

BAB IV

PERANCANGAN DAN REALISASI ALAT

4.1 Umum

Dalam bab ini, dibahas tentang rancang-bangun voltmeter elektrostatik tegangan tinggi. Ada dua bagian penting dalam voltmeter elektrostatik yaitu bagian elektroda sela udara dan bagian elektromekanik. Pada bagian elektroda sela udara, hal-hal yang perlu diperhatikan yaitu mengenai pemilihan bentuk elektroda yang menghasilkan medan homogen serta ukuran elektroda yang menghasilkan besarnya gaya elektrostatik. Dari berbagai bentuk elektroda yang memiliki medan homogen salah satunya adalah plat sejajar (piring-piring). Distribusi medan pada elektroda plat sejajar dapat disimulasikan menggunakan perangkat lunak Femm 4.2.

Pada bagian elektromekanik yaitu bagian yang mengkonversi gerak dari batang elektroda yang bergerak translasi menjadi gerak rotasi dengan tujuan untuk memperbesar jarak perpindahan supaya memudahkan dalam pembacaan pengukuran. Secara teori gaya elektrostatik bisa dicari dengan Pers. (2–25).

4.2 Pemilihan Bentuk Geometris dan Dimensi Elektroda Sela Udara

Bentuk elektroda sela udara yang digunakan adalah elektroda yang menghasilkan medan homogen. Menurut Schwaiger, bentuk geometris dari susunan elektroda yang menghasilkan distribusi medan listrik yang homogen adalah piring-piring (susunan plat sejajar) dan bola-bola. Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah piring-piring (susunan plat sejajar) dalam voltmeter elektrostatik tegangan tinggi ini. Pemilihan ini didasarkan pada kesederhanaan bentuk geometri dan kemudahan dalam proses pembuatan.

Menurut Pers. (2–25), luas permukaan elektroda aktif bagian dalam (Plat M) sebanding dengan gaya \bar{F} . Misalkan dengan jari-jari = 1 cm, tegangan $U_{eff} = 100$ kV, jarak sela 1 cm, dan $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ farad/meter. Gaya elektrostatik (\bar{F}) yang diperoleh adalah:

$$\bar{F} = k_f U_{eff}^2$$

dan

$$k_f = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{S^2}$$

$$k_f = \frac{1}{2} \times 8,854 \times 10^{-12} \times 3,14 \times 0,01^2$$

$$k_f = 0,139 \times 10^{-10} \text{ farad/meter}$$

Jadi, gaya elektrostatik yang dihasilkan adalah:

$$\bar{F} = k_f U_{eff}^2$$

$$\bar{F} = 0,139 \times 10^{-10} \times 100000^2$$

$$\bar{F} = 0,139 \text{ N}$$

Dengan cara yang sama, maka nilai gaya elektrostatik (\bar{F}) untuk jari-jari elektroda yang berbeda dapat dihitung. Hasil lengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.1.

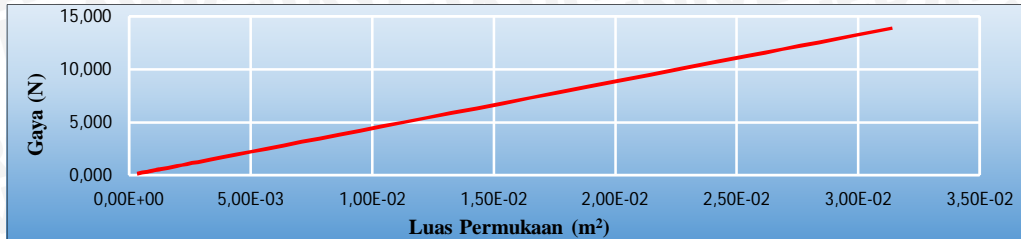
Tabel 4.1 Nilai Gaya Elektrostatik (\bar{F}) dengan Variasi Luas

| No. | Jari-jari (m) | Luas (m^2) | \bar{F} (N) |
|-----|---------------|-----------------------|---------------|
| 1 | 0,01 | $3,14 \times 10^{-4}$ | 0,139 |
| 2 | 0,02 | $1,26 \times 10^{-3}$ | 0,556 |
| 3 | 0,03 | $2,83 \times 10^{-3}$ | 1,251 |
| 4 | 0,04 | $5,02 \times 10^{-3}$ | 2,224 |
| 5 | 0,05 | $7,85 \times 10^{-3}$ | 3,475 |
| 6 | 0,06 | $1,13 \times 10^{-2}$ | 5,004 |
| 7 | 0,07 | $1,54 \times 10^{-2}$ | 6,811 |
| 8 | 0,08 | $2,01 \times 10^{-2}$ | 8,896 |
| 9 | 0,09 | $2,54 \times 10^{-2}$ | 11,260 |
| 10 | 0,10 | $3,14 \times 10^{-2}$ | 13,901 |

Hasil dapat dibuat grafik pengaruh perbesaran jari-jari terhadap \bar{F} seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa grafik meningkat secara linier. Ketika luas permukaan diperbesar maka gaya (\bar{F}) yang dihasilkan meningkat dan ini menunjukkan bahwa antara luas permukaan dengan gaya (\bar{F}) berbanding lurus.

Dari hasil perhitungan pada Tabel 4.1 dan melihat Gambar 4.1 maka diputuskan untuk mengambil diameter elektroda sela udara yang bergerak (Plat M) sebesar 10 cm dengan pertimbangan gaya (\bar{F}) yang dihasilkan tidak terlalu kecil dan ukuran alat yang tidak terlalu besar.



Gambar 4.1 Grafik Perbesaran Luas Permukaan Terhadap Gaya (\bar{F})

Dengan diameter pada elektroda yang bergerak (Plat M) yang telah ditentukan sebesar 10 cm, bisa ditentukan jarak sela yang efektif untuk rentang ukur tegangan 0 – 100 kV. Dengan tegangan (U_{eff}) 100 kV dan diameter 10 cm maka gaya (\bar{F}) yang diperoleh pada tiap-tiap jarak sela adalah:

$$\bar{F} = k_f U_{eff}^2$$

$$\bar{F} = \frac{1}{2} \times 8,854 \times 10^{-12} \times 3,14 \times 0,05^2}{0,01^2} \times 100000^2$$

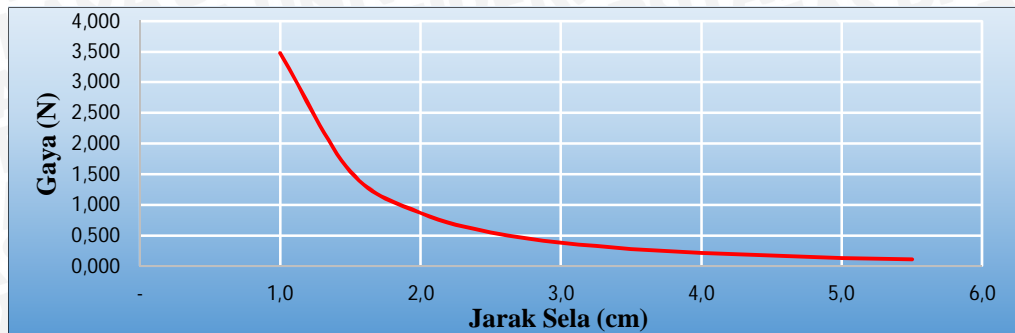
$$\bar{F} = 3,475 \text{ N}$$

Dengan cara yang sama, maka nilai gaya elektrostatis (\bar{F}) pada jarak sela yang berbeda dapat dihitung. Hasil lengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Nilai Gaya Elektrostatis (\bar{F}) dengan Variasi Jarak Sela

| No. | Jarak Sela (m) | \bar{F} (N) |
|-----|----------------------|---------------|
| 1 | $1,0 \times 10^{-2}$ | 3,475 |
| 2 | $1,5 \times 10^{-2}$ | 1,545 |
| 3 | $2,0 \times 10^{-2}$ | 0,869 |
| 4 | $2,5 \times 10^{-2}$ | 0,556 |
| 5 | $3,0 \times 10^{-2}$ | 0,386 |
| 6 | $3,5 \times 10^{-2}$ | 0,284 |
| 7 | $4,0 \times 10^{-2}$ | 0,217 |
| 8 | $4,5 \times 10^{-2}$ | 0,172 |
| 9 | $5,0 \times 10^{-2}$ | 0,139 |
| 10 | $5,5 \times 10^{-2}$ | 0,115 |

Hasil perhitungan dalam Tabel 4.2 selanjutnya dapat dibuat grafik pengaruh perbesaran jarak sela terhadap \bar{F} seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.

