

## BAB IV

### PERANCANGAN, PENGUJIAN DAN ANALISIS

#### 1.1. Umum

Pada bab ini akan diuraikan perancangan arester PCB (*Printed Circuit Board*). Perancangan ini dilakukan dengan beberapa tahapan, yaitu menetapkan spesifikasi arester PCB yang dirancang dan melakukan pengujian arester PCB, untuk mendapatkan nilai-nilai variabel yang digunakan dalam rancang bangun arester PCB. Tujuan pengujian ini yaitu mengetahui karakteristik proteksi arester PCB hasil perancangan.

Variabel dalam penelitian ini adalah bentuk geometri, jarak sela, panjang sela (perbesaran elektroda), hasil pengujian tegangan tembus dan waktu tembus dimaksudkan untuk mendapatkan jarak sela dan perbesaran elektroda yang sesuai dengan arester PCB.

Setelah mendapatkan nilai variabel yang sesuai, maka arester PCB diuji dengan menggunakan kWh meter tiga fasa.

#### 1.2. Spesifikasi Arestor PCB

Arestor yang akan dirancang memiliki maksimal tegangan potong 4 kV. Sesuai dengan kategori ketahanan surja dan tingkatan pemotongan tegangan oleh arester, proteksi untuk kWh meter termasuk kategori III yaitu 4 kV. Selain itu PCB yang digunakan adalah PCB single layer (satu sisi).

##### 1.2.1. Penentuan Dimensi Arestor PCB

Dimensi arester PCB yang dimaksud adalah jarak sela, panjang (perbesaran) elektroda. Bentuk elektroda sela udara yang digunakan adalah elektroda yang menghasilkan medan homogen. Menurut Kind, 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 (susunan plat sejajar). Pemilihan ini didasarkan pada kesederhanaan bentuk geometri dan kemudahan dalam proses pembuatan.

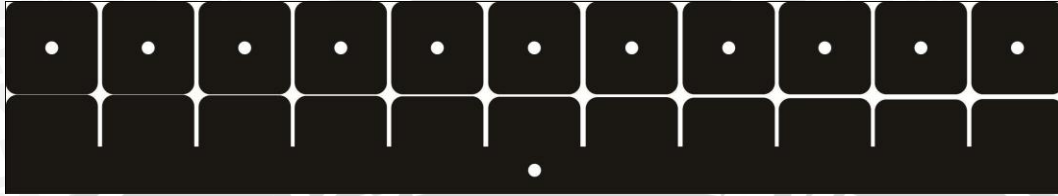
Untuk mengetahui pengaruh jarak sela dan perbesaran, maka dilakukan pengujian terlebih dahulu dengan,

1. Karakteristik pengaruh jarak sela terhadap tegangan tembus
2. Karakteristik pengaruh perbesaran terhadap tegangan tembus

Berikut hasil pengujian dengan menggunakan variabel yang tidak berubah dan yang berubah-ubah.

### 1.2.2. Karakteristik Pengaruh Jarak Sela Terhadap Tegangan Tembus

Pada gambar dibawah ini merupakan desain gambar untuk mendapatkan nilai variabel dengan dimensi elektroda tetap, pada jarak sela yang berbeda-beda.



Gambar 4. 1 Desain gambar pengujian tembus terhadap Jarak Sela  
Sumber : Perencanaan

Tabel 4. 1 Pengaruh jarak sela terhadap Vimpuls potong  
Pada  $p = 965$  mBar,  $t = 24$  °C

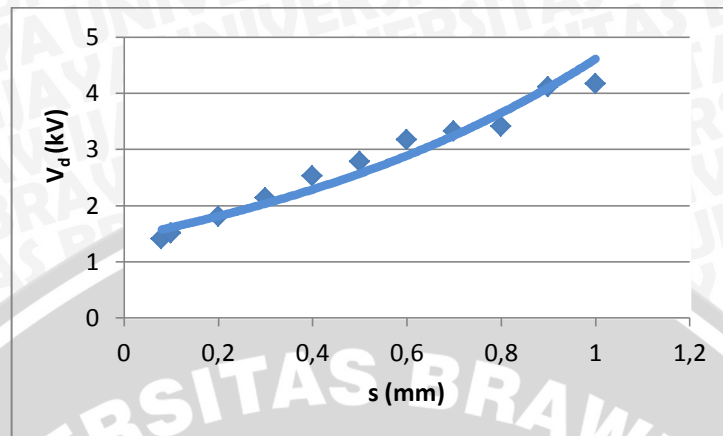
No	s (mm)	$\hat{V}_i$ (kV)	$V_d$ (kV)	td (ns)
1	0,08	4,2	1,41	533
2	0.1	4,2	1,51	466
3	0.2	4,2	1,81	766
4	0.3	4,2	2,14	600
5	0.4	4,2	2,53	500
6	0.5	4,2	2,79	266
7	0.6	4,2	3,17	333
8	0.7	4,2	3,41	300
9	0.8	4,2	3,48	333
10	0.9	4,2	4,11	300
11	1.0	4,2	4,18	800

Sumber : Hasil pengujian

Dari Tabel 4.1 menunjukkan data hasil pengujian. Nilai  $\hat{V}_i$  merupakan nilai impuls puncak,  $V_d$  merupakan nilai tegangan potong dan td (ns) waktu potong merupakan nilai rata-rata. Tabel 4.1 menunjukkan pengaruh kenaikan jarak sela terhadap tegangan potong.

Berdasarkan Tabel 4.1, selanjutnya dapat dibuat grafik hubungan antara jarak sela (s) dan  $V_d$  (kV) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Pada Gambar 4.2 dan Tabel 4.1 diatas, dapat dilihat bahwa seiring bertambahnya jarak sela elektroda,  $V_d$  (kV) naik secara eksponensial. Kenaikan ini berlaku untuk dimensi elektroda yang sama. Setiap kenaikan jarak sela 0,1 mm Uimpuls potong naik rata-rata sebesar 0,1569. Dari

grafik pula didapatkan acuan bahwa agar arester PCB dapat memotong 4 kV maka digunakan jarak sela antara 0,8 – 1 mm.



Gambar 4. 2 Grafik hubungan antara jarak sela dengan Vimpuls potong  
Sumber : Hasil pengujian

### 1.2.3. Perkiraan Tegangan Tembus pada Elektroda Sela Udara

Untuk menghitung besarnya tegangan tembus secara teori dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan (2-1) – (2-3) Besarnya tegangan tembus bergantung pada kuat medan tembus di udara, nilai faktor efisiensi medan, kuat medan, dan jarak sela. Kekuatan dielektrik udara sebesar 41 kV/cm atau 4,1 kV/mm.

Dengan tingkat proteksi yang diinginkan yaitu 4 kV sesuai standard untuk arester kelas C kategori III, maka jarak sela adalah sebagai berikut :

$$V_d = s \times E_d \times \eta$$

$$V_d = s \times 4,1 \text{ (kV/mm)} \times 1$$

$$4_{\text{kV}} = 4,1 \text{ (kV/mm)} \times s$$

$$s = \frac{4}{4,1}$$

$$s = 0,97 \text{ mm}$$

Jadi jarak sela yang dibutuhkan adalah 0,97 mm untuk menghasilkan gelombang tegangan impuls sebesar 4kV. Jarak sela ini sebagai hasil pendekatan perhitungan yang selanjutnya dijadikan dasar pembuatan konstruksi susunan elektroda yang akan diuji di Laboratorium Tegangan Tinggi.

### 1.2.4. Karakteristik Pengaruh Perbesaran Terhadap Tegangan Tembus

Pada gambar dibawah ini merupakan desain realisasi areater PCB untuk mendapatkan nilai variabel dengan dimensi elektroda berbeda-beda, pada jarak sela

yang tetap.



