu pada minyak dan perubahan jarak sela antar elektroda uji yang digunakan.

### Pembatasan Masalah

Tugas akhir ini memiliki beberapa batasan masalah, yaitu:

1. Minyak trafo yang digunakan adalah minyak trafo *shell diala B* dalam keadaan baru diambil dari tempat penyimpanan (drum) dengan tidak memperhitungkan lama waktu penyimpanan.
2. Pengujian dilakukan dengan suhu minyak antara 30<sup>0</sup>C sampai 130<sup>0</sup>C dengan pengujian setiap kenaikan suhu sebesar 10<sup>0</sup>C dan kurva karakteristik tegangan tembus yang terjadi merupakan fungsi suhu.
3. Pengujian yang dilakukan menggunakan elektroda medan seragam yaitu elektroda setengah bola-setengah bola dan elektroda bola-bola.

[1] Mahasiswa Teknik Elektro UNDIP

[2][3] Staf Pengajar Teknik Elektro UNDIP

4. Elektroda setengah bola yang digunakan standar IEC 156 diameter 50 mm.
5. Elektroda bola digunakan mempunyai diameter 25 mm.
6. Jarak sela antara elektroda yang digunakan mulai 2 mm 2.5mm dan 3 mm.
7. Tegangan uji yang diterapkan menggunakan tegangan tinggi bolak-balik (AC) berfrekuensi 50 Hz.
8. Tidak membahas pengaruh-pengaruh luar dan dalam dari bahan baik sebelum ataupun sesudah pengujian.
9. Pengujian dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro

## II. DASAR TEORI

### 2.1 Sifat-Sifat Listrik Bahan Dielektrik

Dielektrik sebagai salah satu bahan listrik mempunyai beberapa sifat-sifat kelistrikan. Sifat-sifat bahan isolasi ditentukan dari sampel berupa model isolasi pada kondisi standar, sehingga nilai ekstrapolasi seluruh sampel tidak selalu pas dengan nilai sesungguhnya. Adapun fungsi yang paling penting dari suatu bahan dielektrik adalah:

1. Untuk mengisolasi antara satu penghantar dengan penghantar lainnya.
2. Menahan gaya mekanis akibat adanya arus pada konduktor yang diisolasinya.
3. Mampu menahan tekanan yang diakibatkan panas dan reaksi kimia.

Tekanan yang diakibatkan oleh medan elektrik, gaya mekanik, thermal maupun kimia dapat terjadi secara serentak. Dengan kata lain, suatu bahan dielektrik dapat dikatakan ekonomis jika bahan dielektrik tersebut dapat bertahan dalam jangka waktu yang lama dengan menahan semua tekanan tersebut diatas.

Dari sifat-sifat bahan dielektrik yang ada, terdapat 6 sifat yang perlu diketahui, yaitu;

1. Kekuatan dielektrik
2. Konduktansi
3. Rugi-rugi dielektrik
4. Tahanan isolasi
5. Peluahan sebagian (*Partial discharge*)
6. Kekuatan kerak isolasi (*tracking strenght*)

### 2.2 Dielektrik Cair

Kekuatan dielektrik merupakan ukuran kemampuan suatu material untuk bisa menahan tegangan tinggi tanpa berakibat terjadinya kegagalan dielektrik. Kekuatan dielektrik cair tergantung pada sifat atom dan molekul cairan itu sendiri, material dari elektroda, suhu, jenis tegangan yang diberikan, gas yang terdapat dalam cairan, dan sebagainya yang dapat merubah sifat molekul cairan. Dalam isolasi cair kekuatan dielektrik setara dengan tegangan yang terjadi<sup>[2]</sup>. Menurut hukum Paschen's, kekuatan dielektrik cair berkisar antara 10<sup>7</sup> V/cm. Dielektrik cair akan mengisi volume ruang yang harus diisolasi dan secara simultan akan mendisipasikan panas yang timbul secara konveksi.<sup>[3]</sup> Dielektrik cair

mempunyai kerapatan 1000 kali lebih besar daripada dielektrik gas sehingga kekuatan dielektriknya lebih tinggi daripada dielektrik gas<sup>[1]</sup>. Kelebihan lain dari dielektrik cair murni yaitu mempunyai kemampuan untuk memperbaiki diri sendiri jika terjadi suatu pelepasan muatan (*discharge*). Salah satu kekurangan dielektrik cair yaitu mudah terkontaminasi.

### 2.3 Sifat-Sifat Dielektrik Cair

#### 2.3.1 Sifat Fisika

Sifat-sifat fisika menjelaskan sifat isolasi cair secara umum yang nantinya digunakan dalam proses perencanaan peralatan. Sifat-sifat fisika yang terpenting adalah<sup>[12]</sup>:

- a. Kejernihan (*Appearance*)
- b. Massa jenis (*Density*)
- c. Viskositas kinematik (*Kinematic viscosity*)
- d. Titik nyala (*Flash point*)
- e. Titik tuang (*Pour point*)
- f. Angka Kenetralan

#### 2.3.2 Sifat Kelistrikan

Adapun sifat-sifat kelistrikan dari isolasi cair antara lain<sup>[12]</sup>:

1. Tegangan tembus atau gagal (*Breakdown Voltage*)
2. Resistivitas (*Resistivity*)
3. Faktor Kebocoran Dielektrik (*Dielectric Dissipation Factor*)
4. Permittivitas (*Permittivity*)

#### 2.3.3 Viskositas

Viskositas atau biasa disebut kekentalan sangat penting pada isolasi cair. Hal ini dikarenakan viskositas berpengaruh pada kemurnian isolasi cair (banyaknya kontaminan partikel padat) dan pendinginan suatu peralatan listrik. Selain sebagai media isolasi biasanya isolasi cair juga berfungsi dalam proses pendinginan. Isolasi cair yang baik haruslah mempunyai viskositas yang rendah sehingga kemungkinan isolasi cair terkontaminasi akan kecil. Selain itu jika viskositas isolasi cair rendah, proses sirkulasi isolasi cair pada peralatan listrik akan berlangsung dengan baik sehingga akhirnya pendinginan inti dan belitan transformator dapat berlangsung dengan sempurna.

