

SKRIPSI

ANALISIS PENGARUH SUDUT KERUNCINGAN DAN DIAMETER FINIAL FRANKLIN TERHADAP DISTRIBUSI MEDAN LISTRIK DAN TINGKAT TEGANGAN TEMBUS DENGAN PENDEKATAN NUMERIK



Disusun Oleh :
RIO ADI PRASETYO
03.12.018

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
2009**

1041842

RECEIVED 140 HANDBOOKS TO THE HONORARY SECRETARY
OFFICE HANDBOOKS TO THE HONORARY SECRETARY
HONORARY SECRETARY HANDBOOKS TO THE HONORARY SECRETARY
HONORARY SECRETARY

1041842
HONORARY SECRETARY
HONORARY SECRETARY
HONORARY SECRETARY

1041842 HONORARY SECRETARY
HONORARY SECRETARY HONORARY SECRETARY
HONORARY SECRETARY HONORARY SECRETARY
HONORARY SECRETARY HONORARY SECRETARY
HONORARY SECRETARY

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS PENGARUH SUDUT KERUNCINGAN DAN
DIAMETER *FINIAL FRANKLIN* TERHADAP DISTRIBUSI
MEDAN LISTRIK DAN TINGKAT TEGANGAN TEMBUS
DENGAN PENDEKATAN NUMERIK**

SKRIPSI

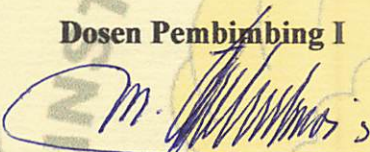
*Disusun Untuk Melengkapi dan Memenuhi Persyaratan
Guna Mencapai Gelar Sarjana Teknik Elektro Strata Satu (S-1)*

**Disusun Oleh :
RIO ADI PRASETYO**

03.12.018

Diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I


(Ir. Teguh Herbasuki, MT)
NIP. Y. 1038900209

Dosen Pembimbing II


(Irrine Budi S, ST, MT)
NIP. 132314400

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro




(Ir. F. Yudi Jampraptono, MT)
NIP. Y. 1039500274

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
2009**

ABSTRAKSI

Analisis Pengaruh Sudut Keruncingan dan Diameter Finial Franklin Terhadap Distribusi Medan Listrik dan Tingkat Tegangan Tembus dengan Pendekatan Numerik

Disusun Oleh:

(Rio Adi Prasetyo 03.12.018, Teknik Elektro/Teknik Energi Listrik S-1)

(Dosen Pembimbing 1: Ir. Teguh Herbasuki, MT.)

(Dosen Pembimbing 2 : Irrine Budi S, ST.MT)

Penangkap petir merupakan bagian utama dari sistem penangkal petir eksternal. Finial atau penangkap petir berupa konduktor batang tegak merupakan finial yang memiliki konstruksi berupa sisi ujung finialnya secara umum berbentuk metal yang runcing sebagai pengumpul muatan listrik statis. Parameter utama yang menentukan baik buruknya kinerja finial Franklin tersebut dilihat dari level tegangan tembus (setelah korona) yang terjadi. Level tegangan tembus dipengaruhi oleh distribusi medan listrik, sedangkan distribusi medan listrik sendiri dipengaruhi oleh bentuk geometris elektroda. Pada finial Franklin, faktor keruncingan sangat menentukan distribusi medan listrik yang terjadi. Faktor keruncingan yang dimaksud adalah sudut keruncingan dan diameter finial.

Pada penelitian skripsi ini dilakukan pengujian finial Franklin dengan variasi sudut keruncingan untuk setiap diameter finial Franklin terhadap tegangan korona dan tembus. Pengujian tegangan korona dan tembus tersebut menggunakan tegangan tinggi searah polaritas negatif dengan mengatur jarak sela elektroda. Selanjutnya dilakukan penggambaran distribusi medan listrik dan perhitungan efisiensi medan listrik setiap objek uji secara eksperimen menggunakan metode kertas konduktif dengan sumber DC tegangan tendah.

Kata Kunci: finial Franklin, sudut keruncingan dan diameter finial, tegangan korona, tegangan tembus, distribusi medan listrik.

1934-1935

Amelia Thompson and her family
Lived in the house for many years
before they moved to the new house

1936-1937

The house was built in 1936
and the family moved in
in 1937. The house was
built by the family.

The house was built in 1936
and the family moved in
in 1937. The house was
built by the family.
The house was built in 1936
and the family moved in
in 1937. The house was
built by the family.
The house was built in 1936
and the family moved in
in 1937. The house was
built by the family.

The house was built in 1936
and the family moved in
in 1937. The house was
built by the family.
The house was built in 1936
and the family moved in
in 1937. The house was
built by the family.
The house was built in 1936
and the family moved in
in 1937. The house was
built by the family.

The house was built in 1936
and the family moved in
in 1937. The house was
built by the family.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga skripsi yang berjudul **“ANALISIS PENGARUH SUDUT KERUNCINGAN DAN DIAMETER FINIAL FRANKLIN TERHADAP DISTRIBUSI MEDAN LISTRIK DAN TINGKAT TEGANGAN TEMBUS DENGAN PENDEKATAN NUMERIK”** dapat diselesaikan dengan lancar dan baik.

Penyusunan skripsi ini diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik, dan merupakan salah satu syarat yang harus ditempuh oleh setiap mahasiswa jurusan Teknik Elektro di lingkungan Fakultas Teknik Institut Teknologi Nasional Malang.

Atas segala bimbingan, pengarahan dan bantuan yang diberikan, sehingga tersusunnya skripsi ini, maka penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Ir. F Yudi Limpraptono, MT, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro (S1) ITN Malang.
2. Ir. Teguh Herbasuki, MT selaku dosen pembimbing pertama.
3. Ir. Irrine Budi S, ST.MT, selaku dosen pembimbing kedua.
4. Prof. Dr. Eng. Ir. Abraham Lomi, MSEE, selaku Rektor ITN Malang
5. My Beloved Mother, Thanks for the love, gift, the sacrificed that you have done to me. I love you mom, now and always. Now you can see me from the heaven.....rest in peace.
6. Keluargaku tercinta, ayah dan kakakku yang selalu memberi semangat tiada habis, terima kasih banyak.
7. Ir. H taufik Hidayat, MT yang selalu memberi semangat tentang kehidupan di dalam dan diluar kampus. Terima kasih banyak, Pak.
8. Teman – temanku semua terima kasih banyak atas bantuannya, karena kalianlah saya bisa semangat mengerjakan skripsi ini.

9. Saudara – saudaraku di **COBRA BLUE BIKERS DIVISION** yang membuatku semakin berani dalam menghadapi tantangan hidup. Thanks Bro, keep on ride.
10. Inna Herliana, yang selama ini menemani perjuanganku, yang mengerti diriku, wanita yang membuatku merasa lengkap. Terima kasih, salam sayang selalu.

Akhirnya penulis mengharapkan skripsi dapat berguna dan bermanfaat bagi rekan-rekan mahasiswa khususnya pada jurusan Teknik Elektro S-1 konsentrasi Teknik Energi Listrik.

Malang, Maret 2009

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
RINGKASAN	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR GRAFIK	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Ruang Lingkup	4
1.6. Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Umum	6
2.2 Profil Awan Guntur	6
2.3 Proses Sambaran Petir	8
2.4 Standar Perancangan Penangkal Petir	11
2.5 Korona	13
2.5.1 Korona Positif Pada Penangkal Petir	14
2.5.2 Tegangan Mula Korona	15
2.6 Tegangan Tembus Pada Berbagai Jenis Atmosfer	16

2.7	Hukum Coloumb	17
2.8	Medan Listrik	18
2.8.1	Kuat Medan Listrik	19
2.8.2	Distribusi Medan Listrik	20
2.8.3	Faktor Effisiensi Medan Listrik	21
2.9	Pengaruh Keruncingan Ujung Finial	23
2.9.1	Intensitas Muatan Pada Ujung Finial	23
2.9.2	Intensitas Medan Listrik Pada Ujung Finial	24
2.10.	Metode FDM (<i>Finitte Difference Method</i>)	26
2.10.1	Pendahuluan	26
2.10.2	Konsep Dasar	26
2.10.3	Bentuk – bentuk Pembagian Titik (diskritisai)	30
2.10.4	Potensial pada Bidang Dua Dimensi	31
2.10.4.1	Bidang Diskritisasi Persegi	32
2.10.4.2	Bidang Diskritisasi Segitiga	34
2.11.	Metode Pemetaan Kertas Konduktif	36

BAB III PERENCANAAN ENGUIJIAN FINIAL FRANKLIN 38

3.1	Pendahuluan	38
3.2	Tempat dan Waktu Penelitian	39
3.3	Obyek Uji	39
3.4	Pembangkitan dan Pengujian Korona serta Tembus dengan Tegangan Tinggi Searah	45
3.5	Pembumian	47
3.6	Memetakan Medan Listrik dengan Kertas Konduktif	47
3.7	Memetakan Medan Listrik dengan Metode FDM	50
3.8	Langkah – langkah Pengujian dan Analisis Data	51
1	Pengujian dan Analisis tegangan korona dan tembus	51
2	Pemetaan medan Listrik dengan metode	

Kertas Konduktif	54
3 Pemetaan Medan Listrik dengan Metode FDM	56
BAB IV ANALISA HASIL PENGUJIAN	61
4.1 Pengujian Tegangan Korona	61
4.1.1. Hasil Pengujian sudut α_n° diameter 2 cm	61
4.1.1.1 Hasil Pengujian sudut α_n° diameter 4 cm	66
4.1.2 Pengujian Tegangan Tembus	68
4.1.2.1 Hasil Pengujian sudut α_n° diameter 2 cm	68
4.1.2.2 Hasil Pengujian sudut α_n° diameter 4 cm	72
4.2 Hasil Perhitungan Kuat Medan Listrik Rata – rata	74
4.2.1 Hasil perhitungan untuk sudut α_n° dengan diameter 2 cm	74
4.2.2 Hasil Perhitungan untuk sudut α_n° dengan diameter 4 cm	77
4.3 Pemetaan Medan Listrik dengan menggunakan Metode Kertas Konduktif	78
4.3.1.1 Pemetaan Medan Listrik untuk sudut $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan diameter 2 cm	79
4.3.1.2 Pemetaan Medan Listrik untuk sudut $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan diameter 2 cm	86
4.3.1.3 Pemetaan Medan Listrik untuk sudut $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	91
4.3.1.4 Pemetaan Medan Listrik untuk sudut $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan diameter 2 cm	97

4.3.2.1 Pemetaan Medan Listrik untuk sudut	
$\alpha_1 = 15^\circ$ dengan diameter 4 cm	102
4.3.2.2 Pemetaan Medan Listrik untuk sudut	
$\alpha_2 = 25^\circ$ dengan diameter 4 cm	107
4.3.2.3 Pemetaan Medan Listrik untuk sudut	
$\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 4 cm	112
4.3.2.4 Pemetaan Medan Listrik untuk sudut	
$\alpha_4 = 45^\circ$ dengan diameter 4 cm	117
4.4 Pemetaan Medan Listrik dengan Menggunakan	
Metode FDM	122
4.4.1 Pemetaan Medan Listrik untuk finial	
$\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	123
4.4.2 Pemetaan Medan Listrik untuk Finial	
$\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 4 cm	132

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	141
5.2 Saran	143

DAFTAR PUSTAKA	144
-----------------------	------------

LAMPIRAN	146
-----------------	------------

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Struktur fisik dan listrik Awan <i>Cumulonimbus</i>	8
Gambar 2.2	Proses terjadinya sambaran petir melalui mekanisme streamer dengan $t_3 > t_2 > t_1$	10
Gambar 2.3	Gambar 2.3. Pembentukan <i>avalanche</i> pada korona positif ...	15
Gambar 2.4	Vektor garis medan elektrik yang ditimbulkan oleh muatan listrik	19
Gambar 2.5	Distribusi medan listrik	21
Gambar 2.6	Penyebaran muatan pada permukaan konduktor	23
Gambar 2.7	Distribusi muatan listrik pada konduktor berbentuk bola dengan $r_1 < r_2$	24
Gambar 2.8	Bentuk-bentuk permukaan kurvatur	25
Gambar 2.9	Penentuan turunan $f(x)$ pada titik P dengan persamaan <i>finite difference</i>	27
Gambar 2.10	Faktor kesalahan (<i>error</i>) sebagai fungsi dari faktor jarak h	30
Gambar 2.11	Bentuk-bentuk diskritisasi titik dua dimensi	31
Gambar 2.12	Pembagian titik-titik potensial pada bidang diskritisasi persegi	32
Gambar 2.13	Pembagian titik-titik potensial pada bidang diskritisasi segitiga	34
Gambar 2.14	Rangkaian percobaan untuk mencari garis ekipotensial dengan bantuan kertas konduktif	36
Gambar 3.1	Model dan dimensi pelat awan	41
Gambar 3.2	Bentuk penangkap petir Franklin	42
Gambar 3.3	Rangkaian pembangkitan dan pengujian tegangan tinggi searah	46

Gambar 3.4	Pengukuran potensial tepi luasan dielektrik udara pada kertas konduktif untuk bentuk diskritisasi segitiga pada penelitian	48
Gambar 3.5	Rangkaian pengujian medan listrik dua dimensi dengan bantuan kertas konduktif	50
Gambar 3.6	Diagram alir pengujian dan analisis data uji	
	a. Diagram Alir pengujian Korona dan tegangan tembus	53
	b. Diagram Alir pemetaan medan listrik menggunakan kertas konduktif	55
	c. Diagram Alir pemetaan medan listrik menggunakan metode FDM	57
Gambar 4.1	Distribusi garis ekipotensial interval 3 V untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan diameter 2 cm	79
Gambar 4.2	Distribusi garis ekipotensial interval 3 V untuk $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan diameter 2 cm	86
Gambar 4.3	Distribusi garis ekipotensial interval 3 V untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	91
Gambar 4.4	Distribusi garis ekipotensial interval 3 V untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan diameter 2 cm	97
Gambar 4.5	Distribusi garis ekipotensial interval 3 V untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan diameter 4 cm	102
Gambar 4.6	Distribusi garis ekipotensial interval 3 V untuk $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan diameter 4 cm	107
Gambar 4.7	Distribusi garis ekipotensial interval 3 V untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 4 cm	112
Gambar 4.8	Distribusi garis ekipotensial interval 3 V untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan diameter 4 cm	117

Gambar 4.9	Luasan daerah untuk finial dengan $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	123
Gambar 4.10	Jumlah titik untuk luasan daerah dengan diskritisasi segitiga pada finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	125
Gambar 4.11	Distribusi garis ekipotensial interval 3 V menggunakan metode FDM untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	131
Gambar 4.12	Luasan daerah untuk finial dengan $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 4 cm	132
Gambar 4.13	Jumlah titik untuk luasan daerah dengan diskritisasi segitiga pada finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	134
Gambar 4.14	Distribusi garis ekipotensial interval 3 V menggunakan metode FDM untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 4 cm	139

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1	Tegangan korona U_c sebagai fungsi jarak sela (s) untuk berbagai sudut dengan diameter 2 cm	62
Grafik 4.2	Tegangan korona U_c sebagai fungsi jarak sela (s) untuk berbagai sudut dengan diameter 4 cm	66
Grafik 4.3	Tegangan tembus U_d sebagai fungsi jarak sela (s) untuk berbagai sudut dengan diameter 2 cm	69
Grafik 4.4	Tegangan tembus U_d sebagai fungsi jarak sela (s) untuk berbagai sudut dengan diameter 4 cm	72
Grafik 4.5	Kuat Medan rata – rata $E_{rata - rata}$ sebagai fungsi jarak sela (s) untuk berbagai sudut dengan diameter 2 cm	75
Grafik 4.6	Kuat Medan rata – rata $E_{rata - rata}$ sebagai fungsi jarak sela (s) untuk berbagai sudut dengan diameter 4 cm	77
Grafik 4.7	Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan diameter 2 cm	82
Grafik 4.8	Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan diameter 2 cm	82
Grafik 4.9	Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan diameter 2 cm	88
Grafik 4.10	Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan diameter 2 cm	88
Grafik 4.11	Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	94
Grafik 4.12	Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	94

Grafik 4.13	Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan diameter 2 cm	99
Grafik 4.14	Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan diameter 2 cm	99
Grafik 4.15	Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan diameter 4 cm	104
Grafik 4.16	Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan diameter 4 cm	104
Grafik 4.17	Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan diameter 4 cm	109
Grafik 4.18	Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan diameter 4 cm	109
Grafik 4.19	Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 4 cm	114
Grafik 4.20	Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 4 cm	114
Grafik 4.21	Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan diameter 4 cm	119
Grafik 4.22	Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan diameter 4 cm	120
Grafik 4.23	Konvergensi iterasi perhitungan potensial menggunakan metode FDM untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	130
Grafik 4.24	Konvergensi iterasi perhitungan potensial menggunakan metode FDM untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 4 cm	138

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Jenis Komponen, bahan, dan ukuran standar perancangan penangkap petir	12
Tabel 2.2	Persamaan CD, FD, dan BD untuk variabel independen satu dan dua	29
Tabel 3.1	Jenis Komponen beserta dimensi perancangan finial franklin pada skripsi	40
Tabel 3.2	Ukuran Diameter dan Keruncingan pada Elektroda Ujung Finial	44
Tabel 4.1	Data pengukuran tegangan korona untuk berbagai sudut α_n° dengan diameter 2 cm pada kondisi kerapatan udara $p = 959$ mbar, $t = 23^\circ\text{C}$	62
Tabel 4.2	Data pengukuran tegangan korona untuk berbagai sudut α_n° dengan diameter 4 cm pada kondisi kerapatan udara $p = 959$ mbar, $t = 23^\circ\text{C}$	66
Tabel 4.3	Data pengukuran tegangan tembus untuk berbagai sudut α_n° dengan diameter 2 cm pada kondisi kerapatan udara $p = 959$ mbar, $t = 23^\circ\text{C}$	68
Tabel 4.4	Data pengukuran tegangan tembus untuk berbagai sudut α_n° dengan diameter 4 cm pada kondisi kerapatan udara $p = 959$ mbar, $t = 23^\circ\text{C}$	72
Tabel 4.5	Nilai $E_{rata - rata}$ untuk berbagai sudut α_n° dengan diameter 2 cm	75
Tabel 4.6	Nilai $E_{rata - rata}$ untuk berbagai sudut α_n° dengan diameter 4 cm	77
Tabel 4.7	Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan diameter 2 cm	81

Tabel 4.8	Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan diameter 2 cm	87
Tabel 4.9	Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	93
Tabel 4.10	Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan diameter 2 cm	98
Tabel 4.11	Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan diameter 4 cm	103
Tabel 4.12	Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan diameter 4 cm	108
Tabel 4.13	Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 4cm	113
Tabel 4.14	Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan diameter 4 cm	119
Tabel 4.15	Nilai – nilai potensial tepi luasan pada finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	124
Tabel 4.16	Konvergensi iterasi perhitungan potensial di titik (15,2); (29,8); (47,9); dan (35,19) untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 2 cm	128
Tabel 4.17	Nilai – nilai potensial tepi luasan pada finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 4 cm	133
Tabel 4.18	Konvergensi iterasi perhitungan potensial di titik (16,7); (28,4); (53,4); dan (34,20) untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan diameter 4 cm	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penangkap petir merupakan bagian utama dari sistem penangkal petir eksternal. Jenis – jenis penangkap petir yang digunakan pada saat ini antara lain berupa susunan finial mendatar (sangkar faraday), susunan finial batang tegak atau finial elektrostatik, finial sistem *Ionization Corona*, maupun finial radioaktif yang semuanya berfungsi sebagai penangkap petir dan selanjutnya menyalurkan arus petir tersebut melalui konduktor menuju ke tanah atau sistem pembumian. Finial atau penangkap petir berupa konduktor batang tegak merupakan finial yang memiliki konstruksi berupa sisi ujung finialnya secara umum berbentuk metal yang runcing sebagai pengumpul muatan listrik statis^[10] dan diletakkan pada tempat yang tinggi khususnya pada atap bangunan miring , sehingga petir diharapkan menyambar ujung metal tersebut terlebih dahulu . Jenis finial ini disebut finial Franklin dan paling sering dipakai karena rata-rata bangunan di Indonesia beratap miring.

Parameter utama yang menentukan baik buruknya kinerja finial Franklin dilihat dari level tegangan tembus (setelah korona) yang terjadi. Menurut Schwaiger, level atau tingkat tegangan tembus dipengaruhi oleh distribusi medan listrik, sedangkan distribusi medan listrik sendiri dipengaruhi oleh bentuk geometris elektroda^[16]. Pada finial Franklin, faktor keruncingan sangat menentukan distribusi medan listrik yang terjadi.

Hal tersebut dapat dilihat bahwa berdasarkan salah satu sifat konduktor^[16] pada konduktor yang bentuknya tidak teratur, muatan konduktor akan terkonsentrasi pada luas permukaan yang lebih sempit (lebih runcing). Sedangkan kuat medan listrik tepat di luar konduktor bermuatan sebanding dengan kerapatan muatan ρ_s (banyak muatan persatuan luas) yang selanjutnya akan menentukan bentuk distribusi medan listrik di sekitarnya.

Dengan demikian, pada ujung runcing finial Franklin, luas permukaan ujungnya yang lebih sempit atau lebih runcing sangat dipengaruhi oleh tingkat keruncingan dan luas permukaan yang tak lain adalah sudut keruncingan dan diameter finial. Oleh karena itu bentuk geometris ujung runcing finial yang penyusun definisikan yaitu sudut keruncingan ujung finial dengan ukuran diameter yang berbeda-beda sebagai titik tangkap petir di finial Franklin sangat menentukan distribusi medan listrik dan tingkat tegangan tembusnya.

Dengan latar belakang diatas, maka pada penyusunan skripsi ini dicoba untuk membuat finial Franklin dengan jumlah variasi sudut keruncingan yang sama untuk setiap ukuran diameter finial yang berbeda dan selanjutnya mengukur, menentukan dan menganalisis besar tegangan korona, tembus, dan distribusi medan listriknya serta membandingkan hasil pengujian tersebut.

1.2. Rumusan Masalah

Sebagaimana diuraikan di atas, dengan perbedaan sudut keruncingan dan diameter pada ujung finial, maka akan mempengaruhi bentuk distribusi medan listrik dan tingkat tegangan tembusnya sehingga hal itu dapat mempengaruhi pula

efektifitas dari kinerja finial. Oleh karena itu penyusun tertarik untuk mengamati lebih jauh permasalahan tersebut, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh perubahan sudut keruncingan pada ujung runcing finial terhadap tingkat tegangan saat korona, tembus, dan bentuk distribusi medan listrik ?
2. Bagaimana pengaruh perubahan diameter pada batang ujung runcing finial yang memiliki jumlah variasi sudut keruncingan yang sama terhadap tingkat tegangan saat korona, tembus, dan bentuk distribusi medan listrik ?

1.3. Tujuan

Penulisan skripsi ini bertujuan untuk menguji dan menganalisis pengaruh sudut keruncingan dan diameter pada ujung finial terhadap tingkat tegangan korona, tembus, efisiensi dan bentuk distribusi medan listriknya.

1.4. Batasan Masalah

Pembahasan skripsi ini dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut:

1. Penangkap petir yang digunakan ialah finial tegak dengan batang elektroda runcingnya yang terbuat dari besi, sedangkan model awan dirancang dengan bentuk pelat tipis 1 mm persegi panjang berukuran 100×60 cm yang terbuat dari seng.
2. Besar sudut keruncingan (α^0), diameter ujung finial (D cm) dan jarak sela udara (s mm) dibuat variabel. Untuk (α^0) $15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ$; (D) 2 cm, 4 cm. Sedangkan untuk (s mm) 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50.

3. Bentuk distribusi intensitas medan listrik pada konfigurasi penangkap petir dan model awan ditentukan secara eksperimental dengan menggunakan metode kertas konduktif.
4. Pemetaan medan listrik dengan pendekatan numerik menggunakan metode FDM (*Finite Difference Method*) digunakan sebagai pembanding.
5. Pengujian korona dan tembus listrik menggunakan tegangan tinggi searah polaritas negatif.
6. Pengujian dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi dan Pengukuran Besaran Elektrik, Jurusan Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

1.5. Ruang Lingkup

Ruang lingkup permasalahan yang dibahas dalam skripsi ini adalah:

1. Mempersiapkan obyek uji penangkap petir dengan berbagai sudut keruncingan dan diameter pada ujung finialnya.
2. Menguji dan menganalisis pengaruh sudut keruncingan pada ujung runcing finial Franklin terhadap tegangan korona, tembus, dan bentuk distribusi medan listriknya.
3. Menguji dan menganalisis pengaruh diameter pada batang ujung runcing finial Franklin yang memiliki jumlah variasi sudut keruncingan yang sama terhadap tegangan korona, tembus, dan bentuk distribusi medan listriknya.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dan gambaran secara umum tentang skripsi ini dibagi menjadi lima bagian yaitu sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan, meliputi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka, berupa penjelasan tentang proses sambaran petir, korona dan tembus listrik, distribusi medan elektrik, pengaruh keruncingan elektroda terhadap kuat medan listrik, metode FDM dan pemetaan eksperimental dengan kertas konduktif.

BAB III Metodologi Penelitian, berisi perencanaan objek uji, alat uji, prosedur pengujian, dan metode analisis data hasil pengujian.

BAB IV Hasil dan Pembahasan, menyajikan pembuatan alat, hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang telah dilakukan.

BAB V Penutup, berisi kesimpulan pembahasan hasil penelitian pada skripsi dan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

Udara ideal adalah gas yang hanya terdiri dari molekul-molekul netral. Namun pada kenyataannya, udara yang sebenarnya terdiri dari molekul-molekul netral dan sebagian kecil ion-ion serta elektron bebas yang akan mengakibatkan udara dapat mengalirkan arus dalam waktu tertentu. Tembus listrik yang terjadi di udara atau gas tergantung dari jumlah elektron bebas yang ada di udara atau gas tersebut.

2.2. Profil Awan Guntur

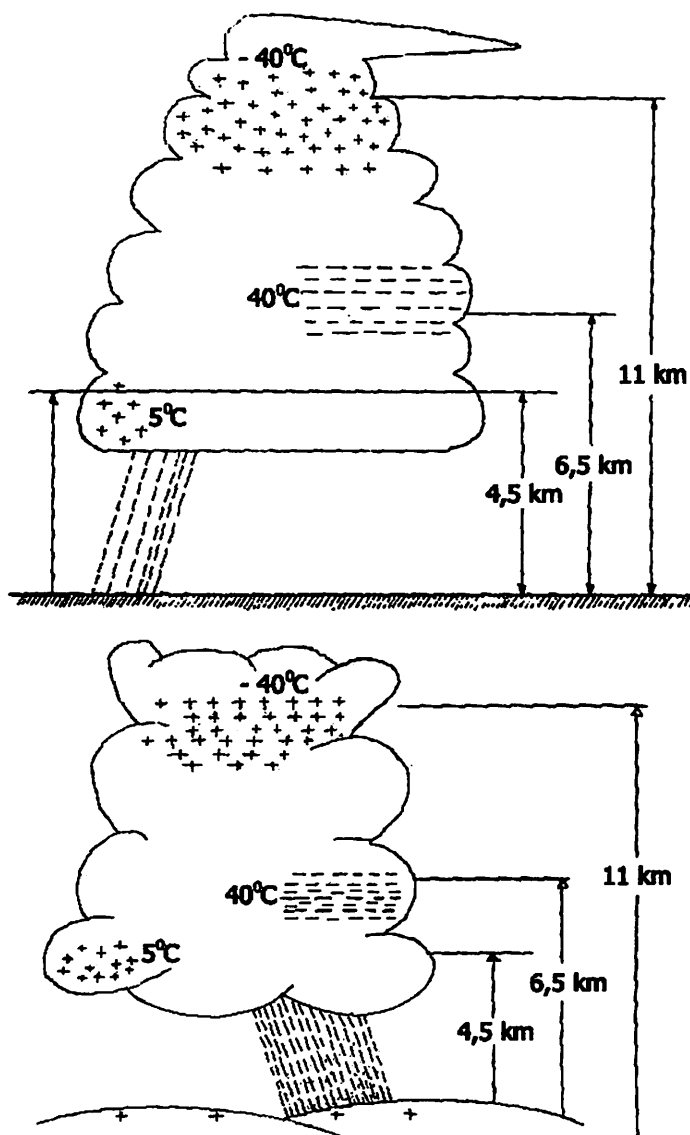
Awan Guntur atau awan *Cumulonimbus* merupakan awan berbentuk gumpalan yang berkembang dari Awan Kumulus yang merupakan awan kemawang. Awan ini merupakan awan penghasil hujan yang disertai dengan terjadinya petir. Struktur fisik dari awan ini adalah awan gumpalan yang memiliki ukuran vertikal lebih besar daripada ukuran horisontalnya. Bagian atas berbentuk seperti paron atau kubah dan memiliki permukaan bagian bawah yang rata horisontal. Ukuran vertikalnya dapat mencapai 14 km dan ukuran horisontalnya sekitar 1.5-7.5 km, sedangkan ketinggian dasarnya dari permukaan bumi ialah 2-16 km.

Dengan adanya perbedaan ketinggian antara bagian atas dan bawah awan, maka terdapat perbedaan temperatur, sehingga di dalam awan yaitu pada lapisan

atas tersebut akan timbul kristal-kristal es. Ketika butiran es bergesek dengan kristal es dan butiran air bertumbuk dengan butiran es, maka butiran es dan butiran air akan melepaskan panas yang tersimpan. Sebagian butiran air akan membeku ketika bersentuh dengan butiran es. Pelepasan energi panas yang cukup besar tersebut akan menyebabkan atom-atom netral pada molekul kristal es dan butiran es terionisasi, sehingga terjadi pelepasan elektron-elektron.

Muatan elektron dari atom kristal es akan berpindah ke atom butiran es sehingga butiran es akan bermuatan negatif dan atom kristal es bermuatan positif. Juga muatan elektron dari atom butiran es akan berpindah ke atom butiran air sehingga butiran air akan bermuatan negatif dan atom butiran es bermuatan positif. Karena massa kristal es dan sebagian butiran es yang bermuatan positif bertambah kecil, maka akan bergerak ke bagian atas awan sedangkan butiran air dan sebagian butiran es yang bermuatan negatif mengalami penambahan massa sehingga bergerak ke bagian bawah awan. Hal tersebut disebabkan massa sebanding dengan gaya gravitasi benda. Selain itu, dengan adanya arus angin vertikal ke arah atas di dalam awan, menyebabkan terjadinya pemisahan muatan.

Dengan demikian, bagian bawah awan menjadi bermuatan negatif. Muatan negatif ini nantinya kemudian dilepaskan ke bumi. Struktur fisik dan listrik dari Awan Guntur atau Awan *Cumulonimbus* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Struktur fisik dan listrik Awan *Cumulonimbus*

Sumber: Direktorat penyelidikan masalah bangunan, 1983:7

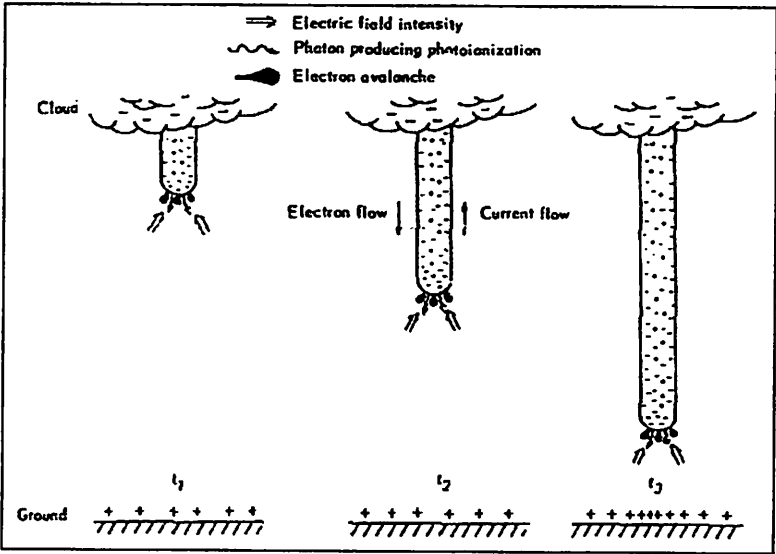
2.3. Proses Sambaran Petir

Petir adalah suatu fenomena alam yang bisa dianalogikan dengan sebuah kapasitor raksasa, di mana lempeng atau elektroda pertama adalah awan (bisa elektroda negatif atau positif) dan lempeng kedua adalah permukaan bumi (dianggap netral). Loncatan muatan listrik yaitu petir diawali dengan

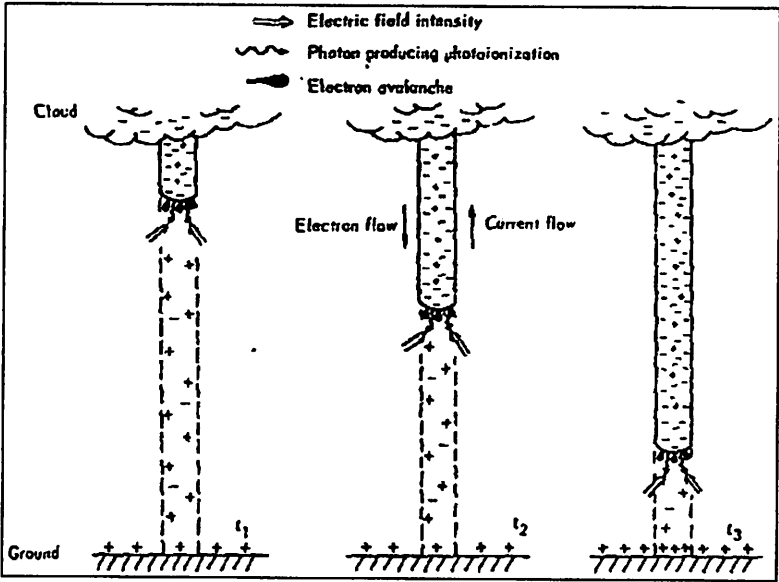
mengumpulnya uap air di dalam awan *cumulonimbus* (awan guntur). Karena adanya perbedaan ketinggian yang cukup besar antara lapisan atas dan bawah awan, maka akan timbul perbedaan temperatur yang ekstrim tiap lapisan tersebut yang mengakibatkan di dalam awan tersebut akan terbentuk kristal-kristal es. Karena di dalam awan terdapat angin ke segala arah, maka kristal-kristal es tersebut akan saling bertumbukan dan bergesekan sehingga muatan positif dan muatan negatifnya akan terpisah.

Umumnya muatan negatif terkumpul dilapisan bawah awan dan ini menyebabkan terinduksinya muatan positif di atas permukaan tanah, sehingga timbul medan listrik akibat adanya perbedaan potensial antara awan dan tanah. Jika muatan listrik cukup besar dan kuat medan listrik (kekuatan dielektrik) di udara dilampaui, maka terjadi pelepasan muatan berupa petir atau terjadi sambaran petir yang bergerak dengan kecepatan cahaya dari awan ke bumi dan sebaliknya untuk mencapai kesetimbangan.^[15]

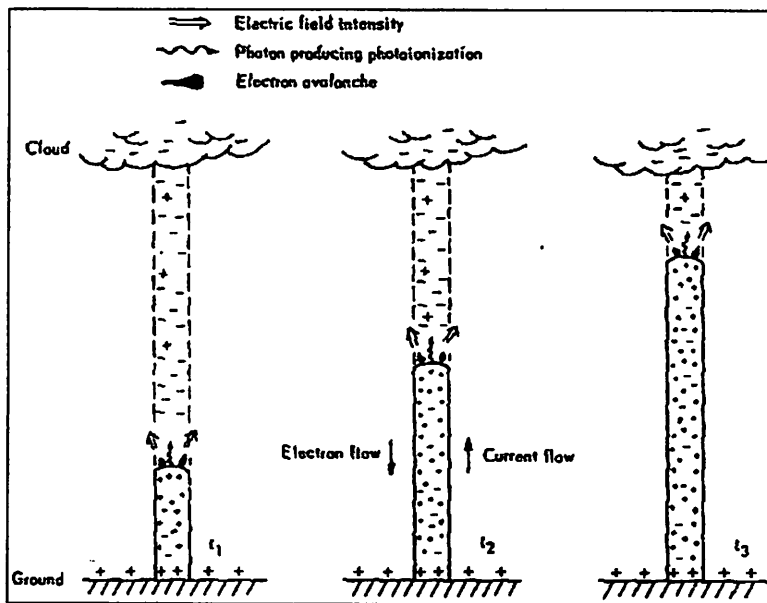
Proses sambaran petir ke bumi yang memiliki dua pergerakan yaitu sambaran ke bawah atau sambaran perintis dari awan (*downward-moving leader*) lalu diikuti oleh sambaran balik (naik) atau ke atas dari bumi (*upward-moving return*) terbagi dalam tiga tahap yang ditunjukkan dalam Gambar 2.2 yaitu terbentuknya cabang sambaran petir pertama (*first leader*) (a), peluahan muatan pada sambaran ke bawah atau perintis (tanah) akibat terbentuknya kanal plasma streamer (*dart leader*) (b), dan terakhir ialah peluahan muatan pada sambaran balik ke awan (*return stroke*) (c).



(a). Terbentuknya *first ladder*



(b). Sambaran perintis dari awan



(c). Sambaran balik dari bumi

Gambar 2.2. Proses terjadinya sambaran petir melalui mekanisme streamer dengan $t_3 > t_2 > t_1$

Sumber: Martin A.Uman, 1969:209-211

2.4. Standar Perancangan Penangkap Petir

Finial Franklin merupakan salah satu alat penangkap petir konvensional yang pertama kali diperkenalkan oleh Benjamin Franklin. Bentuk finial ini ialah memiliki ujung pejal yang runcing sebagai titik tangkap sambaran petir. Finial ini nantinya terhubung dengan konduktor atau kawat penghantar tembaga maupun aluminium sebagai komponen penyalur arus petir yang terhubung ke sistem pembumian.

Bahan-bahan yang digunakan dalam perancangan dan pembuatan komponen-komponen dari suatu instalasi penangkap petir harus dipilih sesuai daftar bahan yang dapat dilihat pada Tabel 2.1. Penentuan bahan untuk merancang

sebuah penangkap petir dan ukurannya ditentukan berdasarkan beberapa faktor yaitu:

- a. Ketahanan mekanis.
- b. Ketahanan terhadap panas.
- c. Ketahanan terhadap pengaruh kimia terutama korosi.
- d. Ketahanan terhadap pengaruh lingkungan lain.

Tabel 2.1. Jenis komponen, bahan, dan ukuran standar perancangan penangkap petir

No.	Komponen	Jenis bahan	Bentuk	Ukuran terkecil
1.	Penangkap petir			
1.1.	Penangkap petir tegak (Finial Franklin)			
1.1.1.	Kepala dengan dudukan	• Tembaga • Baja galvanis • Aluminium	Pejal runcing	Ø 1 inci (dudukan dari tembaga)
1.1.2.	Batang tegak	• Tembaga • Baja galvanis • Aluminium	1. Silinder pejal 2. Pita pejal 1. Pipa silinder pejal 2. Pipa pejal 1. Silinder pejal 2. Pita pejal	Ø 1 inci dari pipa Ø 1 inci Ø 10 mm 25 mm × 3 mm Ø 1 inci 25 mm × 3 mm Ø 1 inci 25 mm × 4 mm
1.2.	Penangkap petir batang pendek	• Tembaga • Baja galvanis • Aluminium	1. Silinder pejal 2. Pita pejal 1. Silinder pejal 2. Pita pejal 1. Silinder pejal	Ø 8 mm 25 mm × 3 mm Ø 8 mm 25 mm × 3 mm Ø 0.5 inci

			2. Pita pejal	25 mm × 4 mm
1.3.	Penangkap petir datar	• Tembaga • Baja galvanis	1. Silinder pejal 2. Pita pejal 3. Pilin 1. Silinder pejal 2. Pita pejal	Ø 8 mm 25 mm × 3 mm 50 mm ² Ø 0.5 inci 25 mm × 4 mm
2.	Penghantar penyalur utama	• Tembaga • Baja galvanis • Aluminium	1. Silinder pejal 2. Pita pejal 3. Pilin 1. Silinder pejal 2. Pita pejal 1. Silinder pejal 2. Pita pejal	Ø 8 mm 25 mm × 3 mm 50 mm ² Ø 8 mm 25 mm × 3 mm Ø 0.5 inci 25 mm × 4 mm
3.	Elektroda pengebumian	• Tembaga • Baja galvanis	1. Silinder pejal 2. Pita pejal 1. Silinder pejal 2. Pita pejal	Ø 0.5 inci 25 mm × 4 mm Ø 0.5 inci 25 mm × 4 mm

Sumber: Direktorat penyelidikan masalah bangunan, 1983:25

2.5. Korona

Korona adalah terlepasnya muatan listrik dari permukaan konduktor yang merupakan salah satu gejala tembus parsial karena adanya kuat medan listrik yang sangat tinggi di ujung elektroda sehingga terjadi tembus di sekitar daerah ujung elektroda tersebut. Korona diawali dengan adanya ionisasi dalam udara yaitu adanya kehilangan elektron dari molekul udara^[7] . Jika tegangan tinggi dikenakan pada sepasang elektroda yang salah satunya berbentuk kawat, jarum atau bentuk

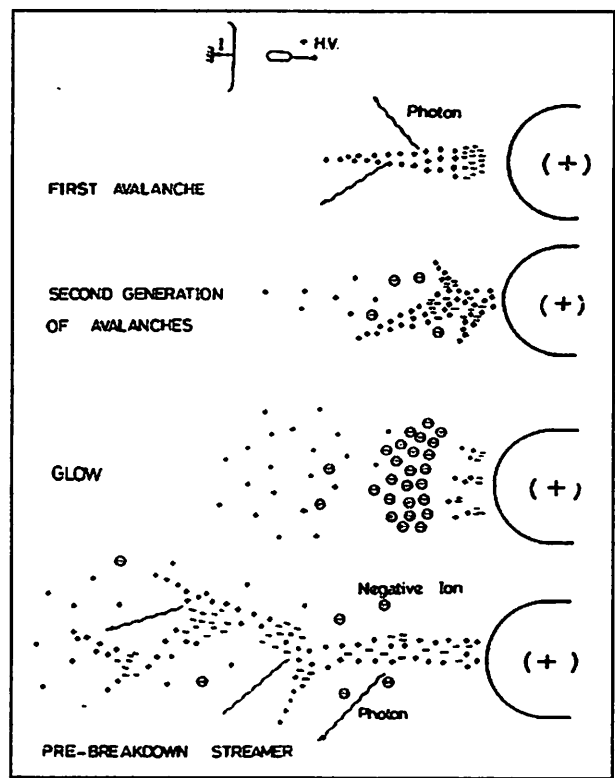
lain dengan radius kecil, medan listrik di sekitar permukaannya akan menjadi tinggi. Elektron bebas di sekitar medan tinggi ini akan dipercepat sampai kecepatan yang mencukupi untuk membebaskan elektron dari kulit terluar sebuah molekul gas melalui tumbukan yang menghasilkan sebuah ion positif dan elektron bebas lainnya.