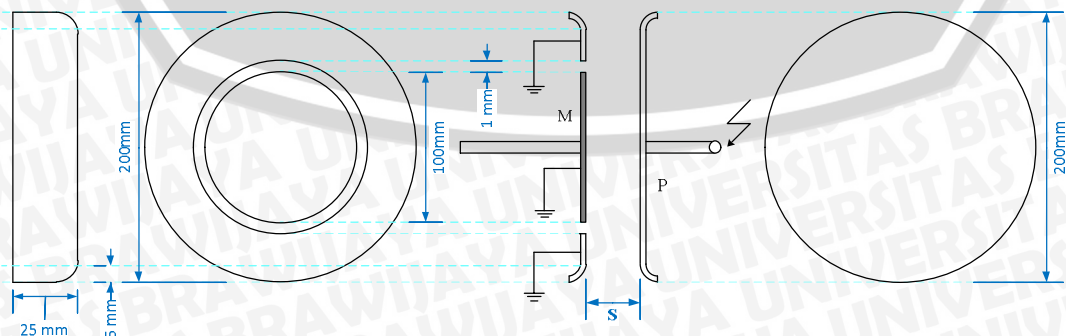


Gambar 4.2 Grafik Perbesaran Jarak Sela Terhadap Gaya (\bar{F})

Dari Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa jarak sela untuk tegangan U_{eff} sebesar 100 kV ketika jarak sela diperbesar maka gaya (\bar{F}) akan semakin menurun. Dan ini menunjukkan bahwa antara jarak sela dan gaya (\bar{F}) berbanding terbalik.

Dari hasil perhitungan pada Tabel 4.2 dan melihat Gambar 4.2 maka diputuskan untuk mengambil jarak sela sebesar 4 cm pada tegangan U_{eff} sebesar $20 < U_{eff} \leq 100$ kV dan 1,5 cm pada tegangan U_{eff} sebesar $0 \leq U_{eff} < 20$ kV dengan pertimbangan gaya (\bar{F}) yang dihasilkan dan alat ini bekerja dengan tidak boleh terjadi tembus serta dielektrik udara yang memiliki nilai sebesar 30 kV/cm dan pergeseran maksimum elektroda (Plat M) adalah 0,5 cm.

Dengan data-data yang telah ditentukan dari hasil perhitungan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 yaitu diameter elektroda sela udara yang bergerak (Plat M) adalah 10 cm, jarak sela yang digunakan sebesar 1,5 cm dan 4 cm, dan bentuk geometris elektroda sela udara adalah plat sejajar, maka bisa buat rancangan elektroda sela udara yang dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Struktur Rancangan Elektroda Sela Udara

Pada Gambar 4.3, S adalah jarak sela yang memiliki nilai sebesar 1,5 cm dan 4 cm. Diameter 20 cm adalah diameter keseluruhan dari elektroda sela udara atau diameter dari elektroda (Plat P). Permukaan elektroda harus licin dan benar-benar rata supaya medan yang dihasilkan adalah medan yang homogen.

4.3 Perhitungan Gaya Elektrostatik Pada Sela Elektroda

Untuk mendapatkan gaya yang dihasilkan dengan jarak sela S dan luas permukaan A digunakan Pers. (2-25). Dengan diameter elektroda sebesar 10 cm, jarak sela 4 cm, dan tegangan masukan 100 kV akan didapat konstanta k_f sebesar:

$$k_f = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{S^2}$$

Dengan memasukkan nilai-nilai $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ farad/meter, $A = \pi \times 0,05^2$, dan $S = 4$ cm, didapatkan:

$$k_f = \frac{1}{2} \times 8,854 \times 10^{-12} \times 3,14 \times 0,05^2$$

$$k_f = 21,72 \times 10^{-16} \text{ farad/meter}$$

Dengan nilai k_f tersebut, maka gaya elektrostatik \bar{F} dapat diperoleh, yaitu:

$$\bar{F} = k_f u_{eff}^2$$

$$\bar{F} = 21,72 \times 10^{-12} \times 100000^2$$

$$\bar{F} = 21,72 \times 10^{-2} \text{ N}$$

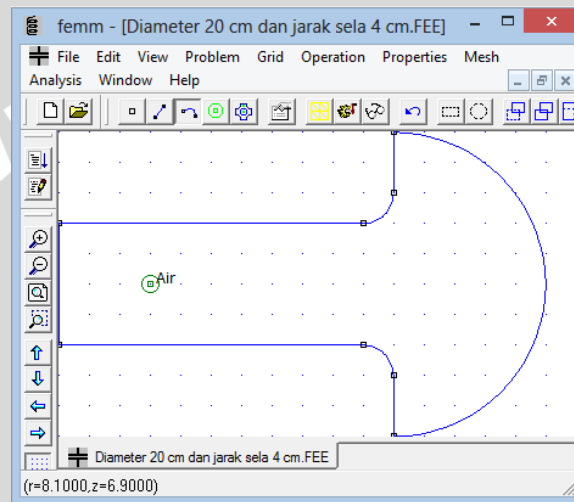
$$\bar{F} = 2,172 \times 10^{-1} \text{ N}$$

Dengan cara yang sama, maka nilai gaya elektrostatik (\bar{F}) untuk jarak sela dan tegangan masukan yang berbeda dapat dihitung. Hasil lengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Nilai Gaya Elektrostatik Yang Dihasilkan Pada Jarak Sela Antara 0,25 – 5 cm dan U_{eff} Antara 0 – 100 kV

| U_{eff} (kV) | Gaya yang dihasilkan dalam (N) pada diameter (Plat M) 10 cm | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Jarak Sela (cm) | | | | | | | | | | |
| | 0,25 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 5,56E-01 | 1,39E-01 | 3,48E-02 | 1,54E-02 | 8,69E-03 | 5,56E-03 | 3,86E-03 | 2,84E-03 | 2,17E-03 | 1,72E-03 | 1,39E-03 |
| 20 | 2,22E+00 | 5,56E-01 | 1,39E-01 | 6,18E-02 | 3,48E-02 | 2,22E-02 | 1,54E-02 | 1,13E-02 | 8,69E-03 | 6,86E-03 | 5,56E-03 |
| 30 | 5,00E+00 | 1,25E+00 | 3,13E-01 | 1,39E-01 | 7,82E-02 | 5,00E-02 | 3,48E-02 | 2,55E-02 | 1,95E-02 | 1,54E-02 | 1,25E-02 |
| 40 | 8,90E+00 | 2,22E+00 | 5,56E-01 | 2,47E-01 | 1,39E-01 | 8,90E-02 | 6,18E-02 | 4,54E-02 | 3,48E-02 | 2,75E-02 | 2,22E-02 |
| 50 | 1,39E+01 | 3,48E+00 | 8,69E-01 | 3,86E-01 | 2,17E-01 | 1,39E-01 | 9,65E-02 | 7,09E-02 | 5,43E-02 | 4,29E-02 | 3,48E-02 |
| 60 | 2,00E+01 | 5,00E+00 | 1,25E+00 | 5,56E-01 | 3,13E-01 | 2,00E-01 | 1,39E-01 | 1,02E-01 | 7,82E-02 | 6,18E-02 | 5,00E-02 |
| 70 | 2,72E+01 | 6,81E+00 | 1,70E+00 | 7,57E-01 | 4,26E-01 | 2,72E-01 | 1,89E-01 | 1,39E-01 | 1,06E-01 | 8,41E-02 | 6,81E-02 |
| 80 | 3,56E+01 | 8,90E+00 | 2,22E+00 | 9,88E-01 | 5,56E-01 | 3,56E-01 | 2,47E-01 | 1,82E-01 | 1,39E-01 | 1,10E-01 | 8,90E-02 |
| 90 | 4,50E+01 | 1,13E+01 | 2,81E+00 | 1,25E+00 | 7,04E-01 | 4,50E-01 | 3,13E-01 | 2,30E-01 | 1,76E-01 | 1,39E-01 | 1,13E-01 |
| 100 | 5,56E+01 | 1,39E+01 | 3,48E+00 | 1,54E+00 | 8,69E-01 | 5,56E-01 | 3,86E-01 | 2,84E-01 | 2,17E-01 | 1,72E-01 | 1,39E-01 |

Pada Tabel 4.3 nilai yang berwarna merah adalah nilai-nilai gaya saat terjadi tembus (*breakdown*). Pada nilai ini tekanan listrik lebih besar atau sama dengan dari kekuatan dielektrik udara. Nilai yang berwarna kuning adalah nilai-nilai gaya ambang batas untuk terjadi tembus (*breakdown*). Nilai yang berwarna hijau adalah nilai-nilai gaya yang tekanan listriknya lebih kecil dari dielektrik udara. Nilai gaya yang berwarna biru adalah nilai gaya yang digunakan dalam penelitian ini karena pada alat voltmeter elektrostatis tegangan tinggi ini memiliki syarat tidak boleh terjadi tembus saat pengukuran namun harus memiliki nilai gaya yang cukup besar.