Gambar 4. 3 Desain Gambar Pengujian Tembus Terhadap Perbesaran Elektroda  
Sumber : Perancangan

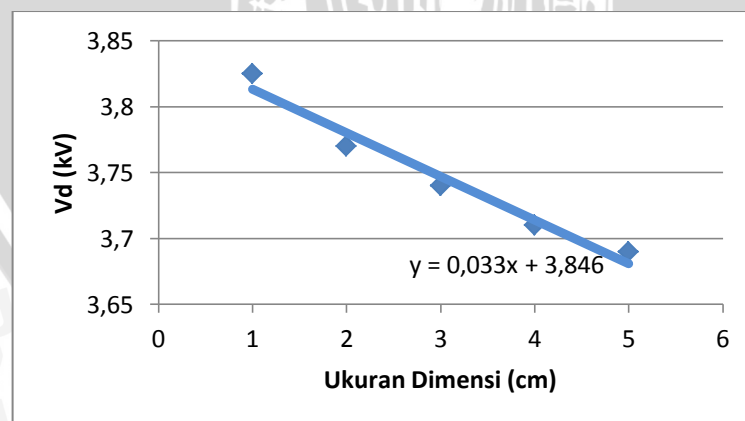
Tabel 4. 2 Pengaruh perbesaran elektroda terhadap pemotongan tegangan impuls  
Pada  $p = 965$  mBar,  $t = 24$  °C

No	Ukuran (cm)	$\hat{V}_i$ (kV)	$V_d$ (kV)	$t_d$ (ns)
1	1 x 1	4,03	3,82	367
2	2 x 1	4,00	3,77	567
3	3 x 1	4,03	3,74	333
4	4 x 1	4,03	3,71	700
5	5 x 1	4,03	3,69	500

Sumber : Hasil pengujian

Dari Tabel 4.2 menunjukkan data hasil pengujian. Nilai  $\hat{V}_i$  merupakan nilai impuls puncak,  $V_d$  merupakan nilai tegangan potong dan  $t_d$  (ns) waktu potong merupakan nilai rata-rata. Tabel 4.2 menunjukkan pengaruh perbesaran elektroda terhadap tegangan potong.

Berdasarkan Tabel 4.2, selanjutnya dapat dibuat grafik hubungan antara perbesaran dan Uimpuls potong rata-rata seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4



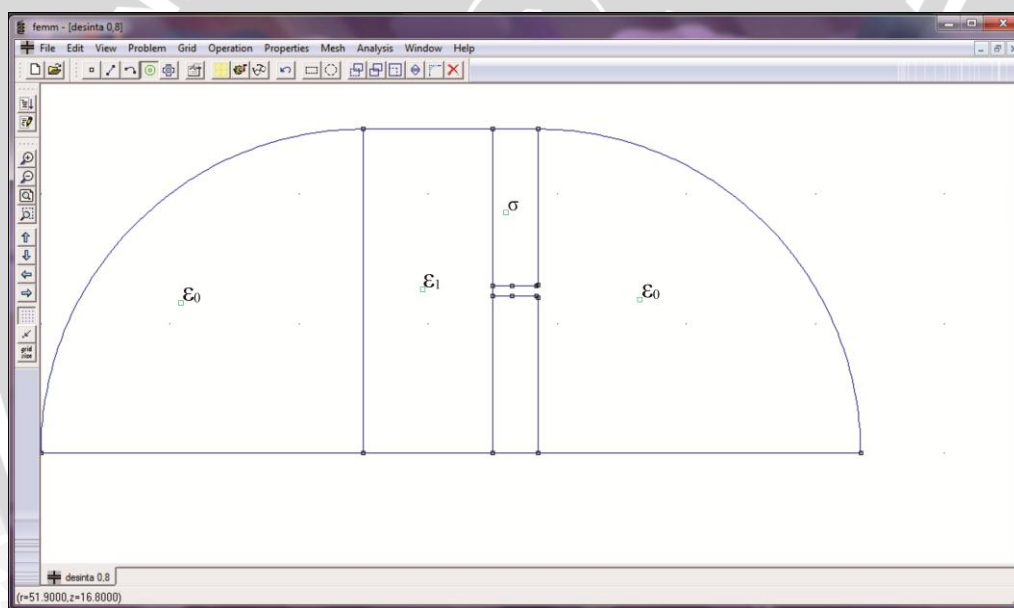
Gambar 4. 4 Grafik hubungan antara perbesaran dengan  $V_d$  (kV)  
Sumber : Hasil pengujian

Dari Gambar 4.4 dan Tabel 4.2, dapat dilihat bahwa bertambah panjang sela elektroda, tingkat pemotongan tegangan impuls turun dengan laju 0,13. Penurunan

tegangan potong ini berlaku pada jarak sela yang sama yaitu 0,8 mm. Setiap kenaikan 1 cm penambahan dimensi maka, Vimpuls potong (kV) naik rata-rata sebesar 0,085 kV.

### 1.3. Analisis Distribusi Medan Listrik pada 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. Dengan efisiensi medan listrik yang diketahui, selanjutnya dapat dihitung besarnya tegangan tembus elektroda sela udara dari susunan elektroda pada Gambar 4.6, Gambar grafik dengan menggunakan program Femm 4.2 untuk simulasi medan listrik dari susunan elektroda sela udara adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7



Gambar 4.5 Pendefinisian dimensi dan parameter material untuk simulasi medan listrik menggunakan FEMM 4.2

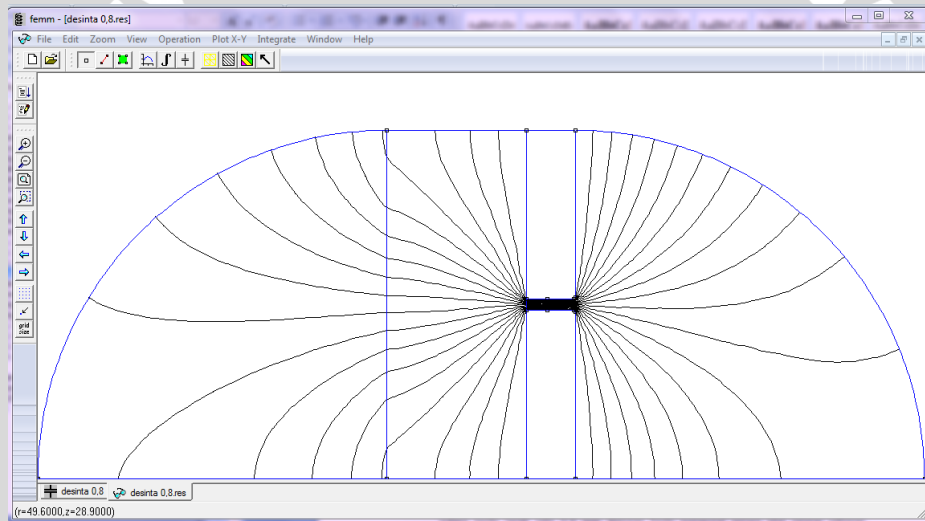
Sumber : Hasil simulasi FEMM 4.2

Gambar simulasi yang digambarkan pada Gambar 4.5 adalah simulasi pengujian tembus elektroda sela udara untuk perbesaran elektroda 12 mm dan jarak sela 1 mm. Pada Gambar 4.5 dapat dibuat perbandingan ketebalan pcb dan tembaga, pada keadaan real ketebalan pcb 1-1,6 mm dan ketebalan tembaga 35  $\mu\text{m}$  / 17-18  $\mu\text{m}$ , dari ukuran tersebut dapat dibuat perbandingan untuk ketebalan pcb 10 cm dan untuk ketebalan tembaga 3,5 mm. Isolator yang digunakan antara elektroda pelat sejajar adalah isolator udara. Tegangan masukan pada simulasi distribusi medan listrik menggunakan tegangan

acuan sebesar 100 kV.

Pada Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa  $\epsilon_0$  adalah material dari hampa udara, karena material hampa udara =  $1,0001 \approx 1$ , maka dianggap seperti udara.  $\epsilon_1$  adalah material dari PCB (*Printed Circuit Board*) yaitu *paper phenolic* atau Pertinax. Sedangkan simbol  $\sigma$  adalah untuk elektroda berbahan tembaga (*copper*).

