

**REKAYASA PEMOTONG TEGANGAN LEBIH IMPULS  
MENGUNAKAN ELEKTRODA SPIRAL**

**SKRIPSI**

**TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



**RIZKI TOFAN RIADI**  
**NIM. 115060300111054**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**MALANG**  
**2016**



## RINGKASAN

**Rizki Tofan Riadi**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Desember 2015, *Rekayasa Pemotong Tegangan Lebih Impuls Menggunakan Elektroda Spiral*, Dosen Pembimbing: Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. dan Ir. Hery Purnomo, M.T.

Pada buku skripsi ini menguraikan hasil penelitian tentang rekayasa pemotong tegangan lebih impuls menggunakan elektroda spiral dengan tingkat pemotongan 1,5 kV. Pada penelitian ini dilakukan pengujian untuk mengetahui karakteristik dari arester elektroda spiral. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian pengaruh jarak sela terhadap tegangan potong arester elektroda spiral, pengujian pengaruh diameter terhadap tegangan potong arester elektroda spiral, dan pengujian pengaruh panjang terhadap tegangan potong arester elektroda spiral. Selain itu dilakukan pula pengujian untuk mengetahui tegangan tembus arester elektroda spiral dengan menggunakan metode naik-turun. Untuk mendapatkan kurva karakteristik tegangan-waktu dari arester elektroda spiral dilakukan pengujian dengan memberikan variasi tegangan masukan sampai 30 kV. Hasil dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan bahwa Penentuan dimensi dalam rekayasa pemotong tegangan lebih impuls susunan elektroda tabung dan spiral pada tingkat proteksi 1500V pertama dilakukan dengan pengujian variabel jarak sela terlebih dahulu karena memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap tegangan potong. Kemudian dilakukan pengujian dengan variabel diameter dan panjang arester agar mendapatkan tegangan potong yang lebih mendekati 1500V. Dari hasil pengujian didapatkan dimensi jarak sela 0,4 mm, diameter 21 mm, dan panjang 56,3 mm. Karakteristik pemotong tegangan lebih impuls susunan elektroda tabung dan spiral pada tegangan masukan sebesar 20 kV didapatkan tegangan potong 1,5 kV dan waktu potong sebesar 113 ns. Didapatkan kurva karakteristik tegangan-waktu arester dengan semakin cepat waktu potong maka tegangan potongnya semakin besar.

**Kata kunci**—Rekayasa, Pemotong tegangan, Impuls, Elektroda spiral

## SUMMARY

**Rizki Tofan Riadi**, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, in December 2015, *Impulse-wave Overvoltage Arrester Using Spiral-form Electrode*, Supervisor: Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. and Ir. Hery Purnomo, M.T.

In the book thesis describes the results of research on impulse-wave overvoltage arrester using spiral-form electrode with the cuts of 1,5 kV. In this research, testing to determine the characteristics of the spiral electrode arrester. Testing was conducted on the effect of distance between the test piece against voltage arrester spiral electrode, testing the effect of the diameter of the spiral electrode voltage arrester cut, and testing the effect of the length of the spiral electrode voltage arrester pieces. In addition it also conducted tests to determine the breakdown voltage arrester elektroda spiral using the up and down. To obtain a voltage-time characteristic curve of the spiral electrode arrester testing by providing input voltage variations up to 30 kV. Results of the research that has been done it was concluded that the determination of the dimensions in the engineering of impulse overvoltage arrester with spiral-tube electrode arrangement on the first level of protection 1500V is done by testing a variable distance between the first because it has a greater influence on the voltage cut. Then tested with variable diameter and length in order to get the voltage arrester cut closer to 1500V. From the test results obtained distance dimensions between 0.4 mm, diameter 21 mm, and a length of 56.3 mm. Characteristics impulse overvoltage arrester with spiral-tube electrode arrangement on the input voltage of 20 kV voltage obtained pieces of 1.5 kV and a cut of 113 ns. Obtained voltage-time characteristic curve arrester with faster cutting times greater then the voltage is interrupted.

**Keywords**-Engineering, Arrester, Impulse, Spiral Electrode

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT dengan rahmat dan hidayah-Nya skripsi berjudul “Rekayasa Pemotong Tegangan Lebih Impuls Menggunakan Elektroda Spiral” dapat terselesaikan. Dalam kesempatan ini diucapkan terima kasih kepada yang telah berkenan memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung sebagai berikut.

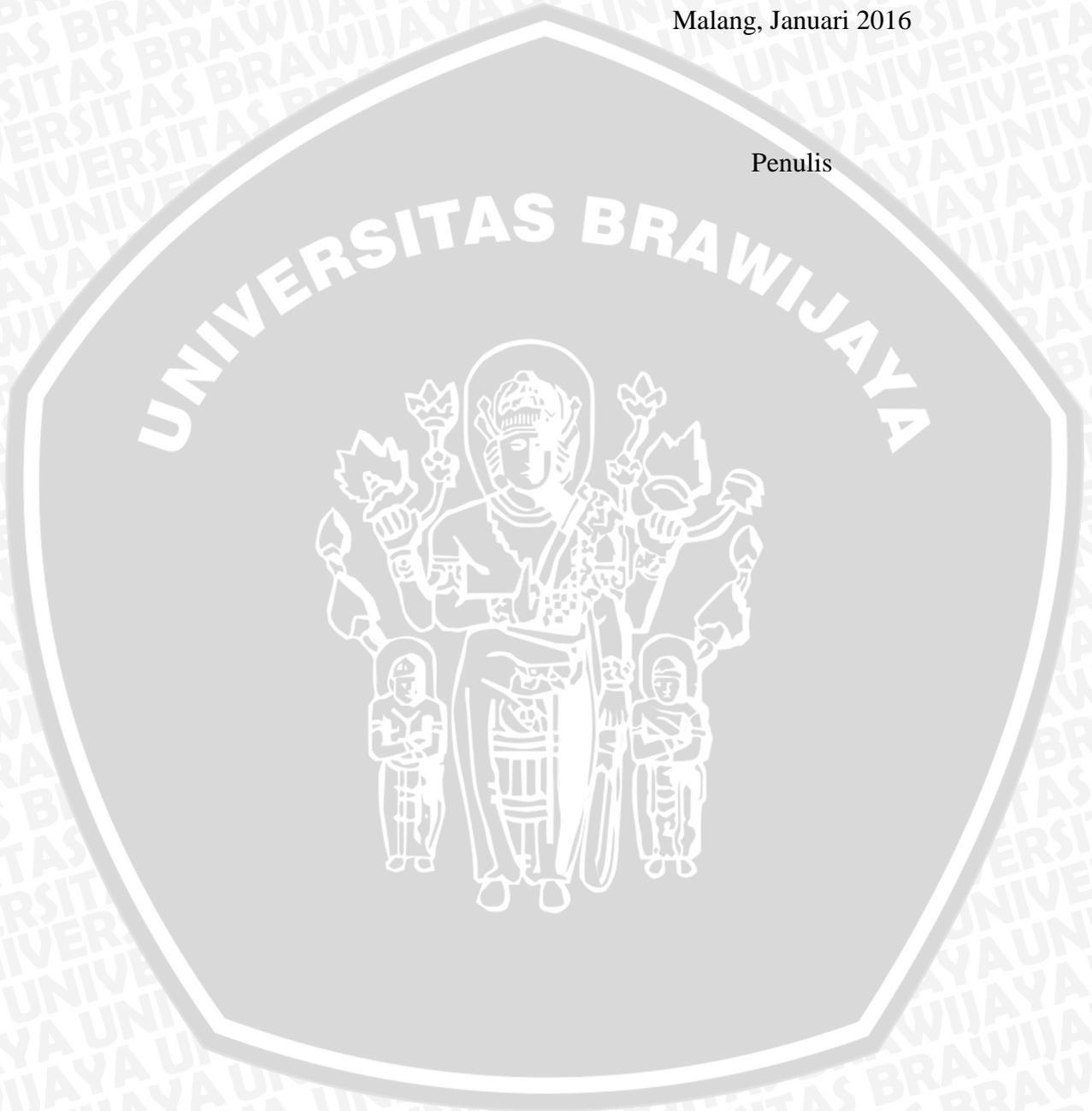
1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
2. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. dan Bapak Ali Mustofa S.T., M.T. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik dan Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. dan Bapak Ir. Hery Purnomo, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi yang selalu membimbing dan mengarahkan dalam pengerjaan skripsi ini.
4. Ibu Ir. Retnowati, M.T. selaku dosen pembimbing akademik beserta seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro yang selalu membantu penulis selama perkuliahan.
5. Keluarga tercinta, Ayah Yasin Bin Mardi Basuki, Ibu Hery Windayani, dan Kakak Satria Candra Wibawa. Terima kasih atas do’a, dukungan, semangat dan segalanya yang telah diberikan.
6. Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang telah turut andil memberikan memberikan waktu, tenaga, pikiran, kebersamaan, semangat, dan saling mendukung dalam pengerjaan skripsi.
7. Keluarga Besar Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya, keluarga besar Inverter’11, VII-H dan teman-teman e-fm, yang telah menjadi keluarga selama perkuliahan.



Sekiranya Allah SWT mencatat amalan ikhlas kami dan semua pihak yang turut membantu sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Disadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan, namun semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Malang, Januari 2016

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>vii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Sistematika Pembahasan .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Arester .....	5
2.1.1 Arester Tegangan Rendah .....	6
2.1.2 Karakteristik Tegangan Potong Arester .....	7
2.1.3 Pemotongan Tegangan Lebih .....	8
2.1.4 Karakteristik Lengkung tegangan-waktu.....	9
2.1.5 Tingkat Isolasi Dasar dan Koordinasi Isolasi .....	9
2.2 Tegangan Impuls .....	10
2.3 Parameter Tegangan Impuls .....	11
2.4 Pembangkit Tegangan Impuls .....	12
2.5 Tembus Pada Gas .....	13
2.5.1 Mekanisme Townsend.....	13
2.5.1.1Proses Primer.....	14
2.5.1.2Proses Sekunder .....	15
2.5.2 Mekanisme Streamer .....	15
2.6 Distribusi Medan Listrik dan Kekuatan Tembus Material Isolasi Gas .....	15
2.7 Faktor Efisiensi Medan Listrik .....	16
2.8 Hukum Perbesaran (Enlargement Law) .....	19
2.9 Gelombang Berjalan .....	20
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>23</b>
3.1 Studi Literatur.....	24
3.2 Variabel Penelitian .....	24
3.3 Perencanaan .....	24

3.3.1	Bentuk Elektroda Arester .....	24
3.3.2	Bahan Elektroda Arester .....	25
3.4	Bahan dan Peralatan .....	25
3.5	Rangkaian Pengujian .....	26
3.6	Pembumian .....	27
3.7	Langkah-langkah Pengujian .....	27
3.8	Analisis Hasil Pengujian .....	27
3.9	Kesimpulan dan Saran .....	27
<b>BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS REKAYASA PEMOTONG TEGANGAN</b>		
<b>LEBIH IMPULS MENGGUNAKAN ELEKTRODA SPIRAL .....</b>		<b>29</b>
4.1	Spesifikasi Arester .....	29
4.2	Penentuan Dimensi Arester .....	29
4.2.1	Karakteristik Jarak Sela Arester Terhadap Tegangan Potong .....	29
4.2.2	Karakteristik Diameter Arester Terhadap Tegangan Potong .....	32
4.2.3	Karakteristik Panjang Arester Terhadap Tegangan Potong .....	35
4.3	Distribusi Medan Listrik pada Sela Udara .....	38
4.4	Efisiensi Medan Listrik .....	38
4.5	Arester Elektroda Spiral .....	39
4.5.1	Bentuk Geometri Arester .....	39
4.5.2	Jarak Sela Arester .....	40
4.5.3	Diameter Arester .....	41
4.5.4	Panjang Arester .....	41
4.6	Pengujian Tegangan Tembus Arester dengan Metode Naik-Turun .....	42
4.7	Karakteristik tegangan-waktu Arester Elektroda Spiral .....	43
<b>BAB V PENUTUP .....</b>		<b>47</b>
5.1	Kesimpulan .....	47
5.2	Saran .....	47
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>48</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>50</b>

**DAFTAR TABEL**

Tabel 4.1 Pengujian pengaruh jarak sela terhadap tegangan potong dengan diameter dalam 23 mm dan panjang 50 mm ..... 30

Tabel 4.2 Perbandingan data pengujian dengan data menurut trendline untuk jarak sela arester yang berbeda ..... 32

Tabel 4.3 Pengujian pengaruh diameter terhadap tegangan potong dengan jarak sela 0,4 mm dan panjang 50 mm ..... 33

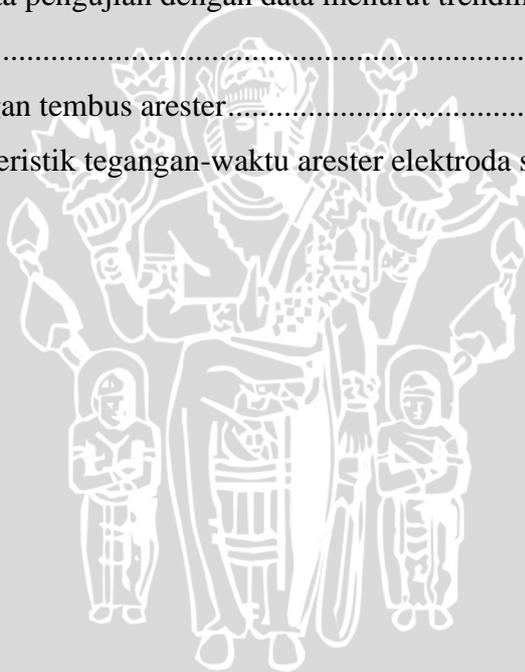
Tabel 4.4 Perbandingan data pengujian dengan data menurut trendline untuk diameter arester yang berbeda ..... 35

Tabel 4.5 Pengujian pengaruh panjang terhadap tegangan potong dengan jarak sela 0,4 mm dan diameter dalam 21 mm ..... 36

Tabel 4.6 Perbandingan data pengujian dengan data menurut trendline untuk panjang arester yang berbeda ..... 38

Tabel 4.7 Pengujian tegangan tembus arester ..... 43

Tabel 4.8 Pengujian karakteristik tegangan-waktu arester elektroda spiral ..... 45



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kategori ketahanan tegangan surja pada perlatan listrik tegangan rendah dan kelas arester .....	6
Gambar 2.2	Bentuk elektroda GDT menurut Citel.....	7
Gambar 2.3	Tempat kedudukan kurva tegangan-waktu dari hasil pemotongan gelombang tegangan impuls.....	8
Gambar 2.4	Kurva karakteristik tegangan-waktu .....	10
Gambar 2.5	Beberapa bentuk gelombang tegangan impuls .....	11
Gambar 2.6	Parameter tegangan uji impuls petir standar .....	11
Gambar 2.7	Rangkaian Pembangkitan Tegangan Impuls.....	12
Gambar 2.8	Konfigurasi elektroda Rod-bidang.....	16
Gambar 2.9	Kurva kuat medan listrik tembus <b><i>Ed</i></b> .....	18
Gambar 2.10	Perbesaran dimensi elektroda .....	19
Gambar 2.11	Proses pemotongan gelombang berjalan.....	21
Gambar 3.1	Diagram alir metode penelitian.....	23
Gambar 3.2	Bentuk Elektroda .....	25
Gambar 3.3	Rangkaian pengujian tegangan tinggi impuls tipe 1,2/50 $\mu$ s .....	26
Gambar 4.1	Pengaruh jarak sela terhadap tegangan potong arester .....	31
Gambar 4.2	Pengaruh diameter terhadap tegangan potong arester.....	34
Gambar 4.3	Pengaruh panjang terhadap tegangan potong arester.....	37
Gambar 4.4	Bentuk Geometri Arester .....	40
Gambar 4.5	Jarak sela yang dipilih.....	40
Gambar 4.6	Arester hasil rekayasa .....	42
Gambar 4.7	Pengujian tegangan tembus arester.....	42
Gambar 4.8	Gelombang impuls sebelum terpotong .....	44
Gambar 4.9	Gelombang impuls setelah terpotong.....	44
Gambar 4.10	Karakteristik tegangan-waktu arester elektroda spiral.....	46

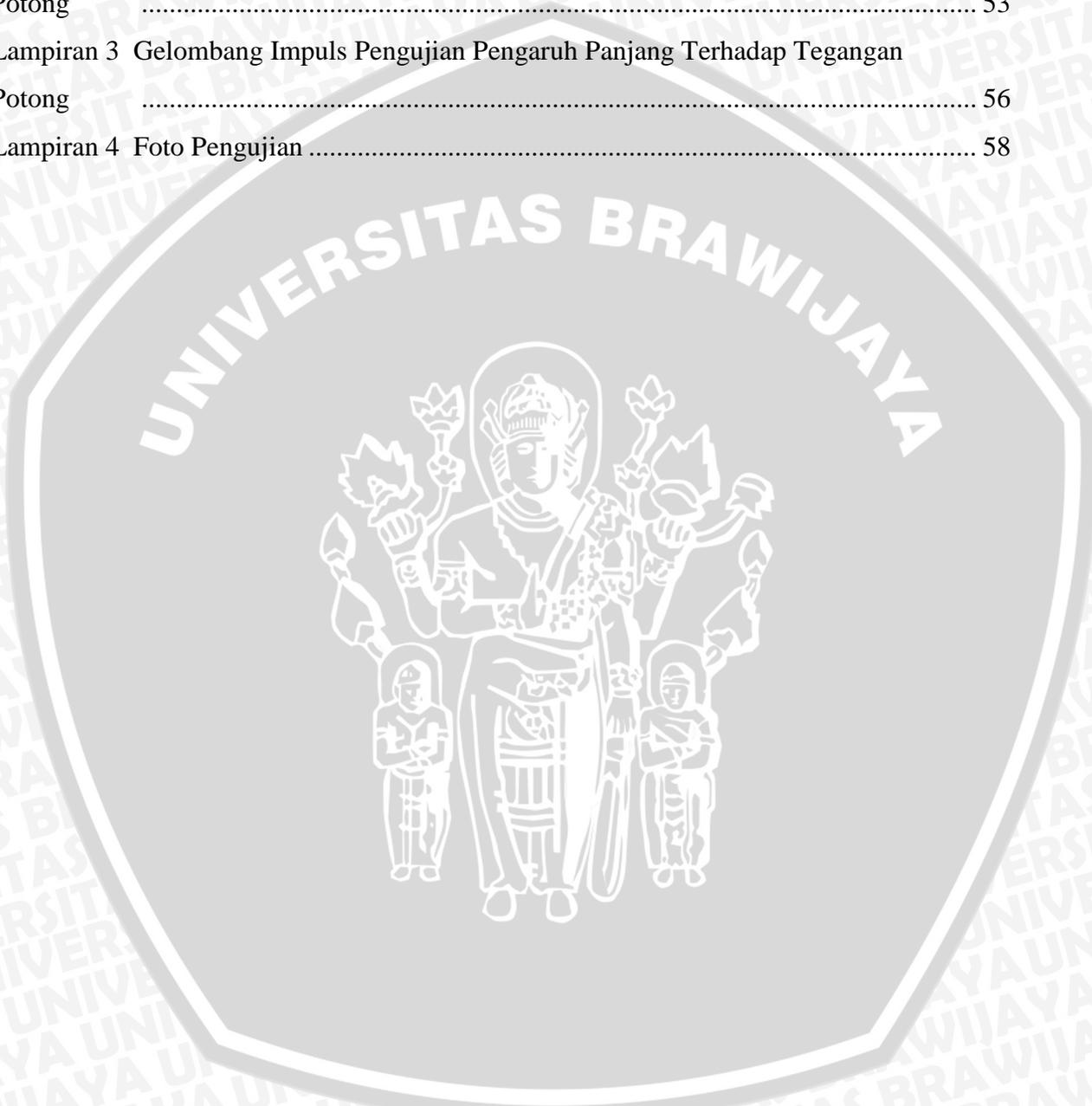
**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1 Gelombang Impuls Pengujian Pengaruh Jarak Sela Terhadap Tegangan Potong ..... 51

