

RANCANG BANGUN VOLTMETER ELEKTROSTATIK UNTUK PENGUKURAN NILAI EFEKTIF TEGANGAN TINGGI AC 100 KV

Bobby Hertanto, Pembimbing 1: Moch. Dhofir. Drs., Ir., MT., Pembimbing 2: Hery Purnomo. Ir., MT.

Abstrak—Pengukuran tegangan tinggi berbeda dengan pengukuran tegangan rendah karena voltmeter konvensional tidak bisa dihubungkan secara langsung keterminal tegangan tinggi yang akan diukur karena selain merusak alat ukur juga sangat membahayakan bagi pengguna voltmeternya. Pengukuran nilai efektif tegangan tinggi dapat menggunakan voltmeter elektrostatik tegangan tinggi. Voltmeter elektrostatik tegangan tinggi 100 kV dapat berupa susunan elektroda sela udara yang sederhana dan mudah dalam rekasayanya.

Dari hasil perhitungan secara teori didapatkan dengan menggunakan elektroda piring-piring berdiameter 20 (dengan diameter elektroda yang bergerak sebesar 10 cm), jarak sela 4 cm dan tegangan masukan sebesar 100 kV didapatkan pergeseran sebesar 0,5 cm secara translasi yang kemudian ditransformasikan secara rotasi sehingga didapatkan sudut sebesar 22,94°. Dengan panjang lengan sebesar 33 cm didapatkan panjang skala busur sebesar 26,42 cm. Pada saat pengujian untuk tegangan masukan maksimum 100 kV didapatkan panjang skala busur sebesar 23,39 cm. Terdapat selisih panjang garis indeks antara teori dengan pengujian karena pada saat pengujian terdapat gaya gesek pada sistem elektro-mekanik yang mempengaruhi panjang garis indeks skala bar. Persentase selisih jarak garis indeks (dengan jarak sela 4 cm) secara teori dengan pengujian (Δ) rata-ratanya adalah 15,3% dan jarak sela 1,5 cm rata-ratanya adalah 19,3%.

Kata Kunci— elektroda, gaya Coulomb, medan homogen, FEMM 4.2, voltmeter elektrostatik.

I. PENDAHULUAN

Selain untuk keperluan pengujian di laboratorium, pengukuran tegangan tinggi dibutuhkan juga untuk pengukuran tegangan tinggi di gardu induk sistem tenaga listrik dan instalasi konsumen industri. Pengukuran tegangan tinggi berbeda dengan pengukuran tegangan rendah karena voltmeter konvensional tidak dapat dihubungkan langsung keterminal tegangan tinggi yang akan diukur. Selain merusak alat ukur, cara itu sangat berbahaya bagi pengguna voltmeternya. Karena itu, perlu penjelasan khusus mengenai pengukuran tegangan tinggi.

Pada pengukuran tegangan tinggi, termasuk tegangan tinggi AC harus dilakukan dari sisi tegangan tingginya. Adapun parameter-parameter tegangan tinggi AC yang penting untuk diukur adalah nilai puncak dan nilai efektifnya.

Di laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya hanya tersedia peralatan pengukur nilai puncak tegangan tinggi AC, seperti menggunakan sela bola dan teknik pembagi tegangan kapasitif dan tidak tersedia peralatan yang dapat mengukur nilai efektif tegangan tinggi AC.

Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah alat pengukur nilai efektif tegangan tinggi AC dan dalam penelitian ini

akan dilakukan rancang bangun sebuah alat ukur nilai efektif tegangan tinggi dengan menggunakan prinsip gaya elektrostatik yaitu bila elektroda sisi tegangan tinggi diberi sumber tegangan, maka akan terjadi interaksi (timbul medan listrik) antara dua buah elektroda yang masing-masing mempunyai potensial berbeda. Kemudian terjadi gaya tarik atau gaya elektrostatik (Gaya Coulomb) antara muatan listrik.

Nilai efektif tegangan tinggi AC dapat juga ditentukan melalui teknik pengukuran nilai puncak tegangan tinggi AC apabila bentuk gelombang tegangannya sinusoidal murni. Padahal pada umumnya bentuk gelombang tegangan dari sumber PLN belum tentu sinusoidal murni. Sehingga, penentuan nilai tegangan efektif yang dihitung dari hasil pengukuran nilai tegangan puncak hasilnya diragukan.

