

**PENGARUH BOMBARDIR PARTIKEL BERMUATAN PADA  
PERMUKAAN PLAT MENGGUNAKAN HVDC**

**SKRIPSI**

**TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**DANDHI TRI LAKSONO**

**NIM : 135060301111039**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**MALANG**

**2018**





repository.ub.ac.id

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**PENGARUH BOMBARDIR PARTIKEL BERMUATAN PADA**  
**PERMUKAAN PLAT MENGGUNAKAN HVDC**

**SKRIPSI**

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**DANDHI TRI LAKSONO**  
**NIM. 135060301111039**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 4 Juni 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.  
NIP. 19600701 199002 1 001

Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.  
NIP. 19680122 199512 2 001

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM.  
NIP. 19730520 200801 1 013





JUDUL SKRIPSI:

PENGARUH BOMBARDIR PARTIKEL BERMUATAN PADA PERMUKAAN PLAT MENGGUNAKAN HVDC.

Nama Mahasiswa : DANDHI TRI LAKSONO  
NIM : 135060301111039  
Program Studi : TEKNIK ELEKTRO  
Konsentrasi : TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Komisi Pembimbing :

Ketua : Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.

Anggota : Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.

Tim Dosen Penguji :

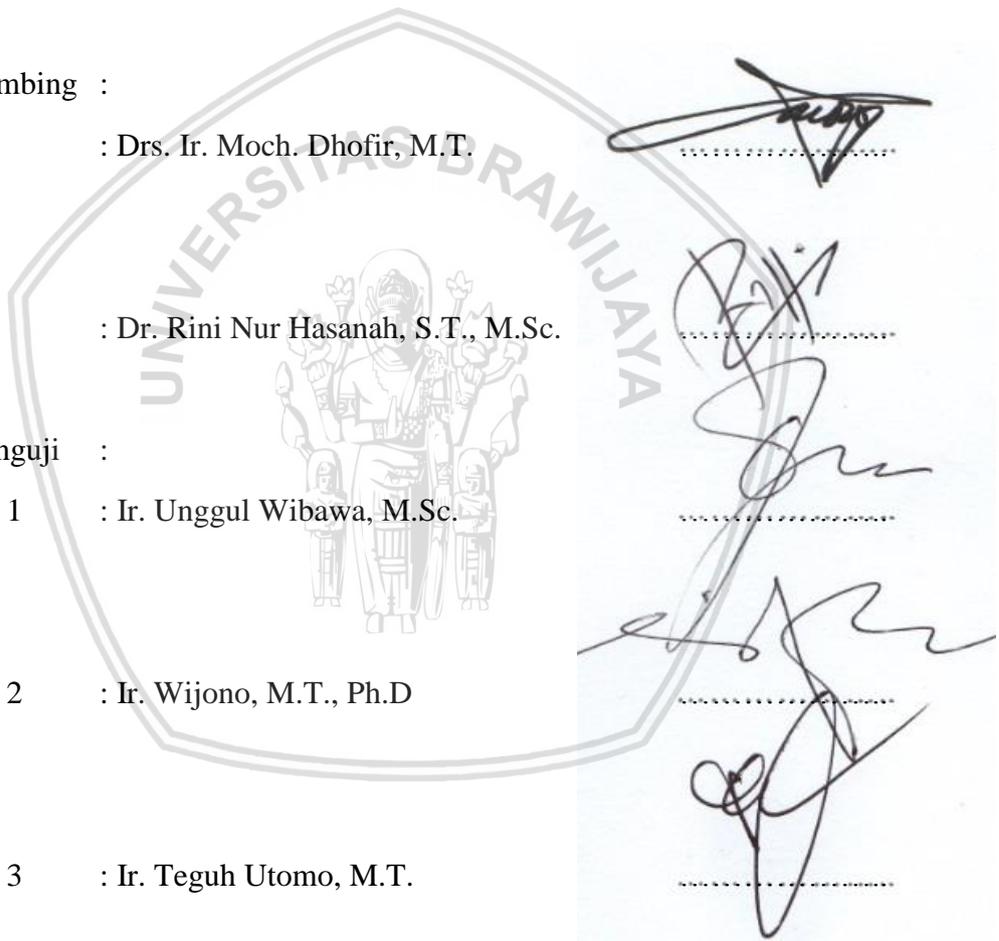
Dosen Penguji 1 : Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.

Dosen Penguji 2 : Ir. Wijono, M.T., Ph.D

Dosen Penguji 3 : Ir. Teguh Utomo, M.T.

Tanggal Ujian : 27 April 2018

SK Penguji : 873/UN10.F07/SK/2018







*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:*

*(alm) Ayahanda dan Ibunda tercinta*

*Pratikno dan Riatin*



## 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 ditulis 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.

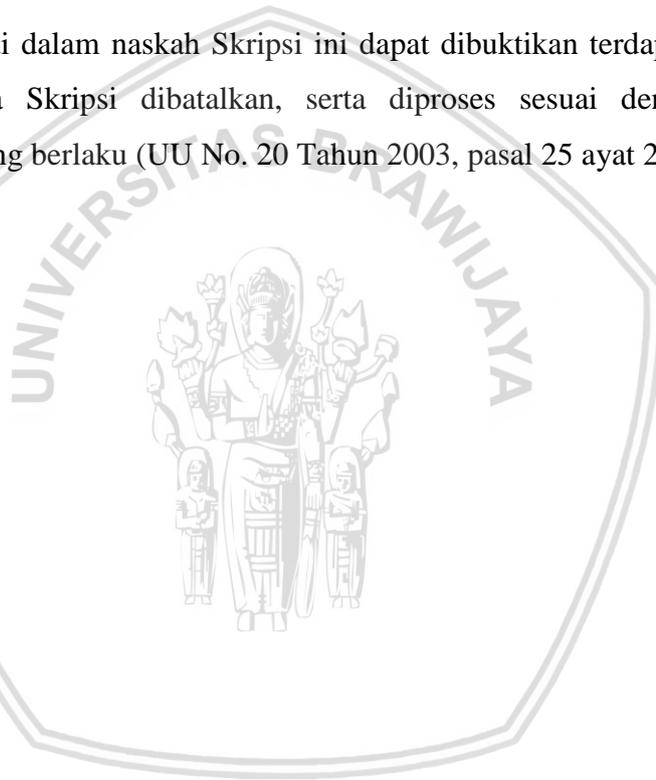
Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 4 Juni 2018

Mahasiswa,



DANDHI TRI LAKSONO  
NIM 135060301111039





## RINGKASAN

**Dandhi Tri Laksono**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, April 2018, **Pengaruh Bombardir Partikel Bermuatan pada Permukaan Plat Menggunakan HVDC**, Dosen Pembimbing: Drs., Ir., Moch Dhofir, M.T. dan Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc

Pada buku skripsi ini menguraikan hasil penelitian tentang pengaruh bombardir partikel bermuatan pada permukaan plat menggunakan HVDC. Data yang diambil dalam pengujian ini berupa, tegangan korona ( $U_c$ ) dan tegangan tembus ( $U_d$ ), serta berupa gambar plat dengan perbesaran sampai partikel dengan menggunakan alat *scanning electron microscope (SEM)*. Setiap satu kali pengukuran dilakukan pergantian elektroda plat guna untuk melihat mikrostruktur permukaan plat akibat pengaruh bombardir partikel bermuatan. Setiap hasil pengujian dilakukan analisis untuk mengetahui besar energi kinetik partikel bermuatan. Pada penelitian ini dilakukan metode pengujian meliputi pengujian pengaruh bombardir dengan polaritas positif dan jarak sela 3 cm didapatkan tegangan 25kV, 25,20kV, 25,80kV, 26,20kV, 27kV memiliki energi kinetik 0,2260eV, 0,2277eV, 0,2333eV, 0,2369eV, 0,244eV. pengujian pengaruh bombardir dengan polaritas positif dan jarak sela 5 cm didapatkan tegangan 28,54kV, 29,35kV, 30,70kV, 33,10kV, 41kV memiliki energi kinetik 0,1998eV, 0,2055eV, 0,2149eV, 0,2317eV, 0,2870eV. pengujian pengaruh bombardir dengan polaritas negatif dan jarak sela 3 cm didapatkan tegangan 22,30kV, 22,40kV, 23,20kV, 23,80kV, 25,90kV memiliki energi kinetik 0,2016eV, 0,2026eV, 0,2098eV, 0,2152eV, 0,2342V. pengujian pengaruh bombardir dengan polaritas negatif dan jarak sela 5 cm didapatkan tegangan 29,17kV, 29,75kV, 32,75kV, 33,74kV, 40kV memiliki energi kinetik 0,2042eV, 0,2083eV, 0,2293eV, 0,2362eV, 0,28eV. Hasil dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan bahwa kenaikan secara linier terjadi pada energi kinetik partikel bermuatan ( $E_k$ ) dari tegangan korona mulai muncul sampai tegangan tembus. Hal ini dikarenakan semakin besar tegangan maka kecepatan elektron semakin besar dan semakin besar pula energi kinetik partikel bermuatan. Selain itu, untuk hasil pengujian kawat pada polaritas positif hasil gambar pada mikrostruktur permukaan plat memiliki bentuk gambar banjiran muatan yang sedikit dan memiliki ukuran diameter lebih besar. pada polaritas negatif hasil gambar mikrostruktur permukaan menunjukkan banjiran muatan lebih banyak dan memiliki ukuran diameter lebih kecil.

**Kata kunci:** Energi kinetik partikel bermuatan, efek bombardir, Polaritas tegangan, *scanning electron microscope (SEM)*.



## SUMMARY

**Dandhi Tri Laksono**, Department Of Electrical Engineering, Faculty Of Engineering University Of Brawijaya, April 2018, **The Effect Of Bombardment Of Charged Particles On The Surface Of The Plate Using HVDC**, Academic Supervisor: Drs., Ir., Moch Dhofir, M.T. and Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.

*In this thesis book describes the results of research on the effect of bombardment of charged particles on plate peluakaan using HVDC. The data taken in this test are the corona ( $U_c$ ) and translucent ( $U_d$ ) stresses, as well as the plate drawing with magnification to the particles using a scanning electron microscope (SEM) device. Every single measurement is done the replacement of plate electrode in order to see plate surface microstructure due to the effect of bombarded charged particles. Each test result is analyzed to find out the magnitude of kinetic energy of charged particles. In this research, the test method includes testing the effect of bombardment with positive polarity and spacing of 3 cm obtained 25kV, 25,20kV, 25,80kV, 26,20kV, 27kV have kinetic energy 0,2260eV, 0,2277eV, 0,2333eV, 0,2369eV, 0,244eV. testing the effect of bombardment with positive polarity and spacing of 5 cm obtained voltage 28,54kV, 29,35kV, 30,70kV, 33,10kV, 41kV have kinetic energy 0,1998eV, 0,2055eV, 0,2149eV, 0,2317eV, 0, 2870eV. testing the effect of bombardment with negative polarity and spacing of 3 cm obtained voltage 22.30kV, 22,40kV, 23,20kV, 23,80kV, 25,90kV having kinetic energy 0,2016eV, 0,2026eV, 0,2098eV, 0,2152eV, 0,2342V. The test of bombarding effect with negative polarity and 5 cm spacing is obtained voltage 29,17kV, 29,75kV, 32,75kV, 33,74kV, 40kV have kinetic energy 0,2042eV 0,2083eV 0,2293eV, 0.2362eV, 0.28eV. The result of the research has been found that the linear rise occurs in the kinetic energy of charged particles ( $E_k$ ) from the corona voltage begins to appear until the voltage breaks. This is because the greater the voltage the greater the electron velocity and the greater the kinetic energy of charged particles. In addition, for the test results of the wire on the positive polarity of the image on the plate surface microstructure has the shape of the image flooded a little and has a larger diameter size. on the negative polarity of the surface microstructural image shows more flood load and has smaller diameter size.*

**Keywords:** Kinetic energy of charged particles, bombardment effects, voltage polarity, scanning electron microscope (SEM)



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji hanya bagi Allah Subhanahu Wa Taala, Rabb alam semesta. Dialah Allah, Tuhan Yang Maha Satu, Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. dialah sebaik-baik Penolong dan Sebaik-baik Pelindung. Shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad Rasulullah Shallallahu Alaihi Wa Salam, Sang pembawa kabar gembira dan sebaik baik suri tauladan bagi yang mengharap Rahmat dan Hidayah-Nya.

Sungguh hanya melalui Pertolongan dan Perlindungan Allah SWT semata sehingga dapat terselesaikan skripsi ini. Dengan seizin Allah SWT, di kesempatan yang baik ini dihaturkan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar besarnya atas bantuan sehingga terselesainya skripsi ini kepada:

1. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Ibu Nurussa'adah, Ir.,MT. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Bapak Ali Mustofa, ST.,MT. selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik elektro Universitas Brawijaya.
4. Ibu Rini Nur Hasanah, Dr., ST., Msc. selaku KKDK Teknik Energi Elektrik dan dosen pembimbing yang telah banyak memberikan pengarahan, bimbingan, nasehat, saran dan motivasinya.
5. Bapak Moch. Dhofir, Drs., Ir., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan, nasehat, saran, masukan dan motivasinya.
6. Kepala Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Teknik Elektro Universitas Brawijaya atas segala alat serta sarana dan prasarana yang dimanfaatkan dalam melakukan penelitian ini.
7. Kepala Laboratorium Central Teknik Mesin Universitas Brawijaya atas segala alat serta sarana dan prasarana yang dimanfaatkan dalam melakukan penelitian ini.
8. Keluarga tercinta, kedua orang tua (alm) Bapak Pratikno dan Ibu Riatin yang selalu memberikan dukungan dan doa tak henti-hentinya
9. Teman-teman Grup "Silaturahmi" terima kasih atas canda tawa, semangat dan kebersamaan selama ini
10. Rekan-rekan asisten Tegangan Tinggi Teknik Elektro Universitas Brawijaya angkatan 2013, 2014 atas waktu yang diberikan selama pengujian dilakukan.
11. Keluarga besar angkatan 2013 "SPECTRUM" atas do'a, semangat, serta dukungan yang diberikan dalam penelitian ini. serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-satu



yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Sekiranya Allah SWT mencatat amal baik kepada semua pihak yang turut membantu menyelesaikan skripsi ini. Akhirnya, dapat di sadari bersama bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna namun semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. Allahumma Amin.

Malang, 4 Juni 2018



Penulis

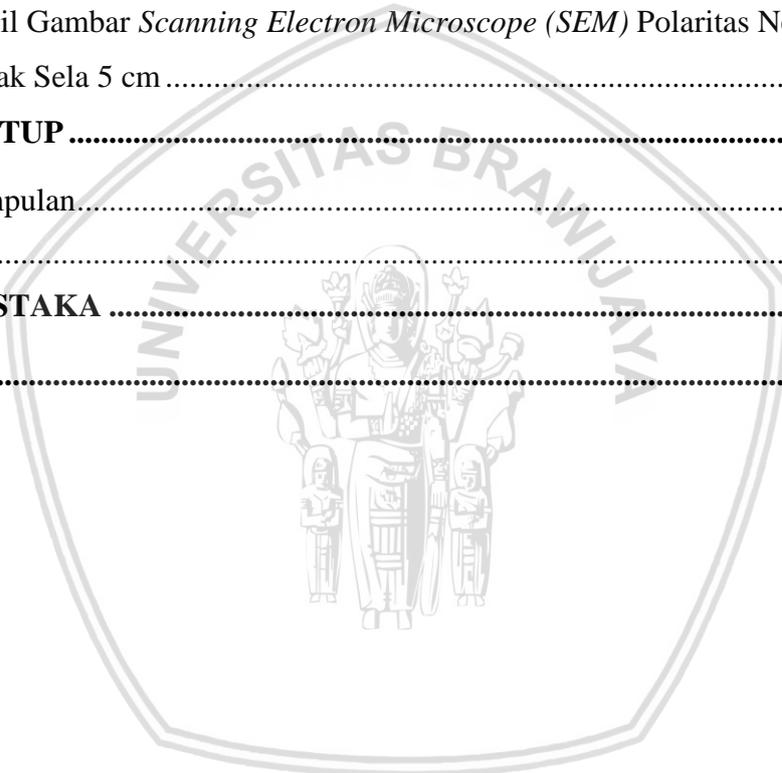
## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan .....	2
1.5 Manfaat .....	2
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Dasar Teori .....	5
2.2 Hukum Eksperimental Coulomb .....	5
2.3 Medan Listrik .....	6
2.4 Jarak Bebas Molekul dan Elektron ( $\lambda$ ) .....	6
2.5 Kekuatan Dielektrik Udara atau Gas .....	9
2.6 Kegagalan Lisrik dalam Gas .....	9
2.6.1 Proses Dasar Ionisasi .....	10
2.6.2 Ionisasi dalam Udara atau Gas .....	10
2.6.3 Energi Ionisasi .....	11
2.6.4 Ionisasi Karena Tumbukan .....	12
2.6.5 Proses Ionisasi Sekunder .....	14
2.7 Mekanisme Kegagalan dalam Gas .....	15
2.7.1 Mekanisme Townsend .....	15
2.7.2 Mekanisme Streamer .....	18
2.8 Proses Terjadinya Korona .....	20
2.9 Efek Polaritas .....	22
2.9.1 Korona Positif .....	22



2.9.2	Korona Negatif.....	22
2.10	<i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> .....	23
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>		<b>27</b>
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	27
3.2	Studi Literatur.....	28
3.3	Variabel Penelitian.....	28
3.4	Perencanaan Pengujian .....	28
3.5	Penyediaan Alat Pengujian .....	29
3.6	Rangkaian Pengujian .....	30
3.6.1	Pembangkitan Tegangan Tinggi DC.....	30
3.6.	Pengujian <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> .....	31
3.7.	Objek Uji .....	32
3.8.	Pengambilan Data.....	33
3.9.	Analisis Hasil Pengujian.....	33
3.10.	Kesimpulan dan Saran.....	34
<b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>35</b>
4.1	Tinjauan Umum.....	35
4.2	Perhitungan Jarak Bebas Elektron.....	35
4.3	Pengujian Pengaruh Bombardir dengan Polaritas Positif dan Jarak Sela 3 cm.....	36
4.3.1	Data Hasil Pengujian Polaritas Positif dan Jarak Sela 3 cm .....	36
4.3.2	Perhitungan Efisiensi Polaritas Positif dan Jarak Sela 3 cm.....	37
4.3.3	Analisis Perhitungan Energi Kinetik Partikel Bermuatan Polaritas Positif dan Jarak Sela 3 cm .....	38
4.3.4	Hasil Gambar <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> Polaritas Positif dan Jarak Sela 3 cm .....	40
4.4	Pengujian Pengaruh Bombardir dengan Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm.....	42
4.4.1	Data Hasil Pengujian Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm .....	42
4.4.2	Perhitungan Efisiensi Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm.....	43
4.4.3	Analisis Perhitungan Energi Kinetik Partikel Bermuatan Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm .....	44
4.4.4	Hasil Gambar <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm .....	46
4.5	Pengujian Pengaruh Bombardir dengan Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm ...	48
4.5.1	Data Hasil Pengujian Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm.....	48

4.5.2	Perhitungan Efisiensi Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm .....	49
4.5.3	Analisis Perhitungan Energi Kinetik Partikel Bermuatan Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm .....	50
4.5.4	Hasil Gambar <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm .....	52
4.6	Pengujian Pengaruh Bombardir dengan Polaritas Negatif dan Jarak Sela 5 cm ...	54
4.6.1	Data Hasil Pengujian Polaritas Negatif dan Jarak Sela 5 cm .....	54
4.6.2	Perhitungan Efisiensi Polaritas Negatif dan Jarak Sela 5 cm .....	55
4.6.3	Analisis Perhitungan Energi Kinetik Partikel Bermuatan Polaritas Negatif dan Jarak Sela 5 cm .....	56
4.6.4	Hasil Gambar <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> Polaritas Negatif dan Jarak Sela 5 cm .....	58
<b>BAB V PENUTUP .....</b>		<b>61</b>
5.1	Kesimpulan.....	61
5.2	Saran.....	62
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>63</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>65</b>





*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2. 1	Pergerakan Partikel.....	7
Gambar 2. 2	Model dalam Menentukan jalur bebas.....	7
Gambar 2. 3	Grafik Probabilitas Ionisasi untuk Udara .....	12
Gambar 2. 4	Rangkaian Uji Ionisasi.....	13
Gambar 2. 5	Pelipatgandaan Elektron .....	13
Gambar 2. 6	Grafik U dan I Berdasarkan Kriteria Townsend.....	17
Gambar 2. 7	Efek Polaritas pada Susunan Elektroda Kawat-Plat .....	22
Gambar 2. 8	mekanisme kerja SEM .....	25
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian.....	27
Gambar 3. 2	Rangkaian Pengujian Efek Polaritas Positif .....	30
Gambar 3. 3	Rangkaian Pengujian Efek Polaritas Negatif.....	31
Gambar 3. 4	<i>Scanning Electron Microscope</i> .....	32
Gambar 3. 5	Sketsa Bentuk Elektroda.....	33
Gambar 4. 1	Grafik energi kinetik partikel bermuatan pada setiap tegangan pada polaritas positif dan jarak sela 3 cm.....	39
Gambar 4. 2	Hasil SEM dengan polaritas positif dan jarak 3 cm .....	40
Gambar 4. 3	Grafik energi kinetik partikel bermuatan pada setiap tegangan pada polaritas positif dan jarak sela 5 cm.....	45
Gambar 4. 4	Hasil SEM dengan polaritas positif dan jarak 5 cm .....	46
Gambar 4. 5	Grafik energi kinetik partikel bermuatan pada setiap tegangan pada polaritas negatif dan jarak sela 3 cm.....	51
Gambar 4. 6	Hasil SEM dengan polaritas negatif dan jarak 3 cm.....	52
Gambar 4. 7	Grafik energi kinetik partikel bermuatan pada setiap tegangan pada polaritas negatif dan jarak sela 5 cm.....	57
Gambar 4. 8	Hasil SEM dengan polaritas negatif dan jarak 5 cm.....	58



