

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

MODEL MINIATUR *ELECTROSTATIC PRECIPITATOR*

5.1 Umum

Pengujian model miniatur *Electrostatic Precipitator* (EP) ini dilaksanakan di Laboratorium Tegangan Tinggi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

5.2 Tujuan Pengujian

Tujuan dari pengujian model miniatur EP ini adalah untuk mengetahui prinsip kerja dari EP. Parameter yang diamati adalah pengaruh kuat medan terhadap perubahan jarak antar elektroda kawat dan plat. Selain itu juga mengamati pengaruh besarnya efisiensi dalam menangkap debu terhadap perubahan jarak antar elektroda kawat dan plat.

5.3 Peralatan Pengujian

Dalam pengujian model miniatur ini menggunakan peralatan seperti pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Rangkaian Percobaan dan Pengujian Model Miniatur EP

Sumber: Dokumentasi penulis

Adapun penjelasan tentang peralatan yang dipakai yaitu:

1. Transformator Uji (TEO 100/10)

Transformator uji digunakan untuk membangkitkan tegangan tinggi dengan spesifikasi sebagai berikut:

Daya (P_{out}) : 5 kVA

V_{primer} : 220/240 V

$V_{sekunder}$: 100 kV

Belitan : 3 belitan

Fasa : 1 Fasa

2. Dioda Penyearah (D_1 dan D_2)

Dioda penyearah digunakan untuk menyearahkan hasil keluaran Transformator uji menjadi tegangan DC. Dioda yang digunakan sebanyak dua buah. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi adanya tegangan balik. Spesifikasi dari dioda yaitu:

V_{max} : 140 kV

Resistansi : 100 k Ω

Arus : 20 mA

3. Kapasitor perata (C_m)

Kapasitor perata digunakan untuk mengurangi ripple yang terjadi karena hasil penyearahan dioda. Kapasitor memiliki besaran nilai 10000 pF dengan tegangan kerja maksimal 140 kV.

4. Resistor (R_m)

Resistor ini merupakan resistor pembagi tegangan agar alat ukur DGM dapat membaca tegangan keluaran dari diode. Resistor ini memiliki nilai resistansi sebesar 280 M Ω dan tegangan kerja 140 kV.

5. DGM

DGM adalah alat ukur tegangan tinggi DC untuk membaca tegangan keluaran dari dioda.

6. Model miniatur EP (*Electrostatic Precipitator*)

Model miniatur EP ini digunakan sebagai objek uji.

7. Debu Pengotor

Debu pengotor yang digunakan adalah debu yang berasal dari hasil keluaran cerobong yang berada disekitar lingkungan pabrik.

8. Timbangan Digital

Timbangan digital yang digunakan adalah timbangan digital Ohaus yang memiliki ketelitian 1×10^{-4} gram.

5.4 Prosedur Pengujian

Pengujian model miniatur EP ini dilakukan dengan merangkai peralatan seperti pada Gambar 3.1. Prinsip kerja rangkaian diatas adalah meyearahkan tegangan masukan yang berupa tegangan bolak balik dengan menggunakan dua buah diode penyearah. Kemudian, hasil dari penyearah setengah gelombang ini diratakan dengan menggunakan kapasitor perata yang berkapasitas cukup besar (10000 pF) sehingga tegangan gelombang setelah melewati kapasitor menyerupai gelombang tegangan arus searah (DC) dengan riak yang kecil. Susunan dioda yang digunakan secara terbalik untuk mendapatkan tegangan searah yang berpolaritas negatif.

Prosedur dalam melakukan pengujian model miniatur EP antara lain:

1. Menyusun rangkaian seperti pada Gambar 3.1
2. Mempersiapkan model miniatur EP yang akan digunakan
3. Menghubungkan elektorda kawat dengan catu negatif dan elektorda plat dengan *ground*.
4. Menghidupkan peralatan pengendali dan peralatan penyuplai tegangan tinggi dengan menempatkan *switch* utama pada posisi ON.
5. Memastikan bahwa sangkar faraday telah tertutup rapat.
6. Menghubungkan suplai ke transformator penaik tegangan dengan menggunakan pengendali. Pada langkah ini memastikan lampu indikator berwarna merah menyala yang berarti bahwa telah dimungkinkan dari tegangan tinggi.
7. Menyalakan dan menaikkan catu tegangan tinggi arus searah hingga terjadi spark over pada peralatan pengendali.
8. Mencatat tegangan saat terjadi spark over (tegangan tembus).