Kelebihan dari alat ukur voltmeter elektrostatik dapat digunakan untuk berbagai bentuk gelombang tegangan tinggi baik yang berbentuk sinusoidal (yang murni maupun tidak murni) dan non sinusoidal.

Berawal dari belum tersedianya alat ukur tegangan tinggi untuk mengukur nilai efektif di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya maka pada penelitian ini akan dilakukan rancang bangun voltmeter elektrostatik untuk pengukuran nilai efektif tegangan tinggi AC 100 kV.

II. DASAR TEORI

A. Pengukuran Tegangan Tinggi

Ada tiga jenis tegangan tinggi yang akan diukur dalam pengujian tegangan tinggi, yaitu tegangan tinggi AC, tegangan tinggi DC, dan tegangan tinggi impuls. Ada beberapa cara pengukuran tegangan tinggi, yaitu metode pengukuran dengan (1) sela bola standar, (2) metode pengukuran Chubb & Fortescue, (3) pembagi tegangan kapasitif, (4) trafo ukur, dan (5) voltmeter elektrostatik.

B. Dasar Gaya Elektrostatik (Gaya Coulomb)

Gaya Coulomb (\vec{F}) antara dua muatan titik Q_1 dan Q_2 di udara secara matematis dinyatakan:[1]

$$\vec{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 R^2} \hat{a}_R \quad (1)$$

Apabila gaya Coulomb diterapkan pada dua elektroda bola secara matematis dinyatakan:[1]

$$\vec{F} = \frac{C^2 U^2}{4\pi\epsilon_0 R^2} \quad (2)$$

C. Intensitas Medan Listrik

Intensitas medan listrik (\vec{E}) disebabkan medan titik Q_1 yang bergerak sejauh R dimuati tersebut secara matematis dinyatakan:[1]

$$\vec{E} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R^2} \hat{a}_R \quad (3)$$

Mengacu pada Pers. (1) terdapat hubungan antara gaya Coulomb \vec{F} dan intensitas medan listrik \vec{E} , yaitu:

$$\vec{F} = Q_2 \vec{E} \tag{4}$$

D. Faktor Efisiensi Medan Listrik

Besar faktor efisiensi medan listrik (η) pada berbagai konfigurasi susunan elektroda dengan bentuk geometri tertentu dapat didefinisikan menurut Schwaiger sebagai berikut:[2]

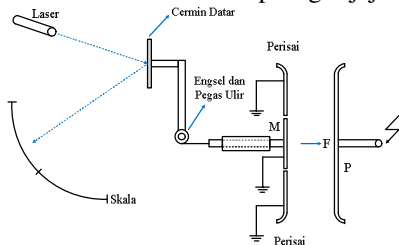
$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maksimum}} \tag{5}$$

Dan medan listrik maksimumnya adalah

$$E_{maksimum} = \frac{U}{s \times \eta_m} \tag{6}$$

E. Alat Ukur Nilai Tegangan Efektif Voltmeter Elektrostatik

Alat ukur ini digunakan untuk mengukur tegangan tinggi searah dan tegangan tinggi bolak-balik. Konstruksinya diberikan pada Gambar 1. Bagian utama alat ukur ini adalah dua elektroda piring sejajar.[3]



Gambar 1. Alat Ukur Voltmeter Elektrostatik

Salah satu diantaranya dapat bergerak sepanjang sumbu elektroda (Plat M) dan elektroda yang satu lagi adalah elektroda pengukur (Plat P). Kedua elektroda ini merupakan susunan kondensator yang kapasitansinya sebagai berikut:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{s} \tag{7}$$

Jika elektroda pengukur bertegangan, maka timbul medan elektrik (E) di antara kedua elektroda. Agar distribusi medan elektrik tersebut merata, maka di sekeliling piring bergerak diberikan perisai. Medan elektrik ini akan menimbulkan gaya pada muatan-muatan bebas yang terdapat pada elektroda (plat M). Satu muatan Q akan mengalami gaya sebesar:

$$\vec{F} = Q \vec{E} \tag{8}$$

Jika piring (Plat M) berpindah maka ada perubahan energi yang tersimpan pada kapasitor C. Misalnya besarnya perubahan tersebut adalah dW_c . Energi ini digunakan untuk memindahkan piring (Plat M) sejauh ds. Jika gaya yang membuat perpindahan itu adalah \vec{F} , maka energi yang dibutuhkan piring (Plat M) untuk berpindah sejauh ds adalah sebesar $\vec{F} \times ds$. Oleh karena itu dapat ditulis sebagai berikut:

$$\vec{F} = \frac{1}{2} U^2 \epsilon_0 A \frac{1}{s^2} = k_f U^2 \tag{9}$$

dengan

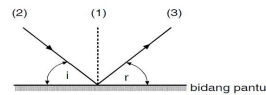
$$k_f = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{s^2} \tag{10}$$