Gambar 4.4 Perencanaan Simulasi Elektroda Sela Udara

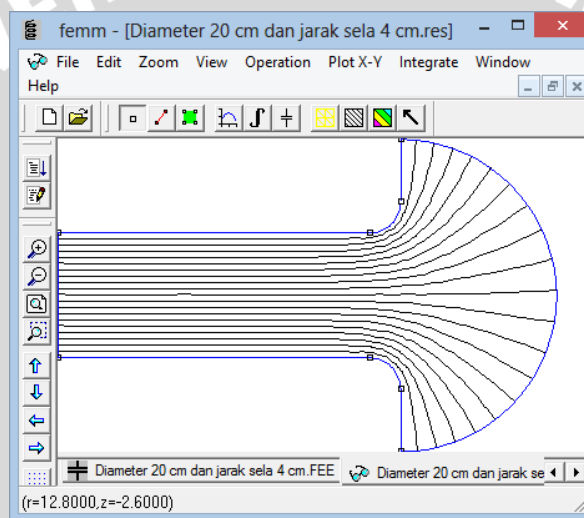
4.4 Analisis Distribusi Medan Listrik pada Elektroda Sela Udara

Distribusi medan listrik pada elektroda sela udara dapat disimulasikan dengan menggunakan program Femm 4.2. Tujuan analisis ini adalah untuk menentukan efisiensi medan listrik elektroda sela udara. Untuk menentukan efisiensi itu sendiri dibutuhkan nilai kuat medan listrik maksimum (E_{\max}) yang dapat diketahui dari hasil simulasi distribusi medan dengan menggunakan Femm 4.2. Perencanaan bentuk elektroda dengan menggunakan program Femm 4.2 untuk simulasi medan listrik dari susunan elektroda sela udara adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.

Hasil simulasi yang digambarkan pada Gambar 4.4 adalah simulasi pengujian tembus elektroda sela udara untuk diameter elektroda 20 cm dan jarak sela 4 cm. Isolator yang digunakan antara elektroda plat sejajar adalah isolator

udara. Tegangan masukan untuk simulasi distribusi medan listrik menggunakan tegangan maksimum sebesar 100 kV.

Untuk selanjutnya dapat dibuat simulasi untuk tiap konfigurasi elektroda sela udara yang berbeda. Tiap konfigurasi elektroda disimulasikan dengan variasi jarak sela yang berbeda. Tegangan masukan (U_{eff}) pada simulasi distribusi medan listrik menggunakan tegangan acuan yang sama yaitu sebesar 20 kV dan 100 kV untuk semua konfigurasi elektroda dan jarak sela. Dari hasil simulasi dapat diketahui heterogenitas medan listrik dari elektroda yang diuji. Dengan menggunakan data-data tersebut, maka distribusi medan listrik dari pengujian elektroda sela udara dapat disimulasikan.

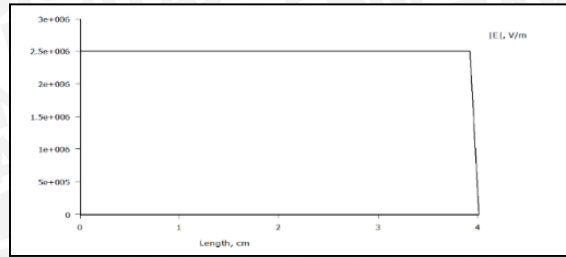


Gambar 4.5 Hasil Simulasi *Equipotensial* Elektroda Sela Udara

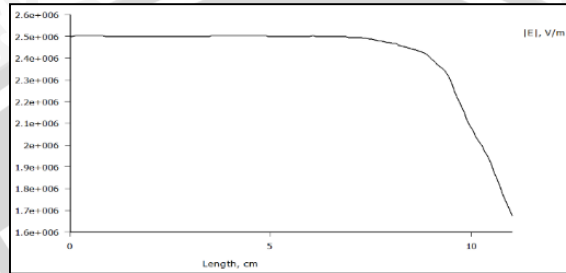
Gambar 4.5 adalah hasil simulasi untuk *equipotensial* pada elektroda sela udara pada jarak sela 4 cm dengan beda potensial antara plat sejajar sebesar 100 kV. *Equipotensial* adalah diibaratkan daerah yang semua titik dalam daerah itu pada potensial yang sama sehingga beda potensial antara sembarang dua titik dalam daerah tersebut adalah nol.

4.5 Pengaruh Jarak Sela Terhadap Efisiensi Medan Listrik

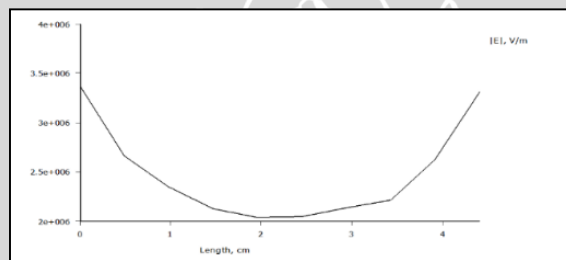
Grafik simulasi kuat medan listrik mutlak (*magnitude of field intensity, |E|*) pada pengujian tegangan tembus pada elektroda sela udara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.6 Hasil Simulasi Grafik Kuat Medan Listrik Mutlaknya

(Magnitude of Field Intensity, $|E|$)

- (a) Garis ukur pada poros elektroda,
- (b) Garis ukur pada sela elektroda,
- (c) Garis ukur pada pinggir elektroda.

Gambar 4.6 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik pada elektroda sela udara untuk diameter 20 cm. Beda potensial antara elektroda sebesar 100 kV dengan jarak sela elektroda sebesar 4 cm. Kuat medan listrik yang terjadi adalah di poros elektroda pelat sejajar. Dari Gambar 4.6 (a) terlihat bahwa kuat medan listrik bernilai konstan yaitu $2,5 \times 10^6$ V/m atau 25 kV/cm yang menunjukkan bahwa distribusi medan yang ditimbulkan oleh daerah luas elektroda sela udara adalah distribusi medan seragam atau homogen.

Gambar 4.6 (b) adalah grafik kuat medan listrik yang terletak di sela elektroda, dimana pada poros elektroda menuju pinggir elektroda terlihat bahwa distribusi medan adalah seragam dengan ditunjukkan garis lurus dari jari-jari 0 sampai dengan 9 cm, setelah itu kuat medan mengalami penurunan dimana pada posisi ini distribusi medan mulai tidak seragam yaitu pada pinggir elektroda pada posisi jari-jari 9 cm dan seterusnya. Ini menunjukkan pada daerah luas elektroda menunjukkan distribusi medan seragam.

Gambar 4.6 (c) adalah grafik kuat medan listrik yang terletak pada pinggir elektroda yaitu pada daerah lengkung elektroda. Pada gambar terlihat adanya kuat medan lokal tertinggi pada ujung lengkung elektroda yaitu sebesar $3,36 \times 10^6$ V/m atau 33,6 kV/cm yang menunjukkan bahwa distribusi medan pada pinggir elektroda tidak seragam. Inilah yang dinamakan efek pinggir.

Dari Gambar 4.6 (a) didapatkan nilai kuat medan tertinggi berdasarkan hasil simulasi adalah $2,5 \times 10^6$ V/m atau 25 kV/cm. Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata-ratanya dihitung dengan menggunakan Pers. 2.8. Dengan U_d sebesar 100 kV dan jarak sela (S) sebesar 4 cm, sehingga kuat medan listrik rata-ratanya adalah:

$$E_{rata-rata} = \frac{100}{4}$$

$$E_{rata-rata} = 25 \text{ kV/cm}$$

Dengan nilai kuat medan lokal tertinggi 25 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 25 kV/cm, maka sesuai Pers. (2-7), faktor efisiensi medan listrik pada elektroda sela udara adalah:

$$\eta = \frac{25}{25}$$

$$\eta = 1$$

Jadi, faktor efisiensi medan listrik pada elektroda sela udara adalah 1.