Viskositas dinamis dalam isolasi cair dinyatakan dalam persamaan<sup>[20]</sup>:

$$\mu = \frac{2r^2g}{9v} \rho - \rho^1 \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan

- $\eta$  = viskositas (poise)
- $r$  = jari-jari bola ukur (cm)
- $g$  = gaya grafitasi
- $v$  = kecepatan bola ukur (cm/s)
- $\rho$  = massa jenis bola ukur (g/cm<sup>3</sup>)
- $\rho^1$  = massa jenis isolasi cair (g/cm<sup>3</sup>)

Sedangkan nilai viskositas pada minyak trafo dinyatakan dengan satuan cSt, yaitu satuan untuk viskositas kinematik yang dinyatakan dengan persamaan:

$$V = \frac{\mu}{\rho_1} \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan :

- V = viskositas kinematik (St)
- $\mu$  = viskositas dinamis (poise)
- $\rho^1$  = massa jenis isolasi cair ( $\text{g/cm}^3$ )
- 1 St = 100 cSt

### 2.3.4 Karakteristik Minyak Terhadap Temperatur

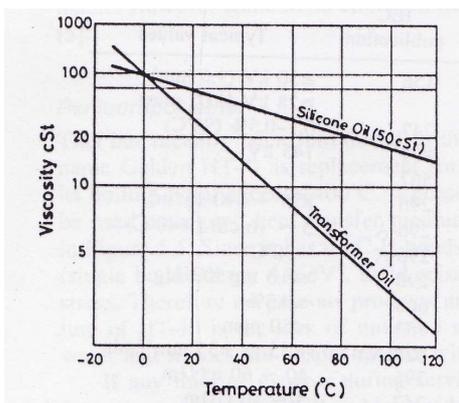
Pada peralatan yang menggunakan sistem isolasi minyak, panas dialirkan secara konveksi. Proses aliran panas secara konveksi (N) dapat dihitung dengan:

$$N = \left( \frac{K^3 AC}{v} \right)^n \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan:

- K = konduktivitas thermal
- A = koefisien pemuai
- C = panas/satuan volume
- v = viskositas kinematik
- n = konstanta (0,25~0,33)

Dari persamaan 2.14, aliran panas sangat bergantung pada konduktivitas thermal, koefisien pemuai, dan panas per satuan volume. Secara umum pada dielektrik cair besarnya koefisien pemuai (A) dan panas per satuan volume (C) tidak terlalu berpengaruh, tetapi nilai viskositas kinematik (v) sangat mempengaruhi aliran panas.



Gambar 2.1 Karakteristik temperatur terhadap viskositas pada minyak trafo dan minyak silikon<sup>[3]</sup>

Dari gambar 2.7 dapat dilihat bahwa dengan semakin naiknya temperatur maka viskositas pada minyak trafo akan semakin menurun. Kenaikan temperatur ini akan menyebabkan molekul-molekul pada minyak akan merenggang sehingga minyak akan menjadi lebih cair karena nilai viskositasnya kecil.

### 2.4 Teori Kegagalan Dielektrik Cair

Teori kegagalan isolasi yang terjadi pada minyak transformator dibagi menjadi empat jenis sebagai berikut:

#### 1. Teori kegagalan elektronik

Teori ini merupakan perluasan dari teori kegagalan pada gas, artinya proses kegagalan yang terjadi dalam dielektrik cair karena adanya banjir elektron (*electron avalanche*) pada gas. Pancaran medan elektron dari katoda di asumsikan bertabrakan dengan atom dielektrik cair. Jika energi medan yang dihasilkan dari tabrakan sudah cukup besar, sebagian elektron akan terlepas dari atom dan akan bergerak menuju anoda bersama dengan elektron bebas. Banjiran elektron ini serupa dengan peluahan yang terjadi pada gas dan peristiwa ini akan mengawali proses terjadinya kegagalan.

#### 2. Teori kegagalan karena adanya gelembung gas

Yaitu ketakmurnian (misalnya gelembung udara) mempunyai tegangan gagal yang lebih rendah dari zat cair, disini adanya gelembung udara dalam cairan merupakan awal dari pencetus kegagalan total dari pada zat cair. Kegagalan gelembung merupakan bentuk kegagalan isolasi cair yang disebabkan oleh gelembung-gelembung gas didalamnya.

#### 3. Teori kegagalan partikel padat

Partikel debu atau serat selulosa yang ada disekeliling isolasi padat (kertas) seringkali ikut tercampur dengan minyak. Selain itu partikel padat ini pun dapat terbentuk ketika terjadi pemanasan dan tegangan lebih. Pada saat terjadi medan listrik, partikel – partikel ini akan terpolarisasi dan membentuk jembatan. Arus akan mengalir melalui jembatan dan menghasilkan pemanasan local serta menyebabkan terjadinya kegagalan.

#### 4. Teori kegagalan bola cair

Air dan uap air terdapat pada minyak, terutama pada minyak yang telah lama digunakan. Jika terdapat medan listrik, maka molekul uap air yang terlarut memisah dari minyak dan terpolarisasi membentuk suatu dipole. Jika jumlah molekul molekul uap air ini banyak, maka akan tersusun semacam jembatan yang menghubungkan kedua elektroda, sehingga terbentuk suatu kanal peluahan. Kanal ini akan merambat dan memanjang sampai terjadi tembus listrik.

### 2.5 Minyak Trafo Sebagai Bahan Isolasi

Minyak trafo sering digunakan dalam peralatan tegangan tinggi. Minyak trafo merupakan jenis minyak organik. Minyak trafo hampir tidak berwarna yang tersusun dari senyawa hidrokarbon yang terdiri dari paraffin, iso-paraffin, naphthalene dan aromatic. Ketika diaplikasikan untuk jangka waktu tertentu, minyak trafo difungsikan untuk mengalirkan panas dan pada suhu 95°C akan mengakibatkan proses penuaan pada minyak serta mengakibatkan warna minyak akan menjadi lebih gelap karena adanya zat pengotor dan resin atau lumpur pada minyak.

Beberapa pengotor mempunyai sifat korosif terhadap material isolasi padat dan bagian-bagian konduktor pada trafo. Lumpur yang menumpuk pada inti trafo, lilitan dan didalam saluran minyak akan menghambat sirkulasi minyak sehingga proses aliran panas akan terhambat<sup>[1]</sup>.

### 2.6 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian yang harus diperhatikan sebelum melakukan pengujian tegangan tembus isolasi cair menurut IEC 156 antara lain<sup>[7]</sup> :

- a. Persiapan Sampling
 

Sesegera mungkin sebelum mengisi kotak uji, sampling harus dikocok berulang kali secara lembut untuk memastikan adanya homogenisasi kontaminan cairan tanpa menimbulkan gelembung udara pada cairan.
- b. Pengisian Kotak Uji
 

Sebelum melaksanakan pengujian, bersihkan kotak uji, dinding-dindingnya, elektroda dan komponen lainnya. Kemudian tuang kedalam kotak uji secara perlahan dan hindari terjadinya gelembung-gelembung udara.
- c. Pemberian Tegangan
 