Lampiran 2 Gelombang Impuls Pengujian Pengaruh Diameter Terhadap Tegangan Potong ..... 53

Lampiran 3 Gelombang Impuls Pengujian Pengaruh Panjang Terhadap Tegangan Potong ..... 56

Lampiran 4 Foto Pengujian ..... 58





## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Di berbagai bidang seperti industri, kesehatan, dan bahkan rumah tangga pemakaian peralatan elektronik semakin meningkat. Peralatan elektronik ini mempunyai sensitivitas yang tinggi terhadap tegangan lebih. Hal ini karena setiap barang elektronik memiliki tingkat tegangan maksimum yang dapat diterimanya. Jika tegangan masukan melebihi kapasitasnya maka akan dapat merusak komponen di dalam peralatan elektronik tersebut. Oleh karena itu keberadaan alat proteksi tegangan lebih impuls pada setiap peralatan elektronik menjadi sangat penting guna mengurangi terjadinya kerusakan.

Sebagai negara yang beriklim tropis, Indonesia mempunyai curah hujan yang tinggi. Indonesia memiliki intensitas curah hujan berkisar antara 500-5000 mm per tahun (BMKG, 2014). Hal ini menunjukkan bahwa ancaman kerusakan peralatan elektronik akibat tegangan lebih impuls yang ditimbulkan oleh sambaran petir menjadi lebih besar. Selain itu, gangguan tegangan lebih impuls juga dapat terjadi dari faktor internal seperti surja hubung.

Arester merupakan suatu alat pelindung peralatan yang terdapat dalam sistem dari tegangan lebih. Alat pelindung terhadap gangguan surja ini berfungsi melindungi peralatan sistem tenaga listrik dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang masuk ke sistem dan mengalirkannya ke tanah. Selain dari faktor eksternal seperti sambaran petir, tegangan lebih dalam sistem kelistrikan juga dapat timbul karena faktor internal seperti surja hubung. Sehingga sebagai upaya untuk melindungi dan menambah usia dari suatu peralatan, pemakaian arester menjadi sering digunakan.

Setiap arester memiliki karakteristik pemotongan yang berbeda, yakni meliputi besarnya tegangan potong dan waktu potong. Karakteristik inilah yang menentukan arester ini dipasang pada sistem dengan tegangan rendah atau tinggi. Terdapat beberapa jenis arester yang biasa digunakan yaitu arester jenis ekspulsi atau tabung pelindung, arester katup, dan arester jenis kancing.

Pada sistem tegangan rendah arester yang sering digunakan yaitu arester jenis kancing. Arester ini memiliki bentuk elektroda berupa kepingan logam berbentuk piringan

yang disusun sejajar. Dalam proses pembuatannya, arester jenis kancing ini memiliki beberapa kerumitan salah satunya pembentukan elektroda piring yang rata dan harus memiliki jarak yang sama antar elektrodanya. Seiring dengan semakin meningkatnya kebutuhan akan arester, oleh karena itu perlu kiranya untuk memproduksi arester dengan bentuk elektroda yang lebih sederhana yaitu dengan menggunakan kawat. Bentuk yang sederhana ini memudahkan setiap orang untuk membuat aresternya sendiri dengan biaya yang murah.

Dalam penelitian ini, akan direkayasa sebuah arester sela udara dengan menggunakan elektroda kawat yang dibentuk spiral dan silinder logam. Aresternya dengan bentuk elektroda tersebut merupakan pengembangan dari arester dengan bentuk elektroda susunan koaksial (tabung-tabung). Pada arester dengan susunan koaksial memiliki efisiensi yang tinggi yaitu mendekati 1. Hal ini menyebabkan kesulitan dalam mendapatkan nilai tegangan potong arester yang diinginkan. Sedangkan elektroda dengan bentuk spiral memiliki efisiensi yang lebih rendah. Dengan merekayasa bentuk elektroda menjadi spiral, maka akan memberikan kemudahan dalam menentukan nilai tegangan potongnya yaitu dengan cara mengatur panjang kawat elektroda. Diharapkan penelitian ini dapat dijadikan sebagai dasar pertimbangan dalam perancangan dan pembuatan arester untuk proteksi tegangan rendah.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah yang disusun adalah sebagai berikut.

- a. Bagaimana rekayasa pemotong tegangan lebih impuls menggunakan elektroda spiral dengan tingkat proteksi 1500V.
- b. Bagaimana karakteristik pemotongan gelombang impuls menggunakan elektroda spiral sebagai proteksi tegangan lebih untuk peralatan listrik tegangan rendah.

## **1.3 Batasan Masalah**

Berdasarkan rumusan masalah tersebut di atas, batasan masalah yang dirumuskan adalah sebagai berikut.

- a. Aresternya digunakan pada sistem catu daya peralatan listrik tegangan rendah 220V.
- b. Pada penelitian ini tingkat tegangan proteksi arester sebesar 1500V.
- c. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tegangan impuls 1,2/50  $\mu$ s.

- d. Kondisi tekanan dan temperatur udara pada ruang pengujian dibuat tetap (tekanan udara 964 mbar dan temperatur udara 24°C).
- e. Kawat tembaga yang digunakan memiliki diameter 1,3 mm.

#### **1.4 Tujuan**

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan pemotong tegangan lebih impuls menggunakan elektroda spiral dengan tingkat proteksi 1500V.

#### **1.5 Sistematika Pembahasan**

Sistematika pembahasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

##### **BAB I PENDAHULUAN**

Berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika pembahasan penelitian.

##### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Berisi dasar teori dan digunakan sebagai dasar penelitian yang berkaitan dengan permasalahan yang diajukan dalam penelitian.

##### **BAB III METODE PENELITIAN**

Berisi metode yang digunakan dalam penelitian ini yang terdiri dari studi literatur, pengambilan data, perhitungan dan analisis data, serta kesimpulan dan saran.

##### **BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS REKAYASA PEMOTONG TEGANGAN LEBIH IMPULS MENGGUNAKAN ELEKTRODA SPIRAL**

Berisi pengujian, pengolahan data, dan analisis tentang rekayasa pemotong tegangan lebih impuls menggunakan elektroda spiral.

##### **BAB V PENUTUP**

Berisi kesimpulan hasil penelitian dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya di masa yang akan datang.



## BAB II

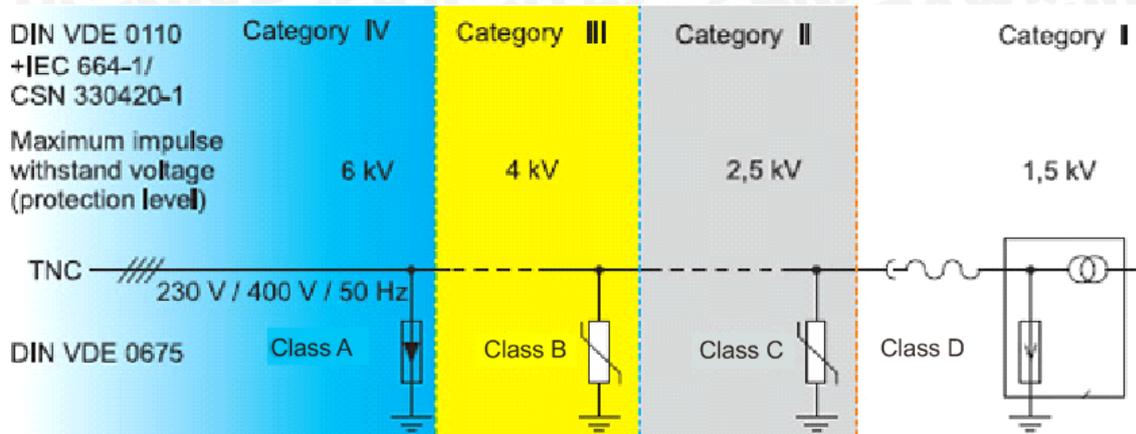
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Arester

Arester merupakan suatu alat pelindung peralatan sistem terhadap tegangan surja dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkannya ke tanah. Pada kondisi normal, arester bersifat isolator sedangkan saat terdapat tegangan lebih di sistem maka arester bersifat konduktor yang meneruskan tegangan lebih tersebut ke tanah. Setelah surja dilepaskan, arus masih mengalir karena adanya tegangan sistem. Arus ini dinamakan arus dinamik atau arus susulan. Arester harus mempunyai ketahanan termis yang cukup terhadap energi dari arus susulan ini, dan harus mampu memutuskannya.

Berdasarkan DIN VDE 0110/IEC Publ.664, terdapat 4 kategori ketahanan tegangan surja pada peralatan listrik tegangan rendah:

- Kategori I : Kategori ini memiliki ketahanan tegangan surja 1,5 kV. Tempat dari aplikasi fungsi/tujuannya adalah sebagai proteksi surja untuk peralatan tegangan rendah, untuk pemotongan dari sisa tegangan arester yang sebelumnya.
- Kategori II : Kategori ini memiliki ketahanan tegangan surja 2,5 kV. Kegunaan dari kategori ini sama dengan kategori I tetapi aplikasi proteksi kategori ini digunakan pada piranti rendah yang protabel.
- Kategori III : Kategori ini memiliki ketahanan tegangan surja 4 kV. Tempat dari aplikasi fungsi/tujuannya adalah untuk proteksi tegangan lebih pada peralatan meter listrik.
- Kategori IV : Kategori ini memiliki ketahanan tegangan surja 6 kV. Tempat dari aplikasi fungsi/tujuannya adalah untuk proteksi petir bonding ekipotensial/proteksi surja dari sistem, untuk pemutusan energi dari arus petir dan arus petir terusan.



Gambar 2.1 Kategori ketahanan tegangan surja pada peralatan listrik tegangan rendah dan kelas arester

Sumber : IEC Publ. 664

Selain itu berdasarkan DIN VDE 0675 Part 6 juga terdapat 4 klasifikasi kelas untuk arester tegangan rendah:

- Kelas A : Arestor dengan kelas A berfungsi untuk melindungi peralatan listrik tegangan rendah kategori IV dengan tingkat proteksi sebesar 6 kV.
- Kelas B : Arestor dengan kelas B berfungsi untuk melindungi peralatan listrik tegangan rendah kategori III dengan tingkat proteksi sebesar 4 kV.
- Kelas C : Arestor dengan kelas C berfungsi untuk melindungi peralatan listrik tegangan rendah kategori II dengan tingkat proteksi sebesar 2,5 kV.
- Kelas D : Arestor dengan kelas D berfungsi untuk melindungi peralatan listrik tegangan rendah kategori I dengan tingkat proteksi sebesar 1,5 kV.

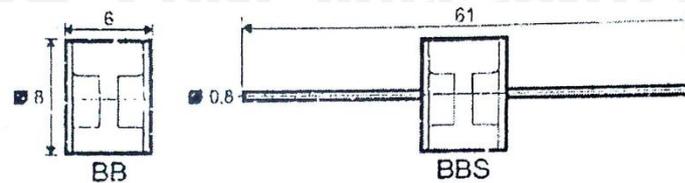
Pada skripsi ini akan direkayasa arester untuk melindungi peralatan listrik tegangan rendah yang termasuk dalam kategori I dengan tingkat proteksi sebesar 1,5 kV (termasuk ke dalam arester kelas D).

### 2.1.1 Arestor Tegangan Rendah

Arestor tegangan rendah merupakan suatu alat pelindung peralatan listrik dari tegangan lebih impuls dengan tingkat pemotongan pada level yang rendah. Terdapat beberapa jenis arester tegangan rendah yang biasa digunakan di lapangan, salah satu yang membedakan diantara arester-arester tersebut adalah bentuk elektrodanya. Bentuk elektroda ini memiliki pengaruh besar dalam menghasilkan tegangan potong dari suatu arester. Hal ini dapat dijelaskan sesuai dengan persamaan berikut:

$$U_d = E_d \cdot s \cdot \eta \quad (2.1)$$

Nilai tegangan tembus ( $U_d$ ) atau tegangan potong dari suatu arester dipengaruhi oleh medan listrik ( $E_d$ ), jarak sela ( $s$ ), dan efisiensi ( $\eta$ ). Bentuk elektroda akan berpengaruh terhadap efisiensi.



Gambar 2.2 Bentuk elektroda GDT menurut Citel

Sumber : Mansuri, 2002 : 8

Salah satu contoh arester tegangan rendah yaitu arester GDT. Bentuk elektroda dari arester GDT seperti terlihat pada Gambar 2.2 yaitu memiliki elektroda piring-piring yang disusun sejajar. Tingkat proteksi GDT dipengaruhi oleh jarak sela elektrodanya dan kondisi tekanan udara dalam tabung arester.

Selain itu juga terdapat arester dengan bentuk elektroda susunan koaksial (tabung-tabung). Arestor dengan bentuk elektroda ini memiliki efisiensi yang tinggi yaitu mendekati 1. Karena hal inilah arester dengan elektroda susunan koaksial mempunyai kesulitan dalam mendapatkan nilai tegangan potong arester yang diinginkan.

### 2.1.2 Karakteristik Tegangan Potong Arestor

Arestor bekerja berdasarkan tegangan yaitu bila tegangan impuls pada terminal melampaui teraan impulsnya maka arester akan bekerja dengan cara memotong tegangan lebih tersebut (Mansuri, 2009 : 9). Karakteristik tegangan potong arester merupakan kombinasi dua variabel yaitu tegangan potong dan waktu potong yang menghasilkan karakteristik tegangan-waktu dari arester. Karakteristik tegangan-waktu arester sangat berguna sebagai data koordinasi isolasi.

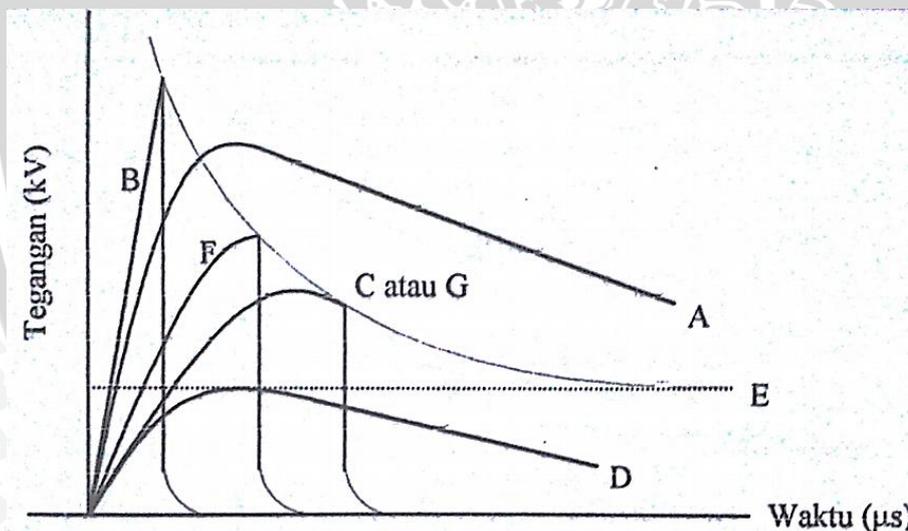
Beberapa karakteristik arester yang perlu diketahui dengan jelas adalah sebagai berikut (Arismunandar, 1984 : 110) :

1. Arestor mempunyai tegangan dasar yang tidak boleh dilampaui. Karena arester merupakan suatu alat pelindung surja yang bekerja berdasarkan tegangan lebih (salah satunya disebabkan oleh surja petir) dan mempunyai tegangan tertentu, maka arester tidak boleh dikenakan tegangan melebihi tegangan dasar ini, baik dalam keadaan normal atau pada keadaan selama terjadi gangguan.

2. Arester mempunyai karakteristik yang dibatasi oleh tegangan bila dilalui oleh berbagai macam arus petir.
3. Karakteristik pembatas tegangan impuls dari arester adalah harga yang dapat ditahan pada terminalnya bila menyalurkan surja arus tertentu.
4. Arester mempunyai batas termis. Arester harus mempunyai kemampuan menyalurkan arus surja yang terjadi berulang-ulang. Karena adanya komponen resistansi dari arester maka pada arester akan timbul panas. Panas yang timbul ini harus mampu ditahan oleh arester.

### 2.1.3 Pemotongan Tegangan Lebih

Jika ada surja petir datang ke sebuah peralatan, dapat digambarkan gelombangnya menyerupai karakteristik A pada Gambar 2.3. Sesuai dengan fungsinya arester akan bekerja melindungi peralatan dari gangguan akibat surja petir tersebut dengan cara memotongnya sehingga tegangan yang dirasakan oleh peralatan tidak menyebabkan rusaknya peralatan tersebut, tergantung besarnya surja yang datang.