Elektron bebas tambahan ini mengalami proses yang sama untuk menyebabkan ionisasi tumbukan berikutnya. Proses ini dinamakan *avalanche*, yang terjadi berulang kali sehingga timbul elektron dan ion positif dalam jumlah besar di sekitar daerah korona. Penampakan sinar korona tergantung pada polaritas elektroda koronanya. Korona positif biasanya menampilkan cahaya yang seragam pada permukaannya, sedangkan yang negatif tampak seperti noda-noda terang pada tempat tertentu. Korona dipengaruhi oleh beberapa kondisi yaitu tekanan udara, bahan elektroda, adanya uap air di udara, photoionisasi dan tipe tegangan tinggi yang diterapkan. Sedangkan karakteristik korona tergantung pada tegangan, bentuk permukaan elektroda, dan kondisi permukaan^[8].

2.5.1. Korona Positif pada Penangkap Petir

Korona yang terjadi pada ujung permukaan penangkap petir merupakan jenis korona positif karena awan menginduksikan muatan positif yang mengumpul (terkonsentrasi) pada ujung runcing finial petir dengan tipe tegangan petir ialah tegangan tinggi searah^[12]. Proses terjadinya korona ini yaitu proses *avalanche* akan menghasilkan ion-ion positif yang bergerak menuju elektroda negatif (Gambar 2.3), sedangkan elektron-elektron bebas pada udara akan bergerak menuju elektroda korona yaitu ujung finial. Perbedaan mendasar antara

korona positif dan negatif adalah pada korona negatif pembentukan ion-ion penghasil muatan ruang membutuhkan kehadiran gas-gas elektronegatif, sedangkan pada korona positif proses itu terjadi dengan sendirinya



Gambar 2.3. Pembentukan *avalanche* pada korona positif

Sumber: Salam, 2000:151

2.5.2. Tegangan Mula Korona

Tegangan permulaan korona pada ujung penangkap petir dipengaruhi oleh bentuk permukaan ujung finial dan komposisi serta kondisi gas di sekelilingnya^[4]

Persamaan kuat medan listrik yang dibutuhkan untuk permulaan korona E_c adalah:

$$E_c = 30m_v \delta (1 + 0.3 \sqrt{\delta/r}) \text{ kV/cm} \tag{2-1}$$

Besar tegangan kritis permulaan korona pada ujung finial adalah:

$$U_c = m_v g_0 \delta r \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r}} \right) \ln \left(\frac{s}{r} \right) \text{ volt} \quad (2-2)$$

keterangan:

m_v = faktor kekasaran permukaan elektroda ujung finial ($0 \leq m_v \leq 1$)

g_0 = kuat medan listrik kritis disruptif atau gradien kritis awal korona
(kV/cm)

δ = kerapatan udara relatif

s = jarak sela udara (cm)

r = jari-jari pada ujung finial (cm)

Tegangan kritis permulaan korona dipengaruhi oleh geometris elektroda.

Dari persamaan 2-2, semakin kecil radius ujung finial maka semakin kecil tegangan yang dibutuhkan untuk memunculkan korona.

2.6. Tegangan Tembus pada Berbagai Kondisi Atmosfer

Tegangan tembus adalah tegangan yang terjadi setelah peristiwa korona (pelepasan muatan listrik dari sebuah konduktor) karena adanya kuat medan listrik yang sangat tinggi. Pada umumnya saat terjadi tembus diikuti dengan flasf over (loncatan listrik) atau spark over (percikan listrik). Akibat dari tegangan tembus yang dihasilkan petir dapat mengakibatkan kerusakan peralatan yang tersambar.

Menurut Schwaiger, besar tegangan tembus listrik ($U_d = \hat{U}_d$) pada berbagai kondisi atmosfer dirumuskan sebagai berikut:

$$U_d = \delta \hat{U}_{d0} \quad (2-3)$$

$$\delta = \frac{p}{760} \times \frac{293}{273+t} = 0,386 \frac{p}{273+t} \text{ (p dalam torr)} \quad (2-4)$$

$$\delta = \frac{p}{1013} \times \frac{293}{273+t} = 0,289 \frac{p}{273+t} \text{ (p dalam mbar)} \quad (2-5)$$

dengan substitusi persamaan 2-5 ke dalam persamaan 2-3, didapatkan:

$$U_d = 0,289 \frac{p}{273+t} \hat{U}_{d0} \quad (2-6)$$

keterangan:

$\hat{U}_{d0}$ = tegangan tembus untuk sela bola menurut Schwaiger pada kondisi
kerapatan udara standar ($p_0 = 1013$ mbar, $t_0 = 20$ °C) (kV)

U_d = tegangan tembus (kV)

δ = faktor koreksi atau disebut sebagai kerapatan udara relatif (0.9-1.1)

p = tekanan udara pada ruangan (mbar)

t = temperatur udara pada ruangan (°C)

2.7. Hukum Coulomb

Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) memberikan pernyataan pada abad kedelapan belas mengenai dua muatan titik yang sekarang telah dikenal dengan Hukum Coulomb. Pernyataan ini dapat diikhtisarkan menjadi dua pernyataan. Pertama, dua muatan titik saling melakukan gaya yang bekerja di sepanjang garis hubung kedua muatan itu dan besarnya berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan tersebut^[9]. Kedua, gaya ini juga sebanding dengan hasil kali muatan tersebut, bersifat menolak muatan sejenis dan

bersifat menarik muatan yang berlawanan. Hukum Coulomb untuk muatan titik dapat dirumuskan secara singkat.

$$\mathbf{F} = k \frac{qQ}{r^2} \hat{a}_r \quad (2-7)$$

keterangan:

$\mathbf{F}$ = gaya coulomb (N)

q, Q = partikel bermuatan (C)

r = jarak antara kedua muatan (m)

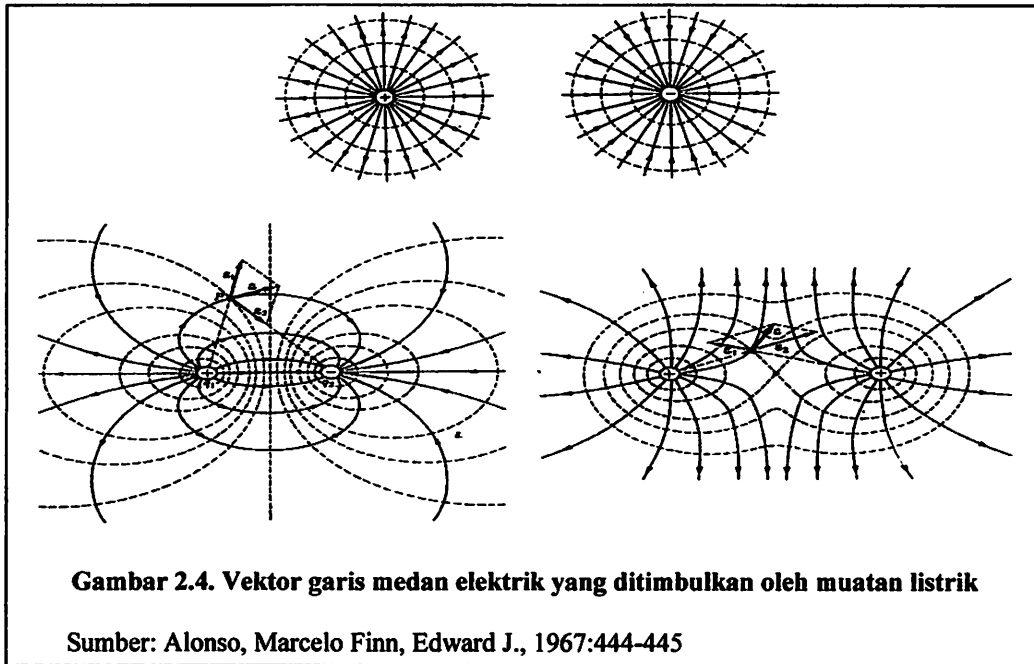
k = tetapan, untuk ruang hampa atau udara = $8.9874 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$

Jika terdapat lebih dari dua muatan titik, maka gaya bersama ditentukan dengan penerapan berulang persamaan 2-7. Terutama jika sistem N muatan dipertimbangkan, maka gaya pada muatan ke- i diberikan sebagai berikut:

$$\mathbf{F}_i = q_i \sum_{j \neq i}^N \frac{q_j}{4\pi\epsilon_0} \frac{\hat{a}_{r_{ij}}}{(r_{ij})^2} \quad (2-8)$$

2.8. Medan Listrik

Medan listrik adalah suatu daerah (ruang) di sekitar muatan yang masih dipengaruhi oleh gaya elektrik. Oleh Michael Faraday medan listrik digambarkan sebagai vektor garis medan listrik yang keluar dari muatan positif dan masuk ke muatan negatif. Kuat medan listrik yang semakin besar digambarkan dengan garis medan yang semakin rapat^[1]. Gambar 2.4 berikut menunjukkan pola garis medan listrik akibat muatan listrik.



2.8.1. Kuat Medan Listrik

Pada setiap titik di dalam medan listrik ada suatu kuantitas yang menyatakan tingkat kekuatan medan tersebut, yang disebut kuat medan listrik. Kuat medan listrik (E) di sebuah titik adalah gaya per satuan muatan yang dialami oleh sebuah muatan di titik tersebut. Secara matematis dapat ditulis sebagai:

$$E = \frac{F}{q} \quad (2-9)$$

keterangan:

E = kuat medan listrik di tempat muatan q (N/C)

F = gaya listrik yang dialami muatan q (N)

q = muatan uji (C)

Jika persamaan 2-7 disubstitusikan ke persamaan 2-9, maka kuat medan dalam elektroda

$$E = k \frac{Q}{r^2} \hat{a}_r \quad (2-10)$$

2.8.2. Distribusi Medan Listrik

Distribusi medan listrik ialah penyebaran medan listrik pada ruang yang terdapat di antara elektroda positif (anoda) dan negatif (katoda). Distribusi medan listrik mempunyai tingkat intensitas yang berbeda pada tiap titik dalam jarak sela^[5]. Intensitas medan listrik akan memberikan tekanan listrik pada suatu bahan dielektrik yang disebut stress listrik. Sedangkan kekuatan maksimum bahan dalam menahan stress listrik agar tidak terjadi tembus disebut kekuatan dielektrik bahan. Kekuatan dielektrik dan tekanan listrik dinyatakan dalam besaran kV/cm

Bentuk distribusi medan listrik sangat menentukan besarnya intensitas medan listrik pada setiap titik yang artinya juga menentukan besarnya nilai tegangan tembus. Besarnya intensitas medan listrik pada sebuah titik adalah hasil bagi antara beda potensial (ΔU) dan jarak antar dua titik (Δx)^[11] seperti yang dinyatakan dalam persamaan 2-11. ΔU ialah beda potensial antara dua titik yang berdekatan, semakin besar ΔU , maka intensitas medan listriknya juga semakin besar dalam Δx yang tetap. Δx adalah jarak antar dua titik yang berdekatan. Semakin besar Δx maka semakin kecil intensitas medan listriknya.

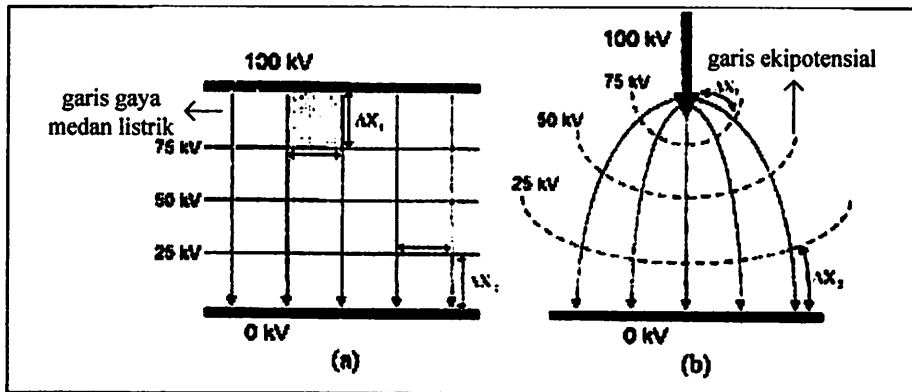
$$E = \frac{\Delta U}{\Delta x} \quad (2-11)$$

keterangan:

E = intensitas medan listrik pada sebuah titik (kV/cm)

ΔU = beda potensial antar dua titik yang berdekatan (kV)

Δx = jarak antar dua titik yang berdekatan (cm)



Gambar 2.5. Distribusi medan listrik

(a) Homogen

(b) Non homogen

2.8.3. Faktor Efisiensi Medan Listrik

Bentuk distribusi medan listrik dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu distribusi medan listrik seragam dan tidak seragam. Ukuran seragam tidaknya distribusi medan listrik diantara susunan elektroda dapat diketahui dari nilai efisiensi medan listrik yang didefinisikan Schwaiger yaitu:

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maks}} \quad (2-12)$$

Pada Gambar 2.5.b ditunjukkan konfigurasi elektroda jarum-pelat yang mempunyai distribusi medan listrik non homogen atau tak seragam. Artinya, alat uji berupa penangkap petir dan model awan nantinya dapat kita analogikan sebagai konfigurasi elektroda jarum-pelat tersebut. Dan adanya garis ekuipotensial yaitu garis yang memotong garis – garis distribusi medan listrik secara tegak lurus yang jarak antar titiknya mempunyai tegangan yang besar.

Pada susunan elektroda keping sejajar (Gambar 2.5.a), distribusi medan listriknya homogen sehingga besar $E_{maksimum}$ sama dengan $E_{rata-rata}$. Sebaliknya

pada distribusi medan listrik non homogen akan terdapat kuat medan listrik lokal pada daerah tertentu dalam jarak sela yang nilainya lebih besar dari kuat medan listrik rata-ratanya. Jarak sela adalah jarak pemisah antar dua konduktor yang bertegangan, dalam hal ini adalah elektroda. Dengan demikian, maka batas nilai faktor efisiensi medan listrik untuk berbagai susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu memenuhi syarat:

$$\eta \leq 1 \quad (2-13)$$

Besar faktor efisiensi medan listrik bergantung pada bentuk geometris dari susunan elektroda, yaitu untuk susunan elektroda yang memberikan distribusi medan listrik homogen semisal susunan pelat datar sejajar maka $\eta \approx 1$, sedangkan pada susunan elektroda yang menghasilkan distribusi medan listrik non homogen seperti jarum-pelat, maka nilai $\eta < 1$. Karena tegangan tembus pada sela elektroda dapat ditentukan yaitu:

$$U_d = E_d \times s \times \eta \quad (2-14)$$

keterangan:

U_d = tegangan tembus pada susunan elektroda (kV)

E_d = kuat medan listrik yang menyebabkan terjadi tembus (kV/cm)

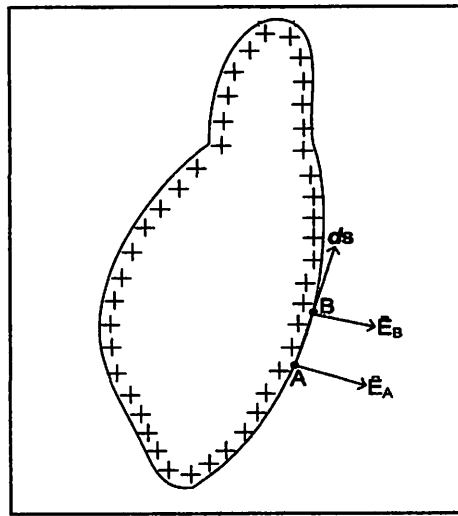
s = jarak sela (cm)

maka dapat disimpulkan, bentuk finial petir yang runcing akan memberikan tegangan tembus yang lebih kecil dan lebih cepat dibandingkan bentuk finial yang kurang runcing.

2.9. Pengaruh Keruncingan Ujung Finial

2.9.1. Intensitas Muatan pada Ujung Finial

Berdasarkan sifat-sifat konduktor, disebutkan bahwa pada bentuk konduktor yang tidak teratur maka muatan konduktor tersebut akan terkonsentrasi pada luas permukaan yang lebih sempit (lebih runcing) atau terdapat intensitas muatan yang sangat tinggi. Hal ini dapat dibuktikan dengan melihat sifat potensial pada konduktor.



Gambar 2.6. Penyebaran muatan pada permukaan konduktor

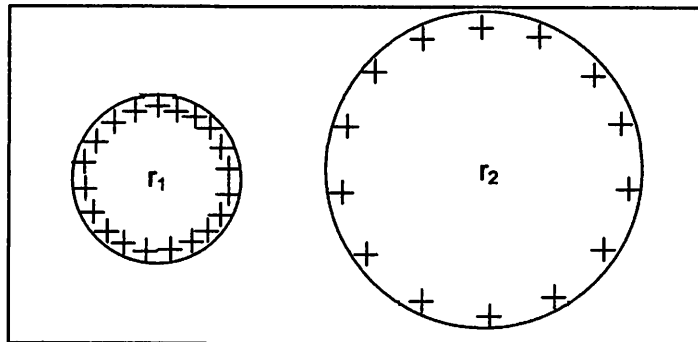
Sumber: Yohanes Surya, 1996:20

Pada Gambar 2.6 dapat dilihat titik A dan B terletak pada permukaan konduktor bermuatan. Sepanjang permukaan antara kedua titik ini medan E selalu tegak lurus perpindahan ds , sehingga:

$$\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = E \times ds \times \cos 90^\circ = 0$$

$$V_B - V_A = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (2-15)$$

Akibatnya $V_B = V_A$ dan hasil ini menunjukkan potensial diseluruh permukaan konduktor sama. Untuk membuktikan ujung runcing konduktor menyimpan muatan lebih banyak, dapat kita representasikan dengan dua buah konduktor berbentuk bola dengan jari-jari r_1 dan r_2 ($r_1 < r_2$) pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Distribusi muatan listrik pada konduktor berbentuk bola dengan $r_1 < r_2$

Sumber: Yohanes Surya, 1996:21

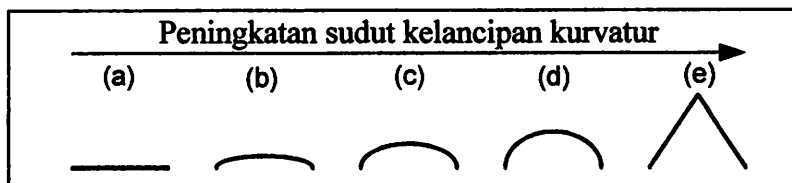
Jika dimuati dengan muatan sedemikian sehingga potensial di permukaan kedua bola sama besar, maka dengan mensubstitusi persamaan 2-10 ke persamaan 2-11 didapatkan persamaan potensial $V = kQ/r$. Dengan nilai potensial yang sama, maka bergantung jari-jari r didapatkan bola yang berjari-jari lebih kecil r_1 atau $r \approx 0$ akan memiliki muatan lebih banyak atau dengan kata lain muatan konduktor akan terkonsentrasi pada bagian runcing. Konsep dasar inilah yang dipakai pada pembuatan ujung finial petir Franklin yang berfungsi sebagai pengumpul muatan listrik statis yang besar sehingga petir akan menyambar ujung runcing finial.

2.9.2. Intensitas Medan Listrik pada Ujung Finial

Kurvatur permukaan konduktor berpengaruh terhadap kekuatan intensitas medan listrik. Permukaan yang datar (tidak memiliki kurvatur) mempunyai intensitas medan listrik yang relatif lemah. Sedangkan permukaan yang berupa

titik (memiliki kurvatur tinggi atau $r \approx 0$) mempunyai intensitas medan listrik yang relatif kuat. Jadi dapat disimpulkan bahwa semakin datar atau rata permukaan konduktor maka intensitas medan listriknya semakin kecil dan semakin runcing permukaan konduktor maka intensitas medan listriknya semakin besar.

Besar kuat medan listrik yang paling besar terdapat pada permukaan konduktor yang berbentuk runcing. Hal ini dikarenakan semakin rapatnya medan listrik yang dihasilkan oleh konduktor tersebut^[14]. Untuk lebih memperjelas sudut keruncingan kurvatur dapat dilihat pada Gambar 2.8 yaitu bentuk kurvatur permukaan (a) memiliki intensitas medan listrik terkecil dan (e) memiliki intensitas medan listrik terbesar.



Gambar 2.8. Bentuk-bentuk permukaan kurvatur

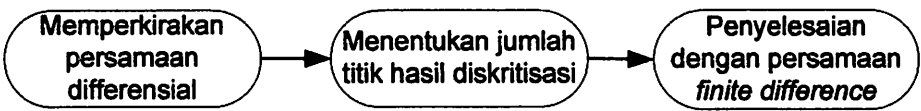
Permukaan konduktor yang berbentuk runcing yaitu pada ujung finial dimaksudkan apabila terjadi penumpukan muatan di sekitar konduktor maka rapat muatan ρ_s yang ada pada ujung konduktor runcing akan relatif lebih besar daripada rapat muatan yang ada pada permukaan konduktor sekitarnya. Akibatnya kuat medan listrik yang dihasilkan sangat tinggi karena $E \approx \rho_s/\epsilon_0$, sehingga dengan bentuk permukaan ujung finial yang runcing akan diperoleh intensitas medan listrik paling tinggi.

2.10. Metode FDM (*Finite Difference Method*)

2.10.1. Pendahuluan

Metode FDM (*Finite Difference Method*) adalah sebuah metode pendekatan yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan diferensial parsial. Metode ini telah digunakan untuk memecahkan berbagai masalah, antara lain permasalahan linear maupun nonlinear, dan permasalahan yang bergantung waktu (*time dependent*) maupun yang tidak bergantung pada waktu (*time independent*). Metode ini dapat juga dipakai pada permasalahan dengan bentuk batasan yang berbeda, kondisi batas yang berbeda, dan pada daerah yang terdiri dari sejumlah material yang berbeda^[17].

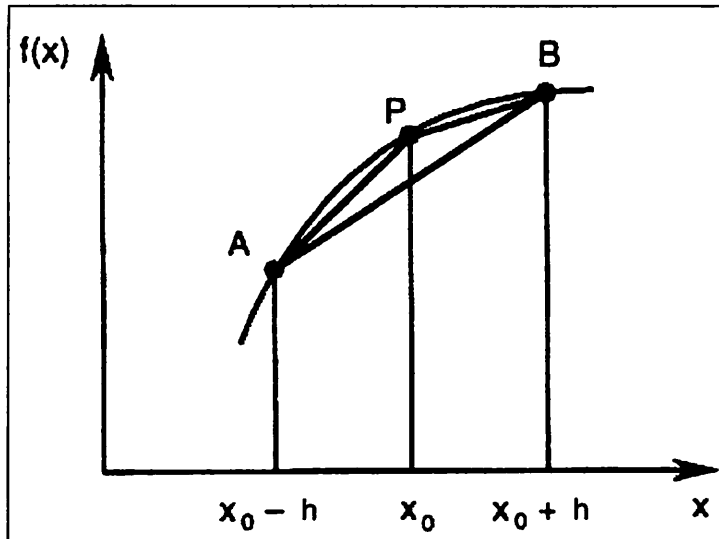
Seperti metode numerik yang lain, tujuan dari metode FDM (*Finite Difference Method*) adalah untuk menyatakan permasalahan kontinyu menjadi permasalahan diskrit yang terdiri atas sejumlah titik. Jadi turunan parsial suatu fungsi yang tidak diketahui didekati dengan sejumlah titik hasil pendiskritan yang tertentu. Persamaan diferensial parsial semula kemudian diubah menjadi sejumlah persamaan aljabar. Skema dari metode FDM adalah seperti berikut:



2.10.2. Konsep Dasar

Apabila terdapat sebuah fungsi $f(x)$ yang mengandung hanya satu variabel independen x seperti yang terlihat pada Gambar 2.9, maka turunan pertama dari $f(x)$ yaitu df/dx dapat dinyatakan dalam bentuk diskrit sebagai f_A , f_P , f_B pada

titik-titik $x_0 - h$, x_0 dan $x_0 + h$. Dengan x_0 adalah titik pusat dan $\pm h$ adalah selisih dari nilai x yang diambil^[13]



Gambar 2.9. Penentuan turunan $f(x)$ pada titik P dengan persamaan *finite difference*

Berdasarkan pada Gambar 2.9, maka turunan pertama $f(x)$ pada titik P atau di x_0 dapat ditulis sebagai berikut:

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} \quad (\text{persamaan } \textit{Forward Difference})$$

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_0) - f(x_0 - h)}{h} \quad (\text{persamaan } \textit{Backward Difference})$$

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_0 + h) - f(x_0 - h)}{2h} \quad (\text{persamaan } \textit{Central Difference})$$

Persamaan *Central Difference* merupakan nilai rata-rata di antara persamaan *Forward* dan *Backward Difference*. Pada persamaan-persamaan tersebut digunakan tanda $\approx$ untuk menegaskan sifat pendekatan. Untuk mendapatkan persamaan-persamaan *finite difference* di atas, maka digunakan deret Taylor yaitu:

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + hf'(x_0) + \frac{1}{2!}h^2 f''(x_0) + \frac{1}{3!}h^3 f'''(x_0) + \dots \quad (2-16)$$

$$f(x_0 - h) = f(x_0) - hf'(x_0) + \frac{1}{2!}h^2 f''(x_0) - \frac{1}{3!}h^3 f'''(x_0) + \dots \quad (2-17)$$

Dari persamaan 2-16 dan 2-17 tersebut, dengan mengabaikan turunan ketiga dan seterusnya, maka diperoleh:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} - \frac{h}{2} f''(x_0) \quad (2-18)$$

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0) - f(x_0 - h)}{h} + \frac{h}{2} f''(x_0) \quad (2-19)$$

Persamaan 2-18 tersebut merupakan bentuk lengkap persamaan *Forward Difference* yang mempunyai faktor kesalahan atau *error* $-\frac{h}{2} f''(x_0)$. Sedangkan persamaan 2-19 ialah bentuk lengkap persamaan *Backward Difference* yang mempunyai faktor kesalahan $\frac{h}{2} f''(x_0)$. Dengan memperkecil nilai jarak h maka faktor kesalahan akan semakin kecil pula dengan orde h .

Kemudian jika persamaan 2-16 dikurangi dengan persamaan 2-17, diperoleh:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0 - h)}{2h} - \frac{h^2}{12} f'''(x_0) \quad (2-20)$$

Persamaan 2-20 tersebut merupakan bentuk lengkap persamaan *Central Difference* yang mengandung faktor kesalahan sebesar $-\frac{h^2}{12} f'''(x_0)$ dengan orde h^2 .

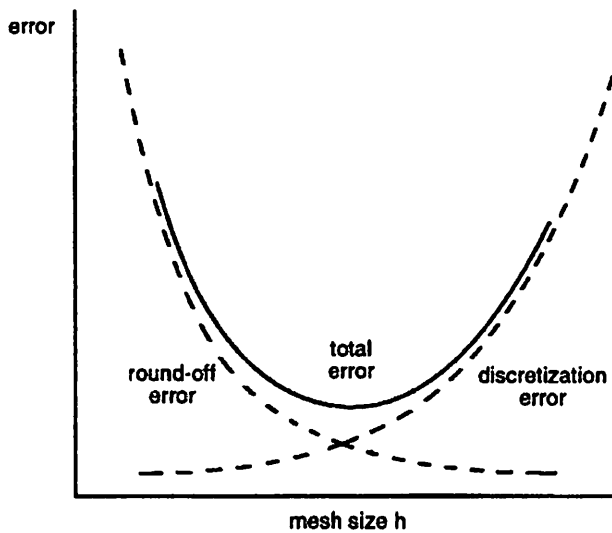
Hal ini berarti dengan jarak h yang semakin kecil maka akan didapatkan nilai kesalahan yang lebih kecil pada persamaan *Central Difference* dibandingkan

dengan persamaan *Forward* dan *Backward Difference*. Berikut ini diberikan Tabel 2.2 yaitu persamaan *Central Difference* (CD), *Forward Difference* (FD) dan *Backward Difference* (BD) beserta faktor kesalahannya untuk variabel independen satu dan dua.

Tabel 2.2. Persamaan CD, FD dan BD untuk variabel independen satu dan dua

Derivative	Finite Difference Approximation	Type	Error
Φ_x	$\frac{\Phi_{i+1} - \Phi_i}{\Delta x}$	FD	$O(\Delta x)$
	$\frac{\Phi_i - \Phi_{i+1}}{\Delta x}$	BD	$O(\Delta x)$
	$\frac{\Phi_{i+1} - \Phi_{i-1}}{\Delta x}$	CD	$O(\Delta x)^2$
	$\frac{-\Phi_{i+2} + 4\Phi_{i+1} - 3\Phi_i}{2\Delta x}$	FD	$O(\Delta x)^2$
	$\frac{3\Phi_i - 4\Phi_{i-1} + \Phi_{i-2}}{2\Delta x}$	BD	$O(\Delta x)^2$
	$\frac{-\Phi_{i+2} + 8\Phi_{i+1} - 8\Phi_{i-1} + \Phi_{i-2}}{12\Delta x}$	CD	$O(\Delta x)^4$
Φ_{xx}	$\frac{\Phi_{i+2} - 2\Phi_{i+1} + \Phi_i}{(\Delta x)^2}$	FD	$O(\Delta x)^2$
	$\frac{\Phi_i - 2\Phi_{i-1} + \Phi_{i-2}}{(\Delta x)^2}$	BD	$O(\Delta x)^2$
	$\frac{\Phi_{i+1} - 2\Phi_i + \Phi_{i-1}}{(\Delta x)^2}$	CD	$O(\Delta x)^2$
	$\frac{-\Phi_{i+2} + 16\Phi_{i+1} - 30\Phi_i + 16\Phi_{i-1} - \Phi_{i-2}}{(\Delta x)^2}$	CD	$O(\Delta x)^4$

Dari semua persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa faktor jarak h sangat menentukan akurasi dan faktor kesalahan pada perhitungan seperti yang terlihat pada Gambar 2.10.

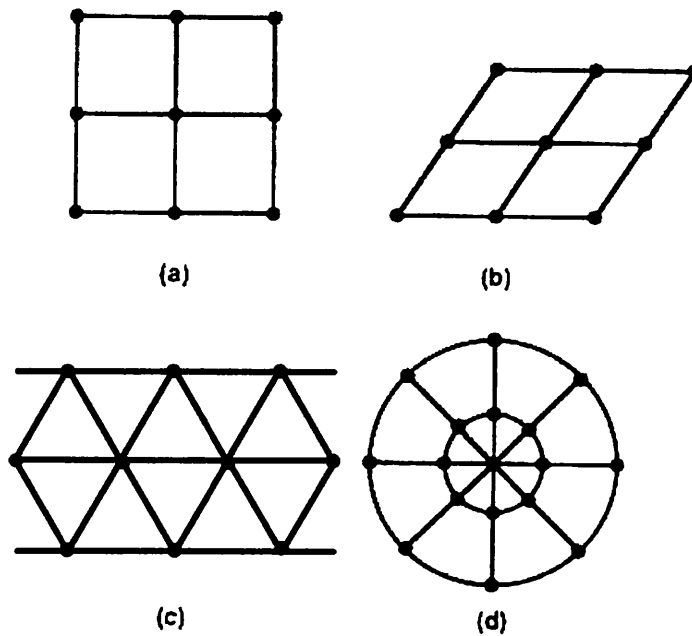


Gambar 2.10. Faktor kesalahan (*error*) sebagai fungsi dari faktor jarak h

2.10.3. Bentuk-Bentuk Pembagian Titik (Diskritisasi)

Penyelesaian numerik menggunakan metode FDM yang menggunakan persamaan aljabar sangat ditentukan oleh bentuk pembagian titiknya (diskritisasi). Bentuk-bentuk pembagian titik tersebut dapat dibedakan beberapa macam yaitu persegi, segitiga, lingkaran, maupun jajar genjang seperti yang terlihat pada Gambar 2.11. Penerapan bentuk diskritisasi ini nantinya akan bergantung pada bentuk geometris elektroda.

Pada skripsi ini, objek uji mempunyai bentuk geometris elektroda menyerupai segitiga (ujung runcing finial) sehingga digunakan bentuk diskritisasi segitiga. Hal ini disebabkan, dengan bentuk diskritisasi yang tepat maka potensial pada permukaan finial dapat dicari dengan tingkat kesalahan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan menggunakan bentuk diskritisasi yang lain.



Gambar 2.11. Bentuk-bentuk diskritisasi titik dua dimensi

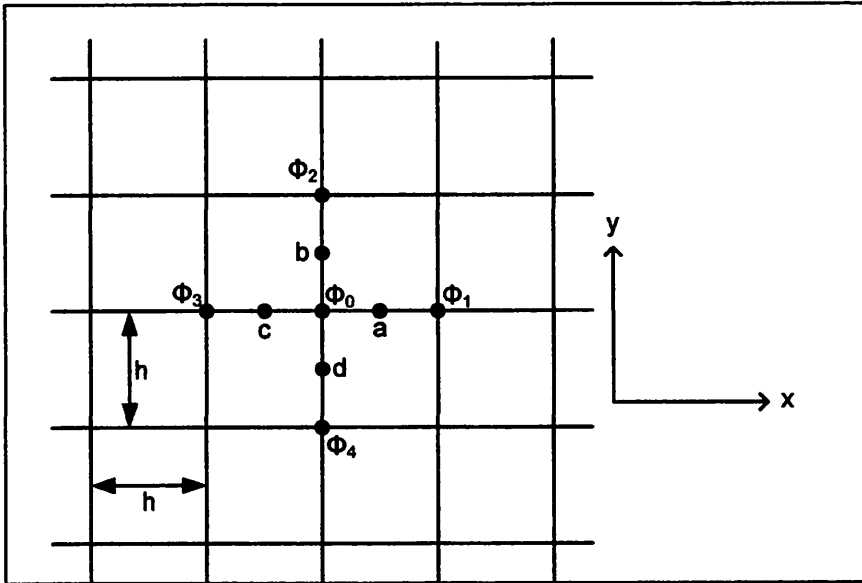
- (a) Diskritisasi persegi
- (b) Diskritisasi jajar genjang
- (c) Diskritisasi segitiga
- (d) Diskritisasi lingkaran

2.10.4. Potensial pada Bidang Dua Dimensi

Dalam persoalan potensial yang potensialnya diketahui pada perbatasan suatu daerah, terutama persoalan yang potensialnya tidak berubah dalam suatu arah tertentu yaitu distribusi potensial berdimensi dua maka persamaan potensialnya dapat ditentukan yaitu bila potensialnya tidak berubah terhadap koordinat z dan memiliki dua variabel independen yaitu x dan y , bergantung bentuk diskritisasinya^[13].

2.10.4.1. Bidang Diskritisasi Persegi

Bagian suatu daerah dua dimensi yang telah dibagi-bagi menjadi beberapa bujursangkar atau persegi dengan jarak antar titik h dapat ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Pembagian titik-titik potensial pada bidang diskritisasi persegi

Sumber: William H. Hayt, Jr, 1991:165

Harga yang tak diketahui pada lima titik yang berdekatan ditunjukkan sebagai Φ_0 , Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 dan Φ_4 . Jika daerahnya bermuatan bebas dan berisi dielektrik serbasama, maka $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$ dan $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$, sehingga didapatkan:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = 0 \quad (2-21)$$

Operasi gradien menghasilkan $E_x = \partial\Phi / \partial x$ dan $E_y = \partial\Phi / \partial y$, sehingga persamaan

Laplace dua dimensi dapat dinyatakan dengan:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2-22)$$

Harga aproksimasi untuk turunan parsial ini dapat diperoleh dari potensial yang diketahui, yaitu:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_a = \frac{\Phi_1 - \Phi_0}{h}, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_c = \frac{\Phi_0 - \Phi_3}{h}, \text{ dan}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_b = \frac{\Phi_2 - \Phi_0}{h}, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_d = \frac{\Phi_0 - \Phi_4}{h}$$

Kemudian didapatkan juga:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \Big|_0 = \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_a - \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_c}{h} = \frac{\Phi_1 - \Phi_0 - \Phi_0 + \Phi_3}{h^2} \quad (2-23)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \Big|_0 = \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_b - \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_d}{h} = \frac{\Phi_2 - \Phi_0 - \Phi_0 + \Phi_4}{h^2} \quad (2-24)$$

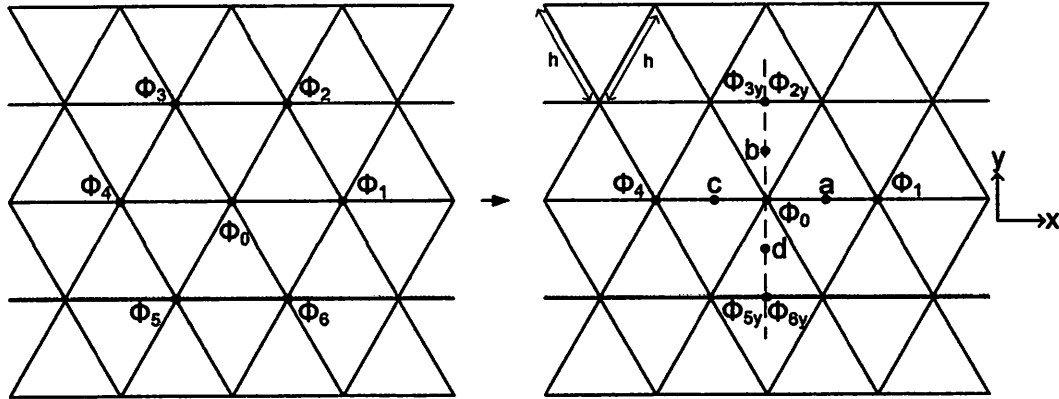
Dengan mensubstitusi persamaan 2-23 dan 2-24 ke dalam persamaan 2-22, diperoleh:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 - 4\Phi_0}{h^2} = 0 \quad (2-25)$$

$$\text{atau } \Phi_0 = \frac{1}{4}(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4)$$

2.10.4.2. Bidang Diskritisasi Segitiga

Bagian suatu daerah dua dimensi yang telah dibagi-bagi menjadi beberapa segitiga dengan jarak antar titik h dapat ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Pembagian titik-titik potensial pada bidang diskritisasi segitiga

Sumber: Pei-bai Zhou, 1993:65

Harga yang tak diketahui pada tujuh titik yang berdekatan ditunjukkan sebagai Φ_0 , Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , Φ_4 , Φ_5 dan Φ_6 . Jika daerahnya bermuatan bebas dan berisi dielektrik serbasama, maka $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$ dan $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$. Didapatkan:

Turunan parsial pertama potensial terhadap sumbu x:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_a = \frac{\Phi_1 - \Phi_0}{h}, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_c = \frac{\Phi_0 - \Phi_4}{h}$$

Turunan parsial pertama potensial terhadap sumbu y:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_b = \frac{\Phi_2 + \Phi_3 - 2\Phi_0}{h}, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_d = \frac{2\Phi_0 - (\Phi_5 + \Phi_6)}{h}$$

Didapatkan:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \Big|_0 = \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_a - \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_c}{h} = \frac{\Phi_1 - \Phi_0 - \Phi_0 + \Phi_4}{h^2} \quad (2-26)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \Big|_0 = \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_b - \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_d}{h} = \frac{\Phi_2 + \Phi_3 - 2\Phi_0 - 2\Phi_0 + \Phi_5 + \Phi_6}{h^2} \quad (2-27)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2-26 dan 2-27 ke dalam persamaan 2-22, diperoleh:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 + \Phi_6 - 6\Phi_0}{h^2} = 0 \quad (2-28)$$

$$\text{atau } \Phi_0 = \frac{1}{6}(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 + \Phi_6)$$

Persamaan 2-25 adalah persamaan potensial dua dimensi dengan permitivitas seragam yang digunakan pada setiap titik dengan diskritisasi persegi sedangkan persamaan 2-28 untuk diskritisasi segitiga.

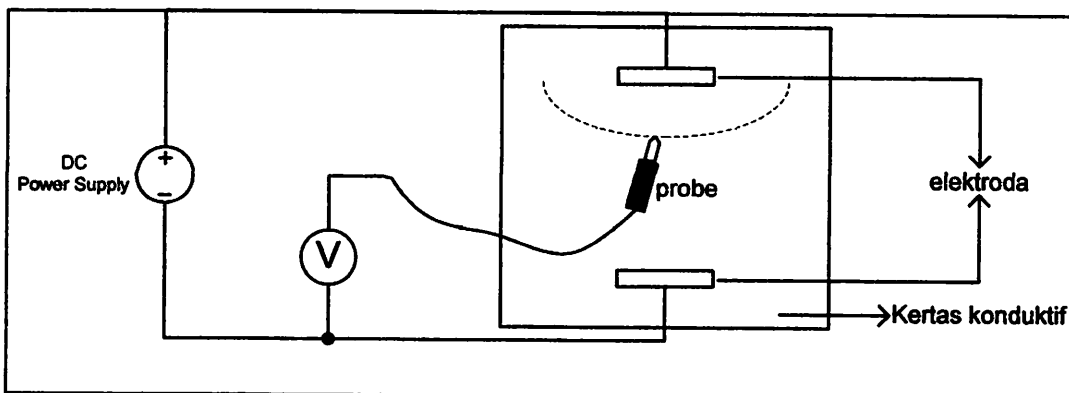
Dari melihat persamaan-persamaan di atas, maka langkah-langkah penyelesaian dengan menggunakan metode FDM ini adalah:

- a. Menentukan jarak antar titik, semakin kecil jarak antar titik, maka hasil yang diperoleh akan semakin teliti.
- b. Memakai persamaan potensial dua dimensi untuk mencari nilai potensial pada setiap titik sesuai bentuk diskritisasinya.
- c. Dengan menyelesaikan persamaan-persamaan yang didapat secara iterasi hingga mencapai nilai yang konvergen, maka nilai potensial pada titik-titik yang diinginkan bisa ditemukan.

