

**REKAYASA PEMBANGKITAN MEDAN LISTRIK TINGGI  
MENGUNAKAN TEKNIK DIELEKTRIK BERLAPIS  
BERBAHAN KACA**

**SKRIPSI  
TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**AHMAD NAHLA RIALDI  
NIM. 155060301111073**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2019**





**PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan, dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 6 Januari 2020

Mahasiswa,

AHMAD NAHLA RIALDI

NIM. 155060301111073







## RINGKASAN

**Ahmad Nahla Rialdi**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Desember 2019, *Rekayasa Pembangkitan Medan Listrik Tinggi Menggunakan Teknik Dielektrik Berlapis Berbahan Kaca*, Dosen Pembimbing: Moch. Dhofir.

Skripsi ini meneliti tentang pengaruh banyaknya sela udara dan kecepatan aliran udara terhadap pembangkitan medan tinggi menggunakan dielektrik berlapis. Metode yang digunakan merupakan penerapan dari prinsip peluahan penghalang dielektrik, dimana diberikan sela udara diantara dua atau lebih dielektrik yang disusun sejajar yang akan membangkitkan medan listrik tinggi jika diberi tegangan tinggi. Kuat medan listrik yang dibangkitkan pada sela udara dipengaruhi oleh koefisien relative dielektrik padat, tebal dielektrik keseluruhan dan tegangan yang diberikan.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah perancangan dielektrik yang disusun secara berlapis, terdiri dari 2, 3 dan 4 dielektrik padat dengan koefisien relatif dielektrik sama yaitu kaca ( $\epsilon_r = 4,5$ ) ketebalan 0,2 cm, dengan memberi sela udara diantara dielektrik padat setebal 0,1 cm, lebar 10 cm dan panjang 20 cm. variasi tegangan yang digunakan dalam pengujian yaitu, 5 kV – 50 kV dengan rentang 5 kV disetiap pengujian. Sebelumnya dilalukan simulasi untuk mengetahui kuat medan listrik yang dibangkitkan menggunakan *software FEMM 4.2*. Dalam penelitian ini dilakukuan pengujian, untuk membuktikan pengaruh dari variabel yang telah diberikan terhadap besarnya medan listrik yang bangkit di sela udara. Nantinya medan listrik yang bangkit akan diaplikasikan untuk memproduksi gas ozon ( $O_3$ ) dengan proses ionisasi. Hasil dan kecepatan pemurnian larutan air yang diberi pewarna untuk menjadi jernih kembali.

Hasil penelitian yang telah dilakukan, menggunakan tegangan 5 kV – 50 kV dengan rentang tegangan 5 kV, kuat medan listrik yang dibangkitkan di sela udara berkisar 26,59 hingga 265,95 kV/cm untuk dielektrik 1 sela udara, untuk dielektrik 2 sela udara berkisar sebesar 15,01 hingga 150,15 kV/cm, dan untuk dielektrik 3 sela udara berkisar sebesar 10,46 hingga 104,60 kV/cm. Pada tegangan yang sama pada dielektrik dengan ketebalan paling kecil yaitu dielektrik 1 sela membangkitkan medan listrik dengan nilai lebih tinggi dari pada dielektrik dengan ketebalan paling tinggi yaitu dielektrik 3 sela udara. Semakin besar medan listrik yang dibangkitkan semakin besar ozon yang diproduksi. Sedangkan kecepatan udara tidak mempengaruhi proses dibangkitkannya medan tinggi karena proses tersebut terjadi sangat cepat. namun mempengaruhi volume udara yang keluar dimana semakin cepat kecepatan angin semakin besar volume udara yang berhembus. Sehingga dari hasil pengamatan penjernihan larutan semakin banyak sela udara medan listrik di sela udara semakin kecil namun produksi ozon semakin besar jadi semakin murni larutan dan waktu yang dibutuhkan untuk pemurnian juga semakin sedikit.

**Kata kunci:** Rekayasa, pembangkit, medan tinggi, dielektrik berlapis, udara-kaca.



Halaman ini sengaja dikosongkan

## SUMMARY

**Ahmad Nahla Rialdi**, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, December 2019, **Engineering of High Electric Field Generation Using the Dielectric Layered Method Made of Glass**, Academic Supervisor: Moch. Dhofir.

*This thesis examines the influence of the amount of air interruption and air flow velocity on the generation of high fields using a layered dielectric. The method used is the application of the principle of dielectric barrier discharge, which is given an air gap between two or more dielectric arranged in parallel which will generate a high electric field if given a high voltage. The strength of the electric field generated in between air is affected by the relative dielectric coefficient of the solid, the overall thickness of the dielectric and the applied voltage.*

*The method used in this research is dielectric design arranged in layers, consisting of 2, 3 and 4 solid dielectrics with the same relative dielectric coefficient, namely glass ( $\epsilon_r = 4.5$ ) thickness of 0.2 cm, by giving air gap in the direction of solid dielectric 0.1 cm thick, 10 cm wide and 20 cm long. voltage variations used in the test are, 5 kV - 50 kV with a range of 5 kV in each test. Previously carried out simulations to determine the strength of the electric field generated using FEMM 4.2 software. In this study, testing was done, to prove the effect of the variable that has been given to the magnitude of the electric field that rises between air. Later the electric field that rises will be applied to produce ozone gas (O<sub>3</sub>) by the ionization process. The results and the speed of purification of the aqueous solution which is dyed to become clear again.*

*The results of research that have been done, using a voltage of 5 kV - 50 kV with a voltage range of 5 kV, the strength of the electric field generated in the air between ranges of 26.59 to 265.95 kV / cm for dielectric of 1 air gap, for dielectric of 2 air gap ranges in the amount of 15.01 to 150.15 kV / cm, and for dielectric 3 air gap ranges from 10.46 to 104.60 kV / cm. At the same voltage at the dielectric with the smallest thickness, namely 1 air gap dielectric generates an electric field with a higher value than the dielectric with the highest thickness of dielectric with 3 air gap. The greater the electric field generated, the greater the ozone produced. While the air velocity does not affect the process of generating a high field because the process occurs very quickly. But affects the volume of air that comes out where the faster the wind speed the greater the volume of air that blows the greater the electric field generated, the greater the ozone produced. So that from the observation of clarifying the solution, the more air between the electric fields in the air, the smaller the ozone production, the greater the purer the solution and the less time needed for purification.*

**Keywords:** Engineering, generating, high electric field, layered dielectric, layered dielectric



Halaman ini sengaja dikosongkan

**DAFTAR ISI**

RINGKASAN.....	i
SUMMARY.....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Kaca Sebagai Dielektrik.....	5
2.2 Dielektrik Berlapis.....	6
2.3 Peluahan Penghalang Dielektrik (Dielectric Barrier Discharge).....	9
2.4 Peluahan Parsial Dalam.....	10
2.5 Ozon (O <sub>3</sub> ).....	13
2.6 Proses Pembentukan Ozon (O <sub>3</sub> ) dengan Dielektrik Berlapis.....	14
2.7 Pengaruh Kecepatan Aliran Udara terhadap Proses Ionisasi.....	17
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	<b>19</b>
3.1 Studi Literatur.....	19
3.2 Penentuan Variabel Penelitian.....	19
3.3 Objek Uji.....	19
3.4 Rangkaian Pengujian.....	21
3.5 Bahan dan Peralatan.....	22
3.6 Deskripsi Bahan dan Peralatan.....	23
3.7 Kondisi Pengujian.....	23
3.8 Langkah Pengujian.....	24
3.9 Studi Data dan Pembahasan.....	25



3.10	Pengambilan Kesimpulan dan Saran.....	25
3.11	Diagram Alir Penelitian.....	25
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....		<b>27</b>
4.1	Tinjauan Umum.....	27
4.2	Simulasi FEMM.....	28
4.2.1	Simulasi FEMM Dielektrik Satu Sela.....	28
4.2.2	Tegangan Kritis Terjadinya Ionisasi pada Dielektrik Satu Sela.....	30
4.2.3	Simulasi FEMM Dielektrik Dua Sela.....	30
4.2.4	Tegangan Kritis Terjadinya Ionisasi pada Dielektrik Dua Sela.....	32
4.2.5	Simulasi FEMM Dielektrik Tiga Sela.....	32
4.2.6	Tegangan Kritis Terjadinya Ionisasi pada Dielektrik Tiga Sela.....	34
4.2.7	Perbandingan Simulasi FEMM Dielektrik dengan Jumlah Sela Berbeda.....	35
4.3	Perhitungan Intensitas Medan Listrik.....	36
4.3.1	Perhitungan Intensitas Medan Listrik pada Dielektrik 1 Sela.....	36
4.3.2	Perhitungan Intensitas Medan Listrik pada Dielektrik 2 Sela.....	38
4.3.3	Perhitungan Intensitas Medan Listrik pada Dielektrik 3 Sela.....	40
4.3.4	Perbandingan Perhitungan Medan Listrik.....	42
4.4	Perbandingan Hasil Simulasi FEMM dan Perhitungan.....	44
4.5	Pengujian Pembangkitan Medan Listrik Tinggi yang Diaplikasikan Untuk Memproduksi Ozon Guna Menjernihkan Air Pewarna.....	47
4.5.1	Pengujian Dielektrik Kaca dengan Satu Sela.....	50
4.5.2	Pengujian Dielektrik Kaca dengan 2 Sela.....	50
4.5.3	Pengujian Dielektrik Kaca dengan 3 sela.....	51
4.5.4	Pengaruh Jumlah Sela Udara terhadap Pemurnian Larutan.....	52
4.5.5	Pengaruh Kecepatan Udara terhadap Pemurnian Larutan.....	54
<b>BAB V PENUTUP</b> .....		<b>55</b>
5.1	Kesimpulan.....	55
5.2	Saran.....	55
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		<b>57</b>



## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Contoh kekuatan dielektrik suatu bahan.....	5
Tabel 2. 2 Keterangan Ozon.....	13
Tabel 2. 3 Kandungan gas pada udara.....	15
Tabel 3. 1 Dimensi Desain Objek Uji.....	21
Tabel 4. 1 Data $E_{max}$ pada simulasi FEMM dielektrik 2 keping kaca 1 sela udara.....	29
Tabel 4. 2 Data $E_{max}$ pada simulasi FEMM dielektrik 3 keping kaca 2 sela udara.....	32
Tabel 4. 3 Data $E_{max}$ pada simulasi FEMM dielektrik 4 keping kaca 3 sela udara.....	34
Tabel 4. 4 Data Perbandingan $E_{sela\ udara}$ Simulasi FEMM.....	35
Tabel 4. 5 Intensitas Medan Listrik pada Sela Udara Dielektrik Kaca.....	37
Tabel 4. 6 Intensitas Medan Listrik pada Sela Udara Dielektrik Kaca 2 sela.....	39
Tabel 4. 7 Intensitas Medan Listrik pada Sela Udara Dielektrik Kaca.....	41
Tabel 4. 8 Perbandingan Intensitas Medan Listrik.....	43
Tabel 4. 9 Perbandingan Hasil Simulasi FEMM dan Perhitungan.....	45
Tabel 4. 10 Hasil perhitungan kecepatan udara menjadi volume laju udara.....	48
Tabel 4. 11 Data Pengujian Pemurnian Air Pewarna Menggunakan Ozon Pada Dielektrik 1 Sela.....	50
Tabel 4. 12 Data Pengujian Pemurnian Air Pewarna Menggunakan Ozon Pada Dielektrik 2 Sela.....	51
Tabel 4. 13 Data Pengujian Pemurnian Air Pewarna Menggunakan Ozon.....	52





Halaman ini sengaja dikosongkan

**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2. 1 Dielektrik berlapis dengan ketebalan dan konstanta dielektrik berbeda ..... 7

Gambar 2. 2 Grafik distribusi medan listrik pada dielektrik lapis dengan kondisi  $\epsilon r_1 < \epsilon r_2 < \epsilon r_3$  ..... 8

Gambar 2. 3 Grafik distribusi medan listrik pada dielektrik lapis dengan kondisi  $\epsilon r_2 < \epsilon r_1 < \epsilon r_3$  ..... 8

Gambar 2. 4 Grafik distribusi medan listrik pada dielektrik lapis dengan kondisi  $\epsilon r_2 < \epsilon r_3 < \epsilon r_1$  dengan perbedaan ketebalan dielektrik ..... 9

Gambar 2. 5 Beragam konfigurasi peluahan penghalang dielektrik ..... 10

Gambar 2. 6 Susunan dengan peluahan parsial dalam dan rangkaian ekuivalen a) Objek uji dengan rongga b) Rangkaian ekuivalen ..... 11

Gambar 2. 7 Kurva tegangan pada rangkaian ekuivalen untuk peluahan parsial dalam berbentuk pulsa ..... 12

Gambar 2. 8 Laju Pengulangan pulsa dari peluahan parsial ..... 12

Gambar 2. 9 Ionisasi ketika polaritas negatif ..... 16

Gambar 2. 10 Ionisasi ketika polaritas Positif ..... 16

Gambar 3. 1 Objek uji 2 keping kaca 1 sela udara ..... 20

Gambar 3. 2 Objek uji 3 keping kaca 2 sela udara ..... 20

Gambar 3. 3 Objek uji 4 keping kaca 3 sela udara ..... 20

Gambar 3. 4 Rangkaian pengujian pembangkitan medan listrik tinggi sebagai ozonisator ..... 22

Gambar 3. 5 Diagram alir penelitian dan diagram simulasi FEMM ..... 26

Gambar 4. 1 Penggambaran FEMM 1 sela dengan tegangan 50 kV ..... 28

Gambar 4. 2 Simulasi FEMM dielektrik kaca 1 sela dengan tegangan 50 kV ..... 29

Gambar 4. 3 Plot grafik medan listrik pada kaca dengan 1 sela tegangan 50 kV ..... 29

Gambar 4. 4 Penggambaran FEMM 1 sela dengan tegangan 50 kV ..... 31

Gambar 4. 5 Simulasi FEMM dielektrik kaca 2 sela dengan tegangan 50 kV ..... 31

Gambar 4. 6 Plot grafik medan listrik pada kaca dengan 2 sela tegangan 50 kV ..... 31

Gambar 4. 7 Penggambaran FEMM 3 sela dengan tegangan 50 kV ..... 33

Gambar 4. 8 Simulasi FEMM dielektrik kaca 3 sela dengan tegangan 50 kV ..... 33

Gambar 4. 9 Plot grafik medan listrik pada kaca dengan 3 sela tegangan 50 kV ..... 33

Gambar 4. 10 Grafik perbandingan  $E_{\text{sela udara}}$  pada dielektrik dengan jumlah sela dan ketebalan berbeda ..... 36

Gambar 4. 11 Grafik hubungan intensitas medan listrik terhadap tegangan dielektrik kaca 1 sela ..... 38

Gambar 4. 12 Grafik hubungan intensitas medan listrik terhadap tegangan dielektrik kaca ..... 40

Gambar 4. 13 Grafik hubungan intensitas medan listrik terhadap tegangan dielektrik kaca ..... 42

Gambar 4. 14 Grafik perbandingan intensitas medan tinggi dengan perbedaan sela ..... 44

Gambar 4. 15 Grafik perbandingan Simulasi dan perhitungan pada dielektrik 1 sela ..... 46

Gambar 4. 16 Perbandingan Simulasi dan perhitungan pada dielektrik 2 sela ..... 46

Gambar 4. 17 Perbandingan Simulasi dan perhitungan pada dielektrik 3 sela ..... 47

Gambar 4. 18 Sampel hasil pengamatan perubahan warna pada larutan air ..... 49

Gambar 4. 19 Grafik tegangan yang dibutuhkan dielektrik untuk menjernihkan air ..... 53





Halaman ini sengaja dikosongkan



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Foto Pengujian	59
Lampiran 2 Perhitungan matematis intensitas medan listrik yang dibangkitkan pada dielektrik dengan 1 sela udara	61
Lampiran 3 Perhitungan matematis volume laju udara	63
Lampiran 4 Data Simulasi FEMM 4.2	64
Lampiran 5 Sampel hasil pengamatan penjernihan air warna	85





Halaman ini sengaja dikosongkan

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam kehidupan sehari-hari pengaplikasian medan listrik dapat kita temukan. Contohnya dalam bidang percetakan dimana mesin fotocopy dan printer laser. Pada printer laser Ketika drum yang bermuatan positif berputar, laser bersinar melintasi permukaan yang tidak bermuatan. Laser akan menggambar pada kertas yang bermuatan negatif. Setelah melewati drum yang berputar kertas akan melewati fuser. Pada bagian fuser ini kertas akan mengalami pemanasan, hal ini yang menyebabkan kertas terasa panas pada saat keluar dari printer. Sehingga printer laser sangat membantu dalam bidang percetakan karena lebih cepat, lebih akurat, dan lebih ekonomis. (D. Kessler, 1997). Dalam pemanfaatan skala besar contohnya industri, digunakan ESP (Electrostatic Precipitator) untuk pengumpul debu (ash) pada asap sehingga asap hasil pembakaran lebih bersih. Bahkan saat ini Kebanyakan ESP industri membutuhkan catu daya tinggi dan rentang tegangan bervariasi sesuai dengan ukuran dan jumlah dari partikel debu. (G. Kowshik, 2010)

Pemanfaatan teknologi medan listrik tinggi yang banyak digunakan salah satunya dalam produksi ozon yang dapat digunakan untuk mengurangi kandungan bahan berbahaya dan beracun (B3) seperti logam besi, zat beracun pada pembersih lantai dan lainnya yang terdapat pada cairan yang dihasilkan oleh tumpukan sampah, sehingga air tersebut dapat dengan aman dialirkan menuju sungai dan tidak mencemari lingkungan sekitar. Mengingat akan aplikasi ozon yang mempunyai banyak manfaat, maka pembuatan generator ozon sangat perlu untuk direalisasikan khususnya yang dalam tahap ini akan digunakan untuk penjernihan air.

Ozon dapat diproduksi dengan beberapa metode seperti peluahan elektrik, reaksi optokimia dan radiasi UV. Peluahan elektrik adalah metode yang paling umum digunakan generasi ozon. Diantaranya adalah peluahan korona, gliding arc discharge dan dielectric barrier discharge. Metode yang paling umum digunakan untuk menghasilkan ozon adalah dielectric barrier discharge (DBD) yang beroperasi pada tekanan atmosfer. Struktur ini terdiri dari dua elektroda yang terpisah dengan jarak sela di salah satu atau kedua sisi menggunakan bahan dielektrik. Sistem ini menghasilkan plasma non-termal yang stabil dan

di bawah tekanan atmosfer sehingga merupakan metode yang baik untuk membangkitkan medan tinggi sehingga salah satu manfaatnya dapat memproduksi ozon. Metode ini juga dikenal sebagai metode yang paling hemat biaya.

Dielectric barrier yang terkandung di atas elektroda ground digunakan untuk membatasi arus peluahan, mencegah transisi DBD discharge ke arc discharge, untuk memastikan bahwa plasma non-equilibrium yang stabil dapat dihasilkan bahkan di bawah tekanan atmosfer, yaitu sesuai untuk generator ozon. Karena itu, penghalang dielektrik yang terkandung di atas elektroda ground dapat berfungsi untuk mendistribusikan peluahan secara merata di seluruh area jalur elektroda dan meningkatkan pembentukan ozon dengan menggunakan bahan dielektrik konduktivitas rendah. Selain itu, ozon generator juga dapat dipengaruhi dari jarak sela, bahan elektroda, jenis gas, tegangan, catu daya, input gas dan bahan dielektrik (S. Fitria, 2018).

Untuk membangkitkan medan listrik tinggi dan menghasilkan ozon menggunakan metode DBD diperlukan dielektrik yang memiliki konduktivitas dan plasma suhu rendah yang meningkatkan efisiensi pembentukan ozon. Selain itu, agar mendapat nilai medan listrik yang maksimal ketebalan juga menjadi faktor penting. Karena pertimbangan-pertimbangan tersebut maka kaca dipilih sebagai bahan dielektrik paling tepat untuk digunakan. Dalam kondisi tekanan atmosfer plasma DBD sebagian besar dihasilkan oleh sumber AC tegangan tinggi. AC digunakan karena impedansi reaktor (karakter kapasitif). Karena dalam penggunaan sumber DC kita harus membatasi arus keluaran menggunakan resistor tegangan tinggi, yang membatasi daya dan efisiensi. Maka sumber AC lebih baik digunakan untuk pembangkitan medan listrik tinggi dalam memproduksi ozon menggunakan metode DBD dari pada sumber DC (Andrei V. Pipa, 2019).

Atas dasar latar belakang tersebut, perlu dilakukan penelitian tentang pembangkitan medan listrik tinggi dengan merancang generator ozon dengan memperhatikan jumlah sela yang dapat menurunkan konduktivitas dan meningkatkan konsentrasi ozon yang dihasilkan untuk menunjukkan jika terdapat medan tinggi di setiap selanya. Metode yang akan digunakan adalah Dielectric Barrier Discharge memiliki lebih dari satu sela udara dan beberapa lapisan dielektrik sehingga bisa menghasilkan konsentrasi ozon yang lebih tinggi. Selain itu kecepatan udara yang mengalir ke dalam sela udara akan diatur untuk mengetahui seberapa cepat ionisasi terjadi pada permukaan dimana terjadi medan listrik tinggi. Di dalam penelitian ini akan diuji sebuah bahan dielektrik padat dengan diberikan sela dan diberikan variabel jumlah sela yang berbeda dengan kecepatan udara yang berbeda dan akan diaplikasikan untuk mengionisasi udara yang membutuhkan medan tinggi untuk

merubah menjadi senyawa ozon ( $O_3$ ). Dengan tujuan untuk menganalisa efektifitas penjernihan air dari jumlah sela dan kecepatan udara yang berbeda.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, dapat disusun rumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh jumlah sela pada dielektrik terhadap besar medan tinggi dibangkitkan.
2. Bagaimana pengaruh kecepatan udara yang diberikan terhadap kecepatan ionisasi di permukaan dimana terjadi medan listrik tinggi.
3. Bagaimana efektifitas penjernihan air tinta menggunakan ozon ( $O_3$ ) yang dihasilkan dari medan listrik tinggi.

## 1.3 Batasan Masalah

Hal-hal yang berkaitan dengan penelitian ini akan diberi batas sebagai berikut.

1. Bahan dielektrik yang digunakan adalah udara dan kaca.
2. Pada penelitian ini jumlah kepingan dielektrik padat yang akan digunakan yaitu 2, 3 dan 4.
3. Sumber tegangan tinggi menggunakan tegangan tinggi AC.
4. Variabel penelitian yang diamati adalah jumlah sela dan kecepatan udara.
5. Pengujian dilakukan di laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
6. Tidak membahas pengaruh jenis kandungan udara terhadap banyaknya konsentrasi ozon yang terbentuk.
7. Penggunaan air tinta merah digunakan dalam pengujian untuk melihat besarnya ozon yang dihasilkan dari pembangkitan medan listrik tinggi terhadap waktu penjernihan air yang diberi zat warna.
8. Penelitian ini melanjutkan penelitian sebelumnya yang membahas pengaruh rasio dan bahan dielektrik terhadap pembangkitan medan listrik tinggi.

## 1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan membuat pembangkit medan listrik tinggi dengan menggunakan teknik dielektrik berlapis yang terdiri dari udara dan kaca.

## 1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut :

- 1) Bagi penulis, mampu memberikan pembelajaran dalam meneliti dan menganalisis pengaruh banyaknya lapisan dielektrik kaca dan kecepatan udara terhadap pembangkitan medan listrik tinggi, dan efektifitas sebagai penghasil gas ozon (Ozonisator).
- 2) Bagi pembaca, mampu memberikan wawasan mengenai pengaruh banyaknya lapisan dielektrik kaca dan kecepatan udara terhadap pembangkitan medan listrik tinggi, dan efektifitas sebagai penghasil gas ozon (Ozonisator).



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kaca Sebagai Dielektrik

Material kaca sering kali ditemui sebagai insulasi untuk mengamankan peralatan tegangan tinggi. Hal itu dikarenakan secara biaya lebih efektif dan mudah dibentuk. Selain itu kaca memiliki nilai permitivitas yang baik, dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Contoh kekuatan dielektrik suatu bahan

Bahan		KD ( kV/cm )	Tg $\delta$ (50 Hz)	Konstanta dielektrik ( $\epsilon$ )
Keramik	Alumina	1600	5 x 10-4	9
	Forsterite	800-1200	3 - 4 x 10-4	6
	Porselen	570	0,010	7
PVC		300	0,015 - 0,02	3 - 3,3
Udara		300		1,00059
Fluoro Carbon Plastic	P.T.F.E	200	< 0,0002	2
	P.C.T.F.E	210	0,0012 - 0,0036	2,3 - 2,8
	P.V.F2	104-512	0,0491 - 0,15	6,49 - 8,4
Nylon	Nylon 6/6	154	0,014	4,1
	Nylon 6	176-204	0,06 - 0,1	5 - 14
	Nylon 6/10	190	0,04	4,6
Mika dan turunannya	Muscovite	10.000	0,03	6 - 7,5
	phlogopite	7000	0,03	6 - 7,5
Kaca		100 - 400	< 1.10 - 3	3,8 - 10
Dielektrik Minyak	Transformator	150	0,001	2,2 - 2,3
	Kabel	300	0,002	2,3 - 2,5
	Kapasitor	200	0,25 x 10-2	2,1
	Askarels	200-250	0,6 x 10-2	4,8
	Silikon	300-400	10-3	2,7 - 3
Polyethelyn	Low Density	170-280	2.10 -4	2,3
	Med-Density	200-280	2.10 -4	2,3
	High Density	180-240	2.10 -4	2,35
	Irradiated	720-1000	5.10 -4	2,3

Sumber: High Voltage and Electrical Insulation Engineering, R. Arora, W. Morch, 2011

Dari Tabel 2.1 terlihat bahwa kaca memiliki konstanta dielektrik atau permitivitas listrik relative 3,8 hingga 10 dimana nilai tersebut tergolong tinggi disbanding dengan bahan dielektrik lain. Dalam sejarahnya percobaan pertama pembangkitan ozon dengan medan listrik tinggi pada tahun 1857 dilakukan menggunakan dua tabung kaca koaksial yang dialiri oksigen atau udara. Untuk mengaliri arus dalam sela peluahan, medan listrik harus cukup tinggi untuk menyebabkan tembus pada gas. Dalam sebagian besar aplikasi, dibutuhkan batas kerapatan arus dielektrik pada nilai rata-rata di ruang gas. Dengan demikian dielektrik bertindak sebagai beban yang dalam kasus ideal tidak mengkonsumsi



energi. Bahan yang biasanya digunakan untuk penghalang dielektrik adalah kaca atau gelas silika, dalam kasus khusus juga bahan keramik, dan lapisan email atau polimer tipis. (U. Kogelschatz, 2002)

**2.2 Dielektrik Berlapis**

Saat ini untuk memenuhi beragam kebutuhan kemanan pada peralatan tegangan tinggi dibutuhkan juga insulator yang bervariasi juga, mulai dari bentuk, jenis dan bahan yang akan digunakan sesuai kebutuhan. Kebutuhan tersebut biasanya dipengaruhi oleh besar tegangan suatu peralatan tegangan tinggi, lokasi atau bahkan dipengaruhi oleh factor efisiensi biaya. Salah satu variasi dalam penerapan dielektrik yang sering ditemui adalah dengan menyusun dielektrik tersebut secara berlapis. Penyusunan secara berlapis dilakukan untuk menaikan nilai permitivitas sehingga dielektrik dapat menahan tembus yang lebih besar.