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 pada simulasi distribusi medan listrik menggunakan tegangan acuan yang sama yaitu sebesar 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. 6 Garis-garis equipotensial hasil simulasi

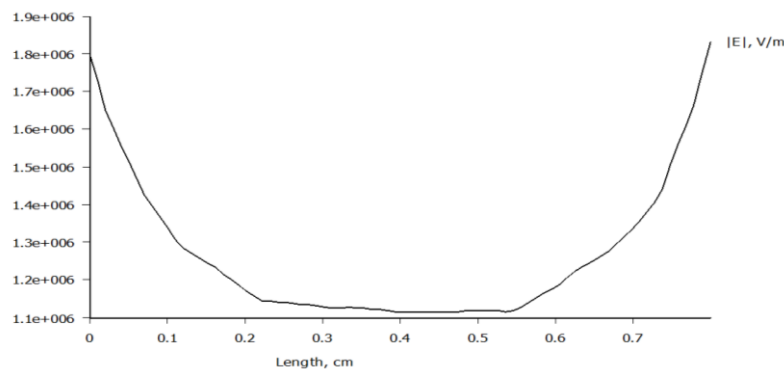
Sumber : Hasil simulasi FEMM 4.2

Gambar 4.6 adalah hasil simulasi untuk equipotensial pada elektroda sela udara pada jarak sela 0,8 mm 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.

Berdasarkan gambar diatas, dapat dilihat bahwa garis equipotential berbelok dari material PCB (*Printed Circuit Board*) ke material udara, hal ini disebabkan karena adanya perbedaan material.

#### 1.4. Efisiensi Medan Listrik terhadap Perbesaran Jarak Sela

Grafik simulasi kuat medan listrik mutlak (*magnitude of field intensity*,  $|E|$ ) pada pengujian tegangan tembus pada elektroda sela udara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 dibuat dengan menggunakan bantuan aplikasi FEMM 4.2.



Gambar 4. 7 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik (*Magnitude of Field Intensity*,  $|E|$ ) garis uji pada pinggir elektroda

Sumber: Hasil simulasi FEMM 4.2

Gambar 4.7 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik pada elektroda sela udara. Beda potensial antara elektroda sebesar 100 kV dengan jarak sela elektroda sebesar 0,8 mm. Gambar 4.7 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  $1,79 \cdot 10^6$  V/m atau 17,9 kV/cm yang menunjukkan bahwa distribusi medan pada pinggir elektroda tidak seragam. Inilah yang dinamakan efek pinggir.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata-ratanya dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-3). Dengan  $U_d$  sebesar 1 kV dan jarak sela ( $s$ ) sebesar 0,8 mm, sehingga kuat medan listrik rata-ratanya adalah:

$$E_{rata-rata} = \frac{1}{0,8}$$

$$E_{rata-rata} = 1,25 \text{ kV/mm}$$

Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi 1,25 kV/mm atau 12,5 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 12,5 kV/cm, maka sesuai Persamaan (2-5), faktor efisiensi medan listrik pada elektroda sela udara adalah:

$$\eta = \frac{12,5}{17,9}$$

$$\eta = 0,71$$

Sehingga didapatkan faktor efisiensi medan listrik pada elektroda sela udara adalah kurang dari 1.

Dengan menggunakan simulasi Femm 4.2 dan dengan cara yang sama, nilai kuat medan listrik maksimum untuk jarak sela yang berbeda dapat diketahui. Selanjutnya efisiensi medan listrik dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-5). Faktor efisiensi untuk elektroda sela udara dengan jarak sela yang berbeda dapat dilihat dalam Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Efisiensi medan pada jarak sela yang berbeda

No.	Sela (mm)	Letak Medan	Emaks (kV/cm)	Erata-rata (kV/cm)	Efisiensi ( $\eta$ )
1	0,8	Pinggir	17,96	12,5	0,71
2	0,9	Pinggir	16,6	11,11	0,66

Sumber : Hasil Simulasi FEMM 4.2

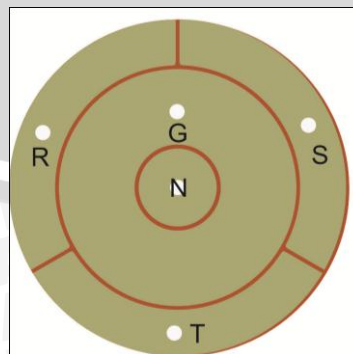
Berdasarkan Tabel 4.3 dapat diketahui efisiensi ( $\eta$ ). Pada letak medan di pinggir efisiensi ( $\eta$ )  $> 0,5$  dan  $\leq 1$ , Hal ini karena tembus medan terletak pada medan yang tidak seragam (non homogen).

### 1.5. Perancangan Arester PCB

Untuk rancang bangun arester PCB maka, kita harus mempertimbangkan bentuk geometri, jarak sela udara, dan perbesaran pada elektroda.

#### 1. Bentuk Geometri

Sesuai dengan analisis distribusi medan listrik pada sela udara dan efisiensi medan listrik didapatkan desain rancang bangun arester PCB seperti pada Gambar 4.8



Gambar 4. 8 Bentuk Geometri Rancang Bangun Arester

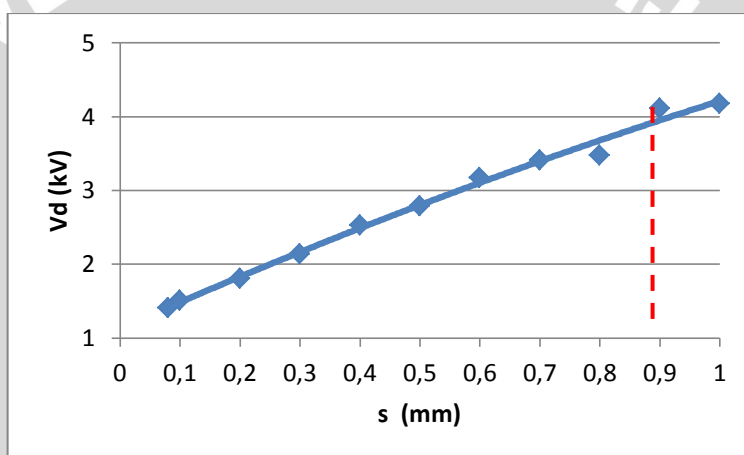
Sumber : Perencanaan



Dari Gambar 4.8 didapatkan bahwa bentuk geometri dari perancangan diatas sama dengan plat sejajar antar fasa-ground, dan netral-ground. Selain itu bentuk geometri dibuat tumpul pada sisi ujung setiap fasa agar distribusi medannya dapat merata disetiap permukaan.

## 2. Jarak Sela

Dari Gambar 4.2 tegangan impuls dapat terpotong hingga 4 kV pada jarak sela dalam rentang 0,08 – 0,8 mm. Sedangkan pada jarak sela diatas 0,9 – 1 mm tegangan impuls terpotong pada bagian muka tetapi dengan tingkat tegangan potong lebih dari 4 kV . Oleh karena itu jarak sela dalam rentang 0,8-0,9 mm akan digunakan sebagai jarak sela yang dipilih seperti pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Jarak sela yang digunakan untuk perancangan

Sumber : Hasil pengujian

## 3. Dimensi Elektroda

Dimensi elektroda didapatkan dari hasil pendekatan perkiraan jarak sela (s) dan hasil pengujian pengaruh jarak sela dan perbesaran terhadap tegangan tembus, elektroda yang direncanakan harus memiliki kemampuan pemotongan terhadap tegangan impuls yang efisiensi bahan. Berikut konfigurasi dimensi elektroda yang digunakan,