9. Mematikan catu tegangan, kemudian memasukkan debu kedalam kotak penampungan.
10. Menghidupkan kembali catu tegangan, lalu menaikkan hingga timbul korona (saat terdengar suara mendesis).
11. Menyalakan kipas angin dan penggetar yang diletakkan di sebelah kotak penampung debu.
12. Setelah semua debu telah dialirkan, matikan penggetar dan kipas angin dan matikan suplai daya.
13. Mengumpulkan debu-debu yang terjatuh dan yang menempel pada plat dalam wadah yang berbeda.
14. Mengulangi langkah prosedur ke-10 sampai ke-13 sampai 3 kali

Pengujian dilakukan dengan variasi jarak antar elektroda kawat dan elektroda plat pengumpul sebesar 4 cm dan 5 cm. Jenis partikel debu yang digunakan, yaitu polutan debu hasil gas buang pabrik yang tersebar dilingkungan sekitar pabrik. Bentuk elektroda kawat (elektroda negatif), yaitu lurus dan halus dengan panjang 12 cm. Sedangkan elektroda plat pengumpul (elektroda positif) berbentuk plat datar dengan tebal 0,1 cm. Jarak antar elektroda kawat selalu konstan. Tegangan yang digunakan berpolaritas negatif karena korona yang digunakan adalah korona negatif.

5.5 Hasil Pengujian dan Analisis

5.5.1 Hasil Pengujian Model Miniatur EP Sebelum Ada Partikel

Pengujian model miniatur EP sebelum ada partikel adalah pengujian tegangan tembus dan korona yang terjadi sebelum partikel dialirkan kedalam model miniatur EP. Hasil dari pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.1 dan 5.2 sebagai berikut.

Tabel 5.1 Hasil Pengujian Model Miniatur EP Sebelum Ada Partikel Pada Jarak Antar Elektroda Kawat Dan Plat Pengumpul Sebesar 4 cm

No.	Tegangan Korona (V_k) (kV)	Tegangan Tembus (V_T) (kV)	E_{maks} (kV/cm)	$E_{rata-rata}$ (kV/cm)	η
1.	-21	-28	27,35	7	0,25594
2.	-21,5	-28,5	27,84	7,13	0,25593
3.	-22	-29,2	25,52	7,3	0,25596
Rata-rata	-21,5	-28,57	27,903	7,142	0,256

Sumber: Hasil pengujian

Tabel 5.2 Hasil Pengujian Model Miniatur EP Sebelum Ada Partikel Pada Jarak Antar Elektroda Kawat Dan Plat Pengumpul Sebesar 5 cm

No.	Tegangan Korona (V_k) (kV)	Tegangan Tembus (V_T) (kV)	E_{maks} (kV/cm)	$E_{rata-rata}$ (kV/cm)	η
1.	-22,5	-30	24,59	6	0,244
2.	-23,4	-31,2	25,7	6,24	0,243
3.	-24	-32	26,36	6,4	0,2427
Rata-rata	-23,6	-31,07	25,55	6,213	0,243