Jika diterapkan tegangan u(t) pada suatu susunan elektroda, misalnya seperti dalam Gambar 1, maka medan elektrik menghasilkan gaya F(t) yang cenderung mempersempit sela elektroda (S). Gaya tarik tersebut dapat dihitung dari perubahan energi dari medan elektrik dari Pers. (9) sehingga diperoleh:

$$\vec{F} = k_f u_{eff}^2 \tag{11}$$

F. Hukum Pemantulan Cahaya

Pada saat sinar mendatangi permukaan cermin datar, cahaya akan di pantulkan seperti Gambar 2. garis yang tegak lurus bidang pantul disebut garis normal. Pengukuran sudut datang dan sudut pantul dimulai dari garis ini. Sudut datang (i) adalah sudut yang dibentuk oleh garis normal (1) dan sinar datang (2), sedangkan sudut pantul (r) adalah sudut yang dibentuk oleh garis normal (1) dan sinar pantul (3).[4]



Gambar 2. Hukum Pemantulan Cahaya Pada Cermin Datar Berdasarkan pengamatan dan pengukuran didapatkan bahwa:

1. Sinar datang, sinar pantul dan garis normal terletak pada bidang yang sama,
2. Besar sudut datang (i) sama dengan besar sudut pantul (r).

G. Pegas

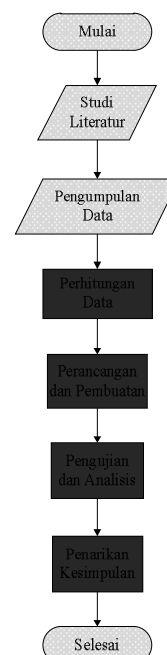
Jika gaya yang bekerja pada sebuah pegas dihilangkan, pegas tersebut akan kembali pada keadaan semula. Robert Hooke, ilmuwan berkebangsaan Inggris menyimpulkan bahwa sifat elastis pegas tersebut ada batasnya dan besar gaya pegas sebanding dengan pertambahan panjang pegas. Dari penelitian yang dilakukan, didapatkan bahwa besar gaya pegas pemulih sebanding dengan pertambahan panjang pegas. Secara matematis, dapat dituliskan sebagai:[5]

$$F_p = -k_p \Delta x \tag{12}$$

Tanda minus (-) diberikan karena arah gaya pemulih pada pegas berlawanan dengan arah gerak pegas tersebut.

III. METODE PENELITIAN

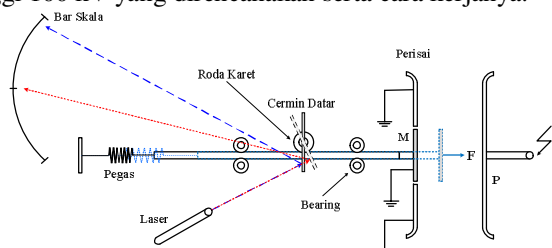
Metodologi penelitian memberikan gambaran urutan langkah-langkah yang dilaksanakan untuk mencapai tujuan penyusunan penelitian. Adapun urutan langkah-langkah penyusunan penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3. Diagram Alir Metode Penelitian

A. Perencanaan Bentuk Voltmeter Elektrostatis Tegangan Tinggi

Voltmeter elektrostatis tegangan tinggi yang direncanakan sebagai alat ukur tegangan efektif yang mempunyai rentang ukur 0 – 100 kV. Gambar 4 menunjukkan bentuk voltmeter elektrostatis tegangan tinggi 100 kV yang direncanakan serta cara kerjanya.



