

Pengaruh Sudut Keruncingan Dan Diameter Finial Franklin Terhadap Distribusi Medan Listrik Dan Tingkat Tegangan Tembus

Harry Soekotjo Dachlan, Moch. Dhofir, Vico Fernanda

Abstrak – 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 penelitian 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 rendah.

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

I. PENDAHULUAN

Hingga saat ini bentuk penangkap petir yang telah digunakan ialah berupa susunan finial mendatar (sangkar faraday), susunan finial batang tegak atau finial elektrostatik, finial sistem *Ionization Corona*, maupun finial radioaktif yang semuanya berfungsi sebagai

Harry S. Dachlan dan Moch. Dhofir adalah dosen jurusan Teknik `Elektro Universitas Brawijaya Malang.

Vico Fernanda adalah asisten Lab.Teknik Tegangan Tinggi jurusan Teknik `Elektro UB

Ketiga penulis dapat dikontak di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang, Jl. MT. Haryono 167 Malang. Telp 0341554166

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 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. Pada finial Franklin, faktor keruncingan sangat menentukan distribusi medan listrik yang terjadi.

Hal tersebut dapat dijelaskan bahwa berdasarkan salah satu sifat konduktor 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. Dalam penelitian ini dibuat finial Franklin dengan jumlah variasi sudut keruncingan yang berbeda 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.

II. DASAR TEORI

A. 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 permukaan elektroda sehingga terjadi tembus di sekitar daerah elektroda tersebut. Korona diawali dengan adanya ionisasi dalam udara yaitu adanya kehilangan elektron dari molekul udara (Arismunandar, 1994). 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. Korona dipengaruhi oleh beberapa kondisi yaitu tekanan udara, bahan elektroda, adanya uap air di udara, photoionisasi dan tipe tegangan tinggi yang diterapkan (Hermagasantos, 1994:53). Sedangkan karakteristik korona tergantung pada tegangan, bentuk permukaan elektroda, dan kondisi permukaan (Hermagasantos, 1994:56).

Korona yang terjadi pada ujung permukaan penangkap petir merupakan jenis korona positif karena awan menginduksikan muatan positif yang terkonsentrasi pada ujung runcing finial petir dengan tipe tegangan petir ialah tegangan tinggi searah. Proses terjadinya korona ini yaitu proses *avalanche* akan menghasilkan ion-ion positif yang bergerak menuju elektroda negatif, sedangkan elektron-elektron bebas pada udara akan bergerak menuju elektroda korona yaitu ujung finial.

Nilai dari kuat medan listrik yang diperlukan untuk permulaan korona pada konduktor bergantung pada polaritas tegangan, tekanan dan temperatur udara disekitarnya (Salam, 2000:158). Berdasarkan hasil eksperimen, nilai kuat medan listrik korona dapat dirumuskan sebagai berikut (Salam, 2000:158):

Untuk AC:

$$E_0 = 30 \delta \quad (2-1)$$

Untuk DC:

$$E_{\pm} = A_{\pm} \delta + B_{\pm} \sqrt{\frac{\delta}{r}} \quad (2-2)$$

keterangan:

E_0, E_{\pm} = kuat medan listrik korona (kV/cm)

δ = faktor koreksi atau disebut

sebagai kerapatan udara relatif (0.9-1.1)

A_{+} dan B_{+} = 31-39.8 dan 11.8-8.4 (korona positif)

A_{-} dan B_{-} = 29.4-40.3 dan 9.9-7.3 (korona negatif)

r = jari-jari konduktor (cm)

B. Tegangan Tembus pada Berbagai Kondisi Atmosfer

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

$$U_d = 0,289 \frac{p}{273 + t} \hat{U}_{d0} \quad (2-3)$$

keterangan:

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

C. 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.

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

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \quad (2-4)$$

Kuat medan listrik dalam elektroda ialah:

$$\mathbf{E} = k \frac{Q}{r^2} \hat{a}_r \quad (2-5)$$

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. 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:

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta x} \quad (2-6)$$

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)

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:

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maks}} \quad (2-7)$$

Pada Gambar 2.2.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.