2.11. Metode Pemetaan Kertas Konduktif

Untuk medan listrik dua dimensi, dapat diukur dengan sederhana dan cukup teliti dengan menggunakan kertas konduktif, yaitu konstanta dielektrik yang disimulasikan dengan konduktivitas sebanding dengan jumlah lapisan kertas konduktif seperti yang terlihat pada Gambar 2.14. Sebagai kertas konduktif dikenal kertas grafit dengan suatu tahanan permukaan (yakni resistansi yang terukur antara kedua sisi permukaan dari sampel yang berbentuk bujur sangkar yang panjang sisinya 1 m) sekitar $10 \text{ k}\Omega$ dan ini sama dengan pelapis konduktif pada kabel tegangan tinggi.

Permukaan elektroda disimulasikan dengan lapisan cat perak yang konduktif atau biasanya dengan lembaran aluminium foil. Pada bidang batas antara elektroda dan dielektrik atau antara dua dielektrik yang berbeda, kertas konduktif harus terhubung dengan baik secara listrik. Untuk itu perlu dilakukan pemakuan kertas konduktif pada alas. Keuntungan metode ini yaitu garis medan listrik dapat langsung digambar pada kertas dengan pertolongan garis ekipotensial.



Gambar 2.14. Rangkaian percobaan untuk mencari garis ekipotensial dengan bantuan kertas konduktif

Penentuan dan pemodelan garis ekipotensial dan medan listrik dari rangkaian di atas ialah sebagai berikut:

- a. Hubungkan terminal *output* sumber tegangan DC rendah ke terminal dari kedua elektroda dengan menggunakan sebuah kabel.
- b. Gambar konfigurasi elektroda yang akan diuji pada sebuah kertas milimeter dengan koordinat yang sama pada kertas konduktif tersebut.
- c. Tentukan jumlah garis ekipotensial yang akan digambar pada susunan elektroda tersebut dengan menetapkan nilai-nilai potensial (U_v) yang akan dicari dengan range kenaikan potensial (ΔU_v) yang sama.
- d. Nyalakan sumber tegangan DC, kemudian lacak nilai potensial yang akan dicari pada susunan elektroda tersebut dengan meletakkan ujung probe pada kertas konduktif. Gerakkan probe hingga nilai potensial U_v terbaca pada Voltmeter. Untuk setiap potensial U_v , akan didapatkan lebih dari satu buah koordinat titik pada daerah sela elektroda tersebut. Tetapkan jumlah titik tersebut semisal 8 buah titik. Plot titik-titik tersebut pada kertas milimeter.
- e. Ulangi langkah d untuk nilai U_v yang lain. Setelah selesai memplot semua titik potensial yang dicari pada kertas milimeter, matikan sumber tegangan DC kemudian hubungkan titik-titik sepotensial dengan sebuah garis sehingga nantinya akan didapatkan gambar garis-garis ekipotensial.
- f. Akhirnya, sketsa atau gambar garis medan listrik dengan memotong garis ekipotensial secara tegak lurus sehingga didapatkan distribusi medan listrik pada susunan elektroda tersebut.

BAB III

PERENCANAAN PENGUJIAN FINIAL FRANKLIN

3.1. Pendahuluan

Tegangan tembus yang dinyatakan dalam kV merupakan ukuran kemampuan finial tersambar oleh petir dengan waktu tembus tertentu. Tegangan tembus ini sangat bergantung pada distribusi medan listrik dan distribusi medan listrik tersebut dipengaruhi oleh keruncingan pada elektroda ujung finial. Dalam praktek, faktor keruncingan elektroda ujung finial dapat dilihat dari besar sudut keruncingan maupun diameter finial tersebut.

Penelitian yang akan dilaksanakan dan disusun pada skripsi ini pada dasarnya untuk menguji dan menganalisis pengaruh dari sudut keruncingan ujung finial dan diameter batang finial yang berbeda-beda terhadap distribusi medan listrik dan tegangan tembus. Pengujian berupa pengukuran tegangan korona dan tembus pada objek uji finial Franklin tersebut bertujuan untuk mendapatkan kemampuan menyambar pada titik ujung finial tersebut. Se jauh mana kualitas kemampuannya dapat dianalisis dari data nilai tegangan korona dan tembus.

Selain itu parameter penting lainnya yang dibahas ialah distribusi medan listrik yang dihasilkan oleh finial tersebut. Dengan membahas medan listriknya, nantinya akan diperoleh besar efisiensi medan listrik yang akhirnya dapat menjelaskan perbedaan kemampuan sambaran finial-finial yang akan diteliti.

Oleh karena itu, untuk mendukung hasil pengujian, maka diperlukan literatur-literatur untuk pembahasan data uji yang antara lain:

- a. Parameter tegangan korona dan tembus pada berbagai kondisi atmosfer menurut hukum Schwaiger yang digunakan untuk menganalisis data uji tegangan korona dan tembus pada objek pengujian.
- b. Metode pemetaan eksperimental yaitu dengan menggunakan kertas konduktif yang digunakan untuk penggambaran distribusi medan listrik dengan cara mengukur nilai potensial di tepi dan dalam luasan dari daerah sela elektroda yang ukurannya telah didefinisikan.
- c. Metode FDM (*Finite Difference Method*) yaitu dengan membagi daerah sela antara elektroda ujung finial dengan elektroda pelat awan menjadi beberapa bagian titik. Nilai fungsi kontinyu di dalam daerah sela tersebut direpresentasikan oleh nilai potensial pada titik-titik tersebut.

3.2. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian akan dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi dan Pengukuran Besaran Elektrik Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya Malang pada Bulan Desember 2008 - Januari 2009.

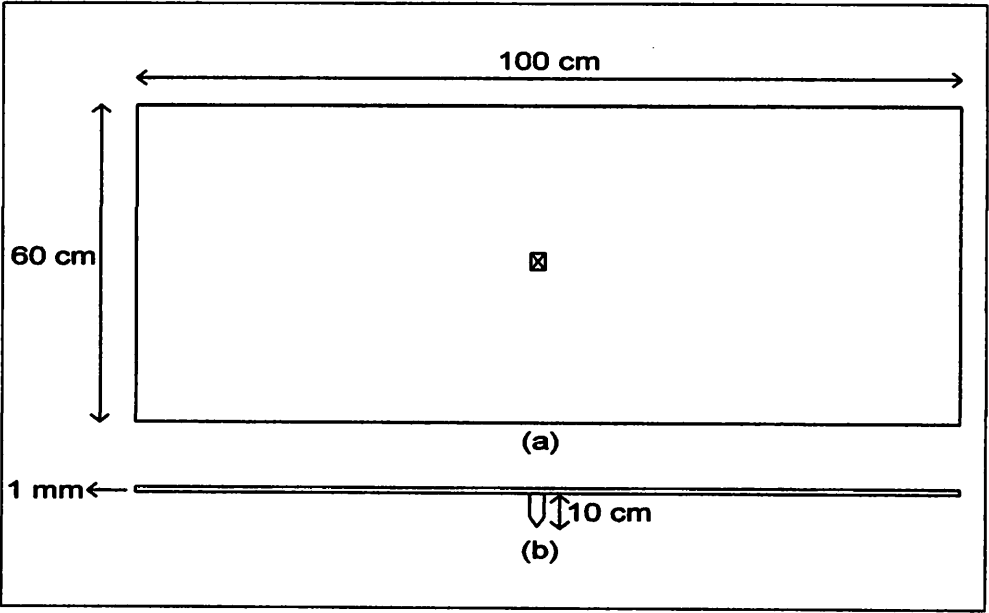
3.3. Objek Uji

Dalam penelitian skripsi ini, objek uji yang digunakan ialah elektroda ujung runcing finial yang terbuat dari bahan besi silinder pejal. Berikut ini diberikan tabel perancangan penangkap petir pada penyusunan skripsi ini yang disesuaikan dengan standar dari Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP pada Tabel 2.1), SPLN dan DIN EN/VDE.

Tabel 3.1. Jenis komponen beserta dimensi perancangan finial Franklin pada skripsi

No.	Komponen	Jenis bahan	Bentuk	Ukuran
1.	Kepala (ujung finial)	Besi	Pejal runcing	Lihat Tabel 3.2
2.	Batang tegak	Besi	Batang silinder pejal	Ø (diameter) disesuaikan dengan No.1
3.	Penghantar penyalur utama (<i>stranded conductor</i>)	Cu (Tembaga)	<i>Stranded</i> /Pilin	50 mm ² , 7×3 mm, Ø 9 mm (DIN EN 50164-2)
4.	Elektroda pengebumian	Cu (Tembaga)	Rod silinder pejal	Ø 16 mm (0.63 inci), <i>ℓ</i> 10 m (DIN EN 18195)

Sedangkan model awan yang digunakan ialah pelat tipis seng yang berbentuk persegi panjang. Untuk lebih jelasnya dimensi objek uji dapat dilihat pada Gambar 3.2.

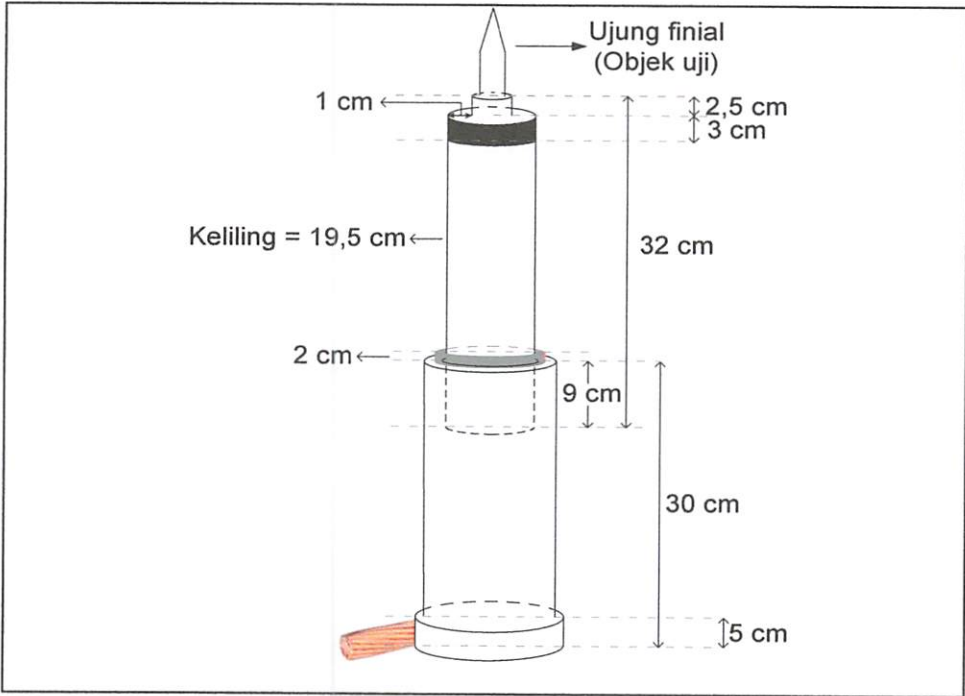


Gambar 3.1. Model dan dimensi pelat awan

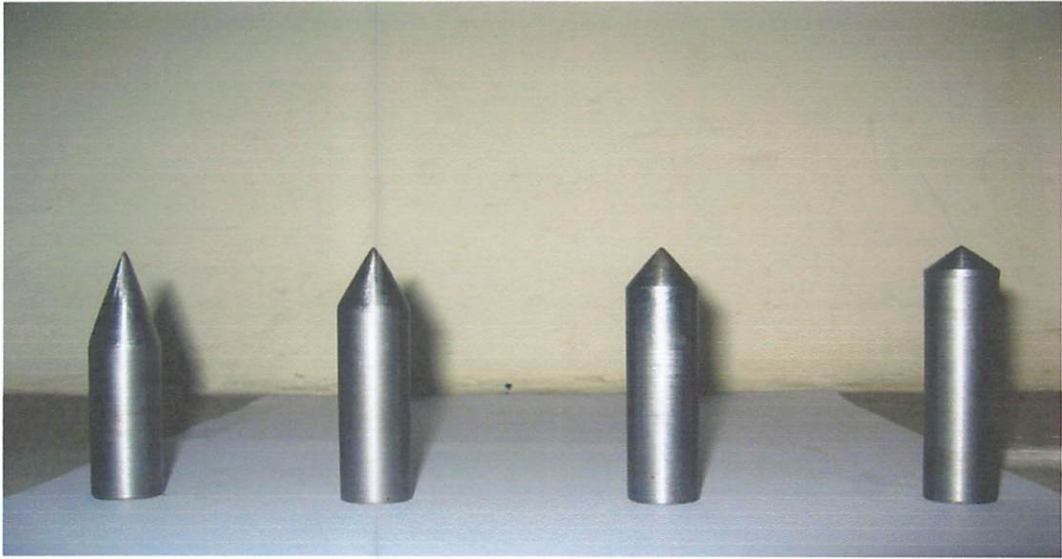
- (a) Tampak atas
- (b) Tampak samping



Gambar 3.2 Bentuk penangkap petir Franklin



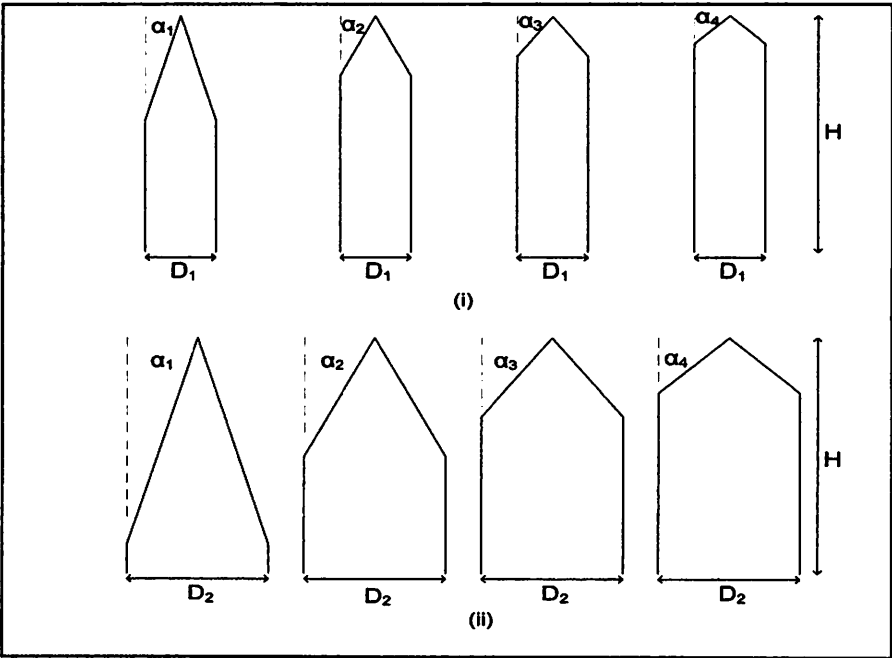
(a) Dimensi Penangkap Petir Pada Penelitian



(i) Untuk $D_1 = 2$ cm, $H = 10$ cm



(ii) Untuk $D_2 = 4$ cm, $H = 10$ cm



(b) Dimensi ujung finial (objek uji) petir

Dari Gambar 3.2, dimensi objek uji yang akan diteliti ialah seperti pada tabel berikut:

Tabel 3.2. Ukuran diameter (D) dan sudut keruncingan (α) pada elektroda ujung runcing finial

n	$D_1 = 2 \text{ cm}$	$D_2 = 4 \text{ cm}$
	α_n^0	
1	15	
2	25	
3	35	
4	45	

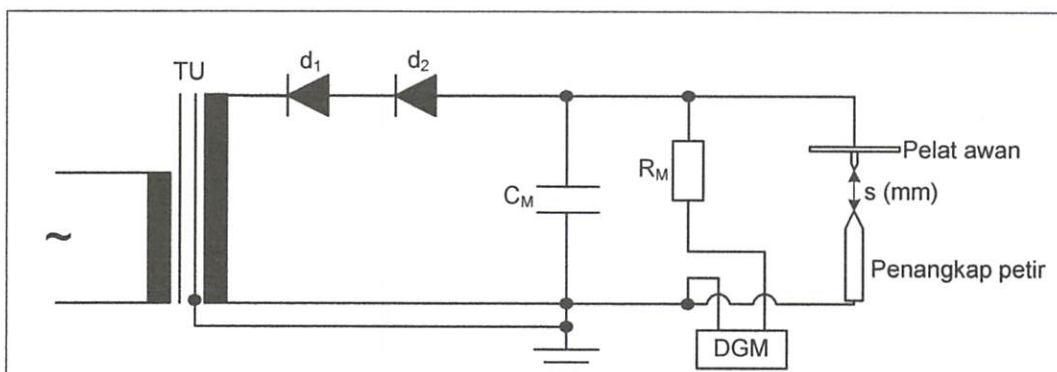
Dari Tabel 3.2, variabel yang akan dibahas pada objek uji terdiri dari dua yaitu sudut keruncingan ujung runcing finial (α^0) dan diameter batang ujung runcing finial (D). Masing-masing diameter tersebut akan memiliki jumlah variasi sudut runcing yang sama yaitu 15^0 , 25^0 , 35^0 dan 45^0 . Selanjutnya objek finial tersebut akan diuji untuk mencari nilai tegangan korona dan tembus menggunakan metode pengujian tegangan tinggi searah karena tegangan petir merupakan jenis tegangan tinggi searah polaritas negatif.

3.4. Pembangkitan dan Pengujian Korona serta Tembus dengan Tegangan Tinggi Searah

Pembangkitan tegangan tinggi searah adalah tegangan yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai tegangan korona dan tembus pada konfigurasi objek uji dengan pelat awan. Sebagai dielektrik pada konfigurasi tersebut adalah udara pada ruangan. Untuk pembangkitan tegangan tinggi searah dapat menggunakan pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik yang keluarannya dihubungkan dengan rangkaian penyearah setengah gelombang (menggunakan dioda tegangan tinggi). Untuk rangkaian penyearah dengan kapasitor perata memberikan tegangan searah yang lebih murni daripada tanpa kapasitor. Dengan memperbesar ukuran kapasitor perata, frekuensi dan jumlah fasa akan mengurangi tegangan cacat yang dihasilkan.

Dari rangkaian pembangkitan seperti pada Gambar 3.3, dioda disusun bias balik sehingga jenis tegangan tinggi searah yang dibangkitkan ialah tegangan tinggi searah polaritas negatif. Ini artinya tegangan dengan polaritas negatif akan

dihubungkan dengan elektroda pelat awan, sedangkan tegangan berpolaritas positif terhubung pada finial petir sebagai objek uji. Alat ukur tegangan tinggi searah yang akan membaca nilai tegangan korona dan tembus ialah DGM yang diseri dengan resistor tegangan tinggi sebagai pembagi resistif.



Gambar 3.3. Rangkaian pembangkitan dan pengujian tegangan tinggi searah

keterangan gambar:

TU = Trafo Uji tiga belitan tegangan tinggi 220 V/220 V/100 kV

d_1, d_2 = Dioda tegangan tinggi 100 k Ω , 20 mA, 140 kV

C_M = Kapasitor perata 10000 pF

R_M = Resistor pengukuran 280 M Ω

DGM = Alat ukur tegangan tinggi searah (kV)

3.5. Pembumian

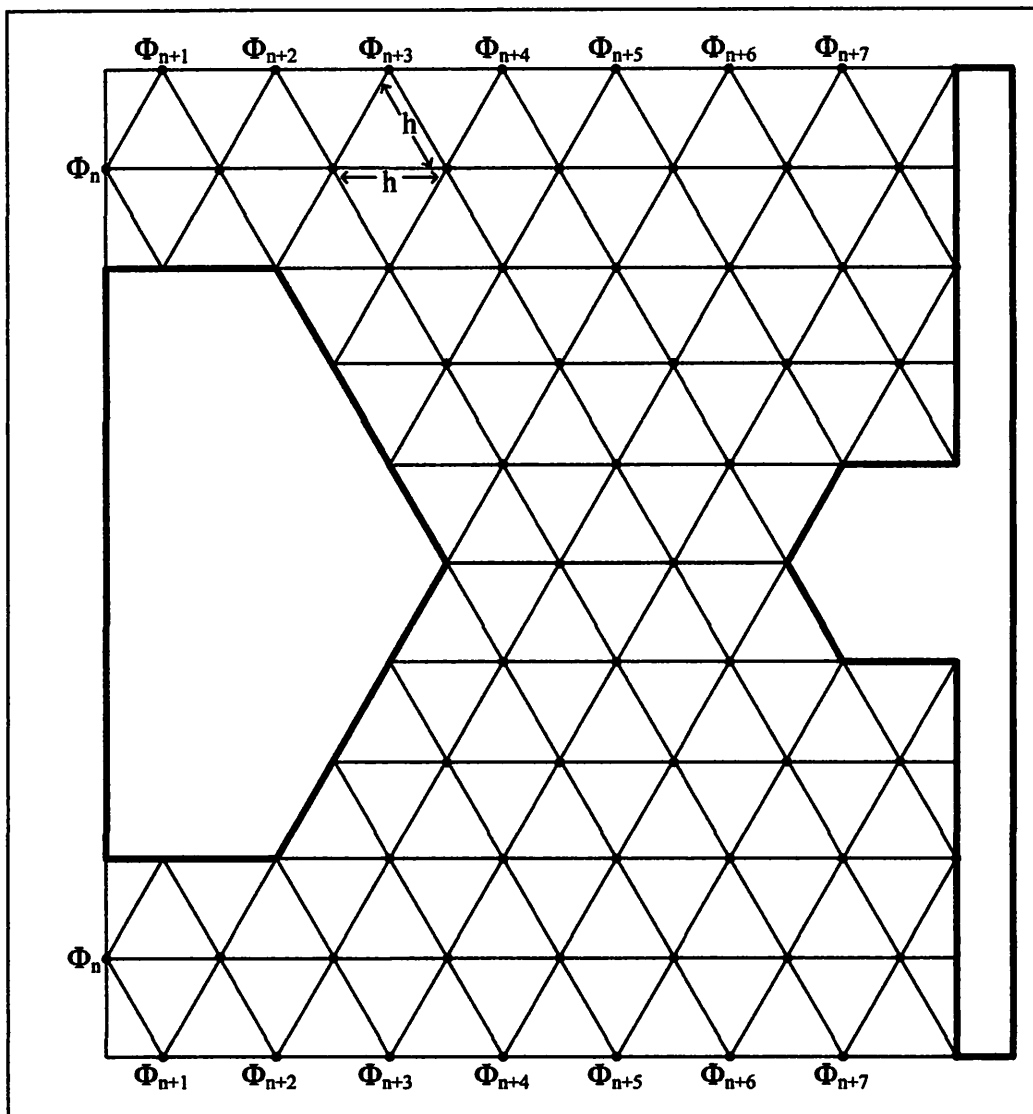
Pengujian tegangan tinggi merupakan pengujian yang mempunyai resiko yang sangat tinggi sehingga untuk menjaga keselamatan dan meredam gangguan yang ditimbulkan oleh pemakaian tegangan tinggi, maka semua peralatan yang bersifat metal atau logam yang dalam keadaan normal atau tidak dialiri arus listrik harus dibumikan sehingga mempunyai potensial yang sama dengan tanah dan tidak mempengaruhi hasil pengukuran.

3.6. Memetakan Medan Listrik dengan Metode Kertas Konduktif

Syarat yang harus dipenuhi dalam penggunaan metode FDM adalah nilai potensial pada titik-titik di bagian tepi luasan harus diketahui terlebih dahulu. Oleh karena itu untuk mencari nilai potensial pada tepi luasan digunakan bantuan metode kertas konduktif. Luasan yang dimaksud disini ialah bidang atau daerah dua dimensi diantara dua buah elektroda bertegangan yang akan dicari bentuk distribusi medan listriknya.

Pada skripsi ini luasan yang dipakai ialah luasan diantara elektroda ujung runcing finial dan elektroda pelat awan yang diisi oleh dielektrik udara seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4. Oleh karenanya kertas konduktif nanti

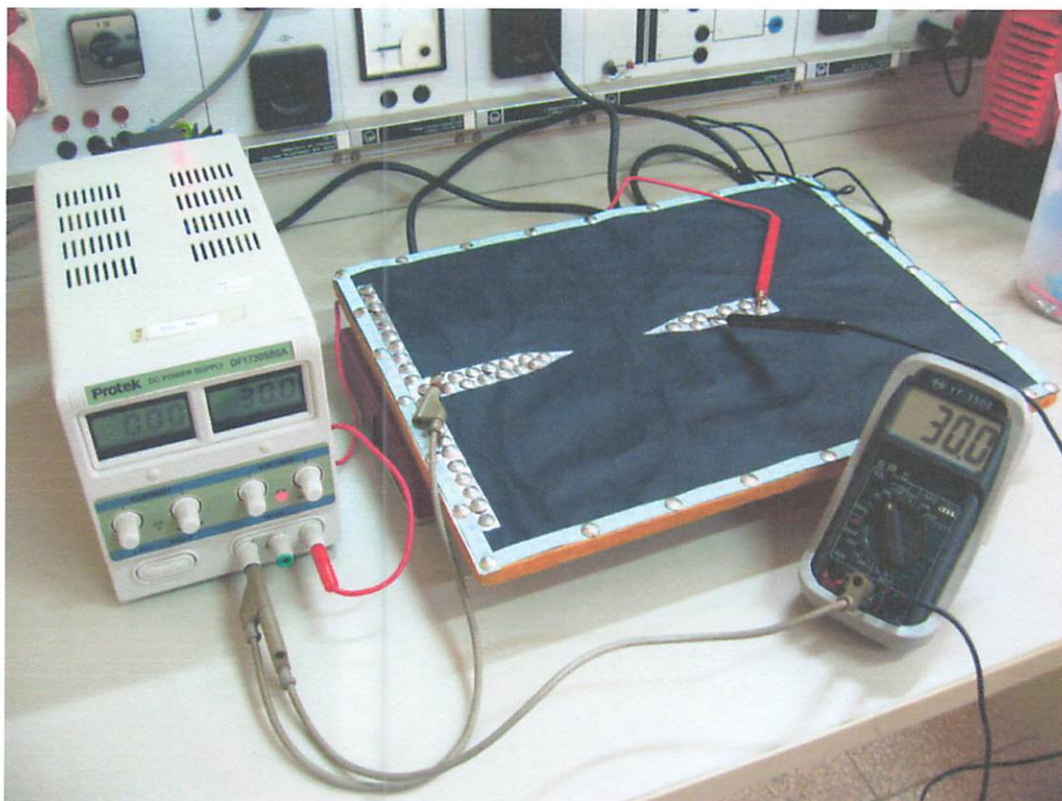
direpresentasikan sebagai dielektrik udara tersebut. Diskritisasi segitiga pada Gambar 3.4 akan diperlukan pada metode FDM, namun tidak digambar pada kertas konduktif tersebut melainkan pada kertas milimeter.

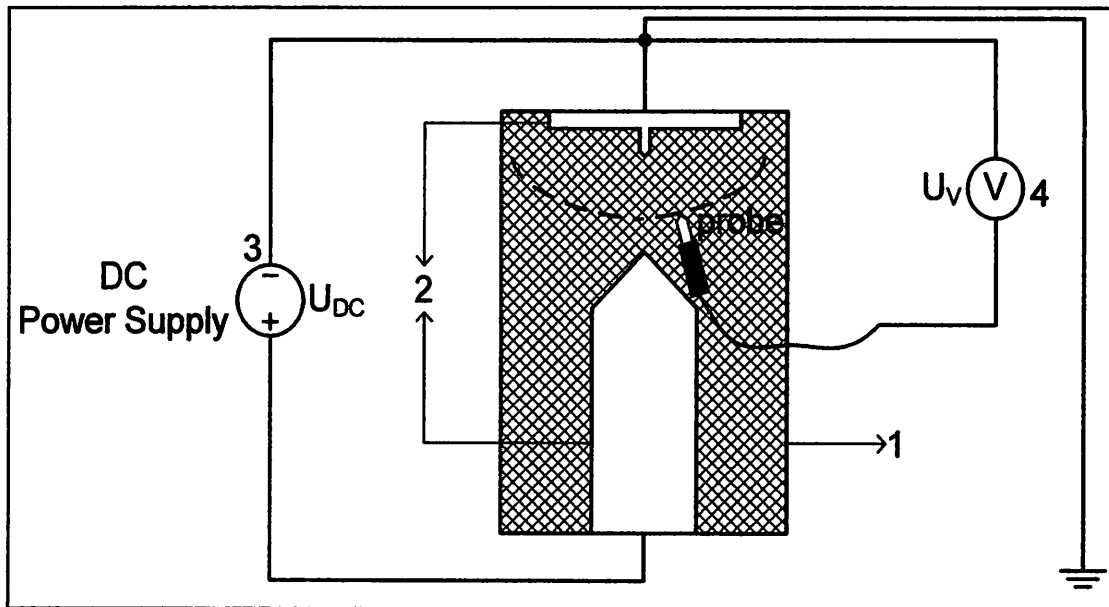


Gambar 3.4. Pengukuran potensial tepi luasan dielektrik udara pada kertas konduktif untuk bentuk diskritisasi segitiga pada penelitian

Agar sebuah kertas konduktif dapat mewakili sebuah dielektrik dalam jenis tertentu, maka kertas konduktif disusun bertumpuk sehingga mempunyai permitivitas sama dengan permitivitas ϵ dielektrik tersebut. Karena jenis dielektrik

yang dipakai ialah udara dan $\epsilon_{\text{udara}} = 1$, maka kertas konduktif yang dipakai cukup satu lapis. Bahan yang dipakai untuk memodelkan elektroda ujung runcing finial dan pelat awan terbuat dari aluminium foil yang dipotong sesuai dengan dimensi kedua elektroda tersebut. Selanjutnya aluminium foil tersebut ditempel pada kertas konduktif yang telah terhubung sebelumnya pada sebuah alas dari kayu.





Gambar 3.5. Rangkaian pengujian medan listrik dua dimensi dengan bantuan kertas konduktif

Keterangan gambar:

1. Kertas konduktif sebagai dielektrik udara (1 lapis kertas $\approx \epsilon = 1$).
2. Kertas aluminium foil sebagai model elektroda ujung runcing finial dan pelat awan.
3. *DC power supply*.
4. Voltmeter DC.

3.7. Memetakan Medan Listrik dengan Metode FDM (*Finite Difference Method*)

Setelah mencari nilai potensial di titik-titik tepi luasan yang telah didefinisikan sebelumnya, kemudian dilakukan perhitungan potensial-potensial di dalam daerah luasan tersebut. Metode iterasi pendekatan numerik ini diperlukan

agar nantinya garis-garis ekipotensial dapat digambar menggunakan data-data nilai-nilai potensial tersebut, dengan menghubungkan titik-titik yang mempunyai nilai potensial sama pada luasan tersebut. Penggambaran garis medan listrik dilakukan dengan memotong garis-garis ekipotensial secara tegak lurus, karena garis ekipotensial dan garis medan listrik selalu tegak lurus.

3.8. Langkah-Langkah Pengujian dan Analisis Data

Data-data hasil pengujian kekuatan dielektrik yang berupa tegangan korona dan tembus merupakan data yang akan memberi petunjuk sejauh mana kemampuan finial untuk mencapai waktu sambaran yang lebih efektif. Kemudian data-data tegangan tersebut akan dibandingkan berupa tampilan grafik tegangan korona dan tembus sebagai fungsi jarak sela dan grafik-grafik pendukung lainnya.

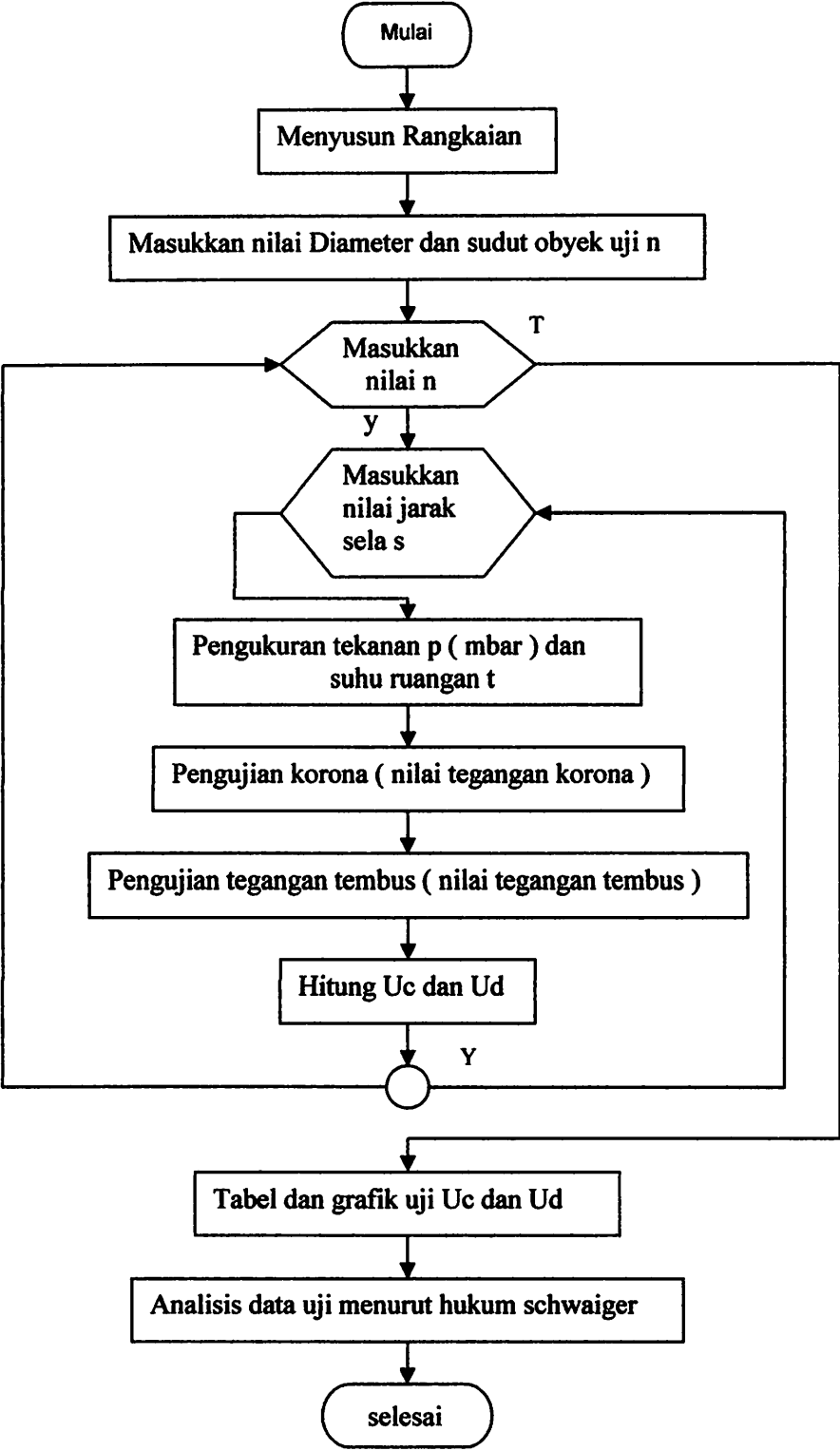
Selain pengujian kekuatan dielektrik tersebut, dilakukan pula penggambaran distribusi medan listrik dengan bantuan metode kertas konduktif dan FDM yang akan menjelaskan perbedaan hasil pengujian korona dan tembus. Dari analisis data ini, kesimpulan dari penelitian dapat dihasilkan. Berikut langkah-langkah pengujian dan analisisnya yang dibagi menjadi tiga bagian:

1. Pengujian dan analisis tegangan korona dan tembus

- a. Menyusun rangkaian pembangkitan dan pengujian seperti Gambar 3.3.

Lalu dilakukan pengujian korona dan tembus untuk setiap objek uji yang berjumlah delapan buah.

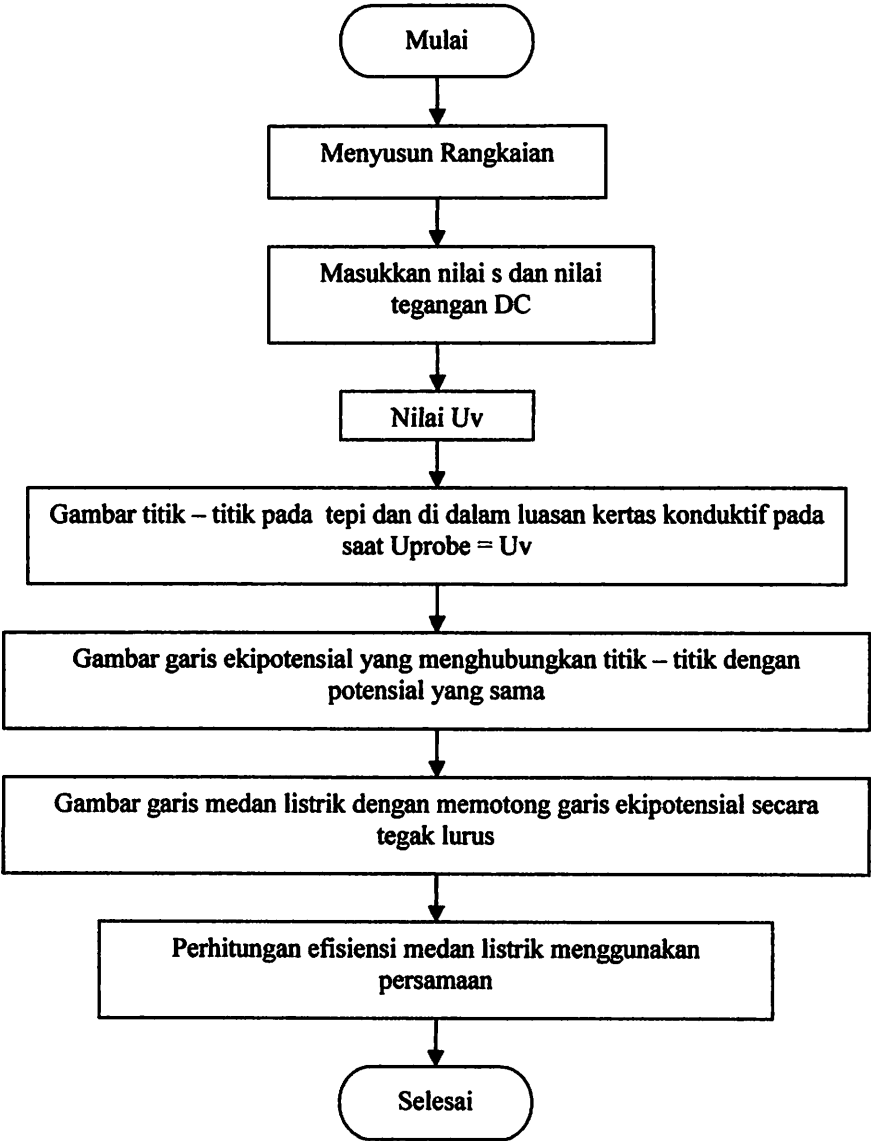
- b. Jarak sela s (mm) diubah-ubah mulai dari 20, 25, 30, 35, 40, 45 dan 50 mm. Sehingga setiap perubahan jarak sela untuk tiap-tiap objek uji tersebut dicatat nilai tegangan korona dan tembusnya dan setiap perubahan jarak sela nilai tekanan udara p (mbar) dan suhu ruangan t ($^{\circ}\text{C}$) dicatat.
- c. Setelah data tegangan korona dan tembus terkumpul dalam sebuah tabel pengujian, maka selanjutnya dibuat grafik tegangan korona dan tembus sebagai fungsi jarak sela dan grafik-grafik pendukung lainnya. Kemudian dilakukan analisis berdasarkan hukum Schwaiger.