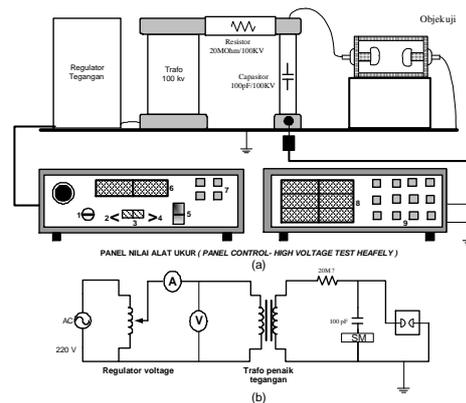
Berikan tegangan pada elektroda dengan kenaikan yang seragam (konstan) dimulai dari 0 V sampai sekitar 2,0 kV/dt ± 0.2 kV/dt sampai timbul tegangan tembus.
- d. Pencatatan data
 

Lakukan 6 kali percobaan tembus pada kotak uji yang sama dengan jeda sekurang-kurangnya 2 menit dari setiap pengujian baru kemudian diulang kembali. Pastikan tidak muncul gelembung udara diantara jarak sela. Kecuali jika menggunakan pengaduk maka percobaan dapat dilakukan secara terus-menerus.
- e. Laporan
 

Data yang dimasukkan dalam laporan adalah hasil dari nilai rata-rata dari 6 kali percobaan yang sudah dilakukan.

### III. METODE PENELITIAN

Pengujian tegangan tembus yang dilakukan menggunakan standar IEC 156 menggunakan elektroda medan seragam yaitu elektroda setengah bola-setengah-bola dan elektroda bola-bola dengan suhu minyak dari 30<sup>0</sup>C sampai 130<sup>0</sup>C. Minyak trafo yang digunakan pada pengujian ini adalah minyak trafo *shell dials B* .Untuk mendapatkan nilai tegangan tembus dari minyak trafo ini, minyak di uji dengan menggunakan rangkaian uji seperti gambar 3.1 dibawah ini.

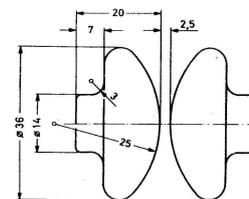


Gambar 3.1 Rangkaian Pengujian  
 a. Rangkaian pengujian  
 b. Rangkaian ekuivalen pengujian

### 3.1 Elektroda Uji

#### 3.1.1 Elektroda Setengah Bola

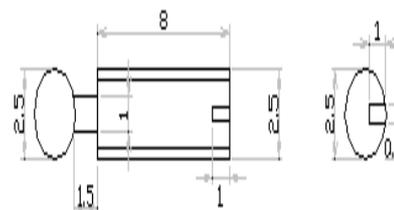
Elektroda setengah bola yang digunakan standar IEC 156 untuk pengukuran tegangan tembus isolasi cair mempunyai diameter 50 mm. Elektroda setengah bola dibuat dengan menggunakan bahan aluminium. Jarak elektroda pada saat pengujian adalah 2 mm dan 2.5 mm, dan 3 mm hal ini dilakukan karena jarak sela elektroda akan mempengaruhi tegangan tembus yang diterapkan pada isolasi cair.



Gambar 3.2 Elektroda setengah bola

#### 3.1.2 Elektroda Bola

Elektroda bola yang digunakan untuk pengukuran tegangan tembus minyak trafo mempunyai diameter 25 mm . Elektroda bola digunakan sebagai contoh penggunaan bentuk elektroda seragam dan selain itu, elektroda bola juga digunakan untuk menganalisis pengaruh jarak sela antar elektroda.



Gambar 3.3 Elektroda Bola

### 3.2 Teknik Pengambilan Data

Pengambilan data ini bertujuan untuk mengetahui tegangan tembus dari minyak trafo *shell diala B*. Pada pengujian tegangan tembus ini tegangan diterapkan pada salah satu elektroda dan elektroda yang lain dihubungkan dengan tanah (*ground*), tegangan akan terus naik sampai terjadi tembus pada bahan uji.

Pengujian dilakukan dengan variasi suhu dari 30°C sampai 130°C dengan kelipatan suhu pengujian setiap 10°C dan variasi jarak sela antar elektroda 2 mm, 2,5 mm, dan 3 mm. Pengujian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kekuatan isolasi dari minyak trafo baru dengan membandingkan nilai tegangan tembus dengan variasi jarak sela dan perbedaan suhu. Pengambilan data ini tidak dipengaruhi oleh parameter-parameter yang ada seperti kelembaban dan tekanan udara. Hal ini disebabkan keterbatasan peralatan yang digunakan.

## IV. HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian yang telah dilakukan pada minyak trafo *shell diala B* dengan metode uji IEC 156 dan rangkaian pengujian seperti pada gambar 3.1. Elektroda uji medan seragam yang digunakan adalah elektroda setengah bola-setengah bola dan elektroda bola-bola dengan menerapkan suhu minyak trafo dari 30°C sampai 130°C. Data pengujian yang didapatkan adalah sebagai berikut :

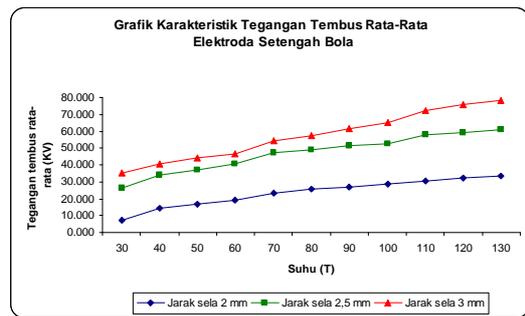
1. Pengujian tegangan tembus menggunakan elektroda setengah bola-setengah bola dengan suhu dan jarak sela antar elektroda yang berbeda-beda.
2. Pengujian tegangan tembus menggunakan elektroda bola-bola dengan suhu dan jarak sela antar elektroda yang berbeda-beda.

### 4.1 Analisis

#### 4.1.1 Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Transformator *Shell Diala B* Pengaruh Perbedaan Suhu dan Jarak Sela dengan Elektroda Uji Setengah Bola-Setengah Bola

##### a. Karakteristik tegangan tembus terhadap suhu

Pengujian tegangan tembus minyak trafo *shell diala B* dilakukan dengan menerapkan variasi suhu pada minyak trafo dari 30°C sampai 130°C. Dari hasil pengujian yang telah didapatkan, diperoleh gambar grafik karakteristik yang menunjukkan tegangan tembus minyak transformator *shell diala B* dengan pengaruh perbedaan suhu pada minyak saat pengujian dengan menggunakan elektroda uji setengah bola-setengah bola. Pengujian tegangan tembus pada minyak trafo dilakukan saat suhu minyak trafo 30°C sampai dengan 130°C, di uji setiap kenaikan suhu sebesar 10°C.