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

$$U_d = E_d \times s \times \eta \quad (2-8)$$

keterangan:

U_d = tegangan tembus pada susunan elektroda (kV)

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

s = jarak sela (cm)

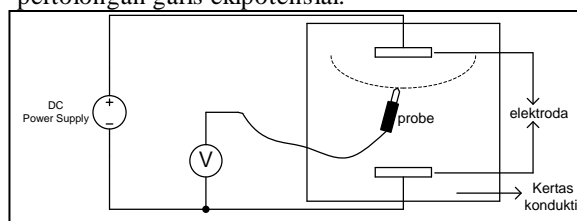
maka dapat disimpulkan, bentuk finial petir yang runcing akan memberikan tegangan tembus yang lebih kecil dan lebih cepat dibandingkan bentuk finial yang kurang runcing.

D. 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. 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 k Ω 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 2.5. Rangkaian percobaan untuk mencari garis ekipotensial dengan bantuan kertas konduktif

Sumber: www.webphysics.davidson.edu

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

1. Hubungkan terminal *output* sumber tegangan DC rendah ke terminal dari kedua elektroda dengan menggunakan sebuah kabel.
2. Gambar konfigurasi elektroda yang akan diuji pada sebuah kertas milimeter dengan koordinat yang sama pada kertas konduktif tersebut.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

Akhirnya, sketsa atau gambar garis medan listrik dengan memotong garis ekipotensial secara tegak lurus sehingga didapatkan distribusi medan listrik pada susunan elektroda tersebut.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Objek Uji

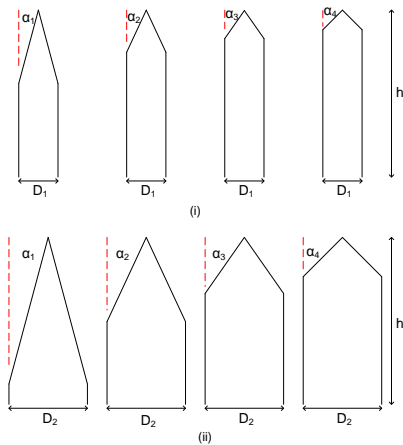
Jenis komponen, bahan, bentuk dan ukuran finial Franklin ditunjukkan dalam table 3.1.

TABEL 3.1.
JENIS KOMPONEN BESERTA DIMENSI FINIAL FRANKLIN PADA PENELITIAN

No.	Komponen	Jenis bahan	Bentuk	Ukuran
1.	Kepala (ujung finial)	Besi	Pejal runcing	Tabel 3.2
2.	Batang tegak	Besi	Batang silinder pejal	Ø (diameter) disesuaikan dengan No.1
3.	Penghantar penyalur utama	Tembaga	Pilin	50 mm ² , 7 × 3 mm, Ø 9 mm
4.	Elektroda pembumih-an	Tembaga	Rod silinder pejal	Ø 16 mm (0.63 inci), □ 10 m

TABEL 3.2.
UKURAN DIAMETER (D) DAN SUDUT KERUNCINGAN (A) PADA ELEKTRODA UJUNG RUNCING FINIAL

n	α _n ⁰	
	D ₁ = 2 cm	D ₂ = 4 cm
1	15	
2	25	
3	35	
4	45	



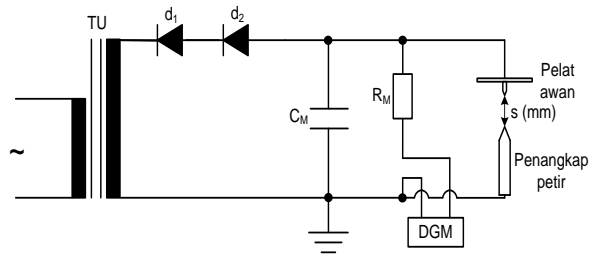
Gambar 3.1. Variasi sudut keruncingan finial
(i) Untuk D₁ = 2 cm, h = 10 cm
(ii) Untuk D₂ = 4 cm, h = 10 cm

B. 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 pada Gambar 3.2, dioda disusun bias balik sehingga jenis tegangan tinggi searah yang dibangkitkan ialah tegangan tinggi searah polaritas negatif. Alat ukur tegangan tinggi searah yang akan membaca nilai tegangan korona dan tembus ialah DGM yang diseri dengan resistor tegangan tinggi sebagai pembagi resistif.