Gambar3.6 (a) Diagram Alir Perencanaan Pengujian Tegangan Korona dan Tegangan Tembus

2. Pemetaan medan listrik dengan metode kertas konduktif

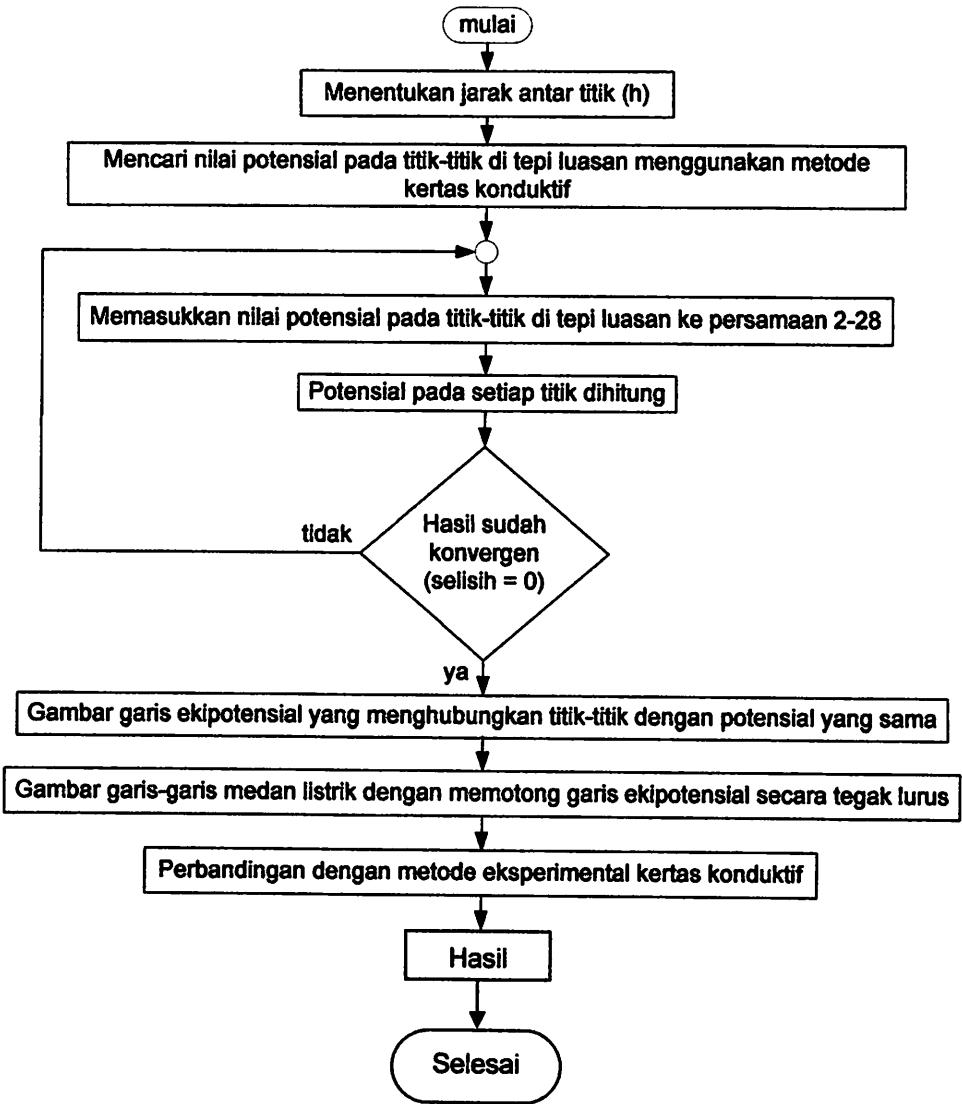
- a. Rangkaian pada Gambar 3.5 disusun dengan menggunakan sumber tegangan searah. Jarak sela s (mm) antara elektroda dipilih hanya yang paling besar yaitu $s = 50$ mm.
- b. Sumber tegangan searah (*DC power supply*) diset pada tegangan $U_{DC} = 30$ volt. Ditentukan untuk penggambaran sembilan buah garis ekipotensial dengan langkah tegangan U_V atau U sebesar 27 V, 24 V, 21 V, 18 V, 15 V, 12 V, 9 V, 6V dan 3V.
- c. Untuk menggambar garis ekipotensial $U_V = 27$ volt, maka gerakkan ujung probe pada permukaan kertas konduktif hingga voltmeter menunjukkan nilai 27 V. Pada saat ini tegangan antara probe U_{probe} dengan luasan kertas konduktif sama dengan 27 volt.
- d. Plot koordinat titik-titik dari setiap potensial U_V pada kertas milimeter.
- e. Titik yang diukur adalah titik yang berada di pinggir luasan pada kertas konduktif dan titik-titik di dalam daerah luasan sehingga didapatkan bentuk distribusi medan listrik.
- f. Setelah itu dilakukan perhitungan nilai efisiensi medan listrik (η) untuk setiap bentuk distribusi medan listrik menggunakan persamaan 2-12 dengan mencari terlebih dahulu nilai $E_{rata-rata}$ dan $E_{maksimum}$ nya.



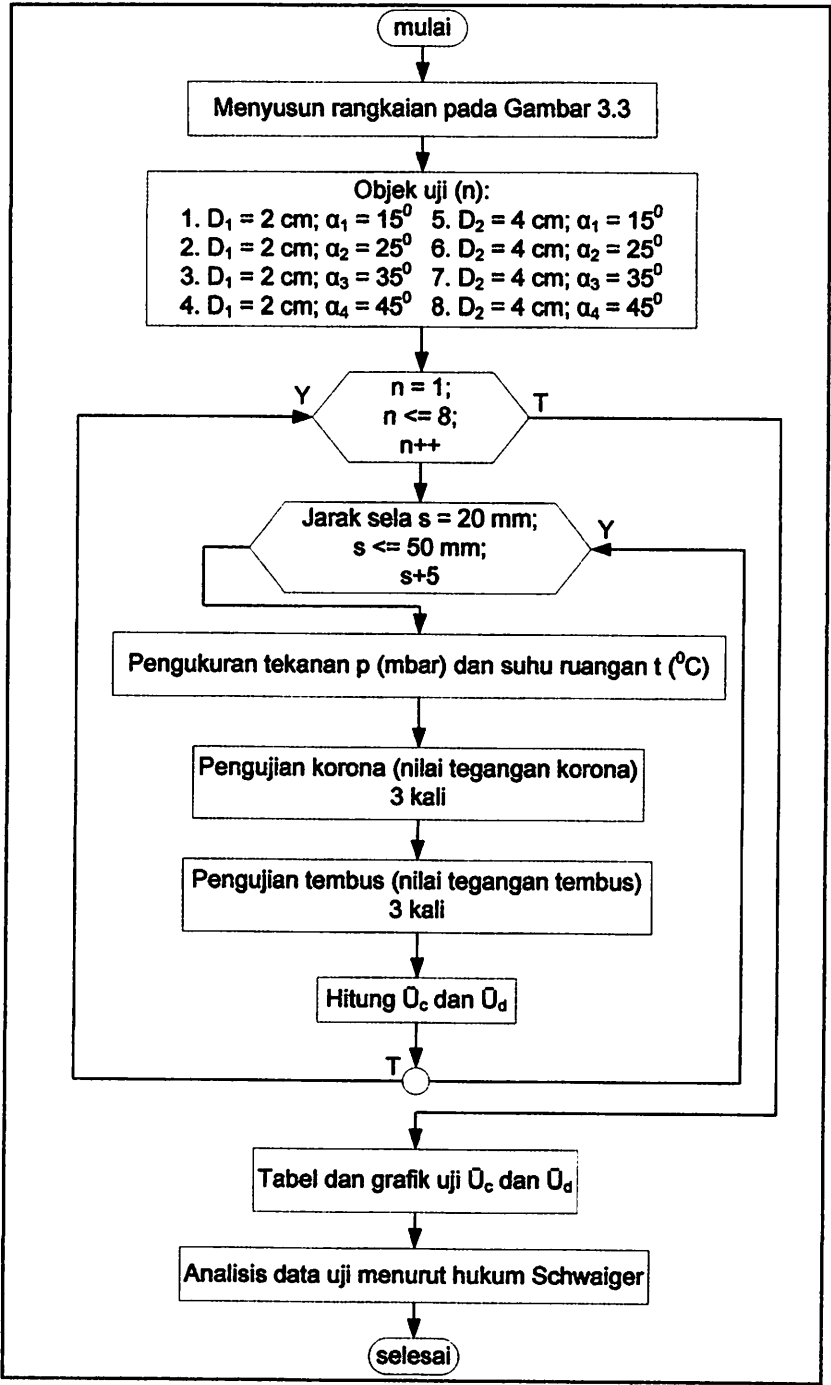
Gambar 3.6 (b) Diagram Alir Perencanaan Perhitungan Medan Listrik dengan Metode Kertas Konduktif

3. Pemetaan medan listrik dengan metode FDM (*Finite Difference Method*)

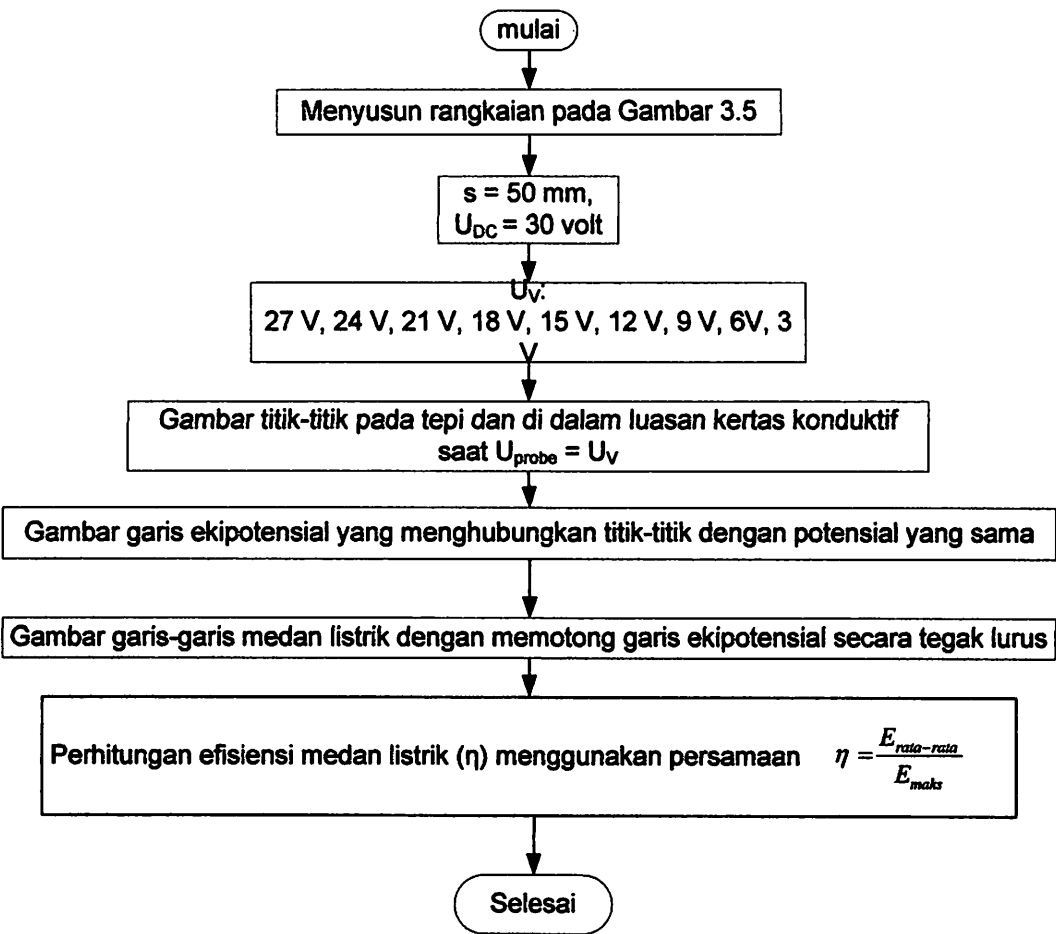
- a. Menentukan jarak antar titik h . Dengan semakin kecil jarak antar titik h (mm), maka didapatkan faktor kesalahan atau *error* yang makin kecil. Ditetapkan h sebesar 5 mm.
- b. Hasil pengukuran potensial dari metode kertas konduktif dimasukkan pada persamaan potensial dua dimensi dengan permitivitas seragam untuk diskritisasi segitiga yaitu persamaan 2-28.
- c. Pada perhitungan pertama atau iterasi ke-1, potensial pada titik-titik selain di tepi luasan dianggap bernilai nol, sedangkan potensial di titik tepi elektroda ujung runcing finial ialah 30 volt.
- d. Hasil perhitungan pada iterasi ke-1 dimasukkan pada perhitungan iterasi ke-2 dan seterusnya hingga didapatkan hasil yang konvergen dengan selisih perhitungan ditetapkan sebesar 0.
- e. Garis-garis ekipotensial digambar dengan menghubungkan titik-titik dengan nilai potensial yang sama pada luasan tersebut.
- f. Kemudian, digambar garis-garis medan listrik dengan memotong garis-garis ekipotensial secara tegak lurus dan dilakukan perbandingan dengan metode kertas konduktif



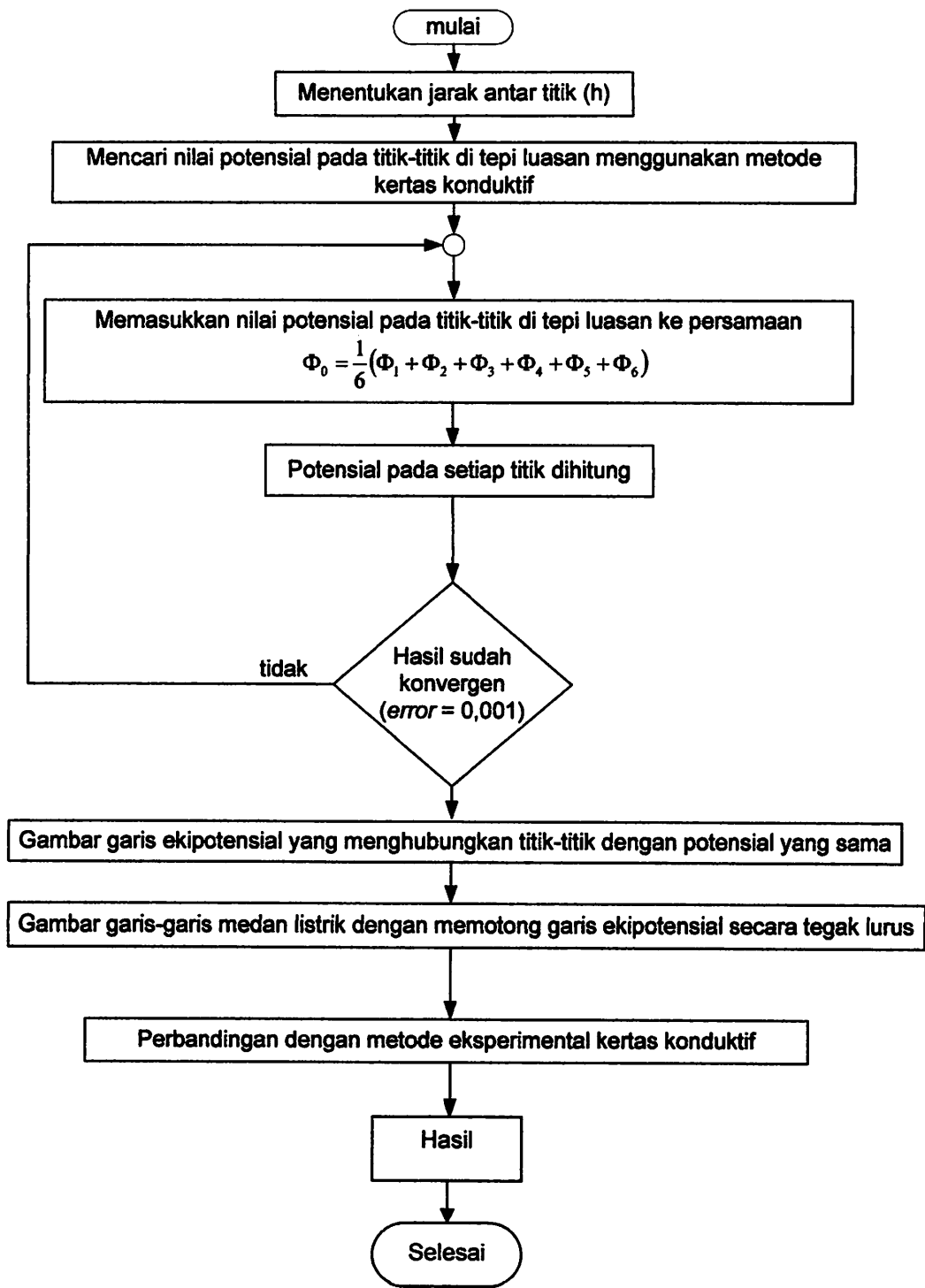
Gambar 3.6 (c) Diagram Alir Perencanaan Perhitungan Medan Listrik dengan Metode FDM (*Finite Difference Method*)



Gambar 3.7 (a) Diagram Alir Pengujian Korona dan Tegangan Tembus



Gambar 3.7 (b) Diagram Alir Pengujian Medan Listrik dengan Metode Kertas Konduktif



Gambar 3.7 (c) Diagram Alir Pengujian Medan Listrik dengan Metode FDM

BAB IV

ANALISA HASIL PENGUJIAN

4.1. Pengujian Tegangan Korona

4.1.1. Hasil Pengujian untuk Sudut Keruncingan α_n^0 pada Diameter Finial

$$D_1 = 2 \text{ cm}$$

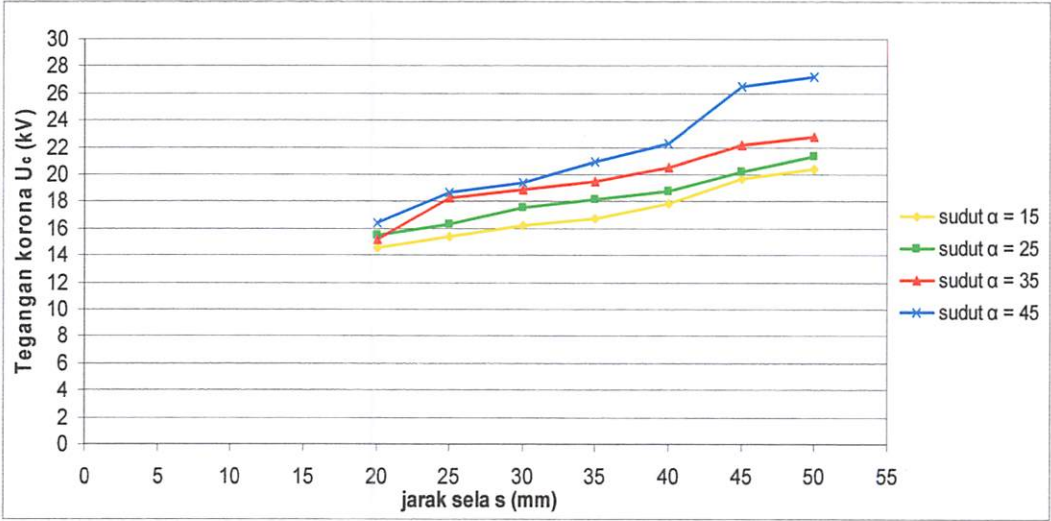
Dari Tabel 4.1 dan grafik 4.1 dapat dilihat bahwa nilai tegangan korona untuk setiap sudut bertambah besar apabila jarak sela diperlebar. Seperti telah dijelaskan sebelumnya pada bab 2, untuk memunculkan korona diperlukan kuat medan yang cukup besar untuk melepaskan sebuah elektron dari permukaan elektroda khususnya elektroda katoda. Karena ujung elektroda finial memiliki luas permukaan yang paling sempit menyebabkan timbulnya kuat medan listrik lokal yang tinggi daripada permukaan lainnya.

Kuat medan listrik tersebut memberikan energi ionisasi awal untuk dapat membebaskan elektron dan ion positif dari molekul gas di depannya. Dengan terlepasnya elektron, menyebabkan elektron bergerak dengan kecepatan v di daerah sela elektroda dekat permukaan ujung finial. Dengan pergerakan elektron bebas tersebut menyebabkan elektron menumbuk molekul udara netral lainnya dan bila energi kinetik elektron lebih besar dari energi ionisasi molekul tersebut menyebabkan timbulnya ion positif dan elektron bebas baru. Proses ini dinamakan *avalanche* yang nantinya menghasilkan muatan ruang awal yang cukup besar di depan ujung runcing finial. Ion-ion positif yang bersifat stasioner tersebut akan menumpuk terlebih dahulu pada permukaan ujung finial sebelum bergerak ke

elektroda anoda atau awan. Oleh karena itu korona positif muncul pada ujung runcing finial tersebut.

Tabel 4.1. Data pengukuran tegangan korona untuk berbagai α_n^0 dengan $D_1 = 2\text{ cm}$ pada kondisi kerapatan udara $p = 959\text{ mbar}$, $t = 23^0\text{C}$

jarak sela (mm)	Tegangan korona $\bar{U}_c$ (kV)			
	$\alpha_1 = 15^0$	$\alpha_2 = 25^0$	$\alpha_3 = 35^0$	$\alpha_4 = 45^0$
20	14.53	15.47	15.17	16.40
25	15.40	16.33	18.27	18.70
30	16.23	17.50	18.83	19.37
35	16.70	18.17	19.50	20.93
40	17.87	18.73	20.57	22.30
45	19.73	20.23	22.17	26.50
50	20.40	21.37	22.83	27.23



Grafik 4.1 Tegangan korona $\bar{U}_c$ sebagai fungsi jarak sela (s) untuk berbagai sudut α_n dengan $D_1 = 2\text{ cm}$

Kemudian dari grafik di atas, apabila jarak sela elektroda diperlebar maka korona muncul lebih lama dari sebelumnya yang ditandai dengan nilai U_c yang lebih besar. Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada susunan antara finial dan awan menghasilkan kapasitansi C yang nilainya didekati menggunakan persamaan:

$$C \approx \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{s}, \epsilon_r \text{ udara} = 1 \text{ dan } \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ N.m}^2/\text{C}^2$$

dengan A ialah luas permukaan elektroda dan s ialah jarak sela udara.

Dari persamaan tersebut, jika nilai (s) diperbesar menyebabkan nilai kapasitansi yang dihasilkan semakin kecil. Karena nilai C sebanding dengan muatan Q dan berbanding terbalik dengan tegangan U atau secara matematis dapat dituliskan $C = \frac{Q}{U}$, maka untuk jarak sela $s = 20 \text{ mm}$ dihasilkan C_1 sedangkan jarak sela $s = 25 \text{ mm}$ dihasilkan C_2 .

$$C_1 = \frac{Q_1}{U_1} \rightarrow U_1 = \frac{Q_1}{C_1} \text{ dan } C_2 = \frac{Q_2}{U_2} \rightarrow U_2 = \frac{Q_2}{C_2}$$

Jika diberikan nilai tegangan tinggi DC yang sama maka dengan menyamakan variabel tegangannya diperoleh:

$$U_1 = U_2$$

$$\frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} \rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1}{C_2} \rightarrow C_1 > C_2 \text{ sehingga } Q_1 > Q_2$$

Dari hasil akhir persamaan tersebut didapatkan bahwa jumlah muatan listrik Q_1 lebih banyak daripada Q_2 sehingga dengan memasukkan variabel Q tersebut ke dalam persamaan 2-10, diperoleh kuat medan listrik E sebagai berikut:

$$E_1 = k \frac{Q_1}{r^2} \text{ dan } E_2 = k \frac{Q_2}{r^2}$$

Karena jari-jari finial r sama maka perbandingan kuat medan listriknya adalah:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \rightarrow E_1 > E_2$$

Dengan kuat medan listrik E_1 yang lebih besar dari E_2 menyebabkan pembentukan muatan bebas di depan ujung finial lebih cepat sehingga pada akhirnya waktu terjadinya korona lebih cepat pula yang ditandai dengan nilai U_c yang semakin kecil. Oleh karenanya dengan memperlebar jarak sela (s) maka dibutuhkan penambahan tegangan agar timbul korona.

Kemudian pada jarak sela yang sama, terlihat pada Grafik 4.1 yaitu dengan sudut keruncingan yang berbeda akan memberikan nilai tegangan korona yang tidak sama. Apabila sudut α diperbesar maka nilai U_c cenderung semakin meningkat. Hal ini dapat dijelaskan yaitu dengan luas permukaan finial A yang semakin kecil bila sudut keruncingan α diperbesar maka pada jarak sela (s) yang sama menyebabkan kapasitansi C_1 untuk α_1 lebih besar dari C_2 untuk α_2 sehingga diperoleh $C_1 > C_2 > C_3 > C_4$. Bila setiap konfigurasi finial dengan α yang berbeda tersebut diberi tegangan dengan nilai yang sama, maka dengan menyamakan variabel U_1, U_2, U_3 dan U_4 didapatkan:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_4$$

$$\frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_3}{C_3} = \frac{Q_4}{C_4} \rightarrow Q_1 > Q_2 > Q_3 > Q_4$$

Dari hasil akhir persamaan tersebut didapatkan bahwa jumlah muatan listrik Q_1 semakin kecil dengan memperbesar sudut α sehingga dengan

memasukkan variabel Q tersebut ke dalam persamaan 2-10, diperoleh kuat medan listrik E sebagai berikut:

$$E_1 = k \frac{Q_1}{r_1^2}, E_2 = k \frac{Q_2}{r_2^2}, E_3 = k \frac{Q_3}{r_3^2} \text{ dan } E_4 = k \frac{Q_4}{r_4^2}$$

Karena besar pertambahan muatan listrik Q lebih dominan daripada pertambahan nilai jari-jari finial r untuk sudut finial yang semakin runcing atau kecil maka perbandingan kuat medan listriknya adalah:

$$E_1 > E_2 > E_3 > E_4$$

Dengan demikian, kuat medan listrik di ujung finial semakin kecil apabila sudut finial diperbesar sehingga semakin runcing sudut finial maka waktu terjadinya korona lebih cepat atau nilai tegangan korona U_c semakin kecil seperti terlihat pada data hasil pengujian.

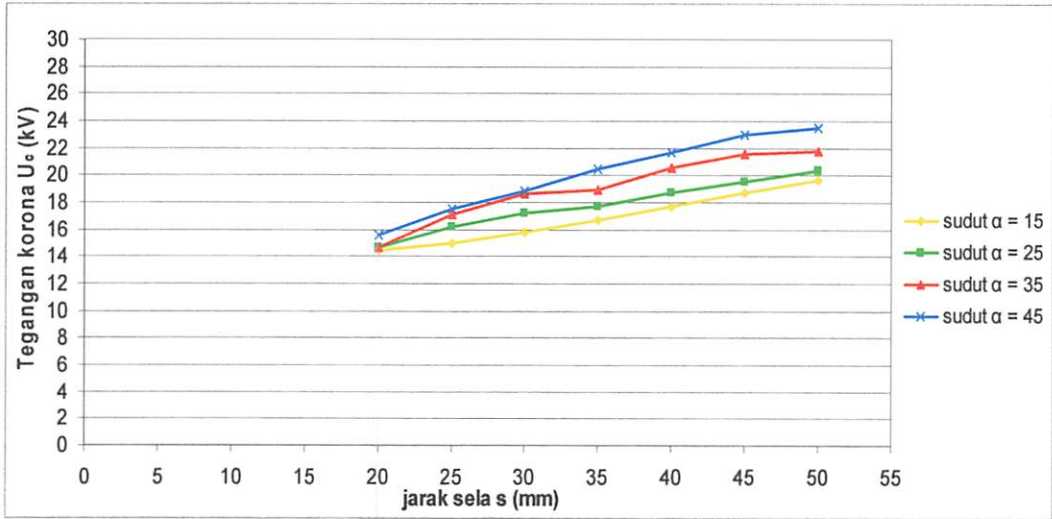
4.1.1.1. Hasil Pengujian untuk Sudut Keruncingan α_n^0 pada Diameter Finial

$D_2 = 4\text{ cm}$

Nilai-nilai tegangan korona U_c untuk berbagai sudut keruncingan finial dengan pengaturan jarak sela (s) untuk diameter yang lebih besar yaitu D_2 diperlihatkan pada Tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2. Data pengukuran tegangan korona untuk berbagai α_n^0 dengan $D_2 = 4\text{ cm}$ pada kondisi kerapatan udara $p = 959\text{ mbar}$, $t = 23^0\text{C}$

jarak sela (mm)	Tegangan korona $\bar{U}_c$ (kV)			
	$\alpha_1 = 15^0$	$\alpha_2 = 25^0$	$\alpha_3 = 35^0$	$\alpha_4 = 45^0$
20	14.43	14.60	14.63	15.57
25	14.97	16.17	17.13	17.50
30	15.73	17.23	18.63	18.77
35	16.67	17.67	18.90	20.43
40	17.67	18.67	20.50	21.63
45	18.73	19.53	21.53	22.97
50	19.67	20.30	21.80	23.50



Grafik 4.2 Tegangan korona $\bar{U}_c$ sebagai fungsi jarak sela s untuk berbagai sudut α_n dengan $D_2 = 4\text{ cm}$

Dari Tabel 4.2 dan grafik 4.2 dapat dilihat bahwa nilai tegangan korona semakin besar apabila jarak sela elektroda diperlebar untuk masing-masing sudut α . Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada susunan antara finial dan awan menghasilkan kapasitansi C yang nilainya berbanding terbalik dengan jarak sela s seperti yang telah disebutkan pada persamaan di subbab sebelumnya. Dari persamaan tersebut, jika nilai s diperbesar menyebabkan nilai kapasitansi yang dihasilkan semakin kecil. Nilai C tersebut juga dapat ditentukan melalui persamaan $C = \frac{Q}{U}$. Dengan memisalkan untuk jarak sela $s = 20$ mm dihasilkan C_1 sedangkan jarak sela $s = 25$ mm dihasilkan C_2 , maka jika diberikan nilai tegangan tinggi DC yang sama maka dengan menyamakan variabel tegangannya diperoleh $Q_1 > Q_2$. Sehingga dengan memasukkan variabel Q tersebut ke dalam persamaan 2-10, diperoleh perbandingan kuat medan listrik $E_1 > E_2$. Perbandingan ini sama seperti pada diameter D_1 sehingga dengan memperbesar diameter finial, nilai kuat medan listrik yang dihasilkan di ujung finial dengan jarak sela yang paling kecil adalah paling besar atau semakin besar jarak sela menyebabkan nilai kuat medan listrik tersebut dan nilai U_c semakin kecil.

Kemudian berdasarkan data hasil pengujian pada Tabel 4.2 juga dapat diamati bahwa dengan sudut keruncingan finial yang semakin besar, maka pada jarak sela yang sama didapatkan hasil pengukuran tegangan korona yang semakin besar nilainya. Dengan sudut finial yang semakin besar menyebabkan luas permukaan finial A yang semakin kecil. Sehingga sesuai dengan penjelasan pada subbab sebelumnya, didapatkan perbandingan kuat medan listrik $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ dan α_4 berturut-turut $E_1 > E_2 > E_3 > E_4$. Oleh karenanya dengan penambahan diameter D_2

maka tetap dihasilkan kuat medan listrik di ujung finial yang semakin kecil apabila sudut finial diperbesar sehingga nilai tegangan korona U_c semakin besar seperti terlihat pada data hasil pengujian.

4.1.2. Pengujian Tegangan Tembus

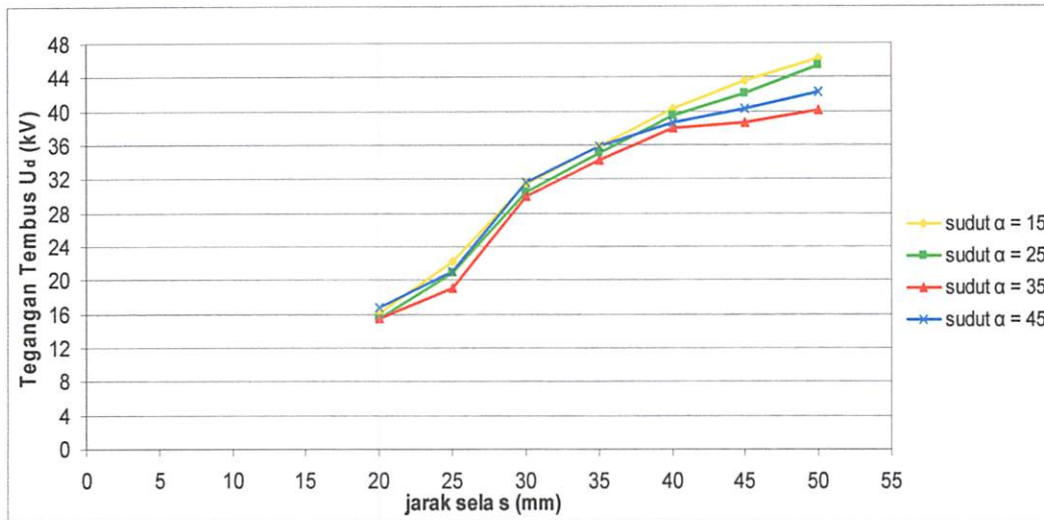
4.1.2.1. Hasil Pengujian untuk Sudut Keruncingan α_n^0 pada Diameter Finial

$D_1 = 2\text{ cm}$

Berdasarkan Tabel 4.3 dan Gambar 4.3 di bawah, terlihat bahwa untuk setiap sudut keruncingan maka nilai tegangan tembus yang terjadi akan meningkat apabila jarak sela (s) diperlebar. Syarat untuk terjadinya tembus ialah dibutuhkannya sebuah elektron bebas di dalam daerah sela dan itu ditandai dengan kemunculan korona pada ujung finial petir.

Tabel 4.3. Data pengukuran tegangan tembus untuk berbagai α_n^0 dengan $D_1 = 2\text{ cm}$ pada kondisi kerapatan udara $p = 959\text{ mbar}$, $t = 23^{\circ}\text{C}$

jarak sela (mm)	Tegangan tembus $\bar{U}_d$ (kV)			
	$\alpha_1 = 15^0$	$\alpha_2 = 25^0$	$\alpha_3 = 35^0$	$\alpha_4 = 45^0$
20	16.03	15.50	15.47	16.70
25	22.13	20.80	19.00	21.00
30	31.33	30.40	29.97	31.50
35	35.83	34.93	34.20	35.90
40	40.23	39.40	38.03	38.70
45	43.60	42.13	38.63	40.20
50	46.13	45.37	40.07	42.20



Grafik 4.3 Tegangan tembus $\bar{U}_d$ sebagai fungsi jarak sela (s) untuk berbagai sudut α_n dengan $D_1 = 2$ cm

Dengan mengacu pada persamaan 2-14, parameter jarak sela sangat mempengaruhi besarnya tegangan tembus. Dari persamaan tersebut terlihat bahwa apabila jarak sela diperbesar maka nilai tegangan tembus akan meningkat pula. Ini artinya proses *breakdown* pada isolasi lebih lama. Mekanisme tembus pada daerah sela elektroda finial dan awan dengan jarak sela yang berbeda dapat dijelaskan yaitu diawali dengan terbentuknya elektron bebas pada pelat awan yang akan menimbulkan *spark breakdown*. *Avalanche* tunggal tersebut nantinya akan menyebabkan proses ionisasi tumbukan di daerah dekat ujung elektroda. Dengan menaikkan nilai tegangan maka kuat medan listrik pada sela elektroda akan semakin besar.

Akibatnya timbul banjir elektron dan ion positif dalam daerah sela yang disebut mekanisme primer. Banjir elektron dan ion positif ini akan

menyebabkan distorsi medan listrik pada sela elektroda dan menimbulkan fotoionisasi sehingga jumlah muatan ruang semakin besar. Akibatnya, kuat medan listrik berubah pula. Bila kekuatan dielektrik udara pada sela elektroda terlampaui maka bergantung jarak sela, semakin lebar jarak sela s maka jumlah muatan ruang yang diperlukan semakin banyak untuk dapat menjembatani peluahan muatan antara finial dengan awan yang ditandai dengan munculnya petir pada saat pengujian. Ini artinya diperlukan penambahan nilai tegangan tembus U_d untuk jarak sela yang semakin besar seperti terlihat pada data hasil pengujian.

Dari Grafik 4.3 juga dapat diamati pula bahwa untuk kenaikan sudut α dengan jarak sela yang sama maka bila dibandingkan, nilai tegangan tembus akan mengecil namun kembali meningkat pada saat sudut $\alpha_4 = 45^\circ$. Pada data tersebut, ternyata sudut 15° sebagai sudut finial paling runcing memberikan nilai tegangan tembus lebih tinggi kemudian diikuti oleh sudut $\alpha_2 = 25^\circ$ dan $\alpha_4 = 45^\circ$. Sedangkan sudut $\alpha_3 = 35^\circ$ justru memiliki nilai tegangan tembus yang paling rendah daripada sudut yang lainnya.

Hal tersebut dapat dijelaskan bahwa menurut hukum Schwaiger nilai tegangan tembus pada sela elektroda sangat ditentukan oleh bentuk distribusi medan listriknya yaitu bila distribusi medan listrik homogen akan memberikan nilai tegangan tembus yang lebih besar daripada distribusi medan listrik non-homogen. Sedangkan distribusi medan listrik sendiri akan dipengaruhi oleh bentuk geometris elektroda. Pada skripsi ini, meskipun bentuk geometris objek uji finial adalah sama yaitu runcing namun dengan adanya perbedaan sudut

keruncingan maka jelas menyebabkan konfigurasi elektroda objek uji dengan elektroda pelat awan berbeda pula.

Oleh karena itu dengan melihat data pengujian maka konfigurasi objek uji finial sudut α 35° dengan pelat awan akan memberikan bentuk distribusi medan listrik lebih non-homogen ketimbang sudut 15° , 25° , dan 45° . Justru konfigurasi objek uji dengan sudut paling runcing 15° dan pelat awan yang memberikan distribusi medan listrik lebih homogen daripada konfigurasi sudut lainnya. Ini artinya distorsi medan listrik pada konfigurasi objek finial sudut 35° dan awan paling besar sedangkan distorsi medan listrik untuk konfigurasi objek finial sudut 15° dan awan paling kecil.

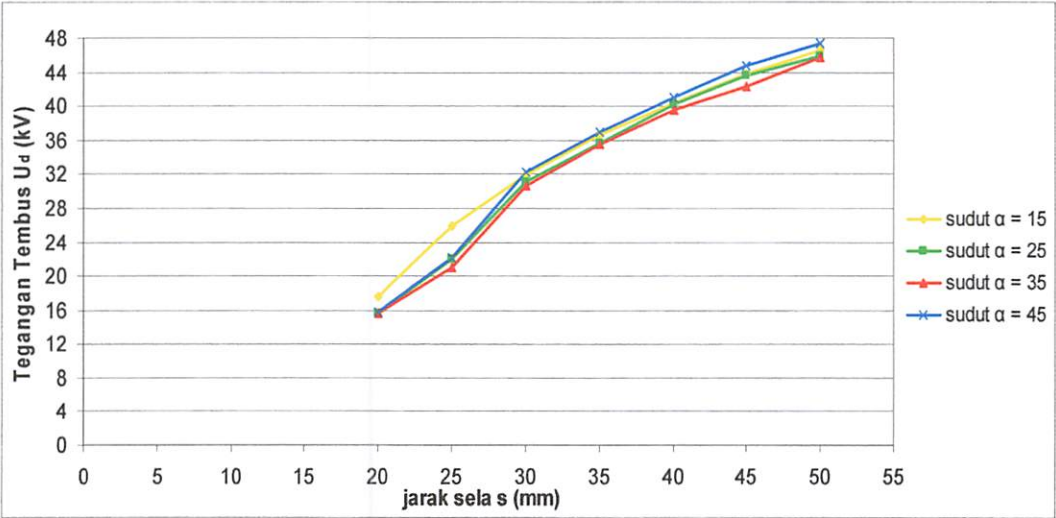
Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya pada bab 2, bentuk distribusi medan listrik pada konfigurasi elektroda pengujian akan menentukan nilai efisiensi medan listriknya. Dengan mengacu pada persamaan 2-14, tegangan tembus nilainya sebanding dengan efisiensi medan listrik η . Semakin kecil nilai tegangan tembus maka efisiensi medan listrik semakin kecil pula. Dengan demikian pada konfigurasi objek finial sudut 35° dan pelat awan akan memberikan nilai efisiensi medan listrik yang paling kecil sedangkan konfigurasi objek finial sudut 15° dan pelat awan akan memberikan nilai efisiensi medan listrik yang paling besar. Jadi meskipun korona atau tembus parsial lebih cepat terjadi pada objek finial sudut 15° dan 25° bukan berarti tembus listrik akan lebih cepat pula karena terjadinya tembus dipengaruhi oleh bentuk geometris dan konfigurasi elektroda. Nilai tegangan tembus yang lebih kecil menandakan proses terjadinya *breakdown* memerlukan waktu yang lebih singkat.

4.1.2.2. Hasil Pengujian untuk Sudut Keruncingan α_n^0 pada Diameter Finial $D_2 = 4\text{ cm}$

Pada pengujian dengan diameter D_2 didapatkan bahwa tegangan tembus U_d pada setiap sudut keruncingan α akan meningkat bila jarak sela elektroda diperlebar seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 di bawah ini.

Tabel 4.4. Data pengukuran tegangan tembus untuk berbagai α_n^0 dengan $D_2 = 4\text{ cm}$ pada kondisi kerapatan udara $p = 959\text{ mbar}$, $t = 23^0\text{C}$

jarak sela (mm)	Tegangan tembus $\bar{U}_d$ (kV)			
	$\alpha_1 = 15^0$	$\alpha_2 = 25^0$	$\alpha_3 = 35^0$	$\alpha_4 = 45^0$
20	17.57	15.70	15.67	15.83
25	25.80	21.90	21.00	22.07
30	31.83	31.07	30.60	32.20
35	36.53	35.67	35.47	36.87
40	40.37	40.27	39.60	40.97
45	43.83	43.60	42.37	44.70
50	46.47	45.93	45.80	47.40



Grafik 4.4 tegangan tembus $\bar{U}_d$ sebagai fungsi jarak sela (s) untuk berbagai sudut α_n dengan $D_2 = 4\text{ cm}$

Perlakuan ini sama dengan yang terjadi pada diameter finial $D_1 = 2$ cm. Pada subbab sebelumnya sudah dijelaskan bahwa nilai tegangan tembus berbanding lurus dengan besar variabel jarak sela seperti yang tertulis pada persamaan 2-14. Dengan memperlebar jarak sela maka jalur peluahan muatan dari katoda ke anoda dan sebaliknya dalam daerah dielektrik udara akan semakin panjang sehingga diperlukan lebih banyak muatan ruang agar terbentuk plasma streamer. Pembentukan muatan bebas pada sela finial dan pelat awan sangat dipengaruhi oleh kuat dan distribusi medan listriknya. Dengan demikian, diperlukan kuat medan tembus E_d sesuai dengan persamaan 2-14 yang lebih besar lagi sehingga kekuatan dielektrik isolasi udara pada jarak sela tersebut terlampaui. Cara tersebut dapat dicapai dengan cara menaikkan nilai tegangan yang diberikan pada rangkaian pengujian. Sehingga apabila jarak sela diperlebar maka tembus yang diamati dalam fenomena sambaran petir pada saat pengujian akan membutuhkan waktu yang lebih lama.