Dalam penelitian ini dibutuhkan dielektrik yang dapat membangkitkan medan listrik tinggi dengan menyusun dielektrik secara berlapis. Dengan dielektrik yang berlapis maka ketebalannya bertambah dan mempengaruhi kemampuan dielektrik dalam membangkitkan medan tinggi. Pernyataan tersebut ditunjukkan dengan rumus berikut.

$$U = U_1 + U_2 \dots + U_x + \dots + U_n \tag{2.1}$$

$$= E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 + \dots + E_x \cdot d_x + \dots + E_n \cdot d_n$$

$$= E_2 \left( \frac{E_1}{E_x} \cdot d_1 + \frac{E_2}{E_x} \cdot d_2 + \dots + d_x + \dots + \frac{E_n}{E_n} \cdot d_n \right)$$

Karena:  $\frac{E_i}{E_v} = \frac{\epsilon_v}{\epsilon_i} = \frac{\epsilon_{rv} \epsilon_0}{\epsilon_{ri} \epsilon_0} = \frac{\epsilon_{rv}}{\epsilon_{ri}}$

$$U = E_x \left( \frac{\epsilon_{rx}}{\epsilon_{r1}} \cdot d_1 + \frac{\epsilon_{rx}}{\epsilon_{r2}} \cdot d_2 + \dots + d_x + \dots + \frac{\epsilon_{rx}}{\epsilon_{rn}} \cdot d_n \right)$$

$$= E_2 \cdot E_{rx} \left( \frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + \dots + \frac{d_x}{\epsilon_{rx}} + \dots + \frac{d_n}{\epsilon_{rn}} \right) \tag{2.2}$$

$$E_x = \frac{U}{\epsilon_{rx} \left( \frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + \dots + \frac{d_x}{\epsilon_{rx}} + \dots + \frac{d_n}{\epsilon_{rn}} \right)} \tag{2.3}$$

$$E_x = \frac{U}{\epsilon_{rx} \sum \frac{d_i}{\epsilon_{ri}}} \text{ kV/cm} \tag{2.4}$$

Dengan  $K = \frac{U}{\sum \frac{d_i}{\epsilon_{ri}}}$

$$E_x = \frac{K}{\epsilon_{rx}} \text{ kV/cm} \tag{2.5}$$



Keterangan:

$U$  : tegangan (V)

$E$  : kuat medan listrik (kV/cm)

$E_x$  : kuat medan listrik pada dielektrik lapisan ke-x (kV/cm)

$E_n$  : kuat medan listrik pada dielektrik lapisan selanjutnya (kV/cm)

$d$  : ketebalan dielektrik (cm)

$d_x$  : ketebalan pada dielektrik lapisan ke-x (cm)

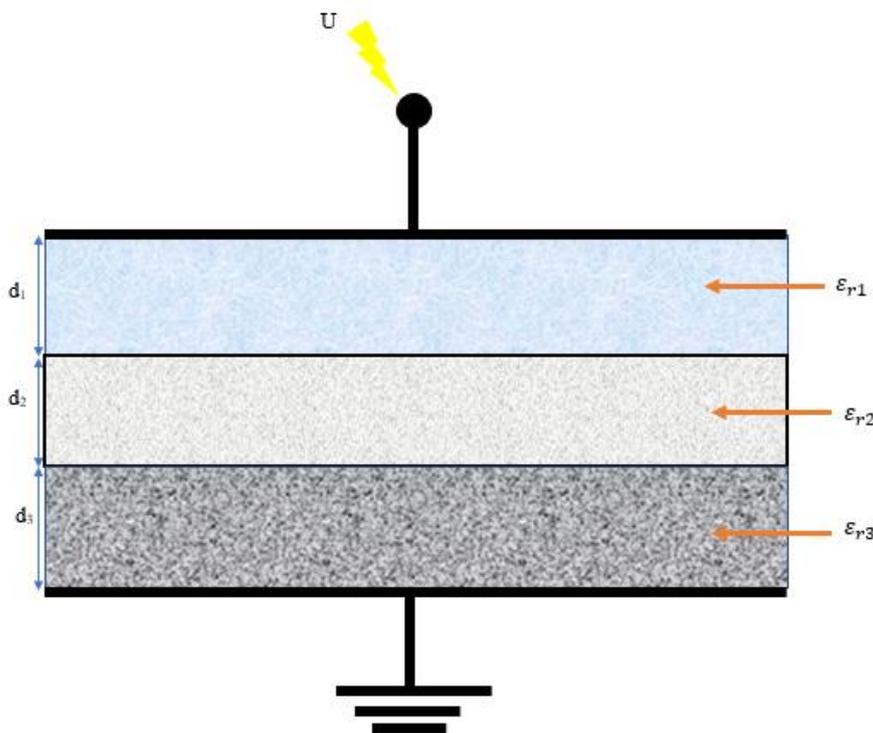
$d_n$  : ketebalan pada dielektrik lapisan selanjutnya (cm)

$\epsilon$  : Konstanta dielektrik

$\epsilon_{rx}$  : Konstanta dielektrik lapisan ke-x

$\epsilon_{rn}$  : Konstanta dielektrik lapisan selanjutnya

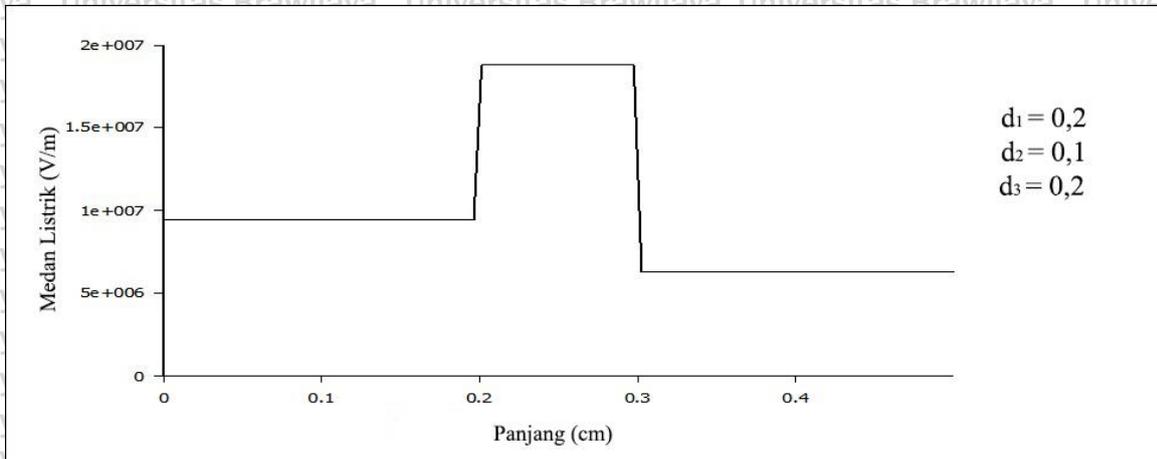
Dari rumus di atas menunjukkan jika tegangan ( $U$ ), ketebalan dielektrik ( $d$ ) dan konstanta dielektrik atau permitivitas listrik relatif ( $\epsilon$ ) mempengaruhi kuat medan listrik ( $E$ ) yang dibangkitkan. Seperti diilustrasikan pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Dielektrik berlapis dengan ketebalan dan konstanta dielektrik berbeda  
 Sumber: D. Kind (1993)

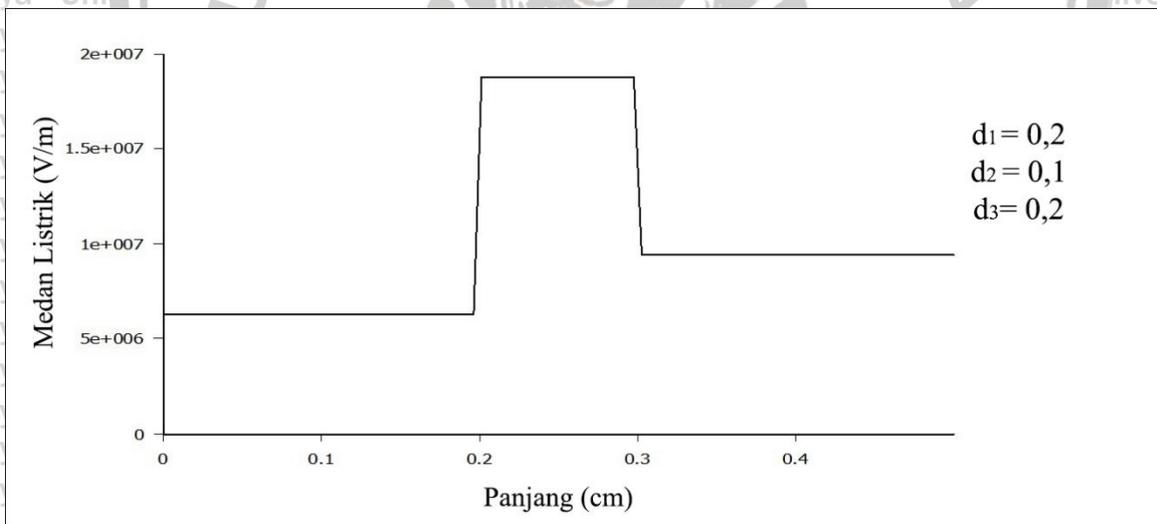
Besar tegangan berbanding lurus dengan medan yang dibangkitkan, sedangkan total ketebalan dielektrik berlapis dan konstanta dielektrik berbanding terbalik dengan medan listrik yang dibangkitkan. (M. Dhofir, 1997). Bila dinyatakan dalam grafik ilustrasi pada

Gambar 2.1 dan disesuaikan dengan perhitungan pada persamaan 2.1 sampai 2.5 dimisalkan medan listrik pada dielektrik lapisan pertama ( $E_1$ ), lapisan kedua ( $E_2$ ) dan lapisan ketiga ( $E_3$ ) dengan konstanta dielektrik dan ketebalan dielektrik dalam 3 kondisi akan digambarkan pada Gambar 2.2, 2.3 dan 2.4.



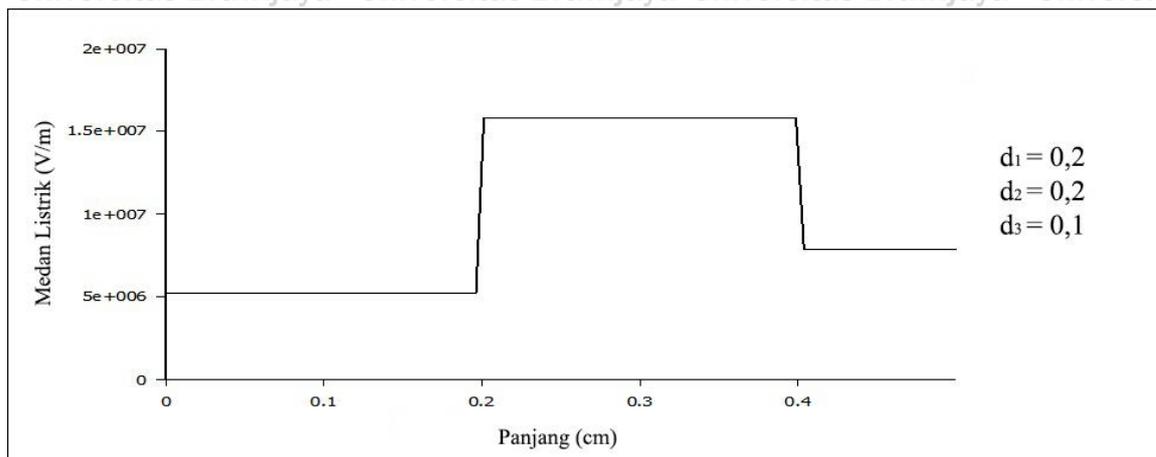
Gambar 2.2 Grafik distribusi medan listrik pada dielektrik lapis dengan kondisi  $\epsilon_{r1} < \epsilon_{r2} < \epsilon_{r3}$

Sumber: W. H. Hayt (1958)



Gambar 2.3 Grafik distribusi medan listrik pada dielektrik lapis dengan kondisi  $\epsilon_{r1} < \epsilon_{r3} < \epsilon_{r2}$

Sumber: W. H. Hayt (1958)



Gambar 2. 4 Grafik distribusi medan listrik pada dielektrik lapis dengan kondisi  $\epsilon_{r2} < \epsilon_{r3} < \epsilon_{r1}$  dengan perbedaan ketebalan dielektrik  
 Sumber: W. H. Hayt (1958)

Dari Gambar 2.2, 2.3 dan 2.4 yang merupakan keluaran grafik dari simulasi Finite Element Method Magnetics (FEMM) terlihat jika besar konstanta dan ketebalan dielektrik mempengaruhi distribusi medan listrik. Seperti terlihat pada Gambar 2.2 dan 2.3 dimana  $d_1$  semakin besar konstanta dielektrik, semakin kecil medan listrik yang dapat dibangkitkan. Sedangkan pada Gambar 2.4, semakin tebal dielektrik maka semakin kecil permukaan medan listrik yang dibangkitkan. Jadi konstanta dan ketebalan dielektrik memang berbanding terbalik dengan medan listrik yang dibangkitkan.

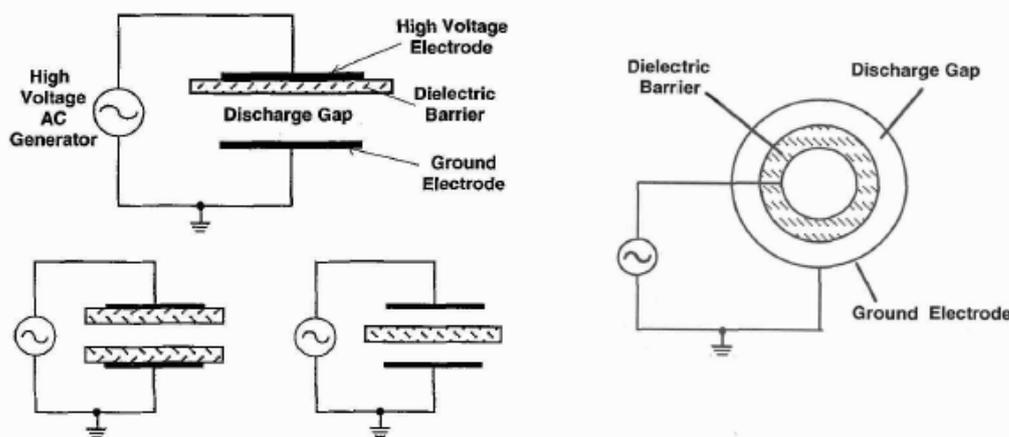
### 2.3 Peluahan Penghalang Dielektrik (Dielectric Barrier Discharge)

Dielectric Barrier Discharge (DBD), adalah peluahan listrik antara dua elektroda yang dipisahkan oleh isolasi dielectric barrier, juga disebut sebagai Barrier Discharge atau Silent Discharge yang sejak dulu secara khusus terkait dengan generator ozon. Karakteristik paling penting dari dielectric barrier discharge adalah bahwa kondisi plasma non-equilibrium dapat dihasilkan dengan cara yang lebih sederhana daripada dengan alternatif lain seperti peluahan tekanan rendah, fast pulsed high pressure discharge atau injeksi sinar elektron. Fleksibilitasnya sehubungan dengan konfigurasi geometris, media operasi, dan parameter pengoperasian belum pernah terjadi sebelumnya. Kondisi yang dioptimalkan dalam percobaan laboratorium dapat dengan mudah ditingkatkan hingga instalasi industri besar. Pasokan daya berbiaya rendah yang efisien tersedia hingga daya yang sangat besar. Teknologi ini pertama kali diperkenalkan oleh W. Siemens pada tahun 1857 untuk tujuan "ozonisasi" udara, DBD telah lama dianggap sebagai pelepasan ozonizer. Wawasan baru yang penting dalam struktur peluahan diperoleh oleh para insinyur



tegangan tinggi yang mempelajari tembus pada gas. Pada tahun 1932 Buss mengamati bahwa dalam sela bidang sejajar dengan elektroda terisolasi, tembus udara terjadi pada sejumlah saluran kerusakan kecil individu.

Dielectric Barrier Discharge ditandai dengan adanya satu atau lebih lapisan isolasi di aliran arus antara elektroda logam di samping ruang peluahan. Konfigurasi planar atau silinder yang berbeda adalah umum seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Hal ini sangat terkait dengan dengan konfigurasi peluahan permukaan di mana peluahan dimulai pada permukaan dielektrik karena medan listrik yang kuat yang dihasilkan oleh elektroda logam tertanam. Kehadiran dielektrik menghalangi operasi DC. Meskipun konfigurasi DBD dapat dioperasikan antara frekuensi saluran dan frekuensi gelombang mikro, jangkauan operasi tipikal untuk sebagian besar aplikasi DBD secara teknis terletak antara 500 Hz dan 500 kHz.



Gambar 2. 5 Beragam konfigurasi peluahan penghalang dielektrik  
Sumber: U. Kogelschatz (1997)

#### 2.4 Peluahan Parsial Dalam

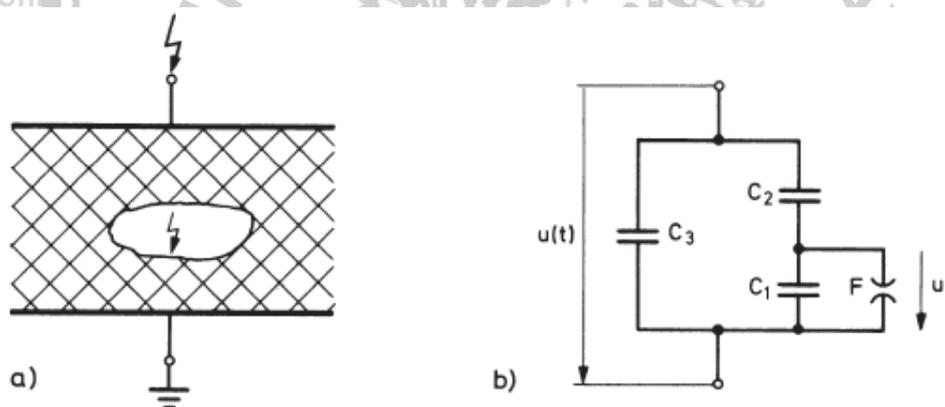
Jika dalam dielektrik jenis padat atau cair dari suatu sistem isolasi terdapat rongga udara atau berisi bahan dengan nilai konstanta dielektrik lebih rendah maka kuat medan dalam rongga tersebut akan lebih besar dari pada dalam medium sekelilingnya. Untuk itu peluahan parsial dalam merupakan mekanisme yang terjadi dalam penelitian yang akan dilakukan. Bilamana tegangan pada rongga melampaui tegangan nyala maka terjadi tembus parsial. Terutama untuk tegangan bolak-balik dengan nilai amplitudo yang cukup maka terjadi peluahan yang berbentuk pulsa di dalam rongga. Kondisi dielektrik sekelilingnya dapat memburuk akibat pengaruh jangka panjang dari peluahan parsial ini, dan dengan kondisi tertentu bahkan dapat dirusakkan oleh tembus sempurna akibat mekanisme erosi.

Dalam Gambar 2.6 dicontohkan suatu susunan elektrida dengan peluahan parsial dalam yang digambarkan dengan sistem isolasi dengan dielektrik padat yang mengandung rongga gas. Gambar tersebut juga memperlihatkan rangkaian ekuivalen untuk peluahan parsial berbentuk pulsa yang dikemukakan oleh A. Gemant dan W.v. Phillipoff (1932). Nilai  $C_1$  berhubungan dengan kapasitansi rongga yang meluuh memalui F bilamana tegangan nyala  $U_z$  tercapai. Nilai  $C_2$  berhubungan dengan kapasitansi yang terhubung seri dengan rongga dan  $C_3$  untuk menyatakan kapasitansi parallel dari susunan tersebut. Untuk tegangan uji sinusoidal maka tegangan pada  $C_1$  dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$U_{10} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} u(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \hat{U} \sin \omega t \quad (2.6)$$

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

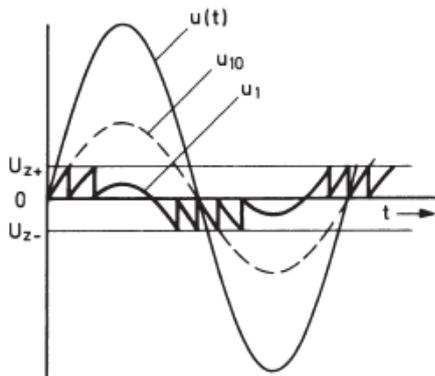
$$\hat{U}_e = \frac{C_1 + C_2}{C_2} U_z \quad (2.7)$$



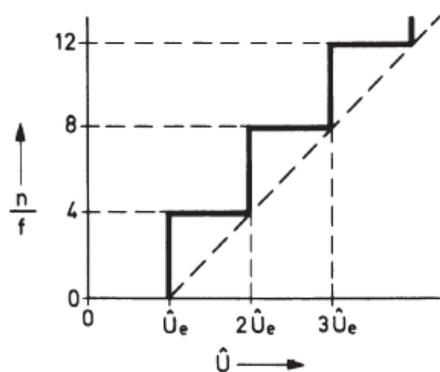
Gambar 2. 6 Susunan dengan peluahan parsial dalam dan rangkaian ekuivalen a) Objek uji dengan rongga b) Rangkaian ekuivalen  
 Sumber: D. Kind (1993)

Jika tegangan uji lebih besar dari tegangan mula maka terjadi pemuatan  $C_1$  secara berulang seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Nampak dalam gambar tersebut bahwa pulsa-pulsa peluahan parsial terjadi terutama dalam daerah perpotongan tegangan uji.

Di sini persamaan yang sama juga berlaku untuk frekuensi pulsa seperti yang diberikan dalam Gambar 2.8 dan ditunjukkan juga dalam grafik.



Gambar 2. 7 Kurva tegangan pada rangkaian ekuivalen untuk peluahan parsial dalam berbentuk pulsa  
 Sumber: D. Kind (1993)



Gambar 2. 8 Laju Pengulangan pulsa dari peluahan parsial  
 Sumber: D. Kind (1993)

Hubungan fasa yang berbeda dari peluahan parsial dalam dan luar merupakan karakteristik pembeda yang penting dari kedua gejala ini. Muatan yang dikompensasi pada tempat peluahan untuk setiap peluahan sebesar:

$$Q_1 = (C_1 + C_2) U_z \tag{2.8}$$

Dengan “muatan semu”  $Q_{1s}$  disulang dengan  $C_2$

$$Q_{1s} = C_2 U_z \neq Q_1 \tag{2.9}$$

Di sini tidak mungkin mengukur muatan yang sebenarnya  $Q_1$  untuk kapasitansi parsial yang tidak diketahui, hal tersebut berlawanan dengan peluahan parsial luar. Muatan  $Q_{1s}$  yang dapat diukur dinyatakan dengan seperti halnya dalam persamaan berikut:

$$\Delta Q = Q_{1s} \tag{2.10}$$



## 2.5 Ozon (O<sub>3</sub>)

Ozon adalah molekul triatomik atau terdiri dari tiga molekul oksigen. Ozon tertumpu di bawah stratosfer di antara 15 dan 30 km di atas permukaan bumi yang dikenal sebagai 'lapisan ozon'. Namun sebagian kecil dari ozon juga terdapat di troposfer. Secara alamiah, ozon dihasilkan melalui percampuran cahaya ultraviolet dengan atmosfer bumi dan membentuk suatu lapisan ozon pada ketinggian 50 kilometer. Ozon (O<sub>3</sub>) dihasilkan apabila O<sub>2</sub> menyerap sinar ultraviolet pada jarak gelombang 242 nanometer dan disingkirkan dengan fotosintesis dari sinar bagi jarak gelombang yang besar dari 290 nm. O<sub>3</sub> juga merupakan penyerap utama sinar UV antara 200 dan 330 nm. Penggabungan proses-proses ini efektif dalam meneruskan kekonstanan bilangan ozon dalam lapisan dan penyerapan 90% sinar UV. Ozon amat mengkakis dan dipercayai sebagai bahan beracun dan bahan cemar biasa. Ozon mempunyai bau yang tajam, menusuk hidung. Ozon juga terbentuk pada kadar rendah dalam udara akibat arus listrik seperti kilat, dan oleh tenaga tinggi seperti radiasi elektromagnetik.

Tabel 2. 2 Keterangan Ozon

No	Keterangan	
1.	Nama	Trioksigen
2.	Rumus kimia	O <sub>3</sub>
3.	Massa polar	47,998 g·mol <sup>-1</sup>
4.	Penampilan	gas berwarna kebiruan
5.	Densitas	2,144 g·L <sup>-1</sup> (0 °C), gas
6.	Titik lebur	80,7 K, -192,5 °C
7.	Titik didih	161,3 K, -111,9 °C
8.	Kelarutan dalam air	0,105 g·100mL <sup>-1</sup> (0 °C)
9.	Entropi molar standar (S°)	237,7 J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup>
10.	Entalpi pembentukan standar (Δ <sub>f</sub> H°)	+142,3 kJ·mol <sup>-1</sup>

Sumber : W. M. Haynes, 2015

Gas ozon (O<sub>3</sub>) banyak digunakan dalam deodorisasi, dekolourisasi, desinfeksi, proses pemutihan, pengolahan gas/udara, sintesis kimia dan baru-baru ini dalam aplikasi medis. Dalam banyak aplikasi yang disebutkan di atas, penting untuk memberikan O<sub>3</sub> dalam konsentrasi yang benar. Konsentrasi O<sub>3</sub> berlebihan atau kurang dapat memiliki efek yang tidak efektif atau merusak. Konsentrasi dapat dikaitkan dengan konsentrasi gas ozon itu sendiri, diukur dalam sebagian dari per juta (ppm) atau mg/m<sup>3</sup>. Oleh karena itu pentingnya mengetahui konsentrasi gas ozon yang diproduksi sendiri. Dibandingkan dengan disinfektan konvensional seperti senyawa klorin (klorin) atau kaporit yang umum digunakan untuk pengolahan air minum, ozon mempunyai beberapa kelebihan. Klorin misalnya, dapat menimbulkan bau yang tajam (bau kaporit). Selain itu disinfeksi dengan klor

(klorin) dapat menimbulkan dampak sampingan dengan terbentuknya senyawa trihalomethan (THMs) yang bersifat karsinogen. Maka dari itu ozon adalah zat pengoksidasi kuat yang terbuat dari molekul oksigen yang stabil dan dapat menggantikan senyawa klorin dalam berbagai aplikasi termasuk pengolahan air limbah, pemrosesan udara yang tercemar, antimikroba, inaktivasi bakteri, oksidasi semikonduktor, dan sebagai desinfektan. Namun, sisa ozon akan kembali ke oksigen alami yang membuat lingkungan tidak terpengaruh oleh polusi dari produk sampingannya.

## 2.6 Proses Pembentukan Ozon (O<sub>3</sub>) dengan Dielektrik Berlapis

Beberapa mekanisme pembentukan ozon sendiri telah dipelajari yaitu peluahan parsial dalam seperti yang sudah dibahas sebelumnya, peluahan streamer, dan peluahan sunyi. Saat ini, ozonizer silent discharge lebih banyak digunakan karena memerlukan tegangan mula yang lebih rendah dan konsumsi daya lebih sedikit. Lebih lanjut, peluahan terjadi secara homogen di seluruh ruang reaksi, menghasilkan suhu yang lebih rendah sehingga menghilangkan kebutuhan akan sistem pendingin. Ruang peluahan dimana terbangkitnya medan listrik tinggi hening dibentuk oleh dua elektroda logam dengan lapisan dielektrik dan sela udara di antaranya. Itu juga dikenal sebagai debit penghalang dielektrik (DBD). Ruang tersebut mengalami tegangan tinggi di seluruh elektroda yang memasok energi untuk peluahan mikro. peluahan mikro ini memecah molekul oksigen menjadi atom oksigen tunggal, yang bergabung dengan molekul oksigen untuk membentuk gas ozon

Metode produksi ozon dapat memisahkan molekul oksigen menjadi atom sehingga molekul oksigen dan partikel ketiga bertabrakan dan segera membentuk ozon. Ozon yang terbentuk akan memiliki elektron berenergi tinggi antara 1-10 eV yang dihasilkan di daerah peluahan dimana DBD terjadi. Mekanisme pembentukan ozon ionisasi dan rekombinasi mencakup disosiasi dan asosiasi. Prosesnya dimulai dengan pemboman elektron molekul O<sub>2</sub> di wilayah peluahan menghasilkan atom oksigen dan menggabungkan elektron dengan molekul oksigen untuk membuat ozon. Reaksi utama untuk pembentukan ozon ditunjukkan pada persamaan 2.11 dan 2.12:



Dimana M adalah pasangan reaksi tubrukan ketiga yang memiliki peran dalam proses penyerapan energi tetapi tidak bereaksi terhadap kimia sehingga distribusi elektron berenergi tinggi menentukan jumlah ozon yang terbentuk. Pada saat yang sama

pembentukan ozon terjadi dengan terjadinya dekomposisi ozon. Seperti terlihat pada persamaan 2.11 bahwa dalam produksi ozon diperlukan 2 molekul oksigen dan 1 elektron untuk menguraikan molekul oksigen tersebut. Elektron berenergi tinggi yang dibutuhkan berasal dari M. Penguraian ozon terjadi melalui reaksi pada persamaan 2.13 dan 2.14:



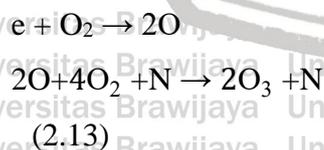
Dari Persamaan 2.12 menunjukkan bahwa oposisi antara produksi ozon dan dekomposisi ozon di sekitar proses produksi ozon. Dalam percobaan yang akan dilakukan jenis gas yang akan dimasukkan merupakan udara bebas yang terdiri dari:

Tabel 2.3 Kandungan gas pada udara

Kandungan Udara Kering				
Gas		Volume		
Nama	Formula	Dalam ppmv	Persentase (%)	
Nitrogen	N <sub>2</sub>	780,840	78.084	
Oksigen	O <sub>2</sub>	209,460	20.946	
Argon	Ar	9,340	0.9340	
Karbon Dioksida (April, 2019)	CO <sub>2</sub>	413.32	0.041332	
Neon	Ne	18.18	0.001818	
Helium	He	5.24	0.000524	
Metana	CH <sub>4</sub>	1.87	0.000187	
Krypton	Kr	1.14	0.000114	
Tidak termasuk dalam udara kering				
Uap Udara	H <sub>2</sub> O	0–30,000(D)	0–3%(D)	

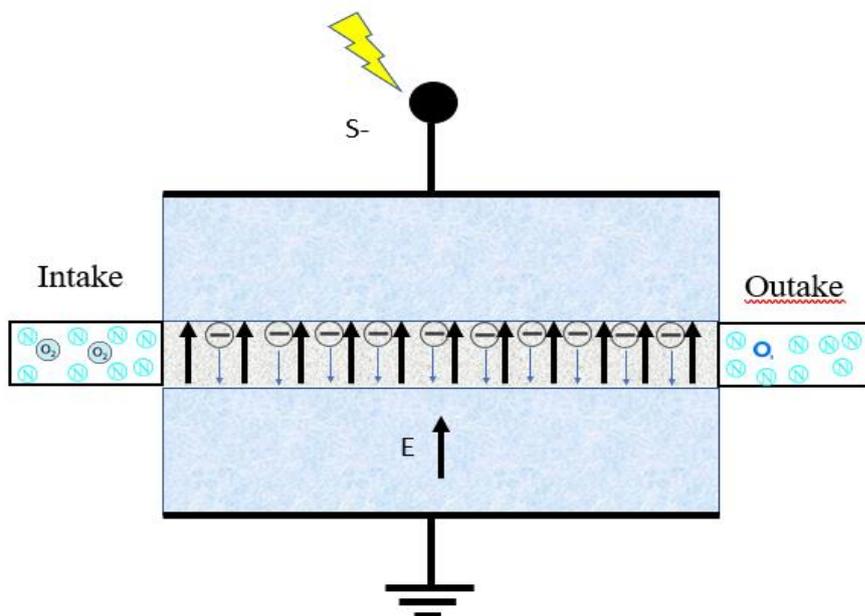
Sumber : W. M. Haynes, 2015

Dalam Tabel 2.3 terlihat jika sebagian besar udara kering yang ada di sekitar kita merupakan hampir 80% Nitrogen dan 20% Oksigen. Karena persentase kandungan Nitrogen pada udara bebas merupakan yang terbesar, sehingga Nitrogen memiliki kecenderungan sebagai M pada persamaan 2.11. Sehingga persamaan yang terbentuk adalah persamaan 2.15

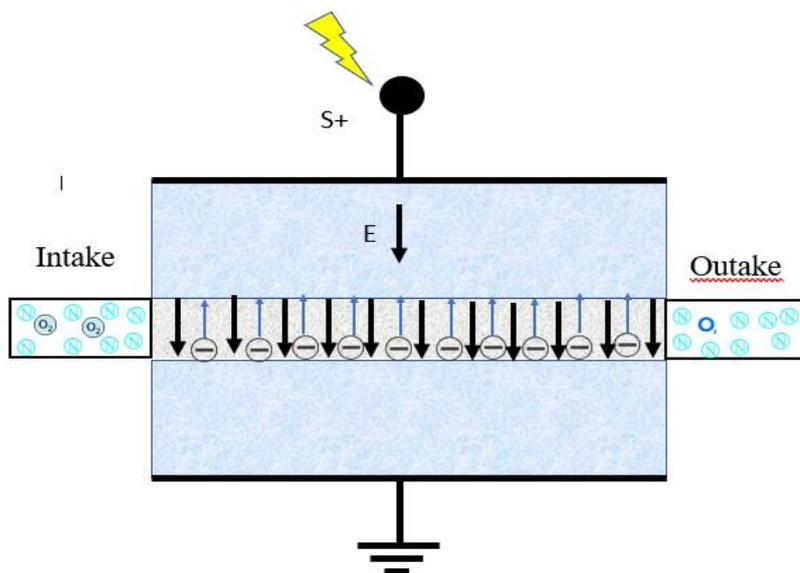


Dari persamaan 2.16 menyatakan jika dalam memproduksi ozon diperlukan 1 elektron dan 2 molekul oksigen. Elektron dalam proses ionisasi memecah molekul oksigen menjadi satu atom dan dengan bantuan Nitrogen pada persamaan 2.16 membentuk ozon, sehingga menunjukkan jika Nitrogen memiliki andil besar dalam reaksi ketika ionisasi terjadi di dalam chamber seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9 dan 2.10 dengan dicatu tegangan AC yang polaritasnya berubah dari positif ke negatif secara kontinu.

Pembentukan ozon terjadi ketika molekul oksigen menjadi atom sehingga molekul oksigen dan partikel ketiga yang merupakan nitrogen yang elektronnya terlepas menjadi electron bebas bertabrakan dengan molekul oksigen dan segera membentuk ozon.



Gambar 2. 9 Ionisasi ketika polaritas negative  
 Sumber: W. H. Hayt (1958)



Gambar 2. 10 Ionisasi ketika polaritas Positif  
 Sumber: W. H. Hayt (1958)

## 2.7 Pengaruh Kecepatan Aliran Udara terhadap Proses Ionisasi

Seperti yang disebutkan sebelumnya jika pembentukan ozon akan memiliki elektron berenergi tinggi antara 1-10 eV yang dihasilkan di daerah peluahan dimana DBD terjadi. Dengan energi yang sangat tinggi tadi maka proses ionisasi yang terjadi sangatlah cepat.

Maka dari itu dalam penelitian ini akan membuktikan hal tersebut dengan mempertimbangkan apakah kecepatan aliran udara mempengaruhi proses ionisasi dalam pembentukan ozon.