Gambar 4. Voltmeter Yang Direncanakan

Gambar 4 menjelaskan bahwa ketika elektroda plat (M) bekerja gaya elektrostatis, elektroda plat (M) akan bergerak secara horizontal yang terhubung dengan sebuah poros tempat cermin berada yang keduanya dihubungkan dengan sebuah batang besi sehingga pada reflektor cermin datar bergerak secara rotasi kemudian membentuk sebuah sudut θ . Sehingga terjadi simpangan sinar laser yang dipantulkan oleh reflektor cermin datar yang kemudian sinar laser tersebut menunjuk ke bar skala. Pegas berfungsi untuk menahan jarak pergeseran agar tidak melebihi batas pergeseran yang diijinkan dan mengembalikan posisi elektroda plat (M) pada keadaan semula ketika sumber dimatikan (keadaan sebelum elektroda P diberi tegangan). Perisai pada elektroda digunakan untuk membuang medan yang tidak homogen sebagai akibat dari efek pinggir elektroda sehingga hanya medan yang relatif homogen saja yang diambil yaitu yang berada di pusat elektroda.

B. Penskalaan

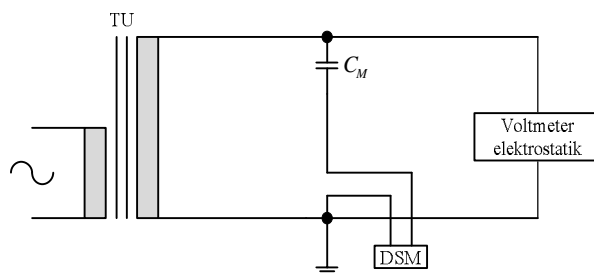
Pada distribusi medan listrik yang seragam dengan kekuatan dielektrik udara standar sebesar 30 kV/cm, secara teoritis dalam jarak sela 1 cm akan terjadi tembus (*breakdown*) pada tegangan 30 kV. Sehingga, bila jarak sela $s = 1$ cm, maka rentang ukurnya < 30 kV. Maka akan dibuat dua penskalaan yaitu:

1. Skala untuk 0 – 20 kV digunakan jarak sela minimal 1,5 cm.
2. Skala untuk 21 – 100 kV digunakan jarak sela minimal 4 cm.

C. Pengujian

Pengujian dilakukan di laboratorium tegangan tinggi Fakultas Teknik Jurusan Elektro Universitas Brawijaya. Rangkaian pengujian yang digunakan untuk membuat penskalaan pada voltmeter elektrostatis tegangan tinggi 100 kV.

Rangkaian pengujian yang digunakan untuk membuat bar skala adalah rangkaian pengukuran tegangan bolak-balik[6]. Susunan rangkaian pengukuran tegangan bolak-balik, yaitu; trafo uji 100 kV disusun secara paralel dengan objek uji. Sedangkan alat ukur DSM (alat ukur tegangan tinggi AC) dipasang seri dengan kapasitor C_M , yang kemudian disusun secara paralel dengan trafo uji dan objek uji. Trafo uji 1 fasa 3 belitan 220V/100kV yang berfungsi untuk menaikkan tegangan pada belitan sisi sekunder.



Gambar 5. Rangkaian Pengujian

Prosedur pengujian sebagai berikut:

- a. Objek uji yang digunakan adalah voltmeter elektrostatis.
- b. Rangkaian percobaan yang digunakan adalah rangkaian pengukuran tegangan bolak-balik dengan kapasitor $C_M = 100$ pF dan trafo uji adalah trafo tegangan tinggi 220V/100kV, 3 belitan serta DSM untuk mengukur tegangan tinggi.
- c. Elektroda yang digunakan adalah elektroda plat sejajar yang salah satunya bisa bergerak.
- d. Jarak sela S pada elektroda plat sejajar yang diterapkan adalah minimal 1,5 cm (untuk 0 – 20 kV) dan 4 cm (untuk 21 – 100 kV).
- e. Pengujian pertama untuk tegangan 0 - 20 kV menggunakan jarak sela S dengan jarak minimal 1,5 cm.
- f. Pengujian kedua untuk tegangan 21 – 100 kV menggunakan jarak sela S dengan jarak minimal 4 cm.