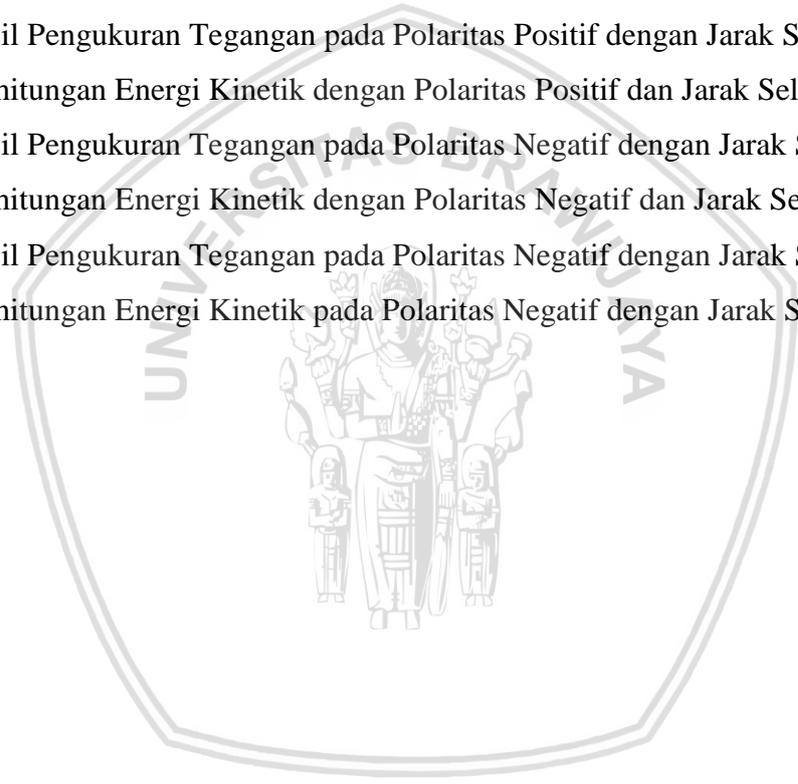


*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**DAFTAR TABEL**

No	Judul	Halaman
Tabel 2. 1	<i>Mean free path measured at 15° and 760 Torr</i> .....	9
Tabel 2. 2	Kekuatan dielektrik gas .....	9
Tabel 2. 3	Energi Pembebasan Elektron Beberapa Jenis Logam. ....	12
Tabel 3. 1	peralatan pengujian.....	29
Tabel 4. 1	Hasil Pengukuran Tegangan pada Polaritas Positif dengan Jarak Sela 3 cm..	36
Tabel 4. 2	Perhitungan Energi Kinetik dengan Polaritas Positif dan Jarak Sela 3cm .....	38
Tabel 4. 3	Hasil Pengukuran Tegangan pada Polaritas Positif dengan Jarak Sela 5 cm...	42
Tabel 4. 4	Perhitungan Energi Kinetik dengan Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm .....	44
Tabel 4. 5	Hasil Pengukuran Tegangan pada Polaritas Negatif dengan Jarak Sela 3 cm .	48
Tabel 4. 6	Perhitungan Energi Kinetik dengan Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm.....	50
Tabel 4. 7	Hasil Pengukuran Tegangan pada Polaritas Negatif dengan Jarak Sela 5 cm .	54
Tabel 4. 8	Perhitungan Energi Kinetik pada Polaritas Negatif dengan Jarak Sela 5 cm...	56





*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
	Lampiran 1 Perhitungan Efisiensi .....	66
	Lampiran 2 Dokumentasi alat.....	86
	Lampiran 3 Data Sheet <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> .....	88





## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada pengujian peralatan tegangan tinggi, medan tinggi pasti terjadi pada setiap alat uji saat tegangan mulai muncul. Dengan adanya medan tinggi, banyak molekul-molekul berkumpul disekitar katoda. Dengan semakin banyaknya Molekul-molekul di katoda maka katoda tidak bisa lagi membendung dan akan menyebabkan molekul lepas di udara. Molekul tersebut akan bergerak maka terjadilah ionisasi. Didalam proses iosnisasi timbul pemisahan elektron dan muatan positif. jika didalam medan listrik maka keduanya akan bergerak dengan hukum coulomb. Hukum coulomb menjelaskan bahwa muatan negarif akan bergerak berlawanan arah medan dan muatan positif akan bergerak searah dengan arah medan(Hayt.William 2006). Ketika didalam medan maka elektron akan bergerak dipercepat sesuai jarak antara dua tubrukan dengan molekul lain. Semakin jauh jarak antara dua tubrukan dari anoda menuju katoda kecepatannya akan semakin tinggi, maka energi kinetik dari muatan semakin tinggi, ketika muatan sampai menuju katoda maka muatan akan menumbuk semakin dalam.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka dalam skripsi ini dilakukan pengamatan dan pembuktian yang berkenaan dengan energi kinetik partikel bermuatan dan kondisi struktur permukaan elektroda untuk melihat efek bombardir partikel bermuatan yang muncul dengan ketahanan dielektrik berupa udara dilihat dari waktu terjadinya sampai polaritas tegangannya. Dengan penelitian ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan tentang bagaimana proses ionisasi terhadap elektroda plat.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dalam skripsi ini, terdapat beberapa rumusan masalah, yaitu :

1. Berapa rata-rata energi kinetik partikel bermuatan dalam perjalanan menuju katoda terhadap variasi tegangan
2. Bagaimana pengaruh jarak sela terhadap energi kinetik bombardir partikel bermuatan pada elektroda plat
3. Bagaimana hasil gambar mikrostruktur permukaan elektroda dalam bombardir partikel bermuatan dengan pemberian variasi tegangan, polaritas dan jarak sela

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk menghindari pembahasan yang meluas maka penulis akan membatasi pembahasan tugas akhir ini dengan hal-hal berikut:

1. Tegangan untuk pengujian menggunakan tegangan tinggi kurang dari 50 kV
2. Media isolasi dielektrik yang digunakan adalah udara.
3. Material elektroda dari bahan aluminium
4. Bentuk susunan elektroda adalah kawat – plat
5. pengujian menggunakan polaritas positif dan negatif
6. Suhu dikondisikan dalam keadaan suhu ruangan 15° C

## 1.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh tingkat tegangan, polaritas, durasi waktu dan jarak sela elektroda terhadap bombardir partikel bermuatan pada permukaan elektroda plat.

## 1.5 Manfaat

Adapun manfaat dalam penelitian skripsi ini sebagai berikut:

1. Untuk kepentingan ilmiah, skripsi ini diharapkan dapat menjadi pengetahuan tentang proses pengisian partikel bermuatan dan energi kinetik partikel bermuatan.
2. Untuk kepentingan akademik, skripsi ini dapat berguna sebagai aplikasi pemahaman ilmu yang didapat penulis selama menempuh kuliah di Teknik Elektro Universitas Brawijaya.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian ini meliputi :

### **BAB I : PENDAHULUAN**

Pada bab ini dibahas tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penulisan, manfaat dan sistematika penulisan.

### **BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**

Berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan untuk mendukung permasalahan yang diselesaikan.

### **BAB III : METODE PENELITIAN**

Berisi penjelasan tentang metode pengujian dan pengambilan data yang diperlukan dalam penyusunan penelitian ini.

### **BAB IV : PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA**

Berisi pembahasan mengenai analisis bombardir partikel bermuatan pada permukaan plat menggunakan HVDC dan pengaruhnya ketika diberikan variasi polaritas dan jarak sela guna untuk melihat perbedaan energi kinetik partikel bermuatan dan struktur permukaan plat

### **BAB V : PENUTUP**

Memuat kesimpulan yang diperoleh dari analisis hasil penelitian dalam tugas akhir ini serta saran-saran untuk pengembangan lebih lanjut.

### **DAFTAR PUSTAKA**

Memaparkan tentang sumber-sumber literatur yang digunakan dalam penelitian



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Dasar Teori

Ion merupakan atom atau gabungan atom yang memiliki muatan listrik, ion terbentuk apabila pada peristiwa kimia suatu atom unsur menangkap atau melepaskan elektron. Proses terbentuknya ion dinamai dengan ionisasi. Jika diantara dua elektroda yang dimasukkan dalam media gas diterapkan tegangan  $V$  maka akan timbul suatu medan listrik  $E$  yang mempunyai besar dan arah tertentu yang akan mengakibatkan elektron bebas mendapatkan energi yang cukup kuat menuju kearah anoda sehingga dapat merangsang timbulnya proses ionisasi. Dalam perjalanan menuju anoda terjadi tumbukan antara ion dan ion lain. Benturan ion positif pada permukaan katoda dapat membebaskan elektron. Agar elektron dapat di emisikan, dua buah elektron harus dibebaskan melawan fungsi kerja ikatan metal. Energi ionisasi dan energi kinetik ion untuk membebaskan elektron kedua dari katoda harus lebih besar atau sama dengan energi fungsi kerja material. Dengan lebihnya elektron bebas maka akan ditransformasikan menjadi energi kinetik elektron.

Menurut jurnal IEEE penelitian Zhang Xu, Xingming bian dan Xiang cui. (2016). Yang berjudul *Effect of positive DC corona discharge intensity on the variation of conductor surface conditions under contaminated environment* bahwa dengan memberikan tegangan yang besar maka energi ionisasinya juga semakin besar. dengan besarnya energi ionisasi maka terjadi perubahan terhadap sruktur permukaan konduktor akibat pelepasan elektron maupun ion positif. Proses ini dapat dibuktikan dengan melihat sruktur permukaan konduktor dengan *Scanning Electron Microscope*.

### 2.2 Hukum Eksperimental Coulomb

Coulomb menyatakan bahwa gaya yang terdapat diantara dua objek yang sangat kecil, berada di dalam ruang hampa dan saling dipisahkan oleh jarak relatif besar dibandingkan ukurannya sebanding dengan muatan pada masing-masing objek dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya. Dapat ditulis dalam bentuk persamaan (Hayt.William, 2006,p.11)

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{R^2} \quad (2.1)$$

Di mana  $Q_1$  dan  $Q_2$  adalah nilai-nilai positif atau negatif muatan listrik pada kedua objek, dan  $k$  adalah sebuah konstanta kesebandingan. Apabila kita menggunakan sistem satuan internasional SI, maka  $Q$  dinyatakan dalam coulomb (C),  $R$  dalam meter (m) dan gaya diukur dalam newton (N). Konsistensi satuan ini dapat dicapai jika konstanta kesebandingan  $k$  adalah

$$F \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (2.2)$$

### 2.3 Medan Listrik

Sebuah muatan  $Q_1$  yang diam di suatu titik akan mempengaruhi muatan lain (misal  $Q_t$ ) yang bergerak mengelilinginya. Adanya pengaruh terhadap muatan lain tersebut menandakan adanya medan gaya di ruang sekitar muatan  $Q_1$ , sehingga muatan  $Q_t$  akan mengalami gaya sesuai dengan hukum Coulomb (Hayt, William, 2006, p.12) yaitu,

$$F_t = \frac{Q_1 Q_t}{4\pi\epsilon_0 R_t^2} \quad (2.3)$$

Jika gaya di atas dituliskan sebagai gaya yang dikerahkan pada setiap muatan listrik sebesar satu satuan, akan didapatkan ,

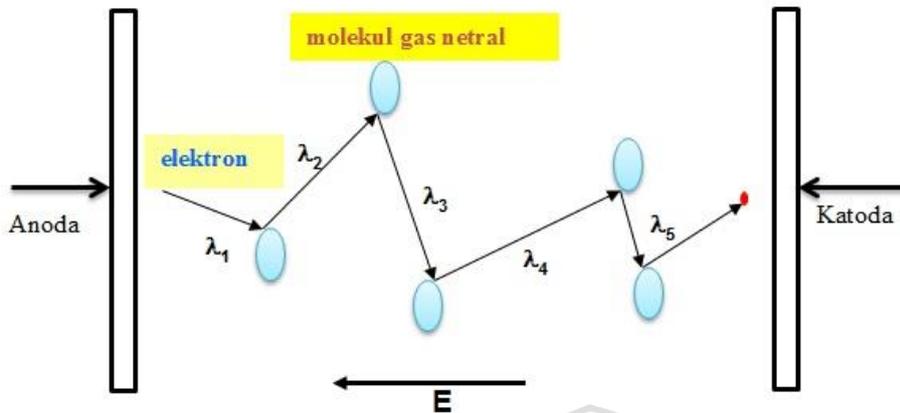
$$E = \frac{F_t}{Q_t} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_t^2} a_t \quad (2.4)$$

Kuantitas di ruas kanan pada persamaan di atas merupakan fungsi yang besar dan arahnya dientukan oleh  $Q_1$  dan vektor yang mempresentasikan jarak dari  $Q_1$  ke posisi muatan  $Q_t$ . Fungsi persamaan di atas disebut sebagai idenitas medan listrik. Dengan kata lain intensitas medan listrik adalah gaya yang dialami oleh sebuah muatan yang dipengaruhi oleh muatan lain yang memiliki potensial lebih besar.

### 2.4 Jarak Bebas Molekul dan Elektron ( $\lambda$ )

Pergerakan partikel adalah gerakan terus menerus dari suatu partikel zat cair atau gas, contoh partikel-partikel tidak pernah dalam keadaan stasioner atau sepenuhnya diam. Jika kita mengamati partikel dibawah mikroskop ultra, maka kita akan melihat partikel-partikel tersebut akan bergerak membentuk zigzag atau gerakan tidak beraturan. Di dalam jarak antara anoda dan katoda terdapat molekul-molekul netral dan elektron yang dionisasikan. Pergerakan elektron dalam suatu gas dalam menuju katoda tidaklah mulus,

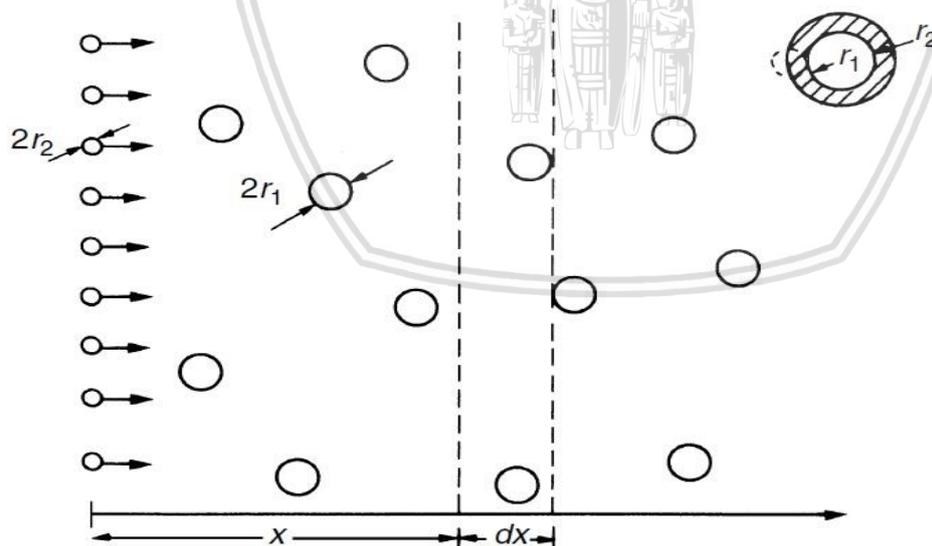
tetapi mengalami tumbukan dengan molekul lain dan pergerakannya tidak beraturan. Jarak antara dua tumbukan disebut jarak bebas elektron ( $\lambda$ ).



Gambar 2. 1 Pergerakan Partikel

Sumber: Kuffel (2000,p.287)

Untuk mendapatkan jalur bebas rata-rata, asumsikan molekul dalam keadaan stasioner jari-jari  $r_1$  dan  $r_2$  adalah partikel yang bergerak dengan ukuran yang lebih kecil. Kepadatannya akan menurun atau berkurang karena hamburan yang disebabkan oleh tabrakan dengan molekul-gas. Jika kita berasumsi bahwa partikel dan molekul bergerak berperilaku sebagai bola padat, maka tabrakan akan terjadi setiap dua unsur dalam jarak  $r_1$  dan  $r_2$ . Proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Model dalam Menentukan Jalur Bebas

Sumber: Kuffel (2000,p.287)

Gabungan molekul tersebut menjadi  $\pi(r_1 + r_2)^2$  dan dalam satuan volume menjadi  $N\pi(r_1 + r_2)^2$  ini sering disebut daerah efektif untuk intersepsi dimana  $N$  adalah jumlah partikel per-satuan volum gas.

Jika kita mempertimbangkan lapisan  $dx$  jauh dari asal  $x$  dan  $n(x)$  jumlah partikel yang bertahan dari jarak  $x$ , kemudian menurun dalam partikel yang bergerak karena hamburan pada lapisan  $dx$ . (Kuffel, 2000,p.288)

$$dn = -n(x)N\pi(r_1 + r_2)^2 dx \quad (2.5)$$

dengan asumsi jumlah partikel yang masuk ( $x=0$ ) adalah  $n_0$ , integrasinya

$$n(x) = N_0 e^{-N\pi(r_1+r_2)^2 x} \quad (2.6)$$

Probabilitas jalur bebas dari panjang  $x$  sama dengan probabilitas tabrakan antara  $x$  dan  $x+dx$ . Jalur bebas rata-rata yang diperoleh adalah  $\lambda = x$ . Untuk menjabarkan dan membedakan Persamaan 2.6 kita dapatkan.

$$f(x) = \frac{dn}{n_0} = N\pi(r_1 + r_2)^2 e^{-N\pi(r_1+r_2)^2 x} dx \quad (2.7)$$

Untuk jalur bebas rata-rata

$$x = \lambda = \int_{x=0}^{\infty} x f(x) dx \quad (2.8)$$

menjadi

$$\lambda = N\pi(r_1 + r_2)^2 \int_{x=0}^{\infty} x e^{-N\pi(r_1+r_2)^2 x} dx \quad (2.9)$$

menjadi

$$\lambda = \frac{1}{N\pi(r_1+r_2)^2} \quad (2.10)$$

Di dalam udara terdapat beberapa macam gas antara lain nitrogen  $N_2$  dan oksigen  $O_2$  dan gas lain. Dalam keadaan normal jarak bebas elektron gas nitrogen  $N_2$  dan oksigen  $O_2$  dapat dilihat dalam tabel dibawah

Tabel 2. 1 *Mean Free Path Measured at 15° and 760 Torr*

Type of gas	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Dimensions
$\lambda$	11.77	6.79	6.28	4.19	4.18	10 <sup>-8</sup> m
Molecular weight	2.016	32.00	28.020	44.00	18.00	

Sumber: Kuffel (2000,p.290).

## 2.5 Kekuatan Dielektrik Udara atau Gas

Apabila suatu bahan isolasi diberi tegangan ac, maka pada bahan isolasi tersebut akan timbul rugi-rugi dielektrik. Rugi-rugi ini berubah menjadi panas yang menyebabkan temperatur bahan isolasi naik. Rugi-rugi ini berasal dari rugi-rugi pada resistansi bahan isolasi ( $i^2r$ ) atau rugi-rugi konduktif. Sumber kedua ialah rugi-rugi pada resistansi kontak antara dua bahan isolasi berdampingan. Sumber ketiga ialah terjadinya peluahan pada rongga udara yang mungkin ada didalam bahan isolasi. Sumber keempat ialah rugi-rugi dipol, yaitu panas karena adanya gesekan antar molekul dipol bahan isolasi ketika molekul dipol mengikuti arah medan elektrik yang terjadi pada bahan isolasi tersebut (Bonggas,2012,p114).

Tabel 2. 2 Kekuatan Dielektrik Gas

Gas	Massa jenis kg/m <sup>3</sup>	konduktivitas panas W/°C.m	Tegangan tembus kV/cm
Udara	1,228	5.10 <sup>-6</sup>	30
SF <sub>6</sub>	6,139	1,9 . 10 <sup>-5</sup>	75
N <sub>2</sub>	1,191	5,4 . 10 <sup>-6</sup>	30
CO <sub>2</sub>	1,867	3,2 . 10 <sup>-6</sup>	27
H <sub>2</sub>	0,086	3,3 . 10 <sup>-5</sup>	18

Sumber: Bonggas (2012,p114)

## 2.6 Kegagalan Lisrik dalam Gas

Bahan isolasi berfungsi untuk memisahkan dua penghantar lisrik atau lebih yang bertegangan sehingga dapat mencegah erjadinya lompaan listrik *flashover* dan percikan lisrik *sparkover*. Salah satu bahan yang sering digunakan sebagai bahan isolasi peralatan ketenagalistrikan adalah gas atau udara karena pada kondisi normal udara hanya terdiri dari molekul-molekul netral.

Akan tetapi, dapat terjadi kegagalan pada isolasi gas atau udara yang berupa pelepasan muatan. Pelepasan muatan itu terjadi karena tegangan yang digunakan sangat tinggi dan sudah melebihi kemampuan bahan isolasi. Proses pelepasan muatan tersebut dapat terjadi karena proses ionisasi yang bisa disebabkan beberapa faktor seperti karena tabrakan antara ion-ion dan elektron-elektron, cahaya, emisi elektron (Bosco, 2008,p.5) .

### 2.6.1 Proses Dasar Ionisasi

Ion merupakan atom atau gabungan atom yang memiliki muatan listrik, ion terbentuk apabila pada peristiwa kimia suatu atom unsur menangkap atau melepaskan elektron. Proses terbentuknya ion dinamai dengan ionisasi Jika diantara dua elektroda yang dimasukkan dalam media gas diterapkan tegangan  $V$  maka akan timbul suatu medan listrik  $E$  yang mempunyai besar dan arah tertentu yang akan mengakibatkan elektron bebas mendapatkan energi yang cukup kuat menuju kearah anoda sehingga dapat merangsang timbulnya proses ionisasi

### 2.6.2 Ionisasi dalam Udara atau Gas

Pada kondisi normal, gas atau udara terdiri dari molekul-molekul netral. Akan tetapi, pada kenyataannya pada udara terdapat ion-ion dan elektron-elektron bebas. Ion dan elektron bebas itu dapat menyebabkan udara mengalirkan arus listrik walaupun dengan jumlah terbatas. Banyaknya elektron dan ion bebas di udara mempengaruhi terjadinya kegagalan listrik.