Kemudian jika diamati lagi grafik 4.4, maka terlihat bahwa pada jarak sela yang sama nilai tegangan tembus untuk setiap sudut keruncingan α tidak sama. Tegangan tembus pada sudut finial 15° nilainya selalu lebih besar dari sudut finial 25° . Sedangkan bila sudut diperbesar lagi justru tegangan tembus U_d untuk $\alpha = 35^\circ$ menjadi lebih kecil dan untuk sudut 45° tegangan tembus kembali lebih besar dari sudut 35° dan sebelumnya. Pada data pengujian, U_d terkecil diperoleh pada sudut finial $\alpha_3 = 35^\circ$ sedangkan U_d terbesar cenderung diperoleh pada sudut $\alpha_4 = 45^\circ$. Sudut finial terkecil yaitu $\alpha_1 = 15^\circ$ nilai tegangan tembusnya di atas U_d sudut $\alpha_2 = 25^\circ$. Hasil ini tidak jauh berbeda dengan diameter finial $D_1 = 2$ cm yaitu

tegangan tembus U_d terkecil selalu diperoleh pada sudut keruncingan finial $\alpha_3 = 35^\circ$ meskipun nilai U_d tersebut selisihnya lebih kecil dengan sudut lainnya dibandingkan dengan D_1 . Perbedaan U_d tersebut telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya bahwa dengan sudut keruncingan yang berbeda maka menyebabkan konfigurasi dari elektroda finial dengan pelat awan tidak sama. Sedangkan tegangan tembus U_d dipengaruhi bentuk distribusi medan listrik dan distribusi medan listrik tersebut sangat dipengaruhi geometris dan konfigurasi elektroda. Sehingga pada hasil pengujian terlihat pada sudut finial 15° , 25° dan 45° memberikan distribusi yang lebih seragam ketimbang sudut 35° . Semakin tidak seragam distribusi medan listrik maka efisiensi medan listrik η semakin kecil dan sesuai persamaan 2-14 nilai U_d 35° paling kecil.

4.2. Hasil Perhitungan Kuat Medan Listrik Rata-Rata

4.2.1. Hasil Perhitungan untuk Sudut Keruncingan α_n° pada Diameter Finial

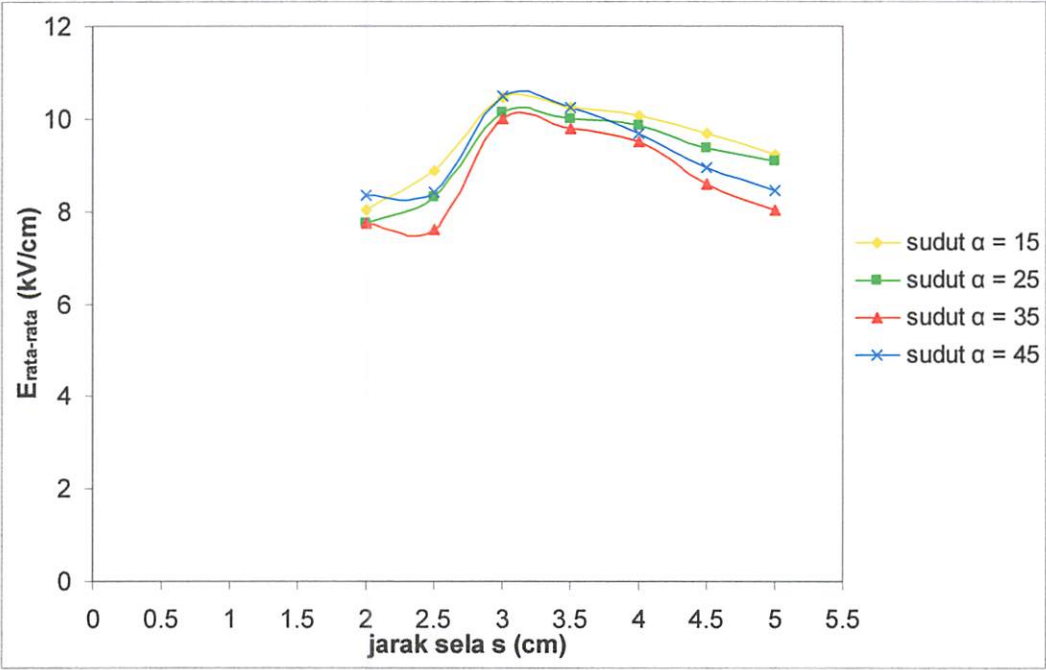
$$D_1 = 2 \text{ cm}$$

Berikut ditampilkan tabel $E_{\text{rata-rata}}$ untuk pengujian finial ini yang penentuan nilainya secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{\overline{U_d}}{s} \quad (4-1)$$

Tabel 4.5. Nilai $E_{rata-rata}$ untuk berbagai α_n^0 pada $D_1 = 2\text{ cm}$

jarak sela (cm)	$E_{rata-rata}$ (kV/cm)			
	$\alpha_1 = 15^0$	$\alpha_2 = 25^0$	$\alpha_3 = 35^0$	$\alpha_4 = 45^0$
2	8.02	7.75	7.73	8.35
2.5	8.85	8.32	7.60	8.40
3	10.44	10.13	9.99	10.50
3.5	10.24	9.98	9.77	10.26
4	10.06	9.85	9.51	9.68
4.5	9.69	9.36	8.59	8.93
5	9.23	9.07	8.01	8.44



Grafik 4.5 Kuat medan rata-rata $E_{rata-rata}$ sebagai fungsi jarak sela (s)
untuk berbagai sudut α_n dengan $D_1 = 2\text{ cm}$

Dari persamaan 4-1 dengan melihat Tabel 4.3 maka diperoleh nilai $E_{rata-rata}$ terkecil pada saat sudut keruncingan finial $\alpha = 35^0$ untuk setiap jarak sela seperti yang terlihat pada Tabel 4.5. Nilai Intensitas medan listrik rata-rata yang lebih besar pada daerah sela finial-pelat awan untuk sudut finial selain 35^0 bukan berarti proses pembentukan muatan ruangnya semakin cepat. Hal ini dikarenakan gaya elektrostatik yang dialami setiap muatan ruang tersebut merupakan resultan dari kuat medan listrik tiap titik dikalikan dengan muatan ruang tersebut seperti tertulis pada persamaan 2-8. Gaya tersebut akan memberikan tambahan energi kinetik dan energi ionisasi muatan.

Kuat medan listrik pada setiap titik tidak sama dengan kuat medan listrik rata-ratanya karena distribusi medan listrik yang terbentuk pada konfigurasi finial dan pelat awan ialah distribusi medan listrik non-homogen sehingga nantinya nilai kuat medan listrik di setiap titik pada jarak sela s tidak sama. Kuat medan listrik rata-rata merupakan rata-rata kuat medan listrik setiap titik pada jarak sela s . Dengan demikian, seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa tembus sangat dipengaruhi oleh distribusi medan listriknya sehingga pada bentuk distribusi medan listrik yang lebih homogen pada sudut selain 35^0 akan memberikan kuat medan listrik rata-rata yang lebih besar dan menyebabkan waktu tembusnya semakin lama.

Dari grafik 4.5 terlihat bahwa pengaruh jarak sela memberikan kurva tak linier pada $E_{rata-rata}$ nya yaitu nilainya cenderung naik dari $s = 2$ cm lalu mencapai nilai maksimum pada saat jarak sela 3 cm kemudian nilainya kembali mengecil. Hal ini menandakan bahwa nilai pertambahan U_d akan semakin besar dari $s = 2$

cm hingga dicapai nilai $\Delta \bar{U}_d$ maksimum pada $s = 3$ cm dan pertambahannya lebih kecil setelah itu.

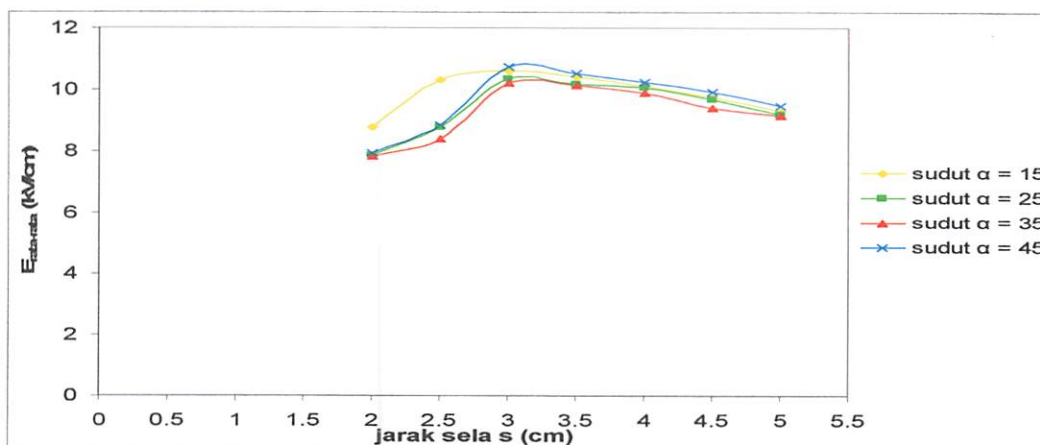
4.2.2. Hasil Perhitungan untuk Sudut Keruncingan α_n^0 pada Diameter Finial

$$D_2 = 4 \text{ cm}$$

Dari Tabel 4.6 dan Grafik 4.6 terlihat bentuk kurva tak linier $E_{\text{rata-rata}}$ mempunyai pola yang sama dengan diameter finial $D_1 = 2$ cm yaitu $E_{\text{rata-rata}}$ pada sudut finial 35° akan memberikan nilai yang terkecil dibanding sudut finial lainnya dan nilai $E_{\text{rata-rata}}$ setiap sudut finial mencapai maksimum pada $s = 3$ cm.

Tabel 4.6. Nilai $E_{\text{rata-rata}}$ untuk berbagai α_n^0 pada $D_2 = 4$ cm

jarak sela (cm)	$E_{\text{rata-rata}}$ (kV/cm)			
	$\alpha_1 = 15^\circ$	$\alpha_2 = 25^\circ$	$\alpha_3 = 35^\circ$	$\alpha_4 = 45^\circ$
2	8.78	7.85	7.83	7.92
2.5	10.32	8.76	8.4	8.83
3	10.61	10.36	10.2	10.73
3.5	10.44	10.19	10.13	10.53
4	10.09	10.07	9.9	10.24
4.5	9.74	9.69	9.41	9.93
5	9.29	9.19	9.16	9.48



Grafik 4.6 Kuat medan rata-rata $E_{\text{rata-rata}}$ sebagai fungsi jarak sela (s) untuk berbagai sudut α_n dengan $D_2 = 4$ cm

Bila kita bandingkan nilai $E_{rata-rata}$ pada D_1 dan D_2 , maka akan didapatkan bahwa pada sudut yang sama, nilai $E_{rata-rata}$ D_1 lebih kecil dari D_2 . Sehingga berdasarkan penjelasan subbab sebelumnya, diketahui bahwa dengan nilai $E_{rata-rata}$ yang lebih kecil menyebabkan distribusi medan listrik akan semakin non-homogen yang berakibat semakin kecilnya nilai efisiensi medan listrik. Dengan demikian waktu tembus yang diperlukan pada konfigurasi finial-pelat awan dengan D_1 lebih cepat dibandingkan dengan D_2 atau dengan kata lain kemampuan tersambar petir pada objek uji finial D_1 lebih baik daripada objek uji finial D_2 .

4.3. Pemetaan Medan Listrik Menggunakan Metode Kertas Konduktif

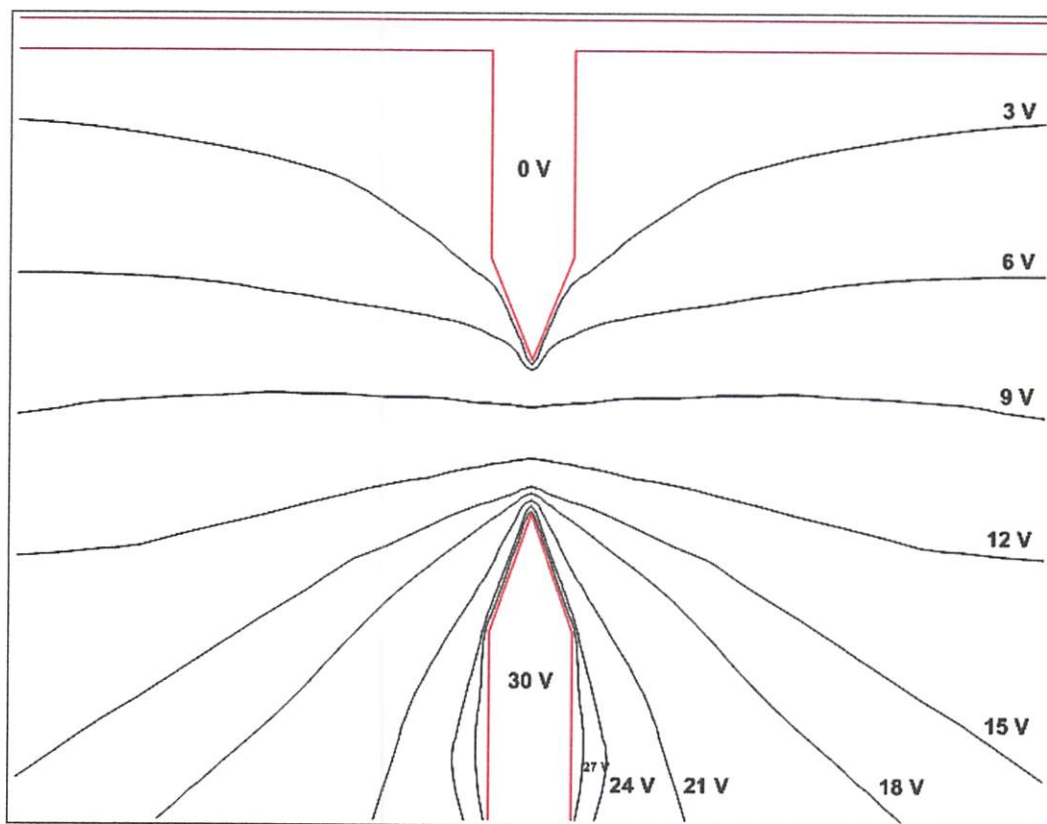
Selain parameter tegangan korona dan tembus, pada skripsi ini akan dilakukan pula penentuan parameter medan listrik untuk setiap konfigurasi objek uji. Parameter medan listrik tersebut yaitu secara garis besar meliputi penggambaran distribusi medan listrik dua dimensi dan perhitungan efisiensi medan listrik η . Metode pemetaan eksperimental menggunakan media kertas konduktif merupakan metode yang biasa dipakai dalam penggambaran tersebut melalui pertolongan garis ekipotensial. Berdasarkan hukum Schwaiger, bahwa dengan menentukan bentuk distribusi medan listrik pada setiap konfigurasi objek uji finial maka nantinya dapat menjelaskan perbedaan nilai hasil pengujian tegangan korona dan tembus.

Pada pengujian ini, analisis data cukup dilakukan dengan menampilkan gambar bentuk distribusi garis ekipotensial saja karena hal tersebut sudah dapat mewakili distribusi medan listriknya dan perhitungan nilai efisiensi medan listrik

juga bisa dilakukan. Penggambaran distribusi garis ekipotensial pada konfigurasi finial dan pelat awan dilakukan dengan memilih jarak sela yang telah ditetapkan sebelumnya yaitu $s = 5 \text{ cm}$

4.3.1.1 Pemetaan Medan Listrik untuk Diameter Finial $D_1 = 2 \text{ cm}$ untuk Sudut Keruncingan Finial $\alpha_1 = 15^\circ$

. Setelah menyusun rangkaian pengujian seperti pada Gambar 3.5, maka didapatkan bentuk distribusi garis-garis ekipotensial untuk setiap objek uji seperti yang dijelaskan pada subbab berikut ini. Dengan mengikuti tata urutan pengujian seperti yang telah dijelaskan pada bab 3, maka hasil penggambaran distribusi garis ekipotensialnya dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.1. Distribusi garis ekipotensial dengan interval 3 V untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dan $D_1 = 2 \text{ cm}$

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa jarak antar garis ekipotensial tidaklah sama. Pada daerah yang paling dekat dengan permukaan elektroda baik elektroda bawah yaitu finial maupun elektroda atas yaitu awan, akan menghasilkan bentuk garis ekipotensial yang paling mengikuti alur permukaan elektroda tersebut. Dari gambar di atas terlihat pula, nilai potensial U yang terukur lebih dekat dengan permukaan elektroda semisal 27 V dengan 24 V pada finial dan 3 V dengan 6 V pada awan, akan menghasilkan garis-garis ekipotensial dengan jarak pemisah yang lebih rapat atau kecil. Sedangkan pada tengah-tengah daerah sela yaitu antara garis ekipotensial 6 V, 9 V, 12 V dan 15 V memberikan jarak Δx yang lebih renggang atau lebar.

Dengan demikian, semakin dekat dengan permukaan elektroda finial maupun awan menyebabkan bentuk garis-garis ekipotensial lebih menyerupai kontur permukaan elektroda dan jarak antara dua garis ekipotensial yang berdekatan tersebut Δx semakin kecil. Karena adanya perbedaan Δx tersebut maka menyebabkan kuat medan listrik di setiap titik pada daerah sela finial $\alpha_1 = 15^\circ$ dan pelat awan tidak sama. Hal ini sesuai dengan persamaan 2-11 bahwa pada interval garis ekipotensial yang dibuat sama 3 V, maka dengan mengubah nilai Δx otomatis nilai E akan berubah pula. Untuk lebih jelasnya, berikut ini ditampilkan berupa tabel perhitungan nilai kuat medan listrik pada konfigurasi finial 15° dengan jarak sela 5 cm berdasarkan Gambar 4.1 dan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_k = \frac{\Delta U_k}{\Delta x_k} \quad (4-2)$$

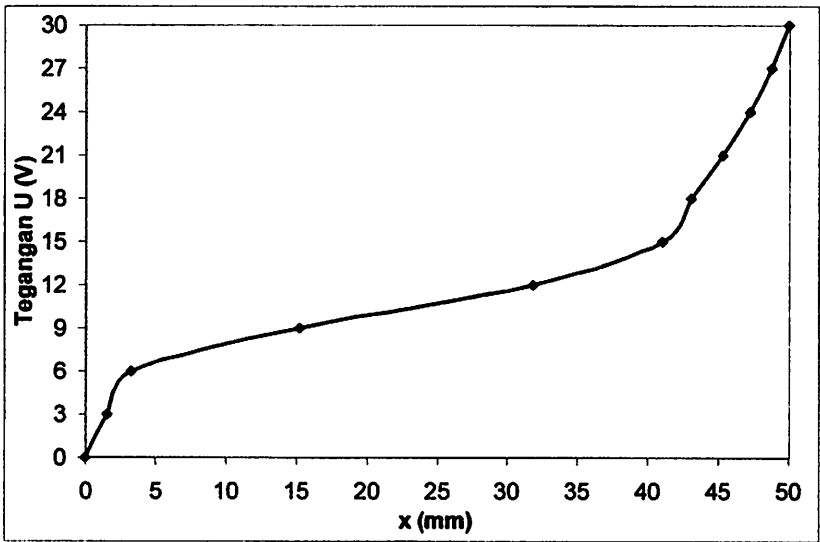
keterangan:

- E_k = kuat medan listrik pada segmen k (V/mm)
- k = segmen ke-1, 2, 3,..., 10
- ΔU_k = interval tegangan antar garis ekipotensial yaitu 3 V
- Δx_k = jarak antar garis ekipotensial yang berdekatan melalui sela udara (mm)

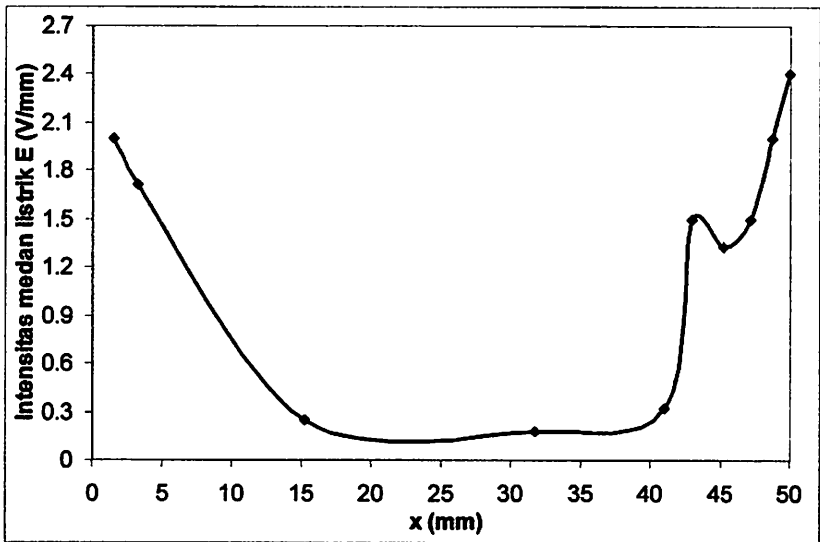
Tabel 4.7. Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_1 = 15^0$, $D_1 = 2$ cm

k	Interval tegangan pada sela udara	ΔU (V)	Δx (mm)	E (V/mm)
1	3 V - 0 V	3	1.5	2
2	6 V - 3 V	3	1.75	1.71
3	9 V - 6 V	3	12	0.25
4	12 V - 9 V	3	16.5	0.18
5	15 V - 12 V	3	9.25	0.32
6	18 V - 15 V	3	2	1.5
7	21 V - 18 V	3	2.25	1.33
8	24 V - 21 V	3	2	1.5
9	27 V - 24 V	3	1.5	2
10	30 V - 27 V	3	1.25	2.4

Dengan menggunakan Gambar 4.1 dan Tabel 4.7, maka dapat dibuat grafik distribusi tegangan dan juga grafik distribusi intensitas medan listrik di sepanjang lintasan sela udara antara elektroda finial 15^0 dan pelat awan seperti ditunjukkan pada gambar-gambar berikut ini.



Grafik 4.7. Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_1 = 15^0$ dan $D_1 = 2$ cm



Grafik 4.8. Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_1 = 15^0$ dan $D_1 = 2$ cm

Berdasarkan grafik 4.7 menunjukkan peningkatan nilai Δx pada interval tegangan yang sama yaitu 3 V tidak linier. Interval U antara 6 V – 9 V, 9 V – 12

V, dan 12 V – 15 V memiliki selisih jarak yang lebih besar dari lainnya diakibatkan kuat medan listrik E yang dihasilkan pada interval U tersebut lebih kecil. Karena nilai U sebanding dengan E dan x, maka dengan memperkecil nilai kuat medan listriknya akan menghasilkan pertambahan x yang lebih besar. Dari Tabel 4.7 dan Grafik 4.8 diketahui bahwa kurva distribusi intensitas medan listrik yang terjadi pada daerah sela udara tersebut mempunyai nilai yang tinggi pada jarak sela mendekati nol dan 5 cm. Nilai kuat medan listrik yang sangat besar dihasilkan di daerah dekat ujung elektroda yaitu 2.4 V/mm pada ujung finial sebagai kuat medan maksimum pada konfigurasi finial 15⁰ dengan U = 30 V dan 2 V/mm di depan pelat awan (U = 0 V). Sedangkan pada daerah yang semakin jauh dari permukaan elektroda akan menghasilkan kuat medan listrik yang semakin kecil nilainya.

Nilai yang tidak sama di setiap titik tersebut dipengaruhi oleh bentuk geometris elektroda yang tidak sama. Karena ujung finial 15⁰ memiliki radius keruncingan yang paling kecil maka nilai kuat medan listrik maksimum timbul pada $x \approx 5$ cm dan akan terjadi penumpukan muatan bebas ion positif di depan finial sehingga korona positif muncul. Dengan terbentuknya muatan ruang awal dalam jumlah besar di depan ujung elektroda finial maupun awan tersebut memulai terjadinya distorsi terhadap kuat medan listrik sebelum adanya muatan ruang. Berdasarkan gambar 4.1 dan grafik 4.8, distorsi menyebabkan pembentukan muatan ruang pada jarak $x = 15.25$ mm hingga kira-kira 41 mm lebih lamban sehingga menyebabkan nilai E semakin turun atau kecil. Pada akhirnya saat telah muncul muatan ruang bebas yang menyebar di seluruh daerah

sela, menyebabkan distribusi garis ekipotensialnya yang ditandai dengan jarak antar garis ekipotensial yang tidak sama menjadi tak seragam sehingga distribusi medan listriknya non-homogen pula.

Sejauh mana seragam atau tidaknya distribusi medan listrik pada konfigurasi finial 15° , dapat dilihat dari nilai η . Nilai intensitas medan listrik rata-rata aproksimasi pada $s = 5$ cm dalam pengujian ini adalah:

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{\sum_{k=1}^{10} E_k}{10} \quad (4-3)$$

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{2 + 1.71 + 0.25 + 0.18 + 0.32 + 1.5 + 1.33 + 1.5 + 2 + 2.4}{10}$$

$$= 1.32 \text{ V/mm}$$

Dengan mengacu pada persamaan 2-12, maka nilai efisiensi medan listrik η pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan $D_1 = 2$ cm dan pelat awan ialah:

$$\eta (\%) = \frac{1.32}{2.4} \times 100\% = 55.02\%$$

Terlihat bahwa dengan nilai efisiensi sebesar 0.5502 yang berarti lebih kecil dari 1 menyebabkan distribusi medan listriknya jelas non-homogen. Dengan melihat kembali nilai tegangan tembus U_d finial $\alpha_1 = 15^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm untuk $s = 5$ cm pada Tabel 4.3, maka besar kuat medan tembus E_d pada konfigurasi ini dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2-14 yaitu:

$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} = \frac{46.13}{5 \times 0.5502} = 16.768 \text{ kV/cm}$$

Karena nilai tegangan tembus U_d pada konfigurasi ini sebesar 46.13 kV maka nilai tegangan ini harus sebanding dengan $U = 30$ V pada pengujian

pemetaan distribusi medan listrik ini, sehingga tegangan $U = 27 \text{ V}$ harus sebanding dengan:

$$\frac{27V}{30V} \times 46.13 \text{ kV} = 41.52 \text{ kV}$$

Dengan demikian, pada tegangan 46.13 kV interval tegangan antara dua garis ekipotensial adalah sebesar:

$$\Delta U = 46.13 \text{ kV} - 41.52 \text{ kV} = 4.61 \text{ kV}$$

Nilai ΔU di antara dua garis ekipotensial pada level tegangan 46.13 kV ini berlaku pada semua segmen k. Oleh karena itu, nilai kuat medan maksimum sebenarnya pada konfigurasi objek uji ini untuk level tegangan 46.13 kV adalah:

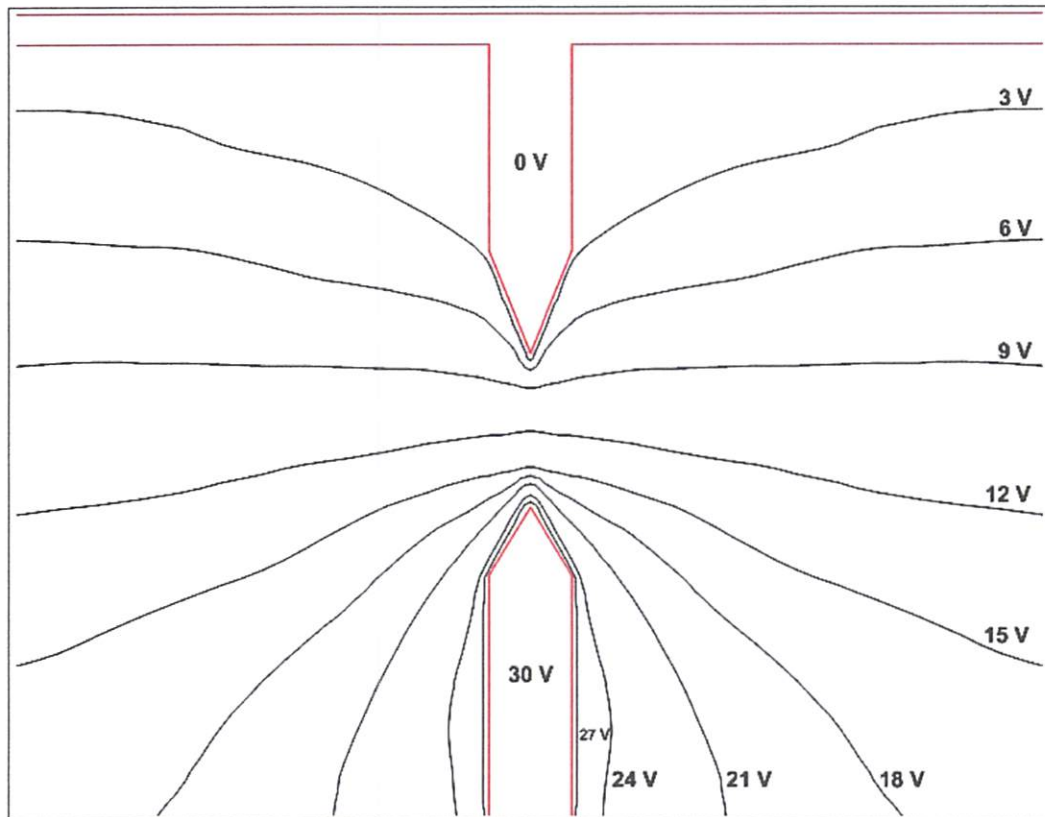
$$E_{\text{maks}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{min}}} = \frac{4.61 \text{ kV}}{0.125 \text{ cm}} = 36.904 \text{ kV/cm}$$

Sedangkan nilai kuat medan minimum sebenarnya pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan $D_1 = 2 \text{ cm}$ dan pelat awan untuk level tegangan tembus 46.13 kV adalah:

$$E_{\text{min}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{maks}}} = \frac{4.61 \text{ kV}}{1.65 \text{ cm}} = 2.796 \text{ kV/cm}$$

4.3.1.2 Untuk Sudut Keruncingan Finial $\alpha_2 = 25^\circ$

Hasil penggambaran distribusi garis ekipotensial pada konfigurasi objek finial $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan $D_1 = 2$ cm dan pelat awan dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.2. Distribusi garis ekipotensial dengan interval 3 V untuk

$$\alpha_2 = 25^\circ \text{ dan } D_1 = 2 \text{ cm}$$

Dari Gambar 4.2 terlihat bahwa kerapatan atau jarak antara garis ekipotensial yang berdekatan tidak sama. Semakin ke tengah atau menjauhi permukaan elektroda maka Δx semakin besar. Garis ekipotensial yang terbentuk pada gambar tersebut selalu mengikuti alur permukaan elektroda terdekatnya. Bila

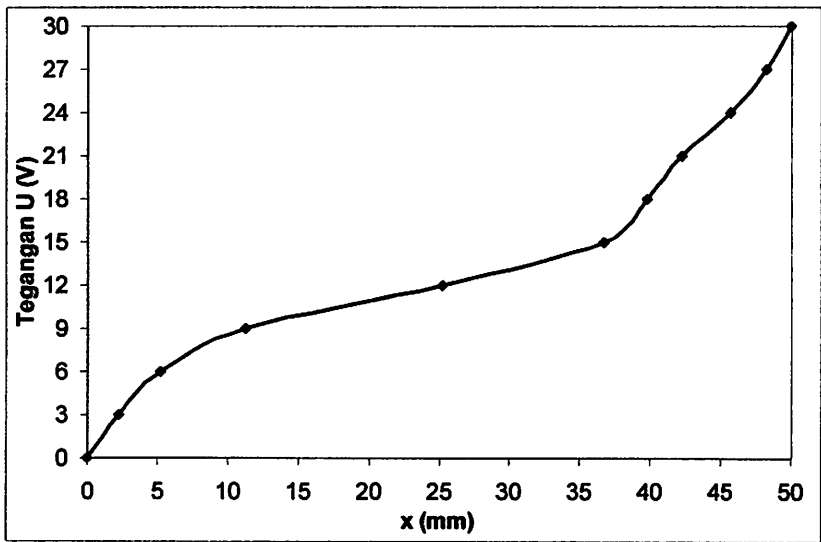
dibandingkan dengan distribusi garis ekipotensial pada $\alpha_1 = 15^0$ maka terlihat adanya perbedaan yaitu selisih jarak Δx garis ekipotensial 27 V dengan elektroda finial $\alpha_2 = 25^0$ lebih besar. Akibatnya sesuai dengan persamaan 2-11, nilai kuat medan listrik E di depan ujung runcing finial 25^0 lebih kecil dari finial 15^0 sehingga waktu terjadinya korona lebih lama yang ditandai dengan nilai tegangan korona yang lebih besar seperti yang terlihat pada Tabel 4.1. Secara keseluruhan bentuk distribusi garis ekipotensial pada gambar di atas ialah non-homogen sehingga dihasilkan distribusi medan listrik yang tidak seragam.

Untuk menganalisis lebih lanjut gambar tersebut, berikut ditampilkan tabel nilai kuat medan listrik pada konfigurasi finial 25^0 dengan jarak sela 5 cm yang menggunakan persamaan 4-2.

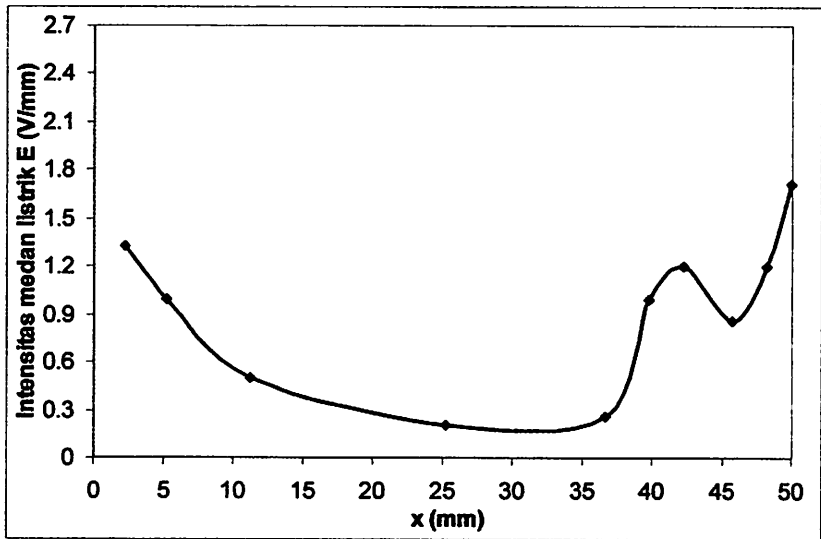
Tabel 4.8. Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_2 = 25^0$, $D_1 = 2$ cm

k	Interval tegangan pada sela udara	ΔU (V)	Δx (mm)	E (V/mm)
1	3 V – 0 V	3	2.25	1.33
2	6 V - 3 V	3	3	1
3	9 V - 6 V	3	6	0.5
4	12 V - 9 V	3	14	0.21
5	15 V - 12 V	3	11.5	0.26
6	18 V - 15 V	3	3	1
7	21 V - 18 V	3	2.5	1.2
8	24 V - 21 V	3	3.5	0.86
9	27 V - 24 V	3	2.5	1.2
10	30 V - 27 V	3	1.75	1.71

Dengan menggunakan Tabel 4.8 dan Gambar 4.2 maka dapat dibuat grafik distribusi tegangan dan intensitas medan listrik sepanjang jarak sela tersebut seperti yang terlihat pada gambar berikut ini.



Grafik 4.9. Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_2 = 25^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm



Grafik 4.10. Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_2 = 25^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm

Pada grafik 4.9 terlihat bahwa peningkatan interval tegangan sebesar 3 V akan menghasilkan interval kenaikan x yang tak linier. Sama seperti pada sudut 15^0 , bahwa pada interval tegangan 6 V, 9 V, 12 V, dan 15 V akan menghasilkan Δx yang lebih besar sehingga garis-garis ekipotensial pada nilai tegangan tersebut semakin jauh jaraknya. Kemudian dari Tabel 4.8 dan grafik 4.10 diketahui bahwa kuat medan listrik yang besar dihasilkan tepat di ujung elektroda yaitu 1.71 V/mm sebagai kuat medan maksimum pada ujung elektroda finial dan 1.33 V/mm pada ujung elektroda pelat awan. Sedangkan kuat medan listrik minimumnya terjadi pada $U = 12$ V sebesar 0.21 V/mm.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, nilai E yang berbeda-beda tersebut dipengaruhi oleh bentuk geometris elektroda finial dan pelat awan yang tidak sama. Karena timbulnya muatan ruang pada daerah sela selama proses menuju terjadinya tembus, maka hal tersebut akan mempengaruhi bentuk distribusi medan listriknya atau terjadi distorsi medan listrik. Perbedaan jumlah muatan ruang di setiap titik pada daerah sela menyebabkan nilai E yang dihasilkan tidak sama sehingga menyebabkan resultan penjumlahan vektor E di setiap titik berbeda pula. Berdasarkan Gambar 4.10 menunjukkan pembentukan muatan bebas pada daerah sela $x = 11.25$ mm hingga 36.75 mm yang sangat lama dan jumlah yang sedikit menghasilkan nilai E sangat kecil.

Nilai intensitas medan listrik rata-rata aproksimasi pada $s = 5$ cm dalam pengujian finial ini adalah:

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{1.33 + 1 + 0.5 + 0.21 + 0.26 + 1 + 1.2 + 0.86 + 1.2 + 1.71}{10}$$

$$= 0.93 \text{ V/mm}$$

Dengan mengacu pada persamaan 2-12, maka nilai efisiensi medan listrik η pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan $D_1 = 2$ cm dan pelat awan ialah:

$$\eta (\%) = \frac{0.93}{1.71} \times 100\% = 54.13\%$$

Nilai efisiensi ini dibandingkan dengan sudut finial 15° lebih kecil sehingga menyebabkan distribusi medan listriknya lebih non-homogen dan akibatnya bila dilihat dari nilai tegangan tembusnya semakin kecil sehingga waktu tembus pada konfigurasi finial 25° lebih cepat daripada finial 15° . Dengan melihat kembali nilai tegangan tembus U_d finial $\alpha_2 = 25^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm untuk $s = 5$ cm pada Tabel 4.3, maka besar kuat medan tembus E_d pada konfigurasi ini dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2-14 yaitu:

$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} = \frac{45.37}{5 \times 0.5413} = 16.763 \text{ kV/cm}$$

Karena nilai tegangan tembus U_d pada konfigurasi ini sebesar 45.37 kV maka nilai tegangan ini harus sebanding dengan $U = 30$ V pada pengujian pemetaan distribusi medan listrik ini, sehingga tegangan $U = 27$ V harus sebanding dengan:

$$\frac{27V}{30V} \times 45.37 \text{ kV} = 40.83 \text{ kV}$$

Dengan demikian, pada tegangan 45.37 kV interval tegangan antara dua garis ekipotensial adalah sebesar:

$$\Delta U = 45.37 \text{ kV} - 40.83 \text{ kV} = 4.54 \text{ kV}$$

Nilai ΔU di antara dua garis ekipotensial pada level tegangan 45.37 kV ini berlaku pada semua segmen k. Oleh karena itu, nilai kuat medan maksimum sebenarnya pada konfigurasi objek uji ini untuk level tegangan 45.37 kV adalah:

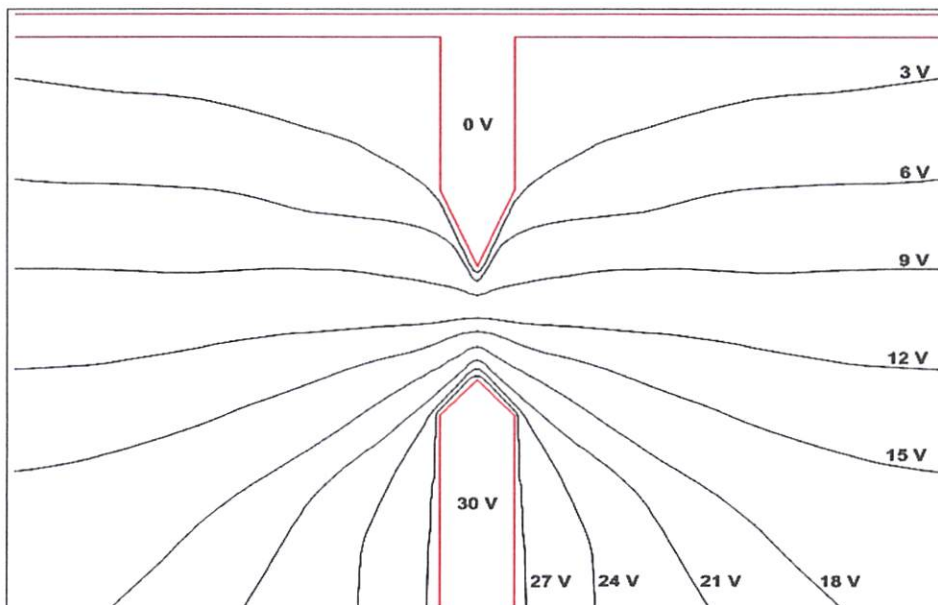
$$E_{\text{maks}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{min}}} = \frac{4.54 \text{ kV}}{0.175 \text{ cm}} = 25.926 \text{ kV/cm}$$

Sedangkan nilai kuat medan minimum sebenarnya pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan $D_1 = 2 \text{ cm}$ dan pelat awan untuk level tegangan tembus 45.37 kV adalah:

$$E_{\text{min}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{maks}}} = \frac{4.54 \text{ kV}}{1.4 \text{ cm}} = 3.241 \text{ kV/cm}$$

4.3.1.3 Untuk Sudut Keruncingan Finial $\alpha_3 = 35^\circ$

Hasil penggambaran distribusi garis ekipotensial pada konfigurasi objek finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan $D_1 = 2 \text{ cm}$ dan pelat awan dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.3. Distribusi garis ekipotensial dengan interval 3 V untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_1 = 2 \text{ cm}$

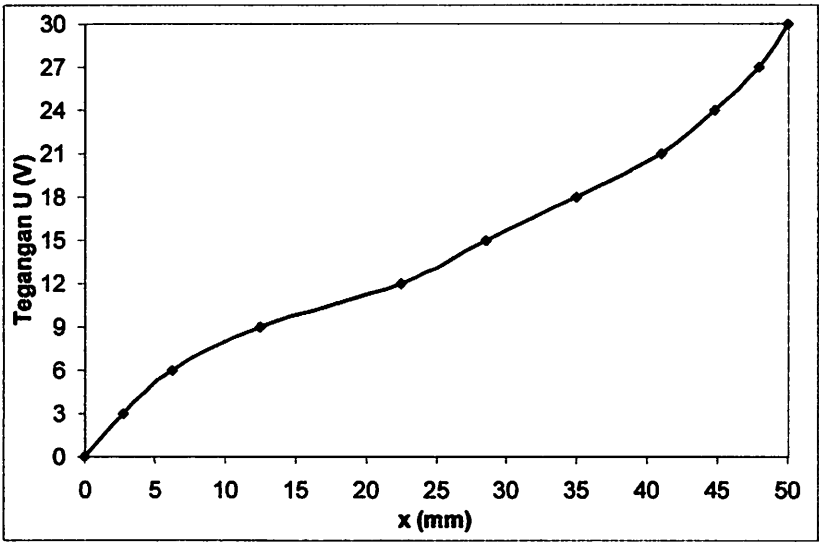
Dari Gambar 4.3 terlihat bahwa garis-garis ekipotensial yang terbentuk dengan interval yang sama tersebut terpisahkan dengan Δx yang berbeda-beda. Sama halnya dengan distribusi garis ekipotensial pada sudut finial 15° dan 25° , daerah dekat permukaan ujung elektroda finial dan pelat awan dihasilkan garis-garis ekipotensial yang sangat berdekatan jaraknya seperti ekipotensial U 27 V dengan 24 V dan 6 V dengan 3 V. Kontur ujung finial yang tetap sama yaitu runcing menyebabkan garis ekipotensial yang terbentuk membentuk sudut kelengkungan. Semakin dekat dengan ujung finial maka sudut kelengkungannya mendekati sudut finial tersebut. Berdasarkan gambar di atas, bila dibandingkan dengan Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 maka jarak yang lebih renggang diperlihatkan antara garis ekipotensial 27 V dengan permukaan ujung elektroda finial 35° . Dengan Δx yang lebih besar maka menyebabkan kuat medan listrik yang dihasilkan pada ujung finial semakin kecil sehingga belum cukup untuk mencapai kuat medan kritis koronanya E_c . Oleh karena itu, waktu untuk memunculkan koronanya lebih lama yang ditandai dengan nilai tegangan korona yang lebih besar daripada sudut 15° maupun 25° seperti yang terlihat pada Tabel 4.1.