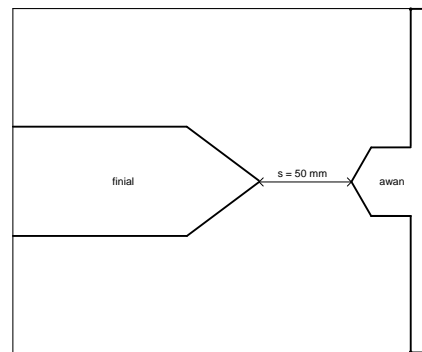
Gambar 3.2 Rangkaian pembangkitan dan pengujian tegangan tinggi searah polaritas negatif

Keterangan gambar:

- TU = Trafo Uji tiga belitan tegangan tinggi 220 V/220 V/100 kV
- d₁, d₂ = Dioda tegangan tinggi 100 kΩ, 20 mA, 140 kV
- C_M = Kapasitor perata 10000 pF
- R_M = Resistor pengukuran 280 MΩ
- DGM = Alat ukur tegangan tinggi searah (kV)

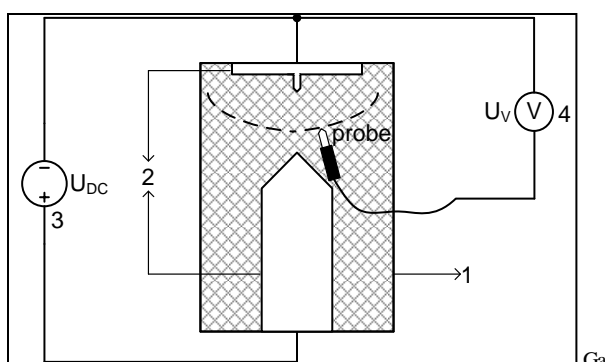
C. Memetakan Medan Listrik Dengan Metode Kertas Konduktif

Bentuk luasan yang akan dicari nilai potensial pada metode kertas konduktif yang selanjutnya dilakukan penggambaran bentuk distribusi garis ekuipotensialnya dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.3 Bentuk luasan pada pemetaan medan listrik dengan kertas konduktif

Dari Gambar 3.4 tersebut, luasan yang dipakai ialah luasan diantara elektroda ujung runcing finial dan elektroda pelat awan yang diisi oleh dielektrik udara. Oleh karenanya kertas konduktif nanti direpresentasikan sebagai dielektrik udara tersebut. 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 ϵ_r 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 3.4 Rangkaian pengujian medan listrik dua dimensi dengan bantuan kertas konduktif

Keterangan gambar:

Kertas konduktif sebagai dielektrik udara (1 lapis kertas $\approx \epsilon_r = 1$).

Kertas aluminium foil sebagai model elektroda ujung runcing finial dan pelat awan.

DC power supply.

Voltmeter DC.

D. Langkah-Langkah Pengujian dan Analisis Data

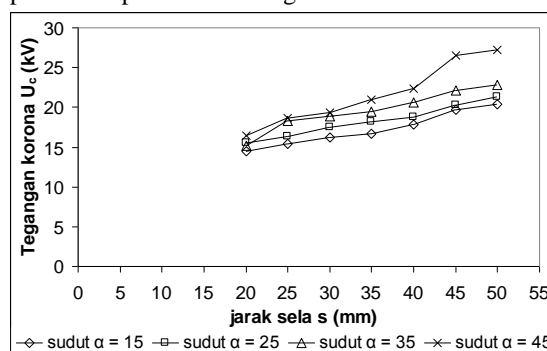
Dilakukan pengujian korona dan tembus untuk setiap objek finial dengan pengaturan jarak sela s . Setelah data tegangan korona dan tembus terkumpul, dilakukan analisis berdasarkan hukum Schwaiger.

Pemetaan medan listrik menggunakan kertas konduktif untuk setiap objek uji dengan mengukur potensial titik yang berada di pinggir luasan pada kertas konduktif dan titik-titik di dalam daerah luasan sehingga didapatkan bentuk distribusi medan listrik. Kemudian dilakukan perhitungan nilai efisiensi medan listrik (η) dan kuat medan listrik setiap konfigurasi elektroda.

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

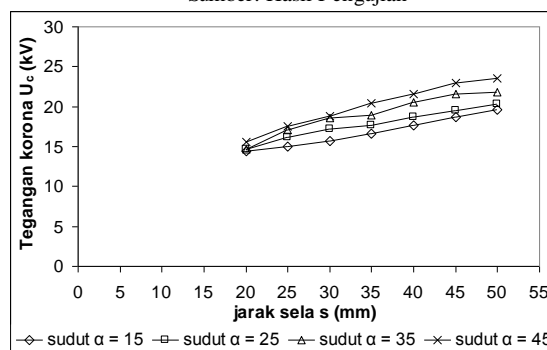
A. Pengujian Tegangan Korona

Hasil pengujian untuk setiap variabel objek finial dapat dilihat pada tabel dan gambar berikut ini.