Dengan kecepatan aliran yang berbeda tentu nantinya volume udara yang dihasilkan juga berbeda. Hal itu ditunjukkan dalam persamaan berikut

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2.17)$$

Keterangan:

Q : Laju aliran udara (Liter/detik)

V : Volume bidang/alat uji (cm<sup>3</sup>)

t : waktu (detik)

dimana volume bidang sela udara ditunjukkan dengan persamaan berikut:

$$V = p \times l \times t \quad (2.18)$$

Keterangan:

p : Panjang sela udara (cm)

l : lebar sela udara (cm)

t : tinggi sela udara (cm)

Dari persamaan 2.17 ditunjukkan jika volume perasal dari dimensi sela udara pada alat uji yang nantinya akan dialirkan udara yang inletnya berasal dari pompa udara dan outletnya menuju air yang diberi pewarna



## BAB III

### METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah dengan melakukan pengujian di laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan data - data hasil pengujian yang didapat akan dianalisis. Metode dalam penelitian ini meliputi.

#### 3.1 Studi Literatur

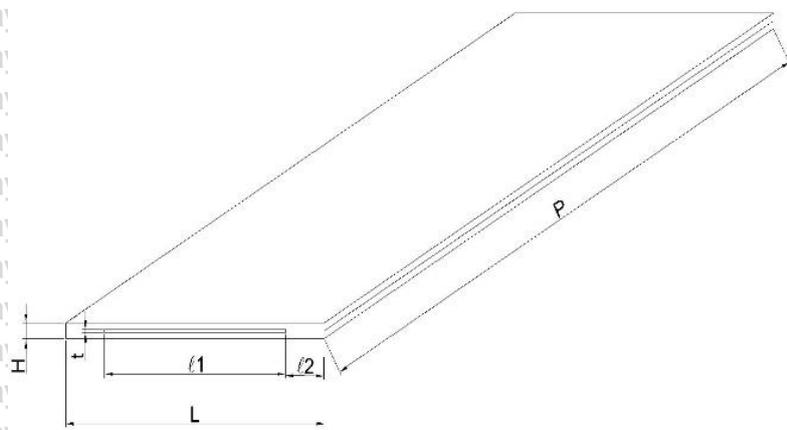
Studi literatur yang dilakukan dengan mempelajari buku-buku literatur yang berkaitan dengan dielektrik, medan listrik tinggi, ozon dan pengujian metode – metode pembangkitan medan listrik tinggi dengan aplikasinya dan jurnal - jurnal dari situs internet yang berkaitan dengan penyelesaian penelitian ini. Studi literatur bertujuan sebagai dasar teori yang menunjang penyelesaian penelitian tentang karakteristik dan metode pengujian dari dielektrik untuk pembangkitan medan listrik tinggi.

#### 3.2 Penentuan Variabel Penelitian

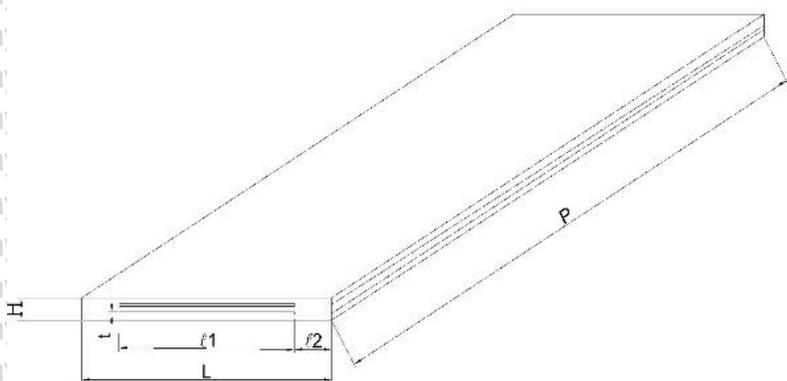
Pada penelitian ini variabel yang akan diamati adalah pengaruh jumlah void udara dan masukan gas yang diberikan dielektrik padat terhadap pembangkitan medan listrik tinggi yang diaplikasikan untuk mengionisasi gas tersebut sehingga memproduksi gas ozon yang akan dialirkan pada air tinta sebagai indikator penjernihan air menggunakan gas ozon. Berdasarkan literatur dan perhitungan yang telah dilakukan medan listrik tinggi yang dibutuhkan untuk menghasilkan gas ozon yaitu berkisar  $>60$  kV/cm maka tegangan yang digunakan pada pengujian ini, dimulai dari 5 kV sampai 50 kV dan variasi yang digunakan adalah variasi banyaknya sela void udara dan kecepatan udara yang masuk terhadap dielektrik padat.

#### 3.3 Objek Uji

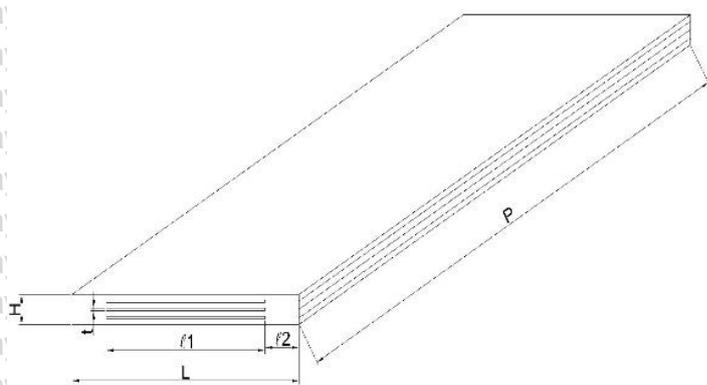
Dalam penelitian ini obyek uji yang digunakan merupakan dielektrik padat yaitu kaca (*silicate glass*) yang diberikan void atau sela udara dengan jumlah yang berbeda-beda.



Gambar 3. 1 Objek uji 2 keping kaca 1 sela udara



Gambar 3. 2 Objek uji 3 keping kaca 2 sela udara



Gambar 3. 3 Objek uji 4 keping kaca 3 sela udara

Desain objek uji untuk pembangkitan medan listrik di sela udara ditunjukkan pada Gambar 3.1, 3.2 dan 3.3 dengan variabel ukuran yang diberikan pada Tabel 3.1.

Setelah ditumpuk dengan sedemikian rupa, lalu objek uji dibersihkan dari polutan-polutan yang mungkin dapat menyebabkan penurunan kekuatan dielektrik atau koefisien dielektrik, bisa juga mengakibatkan medan tinggi yang dapat menyebabkan tembus di luar sela udara.

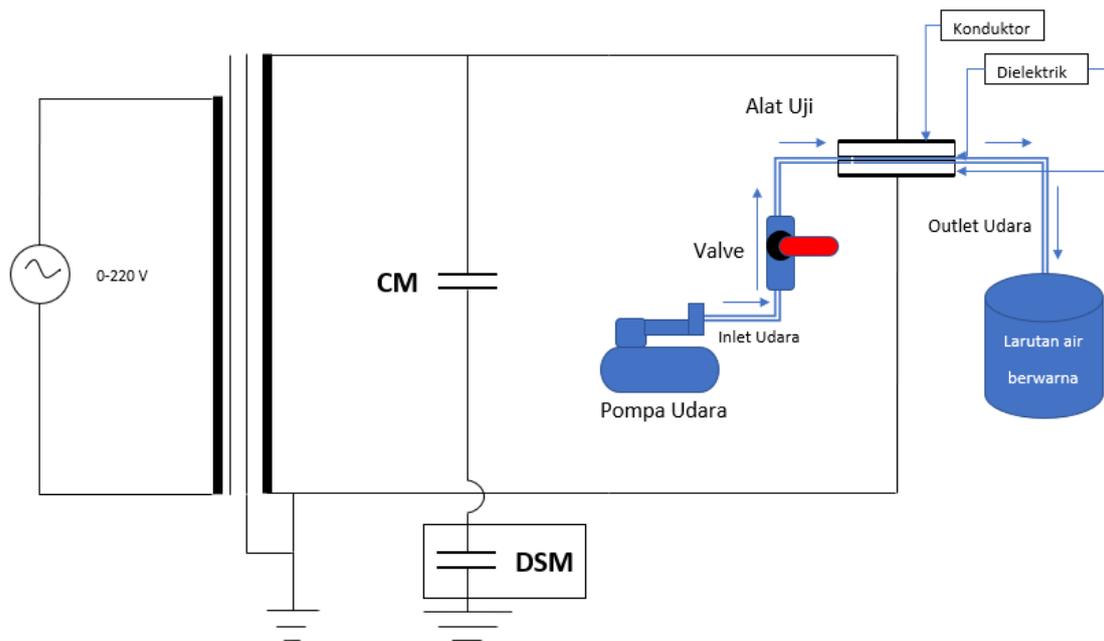
Tabel 3.1 Dimensi Desain Objek Uji

Keterangan	1 Sela (cm)	2 Sela (cm)	3 Sela (cm)
t	0,1	0,1	0,1
H	0,5	0,8	1,1
P	23	23	23
L	10	10	10
l <sub>1</sub>	8,5	8,5	8,5
l <sub>2</sub>	1,5	1,5	1,5

Pada permukaan atas dan bawah objek uji ditempatkan konduktor aluminium di atas dan untuk dialirkan tegangan tinggi dan ground yang ukurannya menyerupai dengan permukaan objek uji dan sesuai dengan perhitungan jarak rambat dan dikikir di sudut-sudut, sisi atau permukaan yang sekiranya berbentuk runcing. Setelah itu, seluruh permukaan dielektrik dan konduktor tersebut diselubungi oleh isolasi listrik sejenis mastic waterseal. Beberapa hal tersebut dilakukan supaya tidak menimbulkan medan tinggi yang dapat menyebabkan tembus di luar dielektrik.

### 3.4 Rangkaian Pengujian

Rangkaian pengujian yang digunakan untuk mengetahui pengaruh jumlah sela udara dan kecepatan udara pada hasil produksi ozon akan di berikan seperti Gambar 3.3. Dalam pengujian pengaruh banyak sela dan kecepatan udara pada hasil produksi ozon digunakan tegangan bolak-balik (AC). Pengukuran tegangan tinggi terdiri dari trafo uji (*HV Transformer*) yang dapat menaikkan tegangan sampai 100 kV, dengan daya yang dikeluarkan sebesar 5 kVA, dan frekuensi 50 Hz.



Gambar 3. 4 Rangkaian pengujian pembangkitan medan listrik tinggi sebagai ozonisator

Trafo uji digunakan untuk membangkitkan tegangan tinggi AC. Pada saat pengujian, untuk menaikkan tegangan kerja pada sisi primer trafo dapat diatur melalui *control desk*.

Untuk kebutuhan pengukuran dibutuhkan  $C_M$  yang digunakan sebagai pembagi tegangan kapasitif menuju DSM, DSM merupakan alat ukur tegangan tinggi AC, agar tegangan yang akan masuk pada DSM diturunkan terlebih dahulu oleh  $C_M$  dengan prinsip pembagi tegangan kapasitif. Sisi sekunder trafo dihubungkan dengan terminal fasa dari dielektrik padat yang berupa konduktor alumunium, dengan bagian bawah dari dielektrik padat yang dibumikan.

Pompa udara digunakan untuk memberi masukan udara menuju objek uji yang berupa udara dengan konsentrasi Oksigen ( $O_2$ ) sekitar 22%. Sebelum udara menuju objek uji, kecepatan udara tersebut diatur menggunakan valve. Lalu keluaran udara dari objek uji yang sudah terionisasi akan keluar Ozon ( $O_3$ ) yang akan dialirkan menuju wadah yang berisi larutan air berwarna sebagai indikator pemurnian.

### 3.5 Bahan dan Peralatan

Bahan dan peralatan yang dipergunakan pada penelitian ini agar mendapatkan pengaruh bahan dielektrik dan jumlah lapis kepingan dielektrik pada produksi gas ozon, antara lain.

- a. Dielektrik Padat Dengan Sela Udara : Obyek Uji
- b. Plat Alumunium : Konduktor Objek Uji
- c. Larutan Air Berwarna : Sebagai Indikator
- d. Pompa Udara : Alat pompa udara
- e. Selang Udara : Untuk mengalirkan udara
- f. Valve/katup : Untuk mengatur kecepatan udara
- g. *HV Transformer* (Trafo Uji) : 220 V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz
- h.  $C_M$  : Pembagi Kapasitif (100-Pf)
- i. *DSM* : Alat Ukur Tegangan Tinggi AC
- j. Kabel konduktor : NYA (2mm)

### 3.6 Deskripsi Bahan dan Peralatan

- a. Dielektrik padat dengan jumlah sela udara yang berbeda-beda sebagai objek uji yang akan diteliti.
- b. Larutan air berwarna, digunakan sebagai indikator untuk pemurnian air dengan gas ozon.
- c. Plat Alumunium, sebagai konduktor objek uji yang disambungkan dengan sumber tegangan tinggi dan ground.
- d. Pompa udara, digunakan untuk mengalirkan udara ke objek uji.
- e. Selang udara digunakan untuk mengalirkan udara dari pompa melewati objek uji menuju ke larutan air berwarna.
- f. Katup/valve untuk mengatur kecepatan udara yang melewati objek uji.
- g. *HV Transformer* (Trafo Uji), transformator ini dapat menaikan tegangan sampai 100 kV, dengan daya yang dikeluarkan sampai dengan 5 kVA, dan frekuensi yang digunakan sesuai standar PLN, yaitu 50 Hz.
- h.  $C_M$  merupakan kapasitor pengukur yang berfungsi sebagai pembagi tegangan sebelum masuk ke *DSM*.
- i. *DSM* adalah sebagai pengukur tegangan tinggi AC.

### 3.7 Kondisi Pengujian

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan sebelum melakukan pengujian salah satunya adalah kondisi ruangan uji. Dengan menentukan ruangan normal yaitu dengan suhu  $25^{\circ}\text{C}$  dan tekanan ruang 965 mbar. Objek uji harus dipastikan benar benar bersih dari debu

sehingga tidak mengakibatkan medan tinggi di luar sela udara untuk menghindari tembus. Plat elektroda tegangan tinggi yang menggunakan plat aluminium dikikir pingir-pinggirannya sehingga lebih halus dan tidak lancip untuk menghindari tembus yang terjadi dikarenakan medan yang berkumpul di bentuk lancip.

Pompa udara, memompa udara dengan tekanan yang sama yang dialirkan menggunakan selang udara dan disebar menggunakan casing akrilik berbentuk segitiga agar persebaran udara yang melewati sela udara lebih merata. Dipastikan untuk tidak ada udara yang keluar selain melewati selang udara agar menjaga tekanan udara yang dipompa oleh pompa udara tetap sama.

### 3.8 Langkah Pengujian

Adapun langkah-langkah untuk pengujian adalah seperti berikut:

1. Merancang 3 buah objek uji dengan perbedaan banyak sela alir udara.
2. Menyusun komponen rangkaian pengujian seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3
3. Menghubungkan tegangan tinggi AC dari transformator ke plat konduktor objek uji
4. Menghubungkan, mengatur bukaan katup dan menyalakan pompa udara untuk masukan udara *gas inlet* menuju objek uji
5. Menyiapkan larutan air berwarna yaitu berupa campuran dari air dan minuman dengan warna merah (fanta) dengan perbandingan antara air dan fanta 1 : 5, lalu menghubungkan *gas outlet* dari objek uji.
6. Mengatur variasi tegangan yang telah ditentukan
7. Mencatat hasil pengamatan berupa arus bocor dan waktu yang dibutuhkan untuk memurnikan larutan air berwarna
8. Maksimal waktu pengujian untuk pemurnian yaitu 15 menit
9. Mengamati hasil pemurnian
10. Mengulangi langkah 1 sampai 9 pada pengujian untuk rasio dielektrik yang berbeda
11. Mengulangi langkah 1 sampai 10 pada pengujian menggunakan objek uji dengan jumlah sela yang berbeda
12. Membandingkan seluruh data yang diperoleh

### 3.9 Studi Data dan Pembahasan

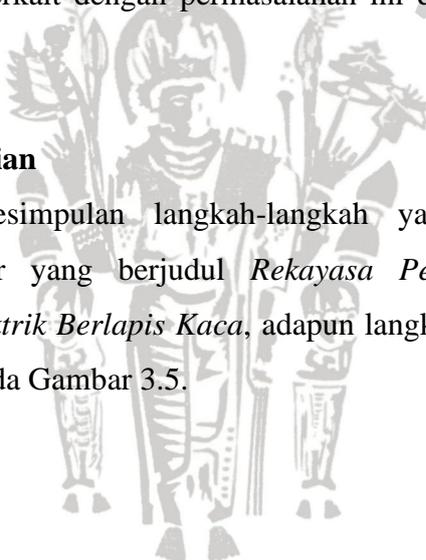
Setelah pengujian akan didapat data-data berupa besar arus bocor, hasil pemurnian air dari larutan air berwarna dan kecepatan waktu yang dibutuhkan untuk memurnikan larutan air berwarna. Pada penelitian ini data-data yang telah didapat akan didokumentasikan dan dilakukan studi serta pembahasan pengaruh banyak sela udara, kecepatan udara, dan variasi tegangan tinggi terhadap medan listrik yang dibangkitkan di sela udara dielektrik padat. Juga pengamatan produksi ozon terhadap besaran medan listrik yang digunakan untuk memurnikan larutan air berwarna sebagai indikator.

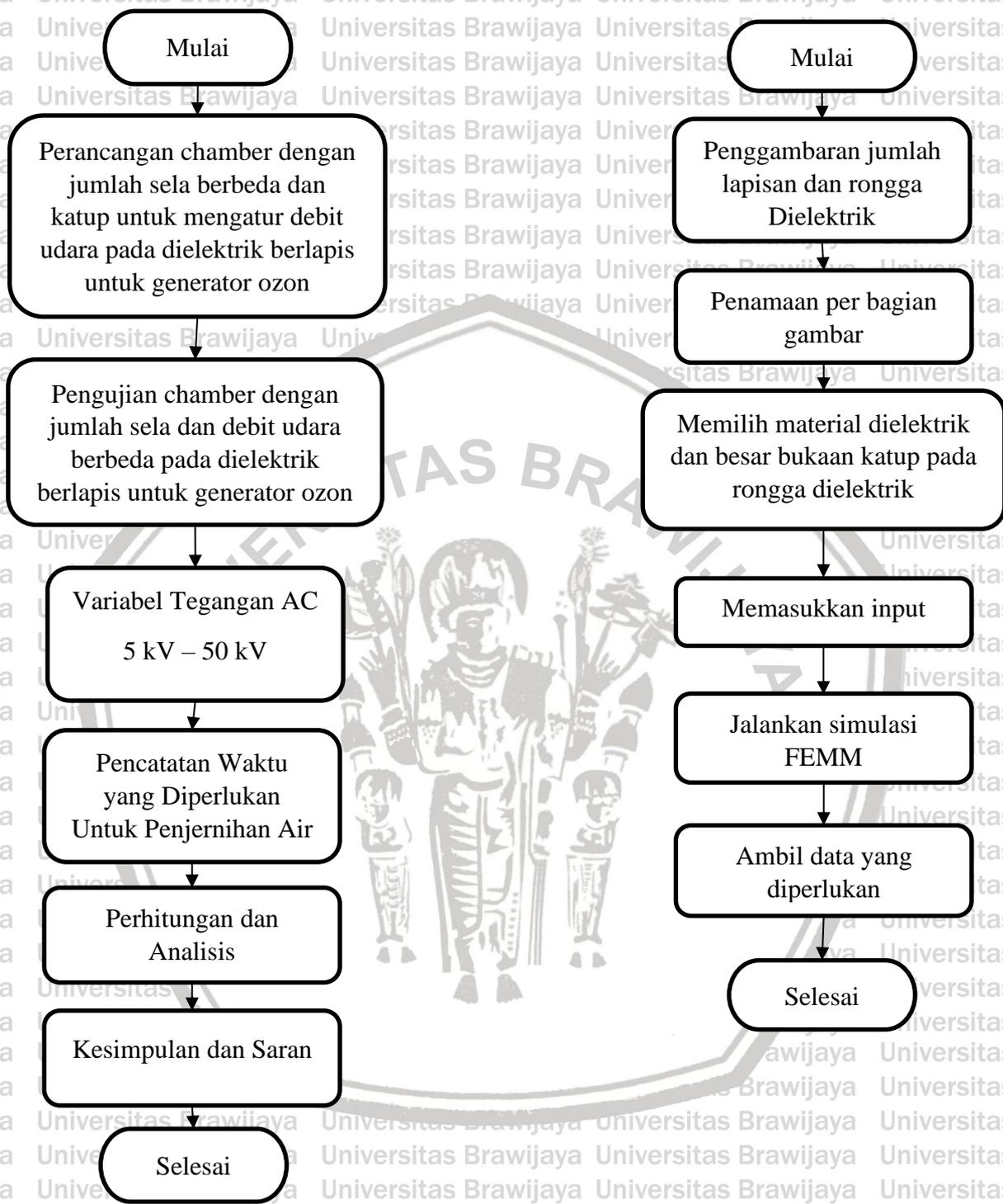
### 3.10 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Dari analisis dan pembahasan dapat ditarik suatu kesimpulan yang merupakan intisari dari penulisan skripsi ini dan disertakan pula saran dari penulis untuk mengembangkan penelitian ke depan yang terkait dengan permasalahan ini dan menemukan solusi untuk permasalahan ini.

### 3.11 Diagram Alir Penelitian

Dari keseluruhan kesimpulan langkah-langkah yang akan ditempuh dalam menyelesaikan tugas akhir yang berjudul *Rekayasa Pembangkitan Medan Tinggi Menggunakan Bahan Dielektrik Berlapis Kaca*, adapun langkah-langkah pengerjaan tugas akhir tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.5.





Gambar 3. 5 Diagram alir penelitian dan diagram simulasi FEMM

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Tinjauan Umum

Mempelajari pengaruh banyak sela udara dan besar kecepatan udara terhadap kuat pembangkitan medan listrik tinggi tentunya memerlukan beberapa nilai aspek dan metode.

Hal tersebut mencakup perhitungan matematis, simulasi FEMM dan dengan mempelajari efektivitas pengaplikasian medan tinggi tersebut secara langsung. Maka dari itu dari itu dalam pengujian untuk menempuh skripsi ini saya melakukan pengaplikasian medan listrik tinggi dengan indikator keluaran berupa ozon ( $O_3$ ) yang keberhasilannya dilihat dari kemampuan keluaran udara hasil pengujian dapat menjernihkan air yang berwarna. Dalam percobaan ini hal pertama yang dilakukan adalah dengan merancang 3 buah alat uji untuk dilakukan perbandingan. Masing-masing dari alat uji tersebut merupakan dielektrik yang memiliki dua, tiga dan empat lapis kaca yang diantaranya diberi jarak sela berupa udara sebesar 1 mm yang bertujuan untuk memicu adanya medan tinggi. Lalu isolator-isolator berlapis tersebut dilapisi lagi dengan dua lembar plat aluminium di kedua sisinya dengan tebal 1,5 mm yang dihubungkan dengan sumber tegangan tinggi pada sisi satunya dan ground pada sisi yang lain. Diantara jarak sela pada alat uji dialirkan udara menggunakan pompa sehingga ruang medan tinggi diantara sela dielektrik tersebut bisa bereaksi dengan udara yang mengalir sehingga oksigen ( $O_2$ ) yang terdandung dalam udara tersebut dapat membentuk ozon ( $O_3$ ). Nantinya keluaran ozon dari alat uji tersebut dihubungkan dengan air yang sudah diberi pewarna dengan perbandingan 1:5 dan diamati perubahan warna air tersebut menjadi bening kembali sebagai indikator dibangkitkannya medan tinggi yang mampu memproduksi ozon.

Untuk melengkapi penulisan skripsi ini, maka perlu dilakukan percobaan berupa pengukuran kecepatan pemurnian air dengan beberapa dielektrik yang memiliki jumlah sela udara yang berbeda, kecepatan udara dan tegangan yang bervariasi. Banyaknya sela udara pada dielektrik dari hanya satu sela udara hingga 3 sela udara dan kecepatan aliran udara dapat diamati seberapa besar pengaruh dibangkitkannya medan tinggi yang terjadi pada saat pengujian.

Dengan melakukan percobaan ini, diharapkan akan diketahui seberapa besar pengaruh jumlah sela udara, kecepatan aliran udara dan perubahan tegangan terhadap

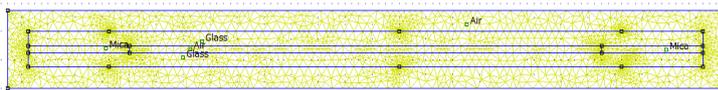
besarnya medan tinggi yang dihasilkan untuk cepatnya dalam memurnikan air dan untuk membuktikan kebenaran teori-teori yang telah dipelajari.

#### 4.2 Simulasi FEMM

Dengan menggunakan *software* FEMM 4.2, dibuat simulasi terkait masalah medan listrik yang digambarkan sama seperti yang akan dilakukan pengujian. Sehingga dapat diketahui medan listrik yang dibangkitkan di sela udara pada pengujian nantinya. Maka dari itu, melalui simulasi FEMM akan terlihat perbandingan dan pengaruh dari tegangan, rasio dielektrik lebar void dan koefisien dielektrik.

##### 4.2.1 Simulasi FEMM Dielektrik Satu Sela

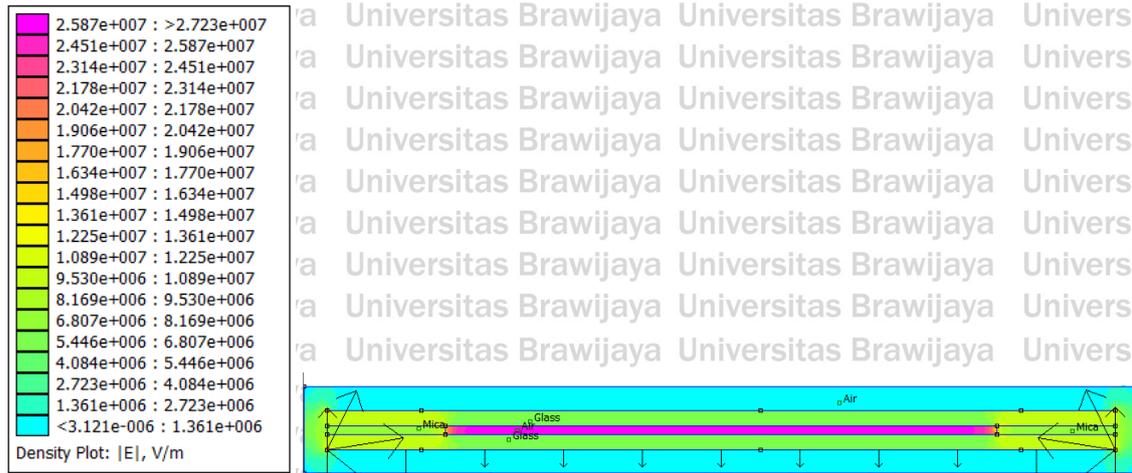
Menggunakan *software* FEMM digambarkan simulasi pengujian yang menggunakan dielektrik kaca dengan  $\epsilon_r = 4,5$ . Rasio dielektriknya yaitu dielektrik padat dengan total ketebalan 4 mm dan total ketebalan sela 1 mm. Tegangan yang diberikan yaitu 5 kV hingga 50 kV dengan rentang 5 kV di setiap tegangannya. Lalu dilakukan penggambaran 2 dimensi dengan lebar sela udara yang berbeda, lalu memilih material dielektrik dan udara untuk rongga dielektrik, setelah itu memasukkan input tegangan pada sisi atas dielektrik pada pengujian nantinya yang akan dihubungkan tegangan tinggi dan memasukkan input ground untuk sisi bawah dielektrik. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat dari Gambar 4.1 di bawah ini.



Gambar 4.1 Penggambaran FEMM 1 sela dengan tegangan 50 kV

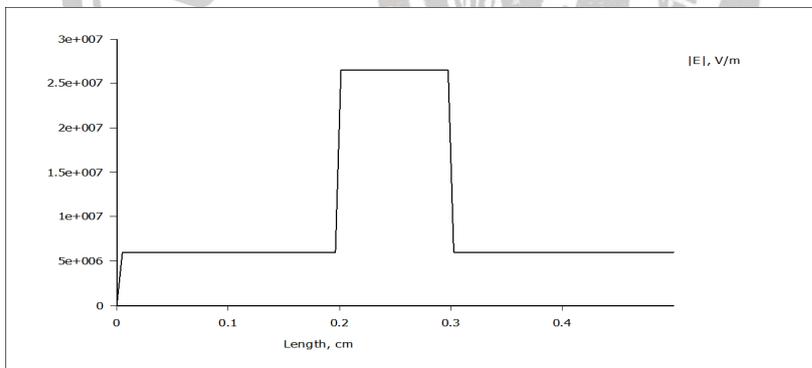
Selanjutnya akan dijalankan simulasi FEMM dan akan dilihat E atau medan listrik yang ada di sela udara dari masing-masing variabel yang akan ditunjukkan pada Gambar

4.2.



Gambar 4. 2 Simulasi FEMM dielektrik kaca 1 sela dengan tegangan 50 kV

Bisa dilihat pada Gambar 4.2 medan listrik yang muncul di sela udara lebih tinggi dibandingkan di daerah lain. Dilihat pada legenda disebelah kanan, dengan diberikan tegangan 50 kV nilai medan listrik yang dibangkitkan pada sela udara dengan lebar yang berbeda, nilai medan listrik cenderung sama dan tidak memiliki perbedaan nilai yang signifikan. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada gambar plot grafik daerah medan listrik yang akan ditunjukkan pada Gambar 4.3 di bawah ini.



Gambar 4. 3 Plot grafik medan listrik pada kaca dengan 1 sela tegangan 50 kV

Sesuai gambar plot grafik Gambar 4.3 medan listrik tinggi timbul di sepanjang sela udara. Selanjutnya akan dijalankan simulasi FEMM dan akan dilihat Emax dari masing-masing variabel yang akan ditunjukkan pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Data E<sub>max</sub> pada simulasi FEMM dielektrik 2 keping kaca 1 sela udara

No	Tegangan (kV)	E pada sela udara (kV/cm)
1	5	26,60
2	10	53,20
3	15	79,36
4	20	105,80
5	25	132,98
6	30	159,57

Tabel 4. 2 Data  $E_{\max}$  pada simulasi FEMM dielektrik 2 keping kaca 1 sela udara (Lanjutan)

No	Tegangan (kV)	E pada sela udara (kV/cm)
7	35	186,17
8	40	212,77
9	45	239,36
10	50	265,96

Pada Tabel 4.1 menunjukkan data  $E_{\text{pada sela udara}}$  atau medan listrik yang dibangkitkan pada sela udara di dielektrik akrilik melalui simulasi FEMM. Dengan data diatas dapat dilihat bahwa perbedaan lebar void tidak terlalu berpengaruh pada  $E_{\max}$  atau medan listrik yang dibangkitkan.

#### 4.2.2 Tegangan Kritis Terjadinya Ionisasi pada Dielektrik Satu Sela

Mengacu pada tinjauan pustaka sebelumnya bahwa dimulainya peristiwa ionisasi terjadi pada intensitas medan listrik 30kV/cm. Sehingga akan dicari tegangan kritis dimana dimulainya peristiwa ionisasi pada sela udara dielektrik akrilik. Dapat dilihat pada Tabel 4.1 dielektrik kaca dengan 1 sela udara pada tegangan 5 kV membangkitkan medan listrik 26,6 kV/cm dan pada tegangan 10 kV 53,2 kV/cm. Melalui rumus interpolasi antara tegangan 5 kV dan 10 kV. 3.66

$$X = X_0 + \frac{Y - Y_0}{Y_1 - Y_0} (X_1 - X_0) \quad (4.1)$$

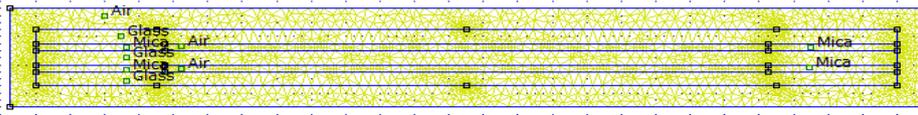
$$X = 5 + \frac{30 - 26,6}{53,2 - 26,6} (10 - 5) \quad (4.2)$$

$$X = 5,639 \text{ kV} \quad (4.3)$$

Maka tegangan kritis dimulainya peristiwa ionisasi di sela udara dielektrik akrilik adalah 5,63 kV.

