

**ANALISIS DAN SIMULASI TEGANGAN AWAL  
TERBENTUKNYA KORONA PADA MODEL  
KUBIKEL**

**SKRIPSI**

Oleh

**DON BOSCO**  
**04 03 03 034 9**



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GANJIL 2007/2008**

**ANALISIS DAN SIMULASI TEGANGAN AWAL  
TERBENTUKNYA KORONA PADA MODEL  
KUBIKEL**

**SKRIPSI**

Oleh

**DON BOSCO  
04 03 03 034 9**



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN  
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GANJIL 2007/2008**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

### **ANALISIS DAN SIMULASI TEGANGAN AWAL TERBENTUKNYA KORONA PADA MODEL KUBIKEL**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 7 Januari 2008

Don Bosco  
NPM. 0403030349

## **PENGESAHAN**

Skripsi dengan judul :

### **ANALISIS DAN SIMULASI TEGANGAN AWAL TERBENTUKNYA KORONA PADA MODEL KUBIKEL**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian skripsi. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 4 Januari 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 7 Januari 2008

Dosen Pembimbing,

Dr. Ir. Iwa Garniwa MK, MT  
NIP. 131 845 377

## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

**Dr. Ir. Iwa Garniwa M.K., M.T.**

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.

Don Bosco  
NPM 04 03 03 034 9  
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Iwa Garniwa MK, MT

## **ANALISIS DAN SIMULASI TEGANGAN AWAL TERBENTUKNYA KORONA PADA MODEL KUBIKEL**

### **ABSTRAK**

Korona adalah suatu peristiwa kegagalan listrik yang merupakan gejala awal terjadinya peristiwa *flashover* (lepas denyar). Aktivitas korona pada kubikel tegangan tinggi merupakan sumber utama terjadinya degradasi dan kegagalan pada isolasi. Peristiwa korona ini ditandai dengan adanya bunyi dengung, bau ozon, dan kilatan cahaya seragam pada permukaan elektroda. Pendeteksian terhadap korona pada kubikel dapat dilakukan dengan menganalisa bunyi dengung yang dihasilkan. Korona pada kubikel disebabkan karena adanya ketidakidealan pada celah udara yang memisahkan dua elektroda. Tegangan kritis awal terjadinya korona pada model kubikel dipengaruhi oleh beberapa hal seperti gradient tegangan, bentuk elektroda pada kubikel, jarak elektroda dengan badan kubikel, kelembaban udara, tekanan udara, dan kondisi suhu udara. Hal-hal tersebut menyebabkan ketidakseragaman medan pada elektroda sehingga dapat mempercepat terjadinya proses korona.

Dalam skripsi ini akan ditunjukkan simulasi dengan menggunakan MATLAB untuk menghitung tegangan kritis awal munculnya korona pada model kubikel. Hasil simulasi dibandingkan dengan hasil pengujian langsung di laboratorium. Dari hasil perbandingan diketahui bahwa simulasi sudah mewakili kondisi sebenarnya. Dengan menggunakan simulasi akan dibuktikan bahwa faktor bentuk elektroda sangat mempengaruhi besarnya tegangan kritis.

**Kata kunci : Korona, kubikel, tegangan kritis.**

Don Bosco  
NPM 04 03 03 034 9  
Electrical Engineering Department

Counsellor  
Dr. Ir. Iwa Garniwa MK, MT

**ANALYSIS AND SIMULATION THE INITIAL VOLTAGE OF CORONA  
AT CUBICLE MODEL**

**ABSTRACT**

Corona is electrical breakdown that constitute the beginning of flashover. The corona activity at high voltage cubicle is the main cause of degradation and isolation failure. Corona was showed by buzzing sound, ozone scent, and uniform purplish light at the electrode surfaces. Corona detection at cubicle can be done by analyze the buzzing sound. The corona at cubicle can be caused by non-ideal air gap that separate two electrodes. Critical voltage of corona at cubicle model was influenced by many things, such as voltage gradient, electrode form, gap between electrode and cubicle body, humidity, air pressure, and temperature. All of that matter can cause non-uniform electric field which can quicken corona phenomena.

This minithesis will showed how to approximate critical voltage of corona at cubicle model using simulation in MATLAB. The simulation result will be compared by the result of direct experiment at laboratory. The comparison result shows that the results in simulation represent the actual condition. Using the simulation will be proved that electrode shape influence the critical voltage of corona.

**Keywords : Corona, cubicle, critical voltage.**

## DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 TUJUAN PENULISAN	2
1.3 BATASAN MASALAH	2
1.4 SISTEMATIKA PENULISAN	3
BAB II DASAR TEORI	4
2.1 MEDAN LISTRIK	4
2.2 KEGAGALAN LISTRIK DALAM GAS	5
2.2.1 Ionisasi Dalam Udara atau Gas	5
2.2.2 Ionisasi Karena Tumbukan	6
2.2.3 Ionisasi Karena Cahaya	7
2.2.4 Ionisasi Karena Panas	8
2.2.5 Proses Ionisasi Sekunder	9
2.2.5.1 <i>Emisi Elektron karena Pengaruh Ion Positif</i>	9
2.2.5.2 <i>Emisi Elektron karena Photon</i>	9
2.3 MEKANISME KEGAGALAN DALAM GAS	10
2.3.1 Mekanisme Townsend	10



2.3.2 Mekanisme Streamer	13
2.4 PROSES TERJADINYA KORONA	15
2.5 JENIS KORONA	16
2.5.1 Korona Positif	16
2.5.2 Korona Negatif	16
2.6 KUBIKEL TEGANGAN MENENGAH	17
2.7 KORONA PADA KUBIKEL TEGANGAN MENENGAH	18
2.8 FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KORONA	18
2.8.1 Gradien Potensial	18
2.8.2 Bentuk Elektroda	20
2.8.3 Faktor Cuaca	21
2.8.4 Faktor Kelembaban Udara	21
2.9 TEKNIK SIMULASI PERHITUNGAN	22
2.9.1 Penurunan Persamaan Potensial dan Medan	22
2.9.2 Kondisi Batas Dari Elektroda Batang Bidang	25
2.9.3 Pemilihan Parameter	28
2.9.4 Matriks Perhitungan	28
<b>BAB III METODOLOGI PENGUJIAN</b>	<b>30</b>
3.1 PERALATAN PENGUJIAN	30
3.2 RANGKAIAN PENGUJIAN	31
3.2.1 Rangkaian Pengukuran Pada Gardu	31
3.2.2 Rangkaian Pengujian Pada Laboratorium	31
3.2.2.1 Rangkaian Pengujian dengan menggunakan mikrofon	32
3.2.2.2 Rangkaian Pengujian dengan menggunakan stetoskop	32
3.2.3 Algoritma Simulasi Perhitungan	33
3.3 PROSES PENGUJIAN	34
<b>BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS</b>	<b>35</b>
4.1 SIMULASI PERHITUNGAN TEGANGAN KRITIS PELEPASAN KORONA	35
4.2 HASIL SIMULASI DAN PENGUJIAN	37
4.2.1 Jarak Sela 15 cm	37
4.2.2 Jarak Sela 20 cm	40
4.2.3 Jarak Sela 25 cm	42
4.3 PENGARUH DIMENSI ELEKTRODA	46
4.3.1 Jari-jari 1 cm	47
4.3.2 Jari-jari 0.5 cm	47

4.3.3 Jari-jari 0.3 cm	48
4.4 PENGUKURAN PADA KUBIKEL GARDU TEGANGAN MENENGAH	49
4.4.1 Gardu 5	49
4.4.2 Gardu 6	52
4.4.3 Gardu 8	53
4.4.4 Gardu 11	55
BAB V KESIMPULAN	57
DAFTAR ACUAN	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	60

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Rangkaian uji ionisasi	6
<b>Gambar 2.2</b> Pelipatgandaan elektron	7
<b>Gambar 2.3</b> Grafik hubungan V vs I berdasarkan kriteria Townsend	12
<b>Gambar 2.4</b> Konstruksi kubikel tegangan menengah	17
<b>Gambar 2.5</b> Elektroda jarum	20
<b>Gambar 2.6</b> Elektroda batang	20
<b>Gambar 2.7</b> Elektroda bola	20
<b>Gambar 2.8</b> Elektroda bidang	20
<b>Gambar 2.9</b> Konfigurasi sela batang bidang	22
<b>Gambar 2.10</b> Simulasi metode bayangan untuk perhitungan	23
<b>Gambar 2.11</b> Koordinat titik dengan parameter c	26
<b>Gambar 3.1</b> Rangkaian pengujian pada gardu	31
<b>Gambar 3.2</b> Rangkaian pengujian pada laboratorium dengan menggunakan mikrofon	32
<b>Gambar 3.3</b> Rangkaian pengujian pada laboratorium dengan menggunakan stetoskop	32
<b>Gambar 3.4</b> Bagan algoritma simulasi perhitungan	33
<b>Gambar 4.1</b> Pemilihan koordinat titik elektroda batang	35
<b>Gambar 4.2</b> Grafik perbandingan tegangan kritis untuk $G = 15$ cm	39
<b>Gambar 4.3</b> Grafik perbandingan tegangan kritis untuk $G = 20$ cm	42
<b>Gambar 4.4</b> Grafik perbandingan tegangan kritis untuk $G = 25$ cm	45
<b>Gambar 4.5</b> Grafik perbandingan tegangan kritis untuk setiap jarak sela	46
<b>Gambar 4.6</b> Grafik perbandingan tegangan kritis dengan jari-jari elektroda pada jarak sela 15 cm	49
<b>Gambar 4.7</b> Grafik perbandingan spektrum frekuensi dengan tingkat kebisingan	51
<b>Gambar 4.8</b> Grafik perbandingan spektrum frekuensi dengan tingkat kebisingan	53
<b>Gambar 4.9</b> Grafik perbandingan spektrum frekuensi dengan tingkat kebisingan	54

**Gambar 4.10** Grafik perbandingan spektrum frekuensi dengan tingkat kebisingan

56



## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 2.1</b> Pemilihan nilai terbaik $z$ dan $A$	28
<b>Tabel 4.1</b> Hasil perekaman menggunakan mikrofon pada jarak sela 15 cm	37
<b>Tabel 4.2</b> Hasil perekaman menggunakan stetoskop pada jarak sela 15 cm	38
<b>Tabel 4.3</b> Hasil perekaman dengan menggunakan mikrofon pada jarak sela 20 cm	40
<b>Tabel 4.4</b> Hasil perekaman dengan menggunakan stetoskop pada jarak sela 20 cm	41
<b>Tabel 4.5</b> Hasil perekaman dengan menggunakan mikrofon pada jarak sela 25 cm	43
<b>Tabel 4.6</b> Hasil perekaman dengan menggunakan stetoskop pada jarak sela 25 cm	44
<b>Tabel 4.7</b> Spektrum suara pada gardu 5	50
<b>Tabel 4.8</b> Spektrum suara korona pada percobaan laboratorium dengan menggunakan mikrofon	50
<b>Tabel 4.9</b> Spektrum suara pada gardu 6	52
<b>Tabel 4.10</b> Spektrum suara pada gardu 8	54
<b>Tabel 4.11</b> Spektrum suara pada gardu 11	55

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>Lampiran 1</b> <i>Listing</i> Program Simulasi	60
<b>Lampiran 2</b> Data Hasil Pengujian Laboratorium	64
<b>Lampiran 3</b> Data Pengujian Gardu	68

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 LATAR BELAKANG**

Tegangan tinggi dalam dunia ketenagalistrikan adalah semua tegangan yang dianggap cukup tinggi oleh para teknisi listrik sehingga diperlukan pengujian dan pengukuran dengan tegangan tinggi yang semuanya bersifat khusus dan memerlukan teknik-teknik tertentu dimana gejala-gejala tegangan tinggi mulai terjadi. Batas yang menyatakan kapan suatu tegangan dapat dikatakan tinggi (High Voltage), dan kapan sudah dikategorikan sebagai tinggi sekali (Extra High Voltage) atau sangat tinggi sekali (Ultra High Voltage) berbeda-beda untuk setiap negara atau perusahaan tenaga listrik di negara-negara tersebut, dan biasanya tergantung kepada kemajuan tekniknya masing-masing. Salah satu faktor yang menentukan adalah tingginya tegangan transmisi yang dipakai. Hal ini tergantung kepada besarnya tenaga yang harus disalurkan dari pusat-pusat listrik ke pusat beban dan jarak yang harus ditempuh untuk memindahkan tenaga tersebut secara ekonomis.

Pada negara-negara maju, High Voltage (HV) dianggap mulai pada tegangan 20-30 kV, dan Extra High Voltage (EHV) kira-kira 220 kV, dan Ultra High Voltage (UHV) kira-kira pada 765 kV. Penerapan tegangan transmisi pada tegangan tinggi sekali (EHV) di dunia (220 kV ke atas) baru dimulai tidak lebih lama dari dua puluh lima tahun yang lalu. Bahkan di Amerika Serikat, pemasangan saluran dengan tegangan 345 kV baru dilaksanakan dua puluh tahun lalu.

Sebagaimana juga dalam bidang lain, maka pergerakan ke arah tegangan yang lebih tinggi ini menimbulkan persoalan baru. Persoalan ini sudah dijumpai pada tegangan yang lebih rendah, tetapi sekarang menjadi lebih terasa oleh karena

keinginan dari industri untuk menghasilkan rencana yang ekonomis dan dapat dipertanggungjawabkan. Persoalan itu menyangkut beberapa bidang seperti :

1. Adanya gejala korona yang makin menonjol.
2. Persoalan isolasi kawat.
3. Persoalan isolasi peralatan.

Tegangan tinggi yang diterapkan pada penghantar dapat mengakibatkan terjadinya korona, dimana medan listrik di sekitar kawat atau konduktor ditimbulkan oleh tegangan tinggi tersebut. Timbulnya korona pada suatu penghantar dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kondisi udara, keadaan permukaan kawat penghantar, jenis penghantar, dan diameter kawat penghantar.

Gejala korona yang terjadi mengakibatkan berbagai macam gangguan seperti gangguan radio, rugi saluran transmisi, suara bising, dan pada kondisi tegangan yang sangat tinggi akan muncul busur api, sedangkan bagi kubikel dapat menyebabkan kegagalan isolasi yang bisa mengakibatkan kubikel terbakar atau bahkan meledak.

## **1.2 TUJUAN PENULISAN**

Tujuan penulisan dari skripsi ini adalah untuk mensimulasikan besar tegangan kritis awalnya korona yang akan dibandingkan dengan hasil pengujian langsung untuk menentukan tingkat akurasi simulasi.

Dengan menggunakan metode simulasi akan dicari faktor-faktor utama yang menentukan besarnya tegangan kritis awal terbentuknya korona.

## **1.3 BATASAN MASALAH**

Skripsi ini membahas tentang tegangan kritis awal terjadinya korona pada kubikel, proses yang mempengaruhi besarnya tegangan kritis awal korona tersebut seperti dimensi elektroda, faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, tekanan udara. Pembahasan dilakukan dengan membuat simulasi menggunakan metode bayangan yang kemudian diimplementasikan dengan menggunakan program MATLAB.

Pada skripsi ini juga membahas tentang kondisi korona pada kubikel tegangan menengah yang dianalisa berdasarkan spektrum suara.



#### **1.4 SISTEMATIKA PENULISAN**

Skripsi ini dibagi menjadi lima bab. Pada bab pertama akan dijelaskan tentang pendahuluan yang meliputi latar belakang, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

Pada bab kedua akan dijelaskan mengenai korona mulai dari penyebabnya yaitu proses-proses ionisasi, mekanisme terjadinya, dan jenis korona yaitu korona positif dan korona negatif. Pada bab kedua ini akan dijelaskan juga tentang kubikel, faktor-faktor yang mempengaruhi korona pada kubikel seperti faktor bentuk permukaan elektroda, keadaan cuaca, dan keadaan kelembaban udara. Pada bab dua juga terdapat penurunan rumus untuk simulasi perhitungan tegangan kritis korona pada kubikel.

Pada bab ketiga akan dijelaskan mengenai metode-metode pengujian yang akan digunakan pada penelitian.

Pada bab keempat berisi data hasil pengujian dan juga analisis tentang setiap hasil pengujian.

Bab lima berisi kesimpulan dari bab-bab sebelumnya.

## BAB 2 DASAR TEORI

### 2.1 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 yaitu [1],

$$F_t = \frac{Q_1 Q_t}{4\pi \epsilon_0 R_t^2} a_{1t} \quad (2.1)$$

Jika gaya di atas dituliskan sebagai gaya yang dikerahkan pada setiap muatan listrik sebesar satu satuan, akan didapatkan [1],

$$\frac{F_t}{Q_t} = \frac{Q_1}{4\pi \epsilon_0 R_t^2} a_{1t} \quad (2.2)$$

Kuantitas di ruas kanan pada persamaan di atas merupakan fungsi yang besar dan arahnya ditentukan oleh  $Q_1$  dan vektor yang merepresentasikan jarak dari  $Q_1$  ke posisi muatan  $Q_t$ . Fungsi persamaan di atas disebut sebagai intensitas 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.

Hubungan antara tegangan yang diberikan dengan kuat medan adalah kuat medan berbanding lurus dengan gradien tegangan.

$$E = - \nabla \emptyset \quad (2.3)$$

dimana :

E = kekuatan medan listrik

$\emptyset$  = beda potensial / tegangan yang digunakan.

$$\nabla = a_x \frac{\partial}{\partial x} \phi + a_y \frac{\partial}{\partial y} \phi + a_z \frac{\partial}{\partial z} \phi$$

$a_x, a_y, a_z$  adalah komponen dari vektor posisi  $r$ .

$$r = a_x X + a_y Y + a_z Z$$

## 2.2 KEGAGALAN LISTRIK DALAM GAS

Bahan isolasi berfungsi untuk memisahkan dua penghantar listrik atau lebih yang bertegangan sehingga dapat mencegah terjadinya lompatan listrik (*flashover*) dan percikan listrik (*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 melewati 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.

### 2.2.1 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 [2]:

$$U = eV = \frac{1}{2} m_e v_e^2 \quad (2.4)$$

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

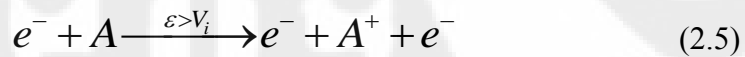
$V$  = beda potensial antara dua elektroda (volt)

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

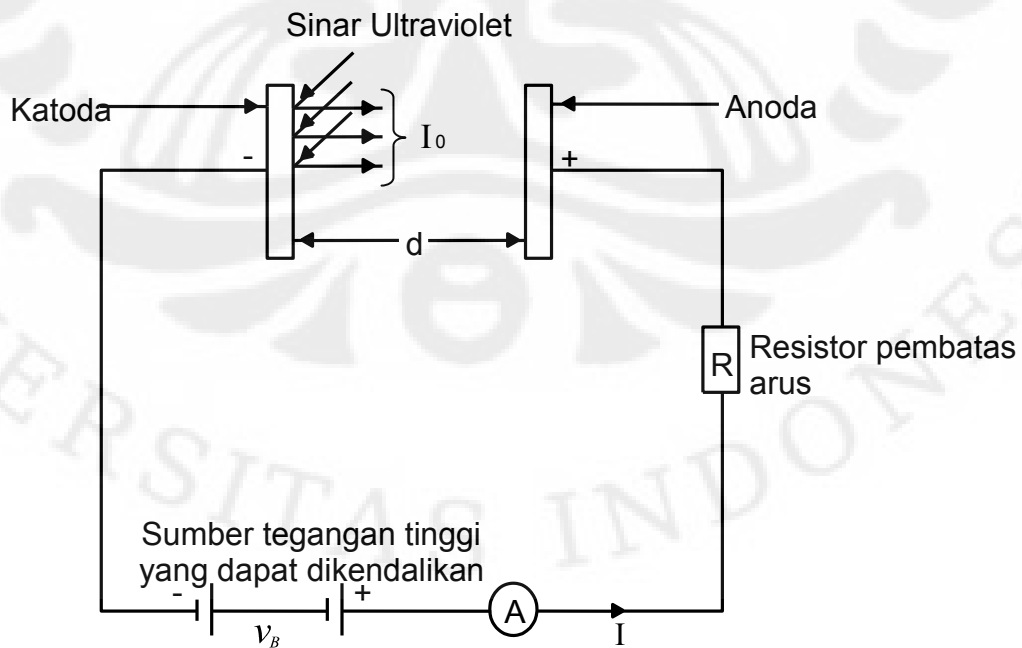
$V_e$  = kecepatan elektron (m/det)

### 2.2.2 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 2.1 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 ( $\epsilon$ ) meningkat sepanjang lintasan karena tumbukan dan telah melampaui potensial ionisasi ( $V_i$ ) yaitu energi yang diperlukan untuk melepas elektron dari kulit atom, maka akan terjadi ionisasi. Proses tersebut ditunjukkan dalam Persamaan (2.5) [3] :

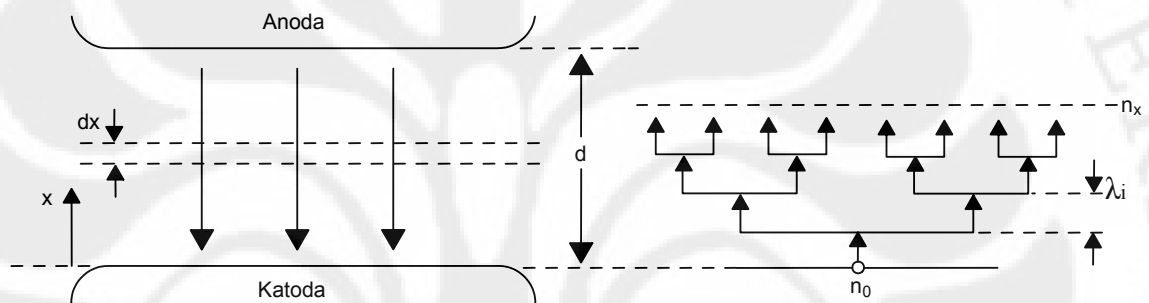


dimana,  $A$  adalah atom,  $A^+$  adalah ion positif, dan  $e^-$  adalah elektron.