Gambar 4.1. Grafik tegangan korona \bar{U}_c sebagai fungsi jarak sela s untuk berbagai sudut α_n dengan $D_1 = 2$ cm

Sumber: Hasil Pengujian



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

Sumber: Hasil Pengujian

Dari Gambar 4.1 dan 4.2 dapat dilihat bahwa nilai tegangan korona untuk setiap sudut bertambah besar apabila jarak sela diperlebar. Kemudian dari gambar 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:

$$C \approx \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{s}, \quad \epsilon_r \text{ udara} = 1 \text{ dan}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$$

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 $s = 20$ mm dihasilkan C_1 sedangkan jarak sela $s = 25$ mm dihasilkan C_2 .

$$C_1 = \frac{Q_1}{U_1} \rightarrow U_1 = \frac{Q_1}{C_1}$$

$$C_2 = \frac{Q_2}{U_2} \rightarrow U_2 = \frac{Q_2}{C_2}$$

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

$$U_1 = U_2$$

$$\frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} \rightarrow \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2}$$

$$\rightarrow Q_1 > Q_2$$

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 2-5, 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, 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 bahwa 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 2-5, diperoleh kuat medan listrik E sebagai berikut:

$$E_1 = k \frac{Q_1}{r_1^2}, E_2 = k \frac{Q_2}{r_2^2},$$

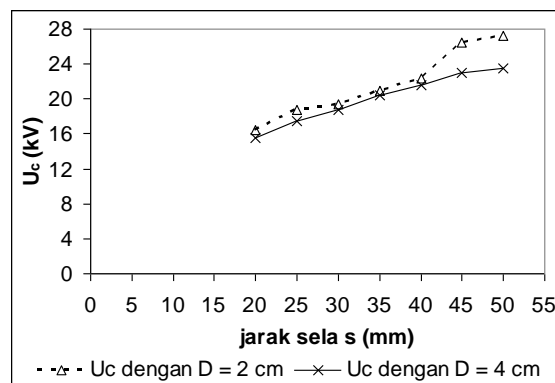
$$E_3 = k \frac{Q_3}{r_3^2}, E_4 = k \frac{Q_4}{r_4^2}$$

Karena besar pertambahan muatan listrik Q lebih dominan dari pada 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.

Apabila dibandingkan $U_c = f(s)$ untuk setiap diameter finial, maka didapatkan bahwa tegangan korona pada $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan $D_1 = 2$ cm nilainya cenderung lebih besar dari U_c pada $\alpha_1 = 15^\circ$ dengan $D_2 = 4$ cm untuk setiap jarak sela. Begitu pula untuk sudut yang lainnya seperti yang terlihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Grafik perbandingan tegangan korona U_c sebagai fungsi jarak sela s untuk $D_1 = 2$ cm dan $D_2 = 4$ cm dengan $\alpha_4 = 45^\circ$

Sumber: Hasil Pengujian

Nilai U_c pada D_2 yang selalu lebih kecil dari D_1 dipengaruhi oleh nilai kapasitansi susunan elektroda finial dan awan. Karena kapasitansi C sebanding dengan luas permukaan elektroda, maka untuk setiap sudut finial yang sama, didapatkan luas permukaan diameter finial D_2 yang lebih besar dari D_1 sehingga dengan menyamakan nilai s diperoleh kapasitansi C pada D_2 lebih besar dari C pada D_1 atau $C_{\alpha,D1} < C_{\alpha,D2}$. Dengan demikian didapatkan pula nilai muatan listrik Q untuk D_2 yang lebih besar dari D_1 sehingga sesuai persamaan 2-5 diperoleh kuat medan listrik E sebagai berikut:

$$E_{\alpha,D1} = k \frac{Q_{\alpha,D1}}{(r_{\alpha,D1})^2} \text{ dan}$$

$$E_{\alpha,D2} = k \frac{Q_{\alpha,D2}}{(r_{\alpha,D2})^2}, Q_{\alpha,D1} < Q_{\alpha,D2}$$

Karena nilai muatan listrik Q lebih dominan daripada nilai jari-jari finial r untuk setiap sudut finial yang sama maka perbandingan kuat medan listriknya adalah:

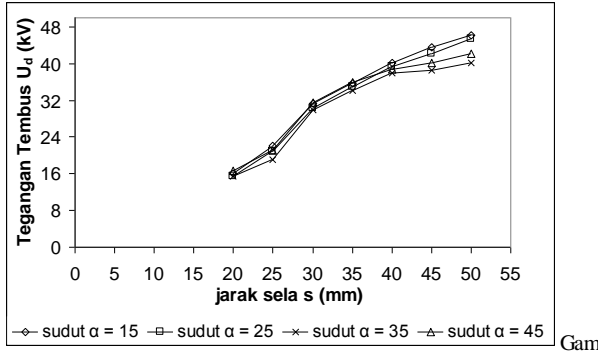
$$E_{\alpha,D1} < E_{\alpha,D2}$$

Dari hasil perbandingan kuat medan listrik di atas dapat disimpulkan bahwa pada sudut keruncingan finial yang sama maka dengan memperbesar diameter batang

final menghasilkan nilai kuat medan listrik di ujung finial yang semakin tinggi sehingga menyebabkan waktu terjadinya korona semakin cepat dan diperoleh nilai U_c juga makin kecil.

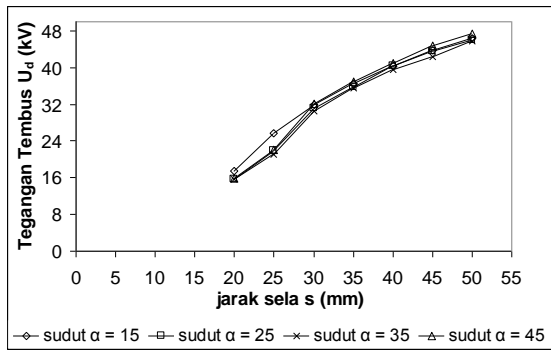
B. Pengujian Tegangan Tembus

Hasil pengujian dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.4. Grafik tegangan tembus \bar{U}_d sebagai fungsi jarak sela s untuk berbagai sudut α_n dengan $D_1 = 2$ cm

Sumber: Hasil Pengujian



Gambar 4.5. Grafik tegangan tembus \bar{U}_d sebagai fungsi jarak sela s untuk berbagai sudut α_n dengan $D_2 = 4$ cm

Sumber: Hasil Pengujian

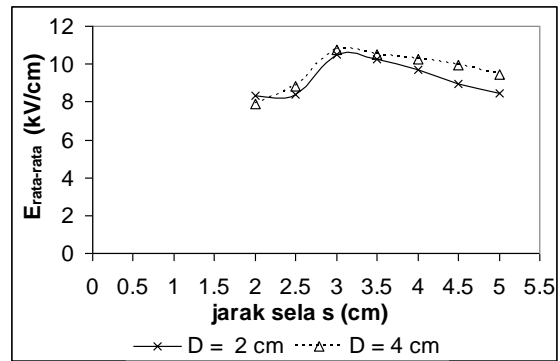
Berdasarkan Gambar 4.4 dan 4.5 terlihat bahwa untuk setiap sudut keruncingan maka nilai tegangan tembus yang terjadi akan meningkat apabila jarak sela s diperlebar. Dengan mengacu pada persamaan 2-8, parameter jarak sela sangat mempengaruhi besar tegangan tembus. Dari persamaan tersebut terlihat bahwa apabila jarak sela diperbesar maka nilai tegangan tembus akan meningkat pula. Ini artinya proses *breakdown* pada isolasi lebih lama.

Dari gambar tersebut terlihat 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 penelitian 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.

untuk pengujian finial ini yang penentuan nilainya secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$E_{rata-rata} = \frac{\bar{U}_d}{s} \quad (4-1)$$



Gambar 4.7. Grafik perbandingan kuat medan rata-rata $E_{rata-rata}$ sebagai fungsi jarak sela s untuk $D_1 = 2$ cm dan $D_2 = 4$ cm dengan $\alpha_4 = 45^\circ$

Dari Gambar 4.7 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. Hal ini berarti waktu untuk terjadinya tembus dari jarak sela 2.5 cm ke 3 cm lebih lama. 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 . Akibatnya 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 .

C. Pemetaan Medan Listrik dengan Metode Kertas Konduktif

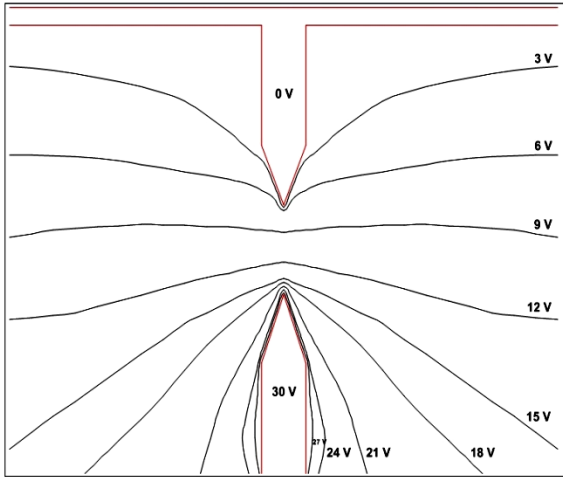
Pada pengujian ini, analisis data cukup dilakukan dengan menampilkan gambar bentuk distribusi garis eipotensial saja karena hal tersebut sudah dapat mewakili distribusi medan listriknya.