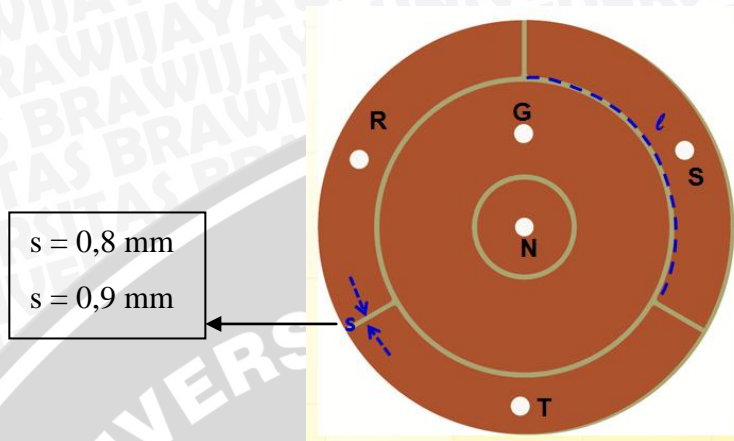
Berdasarkan pada grafik hubungan antara tegangan potong (Vd) dan perbesaran dimensi pada Gambar 4.4 didapatkan persamaan regresi untuk tingkat proteksi 4 kV yaitu :

$$Vd = 0,033 \ell + 3,846$$

$$4 = 0,033 \ell + 3,846$$

$$\ell = 4,67 \text{ cm} = 46,7 \text{ mm}$$

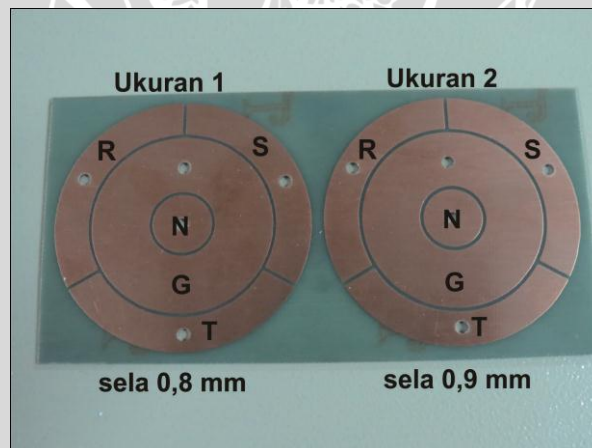
Dari hasil pengujian perbesaran didapatkan perubahan panjang sela yang sesuai untuk proteksi 4 kV pada arester PCB ( *Printed Circuit Board* ) hasil perancangan adalah sebesar  $\ell = 4,67 \text{ cm}$ .



Gambar 4. 10 Hasil desain rancang bangun arester PCB

Sumber : Perencanaan

Setelah didapatkan mempertimbangkan bentuk geometri, jarak sela , dan perbesaran maka, didapatkan arester PCB ( *Printed Circuit Board* ) hasil perancangan seperti pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 11 Hasil rancang bangun arester PCB tiga fasa

Sumber : Hasil perancangan

Tabel 4. 4 Konfigurasi dimensi elektroda

Konfigurasi	s (mm)
I	0,8
II	0,9

Sumber : Perencanaan

## 1.6. Pengujian Arester PCB (*Printed Circuit Board*)

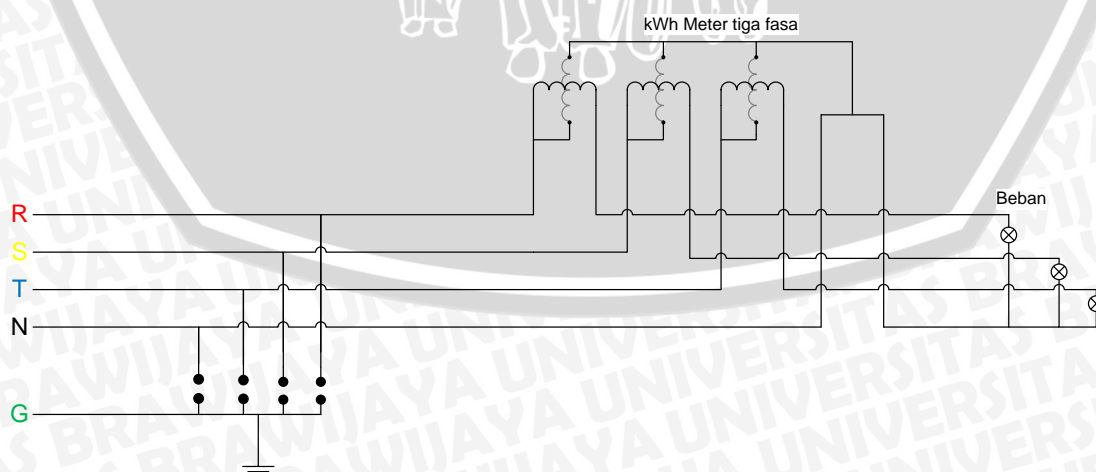
### 1.6.1. Peralatan

Peralatan yang dibutuhkan pada saat pengambilan data adalah sebagai berikut :

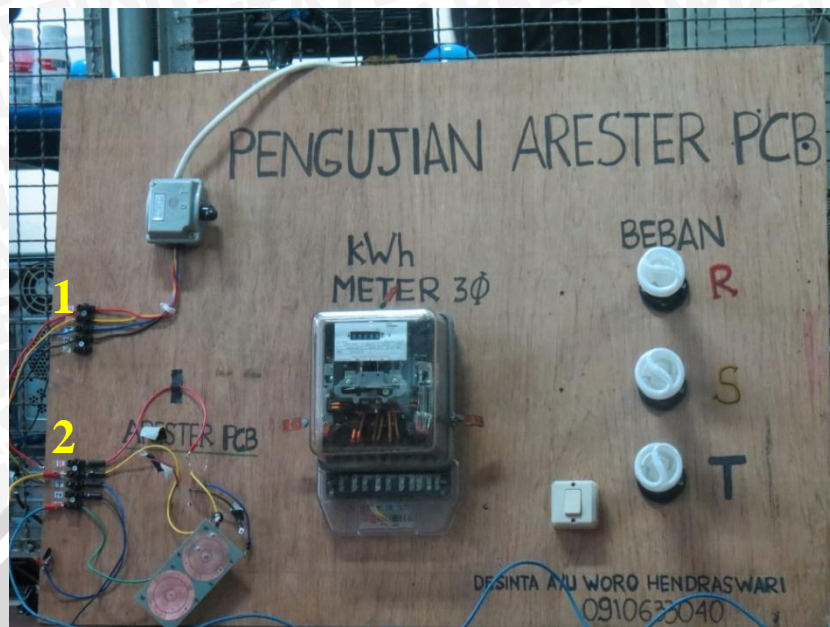
1. Arester PCB (*Printed Circuit Board*) yang sesuai rancang bangun
2. Seperangkat alat ukur energi (kWh meter analog) tiga fasa
3. Lampu 3 buah
4. Saklar 4 kutub
5. Kabel Penghubung
6. Kabel NYM 4x1.5 mm<sup>2</sup> 450/750 V
7. Panel tiga fasa
8. Rangkaian tegangan tinggi impuls
9. Osiloskop digital
10. Penyimpan data
11. Voltage regulator tiga fasa merk MRO
12. Multimeter Sanwa digital CD772

### 1.6.2. Prosedur Pengujian

Pada pengujian arester PCB (*Printed Circuit Board*) digunakan kWh meter analog tiga fasa dan beban 3 lampu. Selain itu digunakan pula rangkaian tegangan tinggi impuls, untuk mengetahui pemotongan arester. Rangkaian pengawatan dan rangkaian percobaan ditunjukkan pada Gambar 4. 12 dan Gambar 4.13.