Gambar 2.1 Rangkaian uji ionisasi [3]

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 2.2. Pelipatgandaan elektron [4]

### 2.2.3 Ionisasi Karena Cahaya

Fenomena ionisasi ini biasa disebut ionisasi karena radiasi atau fotoionisasi, dimana fenomena ini melibatkan interaksi radiasi dengan bahan. Fotoionisasi dapat terjadi apabila jumlah energi radiasi yang diserap oleh atom atau molekul telah melampaui potensial ionisasi atom atau molekul tersebut.

Ada beberapa proses dimana radiasi dapat diserap oleh atom atau molekul, yaitu :

- a) Eksitasi pada atom hingga mencapai tingkat energi yang lebih tinggi
- b) Penyerapan terus-menerus dengan eksitasi langsung pada atom atau penguraian molekul diatomik atau ionisasi langsung, dll.

Seperti atom eksitasi yang memancarkan radiasi ketika elektron kembali ke level yang lebih rendah, proses sebaliknya terjadi ketika atom menyerap radiasi. Proses timbal balik ini ditunjukkan dalam Persamaan [3] :



Ionisasi terjadi ketika :

$$\lambda \leq c \cdot \frac{h}{V_i} \quad (2.7)$$

dimana  $h$  adalah konstanta Planck,  $c$  adalah kecepatan cahaya,  $\lambda$  adalah panjang gelombang radiasi, dan  $V_i$  adalah energi ionisasi dari atom. Dengan mensubstitusikan  $h$  dan  $c$ , maka didapatkan :

$$\lambda \leq \left( \frac{1.27}{V_i} \right) \times 10^{-6} \text{ cm} \quad (2.8)$$

dimana  $V_i$  dalam elektron volt (eV). Semakin tinggi energi ionisasi, maka semakin pendek panjang gelombang radiasi yang dapat menyebabkan ionisasi. Melalui penelitian diketahui bahwa radiasi dengan panjang gelombang 1240 Å dapat menyebabkan ionisasi pada hampir seluruh jenis gas.

#### 2.2.4 Ionisasi Karena Panas

Pada proses ionisasi ini pemanasan sampai suhu cukup tinggi akan mengakibatkan banyak atom netral memperoleh energi yang dibutuhkan untuk mengionisasikan atom-atom yang mereka tumbuk. Hal ini dapat dituliskan dalam persamaan reaksi sebagai berikut :



dimana :

$U_i(T)$  = energi kalor ( J )

$A$  = molekul atau atom gas awal

$A^+$  = molekul atau atom yang kehilangan 1 elektron

Ionisasi akibat pemanasan (thermal) meliputi ionisasi akibat benturan antar molekul atau atom gas yang bergerak dengan kecepatan tinggi akibat suhu yang tinggi dan ionisasi yang terjadi akibat panas atau benturan elektron.

## 2.2.5 Proses Ionisasi Sekunder

### 2.2.5.1 Emisi Elektron karena Pengaruh Ion Positif

Ion positif terbentuk akibat dari ionisasi yang disebabkan oleh tumbukan dan karena cahaya, kemudian tercharge secara positif, ion-ion tersebut melintas ke arah katoda. Ion positif yang mendekati logam katoda (metal) 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.

### 2.2.5.2 Emisi Elektron karena Photon

Untuk membuat elektron terlepas dari metal, harus menggunakan energi yang cukup untuk menembus tahanan potensial permukaan. Energi tersebut dapat disuplai dalam bentuk photon dari sinar ultraviolet pada frekuensi yang sesuai. Emisi elektron yang terjadi pada permukaan metal terjadi pada kondisi kritis sesuai dengan persamaan

$$h\nu \geq \phi \quad (2.10)$$

dimana  $\phi$  adalah fungsi kerja dari elektroda metal. Frekuensi yang ( $\nu$ ) diberikan dengan Persamaan [3] :

$$\nu = \frac{\phi}{h} \quad (2.11)$$

dikenal sebagai frekuensi *threshold* (frekuensi saturasi). Untuk permukaan Nikel murni dengan  $\phi = 4,5$  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.

## 2.3 MEKANISME KEGAGALAN DALAM GAS

### 2.3.1 Mekanisme Townsend

Berdasarkan pada gambar 2.1 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 2.2) akan bertambah dengan  $dn_e$  elektron. Banyaknya jumlah penambahan elektron bebas yang terjadi pada lapisan  $dx$  tersebut sesuai dengan Persamaan [3] :

$$dn_e = \alpha \cdot n_e \cdot dx \quad (2.12)$$

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 :

$$dn_e = dn_+ = \alpha \cdot n_e \cdot (t) \cdot v_d \cdot dt \quad (2.13)$$

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 :

$$n_e = n_0 \mathcal{E}^{\alpha x} \quad (2.14)$$

jumlah elektron yang menumbuk anoda dengan jarak  $d$  dari katoda sama dengan jumlah dari ion positif yang dinyatakan dalam Persamaan [3] :

$$n_+ = n_0 \mathcal{E}^{\alpha d} \quad (2.15)$$

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

$$\mathcal{E}^{\alpha d} - 1 = \frac{n_d - n_0}{n_0} \quad (2.16)$$

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

$$I = I_0 \mathcal{E}^{\alpha d} \quad (2.17)$$



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 :

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

$$n_e = \frac{n_0 \epsilon^{ad}}{1 - \gamma(\epsilon^{ad} - 1)} \quad (2.18)$$

dan besar arus rata-rata dalam celah menjadi :

$$I = \frac{I_0 \epsilon^{ad}}{1 - \gamma(\epsilon^{ad} - 1)} \quad (2.19)$$

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 [3] :

$$\gamma(\epsilon^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.20)$$

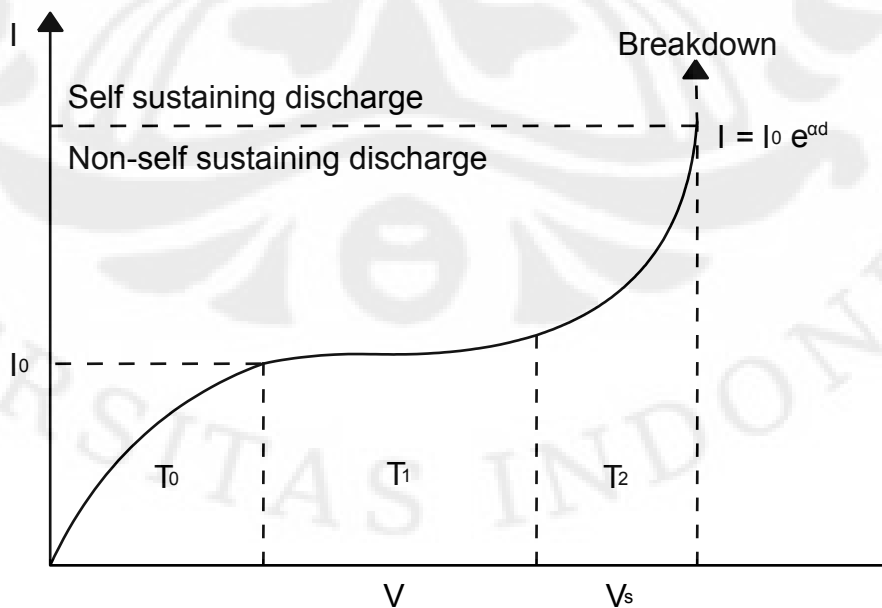
dimana  $\gamma\epsilon^{\alpha d}$  sangat besar atau  $\gamma\epsilon^{\alpha d} \gg 1$ , sehingga persamaan di atas menjadi :

$$\gamma\epsilon^{\alpha d} = 1 \quad (2.21)$$

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 :

- $\gamma\epsilon^{\alpha d} < 1$ , arus pelepasan tidak bisa bertahan sendiri sehingga jika sumber arus primer  $I_0$  dihilangkan, arus pelepasan akan berhenti mengalir.
- $\gamma\epsilon^{\alpha d} = 1$ , banjir elektron menghasilkan jumlah pasangan ion  $\gamma\epsilon^{\alpha d}$  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  $I_0$ .
- $\gamma\epsilon^{\alpha d} > 1$ , ionisasi yang disebabkan banjir berturut-turut akan bertumpuk, sehingga hal ini akan menyebabkan pelepasan percikan tumbuh dengan cepat sebanding dengan kelebihan  $\gamma\epsilon^{\alpha d}$  dari 1.

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



Gambar 2.3. Grafik hubungan V vs I berdasarkan kriteria Townsend [2]

Pada daerah  $T_0$ , arus meningkat perlahan-lahan tetapi secara terus-menerus. Pada daerah  $T_1$  dan  $T_2$  arus meningkat dengan tetap sesuai dengan mekanisme Townsend. Pada gambar terlihat bahwa pada tegangan  $V$  rendah, maka  $\gamma\epsilon^{ad} \ll 1$ . Jika tegangan  $V$  dinaikkan, maka  $\epsilon^{ad}$  juga akan meningkat, sehingga  $\gamma\epsilon^{ad} = 1$ . Penyebut persamaan menjadi nol dan  $I$  menjadi tak hingga, pada kondisi ini terjadi *breakdown* (kegagalan). Melewati daerah  $T_2$  maka arus akan meningkat dengan tajam dan akan muncul percikan (spark).

### 2.3.2 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 banjiran tunggal, kemudian dari banjiran tersebut akan terjadi muatan ruang dimana muatan ruang tersebut akan mengubah banjiran 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 banjiran 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.

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

kepala banjiran sama dengan medan E yang diterapkan agar terjadi peningkatan ionisasi.

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

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

Persamaan empiris yang menyatakan kriteria *spark streamer* adalah sebagai berikut :

$$\alpha x_c = 17.7 + \ln x_c + \ln(E_r / E) \quad (2.22)$$

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

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

$$\alpha x_c = 17.7 + \ln x_c \quad (2.23)$$

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

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

$$E_r = 5.27 \times 10^{-7} \frac{\alpha \epsilon^{\alpha x}}{(x/p)^{1/2}} \text{ V/cm} \quad (2.24)$$

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 :

$$\alpha d + \ln\left(\frac{\alpha}{p}\right) = 14.5 + \ln\left(\frac{E}{p}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{d}{p}\right) \quad (2.25)$$

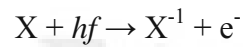
## 2.4 PROSES TERJADINYA KORONA

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. 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. Hal ini dapat ditunjukkan dalam persamaan berikut :



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.

## **2.5 JENIS KORONA**

### **2.5.1 Korona Positif**

Dengan elektroda titik positif, suatu elektron akan terbentuk di celah, bergerak ke arah titik, berbaris dalam daerah medan yang kuat, mulai terionisasi dan terbentuk banjiran elektron. Tegangan antar elektroda bertambah secara perlahan sampai terbentuk korona. Saat banjiran elektron ini mencapai elektroda titik, ion-ion positif dalam celah bergerak perlahan ke arah elektroda berlawanan. Dekat elektroda positif (titik) akan terbentuk muatan ruang. Kehadiran muatan ruang positif mengurangi kuat medan di sekitar titik dan sedikit menambah di ruang bagian luar. Hal ini menyebabkan ionisasi yang jauh dari sekitar titik akan menjadi lemah dan membuat korona menjadi lebih sulit.

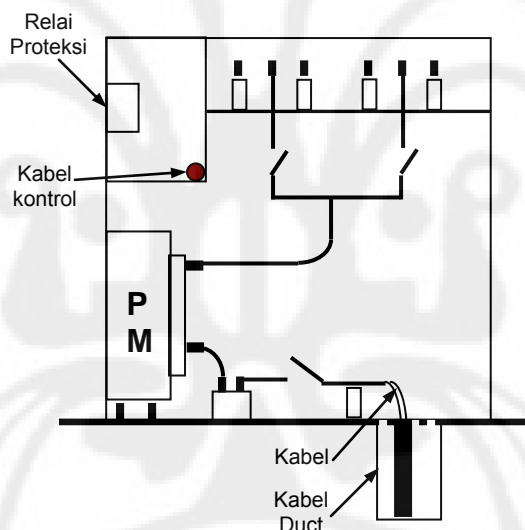
### **2.5.2 Korona Negatif**

Dengan polaritas negatif pada elektroda titik, elektron-elektron secara cepat akan terbentuk dalam medan yang kuat dan membentuk banjiran yang bergerak ke arah elektroda bidang. Ketika banjiran elektron menjauh dari daerah medan yang kuat, banjiran itu akan berhenti menghasilkan ionisasi dan mengurangi kecepatan

pergerakan ke arah anoda. Sebagian mencapai anoda dan dinetralkan di sana, sebagian lagi akan ditangkap oleh atom-atom oksigen dan membentuk ion negatif. Ion-ion positif akibat banjir, secara berangsur bergerak ke arah konduktor (penghantar). Oleh karena pergerakan dari ion-ion positif tersebut lambat, maka di daerah sekitar konduktor selalu terjadi muatan ruang positif. Muatan ruang positif tersebut akan menaikkan kuat medan pada daerah konduktor sehingga mempermudah terjadinya proses korona.

## 2.6 KUBIKEL TEGANGAN MENENGAH

Kubikel tegangan menengah merupakan sebuah peralatan sistem tenaga listrik yang terhubung dengan jaringan listrik tegangan menengah 20 kV. Secara umum, konstruksi kubikel 20 kV yang terpasang di instalasi PLN sekilas dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.4. Konstruksi kubikel tegangan menengah [5]

Pada kubikel tersebut terdapat dua bidang elektroda. Satu elektroda dihubungkan ke tanah ( $V = 0\%$ ) sedangkan elektroda yang satunya dihubungkan dengan sumber tegangan ( $V = 100\%$ ). Sebagai salah satu cara proteksi, di antara kedua elektroda tersebut terdapat celah udara (*air gap*). Korona dapat terjadi pada kubikel tegangan menengah yang disebabkan karena ketidakmurnian dari udara yang terdapat pada celah udara tersebut atau dengan kata lain pada celah udara terdapat partikel-partikel yang membuat udara menjadi bersifat tidak netral.

## **2.7 KORONA PADA KUBIKEL TEGANGAN MENENGAH**

Seperti yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa korona disebabkan karena terjadinya kegagalan listrik di udara. Dalam hal ini, korona yang terjadi pada kubikel juga disebabkan karena hal yang sama. Kegagalan listrik di udara yang terjadi pada kubikel bisa disebabkan karena polusi partikel-partikel pada udara sehingga menyebabkan udara menjadi tidak netral.

Biasanya partikel yang membuat polusi di dalam kubikel masuk melalui lubang antara kabel duct dan ruang bagian dalam kubikel (*cable gland*) yang tidak tertutup rapat sejak awal pemasangannya, sehingga mempercepat proses penumpukan partikel tertentu di permukaan isolator di dalam kubikel. Demikian pula bila terminasi kabel kurang baik, pemanasan dan penguapan bahan isolasi kabel juga akan mengotori permukaan isolator penyangga rel melalui lubang ini. Kondisi lain yang juga menjadi masalah adalah pentanahan kubikel. Pentanahan yang tidak baik bisa menaikkan potensial kubikel terhadap tanah referensi bila terjadi *flashover*. *Power follow current* (dari sistem) yang bertahan lama akan menghancurkan kubikel.

Faktor-faktor yang sangat mempengaruhi korona yang terjadi pada kubikel adalah gradien potensial, bentuk elektroda, kondisi kelembaban udara, kondisi suhu udara, tekanan udara, dan partikel yang terdapat pada permukaan elektroda.

## **2.8 FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KORONA**

Korona yang terjadi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya keadaan lingkungan yang meliputi cuaca, kelembaban udara, suhu, dan tekanan udara. Keadaan lingkungan sekitar penghantar dapat mempengaruhi gradien awal terjadinya korona dan isolasi udara.

### **2.8.1 Gradien Potensial**

Ionisasi udara mengakibatkan redistribusi tegangan gradien tegangan. Bila redistribusi ini menyebabkan gradien udara di antara dua elektroda lebih besar dari gradien udara normal maka bisa terjadi lompatan api. Bila hanya sebagian udara antara dua elektroda yang terionisasikan, maka korona merupakan sampul (*envelope*) mengelilingi elektroda. Gradien tegangan seragam yang dapat



menimbulkan ionisasi kumulatif di udara normal (25<sup>0</sup> C, 76 cmHg) adalah 30 kV/cm. Gradien potensial yang menyebabkan terjadinya kerusakan dielektrik disebut kekuatan dielektrik material.

Pada daerah yang sangat lebar kekuatan dielektrik udara berbanding lurus dengan kerapatannya, berbanding lurus terhadap tekanan, dan berbanding terbalik terhadap temperatur. Persamaan kerapatan relatif pada tekanan  $b$  cmHg dan suhu  $t^0$  C adalah :

$$\delta = \frac{3,92b}{273+t} \quad (2.26)$$

Dimana kekuatan dielektrik dalam kondisi tersebut adalah  $g_0\delta$ .

Gradien memiliki nilai yang konstan pada semua titik dalam suatu medan dielektrik seragam seperti terdapat di antara piringan paralel. Apabila tegangan bertambah secara perlahan-lahan secepat dicapainya gradien kegagalan 30kV/cm, maka kegagalan udara dan *flashover* akan menjadikan hubungan singkat kedua piringan.

Sedangkan apabila medan dielektrik tidak seragam, seperti medan pada dua elektroda paralel atau dua bola, dan dengan adanya penambahan tegangan, maka gradien kegagalan tidak akan secara serempak melalui seluruh medan, tetapi yang pertama dicapai pada permukaan elektroda.

Besarnya  $g_0$  pada saat gradien perusakan udara mencapai permukaan penghantar adalah :

$$g_0 = \frac{E_0}{r \log \frac{d'}{r}} \quad (2.27)$$

dan  $E_0$  adalah :

$$E_0 = g_0 r \log \frac{d'}{r} \quad (2.28)$$

dimana  $E_0$  diketahui sebagai tegangan kritis perusakan. Untuk gelombang sinus nilai RMS dari  $g_0$  adalah 21,1 kV/cm sehingga rumus lengkapnya adalah sebagai berikut :

$$E_0 = 21,1m_0r\delta \ln \frac{d'}{r} \text{ kV ke netral (RMS)} \quad (2.29)$$

Nilai  $E_0$  yang diberikan pada rumus di atas adalah tegangan perusakan kritis untuk kondisi cuaca normal dan baik. Untuk kondisi udara yang buruk nilai  $E_0$  akan menjadi lebih rendah yang menyebabkan semakin besarnya rugi-rugi korona.

### 2.8.2 Bentuk Elektroda

Bentuk elektroda yang terdapat pada kubikel merupakan salah satu hal penting yang mempengaruhi korona yang terjadi pada kubikel. Apabila jari-jari elektroda semakin kecil maka menyebabkan semakin tidak seragamnya medan sehingga korona akan lebih mudah untuk terjadi. Beberapa bentuk tipe elektroda yang terdapat dalam kubikel adalah sebagai berikut [6]:

- Elektroda jarum



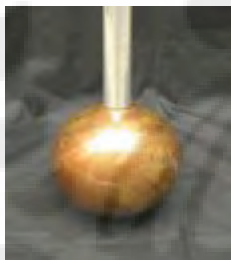
Gambar 2.5. Elektroda jarum

- Elektroda batang



Gambar 2.6. Elektroda batang

- Elektroda bola



Gambar 2.7. Elektroda bola

- Elektroda bidang



Gambar 2.8. Elektroda bidang

### 2.8.3 Faktor Cuaca

Faktor cuaca yang amat menentukan adalah hujan. Jarum es (*hoarfrost*) dan kabut akan menyebabkan harga hilang korona yang tinggi. Salju sedikit menyebabkan kenaikan rugi korona.

Nilai  $g_0$  (gradien tegangan kritis) berbeda untuk kondisi cuaca baik dan basah. Pada saluran transmisi untuk cuaca baik nilai  $g_0$  adalah 21.1 kV/cm, sedangkan untuk cuaca basah adalah 16.9 kV/cm. Dengan demikian, pada kondisi cuaca yang kurang baik tegangan awal korona lebih rendah dibandingkan pada kondisi cuaca yang baik.

Tekanan udara juga mempengaruhi korona. Pada proses ionisasi, ion-ion bergerak dalam gas dengan kecepatan yang berbeda-beda bergantung pada kuat medan listrik dan kerapatan udara yang dilalui. Semakin besar tekanan maka kerapatan udara semakin besar.

Partikel-partikel di udara juga merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi korona. Udara tidak hanya terdiri dari gas-gas, tetapi juga mengandung partikel seperti butir-butir debu dan uap air. Apabila partikel-partikel tersebut mendekati elektroda kubikel, maka akan timbul pelepasan yang berasal dari elektroda ke partikel akibat terjadi perubahan medan listrik. Partikel yang mendekati elektroda akan terinduksi oleh medan listrik dan menimbulkan distribusi muatan pada ujung partikel. Dengan demikian, medan listrik akan semakin diperkuat dan memungkinkan terjadinya pelepasan.