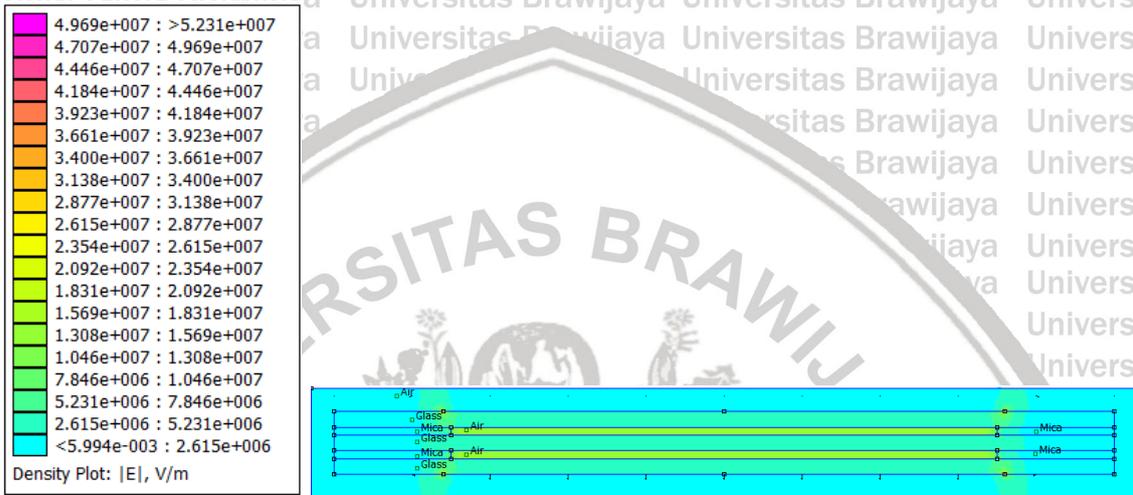
#### 4.2.3 Simulasi FEMM Dielektrik Dua Sela

Menggunakan software FEMM digambarkan simulasi pengujian yang menggunakan dielektrik kaca dengan  $\epsilon_r = 4,5$ . Rasio dielektriknya yaitu dielektrik padat dengan total ketebalan 6 mm dan total ketebalan sela 2 mm. Tegangan yang diberikan yaitu Tegangan yang diberikan yaitu 5 kV hingga 50 kV dengan rentang 5 kV di setiap tegangannya. Lalu dilakukan penggambaran 2 dimensi dengan lebar sela udara yang berbeda, lalu memilih material dielektrik dan udara untuk rongga dielektrik, setelah itu memasukkan input tegangan pada sisi atas dielektrik pada pengujian nantinya yang akan dihubungkan tegangan tinggi dan memasukkan input ground untuk sisi bawah dielektrik. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat dari Gambar 4.4 di bawah ini.



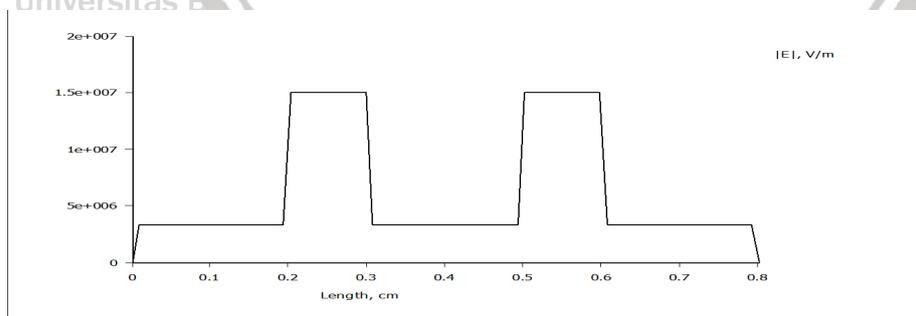
Gambar 4. 4 Penggambaran FEMM 1 sela dengan tegangan 50 kV

Selanjutnya akan dijalankan simulasi FEMM dan akan dilihat E atau medan listrik yang ada di sela udara dari masing -masing variabel yang akan ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Simulasi FEMM dielektrik kaca 2 sela dengan tegangan 50 kV

Bisa dilihat pada Gambar 4.5 medan listrik yang muncul di sela udara lebih tinggi dibandingkan di daerah lain. Dilihat pada legenda disebelah kanan, dengan diberikan tegangan 50 kV nilai medan listrik yang dibangkitkan pada sela udara dengan lebar yang berbeda, nilai medan listrik cenderung sama dan tidak memiliki perbedaan nilai yang signifikan. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada gambar plot grafik daerah medan listrik yang akan ditunjukkan pada Gambar 4.6 di bawah ini.



Gambar 4. 6 Plot grafik medan listrik pada kaca dengan 2 sela tegangan 50 kV

Sesuai gambar plot grafik Gambar 4.6 medan listrik tinggi timbul di sepanjang sela udara, sedangkan medan yang lebih rendah yang ditunjukkan pada grafik berada di

sepanjang dielektrik. Selanjutnya akan dijalankan simulasi FEMM dan akan dilihat  $E_{max}$  dari masing-masing variabel yang akan ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Pada Tabel 4.2 menunjukkan data  $E_{pada\ sela\ udara}$  atau medan listrik yang dibangkitkan pada sela udara di dielektrik akrilik melalui simulasi FEMM. Dengan data diatas dapat dilihat bahwa perbedaan lebar void tidak terlalu berpengaruh pada  $E_{max}$  atau medan listrik yang dibangkitkan.

Tabel 4. 3 Data  $E_{max}$  pada simulasi FEMM dielektrik 3 keping kaca 2 sela udara

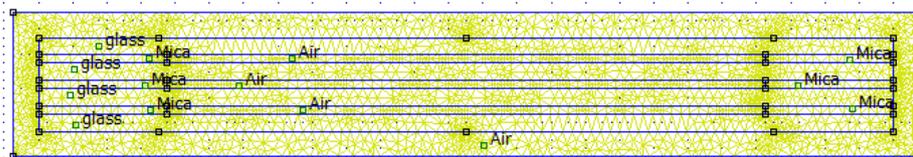
No	Tegangan (kV)	E pada sela udara (kV/cm)
1	5	15,015
2	10	30,03
3	15	45,04
4	20	60,06
5	25	75,07
6	30	90,09
7	35	105,10
8	40	120,12
9	45	135,13
10	50	150,15

#### 4.2.4 Tegangan Kritis Terjadinya Ionisasi pada Dielektrik Dua Sela

Mengacu pada tinjauan pustaka sebelumnya bahwa dimulainya peristiwa ionisasi terjadi pada intensitas medan listrik 30kV/cm. Sehingga akan dicari tegangan kritis dimana dimulainya peristiwa ionisasi pada sela udara dielektrik akrilik. Dapat dilihat pada Tabel 4.2 dielektrik kaca dengan 2 sela pada tegangan 10 kV membangkitkan medan listrik 30 kV/cm. Maka tegangan kritis dimulainya peristiwa ionisasi di sela udara dielektrik kaca dengan 2 sela adalah 10 kV.

#### 4.2.5 Simulasi FEMM Dielektrik Tiga Sela

Menggunakan software FEMM digambarkan simulasi pengujian yang menggunakan dielektrik kaca dengan  $\epsilon_r = 4,5$ . Rasio dielektriknya yaitu total ketebalan dielektrik padat 8 mm dan total ketebalan sela 3 mm. Tegangan yang diberikan yaitu Tegangan yang diberikan yaitu 5 kV hingga 50 kV dengan rentang 5 kV di setiap tegangannya. Lalu dilakukan penggambaran 2 dimensi dengan lebar sela udara yang berbeda, lalu memilih material dielektrik dan udara untuk rongga dielektrik, setelah itu memasukkan input tegangan pada sisi atas dielektrik pada pengujian nantinya yang akan dihubungkan tegangan tinggi dan memasukkan input ground untuk sisi bawah dielektrik. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat dari Gambar 4.7 di bawah ini.



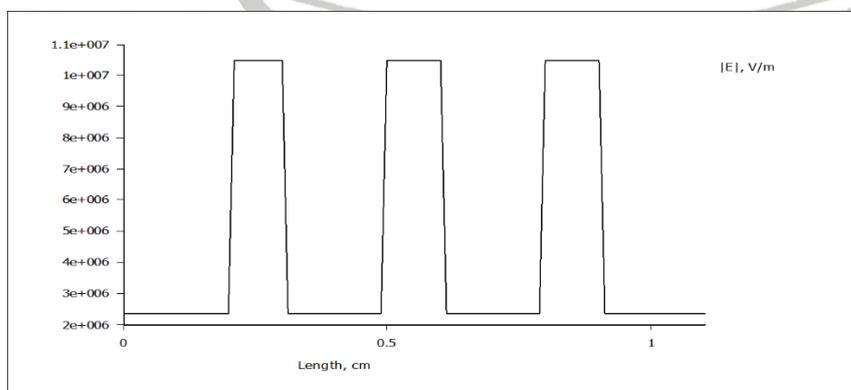
Gambar 4. 7 Penggambaran FEMM 3 sela dengan tegangan 50 kV

Selanjutnya akan dijalankan simulasi FEMM dan akan dilihat E atau medan listrik yang ada di sela udara dari masing -masing variabel yang akan ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Simulasi FEMM dielektrik kaca 3 sela dengan tegangan 50 kV

Bisa dilihat pada Gambar 4.8 medan listrik yang muncul di sela udara lebih tinggi dibandingkan di daerah lain. Dilihat pada legenda disebelah kanan, dengan diberikan tegangan 50 kV nilai medan listrik yang dibangkitkan pada sela udara dengan lebar yang berbeda, nilai medan listrik cenderung sama dan tidak memiliki perbedaan nilai yang signifikan. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada gambar plot grafik daerah medan listrik yang akan ditunjukkan pada Gambar 4.9 di bawah ini.



Gambar 4. 9 Plot grafik medan listrik pada kaca dengan 3 sela tegangan 50 kV

Sesuai gambar plot grafik Gambar 4.9 medan listrik tinggi timbul di sepanjang sela udara sedangkan medan listrik lebih rendah ditunjukkan pada grafik berada di sepanjang dielektrik padat berupa kaca. Selanjutnya akan dijalankan simulasi FEMM dan akan dilihat  $E_{max}$  dari masing-masing variabel yang akan ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Pada Tabel 4.3 menunjukkan data  $E_{pada\ sela\ udara}$  atau medan listrik yang dibangkitkan pada sela udara dielektrik akrilik melalui simulasi FEMM. Dengan data diatas dapat dilihat bahwa perbedaan lebar void tidak terlalu berpengaruh pada  $E_{max}$  atau medan listrik yang dibangkitkan.

Tabel 4. 4 Data  $E_{max}$  pada simulasi FEMM dielektrik 4 keping kaca 3 sela udara

No	Tegangan (kV)	E pada sela udara (kV/cm)
1	5	10,46
2	10	20,92
3	15	31,38
4	20	41,84
5	25	52,30
6	30	62,76
7	35	73,22
8	40	83,68
9	45	94,14
10	50	104,60

#### 4.2.6 Tegangan Kritis Terjadinya Ionisasi pada Dielektrik Tiga Sela

Mengacu pada tinjauan pustaka sebelumnya bahwa dimulainya peristiwa ionisasi terjadi pada intensitas medan listrik 30kV/cm. Sehingga akan dicari tegangan kritis dimana dimulainya peristiwa ionisasi pada sela udara dielektrik akrilik. Dapat dilihat pada Tabel 4.4 dielektrik kaca dengan 3 sela pada tegangan 10 kV membangkitkan medan listrik 20,92 kV/cm dan pada tegangan 15 kV 31,38 kV/cm. Melalui rumus interpolasi antara tegangan 10 kV dan 15 kV.

$$X = X_0 + \frac{Y - Y_0}{Y_1 - Y_0} (X_1 - X_0) \quad (4.4)$$

$$X = 10 + \frac{30 - 20,92}{31,38 - 20,92} (15 - 10) \quad (4.5)$$

$$X = 14,34 \text{ kV} \quad (4.6)$$

Maka tegangan kritis dimulainya peristiwa ionisasi di sela udara dielektrik kaca adalah 14,34 kV.

**4.2.7 Perbandingan Simulasi FEMM Dielektrik dengan Jumlah Sela Berbeda**

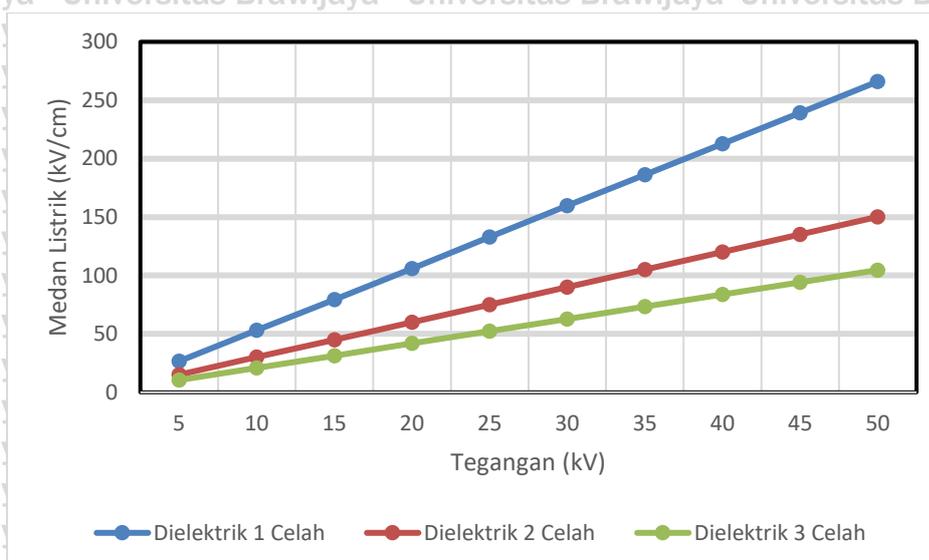
Dari simulasi FEMM yang telah dilakukan untuk mengetahui  $E_{max}$  atau medan yang dibangkitkan di sela udara diantara dielektrik padat (kaca). Maka dilakukan perbandingan untuk mengetahui pengaruh dan hasilnya.

Pada Tabel 4.4 menunjukkan data hasil simulasi FEMM untuk mendapatkan  $E_{max}$  atau medan tinggi yang dibangkitkan di sela udara di dielektrik padat. Dapat dilihat perubahan nilai medan terjadi dari faktor banyak sela, ketebalan dielektrik dan juga faktor nilai tegangan. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat di grafik Gambar 4.10 di bawah ini.

Tabel 4.5 Data Perbandingan  $E_{sela\ udara}$  Simulasi FEMM

No	Jumlah Sela Udara	Tegangan	E <sub>max</sub>	No	Jumlah Sela Udara	Tegangan	E <sub>max</sub>	
1	1	3	5	26,60	3	3	5	10,46
			10	53,20			10	20,92
			15	79,36			15	31,38
			20	105,80			20	41,84
			25	132,98			25	52,30
			30	159,57			30	62,76
			35	186,17			35	73,22
			40	212,77			40	83,68
			45	239,36			45	94,14
			50	265,96			50	104,60
2	2	3	5	15,015	3	3	5	15,015
			10	30,03			10	30,03
			15	45,04			15	45,04
			20	60,06			20	60,06
			25	75,07			25	75,07
			30	90,09			30	90,09
			35	105,10			35	105,10
			40	120,12			40	120,12
			45	135,13			45	135,13
50	150,15	50	150,15					





Gambar 4. 10 Grafik perbandingan  $E_{\text{sela udara}}$  pada dielektrik dengan jumlah sela dan ketebalan berbeda

### 4.3 Perhitungan Intensitas Medan Listrik

Perhitungan matematis yang digunakan dalam menghitung besar medan listrik tinggi yang dibangkitkan dengan menggunakan rumus dasar dielektrik berlapis yaitu  $U = E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 + E_n \cdot d_n$ . Perhitungan matematis ini mewakili intensitas medan listrik yang dibangkitkan pada sela udara ketika pengujian berlangsung. Tegangan uji yang digunakan untuk pengujian nantinya dimulai dari 5 kV sampai 50 kV dengan rentang tegangan 5 kV tiap pengambilan data dalam pengujian. Material yang digunakan untuk pengujian yaitu kaca dengan kaca dengan koefisien dielektrik relatif mengacu pada Tabel 2. yaitu 4,5 ( $\epsilon_r$  kaca = 4,5). Perhitungan intensitas medan listrik ini nantinya untuk mengamati pengaruh dari perubahan tegangan dan ketebalan dielektrik yang digunakan, terhadap medan listrik tinggi yang dibangkitkan.

#### 4.3.1 Perhitungan Intensitas Medan Listrik pada Dielektrik 1 Sela

Pada percobaan pertama digunakan dielektrik padat berupa 2 lembar kaca setebal 2 mm dengan konstanta dielektrik sebesar 4,5 ( $\epsilon_{\text{kaca}} = 4,5$ ) yang diberi satu sela udara 1mm ( $\epsilon_{\text{udara}} = 1$ ).

Perhitungan matematis intensitas medan listrik tinggi ini digambarkan saat pengujian nantinya akan diamati pengaruh variasi tegangan yang diberikan terhadap medan listrik tinggi yang dibangkitkan pada sela udara. Dalam pengujian nantinya, variasi tegangan uji yang diberikan 5 kV hingga 50 kV dengan rentang 5 kV di setiap tegangannya.

Sehingga:

$$U = E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 + E_3 \cdot d_3 \tag{4.7}$$

$$= E_1 \cdot 2 + E_2 \cdot 1 + E_3 \cdot 2 \tag{4.8}$$

$$= E_2 \left( \frac{E_1}{E_2} \cdot 2 + d_2 + \frac{E_3}{E_2} \cdot 2 \right) \tag{4.9}$$

Karena :  $\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_v}{\epsilon_1} = \frac{\epsilon_{rv} \epsilon_0}{\epsilon_{r1} \epsilon_0} = \frac{\epsilon_{rv}}{\epsilon_{r1}}$  (4.10)

$$U = E_2 \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot 2 + d_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3} \cdot 2 \right) \tag{4.11}$$

$$= E_2 \cdot \epsilon_2 \left( \frac{2}{\epsilon_1} + \frac{1}{1} + \frac{2}{\epsilon_3} \right) \tag{4.12}$$

$$= E_2 \cdot 1 \left( \frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5} \right) \tag{4.13}$$

$$E_2 = \frac{K}{\frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5}} \tag{4.14}$$

$$E_2 = \frac{K}{1,89} \text{ kV/mm} = E_2 = \frac{10K}{1,89} \text{ kV/cm} \tag{4.15}$$

Untuk perhitungan selanjutnya medan listrik tinggi yang dibangkitkan di void atau sela udara dielektrik padat dapat dilihat pada Tabel 4.5. Tabel 4.5 menunjukkan medan listrik tinggi yang dibangkitkan dari satu sela udara diantara dielektrik kaca melalui perhitungan rumus dielektrik berlapis. Untuk tegangan 5 kV medan listrik yang dibangkitkan 26,59 kV/cm, untuk tegangan 10 kV medan listrik yang dibangkitkan 53,19 kV/cm, untuk tegangan 15 kV medan listrik yang dibangkitkan 79,78 kV/cm, untuk tegangan 20 kV medan listrik yang dibangkitkan 106,38 kV/cm, untuk tegangan 25 kV medan listrik yang dibangkitkan 132,97 kV/cm, untuk tegangan 30 kV medan listrik yang dibangkitkan 159,57 kV/cm, untuk tegangan 35 kV medan listrik yang dibangkitkan 186,1702 kV/cm.

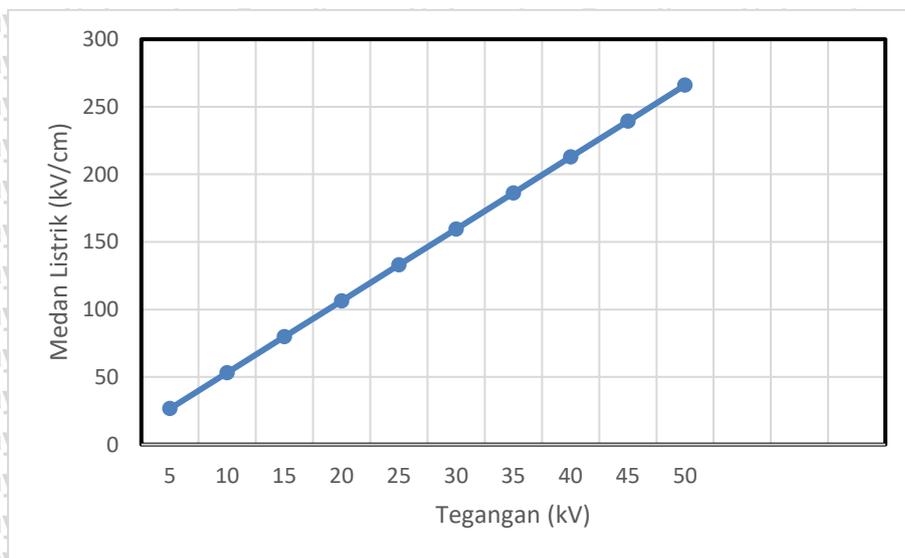
Tabel 4. 6 Intensitas Medan Listrik pada Sela Udara Dielektrik Kaca

No	Tegangan (kV)	Medan Listrik (kV/cm)
1	5	26,59
2	10	53,19
3	15	79,78
4	20	106,38
5	25	132,97
6	30	159,57
7	35	186,17
8	40	212,76
9	45	239,36
10	50	265,95

Untuk tegangan 40 kV medan listrik yang dibangkitkan 212,76 kV/cm, untuk tegangan 45 kV medan listrik yang dibangkitkan 239,36 kV/cm, untuk tegangan 50 kV medan listrik yang dibangkitkan 265,95 kV/cm. Berdasarkan data pada Tabel 4.5, maka dapat dibuat



grafik hubungan antara medan listrik yang dibangkitkan di sela udara terhadap tegangan dari dielektrik kaca



Gambar 4. 11 Grafik hubungan intensitas medan listrik terhadap tegangan pada dielektrik 1 sela

Dari grafik pada Gambar 4.11 terlihat bahwa ada perbedaan nilai medan listrik yang dibangkitkan pada nilai tegangan yang berbeda-beda. Semakin tinggi tegangan yang dihubungkan maka medan listrik yang dibangkitkan pada sela udara dielektrik kaca akan semakin tinggi juga, kenaikan nilai medan listrik yang dibangkitkan terhadap tegangan naik secara linier.

### 4.3.2 Perhitungan Intensitas Medan Listrik pada Dielektrik 2 Sela

Pada percobaan kedua digunakan dielektrik padat berupa 3 lembar kaca setebal 2 mm dengan konstanta dielektrik sebesar 4,5 ( $\epsilon_{kaca} = 4,5$ ) yang diberi dua sela udara 1mm ( $\epsilon_{udara} = 1$ ). Perhitungan matematis intensitas medan listrik tinggi ini digambarkan saat pengujian nantinya akan diamati pengaruh variasi tegangan yang diberikan terhadap medan listrik tinggi yang dibangkitkan pada sela udara. Dalam pengujian nantinya, variasi tegangan uji yang diberikan ialah 5 kV hingga 50 kV dengan rentang 5 kV di setiap tegangannya.

Sehingga:

$$U = E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 + E_3 \cdot d_3 + E_2 \cdot d_2 + E_4 \cdot d_4 \quad (4.16)$$

$$= E_1 \cdot 2 + E_2 \cdot 1 + E_3 \cdot 2 + E_2 \cdot 1 + E_4 \cdot 2 \quad (4.17)$$

$$= E_2 \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot 2 + d_2 + \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \cdot 2 + d_2 + \frac{\epsilon_4}{\epsilon_2} \cdot 2 \right) \quad (4.18)$$

Karena :  $\frac{E_i}{E_v} = \frac{\epsilon_v}{\epsilon_i} = \frac{\epsilon_{rv} \epsilon_0}{\epsilon_{ri} \epsilon_0} = \frac{\epsilon_{rv}}{\epsilon_{ri}} \quad (4.19)$



$$U = E_2 \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot 2 + d_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3} \cdot 2 + d_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_4} \cdot 2 \right) \quad (4.20)$$

$$V = E_2 \cdot \epsilon_2 \left( \frac{2}{\epsilon_1} + \frac{1}{1} + \frac{2}{\epsilon_3} + \frac{1}{1} + \frac{2}{\epsilon_4} \right) \quad (4.21)$$

$$= E_2 \cdot 1 \left( \frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5} \right) \quad (4.22)$$

$$E_2 = \frac{K}{\frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5}} \quad (4.23)$$

$$E_2 = \frac{K}{3,33} \text{ kV/mm} = E_2 = \frac{10K}{3,33} \text{ kV/cm} \quad (4.24)$$

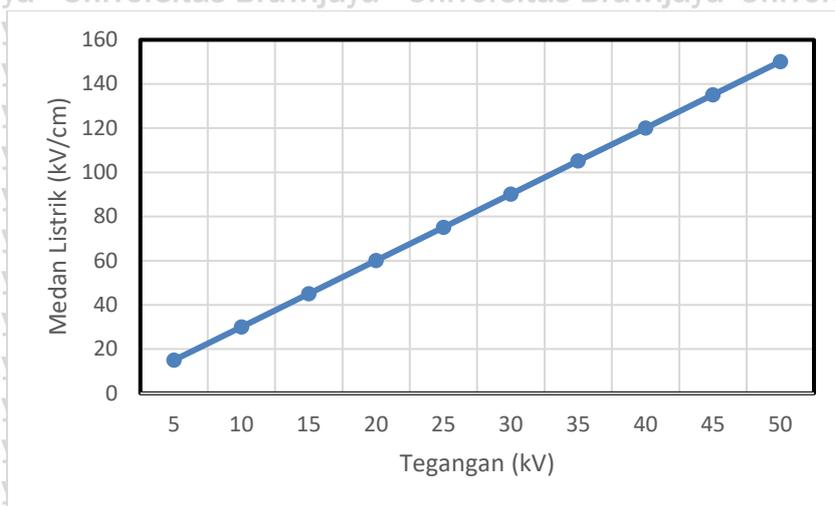
Untuk perhitungan selanjutnya medan listrik tinggi yang dibangkitkan di void atau sela udara dielektrik padat dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 7 Intensitas Medan Listrik pada Sela Udara Dielektrik Kaca 2 sela

No	Tegangan (kV)	Medan Listrik (kV/cm)
1	5	15,01
2	10	30,03
3	15	45,04
4	20	60,06
5	25	75,07
6	30	90,09
7	35	105,10
8	40	120,12
9	45	135,13
10	50	150,15

Tabel 4.6 menunjukkan medan listrik tinggi yang dibangkitkan dari satu sela udara diantara dielektrik kaca melalui perhitungan rumus dielektrik berlapis. Untuk tegangan 5 kV medan listrik yang dibangkitkan 15,01 kV/cm, untuk tegangan 10 kV medan listrik yang dibangkitkan 30,03 kV/cm, untuk tegangan 15 kV medan listrik yang dibangkitkan 45,04 kV/cm, untuk tegangan 20 kV medan listrik yang dibangkitkan 60,06 kV/cm, untuk tegangan 25 kV medan listrik yang dibangkitkan 75,07 kV/cm, untuk tegangan 30 kV medan listrik yang dibangkitkan 90,09 kV/cm, untuk tegangan 35 kV medan listrik yang dibangkitkan 105,10 kV/cm, untuk tegangan 40 kV medan listrik yang dibangkitkan 120,12 kV/cm, untuk tegangan 45 kV medan listrik yang dibangkitkan 135,13 kV/cm, untuk tegangan 50 kV medan listrik yang dibangkitkan 150,15 kV/cm. Berdasarkan data pada Tabel 4.6, maka dapat dibuat grafik hubungan antara medan listrik yang dibangkitkan di sela udara terhadap tegangan dari dielektrik kaca.





Gambar 4.12 Grafik hubungan intensitas medan listrik terhadap tegangan pada dielektrik 2 sela

Dari grafik pada Gambar 4.12 terlihat bahwa ada perbedaan nilai medan listrik yang dibangkitkan pada nilai tegangan yang berbeda-beda. Semakin tinggi tegangan yang dihubungkan maka medan listrik yang dibangkitkan pada sela udara dielektrik kaca akan semakin tinggi juga, kenaikan nilai medan listrik yang dibangkitkan terhadap tegangan naik secara linier.

### 4.3.3 Perhitungan Intensitas Medan Listrik pada Dielektrik 3 Sela

Pada percobaan kedua digunakan dielektrik padat berupa 4 lembar kaca setebal 2 mm dengan konstanta dielektrik sebesar 4,5 ( $\epsilon_{kaca} = 4,5$ ) yang diberi tiga sela udara 1 mm ( $\epsilon_{udara} = 1$ ). Perhitungan matematis intensitas medan listrik tinggi ini digambarkan saat pengujian nantinya akan diamati pengaruh variasi tegangan yang diberikan terhadap medan listrik tinggi yang dibangkitkan pada sela udara. Dalam pengujian nantinya, variasi tegangan uji yang diberikan ialah 5 kV hingga 50 kV dengan rentang 5 kV di setiap tegangannya.