Gambar 4. 12 Pengawatan pada rangkaian pengujian



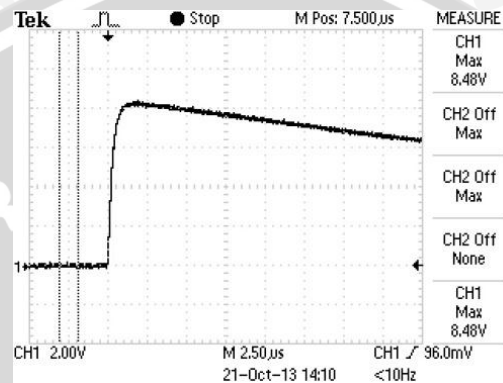
Gambar 4. 13 Komponen dan rangkaian pada papan uji

Sumber : Perancangan

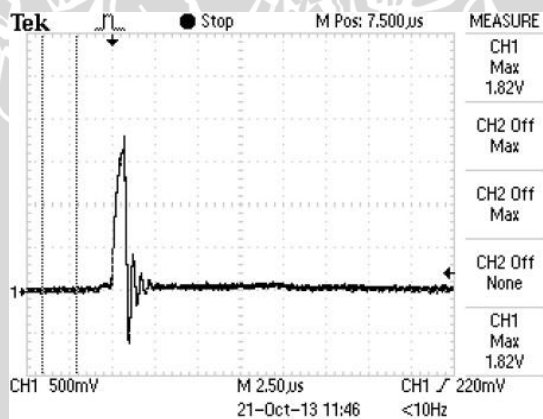
Pengujian dihubungkan seperti Gambar 4.13. Hubungkan sumber tegangan tinggi impuls ke salah satu fasa dan satu ground pada terminal 2, Sumber dari panel tiga fasa dihubung open. Hubungkan kabel penghubung salah satu fasa dari output terminal 2 dan kabel penghubung salah satu fasa dari input kWh meter tiga fasa ke arester PCB (*Printed Circuit Board*). Setelah semua peralatan terhubung, maka dilakukan pengujian tegangan tinggi impuls. Data-data yang diinginkan seperti  $V_{dc}$ ,  $U_{impuls}$ , dan gelombang pemotongan terukur secara *real time* pada alat ukur DGM, DSTM, dan osiloskop. Data diuji hingga 40 kV impuls (46,51 kV Vdc), data diambil stiap kenaikan 5 kV hingga 46,51 kV Vdc. Setelah mendapatkan data, maka dilakukan uji terhadap kWh meter tiga fasa yaitu dengan menghubungkan kabel output dari terminal 1 ke input terminal 2. Tekan tombol ON pada saklar. Apabila kWh meter tiga fasa berputar dari kiri ke kanan dan lampu menyala maka arester dapat menahan tegangan tinggi tersebut. Ulangi prosedur diatas untuk pengujian terhadap fasa yang lainnya. Catat hasil pengukuran pada tabel dan simpan hasil gelombang terpotong. Setelah mendapatkan hasil pengujian, arester diuji dengan menggunakan voltage regulator dan dinaikkan tegangan sebesar 400 volt, selama 5 menit arester PCB diuji ketahanan oleh tegangan sistem. Sehingga didapatkan wujud material yang telah diuji.

### 1.6.3. Karakteristik volt-waktu Arester PCB

Pengujian karakteristik v-t dilakukan untuk mengetahui karakteristik pemotongan tegangan impuls oleh arester PCB, tegangan potong dari arester yaitu besarnya tegangan potong dan waktu potong dari arester bila dikenai tegangan impuls dengan nilai puncak yang berbeda. Dapat dilihat Gambar 4.14 Sebelum arester terpasang dan Gambar 4.15 Setelah arester terpasang.



Gambar 4. 14 Gelombang sebelum arester PCB terpasang  
Sumber : Hasil pengujian



Gambar 4. 15 Gelombang pemotongan tegangan lebih oleh arester PCB  
Sumber : Hasil pengujian

Untuk hasil pemotongan tegangan lebih oleh arester dapat dilihat pada Lampiran 1. Hasil pengujian Vimpuls puncak, Vimpuls potong dan waktu potong dengan fasa-ground (R-G,S-G,T-G) dan netral-ground (N-G) ditunjukkan pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 dibawah ini.

### a. Konfigurasi I

sela = 0,8 mm

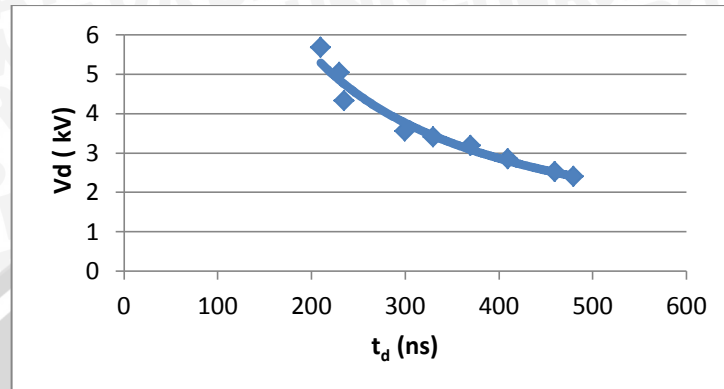
Tabel 4. 5 Hasil pengujian arester PCB pada sela 0,8mm  
pada p = 965 mBar, t = 24 °C

No.	Titik pengujian	$\hat{V}_i$ (kV)	Vd (kV)	td (ns)
1	Fasa R-Ground	4,41	2,4	480
		8,63	2,52	460
		12,99	2,84	410
		17,45	3,18	370
		21,54	3,4	330
		25,9	3,54	300
		30,12	4,31	235
		34,5	5,04	230
		40,06	5,64	210
2	Fasa S-Ground	4,46	2,4	490
		8,66	2,64	465
		13,06	2,94	430
		17,4	3,16	350
		21,59	3,3	330
		25,83	3,54	300
		30,21	4,19	235
		34,58	5,09	230
		39,99	5,62	210
3	Fasa T-Ground	4,46	2,37	500
		8,76	2,48	480
		12,98	2,82	400
		17,21	3,06	380
		21,66	3,42	310
		25,9	3,86	280
		30,15	4,19	280
		34,5	5,06	200
		40,06	5,64	200
4	Netral-Ground	4,57	2,36	490
		8,79	2,37	470
		13,06	2,72	470
		17,39	3,23	430
		21,66	3,49	420
		25,86	3,71	430
		30,13	4,15	380
		34,48	5,04	300
		40	5,62	200

Sumber : Hasil Pengujian

Dengan menghubungkan nilai tegangan potong  $V$  dan waktu pemotongan ( $t_d$ ) pada Tabel 4.5, karakteristik v-t dapat diperoleh seperti diperlihatkan pada Gambar 4.16 - 4.18.

### 1. Fasa R-G

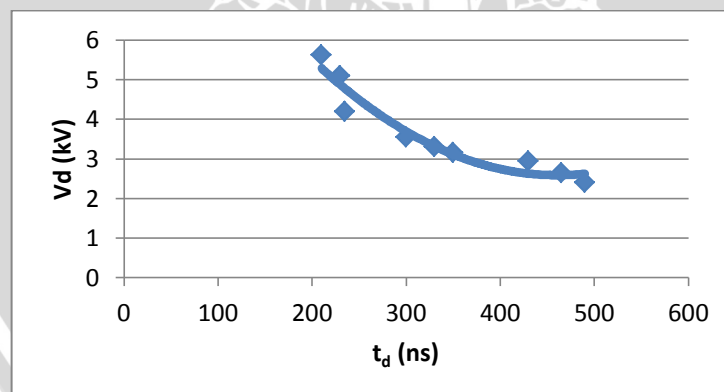


Gambar 4. 16 Grafik Karakteristik v-t arester PCB pada titik uji fasa R-G sela 0,8 mm

Sumber : Hasil pengujian

Gambar 4.16 menunjukkan karakteristik v-t untuk arester dengan sela 0,8 mm, titik uji fasa R-G. Arestor ini menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 2,4 kV sampai dengan 5,64 kV untuk semua tegangan impuls yang digunakan, serta rentang waktu pemotongan antara 200 ns sampai dengan 480 ns.