### 2.8.4 Faktor Kelembaban Udara

Percobaan untuk menguji pengaruh kelembaban terhadap tegangan kritis perusakan pada kubikel pernah dilakukan oleh *Kurt Feser* [7]. Percobaan dilakukan dengan menggunakan tegangan awal sumber dc dan ac dengan variasi tipe lintas cetus api (*spark gap*), jenis elektroda, dan jarak celah. Percobaan pertama dilakukan dengan menggunakan tegangan awal dc dan ac dengan lintas cetus api batang bidang 30 cm, dengan tipe elektroda tumpul beradius 2 mm. Melalui percobaan diperoleh hasil bahwa terjadi penurunan besar tegangan kritis awal korona dengan meningkatnya kelembaban.

Percobaan berikutnya dilakukan dengan lintas cetus api silinder dengan spesifikasi diameter luar 20 cm, konduktor dalam 6 mm, panjang silinder luar 60 cm. Hasilnya adalah sama yaitu terjadi penurunan tegangan kritis awal korona dengan kenaikan kelembaban.

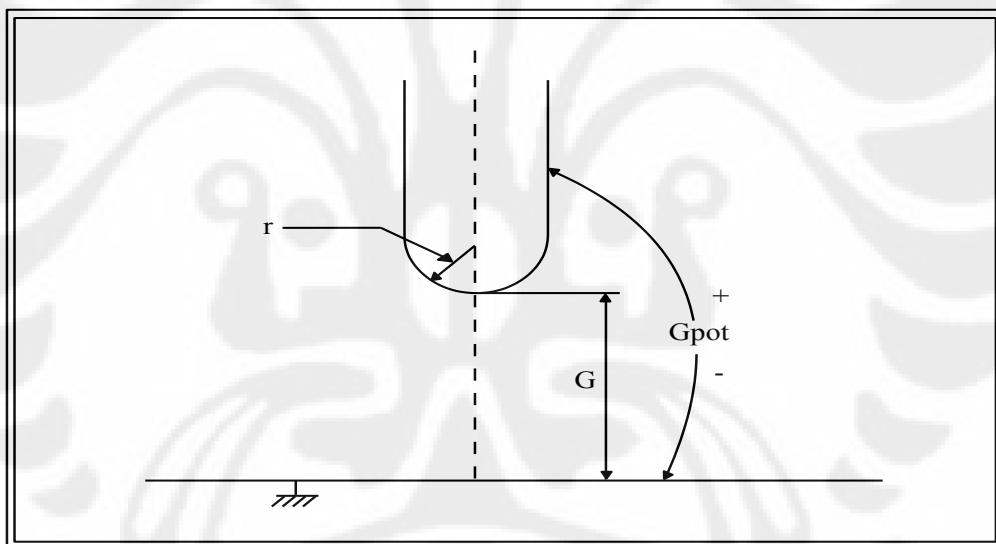
## 2.9 TEKNIK SIMULASI PERHITUNGAN

### 2.9.1 Penurunan Persamaan Potensial dan Medan

Untuk menyederhanakan simulasi pada konfigurasi sela batang bidang, maka terlebih dahulu diperkenalkan notasi berikut :

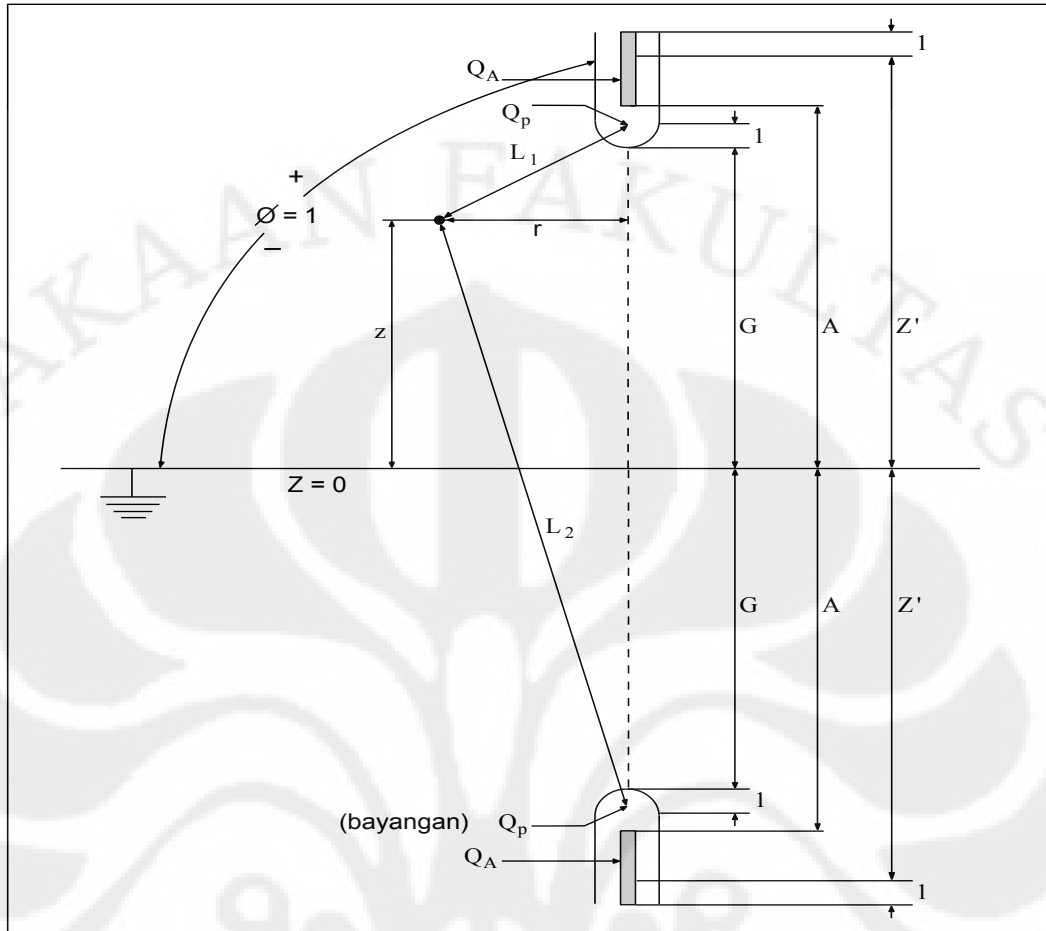
- $G$  = lebar sela dari titik ekstrim setengah bola terhadap bidang.
- $r$  = jari-jari titik.
- $G_{pot}$  = perbedaan potensial antar elektroda.

Gambarnya dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Konfigurasi sela batang bidang [8]

Dalam penyederhanaan prosedur pengkomputasian dan untuk membuat pemecahan yang mungkin pada jarak sela yang berbeda dan parameter daerah batas, maka dapat dilihat gambar 2.10. di bawah ini, di mana pada gambar ini harga jari-jari titik sama dengan satu dan lebar sela variabel. Bidang diganti dengan bayangan elektroda batang, dan kemudian perbedaan potensial adalah sama dengan satu. Sedangkan permitivitas diasumsikan konstan.



Gambar 2.10. Simulasi metode bayangan untuk perhitungan [8]

Dipilih sistem koordinat silinder dengan titik asal diletakkan pada perpotongan sumbu-sumbu silinder (sb.Z), koordinat pada setiap titik ditulis sebagai  $r$  dan  $z$ . Potensial ( $\phi$ ) pada setiap titik  $P(r,z)$  adalah penjumlahan aljabar dari potensial akibat sejumlah muatan titik setengah bola dan muatan garis pada silinder.

Muatan dari elektroda batang akan ditunjukkan dengan :

- Sebuah muatan titik yang diletakkan pada pusat elektroda batang pada bagian setengah bola, yaitu berada pada koordinat  $(0, G+1)$ .
- Dan sebuah deretan dari muatan garis dari elektroda batang yang ditunjukkan sepanjang sumbu bagian silinder dimulai pada titik koordinat  $(r,A)$ , dimana  $r = 0$  dan dalam bidang  $z = 0$ , harus menghasilkan permukaan ekipotensial dari potensial satuan bersama dengan batas elektroda.

Jika kondisi batas di atas dapat dipenuhi dengan distribusi muatan yang sembarang maka simulasi muatan akan dicapai

Bidang  $z = 0$ , akan selalu diasumsikan berpotensi nol, dimana hal dapat dicapai, jika dapat diambil muatan bayang yang tepat terhadap bidang. Dengan memperhatikan gambar 2.10, maka potensial pada setiap titik  $(r,z)$  adalah [8]:

$$\phi(r, z) = \left[ \frac{Q_p}{L_1} - \frac{Q_p}{L_2} \right] + \sum_1^n \left[ Q_j \int_{A_j}^{\infty} \frac{dz'}{\sqrt{r^2 + (z' - z)^2}} - Q_j \int_{A_j}^{\infty} \frac{dz'}{\sqrt{r^2 + (z' + z)^2}} \right] \quad (2.30)$$

atau

$$\phi(r, z) = Q_p P(r, z) + \sum_1^n Q_j V(r, z; A_j) \quad (2.31)$$

dimana :

$Q_p$  = muatan titik total.

$Q_j$  = muatan per satuan panjang dari muatan garis  $n$  yang dimulai dari  $(0, A_j)$ .

$$P(r, z) = \frac{1}{\sqrt{r^2 + (G+1-z)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (G+1+z)^2}} \quad (2.32)$$

$$V(r, z) = Ln \left[ \frac{A_j + z + \sqrt{r^2 + (A_j + z)^2}}{A_j - z + \sqrt{r^2 + (A_j - z)^2}} \right] \quad (2.33)$$

Dari Persamaan (2.3) dan (2.31) [8] akan didapatkan besarnya medan listrik  $E$  pada titik  $(r,z)$ , yaitu :

$$E(r, z) = -\nabla \phi(r, z) = - \left[ \frac{\partial}{\partial r} \phi(r, z) \cdot r + \frac{\partial}{\partial z} \phi(r, z) \cdot z \right] \quad (2.34)$$

maka setelah diturunkan, akan didapat persamaan kuat medan listrik adalah :

$$E(r, z) = - \left\{ \left[ Q_p \frac{\partial}{\partial r} P(r, z) + \sum_1^n Q_j \frac{\partial}{\partial r} V(r, z; A_j) \right] \cdot r + \left[ Q_p \frac{\partial}{\partial z} P(r, z) + \sum_1^n Q_j \frac{\partial}{\partial z} V(r, z; A_j) \right] \cdot z \right\} \quad (2.35)$$

di mana masing-masing harga adalah [8]:

$$\frac{\partial}{\partial r} P(r, z) = \frac{-r}{\sqrt{(r^2 + (G+1-z)^2)^3}} + \frac{r}{\sqrt{(r^2 + (G+1+z)^2)^3}} \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} P(r, z) = \frac{G+1-z}{\sqrt{(r^2 + (G+1-z)^2)^3}} + \frac{G+1+z}{\sqrt{(r^2 + (G+1+z)^2)^3}} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} V(r, z; A_j) &= \frac{r}{\sqrt{r^2 + (A_j + z)^2} \left( A_j + z + \sqrt{r^2 + (A_j + z)^2} \right)} \\ &\quad - \frac{r}{\sqrt{r^2 + (A_j - z)^2} \left( A_j - z + \sqrt{r^2 + (A_j - z)^2} \right)} \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} V(r, z; A_j) &= \frac{1 + (A_j + z) / \sqrt{r^2 + (A_j + z)^2}}{A_j + z + \sqrt{r^2 + (A_j + z)^2}} \\ &\quad + \frac{1 + (A_j - z) / \sqrt{r^2 + (A_j - z)^2}}{A_j - z + \sqrt{r^2 + (A_j - z)^2}} \end{aligned} \quad (2.39)$$

### 2.9.2 Kondisi Batas Dari Elektroda Batang Bidang

Batas dari elektroda batang diasumsikan mempunyai 1 bagian yaitu bagian silinder dan bagian setengah bola, sedangkan batas lainnya yaitu bidang  $z = 0$ , tiga batas inilah yang akan ditinjau, untuk menurunkan persamaan tegangan dan kuat medan dari konfigurasi tersebut.

#### a. Bagian silinder

Potensial dari setiap titik bagian silinder akan diasumsikan adalah sama dengan satu, maka untuk dapat memenuhi asumsi ini dipilih harga  $z$ , yaitu :

$$z \geq G + 1 \quad \text{dengan} \quad r = 1$$

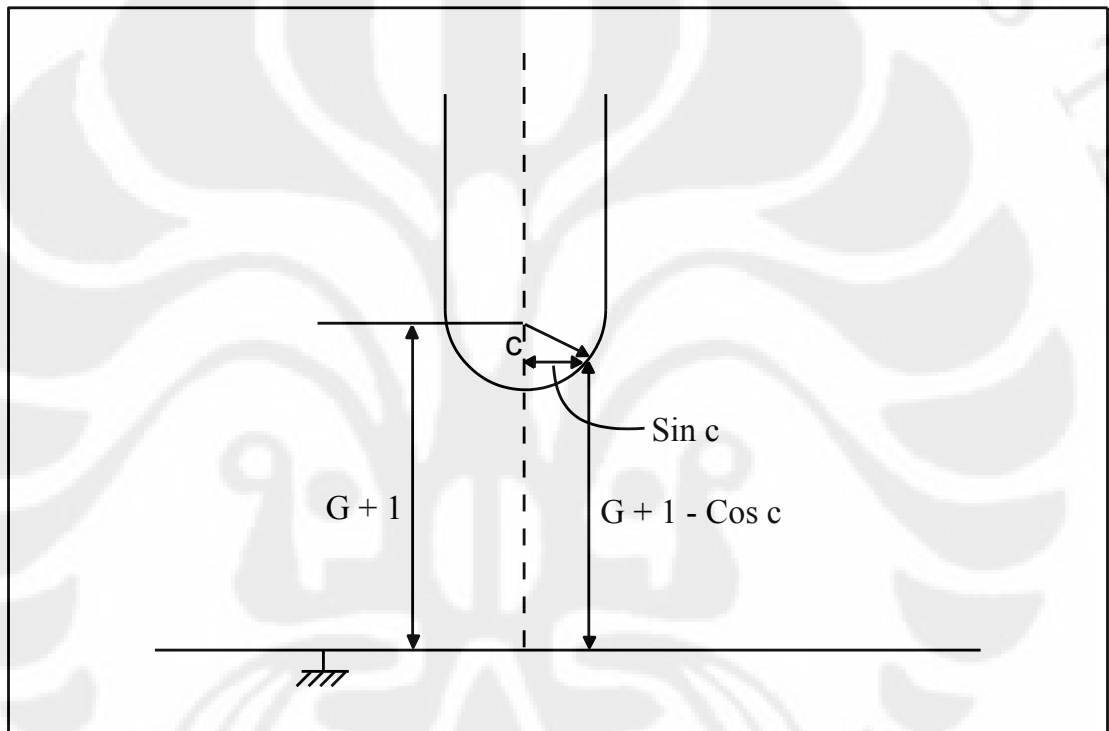
Jika kita substitusikan dengan persamaan 2.31, 2.32, dan 2.33 maka diperoleh :

$$\phi(1,z) = 1 \quad (2.40)$$

dimana :  $z \geq G + 1$

b. Bagian setengah bola

Pada bagian setengah bola dari elektroda batang, potensial dari setiap titik adalah sama dengan satu. Dengan memperhatikan gambar 2.11, dimana  $c$  adalah pergeseran lingkaran yang terbesar dari  $c = 0$  pada titik  $(r,z) = (0,G)$  dan dengan menggunakan transformasi.



Gambar 2.11. Koordinat titik dengan parameter  $c$  [8]

$$r = \sin c$$

$$z = G + 1 - \cos c$$

Kemudian disubstitusikan dengan Persamaan 2.31, 2.32, dan 2.33 [8] akan menghasilkan [8] :

$$\phi(c) = Q_p P(c) + \sum_1^n Q_j V(c; A_j) \quad (2.41)$$

di mana [8]:



$$P(c) = 1 - \frac{1}{\sqrt{\sin^2 c + (2F - \cos c)^2}} \quad (2.42)$$

dan [8]:

$$V(c; A) = Ln \left[ \frac{A + F - \cos c + \sin^2 c + \sqrt{(A + F - \cos c)^2}}{A + F + \cos c + \sin^2 c + \sqrt{(A - F + \cos c)^2}} \right] \quad (2.43)$$

dengan  $F = G + 1$

Untuk memenuhi asumsi kondisi daerah batas yang mempunyai potensial satu pada bagian setengah bola, maka potensial pada titik  $c = 0$  atau  $[(r,z) = (0,G)]$  diatur sama dengan satu, dan dalam penurunan dari potensial terhadap  $c$  dievaluasi pada titik  $c = 0$ , di mana  $\phi(c)$  dibuat sama dengan nol, dalam hal ini penurunan  $\phi(c)$  terhadap  $c$  adalah merupakan turunan kedua, keempat, dan seterusnya. Menurut pengalaman penurunan ke  $n > 4$  akan lebih besar daripada penurunan dengan  $n = 2$  dan  $n = 4$ , tetapi untuk menghasilkan permukaan ekipotensial yang cukup dekat dengan bagian setengah bola di daerah batas, maka diambil penurunan yang ke  $n = 2$  dan  $n = 4$ . Bentuk penurunan pemaksaan adalah :

$$\left. \frac{d^n \phi(c)}{dc^n} \right|_{c=0} = \phi_{nc}(0) = Q_p \cdot P_{nc}(0) + \sum_1^n Q_j V_{nc}(0, A_j) = 0 \quad (2.44)$$

di mana :  $n = 2, 4$

Sehingga hasil penurunan untuk  $n = 1, 2, 4$  adalah [8]:

$$P_{1c}(0) = 0 \quad (2.45)$$

$$P_{2c}(0) = 2F / (2F - 1)^3 \quad (2.46)$$

$$P_{4c}(0) = -2F / (2F - 1)^3 - 36F^2 / (2F - 1)^5 \quad (2.47)$$

Dan

$$V_{1c}(0,A) = 0 \quad (2.48)$$

$$V_{2c}(0,A) = \left[ \frac{1}{(A+G)} + \frac{1}{(A-G)} \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{(A+G)^2} - \frac{1}{(A-G)^2} \right] \quad (2.49)$$

$$V_{4c}(0,A) = \frac{9}{4} \left[ \frac{-1}{(A+G)^4} + \frac{1}{(A-G)^4} \right] - 6 \left[ \frac{1}{(A+G)^3} + \frac{1}{(A-G)^3} \right] + 5 \left[ \frac{-1}{(A+G)^2} + \frac{1}{(A-G)^2} \right] - \left[ \frac{1}{(A+G)} + \frac{1}{(A-G)} \right] \quad (2.50)$$

c. Daerah batas bidang

Pada daerah batas bidang, potensial setiap titik adalah sama dengan nol,  $z = 0$ . Dengan kondisi ini maka otomatis akan dipenuhi oleh muatan bayangan yang diletakkan simetris terhadap bidang.

### 2.9.3 Pemilihan Parameter

Untuk mendapatkan unit permukaan ekipotensial pada daerah batas elektroda batang, maka pemilihan parameter  $z$  dan harus hati-hati. Dua faktor yang diambil untuk hal ini adalah distribusi parameter terhadap masing-masing dan terhadap daerah batas elektroda, dan jumlah parameter.

Distribusi potensial permukaan elektroda batang dihitung pada pemilihan harga  $z$  dan  $A$  yang berbeda dan untuk harga sela  $G$  yang berbeda pula. Perhitungan ini akan menghasilkan harga yang berbeda dan menunjukkan bahwa permukaan ekipotensial satuan sesuai untuk batas elektroda batang. Hasil pemilihan nilai terbaik untuk  $z$  dan  $A$  dapat dilihat pada tabel 1 di bawah ini.

Tabel II.1. Pemilihan nilai terbaik  $z$  dan  $A$  [8]

Z	G + 1	G + 2	G + 5	G + 15	G + 40	G + 140	G + 440		
A	G + 1	G + 1,1	G + 1,2	G + 1,5	G + 2	G + 10	G + 25	G + 90	G + 240

### 2.9.4 Matriks Perhitungan

Dalam analisa perhitungan, dari kondisi batas yang telah dijelaskan sebelumnya berikut dengan persamaan-persamaannya, maka dibentuk suatu persamaan matriks sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix}
 V[1,z(1);A(1)] \cdots \cdots \cdots V[1,z(1);A(9)] & P[1,z(1)] \\
 \cdots \cdots \cdots & \cdots \cdots \cdots \\
 \cdots \cdots \cdots & \cdots \cdots \cdots \\
 V[1,z(7);A(1)] \cdots \cdots \cdots V[1,z(7);A(9)] & P[1,z(7)] \\
 V[0,G;A(1)] \cdots \cdots \cdots V[1,z(7);A(9)] & P[0,G] \\
 Vc[0;A(1)] \cdots \cdots \cdots Vc[1,z(7);A(9)] & Pc(0) \\
 Vc[0;A(1)] \cdots \cdots \cdots Vc[1,z(7);A(9)] & Pc(0)
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 Q[A(1)] \\
 \cdots \\
 \cdots \\
 Q[A(7)] \\
 Q[A(8)] \\
 Q[A(9)] \\
 Q[P]
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 1 \\
 \cdots \\
 \cdots \\
 1 \\
 1 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}$$

Setelah pembentukan matriks selesai, kemudian dicari invers dari matriks di atas lalu dikalikan dengan matriks potensial dan hasilnya adalah merupakan matriks muatan.

## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENGUJIAN**

Tujuan dilakukannya pengujian adalah untuk mengukur besarnya tegangan kritis awal korona pada model kubikel. Pengukuran tegangan kritis ini dilakukan melalui dua cara yaitu melalui simulasi perhitungan dan melalui percobaan di laboratorium untuk membandingkan ketepatannya. Kemudian dilakukan pengujian di gardu tegangan untuk menyelidiki ada tidaknya fenomena korona pada gardu tersebut. Bab ini akan membahas mengenai metode yang akan dilakukan dalam pengujian.

Pengujian yang pertama dilakukan di gardu dengan menggunakan mikrofon untuk mendeteksi adanya korona pada setiap kubikel. Pengujian kedua dilakukan dengan mengukur tegangan kritis awal korona melalui simulasi perhitungan yang telah dibuat programnya. Pengujian yang ketiga dilakukan di laboratorium dengan menggunakan mikrofon dan stetoskop untuk mendeteksi adanya korona pada setiap rating tegangan. Pengujian ketiga ini tidak dilakukan langsung oleh penulis.

#### **3.1 PERALATAN PENGUJIAN**

Peralatan-peralatan yang akan digunakan dalam pengujian ini yaitu untuk mendeteksi bunyi yang dihasilkan gejala korona pada gardu kubikel tegangan menengah adalah sebagai berikut :

- Kubikel tegangan menengah
- Humidity/Temperature Meter
- Microphone
- Connector
- Komputer jenis laptop (notebook)

Selain menggunakan perangkat-perangkat keras di atas, digunakan juga perangkat lunak untuk merekam, melihat, dan menganalisa spektrum suara.

Perangkat lunak yang akan digunakan adalah :

- MATLAB 7.01

Untuk membuat program simulasi perhitungan.

- CoolEditPro 2.0

Untuk merekam bunyi suara yang dihasilkan pada saat terjadi korona ke dalam komputer dan menganalisa spektrum suara tersebut.

### 3.2 RANGKAIAN PENGUJIAN

#### 3.2.1 Rangkaian Pengukuran Pada Gardu

Pengukuran yang dilakukan di gardu bertujuan untuk menganalisa kemungkinan terjadinya korona pada kubikel gardu tegangan menengah. Untuk mendapatkan spektrum frekuensi korona, maka digunakan mikrofon untuk merekam secara langsung suara bising yang dihasilkan korona pada kubikel. Berikut ini adalah rangkaian pengukurannya :

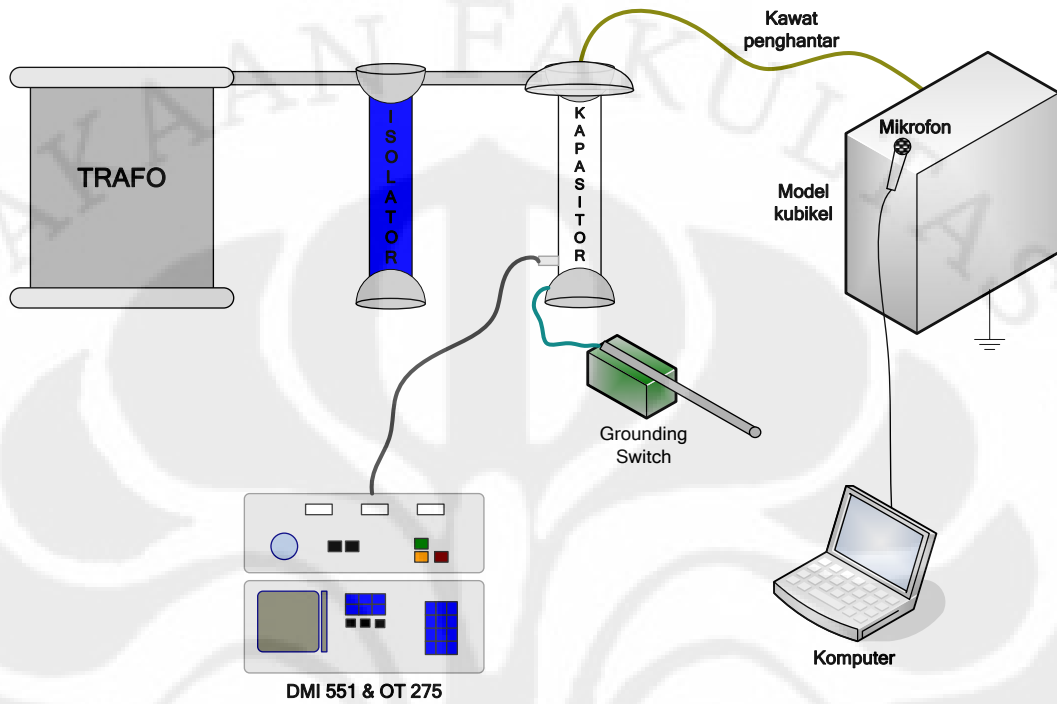


Gambar 3.1. Rangkaian pengujian pada gardu

#### 3.2.2. Rangkaian Pengujian Pada Laboratorium

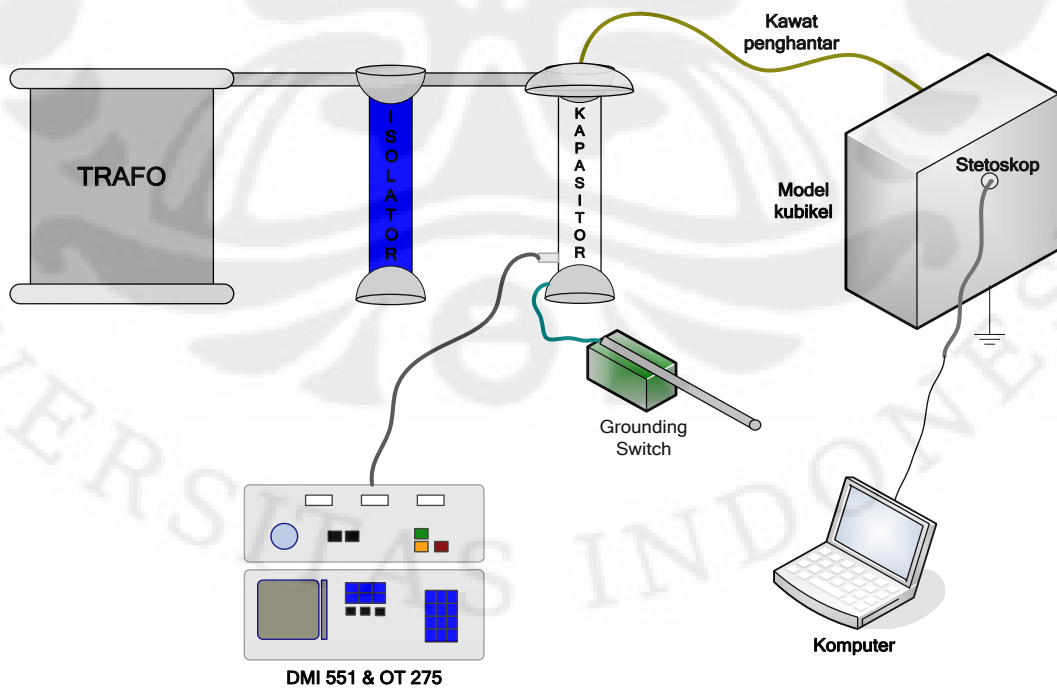
Pengujian di laboratorium dengan menggunakan mikrofon dan stetoskop bertujuan untuk mendapatkan karakteristik asli dari suara bising yang ditimbulkan oleh korona dan mengukur rating tegangan awal terjadinya korona. Untuk mendapatkan spektrum frekuensi korona, maka digunakan mikrofon dan stetoskop untuk merekam suara bising yang dihasilkan korona pada model kubikel. Berikut ini adalah rangkaian pengujiannya :

### 3.2.2.1 Rangkaian Pengujian dengan menggunakan mikrofon



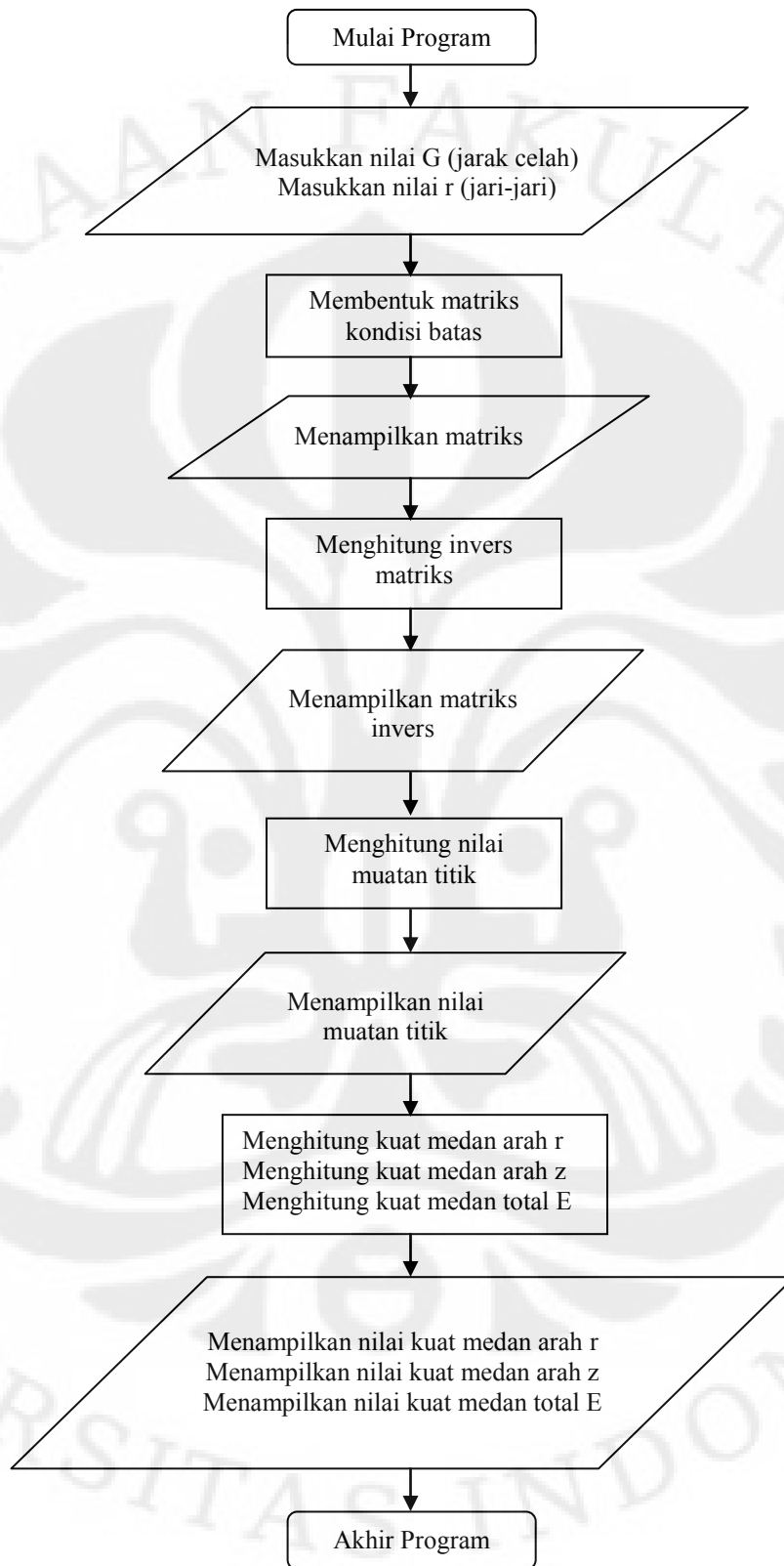
Gambar 3.2. Rangkaian pengujian pada laboratorium dengan menggunakan mikrofon [9]

### 3.2.2.2 Rangkaian Pengujian dengan menggunakan stetoskop



Gambar 3.3. Rangkaian pengujian pada laboratorium dengan menggunakan stetoskop [9]

### 3.2.3 Algoritma Simulasi Perhitungan



Gambar 3.4. Bagan algoritma simulasi perhitungan

### 3.3 PROSES PENGUJIAN

Pengujian pertama dilakukan dengan menghitung tegangan kritis awal munculnya korona pada kondisi normal dengan menggunakan program simulasi perhitungan. Kemudian hasil simulasi ini dibandingkan dengan hasil yang didapat pada pengujian di laboratorium. Apabila hasilnya sama atau mendekati, artinya kondisi yang dilakukan pada saat pengujian sama dengan asumsi pada simulasi. Apabila terdapat perbedaan hasil, maka parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi perhitungan disamakan dengan parameter-parameter yang ada pada saat pengujian dan dilakukan perhitungan kembali. Setelah itu hasilnya dibandingkan kembali.

Pengujian kedua dilakukan dengan membandingkan karakteristik spektrum suara pada saat pengujian di gardu dengan pada saat pengujian di laboratorium. Apabila spektrum suara hasil rekaman pada gardu sama dengan pengujian di laboratorium artinya pada gardu tersebut terjadi korona.



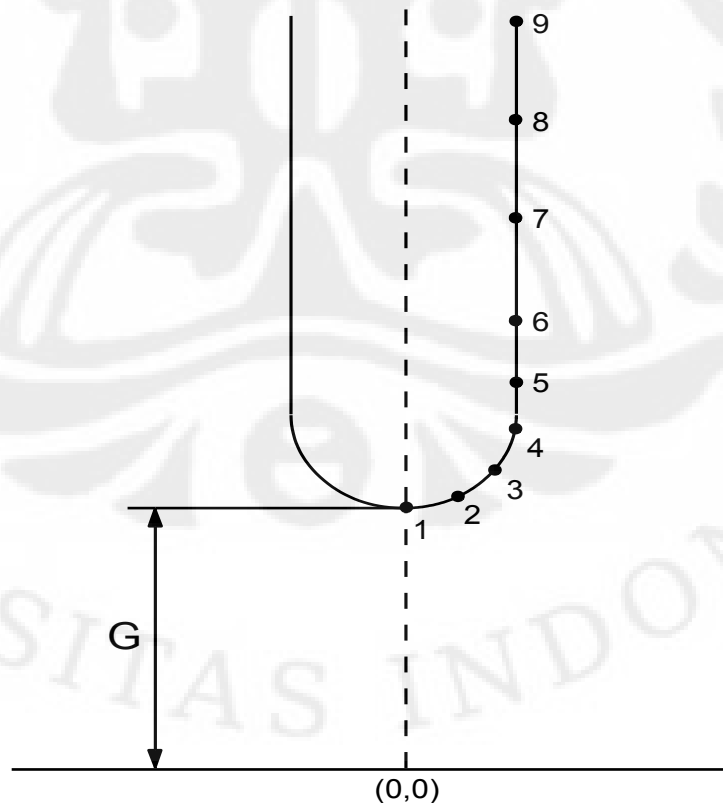
## BAB 4

### HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

#### 4.1 SIMULASI PERHITUNGAN TEGANGAN KRITIS PELEPASAN KORONA

Dalam melakukan perhitungan tegangan kritis saat korona mulai timbul, dilakukan perhitungan terhadap gradien tegangan maksimum pada permukaan elektroda batang dan gradien tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh udara.

Untuk menghitung besar gradien tegangan maksimum permukaan elektroda batang, digunakan simulasi muatan dengan metode bayangan seperti yang sudah diterangkan pada bab sebelumnya. Besar gradien tegangan maksimum udara diperoleh dari pengukuran para ahli.



Gambar 4.1. Pemilihan koordinat titik elektroda batang

Koordinat titik yang dipilih pada permukaan aelektroda batang yang dianggap dapat mewakili secara keseluruhan permukaan elektroda adalah seperti pada gambar 4.1 di atas.

Koordinat tersebut adalah :

- |                                |                             |
|--------------------------------|-----------------------------|
| 1. $(r,z) = (0 ; G)$           | 6. $(r,z) = (1 ; G + 5)$    |
| 2. $(r,z) = (0,5 ; G + 0,134)$ | 7. $(r,z) = (1 ; G + 20)$   |
| 3. $(r,z) = (0,866 ; G + 0,5)$ | 8. $(r,z) = (1 ; G + 40)$   |
| 4. $(r,z) = (1 ; G + 1)$       | 9. $(r,z) = (1 ; G + 90)$   |
| 5. $(r,z) = (1 ; G + 2)$       | 10. $(r,z) = (1 ; G + 140)$ |

Setelah nilai-nilai tersebut dimasukkan ke persamaan 2.39, kemudian dihitung dengan program simulasi perhitungan yang telah dibuat. Pemilihan nilai G adalah 15 cm, 20 cm, dan 25 cm. Pemilihan nilai G ini disesuaikan pada pengujian yang telah dilakukan sebelumnya di laboratorium untuk menguji besar desibel dari gangguan korona. Jari-jari elektroda diasumsikan sebesar 1 cm pada kondisi umum.

Hasil dari simulasi perhitungan adalah kuat harga kuat medan pada titik-titik tersebut (dalam pu).

Jika  $V_{pu} = V_s / V_b$

$$(4.1)$$

di mana :

$V_{pu}$  = tegangan per unit

$V_s$  = tegangan sebenarnya

$V_b$  = tegangan dasar

Karena besar  $V_{pu}$  sama dengan satu, maka :

$$V_s = V_b \quad (4.2)$$

sehingga besar kuat medan atau gradien tegangan maksimum sebenarnya adalah :

$$E_s = V_b \cdot E_{pu} \quad (4.3)$$

Dari persamaan tersebut diperoleh besar nilai tegangan :

$$V_b = (E_0 / E_{pu}) \times m \times \delta \quad (4.4)$$

di mana :

$m$  = faktor kekasaran permukaan

$\delta$  = kerapatan udara

Untuk kondisi udara normal, besarnya gradien udara yang dapat ditahan oleh udara adalah 30 kV, sehingga besarnya tegangan kritis pelepasan korona mulai tampak adalah :

$$V_{pk} = (30 / E_{pu}) \times m \times \delta \quad (4.5)$$

## 4.2 HASIL SIMULASI DAN PENGUJIAN

### 4.2.1 Jarak Sela 15 cm

Untuk membandingkan hasil simulasi perhitungan terhadap tegangan kritis korona pada model kubikel dengan kondisi yang sebenarnya dilakukan pengujian di laboratorium dengan melakukan perekaman bunyi korona dengan menggunakan mikrofon dan stetoskop. Pada pengujian pertama dilakukan perekaman dengan menggunakan mikrofon. Jarak sela diatur sebesar 15 cm, tegangan dinaikan perlahan-lahan sebesar 4 kV sambil melakukan perekaman terhadap bunyi korona. Pada saat pengujian dilakukan elektroda yang digunakan memiliki jari-jari sebesar 3 mm, dan pengujian dilakukan pada kondisi suhu 27<sup>0</sup> C dan tekanan 76 cmHg. Tabel hasil perekaman dengan menggunakan mikrofon pada jarak sela 15 cm adalah sebagai berikut.

Tabel IV.1. Hasil perekaman menggunakan mikrofon pada jarak sela 15 cm [9]

Frekuensi (Hz)	dBFS						
	Distorsi	16 kV	20 kV	24 kV	28 kV	32 kV	34 kV
50	-38,4	-31,7	-30,2	-29,2	-27,9	-23,2	-21,7
100				-58,8	-50,8	-41,7	-37,3
150			-63,7	-58,3	-49,1	-36,1	-34
200					-58,8	-48,9	-46
250		-58,7	-58,1	-56,7	-59	-56,7	-50,9
300					-62,8	-55	-53,3
350				-63,5	-62,8	-53,1	-48
400						-56,2	-54,1
450				-63	-63,2	-51,9	-49,8
500						-57,7	-56,2

Dari tabel hasil pengujian dengan menggunakan mikrofon sebagai alat perekam tercatat bahwa korona muncul pertama kali pada rating tegangan 16 kV, hal ini dibuktikan dengan terekamnya suara korona yang memiliki karakteristik frekuensi kelipatan dari frekuensi sistem tenaga listrik seperti terlihat pada tabel 4.1 di atas.

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan mengganti mikrofon dengan stetoskop sebagai alat perekam suara untuk membandingkan kebenaran hasil pengujian. Tabel hasil perekaman suara korona dengan menggunakan stetoskop adalah sebagai berikut.

Tabel IV.2. Hasil perekaman menggunakan stetoskop pada jarak sela 15 cm [9]

Frekuensi (Hz)	dBFS						
	Distorsi	16 kV	20 kV	24 kV	28 kV	32 kV	34 kV
50	-31,9	-30,5	-29,5	-28,5	-28,7	-27,3	-27,4
100			-63,1	-63,1	-54,8	-50,4	-47,5
150					-55,1	-51,3	-49
200					-63,7	-55,6	-56
250		-59,9	-58,4	-58,4	-58,7	-58,1	-55,5
300				-63,1	-62,5	-58	-58,2

Sama seperti pada saat perekaman dengan mikrofon pengujian ini dilakukan pada kondisi suhu  $27^{\circ}$  C dan tekanan udara 76 cmHg. Pada pengujian dengan menggunakan stetoskop sebagai alat perekam ini juga tercatat tegangan kritis awal korona terjadi pada rating tegangan 16 kV.

