

# ANALISIS SIMULASI TEGANGAN TEMBUS MINYAK TRANSFORMATOR MENGGUNAKAN APLIKASI FEMM 4.2

Alfin Prasetio<sup>1</sup>, Waluyo<sup>2</sup>

Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Bandung (ITENAS)

Alfinprase25@gmail.com

R DD MM YYYY | Revised DD MM YYYY | Accepted DD MM YYYY

## ABSTRAK

*Minyak transformator memiliki peranan penting, selain menjadi media isolasi, juga berperan dalam mendinginkan suhu transformator. Kegagalan isolasi pada transformator dapat berakibat fatal, salah satunya adalah meledak atau terbakar. Tujuan penelitian ini adalah mensimulasikan untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada saat tembus tegangan pada minyak isolasi transformator. Simulasi menggunakan aplikasi FEMM 4.2, terhadap medan listrik, variasi besar elektroda, jarak elektroda dan jenis minyak isolasi yang digunakan. Karakteristik sebaran medan listrik berbanding lurus dengan nilai tegangan yang diterapkan dan jarak sela yang digunakan. Elektroda jenis setengah bola pada jarak 2,5 mm menghasilkan nilai medan listrik sebesar 10,180 kV/mm pada tegangan 25 kV, elektroda jarum-plat pada jarak 2,5 mm menghasilkan nilai medan listrik 13,760 kV/mm pada tegangan 14 kV, pada elektroda bola-bola jarak sela 2,5 mm menghasilkan nilai medan listrik 9,190 kV/mm pada tegangan 22 kV. Semakin dekat jarak sela antar elektroda, maka nilai tegangan tembus akan semakin kecil.*

**Kata kunci:** FEMM 4.2, Minyak Isolasi, Simulasi, Tegangan Tembus, Transformator,

## ABSTRACT

*Transformer oil has an important role, besides being an insulating medium, it also plays a role in cooling the temperature of the transformer. Insulation failure in the transformer can be fatal, one of which is exploding or burning. The purpose of this study is to simulate to determine the phenomenon that occurs when the voltage breaks in the transformer insulating oil. Simulation using the FEMM 4.2 application, on the electric field, large variations of electrodes, electrode distance and the type of insulating oil used. The characteristics of the electric field distribution are directly proportional to the value of the applied voltage and the distance used. The hemispherical type electrode at a distance of 2.5 mm produces an electric field value of 10.180 kV/mm at a voltage of 25 kV, the needle-plate electrode at a distance of 2.5 mm produces an electric field value of 13,760 kV/mm at a voltage of 14 kV, on the spherical electrode. a gap of 2.5 mm produces an electric field value of 9.190 kV/mm at a voltage of 22 kV. The closer the distance between the electrodes, the smaller the breakdown voltage.*

**Keywords:** Breakdown Voltage, FEMM 4.2, Insulating Oil, Simulation,, Trannsformer,

## 1. PENDAHULUAN

Transformator merupakan salah satu komponen yang relatif paling mahal dari segi harga dan kritis peranannya dalam sistem tenaga listrik. Kegagalan trafo akan menyebabkan sejumlah kerugian bagi industri kelistrikan, termasuk kerugian ekonomi selama gangguan akibat terhentinya pasokan aliran listrik (**X. Wang & Z.D Wang, 2008**). Analisa pasca kegagalan transformator menunjukkan bahwa kegagalan isolasi menjadi penyebab utama terjadinya kegagalan transformator (**X. Wang & Z.D Wang, 2008**). Minyak dan kertas merupakan pilihan bahan isolasi untuk trafo daya selama seabad terakhir. Minyak transformator dapat mengisi celah pada isolasi kertas dan mengisi celah antar komponen dalam tangki transformator untuk meningkatkan kekuatan dielektrik dari isolasi. Tidak hanya berfungsi sebagai cairan untuk isolasi, tetapi juga berfungsi meneruskan panas yang dihasilkan dari rugi-rugi belitan dan juga pada inti transformator selain itu juga minyak pada transformator berfungsi sebagai pembawa informasi untuk memantau kondisi transformator tersebut. Dengan melakukan serangkaian pengujian pada minyak isolasi transformator, dapat diketahui bagaimana kondisi minyak isolasi transformator tersebut apakah masih layak digunakan atau perlu dilakukan prosedur selanjutnya jika hasil pengujian menunjukkan bahwa kualitas dari minyak isolasi telah menurun. Salah satunya adalah dengan uji tegangan tembus pada minyak isolasi, tujuannya adalah untuk mengetahui kekuatan isolasi atau dielektrik dari minyak isolasi apakah masih layak atau sudah tidak layak (**X. Wang & Z.D Wang, 2008**).