Langkah-langkah pengujian meliputi:

1. Elektroda diset pada jarak sela yang telah ditentukan.
2. Menaikkan tegangan pemuatan (DSM) mulai 0 kV sampai harga tertentu sehingga mencapai tegangan yang diinginkan (tegangan diset kelipatan 10 kV).
3. Mengamati pergeseran elektroda (Plat M).
4. Mengamati simpangan pantulan sinar laser pada bar skala lalu memberi tanda pada bar skala sesuai simpangan sinar laser.
5. Mencatat jarak pergeseran yang sinar laser pada bar skala.
6. Mengulangi langkah-langkah 1 – 5 dengan ketentuan jarak sela 0 – 20 kV (untuk jarak sela 1,5 cm) dan 21 – 100 kV (untuk jarak sela 4 cm).

IV. PERANCANGAN DAN REALISASI ALAT

A. 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 elektrostatis tegangan tinggi ini. Menurut Pers. (11), luas permukaan elektroda aktif bagian dalam (Plat M) sebanding dengan gaya \vec{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 elektrostatis (\vec{F}) yang diperoleh ditunjukkan pada grafik berikut:



Gambar 6. Grafik Perbesaran Luas Permukaan Terhadap Gaya (\bar{F})

Melihat Gambar 6, 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.

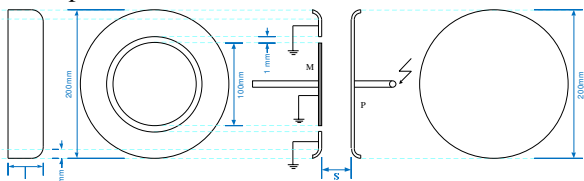
Dengan diameter pada elektroda yang bergerak (Plat M) yang telah ditentukan sebesar 10 cm, bisa ditentukan jarak sela yang efektif untuk rentang ukur tegangan 0 – 100 kV. Dengan tegangan (U_{eff}) 100 kV dan diameter 10 cm maka gaya (\bar{F}) yang diperoleh pada tiap-tiap jarak sela ditunjukkan pada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



Gambar 7. Grafik Perbesaran Jarak Sela Terhadap Gaya (\bar{F})

Melihat Gambar 7 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 $0 \leq U_{eff} \leq 20$ 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 grafik pada Gambar 6 dan Gambar 7 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 8.



Gambar 8. Struktur Rancangan Elektroda Sela Udara

B. Perhitungan Gaya Elektrostatis Pada Sela Elektroda

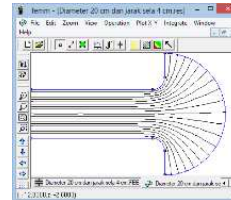
Untuk mendapatkan gaya yang dihasilkan dengan jarak sela S dan luas permukaan A digunakan Pers. (11). Dengan diameter elektroda sebesar 10 cm, jarak sela 4 cm, dan tegangan masukan 100 kV serta memasukkan nilai-nilai $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ farad/meter, dan $A = \pi \times 0,05^2$, maka gaya elektrostatis \bar{F} dapat diperoleh dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Gaya Elektrostatis Yang Dihasilkan

Ueff (kV)	Gaya yang dihasilkan dalam (N) pada diameter (Plat M) 10 cm			
	Jarak Sela (cm)			
	1	1,5	4	4,5
0	0	0	0	0
10	3,48E-02	1,54E-02	2,17E-03	1,72E-03

20	1,39E-01	6,18E-02	8,69E-03	6,86E-03
30	3,13E-01	1,39E-01	1,95E-02	1,54E-02
40	5,56E-01	2,47E-01	3,48E-02	2,75E-02
50	8,69E-01	3,86E-01	5,43E-02	4,29E-02
60	1,25E+00	5,56E-01	7,82E-02	6,18E-02
70	1,70E+00	7,57E-01	1,06E-01	8,41E-02
80	2,22E+00	9,88E-01	1,39E-01	1,10E-01
90	2,81E+00	1,25E+00	1,76E-01	1,39E-01
100	3,48E+00	1,54E+00	2,17E-01	1,72E-01

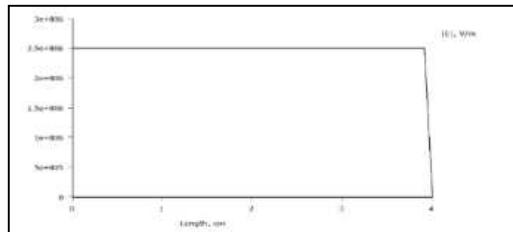
C. Analisis Distribusi Medan Listrik pada Elektroda Sela Udara



Gambar 9. Hasil Simulasi Equipotensial Elektroda Sela Udara

Gambar 9 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.