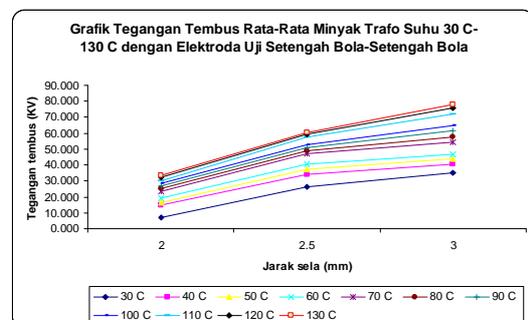


Gambar 4.1 Grafik karakteristik tegangan tembus rata-rata minyak trafo pada suhu 30°C -130°C pada elektroda setengah bola-setengah bola

Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa karakteristik minyak trafo *shell diala B* pada pengujian tegangan tembus dengan menggunakan elektroda uji setengah bola-setengah bola, tegangan tembus minyak trafo *shell diala B* semakin meningkat seiring dengan semakin naiknya suhu pada minyak trafo. Hal ini disebabkan faktor kontaminasi atau ketidakmurnian zat, misalnya seperti adanya bola cair dari jenis cairan yang lain (air) sehingga pada saat terjadi pemanasan minyak trafo maka akan terjadi penguapan pada bola cair tersebut. Proses penguapan ini akan mengurangi jumlah bola cair yang berada di dalam minyak. Ketidakmurnian dalam minyak trafo menyebabkan kondisi yang tidak stabil dalam medan listrik dan merupakan jembatan konduktif di antara elektroda yang dapat menyebabkan kegagalan. Pemanasan minyak trafo dapat membuat bola air tersebut menguap sehingga minyak trafo menjadi lebih stabil yang menyebabkan tingkat ketahanan isolasi meningkat pada saat tegangan diterapkan.

##### b. Karakteristik tegangan tembus terhadap jarak sela

Pengujian tegangan tembus minyak trafo *shell diala B* dilakukan dengan menerapkan variasi jarak sela dari elektroda uji untuk setiap minyak dengan suhu dari 30°C sampai 130°C. Dari hasil pengujian yang telah didapatkan, diperoleh gambar grafik karakteristik yang menunjukkan tegangan tembus minyak transformator *shell diala B* dengan pengaruh perbedaan jarak sela elektroda saat pengujian dengan menggunakan elektroda uji setengah bola-setengah bola.



Gambar 4.2 Grafik karakteristik tegangan tembus rata-rata elektroda setengah bola-setengah bola dengan

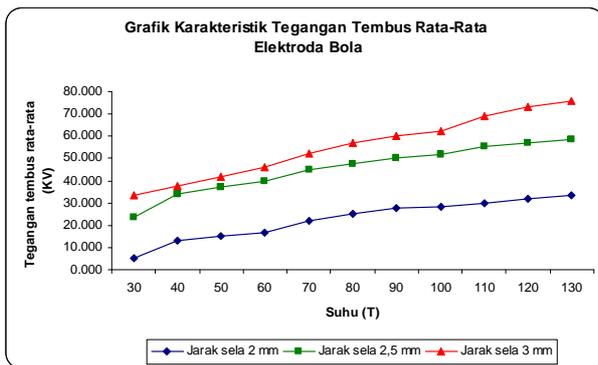
suhu minyak trafo  $30^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C}$  dengan perbedaan jarak sela elektroda.

Dari gambar 4.2 dapat dilihat bahwa karakteristik minyak trafo *shell diala B* untuk setiap suhu tertentu akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak sela antar elektroda. Ini disebabkan karena jika jarak sela antara elektroda yang semakin jauh, tegangan yang diterapkan harus besar karena membutuhkan kuat medan yang besar untuk proses ionisasi gas di dalam minyak trafo tersebut. Pada jarak sela yang semakin besar maka medan listrik yang dibutuhkan besar sehingga energi benturan elektron dalam gelembung udara juga besar. Hal ini akan meningkatkan kuat medan listrik untuk terjadinya kegagalan pada zat cair tersebut. Sedangkan pada jarak yang kecil dengan medan sangat kuat, proses ionisasi gas di dalam minyak trafo akan semakin mudah terjadi, akibatnya tegangan yang diterapkan akan dengan mudah menembus minyak transformator.

#### 4.1.2 Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Tranformator Shell Diala B Pengaruh Perbedaan Suhu dan Jarak Sela dengan Elektroda Uji Bola- Bola

##### a. Karakteristik tegangan tembus terhadap suhu

Pengujian tegangan tembus minyak trafo *shell diala B* dilakukan dengan menerapkan variasi suhu pada minyak trafo dari  $30^{\circ}\text{C}$  sampai  $130^{\circ}\text{C}$ . Dari hasil pengujian yang telah didapatkan, diperoleh gambar grafik karakteristik yang menunjukkan tegangan tembus minyak transformator *shell diala B* dengan pengaruh perbedaan suhu pada minyak saat pengujian dengan menggunakan elektroda uji bola- bola. Pengujian tegangan tembus pada minyak trafo dilakukan saat suhu minyak trafo  $30^{\circ}\text{C}$  sampai dengan  $130^{\circ}\text{C}$ , di uji setiap kenaikan suhu sebesar  $10^{\circ}\text{C}$ .



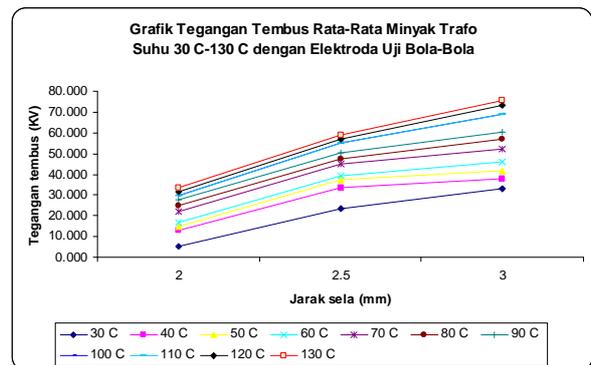
Gambar 4.3 Grafik karakteristik tegangan tembus rata-rata minyak trafo pada suhu  $30^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C}$  pada elektroda bola-bola.

Dari gambar 4.3 dapat dilihat bahwa karakteristik minyak trafo *shell diala B* pada pengujian tegangan tembus dengan menggunakan elektroda uji setengah bola-setengah bola, tegangan tembus minyak trafo *shell diala B* semakin meningkat seiring dengan semakin

naiknya suhu pada minyak trafo. Hal ini disebabkan faktor kontaminasi atau ketidakmurnian zat, misalnya seperti adanya bola cair dari jenis cairan yang lain (air) sehingga pada saat terjadi pemanasan minyak trafo maka akan terjadi penguapan pada bola cair tersebut. Proses penguapan ini akan mengurangi jumlah bola cair yang berada di dalam minyak. Ketidakmurnian dalam minyak trafo menyebabkan kondisi yang tidak stabil dalam medan listrik dan merupakan jembatan konduktif di antara elektroda yang dapat menyebabkan kegagalan. Pemanasan minyak trafo dapat membuat bola air tersebut menguap sehingga minyak trafo menjadi lebih stabil yang menyebabkan tingkat ketahanan isolasi meningkat pada saat tegangan diterapkan.