### TRANSFORMATOR DAN MINYAK ISOLASI

#### A. Transformator

Transformator adalah alat statis yang terdiri dari belitan atau dua belitan berpasangan, dengan atau tanpa inti magnetik, untuk mendorong kedua kopleng antar rangkaian. Catatan : transformator secara eksklusif digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk mentransfer daya dengan induksi elektromagnetik antar sirkuit pada frekuensi yang sama, biasanya dengan nilai tegangan dan arus yang berubah (**Winders, Jr, 2002**).

Sebuah transformator yang sederhana pada dasarnya terdiri dari 2 lilitan atau kumparan, kawat yang terisolasi yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Pada kebanyakan transformator, kumparan kawat terisolasi ini, dililitkan pada sebuah besi yang dinamakan dengan inti besi (*Core*). Ketika kumparan primer dialiri arus AC (bolak-balik) maka akan menimbulkan medan magnet atau fluks magnetik disekitarnya. Kekuatan medan magnet (densitas fluks magnet) tersebut dipengaruhi oleh besarnya arus listrik yang dialirinya. Semakin besar arus listriknya semakin besar pula medan magnetnya. Fluktuasi medan magnet yang terjadi di sekitar kumparan *primer* akan menginduksi GGL (gaya Gerak Listrik) dalam kumparan *sekunder* dan akan terjadi pelimpahan daya dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Dengan demikian terjadilah perubahan taraf tegangan listrik baik dari tegangan rendah menjadi tegangan yang lebih tinggi maupun dari tegangan tinggi menjadi lebih rendah (**Winders, Jr, 2002**).

## B. Bahan Isolasi Cair

Salah satu jenis bahan isolasi yang sering digunakan sebagai media isolasi adalah bahan cair. Keunggulan bahan isolasi cair yaitu dapat mengisi seluruh volume bahan yang diisolasinya dan secara simultan akan mendisipasikan panas secara konveksi. Media minyak memiliki efisiensi 10 kali lebih baik daripada udara ataupun nitrogen dalam hal kemampuan disipasi panasnya saat digunakan pada transformator. Kekuatan dielektrik dari minyak trafo dapat mencapai orde 100kV/cm.

Isolasi zat cair merupakan campuran dari hidrokarbon. Saat digunakan untuk isolasi listrik. Isolasi cair sedapat mungkin terbebas dari uap air, hasil oksidasi dan kontaminan lainnya. Faktor penting yang berdampak pada kekuatan dielektrik dari isolasi cair adalah keberadaan kontaminan. Keberadaan kontaminan pada minyak trafo dapat menurunkan kekuatan dielektriknya dari keadaan sebelum adanya kontaminan (**Anggraini, Ika Novia. 2010**).

## C. Jenis-Jenis Minyak Isolasi

Minyak isolasi terdiri dari beberapa jenis baik dari segi pembuatan maupun dari segi bahannya. Pembagian jenis isolasi ditentukan berdasarkan bahan dan cara pembuatannya. Saat ini minyak isolasi yang sering digunakan adalah minyak mineral dan minyak sintetis.