Sehingga:

$$U = E_2 \cdot d_2 + E_3 \cdot d_3 + E_2 \cdot d_2 + E_4 \cdot d_4 + E_2 \cdot d_2 + E_5 \cdot d_5 \tag{4.25}$$

$$= E_1 \cdot 2 + E_2 \cdot 1 + E_3 \cdot 2 + E_2 \cdot 1 + E_4 \cdot 2 + E_2 \cdot 1 + E_5 \cdot 2 \tag{4.26}$$

$$= E_2 \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot 2 + d_3 + \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \cdot 2 + d_5 + \frac{\epsilon_4}{\epsilon_2} \cdot 2 + d_2 + \frac{\epsilon_5}{\epsilon_2} \cdot 2 \right) \tag{4.27}$$

Karena :  $\frac{E_i}{E_v} = \frac{\epsilon_v}{\epsilon_i} = \frac{\epsilon_{rv} \epsilon_0}{\epsilon_{ri} \epsilon_0} = \frac{\epsilon_{rv}}{\epsilon_{ri}}$  (4.28)

$$U = E_2 \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot 2 + d_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3} \cdot 2 + d_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_4} \cdot 2 + d_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_5} \cdot 2 \right) \tag{4.29}$$

$$U = E_2 \cdot \epsilon_2 \left( \frac{2}{\epsilon_1} + \frac{1}{1} + \frac{2}{\epsilon_3} + \frac{1}{1} + \frac{2}{\epsilon_4} + \frac{1}{1} + \frac{2}{\epsilon_5} \right) \tag{4.30}$$



$$= E2.1 \left( \frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5} \right) \tag{4.31}$$

$$E2 = \frac{K}{\frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5} + \frac{4,5}{4,5} + \frac{2}{4,5}} \tag{4.32}$$

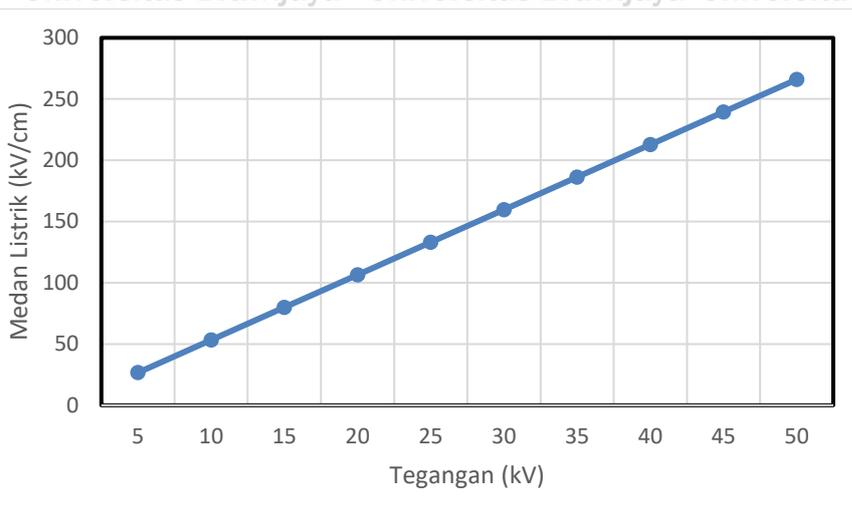
$$E2 = \frac{K}{4,78} \text{ kV/mm} = E2 = \frac{10K}{4,78} \text{ kV/cm} \tag{4.33}$$

Untuk perhitungan selanjutnya medan listrik tinggi yang dibangkitkan di void atau sela udara dielektrik padat dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 8 Intensitas Medan Listrik pada Sela Udara Dielektrik Kaca

No	Tegangan (kV)	Medan Listrik (kV/cm)
1	5	10,46
2	10	20,92
3	15	31,38
4	20	41,84
5	25	52,30
6	30	62,76
7	35	73,22
8	40	83,68
9	45	94,14
10	50	104,60

Tabel 4.7 menunjukkan medan listrik tinggi yang dibangkitkan dari satu sela udara diantara dielektrik kaca melalui perhitungan rumus dielektrik berlapis. Untuk tegangan 5 kV medan listrik yang dibangkitkan 10,46 kV/cm, untuk tegangan 10 kV medan listrik yang dibangkitkan 20,92 kV/cm, untuk tegangan 15 kV medan listrik yang dibangkitkan 31,38 kV/cm, untuk tegangan 20 kV medan listrik yang dibangkitkan 41,84 kV/cm, untuk tegangan 25 kV medan listrik yang dibangkitkan 52,30 kV/cm, untuk tegangan 30 kV medan listrik yang dibangkitkan 62,76 kV/cm, untuk tegangan 35 kV medan listrik yang dibangkitkan 73,22 kV/cm, untuk tegangan 40 kV medan listrik yang dibangkitkan 83,68 kV/cm, untuk tegangan 45 kV medan listrik yang dibangkitkan 94,14 kV/cm, untuk tegangan 50 kV medan listrik yang dibangkitkan 104,60 kV/cm. Berdasarkan data pada Tabel 4.2, maka dapat dibuat grafik hubungan antara medan listrik yang dibangkitkan di sela udara terhadap tegangan dari dielektrik kaca.



Gambar 4.13 Grafik hubungan intensitas medan listrik terhadap tegangan pada dielektrik 3 sela

Dari grafik pada Gambar 4.13 terlihat bahwa ada perbedaan nilai medan listrik yang dibangkitkan pada nilai tegangan yang berbeda-beda. Semakin tinggi tegangan yang dihubungkan maka medan listrik yang dibangkitkan pada sela udara dielektrik kaca akan semakin tinggi juga, kenaikan nilai medan listrik yang dibangkitkan terhadap tegangan naik secara linier.

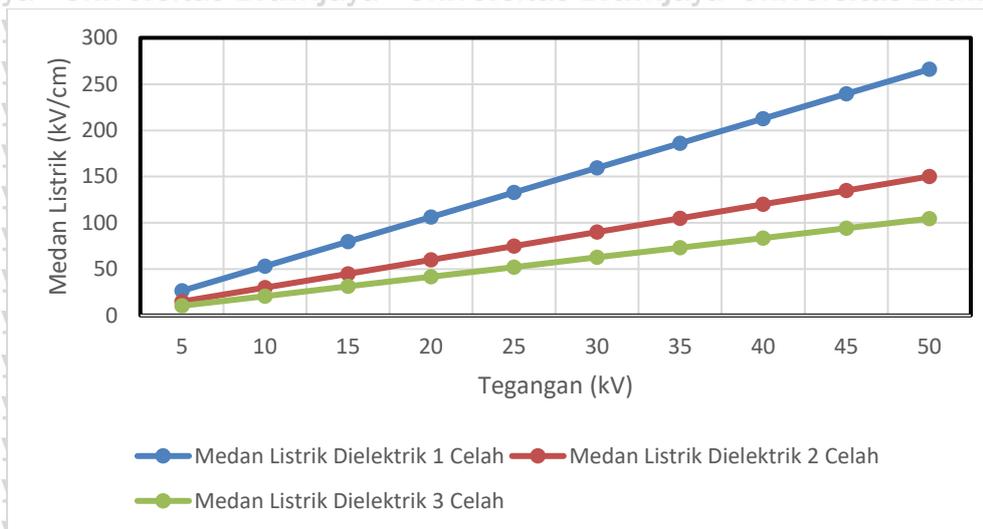
#### 4.3.4 Perbandingan Perhitungan Medan Listrik

Setelah dihitung masing-masing dari kedua bahan dielektrik yang berbeda dengan koefisien dielektrik yang berbeda, maka hasil perhitungan bisa dibandingkan pengaruh koefisien dielektrik dan tegangan terhadap medan tinggi yang dibangkitkan melalui void masing-masing bahan dapat ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Data hasil perhitungan medan listrik dapat terlihat perbedaannya melalui koefisien dielektrik bahan, dimana semakin tinggi  $\epsilon_r$  dari suatu bahan dan tegangan yang dihubungkan pada dielektrik maka medan listrik yang dibangkitkan melalui sela udara semakin tinggi juga. Agar lebih mudah untuk melihat perbedaan medan listrik yang dibangkitkan dapat dibuat grafik pada Gambar 4.9.

Tabel 4.9 Perbandingan Intensitas Medan Listrik

No	Jumlah Sela Udara	Tegangan (kV)	Medan Listrik yang Dibangkitkan (kV/cm)
1	1 Sela	5	26,59
		10	53,19
		15	79,78
		20	106,38
		25	132,97
		30	159,57
		35	186,17
		40	212,76
		45	239,36
		50	265,95
2	2 Sela	5	15,01
		10	30,03
		15	45,04
		20	60,06
		25	75,07
		30	90,09
		35	105,10
		40	120,12
		45	135,13
		50	150,15
3	3 Sela	5	10,46
		10	20,92
		15	31,38
		20	41,84
		25	52,30
		30	62,76
		35	73,22
		40	83,68
		45	94,14
		50	104,60



Gambar 4. 14 Grafik perbandingan intensitas medan tinggi dengan perbedaan sela

Dari grafik yang diperoleh pada Gambar 4.14 diatas, dapat dilihat perbedaan nilai medan listrik yang dibangkitkan dari jumlah sela udara dan ketebalan dielektrik yang berbeda. Semakin banyak sela udara dan semakin tebal dielektrik maka medan listrik yang dibangkitkan juga semakin kecil dibandingkan dengan dielektrik yang jumlah sela udara dan ketebalan dielektriknya lebih kecil pada tegangan yang sama. Namun medan listrik yang dibangkitkan dari ketiga dielektrik dengan jumlah sela dan ketebalan berbeda tersebut naik secara linier terhadap tegangan yang dihubungkan. hal ini dikarenakan medan listrik yang dibangkitkan melalui void dielektrik ( $E_2$ ) berbanding lurus dengan tegangan ( $U$ ) dan juga koefisien dielektrik ( $\epsilon_r$ ).

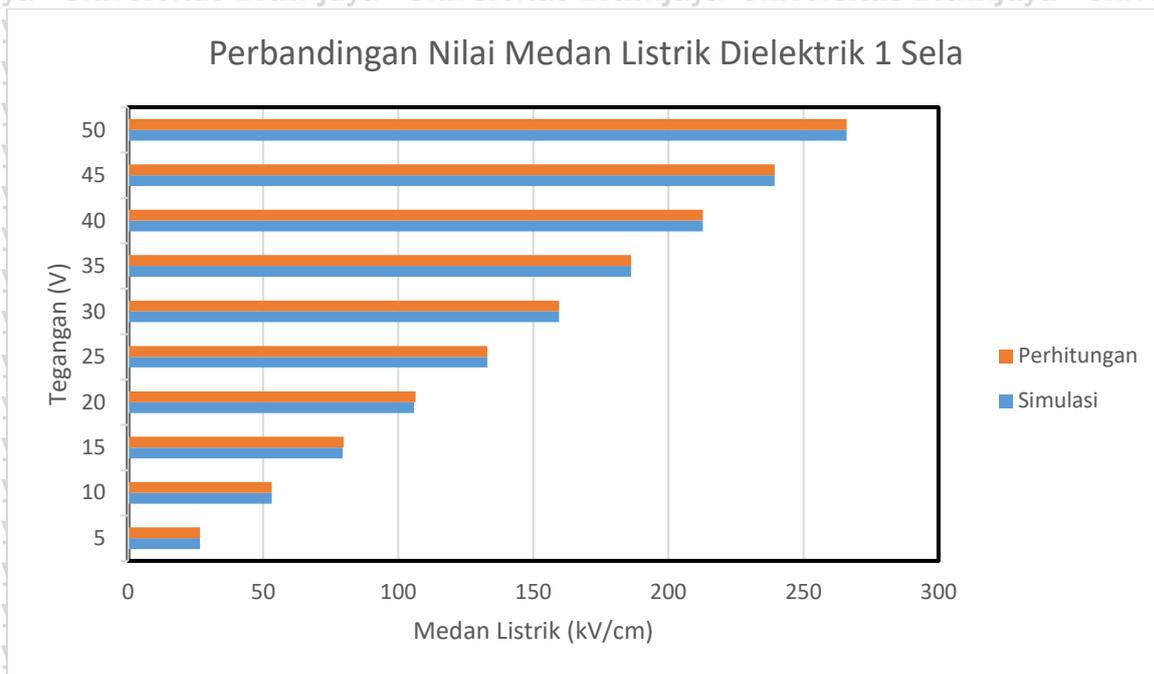
#### 4.4 Perbandingan Hasil Simulasi FEMM dan Perhitungan

Dari hasil simulasi FEMM dan perhitungan masing-masing dihasilkan nilai pembangkitan medan listrik pada sela udara dari masing-masing dielektrik. Hasil perhitungan kedua metode tersebut akan dibandingkan menurut banyaknya sela udara seperti ditunjukkan pada Tabel 4.9.

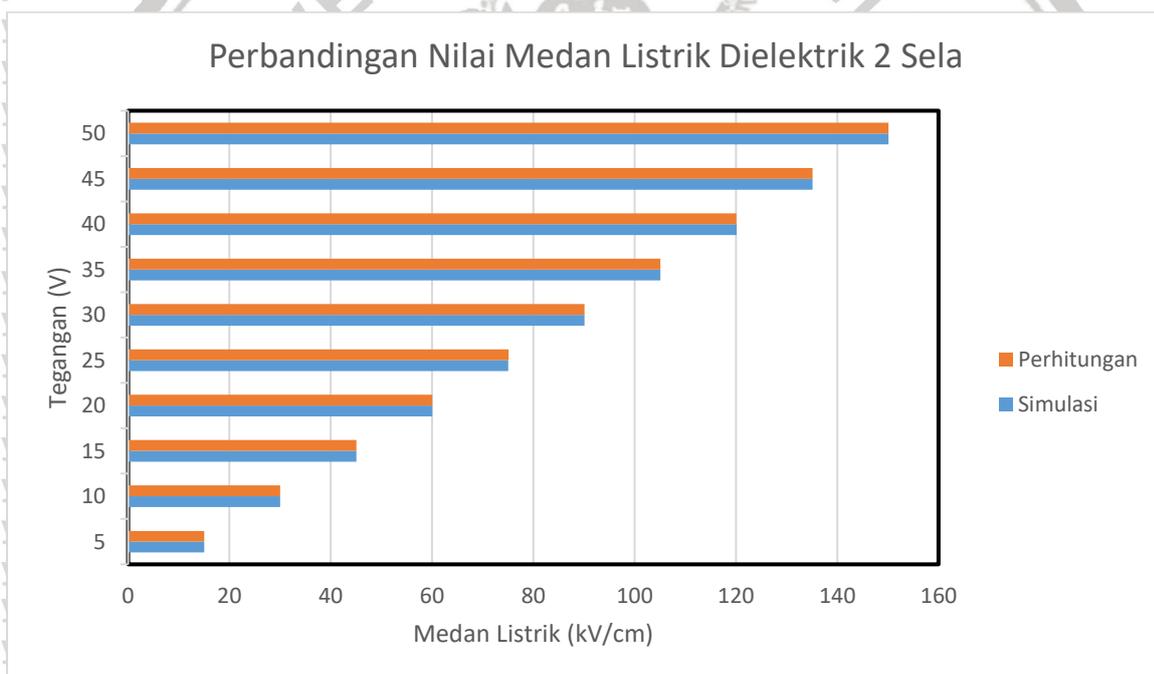
Tabel 4.10 Perbandingan Hasil Simulasi FEMM dan Perhitungan

No	Jumlah Sela Udara	Tegangan (kV)	Medan Listrik Hasil Simulasi (kV/cm)	Medan Listrik Hasil Perhitungan (kV/cm)
1	1 Sela	5	26,60	26,59
		10	53,20	53,19
		15	79,36	79,78
		20	105,80	106,38
		25	132,98	132,97
		30	159,57	159,57
		35	186,17	186,17
		40	212,77	212,76
		45	239,36	239,36
		50	265,96	265,95
2	2 Sela	5	15,02	15,01
		10	30,04	30,03
		15	45,04	45,06
		20	60,07	60,06
		25	75,07	75,10
		30	90,07	90,09
		35	105,08	105,10
		40	120,12	120,11
		45	135,15	135,13
		50	150,15	150,13
3	3 Sela	5	10,44	10,46
		10	20,92	20,90
		15	31,37	31,38
		20	41,84	41,83
		25	52,27	52,30
		30	62,74	62,76
		35	73,22	73,20
		40	83,67	83,68
		45	94,16	94,14
		50	104,60	104,62

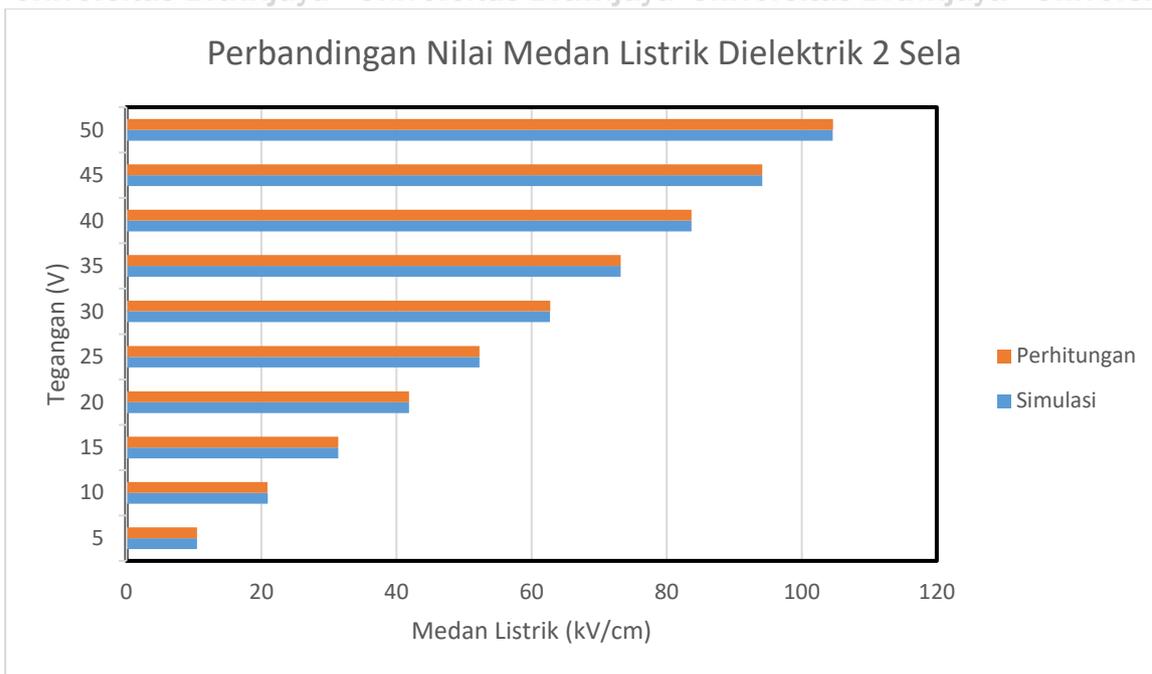
Dibedakan menurut jumlah sela udara dari masing-masing dielektriknya, berikut ini grafik perbandingan yang ditunjukkan dari data hasil pada tabel 4.9.



Gambar 4. 15 Grafik perbandingan Simulasi dan perhitungan pada dielektrik 1 sela



Gambar 4. 16 Perbandingan Simulasi dan perhitungan pada dielektrik 2 sela



Gambar 4. 17 Perbandingan Simulasi dan perhitungan pada dielektrik 3 sela

Terlihat pada Gambar 4.15, 4.16 dan 4.17 dimana grafik tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan antara hasil simulasi menggunakan FEMM dan perhitungan rumus dielektrik berlapis diantara 3 dielektrik dengan jumlah sela udara berbeda.

#### 4.5 Pengujian Pembangkitan Medan Listrik Tinggi yang Diaplikasikan Untuk Memproduksi Ozon Guna Menjernihkan Air Pewarna

Pengujian pembangkitan medan listrik yang diaplikasikan untuk memproduksi ozon sebagai pemurni air perwarna dilakukan pada 3 kondisi ditambah 3 variabel kecepatan aliran udara dari sisi inlet saluran yang sebelumnya diukur menggunakan alat ukur kecepatan angin (Anemometer). Yaitu, kondisi pertama menggunakan dielektrik padat kaca 3 sela dengan kecepatan udara 3,5m/s; 4,5m/s dan 5,5m/s, kondisi kedua menggunakan dielektrik padat kaca 2 sela dengan kecepatan udara 3,5m/s; 4,5m/s dan 5,5m/s, kondisi ketiga menggunakan dielektrik padat kaca 3 sela dengan kecepatan udara 3,5m/s; 4,5m/s dan 5,5m/s. Tegangan uji yang dihubungkan untuk pengujian yaitu dimulai dari 5 kV sampai 50 kV dengan rentang tegangan 5 kV setiap pengujian.

Untuk mengetahui besarnya volume udara yang masuk ke dalam air yang diberi pewarna, maka kecepatan udara tersebut di rubah kesatuan volume/waktu dengan diukur terlebih dahulu volume udara yang mengalir di dasari oleh volume alat uji yang dibangkitkan medan tinggi dengan persamaan 2.18 sebagai berikut:



$$V=p \times l \times t \tag{4.16}$$

$$V=p \times 10^3 \times 7 \times 0,1 \tag{4.17}$$

$$V=p \times 700 \text{ cm}^3 \tag{4.18}$$

Untuk menghitung volume laju uji menggunakan persamaan 2.17 sebagai berikut:

$$Q = \frac{700p \times 10^{-3}}{t} \tag{4.19}$$

$$Q = \frac{700p \times 10^{-3}}{1} \tag{4.20}$$

$$Q = 0,7p \text{ liter/detik} \tag{4.21}$$

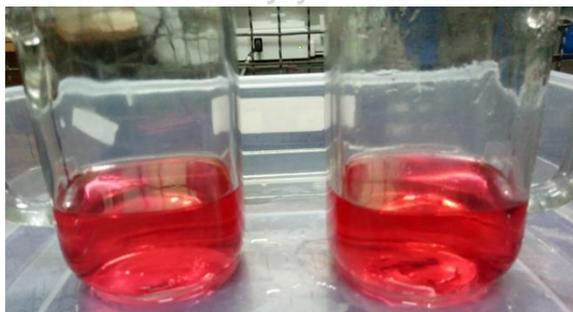
Untuk perhitungan selanjutnya volume udara yang mengalir melalui objek uji padat dapat dilihat pada Tabel 4.12

Tabel 4. 11 Hasil perhitungan kecepatan udara menjadi volume laju udara

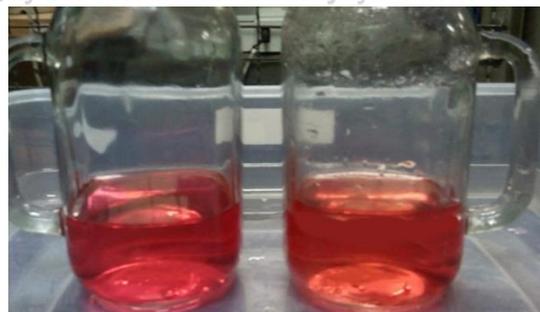
No	Kecepatan Udara (m/s)	Volume Laju Udara (Liter/detik)
1	3,5	2,45
2	4,5	3,15
3	5,5	3,85

Satuan kecepatan udara nantinya akan dikonversikan menjadi volume laju udara dimana 3,5m/s menjadi 2,45 liter/detik, 4,5m/s menjadi 3,15 liter/detik dan 5,5m/s menjadi 3,85 liter/detik. Pengujian ini dilakukan untuk mengamati pengaruh dari banyak sela udara pada dielektrik, kecepatan alir udara yang masuk dari inlet saluran dan juga perubahan tegangan terhadap medan listrik yang dibangkitkan untuk produksi ozon guna penjernihan air pewarna yang berfungsi sebagai indikator.

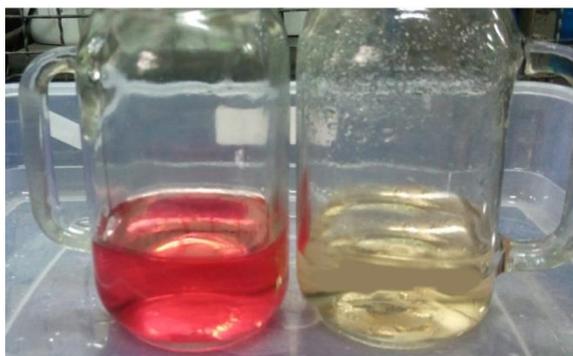




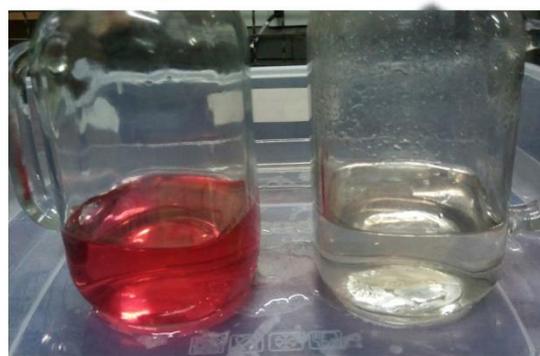
A. 3 sela 15 kV dalam 15 menit  
Tidak berubah warna



B. 2 sela 15 kV dalam 15 menit  
Warna sedikit berubah



C. 3 sela 25 kV dalam 15 menit  
Hampir jernih



D. 1 sela 10 kV dalam 10 menit  
Jernih

Gambar 4. 18 Sampel hasil pengamatan perubahan warna pada larutan air

Pada Gambar 4.18 terlihat 4 sampel hasil pengamatan pada perubahan warna larutan pewarna yang sudah dialirkan udara dari alat uji dengan 4 kondisi yang berbeda. Pada kondisi A tidak terjadi perubahan warna dengan aliran udara 2,45 liter/detik pada dielektrik 3 sela udara yang diberi tegangan 15 kV dan membangkitkan medan listrik sebesar 31,38 kV dalam jangka waktu pengujian 15 menit. Kondisi B terjadi perubahan warna dengan aliran udara 3,15 liter/detik pada dielektrik 2 sela udara yang diberi tegangan 15 kV dan membangkitkan medan listrik sebesar 45,04 kV dalam jangka waktu pengujian 15 menit. Kondisi C air hampir jernih dengan aliran udara 3,85 liter/detik pada dielektrik 3 sela udara yang diberi tegangan 25 kV dan membangkitkan medan listrik sebesar 52,30 kV dalam jangka waktu pengujian 15 menit. Dan kondisi terakhir yaitu kondisi D air berubah menjadi jernih dengan aliran udara 2,45 liter/detik pada dielektrik 1 sela udara yang diberi tegangan 10 kV dan membangkitkan medan listrik sebesar 52,91 kV dalam jangka waktu pengujian 10 menit.

#### 4.5.1 Pengujian Dielektrik Kaca dengan Satu Sela

Untuk pengujian ini plat elektroda diberikan tegangan dengan kisaran 5 kV, 10 kV, 15 kV dan 20 kV. Tegangan dibatasi hingga 20 kV karena pada tegangan di atasnya terjadi tembus pada dielektrik. Sumber udara bertekanan sama disemua pengujian. Percobaan hanya dilakukan satu kali dengan pengamatan perubahan warna pada larutan air warna dengan waktu maksimal 15 menit. Percobaan dilakukan pada dielektrik kaca ( $\epsilon_r = 4,5$ ) dengan dimensi panjang 23 cm, dengan lebar 10 cm, tinggi 0,5 cm dengan sela udara panjang 23 cm, lebar 7 cm, dan tinggi 1mm.

Tabel 4. 12 Data Pengujian Pemurnian Air Pewarna Menggunakan Ozon Pada Dielektrik 1 Sela

No	Volume Laju Udara (Liter/detik)	Tegangan (kV)	Medan (kV/cm)	Waktu Pengujian (menit)	Hasil Pemurnian Larutan
1	2,45	5	26,45	15	Tidak Berubah Warna
		10	52,91	10	Jernih
		15	79,36	8	Jernih
		20	105,82	6	Jernih
2	3,15	5	26,45	15	Tidak Berubah Warna
		10	52,91	11,5	Jernih
		15	79,36	9	Jernih
		20	105,82	7	Jernih
3	3,85	5	26,45	15	Tidak Berubah Warna
		10	52,91	12	Jernih
		15	79,36	10,5	Jernih
		20	105,82	7,5	Jernih

Dapat dilihat pada Tabel 4.9 pemurnian air berpengaruh pada besarnya tegangan dan medan listrik. Semakin besar medan listrik semakin terlihat pemurnian air dari zat pewarna tersebut, dan juga besarnya medan listrik mempengaruhi waktu (t) yang dibutuhkan untuk memurnikan air dari zat warna. Semakin besar medan listrik maka waktu yang dibutuhkan untuk pemurnian semakin sedikit. Sedangkan untuk kecepatan alir udara hanya sedikit mempengaruhi kecepatan pemurnian pada air.

#### 4.5.2 Pengujian Dielektrik Kaca dengan 2 Sela

Untuk pengujian ini plat elektroda diberikan tegangan dengan kisaran 5 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 25 kV, 30 kV dan 35 kV. Sumber udara bertekanan sama disemua pengujian. Percobaan hanya dilakukan satu kali dengan pengamatan perubahan warna pada air warna dengan waktu maksimal 15 menit. Percobaan dilakukan pada dielektrik kaca ( $\epsilon_r = 4,5$ )



dengan dimensi panjang 23 cm, dengan lebar 10 cm, tinggi 0,8 cm dengan sela udara panjang 23 cm, lebar 7 cm, dan tinggi kedua sela 2 mm. Hasil percobaan diberikan pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 13 Data Pengujian Pemurnian Air Pewarna Menggunakan Ozon Pada Dielektrik 2 Sela

No	Laju Alir Udara (Liter/detik)	Tegangan (kV)	Medan (kV/cm)	Waktu Pengujian (menit)	Hasil Pemurnian Larutan
1	2,45	5	15,01	15	Warna tidak berubah
		10	30,03	15	Warna tidak berubah
		15	45,04	15	Berubah Warna
		20	60,06	15	Jernih
		25	75,07	9	Jernih
		30	90,09	6	Jernih
		35	105,1	4,5	Jernih
2	3,15	5	15,01	15	Warna tidak berubah
		10	30,03	15	Warna tidak berubah
		15	45,04	15	Berubah Warna
		20	60,06	14	Jernih
		25	75,07	7,5	Jernih
		30	90,09	4	Jernih
		35	105,1	3,5	Jernih
3	3,85	5	15,01	15	Warna tidak berubah
		10	30,03	15	Warna tidak berubah
		15	45,04	15	Berubah Warna
		20	60,06	13	Jernih
		25	75,07	7	Jernih
		30	90,09	3	Jernih
		35	105,1	3	Jernih

Dapat dilihat pada Tabel 4.8 pemurnian air berpengaruh pada besarnya tegangan dan medan listrik. Semakin besar medan listrik semakin terlihat pemurnian air dari zat pewarna tersebut, dan juga besarnya medan listrik mempengaruhi waktu (t) yang dibutuhkan untuk memurnikan air dari zat warna. Semakin besar medan listrik maka waktu yang dibutuhkan untuk pemurnian semakin sedikit. Sedangkan untuk kecepatan aliran udara hanya sedikit mempengaruhi kecepatan pemurnian pada air.