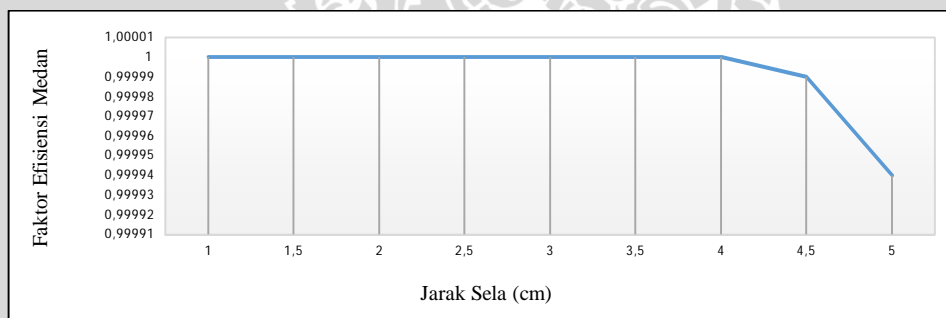
Dengan menggunakan simulasi Femm 4.2 dan dengan cara yang sama, nilai kuat medan listrik maksimum untuk jarak sela dan tegangan masukan yang berbeda dapat diketahui. Selanjutnya, efisiensi medan listrik dapat dihitung dengan

menggunakan Pers. (2-7). faktor efisiensi untuk elektroda sela udara dengan jarak sela dan tegangan masukan yang berbeda dapat dilihat dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perhitungan Faktor Efisiensi Medan dengan Variasi Jarak Sela

| No. | Jarak Sela (cm) | E_{max} (V/m) | $E_{rata-rata}$ (kV/cm) | Efisiensi (η) |
|-----|-----------------|-------------------|-------------------------|----------------------|
| 1 | 1,0 | $1,0 \times 10^7$ | 100,00 | 1,00000 |
| 2 | 1,5 | $6,7 \times 10^6$ | 66,67 | 1,00000 |
| 3 | 2,0 | $5,0 \times 10^6$ | 50,00 | 1,00000 |
| 4 | 2,5 | $4,0 \times 10^6$ | 40,00 | 1,00000 |
| 5 | 3,0 | $3,3 \times 10^6$ | 33,33 | 1,00000 |
| 6 | 3,5 | $2,9 \times 10^6$ | 28,57 | 1,00000 |
| 7 | 4,0 | $2,5 \times 10^6$ | 25,00 | 1,00000 |
| 8 | 4,5 | $2,2 \times 10^6$ | 22,22 | 0,99999 |
| 9 | 5,0 | $2,0 \times 10^6$ | 20,00 | 0,99994 |

Dari Tabel 4.4 dapat dibuat grafik pengaruh perbesaran jarak sela (S) terhadap efisiensi medan listrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Daerah Operasi Kerja Linier

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat untuk elektroda dengan diameter 20 cm pada jarak sela sampai dengan 4 cm nilai kuat medan listrik maksimumnya (E_{max}) sama dengan nilai kuat medan listrik rata-ratanya ($E_{rata-rata}$). Ini menunjukkan bahwa distribusi medan pada jarak sela ini adalah medan seragam ditunjukkan dengan faktor efisiensi medan sebesar satu. Sedangkan pada jarak sela $4 < S \leq 5$ dapat dilihat distribusi medan yang dihasilkan adalah medan yang tidak seragam dengan faktor efisiensi < 1 . Ini berarti dengan menggunakan elektroda piring berdiameter 20 cm dan jarak sela sampai 4 cm, besarnya intensitas medan yang dikembangkan di antara elektroda sebanding dengan tegangan yang diukur ($E = V/S$).

4.6 Hubungan antara Gaya Elektrostatis dengan Pegas

Hubungan antara gaya elektrostatis dengan pegas yaitu gaya elektrostatis yang dihasilkan adalah gaya yang diterima oleh pegas. Berdasarkan Pers. (2-26), untuk tegangan maksimum 100 kV, jarak sela 4 cm, dan besarnya pergeseran $\Delta x = 0,5$ cm (karena jarak sela untuk tembus pada dielektrik udara dengan $U_{eff} = 100$ kV adalah 3,33 cm) maka konstanta pegas yang diperlukan menggunakan perhitungan Pers. (3-1) sebagai berikut:

$$K_p = \frac{|\bar{F}|}{\Delta x}$$

$$K_p = \frac{2,17 \times 10^{-1}}{5 \times 10^{-3}}$$

$$K_p = 43,4 \text{ N/m}$$

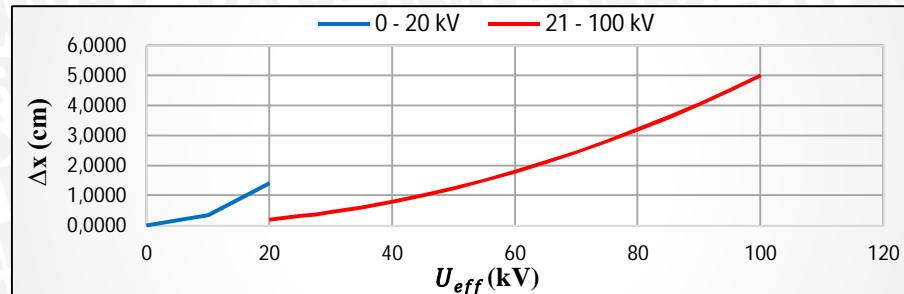
Dengan demikian, pegas yang digunakan adalah pegas yang memiliki konstanta pegas (K_p) = 43,4 N/m.

Setelah didapatkan konstanta pegas (K_p), maka akan didapatkan Δx untuk tegangan masukan (U_{eff}) lainnya dengan asumsi tanpa adanya gaya gesek. Dengan menggunakan Pers. (3-1), nilai $K_p = 43,4 \text{ N/m}$, dan tegangan masukan sesuai Tabel 4.3 (data yang digunakan adalah yang berwarna biru) didapatkan nilai Δx secara teori yang dapat dilihat dalam Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Perhitungan Δx dengan Variasi U_{eff} dan Jarak Sela

| No. | U_{eff} (kV) | Jarak Sela (cm) | Gaya Elektrostatis (N) | Δx (mm) |
|-----|----------------|-----------------|------------------------|-----------------|
| 1 | 0 | 1,5 | 0 | 0 |
| 2 | 10 | 1,5 | $1,54 \times 10^{-2}$ | 0,3559 |
| 3 | 20 | 1,5 | $6,18 \times 10^{-2}$ | 1,4235 |
| 4 | 20 | 4 | $8,69 \times 10^{-3}$ | 0,2002 |
| 5 | 30 | 4 | $1,95 \times 10^{-2}$ | 0,4504 |
| 6 | 40 | 4 | $3,48 \times 10^{-2}$ | 0,8007 |
| 7 | 50 | 4 | $5,43 \times 10^{-2}$ | 1,2512 |
| 8 | 60 | 4 | $7,82 \times 10^{-2}$ | 1,8017 |
| 9 | 70 | 4 | $1,06 \times 10^{-1}$ | 2,4523 |
| 10 | 80 | 4 | $1,39 \times 10^{-1}$ | 3,2029 |
| 11 | 90 | 4 | $1,76 \times 10^{-1}$ | 4,0537 |
| 12 | 100 | 4 | $2,17 \times 10^{-1}$ | 5,0046 |

Dari Tabel 4.5 perubahan jarak elektroda secara translasi atau linier dapat dibuat grafik Δx terhadap tegangan masukan (U_{eff}) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8.

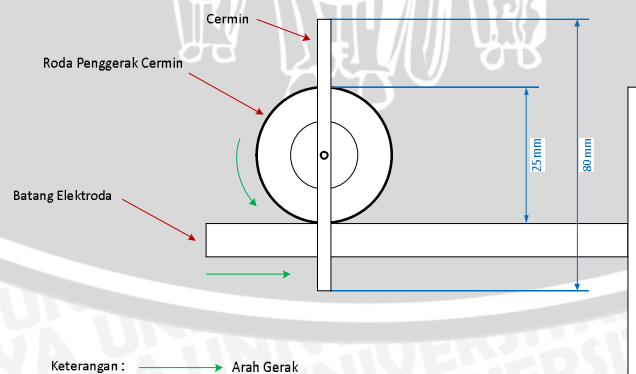


Gambar 4.8 Grafik Tegangan Masukan (U_{eff}) Terhadap Δx

Dari Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa Δx untuk tegangan masukan (U_{eff}) dalam rentang 0 – 20 kV maupun 21 – 100 kV sama-sama naik ketika U_{eff} dinaikkan. Kenaikan ini sebagai akibat dari gaya elektrostatik yang naik juga ketika U_{eff} dinaikkan. Bentuk dari grafik tidak meningkat secara linier tetapi parabolik, ini dikarenakan gaya elektrostatik yang dihasilkan berbanding lurus dengan kuadrat dari tegangan masukannya (U_{eff}).