Apabila di antara dua elektroda yang terpisah oleh udara diterapkan tegangan tinggi, maka akan timbul medan listrik ( $E$ ). Dalam medan listrik tersebut, elektron dan ion-ion bebas di udara akan mendapat energi yang cukup kuat, sehingga dapat memicu terjadinya proses ionisasi. Besar energi ( $U$ ) yang diperoleh elektron yaitu sebesar : (Bosco, 2008,p.5)

$$U=eV=\frac{1}{2}m_e v_e^2 \quad (2.11)$$

$E_k/eV$  = energi kinetik partikel bermuatan (joule) atau  $\frac{1}{1,602} \times 10^{19}(eV)$

$e$  = muatan elektron =  $\pm 1,6 \cdot 10^{-19}C$

$V$  = beda potensial antara dua elektroda (volt)

$m_e$  = massa elektron =  $9,11 \cdot 10^{-31}kg$

$m_p$  = massa proton =  $1,67 \cdot 10^{-27} kg$

$v_e$  = kecepatan elektron (m/det)

Jika gradien tegangan yang ada cukup tinggi maka jumlah elektron yang

diionisasikan akan lebih banyak dibandingkan jumlah ion yang ditangkap menjadi molekul oksigen. Elektron ini kemudian akan berjalan menuju anoda secara kontinyu, sambil membuat benturan- benturan yang kemudian akan membebaskan lebih banyak elektron. Ionisasi karena benturan ini mungkin merupakan proses yang paling penting dalam kegagalan udara atau gas.

### 2.6.3 Energi Ionisasi

Sebuah elektron tunggal yang dibebaskan karena pengaruh luar akan menimbulkan banjir elektron (*avalanche*) yaitu kelompok elektron yang bertambah secara cepat dan bergerak maju meninggalkan ion positif pada lintasannya. Efektivitas ionisasi karena tumbukan elektron ditentukan oleh energi atau kecepatan elektron pembentur yaitu: (Bosco, 2008, p.5)

$$W = \frac{1}{2} m_e v_e^2 \quad (2.12)$$

Dimana  $W$  adalah usaha atau energi (Nm atau joule), dan energi kinetik (joule)

$$F \cdot s = \frac{1}{2} m_e v_e^2 \quad (2.13)$$

Dimana  $F$  adalah gaya (N) dan  $s$  adalah jarak (m)

$$e \cdot E \cdot \lambda = \frac{1}{2} m_e v_e^2 \quad (2.14)$$

dimana  $e$  adalah muatan elektron (C),  $E$  adalah intensitas medan listrik (V/m) dan  $\lambda$  adalah jarak bebas elektron (m)

$$e \cdot \frac{V}{d\eta} \cdot \lambda = \frac{1}{2} m_e v_e^2 \quad (2.15)$$

dimana  $V$  adalah tegangan (volt),  $d$  adalah jarak (m), dan  $\eta$  adalah efisiensi

$$\frac{2 \cdot e \cdot V \cdot \lambda}{d \cdot \eta \cdot m_e} = v_e^2 \quad (2.16)$$

Dimana  $m_e$  adalah massa elektron (kg),

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot V \cdot \lambda}{d \cdot \eta \cdot m_e}} \quad (2.17)$$

Dimana  $v_e$  adalah kecepatan elektron (m/s)

Jika kecepatan elektron  $v_e$  sangat lambat, misalnya oleh sebab tegangan yang diberikan rendah maka tidak akan terjadi proses ionisasi karena energi yang dihasilkan tidak cukup kuat untuk membebaskan elektron berikutnya. Jika kecepatan elektron  $v_e$  terlalu tinggi, maka ionisasi juga sulit terjadi. Dalam keadaan seperti ini ada kemungkinan elektron bebas tersebut dalam pergerakannya akan mendekati sesuatu atom, tanpa mengeluarkan elektron

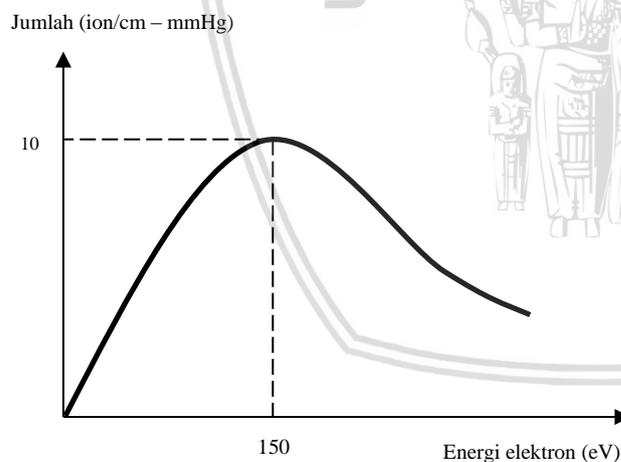
dari ikatannya. Energi pembebasan elektron beberapa logam diberikan pada Tabel 2.3

Tabel 2. 3 Energi Pembebasan Elektron pada Beberapa Jenis Logam.

Logam	Energi Pembebasan Elektron (eV)
Alumunium	1.8
Tembaga	3.9
Tembaga Oksida	5.34
Besi	3.9
Perak	3.1
Platina	3.6
Barium Oksida	1.0

Sumber: Arismunandar(1984,p.29).

Di dalam proses ionisasi dikenal sebuah satuan ionisasi atau probabilitas ionisasi yang didefinisikan sebagai jumlah pasangan ion yang dapat dibebaskan oleh sebuah elektron yang bergerak sepanjang litan 1 cm dalam gas pada tekanan 1 mm Hg. Gambar 2.2 memperlihatkan grafik kemungkinan terjadinya ionisasi untuk udara. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa untuk energi sebesar 150 eV akan dibebaskan 10 pasang ion yang terjadi jika elektronnya bergerak sepanjang 1 cm pada tekanan 1 mm Hg



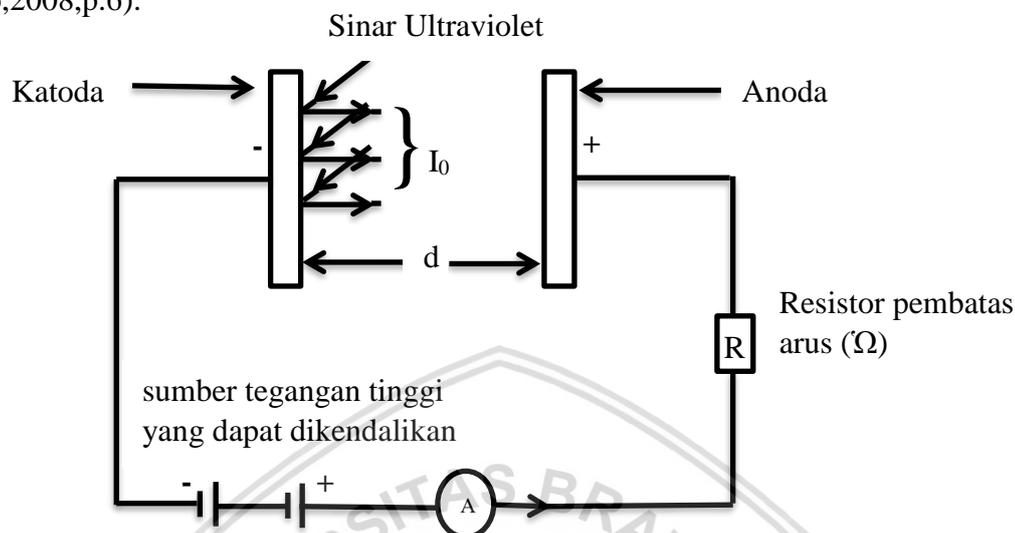
Gambar 2. 3 Grafik Probabilitas Ionisasi untuk Udara

Sumber: Arismunandar(1984,p.8).

#### 2.6.4 Ionisasi Karena Tumbukan

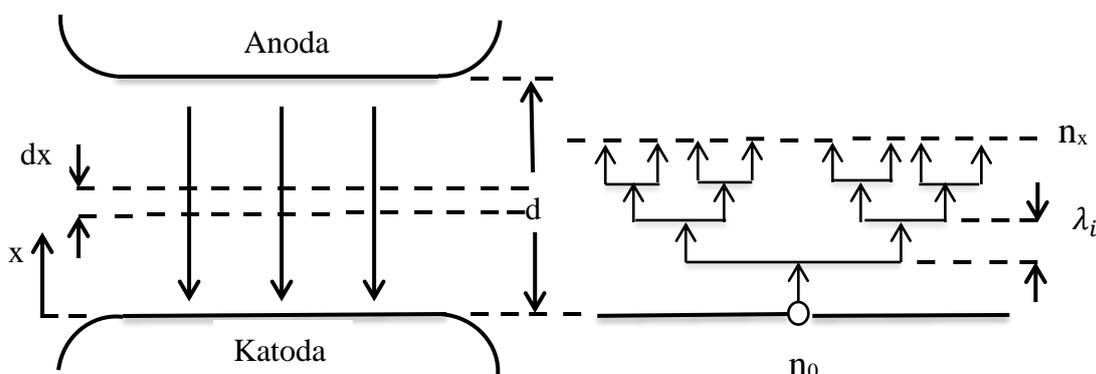
Ionisasi adalah proses pelepasan elektron dari molekul gas yang bersamaan dengan dengan itu menghasilkan ion positif. Dalam proses ionisasi karena tumbukan, elektron bebas bertumbukan dengan molekul netral dari gas dan akan menyebabkan terbentuknya elektron dan ion positif baru. Jika pada medan listrik ( $E$ ) yang melintas antara bidang elektroda paralel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 di bawah ini terdapat gas bertekanan rendah, maka setiap elektron akan semakin dipercepat karena tumbukan antar

molekul gas dalam perjalanannya dari katoda menuju ke anoda. Apabila energi meningkat sepanjang lintasan karena tumbukan dan telah melampaui potensial ionisasi yaitu energi yang diperlukan untuk melepas elektron dari kulit atom, maka akan terjadi ionisasi (Bosco,2008,p.6).



Gambar 2. 4 Rangkaian Uji Ionisasi  
Sumber : Bosco (2008,p.6).

Beberapa elektron dihasilkan di katoda yang disebabkan karena faktor luar misalnya seperti sinar ultraviolet yang jatuh pada katoda, menyebabkan terjadinya ionisasi pada partikel gas netral yang menghasilkan ion positif dan elektron tambahan. Elektron tambahan tersebut kemudian yang menyebabkan terjadinya ionisasi karena tumbukan dan proses itu berlangsung terus menerus. Hal ini juga berarti menyebabkan meningkatnya arus elektron, karena jumlah elektron yang sampai ke anoda lebih banyak dari yang dibebaskan pada katoda. Elektron- elektron yang terus-menerus bertumbukan akan menuju anoda dan terus berlipat ganda sehingga akan menimbulkan banjir elektron. Peristiwa pelipatgandaan elektron tersebut dapat digambarkan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2. 5 Pelipatgandaan Elektron  
Sumber : Kuffel (2000,p.297)

## 2.6.5 Proses Ionisasi Sekunder

### a. Emisi Elektron karena Pengaruh Ion Positif

Ion positif terbentuk akibat dari ionisasi yang disebabkan oleh tumbukan dan karena cahaya, kemudian ter-charge secara positif, ion-ion tersebut melintas ke arah katoda. Ion positif yang mendekati logam katoda dapat menyebabkan terjadinya emisi elektron dari katoda dengan memberikan energi kinetik ion positif yang disebabkan tumbukan. Apabila energi total dari ion positif, yaitu jumlah dari energi kinetik dan energi ionisasi lebih besar dari dua kali fungsi kerja (*work function*) dari logam katoda, maka satu elektron akan dikeluarkan dan elektron kedua akan menetralkan ion tersebut. Probabilitas dari proses ini dilambangkan dengan  $\gamma_i$  dan disebut sebagai koefisien sekunder ionisasi Townsend yang disebabkan ion positif dan merupakan hasil elektron per-tumbukan ion positif. Besar  $\gamma_i$  meningkat sebanding dengan kecepatan ion dan bergantung pada jenis gas dan material yang digunakan pada elektroda (Bosco,2008,p.9).

### b. Emisi Elektron karena Photon

Untuk membuat elektron terlepas dari elektroda, harus menggunakan energi yang cukup untuk menembus tahanan potensial permukaan. Energi tersebut dapat disuplai dalam bentuk photon atau energi cahaya. Emisi elektron yang terjadi pada permukaan metal terjadi pada kondisi kritis sesuai dengan persamaan (Bosco, 2008,p.9)

$$h \cdot \nu \geq W_1 \quad (2.18)$$

dimana  $W_1$  adalah energi ionisasi. Frekuensi ( $\nu$ ) yang diberikan dengan Persamaan:

$$\nu = \frac{W_1}{h} \quad (2.19)$$

$\nu$  dikenal sebagai frekuensi *threshold* (frekuensi saturasi) dan  $h$  adalah konstanta planck ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s). Untuk permukaan Aluminium dengan dengan fungsi kerja bahan ( $W_a = 1,77$  eV), maka frekuensi *threshold* akan sesuai dengan panjang gelombang  $\lambda = 2755$  Å. Apabila radiasi yang terjadi memiliki frekuensi yang lebih besar dari frekuensi saturasi, maka kelebihan energi tersebut sebagian akan menjadi energi kinetik dari elektron emisi, dan sebagian akan menjadi panas pada permukaan elektroda

$$h\nu = W_I + \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.20)$$

## 2.7 Mekanisme Kegagalan dalam Gas

### 2.7.1 Mekanisme Townsend

Berdasarkan pada Gambar 2.4 di atas, jika elektron diemisikan dari katoda, maka apabila elektron bertumbukan dengan partikel netral akan terbentuk ion positif dan elektron. Peristiwa ini disebut ionisasi karena tumbukan. Peristiwa ini akan menyebabkan banjir elektron yang berturut-turut sesuai dengan mekanisme Townsend. Jumlah elektron  $n_e$  dalam banjir elektron pada lintasan  $dx$  Gambar 2.4 akan bertambah dengan  $dn_e$  elektron. Banyaknya jumlah penambahan elektron bebas yang terjadi pada lapisan  $dx$  tersebut sesuai dengan persamaan : (C.L.Wadhwa, 2007,p.3)

$$dn_e = \alpha \cdot n_e \cdot dx \quad (2.21)$$

dimana  $\alpha$  adalah jumlah rata-rata tumbukan ionisasi yang disebabkan elektron per senti meter dalam lintasan,  $\alpha$  biasa disebut koefisien pertama ionisasi Townsend. Banyaknya jumlah elektron bebas  $dn_e$  yang dihasilkan dalam proses ionisasi sama jumlahnya dengan ion positif  $dn_+$  baru yang dihasilkan. Sehingga persamaan di atas dapat ditulis menjadi :

$$Dn_e = dn_+ = \alpha \cdot n_e(t) \cdot v_d \cdot dt \quad (2.22)$$

Pada medan seragam dengan syarat keadaan awal  $n_e = n_0$ ,  $x = 0$ , dan dengan kondisi  $\alpha$  konstan maka jumlah elektron yang terjadi adalah menjadi sebagai berikut :

$$n_e = n_0 \varepsilon^{\alpha x} \quad (2.23)$$

Jumlah elektron yang menumbuk anoda dengan jarak  $d$  dari katoda sama dengan jumlah dari ion positif yang dinyatakan dalam Persamaan :

$$n_+ = n_0 \varepsilon^{\alpha d} \quad (2.24)$$

Jumlah elektron baru yang dihasilkan oleh tiap elektron dalam rata-rata :

$$\varepsilon^{\alpha d} - 1 = \frac{n_d - n_0}{n_0} \quad (2.25)$$

oleh karena itu, arus rata-rata dalam celah, yang sama dengan jumlah elektron yang melintas per detik adalah:

$$I = I_0 \varepsilon^{\alpha d} \quad (2.26)$$

dimana  $I_0$  adalah arus awal pada katoda.

Proses banjir elektron yang dijelaskan di atas akan selesai ketika kumpulan elektron awal mencapai anoda. Akan tetapi, karena penguatan elektron  $\epsilon^{ad}$  yang terjadi dalam medan, kemungkinan dibebaskannya elektron tambahan baru dalam celah yang disebabkan oleh mekanisme lain akan meningkat, dan elektron baru ini akan menyebabkan proses banjir berikutnya. Mekanisme lain itu adalah seperti berikut (Bosco, 2008, p.11) :

1. Ion positif yang dibebaskan mungkin masih memiliki cukup energi untuk melepaskan elektron dari katoda ketika ion positif tersebut mengenai katoda.
2. Atom atau molekul yang mengalami peluruhan mungkin memancarkan photon, dan hal ini akan menyebabkan emisi elektron karena photon.
3. Partikel metastabil yang disebarkan kembali yang menyebabkan emisi elektron.

Elektron yang dihasilkan pada proses banjir elektron sekunder ini disebut elektron sekunder. Koefisien dari proses ionisasi sekunder  $\gamma$  didefinisikan sama dengan  $\alpha$ , yaitu jumlah elektron sekunder yang dihasilkan tiap insiden ion positif, photon, peluruhan partikel, atau partikel metastabil, dan nilai total dari  $\gamma$  adalah jumlah tiap koefisien dari tiga proses yang berbeda, seperti  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$ . Koefisien  $\gamma$  disebut sebagai koefisien ke-2 ionisasi Townsend. Sehingga persamaan jumlah elektron yang meninggalkan katoda dan mencapai anoda di atas menjadi :

$$n_e = \frac{n_0 \epsilon^{ad}}{1 - \gamma(\epsilon^{ad} - 1)} \quad (2.27)$$

dan besar arus rata-rata dalam celah menjadi:

$$I = \frac{I_0 \epsilon^{ad}}{1 - \gamma(\epsilon^{ad} - 1)} \quad (2.28)$$

Arus  $I$  akan terus mengalami kenaikan hingga terjadi peralihan menjadi pelepasan bertahan sendiri (*self sustaining discharge*). Peralihan yang terjadi berupa percikan (*spark*), dan kemudian akan terjadi perubahan arus yang sangat cepat hingga penyebut pada persamaan arus di atas menjadi nol. Kondisi ini disebut kriteria *breakdown* Townsend, dan dapat ditulis dalam Persamaan :

$$\gamma(\epsilon^{ad} - 1) = 1 \quad (2.29)$$

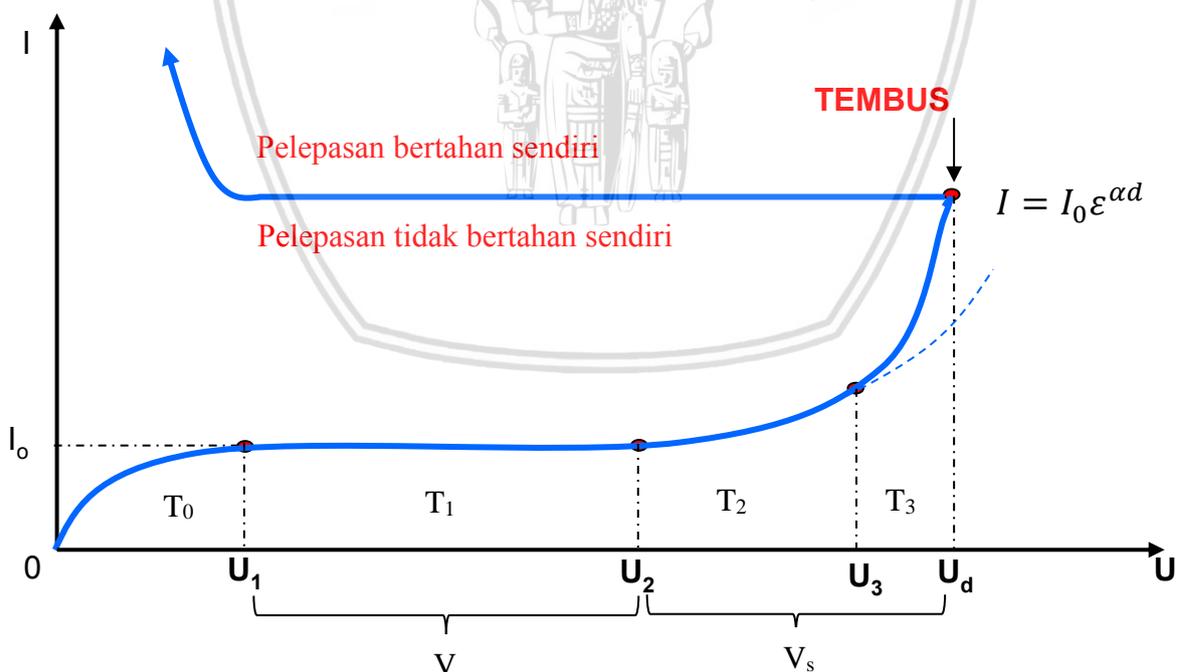
dimana  $\gamma \epsilon^{ad}$  sangat besar atau  $\gamma \epsilon^{ad} \gg 1$ , sehingga persamaan di atas menjadi :

$$\gamma \epsilon^{ad} = 1 \quad (2.30)$$

Pada kondisi ini, secara teori arus menjadi tidak berhingga, tetapi hal ini sulit terjadi karena arus akan dibatasi oleh impedansi rangkaian dan sirkuit eksternal. Townsend membagi kriteria kondisi dimulainya percikan menjadi tiga ketentuan, yaitu: (C.L.Wadhwa, 2007,p.7)

- $\gamma \varepsilon^{\alpha d} < 1$ , arus pelepasan tidak bisa bertahan sendiri sehingga jika sumber arus primer  $I_0$  dihilangkan, arus pelepasan akan berhenti mengalir.
- $\gamma \varepsilon^{\alpha d} = 1$ , banjir elektron menghasilkan jumlah pasangan ion  $\gamma \varepsilon^{\alpha d}$  yang cukup besar sehingga ion positif yang dihasilkan pada peristiwa penumbukan dengan katoda akan membebaskan satu elektron sekunder, dan proses banjir elektron akan terulang. Pelepasan menjadi bertahan sendiri (*self sustaining*) dan terus berlangsung tanpa sumber penghasil  $I_0$ .
- $\gamma \varepsilon^{\alpha d} > 1$ , ionisasi yang disebabkan banjir berturut-turut akan bertumpuk, sehingga hal ini akan menyebabkan pelepasan percikan tumbuh dengan cepat sebanding dengan kelebihan  $\gamma \varepsilon^{\alpha d}$  dari 1.

Persamaan dan kriteria arus yang disebut di atas dapat dijelaskan melalui gambar grafik di bawah ini.