### Minyak Isolasi Mineral

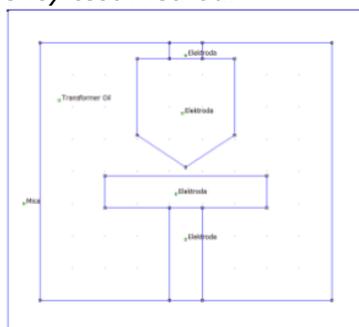
Minyak isolasi mineral adalah minyak isolasi yang bahan dasarnya berasal dari minyak bumi yang diproses dengan cara destilasi. Minyak isolasi hasil destilasi ini harus mengalami beberapa proses lagi agar diperoleh tahanan isolasi yang tinggi, stabilitas panas yang baik, mempunyai karakteristik panas yang stabil, dan memenuhi syarat-syarat teknis yang lain.

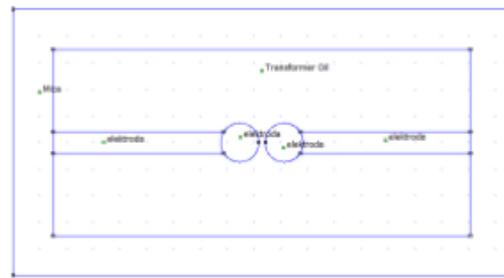
Ditinjau dari sifatnya yang baik, serta ketersediannya yang luas dan biaya yang relatif rendah. Minyak mineral diperoleh dari minyak mentas dan telah digunakan dalam peralatan listrik selama lebih dari 1 abad (**M.T Ishak & Z.Wang, 2008**).

## 2. METODOLOGI

### 2.1. Mencari Diagram Tempat Uji Tegangan Tembus

Langkah pertama sebelum melakukan simulasi adalah mencari referensi gambar diagram tempat uji tegangan tembus. Gambar 1 merupakan model geometri yang mengacu pada standar berdasarkan *IEC 60156 insulating oil determination of the breakdown voltage at power frequency test method*.





(a)

(b)

**Gambar 1. Diagram Tempat Uji Tegangan Tembus (a) elektroda tipe setengah bola (b) elektroda tipe jarum-plat**

## 2.2 Mencari Data Penunjang Simulasi

Setelah mendapatkan desain diagram tempat pengujian tegangan tembus yang nanti akan digambarkan pada *software FEMM 4.2* langkah berikutnya adalah mencari parameter-parameter penunjang yang akan dimasukkan dalam simulasi. Parameter yang diperlukan yaitu :

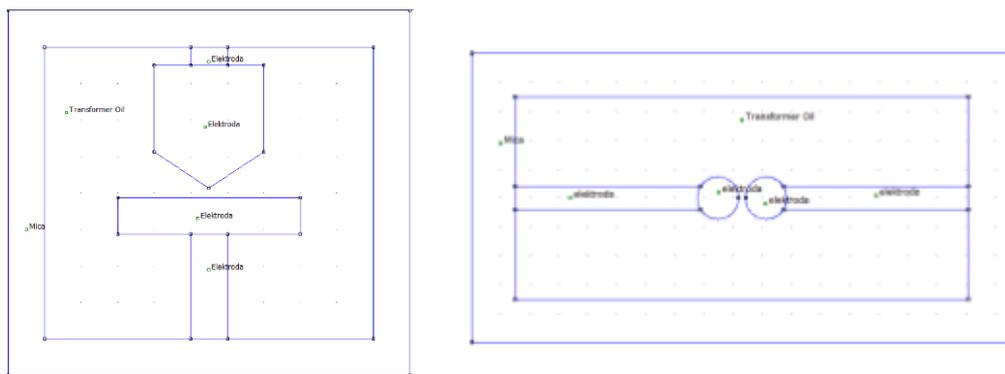
1. Mencari data sekunder dari percobaan yang pernah dilakukan dengan menggunakan nilai-nilai dari percobaan tersebut sebagai acuan dari simulasi.
2. Nilai permitivitas minyak trafo.
3. Suhu minyak trafo pada saat dilakukan pengujian tegangan tembus.

Data yang didapat merupakan data sekunder.

## 2.3 Prosedur Simulasi Pada Aplikasi FEMM 4.2

Dalam melakukan simulasi ada beberapa tahapan yang perlu dilakukan diantaranya :

1. Unduh dan install aplikasi *FEMM 4.2*
2. Gambarkan geometry elektroda secara 2D berdasarkan standar *IEC60156* seperti pada Gambar 2 Dibawah ini.