Gambar 2.3 Tempat kedudukan kurva tegangan-waktu dari hasil pemotongan gelombang tegangan impuls

Sumber : Arismunandar, 1984:115

Gelombang impuls memiliki bentuk awal seperti gelombang A pada Gambar 2.3. Arester sebagai pemotong tegangan memiliki karakteristik potong tegangan tertentu seperti tampak pada Gambar 2.3. (lengkung E). Gelombang B dan F merupakan contoh bentuk gelombang impuls yang terpotong pada bagian muka gelombang. Sedangkan pada gelombang C atau G merupakan contoh bentuk gelombang impuls yang terpotong pada

bagian punggung gelombang. Pada gelombang D tidak terpotong karena besar tegangannya masih berada pada level yang diijinkan oleh arester (berada di bawah kurva karakteristik potong arester).

Suatu arester yang ideal merupakan arester yang memotong gelombang impuls yang datang pada bagian muka gelombang. Saat arester memotong pada bagian muka gelombang, maka peralatan yang dilindungi tidak akan merasakan tegangan puncak dari gelombang impuls sehingga peralatan akan aman.

#### **2.1.4 Karakteristik Lengkung tegangan-waktu**

Lengkung E yang didapat dengan menghubungkan ketiga puncak dari tiga gelombang di atas, merupakan karakteristik tegangan-waktu dari tiga gelombang tegangan yang datang ke peralatan. Lengkung ini juga melalui titik-titik lompatan api pada puncak (lengkung F).

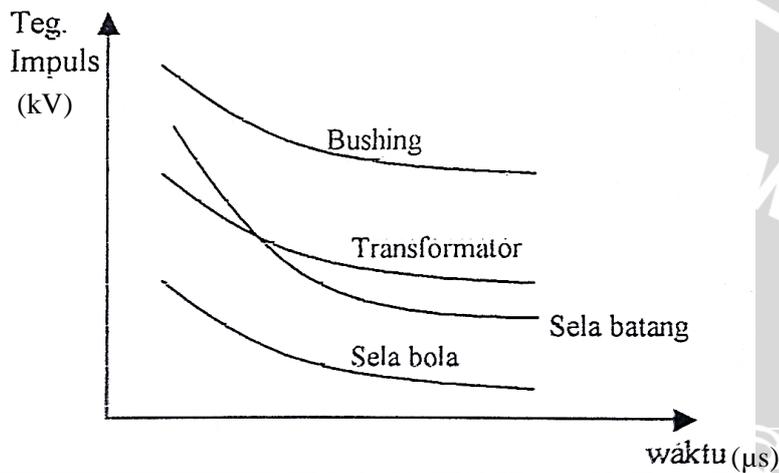
Karakteristik lengkung tegangan-waktu merupakan karakteristik yang menghubungkan puncak-puncak tegangan potong sejumlah impuls dengan bentuk tertentu diterapkan pada isolasi dengan kata lain karakteristik lengkung tegangan-waktu adalah tempat kedudukan titik-titik potong koordinat ( $t_{potong}$ ,  $U_{potong}$ ).

#### **2.1.5 Tingkat Isolasi Dasar dan Koordinasi Isolasi**

Tingkat isolasi dasar merupakan batas kekuatan isolasi suatu peralatan untuk menerima tegangan impuls. Selain itu, tingkat isolasi dasar juga dapat didefinisikan sebagai tingkat-tingkat patokan yang dinyatakan dalam puncak tegangan impuls dengan gelombang standar. Karakteristik kekuatan isolasi peralatan ini sangat penting diketahui, hal ini karena berkaitan dengan perencanaan sistem proteksinya.

Koordinasi isolasi didefinisikan sebagai hubungan antara kekuatan isolasi peralatan dan sirkuit listrik yang ditentukan oleh ketahanan impulsnya dengan karakteristik alat-alat pelindungnya yang ditentukan oleh tingkat proteksi tegangan impuls sehingga isolasi tersebut terlindungi dari bahaya tegangan lebih. Tingkat perlindungan suatu peralatan pelindung dapat ditentukan berdasarkan karakteristik lengkung tegangan-waktu. (Mansuri, 2002:11).

Untuk mendapatkan isolasi yang baik terhadap tegangan impuls, maka karakteristik lengkung tegangan-waktu sebuah perangkat isolasi haruslah berada di bawah nilai tegangan maksimum yang diperbolehkan masuk ke dalam sistem. Pada Gambar 2.4 dapat dilihat beberapa karakteristik lengkung tegangan-waktu isolasi dari beberapa peralatan listrik. IEC Report 664 dan DIN VDE 0110 menampilkan suatu dimensi tegangan impuls maksimum yang diperbolehkan masuk ke suatu peralatan dengan tegangan referensi tertentu.



Gambar 2.4 Kurva karakteristik tegangan-waktu

Sumber : Naidu dan Kamaraju, 1982 : 24

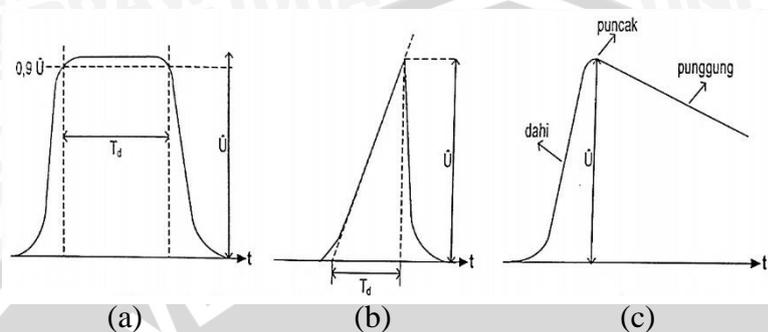
Pada Gambar 2.4 bushing dan transformator merupakan peralatan listrik yang dilindungi. Sela batang dan sela bola berfungsi sebagai peralatan proteksi pemotong tegangan lebih yang masuk ke peralatan. Bushing memiliki tegangan kerja yang tinggi sehingga akan tetap aman saat menggunakan sela batang maupun sela bola sebagai alat proteksi tegangan lebih.

Transformator memiliki tegangan kerja yang lebih rendah dari pada bushing. Dari Gambar 2.4 dapat dilihat bahwa penggunaan sela batang sebagai alat proteksi pada transformator hanya akan melindungi transformator dari surja hubung. Sedangkan sela bola memiliki tingkat proteksi yang lebih rendah sehingga dapat melindungi transformator dari surja petir maupun surja hubung.

## 2.2 Tegangan Impuls

Tegangan impuls merupakan suatu tegangan yang naik mencapai puncaknya secara cepat dan turun secara perlahan menuju nol. Ada tiga bentuk gelombang impuls seperti pada tampak Gambar 2.5 yaitu tegangan impuls persegi, tegangan impuls terpotong (taji), dan tegangan impuls eksponensial ganda. Tegangan impuls persegi mengalami waktu

muka yang sangat singkat dan menjadi konstan setelah mencapai puncak sesaat sebelum terjadi tembus. Sedangkan tegangan impuls terpotong adalah tegangan impuls yang tiba-tiba menjadi nol pada saat mencapai puncak, sewaktu di dahi atau sewaktu di punggung. Tegangan impuls eksponensial ganda biasa digunakan untuk peniruan surja petir dan tegangan surja hubung. Perbedaan bentuk dari gelombang impuls ini ditentukan pada lama waktu dahi dan waktu punggung.



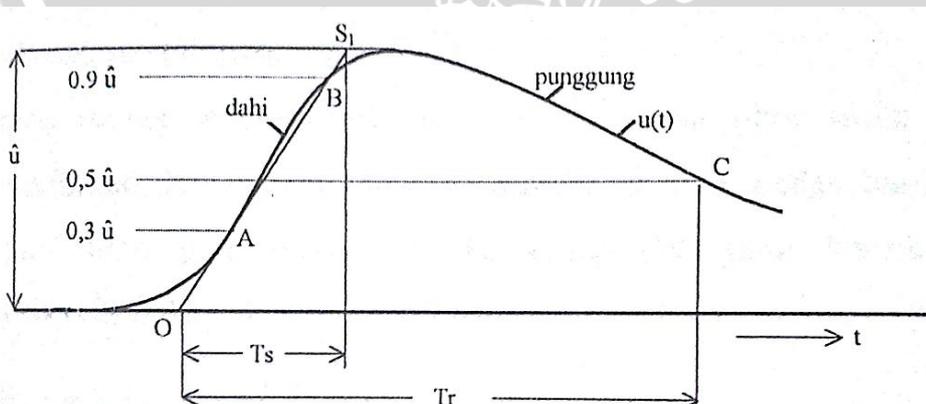
Gambar 2.5 Beberapa bentuk gelombang tegangan impuls

- (a) Tegangan impuls persegi
- (b) Tegangan impuls terpotong (taji)
- (c) Tegangan impuls eksponensial ganda

Sumber : Kind, 1993 : 32

### 2.3 Parameter Tegangan Impuls

Tegangan impuls yang digunakan pada penelitian ini yaitu tegangan impuls eksponensial ganda karena tipe inilah yang mendekati tipe gelombang dari petir. Berdasarkan IEC gelombang petir memiliki tipe standar yaitu  $1,2/50 \mu\text{s}$ , berarti besar waktu dahi (muka)  $T_s = 1,2 \mu\text{s}$  dan waktu paruh punggung  $T_r = 50 \mu\text{s}$ . Muka gelombang impuls petir didefinisikan sebagai bagian dari gelombang yang dimulai dari titik nol hingga mencapai titik puncak, sedangkan sisanya adalah punggung gelombang.



Gambar 2.6 Parameter tegangan uji impuls petir standar

Sumber : Kind, 1993 : 34

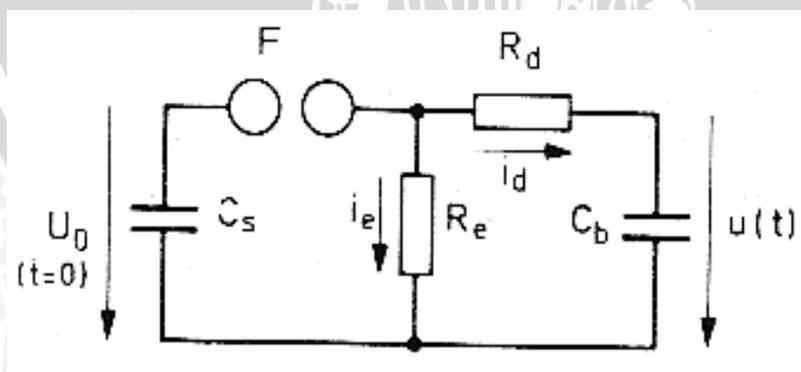
Gambar 2.6 juga merupakan bentuk umum dari gelombang berjalan. Terdapat beberapa spesifikasi gelombang berjalan yaitu:

1. Puncak gelombang, yaitu amplitudo maksimum gelombang dari gelombang tegangan impuls.
2. Muka gelombang  $t_s$  ( $\mu\text{s}$ ) yaitu waktu dari permulaan sampai puncak. Biasanya diambil 30% E sampai 90 % E.
3. Ekor gelombang, yaitu bagian dibelakang puncak. Panjang gelombang  $t_r$  ( $\mu\text{s}$ ) adalah waktu dari permulaan sampai titik 50 % E pada ekor gelombang.
4. Polaritas, yaitu polaritas dari gelombang.

Bentuk dahi tegangan impuls petir sering sukar diukur, sehingga untuk mencirikaninya dibentuk garis lurus 0- $S_1$  melalui titik A dan B. Pada Gambar 2.6 ditunjukkan cara untuk menentukan waktu dahi dan waktu punggung. Waktu dahi ( $T_s$ ) diukur dari titik 0 hingga mencapai titik potong antara sumbu waktu  $t$  dengan garis vertikal dari titik  $S_1$ . Sedangkan waktu paruh punggung ( $T_r$ ) diukur dari titik 0 hingga mencapai titik potong antara sumbu waktu  $t$  dengan garis vertikal dari titik C.

#### 2.4 Pembangkit Tegangan Impuls

Dalam pengujian tegangan tinggi, tegangan impuls diperlukan untuk mensimulasikan gelombang surja yang ada di kehidupan nyata baik surja hubung maupun surja petir. Umumnya tegangan impuls dibangkitkan dengan meluahkan muatan kapasitor tegangan tinggi melalui sela percik yang berfungsi sebagai saklar impuls pada suatu rangkaian pembangkit tegangan impuls.



Gambar 2.7 Rangkaian Pembangkitan Tegangan Impuls

Sumber : Kind, 1993 : 35

Prinsip kerja rangkaian pembangkit tegangan impuls pada Gambar 2.7 dapat dijelaskan sebagai berikut. Kapasitor impuls  $C_s$  dimuati melalui suatu resistansi dengan tegangan searah  $U_0$ . Kemudian dengan memberikan trigger ke sela percik  $F$  maka saklar

impuls ini akan menjadi tertutup dan meluahkan muatan yang berada pada kapasitor  $C_s$ . Tegangan impuls  $U(t)$  akan muncul pada kapasitor beban  $C_b$ . Lama waktu pengisian muatan pada kapasitor  $C_b$  merupakan waktu dahi (waktu yang diperlukan untuk mencapai nilai puncak). Setelah itu saklar impuls  $F$  kembali pada posisi terbuka dan terjadi peluahan muatan kapasitor  $C_b$ . Proses peluahan ini terjadi secara lambat tidak secepat proses pengisiannya. Lama waktu peluahan muatan kapasitor  $C_b$  merupakan waktu punggung. Semakin kecil nilai  $R_d C_b$  maka akan semakin cepat  $U(t)$  mencapai nilai puncak. Nilai puncak tegangan impuls akan selalu lebih rendah dari pada nilai puncak tegangan DC yang dibangkitkan, hal ini karena adanya tahanan  $R_e$ . Untuk mendapatkan tegangan impuls puncak yang setinggi mungkin maka harus dipilih  $C_s \gg C_b$ .

Kurva tegangan impuls yang dihasilkan dari rangkaian di atas mempunyai persamaan berikut (Kind, 1993: 38).

$$U(t) = \frac{U_0}{R_d C_b} \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left( e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2} \right) \quad (2.2)$$

Tampak bahwa tegangan impuls merupakan selisih dari dua fungsi eksponensial, yaitu fungsi pengisian dan peluahan muatan kapasitor  $C_b$  yang masing-masing meluruh dengan konstanta waktu  $T_1$  dan  $T_2$ . Dengan pendekatan  $R_e C_s \gg R_d C_b$  dihasilkan persamaan (Kind, 1993: 38)

$$T_1 = R_e (C_s + C_b) \quad (2.3)$$

$$T_2 = R_d \left( \frac{C_s C_b}{C_s + C_b} \right) \quad (2.4)$$

Nilai  $T_1$  dan  $T_2$  menentukan bentuk impuls. Karena  $T_1 \gg T_2$  maka kondisi untuk menyederhanakan perhitungan  $T_1$  dan  $T_2$  elemen-elemen rangkaian juga harus terpenuhi. Konstanta waktu  $T_1$  dan  $T_2$  terkait dengan karakteristik tegangan impuls petir melalui faktor yang tergantung pada perbandingan  $T_s$  dan  $T_r$  berikut (Kind, 1993: 39)

$$T_s = k_2 T_2 \quad (2.5)$$

$$T_r = k_1 T_1 \quad (2.6)$$

Dengan  $k_1 = 0,73$  dan  $k_2 = 2,96$

## 2.5 Tembus Pada Gas

### 2.5.1 Mekanisme Townsend

Mekanisme Townsend menjelaskan tentang fenomena tembus hanya pada tekanan rendah dan jarak sela yang kecil ( $p_s \leq 10$  barmm) dengan medan homogen. Mekanisme Townsend menyatakan dua hal penting yang menjadi dasar teorinya yaitu proses primer

(memungkinkan terjadinya banjir elektron) dan proses sekunder (memungkinkan terjadinya peningkatan banjir elektron).

Pada pembentukan peluahan mekanisme townsend dapat ditunjukkan bahwa tegangan tembus statik  $U_d$  dari suatu medan yang homogen pada suhu konstan hanya bergantung pada perkalian antara tekanan ( $p$ ) dan jarak sela ( $s$ ). Koefisien ionisasi  $\alpha$  dari elektron dan ketergantungannya terhadap kuat medan  $E$  dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-B \frac{p}{E}} \quad (2.7)$$

Dengan  $A$  dan  $B$  adalah konstanta-konstanta empirik. Untuk mekanisme Townsend dalam medan homogen berlaku kondisi tembus sebagai berikut:

$$As = k = \text{const.} \quad (2.8)$$

Jika persamaan di atas terpenuhi maka  $E = E_d = U_d/s$ . Dengan substitusi untuk memperoleh  $U_d$  maka diperoleh hukum Paschen:

$$U_d = B \frac{ps}{\ln\left(\frac{A}{k} ps\right)} = U_d(ps) \quad (2.9)$$

Jika persyaratan untuk persamaan di atas terpenuhi maka dapat disimpulkan bahwa peluahan yang terjadi diakibatkan oleh mekanisme Townsend. (Dieter Kind, 1993: 167).

### 2.5.1.1 Proses Primer

Proses primer merupakan proses ionisasi. Radiasi eksternal sinar ultraviolet menyebabkan dibebaskannya elektron-elektron yang berada pada katoda. Elektron-elektron bebas ini kemudian bergerak menuju anoda dan dipercepat oleh medan listrik dengan gaya sebesar  $eE$ , dan energi ( $W$ ) yang diberikan adalah sebagai berikut:

$$W = e E x = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.10)$$

keterangan:

- $W$  : energi (Joule)
- $e$  : muatan elektron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C)
- $E$  : intensitas medan (kV/m)
- $m$  : massa elektron (gram)
- $v$  : kecepatan elektron (m/s)
- $x$  : jarak pengarah elektron (m)

Dalam pergerakannya menuju anode, elektron tersebut akan menumbuk molekul gas dan menghasilkan ion-ion positif serta elektron-elektron bebas baru. Elektron bebas

baru ini akan membentuk banjiran elektron primer yang bergerak ke anode sebagai arus listrik.