Sumber: Hasil pengujian

5.5.2 Analisis Model Miniatur EP Sebelum Ada Partikel

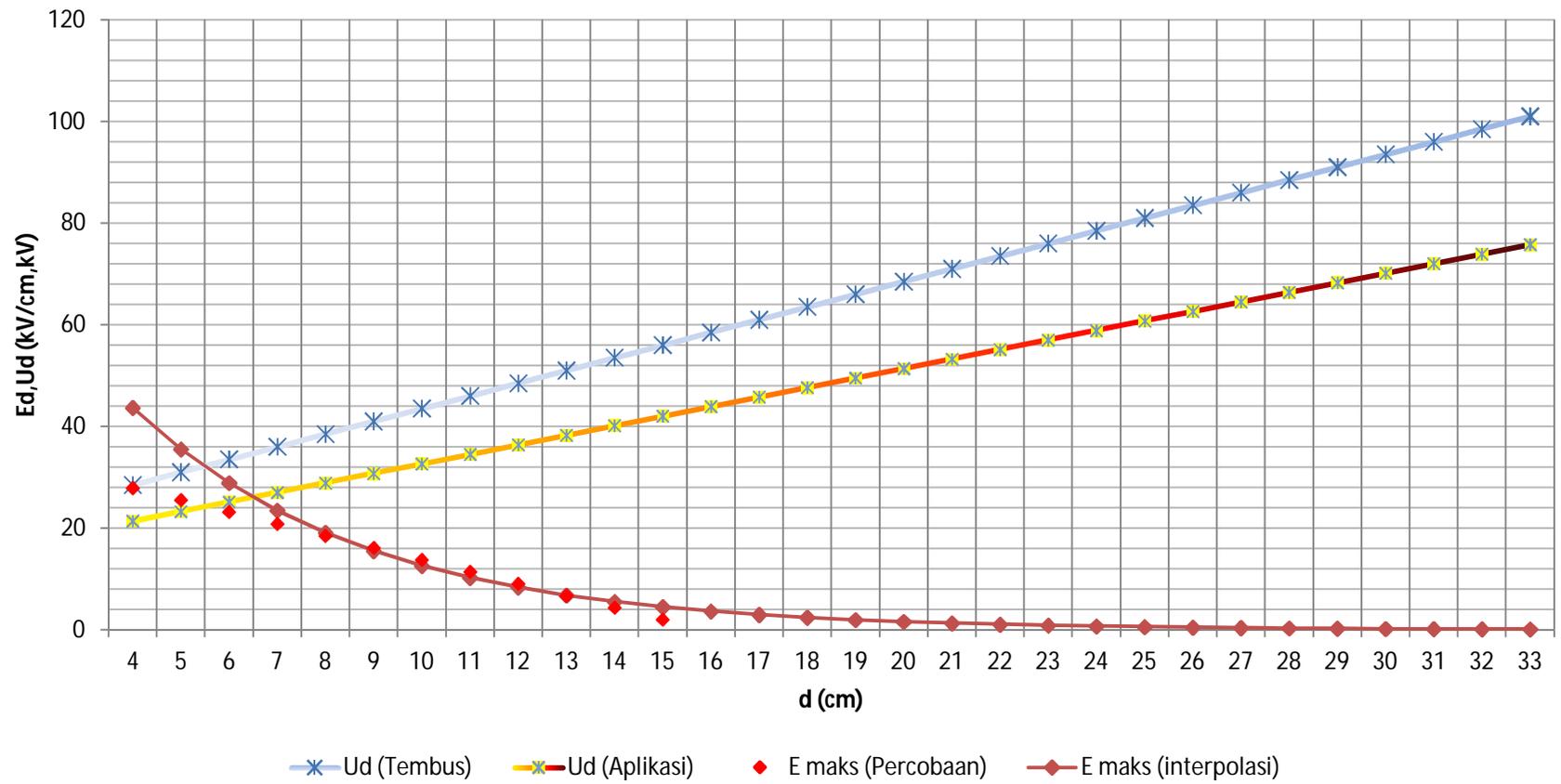
Pada Tabel 5.1 dan 5.2 menjelaskan tentang hasil pengujian sebelum adanya partikel dengan jarak antar kawat elektroda dan plat pengumpul yang berbeda, yaitu 4 cm dan 5 cm. Hasil yang didapat pada pengujian ini antara lain:

- Tegangan tembus
- Tegangan korona (aplikasi)
- Kuat medan listik maksimal
- Kuat medan listrik rata-rata
- Efisiensi dari intensitas medan listrik yang ditimbulkan

Untuk hasil pengujian tegangan tembus hasil yang didapat adalah semakin besar jarak sela antar elektroda kawat dengan plat pengumpul, maka

tegangan tembus juga semakin besar. Hal ini sesuai dengan persamaan (2-7), nilai U_d (tegangan tembus) berbanding lurus dengan d (jarak sela antar elektroda). Untuk tegangan korona, pada pengujian ini digunakan sebagai tegangan aplikasi/operasi dari model miniatur EP. Besarnya tegangan operasi ini adalah 75% dari tegangan maksimal / tembus. Hasil yang didapatkan adalah semakin besar jarak sela antar elektroda semakin besar pula tegangan yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 5.2. (Tabel Gambar 5.2 terdapat pada Lampiran 3)