#### 4.5.3 Pengujian Dielektrik Kaca dengan 3 sela

Untuk pengujian ini plat elektroda diberikan tegangan dengan kisaran 5 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 25 kV, dan 30 kV. Sumber udara bertekanan sama disemua pengujian. Percobaan hanya dilakukan satu kali dengan pengamatan perubahan warna pada air warna dengan waktu maksimal 20 menit. Percobaan dilakukan pada kaca ( $\epsilon_r = 4,5$ ) dengan dimensi panjang 20 cm, dengan lebar 12 cm, tinggi 1cm dengan sela udara panjang 20 cm, lebar 10 cm, dan tinggi 1mm. Hasil percobaan diberikan pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 14 Data Pengujian Pemurnian Air Pewarna Menggunakan Ozon

No	Laju Alir Udara (liter/detik)	Tegangan (kV)	Medan (kV/cm)	Waktu Pengujian (menit)	Hasil Pemurnian Larutan
1	2,45	5	10,46	15	Tidak Berubah Warna
		10	20,92	15	Tidak Berubah Warna
		15	31,38	15	Tidak Berubah Warna
		20	41,84	15	Berubah Warna
		25	52,3	15	Hampir Jernih
		30	62,76	7,5	Jernih
		35	73,22	5	Jernih
		40	83,68	4,5	Jernih
2	3,15	5	10,46	15	Tidak Berubah Warna
		10	20,92	15	Tidak Berubah Warna
		15	31,38	15	Tidak Berubah Warna
		20	41,84	15	Berubah Warna
		25	52,3	15	Hampir Jernih
		30	62,76	7	Jernih
		35	73,22	5	Jernih
		40	83,68	3	Jernih
3	3,85	5	10,46	15	Tidak Berubah Warna
		10	20,92	15	Tidak Berubah Warna
		15	31,38	15	Tidak Berubah Warna
		20	41,84	15	Berubah Warna
		25	52,3	15	Hampir Jernih
		30	62,76	6	Jernih
		35	73,22	4,5	Jernih
		40	83,68	3	Jernih

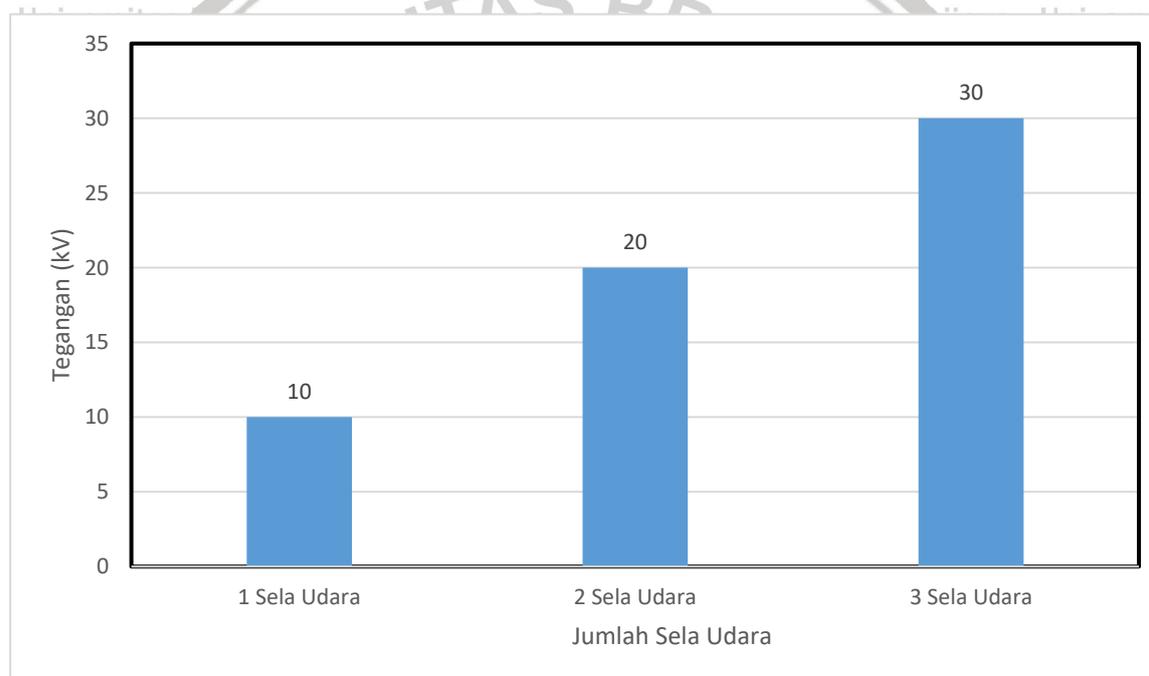
Dapat dilihat pada Tabel 4.13 pemurnian air berpengaruh pada besarnya tegangan dan medan listrik. Semakin besar medan listrik semakin terlihat pemurnian air dari zat pewarna tersebut, dan juga besarnya medan listrik mempengaruhi waktu (t) yang dibutuhkan untuk memurnikan air dari zat warna. Semakin besar medan listrik maka waktu yang dibutuhkan untuk pemurnian semakin sedikit. Sedangkan untuk kecepatan aliran udara hanya sedikit mempengaruhi kecepatan pemurnian pada air.

**4.5.4 Pengaruh Jumlah Sela Udara terhadap Pemurnian Larutan**

Dari pengujian yang dilakukan akan dilihat pengaruh jumlah yang berdampak pada ketebalan dielektrik mempengaruhi hasil pemurnian air dari zat warna dan waktu (t) yang dibutuhkan untuk memurnikan air. Bisa dibandingkan melalui Tabel 4.7, 4.9 dan 4.8.



Dapat dilihat pada hasil Tabel 4.7 dimana menggunakan bahan dielektrik dengan 1 sela udara dibandingkan dengan hasil Tabel 4.8 yang merupakan dielektrik dengan 2 sela udara dan Tabel 4.9 yang merupakan dielektrik dengan 3 sela udara. Dalam tegangan yang sama yaitu 10 kV besaran medan listrik yang dibangkitkan dielektrik dengan 1 sela udara lebih besar yaitu 52,91 kV/cm dibandingkan dengan dielektrik 2 sela udara yang membangkitkan medan sebesar 30,03 kV/cm dan dielektrik 3 sela yang hanya 20,92 kV/cm. Sehingga dalam tegangan uji 10 kV dielektrik dengan 1 sela udara dapat menjernihkan air dengan pewarna selama 10 menit sedangkan 2 alat uji lain dalam waktu 15 menit tidak dapat menjernihkan air dengan pewarna bahkan cenderung tidak berubah warna. Berikut ini grafik perbandingan tegangan yang dibutuhkan dielektrik untuk menjernihkan air pada gambar 4.19.



Gambar 4. 19 Grafik tegangan yang dibutuhkan dielektrik untuk menjernihkan air

Dapat dilihat pada grafik Gambar 4.19 jika dielektrik dengan 1 sela udara membutuhkan tegangan yang lebih kecil dibandingkan dielektrik dengan 2 dan 3 sela udara untuk dapat menjernihkan air yang diberikan pewarna. Hal ini dikarenakan ketebalan dielektrik berbanding terbalik dengan besar medan listrik yang dibangkitkan di rumus dielektrik berlapis pada persamaan 2.5, sehingga semakin tebal dielektrik maka semakin kecil medan listrik yang dibangkitkan. Pernyataan tersebut berhubungan dengan proses udara yang terionisasi dipengaruhi oleh besar medan listrik yang dibangkitkan dimana semakin besar medan listrik, semakin banyak juga udara yang terionisasi. Jika semakin

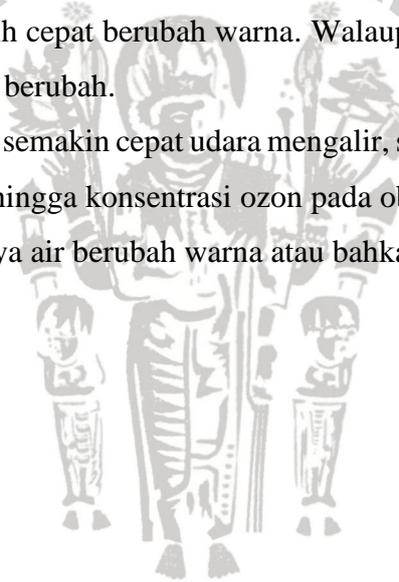
banyak udara terionisasi maka semakin banyak ozon diproduksi yang menyebabkan air pewarna menjadi semakin cepat menjadi jernih.

#### 4.5.5 Pengaruh Kecepatan Udara terhadap Pemurnian Larutan

Dari pengujian yang dilakukan akan dilihat pengaruh kecepatan aliran udara pada sela dielektrik terhadap hasil pemurnian air dari zat warna dan waktu (t) yang dibutuhkan untuk memurnikan air. Bisa dibandingkan melalui Tabel 4.7 dan 4.8 dan 4.9

Dapat dilihat pada hasil tabel 4.7 dimana kecepatan udara yang mengalir dibedakan menjadi tiga yaitu 3,5 m/s; 4,5 m/s; dan 5,5m/s diatur menggunakan katup pada inlet alat uji dan diukur menggunakan alat pengukur kecepatan udara (Anemometer) dan dikonversikan dalam bentuk volume, 3,5m/s menjadi 2,45 liter/detik, 4,5m/s menjadi 3,15 liter/detik dan 5,5m/s menjadi 3,85 liter/detik. Semakin cepat udara mengalir, semakin banyak pula volume udara yang masuk ke dalam indikator. Hal itu ditunjukkan dengan cairan berwarna cenderung lebih cepat berubah warna. Walaupun nilai pada satuan waktu tersebut tidak terlalu signifikan berubah.

Hal ini dapat dikarenakan semakin cepat udara mengalir, semakin besar volume udara yang mengalir ke objek uji. Sehingga konsentrasi ozon pada objek uji menjadi lebih pekat dan menyebabkan lebih cepatnya air berubah warna atau bahkan menjadi jernih.



## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari perhitungan, simulasi, pengujian dan analisis pada pembahasan sebelumnya maka dalam penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Pengaruh banyaknya sela udara pada dielektrik berlapis padat berupa kaca mempengaruhi besar medan listrik yang dibangkitkan karena besar ketebalan dielektrik berbanding terbalik dengan medan listrik yang dibangkitkan, jadi semakin tebal dielektrik semakin kecil medan listrik yang dibangkitkan dengan besar tegangan yang sama.
2. Kecepatan udara yang mengalir cenderung sedikit mempengaruhi kecepatan penjernihan. Hal itu dikarenakan semakin cepat udara mengalir ke dalam objek uji, semakin besar pula volume udara yang masuk sehingga ozon yang dihasilkan semakin pekat. Hal ini juga menunjukkan jika kecepatan aliran udara yang masuk tidak mempengaruhi proses ionisasi dikarenakan prosesnya yang sangat cepat.
3. Hasil dan kecepatan pemurnian air berpengaruh pada besarnya medan listrik karena besarnya medan listrik mengakibatkan energi untuk mengionisasi udara semakin besar sehingga gas ozon yang dihasilkan juga semakin banyak mengakibatkan hasil dan kecepatan pemurnian air lebih baik. Pengaruh nilai tegangan yang diberikan terhadap nilai medan listrik yang dibangkitkan semakin tinggi nilai tegangan yang diberikan maka semakin tinggi juga nilai medan yang dibangkitkan. Nilai medan listrik meningkat secara linier terhadap tegangan.

### 5.2 Saran

Berdasarkan pada hasil analisis yang telah dilakukan, saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya antara lain

1. Dilakukan penelitian menggunakan material dielektrik dengan ketebalan yang lebih bervariasi.
2. Dilakukan penelitian dengan kandungan objek uji yang lebih diperinci sehingga bias lebih dipastikan lebih jelas apa yang dihasilkan dari medan tinggi tersebut seperti volume dan gas yang terkandung.

3. Dilakukan penelitian dengan masukan kandungan gas yang berbeda dan lebih jelas volumenya.
4. Membahas pengaruh bagaimana bahan penyokong alat uji mempengaruhi hasil pengujian.
5. Dilakukan penelitian dengan seberapa besar daya tahan dielektrik berlapis terhadap tegangan yang diberikan.
6. Dilakukan penelitian terkait kandungan yang terdapat dalam keluaran alat uji dan air sebagai indikator untuk mengetahui kandungan yang lebih spesifik dan pengaruhnya kepada indikator.



## DAFTAR PUSTAKA

- Arora, R., & Mosch, W. (2011). *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*. Amerika Serikat: John Wiley & Sons, Inc.
- E. Kuffel. (2000). *High Voltage Engineering Fundamentals: Second Edition*. Belanda: Elsevier
- Juan, M.V. (2007). *Dielectric Materials for Electrical Engineering*. Inggris: Lavoiser
- Kind, Dieter. (1993). *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*; ITB Bandung.
- Kogelschatz, U., (2003). *Dielectric Barrier Discharges; Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications*. Plasma Chemistry and Processing 23,1.
- Moch. Dhofir. (1997). *Diktat Gejala Medan Tinggi*, Malang: Percetakan Unibraw
- Mochammad, F., Hermawan, Karnoto, Zainal, S. & Zolkafle, B., (2014). *Double Dielectric Barrier Discharge Chamber for Ozone Generation*. ICITACEE
- Naidu, M.S. & Kamaraju, V. (2013). *High-Voltage Engineering*. India: McGraw Hill Education (India) Private Limited
- S. Fitria, Z. Nawawi, M.A.B. Sidik, D. Yuniarti, R.F. Kurnia & Z. Buntat. 2018. *Comparison Double Dielectric Barrier Using Perforated Aluminium for Ozone Generation*. ICECOS
- Said, N.I. (2007). *Disinfeksi Untuk Proses Pengolahan Air Minum*. Jakarta: Pusat Teknologi Lingkungan, BPPT.
- Tobing, L.B. (2003). *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*, Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- William, Hayt. & Buck, John. (1958). *Engineering Electromagnetics*. McGraw Hill
- W. M. Haynes. 2017. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* Amerika Serikat: CRC Press
- Yusuf, B. (2016). *Aplikasi Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls Untuk Pembuatan Reaktor Ozon*, Semarang : Universitas Diponegoro.



Halaman ini sengaja dikosongkan

## LAMPIRAN

### Lampiran 1 Foto Pengujian



Dielektrik yang diuji



Rangkaian Pengujian



Control Desk



## Lampiran 2 Perhitungan matematis intensitas medan listrik yang dibangkitkan pada dielektrik dengan 1 sela udara

$$E_2 = \frac{U}{1,89} \text{ kV/mm} = E_2 = \frac{10U}{1,89} \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 5 kV: } E_2 = \frac{10,5 \text{ kV}}{1,89} \text{ cm} = 26,59 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 10 kV: } E_2 = \frac{10,10 \text{ kV}}{1,89} \text{ cm} = 53,19 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 15 kV: } E_2 = \frac{10,15 \text{ kV}}{1,89} \text{ cm} = 79,78 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 20 kV: } E_2 = \frac{10,20 \text{ kV}}{1,89} \text{ cm} = 106,38 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 25 kV: } E_2 = \frac{10,25 \text{ kV}}{1,89} \text{ cm} = 132,97 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 30 kV: } E_2 = \frac{10,30 \text{ kV}}{1,89} \text{ cm} = 159,57 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 35 kV: } E_2 = \frac{10,35 \text{ kV}}{1,89} \text{ cm} = 186,17 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 40 kV: } E_2 = \frac{10,40 \text{ kV}}{1,89} \text{ cm} = 212,76 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 45 kV: } E_2 = \frac{10,45 \text{ kV}}{1,89} \text{ cm} = 239,36 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 50 kV: } E_2 = \frac{10,50 \text{ kV}}{1,89} \text{ cm} = 265,95 \text{ kV/cm}$$

Perhitungan matematis intensitas medan listrik yang dibangkitkan pada dielektrik dengan 2 sela udara

$$E_2 = \frac{U}{3,33} \text{ kV/mm} = E_2 = \frac{10U}{3,33} \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 5 kV: } E_2 = \frac{10,5 \text{ kV}}{3,33} \text{ cm} = 15,01 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 10 kV: } E_2 = \frac{10,10 \text{ kV}}{3,33} \text{ cm} = 30,03 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 15 kV: } E_2 = \frac{10,15 \text{ kV}}{3,33} \text{ cm} = 45,04 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 20 kV: } E_2 = \frac{10,20 \text{ kV}}{3,33} \text{ cm} = 60,06 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 25 kV: } E_2 = \frac{10,25 \text{ kV}}{3,33} \text{ cm} = 75,07 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 30 kV: } E_2 = \frac{10,30 \text{ kV}}{3,33} \text{ cm} = 90,09 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 35 kV: } E_2 = \frac{10,35 \text{ kV}}{3,33} \text{ cm} = 105,1051 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Untuk Tegangan 40 kV: } E_2 = \frac{10,40 \text{ kV}}{3,33} \text{ cm} = 120,12 \text{ kV/cm}$$

Untuk Tegangan 45 kV:  $E_2 = \frac{10,45 \text{ kV/cm}}{3,33} = 135,13 \text{ kV/cm}$

Untuk Tegangan 50 kV:  $E_2 = \frac{10,50 \text{ kV/cm}}{3,33} = 150,15 \text{ kV/cm}$

Perhitungan matematis intensitas medan listrik yang dibangkitkan pada dielektrik dengan 2 sela udara

$E_2 = \frac{U}{4,78} \text{ kV/mm} = E_2 = \frac{100 \text{ kV}}{4,78} \text{ cm}$

Untuk Tegangan 5 kV:  $E_2 = \frac{10,5 \text{ kV/cm}}{3,33} = 10,46 \text{ kV/cm}$

Untuk Tegangan 10 kV:  $E_2 = \frac{10,10 \text{ kV/cm}}{4,78} = 20,92 \text{ kV/cm}$

Untuk Tegangan 15 kV:  $E_2 = \frac{10,15 \text{ kV/cm}}{4,78} = 31,38 \text{ kV/cm}$

Untuk Tegangan 20 kV:  $E_2 = \frac{10,20 \text{ kV/cm}}{4,78} = 41,841 \text{ kV/cm}$

Untuk Tegangan 25 kV:  $E_2 = \frac{10,25 \text{ kV/cm}}{4,78} = 52,30 \text{ kV/cm}$

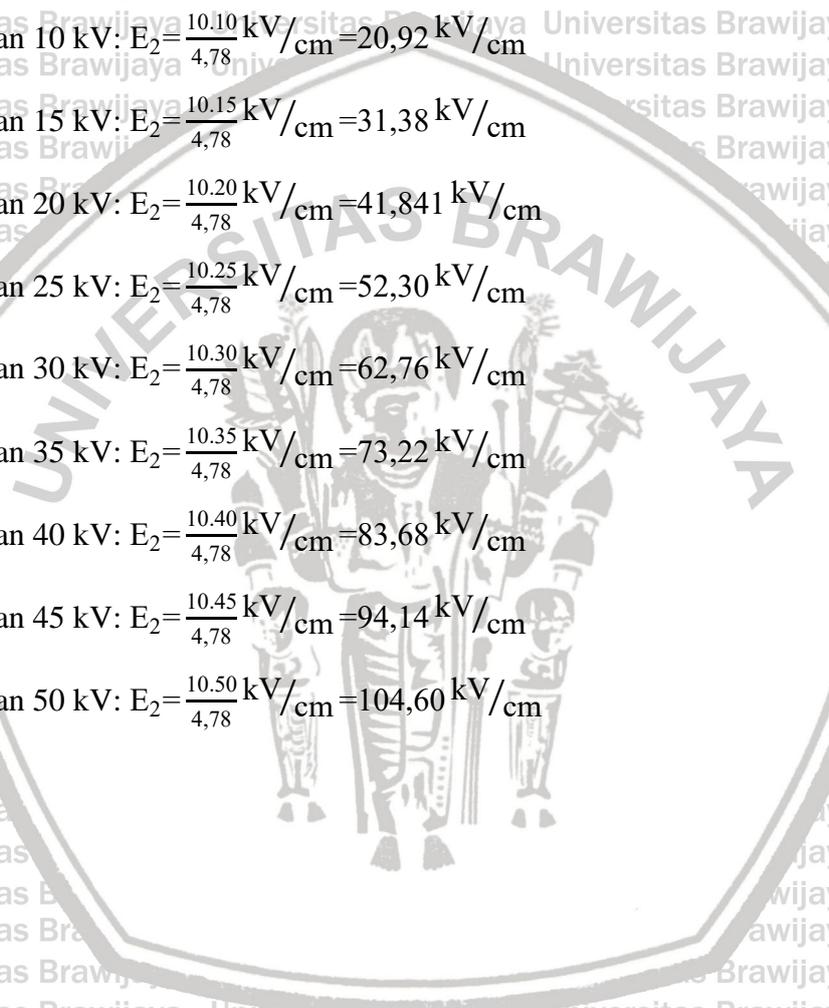
Untuk Tegangan 30 kV:  $E_2 = \frac{10,30 \text{ kV/cm}}{4,78} = 62,76 \text{ kV/cm}$

Untuk Tegangan 35 kV:  $E_2 = \frac{10,35 \text{ kV/cm}}{4,78} = 73,22 \text{ kV/cm}$

Untuk Tegangan 40 kV:  $E_2 = \frac{10,40 \text{ kV/cm}}{4,78} = 83,68 \text{ kV/cm}$

Untuk Tegangan 45 kV:  $E_2 = \frac{10,45 \text{ kV/cm}}{4,78} = 94,14 \text{ kV/cm}$

Untuk Tegangan 50 kV:  $E_2 = \frac{10,50 \text{ kV/cm}}{4,78} = 104,60 \text{ kV/cm}$



**Lampiran 3 Perhitungan matematis volume laju udara**

$$V_{la} = \frac{700p \times 10^{-3}}{t}$$

$$V_{la} = \frac{700p \times 10^{-3}}{1}$$

$$V_{la} = 0,7p \text{ liter/detik}$$

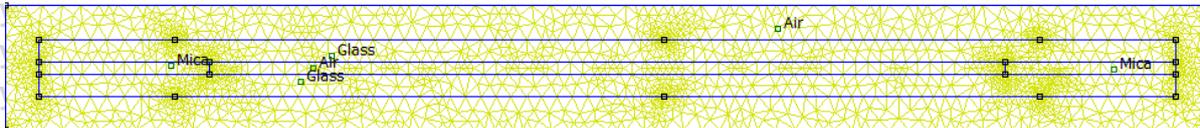
Untuk kecepatan udara 3,5 m/s :  $V_{la} = 0,7 \cdot 3,5 = 2,45$  liter/detik

Untuk kecepatan udara 4,5 m/s :  $V_{la} = 0,7 \cdot 4,5 = 3,15$  liter/detik

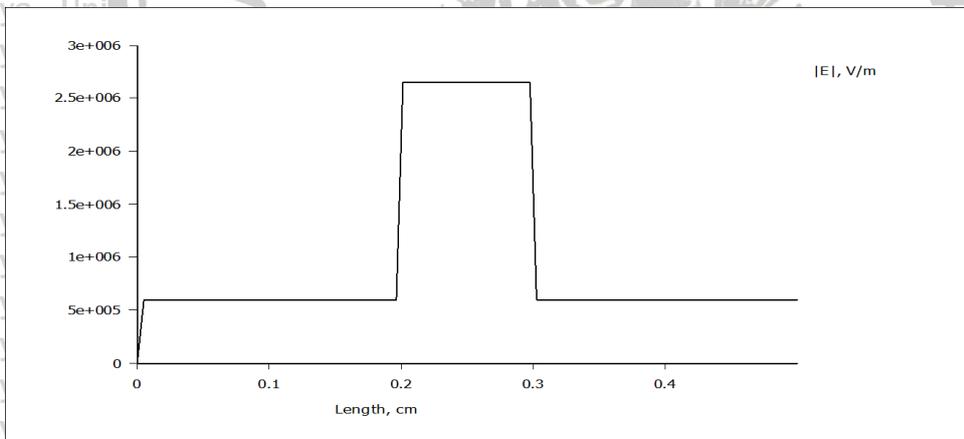
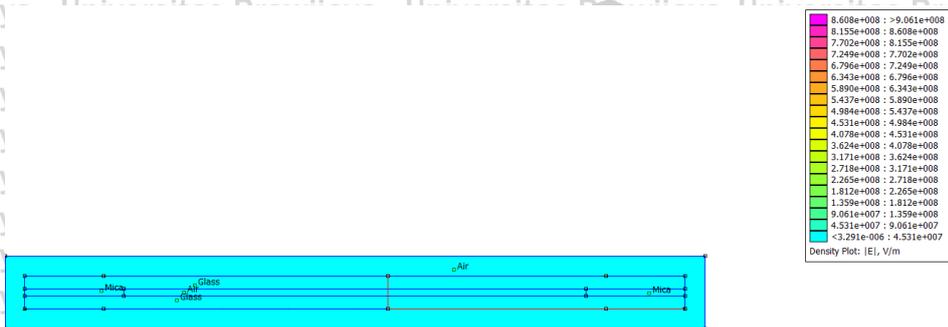
Untuk kecepatan udara 5,5 m/s :  $V_{la} = 0,7 \cdot 5,5 = 3,85$  liter/detik



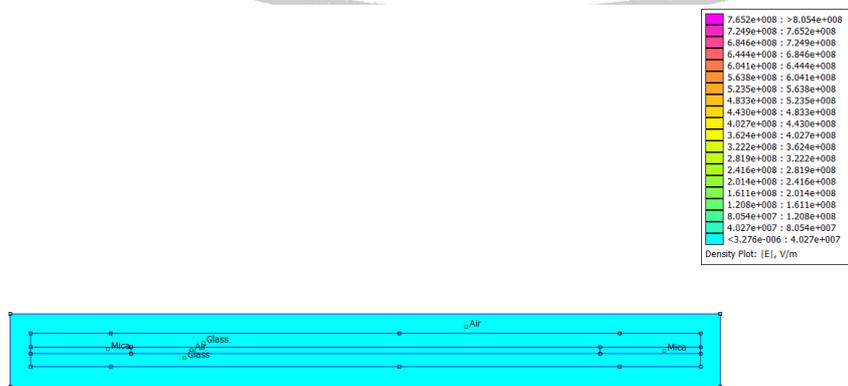
Lampiran 4 Data Simulasi FEMM 4.2

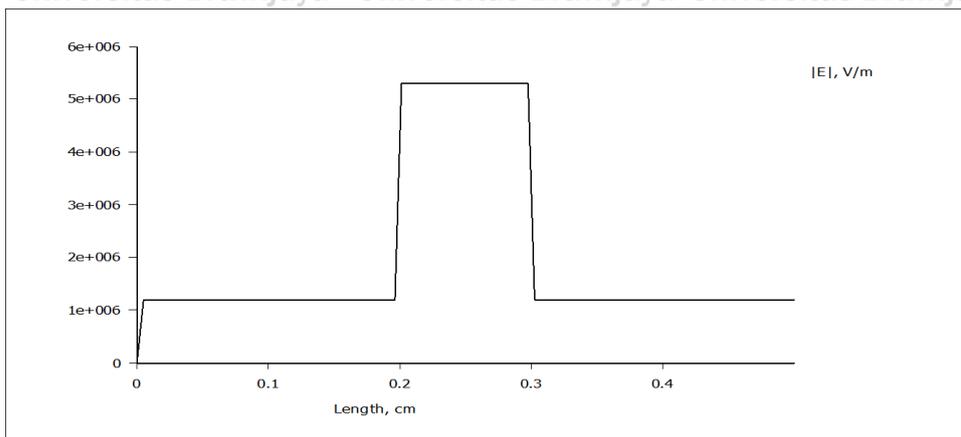


Desain FEMM dielektrik 2 keping kaca 1 sela udara

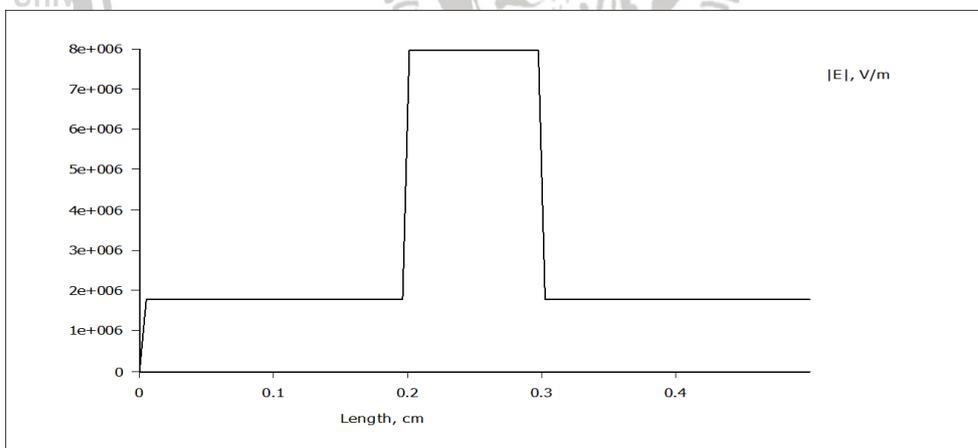
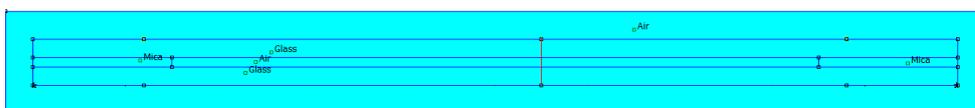
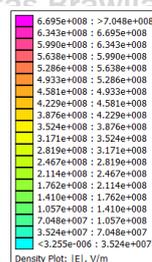


Simulasi FEMM dielektrik 1 sela tegangan 5 kV

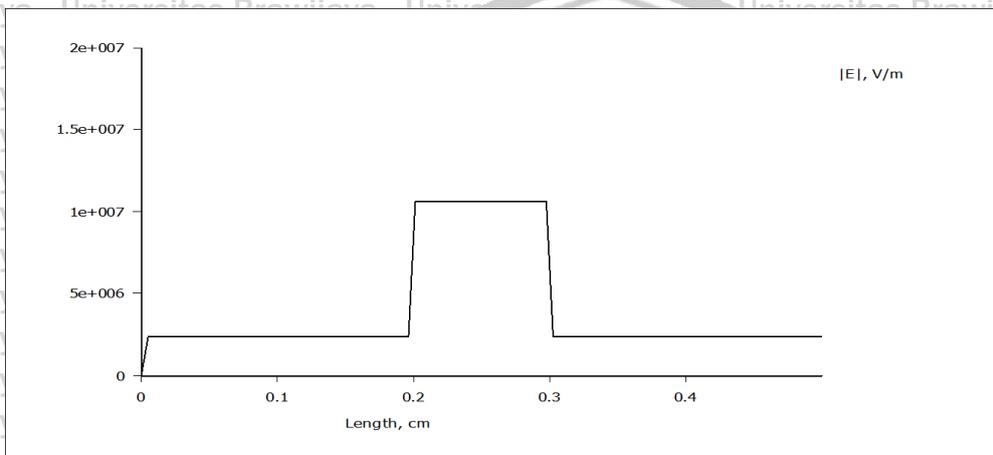
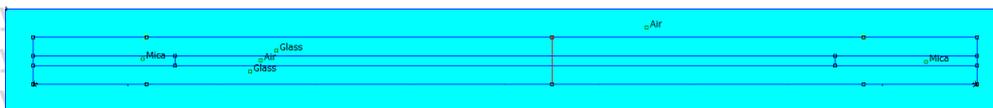
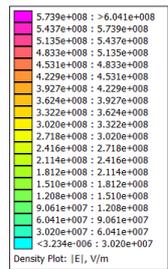




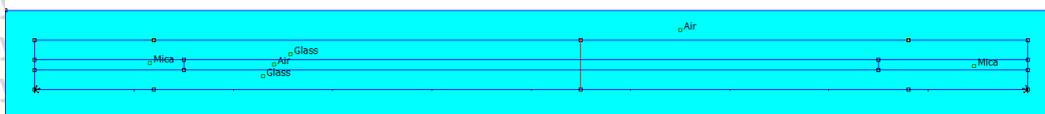
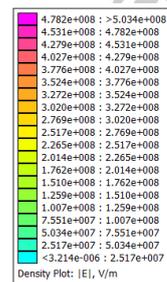
Simulasi FEMM dielektrik 1 sela tegangan 10 kV