##### b. Karakteristik tegangan tembus terhadap jarak sela

Pengujian tegangan tembus minyak trafo *shell diala B* dilakukan dengan menerapkan variasi jarak sela dari elektroda uji untuk setiap minyak dengan suhu dari  $30^{\circ}\text{C}$  sampai  $130^{\circ}\text{C}$ . Dari hasil pengujian yang telah didapatkan, diperoleh gambar grafik karakteristik yang menunjukkan tegangan tembus minyak transformator *shell diala B* dengan pengaruh perbedaan jarak sela elektroda saat pengujian dengan menggunakan elektroda uji bola-bola.



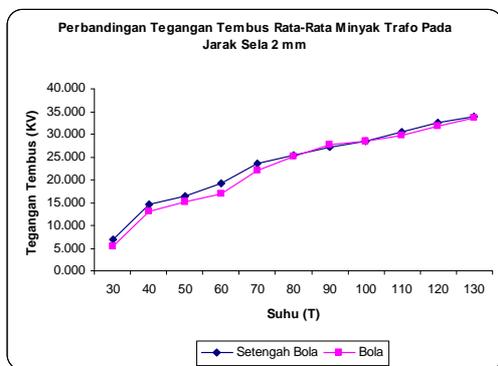
Gambar 4.4 Grafik karakteristik tegangan tembus rata-rata elektroda bola-bola dengan suhu minyak trafo  $30^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C}$  dengan perbedaan jarak sela elektroda.

Dari gambar 4.4 dapat dilihat bahwa karakteristik minyak trafo *shell diala B* untuk setiap suhu tertentu akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak sela antar elektroda. Ini disebabkan karena jika jarak sela antara elektroda yang semakin jauh, tegangan yang diterapkan harus besar karena membutuhkan kuat medan yang besar untuk proses ionisasi gas di dalam minyak trafo tersebut. Pada jarak sela yang semakin besar maka medan listrik yang dibutuhkan besar sehingga energi benturan elektron dalam gelembung udara juga besar. Hal ini akan meningkatkan kuat medan listrik untuk terjadinya kegagalan pada zat cair tersebut. Sedangkan pada jarak yang kecil dengan medan sangat

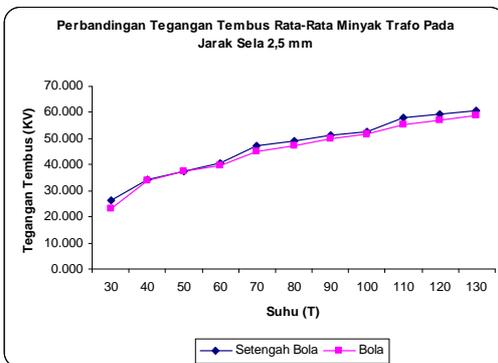
kuat, proses ionisasi gas di dalam minyak trafo akan semakin mudah terjadi, akibatnya tegangan yang diterapkan akan dengan mudah menembus minyak transformator.

#### 4.1.3 Perbandingan Tegangan Tembus Minyak Tranformator Shell Diala B dengan Elektroda Uji Setengah Bola-Setengah Bola dan Elektroda Uji Bola-Bola

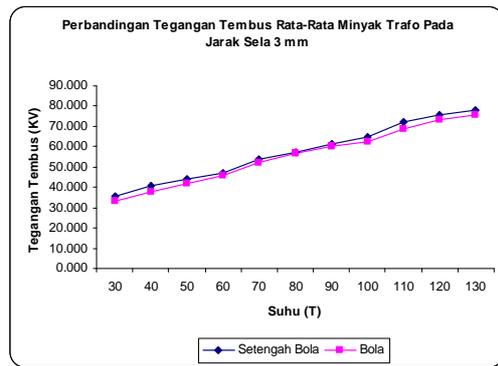
Dari hasil pengujian tegangan tembus minyak trafo *shell diala B* yang diuji menggunakan elektroda setengah bola-setengah bola dan bola-bola, dapat diperoleh gambar grafik karakteristik perbandingan tegangan tembus minyak trafo *shell diala B* terhadap suhu minyak menggunakan elektroda setengah bola-setengah bola dengan elektroda bola-bola.



Gambar 4.5 Grafik perbandingan tegangan tembus minyak trafo elektroda setengah bola-setengah bola dengan elektroda bola-bola pada jarak sela 2 mm



Gambar 4.6 Grafik perbandingan tegangan tembus minyak trafo elektroda setengah bola-setengah bola dengan elektroda bola-bola pada jarak sela 2,5 mm



Gambar 4.7 Grafik perbandingan tegangan tembus minyak trafo elektroda setengah bola-setengah bola dengan elektroda bola-bola pada jarak sela 3 mm

Dari gambar 4.5 sampai 4.7 dapat dilihat bahwa nilai tegangan tembus minyak trafo dengan suhu 30°C sampai 130°C yang di uji dengan menggunakan elektroda setengah bola-setengah bola nilai tegangan tembusnya untuk setiap jarak sela selalu lebih besar dari pada nilai tegangan tembus minyak trafo yang di uji dengan elektroda uji bola-bola. Hal ini disebabkan oleh diameter dari elektroda setengah bola lebih besar daripada diameter elektroda bola. Diameter elektroda setengah bola pada pengujian tegangan tembus ini adalah 50 mm, sedangkan diameter elektroda bola adalah 25 mm sehingga perbedaan diameter ini mempengaruhi luas permukaan dari elektroda. Luas permukaan setiap elektroda dapat dihitung, yaitu :

- Elektroda setengah bola  
Diameter = 50 mm  
Jari-jari (r) = 25 mm  
Sehingga luas permukaan dari setengah bola adalah :

$$A = \frac{4\pi r^2}{2} = \frac{4\pi 25^2}{2} = 1250\pi \text{mm}^2$$

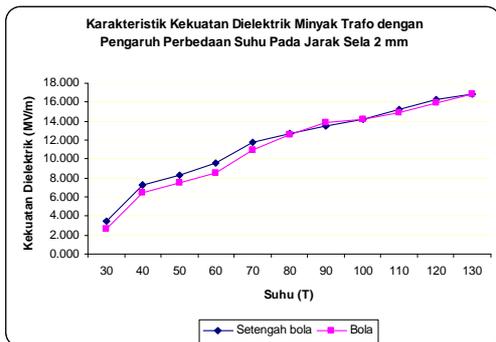
- Elektroda bola  
Diameter = 25 mm  
Jari-jari (r) = 12,5 mm  
Sehingga luas permukaan dari bola adalah :

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi 12,5^2 = 625\pi \text{mm}^2$$