### 2.5.1.2 Proses Sekunder

Bila elektron awal telah berhasil mencapai anode maka proses avalanche tunggal telah selesai. Ion positif yang terbentuk pada proses primer akan bergerak menuju katode dan dipercepat oleh medan listrik. Ketika ion positif menumbuk katode maka elektron akan dibebaskan ke luar permukaan katode dan terjadi penambahan elektron yang akan membentuk banjiran muatan ruang yang lama-kelamaan menjembatani terjadinya kanal peluahan antara anoda-katode pada sela elektroda, sehingga terjadi tembus total.

### 2.5.2 Mekanisme Streamer

Mekanisme kegagalan streamer terjadi pada tekanan dan jarak sela yang lebih besar dari mekanisme kegagalan townsend yaitu sekitar  $p_s \geq 10$  mmbar. Pada mekanisme kegagalan streamer ini tidak dapat terjadi hanya dari avalanche tunggal seperti pada mekanisme Townsend. Avalanche primer yang terbentuk dari proses ionisasi tumbukan tidak mampu menjembatani ruang antara katoda dan anoda.

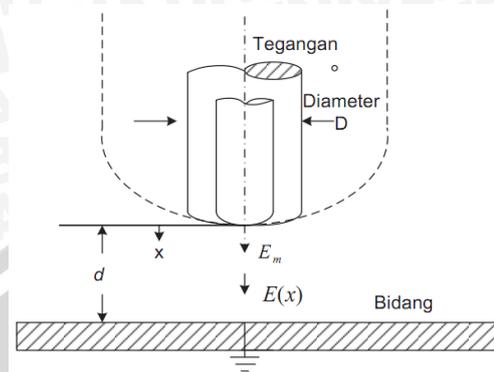
Mekanisme streamer dicirikan dengan terjadinya proses ionisasi benturan ( $\alpha$ ) Townsend, dan proses emisi foton pada bagian kepala avalanche yang memancar kesegala arah. Pancaran energi foton ini kemudian dapat mengionisasi atom gas netral dan menciptakan avalanche-avalanche baru di dalam ruang. Bila avalanche-avalanche tersebut membentuk suatu jembatan konduktif, maka tembus streamer terjadi.

## 2.6 Distribusi Medan Listrik dan Kekuatan Tembus Material Isolasi Gas

Tegangan ( $V$ ) antara dua elektroda mungkin cukup terisolasi dengan menempatkan bahan isolasi homogen. Intensitas medan tembus  $E_b$  dianggap sebagai suatu konstanta karakteristik material antara elektroda tersebut. Jarak sela antara elektroda ( $d$ ) dihitung sebagai  $d = V/E_b$  untuk medan homogen. Elektroda yang digunakan dari bahan yang baik dan dalam ukuran tertentu, dimana distribusi medan antara elektroda dari bahan ditekankan pada nilai intensitas medan maksimum  $E_m$  tertentu.

Dengan analisis medan dapat disimpulkan bahwa kondisi  $E_m = E_b$  akan memberikan solusi optimal untuk masalah isolasi. Hal ini berlaku hanya bila  $E_b$  memiliki nilai yang sangat spesifik yang berkaitan langsung dengan distribusi medan dan dapat dihitung untuk bahan isolasi pada umumnya, seperti gas. Namun, untuk dielektrik padat

dan cair nilai-nilai tersebut hanya cukup diketahui. Contoh sederhana dari sistem isolasi yang merupakan konfigurasi elektroda batang-bidang dengan isolasi udara diperlihatkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Konfigurasi elektroda Rod-bidang

Sumber : Daud, 2012: 11

Gambar 2.8 jarak sela dan kerapatan udara diasumsikan tetap konstan,  $D$  diameter batang berbentuk hemispherical seperti ditunjukkan oleh garis putus-putus. Dua kuantitas medan dapat didefinisikan untuk setiap diameter batang  $D$ . Intensitas medan maksimum  $E_m$  pada ujung batang dan Intensitas medan rata-rata  $E_r = V/d$ . Untuk intensitas medan maksimum  $E_m$  dan intensitas medan rata-rata dapat ditentukan faktor efisiensi medan  $\eta$  yang telah dirumuskan oleh schwaiger sebagai berikut :

$$\eta = \frac{E_r}{E_m} = \frac{V}{dE_m} \quad (2.11)$$

Jika tembus yang disebabkan oleh  $E_m$  saja, maka tegangan tembus  $V_b$  diperoleh dari persamaan 2.11 sebagai:

$$V_b = E_m d \eta = E_d d \eta \text{ dengan } E_m = E_b \quad (2.12)$$

Persamaan 2.12 menggambarkan konsep faktor efisiensi medan. Untuk sembarang distribusi medan dipenuhi  $0 \leq \eta \leq 1$ , sehingga untuk medan tidak homogen mengurangi tingkat tegangan tembus susunan.

## 2.7 Faktor Efisiensi Medan Listrik

Pada berbagai susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu melalui pengujian tegangan tinggi tentu akan memiliki karakteristik tegangan tembus yang berbeda pula. Hal ini disebabkan karena dengan susunan elektroda dengan geometris yang berbeda, distribusi medan listriknya juga akan berbeda. Dikarenakan distribusi medan yang berbeda pula maka tidak hanya karakteristik tegangan tembus yang berbeda, tetapi

mempengaruhi karakteristik yang lain juga. Misalnya pada susunan elektroda bola-piring tentu berbeda distribusi medan listriknya dengan susunan elektroda jarum-piring. Besar faktor efisiensi medan listrik ( $\eta$ ) pada berbagai konfigurasi susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu dapat didefinisikan menurut Schwaiger yaitu sebagai berikut: (Schwaiger,2005):

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maksimum}} \quad (2.13)$$

atau dapat ditulis,

$$E_{rata-rata} = \eta \cdot E_{maksimum} \quad (2.14)$$

$$E_{rata-rata} = \frac{U_d}{s} \quad (2.15)$$

dengan:

$\eta$  : efisiensi medan listrik pada susunan elektroda

$E_{rata-rata}$  : kuat medan listrik rata-rata (kV/cm)

$E_{maksimum}$  : kuat medan listrik lokal tertinggi (kV/cm)

$U_d$  : tegangan tembus pada susunan elektroda (kV)

$s$  : jarak sela antar elektroda (cm)

Pada susunan elektroda keping sejajar, distribusi medan listriknya homogen sehingga besar  $E_{maksimum}$  sama dengan  $E_{rata-rata}$ . Sebaliknya pada distribusi medan listrik non homogen akan terdapat kuat medan listrik lokal pada daerah tertentu yang nilainya lebih besar dari kuat medan listrik rata-ratanya. Dengan demikian, maka batas nilai faktor efisiensi medan listrik untuk berbagai susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu memenuhi syarat:  $\eta < 1$ .

Besar faktor efisiensi medan listrik bergantung pada bentuk geometris susunan elektroda, yaitu untuk susunan elektroda yang memberikan distribusi medan listrik homogen, misal susunan elektroda pelat sejajar, maka  $\eta = 1$ . Sedangkan pada susunan elektroda yang menghasilkan distribusi medan listrik non homogen seperti susunan elektroda bola-piring, maka  $\eta < 1$ .

Selain mengacu pada persamaan diatas, faktor efisiensi medan listrik dapat pula ditentukan secara empiris dengan menyatakan  $\eta$  sebagai fungsi dari satu atau dua besaran karakteristik geometris susunan elektroda  $p$  dan  $q$ . Berdasarkan pada buku faktor efisiensi geometri elektroda menurut Schwaiger halaman pertama, maka:

$$p = \frac{s+r}{r} \quad (2.16)$$

$$q = \frac{R}{r} \quad (2.17)$$

dengan:

$s$  : jarak sela (cm)

$r$  : jari-jari elektroda bawah (cm)

$R$  : jari-jari elektroda atas (cm), berlaku  $r < R$

Nilai dari  $\eta$  fungsi  $p$  dan  $q$  tersebut untuk bermacam-macam susunan elektroda nantinya dapat dilihat pada buku faktor efisiensi geometri elektroda menurut Schwaiger. Apabila besar efisiensi medan  $\eta$  diketahui, maka kuat medan listrik yang menyebabkan terjadi tembus pada dielektrik dalam sela elektroda dapat ditentukan, yaitu:

$$U_d = E_d \times s \times \eta \quad (2.18)$$

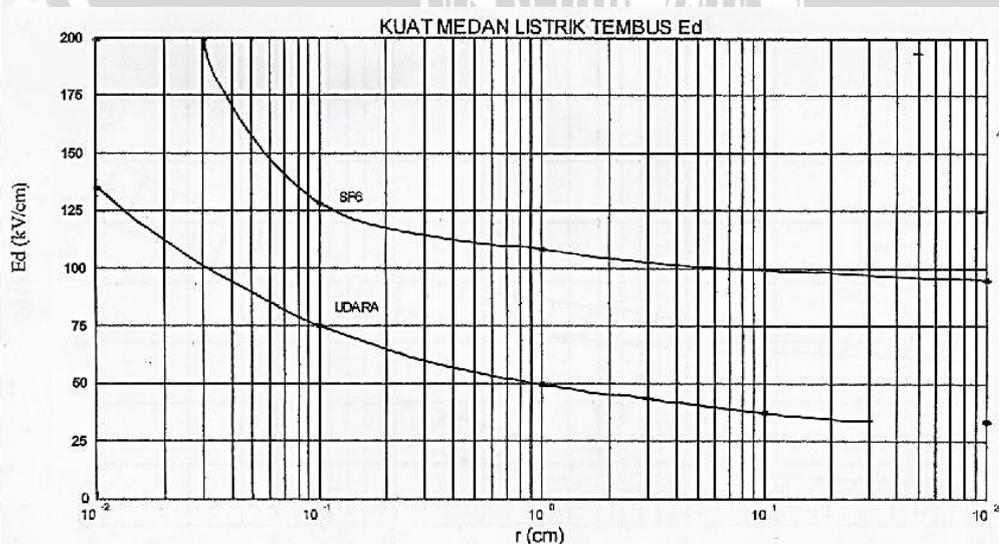
$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} \quad (2.19)$$

dengan:

$U_d$  : tegangan tembus pada susunan elektroda (kV)

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

Untuk mengetahui besarnya medan listrik maksimum juga dapat dilakukan dengan menggunakan simulator program Femm 4.2. Pada Femm 4.2 bentuk geometri akan digambar, kemudian diberikan nilai tegangan tembusnya, dan medium isolasinya juga dapat disesuaikan. Cara lain untuk mendapatkan medan listrik maksimum yaitu dengan menggunakan tabel/grafik Schwaiger untuk susunan elektroda yang diinginkan. Gambar 2.9 merupakan grafik medan maksimum untuk susunan elektroda silinder koaksial dengan medium isolasi udara.

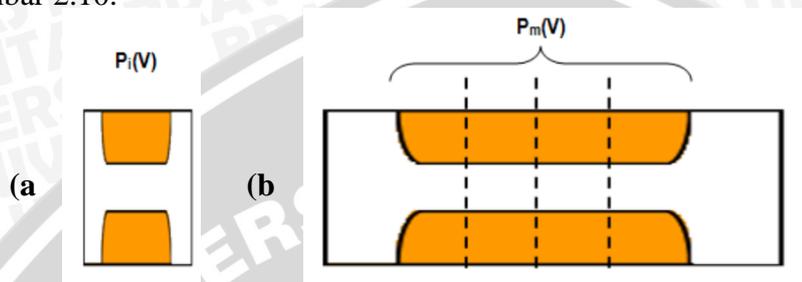


Gambar 2.9 Kurva kuat medan listrik tembus  $E_d$

Sumber : Schwaiger, 1925 : 64

## 2.8 Hukum Perbesaran (Enlargement Law)

Proses tembus pada sela udara merupakan kejadian yang probabilistik-statistik yang mengilhami munculnya Hukum Perbesaran (Dokopoulos, 1968). Hukum perbesaran ini menggambarkan bahwa tegangan tembus pada sela udara akan mengalami penurunan pada saat dimensi elektrodanya bertambah. Hal ini dapat juga dapat diartikan sebagai peningkatan jumlah elemen yang mengalami tekanan listrik dalam paralel seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Perbesaran dimensi elektroda

- (a) Dimensi elektroda awal
- (b) Dimensi elektroda setelah perbesaran

Sumber : Hauschild, 1992:260

Untuk menurunkan hukum perbesaran, dimisalkan ada  $m$  susunan isolasi yang identik dan secara statistik bebas satu dengan yang lainnya dengan ilustrasi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. Dimisalkan fungsi distribusi probabilitas tembus setiap elemen isolasi adalah  $P_i(V)$ , maka probabilitas bahwa sebuah susunan individu tidak akan tembus adalah,

$$1 - P_i(V) \quad (2.20)$$

Jika  $m$  susunan diberi tekanan listrik secara simultan, maka probabilitas  $m$  susunan tidak mengalami tembus dapat diturunkan menggunakan teori probabilitas perkalian (theorema likelihood equal), yaitu:

$$[1 - P_i(V)]^m \quad (2.21)$$

Dengan demikian probabilitas tembus untuk  $m$  susunan paralel isolasi, dapat dinyatakan oleh fungsi distribusi probabilitas,

$$P_m(V) = 1 - [1 - P_i(V)]^m \quad (2.22)$$

Apabila nilai  $P_i(V)$  sangat kecil, maka persamaan (2.22) dapat didekati dengan persamaan yang lebih sederhana, yaitu:

$$P_m(V) \approx m P_i(V) \quad (2.23)$$

Dari persamaan (2.23) dapat diamati bagaimana perbesaran dimensi elektroda dapat memperkecil tegangan tembus. Dari persamaan ini dapat diilustrasikan bahwa apabila satu

elemen isolasi memiliki probabilitas tembus individu sebesar 0,01 pada tegangan V ( $P_i(V) = 0,01$ ), maka untuk perbesaran dimensi 10 kali ( $m = 10$ ), maka probabilitas tembus susunan yang sudah diperbesar adalah,

$$P_{10}(V) \approx m \times P_i(V) = 10 \times 0,01 = 0,1$$

Ini berarti bahwa apabila pada susunan satu elemen memberikan probabilitas tembus sebesar 1% pada tingkat tegangan sebesar 100 kV, maka pada susunan yang diperbesa 10 kali, probabilitas tembusnya meningkat menjadi 10% pada tegangan 100 kV. Tentu saja perbesaran ini juga menyebabkan penurunan pada tingkat tegangan tembusnya, dengan kata lain tegangan tembus susunan yang diperbesar secara dimensi akan lebih kecil dari tegangan tembus susunan satu elemen.

## 2.9 Gelombang Berjalan

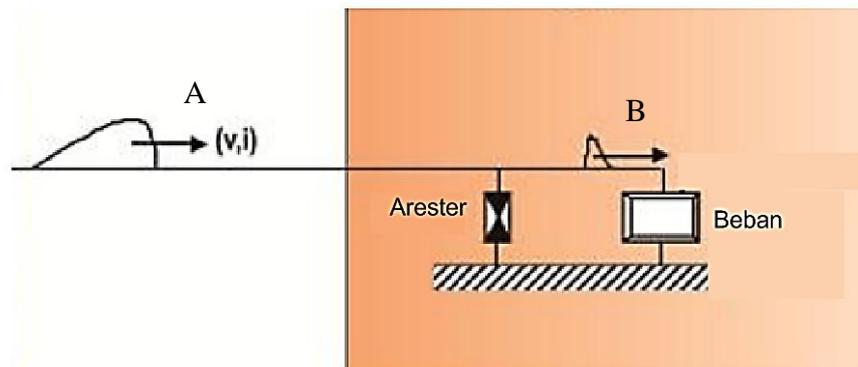
Teori gelombang berjalan pada kawat transmisi telah mulai disusun secara intensif sejak tahun 1910, terlebih lagi pada tahun 1930-an. Persoalan gelombang berjalan sangat sukar, sehingga harus diadakan banyak penyederhanaan agar dapat digunakan untuk keperluan teknik. Pada saat ini, gelombang berjalan telah diselidiki pada :

1. Kawat tunggal.
2. Kawat majemuk.
3. Kecepatan majemuk dari gelombang berjalan.

Terdapat beberapa sebab gelombang berjalan yang telah diketahui antara lain adalah sebagai berikut:

1. Sambaran kilat secara langsung pada kawat.
2. Sambaran tidak langsung pada kawat.
3. Operasi pemutusan (switching operation).
4. Busur tanah (arcing ground).
5. Gangguan – gangguan pada sistem oleh berbagai kesalahan.

Sebab – sebab tersebut menimbulkan tegangan lebih yang masuk ke dalam suatu sistem kelistrikan. Tegangan lebih ini bersifat merambat sehingga biasa disebut juga dengan gelombang berjalan. Tegangan yang sangat besar ini akan berakibat fatal jika sampai masuk ke dalam peralatan listrik. Untuk melindungi peralatan listrik ini maka perlu dipasang areter.