1) Pemetaan Medan Listrik untuk Sudut Keruncingan α_n° pada Diameter Finial $D_1 = 2$ cm

Hasil penggambaran distribusi garis eipotensialnya untuk sudut keruncingan $\alpha_1 = 15^\circ$ dapat dilihat pada gambar berikut ini.

Dari Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa jarak antar garis

ekipotensial tidaklah sama. Pada daerah yang paling dekat dengan permukaan elektroda baik elektroda anoda yaitu finial maupun elektroda katoda yaitu awan, 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.



Gambar 4.9. Distribusi garis ekipotensial dengan interval 3 V untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm
Sumber: Hasil Pengujian

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.

Berikut ini ditampilkan berupa tabel perhitungan nilai kuat medan listrik pada konfigurasi finial 15° dengan jarak sela 5 cm berdasarkan Gambar 4.7 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

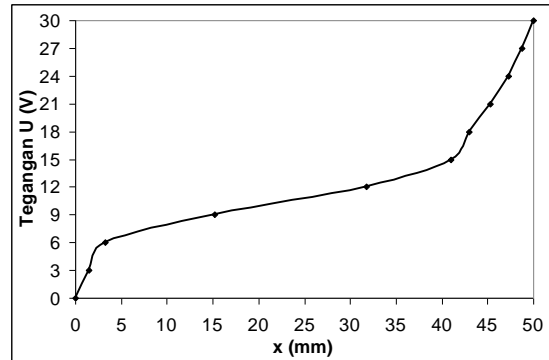
Δx_k = jarak antar garis ekipotensial yang berdekatan melalui sela udara (mm)

TABEL 4.1. NILAI KUAT MEDAN LISTRIK E UNTUK SUDUT $\alpha_1 = 15^\circ, D_1 = 2$ CM

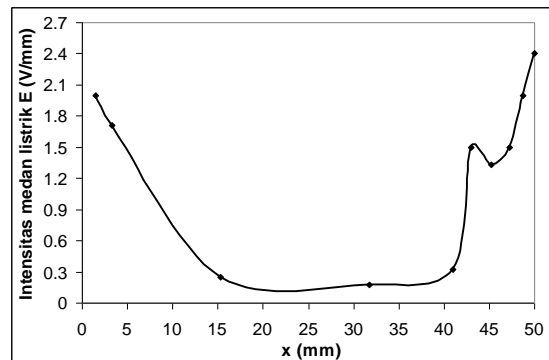
k	Interval tegangan pada sela udara	ΔU (V)	Δx (mm)	E (V/mm)
1	0 V - 3 V	3	1.50	2
2	3 V - 6 V	3	1.75	1.71
3	6 V - 9 V	3	12	0.25
4	9 V - 12 V	3	16.50	0.18
5	12 V - 15 V	3	9.25	0.32

6	15 V - 18 V	3	2	1.50
7	18 V - 21 V	3	2.25	1.33
8	21 V - 24 V	3	2	1.50
9	24 V - 27 V	3	1.50	2
10	27 V - 30 V	3	1.25	2.40

Dengan menggunakan Gambar 4.9 dan Tabel 4.1, maka dapat dibuat grafik distribusi tegangan intensitas medan listrik di sepanjang lintasan sela udara antara elektroda finial 15° dan pelat awan seperti ditunjukkan pada gambar-gambar berikut ini.