### 2. Fasa S-G

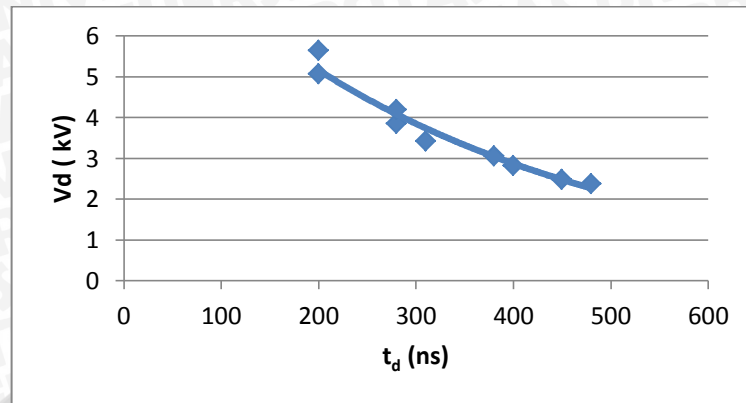


Gambar 4. 17 Grafik Karakteristik v-t arester PCB pada titik uji fasa S-G sela 0,8 mm

Sumber : Hasil Pengujian

Gambar 4.17 menunjukkan karakteristik v-t untuk arester PCB sela 0,8 mm, titik uji fasa S-G. Arestor ini menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 2,4 kV sampai dengan 5,623kV untuk semua tegangan impuls yang digunakan, serta rentang waktu pemotongan antara 210ns sampai dengan 490 ns.

### 3. Fasa T-G

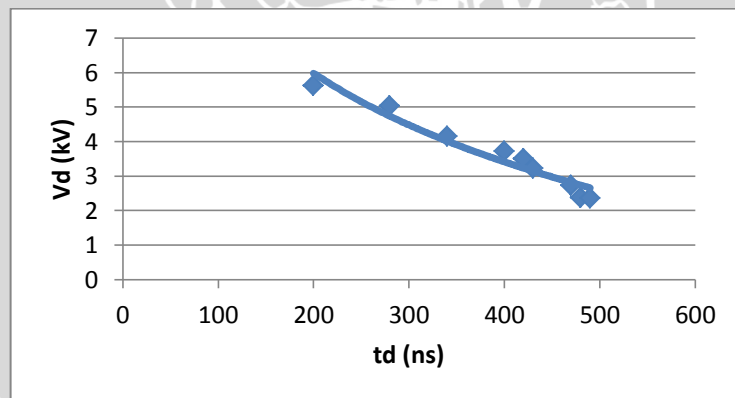


Gambar 4. 18 Grafik karakteristik v-t arester PCB pada titik uji fasa T-G sela 0,8 mm

Sumber : Hasil pengujian

Gambar 4.18 menunjukkan karakteristik v-t untuk arester dengan sela 0,8 mm, titik uji fasa T-G. Arestor ini menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 2,37 kV sampai dengan 5,64 kV untuk semua tegangan impuls yang digunakan, serta rentang waktu pemotongan antara 200 ns sampai dengan 500 ns.

### 4. Netral-G



Gambar 4. 19 Grafik karakteristik v-t arester PCB pada titik uji netral-G sela 0,8 mm

Sumber : Hasil pengujian

Gambar 4.19 menunjukkan karakteristik v-t untuk arester dengan sela 0,8 mm, pada titik uji netral-G. Arestor ini menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 2,365 kV sampai dengan 5,623 kV untuk semua tegangan impuls yang digunakan, serta rentang waktu pemotongan antara 200 ns sampai dengan 500 ns.



**b. Konfigurasi II**

sela = 0,9 mm

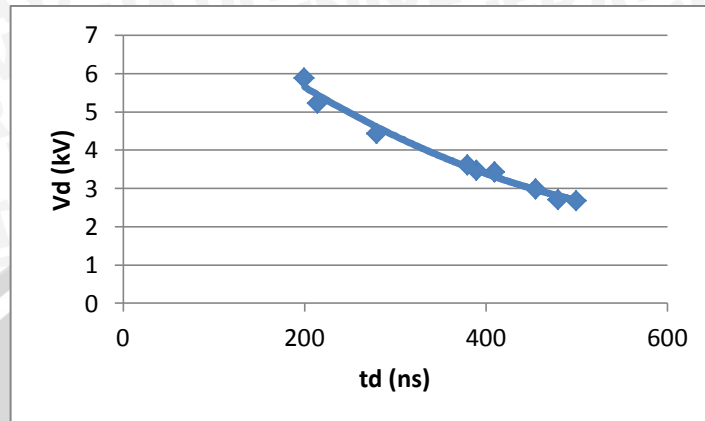
Tabel 4. 6 Hasil pengujian arester PCB pada Sela 0,9 mm pada p = 965 mBar, t = 24 °C

No.	Titik Pengujian	$\hat{V}_i$ (kV)	Vd (kV)	td (ns)
1	Fasa R-G	4,45	2,67	500
		8,6	2,71	480
		13,12	2,99	455
		17,31	3,42	410
		21,56	3,47	390
		25,91	3,62	345
		30,27	4,15	280
		34,41	5,23	215
		40,05	5,88	200
2	Fasa S-G	4,43	2,87	495
		8,61	2,89	480
		13,13	3,11	430
		17,31	3,47	350
		21,50	3,49	325
		25,86	3,81	300
		30,38	4,1	260
		34,60	5,14	200
		40,06	6,00	195
3	Fasa T-G	4,60	2,76	500
		8,85	2,77	470
		13,16	3,08	430
		17,32	3,25	340
		21,68	3,69	325
		25,98	3,86	300
		30,15	4,13	260
		34,50	5,10	200
		40,13	5,98	198
4	N-G	4,40	2,58	480
		8,78	2,92	460
		12,90	3,08	430
		17,25	3,49	325
		21,68	3,78	310
		25,95	4,05	290
		30,22	4,5	245
		34,40	5,26	210
		40	5,96	200

Sumber : Hasil pengujian

Dengan menggunakan Tabel 4.6, diperoleh hubungan antara Tegangan Potong  $V_d$  terhadap waktu potong  $t_d$  dari hasil pengujian, sehingga dibuat  $v-t$  curve yang tersaji pada Gambar 4.19 – Gambar 4.22

### 1. Fasa R-G

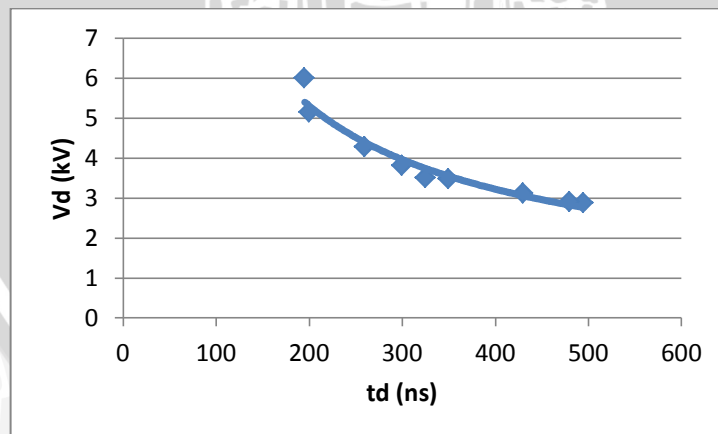


Gambar 4. 20 Grafik Karakteristik v-t arester PCB pada titik uji fasa R-G sela 0,9 mm

Sumber : Hasil pengujian

Gambar 4.20 menunjukkan karakteristik v-t untuk arester dengan sela 0,9 mm, titik uji fasa R-G. Arestor ini menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 2,37kV sampai dengan 5,64kV untuk semua tegangan impuls yang digunakan, serta rentang waktu pemotongan antara 200ns sampai dengan 500ns.