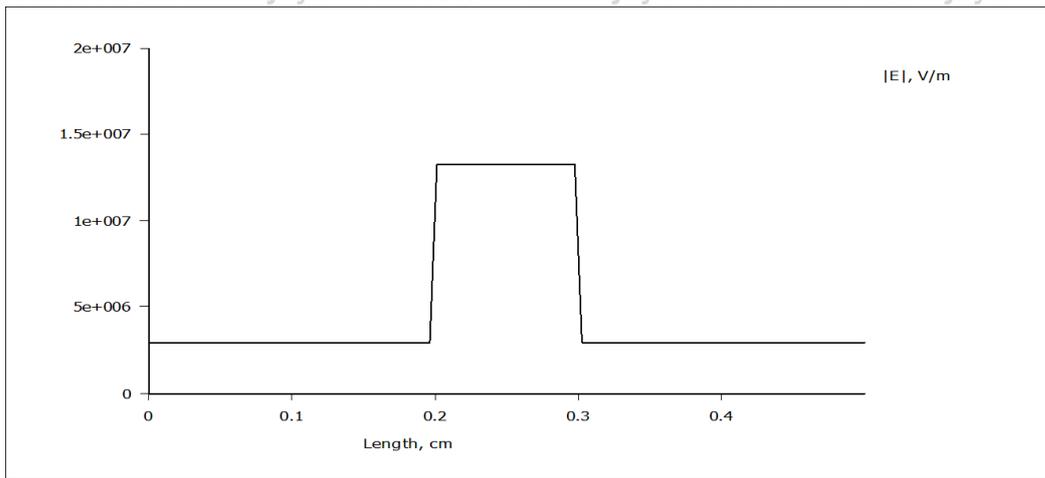


Simulasi FEMM dielektrik 1 sela tegangan 15 kV

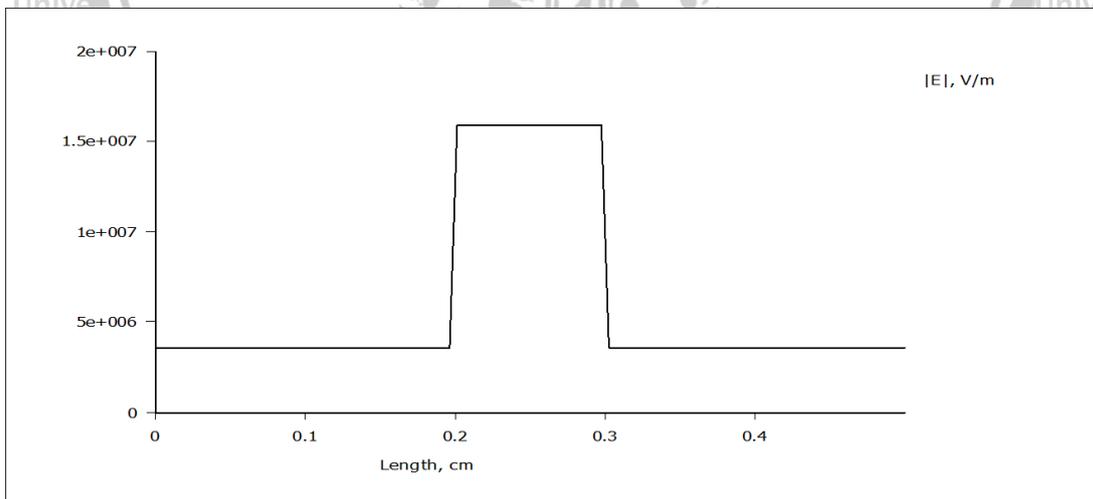
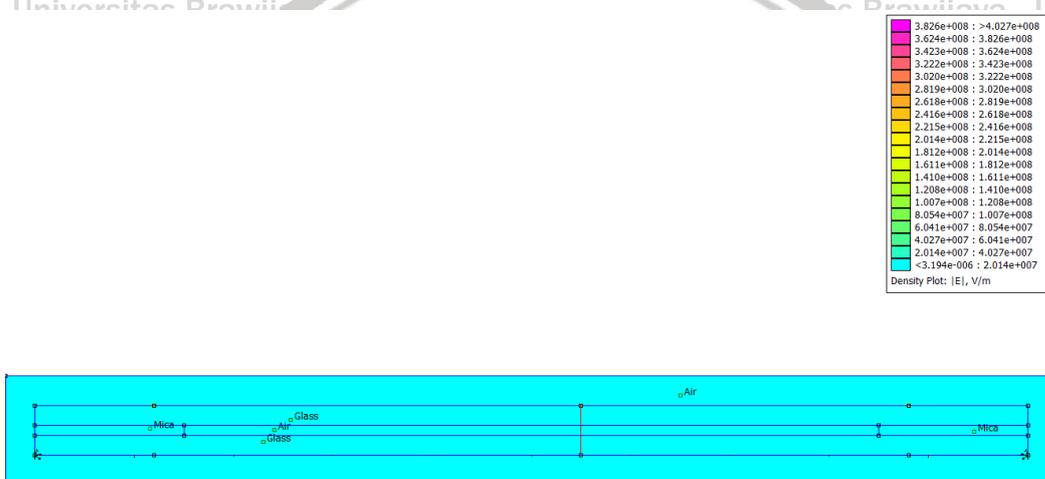


Simulasi FEMM dielektrik 1 sela tegangan 20 kV

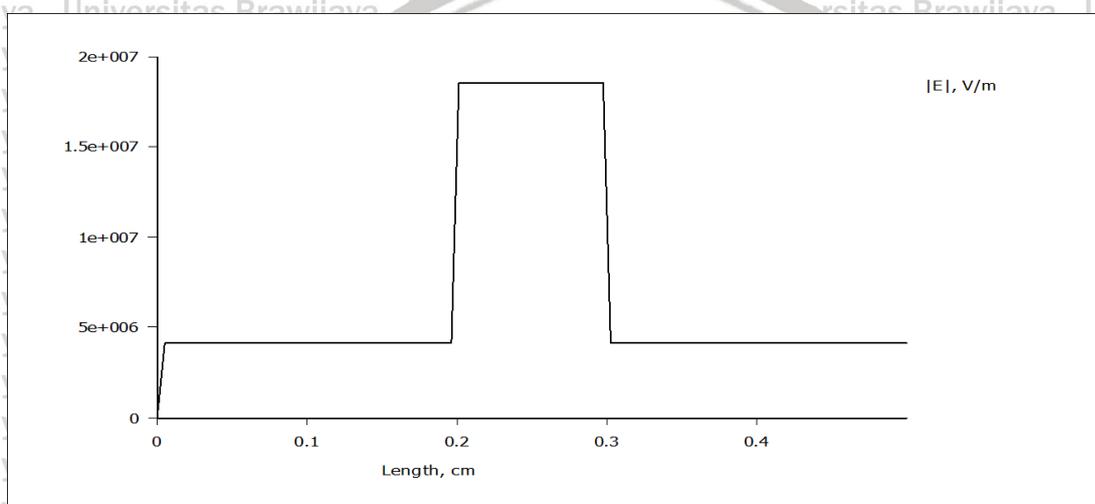
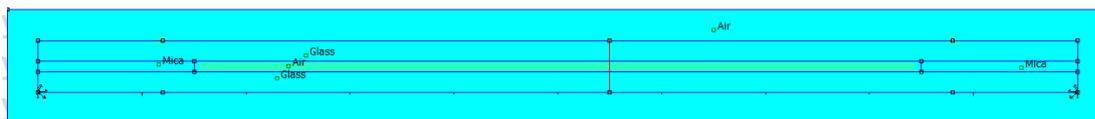
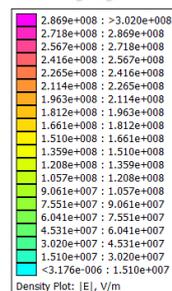




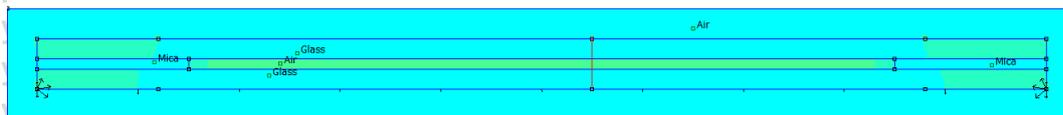
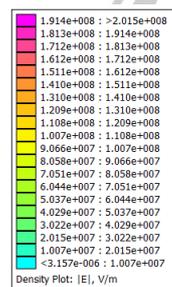
Simulasi FEMM dielektrik 1 sela tegangan 25 kV

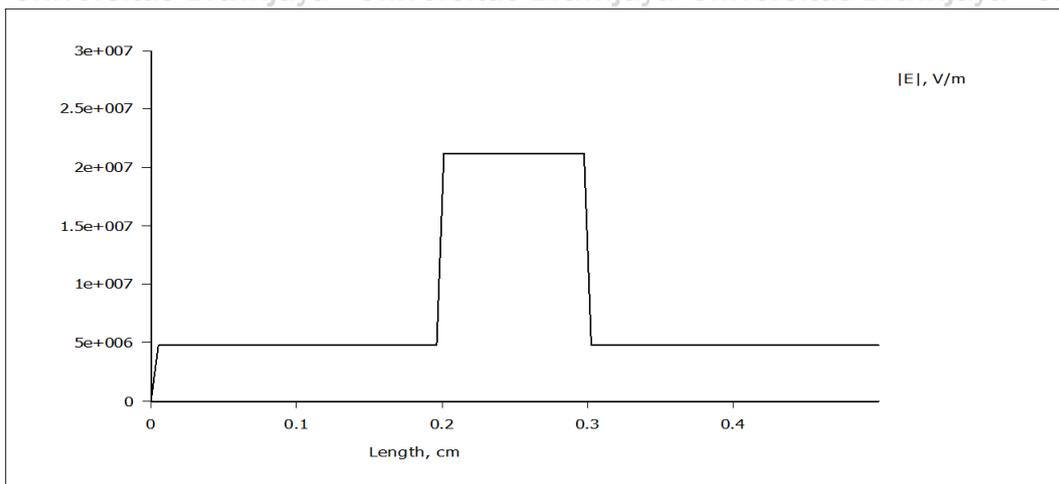


Simulasi FEMM dielektrik 1 sela tegangan 30 kV

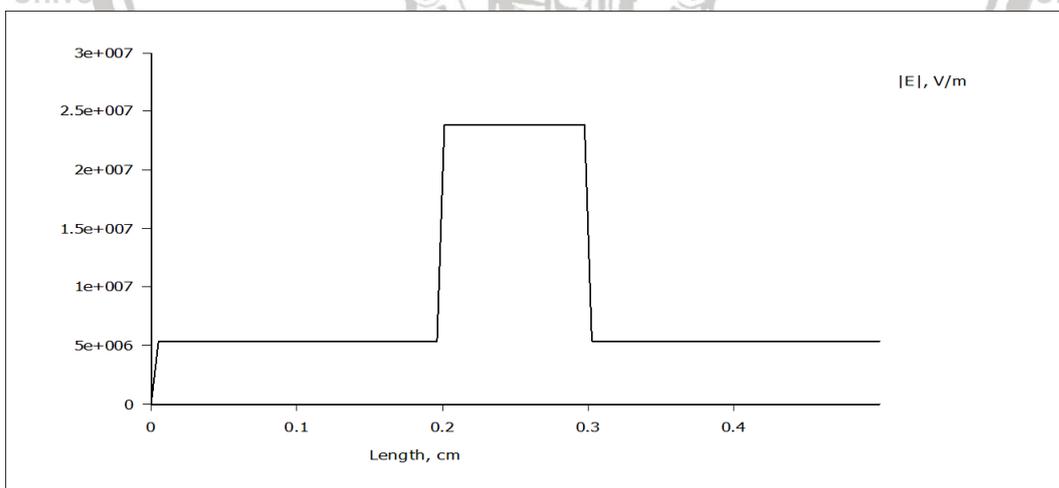
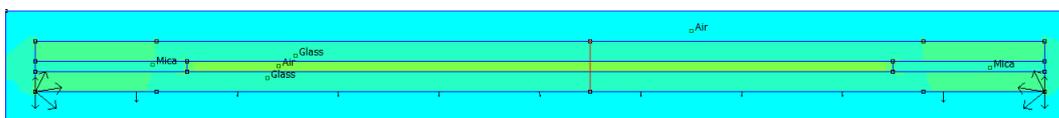
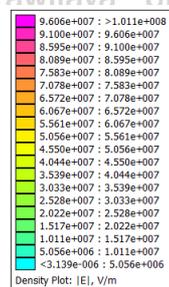


Simulasi FEMM dielektrik 1 sela tegangan 35 kV

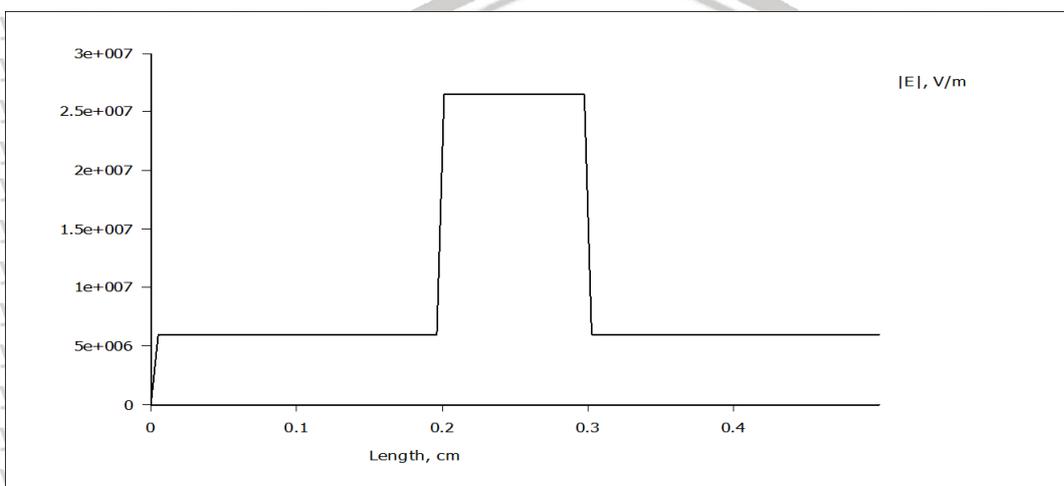
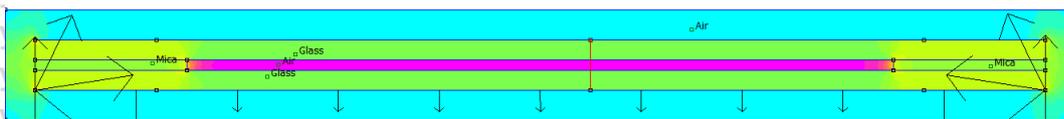
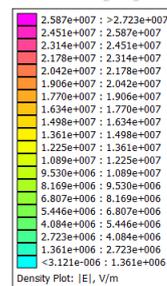




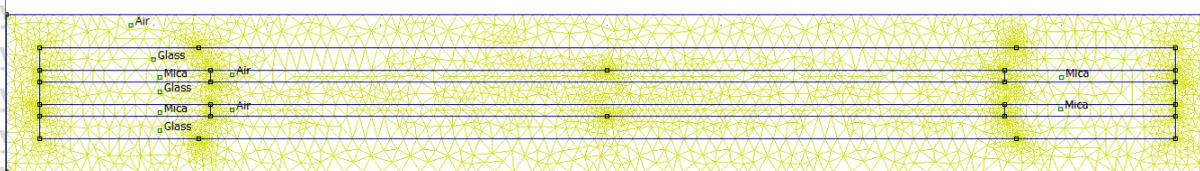
Simulasi FEMM dielektrik 1 sela tegangan 40 kV



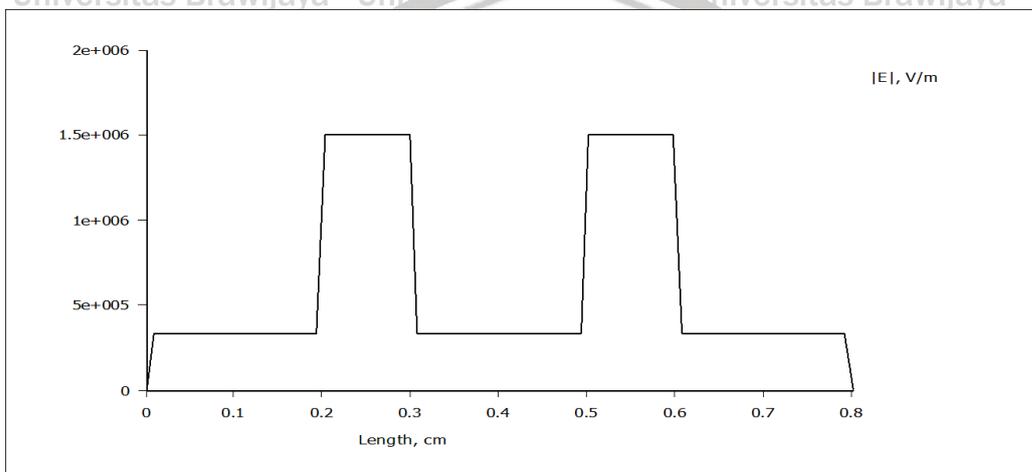
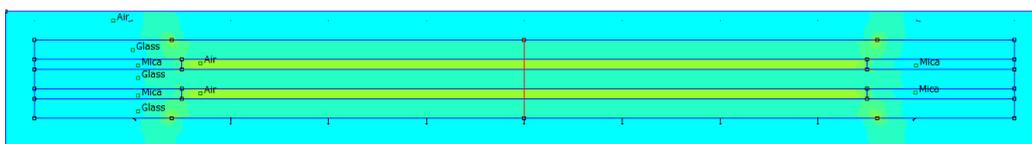
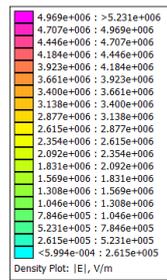
Simulasi FEMM dielektrik 1 sela tegangan 45 kV



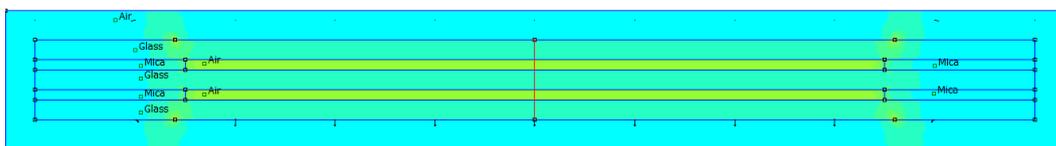
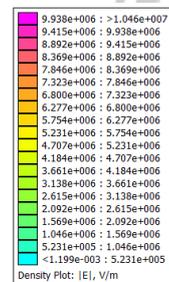
Simulasi FEMM dielektrik 1 sela tegangan 50 kV

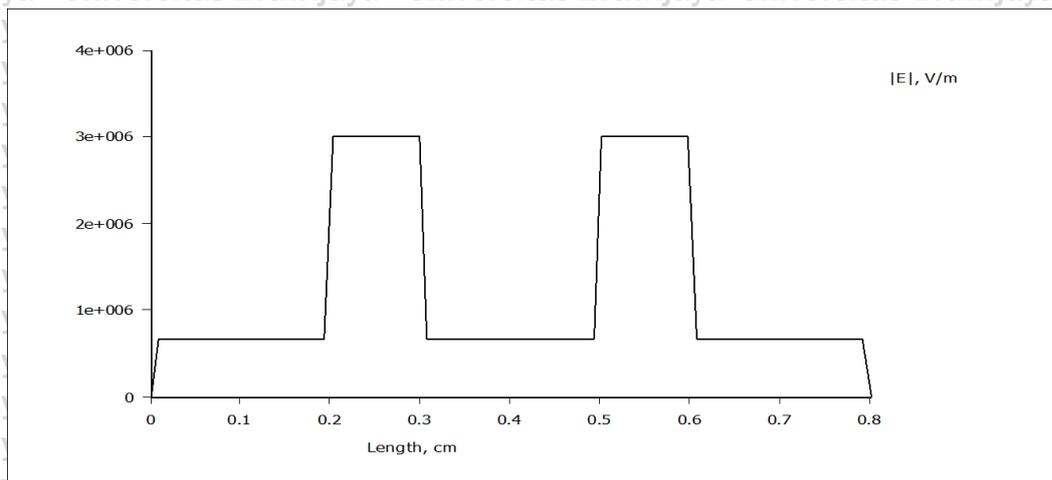


Desain FEMM dielektrik 3 keping kaca 2 sela udara

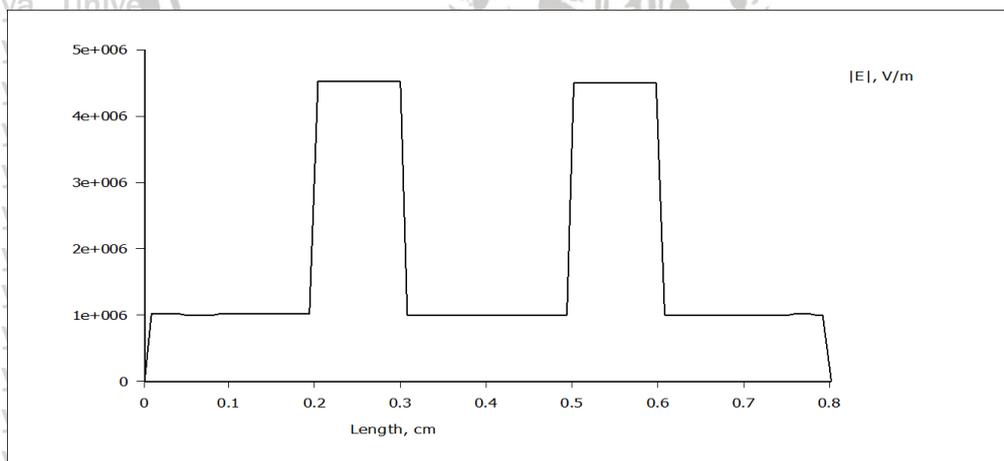
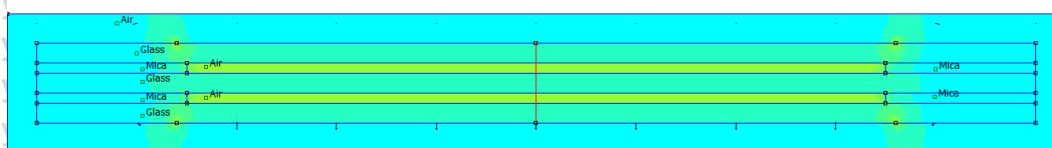


Simulasi FEMM dielektrik 2 sela tegangan 5 kV

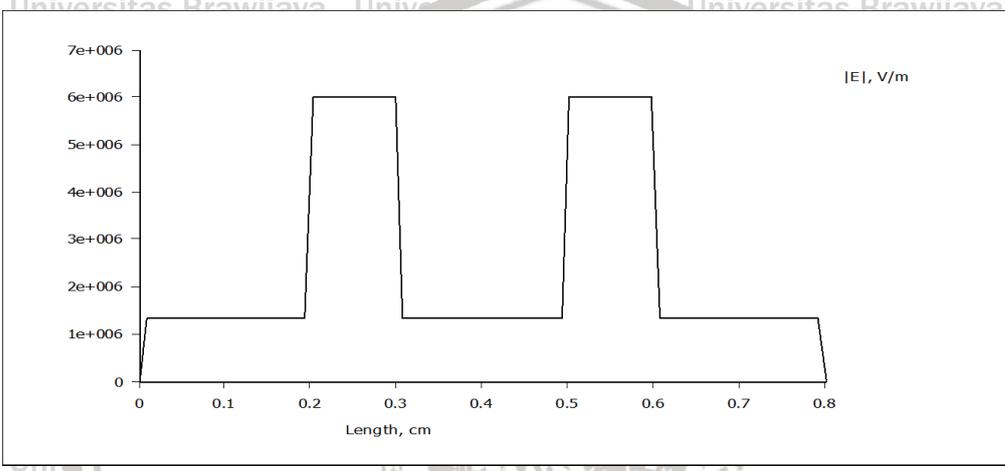
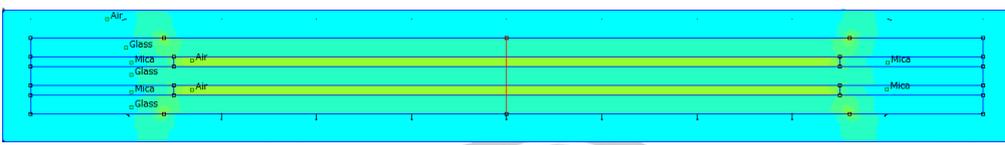
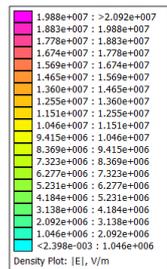




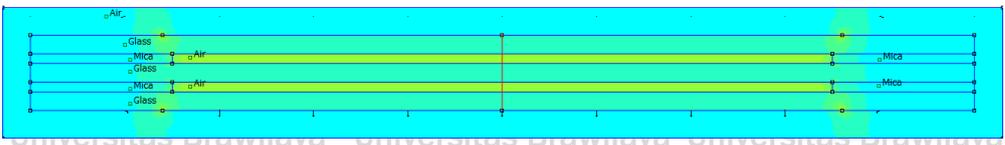
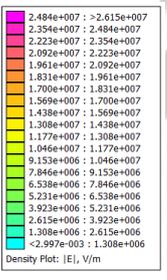
Simulasi FEMM dielektrik 2 sela tegangan 10 kV

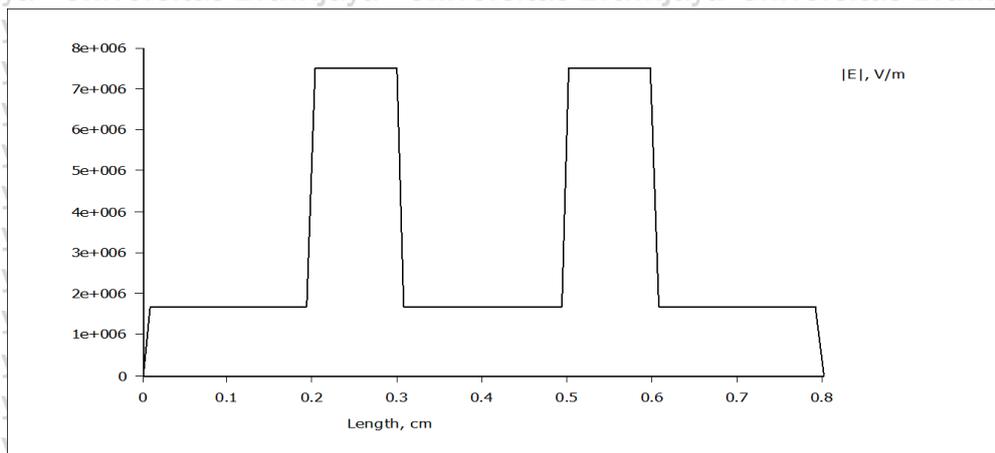


Simulasi FEMM dielektrik 2 sela tegangan 15 kV

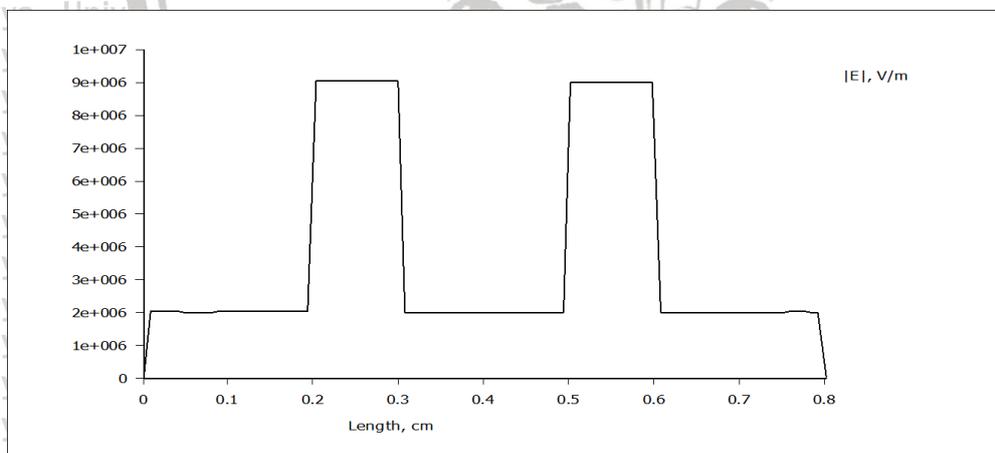
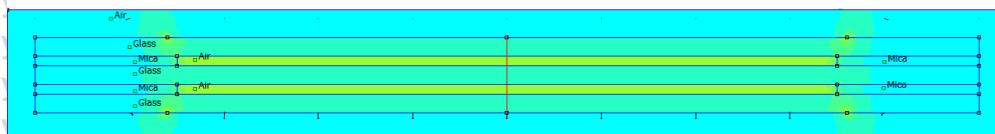
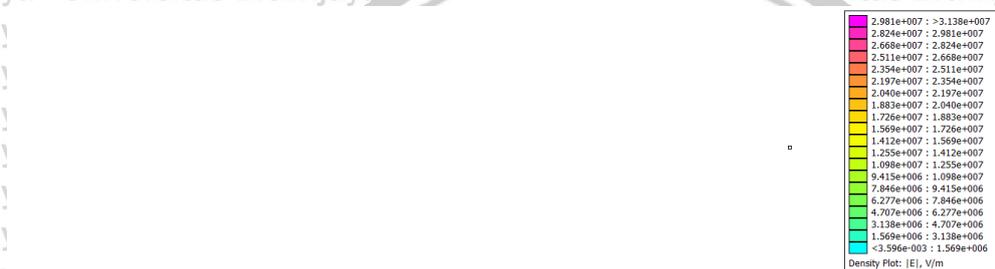


Simulasi FEMM dielektrik 2 sela tegangan 20 kV



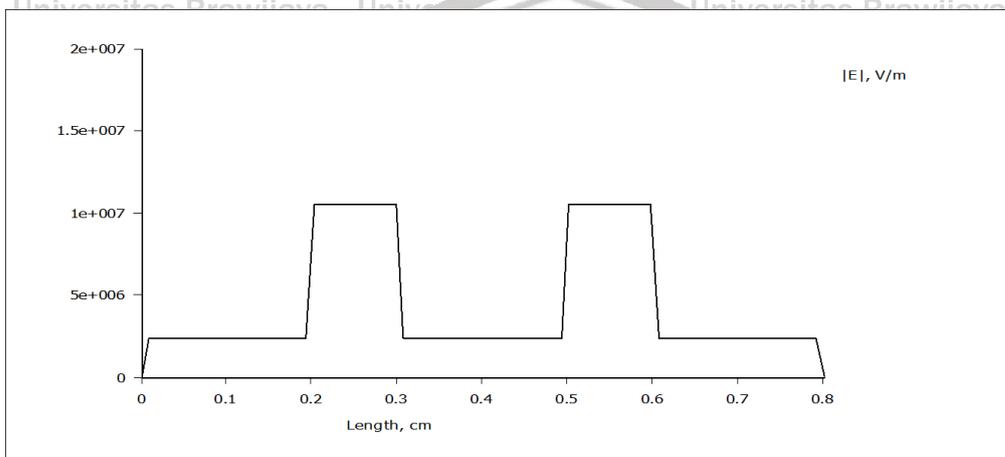
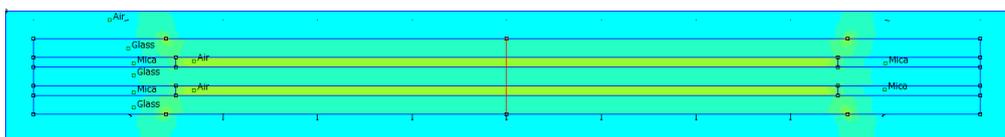
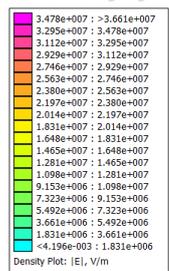


Simulasi FEMM dielektrik 2 sela tegangan 25 kV

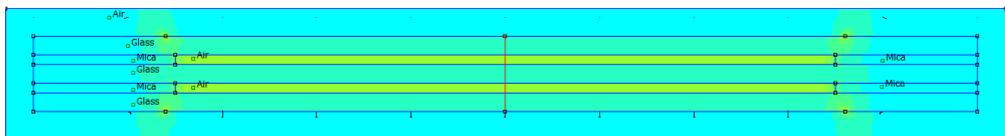
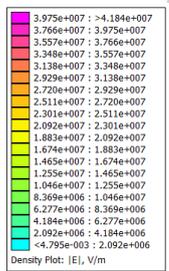