4.7 Transformasi antara Gerak Translasi dengan Gerak Rotasi

Hubungan antara pergerakan translasi elektroda sebagai akibat dari gaya elektrostatik yang timbul pada sela elektroda dengan pergerakan rotasi dari cermin dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Transformasi Antara Gerak Elektroda dengan Gerak Cermin

Dari Gambar 4.9 terlihat bahwa batang elektroda bergerak secara translasi yang menggerakkan roda yang menempel dengan cermin yang bergerak secara

rotasi atau berputar. Roda yang bergerak secara rotasi akan membuat sebuah sudut putar sebesar θ . Dengan diketahui pergeseran maksimum elektroda pada $U_{eff} = 100 \text{ kV}$ adalah $0,5 \text{ cm}$, maka sudut θ yang dibentuk oleh rotasi roda adalah:

$$K = \pi \times D$$

K : Keliling

D : Diameter

$$K = \pi \times 25$$

$$K = 78,5398 \text{ mm}$$

$$K = 7,85398 \text{ cm}$$

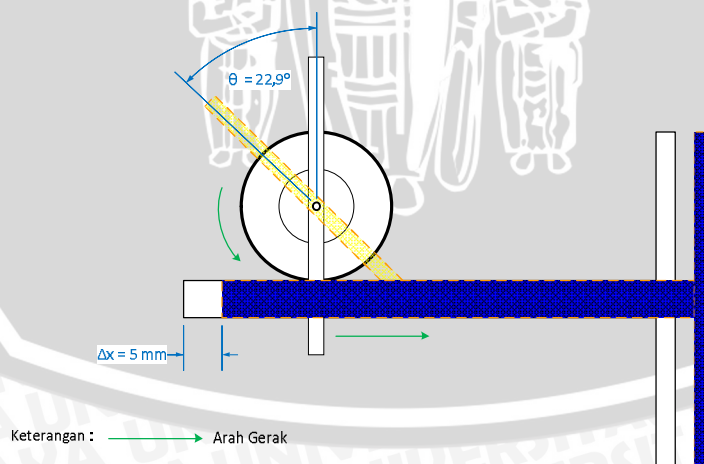
Sudut (θ) yang terbentuk adalah:

$$\theta = \frac{\text{besar pergeseran}}{K} \times 360^\circ$$

$$\theta = \frac{0,5}{7,85398} \times 360^\circ$$

$$\theta = 22,94^\circ$$

Sudut θ yang terbentuk akibat gerak translasi batang elektroda yang menggerakkan roda sehingga terjadi gerakan rotasi pada roda dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Pergeseran Δx dan Sudut θ Yang Terbentuk Pada Roda

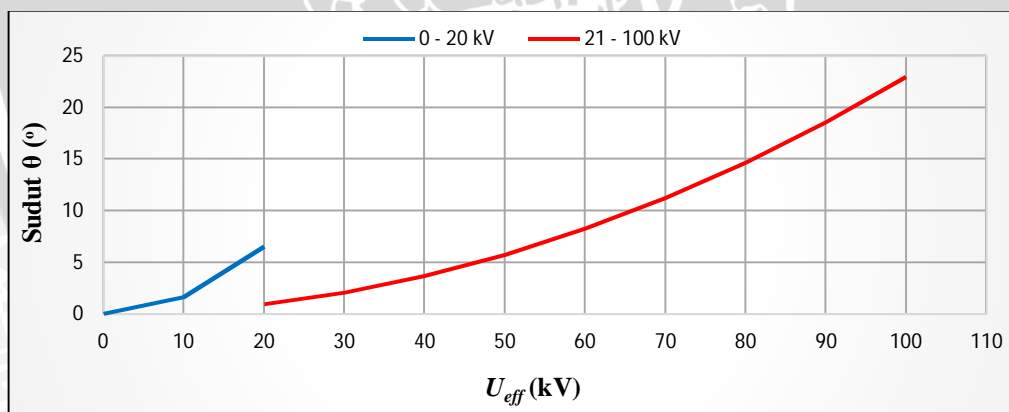
Dari Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa pergeseran sudut θ yang terbentuk sebesar $22,94^\circ$ akibat dari gerakan translasi batang elektroda sejauh $0,5 \text{ cm}$. Dengan

cara yang sama, akan didapatkan nilai θ secara teori dari nilai Δx yang lainnya yang dapat dilihat dalam Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Nilai Sudut θ dengan Variasi Δx

| No. | U_{eff} (kV) | Jarak Sela (cm) | Δx (mm) | Sudut θ (°) |
|-----|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 1 | 0 | 1,5 | 0 | 0 |
| 2 | 10 | 1,5 | 0,3559 | 1,63 |
| 3 | 20 | 1,5 | 1,4235 | 6,52 |
| 4 | 20 | 4 | 0,2002 | 0,92 |
| 5 | 30 | 4 | 0,4504 | 2,06 |
| 6 | 40 | 4 | 0,8007 | 3,67 |
| 7 | 50 | 4 | 1,2512 | 5,73 |
| 8 | 60 | 4 | 1,8017 | 8,26 |
| 9 | 70 | 4 | 2,4523 | 11,24 |
| 10 | 80 | 4 | 3,2029 | 14,68 |
| 11 | 90 | 4 | 4,0537 | 18,58 |
| 12 | 100 | 4 | 5,0046 | 22,94 |

Dari Tabel 4.6 dapat dibuat grafik nilai sudut θ terhadap tegangan masukan U_{eff} seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik Nilai Tegangan Masukan (U_{eff}) Terhadap Sudut θ

Dari Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa bentuk grafiknya sama dengan grafik pada Gambar 4.8 karena nilai yang memiliki besaran panjang hanya diubah ke nilai besaran sudut. Sudut θ untuk tegangan masukan (U_{eff}) 0 – 20 kV maupun 21 – 100 kV sama-sama naik ketika U_{eff} dinaikkan. Kenaikan ini sebagai akibat dari gaya elektrostatis yang naik juga ketika U_{eff} dinaikkan.

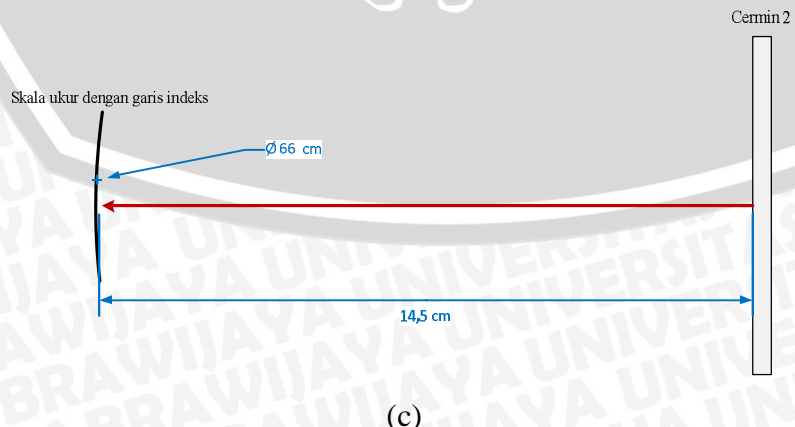
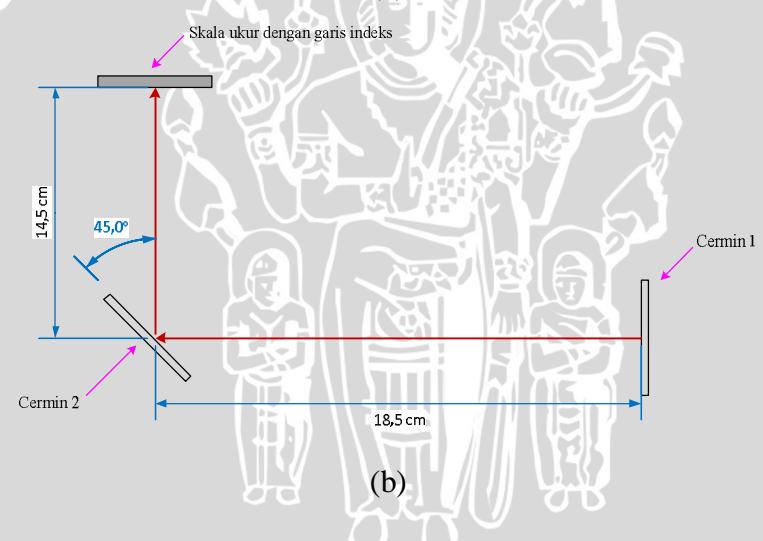
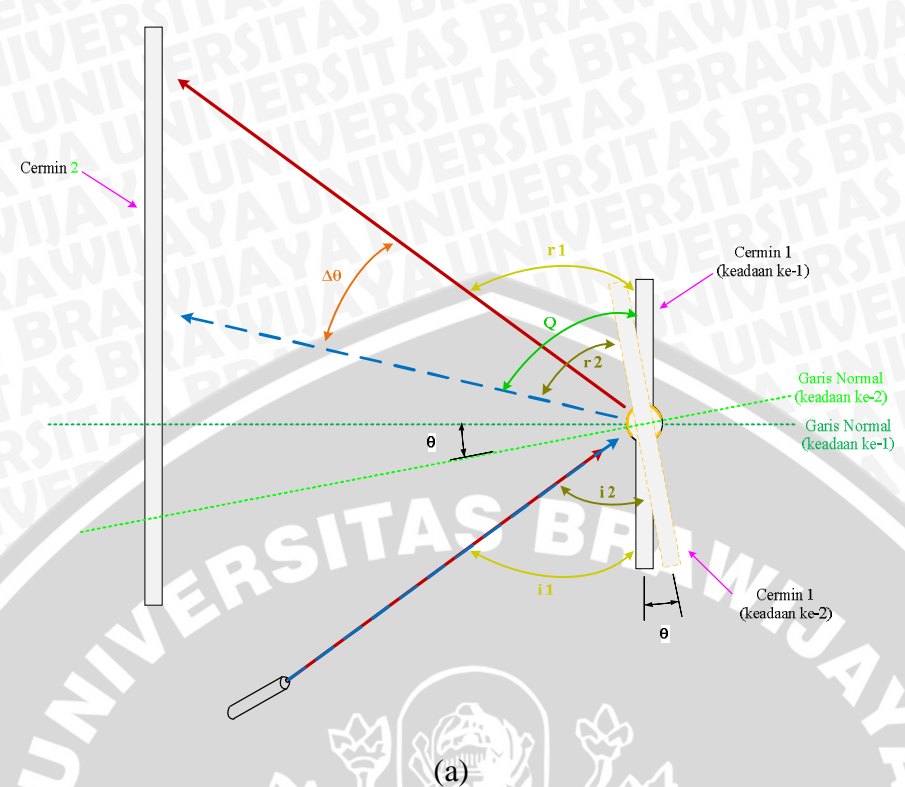
4.8 Pembuatan Skala Ukur dengan Garis Indeks Secara Teori