Gambar 2. 6 Grafik U dan I Berdasarkan Kriteria Townsend  
Sumber : (C.L.Wadhwa, 2007,p.3)

Karena gerakan elektron adalah fungsi dari tegangan dan arahnya berlawanan dengan gerakan arus listrik maka jika suatu tegangan diberikan antara dua elektroda

(katoda dan anoda), arus yang bergerak menuju katoda akan bertambah perlahan-lahan sesuai dengan Bergeraknya elektron. Gerakan ini sesuai dengan arah kuat medan yang ada. Perubahan arus antara dua elektroda pelat yang sejajar sebagai fungsi dari kuat medan.

Pada kondisi  $T_0$  menurut Townsend arus mula-mula naik sebanding dengan tegangan yang diterapkan. Bagian grafik ini linier sebab penambahan elektron yang dibebaskan sebanding dengan naiknya tegangan yang diberikan. Selanjutnya, pada kondisi  $T_1$  kenaikan tegangan dari  $U_1$  ke  $U_2$  tidak akan menyebabkan kenaikan arus maka  $\gamma \epsilon^{\alpha d} \ll 1$ . Arus konstan pada harga  $I_0$ , yaitu arus fotolistrik yang dihasilkan di katoda oleh penyinaran ultra violet. Arus konstan karena semua elektron yang dibebaskan oleh penyinaran tersebut sudah habis. Keadaan ini disebut kejenuhan. Kejenuhan emisi elektron tidak menambah jumlah elektron dalam ruang. Tumbukan elektron dengan atom netral hanya menyebabkan eksitasi. Pada kondisi  $T_2$  Jika tegangan  $V$  dinaikkan terus sehingga melebihi  $U_2$ , maka  $\epsilon^{\alpha d}$  juga akan meningkat, sehingga  $\gamma \epsilon^{\alpha d} = 1$ , Penyebut persamaan menjadi nol dan  $I$  menjadi tak hingga dan arusnya akan naik secara eksponensial.

Kenaikan arus sesudah tegangan melebihi  $U_2$  menurut Townsend disebabkan oleh ionisasi gas Karena benturan elektron. Pada waktu kuat medan naik, maka elektron-elektron ini memiliki cukup energi untuk memungkinkan terjadinya ionisasi akibat benturan dengan atom atau molekul gas. Tumbukan-tumbukan ini akan menimbulkan elektron-elektron baru. kemudian pada kondisi  $T_3$  terjadi tambahan elektron mula  $n_+$  dari emisi katoda karena bombardir ion positif pada katoda. Dengan demikian jumlah elektron ionisasi meningkat secara hipereksponensial dan arusnya pun semakin besar. Jika tegangan telah mencapai suatu harga kritis  $V_s$ , maka arus bertambah sangat cepat dan akhirnya akan terjadi tegangan tembus ( $U_d$ ) atau pelepasan bertahan sendiri *breakdown* dan akan muncul percikan (spark) (Bosco,2008,p.13).

### 2.7.2 Mekanisme Streamer

Menurut mekanisme Townsend, arus akan meningkat sebagai hasil dari proses ionisasi. Akan tetapi, pada kondisi sebenarnya tegangan *breakdown* tergantung pada tegangan gas dan ukuran dari celah. Semua kondisi-kondisi yang ada pada keadaan sebenarnya yang tidak bisa dijelaskan dalam mekanisme Townsend dapat dijelaskan melalui mekanisme Streamer.

Pelepasan pada kegagalan mekanisme Streamer diawali dengan banjir primer tunggal, kemudian dari banjir tersebut akan terjadi muatan ruang dimana muatan ruang tersebut akan mengubah banjir menjadi *streamer* plasma (celah aliran/kanal). Kemudian konduktivitas akan mengalami kenaikan dengan cepat, dan akan terjadi kegagalan dalam streamer tersebut. Ada dua jenis mekanisme Streamer, yaitu *streamer* yang mengarah ke katoda yang disebut *streamer* positif dan *streamer* yang menuju ke anoda yang disebut *streamer* negatif.

Dalam *streamer* positif untuk geometri medan seragam, pada waktu banjir telah melewati celah, maka elektron akan tertarik ke arah anoda, dan ion-ion dalam anoda akan membentuk kerucut. Medan muatan ruang yang tinggi terjadi di dekat anoda dan di tempat lain kerapatan ionnya rendah. Oleh karena itu, kehadiran ion-ion positif tidak akan menimbulkan kegagalan dalam celah (Bosco, 2008, p.13).

Gas yang terionisasi pada tangkai banjir akan mengeluarkan foton, dan hal ini akan menimbulkan fotoelektron-fotoelektron yang menyebabkan terjadinya proses banjir sekunder. Apabila medan muatan yang disebabkan banjir primer besarnya sama dengan medan luar, peralihan dari banjir elektron ke *streamer* akan terjadi apabila medan  $E_r$  yang dihasilkan oleh ion-ion positif pada kepala banjir sama dengan medan  $E$  yang diterapkan agar terjadi peningkatan ionisasi.

Pelipatgandaan paling besar terjadi sepanjang sumbu banjir primer. Ion-ion positif yang ada di belakang banjir akan memanjang dan memperkuat muatan ruang banjir primer ke arah katoda. Kemudian akan terbentuk plasma dan hal ini tentu saja akan memperpendek jarak anoda dengan katoda. *Streamer* akan terus memanjang hingga merintang celah dan membentuk saluran penghantar yang berupa gas terionisasi di antara elektroda.

Pada *streamer* negatif atau *streamer* yang menuju ke anoda, diawali dengan mekanisme banjir primer yang akan menghasilkan jumlah elektron ( $\epsilon^{\alpha d}$ ) yang cukup untuk menimbulkan medan ruang yang sebanding dengan medan yang diterapkan. Jumlah medan karena muatan ruang dan medan yang diterapkan akan meningkatkan banjir elektron sekunder yang menuju anoda mendahului *streamer* negatif yang terbentuk. Banjir elektron terjadi disebabkan karena fotoionisasi dalam celah di depan *streamer*.

Persamaan empiris yang menyatakan kriteria *spark streamer* adalah sebagai berikut : (C.L.Wadhwa, 2007, p.9)

$$\alpha x_c = 17,7 + \ln x_c + \ln (E_r / E) \quad (2.31)$$

dimana  $E_r$  adalah medan yang dihasilkan di kepala banjir,  $E$  adalah medan yang diterapkan, dan  $x_c$  adalah panjang banjir dimana dihasilkannya elektron sekunder akibat fotoionisasi.

Peralihan dari banjir elektron ke *streamer* terjadi pada saat medan  $E_r$  kira-kira sama dengan medan  $E$  yang diterapkan sehingga persamaan di atas menjadi :

$$\alpha x_c = 17,7 + \ln x_c \quad (2.32)$$

Nilai *breakdown* minimum untuk celah medan seragam pada mekanisme *streamer* yaitu pada saat terjadi peralihan dari banjir ke *streamer* ketika banjir telah merintang celah  $d$ .

Karena itu tegangan *breakdown* minimum pada mekanisme *streamer* terjadi pada saat  $x_c = d$ . Medan yang dihasilkan di kepala banjir pada radius  $r$  adalah :

$$E_r = 5.27 \times 10^{-7} \frac{\alpha \varepsilon^{\alpha x}}{(x/p)^{1/2}} \quad (2.33)$$

dimana  $\alpha$  adalah koefisien pertama ionisasi Townsend,  $p$  adalah tekanan gas dalam torr, dan  $x$  adalah jarak dimana *streamer* telah muncul dalam celah. Karena tegangan minimum *breakdown* terjadi pada saat  $E_r = E$  dan  $x = d$ , maka persamaan tersebut menjadi :

$$\alpha d + \ln\left(\frac{\alpha}{p}\right) = 14.5 + \ln\left(\frac{E}{p}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{d}{p}\right) \quad (2.34)$$

## 2.8 Proses Terjadinya Korona

Bila dua elektroda yang penampangnya kecil (dibandingkan dengan jarak antara kedua elektroda tersebut) diberi tegangan bolak-balik, maka akan mungkin terjadi fenomena korona. Pada tegangan yang cukup rendah, tidak akan terjadi apa-apa. Bila tegangan tersebut dinaikan, maka akan terjadi korona secara bertahap. Pertama-tama, pada elektroda akan kelihatan bercahaya, mengeluarkan suara mendesis (*hissing*), dan berbau ozon (Bosco, 2008, p.15). Warna cahaya yang terlihat adalah ungu muda (violet). Apabila tegangan dinaikan secara terus-menerus, maka karakteristik yang terjadi di atas akan semakin jelas terlihat, terutama pada bagian yang kasar, runcing, atau kotor. Cahaya akan bertambah besar dan terang. Apabila tegangan masih terus dinaikan, maka akan muncul busur api. Korona akan mengeluarkan panas, hal ini dapat dibuktikan dari

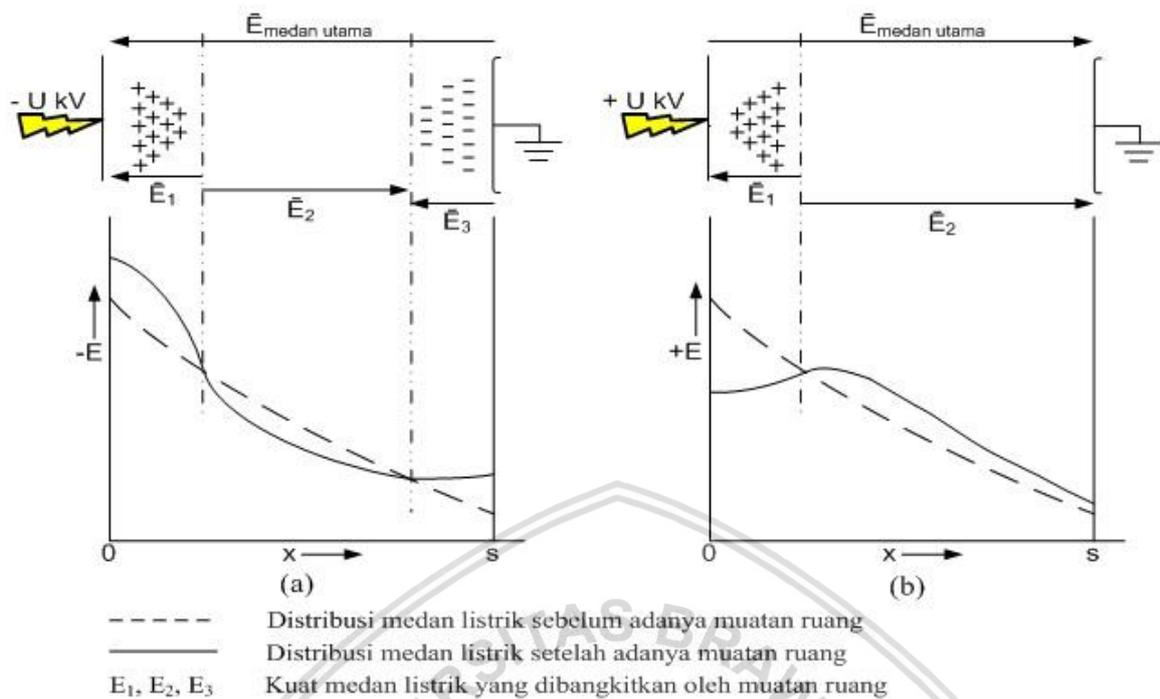
pengukuran menggunakan wattmeter. Pada keadaan udara lembab, korona menghasilkan asam nitrogen (*nitrous acid*), yang menyebabkan elektroda berkarat bila kehilangan daya cukup besar.

Apabila tegangan yang digunakan adalah tegangan searah, maka pada elektroda positif korona akan menampakan diri dalam bentuk cahaya yang seragam (*uniform*) pada permukaan elektroda, sedangkan pada elektroda negatifnya hanya pada tempat-tempat tertentu saja.

Korona terjadi disebabkan karena adanya ionisasi dalam udara, yaitu terjadinya kehilangan elektron dari molekul udara. Karena terjadi ionisasi molekul dalam udara, maka molekul netral di udara bebas mendapatkan energi foton yang cukup dan besarnya melebihi energi yang diperlukan untuk membebaskan elektron dari molekul gas atau udara. Kelebihan energi foton akan dilimpahkan pada elektron yang kemudian dibebaskan dalam bentuk energi kinetik.

Karena adanya medan listrik yang berada di sekitar elektroda penghantar yang mempercepat gerak elektron hasil ionisasi tersebut, maka elektron tersebut akan menumbuk molekul-molekul gas atau udara di sekitarnya. Karena hal ini terjadi secara terus-menerus maka jumlah ion dan elektron bebas menjadi berlipat ganda. Apabila terjadinya eksitasi elektron atom gas, yaitu berubahnya kedudukan elektron gradien tegangan menjadi cukup besar maka akan timbul fenomena korona. Selain menyebabkan terjadinya ionisasi molekul, tumbukan elektron juga menyebabkan dari orbital awalnya ke tingkat orbital yang lebih tinggi. Pada saat elektron berpindah kembali ke tingkat orbital yang lebih rendah, maka akan terjadi pelepasan energi berupa cahaya radiasi dan gelombang elektromagnetik berupa suara bising (Bosco,2008,p.16).

## 2.9 Efek Polaritas



Gambar 2. 7 Efek Polaritas pada Susunan Elektroda Kawat-Plat  
 Sumber: Kind.D (1993,p.120).

### 2.9.1 Korona Positif

Ketika elektroda kawat pada sisi tegangan tinggi polaritasnya positif seperti pada Gambar 2.6b maka elektron di permukaan kawat bergerak sangat cepat menuju elektroda kawat dan habis terdisipasi kedalam elektroda kawat, sedangkan ion positif akan bergerak sangat lambat menuju elektroda plat. Muatan ruang positif ini selanjutnya mendistorsi medan semula dan mengakibatkan pelemahan intensitas medan di daerah permukaan kawat dan meningkatkan medan di daerah lainnya. Dalam hal ini distribusi medannya menjadi lebih seragam dari semula. Karena muatan ruang berada di sekitar permukaan kawat, maka sistem muatan ruang dan permukaan kawat dengan polaritas yang sama akan memperpendek jarak sela antara elektroda kawat dan plat.

### 2.9.2 Korona Negatif

Ketika kawat polaritasnya negatif, maka elektron di permukaan kawat bergerak sangat cepat menuju elektroda plat, sedangkan ion positif akan bergerak sangat lambat menuju permukaan kawat. Pemisahan muatan ruang ini akan menghasilkan intensitas medan dalam ruang yang dapat memperkuat dan melemahkan medan utamanya seperti terlihat pada Gambar 2.7a. akibatnya distribusi medan semula terdistorsi dimana intensitas medan di permukaan kawat meningkat dan di daerah lainnya menurun. Dalam hal ini distribusi medannya semakin tidak homogen.

## 2.10 Scanning Electron Microscope (SEM)

*Scanning Electron Microscope (SEM)* adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk menggambarkan bentuk permukaan dari material yang dianalisis. Prinsip kerja dari SEM ini adalah dengan menggambarkan permukaan benda atau material dengan berkas electron yang dipantulkan dengan energi tinggi. Permukaan material yang disinari atau terkena berkas elektron akan memantulkan kembali berkas elektron atau dinamakan berkas elektron sekunder ke segala arah. Tetapi dari semua berkas elektron yang dipantulkan terdapat satu berkas elektron yang dipantulkan dengan intensitas tertinggi. *Detector* yang terdapat di dalam SEM akan mendeteksi berkas elektron berintensitas tertinggi yang dipantulkan oleh benda atau material yang dianalisis. Selain itu juga dapat menentukan lokasi berkas elektron yang berintensitas tertinggi itu.

Ketika dilakukan pengamatan terhadap material, lokasi permukaan benda yang ditembak dengan berkas elektron yang berintensitas tertinggi di – scan keseluruhan permukaan material pengamatan. Karena luasnya daerah pengamatan kita dapat membatasi lokasi pengamatan yang kita lakukan dengan melakukan zoon – in atau zoon – out. Dengan memanfaatkan berkas pantulan dari benda tersebut maka informasi dapat di ketahui dengan menggunakan program pengolahan citra yang terdapat dalam monitor.

*Scanning Electron Microscope (SEM)* memiliki resolusi yang lebih tinggi dari pada mikroskop optic. Hal ini di sebabkan oleh panjang gelombang de Broglie yang memiliki electron lebih pendek daripada gelombang optik. Karena makin kecil panjang gelombang yang digunakan maka semakin tinggi resolusi mikroskop. *SEM* mempunyai *depthoffield* yang besar, yang dapat memfokuskan jumlah sampel yang lebih banyak pada satu waktu dan menghasilkan bayangan yang baik dari sampel tiga dimensi. *SEM* juga menghasilkan bayangan dengan resolusi tinggi, yang berarti mendekati bayangan yang dapat diuji dengan perbesaran tinggi.

Kombinasi perbesaran yang lebih tinggi, *darkfield*, resolusi yang lebih besar, dan komposisi serta informasi kristallografi membuat *SEM* merupakan satu dari peralatan yang paling banyak digunakan dalam penelitian, R & D industri khususnya industri semikonduktor

Mikroskop elektron memiliki resolusi yang lebih tinggi daripada mikroskop optik. mikroskop optik hanya mampu mencapai 200nm sedangkan mikroskop elektron bisa mencapai resolusi sampai 0,1 – 0,2 nm (Purnomo,2009).

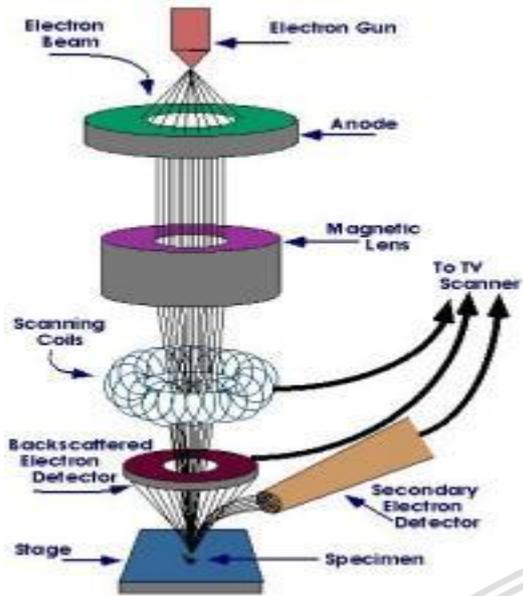
Pada sebuah mikroskop elektron (SEM) terdapat beberapa peralatan utama antara lain:

1. Pistol elektron, biasanya berupa filamen yang terbuat dari unsur yang mudah melepas elektron misal tungsten.
2. Lensa untuk elektron, berupa lensa magnetis karena elektron yang bermuatan negatif dapat dibelokkan oleh medan magnet.
3. Sistem vakum, karena elektron sangat kecil dan ringan maka jika ada molekul udara yang lain elektron yang berjalan menuju sasaran akan terpecah oleh tumbukan sebelum mengenai sasaran sehingga menghilangkan molekul udara menjadi sangat penting.

Prinsip kerja dari SEM adalah sebagai berikut:

1. Electron gun menghasilkan electron beam dari filamen. Pada umumnya electron gun yang digunakan adalah tungsten hairpin gun dengan filamen berupa lilitan tungsten yang berfungsi sebagai katoda. Tegangan yang diberikan kepada lilitan mengakibatkan terjadinya pemanasan. Anoda kemudian akan membentuk gaya yang dapat menarik elektron melaju menuju ke anoda.
2. Lensa magnetik memfokuskan elektron menuju suatu titik pada permukaan sampel.
3. Sinar elektron yang terfokus memindai (scan) keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai.
4. Ketika elektron mengenai sampel, maka akan terjadi hamburan elektron, baik *Secondary Electron (SE)* atau *Back Scattered Electron (BSE)* dari permukaan sampel dan akan dideteksi oleh detektor dan dimunculkan dalam bentuk gambar pada monitor.

Secara lengkap skema SEM dijelaskan oleh gambar dibawah ini:



Gambar 2. 8 Mekanisme Kerja SEM  
Sumber : Purnomo (2009)





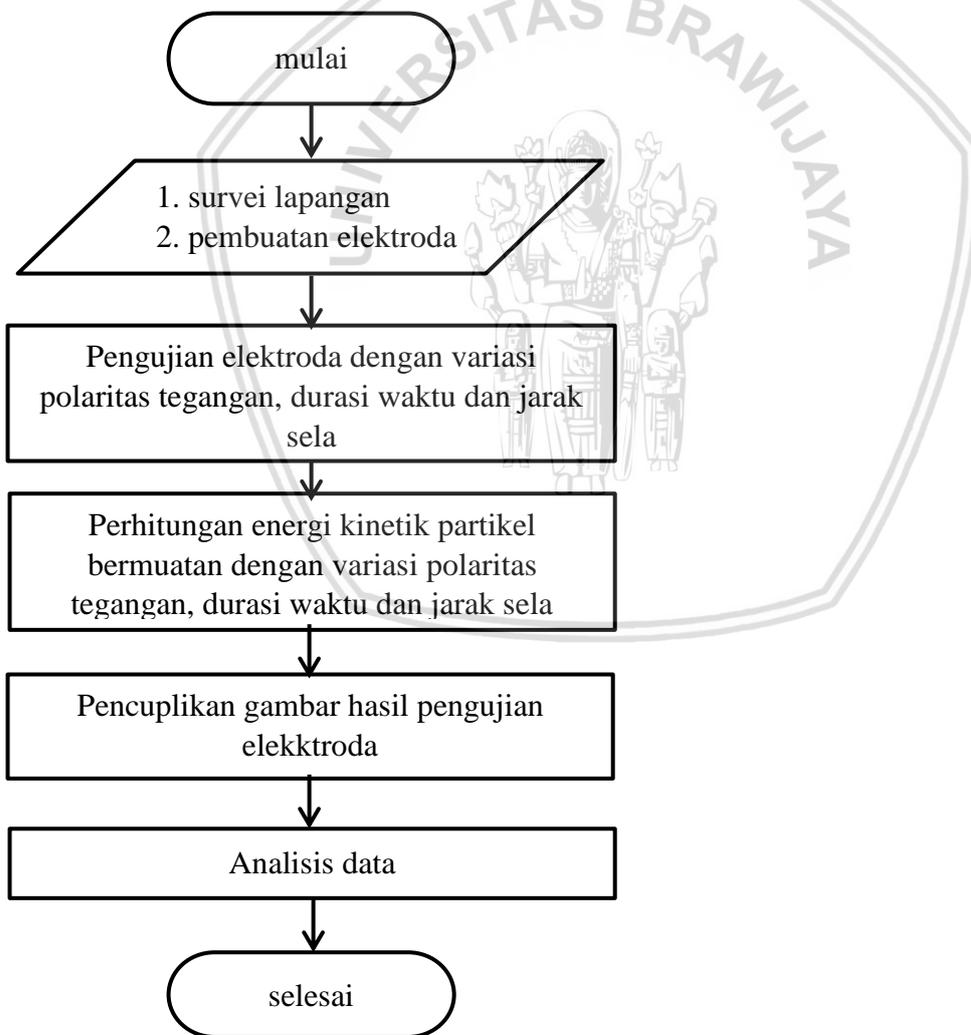
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

### BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang metode pola pikir yang akan digunakan untuk mengkaji pengamatan perjalanan bombardir partikel bermuatan dalam pengisian muatan elektroda plat dengan tegangan tinggi *direct current* (DC) dan menganalisis perhitungan energi kinetik partikel bermuatan. Adapun langkah-langkah untuk mencapai tujuan dalam penelitian ini sebagai berikut :

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini langkah- langkah pengujian mengacu pada diagram alir seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk memahami konsep-konsep yang berkaitan dengan permasalahan yang dikaji dalam skripsi ini. Studi literatur ini dilakukan dengan mempelajari referensi, jurnal, skripsi, *web browsing* dan forum-forum resmi yang menunjang dalam penyusunan skripsi, yaitu

- a. Proses ionisasi
- b. Bombardir partikel bermuatan
- c. Energi kinetik partikel bermuatan

### 3.3 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini ada beberapa hal yang akan diamati, antara lain :

1. Berapa besar energi kinetik partikel bermuatan yang berjalan melalui isolasi dielektrik udara sampai menuju elektroda plat
2. Bagaimana pengaruh polaritas tegangan terhadap struktur permukaan elektroda plat
3. Berapa besar pengaruh durasi waktu dalam pemberian tegangan terhadap stuktur permukaan elektroda plat
4. Berapa besar pengaruh variasi jarak sela terhadap struktur permukaan elektroda plat

### 3.4 Perencanaan Pengujian

Sebelum dilakukan pengujian, perlu adanya perencanaan yang meliputi penyediaan, persiapan, dan pengecekan pada alat pengujian serta alat instrumentasi dengan melakukan pengecekan dan kalibrasi terhadap alat ukur. Hal tersebut harus dilakukan agar dalam pengambilan data lebih akurat dan mengurangi kegagalan, sehingga dalam pengujian ini dapat berjalan dengan baik.