Sedangkan kuat medan listrik maksimal yang dihasilkan merupakan hasil pengujian dengan simulasi menggunakan program *FEMM*. Pada simulasi ini tegangan dan jarak yang digunakan merupakan tegangan maksimal atau tegangan tembus dan jarak sebenarnya saat dilakukan pengujian di laboratorium. Dari hasil pengujian tersebut didapatkan besarnya nilai kuat medan listrik berbanding terbalik dengan jarak sela antar elektroda kawat dengan plat pengumpul, sehingga semakin besar jarak sela antar elektroda tersebut, semakin kecil kuat medan listrik yang dihasilkan. Hal ini juga berlaku untuk kuat medan listrik rata-rata. Setelah mendapatkan kuat medan listrik maksimal dan kuat medan listrik rata-rata didapatkan efisiensi dari intensitas medan listrik. Hasil yang didapat cukup kecil karena medan listrik yang dihasilkan merupakan medan listrik non homogen, yang mana intensitas medan listrik tidak seragam sehingga didapatkan medan lokal pada titik tertentu lebih tinggi dari kuat medan rata-ratanya.



Gambar 5.2 Grafik Hubungan Antara Ed dan Ud dengan Jarak Sela Antar Elektroda

Sumber: Hasil Perhitungan

5.5.3 Hasil Pengujian Model Miniatur EP Sesudah Ada Partikel

Pengujian model miniatur EP sesudah ada partikel adalah menguji efisiensi yang dihasilkan oleh alat berdasarkan jumlah berat debu yang tertangkap. Perhitungan efisiensi dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-22). Debu yang digunakan dalam pengujian adalah debu hasil gas buang PG Krebet Baru dengan berat 25 gram. Hasil pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 5.3 dan 5.4

Tabel 5.3 Hasil Pengujian Model Miniatur EP Sesudah Ada Partikel Pada Jarak Antar Elektroda Kawat Dan Plat Pengumpul Sebesar 4 cm

No.	V _{aplikasi} (kV)	V _{tembus} (kV)	Massa (gram)				Efisiensi
			Awal	Keluar	Plat	Jatuh	
1	-21	-28	25	16,0745	2,5895	6,336	29,01%
2	-21,5	-28,5	25	15,3828	1,0862	8,531	11,29%
3	-22	-29,2	25	16,2242	2,3026	6,4732	26,24%
Rata-rata	21,5	28,57	25,0000	15,8938	1,9928	7,1134	22,18%

Sumber: Hasil pengujian

Tabel 5.4 Hasil Pengujian Model Miniatur EP Sesudah Ada Partikel Pada Jarak Antar Elektroda Kawat Dan Plat Pengumpul Sebesar 5 cm

No.	V _{aplikasi} (kV)	V _{tembus} (kV)	Massa (gram)				Efisiensi
			Awal	Keluar	Plat	Jatuh	
1	-22,5	-30	25	17,0421	1,4148	6,5431	17,78%
2	-23,4	-31,2	25	19,3468	1,0212	4,632	18,06%
3	-24	-32	25	18,5433	1,8894	4,5673	29,26%
Rata-rata	-23,6	-31,07	25,0000	18,3107	1,4418	5,4275	21,55%

Sumber: Hasil pengujian

5.5.4 Analisis Model Miniatur EP Sesudah Ada Partikel

Pada Tabel 4 dan 5 ditunjukkan hasil simulasi saat debu dialirkan ke dalam model miniatur EP. Pengujian ini menggunakan debu awal seberat 25 gram, variasi jarak antar elektroda kawat dengan plat pengumpul 4 dan 5 cm, luas total plat pengumpul yang digunakan adalah 720 m² dan waktu yang dibutuhkan untuk 25 gram debu habis dari tempat penampungannya adalah 10 menit. Dari pengujian didapatkan bahwa debu yang tertangkap pada jarak sela antara elektroda kawat dan plat pengumpul sebesar 4 cm adalah 1,9928 gram, sedangkan

untuk jarak sela antar elektroda sebesar 5 cm adalah 1,4418 gram. Dengan hasil tersebut didapatkan efisiensi yang cukup kecil yaitu 22,18% untuk jarak sela antar elektroda 4 cm, sedangkan untuk jarak sela antar elektroda 5 cm yaitu 21,55 %. Nilai efisiensi yang kecil ini, menurut penulis disebabkan karena besarnya dimensi EP yang kecil dengan ukuran 40 x 12 x 12 cm. Selain itu model miniatur ini hanya menggunakan 1 lajur saja, yaitu 1 pasang plat pengumpul dengan ukuran 30 x 12 cm dan 8 buah elektroda kawat / elektroda pengion dengan panjang 12 cm. Untuk meningkatkan efisiensi dari EP ini dibutuhkan perluasan luas plat pengumpul yang digunakan serta penggabungan EP secara paralel maupun seri.