Penunjuk atau pencatat adalah bagian dari alat ukur melalui mana harga dari hasil suatu pengukuran ditunjukkan atau dicatat. Skala adalah susunan garis yang beraturan dengan jarak antara dua garis yang berdekatan dibuat tetap dan mempunyai arti tertentu. Secara visual pembacaan dilakukan dengan pertolongan garis indeks atau jarum penunjuk yang bergerak relatif terhadap skala. Posisi dari garis indeks atau jarum penunjuk pada skala menyatakan suatu harga.

Setelah didapatkan sudut θ dapat dibuat skala ukur dengan garis indeks yang menggunakan media sinar laser yang diarahkan ke cermin-1 yang kemudian dipantulkan ke cermin-2 yang selanjutnya diteruskan ke garis indeks sebagai penunjuk hasil pengukuran. Secara visual dapat dilihat pada Gambar 4.12.

Dari Gambar 4.12 dilihat dalam tiga sisi sudut pandang (a), (b), dan (c). Digunakannya cermin-2 untuk memperpanjang jarak pantul dengan menghemat tempat yang digunakan. Dari Gambar 4.12 (a) terlihat bahwa cermin-1 yang bergerak secara rotasi akan mengubah sudut pantul dari sinar laser. Pergerakan rotasi cermin-1 sejauh θ sesuai pada Tabel 4.5 dan dengan menggunakan hukum pemantulan cahaya pada cermin datar sesuai Gambar 2.7 akan diperoleh besar pergeseran sinar laser pada skala ukur yang menggunakan format garis indeks pada tiap-tiap U_{eff} . Q adalah besar sudut dari cermin-1 keadaan ke-1 dengan sinar pantul pada cermin-1 keadaan ke-2.

Pada Gambar 4.12 (b) terlihat bahwa panjang sinar laser yang dipantulkan sejauh 33 cm. Dan cermin-2 diputar posisinya sejauh 45° untuk membelokkan sinar yang bertujuan menghemat tempat. Dan pada Gambar 4.12 (c) terlihat bahwa bentuk dari garis indeks skala ukur berbentuk lengkungan dengan diameter 66 cm yang bertujuan untuk memudahkan pembuatan garis indeks skala ukur dan membuat lebih teliti pada saat pengukuran karena gerak dari sinar laser adalah berputar atau berotasi.



Gambar 4.12 Konstruksi Pantulan Sinar Laser



Dari Gambar 4.12 dapat dicari besarnya pergeseran sinar laser pada skala ukur dengan $U_{eff} = 100$ kV yang membentuk sudut θ sebesar $22,94^\circ$ dan diameter skala ukur sebesar 66 cm secara matematis adalah:

$$i_1 = r_1$$

$$i_2 = r_2$$

Dengan,

$$i_2 = i_1 + \theta$$

Maka,

$$r_2 = r_1 + \theta$$

Untuk nilai Q adalah:

$$Q = r_2 + \theta$$

$$Q = r_1 + \theta + \theta$$

$$Q = r_1 + 2\theta$$

Maka nilai dari $\Delta\theta$ adalah:

$$\Delta\theta = Q - r_1$$

$$\Delta\theta = (r_1 + 2\theta) - r_1$$

$$\Delta\theta = 2\theta$$

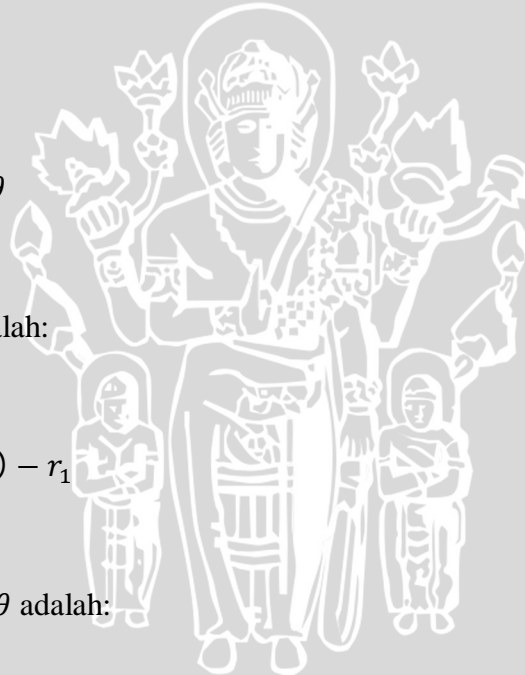
Jadi, besar dari nilai $\Delta\theta$ adalah:

$$\Delta\theta = 2\theta$$

$$\Delta\theta = 2 \times 22,94^\circ$$

$$\Delta\theta = 45,88^\circ$$

Untuk besar pergeseran garis indeks skala ukur dari garis yang bernilai 0 kV sampai 100 kV adalah:



$$\text{jarak dari garis yang bernilai } 0 \text{ kV} - U_{eff} = \frac{\Delta\theta}{360^\circ} \pi D$$

$$\text{jarak dari garis yang bernilai } 0 \text{ kV} - U_{eff} = \frac{45,88^\circ}{360^\circ} \times \pi \times 66$$

$$\text{jarak dari garis yang bernilai } 0 \text{ kV} - U_{eff} = 26,42 \text{ cm}$$

$$\text{jarak dari garis yang bernilai } 0 \text{ kV} - U_{eff} = 264,2 \text{ mm}$$

Dari perhitungan didapatkan besar jarak antara garis indeks yang bernilai 0 kV sampai garis indeks yang bernilai 100 kV adalah 264,2 mm. Dengan cara yang sama, akan didapatkan besar jarak antara garis indeks yang bernilai 0 kV sampai garis indeks yang bernilai U_{eff} secara teori dari nilai $\Delta\theta$ yang lainnya yang dapat dilihat dalam Tabel 4.7.