### 2. Fasa S-G



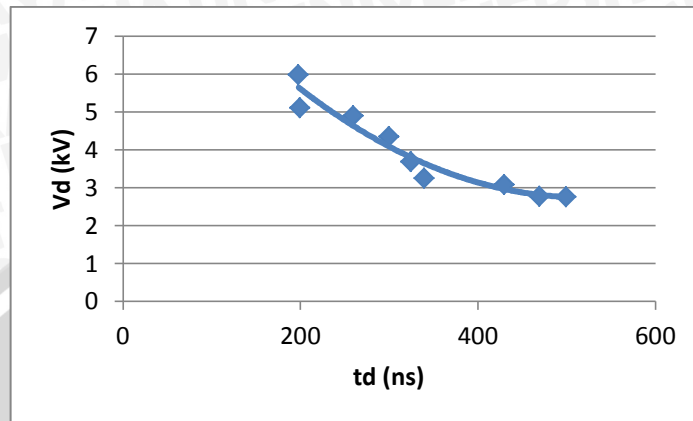
Gambar 4. 21 Grafik Karakteristik v-t arester PCB pada titik uji fasa T-G sela 0,9 mm

Sumber : Hasil Pengujian

Gambar 4.21 menunjukkan karakteristik v-t untuk arester dengan sela 0,9 mm, titik uji fasa S-G. Arestor ini menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 2,87kV

sampai dengan 6 kV untuk semua tegangan impuls yang digunakan, serta rentang waktu pemotongan antara 195ns sampai dengan 495ns

### 3. Fasa T-G

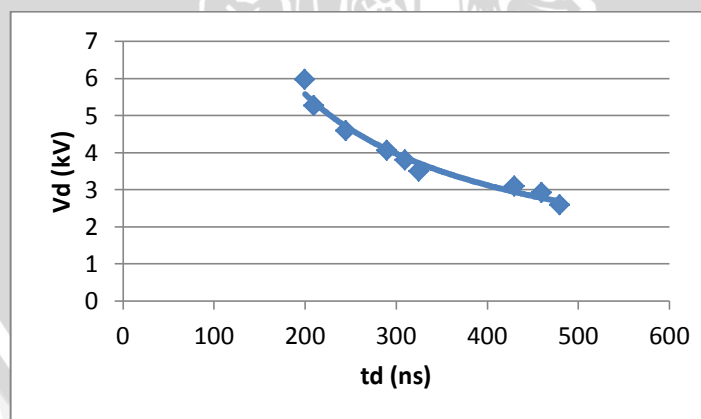


Gambar 4. 22 Grafik Karakteristik v-t arester PCB pada titik uji fasa T-G sela 0,9 mm

Sumber : Hasil pengujian

Gambar 4.22 menunjukkan karakteristik v-t untuk arester dengan sela 0,9 mm, titik uji fasa T-G. Arestor ini menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 2,76kV sampai dengan 5,98 kV untuk semua tegangan impuls yang digunakan, serta rentang waktu pemotongan antara 198ns sampai dengan 500ns

### 4. Netral –G



Gambar 4. 23 Grafik Karakteristik v-t arester PCB pada titik uji netral-G sela 0,9 mm

Sumber : Hasil pengujian

Gambar 4.23 menunjukkan karakteristik v-t untuk arester dengan sela 0,9 mm, titik uji netral-G. Arestor ini menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 2,58kV

sampai dengan 5,96 kV untuk semua tegangan impuls yang digunakan, serta rentang waktu pemotongan antara 200ns sampai dengan 480ns

#### 1.6.4. Pengujian Ketahanan Arester PCB Terhadap Tegangan AC (*Alternating Current*)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui ketahanan arester PCB terhadap tegangan AC. Dengan menggunakan *Voltage Regulator*, arester PCB dicatu tegangan 400 volt fasa antar fasa. Tegangan masukan 400 volt, ini merupakan tegangan sistem jala-jala PLN. Arester PCB diuji ketahanannya selama 5 menit. Setelah diuji ternyata arester PCB layak digunakan.

#### 1.6.5. Probabilitas Tembus pada Pengujian Arester PCB

Dari hasil analisis pengujian tegangan tembus impuls, didapatkan jarak sela yang digunakan untuk Pengujian Tegangan Tinggi Impuls. Nilai tegangan sebagai acuan dasar dalam pengujian berdasarkan pada hasil perhitungan pada awal pembahasan, yaitu sebesar 4 kV.

Beberapa data hasil pengujian tegangan tinggi impuls untuk arester PCB jarak sela 0,8 mm ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Hasil pengujian probabilitas untuk jarak sela 0,8 mm

No	Vd (kV)	Pengujian Ke-										P(V <sub>d</sub> )
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	2,97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2	3,07	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10%
3	3,13	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	20%
4	3,16	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	30%
5	3,53	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	60%
6	3,74	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	90%
7	3,99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100%

Sumber : Hasil Pengujian

Keterangan:

Angka 0 menunjukkan tidak adanya tembus, sedangkan angka 1 menunjukkan adanya tembus

Hasil pengujian seperti Tabel 4.7, probabilitas tegangan tembus terlihat bahwa tembus terjadi pada tegangan impuls terendah 2,97 kV dan tegangan tembus tertinggi terjadi pada tegangan impuls 3,99 kV. Hal ini menunjukkan kenaikan proses tembus semakin besar, terlihat dari prosentasi tembus tertinggi 100% pada tegangan tertinggi pada saat pengujian dengan memberikan terpaan tegangan impuls puncak sebesar 3,99 kV

Dari Tabel 4.7, didapatkan nilai mean  $\mu$  dan nilai deviasi standar  $\sigma$ , sesuai dengan Persamaan (2.17) dan Persamaan (2.18), yaitu:

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Vd \\ &= \frac{1}{31} \sum_{i=1}^{31} (3,07 + (3,13 \times 2) + (3,16 \times 3) + (3,53 \times 6) + (3,74 \times 9) + \\ &\quad (3,99 \times 10)) \\ &= 3,66 \text{ kV}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Vd - \mu)^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{31-1} \sum_{i=1}^{31} (2,97 - 3,66)^2} \\ &= 0,22 \text{ kV}\end{aligned}$$

Kedua variabel di atas dimasukkan dalam Persamaan (2.12), untuk mendapatkan fungsi kerapatan distribusi Normal (Gauss), dengan nilai  $x$  yang berdasarkan pada Tabel 4.9. Hasil perhitungan dari Persamaan (2.12) didapatkan fungsi kerapatan probabilitas di tiap-tiap nilai  $x$ .

Untuk  $x = 2,97 \text{ kV}$

Maka :

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}0,22^2} e^{-(2,97-3,66)^2/(2,0,22^2)}$$

$$f(x; \mu, \sigma^2) = 0,013$$

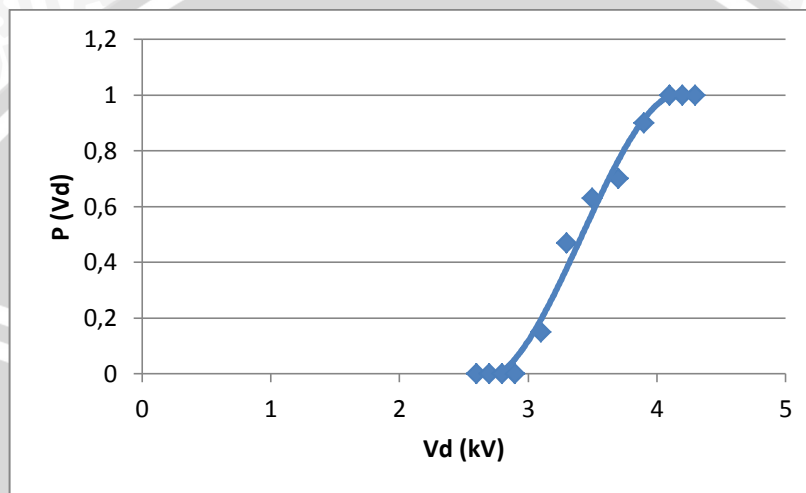
Tabel 4. 8 Hasil perhitungan probabilitas sela 0,8 mm