Untuk membandingkan hasil pengujian di laboratorium tersebut dengan simulasi perhitungan selanjutnya dilakukan simulasi untuk mencari tegangan kritis awal terbentuknya korona pada jarak sela 15 cm dengan jari-jari elektroda sebesar 3 mm. Simulasi dilakukan dengan menjalankan program yang telah dibuat. Hasil simulasi untuk nilai kuat medan pada tiap titik untuk jarak antar sela 15 cm dengan jari-jari elektroda 3 mm adalah sebagai berikut :

1.  $E(r,z) = 1,9962$  pu
2.  $E(r,z) = 1,8081$  pu
3.  $E(r,z) = 1,391$  pu
4.  $E(r,z) = 1,6797$  pu
5.  $E(r,z) = 1,0459$  pu
6.  $E(r,z) = 0,33071$  pu
7.  $E(r,z) = 0,23921$  pu
8.  $E(r,z) = 0,16716$  pu
9.  $E(r,z) = 0,17418$  pu
10.  $E(r,z) = 3,4849 \times 10^{-5}$  pu

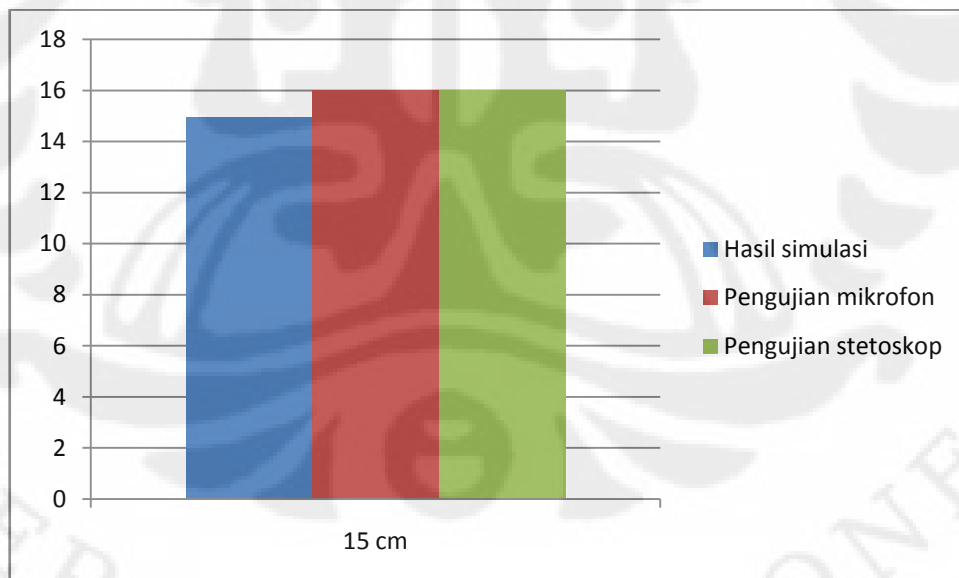
Kemudian dengan menggunakan persamaan 4.5 dengan nilai  $\delta = 0,993067$  (pada suhu  $27^{\circ}$  C dengan tekanan udara 76 cmHg) sesuai dengan kondisi pengujian dihitung besarnya tegangan kritis korona mulai timbul untuk jarak sela 15 cm, dan diperoleh hasil sebagai berikut :

1.  $V(r,z) = 14,9241$  kV
2.  $V(r,z) = 16,4773$  kV

3.  $V(r,z) = 21,4179 \text{ kV}$
4.  $V(r,z) = 17,7364 \text{ kV}$
5.  $V(r,z) = 28,4850 \text{ kV}$
6.  $V(r,z) = 90,0850 \text{ kV}$
7.  $V(r,z) = 124,5436 \text{ kV}$
8.  $V(r,z) = 178,2213 \text{ kV}$
9.  $V(r,z) = 171,0445 \text{ kV}$

Melalui simulasi diperoleh nilai tegangan kritis awal korona untuk jarak sela 15 cm pada titik terendah adalah 14,9241 kV. Sedangkan melalui pengujian baik menggunakan mikrofon maupun stetoskop tercatat tegangan awal munculnya korona adalah pada rating 16 kV. Perbedaan ini bisa disebabkan karena pada saat pengujian, perekaman suara dilakukan setiap kenaikan rating tegangan 4 kV sehingga bunyi korona yang sebenarnya sudah mulai muncul pada rating tegangan 15 kV menjadi tidak terekam. Walaupun tercatat sedikit perbedaan pengukuran tegangan kritis melalui simulasi perhitungan dengan pengujian di laboratorium tetapi selisih itu cukup kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi sudah mewakili kondisi yang sebenarnya.

Di bawah ini adalah grafik perbandingan tegangan kritis awal korona yang diukur melalui simulasi dan pengujian dengan menggunakan mikrofon dan stetoskop.



Gambar 4.2. Grafik perbandingan tegangan kritis untuk  $G = 15 \text{ cm}$

Dapat disimpulkan bahwa untuk jarak sela 15 cm dan jari-jari elektroda 3 mm, untuk kondisi lingkungan normal yaitu pada suhu  $27^{\circ} \text{ C}$  dan tekanan 76 cmHg korona akan mulai muncul pada rating tegangan 15 kV.

#### 4.2.2 Jarak Sela 20 cm

Untuk pengujian selanjutnya, jarak sela diperbesar menjadi 20 cm. Sama seperti prosedur sebelumnya untuk menyelidiki tegangan awal munculnya korona, pada pengujian pertama perekaman terhadap suara korona dilakukan dengan menggunakan mikrofon. Jarak sela diatur sebesar 20 cm, tegangan dinaikan perlahan-lahan sebesar 4 kV sambil melakukan perekaman terhadap bunyi korona. Pada pengujian ini elektroda yang digunakan juga memiliki jari-jari sebesar 3 mm, dan pengujian dilakukan pada kondisi suhu 27<sup>0</sup> C dan tekanan 76 cmHg. Tabel hasil perekaman dengan menggunakan mikrofon pada jarak sela 20 cm adalah sebagai berikut.

Tabel IV.3. Hasil perekaman dengan menggunakan mikrofon pada jarak sela 20 cm [9]

Frekuensi (Hz)	dBFS						
	Distorsi	16 kV	20 kV	24 kV	28 kV	32 kV	34 kV
50	-39,6	-32,8	-31,8	-29,7	-29,4	-27,5	-23,7
100				-57,5	-53,5	-46,1	-44,2
150				-58,5	-51,3	-39,9	-37
200					-64,2	-55,1	-52,8
250		-60,7	-60,6	-60	-59,7	-65	-58
300					-63,9	-55,9	-52,7
350						-57,1	-53,9
400						-67,4	-61,2
450				-64,6	-62,8	-57,9	-54,3
500						-63,9	-61

Dari tabel hasil pengujian untuk jarak sela 20 cm dengan menggunakan mikrofon sebagai alat perekam tercatat bahwa korona muncul pertama kali pada rating tegangan 16 kV, hal ini dibuktikan dengan terekamnya suara korona yang memiliki karakteristik frekuensi kelipatan dari frekuensi sistem tenaga listrik seperti terlihat pada tabel 4.3 di atas.

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan mengganti mikrofon dengan stetoskop sebagai alat perekam suara untuk membandingkan kebenaran hasil pengujian. Tabel hasil perekaman suara korona dengan menggunakan stetoskop adalah sebagai berikut.

Tabel IV.4. Hasil perekaman dengan menggunakan stetoskop pada jarak sela 20 cm [9]

Frekuensi (Hz)	dBFS						
	Distorsi	16 kV	20 kV	24 kV	28 kV	32 kV	34 kV
50	-32,7	-29,8	-29	-28,3	-27,8	-27,2	-26,7
100				-61	-56,9	-54,9	-52,5
150						-57,1	-54,3
200					-61,9	-56,4	-54,3
250		-61,2	-60,1	-60,4	-57,9	-58,9	-57,1
300			-63,3	-61,1	-61,7	-58,6	-60,3

Sama seperti pada saat perekaman dengan mikrofoni pengujian ini dilakukan pada kondisi suhu  $27^{\circ}$  C dan tekanan udara 76 cmHg. Pada pengujian dengan menggunakan stetoskop sebagai alat perekam ini juga tercatat tegangan kritis awal korona terjadi pada rating tegangan 16 kV.

Untuk membandingkan hasil pengujian di laboratorium tersebut dengan simulasi perhitungan selanjutnya dilakukan simulasi untuk mencari tegangan kritis awal terbentuknya korona pada jarak sela 20 cm dengan jari-jari elektroda sebesar 3 mm. Simulasi dilakukan dengan menjalankan program yang telah dibuat. Hasil simulasi untuk nilai kuat medan pada tiap titik untuk jarak antar sela 20 cm dengan jari-jari elektroda 3 mm adalah sebagai berikut :

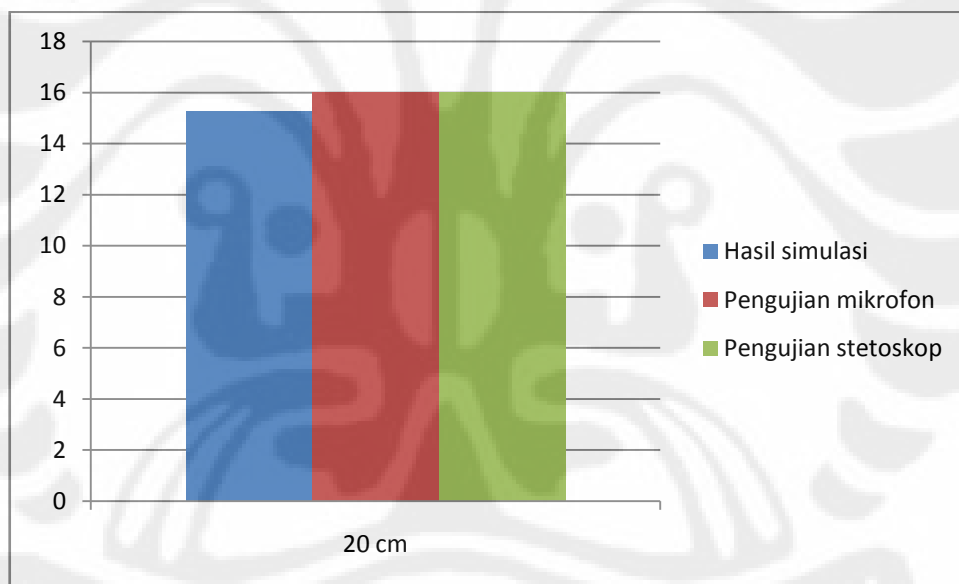
1.  $E(r,z) = 1,9499 \text{ pu}$
2.  $E(r,z) = 1,7680 \text{ pu}$
3.  $E(r,z) = 1,3730 \text{ pu}$
4.  $E(r,z) = 1,6822 \text{ pu}$
5.  $E(r,z) = 1,0285 \text{ pu}$
6.  $E(r,z) = 0,29049 \text{ pu}$
7.  $E(r,z) = 0,13302 \text{ pu}$
8.  $E(r,z) = 0,1650 \text{ pu}$
9.  $E(r,z) = 0,15209 \text{ pu}$
10.  $E(r,z) = 4,1544 \times 10^{-5} \text{ pu}$

Dengan menggunakan persamaan 4.5 dengan nilai  $\delta = 0,993067$  (pada suhu  $27^{\circ}$  C dengan tekanan udara 76 cmHg) sesuai dengan kondisi saat dilakukannya pengujian, dihitung besarnya tegangan kritis korona mulai timbul untuk jarak sela 20 cm, dan diperoleh hasil sebagai berikut :

1.  $V(r,z) = 15,2791 \text{ kV}$
2.  $V(r,z) = 16,8511 \text{ kV}$
3.  $V(r,z) = 21,6980 \text{ kV}$
4.  $V(r,z) = 17,7104 \text{ kV}$
5.  $V(r,z) = 28,9677 \text{ kV}$
6.  $V(r,z) = 102,5595 \text{ kV}$
7.  $V(r,z) = 223,9682 \text{ kV}$
8.  $V(r,z) = 180,5570 \text{ kV}$
9.  $V(r,z) = 195,8788 \text{ kV}$

Melalui simulasi perhitungan tegangan kritis awal korona untuk jarak sela 20 cm pada titik terendah adalah 15,2791 kV. Sedangkan melalui pengujian baik menggunakan mikrofon maupun stetoskop tercatat tegangan awal munculnya korona adalah pada rating 16 kV. Perbedaan ini bisa disebabkan karena pada saat pengujian, perekaman suara dilakukan untuk setiap kenaikan rating tegangan 4 kV sehingga walaupun bunyi korona yang sebenarnya sudah mulai muncul pada rating tegangan 15 kV menjadi tidak terekam. Walaupun tercatat sedikit perbedaan pengukuran tegangan kritis melalui simulasi perhitungan dengan pengujian di laboratorium tetapi selisih itu cukup kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi sudah mewakili kondisi yang sebenarnya.

Di bawah ini adalah grafik perbandingan tegangan kritis awal korona yang diukur melalui simulasi dan pengujian dengan menggunakan mikrofon dan stetoskop.



Gambar 4.3. Grafik perbandingan tegangan kritis untuk  $G = 20$  cm

Dapat disimpulkan bahwa untuk jarak sela 20 cm dan jari-jari elektroda 3 mm, untuk kondisi lingkungan normal yaitu pada suhu  $27^{\circ}$  C dan tekanan 76 cmHg korona akan mulai muncul pada rating tegangan 15 kV.

#### 4.2.3 Jarak Sela 25 cm

Untuk pengujian selanjutnya, jarak sela diperbesar menjadi 25 cm. Sama seperti prosedur sebelumnya untuk menyelidiki tegangan awal munculnya korona,



pada pengujian pertama perekaman terhadap suara korona dilakukan dengan menggunakan mikrofon. Jarak sela diatur sebesar 25 cm, tegangan dinaikan perlahan-lahan sebesar 4 kV sambil melakukan perekaman terhadap bunyi korona. Pada pengujian ini elektroda yang digunakan juga memiliki jari-jari sebesar 3 mm, dan pengujian dilakukan pada kondisi suhu 27<sup>0</sup> C dan tekanan 76 cmHg. Tabel hasil perekaman dengan menggunakan mikrofon pada jarak sela 25 cm adalah sebagai berikut.

Tabel IV.5. Hasil perekaman dengan menggunakan mikrofon pada jarak sela 25 cm [9]

Frekuensi (Hz)	dBFS						
	Distorsi	16 kV	20 kV	24 kV	28 kV	32 kV	34 kV
50	-38,7	-30,7	-29,4	-30	-26,4	-22,8	-21
100				-55,8	-50,4	-47,1	-44,2
150				-57,3	-45,3	-39,9	-36,2
200					-57,6	-52,9	-51,2
250		-60,1	-59,5	-59,2	-60,1	-65	-59,6
300					-61,8	-54,9	-53,9
350					-64,7	-55,8	-52,7
400						-64,2	-63,4
450				-61,7	-59,9	-54,9	-52,7
500							-60,9

Dari tabel hasil pengujian untuk jarak sela 25 cm dengan menggunakan mikrofon sebagai alat perekam tercatat bahwa korona muncul pertama kali pada rating tegangan 16 kV, hal ini dibuktikan dengan terekamnya suara korona yang memiliki karakteristik frekuensi kelipatan dari frekuensi sistem tenaga listrik seperti terlihat pada tabel di 4.5 di atas.

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan mengganti mikrofon dengan stetoskop sebagai alat perekam suara untuk membandingkan kebenaran hasil pengujian. Tabel 4.6 adalah hasil perekaman suara korona dengan menggunakan stetoskop.

Pada pengujian dengan menggunakan stetoskop sebagai alat perekam ini juga tercatat tegangan kritis awal korona terjadi pada rating tegangan 16 kV untuk jarak sela 25 cm pada suhu lingkungan 27<sup>0</sup> C dan tekanan udara 76 cmHg.

Tabel IV.6. Hasil perekaman dengan menggunakan stetoskop pada jarak sela 25 cm [9]

Frekuensi (Hz)	dBFS						
	Distorsi	16 kV	20 kV	24 kV	28 kV	32 kV	34 kV
50	-32	-31,2	-31,4	-29,7	-29,8	-29	-28,3
100						-59,1	-55,7
150			-56	-54,9	-51,3	-48,3	-47,6
200				-63,7	-63,3	-60,2	-61,7
250		-62,8	-59,5			-55,4	-48,2
300					-61,7	-49,2	-52

Untuk membandingkan hasil pengujian di laboratorium tersebut dengan simulasi perhitungan selanjutnya dilakukan simulasi untuk mencari tegangan kritis awal terbentuknya korona pada jarak sela 25 cm dengan jari-jari elektroda sebesar 3 mm. Simulasi dilakukan dengan menjalankan program yang telah dibuat. Hasil simulasi untuk nilai kuat medan pada tiap titik untuk jarak antar sela 25 cm dengan jari-jari elektroda 3 mm adalah sebagai berikut :

1.  $E(r,z) = 2,0302 \text{ pu}$
2.  $E(r,z) = 1,8402 \text{ pu}$
3.  $E(r,z) = 1,4302 \text{ pu}$
4.  $E(r,z) = 1,7629 \text{ pu}$
5.  $E(r,z) = 1,0782 \text{ pu}$
6.  $E(r,z) = 0,30749 \text{ pu}$
7.  $E(r,z) = 0,14370 \text{ pu}$
8.  $E(r,z) = 0,13484 \text{ pu}$
9.  $E(r,z) = 0,14360 \text{ pu}$
10.  $E(r,z) = 4,9269 \times 10^{-5} \text{ pu}$

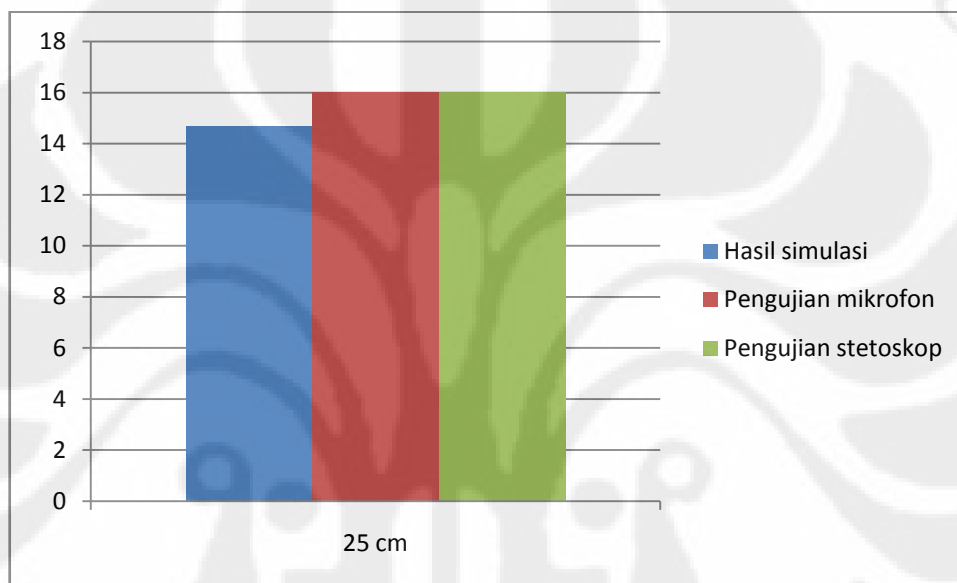
Selanjutnya dengan menggunakan persamaan 4.5, tetapi dengan suhu  $27^{\circ} \text{ C}$  dan tekanan udara tetap yaitu 76 cmHg. Besarnya tegangan kritis awal korona untuk setiap titik berdasarkan perhitungan adalah sebagai berikut.

1.  $V(r,z) = 14,6750 \text{ kV}$
2.  $V(r,z) = 16,1892 \text{ kV}$
3.  $V(r,z) = 20,8307 \text{ kV}$
4.  $V(r,z) = 16,8991 \text{ kV}$
5.  $V(r,z) = 27,6301 \text{ kV}$
6.  $V(r,z) = 96,8888 \text{ kV}$
7.  $V(r,z) = 207,3161 \text{ kV}$
8.  $V(r,z) = 220,9377 \text{ kV}$
9.  $V(r,z) = 207,4685 \text{ kV}$

Melalui simulasi perhitungan tegangan kritis awal korona untuk jarak sela 25 cm pada titik terendah adalah 14,6750 kV. Sedangkan melalui pengujian baik menggunakan mikrofon maupun stetoskop tercatat tegangan awal munculnya korona adalah pada rating 16 kV. Perbedaan ini bisa disebabkan karena pada saat pengujian, perekaman suara dilakukan untuk setiap kenaikan rating tegangan 4 kV

sehingga walaupun bunyi korona yang sebenarnya sudah mulai muncul pada rating tegangan 15 kV menjadi tidak terekam. Walaupun tercatat sedikit perbedaan pengukuran tegangan kritis melalui simulasi perhitungan dengan pengujian di laboratorium tetapi selisih itu cukup kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi sudah mewakili kondisi yang sebenarnya.