(a)

(b)

**Gambar 2. (a) 2D geometry elektroda Jarum Plat (b) 2D Gemoetri elektroda bola-bola**

3. Masukkan seluruh parameter simulasi. Seperti nilai tegangan, nilai permitivitas minyak isolasi.
4. Setelah seluruh parameter dimasukkan, jalankan simulasi dan analisa hasil simulasi tersebut.

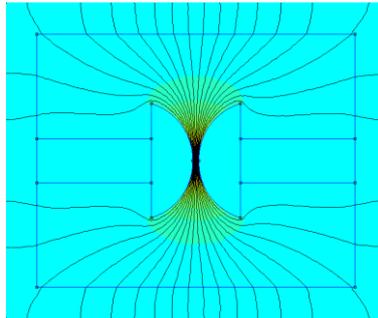
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil Medan Listrik Berdasarkan Simulasi

- Elektroda Setengah Bola

- Pada Jarak 2mm

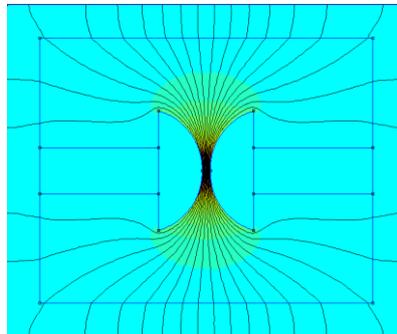
Hasil simulasi pada Gambar 3 menggunakan elektroda setengah bola pada jarak sela 2mm menggunakan minyak isolasi mineral. Pada nilai tegangan tembus 8 kV menghasilkan nilai medan listrik maksimum sebesar 4,006 kV/mm.



Gambar 3. Hasil simulasi medan listrik

- Pada Jarak 2,5mm

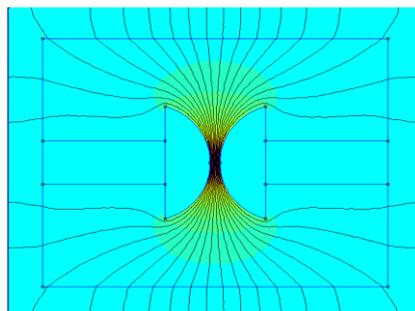
Hasil simulasi pada Gambar 4 menggunakan elektroda setengah bola pada jarak sela 2,5mm, pada nilai tegangan tembus sebesar 25 kV dan menggunakan minyak isolasi mineral. Berdasarkan hasil simulasi menghasilkan nilai maksimum medan listrik sebesar 10,180 kV/mm.



Gambar 4. Hasil simulasi medan listrik

- Pada jarak 3mm

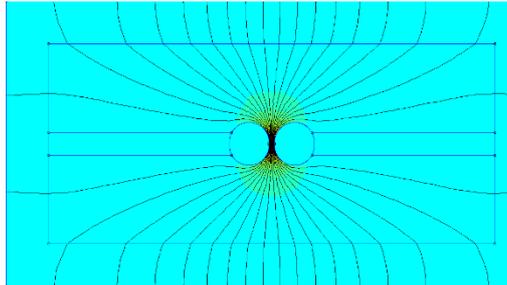
Hasil simulasi pada Gambar 5 pada jarak sela 3mm pada nilai tegangan tembus sebesar 31kV menggunakan minyak isolasi mineral. Berdasarkan simulasi menghasilkan nilai maksimum medan listrik sebesar 10,540 kV/mm.



**Gambar 5. Hasil simulasi medan listrik**

- Elektroda Bola-Bola Minyak Mineral
- Pada Jarak 2mm

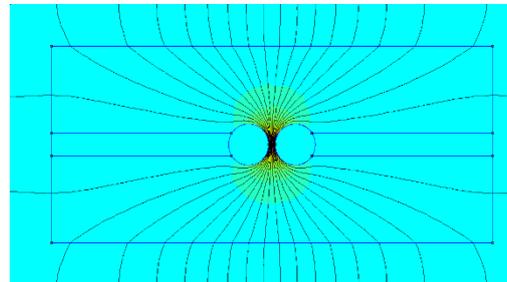
Hasil simulasi menggunakan elektroda bola-bola pada jarak sela 2mm pada nilai tegangan tembus 5kV menggunakan minyak isolasi mineral. Pada simulasi menghasilkan nilai maksimum medan listrik sebesar 2,643 kV/mm.