Gambar 2.11 Proses pemotongan gelombang berjalan

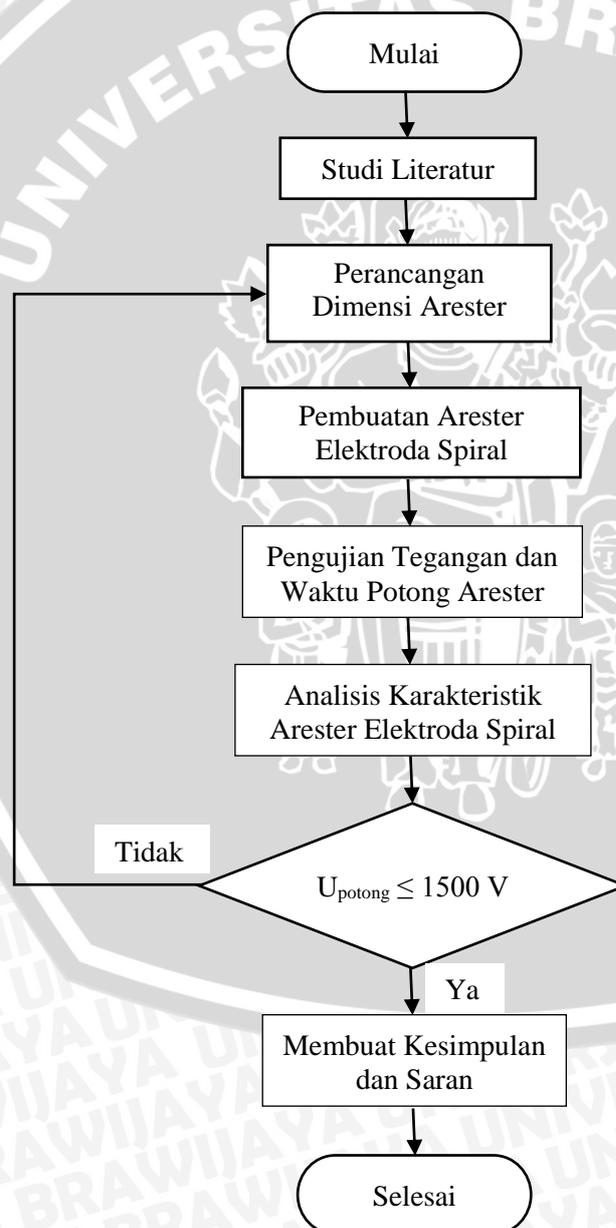
Sumber : Kind, 1993:30

Pada Gambar 2.11 dapat dilihat bahwa arester disusun secara paralel dengan beban. Pada saat gelombang berjalan (gelombang A) ini masuk ke menuju ke beban, gelombang berjalan ini terlebih dahulu akan melewati arester. Suatu arester memiliki tingkat proteksi tertentu sesuai karakteristiknya. Pada kondisi normal, arester bersifat isolator sedangkan saat terdapat tegangan lebih maka arester bersifat konduktor. Apabila tegangan yang melewati arester melebihi tegangan kerjanya, maka tegangan tersebut akan diperkecil. Hal ini karena pada saat tegangan lebih melewati arester maka elektron yang berada pada permukaan katoda akan terlepas dan bergerak menuju anoda. Pada perjalanannya menuju anoda elektron ini kemudian akan menumbuk molekul-molekul udara yang ada pada sela udara arester sehingga terbentuklah banjir elektron bebas baru. Elektron-elektron ini kemudian membentuk suatu jembatan konduktif yang menghubungkan antara katoda dengan anoda, sehingga pada kondisi ini arester akan bersifat sebagai konduktor. Pada kondisi ini resistansi arester lebih kecil sehingga tegangan akan mengalir ke arester dan kemudian diteruskan ke tanah. Arestor ini akan kembali menjadi isolator pada saat tegangan yang melewatinya berada di bawah tegangan kerjanya. Dari Gambar 2.11 dapat dilihat gelombang B merupakan tegangan yang sudah diperkecil oleh arester. Gelombang B akan terus merambat dan masuk ke beban dengan aman.



### BAB III METODE PENELITIAN

Metode yang akan dilakukan dalam penelitian ini seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.1 berikut. Dalam metode penelitian ini akan diuraikan langkah-langkah yang akan dilaksanakan dalam mencapai tujuan penyusunan penelitian. Metode yang akan dilakukan dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 3.1 sebagai berikut.



Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian

Untuk mendapatkan pemotong tegangan lebih impuls yang sesuai dengan tujuan penelitian, maka dilakukan beberapa pengujian. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian pengaruh jarak sela terhadap tegangan potong dan waktu potong arester elektroda spiral, pengujian pengaruh diameter terhadap tegangan potong dan waktu potong arester elektroda spiral, pengujian pengaruh panjang terhadap tegangan potong dan waktu potong arester elektroda spiral.

Pada pengujian jarak sela arester, dilakukan pengujian 5 kali pengambilan data untuk setiap arester dengan jarak sela yang berbeda, jika pengujian sesuai akan dilakukan analisis hasil dari pengujian tersebut. Pada pengujian diameter arester, dilakukan pengujian 5 kali pengambilan data untuk setiap arester dengan diameter yang berbeda, jika pengujian sesuai maka akan dilanjutkan analisis hasil pengujian. Pada pengujian panjang arester, dilakukan pengujian 5 kali pengambilan data untuk setiap arester dengan panjang yang berbeda, jika pengujian sesuai maka akan dilanjutkan analisis hasil pengujian. Setelah semua pengujian dan analisis selesai, akan diambil kesimpulan dan saran dari hasil pengujian tersebut.

### **3.1 Studi Literatur**

Studi literatur yang dilakukan dengan mempelajari buku-buku literatur yang berkaitan dengan pembangkitan tegangan tinggi impuls, karakteristik potong arester dan jurnal-jurnal dari situs internet yang berkaitan dengan penyelesaian penelitian ini. Studi literatur bertujuan sebagai dasar teori yang menunjang penyelesaian penelitian tentang rancang bangun arester dengan elektroda spiral ini.

### **3.2 Variabel Penelitian**

Dalam penelitian ini ada beberapa hal yang akan diamati, antara lain jarak sela, diameter dan panjang arester yang digunakan sebagai elektroda dalam penelitian ini.

### **3.3 Perencanaan**

Arester yang direncanakan pada penelitian ini adalah arester sebagai pelindung peralatan tegangan rendah dengan rating tegangan operasi 220 V/50 Hz dan tingkat proteksi tegangan sebesar  $\leq 1500$  V.

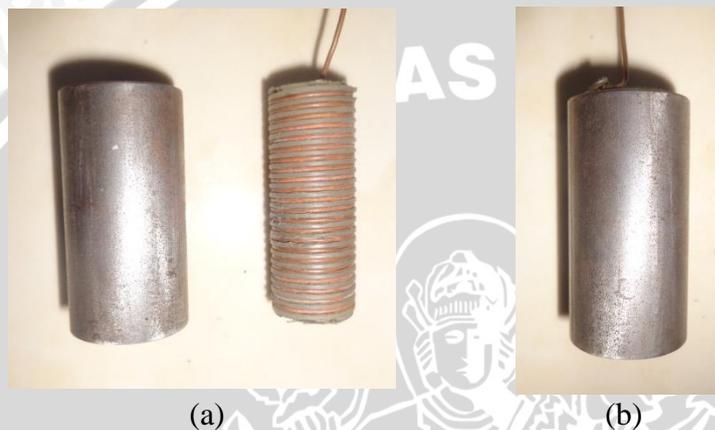
#### **3.3.1 Bentuk Elektroda Arester**

Bentuk elektroda yang dipilih merupakan rekayasa dari bentuk elektroda silinder koaksial. Berdasarkan beberapa kriteria dalam pemilihan bentuk elektroda yaitu

pemakaian bahan elektroda yang lebih hemat, dan kemudahan dalam mendapatkan tegangan potong maka disimpulkan menggunakan bentuk elektroda kawat yang dibentuk spiral (elektroda dalam) dan elektroda tabung (elektroda luar).

### 3.3.2 Bahan Elektroda Arester

Bahan dari elektroda baik kawat maupun tabung yaitu menggunakan tembaga. Tembaga dipilih karena memiliki konduktivitas yang baik dibandingkan dengan bahan lainnya. Bentuk elektroda dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Bentuk Elektroda

- (a) Sebelum disatukan  
(b) Setelah disatukan

### 3.4 Bahan dan Peralatan

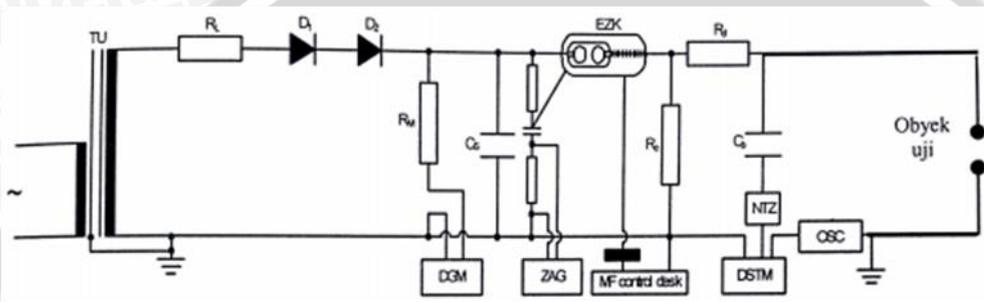
Bahan dan peralatan yang dipergunakan pada penelitian ini agar mendapatkan nilai tegangan potong dan waktu potong arester, antara lain:

- a. Arester : Obyek uji
- b. Trafo Uji : 220 V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz
- c.  $R_L$  : Tahanan pengaman (10 M $\Omega$ )
- d. Dioda : Penyearah tegangan (140 kV)
- e.  $R_M$  : Tahanan pembagi HVDC (280 M $\Omega$ )
- f.  $C_S$  : Pembagi kapasitif (10000 pF)
- g. EZK : Bola pemicu
- h.  $R_E$  : Tahanan peluahan (6100  $\Omega$ )
- i.  $R_D$  : Tahanan redaman (260  $\Omega$ )
- j.  $C_B$  : Kapasitor beban (1200 pF)

- k. NTZ : Pembagi tegangan
- l. ZAG : Pemicu
- m. DGM : Alat ukur tegangan tinggi DC
- n. DSTM : Alat ukur tegangan tinggi impuls
- o. OSC : Osiloskop

### 3.5 Rangkaian Pengujian

Rangkaian pengujian yang digunakan untuk mengetahui tingkat tegangan potong arester akan diberikan seperti pada Gambar 3.3 di bawah ini:



Gambar 3.3 Rangkaian pengujian tegangan tinggi impuls tipe 1,2/50  $\mu$ s

Sumber: Dieter Kind, 1993: 19

Trafo yang digunakan dalam pengujian merupakan trafo uji (*HV Transformer*) yang dapat menaikkan tegangan sampai 100 kV, dengan daya yang dikeluarkan sebesar 5 kVA, dan frekuensi 50 Hz. Trafo uji disusun secara seri dengan tahanan  $R_L$  dan dua buah dioda. Pada rangkaian ini menggunakan dioda karena untuk membangkitkan tegangan tinggi DC. Besar tegangan tinggi DC ini diukur dengan menggunakan resistif divider. Tahanan  $R_M$  dipasang seri dengan DGM (alat ukur tegangan tinggi DC). Tegangan tinggi DC ini kemudian disimpan muatannya di dalam kapasitor  $C_S$  yang disusun secara paralel. Setelah itu diberikan *trigger* melalui ZAG, sehingga saklar impuls EZK yang awalnya pada kondisi *open circuit* menjadi *short circuit* hanya untuk waktu yang singkat. Muatan yang tersimpan dalam kapasitor  $C_S$  selanjutnya akan mengalir ke kapasitor  $C_B$  melewati tahanan  $R_D$ . Pada kapasitor  $C_B$  inilah tempat terjadinya tegangan tinggi impuls. Dengan dipasangnya arester secara paralel dengan kapasitor  $C_B$ , maka tegangan impuls akan terpotong. Gelombang impuls ini dapat dilihat pada osiloskop. Pada osiloskop dapat dilihat berapa tegangan potong yang dihasilkan oleh arester. Selain itu juga dapat dilihat berapa waktu potongnya. Hal ini dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap arester, kemudian diambil nilai rata-ratanya.

### 3.6 Pembedian

Pengujian rekayasa pemotong tegangan lebih impuls ini merupakan penelitian tegangan tinggi, sehingga untuk menjaga keselamatan dan meredam gangguan yang ditimbulkan oleh pemakaian tegangan tinggi, semua peralatan yang bersifat metal (logam) yang dalam keadaan normal atau kerja tidak dialiri arus listrik harus dikebunikan, sehingga mempunyai potensial yang sama dengan tanah dan tidak mempengaruhi hasil pengukuran.

### 3.7 Langkah-langkah Pengujian

1. Menyusun rangkaian pengujian seperti pada Gambar 3.3
2. Menggunakan arester dengan variabel jarak sela.
3. Menaikkan tegangan primer TU hingga mencapai nilai tegangan UDGM tertentu.
4. Meluahkan muatan pada kapasitor CS dengan memberikan trigger pada sela percik sehingga tegangan impuls dari kapasitor pemuatan ini dapat menembus benda uji (arester).
5. Mencatat nilai tegangan potong dan waktu potong melalui pengamatan keluaran osiloskop.
6. Mengulangi langkah (3) sampai (5) menggunakan arester dengan variabel diameter arester.
7. Mengulangi langkah (3) sampai (6) menggunakan arester dengan variabel panjang arester.

### 3.8 Analisis Hasil Pengujian

1. Analisis pengaruh perubahan jarak sela, diameter, dan panjang arester terhadap tegangan potong arester.
2. Menganalisis untuk setiap nilai jarak sela dan diameter elektroda tersebut, ditentukan panjangnya kawat elektroda yang menghasilkan tegangan potong arester sebesar 1500 V.

### 3.9 Kesimpulan dan Saran

Pada tahapan ini dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan teori, hasil perhitungan, dan analisis. Kemudian pemberian saran kepada pembaca yang dimaksudkan untuk memperbaiki kesalahan-kesalahan yang terjadi serta menyempurnakan penelitian untuk pengembangan di masa mendatang.



## BAB IV

### PENGUJIAN DAN ANALISIS REKAYASA PEMOTONG TEGANGAN LEBIH IMPULS MENGGUNAKAN ELEKTRODA SPIRAL

Pada bab ini akan dibahas mengenai perancangan arester dengan elektroda spiral. Beberapa hal yang akan dibahas adalah menetapkan spesifikasi arester, penentuan dimensi arester, pengujian karakteristik jarak sela arester terhadap tegangan potong, pengujian karakteristik diameter arester terhadap tegangan potong, pengujian karakteristik panjang arester terhadap tegangan potong, distribusi medan listrik arester, efisiensi medan listrik arester, dan perancangan arester elektroda spiral.

#### 4.1 Spesifikasi Arestor

Arestor yang akan dirancang ini merupakan rekayasa dari arester dengan elektroda silinder koaksial dengan tingkat proteksi terhadap tegangan lebih sebesar 1,5 kV. Hal ini sesuai dengan DIN VDE 0110/IEC Publ.664 kategori ketahanan surja dan tingkat pemotongan tegangan oleh arester, proteksi untuk peralatan tegangan rendah kategori I, kelas arester D dengan tingkat proteksi 1,5 kV.

#### 4.2 Penentuan Dimensi Arestor

Dimensi dari arester yang dimaksud yaitu jarak sela, diameter, dan panjang arester. Bentuk elektroda yang digunakan merupakan rekayasa dari bentuk elektroda silinder koaksial, yaitu susunan antara elektroda spiral (elektroda dalam) dan elektroda silinder (elektroda luar). Pemilihan bentuk elektroda ini didasarkan pada kemudahan dalam mendapatkan tegangan potong arester yang diinginkan.

Untuk mengetahui karakteristik jarak sela, diameter, dan panjang arester, maka dilakukan pengujian terlebih dahulu dengan,

1. Karakteristik jarak sela arester terhadap tegangan potong.
2. Karakteristik diameter arester terhadap tegangan potong.
3. Karakteristik panjang arester terhadap tegangan potong.

##### 4.2.1 Karakteristik Jarak Sela Arestor Terhadap Tegangan Potong

Tabel 4.1 merupakan tabel data pengujian nilai tegangan potong arester dengan beberapa jarak sela yang berbeda. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali untuk

setiap sampel kemudian diambil nilai rata-ratanya. Nilai  $s$  merupakan nilai jarak sela arester,  $U_i$  merupakan nilai tegangan masukan,  $U_d$  merupakan nilai tegangan potong arester, dan  $\bar{U}_d$  merupakan nilai rata-rata tegangan potong arester.

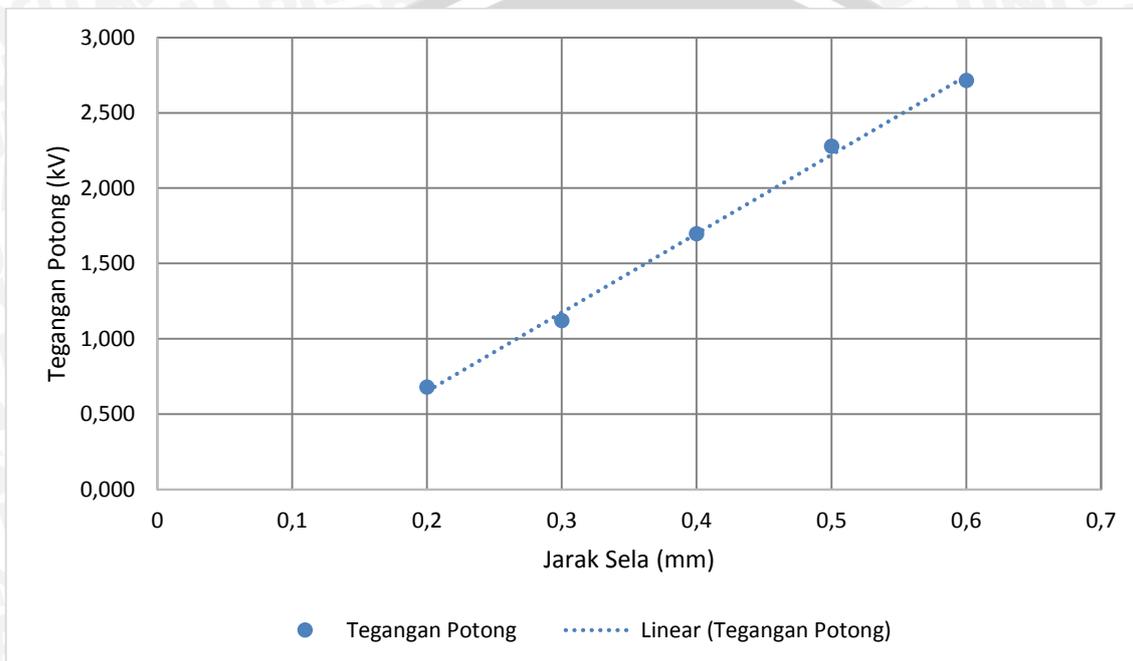
Tabel 4.1 Pengujian pengaruh jarak sela terhadap tegangan potong dengan diameter dalam 23 mm dan panjang 50 mm

No.	s (mm)	$U_i$ (kV)	$U_d$ (kV)	$\bar{U}_d$ (kV)
1.	0,2	20,12	0,742	0,679
			0,636	
			0,660	
2.	0,3	20,10	1,140	1,121
			1,228	
			0,994	
3.	0,4	20,06	1,695	1,698
			1,681	
			1,717	
4.	0,5	20,08	2,265	2,278
			2,229	
			2,339	
5.	0,6	20,12	2,887	2,716
			2,594	
			2,667	

Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa pada saat pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,2 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,12 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 0,679 kV. Saat pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,3 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,10 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,121 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,4 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,06 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,698 kV. Untuk pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,5 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,08 kV, maka didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,278 kV. Selanjutnya untuk pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,6 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,12 kV, maka didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,716 kV.