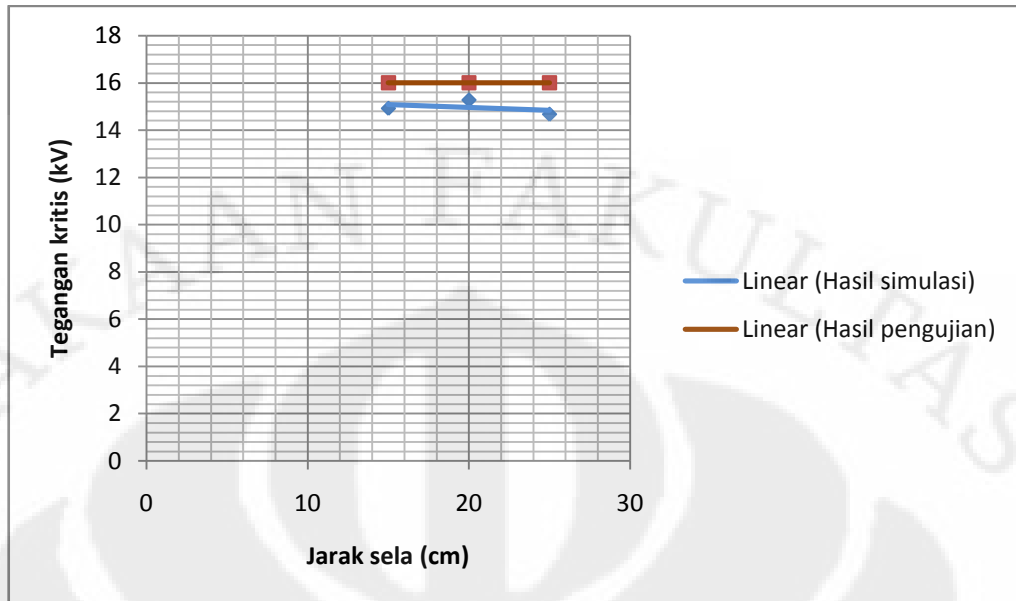
Di bawah ini adalah grafik perbandingan tegangan kritis awal korona yang diukur melalui simulasi dan pengujian dengan menggunakan mikrofon dan stetoskop.



Gambar 4.4. Grafik perbandingan tegangan kritis untuk  $G = 25$  cm

Dapat disimpulkan bahwa untuk jarak sela 20 cm dan jari-jari elektroda 3 mm, untuk kondisi lingkungan normal yaitu pada suhu  $27^{\circ}$  C dan tekanan 76 cmHg korona akan mulai muncul pada rating tegangan 15 kV.

Setelah semua pengujian dan simulasi dilakukan kemudian dilakukan perbandingan maka diperoleh kesimpulan bahwa hasil simulasi sudah mewakili kondisi yang sebenarnya. Hal ini dapat dilihat melalui grafik perbandingan tegangan kritis pada model kubikel yang diperoleh melalui simulasi dan pengujian di bawah ini.



Gambar 4.5. Grafik perbandingan tegangan kritis untuk setiap jarak sela

Pada grafik terlihat bahwa selisih pengukuran tegangan kritis hasil simulasi dan pengujian tidak terlalu berbeda jauh. Seperti telah disebutkan sebelumnya, perbedaan ini bisa disebabkan karena rating tegangan dinaikan setiap 4 kV pada saat pengujian di laboratorium dilakukan, sehingga sangat mungkin bahwa korona yang sebenarnya sudah terjadi pada rating tegangan 15 kV menjadi tidak terukur.

#### 4.3 PENGARUH DIMENSI ELEKTRODA

Seperti telah diketahui pada sub bab sebelumnya bahwa pengujian terhadap tegangan kritis awal terbentuknya korona pada model kubikel yang dilakukan melalui simulasi dan pengujian langsung hasilnya sama. Pada pengujian di laboratorium, variasi jarak sela hanya diatur antara 15 cm, 20 cm, dan 25 cm dan dari variasi jarak tersebut terlihat bahwa untuk kenaikan jarak sela hanya 5 cm tidak terlalu mempengaruhi besarnya tegangan kritis korona.

Hal yang sangat mempengaruhi besarnya tegangan kritis korona pada model kubikel adalah faktor dimensi elektroda. Semakin runcing dimensi elektroda maka akan menyebabkan semakin tidak seragamnya medan pada titik runcing tersebut sehingga menyebabkan korona menjadi lebih mudah terjadi. Berikut ini akan dibuktikan pengaruh dimensi elektroda terhadap besarnya tegangan kritis korona

melalui simulasi. Jarak sela diatur sebesar 15 cm kemudian jari-jari elektroda akan divariasikan sebesar 1 cm; 0,5 cm; dan 0,3 cm.

#### 4.3.1 Jari-jari 1 cm

Pertama-tama jari-jari elektroda dipilih sebesar 1 cm. Hasil simulasi untuk harga kuat medan pada setiap titik adalah sebagai berikut :

- |                          |   |
|--------------------------|---|
| 1. $E(r,z) = 0,78870$ pu | 6. $E(r,z) = 0,31789$ pu                |
| 2. $E(r,z) = 0,77040$ pu | 7. $E(r,z) = 0,25991$ pu                |
| 3. $E(r,z) = 0,70839$ pu | 8. $E(r,z) = 0,21996$ pu                |
| 4. $E(r,z) = 0,57975$ pu | 9. $E(r,z) = 0,20027$ pu                |
| 5. $E(r,z) = 0,41364$ pu | 10. $E(r,z) = 1,3818 \times 10^{-5}$ pu |

Sehingga besarnya tegangan kritis pada titik-titik tersebut pada suhu  $25^{\circ}$  C dan tekanan udara 76 cmHg adalah sebagai berikut :

- |                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| 1. $V(r,z) = 38,0273$ kV | 6. $V(r,z) = 94,3462$ kV  |
| 2. $V(r,z) = 38,9303$ kV | 7. $V(r,z) = 115,3920$ kV |
| 3. $V(r,z) = 42,3382$ kV | 8. $V(r,z) = 136,3497$ kV |
| 4. $V(r,z) = 51,7328$ kV | 9. $V(r,z) = 149,7582$ kV |
| 5. $V(r,z) = 72,5082$ kV |                           |

#### 4.3.2 Jari-jari 0.5 cm

Berikutnya jari-jari elektroda dipilih sebesar 0,7 cm. Besarnya kuat medan pada setiap titik berdasarkan hasil simulasi adalah sebagai berikut :

- |                          |   |
|--------------------------|---|
| 1. $E(r,z) = 1,10850$ pu | 6. $E(r,z) = 0,26089$ pu                |
| 2. $E(r,z) = 1,03480$ pu | 7. $E(r,z) = 0,21104$ pu                |
| 3. $E(r,z) = 0,80484$ pu | 8. $E(r,z) = 0,18136$ pu                |
| 4. $E(r,z) = 0,43136$ pu | 9. $E(r,z) = 0,17201$ pu                |
| 5. $E(r,z) = 0,32530$ pu | 10. $E(r,z) = 1,9536 \times 10^{-5}$ pu |

Sehingga besarnya tegangan kritis pada titik-titik tersebut pada suhu  $25^{\circ}$  C dan tekanan udara 76 cmHg adalah sebagai berikut :

- |                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| 1. $V(r,z) = 27,0554$ kV | 4. $V(r,z) = 69,5281$ kV  |
| 2. $V(r,z) = 28,9824$ kV | 5. $V(r,z) = 92,1966$ kV  |
| 3. $V(r,z) = 37,2645$ kV | 6. $V(r,z) = 114,9591$ kV |

7.  $V(r,z) = 142,1156 \text{ kV}$

9.  $V(r,z) = 174,3582 \text{ kV}$

8.  $V(r,z) = 165,3752 \text{ kV}$

### 4.3.3 Jari-jari 0.3 cm

Berikutnya jari-jari elektroda dipilih sebesar 0,3 cm. Besarnya kuat medan pada setiap titik berdasarkan hasil simulasi adalah sebagai berikut :

1.  $E(r,z) = 1,9962 \text{ pu}$

6.  $E(r,z) = 0,33071 \text{ pu}$

2.  $E(r,z) = 1,8081 \text{ pu}$

7.  $E(r,z) = 0,23921 \text{ pu}$

3.  $E(r,z) = 1,3910 \text{ pu}$

8.  $E(r,z) = 0,16716 \text{ pu}$

4.  $E(r,z) = 1,6797 \text{ pu}$

9.  $E(r,z) = 0,17418 \text{ pu}$

5.  $E(r,z) = 1,0459 \text{ pu}$

10.  $E(r,z) = 3,4849 \times 10^{-5} \text{ pu}$

Sehingga besarnya tegangan kritis pada titik-titik tersebut pada suhu  $25^{\circ} \text{C}$  dan tekanan udara 76 cmHg adalah sebagai berikut :

1.  $V(r,z) = 15,0242 \text{ kV}$

6.  $V(r,z) = 90,6896 \text{ kV}$

2.  $V(r,z) = 16,5879 \text{ kV}$

7.  $V(r,z) = 125,3795 \text{ kV}$

3.  $V(r,z) = 21,5616 \text{ kV}$

8.  $V(r,z) = 179,4174 \text{ kV}$

4.  $V(r,z) = 17,8554 \text{ kV}$

9.  $V(r,z) = 172,1924 \text{ kV}$

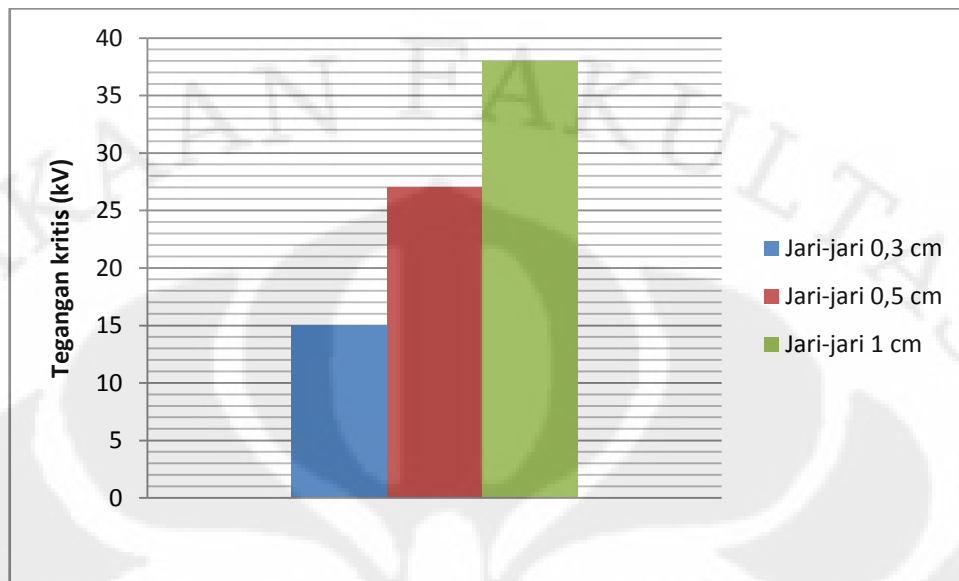
5.  $V(r,z) = 28,6761 \text{ kV}$

Dari hasil simulasi untuk jarak sela 15 cm dengan variasi jari-jari elektroda 1 cm; 0,5 cm; dan 0,3 cm terlihat bahwa besarnya jari-jari elektroda sangat mempengaruhi besarnya tegangan kritis.

Pada saat jari-jari elektroda adalah 1 cm besarnya tegangan kritis titik terendah adalah 38,0273 kV, kemudian ketika jari-jari elektroda diperkecil menjadi 0,5 cm tegangan kritis pada titik terendah turun menjadi 27,0554 kV, dan berikutnya ketika jari-jari diperkecil lagi menjadi 0,3 cm tegangan kritis pada titik terendah turun menjadi 15,0242 kV.

Penurunan tegangan kritis yang sangat jauh antara jari-jari elektroda 1 cm; 0,5 cm; dan 0,3 cm memperlihatkan bahwa semakin runcing elektroda maka akan menyebabkan korona semakin mudah terjadi. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa jari-jari elektroda sangat berpengaruh terhadap ketidakseragaman medan yang menyebabkan semakin rendahnya tegangan kritis

awal korona. Hal tersebut dapat dilihat pada grafik perbandingan tegangan kritis korona terhadap jari-jari elektroda di bawah ini.



Gambar 4.6. Grafik perbandingan tegangan kritis dengan jari-jari elektroda pada jarak sela 15 cm

#### 4.4 PENGUKURAN PADA KUBIKEL GARDU TEGANGAN MENENGAH

Dari hasil pengukuran dengan simulasi perhitungan dan pengujian yang dilakukan di laboratorium telah diketahui besarnya tegangan kritis awal korona, kemudian dari hasil pengujian di laboratorium tersebut diperoleh data karakteristik frekuensi suara korona.

Pengujian selanjutnya dilakukan pada gardu kubikel tegangan menengah untuk menyelidiki ada atau tidaknya fenomena korona pada gardu tersebut. Dengan menggunakan hasil pengujian di laboratorium yang berupa karakteristik frekuensi suara korona akan dibandingkan dengan pengukuran yang dilakukan di gardu yang juga berupa suara yang direkam. Pengukuran dilakukan pada gardu 5, gardu 6, gardu 8, dan gardu 11 Universitas Indonesia.

##### 4.4.1 Gardu 5

Pada pengukuran yang dilakukan di gardu 5 diperoleh data berupa bunyi suara yang terekam. Dengan membandingkan hasil tersebut dengan pengujian yang dilakukan di laboratorium akan diketahui ada atau tidaknya fenomena korona pada kubikel di dalam gardu tersebut.

Perekaman bunyi dilakukan pada tiga kubikel yang ada di gardu 5 tersebut, kemudian dengan menganalisa spektrum frekuensi diperoleh tabel tingkat kebisingan untuk tiap kubikel sebagai berikut.

Tabel IV.7. Spektrum suara pada gardu 5

Frekuensi (Hz)	dB		
	Kubikel 1	Kubikel 2	Kubikel 3
50	-37,7	-37,5	-36,9
100	-64,5	-56,8	-65,4
150	-66	-51,3	-66,5
200		-59,8	
250			
300			
350			
400		-67,8	-61,3
450			
500			

Rating tegangan pada kubikel di gardu tersebut adalah 20 kV, sehingga data di atas akan dibandingkan dengan data pengujian di laboratorium pada rating tegangan 20 kV yang menggunakan mikrofon karena pengukuran di gardu juga menggunakan mikrofon. Tabel pengujian di laboratorium untuk rating tegangan 20 kV tiap sela adalah sebagai berikut.

Tabel IV.8. Spektrum suara korona pada percobaan laboratorium dengan menggunakan mikrofon

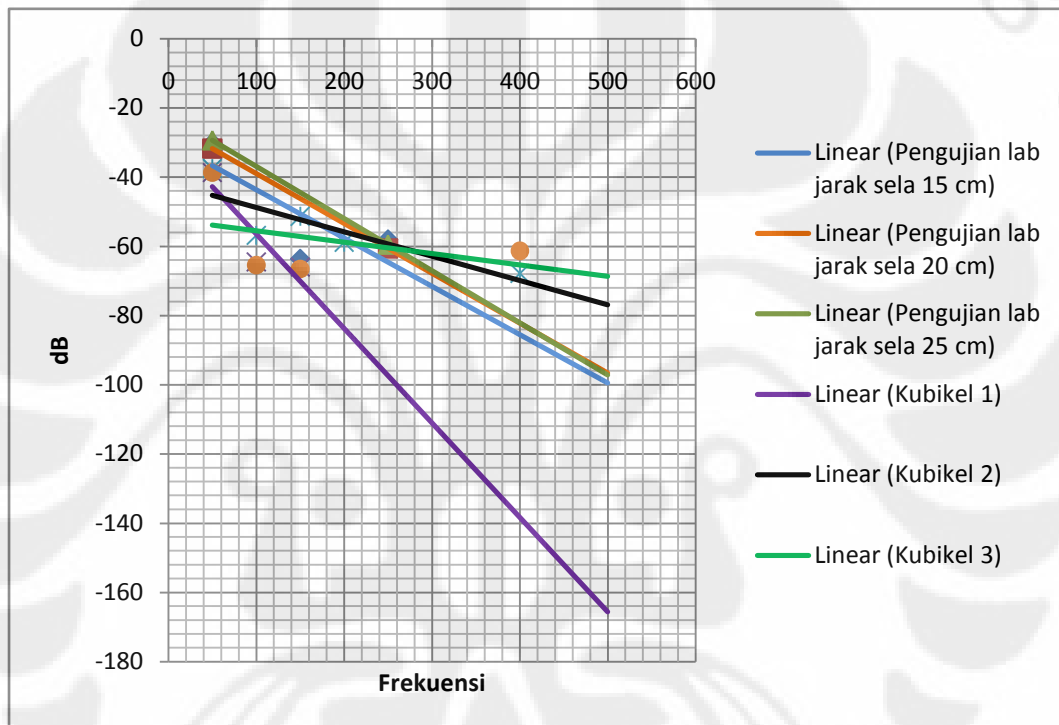
Frekuensi Hz	dB		
	15 cm	20 cm	25 cm
50	-30,2	-31,8	-29,4
100			
150	-63,7		
200			
250	-58,1	-60,6	-59,5
300			
350			
400			
450			
500			

Dari tabel 4.8 di atas terlihat bahwa suara korona pada kondisi tegangan kritis muncul hanya pada frekuensi 50 Hz dan 250 Hz. Spektrum suara yang direkam pada kubikel di gardu 5 memiliki karakteristik frekuensi yang mirip dengan suara yang direkam di laboratorium yaitu kelipatan 50 Hz, tetapi pada hasil pengukuran di gardu ada suara lain yang muncul selain pada frekuensi 50 Hz dan 250 Hz. Jika



dibandingkan dari tingkat kebisingannya, suara yang direkam di gardu 5 lebih rendah dB-nya dibanding suara korona yang terekam pada pengujian di laboratorium.

Pada grafik perbandingan di bawah ini terlihat perbedaan spektrum suara antara pengujian di laboratorium dengan pengukuran pada gardu 5. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa walaupun suara yang terekam pada gardu 5 memiliki karakteristik frekuensi yang mirip dengan frekuensi suara korona tetapi suara tersebut bukanlah suara yang dihasilkan fenomena korona.



Gambar 4.7. Grafik perbandingan spektrum frekuensi dengan tingkat kebisingan

Kemungkinan suara tersebut berasal dari trafo karena trafo yang mengeluarkan bunyi dengan frekuensi yang sesuai dengan frekuensi sistem tenaga listrik.

Kesimpulannya adalah kondisi pengujian pada kubikel gardu 5 ini tidak sama dengan kondisi pada saat pengukuran di laboratorium sehingga terdapat perbedaan tegangan kritis awal korona. Apabila kondisi kubikel pada gardu 5 ini sesuai dengan kondisi normal simulasi perhitungan, maka tegangan kritis korona terendah pada kubikel di gardu 5 dihitung dengan menggunakan simulasi

perhitungan adalah sekitar 38 kV, yaitu dengan asumsi jarak antara elektroda dengan badan kubikel adalah 15 cm dan jari-jari elektroda 1 cm.

#### 4.4.2 Gardu 6

Berikut ini adalah tabel spektrum suara yang direkam pada masing-masing kubikel pada gardu 6.

Tabel IV.9. Spektrum suara pada gardu 6

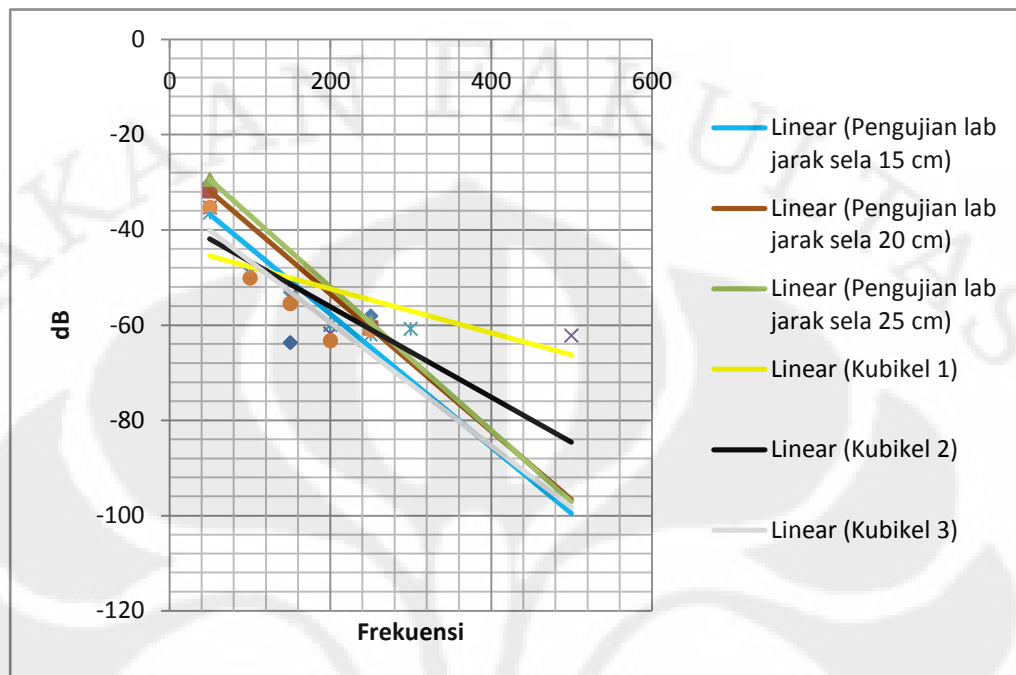
Frekuensi Hz	dB		
	Kubikel 1	Kubikel 2	Kubikel 3
50	-35,3	-36,4	-35,3
100	-49	-49,2	-50,1
150	-53,7	-54,3	-55,5
200	-61,8	-60	-63,3
250		-62	-61
300		-60,8	
350			
400			
450			
500	-62,2		

Data pada tabel 4.9 di atas jika dibandingkan dengan data pada tabel 4.8 hasil pengujian di laboratorium juga memiliki kesamaan pada spektrum frekuensinya yaitu kelipatan 50 Hz. Akan tetapi ada perbedaan tingkat kebisingan suara antara pengujian di laboratorium dengan pengukuran di gardu. Pada pengukuran di gardu ini juga ada suara lain yang muncul selain pada frekuensi 50 Hz dan 250 Hz untuk tegangan 20 kV. Hal ini tidak sesuai dengan hasil pengujian di laboratorium di mana suara korona untuk tegangan 20 kV muncul frekuensi 50 Hz dan 250 Hz.