Gambar 4.10. Distribusi tegangan pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm



Gambar 4.11. Distribusi intensitas medan listrik pada sela udara 5 cm untuk $\alpha_1 = 15^\circ$ dan $D_1 = 2$ cm

Kuat medan rata-rata untuk pengujian ini dengan sumber DC 30 V dan $s = 5$ cm ialah:

$$E_{rata-rata} = \frac{30}{50} = 0.6 \text{ V/mm}$$

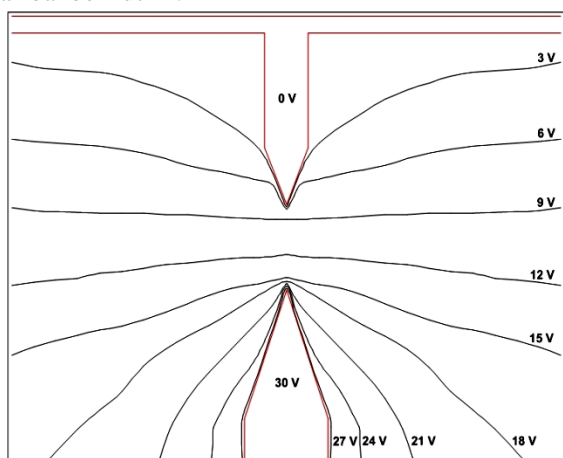
Pada finial $D_1 = 2$ cm, diperoleh nilai-nilai E_{rata} , E_{maks} , η , dan E_d seperti terlihat pada tabel di bawah ini.

TABEL 4.2. NILAI E_{RATA} , E_{MAKS} , H, DAN E_D UNTUK $D_1 = 2$ CM

(α°)	s (cm)	$E_{rata-rata}$ (V/mm)	E_{maks} (V/mm)	H	E_d (kV/cm)
15	5	0.6	2.40	0.250	36.906
25	5	0.6	1.71	0.351	25.924
35	5	0.6	1.50	0.400	20.033
45	5	0.6	1.33	0.451	18.756

2) Pemetaan Medan Listrik untuk Sudut Kerucingan α_n^0 pada Diameter Finial $D_2 = 4$ cm

Hasil penggambaran distribusi garis ekuipotensialnya untuk sudut kerucingan $\alpha_1 = 15^0$ dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.12. Distribusi garis ekuipotensial dengan interval 3 V untuk $\alpha_1 = 15^0$ dan $D_2 = 4$ cm

Sumber: Hasil Pengujian

Dengan cara yang sama maka didapatkan nilai-nilai E_{rata} , E_{maks} , η , dan E_d seperti terlihat pada tabel berikut ini.

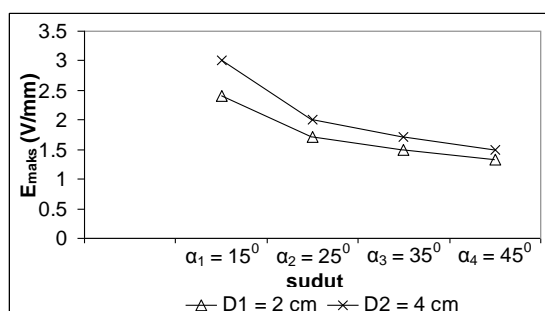
TABEL 4.3 NILAI E_{rata} , E_{maks} , η , DAN E_d UNTUK $D_2 = 4$ CM

(α^0)	s (cm)	$E_{rata-rata}$ (V/mm)	E_{maks} (V/mm)	η	E_d (kV/cm)
15	5	0.6	3	0.200	46.467
25	5	0.6	2	0.300	30.622
35	5	0.6	1.71	0.351	26.112
45	5	0.6	1.50	0.400	23.700

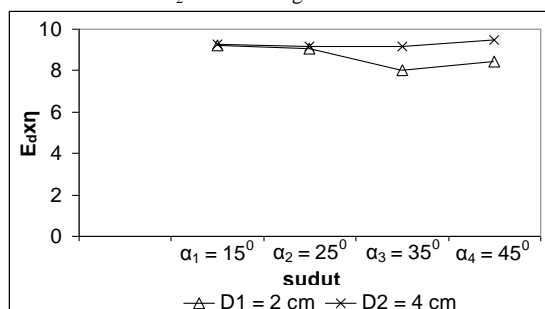
Berdasarkan Tabel 4.2 dan 4.3, terlihat bahwa dengan memperbesar sudut kerucingan finial maka nilai kuat medan listrik E_{maks} semakin kecil. Hal ini sama seperti objek uji untuk variasi α dengan $D_1 = 2$ cm yaitu nilai E_{maks} terbesar didapatkan pada sudut kerucingan 15^0 sehingga korona lebih cepat terjadi pada sudut 15^0 .

D. Perbandingan Hasil Pemetaan Medan Listrik untuk $D_1 = 2$ cm dengan $D_2 = 4$ cm

Dari hasil pengujian pemetaan medan listrik dengan menggunakan kertas konduktif tersebut, maka dengan menggunakan tabel nilai E_{rata} , E_{maks} , η , dan E_d setiap objek uji, maka didapatkan grafik E_{maks} dan perkalian $E_d \times \eta$ seperti yang diperlihatkan pada gambar-gambar berikut ini.