### 3.5 Penyediaan Alat Pengujian

Peralatan pengujian yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Peralatan Pengujian

No	Nama	Spesifikasi	Jumlah	Gambar
1	Transformator Uji	220V/100kV, 5 kVA, 50 Hz.	1	
2	Penyearah Dioda	140 kV	2	
3	Resistor pengukuran ( $R_M$ )	280 M $\Omega$	1	
4	Kapasitor ( $C_S$ )	10000 pF	1	
5	Control desk	Terco	1	

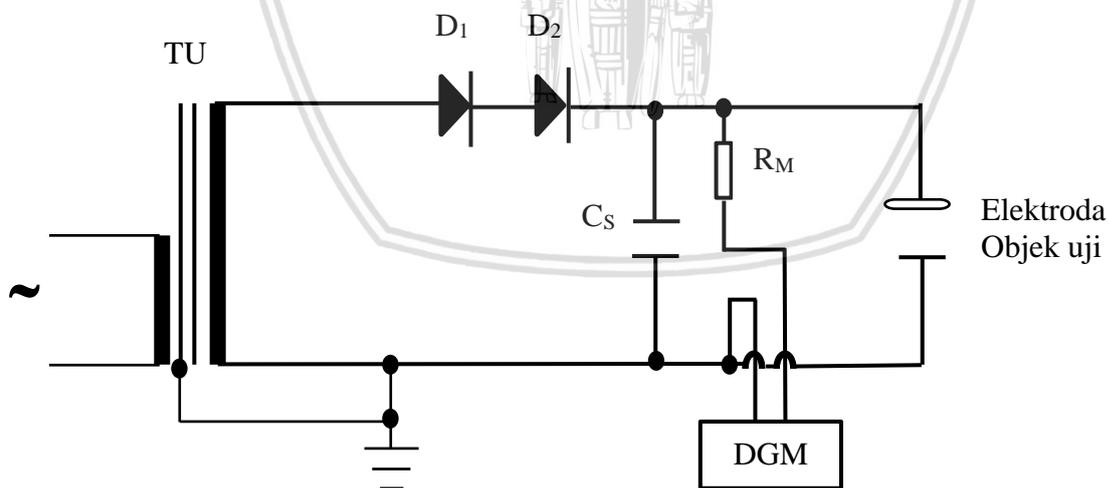
### 3.6 Rangkaian Pengujian

Pengujian pertama dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Pengujian yang dilakukan yaitu pengukuran terhadap proses fenomena bombardir partikel bermuatan pada permukaan elektroda plat. Pengujian dilakukan dengan objek uji yaitu elektroda plat dengan pemberian variasi tegangan, durasi waktu, dan jenis elektroda kemudian mengambil data berupa tegangan dan melakukan perhitungan energi kinetik partikel bermuatan.

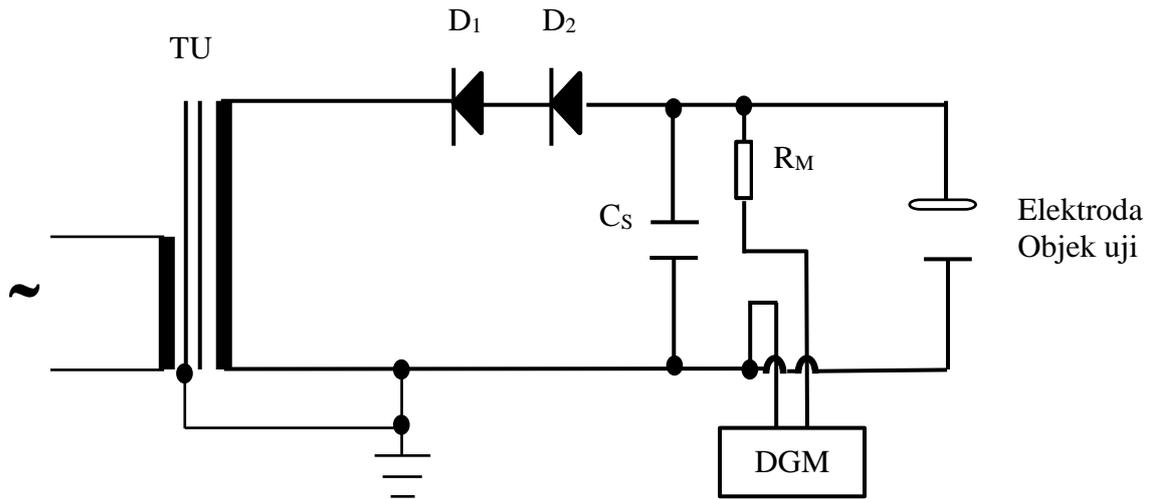
Pengujian kedua dilakukan di Laboratorium Central Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya. Pengujian dilakukan dengan memotong elektroda plat setelah diberi tegangan tinggi DC. kemudian potongan elektroda plat tersebut akan dimasukkan dalam alat *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk diambil hasil cuplikan gambar.

#### 3.6.1 Pembangkitan Tegangan Tinggi DC

Tegangan tinggi DC untuk pengujian dapat dibangkitkan melalui penyearahan sumber tegangan tinggi DC dari trafo uji. Bahan semikonduktor yang umum digunakan untuk maksud ini adalah selenium, germanium, dan silikon. Rangkaian pengujian tegangan tinggi DC dengan kapasitor sebagai perata tegangan ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 3. 2 Rangkaian Pengujian Efek Polaritas Positif



Gambar 3. 3 Rangkaian Pengujian Efek Polaritas Negatif

Pada pengukuran ini, digunakan komponen – komponen sebagai berikut :

TU : Trafo Uji 220V/100kV, 5 kVA, 50 Hz.

D<sub>1</sub>,D<sub>2</sub> : Penyearah dioda 140kV

R<sub>M</sub> : Resistor pengukuran 280 MΩ

C<sub>s</sub> : Kapasitor 10000 pF

DGM : Alat ukur tegangan tinggi DC

Yang perlu diperhatikan dalam rangkaian penyearah adalah kemampuan diode terhadap tegangan balik maksimum  $U_v$  yang besarnya mendekati 2 (dua) kali tegangan maksimum dari sumber tegangan AC.

### 3.6.2 Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)

Pengujian dilakukan dengan memotong elektoda plat setelah diberi tegangan tinggi DC. kemudian potongan elektoda plat tersebut akan dimasukkan dalam alat *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk diambil hasil cuplikan gambar.



*Gambar 3. 4 Scanning Electron Microscope*

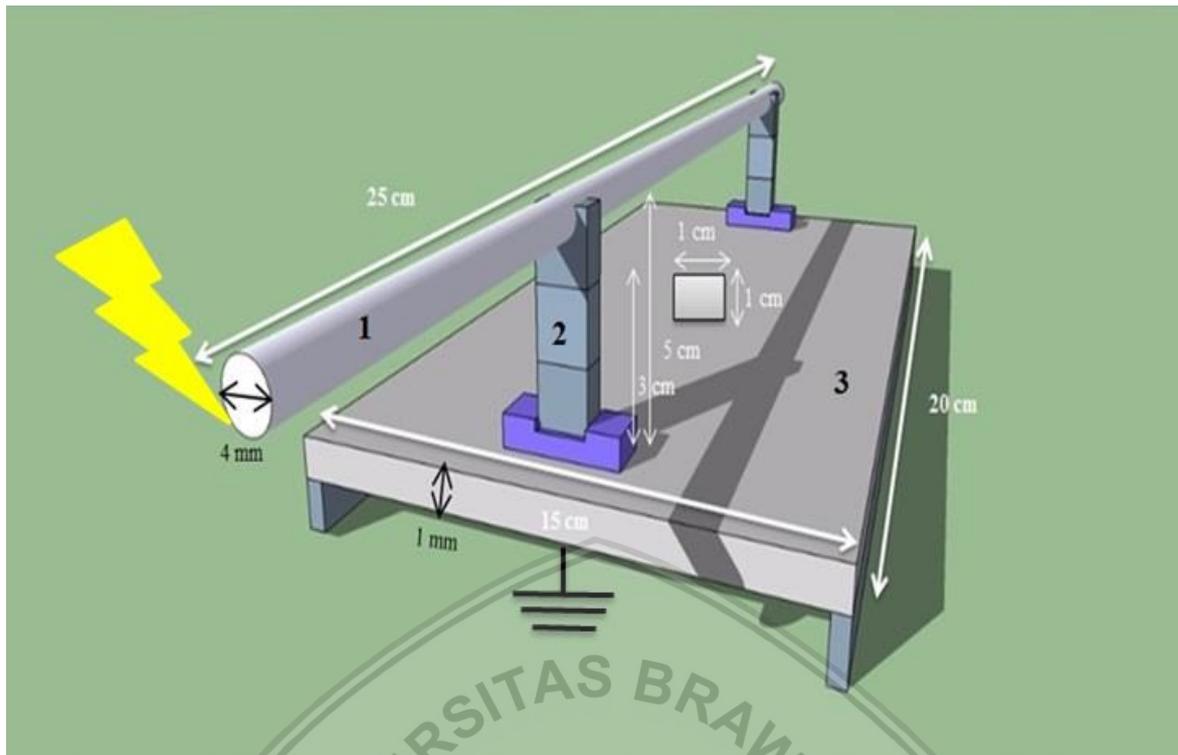
Sumber : Jianchao (1890)

### 3.7 Objek Uji

Pada penelitian ini obyek uji yang digunakan untuk mencari karakteristik dampak dari pemberian tegangan adalah elektroda plat berbentuk persegi panjang. Variabel yang diubah- ubah pada obyek uji adalah sebagai berikut :

1. Pemberian polaritas tegangan tinggi DC positif dan negatif
2. Pemberian variasi jarak sela yaitu 3 cm dan 5 cm  
untuk variabel tetap yang diberikan yaitu
  1. Pemberian durasi waktu yaitu selama 4 menit

Bentuk elektroda yang digunakan dalam penelitian ini seperti yang ditunjukkan dalam gambar dibawah ini:



Gambar 3. 5 Sketsa Bentuk Elektroda

keterangan :

1. Kawat tembaga pejal
2. Isolator penyangga
3. Plat aluminium

### 3.8 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh data-data yang diperlukan dalam menyelesaikan penelitian ini. Data yang dikumpulkan antara lain data primer yang didapatkan dari hasil penelitian. Data primer didapatkan dari hasil pengukuran dan pengujian dengan cara pengukuran tegangan pada elektroda plat dengan menggunakan alat ukur berupa *control desk* yang dapat mengatur tegangan dan arus. Kemudian data primer selanjutnya adalah berupa gambar struktur permukaan elektroda plat dengan menggunakan alat berupa *Scanning Electron Microscope (SEM)*

### 3.9 Analisis Hasil Pengujian

Dalam tahap ini, setelah pengujian dilakukan dan mendapatkan data yang diperlukan maka dilakukan perhitungan sesuai persamaan yang telah dicantumkan pada BAB II. Setelah perhitungan dilakukan, langkah selanjutnya adalah dilakukan analisis dengan mengacu pada rumusan masalah.

### 3.10 Kesimpulan dan Saran

Pada tahapan ini dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan teori, hasil perhitungan dan analisis serta saran-saran yang diberikan. Di akhir penelitian ini akan ditarik suatu kesimpulan dari semua proses analisis yang telah dilakukan, dan pemberian saran kepada pembaca yang akan melakukan studi terkait dengan penelitian ini. Saran-saran yang diberikan kepada pembaca meliputi hal-hal yang menjadi kendala dalam penelitian, atau hal-hal yang masih memerlukan kajian lebih dalam lagi terkait fenomena bombardir partikel bermuatan.



## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Tinjauan Umum

Pada bab ini akan dijelaskan tentang data hasil pengujian dan analisis data percobaan pengaruh bombardir partikel bermuatan menggunakan HVDC terhadap elektroda plat. Data yang diambil dalam pengujian ini berupa tegangan korona  $U_c$ , tegangan tembus  $U_d$ , serta berupa gambar plat dengan perbesaran sampai partikel terhadap pengaruh dari tegangan korona  $U_c$  dan tegangan tembus  $U_d$ . Setiap satu kali pengukuran dilakukan pergantian elektroda plat guna untuk melihat struktur permukaan akibat pengaruh bombardir partikel bermuatan. Untuk menunjang proses penelitian ini, terdapat beberapa pengujian yang dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi Universitas Brawijaya antara lain:

1. Pengujian pengaruh bombardir dengan polaritas positif dan jarak sela 3 cm
2. Pengujian pengaruh bombardir dengan polaritas positif dan jarak sela 5 cm
3. Pengujian pengaruh bombardir dengan polaritas negatif dan jarak sela 3 cm
4. Pengujian pengaruh bombardir dengan polaritas negatif dan jarak sela 5 cm

Pada pengujian ini terdapat variabel tetap yaitu durasi waktu selama 4 menit. Setiap hasil pengujian dilakukan analisis untuk mengetahui besar energi kinetik partikel bermuatan dan membandingkan dengan hasil gambar

### 4.2 Perhitungan Jarak Bebas Elektron

Pada Tabel 2.1 terdapat nilai jarak bebas elektron setiap jenis gas. mayoritas jenis gas di udara yaitu nitrogen  $N_2$  dan oksigen  $O_2$ . sehingga dapat diambil rata-rata jarak bebas elektron di udara.

$$\lambda_{O_2} = 6,79 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

$$\lambda_{N_2} = 6,28 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{rata-rata}} = \frac{(6,79 \cdot 10^{-8} \text{ m} + 6,28 \cdot 10^{-8} \text{ m})}{2} = 6,535 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$



### 4.3 Pengujian Pengaruh Bombardir dengan Polaritas Positif dan Jarak Sela 3 cm

#### 4.3.1 Data Hasil Pengujian Polaritas Positif dan Jarak Sela 3 cm

Pengambilan data pengujian pengaruh bombardir dilakukan kondisi ruangan laboratorium dengan tekanan sebesar 954 milibar dan suhu udara 15°C. Pengukuran pertama yang dilakukan yaitu mencari tegangan awal korona ( $U_c$ ) kemudian dilanjutkan sampai tegangan tembus ( $U_d$ ).setelah itu mengambil *range* tegangan antara tegangan awal korona ( $U_c$ ) dan dan tegangan tembus ( $U_d$ ) sebanyak 3 kali. Setiap satu kali pengukuran dilakukan pergantian elektroda plat guna untuk melihat struktur permukaan akibat pengaruh bombardir partikel bermuatan.

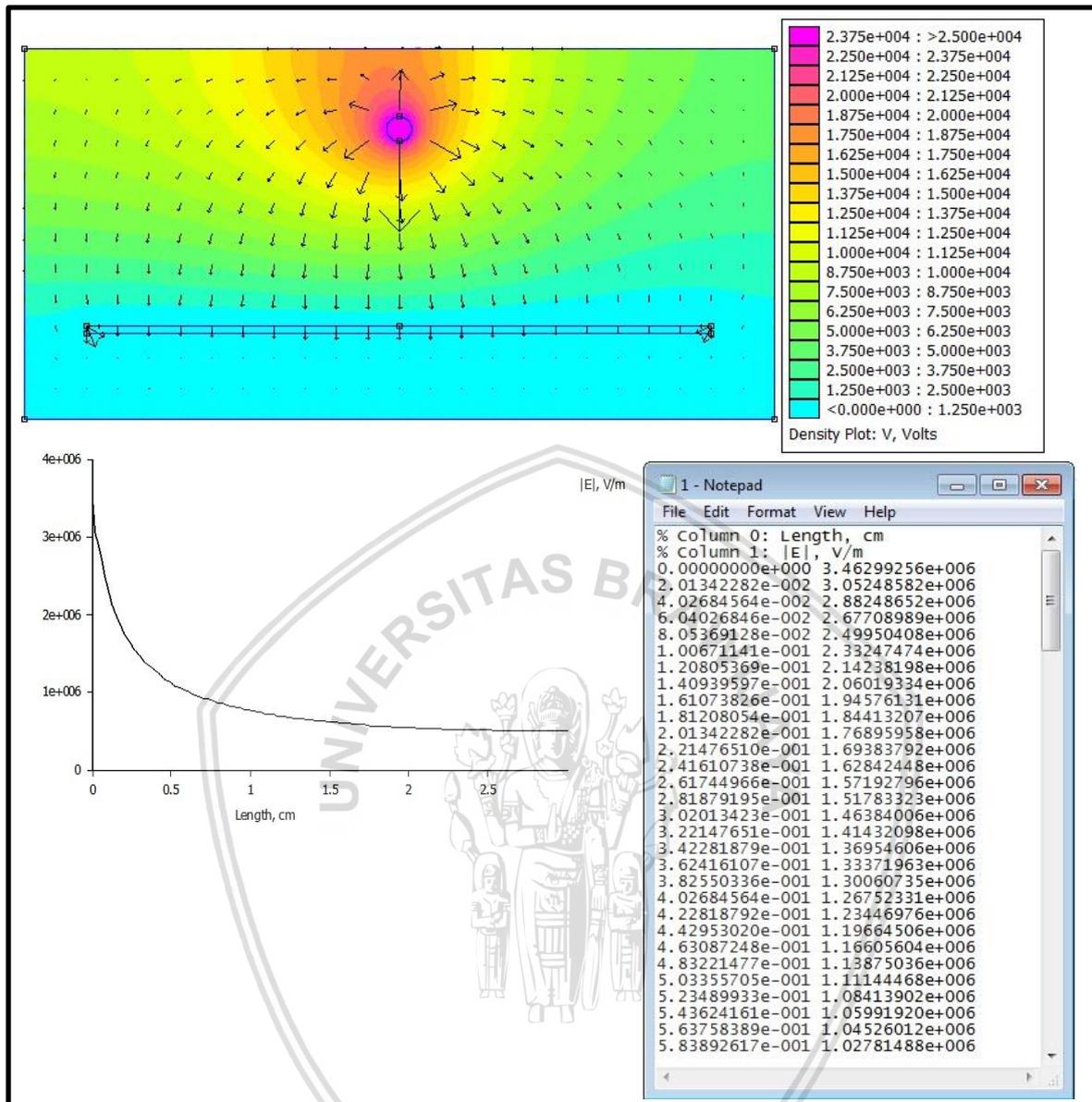
Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran Tegangan pada Polaritas Positif dengan Jarak Sela 3 cm

No	Jarak sela S (cm)	Polaritas positif			Waktu (menit)
		$U_c$ (kV)	$U_d$ (kV)	$U_c$ (kV)	
1	3	25	27	26,20	4
2				25,80	
3				25,20	

Sumber: Hasil Pengujian

Pada Tabel 4.1 dijelaskan bahwa, besar tegangan  $U_c$  adalah 25 kV dan pada tegangan tembus  $U_d$  diperoleh sebesar 27 kV. Sedangkan pada *range* tegangan antara  $U_c$  dan  $U_d$  didapatkan tiga sampel tegangan yaitu 25,20 kV , 25,80 kV dan 26,20 kV.

### 4.3.2 Perhitungan Efisiensi Polaritas Positif dan Jarak Sela 3 cm



Gambar 4. 1 Hasil Simulasi FEMM pada Tegangan 25 kV  
Sumber: Hasil Simulasi

$$E_{maks} = 3,46299256 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

$$= 34,6299256 \text{ kV/cm}$$

$$E_{rata-rata} = \frac{U_c}{d} = \frac{25}{3} = 8,333 \text{ kV/cm}$$

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maks}} \times 100\% = \frac{8,333}{34,6299256} \times 100\% =$$

$$24,0630029\%$$

Perhitungan efisiensi selanjutnya diletakkan pada lampiran 1

### 4.3.3 Analisis Perhitungan Energi Kinetik Partikel Bermuatan Polaritas Positif dan Jarak Sela 3 cm

Dari data diatas setelah mengetahui tegangan pada setiap pengukuran, langkah selanjutnya adalah perhitungan energi kinetik partikel bermutan.