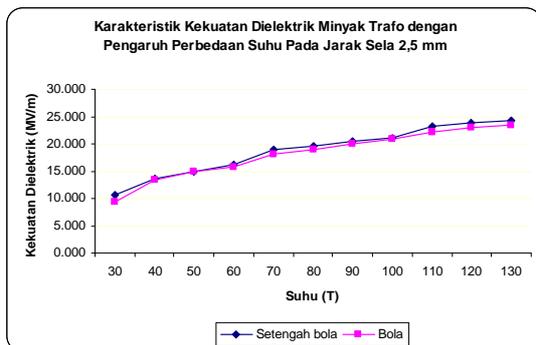
Dari hasil perhitungan luas permukaan kedua elektroda, diketahui bahwa luas permukaan elektroda setengah bola lebih besar daripada elektroda bola. Hal ini menyebabkan nilai tegangan tembus minyak trafo yang di uji dengan menggunakan elektroda setengah bola menjadi lebih besar daripada minyak trafo yang di uji dengan elektroda bola, karena luas permukaan elektroda mempengaruhi kerapatan elektron pada elektroda, semakin besar luas permukaan suatu elektroda maka kerapatan elektron akan semakin kecil, sehingga elektroda akan sulit untuk melepaskan elektronnya. Semakin besar luas permukaan elektroda maka dibutuhkan tegangan yang lebih besar untuk menghasilkan medan listrik yang besar pula supaya terjadi proses tembus isolasi.

#### 4.1.4 Kekuatan Dielektrik Minyak Trafo Shell Diala B

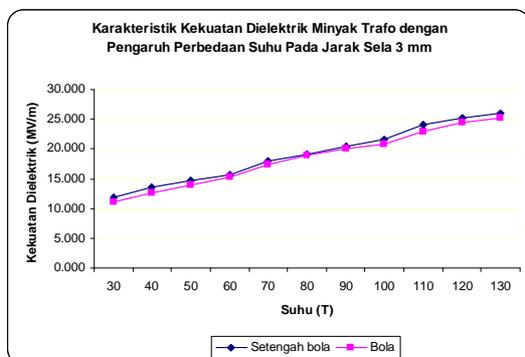
Dari hasil pengujian tegangan tembus yang sudah dilakukan, dapat dihitung kekuatan dielektrik dari minyak trafo *shell diala B*. Kekuatan dielektrik adalah nilai maksimum dari medan elektrik yang diaplikasikan pada suatu material dielektrik, tekanan medan seragam pada elektroda, kegagalan, dan rugi-rugi pada dielektrik itu sendiri. Satuan dari kekuatan dielektrik adalah V/m. Dibawah ini ditampilkan grafik karakteristik kekuatan dielektrik terhadap perubahan suhu minyak trafo.



Gambar 4.8 Grafik karakteristik kekuatan dielektrik minyak trafo *shell diala B* terhadap perbedaan suhu minyak pada jarak sela antar elektroda 2 mm



Gambar 4.9 Grafik karakteristik kekuatan dielektrik minyak trafo *shell diala B* terhadap perbedaan suhu minyak pada jarak sela antar elektroda 2,5 mm



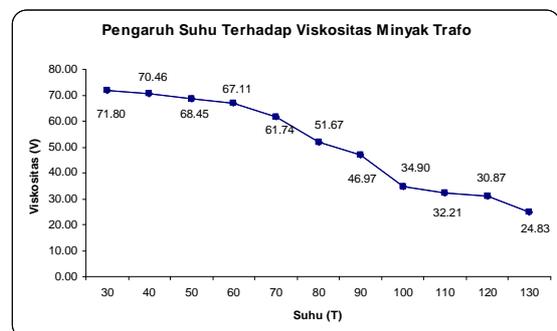
Gambar 4.10 Grafik karakteristik kekuatan dielektrik minyak trafo *shell diala B* terhadap perbedaan suhu minyak pada jarak sela antar elektroda 3 mm

Dari gambar 4.8 sampai gambar 4.10 dapat dilihat bahwa nilai kekuatan dielektrik dari minyak trafo *shell diala B* baik yang di uji dengan menggunakan elektroda setengah bola-setengah bola maupun elektroda bola-bola mempunyai karakteristik yang sama, yaitu kekuatan dielektrik dari minyak trafo *shell diala B* berbanding lurus dengan kenaikan suhu pada minyak. Semakin naik suhu pada minyak trafo maka kekuatan dielektrik pada minyakpun akan semakin besar.

Pada saat suhu minyak yang lebih rendah gelembung-gelembung atau bola-bola cair yang terkandung didalam minyak masih banyak, sehingga tingkat konduktivitas dari minyak masih tinggi. Karena tingkat konduktivitas dari minyak ini masih tinggi ketika diterapkan medan tinggi maka minyak trafo akan mudah mengalami kegagalan isolasi. Sedangkan pada suhu minyak yang lebih tinggi gelembung-gelembung atau bola-bola cair ini akan menguap sebagian karena titik didih dari bola-bola cair ini lebih rendah daripada titik didih minyak trafo sehingga pada suhu yang lebih tinggi kandungan bola-bola cair pada minyak akan lebih sedikit. Hal ini akan mengurangi tingkat konduktivitas dari minyak trafo dan ketika pada minyak diterapkan suatu medan tinggi yang besarnya sama dengan yang diterapkan pada minyak trafo bersuhu rendah maka kegagalan isolasi akan semakin sulit terjadi.

#### 4.1.5 Viskositas Minyak Trafo Terhadap Perubahan Suhu

Untuk mengetahui nilai viskositas dari minyak yang digunakan, dilakukan pengujian untuk mengetahui nilai viskositas dari minyak trafo. Pengujian viskositas minyak trafo menggunakan media uji silica gel yang nantinya dijatuhkan didalam minyak trafo untuk mendapatkan nilai waktu jatuh setelah menempuh jarak jatuhnya. Setelah mendapatkan waktu jatuh dari media uji (silica gel), dengan menggunakan persamaan 2.1 dan 2.2 akan didapatkan nilai viskositas kinematik untuk minyak trafo *shell diala B*. Dibawah ini ditampilkan grafik karakteristik viskositas minyak trafo *shell diala B* pada suhu minyak trafo 30°C sampai 130°C.



Gambar 4.11 Grafik karakteristik suhu terhadap viskositas minyak trafo *shell diala B*

Dari gambar 4.11 dapat dilihat bahwa semakin naik suhu pada minyak trafo maka viskositas minyak trafo akan semakin menurun. Semakin naik suhu pada

minyak maka molekul-molekul pada minyak trafo akan semakin melebar jaraknya atau memuai. Peristiwa ini ditandai dengan minyak trafo akan terlihat semakin cair.