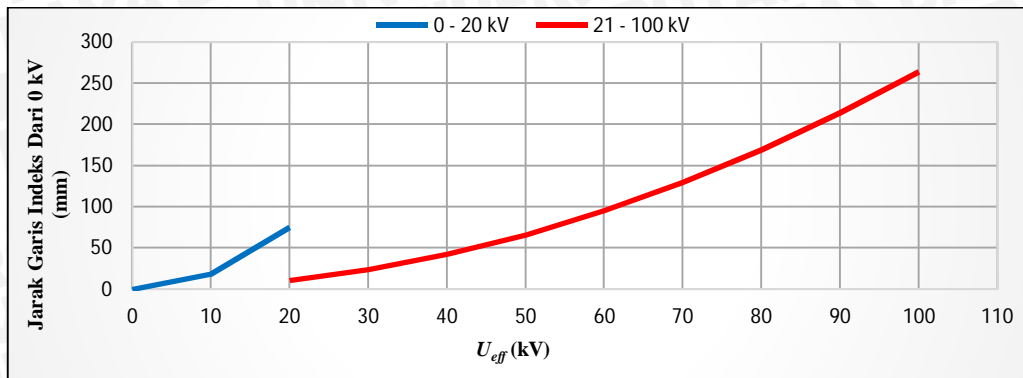
Tabel 4.7 Nilai $\Delta\theta$ dan Jarak Garis Indeks Dari 0 kV dengan Variasi U_{eff}

| No. | U_{eff} (kV) | Jarak Sela (cm) | Sudut θ ($^\circ$) | $\Delta\theta$ ($^\circ$) | Jarak garis indeks dari 0 kV (mm) |
|-----|-------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0 | 1,5 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 10 | 1,5 | 1,63 | 3,26 | 18,8 |
| 3 | 20 | 1,5 | 6,52 | 13,05 | 75,2 |
| 4 | 20 | 4 | 0,92 | 1,84 | 10,6 |
| 5 | 30 | 4 | 2,06 | 4,13 | 23,8 |
| 6 | 40 | 4 | 3,67 | 7,34 | 42,3 |
| 7 | 50 | 4 | 5,73 | 11,47 | 66,1 |
| 8 | 60 | 4 | 8,26 | 16,52 | 95,1 |
| 9 | 70 | 4 | 11,24 | 22,48 | 129,5 |
| 10 | 80 | 4 | 14,68 | 29,36 | 169,1 |
| 11 | 90 | 4 | 18,58 | 37,16 | 214 |
| 12 | 100 | 4 | 22,94 | 45,88 | 264,2 |

Dari Tabel 4.7 dapat dibuat grafik nilai jarak indeks garis dari 0 kV terhadap tegangan masukan (U_{eff}) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13.

Dari Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa bentuk grafiknya sama dengan grafik pada Gambar 4.11 karena nilai yang memiliki besaran sudut hanya diubah ke nilai besaran panjang. Sudut θ untuk tegangan masukan (U_{eff}) 0 – 20 kV maupun 21 – 100 kV sama-sama naik ketika U_{eff} dinaikkan. Kenaikan ini sebagai akibat dari gaya elektrostatik yang naik juga ketika U_{eff} dinaikkan. Bentuk dari grafik tidak

meningkat secara linier tetapi parabolik, ini dikarenakan gaya elektrostatik yang dihasilkan berbanding lurus dengan kuadrat dari tegangan masukannya (U_{eff}).



Gambar 4.13 Grafik Tegangan Masukan (U_{eff}) Terhadap Nilai Jarak Indeks Garis Dari 0 kV

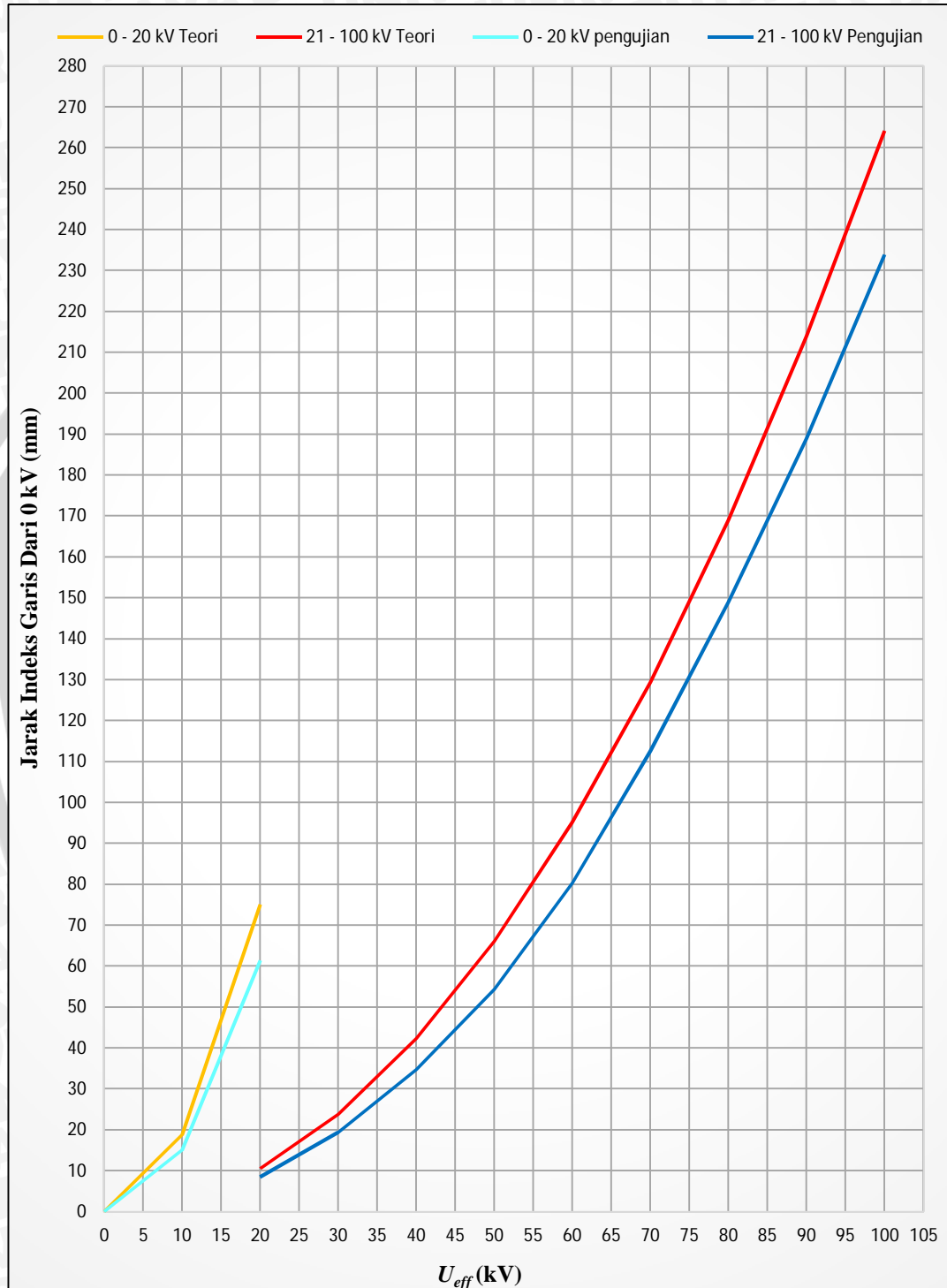
4.9 Pengujian Alat dan Pengambilan Data

Setelah melakukan perancangan selanjutnya adalah pembuatan alat sesuai sesuai dengan data-data yang telah diperoleh. Setelah alat selesai terealisasi selanjutnya dilakukan pengujian untuk diambil data jarak perpindahan pada skala indeks garis untuk dibandingkan dengan data jarak perpindahan pada skala indeks garis secara teori. Data-data yang diperoleh saat pengujian dapat dilihat dalam Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Data Jarak Indeks Garis Dari 0 kV dengan Variasi U_{eff} Saat Pengujian

| No. | U_{eff} (kV) | Jarak Sela (cm) | Jarak indeks garis dari 0 kV (mm) |
|-----|----------------|-----------------|-----------------------------------|
| 1 | 0 | 1,5 | 0,0 |
| 2 | 10 | 1,5 | 15,0 |
| 3 | 20 | 1,5 | 61,4 |
| 4 | 20 | 4 | 8,5 |
| 5 | 30 | 4 | 19,4 |
| 6 | 40 | 4 | 34,7 |
| 7 | 50 | 4 | 54,3 |
| 8 | 60 | 4 | 80,3 |
| 9 | 70 | 4 | 112,6 |
| 10 | 80 | 4 | 149,0 |
| 11 | 90 | 4 | 189,0 |
| 12 | 100 | 4 | 233,9 |

Data dari Tabel 4.8 dapat dibuat grafik perbandingan dengan data pada Tabel 4.7 yaitu perbandingan jarak garis indeks dari 0 kV dari kedua tabel tersebut. Grafik perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Grafik Tegangan Masukan (U_{eff}) Terhadap Perbandingan Jarak Indeks Dari 0 kV Secara Teori dengan Pengujian

Dari Gambar 4.14 terlihat ada perbedaan antara data secara teori dengan data saat pengujian. Hal ini dikarenakan adanya gesekan pada konstruksi alat yang tidak bisa dibuat 100% tanpa adanya gaya gesek. Selisih data pada kedua grafik merupakan nilai gaya gesek yang terjadi pada saat pengujian. Besarnya selisih antara data teori dan data pengujian untuk setiap tegangan masukan (U_{eff}) secara matematis adalah:

$$\Delta J = J_t - J_p$$

- ΔJ : Selisih Jarak Indeks Garis (dari 0 kV),
 J_T : Jarak Indeks Garis (dari 0 kV) secara teori, dan
 J_P : Jarak Indeks Garis (dari 0 kV) pada pengujian.