D. Pengaruh Jarak Sela Terhadap Efisiensi Medan Listrik



Gambar 10 Hasil Simulasi Grafik Kuant Medan Listrik Mutlaknya (Magnitude of Field Intensity, |E|) dengan Garis ukur pada poros elektroda

Gambar 10 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. Kuat medan listriknya 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.

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.

E. 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. (12), 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 perlukan sebagai berikut:

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

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

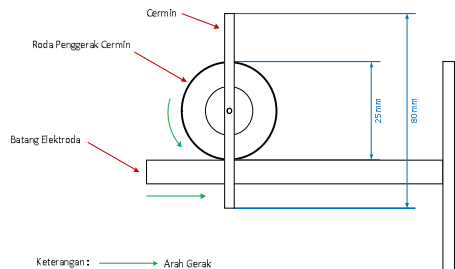
$$K_p = 43,4 \text{ N/m}$$

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. (12), nilai $K_p = 43,4 \text{ N/m}$, dan tegangan masukan sesuai Tabel 1 (data yang digunakan adalah yang berwarna biru) didapatkan nilai Δx secara teori yang dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan Δx dengan Variasi U_{eff} dan Jarak Sela

No.	U_{eff} (kV)	Jarak Sela (cm)	Gaya Elektrostatik (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

F. Transformasi antara Gerak Translasi dengan Gerak Rotasi



Gambar 13. Transformasi Antara Gerak Elektroda dengan Gerak Cermin

Dari Gambar 13 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 $U_{eff} = 100$ kV adalah 0,5 cm, maka sudut θ yang dibentuk oleh rotasi roda adalah:

$$K = \pi \times D$$

K : Keliling
D : Diameter

$$K = \pi \times 25$$

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

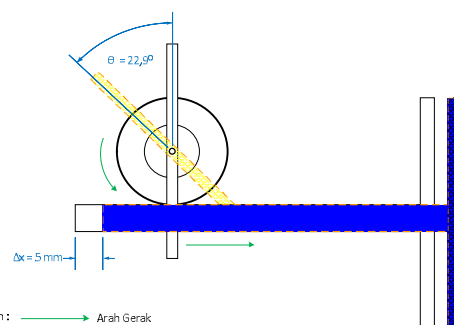
$$K = 7,85398 \text{ cm}$$

Sudut (θ) yang terbentuk adalah:

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

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

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



Keterangan : → Arah Gerak

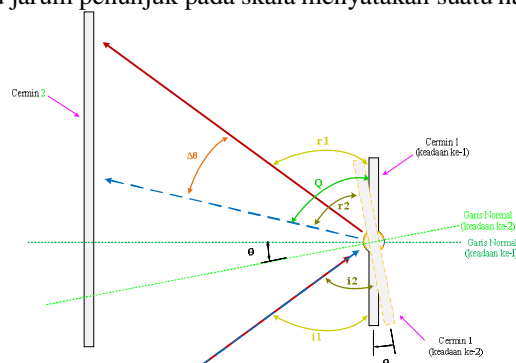
Gambar 14. Pergeseran Δx dan Sudut θ Yang Terbentuk Pada Roda
Dari Gambar 14 dapat dilihat bahwa pergeseran sudut θ yang terbentuk sebesar $22,94^\circ$ akibat dari gerakan translasi batang elektroda sejauh 0,5 cm. Dengan cara yang sama, akan didapatkan nilai θ secara teori dari nilai Δx yang lainnya yang dapat dilihat dalam Tabel 3.

Tabel 3 Nilai Sudut θ dengan Variasi Δx

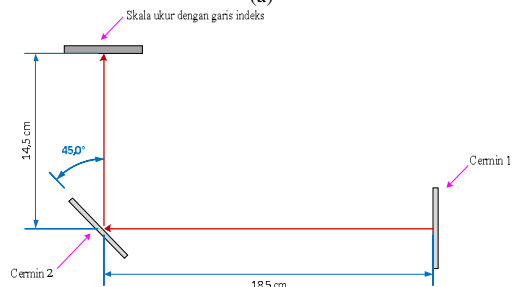
No.	U_{eff} (kV)	Jarak Sela (cm)	Δx (mm)	Sudut θ ($^\circ$)
1	0	1,5	0	0
2	10	1,5	0,3559	1,63
3	20	1,5	1,4235	6,52
4	20	4	0,2002	0,92
5	30	4	0,4504	2,06
6	40	4	0,8007	3,67
7	50	4	1,2512	5,73
8	60	4	1,8017	8,26
9	70	4	2,4523	11,24
10	80	4	3,2029	14,68
11	90	4	4,0537	18,58
12	100	4	5,0046	22,94