#### 4.1.6 Analisis Viskositas Minyak Terhadap Tegangan Tembus Minyak Trafo

Viskositas pada minyak sangat berpengaruh terhadap kemampuan untuk menahan medan tinggi yang diterapkan pada media isolasi. Hal ini dikarenakan viskositas berpengaruh pada kemurnian isolasi cair (banyaknya kontaminan-kontaminan) dan pendinginan suatu peralatan listrik. Selain sebagai media isolasi biasanya isolasi cair juga berfungsi dalam proses pendinginan. Isolasi cair yang baik haruslah mempunyai viskositas yang rendah sehingga kemungkinan isolasi cair terkontaminasi akan kecil. Jika tingkat kontaminan pada minyak trafo tinggi, maka proses kegagalan isolasi akan semakin mudah terjadi karena kontaminan-kontaminan didalam minyak akan menjadi jembatan yang bersifat konduktif.

Pada tabel 4.1 sampai tabel 4.3 ditampilkan pengaruh viskositas minyak trafo terhadap tegangan tembus yang terjadi.

Tabel 4.1 Pengaruh viskositas terhadap tegangan tembus dengan elektroda uji setengah bola-setengah bola jarak sela 2 mm

Suhu (°C)	V (cst)	Vb Setengah bola (KV <sub>rms</sub> )	Vb Bola (KV <sub>rms</sub> )
30	71.80	6.935	5.398
40	70.46	14.609	12.954
50	68.45	16.510	15.021
60	67.11	19.186	16.974
70	61.74	23.476	21.934
80	51.67	25.449	25.044
90	46.97	27.074	27.748
100	34.90	28.380	28.390
110	32.21	30.439	29.801
120	30.87	32.497	31.800
130	24.83	33.731	33.582

Tabel 4.2 Pengaruh viskositas terhadap tegangan tembus dengan elektroda uji setengah bola-setengah bola jarak sela 2,5 mm

Suhu (°C)	V (cst)	Vb Setengah bola (KV <sub>rms</sub> )	Vb Bola (KV <sub>rms</sub> )
30	71.80	26.456	23.348
40	70.46	34.246	33.770
50	68.45	37.283	37.277
60	67.11	40.445	39.506
70	61.74	47.086	45.210
80	51.67	49.009	47.473
90	46.97	51.082	50.136
100	34.90	52.720	51.924
110	32.21	57.790	55.218

120	30.87	59.328	57.191
130	24.83	60.636	58.774

Tabel 4.3 Pengaruh viskositas terhadap tegangan tembus dengan elektroda uji setengah bola-setengah bola jarak sela 3 mm

Suhu (°C)	V (cst)	Vb Setengah bola (KV <sub>rms</sub> )	Vb Bola (KV <sub>rms</sub> )
30	71.80	35.288	33.239
40	70.46	40.707	37.834
50	68.45	44.021	41.645
60	67.11	46.794	45.791
70	61.74	54.152	52.188
80	51.67	57.478	56.784
90	46.97	61.453	60.182
100	34.90	64.974	62.370
110	32.21	71.956	69.036
120	30.87	75.812	73.336
130	24.83	77.953	75.703

Dari tabel 4.1 sampai 4.3 terlihat bahwa semakin kecil nilai viskositas minyak trafo maka tegangan tembusnya akan semakin besar, baik itu pada pengujian tegangan tembus dengan menggunakan elektroda setengah bola- setengah bola maupun bola-bola. Hal ini dikarenakan saat minyak trafo nilai viskositasnya tinggi, tingkat kontaminan yang terdapat didalam minyak trafo juga tinggi. Kontaminan yang terdapat didalam minyak trafo ini jika dikenai medan listrik maka kontaminan-kontaminan ini akan mendapatkan gaya listrik akibat dikenai medan listrik. Jika kehadiran dari kontaminan ini sangat banyak, maka gaya yang terjadi pada partikel ini akan terhubung dan akan terbentuk suatu jembatan konduktif yang menjembatani sela elektroda yang dapat mengakibatkan kegagalan (*breakdown*) antara elektroda.

Nilai kekuatan kegagalan pada dielektrik cair yang mengandung pengotor padat ini akan lebih rendah dari pada dielektrik cair murni. Kehadiran kontaminan ini akan menurunkan kekuatan kegagalan dari dielektrik cair dan jika partikel kontaminan ini mempunyai ukuran yang besar maka nilai kekuatan kegagalannya akan semakin rendah.

#### 4.1.7 Fenomena Tegangan Tembus Minyak Trafo

Suatu dielektrik dalam hal ini isolasi cair mempunyai elektron-elektron yang terikat pada struktur molekul yang membentuk dielektrik cair tersebut. Jika suatu tegangan diterapkan pada elektroda yang di celup pada isolasi cair maka akan timbul medan listrik pada isolasi cair tersebut. Medan listrik yang muncul dari elektroda bertegangan tinggi ini akan memberi gaya kepada elektron-elektron agar terlepas dari ikatannya dan menjadi elektron bebas. Sehingga medan listrik ini merupakan beban yang menekan isolasi cair agar berubah sifat menjadi konduktor.

Isolasi cair yang digunakan dalam pengujian ini adalah minyak trafo, pada saat tegangan diterapkan pada dua buah elektroda yang dicelup pada minyak trafo maka akan timbul medan listrik dalam minyak trafo tersebut. Medan listrik ini akan mengionisasi elektron-elektron dan memberikan gaya pada elektron-elektron yang terikat pada struktur molekul minyak trafo agar terlepas dari ikatannya. Jika elektron yang terionisasi semakin banyak maka akan terjadi banjir elektron (*avalanche*) dan elektron akan bergerak ke arah elektroda yang lain karena gaya akibat ionisasi. Banjiran elektron ini akan membentuk suatu jembatan konduktif. Jika jembatan konduktif ini semakin besar maka akan terjadi peristiwa tembus isolasi (*breakdown*).

Untuk memperoleh tegangan tembus pada setiap pengujian, tegangan uji diberikan pada sistem secara bertahap dengan tingkat kenaikan yang sama per satuan waktu menggunakan peralatan pengontrol. Dengan demikian dapat diamati fenomena apa saja yang terjadi selama pelaksanaan pengujian dengan digolongkan kedalam kelompok sebagai berikut :

- **Peristiwa Sesaat Sebelum Terjadi Tembus Isolasi**

Proses sebelum terjadi tembus isolasi dimulai dengan menaikkan tegangan uji secara bertahap dari tegangan rendah sampai tegangan mendekati tegangan tembus isolasi. Saat tegangan mendekati tegangan tembus isolasi akan terdengar suara mendesis yang menandakan adanya kebocoran atau tembus sebagian pada minyak trafo.

- **Peristiwa Saat Terjadi Tembus Isolasi**

Ketika tegangan uji dinaikkan dan terjadi tembus isolasi pada minyak akan muncul lucutan diantara kedua elektroda uji. Lucutan ini adalah peristiwa lompatan elektron dari elektroda (katoda) ke elektroda (anoda) yang lain. Selain muncul lucutan, muncul juga suara ledakan. Suara ini karena adanya benturan elektron terhadap elektroda yang dihubungkan dengan sistem pentanahan (*ground*).