Pada tegangan masukan (U_{eff}) sebesar 100 kV, J_{teori} memiliki nilai sebesar 264,2 mm dan $J_{pengujian}$ memiliki nilai sebesar 233,9 mm, maka nilai dari ΔJ adalah:

$$\Delta J = 264,2 - 233,9$$

$$\Delta J = 30,3 \text{ mm}$$

Dari perhitungan didapatkan nilai dari ΔJ pada tegangan (U_{eff}) sebesar 100 kV adalah 30,3 mm. Dengan cara yang sama, akan didapatkan nilai dari ΔJ untuk tegangan masukan (U_{eff}) lainnya yang dapat dilihat dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Nilai ΔJ dengan Variasi Tegangan Masukan (U_{eff})

| No. | U_{eff} (kV) | Jarak Sela (cm) | J_T (mm) | J_P (mm) | ΔJ (mm) | ΔJ (%) |
|-----|----------------|-----------------|------------|------------|-----------------|----------------|
| 1 | 0 | 1,5 | 0 | 0,0 | 0 | 0 |
| 2 | 10 | 1,5 | 18,8 | 15,0 | 3,8 | 20,2 |
| 3 | 20 | 1,5 | 75,2 | 61,4 | 13,8 | 18,4 |
| 4 | 20 | 4 | 10,6 | 8,5 | 2,1 | 19,8 |
| 5 | 30 | 4 | 23,8 | 19,4 | 4,4 | 18,5 |
| 6 | 40 | 4 | 42,3 | 34,7 | 7,6 | 18 |
| 7 | 50 | 4 | 66,1 | 54,3 | 11,7 | 17,7 |
| 8 | 60 | 4 | 95,1 | 80,3 | 14,8 | 15,6 |
| 9 | 70 | 4 | 129,5 | 112,6 | 16,9 | 13,1 |
| 10 | 80 | 4 | 169,1 | 149,0 | 20,1 | 11,9 |
| 11 | 90 | 4 | 214 | 189,0 | 25,0 | 11,7 |
| 12 | 100 | 4 | 264,2 | 233,9 | 30,3 | 11,5 |

Dari Tabel 4.9 dapat dilihat bahwa tiap tegangan masukan U_{eff} memiliki nilai ΔJ yang bervariasi. Persentase selisih jarak garis indeks (dengan jarak sela 4 cm) secara teori dengan pengujian (ΔJ) paling kecil adalah 11,5% dan paling besar adalah 19,8% dengan rata-ratanya adalah 15,3%. Untuk jarak sela 1,5 cm, persentase selisih jarak garis indeks secara teori dengan pengujian (ΔJ) paling kecil adalah 18,4% dan paling besar adalah 20,2% dengan rata-ratanya adalah 19,3%. Setelah mendapatkan nilai ΔJ pada Tabel 4.9 selanjutnya bisa dicari besar gaya gesek yang terjadi pada setiap tegangan masukan U_{eff} . Untuk ΔJ pada tegangan masukan U_{eff} sebesar 100 kV adalah 30,3 mm, maka nilai $\Delta\theta_J$ secara matematis adalah:

$$\Delta J = \frac{\Delta\theta_J}{360^\circ} \times \pi D$$

$\Delta\theta_J$: sudut yang terbentuk dari nilai ΔJ .

$$\Delta\theta_J = \frac{\Delta J \times 360^\circ}{\pi D}$$

$$\Delta\theta_J = \frac{30,3 \times 360^\circ}{\pi \times 660}$$

$$\Delta\theta_J = 5,2696^\circ$$

Jadi, nilai $\Delta\theta_J$ untuk tegangan masukan (U_{eff}) sebesar 100 kV adalah $5,2696^\circ$. $\Delta\theta_J$ memiliki nilai sebesar $2 \times \theta_J$, maka untuk nilai θ_J adalah:

$$\theta_J = \frac{1}{2} \times \Delta\theta_J$$

$$\theta_J = \frac{1}{2} \times 5,2696$$

$$\theta_J = 2,6348^\circ$$

Jadi, nilai θ_J untuk tegangan masukan (U_{eff}) sebesar 100 kV adalah $2,6348^\circ$.

Dengan cara yang sama, akan didapatkan nilai dari $\Delta\theta_J$ dan θ_J untuk tegangan masukan (U_{eff}) lainnya yang dapat dilihat dalam Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Nilai $\Delta\theta_j$ dan θ_j dengan Variasi U_{eff}

| No. | U_{eff} (kV) | Jarak Sela (cm) | $\Delta\theta_j$ (°) | θ_j (°) |
|-----|----------------|-----------------|----------------------|----------------|
| 1 | 0 | 1,5 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | 10 | 1,5 | 0,6519 | 0,3259 |
| 3 | 20 | 1,5 | 2,3894 | 1,1947 |
| 4 | 20 | 4 | 0,3643 | 0,1821 |
| 5 | 30 | 4 | 0,7626 | 0,3813 |
| 6 | 40 | 4 | 1,3190 | 0,6595 |
| 7 | 50 | 4 | 2,0403 | 1,0202 |
| 8 | 60 | 4 | 2,5696 | 1,2848 |
| 9 | 70 | 4 | 2,9330 | 1,4665 |
| 10 | 80 | 4 | 3,4930 | 1,7465 |
| 11 | 90 | 4 | 4,3464 | 2,1732 |
| 12 | 100 | 4 | 5,2696 | 2,6348 |

Setelah didapatkan nilai-nilai dari θ_j , selanjutnya bisa dicari besar gaya gesek yang terjadi pada alat. Gaya gesek adalah gaya yang timbul akibat adanya gesekan dua buah materi atau lebih. Sebelum mencari besar gaya gesek, dicari besar pergeseran yang terjadi pada batang elektroda. Besar pergeseran dari batang elektroda saat pengujian ($\Delta x_{pengujian}$) Untuk θ_j tegangan masukan U_{eff} sebesar 100 kV adalah 2,6348° adalah:

$$\Delta x_{pengujian} = \frac{\theta_j \times K}{360^\circ}$$

$$\Delta x_{pengujian} = \frac{2,6348^\circ \times 7,85398}{360^\circ}$$

$$\Delta x_{pengujian} = 0,057 \text{ cm}$$

$$\Delta x_{pengujian} = 0,00057 \text{ m}$$

Maka nilai dari gaya gesek (\bar{F}_j) secara matematis adalah:

$$|\bar{F}_j| = K_p \times \Delta x_{pengujian}$$

$$|\bar{F}_j| = 43,4 \times 0,00057$$

$$|\bar{F}_j| = 0,02495 \text{ N}$$

Jadi, nilai dari pergeseran elektroda pada waktu pengujian ($\Delta x_{\text{pengujian}}$) adalah 0,057 cm dan gaya geseknya (\bar{F}_J) adalah 0,02495 N. Dengan cara yang sama, akan didapatkan nilai dari $\Delta x_{\text{pengujian}}$ dan \bar{F}_J untuk tegangan masukan (U_{eff}) lainnya yang dapat dilihat dalam Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Nilai $\Delta x_{\text{pengujian}}$ dan \bar{F}_J dengan Variasi U_{eff}

| No. | U_{eff} (kV) | Jarak Sela (cm) | $\Delta x_{\text{pengujian}}$ (cm) | \bar{F}_J (N) |
|-----|-----------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
| 1 | 0 | 1,5 | 0,000 | 0,00000 |
| 2 | 10 | 1,5 | 0,007 | 0,00309 |
| 3 | 20 | 1,5 | 0,026 | 0,01131 |
| 4 | 20 | 4 | 0,004 | 0,00172 |
| 5 | 30 | 4 | 0,008 | 0,00361 |
| 6 | 40 | 4 | 0,014 | 0,00624 |
| 7 | 50 | 4 | 0,022 | 0,00966 |
| 8 | 60 | 4 | 0,028 | 0,01217 |
| 9 | 70 | 4 | 0,032 | 0,01389 |
| 10 | 80 | 4 | 0,038 | 0,01654 |
| 11 | 90 | 4 | 0,047 | 0,02058 |
| 12 | 100 | 4 | 0,057 | 0,02495 |

Pada Tabel 4.11 terlihat bahwa terdapat gesekan pada alat ukur voltmeter elektrostatik ini. Nilai gaya gesek tersebut diperoleh dari selisih antara J_T dengan J_P selanjutnya dicari gaya gesek dengan menggunakan perhitungan secara matematis.