Bentuk distribusi medan listrik yang tidak seragam tersebut tentunya menghasilkan kuat medan listrik yang berbeda-beda pada setiap titik dalam daerah sela 5 cm tersebut seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut ini.

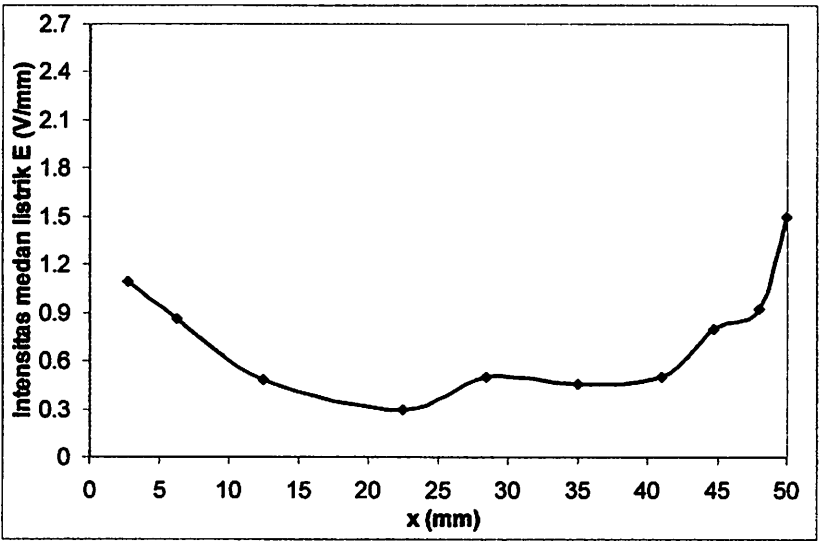
Tabel 4.9. Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_3 = 35^\circ$, $D_1 = 2\text{ cm}$

k	Interval tegangan pada sela udara	$\Delta U\text{ (V)}$	$\Delta x\text{ (mm)}$	E (V/mm)
1	3 V - 0 V	3	2.75	1.09
2	6 V - 3 V	3	3.5	0.86
3	9 V - 6 V	3	6.25	0.48
4	12 V - 9 V	3	10	0.3
5	15 V - 12 V	3	6	0.5
6	18 V - 15 V	3	6.5	0.46
7	21 V - 18 V	3	6	0.5
8	24 V - 21 V	3	3.75	0.8
9	27 V - 24 V	3	3.25	0.92
10	30 V - 27 V	3	2	1.5

Dengan menggunakan Tabel 4.9 dan Gambar 4.3 maka dapat dibuat grafik distribusi tegangan dan intensitas medan listrik sepanjang jarak sela tersebut seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut ini.



Grafik 4.11. Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm



Grafik 4.12. Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm

Terlihat pada Gambar 4.11, pertambahan Δx yang tidak sama tersebut menghasilkan kuat medan listrik yang berbeda seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.12. Nilai Δx yang lebih kecil didapatkan saat jarak x mendekati nilai 0 mm dan 50 mm atau dengan kata lain pada saat itu nilai E yang besar diperoleh

pada daerah dekat ujung finial sebesar 1.5 V/mm sebagai kuat medan listrik maksimum saat $U = 30$ V dan dekat elektroda pelat awan sebesar 1.09 V/mm. Nilai kuat medan listrik minimumnya diperoleh pada titik $U = 12$ V sebesar 0.3 V/mm. Pembentukan muatan ruang bebas lebih banyak dan cepat timbul pada daerah dekat ujung elektroda finial maupun pelat awan sedangkan ke bagian tengah daerah sela lebih lamban sehingga menghasilkan kurva nilai E pada Gambar 4.12 turun hingga x kira-kira 22.5 mm dan naik kembali hingga mencapai maksimumnya.

Nilai intensitas medan listrik rata-rata aproksimasi pada $s = 5$ cm dalam pengujian finial ini adalah:

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{1.09 + 0.86 + 0.48 + 0.3 + 0.5 + 0.46 + 0.5 + 0.8 + 0.92 + 1.5}{10}$$

$$= 0.74 \text{ V/mm}$$

Dengan mengacu pada persamaan 2-12, maka nilai efisiensi medan listrik η pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan $D_1 = 2$ cm dan pelat awan ialah:

$$\eta (\%) = \frac{0.74}{1.5} \times 100\% = 49.42\%$$

Nilai efisiensi ini dibandingkan dengan sudut finial 15° dan 25° lebih kecil sehingga menyebabkan distribusi medan listriknya semakin non-homogen dan akibatnya bila dilihat dari nilai tegangan tembusnya semakin kecil sehingga waktu tembus pada konfigurasi finial 35° lebih cepat daripada finial 15° dan 25° . Dengan melihat kembali nilai tegangan tembus U_d finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm untuk $s = 5$ cm pada Tabel 4.3, maka besar kuat medan tembus E_d pada konfigurasi ini dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2-14 yaitu:

$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} = \frac{40.07}{5 \times 0.4942} = 16.216 \text{ kV/cm}$$

Karena nilai tegangan tembus U_d pada konfigurasi ini sebesar 40.07 kV maka nilai tegangan ini harus sebanding dengan $U = 30 \text{ V}$ pada pengujian pemetaan distribusi medan listrik ini, sehingga tegangan $U = 27 \text{ V}$ harus sebanding dengan:

$$\frac{27V}{30V} \times 40.07 \text{ kV} = 36.06 \text{ kV}$$

Dengan demikian, pada tegangan 40.07 kV interval tegangan antara dua garis ekipotensial adalah sebesar:

$$\Delta U = 40.07 \text{ kV} - 36.06 \text{ kV} = 4.01 \text{ kV}$$

Nilai ΔU di antara dua garis ekipotensial pada level tegangan 40.07 kV ini berlaku pada semua segmen k. Oleh karena itu, nilai kuat medan maksimum sebenarnya pada konfigurasi objek uji ini untuk level tegangan 40.07 kV adalah:

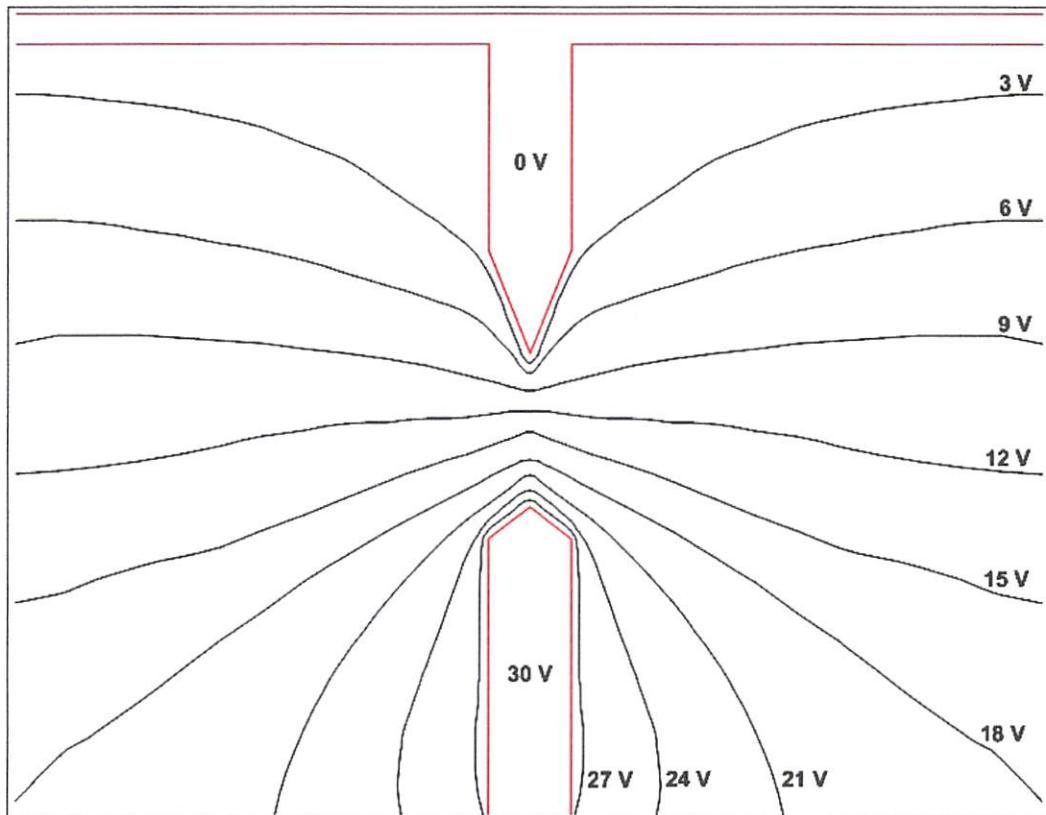
$$E_{\text{maks}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{min}}} = \frac{4.01 \text{ kV}}{0.2 \text{ cm}} = 20.035 \text{ kV/cm}$$

Sedangkan nilai kuat medan minimum sebenarnya pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan $D_1 = 2 \text{ cm}$ dan pelat awan untuk level tegangan tembus 40.07 kV adalah:

$$E_{\text{min}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{maks}}} = \frac{4.01 \text{ kV}}{1 \text{ cm}} = 4.01 \text{ kV/cm}$$

4.3.1.4 Untuk Sudut Keruncingan Finial $\alpha_4 = 45^\circ$

Hasil penggambaran distribusi garis ekipotensial pada konfigurasi objek finial $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan $D_1 = 2$ cm dan pelat awan dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.4. Distribusi garis ekipotensial dengan interval 3 V untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm

Dari Gambar 4.4 terlihat distribusi garis ekipotensial yang dihasilkan tidak seragam karena Δx yang tidak sama untuk setiap interval U . Hal ini sama saja seperti objek finial dengan sudut keruncingan 15° , 25° dan 35° yaitu pada daerah dekat permukaan ujung elektroda finial dan pelat awan dihasilkan garis-garis

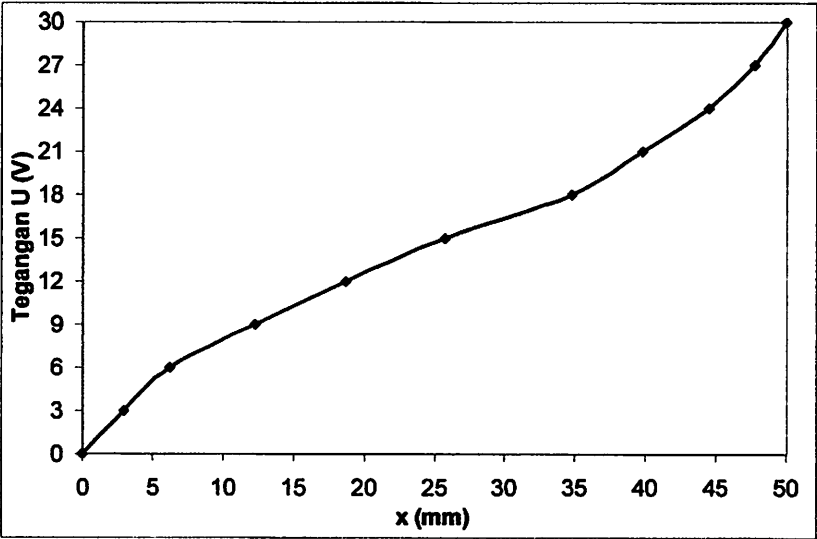
ekipotensial yang sangat berdekatan jaraknya dan melebar jika semakin ke tengah. Namun yang membedakannya ialah nilai Δx antara garis ekipotensial 27 V dengan elektroda finial 45^0 yang bertegangan 30 V semakin besar dibandingkan dengan sudut yang lainnya. Akibatnya kuat medan listrik di depan ujung finial nilainya semakin kecil atau terkecil diantara sudut lainnya sehingga makin kecil dari batas kuat medan kritis korona E_c yang diperlukan. Oleh karena itu proses terjadinya korona untuk konfigurasi finial ini memerlukan waktu paling lama yang ditunjukkan dengan nilai tegangan koronanya yang terbesar seperti pada Tabel 4.1.

Bentuk distribusi medan listrik yang tentunya tidak seragam tersebut menghasilkan kuat medan listrik E yang berbeda-beda pada setiap titik sepanjang lintasan sela udara tersebut seperti yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

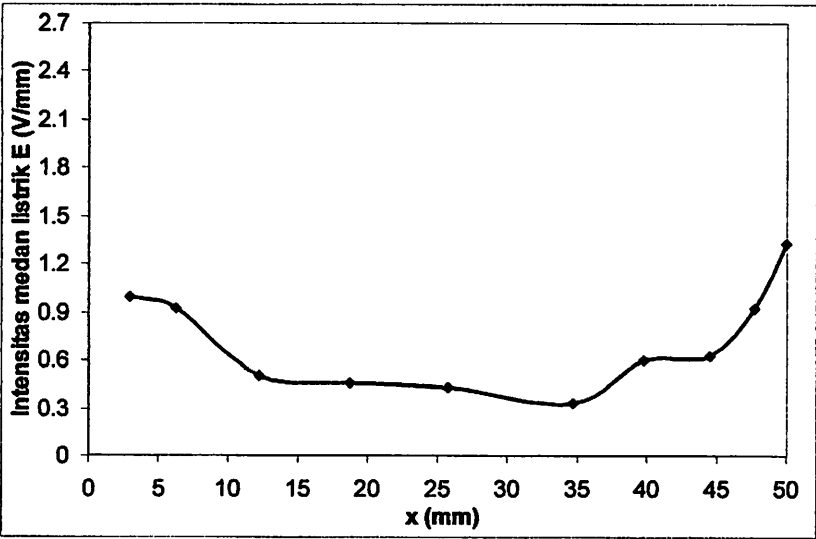
Tabel 4.10. Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_4 = 45^0$, $D_1 = 2\text{ cm}$

k	Interval tegangan pada sela udara	ΔU (V)	Δx (mm)	E (V/mm)
1	3 V - 0 V	3	3	1
2	6 V - 3 V	3	3.25	0.92
3	9 V - 6 V	3	6	0.5
4	12 V - 9 V	3	6.5	0.46
5	15 V - 12 V	3	7	0.43
6	18 V - 15 V	3	9	0.33
7	21 V - 18 V	3	5	0.6
8	24 V - 21 V	3	4.75	0.63
9	27 V - 24 V	3	3.25	0.92
10	30 V - 27 V	3	2.25	1.33

Dengan menggunakan Tabel 4.10 dan Gambar 4.4 maka dapat dibuat grafik distribusi tegangan dan intensitas medan listrik sepanjang jarak sela tersebut seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut ini.



Gambar 4.13. Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dan $D_1 = 2\text{ cm}$



Grafik 4.14. Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dan $D_1 = 2\text{ cm}$

Pada Gambar 4.13 terlihat bahwa pertambahan Δx yang tak linier tersebut akan meningkat nilainya apabila x menjauhi titik 0 mm dan 50 mm. Maka dengan melihat Gambar 4.14 dan Tabel 4.10, nilai kuat medan listrik E akan bergerak turun atau lebih kecil dari titik mendekati nol hingga kira-kira $x = 12.25$ mm kemudian dari pertengahan sela elektroda yaitu kira-kira $x = 34.75$ mm akan meningkat lagi nilainya hingga mencapai kuat medan listrik tertingginya. Pada pengujian ini nilai kuat medan listrik pada daerah dekat elektroda katoda yaitu pelat awan sebesar 1 V/mm sedangkan nilai E yang dihasilkan di daerah dekat ujung elektroda finial 45° sebesar 1.33 V/mm.

Nilai intensitas medan listrik rata-rata aproksimasi pada $s = 5$ cm dalam pengujian finial ini adalah:

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{1 + 0.92 + 0.5 + 0.46 + 0.43 + 0.33 + 0.6 + 0.63 + 0.92 + 1.33}{10}$$

$$= 0.71 \text{ V/mm}$$

Dengan mengacu pada persamaan 2-12, maka nilai efisiensi medan listrik η pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan $D_1 = 2$ cm dan pelat awan ialah:

$$\eta (\%) = \frac{0.71}{1.33} \times 100\% = 53.51\%$$

Nilai efisiensi ini bila dibandingkan dengan sudut finial 15° dan 25° lebih kecil tetapi dengan sudut finial 35° justru lebih besar sehingga distribusi medan listriknya lebih homogen dibandingkan dengan finial 35° . Akibatnya bila dilihat dari nilai tegangan tembusnya maka waktu tembus pada konfigurasi finial 45° lebih cepat daripada finial 15° dan 25° akan tetapi lebih lama dari finial 35° . Oleh karena itu terbukti bahwa sudut finial 35° memiliki kemampuan sambaran yang

lebih baik dari sudut lain. Dengan melihat kembali nilai tegangan tembus U_d finial $\alpha_4 = 45^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm untuk $s = 5$ cm pada Tabel 4.3, maka besar kuat medan tembus E_d pada konfigurasi ini dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2-14 yaitu:

$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} = \frac{42.2}{5 \times 0.5351} = 15.773 \text{ kV/cm}$$

Karena nilai tegangan tembus U_d pada konfigurasi ini sebesar 42.2 kV maka nilai tegangan ini harus sebanding dengan $U = 30$ V pada pengujian pemetaan distribusi medan listrik ini, sehingga tegangan $U = 27$ V harus sebanding dengan:

$$\frac{27V}{30V} \times 42.2 \text{ kV} = 37.98 \text{ kV}$$

Dengan demikian, pada tegangan 42.2 kV interval tegangan antara dua garis ekipotensial adalah sebesar:

$$\Delta U = 42.2 \text{ kV} - 37.98 \text{ kV} = 4.22 \text{ kV}$$

Nilai ΔU di antara dua garis ekipotensial pada level tegangan 42.2 kV ini berlaku pada semua segmen k. Oleh karena itu, nilai kuat medan maksimum sebenarnya pada konfigurasi objek uji ini untuk level tegangan 42.2 kV adalah:

$$E_{\text{maks}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{min}}} = \frac{4.22 \text{ kV}}{0.225 \text{ cm}} = 18.756 \text{ kV/cm}$$

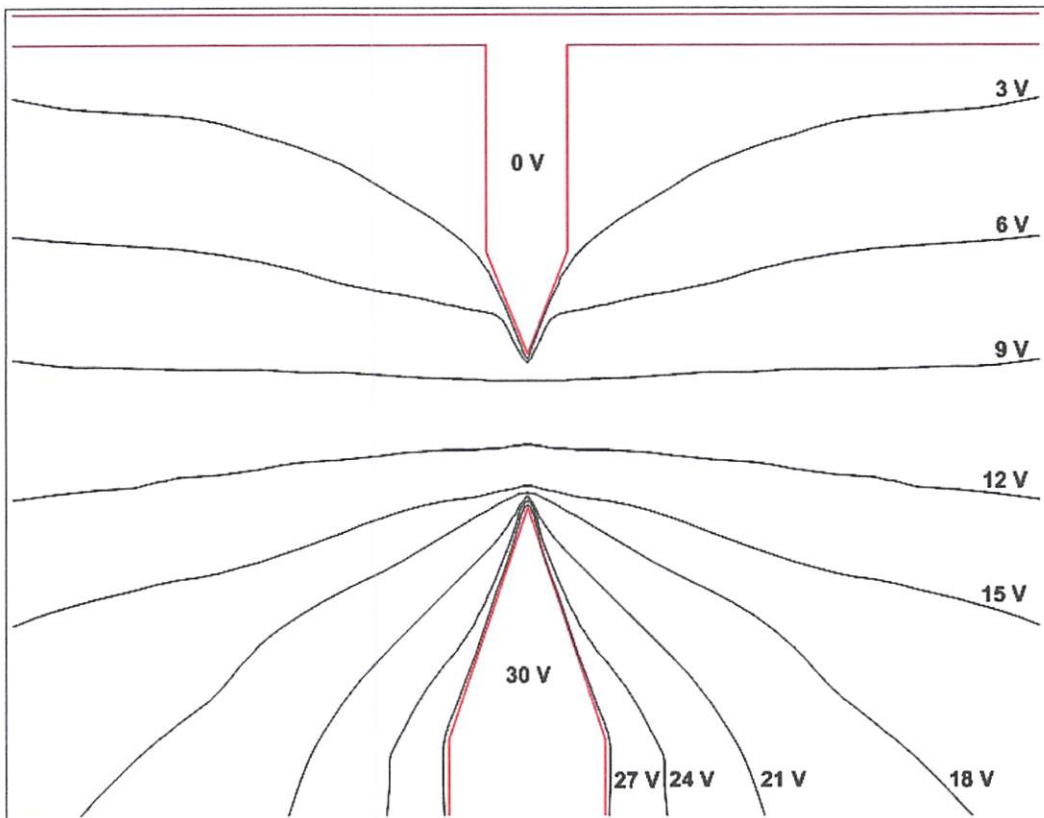
Sedangkan nilai kuat medan minimum sebenarnya pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan $D_1 = 2$ cm dan pelat awan untuk level tegangan tembus 42.2

kV adalah:
$$E_{\text{min}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{maks}}} = \frac{4.22 \text{ kV}}{0.9 \text{ cm}} = 4.689 \text{ kV/cm}$$

4.3.2.1 Pemetaan Medan Listrik untuk Diameter Finial $D_2 = 4$ cm untuk

Sudut Keruncingan Finial $\alpha_1 = 15^\circ$

Hasil penggambaran distribusi garis ekipotensial pada konfigurasi objek finial $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan $D_2 = 4$ cm dan pelat awan dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.5. Distribusi garis ekipotensial dengan interval 3 V untuk

$\alpha_1 = 15^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa dengan kenaikan U yang sama maka didapatkan penyebaran garis-garis ekipotensial dengan kerapatan atau jarak Δx yang berbeda-beda. Pada daerah yang dekat dengan elektroda maka dihasilkan garis-garis ekipotensial dengan nilai Δx sangat kecil dan semakin jauh menyebabkan Δx lebih lebar. Bila dibandingkan dengan finial D_1 , maka pada

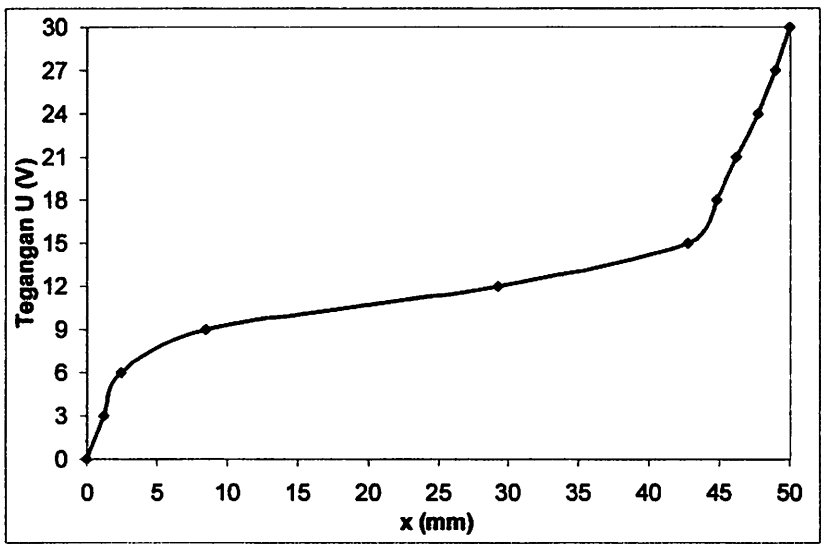
gambar di atas didapatkan jarak terdekat antara garis ekipotensial 27 V dengan ujung elektroda finial lebih kecil. Dengan Δx yang lebih kecil maka kuat medan listrik yang dihasilkan di depan ujung runcing finial ini semakin besar sehingga korona lebih cepat timbul atau nilai U_c pada finial ini lebih kecil dari finial 15° dengan D_1 .

Berikut ini diberikan nilai kuat medan listrik pada konfigurasi finial ini sepanjang jarak sela 5 cm tersebut dengan interval tegangan ΔU ialah 3 V.

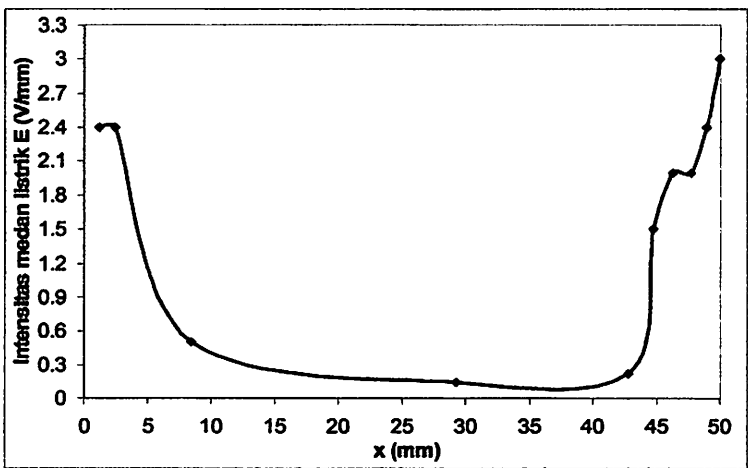
Tabel 4.11. Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_1 = 15^\circ$, $D_2 = 4$ cm

k	Interval tegangan pada sela udara	ΔU (V)	Δx (mm)	E (V/mm)
1	3 V - 0 V	3	1.25	2.4
2	6 V - 3 V	3	1.25	2.4
3	9 V - 6 V	3	6	0.5
4	12 V - 9 V	3	20.75	0.14
5	15 V - 12 V	3	13.5	0.22
6	18 V - 15 V	3	2	1.5
7	21 V - 18 V	3	1.5	2
8	24 V - 21 V	3	1.5	2
9	27 V - 24 V	3	1.25	2.4
10	30 V - 27 V	3	1	3

Dengan menggunakan Gambar 4.5 dan Tabel 4.11, maka dapat dibuat grafik distribusi tegangan dan juga grafik distribusi intensitas medan listrik di sepanjang lintasan sela udara antara elektroda finial tersebut dan pelat awan seperti ditunjukkan pada gambar-gambar di bawah ini.



Grafik 4.15 Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm



Grafik 4.16 Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

Dari grafik 4.15 terlihat dengan nilai Δx yang tak linier setiap interval U , menyebabkan kuat medan listrik E tidak sama. Berdasarkan grafik 4.16 maka kuat medan listrik di depan ujung elektroda pelat awan sebesar 2.4 V/mm kemudian nilai E tersebut turun dan naik kembali hingga mencapai nilai maksimumnya di dekat ujung elektroda finial yaitu sebesar 3 V/mm. Nilai kuat medan listrik minimum diperoleh saat $U = 12$ V sebesar 0.14 V/mm.

Nilai intensitas medan listrik rata-rata aproksimasi pada $s = 5$ cm dalam pengujian finial ini adalah:

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{2.4 + 2.4 + 0.5 + 0.14 + 0.22 + 1.5 + 2 + 2 + 2.4 + 3}{10} = 1.66 \text{ V/mm}$$

Dengan mengacu pada persamaan 2-12, maka nilai efisiensi medan listrik η pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan $D_2 = 4$ cm dan pelat awan ialah:

$$\eta (\%) = \frac{1.66}{3} \times 100\% = 55.22\%$$

Nilai efisiensi ini bila dibandingkan dengan finial sudut 15° dan D_1 lebih besar sehingga bentuk distribusi medan listriknya lebih homogen dari finial tersebut. Akibatnya bila dilihat dari nilai tegangan tembusnya maka waktu terjadinya sambaran petir atau tembus pada konfigurasi finial ini lebih lama. Dengan melihat kembali nilai tegangan tembus U_d finial $\alpha_1 = 15^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm untuk $s = 5$ cm pada Tabel 4.5, maka besar kuat medan tembus E_d pada konfigurasi ini dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2-14 yaitu:

$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} = \frac{46.47}{5 \times 0.5522} = 16.831 \text{ kV/cm}$$

Karena nilai tegangan tembus U_d pada konfigurasi ini sebesar 46.47 kV maka nilai tegangan ini harus sebanding dengan $U = 30$ V pada pengujian pemetaan distribusi medan listrik ini, sehingga tegangan $U = 27$ V harus sebanding dengan:

$$\frac{27V}{30V} \times 46.47 \text{ kV} = 41.82 \text{ kV}$$

Dengan demikian, pada tegangan 46.47 kV interval tegangan antara dua garis ekipotensial adalah sebesar:

$$\Delta U = 46.47 \text{ kV} - 41.82 \text{ kV} = 4.65 \text{ kV}$$

Nilai ΔU di antara dua garis ekipotensial pada level tegangan 46.47 kV ini berlaku pada semua segmen k. Oleh karena itu, nilai kuat medan maksimum sebenarnya pada konfigurasi objek uji ini untuk level tegangan 46.47 kV adalah:

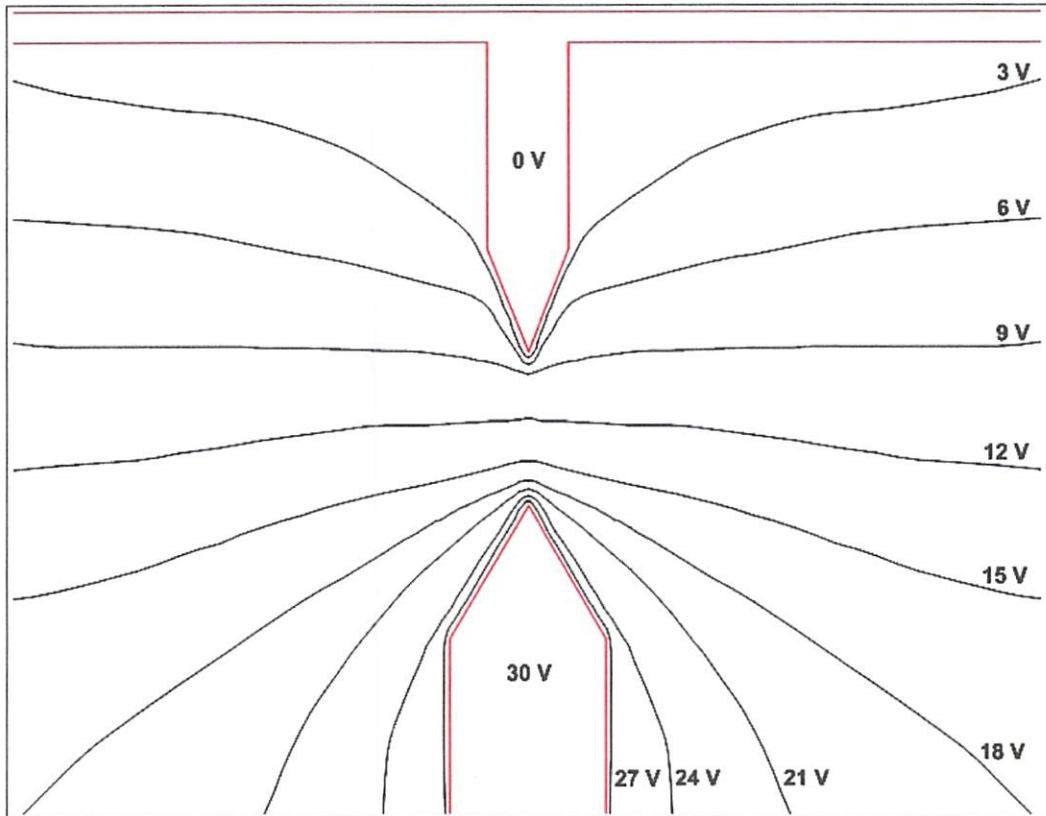
$$E_{\text{maks}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{min}}} = \frac{4.65 \text{ kV}}{0.1 \text{ cm}} = 46.47 \text{ kV/cm}$$

Sedangkan nilai kuat medan minimum sebenarnya pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan $D_2 = 4$ cm dan pelat awan untuk level tegangan tembus 46.47 kV adalah:

$$E_{\text{min}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{maks}}} = \frac{4.65 \text{ kV}}{2.075 \text{ cm}} = 2.24 \text{ kV/cm}$$

4.3.2.2. Untuk Sudut Keruncingan Finial $\alpha_2 = 25^\circ$

Hasil penggambaran distribusi garis ekuipotensial pada konfigurasi objek finial $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan $D_2 = 4$ cm dan pelat awan dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.6 Distribusi garis ekuipotensial dengan interval 3 V untuk

$\alpha_2 = 25^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

Sumber: Hasil Pengujian

Terlihat dari Gambar 4.6 bahwa kerapatan garis-garis ekuipotensial pada daerah dekat elektroda memiliki nilai Δx yang lebih kecil dibandingkan daerah sela lainnya. Garis-garis ekuipotensial yang terbentuk dengan mengikuti alur permukaan elektroda finial dan pelat awan tersebut memiliki perbedaan jika kita

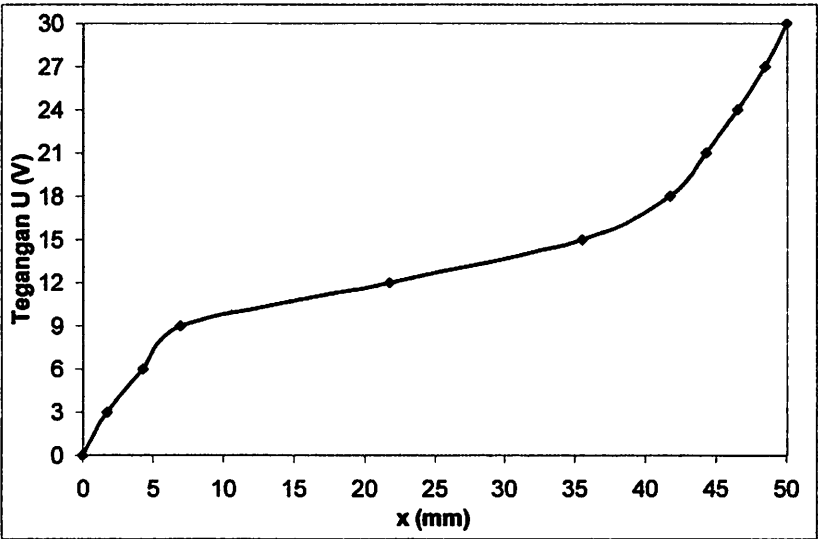
bandingkan dengan distribusi garis ekipotensial pada finial 25^0 dan D_1 yaitu Δx yang lebih kecil pada interval U 30 V – 27 V seperti yang terlihat pada Tabel 4.12. Kuat medan listrik yang dihasilkan di depan ujung finial otomatis lebih besar sehingga menghasilkan kuat medan listrik kritis korona E_c yang lebih cepat. Selanjutnya hal tersebut mempercepat pembentukan muatan ruang bebas berupa ion positif yang menumpuk di depan finial sehingga waktu terjadinya korona lebih cepat yaitu dengan nilai U_c yang lebih kecil tentunya.

Berikut ini diberikan nilai kuat medan listrik pada konfigurasi finial ini sepanjang jarak sela 5 cm tersebut untuk setiap interval U yang sama.

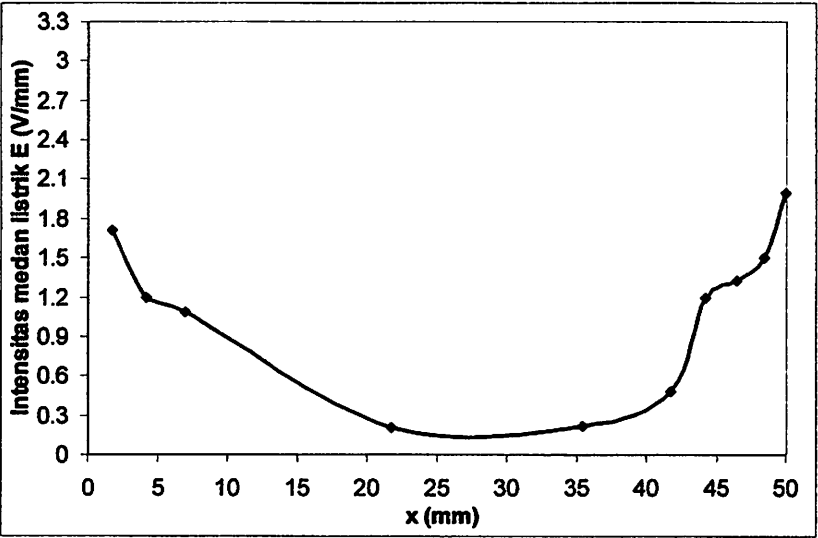
Tabel 4.12. Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_2 = 25^0$, $D_2 = 4$ cm

k	Interval tegangan pada sela udara	ΔU (V)	Δx (mm)	E (V/mm)
1	3 V - 0 V	3	1.75	1.71
2	6 V - 3 V	3	2.5	1.2
3	9 V - 6 V	3	2.75	1.09
4	12 V - 9 V	3	14.75	0.20
5	15 V - 12 V	3	13.75	0.22
6	18 V - 15 V	3	6.25	0.48
7	21 V - 18 V	3	2.5	1.2
8	24 V - 21 V	3	2.25	1.33
9	27 V - 24 V	3	2	1.5
10	30 V - 27 V	3	1.5	2

Grafik distribusi tegangan dan intensitas medan listriknya seperti gambar berikut.



Grafik 4.17. Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_2 = 25^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm



Grafik 4.18. Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_2 = 25^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

Dari grafik 4.17 terlihat dengan nilai Δx yang tak linier setiap interval U , menyebabkan kuat medan listrik E tidak sama. Berdasarkan grafik 4.18 maka kuat medan listrik di depan ujung elektroda pelat awan sebesar 1.71 V/mm kemudian nilai E tersebut turun hingga $x = 21.75$ mm dan naik kembali dari posisi $x = 35.5$ mm hingga mencapai nilai maksimumnya di dekat daerah ujung elektroda finial yaitu sebesar 2 V/mm. Nilai kuat medan listrik minimum diperoleh saat $U = 12$ V sebesar 0.2 V/mm.