- **Peristiwa Sesudah Terjadi Tembus Isolasi**

Setelah terjadi tembus isolasi, pada minyak trafo muncul gelembung gas dan adanya kabut hitam didalam minyak trafo. Hal ini menurut Arismunandar disebabkan oleh:

1. Permukaan elektroda tidak rata, sehingga terdapat kantong-kantong udara di permukaannya
2. Adanya tabrakan elektron saat terjadi tegangan tembus, sehingga muncul produk-produk baru berupa gelembung gas atau arang,
3. Adanya penguapan cairan karena lucutan pada bagian-bagian elektroda yang tajam dan tak teratur
4. Zat cair dikenai perubahan suhu dan tekanan

## V. PENUTUP

### Kesimpulan

Dari hasil uji dan data tegangan tembus yang telah didapatkan, muncul beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Tegangan tembus minyak trafo *shell dila B* akan semakin besar nilainya dengan naiknya suhu pada minyak trafo dan semakin jauhnya jarak sela antar elektroda. Hal ini dapat dilihat pada grafik karakteristik tegangan tembus terhadap suhu pada gambar 4.1 untuk pengujian menggunakan elektroda setengah bola-setengah bola dan gambar 4.3 untuk pengujian menggunakan elektroda bola-bola. Sedangkan grafik karakteristik tegangan tembus terhadap jarak sela dapat dilihat pada gambar 4.2 untuk pengujian menggunakan elektroda setengah bola-setengah bola dan gambar 4.4 untuk pengujian dengan menggunakan elektroda bola-bola.
2. Tegangan tembus minyak trafo *shell dila B* saat di uji dengan elektroda setengah bola-setengah bola lebih besar nilainya dari pada pengujian dengan menggunakan elektroda bola-bola. Hal ini dapat dilihat pada grafik karakteristik gambar 4.5 sampai gambar 4.7.
3. Kekuatan dielektrik minyak trafo *shell dila B* akan semakin besar dengan semakin naiknya suhu pada minyak. Hal ini dapat dilihat pada table 4.10, grafik karakteristiknya pada gambar 4.8 sampai gambar 4.10.
4. Viskositas dari minyak trafo *shell dila B* akan semakin kecil dengan semakin naiknya suhu minyak trafo. Hal ini dapat dilihat pada grafik karakteristik gambar 4.11.
5. Semakin kecil nilai viskositas minyak maka nilai tegangan tembus dari minyak trafo akan semakin besar. Hal ini dapat dilihat pada tabel 4.1 sampai 4.3.
6. Nilai tegangan tembus minyak trafo *shell dila B* menurut standar IEC 156 adalah 30 KV/2,5 mm pada suhu 30<sup>0</sup>C, sedangkan pada pengujian nilainya lebih kecil dari standar yaitu 26,456 KV/2,5 mm pada suhu 30<sup>0</sup>C.

### Saran

Sebelum diuji, sebaiknya minyak trafo dimurnikan (purifikasi) terlebih dahulu untuk menghilangkan kontaminan-kontaminan yang terkandung di dalam minyak yang disebabkan oleh pengaruh lingkungan saat disimpan dalam jangka waktu yang lama. Pemurnian ini dilakukan supaya nilai tegangan tembusnya mendekati nilai standar yang telah ditentukan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Naidu, M.S., and Karamaju, V., *High Voltage Engineering*, McGraw-Hill, New Delhi, 1995.
- [2] Bonggas, L. Tobing, *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. 2003.
- [3] Malik, N.H., Al-Arainy, A.A, and Qureshi, M.I., *Electrical Insulation in Power Systems*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1998.
- [4] Abdel-Salam, M., Anis, H., El-Morshedy, A., Radwan, R., *High Voltage Engineering*, Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.
- [5] Syakur, A., *Bahan Ajar Gejala Medan Tinggi*, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, 2004.
- [6] Arismunandar A., DR., *Teknik Tegangan Tinggi*, Ghalia, Indonesia. Jakarta, 1983.
- [7] ---, IEC-156, *Insulating Liquid Determinan of Breakdown Voltage at Power Frequency Test Method*, 1995.
- [8] ---, SPLN 49 -1, *Minyak Isolasi*, Perusahaan Umum Listrik Negara, 1982.
- [9] ---, SPLN 49 -2, *Minyak Isolasi*, Perusahaan Umum Listrik Negara, 1982.
- [10] ---, SPLN 61, *Spesifikasi Transformator Tenaga Tegangan Tinggi*, Perusahaan Umum Listrik Negara, 1997.
- [11] ---, *Shell Oil Diala B*, Shell.
- [12] Manjang, S., Utina, A., *Analisa Ketidakmurnian Minyak Trafo Terhadap Kekuatan Isolasinya Pada Berbagai Kondisi Penuaan*, Makalah seminar Nasional Ketenagalistrikan 2005 – Semarang.
- [13] Syakur, A., Facta, M., *Perbandingan Tegangan Tembus Media Isolasi Udara dan Media Isolasi Minyak Trafo Menggunakan Elektroda Bidang-Bidang*, Transmisi, Vol.10, No.2, Desember 2005, 26-29.
- [14] Asyari, H., Jatmiko, *Pengaruh Perubahan Suhu Terhadap Tegangan Tembus pada Media Isolasi Cair*, Jurnal Teknik Elektro dan Komputer Emitor, Vol.4, No.2, September 2004.
- [15] Abduh, Syamsir, *Teori Kegagalan Isolasi Seri Teknik Tegangan Tinggi*, Universitas Trisakti, Jakarta, 2003
- [16] \_\_\_\_\_, *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi* “ terjemahan K.T. Sirait, ITB, Bandung 1993.
- [17] Abduh, Syamsir, *Dasar Pembangkitan dan Pengukuran Teknik Tegangan Tinggi*, Salemba Teknika, Jakarta, 2001.
- [18] [www.elektroindonesia.co.id/energi12.html](http://www.elektroindonesia.co.id/energi12.html)
- [19] [www.elektroindonesia.co.id/energi113.html](http://www.elektroindonesia.co.id/energi113.html)
- [20] *Test Certificate Power Oil TO-1020*
- [21] *Test Certificate Transformer Power Oil TO-20*

**Wahyu Kunto Wibowo**  
**L2F 003 547**

Lahir di Semarang, 8 Juli 1986.  
Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas  
Diponegoro (Strata 1) dengan  
konsentrasi Teknik Tenaga Listrik.

Semarang, Februari 2008

Mengetahui,

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir. Yuningtyastuti  
NIP. 131 285 569

Abdul Syakur, ST.MT.  
NIP. 132 231 132