Perhitungan energi kinetik partikel bermuatan pada polaritas positif dengan jarak sela 3 cm dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Tegangan korona ( $U_c$ ) = 25 kV
- Tegangan korona ke-1 ( $U_{c1}$ ) = 25,20 kV
- Tegangan korona ke-2 ( $U_{c2}$ ) = 25,80 kV
- Tegangan korona ke-3 ( $U_{c3}$ ) = 26,20 kV
- Tegangan tembus ( $U_d$ ) = 27 kV

Dengan menggunakan formula kecepatan elektron pada persamaan (2.17) dan formula energi kinetik pada persamaan (2.11) nilai energi kinetik partikel bermuatan pada pengukuran ke-1 adalah

$$\begin{aligned}
 v_e(U_{c1}) &= \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot \lambda \cdot V}{\eta \cdot d \cdot m_e}} \text{ m/s} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 6,535 \cdot 10^{-8} \times 25200}{0,2406 \times 0,03 \times 1,67 \cdot 10^{-27}}} \\
 &= 6611,433 \text{ m/s} \\
 U(U_{c1}) &= eV = \frac{1}{2} m_e v_e^2 \\
 &= \frac{1}{2} \times 1,67 \cdot 10^{-27} \times (6611,433^2) \\
 &= 3,649 \cdot 10^{-20} \text{ Joule} = 0,2277 \text{ eV}
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan data yang lebih lengkap dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

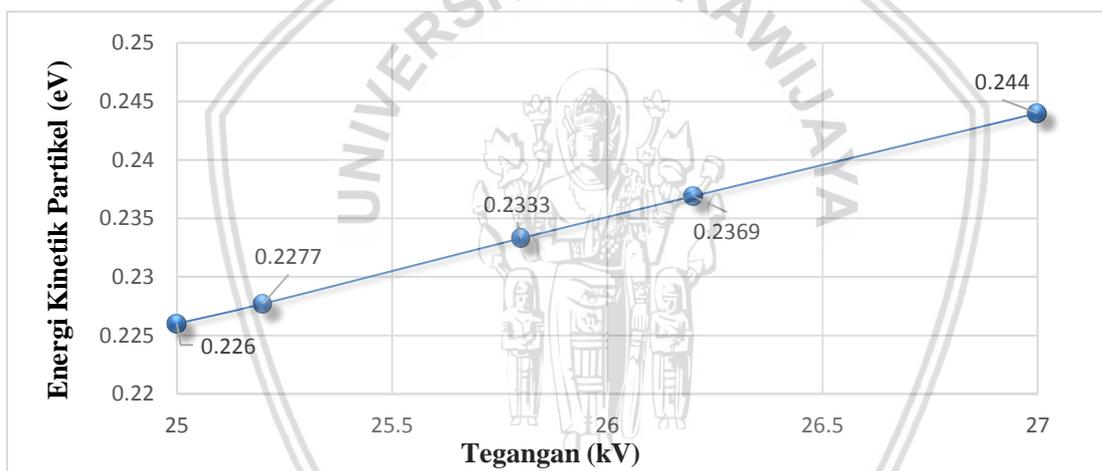
Tabel 4. 2 Perhitungan Energi Kinetik dengan Polaritas Positif dan Jarak Sela 3cm

No	Jenis tegangan	Tegangan (kV)	Kecepatan elektron (m/s)	Energi kinetik partikel (eV)
1	$U_c$	25,00	6585,276	0,2260
2	$U_{c1}$	25,20	6611,433	0,2277
3	$U_{c2}$	25,80	6689,677	0,2333
4	$U_{c3}$	26,20	6742,623	0,2369
5	$U_d$	27,00	6843,483	0,2440

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan data pada Tabel 4.2 dapat diamati perhitungan energi kinetik partikel bermuatan pada elektroda plat dengan polaritas positif dan jarak sela 3 cm bahwa, tegangan korona mulai muncul pada tegangan 25 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 6585,276 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2260 eV. Untuk  $U_{c1}$  besar tegangan 25,20 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 6611,433 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2277 eV. Pada  $U_{c2}$  besar tegangan 25,80 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 6689,677 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2333 eV.  $U_{c3}$  besar tegangan 26,20 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 6742,623 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2369 eV. Sedangkan energi kinetik pada saat mencapai tegangan tembus diperoleh sebesar 0,2440 eV dengan besar tegangan tembus sebesar 27 kV dan kecepatan elektron sebesar 6843,483 m/s

Berdasarkan Tabel 4.2 maka dapat dibuat grafik hubungan antara energi kinetik terhadap tegangan yang ditunjukkan pada Gambar 4.2



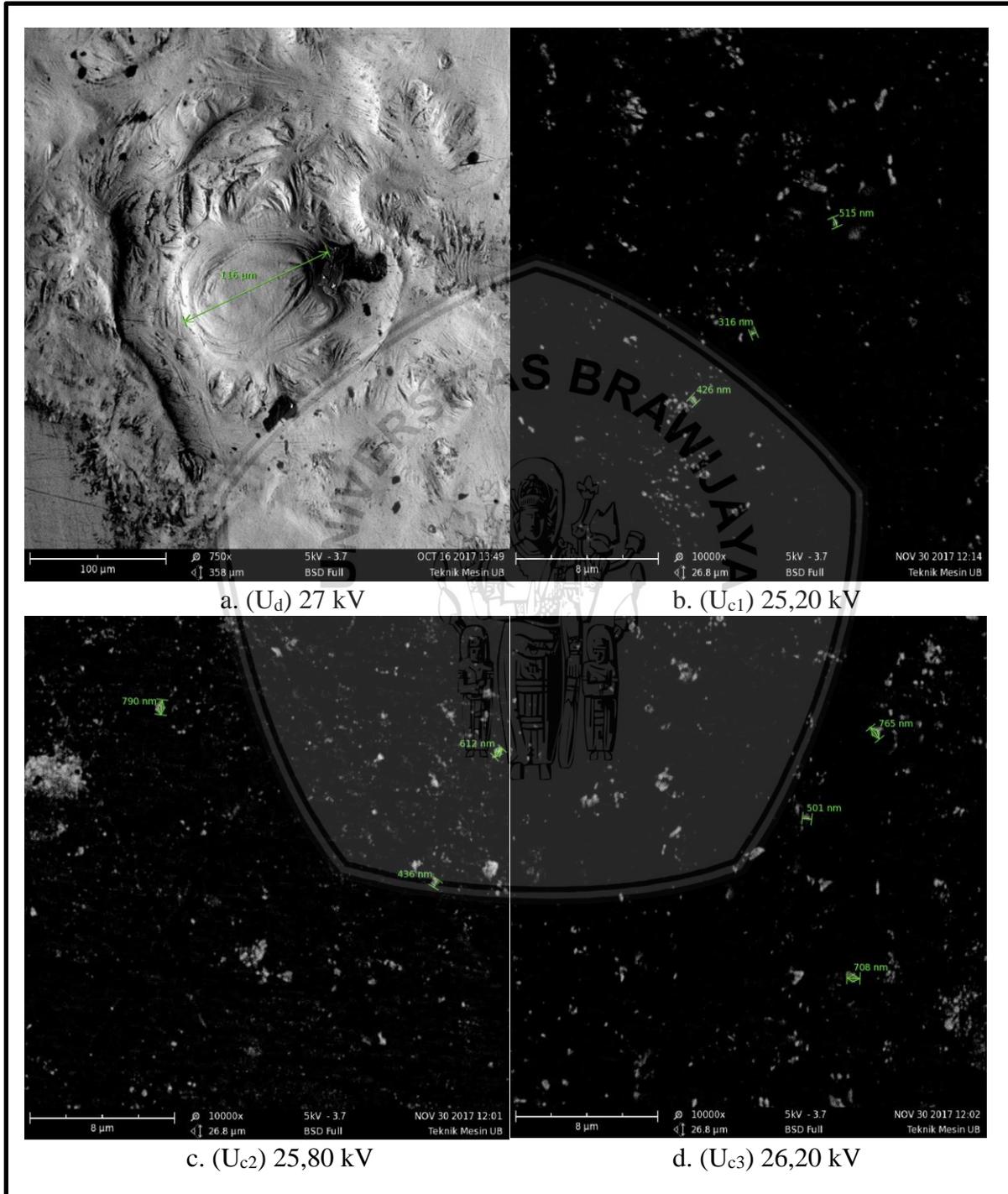
Gambar 4. 2 Grafik Energi Kinetik Partikel Bermuatan pada Setiap Tegangan pada Polaritas Positif dan Jarak Sela 3 Cm

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari grafik pada Gambar 4.2 dapat diamati bahwa kenaikan secara linier terjadi pada energi kinetik partikel bermuatan ( $E_k$ ) dari tegangan korona mulai muncul sampai tegangan tembus. Hal ini dikarenakan perubahan tegangan mempengaruhi energi kinetik partikel bermuatan. Semakin tinggi tegangan yang diberikan maka semakin tinggi pula energi kinetik partikel bermuatan.

#### 4.3.4 Hasil Gambar *Scanning Electron Microscope* (SEM) Polaritas Positif dan Jarak Sela 3 cm

Pengujian dan pengambilan gambar *scanning electron microscope* dilakukan dengan memotong bagian yang di uji atau *spesimen* dengan ukuran 1 cm<sup>2</sup>. Perbesaran yang digunakan untuk melihat mikrostruktur permukaan elektroda plat ini adalah 10000 kali.



Gambar 4. 3 Hasil SEM dengan Polaritas Positif dan Jarak 3 cm

Sumber: Hasil Pengujian

Berdasarkan data pada Gambar 4.3 dapat diamati gambar hasil *Scanning electron microscope* pada elektroda plat dengan polaritas positif dan jarak sela 3 cm bahwa,

- pada Gambar 4.3a yaitu pada tegangan tembus ( $U_d$ ) dengan tegangan 27 kV menunjukkan bahwa mikrostruktur permukaan elektroda plat ini membentuk suatu cekungan lubang akibat besarnya tegangan tembus. diameter lubang tembus ini memiliki ukuran 116  $\mu\text{m}$ . Hal ini menunjukkan bahwa teori bahwa muatan positif memiliki bentuk ukuran yang lebih besar dibanding muatan negatif atau *electron*.
- Pada Gambar 4.3b yaitu pada tegangan korona ( $U_{c1}$ ) dengan tegangan 25,20 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan bahwa mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan positif yang tersebar. Ukuran diameter partikel yang menunbuk pada permukaan memiliki ukuran 316 nm, 426 nm, 515 nm.
- Pada Gambar 4.3c yaitu pada tegangan korona ( $U_{c2}$ ) dengan tegangan 25,80 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan positif yang tersebar merata. Ukuran diameter partikel yang menunbuk pada permukaan memiliki ukuran 436 nm, 612 nm, 790 nm.
- Pada Gambar 4.3d yaitu pada tegangan korona ( $U_{c3}$ ) dengan tegangan 26,20 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan positif yang tersebar merata dan memiliki diameter tumbukan yang lebih besar. Ukuran diameter partikel yang menunbuk pada permukaan memiliki ukuran 501 nm, 708 nm, 765 nm.

#### 4.4 Pengujian Pengaruh Bombardir dengan Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm

##### 4.4.1 Data Hasil Pengujian Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm

Pengambilan data pengujian pengaruh bombardir dilakukan kondisi ruangan laboratorium dengan tekanan sebesar 954 milibar dan suhu udara 15°C. Pengukuran pertama yang dilakukan yaitu mencari tegangan awal korona ( $U_c$ ) kemudian dilanjutkan sampai tegangan tembus ( $U_d$ ). setelah itu mengambil *range* tegangan antara tegangan awal korona ( $U_c$ ) dan tegangan tembus ( $U_d$ ) sebanyak 3 kali. Setiap satu kali pengukuran dilakukan pergantian elektroda plat guna untuk melihat struktur permukaan akibat pengaruh bombardir partikel bermuatan.

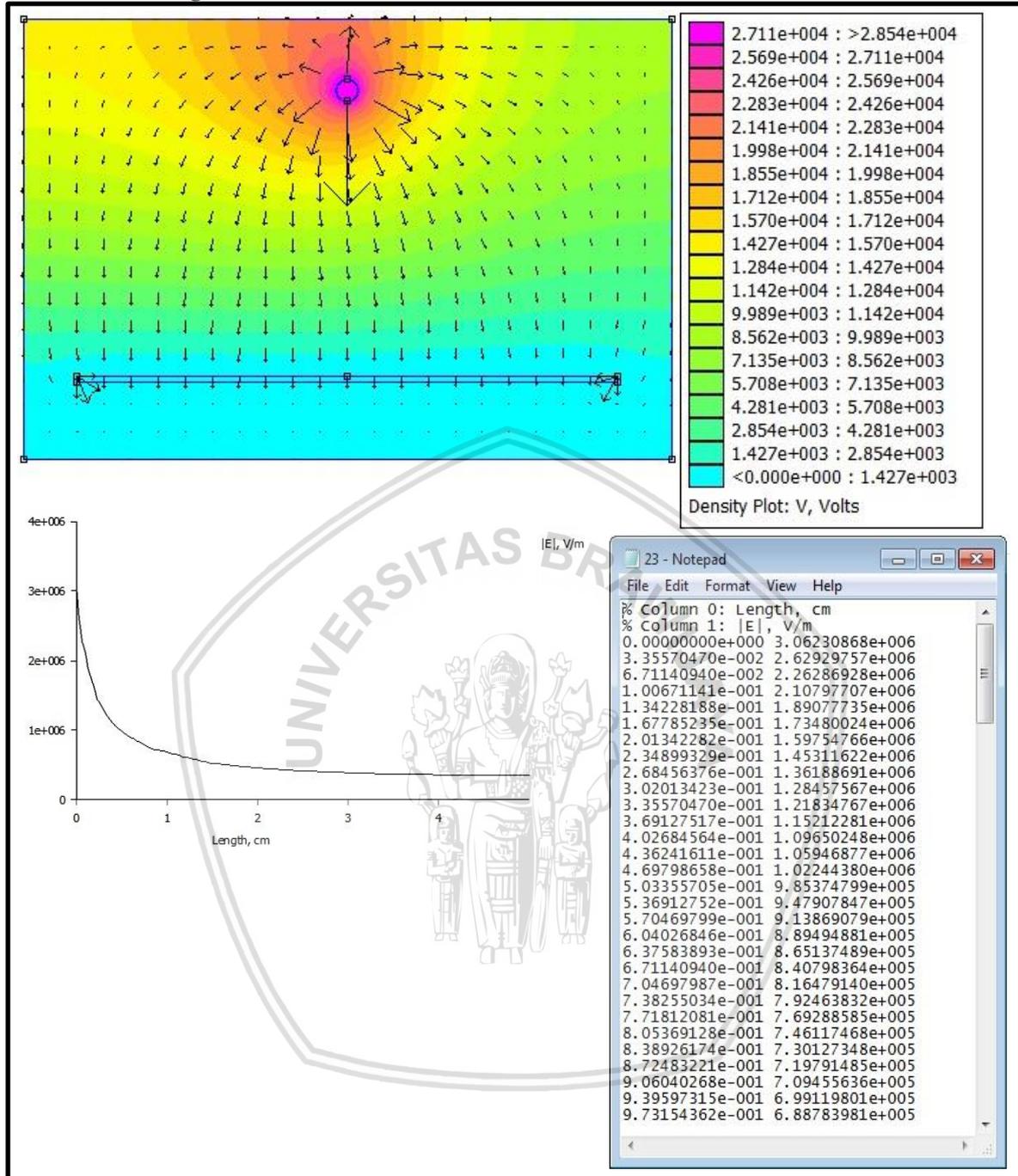
Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran Tegangan pada Polaritas Positif dengan Jarak Sela 5 cm

No	Jarak sela S (cm)	Polaritas positif			Waktu (menit)
		$U_c$ (kV)	$U_d$ (kV)	$U_c$ (kV)	
1	5	28,54	41	33,10	4
2				30,70	
3				29,35	

Sumber: Hasil Pengujian

Pada Tabel 4.3 dijelaskan bahwa, besar tegangan  $U_c$  adalah 28,54 kV dan pada tegangan tembus  $U_d$  diperoleh sebesar 41 kV. Sedangkan pada *range* tegangan antara  $U_c$  dan  $U_d$  didapatkan tiga sampel tegangan yaitu 29,35 kV , 30,70 kV dan 33,10 kV

#### 4.4.2 Perhitungan Efisiensi Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm



Gambar 4. 4 Hasil Simulasi FEMM pada Tegangan 28,54 kV

Sumber: Hasil Simulasi

$$E_{maks} = 3,06230868 \cdot 10^6 \text{ V/m} = 30,6230868 \text{ kV/cm}$$

$$E_{rata-rata} = \frac{U_c}{d} = \frac{28,54}{5} = 5,708 \text{ kV/cm}$$

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maks}} \times 100\% = \frac{5,708}{30,6230868} \times 100\% = 18,63953179\%$$

Perhitungan efisiensi selanjutnya diletakkan pada lampiran 1

#### 4.4.3 Analisis Perhitungan Energi Kinetik Partikel Bermuatan Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm

Dari data diatas setelah mengetahui tegangan pada setiap pengukuran, langkah selanjutnya adalah perhitungan energi kinetik partikel bermuatan.

Perhitungan energi kinetik partikel bermuatan pada polaritas positif dengan jarak sela 5 cm dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Tegangan (U) = 0 kV
- Tegangan korona (U<sub>c</sub>) = 28,54 kV
- Tegangan korona ke-1 (U<sub>c1</sub>) = 29,35 kV
- Tegangan korona ke-2 (U<sub>c2</sub>) = 30,70 kV
- Tegangan korona ke-3 (U<sub>c3</sub>) = 33,1 kV
- Tegangan tembus (U<sub>d</sub>) = 41 kV

Dengan menggunakan formula kecepatan elektron pada persamaan (2.17) dan formula energi kinetik pada persamaan (2.11) nilai energi kinetik partikel bermuatan pada pengukuran ke-1 adalah

$$v_e(U_{c1}) = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot \lambda \cdot V}{h \cdot d \cdot m_e}} \text{ m/s}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 6,535 \cdot 10^{-8} \times 29350}{0,1864 \times 0,05 \times 1,67 \cdot 10^{-27}}} = 6279,732 \text{ m/s}$$

$$U(U_{c1}) = eV = \frac{1}{2} m_e v_e^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 1,67 \cdot 10^{-27} \times (6279,732^2)$$

$$= 3,293 \cdot 10^{-20} \text{ Joule} = 0,2055 \text{ eV}$$

Untuk perhitungan data yang lebih lengkap dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

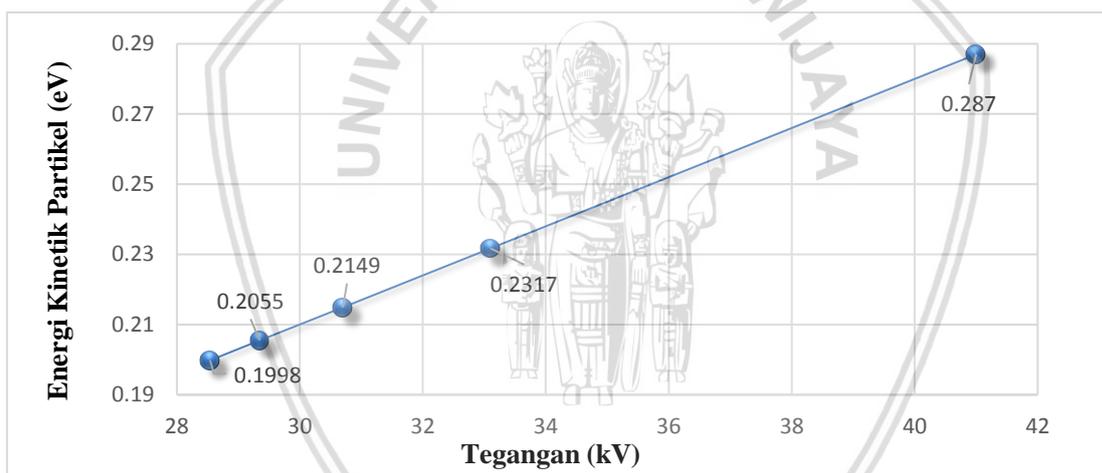
Tabel 4. 4 Perhitungan Energi Kinetik dengan Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm

No	Jenis Tegangan	Tegangan (kV)	Kecepatan Elektron (m/s)	Energi Kinetik Partikel (eV)
1	U	0,00	0,000	0,0000
2	U <sub>c</sub>	28,54	6192,472	0,1998
3	U <sub>c1</sub>	29,35	6279,732	0,2055
4	U <sub>c2</sub>	30,70	6422,531	0,2149
5	U <sub>c3</sub>	33,10	6668,851	0,2317
6	U <sub>d</sub>	41,00	7422,137	0,2870

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan data pada Tabel 4.4 dapat diamati perhitungan energi kinetik partikel bermuatan pada elektroda plat dengan polaritas positif dan jarak sela 5 cm bahwa, tegangan korona mulai muncul pada tegangan 28,54 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 6192,472 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,1998 eV. Untuk  $U_{c1}$  besar tegangan 29,35 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 6279,732 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2055 eV. Pada  $U_{c2}$  besar tegangan 30,70 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 6422,531 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2149 eV.  $U_{c3}$  besar tegangan 33,10 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 6668,851 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2317 eV. Sedangkan energi kinetik pada saat mencapai tegangan tembus diperoleh sebesar 0,2870 eV dengan besar tegangan tembus sebesar 41 kV dan kecepatan elektron sebesar 7422,137 m/s

Berdasarkan Tabel 4.4 maka dapat dibuat grafik hubungan antara energi kinetik terhadap tegangan yang ditunjukkan pada Gambar 4.5