G. Pembuatan Skala Ukur dengan Garis Indeks Secara Teori

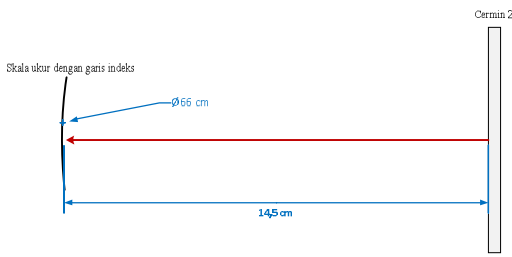
Secara visual pembacaan dilakukan dengan pertolongan garis indeks atau jarum penunjuk yang bergerak relatif terhadap skala. Posisi dari garis indeks atau jarum penunjuk pada skala menyatakan suatu harga.



(a)



(b)



(c)

Gambar 15. 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:

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

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

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

$$J_T = \frac{\Delta\theta}{360^\circ} \pi D$$

$$J_T = 264,2 \text{ mm}$$

Nilai $\Delta\theta$ yang lainnya dapat dilihat dalam Tabel 4.

Tabel 4 Nilai $\Delta\theta$ dan J_T

No.	U_{eff} (kV)	Jarak Sela (cm)	Sudut θ ($^\circ$)	$\Delta\theta$ ($^\circ$)	J_T (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

H. Pengujian Alat dan Pengambilan Data

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}) dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. 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

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%.

V. KESIMPULAN

Dari hasil perancangan dan realisasi alat, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- Untuk mengukur nilai efektif tegangan tinggi AC sampai 100 kV dengan prinsip voltmeter elektrostatik dapat digunakan susunan elektroda piring-piring dengan diameter (Plat P) adalah 20 cm dan diameter elektroda yang bergerak (Plat M) adalah 10 cm.
- Jarak sela elektroda maksimum yang diberlakukan pada voltmeter elektrostatik adalah 4 cm dan pada jarak sela ini intensitas medan homogen dapat diperoleh dengan menggunakan bentuk elektroda piring-piring berdiameter 20 cm.
- Untuk mendapatkan gaya yang cukup dalam pengukuran tegangan relatif rendah ($< 20kV$), maka voltmeter elektrostatik menggunakan dua skala ukur, pertama skala ukur 0 – 20 kV menggunakan jarak sela 1,5 cm sedangkan skala ukur 21 – 100 kV menggunakan jarak sela 4 cm.
- Untuk memperbesar pergeseran skala, maka digunakan transformasi gerak translasi menjadi gerak rotasi dimana pergeseran gerak translasi 0,5 cm untuk tegangan 100 kV ditransformasikan menjadi sudut $22,94^\circ$ dan dengan panjang lengan sebesar 33 cm, didapat panjang garis indeks sebesar 26,42 cm.
- Pada saat pengujian untuk tegangan masukan maksimum 100 kV didapatkan panjang skala busur sebesar 23,39 cm.
- Terdapat selisih panjang garis indeks antara teori dengan pengujian karena pada saat pengujian terdapat gaya gesek pada sistem elektro-mekanik yang mempengaruhi panjang garis indeks skala bar.
- Persentase selisih jarak garis indeks (dengan jarak sela 4 cm) secara teori dengan pengujian (ΔJ) rata-ratanya adalah 15,3% dan jarak sela 1,5 cm rata-ratanya adalah 19,3%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Edminister. Joseph A., "Schaum's Outline Series Theory And Problems Of Electromagnetics", McGraw-Hill Book Company, New York, 1979
- [2] "Modul Materi Praktikum Tegangan Tinggi", Lab TTT UB, Malang
- [3] Tobing, Bonggas L., "Dasar-Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi" Edisi Kedua, Erlangga, Jakarta, 2012
- [4] Sutarno, "Fisika Untuk Universitas" Edisi Pertama, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2013
- [5] Puja, IGN Wiratmaja, "Elemen Mesin I", Mesin ITB, Bandung, 2005