Dari data pada Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambahnya jarak sela arester maka tagangan potong yang dihasilkan akan semakin tinggi. Setiap penambahan jarak sela sebesar 0,1 mm maka tegangan potong yang dihasilkan akan naik rata-rata sebesar 0,509 kV.

Dengan menggunakan data pada Tabel 4.1, maka dapat di buat grafik pengaruh jarak sela terhadap tegangan potong arester yang diberikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Pengaruh jarak sela terhadap tegangan potong arester

Gambar 4.1 merupakan grafik perubahan jarak sela arester, dari gambar dapat dilihat bahwa nilai tegangan potong akan semakin tinggi seiring dengan bertambahnya jarak sela arester yang digunakan.

Fungsi dari grafik diatas adalah :

$$U = 5,231s - 0,3892$$

$$R^2 = 0,997$$

Pada grafik didapatkan persamaan untuk setiap penambahan jarak sela, dengan U merupakan tagangan potong arester dan s adalah jarak sela arester. Dengan mengambil contoh untuk jarak sela sebesar 0,2 mm, maka perhitungannya sebagai berikut,

$$U = 5,231s - 0,3892$$

$$U = 5,231(0,2) - 0,3892$$

$$U = 0,657 \text{ kV}$$

Untuk perhitungan selanjutnya setiap penambahan jarak sela dapat dilihat pada Tabel 4.2 yang merupakan perbandingan data pengujian dengan data menurut *trendline* untuk jarak sela arester yang berbeda.

Tabel 4.2 Perbandingan data pengujian dengan data menurut *trendline* untuk jarak sela arester yang berbeda

Jarak sela (mm)	Tegangan Potong Pengujian (kV)	Tegangan Potong Trendline (kV)	$\Delta U$ (kV)
0,2	0,679	0,657	0,022
0,3	1,121	1,180	0,059
0,4	1,698	1,703	0,005
0,5	2,278	2,226	0,052
0,6	2,716	2,749	0,033
Rata-rata penyimpangan			0,028

Dari Tabel 4.2 dapat dilihat perbandingan data pengujian dengan data *trendline* memiliki rata-rata penyimpangan bernilai 0,028 pada pengujian tegangan potong untuk jarak sela yang berbeda.

#### 4.2.2 Karakteristik Diameter Arester Terhadap Tegangan Potong

Tabel 4.3 merupakan tabel data pengujian nilai tegangan potong arester dengan beberapa diameter dalam yang berbeda. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap sampel kemudian diambil nilai rata-ratanya. Nilai  $d$  merupakan nilai diameter dalam arester,  $U_i$  merupakan nilai tegangan masukan,  $U_d$  merupakan nilai tegangan potong arester, dan  $\overline{U_d}$  merupakan nilai rata-rata tegangan potong arester.

Tabel 4.3 Pengujian pengaruh diameter terhadap tegangan potong dengan jarak sela 0,4 mm dan panjang 50 mm

No.	d (mm)	$U_i$ (kV)	$U_d$ (kV)	$\bar{U}_d$ (kV)
1.	19	20,10	1,366	1,358
			1,319	
			1,388	
2.	20	20,13	1,403	1,440
			1,505	
			1,410	
3.	21	20,08	1,549	1,535
			1,535	
			1,520	
4.	22	20,16	1,622	1,637
			1,593	
			1,695	
5.	23	20,17	1,721	1,718
			1,681	
			1,754	

Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa pada saat pengujian menggunakan arester dengan diameter 19 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,10 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,358 kV. Saat pengujian menggunakan arester dengan diameter 20 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,13 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,440 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan arester dengan diameter 21 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,08 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,535 kV. Untuk pengujian menggunakan arester dengan diameter 22 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,16 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,637 kV. Selanjutnya untuk pengujian menggunakan arester dengan diameter 23 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,17 kV, maka didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,718 kV.

Dari data pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambahnya diameter arester maka tagangan potong yang dihasilkan akan semakin tinggi. Setiap penambahan diameter sebesar 1 mm maka tegangan potong yang dihasilkan akan naik rata-rata sebesar 0,090 kV.

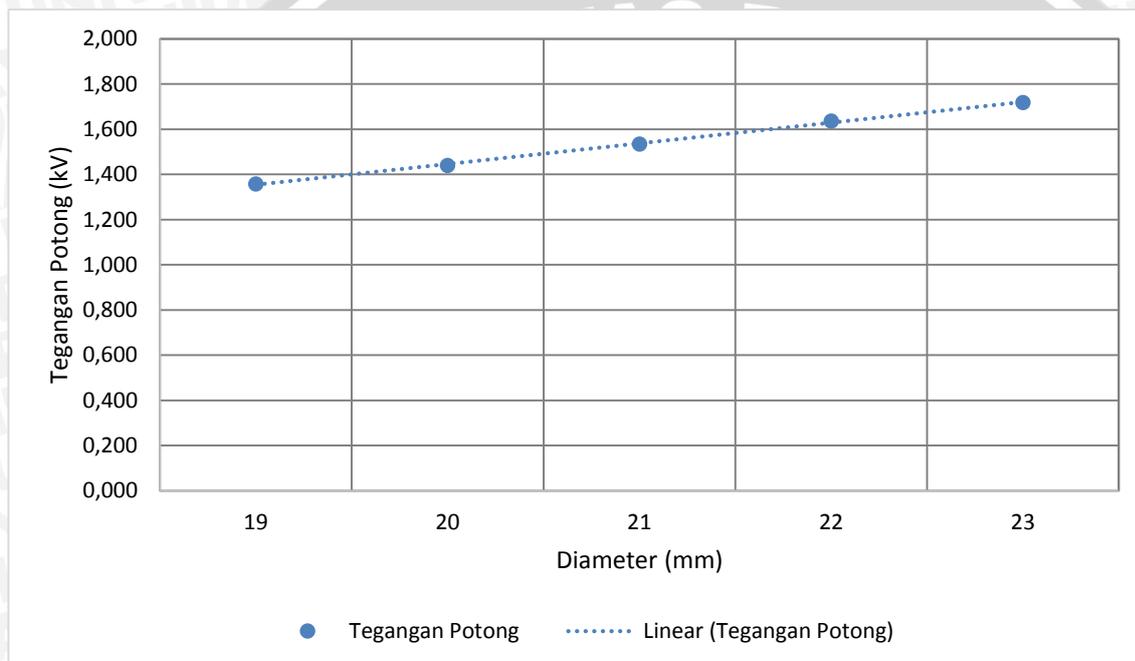
Dengan menggunakan data pada Tabel 4.3, maka dapat di buat grafik pengaruh diameter terhadap tegangan potong arester yang diberikan pada Gambar 4.2.

Gambar 4.2 merupakan grafik perubahan diameter arester, dari gambar dapat dilihat bahwa nilai tegangan potong akan semakin tinggi seiring dengan bertambahnya diameter arester yang digunakan.

Fungsi dari grafik diatas adalah :

$$U = 0,0917d - 0,3881$$

$$R^2 = 0,9989$$



Gambar 4.2 Pengaruh diameter terhadap tegangan potong arester

Pada grafik didapatkan persamaan untuk setiap penambahan diameter, dengan U merupakan tegangan potong arester dan d adalah diameter arester. Dengan mengambil contoh untuk diameter sebesar 19 mm, maka perhitungannya sebagai berikut,

$$U = 0,0917d - 0,3881$$

$$U = 0,0917(19) - 0,3881$$

$$U = 1,354 \text{ kV}$$

Untuk perhitungan selanjutnya setiap penambahan diameter dapat dilihat pada Tabel 4.4 yang merupakan perbandingan data pengujian dengan data menurut *trendline* untuk diameter arester yang berbeda.

Tabel 4.4 Perbandingan data pengujian dengan data menurut *trendline* untuk diameter arester yang berbeda

Diameter (mm)	Tegangan Potong Pengujian (kV)	Tegangan Potong Trendline (kV)	$\Delta U$ (kV)
19	1,358	1,354	0,004
20	1,440	1,446	0,006
21	1,535	1,542	0,003
22	1,637	1,629	0,008
23	1,718	1,721	0,003
Rata-rata penyimpangan			0,005

Dari Tabel 4.4 dapat dilihat perbandingan data pengujian dengan data *trendline* memiliki rata-rata penyimpangan bernilai 0,005 pada pengujian tegangan potong untuk diameter yang berbeda.

#### 4.2.3 Karakteristik Panjang Arestor Terhadap Tegangan Potong

Tabel 4.5 merupakan tabel data pengujian nilai tegangan potong arester dengan beberapa panjang arester yang berbeda. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap sampel kemudian diambil nilai rata-ratanya. Nilai  $L$  merupakan nilai panjang arester,  $U_i$  merupakan nilai tegangan masukan,  $U_d$  merupakan nilai tegangan potong arester, dan  $\overline{U_d}$  merupakan nilai rata-rata tegangan potong arester.

Tabel 4.5 Pengujian pengaruh panjang terhadap tegangan potong dengan jarak sela 0,4 mm dan diameter dalam 21 mm

No.	L (mm)	$U_i$ (kV)	$U_d$ (kV)	$\bar{U}_d$ (kV)
1.	20	20,09	2,064	1,962
			2,010	
			1,812	
2.	30	20,21	1,973	1,827
			1,768	
			1,739	
3.	40	20,18	1,695	1,695
			1,681	
			1,710	
4.	50	20,15	1,535	1,564
			1,564	
			1,593	
5.	60	20,19	1,535	1,476
			1,388	
			1,505	

Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa pada saat pengujian menggunakan arester dengan panjang 30 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,09 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,962 kV. Saat pengujian menggunakan arester dengan panjang 40 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,21 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,827 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan arester dengan panjang 30 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,18 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,695 kV. Untuk pengujian menggunakan arester dengan panjang 40 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,15 kV, maka didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,564 kV. Selanjutnya untuk pengujian menggunakan arester dengan panjang 50 mm dan diberi tegangan uji sebesar 20,19 kV, maka didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,476 kV.

Dari data pada Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambahnya panjang arester maka tagangan potong yang dihasilkan akan semakin rendah. Setiap

pertambahan panjang sebesar 10 mm maka tegangan potong yang dihasilkan akan turun rata-rata sebesar 0,115 kV.

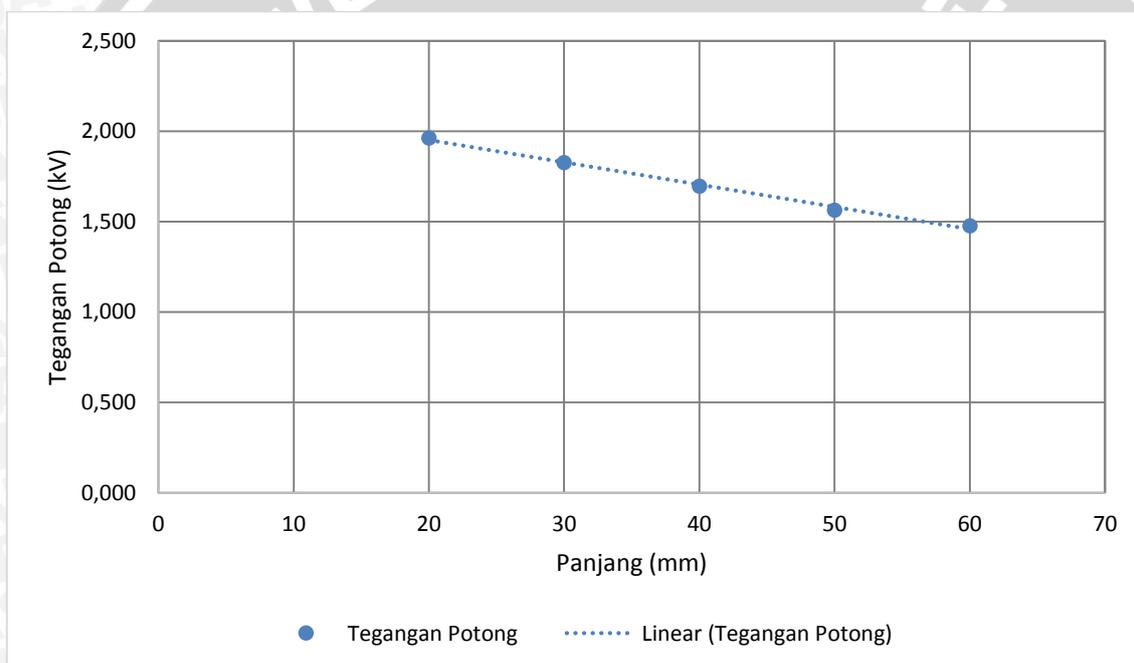
Dengan menggunakan data pada tabel 4.5, maka dapat di buat grafik pengaruh jarak sela terhadap tegangan potong arester yang diberikan pada Gambar 4.3.

Gambar 4.3 merupakan grafik perubahan panjang arester, dari gambar dapat dilihat bahwa nilai tegangan potong akan semakin rendah seiring dengan bertambahnya panjang arester yang digunakan.

Fungsi dari grafik adalah :

$$U = -0,0124L + 2,1988$$

$$R^2 = 0,9946$$



Gambar 4.3 Pengaruh panjang terhadap tegangan potong arester

Pada grafik didapatkan persamaan untuk setiap penambahan panjang, dengan U merupakan tagangan potong arester dan L adalah panjang arester. Dengan mengambil contoh untuk panjang sebesar 20 mm, maka perhitungannya sebagai berikut,

$$U = -0,0124L + 2,1988$$

$$U = -0,0124(20) + 2,1988$$

$$U = 1,950 \text{ kV}$$

Untuk perhitungan selanjutnya setiap penambahan panjang dapat dilihat pada Tabel 4.6 yang merupakan perbandingan data pengujian dengan data menurut *trendline* untuk panjang arester yang berbeda.

Tabel 4.6 Perbandingan data pengujian dengan data menurut *trendline* untuk panjang arester yang berbeda

Panjang (mm)	Tegangan Potong Pengujian (kV)	Tegangan Potong Trendline (kV)	$\Delta U$ (kV)
20	1,962	1,950	0,012
30	1,827	1,826	0,002
40	1,695	1,702	0,007
50	1,564	1,578	0,014
60	1,476	1,454	0,024
Rata-rata penyimpangan			0,012

Dari Tabel 4.6 dapat dilihat perbandingan data pengujian dengan data *trendline* memiliki rata-rata penyimpangan bernilai 0,012 pada pengujian tegangan potong untuk diameter yang berbeda.

#### 4.3 Distribusi Medan Listrik pada Sela Udara

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi tegangan tembus diantaranya suhu, tekanan udara, diameter elektroda, susunan elektroda, jarak sela, dan medium sela elektroda. Berdasarkan Persamaan 2.18 tegangan tembus juga dipengaruhi oleh medan listrik. Untuk mengetahui besarnya medan listrik maksimum dapat dilakukan dengan menggunakan simulator program Femm 4.2. Selain itu juga dapat dilihat pada tabel Schwaiger untuk susunan elektroda yang diinginkan. Pada Gambar 2.9 dapat dilihat pada susunan elektroda silinder koaksial dengan medium isolasi udara didapatkan nilai medan listrik maksimumnya untuk diameter 21 mm yaitu sebesar 4,5 kV/mm.

#### 4.4 Efisiensi Medan Listrik

Efisiensi medan listrik merupakan salah satu yang menentukan tingkat homogenitas dari suatu areter. Rentang nilai efisiensi medan listrik yaitu antara 0 – 1. Semakin

mendekati nilai 1 maka semakin tinggi tingkat homogenitas dari suatu arester. Setelah mendapatkan nilai medan maksimum, maka dapat dihitung berapa efisiensi dari arester elektroda spiral ini. Dengan menggunakan Persamaan 2.15, terlebih dahulu dihitung medan rata-ratanya. Dengan  $U_d$  sebesar 1,5 kV dan jarak sela ( $s$ ) sebesar 0,4 mm, maka nilai medan rata-ratanya adalah sebagai berikut,

$$E_{rata-rata} = \frac{U_d}{s}$$

$$E_{rata-rata} = \frac{1,5}{0,4}$$

$$E_{rata-rata} = 3,75 \text{ kV/mm}$$

Dengan nilai kuat medan listrik maksimum sebesar 4,5 kV/mm dan nilai kuat medan rata-ratanya sebesar 3,75 kV/mm, maka dengan menggunakan Persamaan 2.13 faktor efisiensi medan listrik pada arester elektroda spiral adalah sebagai berikut,

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

$$\eta = \frac{3,75}{4,5}$$

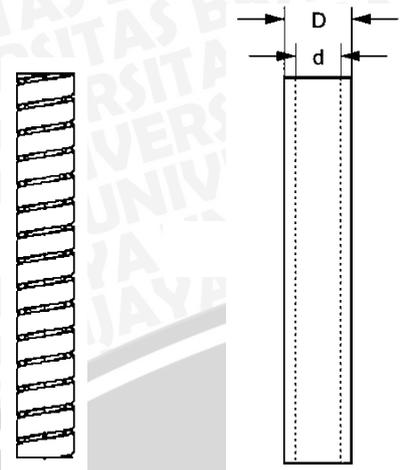
$$\eta = 0,83$$

#### 4.5 Arestor Elektroda Spiral

Untuk rekayasa arester elektroda spiral dengan tingkat proteksi 1500 V terdapat beberapa pertimbangan yaitu bentuk geometri, jarak sela, diameter, dan panjang arester. Berdasarkan data yang telah didapatkan pada pengujian sebelumnya berikut rekayasa arester elektroda spiral.

##### 4.5.1 Bentuk Geometri Arestor

Arestor elektroda spiral merupakan rekayasa dari arester dengan elektroda koaksial (elektroda tabung-tabung) dimana pada arester ini menggunakan elektroda dalam luar berupa tabung dan elektroda luarnya berupa kawat spiral. Sesuai dengan analisis distribusi medan listrik pada sela udara dan efisiensi medan listrik, maka didapatkan desain dari arester elektroda spiral seperti pada Gambar 4.4.