**Gambar 6. Hasil simulasi medan listrik elektroda bola-bola**

- Pada Jarak 2,5mm

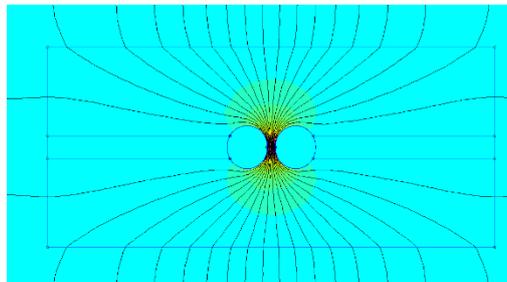
Hasil simulasi pada jarak sela 2,5mm menggunakan minyak isolasi mineral pada tegangan tembus 22kV menghasilkan nilai medan listrik maksimum 9,192 kV/mm berdasarkan hasil simulasi.



**Gambar 7. Hasil simulasi medan listrik elektroda bola-bola**

- Pada jarak 3mm

Hasil simulasi menggunakan elektroda bola-bola pada jarak sela 3mm, menggunakan minyak isolasi mineral pada nilai tegangan tembus 29 kV menghasilkan nilai medan listrik maksimum sebesar 10,320 kV/mm.

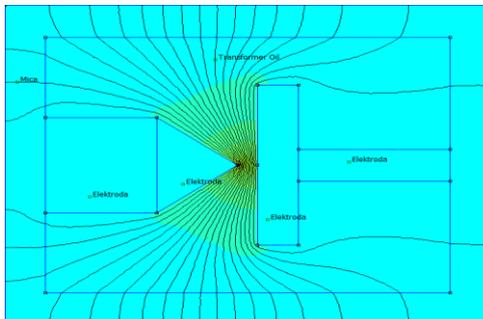


**Gambar 8. Hasil simulasi medan listrik elektroda bola-bola**

- Elektroda Jarum-Plat

- Pada jarak 2,5mm

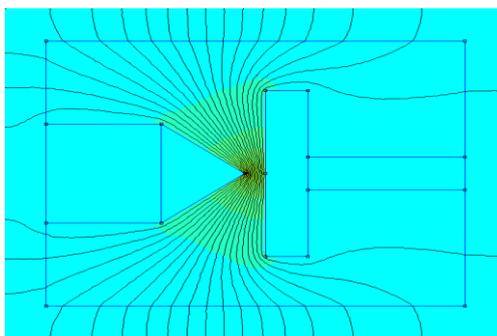
Gambar merupakan hasil simulasi menggunakan elektroda jarum-plat menggunakan minyak isolasi mineral pada tegangan tembus 14 kV, menghasilkan nilai medan listrik maksimum sebesar 13,760 kV/mm.



**Gambar 9. Hasil simulasi elektroda jarum-plat pada jarak 2,5mm**

- Pada jarak 5mm

Hasil simulasi pada jarak sela 5mm, menggunakan minyak isolasi mineral pada nilai tegangan tembus 23 kV, menghasilkan nilai medan listrik maksimum sebesar 14,420 kV/mm



**Gambar 10. Hasil simulasi elektroda jarum-plat pada jarak 5mm**

### 3.2 Hasil Medan Listrik Berdasarkan Perhitungan

- Nilai  $E_{max}$  Elektroda Bola-Bola Minyak Mineral

$$E_{max} = Kx \frac{V}{d} x \frac{r + d}{r} \dots (1)$$

$K$ : Konstanta 0,9

$d$ : Jarak sela (mm)

$r$ : tip radius elektroda (mm)

$V$ : Tegangan (v)