Nilai intensitas medan listrik rata-rata aproksimasi pada $s = 5$ cm dalam pengujian finial ini adalah:

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{1.71 + 1.2 + 1.09 + 0.2 + 0.22 + 0.48 + 1.2 + 1.33 + 1.5 + 2}{10}$$

$$= 1.09 \text{ V/mm}$$

Dengan mengacu pada persamaan 2-12, maka nilai efisiensi medan listrik η pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan $D_2 = 4$ cm dan pelat awan ialah:

$$\eta (\%) = \frac{1.09}{2} \times 100\% = 54.7\%$$

Nilai efisiensi ini bila dibandingkan dengan finial sudut 25° dan D_1 lebih besar sehingga bentuk distribusi medan listriknya lebih homogen dari finial tersebut. Namun bila dibandingkan dengan sudut 15° pada diameter yang sama maka nilainya lebih kecil sehingga dihasilkan distribusi medan listrik yang semakin tak seragam. Akibatnya bila dilihat dari nilai tegangan tembusnya maka waktu terjadinya sambaran petir atau tembus pada konfigurasi finial ini lebih lama dari finial 25° dengan D_1 dan lebih cepat dari sudut 15° pada diameter yang sama. Dengan melihat kembali nilai tegangan tembus U_d finial $\alpha_2 = 25^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

untuk $s = 5 \text{ cm}$ pada Tabel 4.5, maka besar kuat medan tembus E_d pada konfigurasi ini dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2-14 yaitu:

$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} = \frac{45.93}{5 \times 0.547} = 16.793 \text{ kV/cm}$$

Karena nilai tegangan tembus U_d pada konfigurasi ini sebesar 45.93 kV maka nilai tegangan ini harus sebanding dengan $U = 30 \text{ V}$ pada pengujian pemetaan distribusi medan listrik ini, sehingga tegangan $U = 27 \text{ V}$ harus sebanding dengan:

$$\frac{27V}{30V} \times 45.93 \text{ kV} = 41.34 \text{ kV}$$

Dengan demikian, pada tegangan 45.93 kV interval tegangan antara dua garis ekipotensial adalah sebesar:

$$\Delta U = 45.93 \text{ kV} - 41.34 \text{ kV} = 4.59 \text{ kV}$$

Nilai ΔU di antara dua garis ekipotensial pada level tegangan 45.93 kV ini berlaku pada semua segmen k. Oleh karena itu, nilai kuat medan maksimum sebenarnya pada konfigurasi objek uji ini untuk level tegangan 45.93 kV adalah:

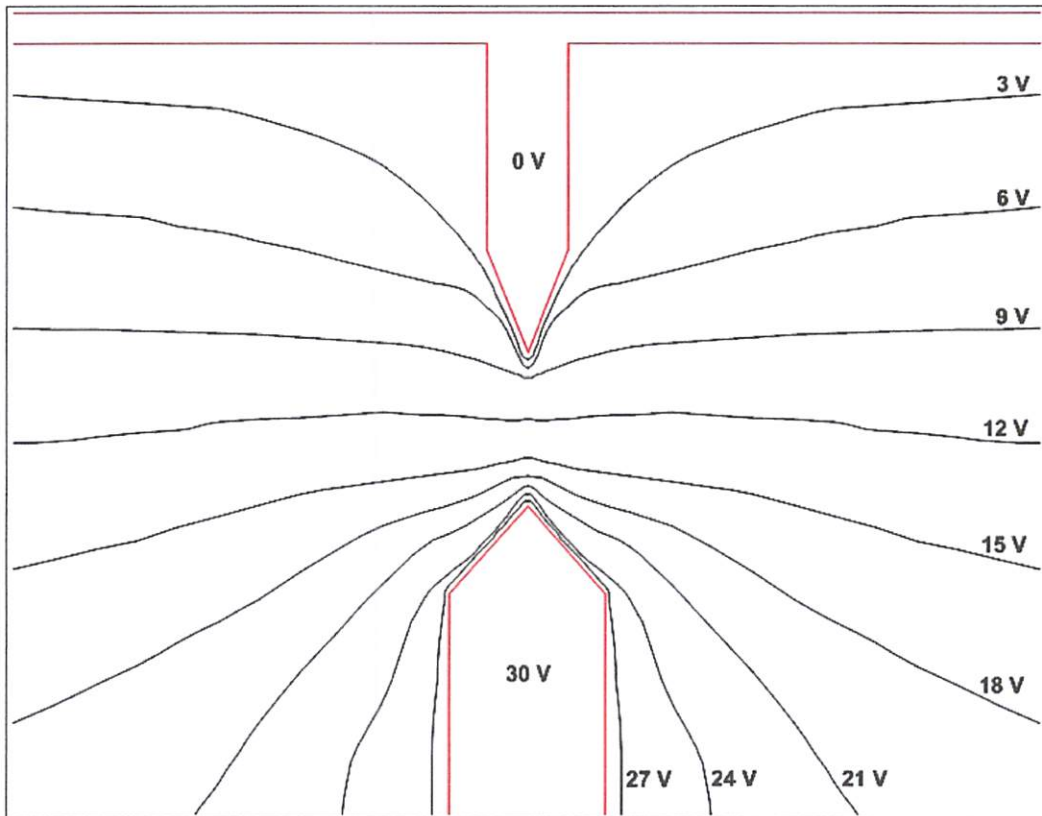
$$E_{\text{maks}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{min}}} = \frac{4.59 \text{ kV}}{0.15 \text{ cm}} = 30.62 \text{ kV/cm}$$

Sedangkan nilai kuat medan minimum sebenarnya pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_2 = 25^\circ$ dengan $D_2 = 4 \text{ cm}$ dan pelat awan untuk level tegangan tembus 45.93 kV adalah:

$$E_{\text{min}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{maks}}} = \frac{4.59 \text{ kV}}{1.475 \text{ cm}} = 3.114 \text{ kV/cm}$$

4.3.2.3. Untuk Sudut Keruncingan Finial $\alpha_3 = 35^\circ$

Hasil untuk penggambaran distribusi garis ekipotensial pada konfigurasi objek finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan $D_2 = 4$ cm dan pelat awan dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.7 Distribusi garis ekipotensial dengan interval 3 V untuk

$\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

Berdasarkan Gambar 4.7, maka distribusi garis ekipotensial yang dihasilkan adalah sama seperti sudut-sudut yang lainnya. Bila dilihat pada interval 30 V – 27 V pada daerah selanya, menghasilkan nilai Δx yang jauh lebih besar ketimbang sudut 25° maupun 15° . Namun nilai tersebut lebih kecil jika

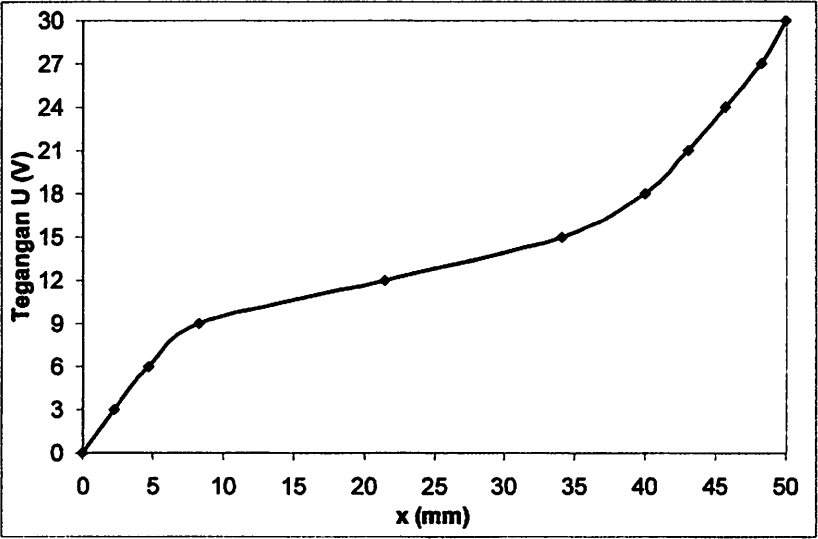
dibandingkan dengan sudut finial 35° dengan diameter lebih kecil D_1 . Sesuai dengan persamaan 2-11, kuat medan listrik di ujung finial pada gambar di atas lebih rendah dari E sudut 25° maupun 15° tetapi lebih tinggi dari finial 35° dengan D_1 . Karena korona muncul bila E_c dipenuhi maka waktu koronanya lebih cepat ketimbang finial 35° dengan D_1 tetapi lebih lama dari finial sudut 25° dan 15° .

Untuk menganalisis lebih lanjut gambar tersebut, berikut ditampilkan tabel nilai kuat medan listrik pada konfigurasi finial 35° dan D_2 pada jarak sela 5 cm dengan menggunakan persamaan 4-2.

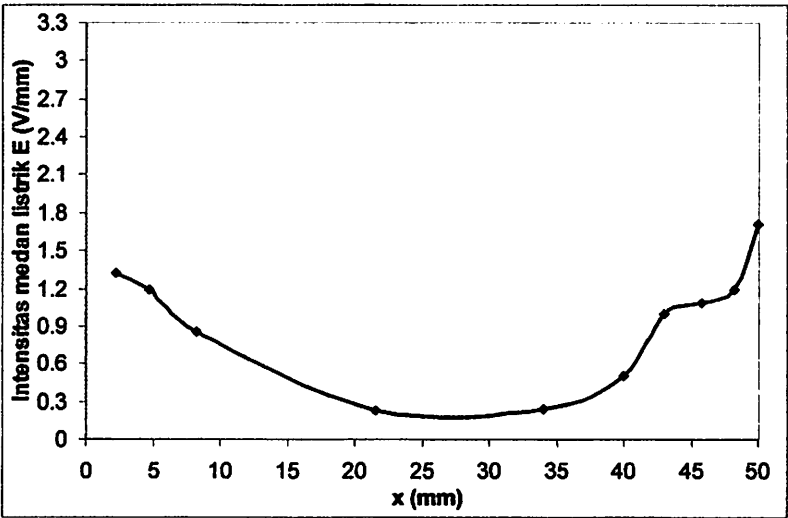
Tabel 4.13. Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_3 = 35^{\circ}$, $D_2 = 4$ cm

k	Interval tegangan pada sela udara	ΔU (V)	Δx (mm)	E (V/mm)
1	3 V - 0 V	3	2.25	1.33
2	6 V - 3 V	3	2.5	1.2
3	9 V - 6 V	3	3.5	0.86
4	12 V - 9 V	3	13.25	0.23
5	15 V - 12 V	3	12.5	0.24
6	18 V - 15 V	3	6	0.5
7	21 V - 18 V	3	3	1
8	24 V - 21 V	3	2.75	1.09
9	27 V - 24 V	3	2.5	1.2
10	30 V - 27 V	3	1.75	1.71

Dengan menggunakan Gambar 4.7 dan Tabel 4.13, maka dapat dibuat grafik distribusi tegangan dan juga grafik distribusi intensitas medan listrik di sepanjang lintasan sela udara antara elektroda finial tersebut dan pelat awan seperti ditunjukkan pada gambar-gambar di bawah ini.



Grafik 4.19. Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm



Grafik 4.20. Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

Pada Gambar 4.19 terlihat dengan nilai Δx yang tak linier setiap interval U , menyebabkan kuat medan listrik E tidak sama. Berdasarkan Gambar 4.20 maka kuat medan listrik di depan ujung elektroda pelat awan sebesar 1.33 V/mm kemudian nilai E tersebut turun hingga $x = 21.5$ mm dan naik kembali dari nilai x sekitar 34 mm hingga mencapai nilai maksimumnya di dekat daerah ujung elektroda finial yaitu sebesar 1.71 V/mm. Nilai kuat medan listrik minimum diperoleh saat $U = 12$ V sebesar 0.23 V/mm.

Nilai intensitas medan listrik rata-rata aproksimasi pada $s = 5$ cm dalam pengujian finial ini adalah:

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{1.33 + 1.2 + 0.86 + 0.23 + 0.24 + 0.5 + 1 + 1.09 + 1.2 + 1.71}{10}$$

$$= 0.94 \text{ V/mm}$$

Dengan mengacu pada persamaan 2-12, maka nilai efisiensi medan listrik η pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan $D_2 = 4$ cm dan pelat awan ialah:

$$\eta (\%) = \frac{0.94}{1.71} \times 100\% = 54.61\%$$

Nilai efisiensi ini bila dibandingkan dengan finial sudut 35° dan D_1 lebih besar sehingga bentuk distribusi medan listriknya lebih homogen dari finial tersebut. Namun bila dibandingkan dengan sudut 15° dan 25° pada diameter yang sama maka nilainya lebih kecil sehingga dihasilkan distribusi medan listrik yang semakin tak seragam. Akibatnya bila dilihat dari nilai tegangan tembusnya maka waktu terjadinya sambaran petir atau tembus pada konfigurasi finial ini lebih lama dari finial 35° dengan D_1 dan lebih cepat dari sudut 15° dan 25° pada diameter yang sama. Dengan melihat kembali nilai tegangan tembus U_d finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dan

$D_2 = 4$ cm untuk $s = 5$ cm pada Tabel 4.5, maka besar kuat medan tembus E_d pada konfigurasi ini dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2-14 yaitu:

$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} = \frac{45.8}{5 \times 0.5461} = 16.773 \text{ kV/cm}$$

Karena nilai tegangan tembus U_d pada konfigurasi ini sebesar 45.8 kV maka nilai tegangan ini harus sebanding dengan $U = 30$ V pada pengujian pemetaan distribusi medan listrik ini, sehingga tegangan $U = 27$ V harus sebanding dengan:

$$\frac{27V}{30V} \times 45.8 \text{ kV} = 41.22 \text{ kV}$$

Dengan demikian, pada tegangan 45.8 kV interval tegangan antara dua garis ekipotensial adalah sebesar:

$$\Delta U = 45.8 \text{ kV} - 41.22 \text{ kV} = 4.58 \text{ kV}$$

Nilai ΔU di antara dua garis ekipotensial pada level tegangan 45.8 kV ini berlaku pada semua segmen k. Oleh karena itu, nilai kuat medan maksimum sebenarnya pada konfigurasi objek uji ini untuk level tegangan 45.8 kV adalah:

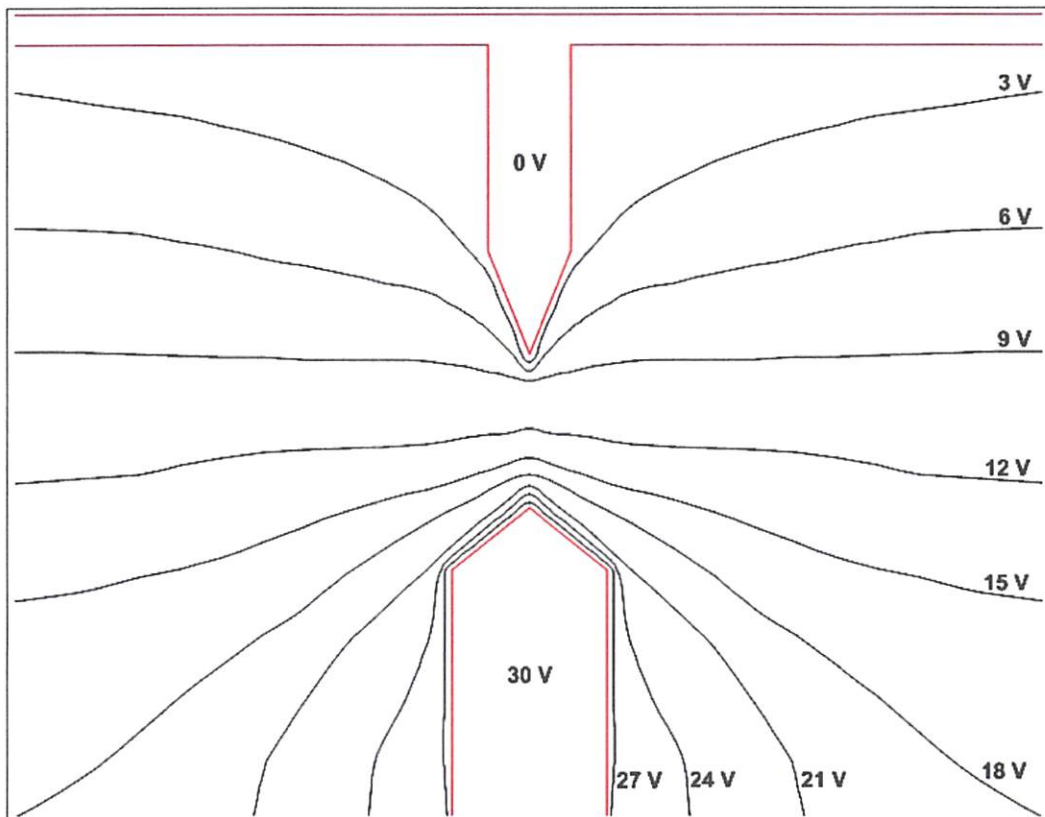
$$E_{\text{maks}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{min}}} = \frac{4.58 \text{ kV}}{0.175 \text{ cm}} = 26.171 \text{ kV/cm}$$

Sedangkan nilai kuat medan minimum sebenarnya pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan $D_2 = 4$ cm dan pelat awan untuk level tegangan tembus 45.8 kV adalah:

$$E_{\text{min}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{maks}}} = \frac{4.58 \text{ kV}}{1.325 \text{ cm}} = 3.457 \text{ kV/cm}$$

4.3.2.4. Untuk Sudut Keruncingan Finial $\alpha_4 = 45^\circ$

Hasil untuk penggambaran distribusi garis ekipotensial pada konfigurasi objek finial $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan $D_2 = 4$ cm dan pelat awan dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.8. Distribusi garis ekipotensial dengan interval 3 V untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

Berdasarkan Gambar 4.8 terlihat bahwa garis-garis ekipotensial yang terbentuk dengan interval yang sama tersebut terpisahkan dengan Δx yang berbeda-beda. Sama halnya dengan distribusi garis ekipotensial pada sudut finial 15° , 25° dan 35° , daerah dekat permukaan ujung elektroda finial dan pelat awan dihasilkan garis-garis ekipotensial yang sangat berdekatan jaraknya seperti

ekipotensial U 27 V dengan 24 V dan 6 V dengan 3 V. Kontur ujung finial yang tetap sama yaitu runcing menyebabkan garis ekipotensial yang terbentuk membentuk sudut kelengkungan. Semakin dekat dengan ujung finial maka sudut kelengkungannya mendekati sudut finial tersebut.

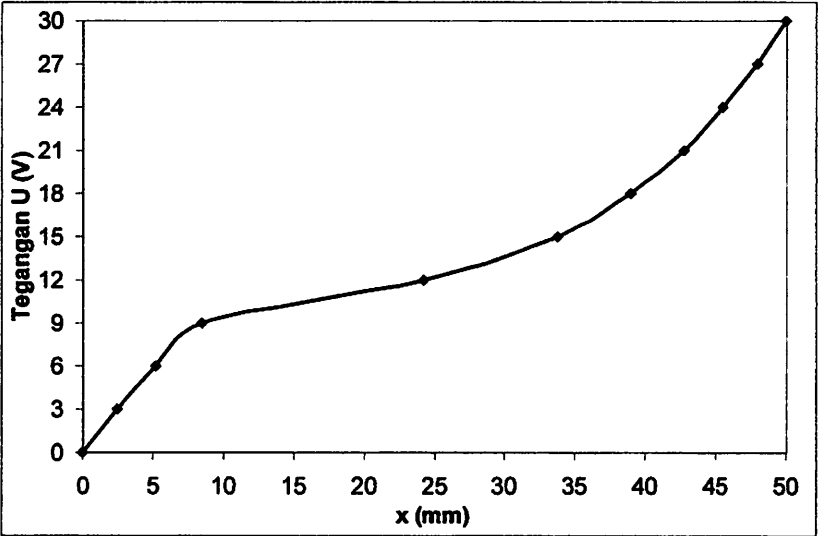
Perbedaan terlihat pada nilai Δx antara garis ekipotensial 27 V dengan elektroda finial 45° yang bertegangan 30 V lebih besar dibandingkan dengan sudut yang lainnya. Akibatnya kuat medan listrik di depan ujung finial nilainya semakin kecil atau terkecil diantara sudut lainnya sehingga makin kecil dari batas kuat medan kritis korona E_c yang diperlukan. Oleh karena itu proses terjadinya korona untuk konfigurasi finial ini memerlukan waktu paling lama yang ditunjukkan dengan nilai tegangan koronanya yang terbesar seperti pada Tabel 4.2. Sedangkan jika dibandingkan dengan finial 45° dengan D_1 , nilai E lebih besar sehingga waktu korona jelas lebih cepat.

Untuk membahas lebih lanjut gambar tersebut, berikut ditampilkan tabel nilai kuat medan listrik pada konfigurasi finial 45° dan D_2 pada jarak sela 5 cm dengan menggunakan persamaan 4-2.

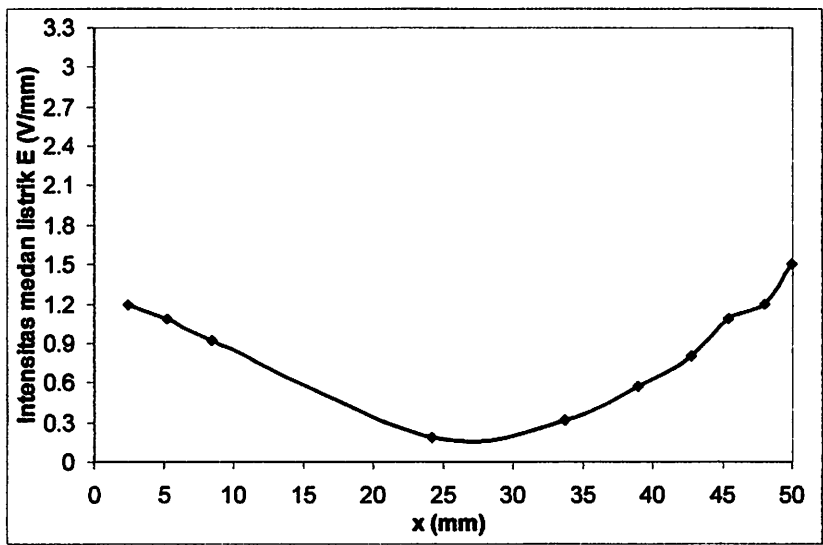
Tabel 4.14. Nilai kuat medan listrik E untuk sudut $\alpha_4 = 45^\circ$, $D_2 = 4\text{ cm}$

k	Interval tegangan pada sela udara	$\Delta U\text{ (V)}$	$\Delta x\text{ (mm)}$	E (V/mm)
1	3 V - 0 V	3	2.5	1.2
2	6 V - 3 V	3	2.75	1.09
3	9 V - 6 V	3	3.25	0.92
4	12 V - 9 V	3	15.75	0.19
5	15 V - 12 V	3	9.5	0.32
6	18 V - 15 V	3	5.25	0.57
7	21 V - 18 V	3	3.75	0.8
8	24 V - 21 V	3	2.75	1.09
9	27 V - 24 V	3	2.5	1.2
10	30 V - 27 V	3	2	1.5

Grafik distribusi tegangan dan intensitas medan listriknya seperti gambar berikut.



Grafik 4.21. Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dan $D_2 = 4\text{ cm}$



Grafik 4.22. Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_4 = 45^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

Terlihat pada grafik 4.21, peningkatan Δx yang tak linier tersebut menghasilkan kuat medan listrik yang berbeda seperti yang ditampilkan pada grafik 4.22. Pembentukan muatan ruang bebas lebih banyak dan cepat timbul pada daerah dekat ujung elektroda finial maupun pelat awan sedangkan ke bagian tengah daerah sela lebih lamban sehingga menghasilkan kurva nilai E pada grafik 4.22 turun hingga $x = 24.25$ mm dan naik kembali saat kira-kira x mendekati 35 mm hingga mencapai maksimumnya. Pada pengujian ini nilai kuat medan listrik pada daerah dekat elektroda pelat awan sebesar 1.2 V/mm sedangkan nilai E yang dihasilkan di daerah dekat ujung elektroda finial 45° sebesar 1.5 V/mm. Nilai kuat medan listrik minimumnya diperoleh pada titik $U = 12$ V sebesar 0.19 V/mm.

Nilai intensitas medan listrik rata-rata aproksimasi pada $s = 5$ cm dalam pengujian finial ini adalah:

$$E_{rata-rata} = \frac{1.2 + 1.09 + 0.92 + 0.19 + 0.32 + 0.57 + 0.8 + 1.09 + 1.2 + 1.5}{10}$$

$$= 0.89 \text{ V/mm}$$

Dengan mengacu pada persamaan 2-12, maka nilai efisiensi medan listrik η pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan $D_2 = 4 \text{ cm}$ dan pelat awan ialah:

$$\eta (\%) = \frac{0.89}{1.5} \times 100\% = 59.22\%$$

Nilai efisiensi ini jika dibandingkan dengan sudut finial 15° , 25° dan 35° pada diameter yang sama dan dengan finial sudut 45° dan D_1 adalah paling besar sehingga distribusi medan listriknya paling homogen. Akibatnya bila dilihat dari nilai tegangan tembusnya maka waktu terjadinya sambaran petir atau tembus pada konfigurasi finial ini paling lama. Berdasarkan nilai efisiensi tersebut membuktikan bahwa dengan memperbesar diameter finial, sudut keruncingan finial 35° masih memberikan kemampuan sambaran petir yang paling baik meski dengan diameter lebih besar kemampuannya untuk menangkap petir makin menurun. Dengan melihat kembali nilai tegangan tembus U_d finial $\alpha_4 = 45^\circ$ dan $D_2 = 4 \text{ cm}$ untuk $s = 5 \text{ cm}$ pada Tabel 4.5, maka besar kuat medan tembus E_d pada konfigurasi ini dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2-14 yaitu:

$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} = \frac{47.4}{5 \times 0.5922} = 16.008 \text{ kV/cm}$$

Karena nilai tegangan tembus U_d pada konfigurasi ini sebesar 47.4 kV maka nilai tegangan ini harus sebanding dengan $U = 30 \text{ V}$ pada pengujian pemetaan distribusi medan listrik ini, sehingga tegangan $U = 27 \text{ V}$ harus sebanding dengan:

$$\frac{27V}{30V} \times 47.4 \text{ kV} = 42.66 \text{ kV}$$

Dengan demikian, pada tegangan 47.4 kV interval tegangan antara dua garis ekipotensial adalah sebesar:

$$\Delta U = 47.4 \text{ kV} - 42.66 \text{ kV} = 4.74 \text{ kV}$$

Nilai ΔU di antara dua garis ekipotensial pada level tegangan 47.4 kV ini berlaku pada semua segmen k. Oleh karena itu, nilai kuat medan maksimum sebenarnya pada konfigurasi objek uji ini untuk level tegangan 47.4 kV adalah:

$$E_{\text{maks}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{min}}} = \frac{4.74 \text{ kV}}{0.2 \text{ cm}} = 23.7 \text{ kV/cm}$$

Sedangkan nilai kuat medan minimum sebenarnya pada konfigurasi elektroda finial $\alpha_4 = 45^\circ$ dengan $D_2 = 4 \text{ cm}$ dan pelat awan untuk level tegangan tembus 47.4 kV adalah:

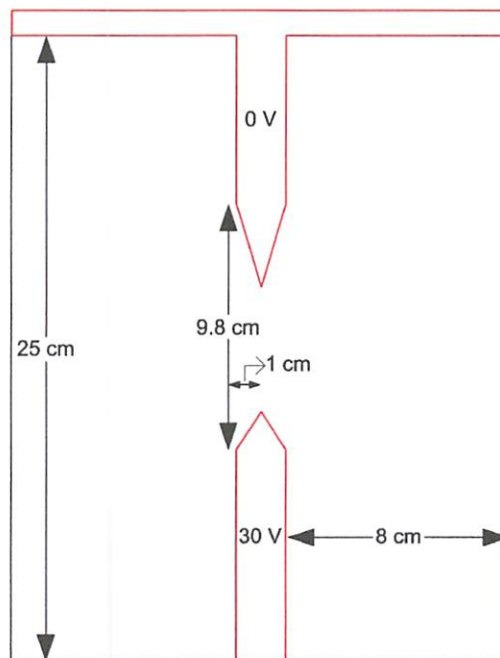
$$E_{\text{min}} = \frac{\Delta U}{\Delta x_{\text{maks}}} = \frac{4.74 \text{ kV}}{1.575 \text{ cm}} = 3.01 \text{ kV/cm}$$

4.4. Pemetaan Medan Listrik dengan Menggunakan Metode FDM

Salah satu metode pendekatan numerik yang digunakan untuk penggambaran distribusi medan listrik ialah FDM (*Finite Difference Method*). Pada skripsi ini persamaan *Central Difference* dipilih karena memiliki faktor kesalahan yang kecil. Sedangkan variabel independen yang akan dicari adalah potensial pada titik-titik yang belum diketahui dalam daerah luasan antara elektroda finial dan pelat awan dengan nilai potensial pada tepi luasan telah diketahui dari pengukuran metode kertas konduktif.

Sesuai dengan langkah analisis pada bab 3, untuk mempermudah perhitungan maka persamaan potensial dua dimensi dengan permitivitas seragam untuk diskritisasi segitiga yaitu persamaan 2-28 diselesaikan dengan bantuan *software* Matlab. Karena medan listrik pada luasan tersebut terdapat faktor kesimetrisan maka perhitungan dilakukan pada salah satu sisi saja (dipilih sisi sebelah kiri elektroda). Analisis data cukup dilakukan dengan menampilkan gambar bentuk distribusi garis ekipotensial saja karena hal tersebut sudah dapat mewakili distribusi medan listriknya dan nantinya dibandingkan dengan metode kertas konduktif. Pada metode ini, konfigurasi objek uji yang dipilih hanya dua yaitu untuk objek uji dengan $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan D_1 dan $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan D_2 .

4.4.1. Untuk Finial dengan $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm



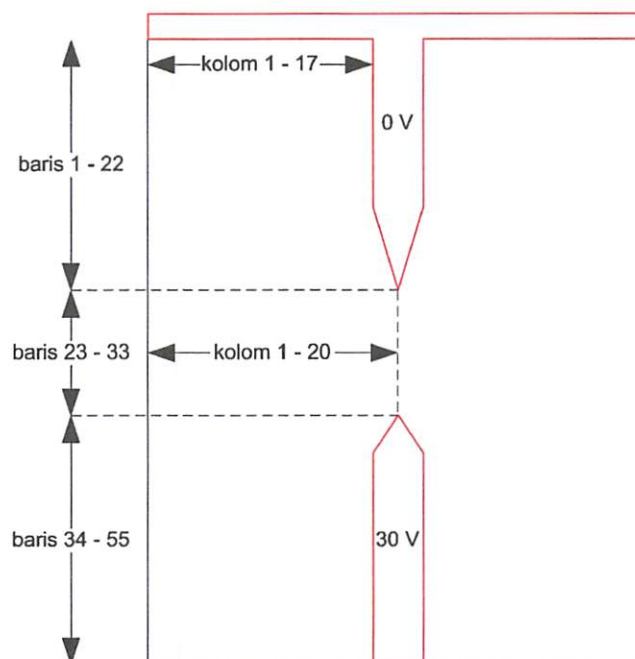
Gambar 4.9. Luasan daerah untuk finial dengan $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm

Gambar 4.9 memperlihatkan daerah yang akan dicari nilai-nilai potensialnya yang mempunyai luasan I dengan lebar 8 cm dari tepi elektroda dan panjang 25 cm dari tepi atas elektroda 0 V (pelat awan) sampai tepi bawah elektroda 30 V (finial) dan luasan II dengan lebar 1 cm dan panjang 9.8 cm. Pada Tabel 4.15 berikut diberikan hasil pengukuran nilai-nilai potensial pada tepi luasan dengan menggunakan kertas konduktif. Nilai-nilai potensial yang diukur disesuaikan dengan interval tegangan di antara dua garis ekipotensial yang berurutan yaitu sebesar 3 V, sehingga untuk $U_{DC} = 30\text{ V}$ dapat diukur 10 buah nilai potensial pada tepi luasan dari $U = 27\text{ V}$, 24 V hingga 3 V .

Tabel 4.15. Nilai-nilai potensial tepi luasan pada finial $\alpha_3 = 35^\circ$, $D_1 = 2\text{ cm}$

k	antara potensial	ΔU (V)	jarak pada tepi luasan (mm)	ΔU per 1 mm pada tepi luasan(V/mm)	jarak antara elektroda (mm)	ΔU per 1 mm antara elektroda (V/mm)
1	3 V - 0 V	3	23	0.130	2.75	1.09
2	6 V - 3 V	3	41	0.073	3.5	0.86
3	9 V - 6 V	3	37.5	0.080	6.25	0.48
4	12 V - 9 V	3	40.5	0.074	10	0.3
5	15 V - 12 V	3	40	0.075	6	0.5
6	18 V - 15 V	3	69	0.043	6.5	0.46
7	21 V - 18 V	3	36	0.083	6	0.5
8	24 V - 21 V	3	31	0.097	3.75	0.8
9	27 V - 24 V	3	18.5	0.162	3.25	0.92
10	30 V - 27 V	3	3.5	0.857	2	1.5

Dari Tabel 4.15 di atas dapat diketahui bahwa pada interval tegangan antara 30 V dan 27 V di tepi luasannya, mempunyai selisih tegangan sebesar 0.857 V per 1 mm-nya. Jadi nilai potensial tepi luasan pada interval 30 V – 27 V berkurang sebesar 0.857 V tiap 1 mm. Demikian pula pada interval tegangan yang lain. Karena faktor simetri, hanya dihitung daerah pada sisi kiri luasan. Dengan bentuk diskritisasi pada luasan ialah segitiga dan jarak antar titik h ditetapkan sebesar 5 mm, didapatkan jumlah baris dan kolom masing-masing sebanyak 55 buah dan 20 buah. Sehingga jumlah titik yang diperoleh adalah 55×20 . Apabila dimasukkan pada program komputer, dituliskan 55 buah baris dengan 20 buah kolom seperti pada Gambar 4.10 berikut.



Gambar 4.10. Jumlah titik untuk luasan daerah dengan diskritisasi segitiga pada finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_1 = 2 \text{ cm}$

Dengan menggunakan persamaan 2-28 pada setiap titik, didapatkan persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$\text{Pada titik ke-1 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,1)} + \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(0,2)} + \Phi_{(0,1)} + \Phi_{(1,0)} + \Phi_{(2,1)} + \Phi_{(2,2)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,1)} = (0 + 0 + 0 + 0.585 + 0 + 0) : 6 = 0.0975 \text{ V}$$

$$\text{Pada titik ke-2 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(0,3)} + \Phi_{(0,2)} + \Phi_{(1,1)} + \Phi_{(2,2)} + \Phi_{(2,3)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,2)} = (0 + 0 + 0 + 0.0975 + 0 + 0) : 6 = 0.01625 \text{ V}$$

$$\text{Pada titik ke-3 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(1,4)} + \Phi_{(0,4)} + \Phi_{(0,3)} + \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(2,3)} + \Phi_{(2,4)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,3)} = (0 + 0 + 0 + 0.01625 + 0 + 0) : 6 = 0.002708 \text{ V}$$

$$\text{Pada titik ke-4 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,4)} + \Phi_{(1,5)} + \Phi_{(0,5)} + \Phi_{(0,4)} + \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(2,4)} + \Phi_{(2,5)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,4)} = (0 + 0 + 0 + 0.002708 + 0 + 0) : 6 = 0.0004514 \text{ V}$$

Demikian pula berlaku untuk titik-titik yang lain. Dari perhitungan pada iterasi ke-1 tersebut diperoleh nilai-nilai potensial tiap-tiap titik berurutan sesuai dengan proses perhitungannya.

Nilai-nilai potensial yang diperoleh dari iterasi ke-1 dimasukkan pada perhitungan iterasi ke-2. Sehingga didapatkan persamaan-persamaan tiap-tiap titik yang berubah menjadi:

$$\text{Pada titik ke-1 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,1)} + \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(0,2)} + \Phi_{(0,1)} + \Phi_{(1,0)} + \Phi_{(2,1)} + \Phi_{(2,2)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,1)} = (0.01625 + 0 + 0 + 0.585 + 0.60125 + 0.11917) : 6$$

$$= 0.2203 \text{ V}$$

$$\text{Pada titik ke-2 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(0,3)} + \Phi_{(0,2)} + \Phi_{(1,1)} + \Phi_{(2,2)} + \Phi_{(2,3)}) = 0$$

$$\begin{aligned}\Phi_{(1,2)} &= (0.002708 + 0 + 0 + 0.2203 + 0.11917 + 0.023) : 6 \\ &= 0.0609 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\text{Pada titik ke-3 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(1,4)} + \Phi_{(0,4)} + \Phi_{(0,3)} + \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(2,3)} + \Phi_{(2,4)}) = 0$$

$$\begin{aligned}\Phi_{(1,3)} &= (0.0004514 + 0 + 0 + 0.0609 + 0.023 + 0.00436) : 6 \\ &= 0.01478 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\text{Pada titik ke-4 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,4)} + \Phi_{(1,5)} + \Phi_{(0,5)} + \Phi_{(0,4)} + \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(2,4)} + \Phi_{(2,5)}) = 0$$

$$\begin{aligned}\Phi_{(1,4)} &= (0.0000752 + 0 + 0 + 0.01478 + 0.00436 + 0.000814) : 6 \\ &= 0.00334 \text{ V}\end{aligned}$$

Demikian pula berlaku untuk titik-titik yang lain.

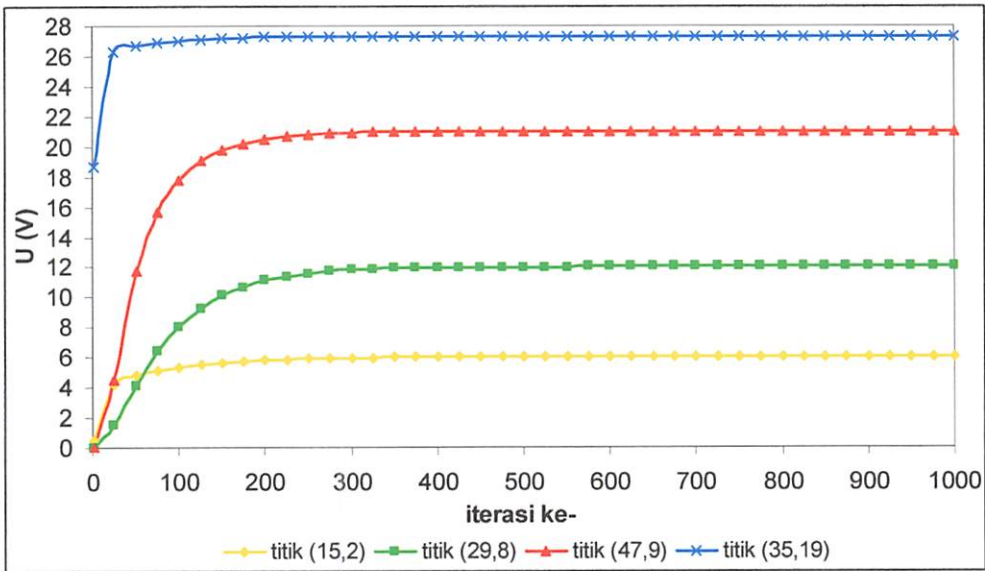
Selanjutnya nilai-nilai potensial yang diperoleh dari iterasi ke-2 dimasukkan pada iterasi ke-3 dengan proses perhitungan yang sama. Proses iterasi ini berlangsung terus hingga selisih perhitungan yang diinginkan sudah tercapai (0) atau sudah konvergen. Dari hasil perhitungan dengan menggunakan metode FDM maka ditampilkan data-data berupa nilai potensial tiap titik untuk setiap iterasi hingga mencapai nilai yang konvergen. Dikarenakan banyaknya titik yang dicari, maka pada skripsi ini ditampilkan beberapa titik yang memberikan nilai akhir potensial mendekati nilai U dengan ΔU yang diinginkan yaitu 6 V, 12 V, 21 V dan 27 V. Nilai-nilai potensial pada titik-titik tersebut dapat dilihat pada tabel konvergensi berikut ini.

**Tabel 4.16. Konvergensi iterasi perhitungan potensial di titik (15,2), (29,8), (47,9)
dan (35,19) untuk $\alpha_3 = 35^\circ$, $D_1 = 2\text{ cm}$**

iterasi	U $\approx$ 6 V		U $\approx$ 12 V		U $\approx$ 21 V		U $\approx$ 27 V	
ke-	pada	selisih	pada	selisih	pada	selisih	pada	selisih
	titik	(V)	titik	(V)	titik	(V)	titik	(V)
	(15,2)		(29,8)		(47,9)		(35,19)	
1	0.47367		0.000372		0.000162		18.672	
25	4.2416	3.76793	1.4842	1.48383	4.5257	4.52554	26.331	7.659
50	4.8034	0.5618	4.1577	2.6735	11.726	7.2003	26.682	0.351
75	5.09	0.2866	6.3784	2.2207	15.623	3.897	26.889	0.207
100	5.3053	0.2153	8.0364	1.658	17.78	2.157	27.034	0.145
125	5.477	0.1717	9.238	1.2016	19.026	1.246	27.133	0.099
150	5.6119	0.1349	10.09	0.852	19.769	0.743	27.2	0.067
175	5.7156	0.1037	10.685	0.595	20.222	0.453	27.245	0.045
200	5.7938	0.0782	11.096	0.411	20.503	0.281	27.275	0.03
225	5.8518	0.058	11.38	0.284	20.681	0.178	27.295	0.02
250	5.8942	0.0424	11.574	0.194	20.794	0.113	27.309	0.014
275	5.9249	0.0307	11.708	0.134	20.867	0.073	27.318	0.009
300	5.9468	0.0219	11.799	0.091	20.915	0.048	27.324	0.006
325	5.9624	0.0156	11.861	0.062	20.946	0.031	27.328	0.004
350	5.9734	0.011	11.904	0.043	20.967	0.021	27.331	0.003
375	5.9811	0.0077	11.933	0.029	20.98	0.013	27.333	0.002
400	5.9865	0.0054	11.953	0.02	20.99	0.01	27.334	0.001
425	5.9902	0.0037	11.967	0.014	20.996	0.006	27.335	0.001
450	5.9928	0.0026	11.976	0.009	21	0.004	27.335	0
475	5.9946	0.0018	11.983	0.007	21.003	0.003	27.336	0.001
500	5.9959	0.0013	11.987	0.004	21.005	0.002	27.336	0

525	5.9967	0.0008	11.99	0.003	21.006	0.001	27.336	0
550	5.9973	0.0006	11.992	0.002	21.007	0.001	27.336	0
575	5.9977	0.0004	11.993	0.001	21.007	0	27.336	0
600	5.998	0.0003	11.994	0.001	21.008	0.001	27.336	0
625	5.9982	0.0002	11.995	0.001	21.008	0	27.336	0
650	5.9983	0.0001	11.995	0	21.008	0	27.337	0.001
675	5.9984	1E-04	11.996	0.001	21.008	0	27.337	0
700	5.9985	1E-04	11.996	0	21.008	0	27.337	0
725	5.9985	0	11.996	0	21.008	0	27.337	0
750	5.9986	1E-04	11.996	0	21.008	0	27.337	0
775	5.9986	0	11.996	0	21.008	0	27.337	0
800	5.9986	0	11.996	0	21.008	0	27.337	0
825	5.9986	0	11.996	0	21.009	0.001	27.337	0
850	5.9986	0	11.996	0	21.009	0	27.337	0
875	5.9986	0	11.996	0	21.009	0	27.337	0
900	5.9986	0	11.996	0	21.009	0	27.337	0
925	5.9986	0	11.996	0	21.009	0	27.337	0
950	5.9986	0	11.996	0	21.009	0	27.337	0
975	5.9986	0	11.996	0	21.009	0	27.337	0
1000	5.9986	0	11.996	0	21.009	0	27.337	0

Dengan menggunakan data pada Tabel 4.16, dapat dibuat grafik konvergensi iterasi perhitungan potensial pada titik (15,2), (29,8), (47,9) dan (35,19) seperti terlihat pada grafik di bawah ini.