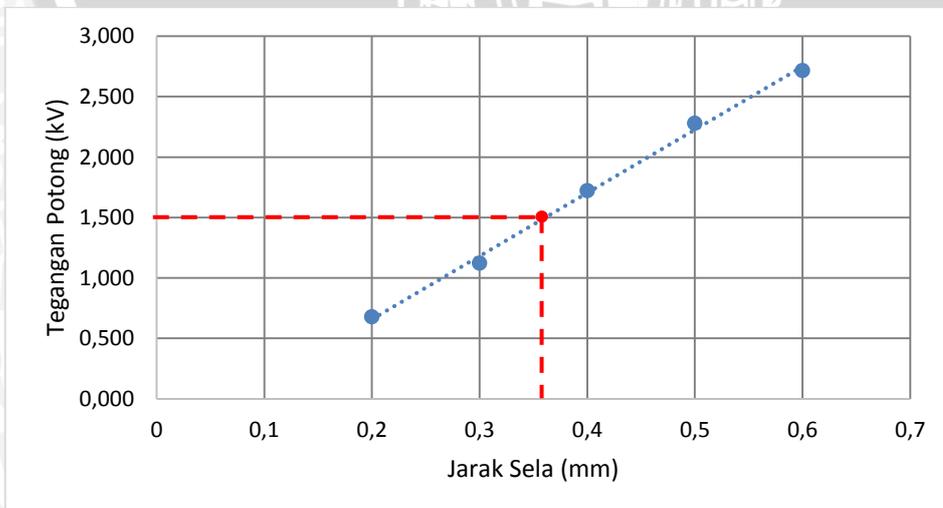
Gambar 4.4 Bentuk Geometri Arester

(a) Elektroda dalam

(b) Elektroda luar

#### 4.5.2 Jarak Sela Arester

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan didapatkan bahwa semakin besar jarak sela arester maka tegangan potong yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan semakin besar jarak sela dari suatu arester maka akan dibutuhkan energi yang lebih besar pula bagi elektron untuk bergerak. Dari Gambar 4.1 untuk jarak sela sebesar 0,2 – 0,3 mm didapatkan tegangan potong dibawah 1500 V. Sedangkan untuk jarak sela sebesar 0,4 – 0,6 mm didapatkan tegangan potong diatas 1500 V. Dari data hasil pengujian tersebut jarak sela yang menghasilkan tegangan potong sebesar 1500 V yaitu pada jarak sela antara 0,3 – 0,4 mm. Oleh karena itu jarak sela dalam rentang 0,3 – 0,4 mm akan digunakan sebagai jarak sela arester seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Jarak sela yang dipilih

#### 4.5.3 Diameter Arester

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan didapatkan bahwa semakin besar diameter arester maka tegangan potong yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan semakin besar diameter arester maka medan yang dihasilkan akan semakin homogen. Dapat dilihat pada Gambar 2.9 semakin besar diameter arester maka medan maksimum yang dihasilkan akan semakin kecil. Sedangkan semakin homogen susunan elektroda maka akan didapatkan tegangan potong akan semakin tinggi. Dari Gambar 4.2 untuk diameter sebesar 19 – 20 mm didapatkan tegangan potong dibawah 1500 V. Sedangkan untuk diameter sebesar 21 – 23 mm didapatkan tegangan potong diatas 1500 V. Dari data hasil pengujian tersebut diameter yang menghasilkan tegangan potong 1500 V yaitu diameter antara 20 – 21 mm. Oleh karena diameter yang paling mendekati adalah 21 mm maka yang akan digunakan sebagai diameter arester elektroda spiral yaitu sebesar 21 mm.

#### 4.5.4 Panjang Arester

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan didapatkan bahwa semakin panjang arester maka tegangan potong yang dihasilkan akan semakin rendah. Hal ini dikarenakan semakin panjang arester maka terjadi perbesaran dimensi elektrodanya. Sehingga menyebabkan probabilitas tembusnya menjadi meningkat atau dengan kata lain elektron membutuhkan energi yang lebih sedikit untuk bergerak. Hal ini sesuai dengan hukum perbesaran yaitu tegangan tembus pada susunan elektroda yang diperbesar secara dimensi akan lebih kecil dibandingkan tegangan tembus pada susunan elektroda satu elemen. Dari Gambar 4.3 untuk panjang arester sebesar 20 – 50 mm didapatkan tegangan potong diatas 1500 V. Sedangkan untuk panjang arester sebesar 60 mm didapatkan tegangan potong dibawah 1500 V. Dari data hasil pengujian tersebut panjang yang menghasilkan tegangan potong 1500 V yaitu panjang antara 50 – 60 mm.

Pada Gambar 4.3 didapatkan persamaan grafik untuk tingkat proteksi sebesar 1500 V, yaitu:

$$U = -0,0124L + 2,1988$$

$$1,5 = -0,0124L + 2,1988$$

$$L = \frac{1,5 - 2,1988}{-0,0124}$$

$$L = 56,3 \text{ mm}$$

Setelah didapatkan hasil pengujian pengaruh jarak sela, diameter, dan panjang arester terhadap tegangan potong kemudian dilakukan perhitungan dan pertimbangan, maka didapatkan arester elektroda spiral hasil rekayasa seperti pada Gambar 4.6.

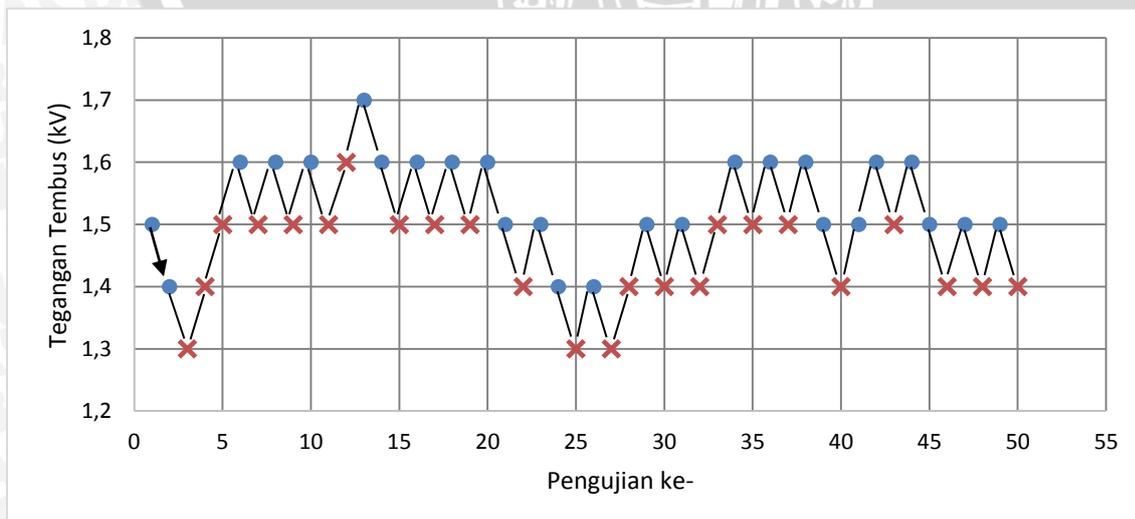


Gambar 4.6 Arester hasil rekayasa

- (a) Elektroda dalam dan luar
- (b) Elektroda setelah disatukan

#### 4.6 Pengujian Tegangan Tembus Arestor dengan Metode Naik-Turun

Pengujian ini berfungsi untuk mengukur tegangan tembus yang dihasilkan oleh arester elektroda spiral. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan di sekitar 1,5 kV pada arester. Pertama-tama diberikan tegangan 1,5 kV selanjutnya apabila terjadi tembus maka tegangan diturunkan. Sedangkan apabila tidak terjadi tembus maka tegangan dinaikkan.



Gambar 4.7 Pengujian tegangan tembus arester

Keterangan:

- : Terjadi tembus
- ✗ : Tidak terjadi tembus

Dari Gambar 4.7 dapat dibuat suatu tabel dengan  $i$  merupakan tingkat tegangan dimana “✗” terjadi,  $n_i$  merupakan jumlah “✗” yang terjadi pada tingkat  $i$ , dan dimana tidak terjadi tembus maka  $i = 0$ .

Tabel 4.7 Pengujian tegangan tembus arester

$i$	$n_i$	$i.n_i$
3	1	3
2	11	22
1	9	9
0	3	0
<b>Jumlah</b>	24	34

Dari Tabel 4.7 selanjutnya dilakukan perhitungan untuk tegangan tembus yang dihasilkan arester. Dengan  $U_{min}$  merupakan tegangan yang terjadi pada tanda “✗” terendah, dan  $U_i$  merupakan tegangan pada tingkat  $i$  (tertinggi).

$$U = U_{min} + (U_i - U_{i-1}) \times \left( \frac{\sum i.n_i}{\sum n_i} + \frac{1}{2} \right)$$

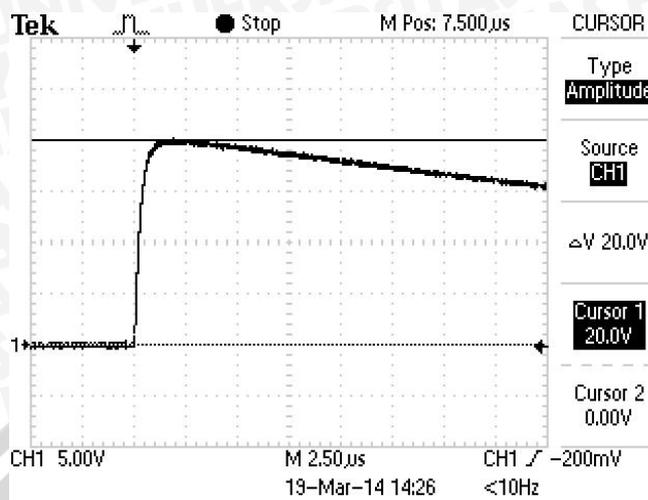
$$U = 1,3 + (1,7 - 1,6) \times \left( \frac{34}{24} + \frac{1}{2} \right)$$

$$U = 1,492 \text{ kV}$$

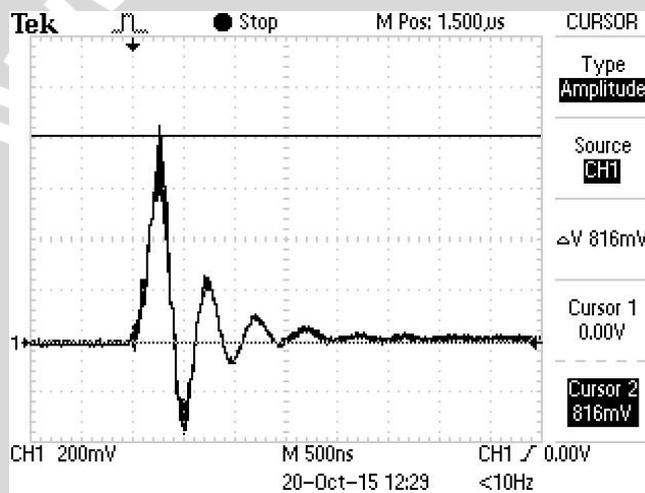
#### 4.7 Karakteristik tegangan-waktu Arestor Elektroda Spiral

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui lengkung atau kurva karakteristik dari arester elektroda spiral. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan uji yang berbeda terhadap arester. Setelah itu gelombang yang muncul pada osiloskop dicatat besarnya tegangan potong dan waktu potong dari arester. Beberapa tegangan uji yang diberikan yaitu 4 kV, 8 kV, 12 kV, 16 kV, 20 kV, 24 kV, dan 28 kV. Tegangan impuls yang diberikan pada pengujian ini merupakan tegangan impuls eksponensial ganda 1,2/50

μs. Untuk gelombang impuls sebelum terpotong seperti terlihat pada Gambar 4.8 dan gelombang pada saat terpotong arester seperti terlihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.8 Gelombang impuls sebelum terpotong



Gambar 4.9 Gelombang impuls setelah terpotong

Tabel 4.8 merupakan tabel data pengujian karakteristik tegangan-waktu arester elektroda spiral. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap tegangan uji kemudian diambil nilai rata-ratanya. Nilai  $U_i$  merupakan nilai tegangan masukan,  $U_d$  merupakan nilai tegangan potong arester,  $\bar{U}_d$  merupakan nilai rata-rata tegangan potong arester,  $t_d$  merupakan nilai waktu potong arester, dan  $\bar{t}_d$  merupakan nilai rata-rata waktu potong arester.

Tabel 4.8 Pengujian karakteristik tegangan-waktu arester elektroda spiral

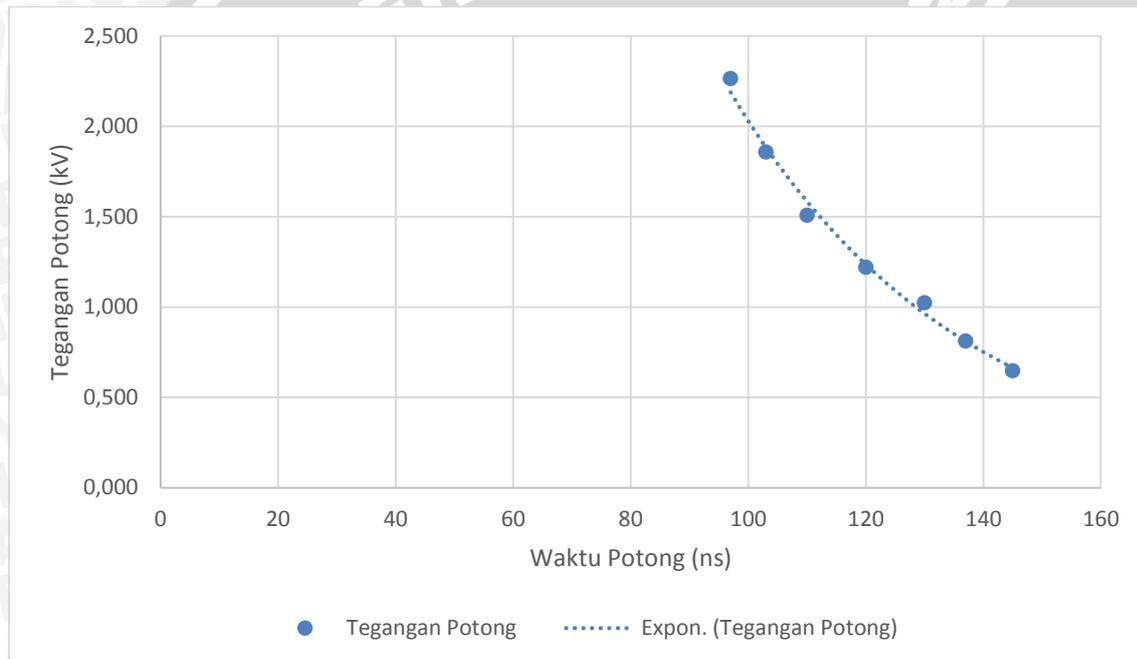
No.	$U_i$ (kV)	$U_d$ (kV)	$\bar{U}_d$ (kV)	$t_d$ (ns)	$\bar{t}_d$ (ns)
1.	4,06	0,607	0,648	140	145
		0,632		150	
		0,698		140	
2.	8,08	0,848	0,812	142	137
		0,767		134	
		0,818		136	
3.	12,07	1,038	1,024	130	130
		1,045		125	
		0,987		135	
4.	16,11	1,264	1,220	120	120
		1,184		120	
		1,213		120	
5.	20,17	1,491	1,508	112	113
		1,505		117	
		1,527		110	
6.	24,04	1,937	1,859	100	103
		1,754		103	
		1,882		112	
7.	28,06	2,265	2,264	98	98
		2,156		100	
		2,375		96	

Tabel 4.8 dapat dilihat bahwa pada saat pengujian karakteristik tegangan-waktu diberikan tegangan uji sebesar 4,06 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 0,648 kV dan waktu potongnya 145 ns. Saat pengujian dengan tegangan uji sebesar 8,08 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 0,812 kV dan waktu potongnya 137 ns. Selanjutnya pengujian dengan tegangan uji sebesar 12,07 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,024 kV dan waktu potongnya 130 ns. Pada pengujian dengan tegangan uji sebesar 16,11 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,220 kV dan waktu potongnya 120 ns. Pada pengujian dengan tegangan uji sebesar 20,17 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,508 kV dan waktu potongnya 113 ns. Pada

pengujian dengan tegangan uji sebesar 24,04 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,859 kV dan waktu potongnya 103 ns. Pada pengujian dengan tegangan uji sebesar 28,06 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,264 kV dan waktu potongnya 98 ns.

Dari data pada Tabel 4.8 dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambahnya tegangan uji yang diberikan maka tegangan potong yang dihasilkan akan semakin tinggi. Sedangkan untuk waktu potong akan semakin kecil seiring dengan bertambahnya tegangan uji.

Dengan menggunakan data pada Tabel 4.8, maka dapat di buat grafik karakteristik tegangan-waktu arester elektroda spiral yang diberikan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Karakteristik tegangan-waktu arester elektroda spiral

Gambar 4.10 merupakan grafik karakteristik tegangan-waktu arester elektroda spiral, dari gambar dapat dilihat bahwa nilai tegangan potong akan semakin rendah seiring dengan bertambahnya waktu potong yang dihasilkan.

Fungsi dari grafik adalah :

$$U = 24,372e^{-0,025t}$$

$$R^2 = 0,9932$$

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Dalam penelitian ini dapat disimpulkan bahwa,

1. Penentuan dimensi dalam rekayasa pemotong tegangan lebih impuls susunan elektroda tabung dan spiral pada tingkat proteksi 1500V pertama dilakukan dengan pengujian variabel jarak sela terlebih dahulu karena memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap tegangan potong. Kemudian dilakukan pengujian dengan variabel diameter dan panjang arester agar mendapatkan tegangan potong yang lebih mendekati 1500V. Dari hasil pengujian didapatkan dimensi jarak sela 0,4 mm, diameter 21 mm, dan panjang 56,3 mm.
2. Karakteristik pemotong tegangan lebih impuls susunan elektroda tabung dan spiral pada tegangan masukan sebesar 20 kV didapatkan tegangan potong 1,5 kV dan waktu potong sebesar 113 ns. Didapatkan kurva karakteristik tegangan-waktu arester dengan semakin cepat waktu potong maka tegangan potongnya semakin besar.