5.5.5 Analisis Perancangan EP Berdasarkan Pengujian Model Miniatur EP

Berdasarkan hasil yang didapatkan pada pengujian model miniatur EP, ada beberapa hal yang dapat digunakan sebagai dasar perancangan EP untuk aplikasi yang akan digunakan mengendapkan partikel debu PG.Krebet Baru Malang. Pada Gambar 5 dapat dilihat hubungan antara jarak sela antar elektroda terhadap tegangan tembus dan tegangan operasi dari EP. Pada umumnya di industri-industri, tegangan kerja atau operasi dari EP berkisar antara 50 kV sampai dengan 100 kV. Selain itu jarak sela antara elektroda kawat dengan plat pengumpul yang umumnya digunakan di industri berkisar antara 20 sampai 30 cm. Dari Gambar 5 tersebut dapat ditentukan tegangan operasi dan tegangan maksimal/tembus yang akan digunakan berdasarkan jarak sela antar elektroda. Menurut perhitungan secara teori pada bab 4.3.8 besarnya tegangan kerja yang digunakan adalah 98 kV untuk jarak sela antar elektroda adalah sebesar 11 cm, jika kita menggunakan jarak sela antar elektroda adalah sebesar 22 cm juga, maka menurut Gambar 5 besarnya tegangan tembus dan tegangan operasi yang diijinkan masing-masing adalah 73 kV dan 55 kV.

Efisiensi dalam EP merupakan hal yang sangat penting karena nilai efisiensi merepresentasikan kemampuan EP dalam menangkap debu. Berdasarkan teori yang ada, besarnya nilai efisiensi ditentukan oleh beberapa hal, yaitu:

- a. Luas total plat pengumpul
- b. Debit gas
- c. Kecepatan migrasi partikel

Berdasarkan hasil pengujian model miniatur EP didapatkan efisiensi rata-rata sebesar 21,86 % \approx 22 %, dengan luas plat pengumpul adalah 720 m², kemudian debit gas yang dihasilkan oleh kipas pendorong adalah 0,021 m³/s, sehingga kecepatan migrasi partikel yang didapatkan adalah sebesar 7,25 m/s. Hasil ini terlalu kecil karena efisiensi yang didapatkan hanya 22%. Dalam upaya meningkatkan besarnya nilai efisiensi dari model miniatur ini, harus dilakukan beberapa perubahan parameter, terutama parameter-parameter yang berpengaruh pada efisiensi. Untuk mendapatkan hasil yang optimal dalam menentukan efisiensi maka dilakukan pendekatan secara perhitungan dan teori.

Pada pembahasan tentang penentuan jarak sela serta tegangan operasi menurut Gambar 5.4 didapatkan hasil, yaitu:

- a. Jarak sela antar elektroda : 22 cm
- b. Tegangan operasi : 55 kV (polaritas negatif)
- c. Tegangan tembus : 73 kV (polaritas negatif)
- d. Kuat medan listrik : 4×10^6 V/m

Dari hasil tersebut dapat dicari beberapa parameter yang diperlukan untuk mendapatkan nilai efisiensi yang optimal:

a) Pemuatan partikel

Pemuatan partikel merupakan proses saat kuat medan listrik yang dihasilkan dapat mengionsasi partikel yang melewati area medan listrik.

$$Q_p = \left\{ \left(1 + \frac{2\lambda}{d_p}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}}\right) \times \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}\right) \right\} \pi \epsilon_0 d_p^2 E_c$$

Dengan,

$$E_c = 4 \times 10^6 \text{ V/m}$$

$$\lambda = 4,281 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\epsilon_r = 3$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$$

$$d_p = 2,5 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Maka,

$$Q_p = \left(1,0822 + 1,489 \times \frac{2}{5}\right) \pi \cdot 8,85 \times 10^{-12} \cdot (2,5 \times 10^{-6})^2 \cdot 4 \times 10^6$$

$$Q_p = 1,16 \times 10^{-16} \text{ C}$$

b) Kecepatan gerak partikel

Kecepatan gerak partikel adalah kecepatan partikel menuju plat pengumpul karena adanya kuat medan listrik.