$V_d$ (kV)	$P(V_d)$
2,9	0,0
3,1	0,15
3,3	0,47
3,5	0,63

3,7	0,7
3,9	0,9
4,1	1,00

Sumber : Hasil perhitungan

Dengan menggunakan Tabel 4.8, diperoleh hubungan antara probabilitas tembus  $P(V_d)$  terhadap tegangan impuls  $V_d$  dari hasil pengujian, berupa Grafik Probabilitas Tembus Hasil Pengujian dengan pendekatan Kurva Distribusi Normal (Gauss). Dimana hasil perhitungan dalam bentuk kurva S sesuai pada Gambar 4.23



Gambar 4. 24 Grafik probabilitas tembus dengan kurva distribusi normal sela 0,8 mm

Sumber : Perhitungan

Dengan menggunakan Kurva Distribusi Normal (Gauss), nilai-nilai karakteristik penting akan didapatkan, yaitu :

$$0,95 = \frac{1}{0,22\sqrt{2\pi}} e^{-(V_d-3,66)^2/2(0,22)^2}$$

$$0,95 \times 0,22 \times \sqrt{2\pi} = e^{-\frac{(V_d-3,66)^2}{2(0,22)^2}}$$

$$\ln 0,52388 = e^{-\frac{(V_d-3,66)^2}{2(0,22)^2}} \ln e$$

$$2(0,22)^2 \cdot 0,64649 = (V_d-3,66)^2$$

$$\sqrt{2(0,22)^2 \cdot 0,64649} = V_d-3,66$$

$$3,66 + 0,2501 = 3,91 \text{ kV}$$

Sehingga, dengan perhitungan yang sama didapatkan ;

$$V_{d-5} = 3,02 \text{ kV}$$

$$V_{d-50} = 3,30 \text{ kV}$$

$$V_{d-95} = 3,91 \text{ kV}$$

Beberapa data hasil pengujian tegangan tinggi impuls untuk elektroda jarak sela 0,9 mm pada beberapa tingkat tegangan yang berbeda ditunjukkan pada Tabel 4.9

Tabel 4. 9 Hasil pengujian probabilitas untuk jarak sela 0.9 mm

No	$V_d$ (kV)	Pengujian Ke-										$P(V_d)$
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	2,85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2	3,1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	30%
3	3,28	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	40%
4	3,56	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	60%
5	3,74	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	80%
6	3,87	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	90%
7	4,01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100%

Sumber : Hasil pengujian

Keterangan:

Angka 0 menunjukkan tidak adanya tembus, sedangkan angka 1 menunjukkan adanya tembus

Hasil pengujian seperti Tabel 4.9, probabilitas tegangan tembus terlihat bahwa tembus terjadi pada tegangan impuls terendah 2,85 kV dan tegangan tembus tertinggi terjadi pada tegangan impuls 4,01 kV. Hal ini menunjukkan kenaikan proses tembus semakin besar, terlihat dari prosentasi tembus tertinggi 100% pada tegangan tertinggi pada saat pengujian dengan memberikan terpaan tegangan impuls puncak sebesar 4,01 kV

Dari Tabel 4.9, didapatkan nilai mean  $\mu$  dan nilai deviasi standar  $\sigma$ , sesuai dengan Persamaan (2-17) dan Persamaan (2-18), yaitu:

$$\begin{aligned} \mu &= \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_d \\ &= \frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} ((3,1 \times 3) + (3,28 \times 4) + (3,56 \times 6) + (3,74 \times 8) + (3,87 \times 9) + \\ &\quad (4,01 \times 10)) \\ &= 3,71 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_d - \mu)^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{40-1} \sum_{i=1}^{40} (2,85 - 3,71)^2}$$

$$= 0,191 \text{ kV}$$

Kedua variabel di atas dimasukkan dalam Persamaan (2-12), untuk mendapatkan fungsi kerapatan distribusi Normal (Gauss), dengan nilai  $x$  yang berdasarkan pada Tabel 4.9. Hasil perhitungan dari Persamaan (2.12) didapatkan fungsi kerapatan probabilitas di tiap-tiap nilai  $x$ .

Untuk  $x = 2,85 \text{ kV}$

Maka :

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}0,191^2} e^{-(2,85-3,71)^2/(2 \cdot 0,191^2)}$$

$$f(x; \mu, \sigma^2) = 0,0827$$

Dengan rumus yang sama, maka nilai probabilitas  $P(V_d)$  untuk tegangan yang lain dapat diketahui. Untuk hasil selengkapnya terlihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Hasil perhitungan probabilitas sela 0,9 mm

$V_d$ (kV)	$P(V_d)$
2,8	0
3,1	0,3
3,2	0,4
3,5	0,6
3,7	0,8
3,8	0,9
4,0	1,00

Sumber : Hasil perhitungan

Dengan menggunakan Tabel 4.10, diperoleh hubungan antara probabilitas tembus  $P(V_d)$  terhadap tegangan impuls  $V_d$  dari hasil pengujian, berupa Grafik Probabilitas Tembus Hasil Pengujian dengan pendekatan Kurva Distribusi Normal (Gauss). Dimana hasil perhitungan dalam bentuk kurva S sesuai pada Gambar 4.24

$$0,95 = \frac{1}{0,191\sqrt{2\pi}} e^{(V_d-3,71)^2/2(0,191)^2}$$

$$0,95 \times 0,191 \times \sqrt{2\pi} = e^{\frac{(V_d-3,71)^2}{2(0,191)^2}}$$



$$\ln 0,4548 = e^{-\frac{(V_d-3,71)^2}{2(0,191)^2}} \ln e$$

$$2(0,191)^2 \cdot 0,7878 = (V_d-3,71)^2$$

$$\sqrt{2(0,191)^2 \cdot 0,7878} = V_d-3,71$$

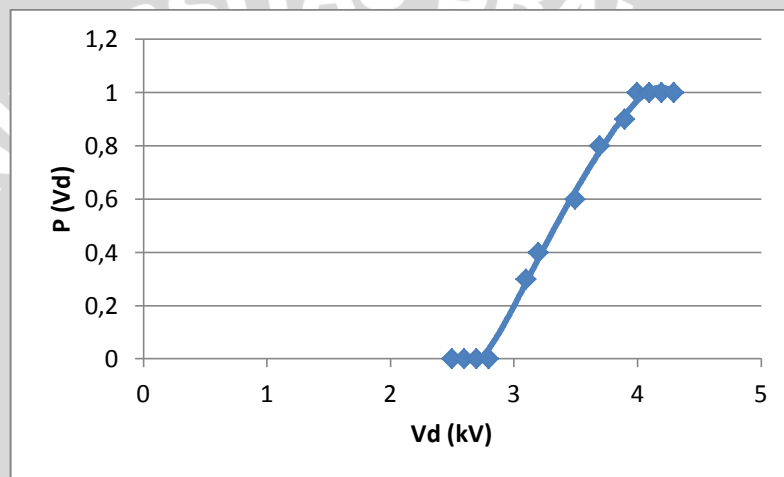
$$3,71 + 0,239 = 3,94 \text{ kV}$$

Sehingga, dengan perhitungan yang sama didapatkan ;

$$V_{d-5} = 2,89 \text{ kV}$$

$$V_{d-50} = 3,46 \text{ kV}$$

$$V_{d-95} = 3,94 \text{ kV}$$



Gambar 4. 25 Grafik probabilitas tembus dengan kurva distribusi normal sela 0,9 mm

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari grafik probabilitas tembus dengan kurva distribusi normal (gauss), didapatkan data – data di atas menunjukkan ketika tegangan berada pada level tegangan  $V_{d-5}$ , secara teori elektroda belum bekerja. Nilai tegangan ini yang disebut dengan tegangan ketahanan isolator. Pada saat level tegangan  $V_{d-50}$ , nilai probabilitas menunjukkan angka sebesar 50%. Tegangan ini yang disebut critical flashover (CFO), dimana tembus sering terjadi di level tegangan ini. Sedangkan pada level tegangan  $U_{d-95}$  yang artinya tembus terjadi pada tegangan ini dengan probabilitas 95% yang artinya jika ada 100 kali gangguan, maka tembus akan terjadi sebanyak 95 kali. Nilai tegangan ini yang disebut dengan tegangan kepastian tembus.