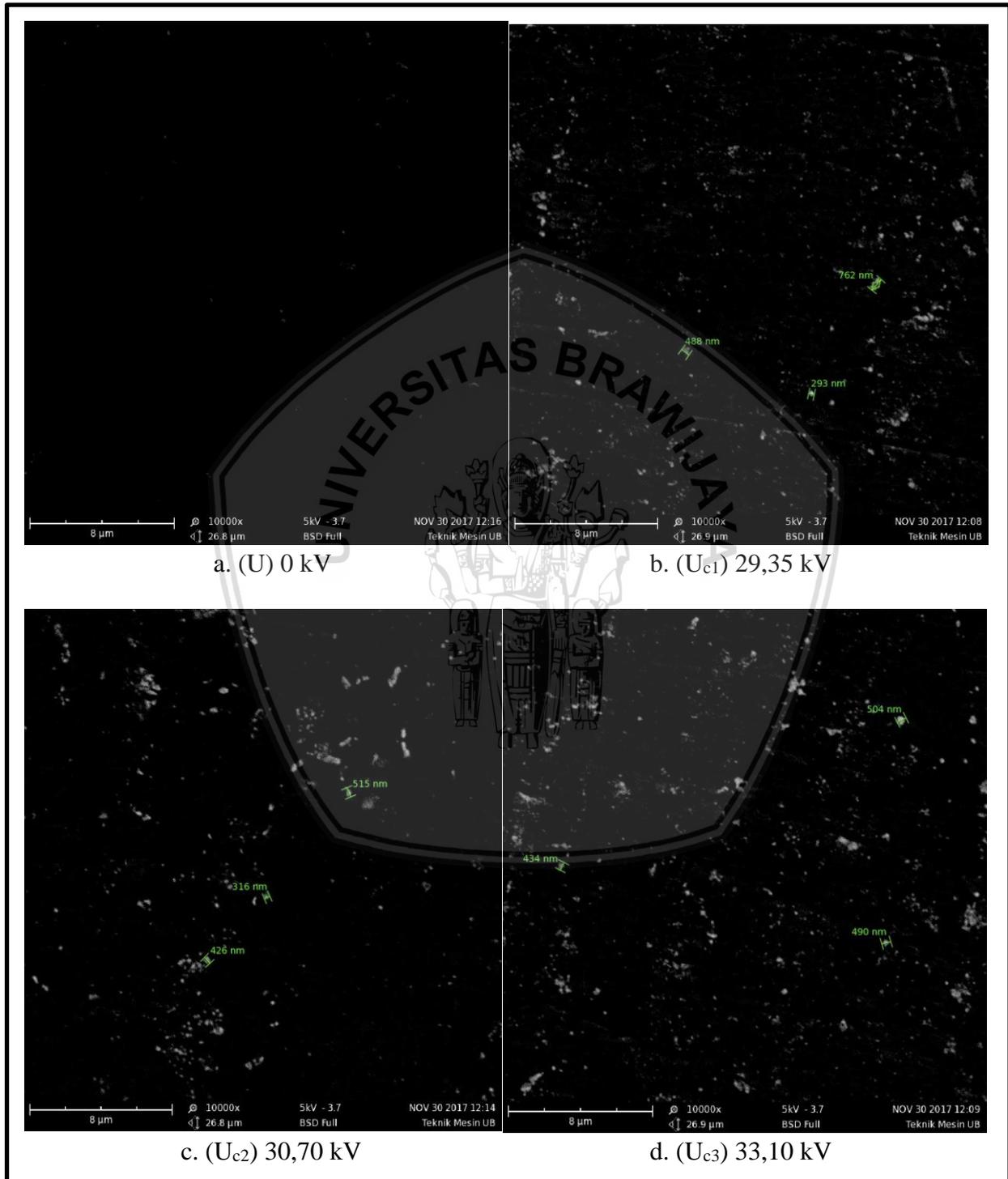
Gambar 4. 5 Grafik Energi Kinetik Partikel Bermuatan pada Setiap Tegangan pada Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm

Sumber: Hasil Perhitngan

Dari grafik pada Gambar 4.5 dapat diamati bahwa kenaikan secara linier terjadi pada energi kinetik partikel bermuatan ( $E_k$ ) dari tegangan korona mulai muncul sampai tegangan tembus. Hal ini dikarenakan perubahan tegangan mempengaruhi energi kinetik partikel bermuatan. Semakin tinggi tegangan yang diberikan maka semakin tinggi pula energi kinetik partikel bermuatan.

#### 4.4.4 Hasil Gambar *Scanning Electron Microscope (SEM)* Polaritas Positif dan Jarak Sela 5 cm

Pengujian dan pengambilan gambar *scanning electron microscope* dilakukan dengan memotong bagian yang di uji atau *spesimen* dengan ukuran 1 cm<sup>2</sup>. Perbesaran yang digunakan untuk melihat mikrostruktur permukaan elektroda plat ini adalah 10000 kali.



Gambar 4. 6 Hasil SEM dengan Polaritas Positif dan Jarak 5 cm

Sumber: Hasil Pengujian

Berdasarkan data pada Gambar 4.6 dapat diamati gambar hasil *Scanning electron microscope* pada elektroda plat dengan polaritas positif dan jarak sela 5 cm bahwa,

- Pada Gambar 4.6a yaitu tanpa diberi tegangan 0 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$ . menunjukkan bahwa gambar mikrostruktur permukaan elektroda plat tidak tampak persebaran tumbukan muatan sehingga permukaan yang dihasilkan juga tampak lebih halus dan merata
- Pada Gambar 4.6b yaitu pada tegangan korona ( $U_{c1}$ ) dengan tegangan 29,35 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan bahwa mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan positif yang tersebar. Ukuran diameter partikel yang menumbuk pada permukaan memiliki ukuran 293 nm, 488 nm, 762 nm.
- Pada Gambar 4.6c yaitu pada tegangan korona ( $U_{c2}$ ) dengan tegangan 30,70 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan positif yang tersebar merata. Ukuran diameter partikel yang menumbuk pada permukaan memiliki ukuran 316 nm, 426 nm, 515 nm.
- Pada Gambar 4.6d yaitu pada tegangan korona ( $U_{c3}$ ) dengan tegangan 33,10 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan positif yang tersebar merata dan memiliki diameter tumbukan yang lebih besar. Ukuran diameter partikel yang menumbuk pada permukaan memiliki ukuran 434 nm, 490 nm, 504 nm.

#### 4.5 Pengujian Pengaruh Bombardir dengan Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm

##### 4.5.1 Data Hasil Pengujian Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm

Pengambilan data pengujian pengaruh bombardir dilakukan kondisi ruangan laboratorium dengan tekanan sebesar 954 milibar dan suhu udara 15°C. Pengukuran pertama yang dilakukan yaitu mencari tegangan awal korona ( $U_c$ ) kemudian dilanjutkan sampai tegangan tembus ( $U_d$ ).setelah itu mengambil *range* tegangan antara tegangan awal korona ( $U_c$ ) dan dan tegangan tembus ( $U_d$ ) sebanyak 3 kali. Setiap satu kali pengukuran dilakukan pergantian elektroda plat guna untuk melihat struktur permukaan akibat pengaruh bombardir partikel bermuatan.

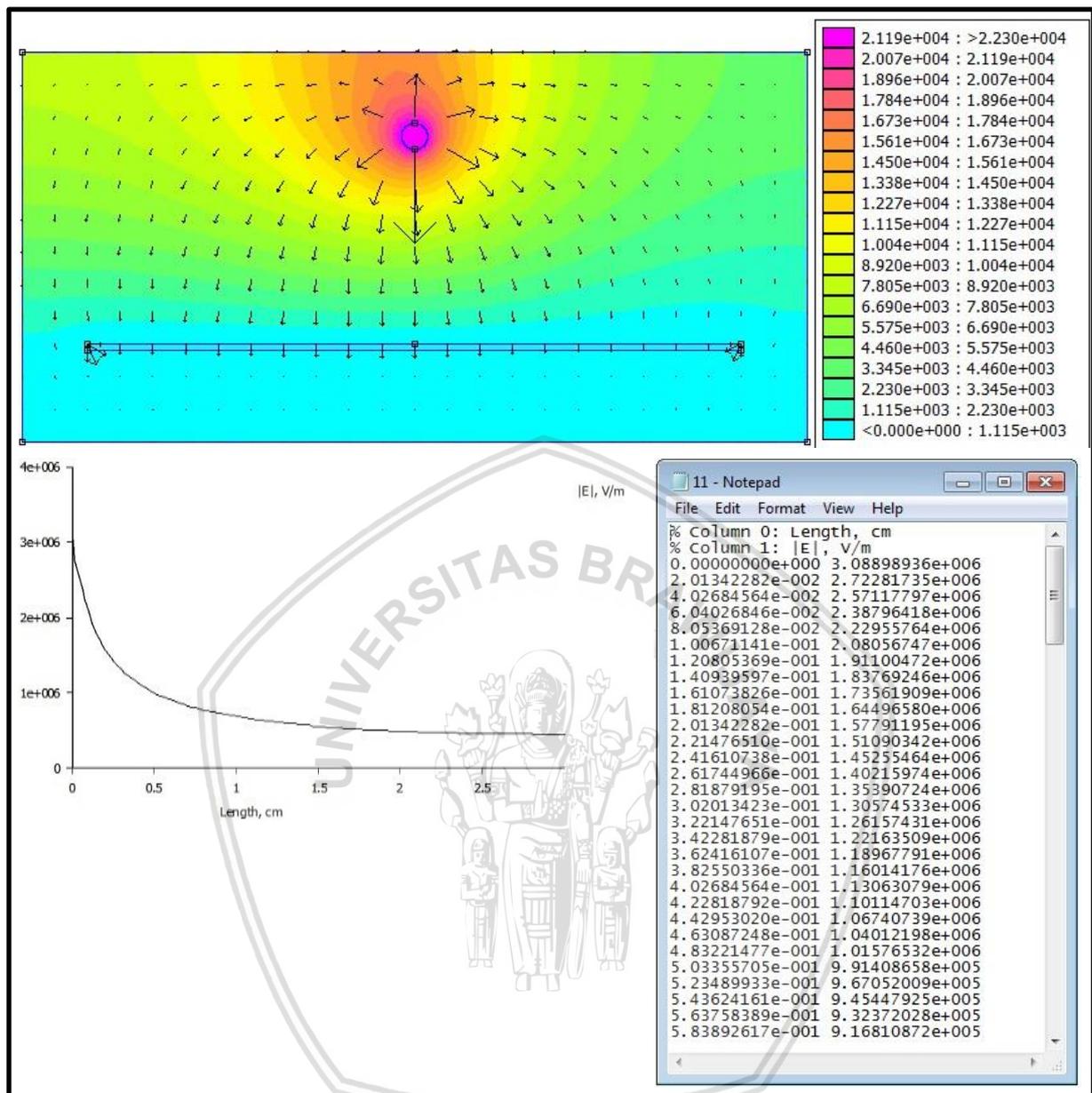
Tabel 4. 5 Hasil Pengukuran Tegangan pada Polaritas Negatif dengan Jarak Sela 3 cm

No	Jarak sela S (cm)	Polaritas negatif			Waktu (menit)
		$U_c$ (kV)	$U_d$ (kV)	$U_c$ (kV)	
1	3	22,30	25,90	23,80	4
2				23,20	
3				22,40	

Sumber: Hasil Pengujian

Pada Tabel 4.5 dijelaskan bahwa, besar tegangan  $U_c$  adalah 22,30 kV dan pada tegangan tembus  $U_d$  diperoleh sebesar 25,90 kV. Sedangkan pada *range* tegangan antara  $U_c$  dan  $U_d$  didapatkan tiga sempel tegangan yaitu 22,40 kV , 23,20 kV dan 23,80 kV.

#### 4.5.2 Perhitungan Efisiensi Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm



Gambar 4. 7 Hasil Simulasi FEMM pada Tegangan 22,30 kV

Sumber: Hasil Simulasi

$$E_{maks} = 3,08898936 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

$$= 30,8898936 \text{ kV/cm}$$

$$E_{rata-rata} = \frac{U_c}{d} = \frac{22,30}{3} = 7,43 \text{ kV/cm}$$

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maks}} \times 100\% = \frac{7,43}{30,8898936} \times 100\% = 24,05317447\%$$

Perhitungan efisiensi selanjutnya diletakkan pada lampiran 1

### 4.5.3 Analisis Perhitungan Energi Kinetik Partikel Bermuatan Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm

Dari data diatas setelah mengetahui tegangan pada setiap pengukuran, langkah selanjutnya adalah perhitungan energi kinetik partikel bermuatan.

Perhitungan energi kinetik partikel bermuatan pada polaritas negatif dengan jarak sela 3 cm dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Tegangan korona ( $U_c$ ) = 22,30 kV
- Tegangan korona ke-1 ( $U_{c1}$ ) = 22,40 kV
- Tegangan korona ke-2 ( $U_{c2}$ ) = 23,20 kV
- Tegangan korona ke-3 ( $U_{c3}$ ) = 23,80 kV
- Tegangan tembus ( $U_d$ ) = 25,90 kV

Dengan menggunakan formula kecepatan elektron pada persamaan (2.17) dan formula energi kinetik pada persamaan (2.11) nilai energi kinetik partikel bermuatan pada pengukuran ke-1 adalah

$$\begin{aligned}
 v_e(U_{c1}) &= \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot \lambda \cdot V}{h \cdot d \cdot m_e}} \text{ m/s} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 6,535 \cdot 10^{-8} \times 22400}{0,2404 \times 0,03 \times 9,11 \cdot 10^{-31}}} \\
 &= 267000,668 \text{ m/s} \\
 U(U_{c1}) &= eV = \frac{1}{2} m_e v_e^2 \\
 &= \frac{1}{2} \times 9,11 \cdot 10^{-31} \times (267000,668^2) \\
 &= 3,247 \cdot 10^{-20} \text{ Joule} = 0,2026 \text{ eV}
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan data yang lebih lengkap dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

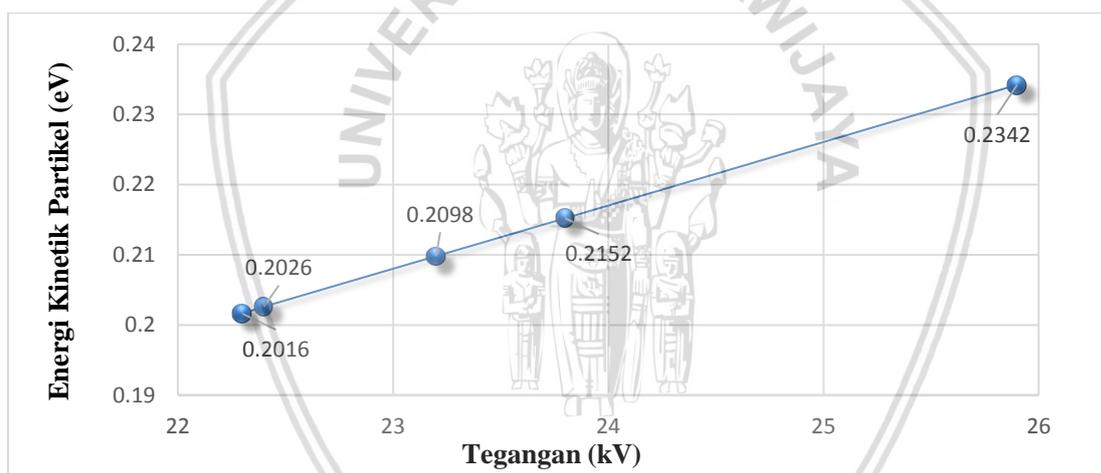
Tabel 4. 6 Perhitungan Energi Kinetik dengan Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm

No	Jenis tegangan	Tegangan (kV)	Kecepatan elektron (m/s)	Energi kinetik partikel (eV)
1	$U_c$	22,30	266344,786	0,2016
2	$U_{c1}$	22,40	267000,668	0,2026
3	$U_{c2}$	23,20	271663,932	0,2098
4	$U_{c3}$	23,80	275152,908	0,2152
5	$U_d$	25,90	287030,541	0,2342

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan data pada Tabel 4.6 dapat diamati perhitungan energi kinetik partikel bermuatan pada elektroda plat dengan polaritas negatif dan jarak sela 3 cm bahwa, tegangan korona mulai muncul pada tegangan 22,30 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 266344,786 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2016 eV. Untuk  $U_{c1}$  besar tegangan 22,40 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 267000,668 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2026 eV. Pada  $U_{c2}$  besar tegangan 23,20 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 271663,932 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2098 eV.  $U_{c3}$  besar tegangan 23,80 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 275152,908 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2152 eV. Sedangkan energi kinetik pada saat mencapai tegangan tembus diperoleh sebesar 0,2342 eV dengan besar tegangan tembus sebesar 25,90 kV dan kecepatan elektron sebesar 287030,541 m/s

Berdasarkan Tabel 4.6 maka dapat dibuat grafik hubungan antara energi kinetik terhadap tegangan yang ditunjukkan pada Gambar 4.8.



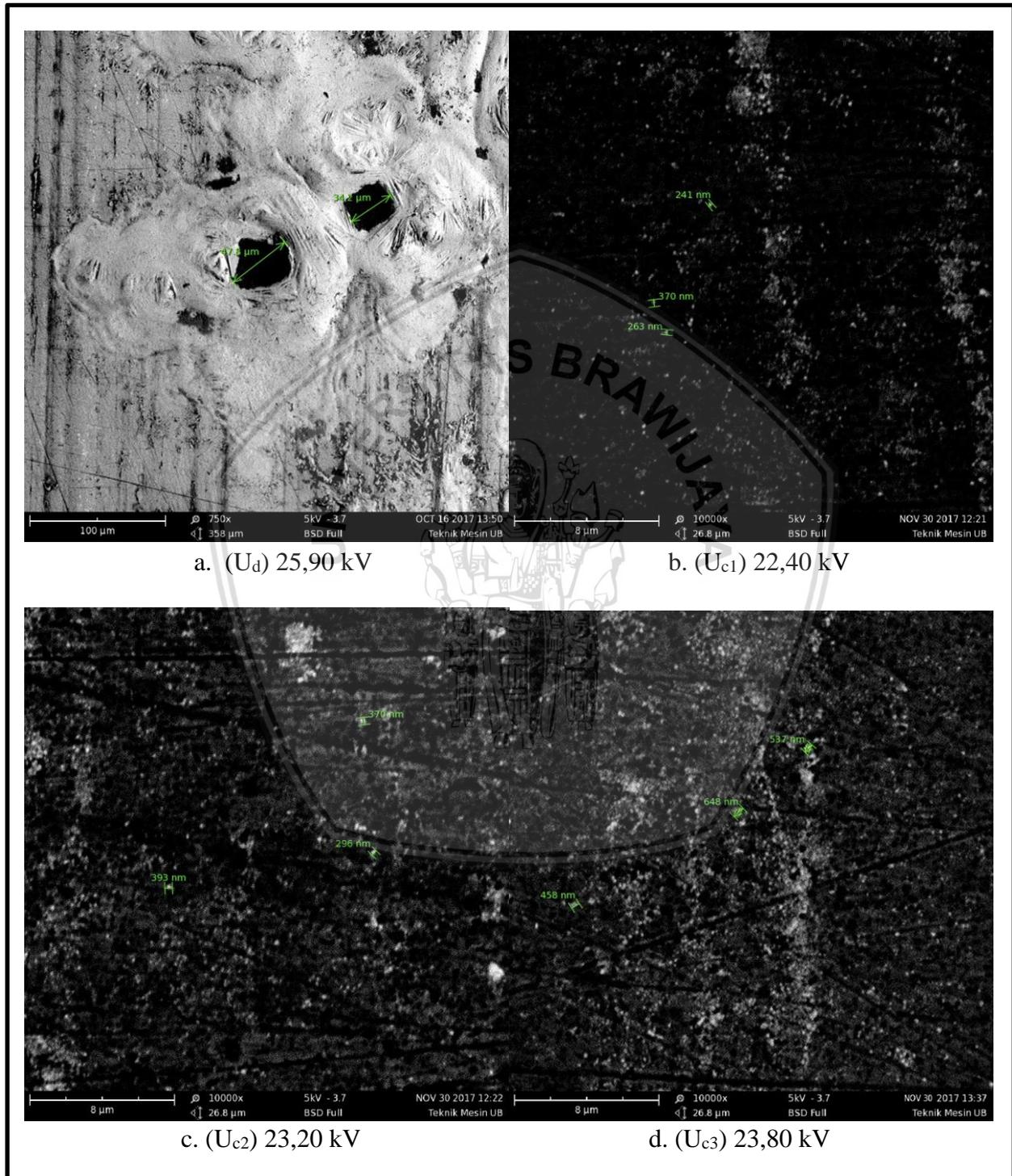
Gambar 4. 8 Grafik Energi Kinetik Partikel Bermuatan pada Setiap Tegangan pada Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari grafik pada Gambar 4.8 dapat diamati bahwa kenaikan secara linier terjadi pada energi kinetik partikel bermuatan ( $E_k$ ) dari tegangan korona mulai muncul sampai tegangan tembus. Hal ini dikarenakan perubahan tegangan mempengaruhi energi kinetik partikel bermuatan. Semakin tinggi tegangan yang diberikan maka semakin tinggi pula energi kinetik partikel bermuatan.

#### 4.5.4 Hasil Gambar *Scanning Electron Microscope (SEM)* Polaritas Negatif dan Jarak Sela 3 cm

Pengujian dan pengambilan gambar *scanning electron microscope* dilakukan dengan memotong bagian yang di uji atau *spesimen* dengan ukuran 1 cm<sup>2</sup>. Perbesaran yang digunakan untuk melihat mikrostruktur permukaan elektroda plat ini adalah 10000 kali.



Gambar 4. 9 Hasil SEM dengan Polaritas Negatif dan Jarak 3 cm

Sumber: Hasil Pengujian

Berdasarkan data pada Gambar 4.9 dapat diamati gambar hasil *Scanning electron microscope* pada elektroda plat dengan polaritas negatif dan jarak sela 3 cm bahwa,

- pada Gambar 4.9a yaitu pada tegangan tembus ( $U_d$ ) dengan tegangan 25,90 kV menunjukkan bahwa mikrostruktur permukaan elektroda plat ini membentuk suatu cekungan lubang yang lebih banyak dibandingkan dengan tegangan tembus polaritas positif. diameter lubang tembus ini memiliki ukuran 34,2  $\mu\text{m}$  dan 47,6  $\mu\text{m}$ . Hal ini menunjukkan bahwa teori bahwa muatan negatif atau elektron memiliki bentuk ukuran yang lebih kecil dibanding muatan positif. Selain itu kecepatan elektron untuk bergerak juga semakin cepat dikarenakan massa elektron lebih kecil dibanding massa ion positif atau muatan positif.
- Pada Gambar 4.9b yaitu pada Tegangan korona ( $U_{c1}$ ) dengan tegangan 22,40 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan bahwa mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan negatif yang tersebar merata dan banyak. Ukuran diameter partikel yang menunbuk pada permukaan memiliki ukuran 241 nm, 263 nm, 370 nm.
- Pada Gambar 4.9c yaitu pada Tegangan korona ( $U_{c2}$ ) dengan tegangan 23,20 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan negatif yang tersebar merata dan banyak. Ukuran diameter partikel yang menunbuk pada permukaan memiliki ukuran 296 nm, 370 nm, 393 nm.
- Pada Gambar 4.9d yaitu pada Tegangan korona ( $U_{c3}$ ) dengan tegangan 23,80 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan negatif yang tersebar merata dan banyak. Ukuran diameter partikel yang menunbuk pada permukaan memiliki ukuran 458 nm, 537 nm, 648 nm.