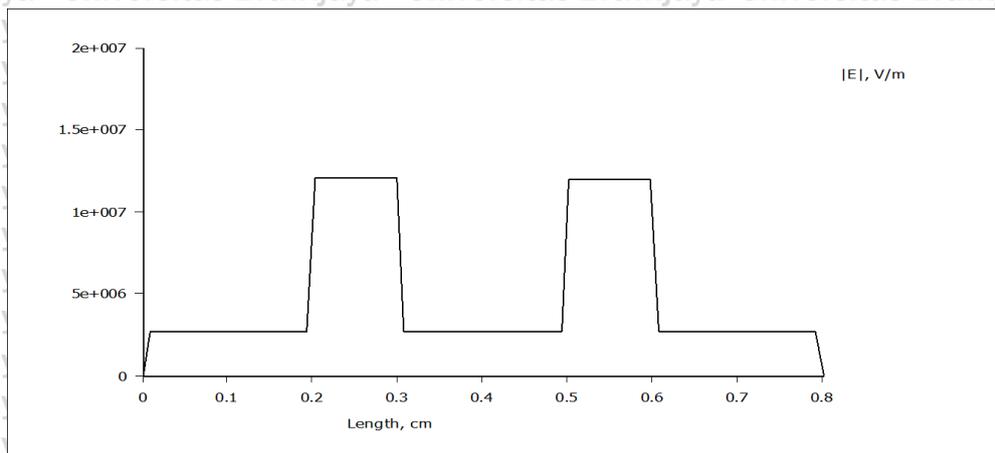
Simulasi FEMM dielektrik 2 sela tegangan 30 kV



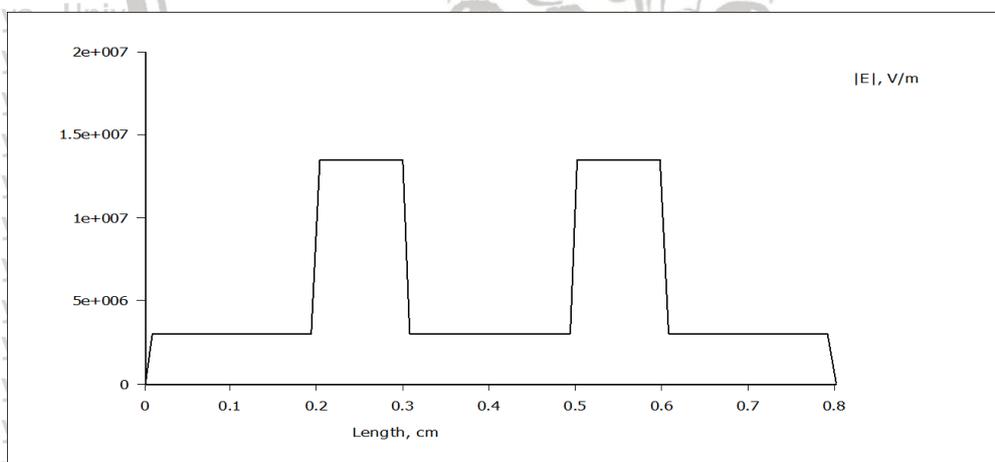
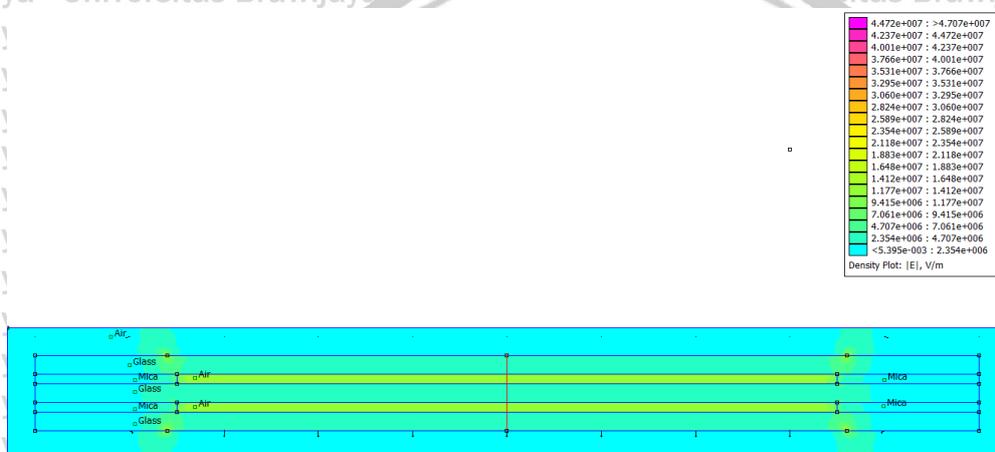


Simulasi FEMM dielektrik 2 sela tegangan 35 kV



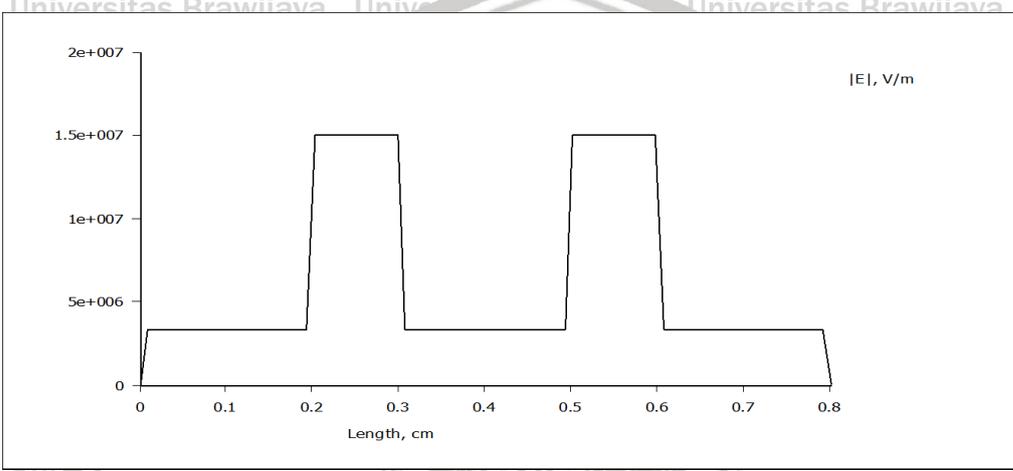
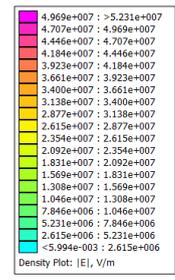


Simulasi FEMM dielektrik 2 sela tegangan 40 kV

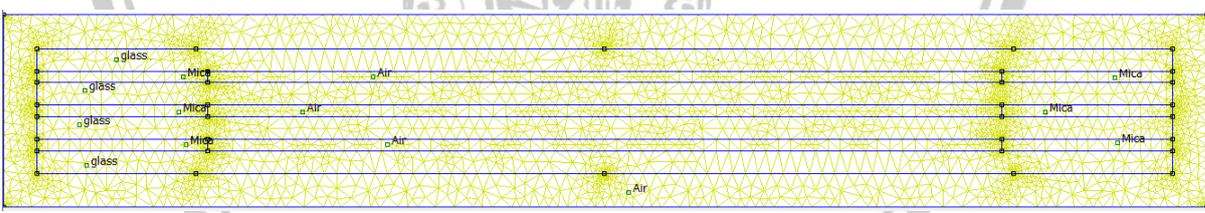


Simulasi FEMM dielektrik 2 sela tegangan 45 kV

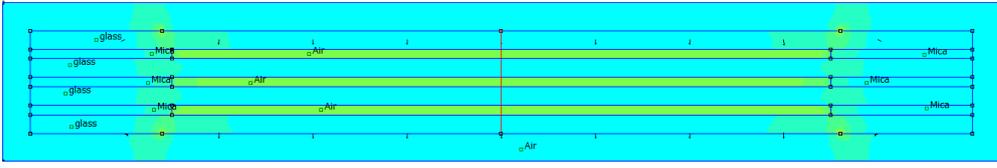
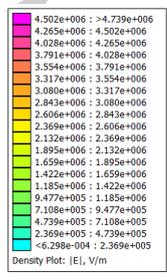
Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya

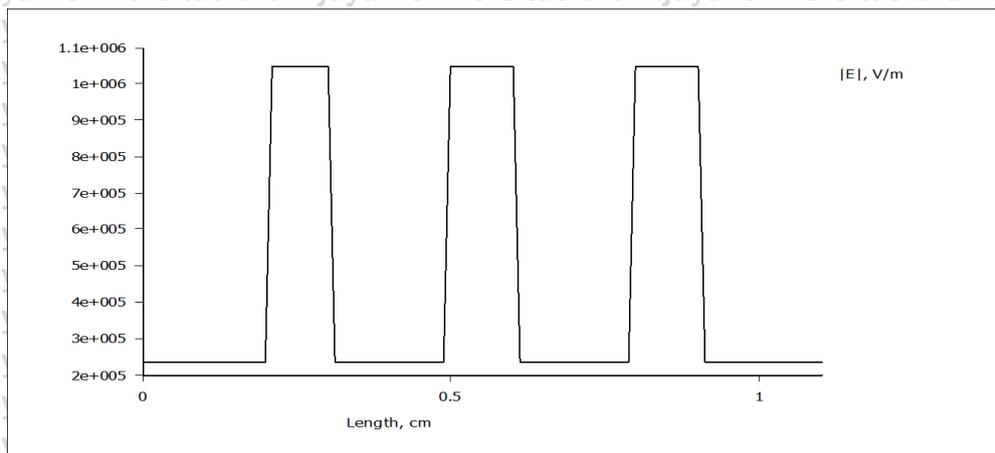


Simulasi FEMM dielektrik 2 sela tegangan 50 kV

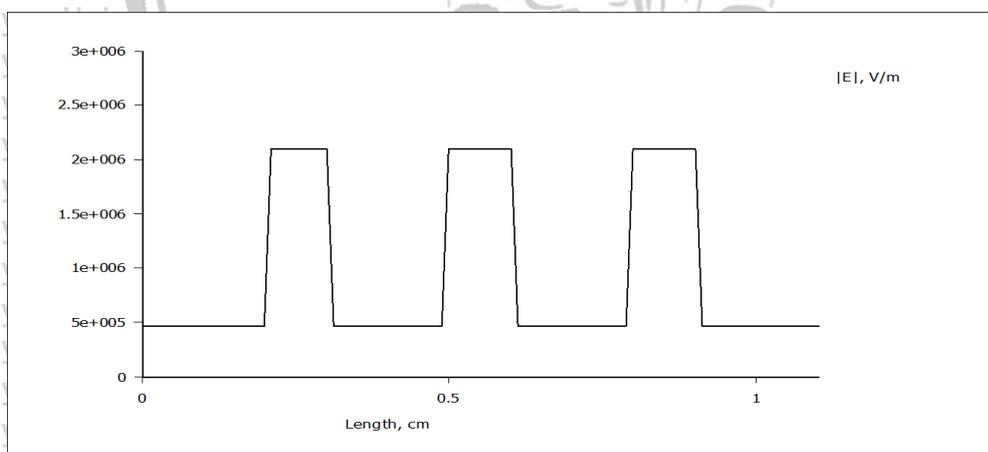
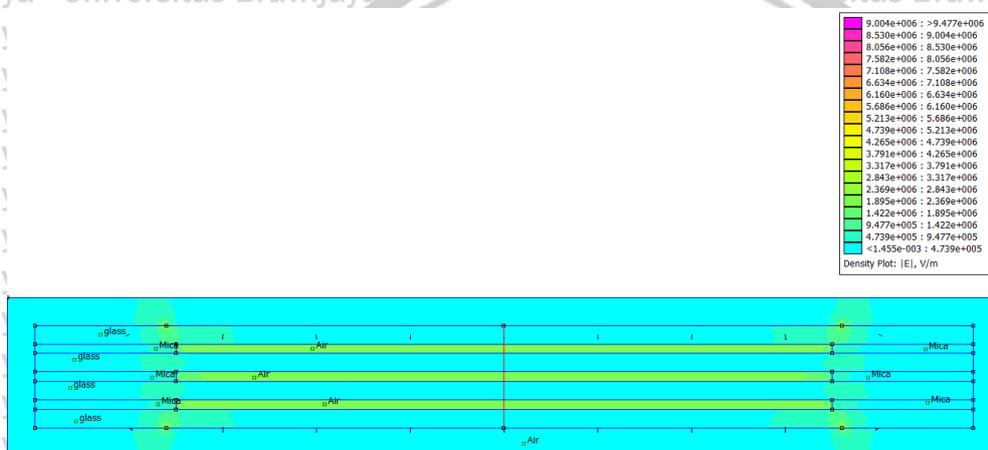


Desain FEMM dielektrik 4 keping kaca 3 sela udara





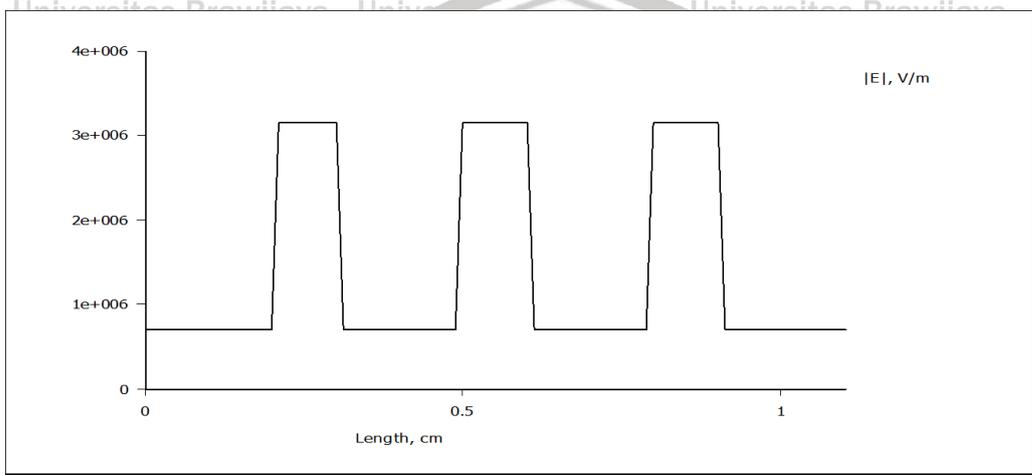
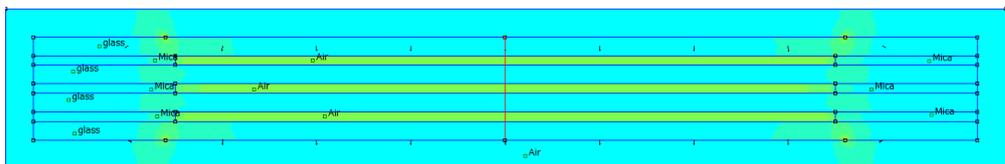
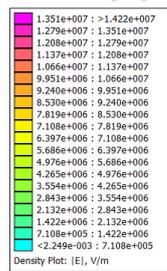
Simulasi FEMM dielektrik 3 sela tegangan 5 kV



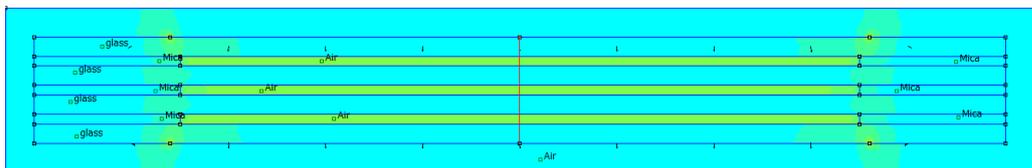
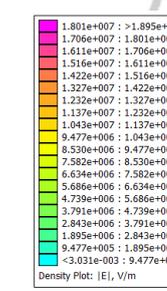
Simulasi FEMM dielektrik 3 sela tegangan 10 kV

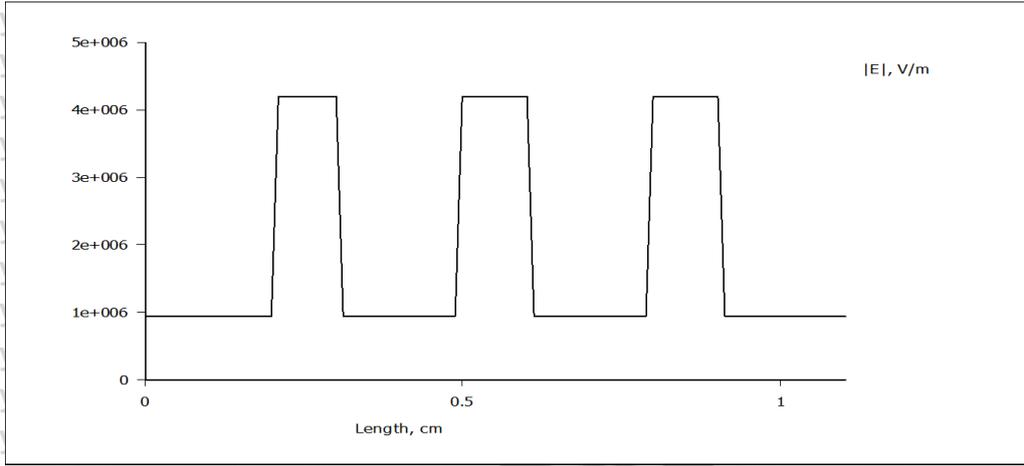


Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya

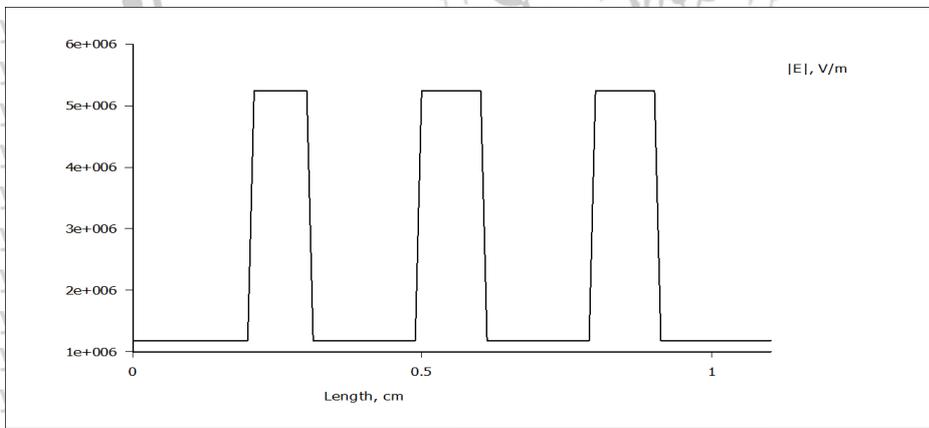
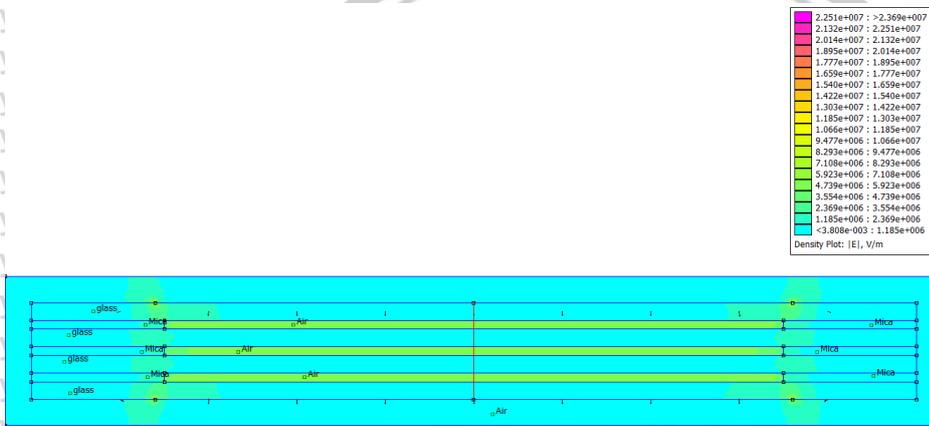


Simulasi FEMM dielektrik 3 sela tegangan 15 kV

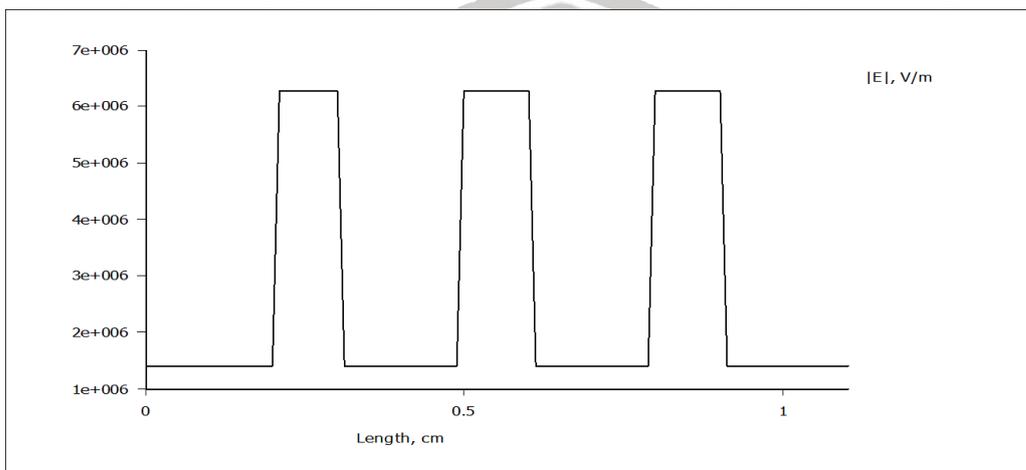
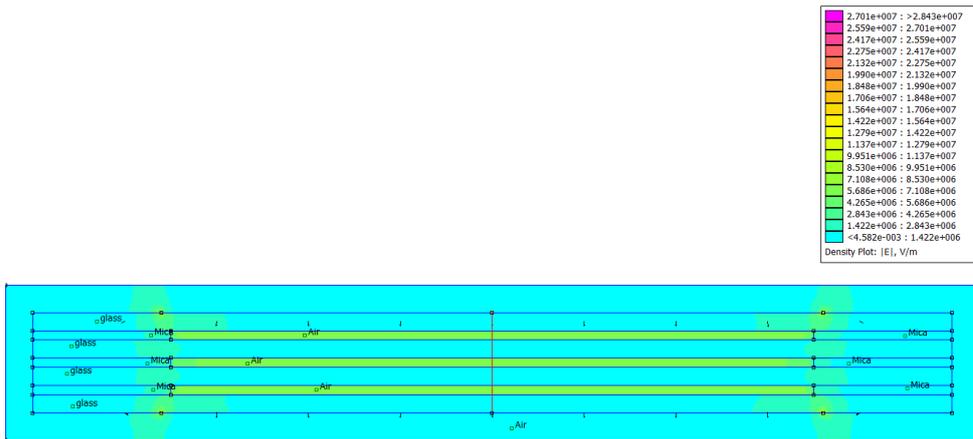




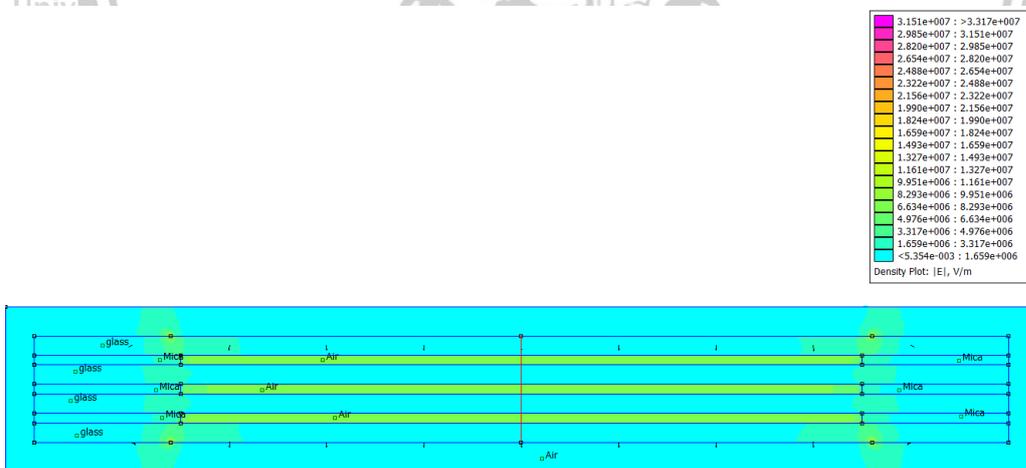
Simulasi FEMM dielektrik 3 sela tegangan 20 kV

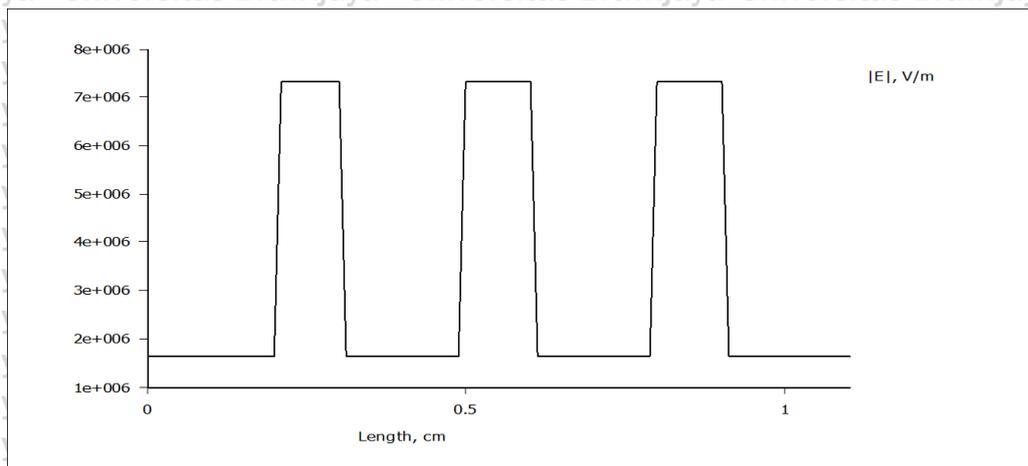


Simulasi FEMM dielektrik 3 sela tegangan 25 kV

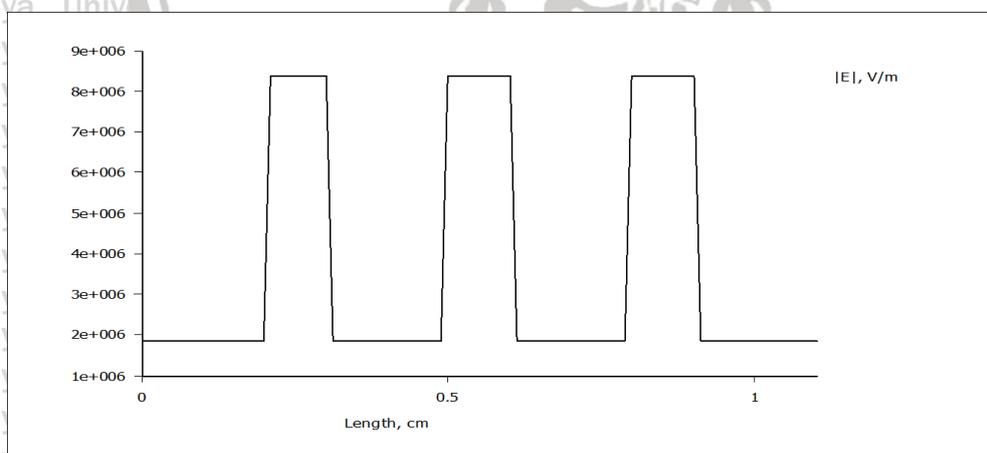
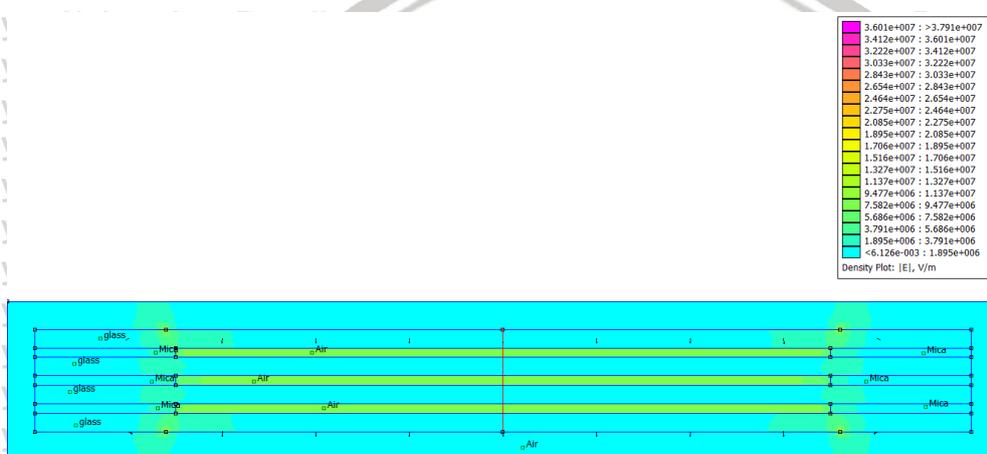


Simulasi FEMM dielektrik 3 sela tegangan 30 kV



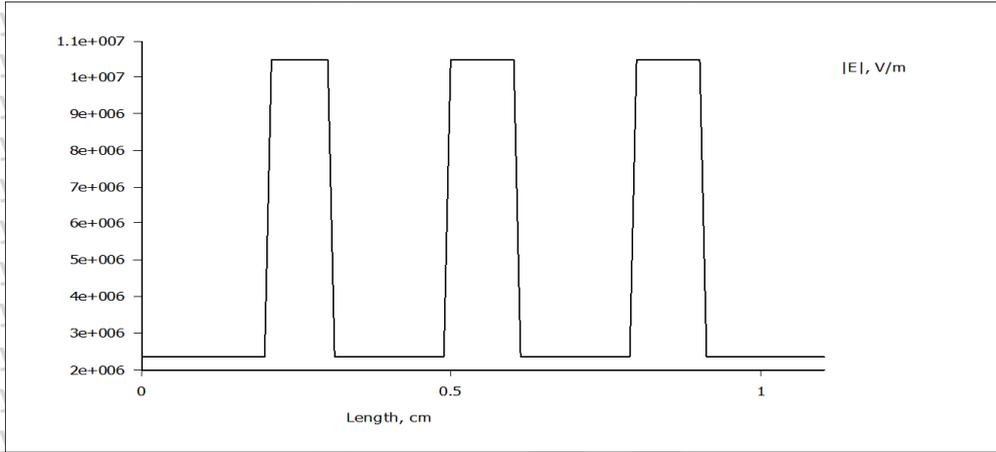


Simulasi FEMM dielektrik 3 sela tegangan 35 kV



Simulasi FEMM dielektrik 3 sela tegangan 40 kV





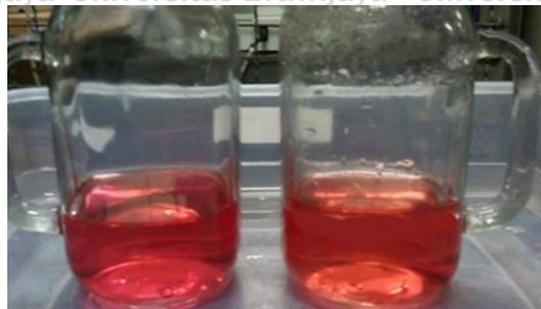
Simulasi FEMM dielektrik 3 sela tegangan 50 kV



Lampiran 5 Sampel hasil pengamatan penjernihan air warna



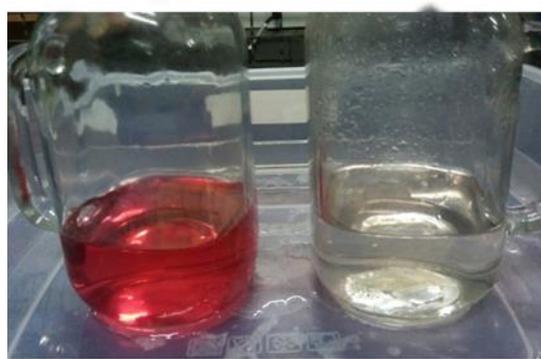
A. 3 sela 15 kV dalam 15 menit  
Tidak berubah warna



B. 2 sela 15 kV dalam 15 menit  
Warna sedikit berubah



C. 3 sela 25 kV dalam 15 menit  
Hampir jernih



D. 1 sela 10 kV dalam 10 menit  
Jernih





Halaman ini sengaja dikosongkan