- Pada Jarak 2mm

$$E_{max} = 0,9x \frac{5kV}{2mm} x \frac{13mm + 2mm}{13mm} = 2,596 kV/mm$$

- Pada Jarak 2.5mm

$$E_{max} = 0,9x \frac{25kV}{2.5mm} x \frac{13mm + 2.5mm}{13mm} = 9,443 kV/mm$$

- Pada Jarak 3mm

$$E_{max} = 0,9x \frac{29 kV}{3mm} x \frac{13mm + 3mm}{13mm} = 10,707 kV/mm$$

- Nilai  $E_{max}$  Pada Elektroda Setengah Bola Minyak Mineral

$$E_{max} = Kx \frac{V}{d} x \frac{r + d}{r} \dots (2)$$

$K$ : Konstanta 0,9

$d$ : Jarak sela (mm)

$r$ : tip radius elektroda (mm)

$V$ : Tegangan (v)

- Pada Jarak 2mm

$$E_{max} = 0,9x \frac{8kV}{2mm} x \frac{25mm + 2mm}{25mm} = 3,888 kV/mm$$

- Pada jarak 2.5mm

$$E_{max} = 0,9x \frac{25kV}{2.5mm} x \frac{25mm + 2.5mm}{25mm} = 9,900 kV/mm$$

- Pada Jarak 3mm

$$E_{max} = 0,9x \frac{31kV}{3mm} x \frac{25mm + 3mm}{25mm} = 10,416 kV/mm$$

- Nilai  $E_{max}$  Pada Elektroda Jarum-Plat Minyak Mineral Baru

$$E_{max} = \frac{2V}{r \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot d}{r}\right)} \dots (3)$$

$d$ : Jarak sela (mm)

$r$ : tip radius elektroda (mm)

$V$ : Tegangan (v)

- Pada Jarak 2.5mm

$$E_{max} = \frac{2x14kV}{1mm \cdot \ln\left(\frac{4x2.5mm}{1mm}\right)} = 12,160 kV/mm$$

- Pada Jarak 5mm

$$E_{max} = \frac{2x23kV}{1mm \cdot \ln\left(\frac{4x5mm}{1mm}\right)} = 15,355 kV/mm$$

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil analisis simulasi menggunakan *FEMM 4.2* dapat diketahui sebaran medan listrik merupakan sebaran medan listrik pada ruang yang terdapat di antara elektroda positif (anoda) dan elektroda negatif (katoda). Distribusi medan listrik pada setiap jenis elektroda yang digunakan memiliki karakteristiknya masing-masing begitu pula pada nilai Medan listrik Max (*E<sub>max</sub>*). Terlihat bahwa nilai maksimum medan listrik tertinggi ada pada konfigurasi jarum-plat yaitu pada jarak sela 2,5 mm pada tegangan 14 kV menghasilkan nilai *E<sub>max</sub>* 13,760 kV/mm dan nilai maksimum medan listrik terendah ada pada konfigurasi bola-bola yaitu pada jarak dan jenis minyak isolasi yang sama menghasilkan nilai *E<sub>max</sub>* sebesar 10,180 kV/mm. Dan berdasarkan hasil perhitungan, menghasilkan kesimpulan yang serupa bahwa nilai *E<sub>max</sub>* tertinggi ada pada konfigurasi jarum-plat yaitu 12,160 kV/mm, sedangkan pada elektroda bola-bola yaitu 9,443 kV/mm. Perbedaan nilai hasil perhitungan dan hasil simulasi, dikarenakan pada hasil perhitungan mengalami pembulatan nilai dan pada simulasi nilai yang dimasukkan merupakan berdasarkan nilai parameter.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Anggraini, I. N. (2010). *Pengaruh Bahan Isolasi Resin Epoksi dengan Bahan Silicone Rubber Terhadap Proses Tracking dan Eros*. Yogyakarta.
- M.T, Ishak, Z.Wang. (2008). *Transformer Hotspot Temperature Calculation using IEEE Loading Guide*. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis.
- Wang.X. (2008). *Partial Discharge Behaviours and Breakdown Mechanisms of Ester Transformer Liquids under AC Stress*. Manchester, UK.