Pada grafik perbandingan di bawah ini terlihat kemiripan pola spektrum suara korona untuk pengujian di laboratorium pada jarak sela 15 cm, 20 cm, dan 25 cm, dibandingkan dengan spektrum suara yang terekam pada kubikel 1, kubikel 2, dan kubikel 3 gardu 6 ada penyimpangan yang cukup jauh.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa walaupun suara yang terekam pada kubikel 1, 2, dan 3 gardu 6 memiliki karakteristik frekuensi yang mirip dengan frekuensi suara korona tetapi suara tersebut bukanlah suara yang dihasilkan fenomena korona. Kemungkinan suara tersebut adalah suara dari trafo,

karena bunyi suara trafo memiliki frekuensi yang sesuai dengan frekuensi sistem tenaga listrik mirip dengan korona.



Gambar 4.8. Grafik perbandingan spektrum frekuensi dengan tingkat kebisingan

Kesimpulannya adalah kondisi saat dilakukan pengukuran pada kubikel di gardu 6 ini tidak sama dengan kondisi pada saat pengujian di laboratorium sehingga terdapat perbedaan tegangan kritis awal korona. Apabila kondisi kubikel pada gardu 6 ini sesuai dengan kondisi normal simulasi perhitungan, maka tegangan kritis korona terendah pada kubikel di gardu 6 dihitung dengan menggunakan simulasi perhitungan adalah sekitar 38 kV, yaitu dengan asumsi jarak antara elektroda dengan badan kubikel adalah 15 cm dan jari-jari elektroda 1 cm.

#### 4.4.3 Gardu 8

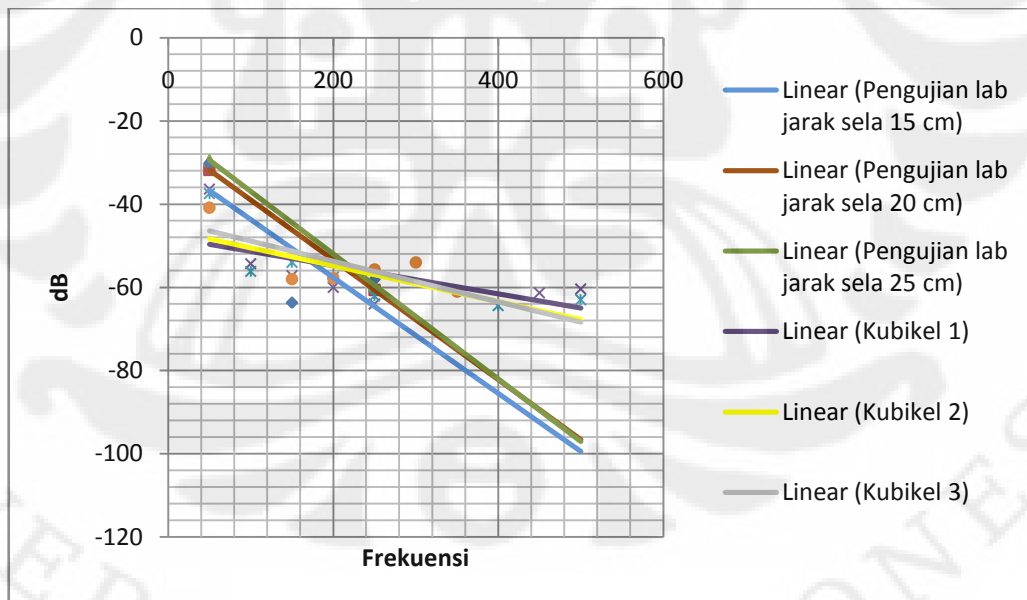
Spektrum suara yang terekam pada gardu 8 seperti pada tabel 4.10 di bawah ini jika dibandingkan dengan data suara korona pada tabel 4.8 hasil pengujian di laboratorium memiliki kesamaan pada spektrum frekuensinya yaitu kelipatan 50 Hz. Akan tetapi tingkat kebisingan suaranya lebih rendah. Pada pengujian di laboratorium suara korona hanya muncul pada frekuensi 50 Hz dan 250 Hz untuk tegangan 20 kV baik pada jarak sela 15 cm, 20 cm, maupun 25 cm. Melalui tabel

4.10 di bawah ini terlihat bahwa pada pengukuran di gardu 8 ada suara lain yang muncul selain pada frekuensi 50 Hz dan 250 Hz pada masing-masing kubikel.

Tabel IV.10. Spektrum suara pada gardu 8

Frekuensi Hz	dB		
	Kubikel 1	Kubikel 2	Kubikel 3
50	-35,3	-34,5	-36,4
100	-54,3	-56,2	-55,3
150	-57,2	-54	-58
200	-60	-57,6	-57,8
250	-64	-62,1	-55,7
300			-54
350			-61
400		-64,4	
450	-61,3		
500	-60,4	-63	

Pada grafik perbandingan di bawah ini terlihat kesamaan pola untuk grafik spektrum suara korona pada pengujian di laboratorium untuk jarak sela 15 cm, 20 cm, dan 25 cm, jika dibandingkan dengan spektrum suara yang terekam pada kubikel 1, kubikel 2, dan kubikel 3 gardu 8 ada penyimpangan yang cukup jauh.



Gambar 4.9. Grafik perbandingan spektrum frekuensi dengan tingkat kebisingan

Dapat disimpulkan bahwa walaupun suara yang terekam pada kubikel 1, 2, dan 3 gardu 8 ini memiliki karakteristik frekuensi yang mirip dengan frekuensi suara korona tetapi suara tersebut bukanlah suara yang dihasilkan karena adanya

korona. Kemungkinan suara tersebut adalah suara dari trafo, karena bunyi suara trafo memiliki frekuensi yang sesuai dengan frekuensi sistem tenaga listrik mirip dengan korona.

Karena kondisi saat dilakukan pengukuran pada kubikel di gardu 8 ini tidak sama dengan kondisi pada saat pengujian di laboratorium sehingga terdapat perbedaan tegangan kritis awal korona. Apabila kondisi kubikel pada gardu 8 ini sesuai dengan kondisi normal simulasi perhitungan, maka tegangan kritis korona terendah pada kubikel di gardu 8 dihitung dengan menggunakan simulasi perhitungan adalah sekitar 38 kV, yaitu dengan asumsi jarak antara elektroda dengan badan kubikel adalah 15 cm dan jari-jari elektroda 1 cm.

#### 4.4.4 Gardu 11

Tabel spektrum suara yang direkam pada masing-masing kubikel untuk gardu 11 adalah sebagai berikut.

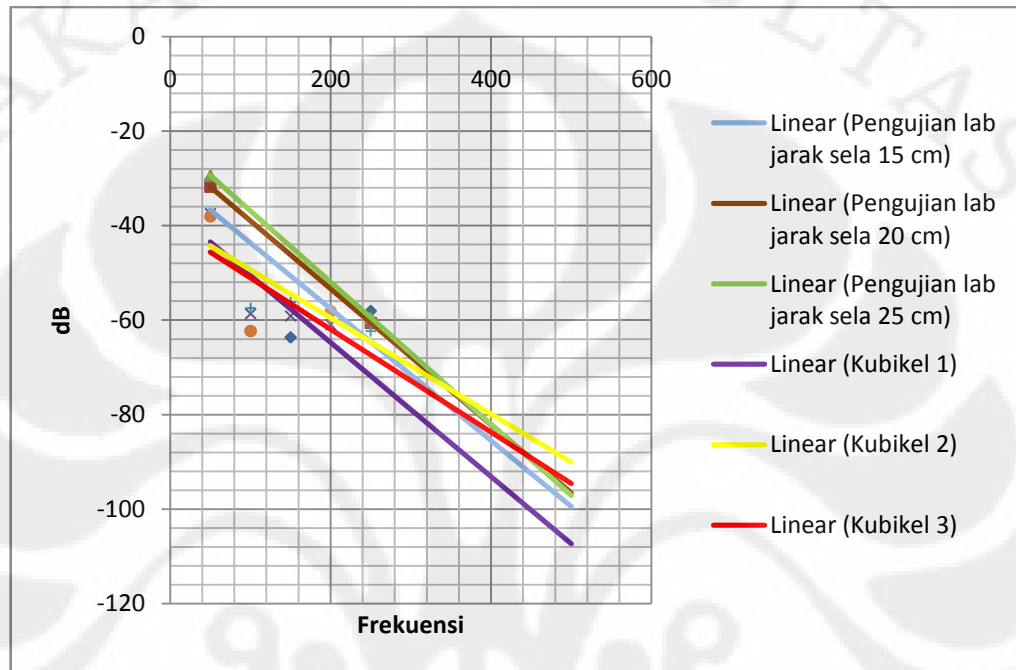
Tabel IV.11. Spektrum suara pada gardu 11

Frekuensi Hz	dB		
	Kubikel 1	Kubikel 2	Kubikel 3
50	-37,5	-36,7	-38,5
100	-58,7	-57,5	-60,6
150	-59,2	-56,2	-62,3
200	-61	-58,6	-58,2
250		-62,4	
300			
350			
400			
450			
500			

Data spektrum suara hasil rekaman pada gardu 11 yang ada tabel 4.11 di atas jika dibandingkan dengan spektrum suara korona hasil pengujian di laboratorium yang tercantum pada tabel 4.8 terdapat kesamaan pada spektrum frekuensinya yaitu kelipatan 50 Hz walaupun terdapat perbedaan tingkat kebisingan. Akan tetapi, pada pengujian di laboratorium suara korona hanya muncul pada frekuensi 50 Hz dan 250 Hz untuk tegangan 20 kV baik pada jarak sela 15 cm, 20 cm, maupun 25 cm. Melalui tabel 4.11 di atas terlihat bahwa pada pengukuran di gardu 11 ada suara lain yang muncul selain pada frekuensi 50 Hz dan 250 Hz pada

masing-masing kubikel. Dengan demikian, suara yang terekam pada gardu 11 tersebut bukanlah suara dari korona.

Pada grafik perbandingan di bawah ini ada penyimpangan yang cukup jauh antara pengukuran di gardu untuk masing-masing kubikel dengan hasil pengujian di laboratorium.



Gambar 4.10. Grafik perbandingan spektrum frekuensi dengan tingkat kebisingan

Kesimpulannya adalah kondisi saat dilakukan pengukuran pada kubikel di gardu 11 ini tidak sama dengan kondisi pada saat pengujian di laboratorium sehingga terdapat perbedaan tegangan kritis awal korona. Apabila kondisi kubikel pada gardu 11 ini sesuai dengan kondisi normal simulasi perhitungan, maka tegangan kritis korona terendah pada kubikel di gardu 11 dihitung dengan menggunakan simulasi perhitungan adalah sekitar 38 kV, yaitu dengan asumsi jarak antara elektroda dengan badan kubikel adalah 15 cm dan jari-jari elektroda 1 cm.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

1. Dengan membandingkan hasil simulasi terhadap tegangan kritis korona pada model kubikel dengan pengujian langsung di laboratorium diperoleh hasil bahwa simulasi sudah mewakili kondisi yang sebenarnya.
2. Dengan menggunakan simulasi dibuktikan bahwa faktor yang sangat mempengaruhi besarnya tegangan kritis awal munculnya korona pada model kubikel adalah dimensi elektroda. Semakin runcing bentuk elektroda maka akan menyebabkan medan semakin tidak seragam sehingga semakin mempermudah proses terbentuknya korona.
3. Melalui simulasi, diperoleh besarnya tegangan kritis awal korona adalah 14,9241 kV untuk jarak antar elektroda 15 cm; 15,2791 kV untuk jarak antar elektroda 20 cm; dan 14,675 kV untuk jarak antar elektroda 25 cm dengan besar jari-jari elektroda adalah 0,3 cm dan pada kondisi lingkungan yang normal yaitu pada suhu  $27^0$  C dan tekanan udara 76 cmHg.
4. Dengan membandingkan hasil pengujian di laboratorium dan pengukuran di gardu dapat disimpulkan bahwa kondisi yang dilakukan pada saat pengujian di laboratorium seperti jari-jari elektroda, jarak celah, suhu udara, tekanan udara, kelembaban udara, dan sebagainya tidak sama dengan kondisi saat dilakukannya pengukuran di gardu. Hal ini dibuktikan dengan tidak munculnya gejala korona pada gardu untuk rating tegangan yang sama pada saat terjadinya korona pada pengujian di laboratorium.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Hayt, William H., Buck, Johan A., *Engineerring Electromagnetics, Seventh Edition* (McGraw-Hill, 2006).
- [2] Arismunandar, A., *Teknik Tegangan Tinggi, Cetakan kedelapan*, (Jakarta : Pradnya Paramita, 2001).
- [3] Naidu, M.S., Kamaraju, V., *High Voltage Engineering, Edisi ketiga*, (McGraw-Hill).
- [4] Razevig, D.V., *High Voltage Engineering*, (New Delhi : Khanna Publisher, 2-B Nath Market, 1979).
- [5] Komari, H., Kadarisman, P., “Kegagalan Proteksi Distribusi 20 KV”, Seminar Proteksi PT.PLN (2001).
- [6] Wu, Dong, Asplund, G., Jacobson, B., Ming, Li, Sahlen, F., “Humidity Influence on Switching-Impulse Breakdown Voltage of Air Gaps for Indoor High-Voltage Installations”, *International Symposium on High Voltage Engineering* (Beijing, 2005).
- [7] Feser, Kurt, “Influence of Humidity on The Breakdown Voltage of D.C. and A.C. Voltages in Air”, *Bulletin ASE* 63 (6), 1972 : hal. 278-221.
- [8] Garniwa, Iwa Dr. Ir., *Karakteristik Pelepasan Korona Pada Sela Batang-Bidang*, Tugas Akhir FTUI (Jakarta : 1987).
- [9] Thalib, Hanif S.T., *Pendeteksian Korona Pada Model Kubikel Berdasarkan Analisis Frekuensi Dan Spektrum Suara*, Skripsi FTUI, (Jakarta : 2002).



## DAFTAR PUSTAKA

Arismunandar, A., *Teknik Tegangan Tinggi*, Cetakan kedelapan (Jakarta : Pradnya Paramita, 2001).

Desphande, M.V., *Electrical Power System Design*, ( New Delhi : Tata McGraw-Hill, 1984).

Feser, Kurt, "Influence of Humidity on The Breakdown Voltage of D.C. and A.C. Voltages in Air", *Bulletin ASE* 63(6), 1972, hal : 278-221.

Garniwa, Iwa Dr. Ir., *Karakteristik Pelepasan Korona Pada Sela Batang-Bidang*, Tugas Akhir FTUI (Jakarta, 1987).

Hayt, William H., Buck, Johan A., *Engineerring Electromagnetics, Seventh Edition* (McGraw-Hill, 2006).

Komari, H., Kadarisman, P., "Kegagalan Proteksi Distribusi 20 KV", Seminar Proteksi PT.PLN (2001).

Naidu, M.S., Kamaraju, V., *High Voltage Engineering, Edisi ketiga*, (McGraw-Hill).

MATLAB *Help*.

Razevig, D.V., *High Voltage Engineering*, (New Delhi : Khanna Publisher, 2-B Nath Market, 1979).

Wu, Dong, Asplund, G., Jacobson, B., Ming, Li, Sahlen, F., "Humidity Influence on Switching-Impulse Breakdown Voltage of Air Gaps for Indoor High-Voltage Installations", *International Symposium on High Voltage Engineering* (Beijing, 2005).

## LAMPIRAN

### Lampiran 1 Listing Program Simulasi

#### Fungsi pembentukan matriks

```
function hitung_Callback(hObject,  
eventdata, handles)  
teksA = findobj('tag','G');  
teksB = findobj('tag','r');  
a = get(teksA,'string');  
G = str2num(a);  
b = get(teksB,'string');  
r = str2num(b);  
as(1) = 1;  
as(2) = 1.1;  
as(3) = 1.2;  
as(4) = 1.5;  
as(5) = 2;  
as(6) = 10;  
as(7) = 25;  
as(8) = 90;  
as(9) = 240;  
vol(1) = 1;  
vol(2) = 2;  
vol(3) = 5;  
vol(4) = 15;  
vol(5) = 40;  
vol(6) = 140;  
vol(7) = 440;  
for x = 1:9  
    A(x) = G + as(x);  
end  
for y = 1:7  
    Z(y) = G + vol(y);  
end  
for y = 1:7  
    for x = 1:9  
        S(y,x) =  
log(((A(x)+Z(y))+sqrt(((A(x)+Z(y))^2  
)+(r^2))))/((A(x)-Z(y))+sqrt(((A(x)-  
Z(y))^2+(r^2)))));  
    end  
end  
for x = 1:9  
    S(8,x) = log((A(x) + G)/(A(x) -  
G));  
end  
for x = 1:9  
    S(9,x) =  
(((1/(A(x)+G))+((1/(A(x)-G)))));  
end  
for x = 1:9  
    S(10,x) = ((9/4)*((( -  
1)/((A(x)+G)^4))+((1)/((A(x)-G)^4)))) -  
((6)*((1)/((A(x)+G)^3))+((1)/((A(x)-  
G)^3)))) + ((5)*((( -  
1)/((A(x)+G)^2))+((1)/((A(x)-G)^2)))) -  
(((1)/((A(x)+G)))+(1/((A(x)-G))));  
end
```

```
for y = 1:7  
    S(y,10) = (1/(sqrt((r^2)+((G+1-  
Z(y))^2)))) -  
(1/(sqrt((r^2)+((G+1+Z(y))^2)))));  
end  
S(8,10) = 1 - (1/((2*(G+1))));  
S(9,10) = (2*(G+1))/((2*(G+1))-1)^3);  
;  
S(10,10) = (((-2)*(G+1))/(((2*(G+1))-  
1)^3)) -  
(((36)*((G+1)^2))/(((2*(G+1))-1)^5))  
;  
teks1 = findobj('tag','materiks');  
set(teks1,'string',num2str(S,5));
```

#### Fungsi invers matriks

```
function next1_Callback(hObject,  
eventdata, handles)  
teks4 = findobj('tag','materiks');  
a = get(teks4,'string');  
S = str2num(a);  
temp = inv(S);  
teks1 = findobj('tag','inverse');  
set(teks1,'visible','on');  
set(teks1,'string',num2str(temp,5));
```

#### Fungsi penghitungan muatan

```
function next2_Callback(hObject,  
eventdata, handles)  
teks4 = findobj('tag','inverse');  
a = get(teks4,'string');  
temp = str2num(a);  
W(1) = 1;  
W(2) = 1;  
W(3) = 1;  
W(4) = 1;  
W(5) = 1;  
W(6) = 1;  
W(7) = 1;  
W(8) = 1;  
W(9) = 0;  
W(10) = 0;  
q = temp * transpose(W);  
teks7 = findobj('tag','q1');  
set(teks7,'string',num2str(q(1)));  
teks8 = findobj('tag','q2');  
set(teks8,'string',num2str(q(2)));  
teks9 = findobj('tag','q3');  
set(teks9,'string',num2str(q(3)));  
teks10 = findobj('tag','q4');  
set(teks10,'string',num2str(q(4)));  
teks11 = findobj('tag','q5');  
set(teks11,'string',num2str(q(5)));
```

```

teks12 = findobj('tag','q6');
set(teks12,'string',num2str(q(6)));
teks13 = findobj('tag','q7');
set(teks13,'string',num2str(q(7)));
teks14 = findobj('tag','q8');
set(teks14,'string',num2str(q(8)));
teks15 = findobj('tag','q9');
set(teks15,'string',num2str(q(9)));
teks16 = findobj('tag','q10');
set(teks16,'string',num2str(q(10)));

```

### Fungsi penghitungan kuat medan

```

function next3_Callback(hObject,
eventdata, handles)
teks18 = findobj('tag','q1');
handle1 = get(teks18,'string');
Q(1) = str2num(handle1);
teks19 = findobj('tag','q2');
handle2 = get(teks19,'string');
Q(2) = str2num(handle2);
teks20 = findobj('tag','q3');
handle3 = get(teks20,'string');
Q(3) = str2num(handle3);
teks21 = findobj('tag','q4');
handle4 = get(teks21,'string');
Q(4) = str2num(handle4);
teks22 = findobj('tag','q5');
handle5 = get(teks22,'string');
Q(5) = str2num(handle5);
teks23 = findobj('tag','q6');
handle6 = get(teks23,'string');
Q(6) = str2num(handle6);
teks24 = findobj('tag','q7');
handle7 = get(teks24,'string');
Q(7) = str2num(handle7);
teks25 = findobj('tag','q8');
handle8 = get(teks25,'string');
Q(8) = str2num(handle8);
teks26 = findobj('tag','q9');
handle9 = get(teks26,'string');
Q(9) = str2num(handle9);
teks27 = findobj('tag','q10');
handle10 = get(teks27,'string');
Q(10) = str2num(handle10);
teksB = findobj('tag','r');
b = get(teksB,'string');
r = str2num(b);
teksA = findobj('tag','G');
c = get(teksA,'string');
G = str2num(c);
for w = 1 : 10
    Gi(w) = G;
end
as(1) = 1;
as(2) = 1.1;
as(3) = 1.2;
as(4) = 1.5;
as(5) = 2;
as(6) = 10;
as(7) = 25;
as(8) = 90;
as(9) = 240;
for x = 1:9
    A(x) = G + as(x);
end
Z2(1) = 0;
Z2(2) = 0.134;
Z2(3) = 0.5;
Z2(4) = 1;
Z2(5) = 2;
Z2(6) = 5;
Z2(7) = 20;