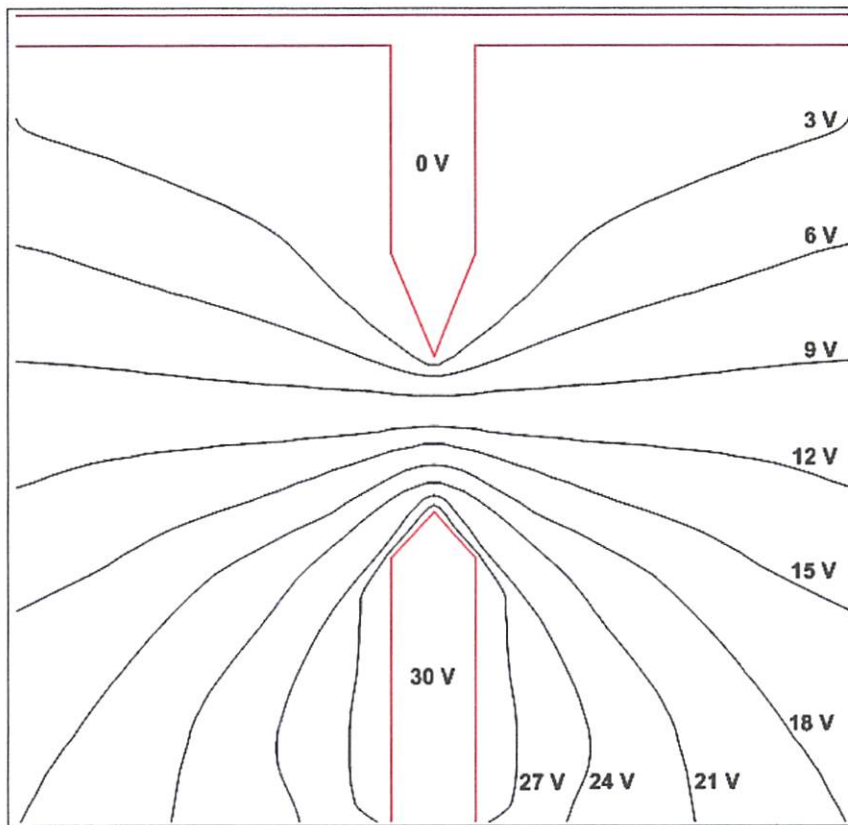


Grafik 4.23 Konvergensi iterasi perhitungan potensial menggunakan metode FDM untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm

Berdasarkan Tabel 4.16 dan grafik 4.23 dapat diketahui bahwa nilai potensial pada titik (15,2) sudah mencapai selisih perhitungan yang diinginkan pada iterasi 775 dengan $U = 5.9986$ V, sedangkan nilai potensial pada titik (29,8), (47,9) dan (35,19) telah konvergen pada (iterasi ke-, nilai akhir U) berturut-turut (700, 11.996 V), (850, 21.009 V) dan (675, 27.337 V). Sehingga hal tersebut menunjukkan bahwa untuk mendapatkan nilai potensial setiap titik yang konvergen pada perhitungan dengan jumlah titik yang banyak, tidak bisa dicapai pada jumlah iterasi yang sama.

Garis-garis ekuipotensial secara aproksimasi dapat diplot menggunakan data nilai-nilai potensial yang telah didapatkan dengan menghubungkan titik-titik yang mempunyai nilai potensial sama pada luasan tersebut dan memiliki interval tegangan sebesar 3 V. Hasil penggambaran distribusi garis-garis ekuipotensial pada

konfigurasi objek uji finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan $D_1 = 2$ cm dan pelat awan secara aproksimasi dengan menggunakan metode FDM ditunjukkan pada gambar berikut ini.



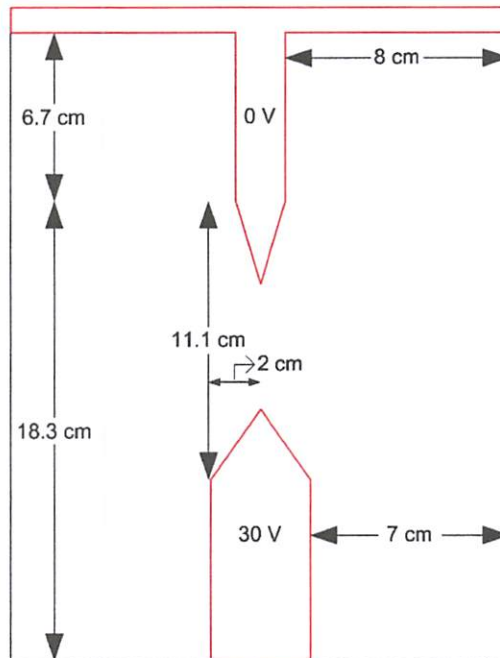
Gambar 4.11. Distribusi garis ekipotensial dengan interval 3 V menggunakan metode FDM untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm

Berdasarkan Gambar 4.11, terlihat bahwa distribusi garis ekipotensial yang dihasilkan menggunakan metode FDM memiliki kesamaan dengan Gambar 4.3 yaitu jarak Δx pada selanya yang lebih rapat di daerah dekat ujung elektroda dan lebih lebar pada tengah-tengah luasan. Garis ekipotensial 3 V, 6 V dan 27 V terhadap daerah permukaan elektroda 0 V dan 30 V pada gambar di atas lebih

renggang bila dibandingkan dengan Gambar 4.3 namun nilai Δx pada setiap interval tegangannya tidak berubah seperti terlihat pada Tabel 4.9 Secara keseluruhan, bentuk distribusi medan listrik yang dihasilkan pada konfigurasi finial ini menggunakan metode FDM ialah non-homogen.

4.4.2. Untuk Finial dengan $\alpha_1 = 35^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

Pada gambar berikut ini ditunjukkan bentuk luasan daerah pada konfigurasi finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm.



Gambar 4.12 Luasan daerah untuk finial dengan $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

Dari Gambar 4.12 ditunjukkan daerah yang akan dicari nilai-nilai potensialnya yang mempunyai tiga buah luasan yaitu luasan I dengan lebar 8 cm dari tepi elektroda dan panjang 6.7 cm dari tepi atas elektroda 0 V (pelat awan), luasan II dengan lebar 7 cm dan panjang 18.3 cm dan luasan III dengan lebar 2 cm dan panjang 11.1 cm dari tepi bawah elektroda 30 V (finial). Pada Tabel 4.17

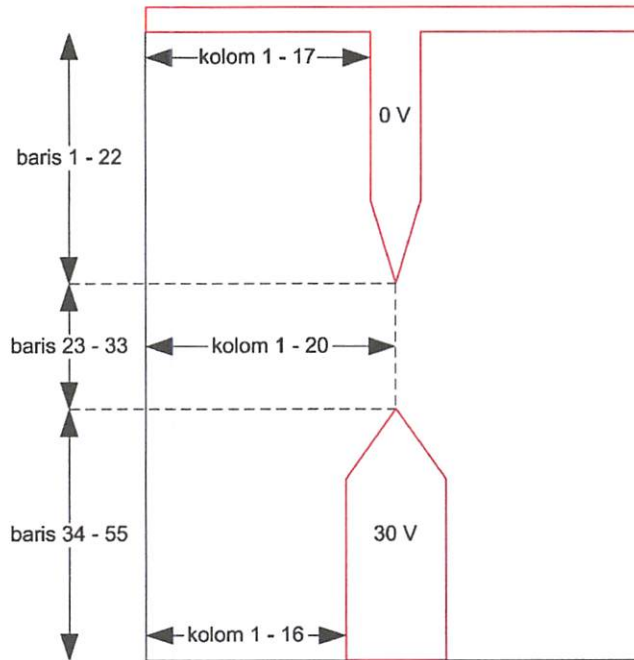
berikut, diberikan hasil pengukuran nilai-nilai potensial pada tepi luasan tersebut dengan menggunakan kertas konduktif.

Tabel 4.17 Nilai-nilai potensial tepi luasan pada finial $\alpha_3 = 35^\circ$, $D_2 = 4\text{ cm}$

k	antara potensial	ΔU (V)	jarak pada tepi luasan (mm)	ΔU per 1 mm pada tepi luasan(V/mm)	jarak antara elektroda (mm)	ΔU per 1 mm antara elektroda (V/mm)
1	3 V - 0 V	3	19	0.158	2.25	1.33
2	6 V - 3 V	3	37	0.081	2.5	1.2
3	9 V - 6 V	3	36.5	0.082	3.5	0.86
4	12 V - 9 V	3	34.5	0.087	13.25	0.23
5	15 V - 12 V	3	36	0.083	12.5	0.24
6	18 V - 15 V	3	42	0.071	6	0.5
7	21 V - 18 V	3	64	0.047	3	1
8	24 V - 21 V	3	36	0.083	2.75	1.09
9	27 V - 24 V	3	22	0.136	2.5	1.2
10	30 V - 27 V	3	4	0.750	1.75	1.71

Dari Tabel 4.17 di atas dapat diketahui bahwa pada interval tegangan antara 30 V dan 27 V di tepi luasannya, mempunyai selisih tegangan sebesar 0.75 V per 1 mm-nya. Jadi nilai potensial tepi luasan pada interval 30 V – 27 V berkurang sebesar 0.75 V tiap 1 mm. Demikian pula pada interval tegangan yang lain. Karena faktor simetri, hanya dihitung daerah pada sisi kiri luasan. Dengan bentuk diskritisasi pada luasan ialah segitiga dan jarak antar titik h ditetapkan sebesar 5 mm, didapatkan jumlah baris dan kolom masing-masing sebanyak 55

buah dan 20 buah. Sehingga jumlah titik yang diperoleh adalah 55×20 . Apabila dimasukkan pada program komputer, dituliskan 55 buah baris dengan 20 buah kolom seperti pada Gambar 4.13 berikut.



Gambar 4.13. Jumlah titik untuk luasan daerah dengan diskritisasi segitiga pada finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_2 = 4 \text{ cm}$

Dengan menggunakan persamaan 2-28 pada setiap titik, didapatkan persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$\text{Pada titik ke-1 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,1)} + \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(0,2)} + \Phi_{(0,1)} + \Phi_{(1,0)} + \Phi_{(2,1)} + \Phi_{(2,2)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,1)} = (0 + 0 + 0 + 0.711 + 0 + 0) : 6 = 0.1185 \text{ V}$$

$$\text{Pada titik ke-2 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(0,3)} + \Phi_{(0,2)} + \Phi_{(1,1)} + \Phi_{(2,2)} + \Phi_{(2,3)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,2)} = (0 + 0 + 0 + 0.1185 + 0 + 0) : 6 = 0.01975 \text{ V}$$

$$\text{Pada titik ke-3 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(1,4)} + \Phi_{(0,4)} + \Phi_{(0,3)} + \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(2,3)} + \Phi_{(2,4)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,3)} = (0 + 0 + 0 + 0.01975 + 0 + 0) : 6 = 0.0033 \text{ V}$$

$$\text{Pada titik ke-4 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,4)} + \Phi_{(1,5)} + \Phi_{(0,5)} + \Phi_{(0,4)} + \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(2,4)} + \Phi_{(2,5)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,4)} = (0 + 0 + 0 + 0.0033 + 0 + 0) : 6 = 0.00055 \text{ V}$$

Demikian pula berlaku untuk titik-titik yang lain. Dari perhitungan pada iterasi ke-1 tersebut diperoleh nilai-nilai potensial tiap-tiap titik berurutan sesuai dengan proses perhitungannya.

Nilai-nilai potensial yang diperoleh dari iterasi ke-1 dimasukkan pada perhitungan iterasi ke-2. Sehingga didapatkan persamaan-persamaan tiap-tiap titik yang berubah menjadi:

$$\text{Pada titik ke-1 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,1)} + \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(0,2)} + \Phi_{(0,1)} + \Phi_{(1,0)} + \Phi_{(2,1)} + \Phi_{(2,2)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,1)} = (0.01975 + 0 + 0 + 0.711 + 0.731 + 0.145) : 6 = 0.2678 \text{ V}$$

$$\text{Pada titik ke-2 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(0,3)} + \Phi_{(0,2)} + \Phi_{(1,1)} + \Phi_{(2,2)} + \Phi_{(2,3)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,2)} = (0.0033 + 0 + 0 + 0.2678 + 0.145 + 0.028) : 6 = 0.074 \text{ V}$$

$$\text{Pada titik ke-3 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(1,4)} + \Phi_{(0,4)} + \Phi_{(0,3)} + \Phi_{(1,2)} + \Phi_{(2,3)} + \Phi_{(2,4)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,3)} = (0.00055 + 0 + 0 + 0.074 + 0.028 + 0.0053) : 6 = 0.018 \text{ V}$$

$$\text{Pada titik ke-4 : } \frac{1}{(5)^2} (-6 \Phi_{(1,4)} + \Phi_{(1,5)} + \Phi_{(0,5)} + \Phi_{(0,4)} + \Phi_{(1,3)} + \Phi_{(2,4)} + \Phi_{(2,5)}) = 0$$

$$\Phi_{(1,4)} = (0.00009 + 0 + 0 + 0.018 + 0.0053 + 0.001) : 6 = 0.004 \text{ V}$$

Demikian pula berlaku untuk titik-titik yang lain.

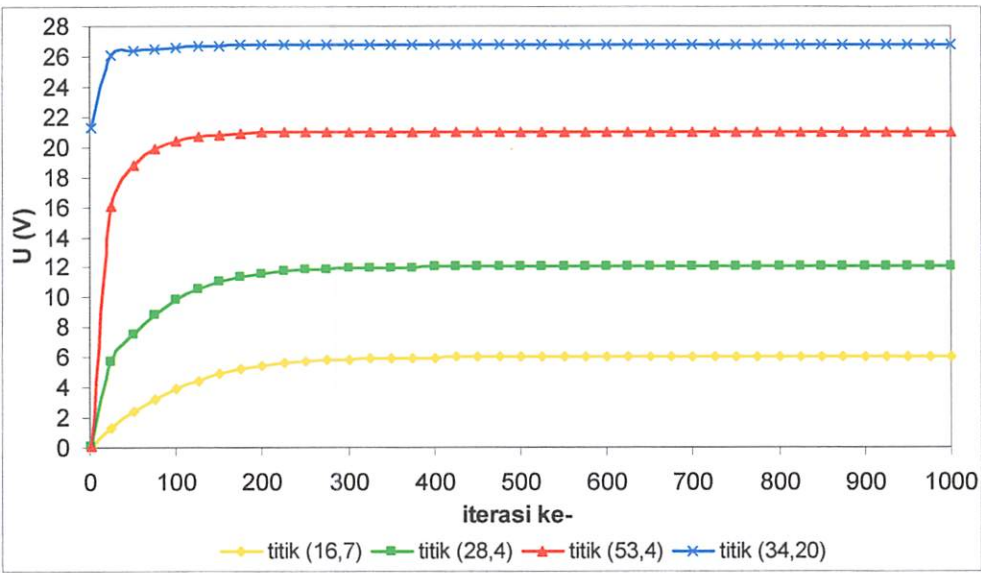
Selanjutnya nilai-nilai potensial yang diperoleh dari iterasi ke-2 dimasukkan pada iterasi ke-3 dengan proses perhitungan yang sama. Proses iterasi ini berlangsung terus hingga selisih perhitungan yang diinginkan sudah tercapai (0) atau sudah konvergen. Dikarenakan banyaknya titik yang dicari, maka hanya ditampilkan beberapa titik yang memberikan nilai akhir potensial mendekati nilai U dengan ΔU yang diinginkan yaitu 6 V, 12 V, 21 V dan 27 V. Nilai potensial pada titik-titik tersebut dapat dilihat di tabel konvergensi berikut ini.

Tabel 4.18. Konvergensi iterasi perhitungan potensial di titik (16,7), (28,4), (53,4) dan (34,20) untuk $\alpha_3 = 35^\circ$, $D_2 = 4$ cm

iterasi ke-	$U \approx 6$ V pada titik (16,7)	selisih (V)	$U \approx 12$ V pada titik (28,4)	selisih (V)	$U \approx 21$ V pada titik (53,4)	selisih (V)	$U \approx 27$ V pada titik (34,20)	selisih (V)
1	0.00146		0.13158		0.11878		21.305	
25	1.2816	1.28014	5.7363	5.60472	16.042	15.9232	26.11	4.805
50	2.3818	1.1002	7.556	1.8197	18.793	2.751	26.362	0.252
75	3.2172	0.8354	8.8421	1.2861	19.887	1.094	26.516	0.154
100	3.9013	0.6841	9.814	0.9719	20.4	0.513	26.622	0.106
125	4.4482	0.5469	10.512	0.698	20.661	0.261	26.692	0.07
150	4.8717	0.4235	10.997	0.485	20.802	0.141	26.737	0.045
175	5.191	0.3193	11.329	0.332	20.881	0.079	26.766	0.029
200	5.4263	0.2353	11.554	0.225	20.926	0.045	26.786	0.02
225	5.5968	0.1705	11.707	0.153	20.953	0.027	26.798	0.012
250	5.7185	0.1217	11.809	0.102	20.969	0.016	26.806	0.008
275	5.8045	0.086	11.878	0.069	20.98	0.011	26.812	0.006
300	5.8647	0.0602	11.925	0.047	20.986	0.006	26.815	0.003
325	5.9065	0.0418	11.956	0.031	20.99	0.004	26.818	0.003
350	5.9354	0.0289	11.977	0.021	20.993	0.003	26.819	0.001
375	5.9553	0.0199	11.992	0.015	20.995	0.002	26.82	0.001
400	5.969	0.0137	12.001	0.009	20.996	0.001	26.821	0.001
425	5.9783	0.0093	12.008	0.007	20.996	0	26.821	0

450	5.9847	0.0064	12.012	0.004	20.997	0.001	26.822	0.001
475	5.989	0.0043	12.015	0.003	20.997	0	26.822	0
500	5.992	0.003	12.017	0.002	20.997	0	26.822	0
525	5.994	0.002	12.019	0.002	20.998	0.001	26.822	0
550	5.9954	0.0014	12.02	0.001	20.998	0	26.822	0
575	5.9963	0.0009	12.02	0	20.998	0	26.822	0
600	5.997	0.0007	12.021	0.001	20.998	0	26.822	0
625	5.9974	0.0004	12.021	0	20.998	0	26.822	0
650	5.9977	0.0003	12.021	0	20.998	0	26.822	0
675	5.9979	0.0002	12.021	0	20.998	0	26.822	0
700	5.998	0.0001	12.021	0	20.998	0	26.822	0
725	5.9981	1E-04	12.021	0	20.998	0	26.822	0
750	5.9982	1E-04	12.021	0	20.998	0	26.822	0
775	5.9982	0	12.021	0	20.998	0	26.822	0
800	5.9982	0	12.021	0	20.998	0	26.822	0
825	5.9982	0	12.022	0.001	20.998	0	26.822	0
850	5.9983	0.0001	12.022	0	20.998	0	26.822	0
875	5.9983	0	12.022	0	20.998	0	26.822	0
900	5.9983	0	12.022	0	20.998	0	26.822	0
925	5.9983	0	12.022	0	20.998	0	26.822	0
950	5.9983	0	12.022	0	20.998	0	26.822	0
975	5.9983	0	12.022	0	20.998	0	26.822	0
1000	5.9983	0	12.022	0	20.998	0	26.822	0

Dengan menggunakan data pada Tabel 4.18, dapat dibuat grafik konvergensi iterasi perhitungan potensial pada titik (16,7), (28,4), (53,4) dan (34,20) seperti terlihat pada grafik di bawah ini.

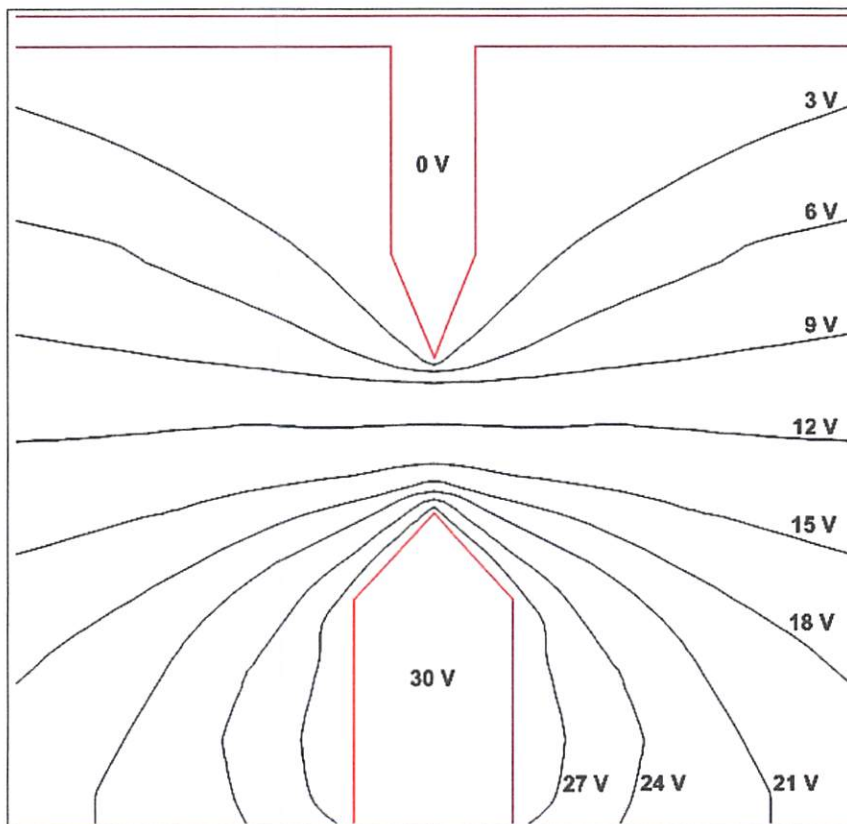


Grafik 4.24 konvergensi iterasi perhitungan potensial menggunakan metode FDM untuk $\alpha_3 = 35^0$ dan $D_2 = 4\text{ cm}$

Berdasarkan Tabel 4.18 dan Gambar 4.24 dapat diketahui bahwa nilai potensial pada titik (16,7) sudah mencapai selisih perhitungan yang diinginkan pada iterasi 875 dengan $U = 5.9983\text{ V}$, sedangkan nilai potensial pada titik (28,4), (53,4) dan (34,20) telah konvergen pada (iterasi ke-, nilai akhir U) berturut-turut (850, 12.022 V), (550, 20.998 V) dan (475, 26.822 V). Sehingga hal tersebut menunjukkan bahwa untuk mendapatkan nilai potensial setiap titik yang konvergen pada perhitungan dengan jumlah titik yang banyak, tidak bisa dicapai pada jumlah iterasi yang sama.

Garis-garis ekipotensial secara aproksimasi dapat diplot menggunakan data nilai-nilai potensial yang telah didapatkan dengan menghubungkan titik-titik yang mempunyai nilai potensial sama pada luasan tersebut dan memiliki interval tegangan sebesar 3 V. Hasil penggambaran distribusi garis-garis ekipotensial pada

konfigurasi objek uji finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dengan $D_2 = 4$ cm dan pelat awan secara aproksimasi dengan menggunakan metode FDM ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar 4.14. Distribusi garis ekuipotensial dengan interval 3 V menggunakan metode FDM untuk $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm

Berdasarkan Gambar 4.14, terlihat bahwa distribusi garis ekuipotensial yang dihasilkan menggunakan metode FDM memiliki kesamaan dengan Gambar 4.7 yaitu jarak Δx pada selanya yang lebih rapat di daerah dekat ujung elektroda finial maupun pelat awan dan lebih lebar pada tengah-tengah luasan. Garis

ekipotensial 3 V, 6 V dan 27 V terhadap daerah permukaan elektroda 0 V dan 30 V pada gambar di atas lebih renggang bila dibandingkan dengan Gambar 4.7 namun nilai Δx pada setiap interval tegangannya tidak berubah seperti terlihat pada Tabel 4.13. Secara keseluruhan, bentuk distribusi medan listrik yang dihasilkan pada konfigurasi finial ini menggunakan metode FDM ialah non-homogen.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Semakin besar sudut keruncingan finial α , maka nilai tegangan korona U_c semakin besar pula. Nilai tegangan korona terkecil diperoleh pada konfigurasi finial ($\alpha_1 = 15^\circ$, $D_2 = 4$ cm) dengan $s = 20$ mm yaitu sebesar $U_c = 14.433$ kV. Sedangkan nilai tegangan korona terbesar diperoleh pada konfigurasi finial ($\alpha_4 = 45^\circ$, $D_1 = 2$ cm) dengan $s = 50$ mm yaitu sebesar $U_c = 27.233$ kV.

Nilai tegangan tembus U_d paling kecil diperoleh untuk sudut keruncingan $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm dengan nilai tegangan tembus terkecilnya diperoleh pada (s) = 20 mm sebesar $U_d = 15.467$ kV sehingga dapat disimpulkan penangkap petir dengan sudut keruncingan 35° mempunyai kemampuan menangkap petir lebih baik daripada sudut lainnya. Sedangkan kemampuan menangkap petir terendah diperoleh pada finial $\alpha_4 = 45^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm dengan nilai tegangan tembus terbesarnya diperoleh pada $s = 50$ mm sebesar $U_d = 47.4$ kV. Semakin besar diameter finial, maka nilai tegangan korona U_c semakin kecil sedangkan nilai tegangan tembusnya U_d semakin besar. Dengan demikian diperoleh nilai tegangan tembus untuk diameter $D_1 = 2$ cm lebih kecil dari $D_2 = 4$ cm.

Dari pemetaan medan listrik dengan kertas konduktif didapatkan bentuk distribusi medan listrik yang dihasilkan untuk setiap objek finial adalah non-homogen dengan nilai efisiensi medan listrik $\eta < 1$. Semakin besar sudut keruncingan finial maka E_{maks} -nya semakin kecil dan nilai efisiensi medan

listriknya η semakin besar. Sedangkan bila diameter finial diperbesar maka didapatkan nilai E_{maks} yang semakin besar dan nilai efisiensi medan listriknya η semakin kecil. E_{maks} tertinggi diperoleh pada finial $\alpha_1 = 15^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm sebesar $E_{maks} = 46.47$ kV/cm. Sedangkan E_{maks} terkecil diperoleh pada finial $\alpha_1 = 45^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm sebesar $E_{maks} = 18.756$ kV/cm.

Semakin diperbesar sudut keruncingan finial maka diperoleh nilai efisiensi medan listrik η $\alpha_3 = 35^\circ$ lebih kecil dari $\alpha_1 = 15^\circ$, $\alpha_2 = 25^\circ$ dan $\alpha_4 = 45^\circ$, sehingga pada sudut finial 35° diperoleh bentuk distribusi medan listrik paling non-homogen diantara sudut finial lainnya.

Semakin besar diameter batang finial maka nilai efisiensi medan listriknya η semakin besar sehingga menyebabkan distribusi medan listrik pada diameter D_2 lebih homogen daripada diameter D_1 . Pada jarak sela $s = 50$ mm, nilai η terkecil diperoleh pada finial $\alpha_3 = 35^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm sebesar $\eta = 0.4942$, sedangkan nilai η terbesar diperoleh pada finial $\alpha_4 = 45^\circ$ dan $D_2 = 4$ cm sebesar $\eta = 0.5922$.

Dari hasil pemetaan medan listrik dengan metode numerik FDM diperoleh: Bentuk distribusi garis ekipotensial yang dihasilkan adalah sama dengan metode kertas konduktif yaitu non-homogen dengan jarak Δx pada selanya yang lebih rapat di daerah dekat ujung elektroda finial maupun pelat awan dan lebih lebar pada tengah-tengah luasan. Jika dibandingkan kedua metode tersebut, nilai Δx pada setiap interval tegangannya tidak berubah.

Nilai potensial setiap titik yang konvergen pada perhitungan dengan jumlah titik yang banyak tidak bisa dicapai pada jumlah iterasi yang sama.

5.2. Saran

1. Perlunya penambahan jumlah sudut keruncingan finial dan diameter batang finial agar data dan analisis pengujian semakin akurat.
2. Perlunya pembahasan mengenai distribusi medan listrik tiga dimensi dengan menggunakan metode numerik lainnya seperti FEM (*Finite Element Method*).

DAFTAR PUSTAKA

1. Alonso, Finn, Marcelo. Edward, J : 1967. *Fundamental University Physics Vol. 2 Fields and Waves*. Addison-Wesley Publishing.
2. Anonim tanpa tahun : *How lightning works* <http://www.Howstuffworks.com/PositiveStreamersandExplodingAir.html> Akses tanggal 6 Januari 2009 pukul 22.30 WIB
3. Anonim. 1983. *Pedoman Perencanaan Penangkal Petir*. Bandung: Direktorat penyelidikan masalah bangunan Indonesia.
4. Anonim. 2002(Villanova University). *Modeling Corona*.
<http://www.ece.villanova.edu/ion/p61.html>. akses tanggal 10 Januari 2009 pukul 21.20 WIB
5. Anonim. 2004. *Electric Field Lines and Equipotential Surfaces*.
<http://www.physics.bu.edu/ulab/intro2/efield.pdf>, akses tanggal 3 Januari 2009 pukul 11.00 WIB.
6. Hayt ,H Jr., William, and The Houw Liong. 1991. *Elektromagnetika Teknologi Edisi Keempat Jilid 1*. Jakarta: PT. Erlangga.
7. Herbasuki, Teguh : *Diktat Teknik Tegangan dan Arus Tinggi* : 2008 Percetakan Fakultas Teknik ITN Malang
8. Hermagasantos. 1994. *Teknik Tegangan Tinggi, Teori dan Pegangan untuk Laboratorium*. Jakarta: PT. Rosda Jayaputra.
9. Kind, D. 1993. *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi* (Terjemahan KT. Sirait). Bandung: Penerbit ITB.
10. (Milis Fisika Indonesia / MFI : Mei 2004)
11. Moch. Dhofir. 1997. *Diktat Gejala Medan Tinggi Jilid I dan II*. Malang: Percetakan Fakultas Teknik Unibraw.
12. Salam, M. A. 2000. *High Voltage Engineering, theory and practice*. New York: Marcel Dekker Inc.
13. Thom,A and C.J Apelt : *Field Computations in engineering and physics*. London : D Van nostrand 1961

14. Tom Henderson. 1996. *Electric Fields and Conductors*.
<http://www.glenbrook.k12.il.us/gbssci/phys/class/estatics/u8l4d.html>,
akses tanggal 9 Januari 2009 pukul 11.25 WIB.
15. Uman A, M. 1969. *Lightning*. New York: McGraw-Hill.
16. Yohanes Surya 1996 : 19. *Electrical engineering* . Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
17. Zhou, Pei-bai. 1993. *Numerical Analysis of Electromagnetic Fields*. Berlin: Springer-Verlag.

LAMPIRAN



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK

BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

1. **Nama** : Rio Adi Prasetyo
2. **NIM** : 03.12.018
3. **Jurusan** : Teknik Elektro S-1
4. **Konsentrasi** : Teknik Energi Listrik
5. **Judul Skripsi** : Analisis Pengaruh Sudut Keruncingan dan Diameter *Finial Franklin* Terhadap distribusi Medan Listrik dan Tingkat Tegangan Tembus dengan Pendekatan Numerik

Dipertahankan dihadapan Majelis Penguji Skripsi Jenjang Strata Satu (S-1) pada :

Hari : Sabtu

Tanggal : 14 Maret 2009

Dengan Nilai : 79,27 (B+) *By*



(Ir. H. Sidik Noertjahjono, MT)
NIP. Y. 1028700163

Panitia Ujian Skripsi

Sekretaris

(Ir. F Yudi Limpraptono, MT)
NIP. Y. 1039500274

Anggota Penguji

Penguji I

(Ir. H Taufik Hidayat, MT)
NIP. Y. 10187000151

Penguji II

(Ir. Abdul Hamid, MT)
NIP. Y. 1018800188



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK

PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

Dari hasil ujian skripsi Jurusan Teknik Elektro jenjang strata satu (S-1)
yang diselenggarakan pada :

Hari : Sabtu
Tanggal : 14 Maret 2009

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

1. Nama : Rio Adi Prasetyo
2. NIM : 03.12.018
3. Jurusan : Teknik Elektro S-1
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
5. Judul Skripsi : "ANALISIS PENGARUH SUDUT KERUNCINGAN
DAN DIAMETER *FINIAL FRANKLIN* TERHADAP
DISTRIBUSI MEDAN LISTRIK DAN TINGKAT
TEGANGAN TEMBUS DENGAN PENDEKATAN
NUMERIK "

Perbaikan meliputi :

No	Materi Perbaikan	Ket.
1.	Ditambahkan materi dari halaman 72 sd 140 yang selanjutnya ditambahkan dalam kesimpulan. ✓	
2.	Hendaknya pemilihan penangkal petir didasarkan pada faktor – faktor yang dibahas (tegangan tembus, tegangan korona, distribusi medan listrik) kemudian disimpulkan. ✓	

Anggota Penguji

Penguji pertama

(Ir. Taufik Hidayat, MT)
NIP.Y. 10187000151

Dosen Pembimbing I

(Ir. Teguh Herbasuki, MT)
NIP.Y. 1038900209

Penguji kedua

(Ir. Abdul Hamid, MT)
NIP.Y. 1018800188

Dosen Pembimbing II

(Irrine Budi S, ST, MT)
NIP. 132314400



FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Rio Adi Prasetyo
Nim : 03.12.018
Masa Bimbingan : 10 Januari 2009 s/d 10 Juli 2009
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Sudut Keruncingan dan Diameter Finial Franklin Terhadap Distribusi Medan Listrik dan Tingkat Tegangan Tembus Dengan Pendekatan Numerik

NO	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1.	25/01/09	* Susunan ...	
2.	26/01/09	* ...	
3.	27/01/09	* ...	
4.	28/01/09	* ...	
5.	29/01/09	* ...	
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			

Malang,
Dosen pembimbing

Ir. Teguh Herbasuki, MT
NIP.1038900209



FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Rio Adi Prasetyo
Nim : 03.12.018
Masa Bimbingan : 10 Januari 2009 s/d 10 Juli 2009
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Sudut Keruncingan dan Diameter Finial Franklin Terhadap Distribusi Medan Listrik dan Tingkat Tegangan Tembus Dengan Pendekatan Numerik

NO	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1.	29/1/09	Perbaikan BAB I untuk susunan & kelengkapan sesuai berdasarkan pustaka.	
2.		BAB II : tambahkan metode kertas kopir & penulisan	
3.	4/2/09	BAB III - flowchart pengerjaan langkah pengerjaan	
4.	16/2/09	BAB IV tabel 1 & 2 hasil kopir & disempurnakan.	
5.		BAB V. kerangka & disempurnakan Analisa berdasarkan tabel 1 & 2	
6.		bab II Membuat gambar & perbaiki, kon. ot 2 & 3 bab 2.	
7.	26/2/09	Ace untuk bab Seminari hari	
8.			
9.			
10.			

Malang,
Dosen pembimbing

Irrine Budi S, ST, MT
NIP.132314400



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Formulir Perbaikan Ujian Skripsi

Dalam pelaksanaan Ujian Skripsi Janjang Strata 1 Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi T. Energi Listrik / T. Elektronika / T. Infokom, maka perlu adanya perbaikan skripsi untuk mahasiswa :

NAMA

NIM

Perbaikan meliputi

: Rio Adi Prashyo
: 0312018

- Para .

dibandingkan analisis dari Hal 72
Ed 140 yang selanjutnya ditambahkan
dalam kesimpulan .

Malang,

200

(_____)



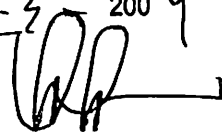
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Formulir Perbaikan Ujian Skripsi

Dalam pelaksanaan Ujian Skripsi Janjang Strata 1 Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi T. Energi Listrik / T. Elektronika / T. Infokom, maka perlu adanya perbaikan skripsi untuk mahasiswa :

NAMA : Rio Adi P
NIM : 0312018
Perbaikan meliputi :

- Haruskah pemilihan material paku didasarkan pd faktor yg dibahas (tg. tanbus; tg. Korona; Distribusi Medan dll)
- Dan disimpulkan.

Malang, 14-3-2009

(_____)



PERMOHONAN PERSETUJUAN SKRIPSI

Yang betanda tangan dibawah ini :

Nama : RIO ADI PRASETYO
NIM : 03.12.018
Semester : 11
Fakultas : Teknologi Industri
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : ~~TEKNIK ELEKTRONIKA~~
TEKNIK ENERGI LISTRIK
TEKNIK KOMPUTER DAN INFORMATIKA
Alamat : Jl. SUMBERSARI 292 C

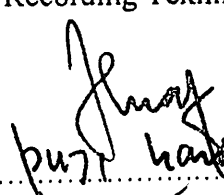
Dengan ini kami mengajukan permohonan untuk mendapatkan persetujuan untuk membuat *SKRIPSI Tingkat Sarjana*. Untuk melengkapi permohonan tersebut, bersama kami lampirkan persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi.

Adapun persyaratan-persyaratan pengambilan *SKRIPSI* adalah sebagai berikut :

1. Telah melaksanakan semua praktikum sesuai dengan konsentrasinya (.....)
2. Telah lulus dan menyerahkan Laporan Praktek Kerja (.....)
3. Telah lulus seluruh mata kuliah keahlian (MKB) sesuai konsentrasinya (.....)
4. Telah menempuh mata kuliah ≥ 134 sks dengan IPK ≥ 2 dan tidak ada nilai E (.....)
5. Telah mengikuti secara aktif kegiatan seminar skripsi yang diadakan Jurusan (.....)
6. Memenuhi persyaratan administrasi (.....)

Demikian permohonan ini untuk mendapatkan penyelesaian lebih lanjut dan atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Telah diteliti kebenaran data tersebut diatas
Recording Teknik Elektro


(..... Puji Handayani)

Malang, 14-11-2008
Pemohon


(..... RIO ADI PRASETYO)



LEMBAR PENGAJUAN JUDUL SKRIPSI JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1

Konsentrasi : Teknik Energi Listrik/Teknik Elektronika/Teknik Komputer & Informatika*)

1.	Nama Mahasiswa: <u>RIO ADI PRASETYO</u>	Nim:	
2.	Waktu Pengajuan	Tanggal:	Bulan: Tahun:
3.	Spesifikasi Judul (berilah tanda silang**) a. Sistem Tenaga Elektrik e. Elektronika & Komponen b. Energi & Konversi Energi f. Elektronika Digital & Komputer c. Tegangan Tinggi & Pengukuran x g. Elektronika Komunikasi d. Sistem Kendali Industri h. lainnya		
4.	Konsultasikan judul sesuai materi bidang ilmu kepada Dosen*) <u>Ir. Teguh Herbasuki, MT</u>	Ketua Jurusan <u>Ir. F. Yudi Limpraptono, MT</u> NIP. P. 1039500274	
5.	Judul yang diajukan mahasiswa:	<u>Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan & diameter Pinnael Franklin terhadap Distribusi medan listrik & tingkat tegangan tembus listrik ke rumah penduduk sekitarnya</u>	
6.	Perubahan judul yang disetujui Dosen sesuai materi bidang ilmu		
7.	Catatan:		
	Persetujuan Judul skripsi yang dikonsultasikan kepada Dosen materi bidang ilmu	Disetujui Dosen <u>01/12/2008</u> <u>Mr. Yudi Limpraptono</u>	

Perhatian:

1. Formulir pengajuan ini harap dikembalikan kepada jurusan paling lambat satu minggu setelah disetujui kelompok dosen keahlian dengan dilampirkan proposal skripsi beserta persyaratan skripsi sesuai form S-1
2. Keterangan: *) Coret yang tidak perlu
**) dilingkari a, b, c, ...atau g sesuai bidang keahlian



PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

PT. BNI (PERSERO) MALANG
BANK NIAGA MALANG

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

Malang, 14 Januari 2009

Nomor : ITN-617/I.TA/2/09
Lampiran : -
Perihal : BIMBINGAN SKRIPSI

Kepada : Yth. Sdr. **IR. TEGUH HERBASUKI, MT**
Dosen Institut Teknologi Nasional Malang

Dosen Pembimbing
Jurusan Teknik Elektro S-1
di
Malang

Dengan hormat
Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam Proposal Skripsi
Untuk Mahasiswa :

Nama : RIO ADI P
Nim : 0312018
Fakultas : Teknologi Industri
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

Maka dengan ini pembimbingan tersebut kami serahkan sepenuhnya
kepada Saudara/i selama masa waktu (enam) 6 bulan, terhitung mulai
tanggal :

10 Januari 2009 s/d 1 Juli 2009

Sebagai satu syarat untuk menempuh ujian Sarjana Teknik,
Jurusan Teknik Elektro S-1
Demikian agar maklum dan atas perhatian serta bantuannya kami sampaikan
terima kasih



Ketua Jurusan
Teknik Elektro S-1

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
Nip. Y. 1039500274

Tembusan Kepada Yth :

1. Mahasiswa Yang Bersangkutan
2. Arsip

Form. S 4a



PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

PT. BNI (PERSERO) MALANG
BANK NIAGA MALANG

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

Malang, 14 Januari 2009

Nomor : ITN-618/I.TA/2/09
Lampiran : -
Perihal : BIMBINGAN SKRIPSI

Kepada : Yth. Sdr./i. **IRRINE BUDI S, ST, MT**
Dosen Institut Teknologi Nasional Malang

Dosen Pembimbing
Jurusan Teknik Elektro S-1
di
Malang

Dengan hormat
Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam Proposal Skripsi
Untuk Mahasiswa :

Nama : RIO ADI P
Nim : 0312018
Fakultas : Teknologi Industri
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

Maka dengan ini pembimbingan tersebut kami serahkan sepenuhnya
kepada Saudara/i selama masa waktu (enam) 6 bulan, terhitung mulai
tanggal :

10 Januari 2009 s/d 1 Juli 2009

Sebagai satu syarat untuk menempuh ujian Sarjana Teknik,
Jurusan Teknik Elektro S-1
Demikian agar maklum dan atas perhatian serta bantuannya kami sampaikan
terima kasih



Ketua Jurusan
Teknik Elektro S-1

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
Nip. Y. 1039500274

Tembusan Kepada Yth :

1. Mahasiswa Yang Bersangkutan
2. Arsip

Form. S 4a