$$v_{th} = \frac{Q_p \cdot E \cdot C_o}{3\pi\mu d_p}$$

Dengan,

$$E_c = 4 \times 10^6 \text{ V/m}$$

$$Q_p = 1,16 \times 10^{-16} \text{ C}$$

$$d_p = 2,5 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$C_o = 1,44$$

$$\mu = 1,83 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

Maka,

$$v_{th} = \frac{Q_p \cdot E \cdot C_o}{3\pi\mu d_p}$$

$$v_{th} = \frac{1,16 \times 10^{-16} \cdot 4 \times 10^6 \cdot 1,44}{3 \cdot \pi \cdot 1,83 \times 10^{-5} \cdot 2,5 \times 10^{-6}}$$

$$v_{th} = 1,55 \text{ m/s} = 0,015 \text{ cm/s}$$

c) Perhitungan luas total plat pengumpul untuk model miniatur EP

Model miniatur EP yang digunakan pada pengujian memiliki debit sekitar $0,021 \text{ m}^3/\text{s}$ dan jarak sela antara elektroda adalah sebesar 22 cm dan jarak antar plat menjadi 44 cm. Untuk mendapatkan efisiensi 99% maka besarnya luas total plat pengumpul yang digunakan adalah

$$A = \frac{-q}{v_{th}} \ln(1 - \text{eff})$$

$$A = \frac{-0,021}{1,55} \ln(1 - 0,99)$$

$$A = 6,22 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \approx 6220 \text{ cm}^2$$

Jika luas plat pengumpul yang digunakan memiliki panjang 30 cm dan lebar 12 cm, maka jumlah plat pengumpul yang digunakan adalah 17 plat pengumpul.

d) **Perhitungan luas total plat pengumpul untuk EP yang sebenarnya berdasarkan perhitungan dan pengujian model miniatur EP**

Model EP yang sebenarnya memiliki debit sekitar $96,67 \text{ m}^3/\text{s}$. dengan menggunakan spesifikasi seperti pada perhitungan diatas, yang mana jarak sela antar elektroda yang digunakan adalah 22 cm dan pergerakan kecepatan partikel sebesar $1,55 \text{ m/s}$, maka besarnya luas total plat pengumpul yang digunakan untuk mendapatkan efisiensi sebanyak 99% adalah

$$A = \frac{-q}{v_{th}} \ln(1 - eff)$$

$$A = \frac{-96,67}{1,55} \ln(1 - 0,99)$$

$$A = 287,214 \text{ m}^2$$

Jika luas plat pengumpul yang digunakan memiliki panjang 5 m dan lebar 6 m, maka jumlah plat pengumpul yang digunakan adalah 10 plat pengumpul. Perbandingan data spesifikasi desain perancangan tampak pada Tabel 5.5

Tabel 5.5 Perbandingan Desain Berdasarkan Pengujian Model Miniatur

No.	Spesifikasi	Hasil Perancangan	
		Model Miniatur	Desain Asli
1	Tegangan operasi	55 kV	55 kV
2	Efisiensi yang diinginkan	99%	99%
3	Ukuran plat pengumpul (p x l)	30 cm x 12 cm	5 m x 6 m
4	Tebal plat pengumpul	1 mm	2 mm
5	Luas total plat pengumpul	6220 cm^2	$287,214 \text{ m}^2$
6	Jumlah plat pengumpul	18 buah	10 buah
7	Jumlah <i>field</i> yang seri	3	2
8	Debit gas	$0,021 \text{ m}^3/\text{s}$	$96,67 \text{ m}^3/\text{s}$
9	Jarak plat-kawat	22 cm	22 cm
10	Jarak plat-plat	44 cm	44 cm
11	Jarak kawat-kawat	22 cm	22 cm
12	Diameter kawat	4 mm	2,5 cm
13	Panjang Kawat	12 cm	5 m
14	Jumlah kawat	8 buah per lajur	45 buah per lajur

15	Jumlah total kawat	120 buah	360 buah
16	Kecepatan migrasi partikel	1,55 m/s	1,55 m/s
17	Perkiraan panjang dan lebar keseluruhan	2,5 m x 1,2 m	2 m x 13 m

Sumber: Hasil perhitungan