```

```

Z2(8) = 40;
Z2(9) = 90;
Z2(10) = 140;
r1(1) = 0 * r;
r1(2) = 0.5 * r;
r1(3) = 0.866 * r;
r1(4) = 1 * r;
r1(5) = 1 * r;
r1(6) = 1 * r;
r1(7) = 1 * r;
r1(8) = 1 * r;
r1(9) = 1 * r;
r1(10) = 1 * r;
for u = 1:10
    Z1(u) = G + Z2(u);
end
for u = 1:9
    for v = 1:9
        ST1(v) =
            (((r1(u))/(sqrt(((A(v)+Z1(u))^2)+((r1(u))^2)))*((A(v)+Z1(u)))+(sqrt(((A(v)+Z1(u))^2)+((r1(u))^2)))) -
            ((r1(u))/(sqrt(((r1(u))^2)+((A(v)-Z1(u))^2)))*((A(v)-Z1(u)))+(sqrt(((r1(u))^2)+((A(v)-Z1(u))^2)))) * Q(v);
        ST2(v) =
            (((1+(A(v)+Z1(u))/sqrt(((A(v)+Z1(u))^2)+((r1(u))^2)))/((A(v)+Z1(u)))+(sqrt(((A(v)+Z1(u))^2)+((r1(u))^2)))) +
            ((1+(A(v)-Z1(u))/sqrt(((r1(u))^2)+((A(v)-Z1(u))^2)))/((A(v)-Z1(u)))+(sqrt(((r1(u))^2)+((A(v)-Z1(u))^2)))) * Q(v);
        jum1(u) = sum(ST1);
        jum2(u) = sum(ST2);
    end
    jum1(10) = 0;
    jum2(10) = 0;
    for i = 1:10
        ST3(i) = (((-r1(i))/(sqrt(((r1(i))^2)+((G+1-Z1(i))^2))^3))) +
            ((r1(i))/(sqrt(((r1(i))^2)+((G+1+Z1(i))^2))^3))) * Q(10);
        jum3(i) = ST3(i);
    end
    ST4(i) = ((G+1-Z1(i))/(sqrt(((r1(i))^2)+((G+1-Z1(i))^2))^3))) +
            ((G+1+Z1(i))/(sqrt(((r1(i))^2)+((G+1+Z1(i))^2))^3))) * Q(10);
        jum4(i) = ST4(i);
    end
    for i = 1:10
        p1(i) = jum3(i) + jum1(i);
        o1(i) = jum4(i) + jum2(i);
        gt(i) =
            sqrt(((p1(i))^2)+((o1(i))^2));
    end
    teks12 = findobj('tag','gsatuan');
    set(teks12,'string',num2str(transpose(Gi)));
    teks13 = findobj('tag','zsatuan');
    set(teks13,'string',num2str(transpose(Z1)));
    teks14 = findobj('tag','rsatuan');
    set(teks14,'string',num2str(transpose(r1)));
    teks15 = findobj('tag','ersatuan');
    set(teks15,'string',num2str(transpose(p1)));

```

```

teks16 = findobj('tag','ezsatuan');
set(teks16,'string',num2str(transpose
(ol)));
teks17 = findobj('tag','esatuan');
set(teks17,'string',num2str(transpose
(gt)));

```

### Fungsi penghitungan tegangan kritis

```

function tegangan_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
teks18 = findobj('tag','q1');
handle1 = get(teks18,'string');
Q(1) = str2num(handle1);
teks19 = findobj('tag','q2');
handle2 = get(teks19,'string');
Q(2) = str2num(handle2);
teks20 = findobj('tag','q3');
handle3 = get(teks20,'string');
Q(3) = str2num(handle3);
teks21 = findobj('tag','q4');
handle4 = get(teks21,'string');
Q(4) = str2num(handle4);
teks22 = findobj('tag','q5');
handle5 = get(teks22,'string');
Q(5) = str2num(handle5);
teks23 = findobj('tag','q6');
handle6 = get(teks23,'string');
Q(6) = str2num(handle6);
teks24 = findobj('tag','q7');
handle7 = get(teks24,'string');
Q(7) = str2num(handle7);
teks25 = findobj('tag','q8');
handle8 = get(teks25,'string');
Q(8) = str2num(handle8);
teks26 = findobj('tag','q9');
handle9 = get(teks26,'string');
Q(9) = str2num(handle9);
teks27 = findobj('tag','q10');
handle10 = get(teks27,'string');
Q(10) = str2num(handle10);
teksB = findobj('tag','r');
b = get(teksB,'string');
r = str2num(b);
teksA = findobj('tag','G');
c = get(teksA,'string');
G = str2num(c);
for w = 1 : 10
    Gi(w) = G;
end
as(1) = 1;
as(2) = 1.1;
as(3) = 1.2;
as(4) = 1.5;
as(5) = 2;
as(6) = 10;
as(7) = 25;
as(8) = 90;
as(9) = 240;
for x = 1:9
    A(x) = G + as(x);
end
Z2(1) = 0;
Z2(2) = 0.134;
Z2(3) = 0.5;
Z2(4) = 1;
Z2(5) = 2;
Z2(6) = 5;
Z2(7) = 20;
Z2(8) = 40;
Z2(9) = 90;
Z2(10) = 140;
r1(1) = 0 * r;
r1(2) = 0.5 * r;

```

```

r1(3) = 0.866 * r;
r1(4) = 1 * r;
r1(5) = 1 * r;
r1(6) = 1 * r;
r1(7) = 1 * r;
r1(8) = 1 * r;
r1(9) = 1 * r;
r1(10) = 1 * r;
for u = 1:10
    Z1(u) = G + Z2(u);
end
for u = 1:9
    for v = 1:9
        ST1(v) =
            (((r1(u))/((sqrt(((A(v)+Z1(u))^2)+((r
1(u))^2))))*(((A(v)+Z1(u))+sqrt(((A(
v)+Z1(u))^2)+((r1(u))^2)))))) -
            ((r1(u))/((sqrt(((r1(u))^2)+((A(v)-
Z1(u))^2))))*(A(v)-
Z1(u)+sqrt(((r1(u))^2)+((A(v)-
Z1(u))^2)))))) * Q(v);
        ST2(v) =
            (((1+(A(v)+Z1(u))/sqrt(((A(v)+Z1(u)
)^2)+((r1(u))^2))))/((A(v)+Z1(u))+s
qrt(((A(v)+Z1(u))^2)+((r1(u))^2))))
            + ((1+(A(v)-
Z1(u))/sqrt(((r1(u))^2)+((A(v)-
Z1(u))^2))))/((A(v)-
Z1(u)+sqrt(((r1(u))^2)+((A(v)-
Z1(u))^2)))))) * Q(v);
        end
        jum1(u) = sum(ST1);
        jum2(u) = sum(ST2);
    end
    jum1(10) = 0;
    jum2(10) = 0;
    for i = 1:10
        ST3(i) = ((((-
r1(i))/sqrt((((r1(i))^2)+((G+1-
Z1(i))^2)^3)))) +
            ((r1(i))/sqrt((((r1(i))^2)+((G+1+Z1
(i))^2)^3)))) * Q(10);
        jum3(i) = ST3(i);
    end
    ST4(i) = (((G+1-
Z1(i))/sqrt((((r1(i))^2)+((G+1-
Z1(i))^2)^3)))) +
            ((G+1+Z1(i))/sqrt((((r1(i))^2)+((G+
1+Z1(i))^2)^3)))) * Q(10);
        jum4(i) = ST4(i);
    end
    for i = 1:10
        p1(i) = jum3(i) + jum1(i);
        o1(i) = jum4(i) + jum2(i);
        gt(i) =
            sqrt(((p1(i))^2)+((o1(i))^2));
    end
    teks43 = findobj('tag','suhu');
    temp1 = get(teks43,'string');
    termo = str2num(temp1);
    teks44 = findobj('tag','tekanan');
    temp2 = get(teks44,'string');
    stres = str2num(temp2);
    for k = 1:9
        dorong(k) = stres;
    end
    for w = 1:9;
        panas(w) = termo;
    end
    for i = 1:9
        teg(i) = ((30 /gt(i))) *
            (((.92)*dorong(i)) / (273+(panas(i))))
        );
    end
end

```

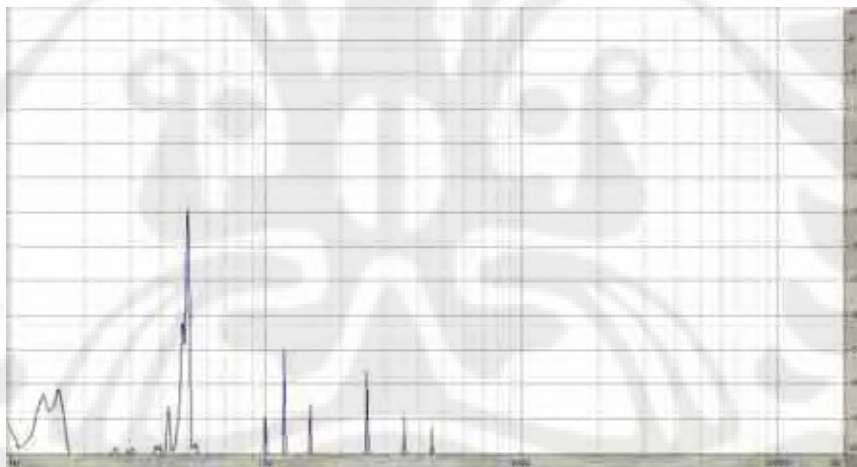
```
teks29 = findobj('tag','V1');
set(teks29,'string',num2str(teg(1)));
teks30 = findobj('tag','V2');
set(teks30,'string',num2str(teg(2)));
teks31 = findobj('tag','V3');
set(teks31,'string',num2str(teg(3)));
teks32 = findobj('tag','V4');
set(teks32,'string',num2str(teg(4)));
teks33 = findobj('tag','V5');
set(teks33,'string',num2str(teg(5)));
teks34 = findobj('tag','V6');
set(teks34,'string',num2str(teg(6)));
teks35 = findobj('tag','V7');
set(teks35,'string',num2str(teg(7)));
teks36 = findobj('tag','V8');
set(teks36,'string',num2str(teg(8)));
teks37 = findobj('tag','V9');
set(teks37,'string',num2str(teg(9)));
```

## Lampiran 2 Data Hasil Pengujian Laboratorium [9]

### Pengujian Dengan Menggunakan Mikrofon



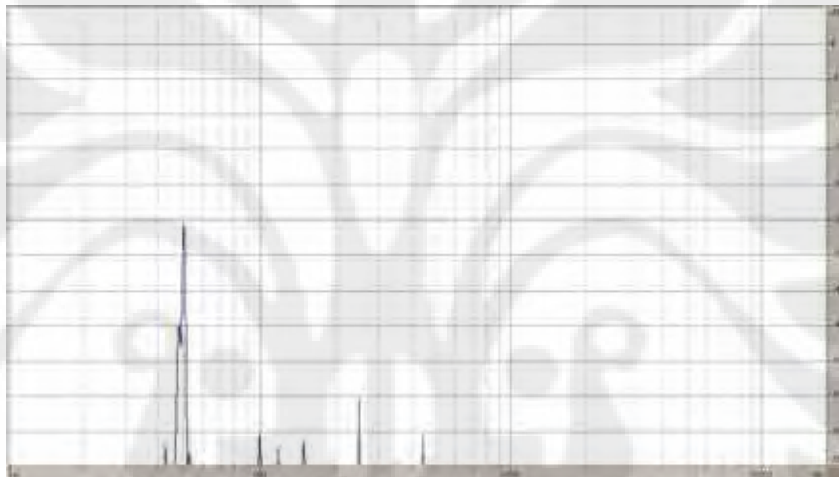
Spektrum suara korona pada 16 kV dengan penghantar 15 cm



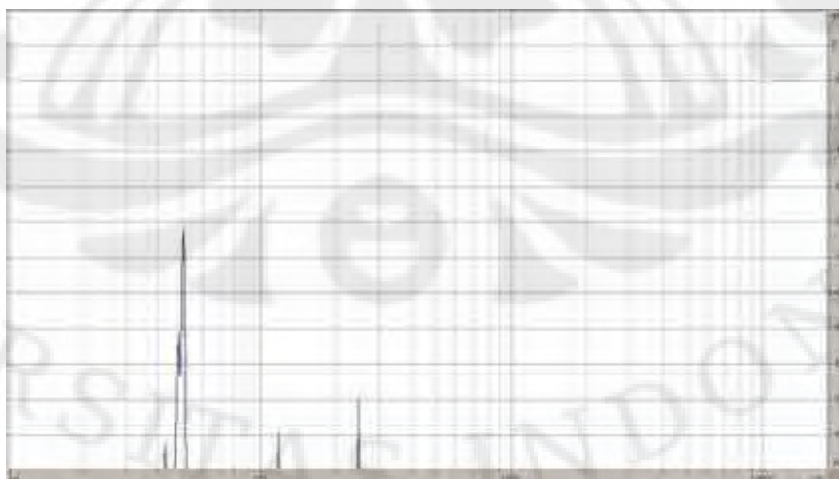
Spektrum suara korona pada 20 kV dengan penghantar 15 cm



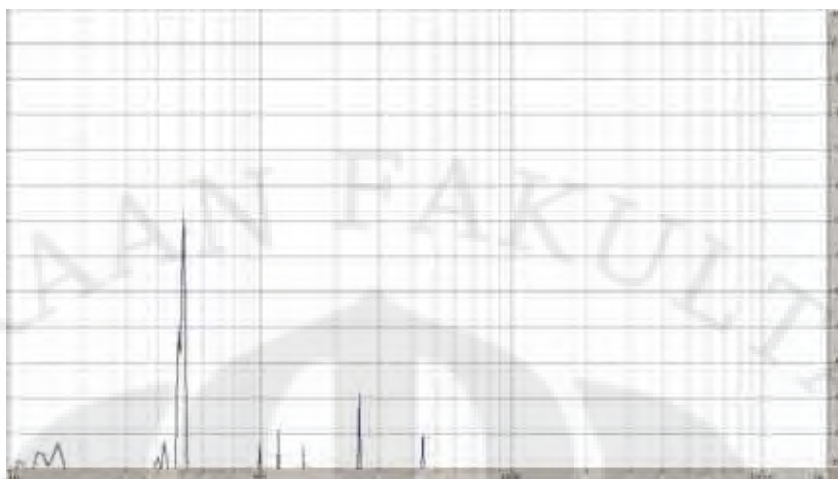
Spektrum suara korona pada 16 kV dengan penghantar 20 cm



Spektrum suara korona pada 20 kV dengan penghantar 20 cm



Gambar 4.16 Spektrum suara korona pada 16 kV dengan penghantar 25 cm

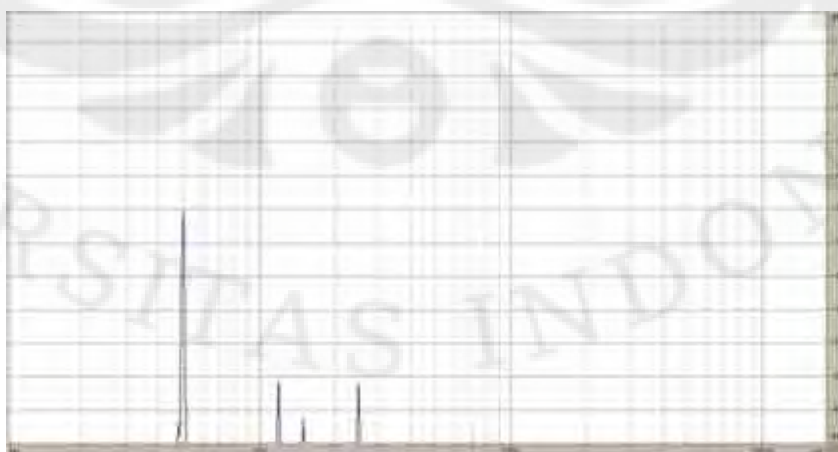


Spektrum suara korona pada 20 kV dengan penghantar 25 cm

### Pengujian Dengan Menggunakan Stetoskop



Spektrum suara korona pada 16 kV dengan penghantar 15 cm



Gambar 4.30 Spektrum suara korona pada 16 kV dengan penghantar 20 cm



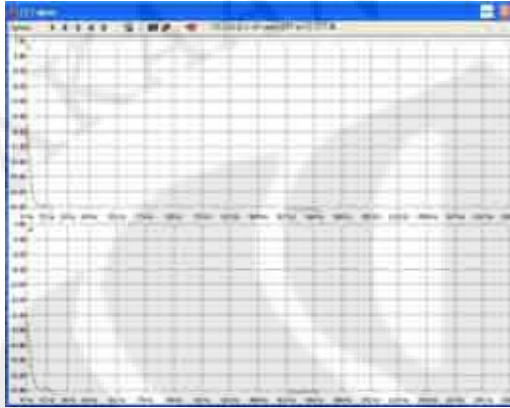


Gambar 4.36 Spektrum suara distorsi stetoskop dengan penghantar 25 cm

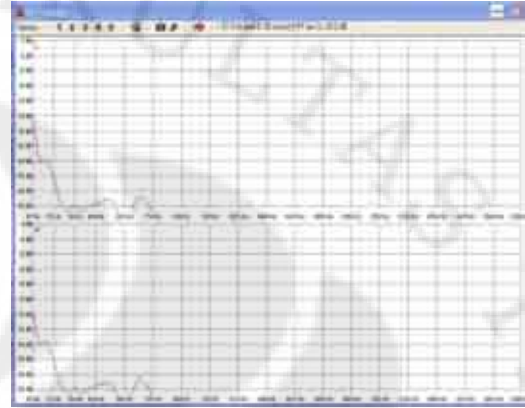
### Lampiran 3 Data Pengujian Gardu

#### Gardu 5

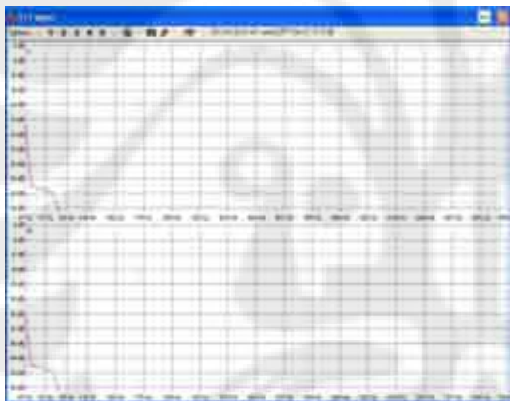
#### Gardu 6



Kubikel 1



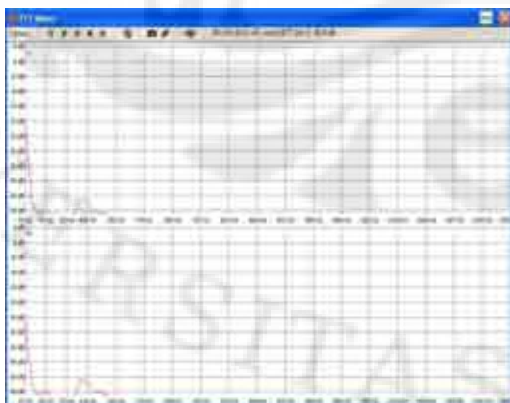
Kubikel 1



Kubikel 2



Kubikel 2



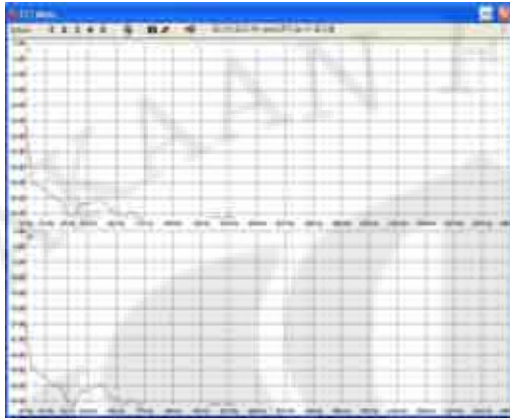
Kubikel 3



Kubikel 3

## Gardu 8

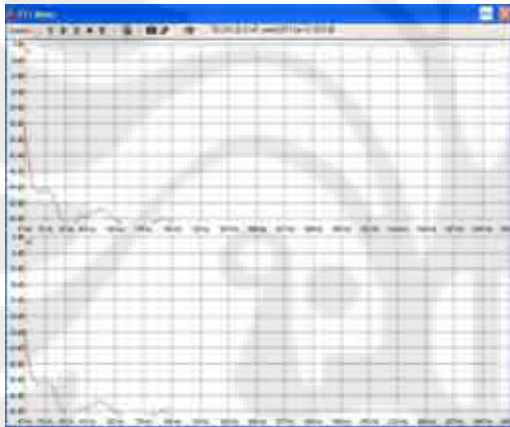
## Gardu 11



Kubikel 1



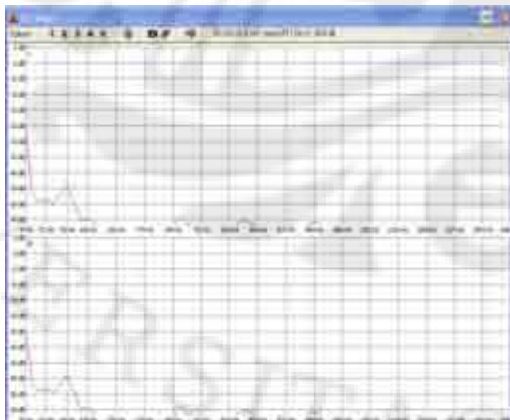
Kubikel 1



Kubikel 2



Kubikel 2



Kubikel 3



Kubikel 3