#### 4.6 Pengujian Pengaruh Bombardir dengan Polaritas Negatif dan Jarak Sela 5 cm

##### 4.6.1 Data Hasil Pengujian Polaritas Negatif dan Jarak Sela 5 cm

Pengambilan data pengujian pengaruh bombardir dilakukan kondisi ruangan laboratorium dengan tekanan sebesar 954 milibar dan suhu udara 15°C. Pengukuran pertama yang dilakukan yaitu mencari tegangan awal korona ( $U_c$ ) kemudian dilanjutkan sampai tegangan tembus ( $U_d$ ).setelah itu mengambil *range* tegangan antara tegangan awal korona ( $U_c$ ) dan dan tegangan tembus ( $U_d$ ) sebanyak 3 kali. Setiap satu kali pengukuran dilakukan pergantian elektroda plat guna untuk melihat struktur permukaan akibat pengaruh bombardir partikel bermuatan.

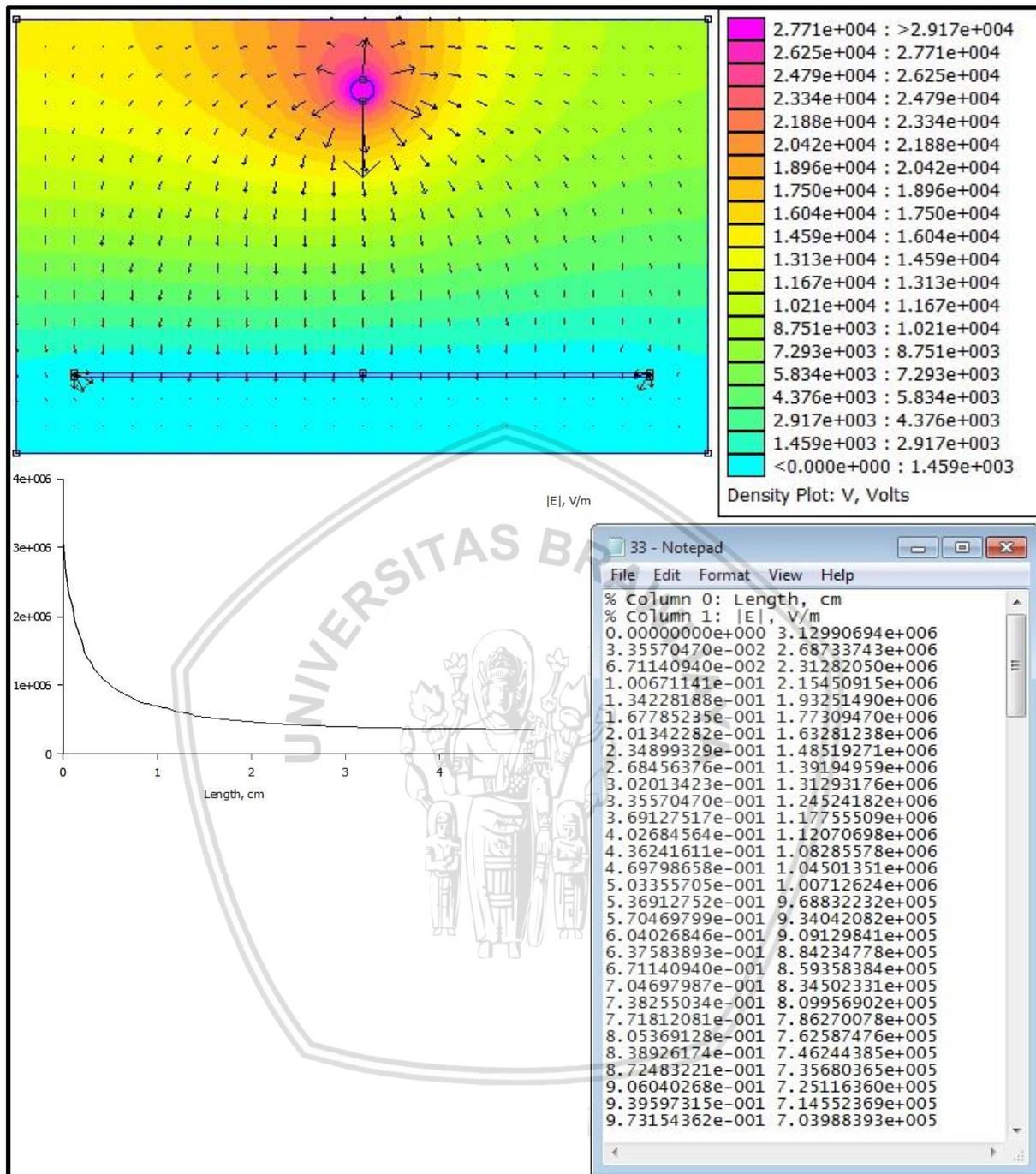
Tabel 4. 7 Hasil Pengukuran Tegangan pada Polaritas Negatif dengan Jarak Sela 5 cm

No	Jarak sela S (cm)	Polaritas negatif			Waktu (menit)
		$U_c$ (kV)	$U_d$ (kV)	$U_c$ (kV)	
1	5	29,17	40	33,74	4
2				32,75	
3				29,75	

Sumber: Hasil Pengujian

Pada Tabel 4.7 dijelaskan bahwa, besar tegangan  $U_c$  adalah 29,17 kV dan pada tegangan tembus  $U_d$  diperoleh sebesar 40 kV. Sedangkan pada *range* tegangan antara  $U_c$  dan  $U_d$  didapatkan tiga sempel tegangan yaitu 29,75 kV , 32,75 kV dan 33,74 kV.

#### 4.6.2 Perhitungan Efisiensi Polaritas Negatif dan Jarak Sela 5 cm



Gambar 4. 10 Hasil Simulasi FEMM pada Tegangan 22,30 kV

Sumber: Hasil Simulasi

$$E \text{ maks} = 3,12990694 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

$$= 31,2990694 \text{ kV/cm}$$

$$E \text{ rata-rata} = \frac{U_c}{d} = \frac{29,17}{5} = 5,834 \text{ kV/cm}$$

$$\eta = \frac{E \text{ rata-rata}}{E \text{ maks}} \times 100\% = \frac{5,834}{31,2990694} \times 100\% = 18,63953182\%$$

Perhitungan efisiensi selanjutnya diletakkan pada lampiran 1

#### 4.6.3 Analisis Perhitungan Energi Kinetik Partikel Bermuatan Polaritas Negatif dan Jarak Sela 5 cm

Dari data diatas setelah mengetahui tegangan pada setiap pengukuran, langkah selanjutnya adalah perhitungan energi kinetik partikel bermuatan

Perhitungan energi kinetik partikel bermuatan pada polaritas negatif dengan jarak sela 5 cm dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Tegangan korona ( $U_c$ ) = 29,17 kV
- Tegangan korona ke-1 ( $U_{c1}$ ) = 29,75 kV
- Tegangan korona ke-2 ( $U_{c2}$ ) = 32,75 kV
- Tegangan korona ke-3 ( $U_{c3}$ ) = 33,74 kV
- Tegangan tembus ( $U_d$ ) = 40 kV

Dengan menggunakan formula kecepatan elektron pada persamaan (2.17) dan formula energi kinetik pada persamaan (2.11) nilai energi kinetik partikel bermuatan pada pengukuran ke-1 adalah

$$\begin{aligned}
 v_e(U_{c1}) &= \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot \lambda \cdot V}{h \cdot d \cdot m_e}} \text{ m/s} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 6,535 \cdot 10^{-8} \times 29750}{0,1864 \times 0,05 \times 9,11 \cdot 10^{-31}}} \\
 &= 270694,592 \text{ m/s} \\
 U(U_{c1}) &= eV = \frac{1}{2} m_e v_e^2 \\
 &= \frac{1}{2} \times 9,11 \cdot 10^{-31} \times (270694,592^2) \\
 &= 3,337 \cdot 10^{-20} \text{ Joule} = 0,2083 \text{ eV}
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan data yang lebih lengkap dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

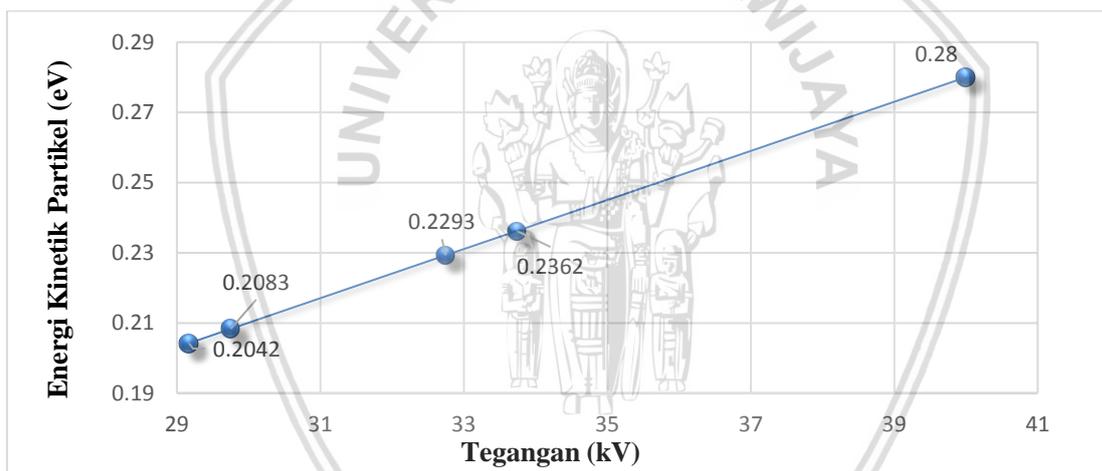
Tabel 4. 8 Perhitungan Energi Kinetik pada Polaritas Negatif dengan Jarak Sela 5 cm

No	Jenis Tegangan	Tegangan (kV)	Kecepatan Elektron (m/s)	Energi Kinetik Partikel (eV)
1	$U_c$	29,17	268042,900	0,2042
2	$U_{c1}$	29,75	270694,592	0,2083
3	$U_{c2}$	32,75	284015,307	0,2293
4	$U_{c3}$	33,74	288276,097	0,2362
5	$U_d$	40,00	313881,768	0,2800

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan data pada Tabel 4.8 dapat diamati perhitungan energi kinetik partikel bermuatan pada elektroda plat dengan polaritas negatif dan jarak sela 5 cm bahwa, tegangan korona mulai muncul pada tegangan 29,17 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 268042,900 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2042 eV. Untuk  $U_{c1}$  besar tegangan 29,75 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 270694,592 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2083 eV. Pada  $U_{c2}$  besar tegangan 32,75 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 284015,307 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2293 eV.  $U_{c3}$  besar tegangan 33,74 kV memiliki kecepatan elektron sebesar 288276,097 m/s dan diperoleh energi kinetik sebesar 0,2362 eV. Sedangkan energi kinetik pada saat mencapai tegangan tembus diperoleh sebesar 0,2800 eV dengan besar tegangan tembus sebesar 40 kV dan kecepatan elektron sebesar 313881,768 m/s

Berdasarkan Tabel 4.8 maka dapat dibuat grafik hubungan antara energi kinetik terhadap tegangan yang ditunjukkan pada Gambar 4.11.



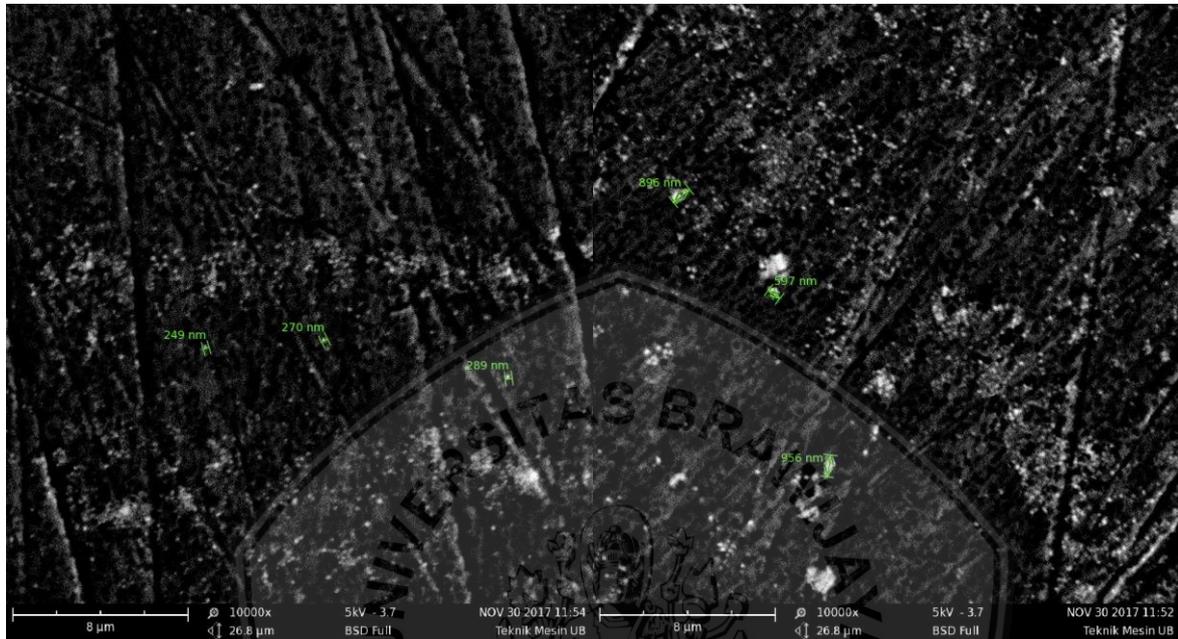
Gambar 4. 11 Grafik Energi Kinetik Partikel Bermuatan pada Setiap Tegangan pada Polaritas Negatif dan Jarak Sela 5 cm

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari grafik pada Gambar 4.11 dapat diamati bahwa kenaikan secara linier terjadi pada energi kinetik partikel bermuatan ( $E_k$ ) dari tegangan korona mulai muncul sampai tegangan tembus. Hal ini dikarenakan perubahan tegangan mempengaruhi energi kinetik partikel bermuatan. Semakin tinggi tegangan yang diberikan maka semakin tinggi pula energi kinetik partikel bermuatan.

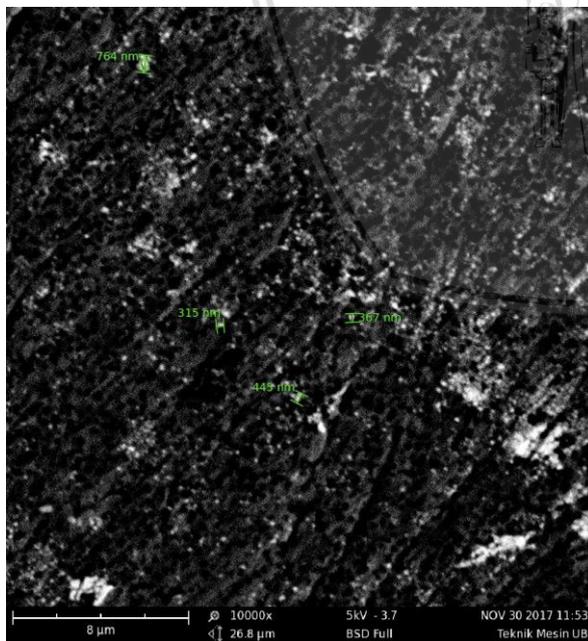
#### 4.6.4 Hasil Gambar *Scanning Electron Microscope (SEM)* Polaritas Negatif dan Jarak Sela 5 cm

Pengujian dan pengambilan gambar *scanning electron microscope* dilakukan dengan memotong bagian yang di uji atau *spesimen* dengan ukuran 1 cm<sup>2</sup>. Perbesaran yang digunakan untuk melihat mikrostruktur permukaan elektroda plat ini adalah 10000 kali



a. ( $U_{c1}$ ) 29,75 kV

b. ( $U_{c2}$ ) 32,75 kV



c. ( $U_{c3}$ ) 33,74 kV

Gambar 4. 12 Hasil SEM dengan Polaritas Negatif dan Jarak 5 cm

Sumber: Hasil Pengujian

Berdasarkan data pada Gambar 4.12 dapat diamati gambar hasil *Scanning electron microscope* pada elektroda plat dengan polaritas negatif dan jarak sela 5 cm bahwa,

- Pada Gambar 4.12a yaitu pada Tegangan korona ( $U_{c1}$ ) dengan tegangan 29,75 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan bahwa mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan negatif yang tersebar merata dan banyak. Ukuran diameter partikel yang menunbuk pada permukaan memiliki ukuran 249 nm, 270 nm, 289 nm.
- Pada Gambar 4.12b yaitu pada Tegangan korona ( $U_{c2}$ ) dengan tegangan 32,75 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan negatif yang tersebar merata dan banyak. Ukuran diameter partikel yang menunbuk pada permukaan memiliki ukuran 315 nm, 367 nm, 445 nm.
- Pada Gambar 4.12c yaitu pada Tegangan korona ( $U_{c3}$ ) dengan tegangan 33,74 kV dengan lebar fokus gambar 8  $\mu\text{m}$  menunjukkan mikrostruktur permukaan elektroda plat ini memiliki bentuk gambar tumbukan muatan negatif yang tersebar merata dan banyak. Ukuran diameter partikel yang menunbuk pada permukaan memiliki ukuran 597 nm, 896 nm dan 956 nm.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Dari data hasil penelitian dan analisis pengaruh bombardir partikel bermuatan pada permukaan plat menggunakan HVDC, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Energi kinetik partikel bermuatan pada level kenaikan tegangan cenderung naik secara linier baik pada perbedaan polaritas tegangan dan perbedaan jarak sela.
  - a. Pada percobaan polaritas positif dan jarak sela 3 cm energi kinetik mulai muncul pada tegangan korona sampai tegangan tembus di dapatkan 0,2260 eV, 0,2277 eV, 0,2333 eV, 0,2369 eV, 0,2440 eV. Sedangkan pada polaritas negatif dengan jarak sela yang sama didapatkan energi kinetik 0,2016 eV, 0,2026 eV, 0,2098 eV, 0,2152 eV, 0,2342 eV.
  - b. Pada percobaan polaritas positif dan jarak sela 5 cm energi kinetik mulai muncul pada tegangan korona sampai tegangan tembus di dapatkan 0,1998 eV, 0,2055 eV, 0,2149 eV, 0,2317 eV, 0,2870 eV. Sedangkan pada polaritas negatif dengan jarak sela yang sama didapatkan energi kinetik 0,2042 eV, 0,2083 eV, 0,2293 eV, 0,2362 eV, 0,2800 eV.
2. Jarak sela mempengaruhi tingkat energi kinetik pada elektroda plat, semakin besar jarak sela maka energi kinetik yang didapat akan semakin besar. hal ini berlaku pada polaritas positif dan polaritas negatif.
3. Besar tegangan berpengaruh pada diameter banjir muatan. Semakin besar Tegangan yang diberikan, diameter partikel yang timbul pada mikrostruktur permukaan elektroda plat semakin besar. Sedangkan pada polaritas Terdapat perbedaan kondisi mikrostruktur permukaan elektroda plat antara tegangan polaritas positif dan tegangan polaritas negatif. Pada polaritas positif banjir bombardir muatan tidak terlalu banyak selain itu ukuran diameter partikel yang menembus pada elektroda plat lebih besar. besar diameter partikel pada tegangan tembus 27 kV adalah 116  $\mu\text{m}$ . Hal ini dikarenakan massa ion positif lebih besar dibanding elektron dan jumlah ion positif lebih banyak dibanding elektron. Sedangkan pada polaritas negatif banjir bombardir muatan lebih banyak dan ukuran diameter

lebih kecil. Besar diameter partikel pada tegangan tembus 25,90 kV adalah 34,2  $\mu\text{m}$  dan 47,6  $\mu\text{m}$ . Pada perbedaan jarak sela gambar mikrostruktur pada permukaan plat hampir tidak memiliki perbedaan.

## 5.2 Saran

Berdasarkan pada hasil penelitian yang telah dilakukan, ada beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah

1. Perlu diadakan penelitian lebih lanjut tentang aplikasinya pada permukaan elektroda.
2. Perlu dilakukan lebih lanjut dengan obyek uji dalam kondisi di dalam zat cair sehingga dapat mengetahui secara jelas proses banjir muatan



## DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar.1983. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta Timur : Penerbit Ghalia Indonesia
- Bonggas.L. 2012. *Dasar Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi Edisi Kedua*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Bosco, Don. 2008. *Analisis Dan Simulasi Tegangan Awal Terbentuknya Korona Pada Model Kubikel*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia.
- C.L,Wadhwa.,2007., *High voltage engineering, second edition.*, New Delhi., New Age International
- Hayt, William H., Buck, Johan A., 2006., *Engineerring Electromagnetics, Seventh Edition.*, McGraw-Hill,.
- Kind, D. 1993. *Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Terjemahan K.T. Sirait. Bandung: Penerbit ITB.
- Kuffel, J., Zaengl, W.S., Kuffel, E., 2000., *High voltage engineering fundamental, second edition.*, Butterworth-Heinemann
- Li, Jianchao., 2018., JEOL JSM-7001F Scanning Electron Microscope  
<https://nanofabrication.unt.edu/jeol-jsm-7001f-scanning-electron-microscope>  
 (diakses pada tanggal 24 april 2017)
- Purnomo, Candra., 2009., *Material Cerdas* ., <https://materialcerdas.wordpress.com/teori-dasar/scanning-electron-microscopy/> (diakses pada tanggal 24 April 2017.)
- Zhang, Xu., Bian, Xingming., & Cui, Xiang. 2016. *Effect of positive DC corona discharge intensity on the variation of conductor surface conditions under contaminated environment*. Jurnal IEEE