Gambar 4.13. Grafik perbandingan E_{maks} fungsi sudut kerucingan α untuk $D_1 = 2$ cm dan $D_2 = 4$ cm dengan $s = 5$ cm



Gambar 4.14. Grafik perbandingan $E_d \times \eta$ fungsi sudut kerucingan α untuk $D_1 = 2$ cm dan $D_2 = 4$ cm dengan $s = 5$ cm

Dari Gambar 4.13, terlihat kurva cenderung menurun dengan nilai E_{maks} pada finial yang berdiameter D_1 lebih kecil daripada diameter D_2 .

Dari Gambar 4.14 terlihat nilai perkalian kuat medan listrik tembus dengan efisiensi untuk s yang sama pada diameter finial $D_2 = 4$ cm lebih besar dari objek finial dengan $D_1 = 2$ cm untuk setiap perubahan nilai sudut kerucingannya. Dengan demikian nilai tegangan tembusnya lebih kecil. Hal tersebut dibuktikan melalui hasil pengujian tembus yang diperlihatkan pada Gambar 4.4 dan 4.5. Pada gambar tersebut terlihat pula bahwa nilai $E_d \times \eta$ cenderung menurun dari sudut 15^0 hingga 35^0 dan naik kembali pada sudut 45^0 . Dengan nilai minimum diperoleh pada $\alpha_3 = 35^0$ yaitu untuk D_1 sebesar 8.0134 dan untuk D_2 sebesar 9.16.

V. KESIMPULAN

Semakin besar sudut kerucingan finial α , maka nilai tegangan korona U_c semakin besar pula. Sedangkan nilai tegangan tembusnya U_d semakin kecil dari sudut $\alpha_1 = 15^0$ hingga $\alpha_3 = 35^0$ dan membesar lagi pada sudut $\alpha_4 = 45^0$. Nilai tegangan tembus U_d paling kecil diperoleh untuk sudut kerucingan $\alpha_3 = 35^0$ sehingga dapat disimpulkan penangkap petir dengan sudut kerucingan 35^0 mempunyai kemampuan menangkap petir lebih baik daripada sudut lainnya.

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.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alonso. et al. 1967. *Fundamental niversity Physics Vol. 2 Fields and Waves*. Addison-Wesley Publishing.
- [2] Anonim. 2004. *Electric Field Lines and Equipotential Surfaces*. <http://www.physics.bu.edu/ulab/intro2/efield.pdf>, akses tanggal 3 Februari 2008 pukul 11.00 WIB.
- [3] Anonim. 1983. *Pedoman Perencanaan Penangkal Petir*. Bandung: Direktorat penyelidikan masalah bangunan Indonesia.
- [4] Anonim. tanpa tahun. *Capacitance*. [http://www.abdn.ac.uk/physics/px3008/\(6\)capacitance.pdf](http://www.abdn.ac.uk/physics/px3008/(6)capacitance.pdf), akses tanggal 10 Februari 2008 pukul 15.00 WIB.
- [5] Arismunandar, A. 1983. *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*. Jakarta: PT. Ghalia Indonesia.
- [6] _____. 1994. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- [7] Dhofir, M. 1997. *Diktat Gejala Medan Tinggi Jilid I dan II*. Malang: Percetakan Fakultas Teknik Unibraw.
- [8] Uman, M. 1969. *Lightning*. New York: McGraw-Hill.
- [9] Hermagasantos. 1994. *Teknik Tegangan Tinggi, Teori dan Pegangan untuk Laboratorium*. Jakarta: PT. Rosda Jayaputra.
- [10] Kind, D. 1993. *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi* (Terjemahan KT. Sirait). Bandung: Penerbit ITB.
- [11] Neuschwander, Dwight E. 2004. *Elegant Connections in Physics, Lightning and Capacitance, Inductance, and Resistance*. http://www.spsobserver.org/articles/04_elegant_connections.pdf, akses tanggal 4 Maret 2008 pukul 08.00 WIB.
- [12] Salam, M. A. 2000. *High Voltage Engineering, Theory and Practice*. New York: Marcel Dekker Inc.
- [13] Tom Henderson. 1996. *Electric Fields and Conductors*. <http://www.glenbrook.k12.il.us/gbssci/phys/class/estatics/u814d.html>, akses tanggal 15 September 2007 pukul 11.25 WIB.