### 5.2 Saran

Berdasarkan pada hasil penelitian yang telah dilakukan, saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah melakukan pengujian lebih lanjut dengan dimensi arester yang lebih kecil.





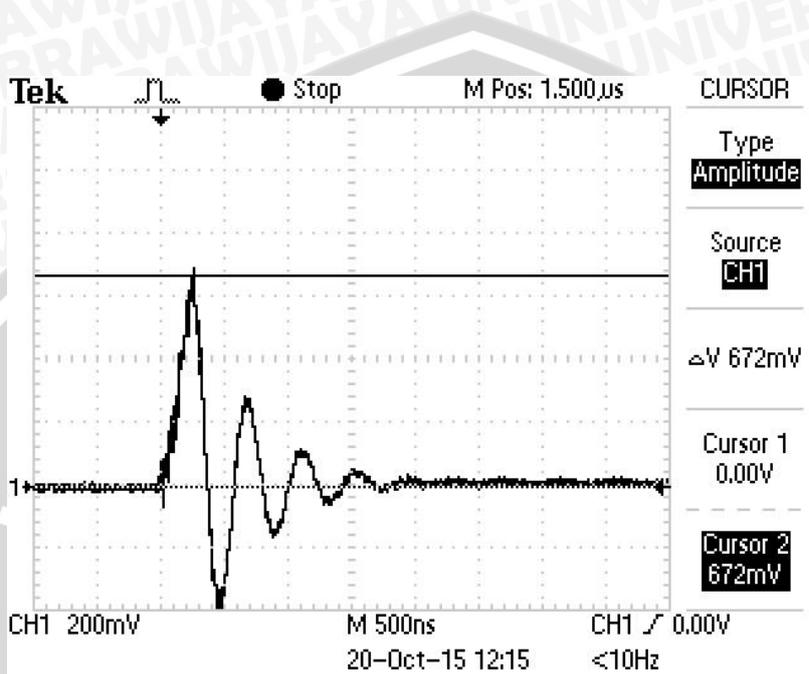
## DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, A., Prof. Dr. 1983. *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Arismunandar, A., Prof. Dr. 1984. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Daud, O. B. 2011. *Pemanfaatan Elektroda Koaksial Sebagai Peralatan Proteksi Tegangan Lebih pada Peralatan Listrik Tegangan Rendah*. Tesis. Malang: Jurusan Teknik Elektro FTUB.
- Hauschild, W, Mosch, W. 1992. *Statistical Techniques for High Voltage Engineering*. London : Peter Peregrinus Ltd.
- Hasse, P. 1992. *Over Voltage Protection of Low Voltage System*. London: Peter Peregrinus Ltd.
- Kind, D. 1993. *Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Terjemahan K.T. Sirait. Bandung: Penerbit ITB.
- Kuffel, E., Zeagl, W. S. 1988. *High Voltage Engineering*. London: Pergamon Press.
- Mansuri. 2002. *Perencanaan dan Pembuatan Prototipe Arrester Jenis Kancing untuk Proteksi Tegangan Rendah*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Naidu, M. S., Kamaraju, V. 1982. *High Voltage Engineering*. New Delhi: Tata Mc. Graw-Hill Publishing Co. Ltd.
- Satriyadi, H. 2010. *Analisis Kinerja Arrester Tegangan Tinggi 150 kV Menggunakan Power System Computer Aided Design*. Skripsi tidak dipublikasikan. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Schwaiger A. 1925. *Electrische Festigkeitslehre*. Berlin: Springer-Verlag.
- Tobing L, Bonggas. 2012. *Dasar - Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Jakarta: Penerbit Erlangga.

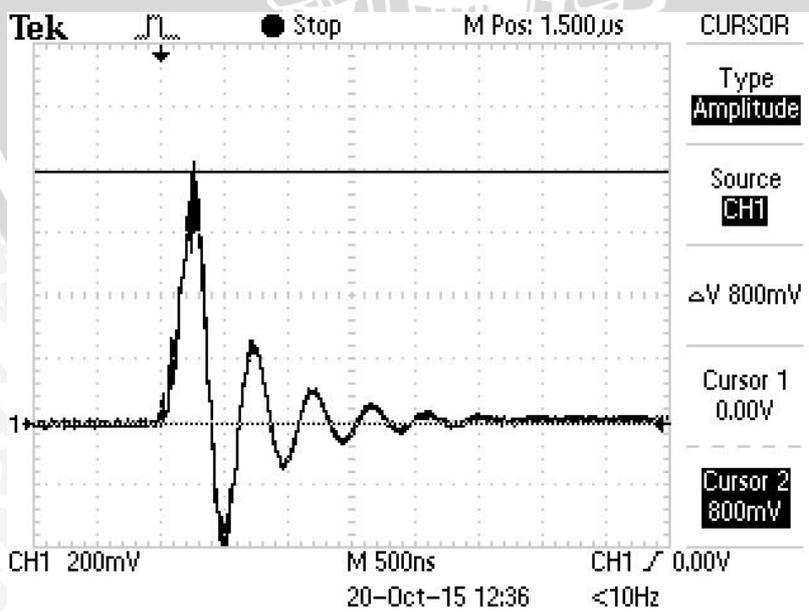


LAMPIRAN

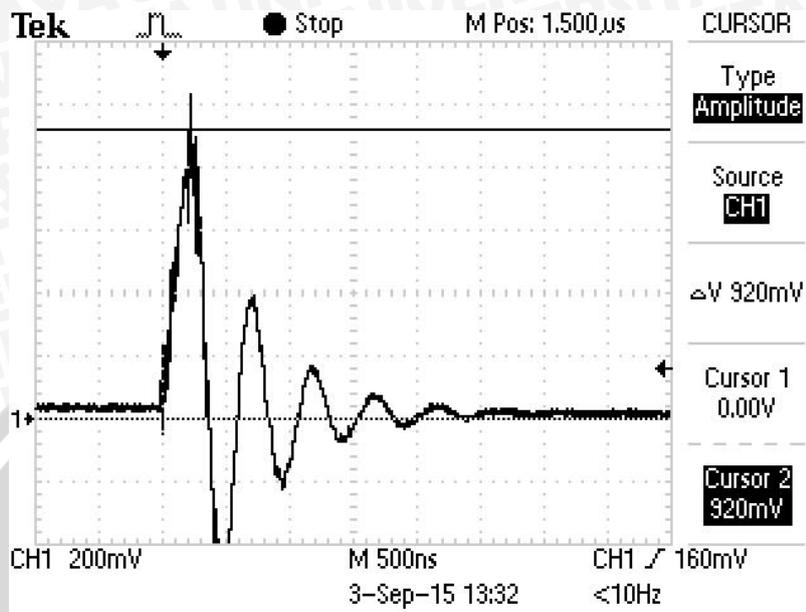
Lampiran 1 Gelombang Impuls Pengujian Pengaruh Jarak Sela Terhadap Tegangan Potong



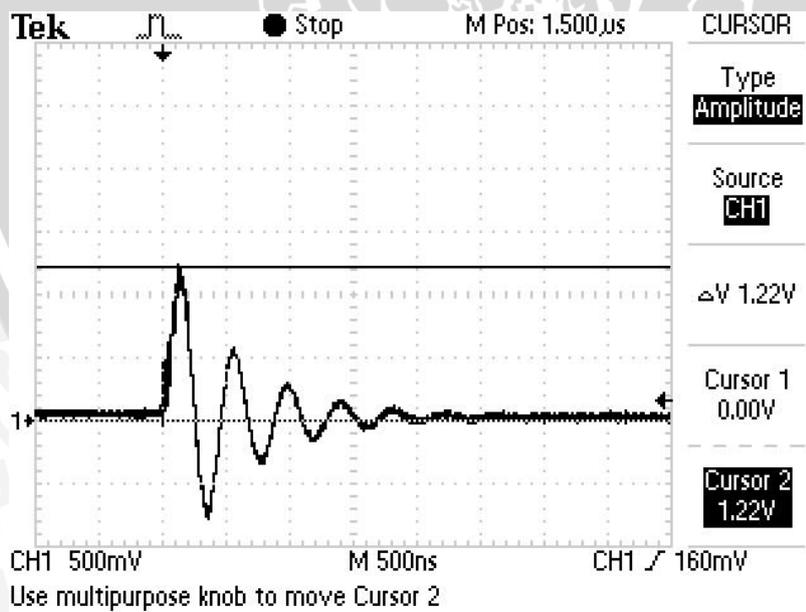
Gambar 1. Gelombang impuls dengan jarak sela 0,2 mm



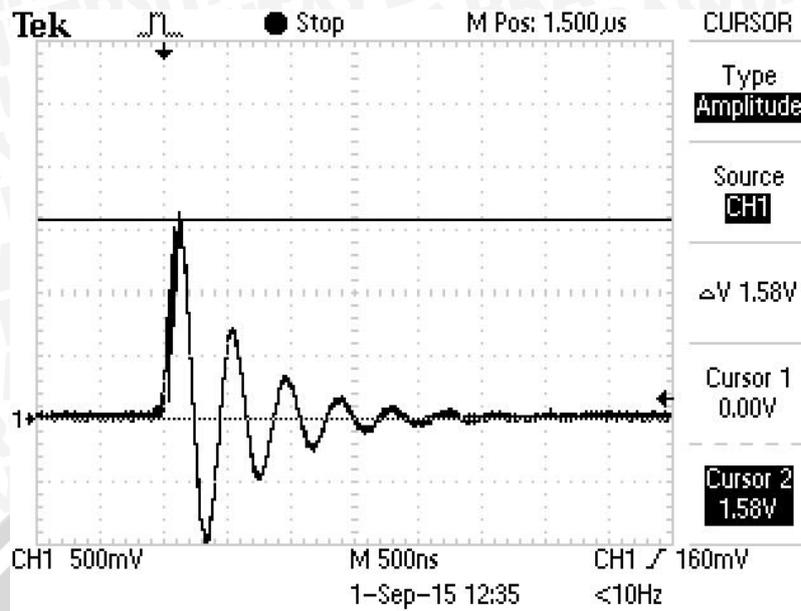
Gambar 2. Gelombang impuls dengan jarak sela 0,3 mm



Gambar 3. Gelombang impuls dengan jarak sela 0,4 mm

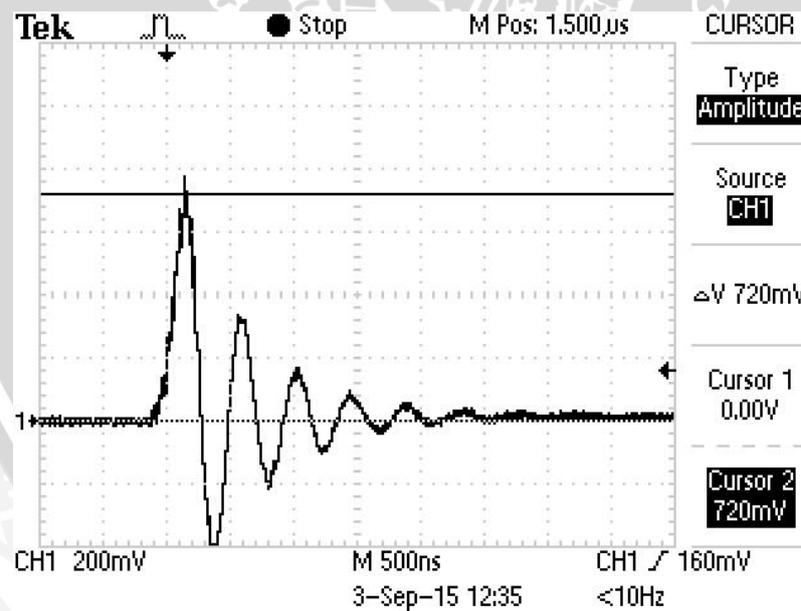


Gambar 4. Gelombang impuls dengan jarak sela 0,5 mm

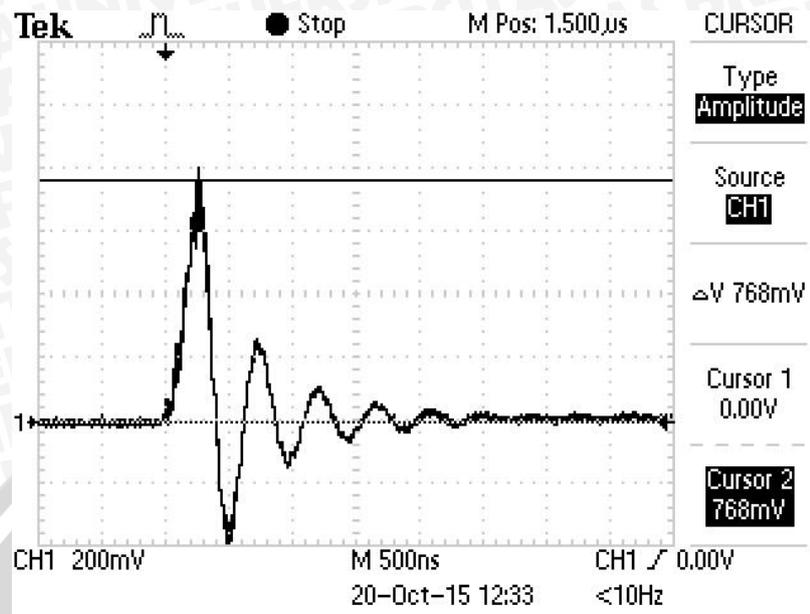


Gambar 5. Gelombang impuls dengan jarak sela 0,6 mm

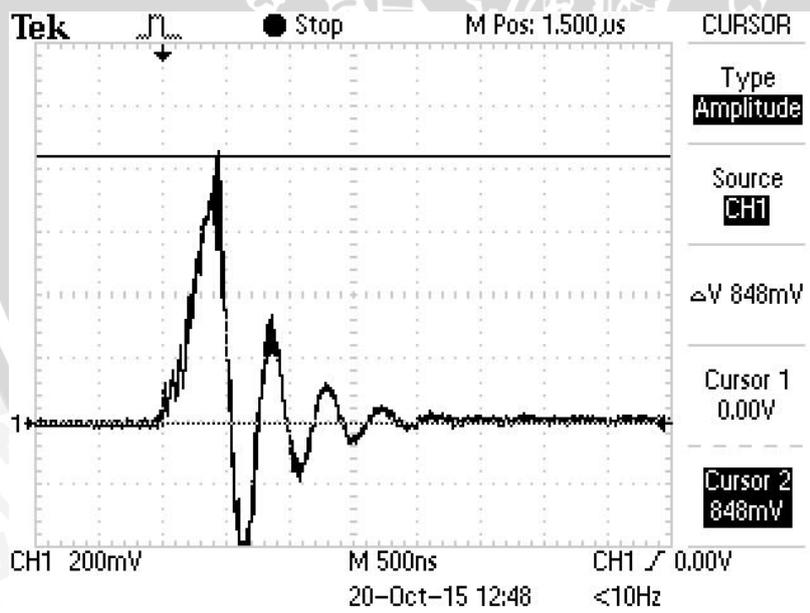
Lampiran 2 Gelombang Impuls Pengujian Pengaruh Diameter Terhadap Tegangan Potong



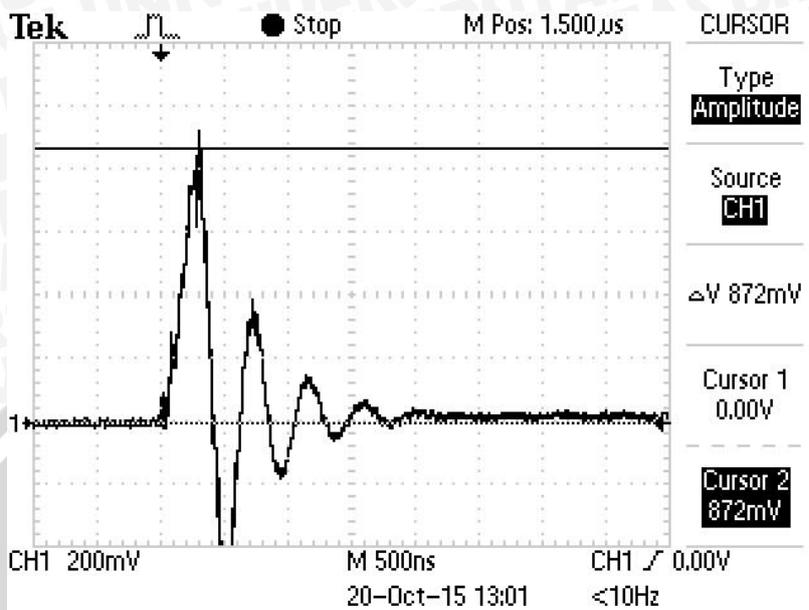
Gambar 6. Gelombang impuls dengan diameter 19 mm



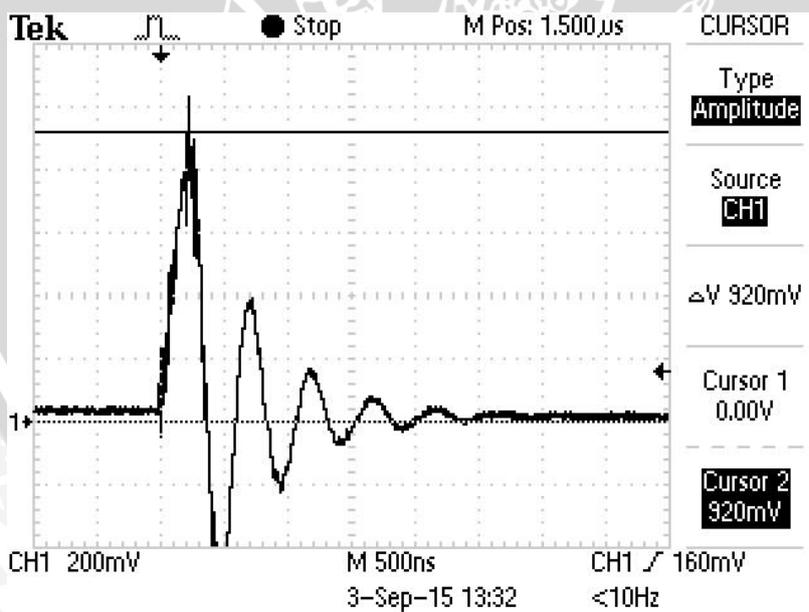
Gambar 7. Gelombang impuls dengan diameter 20 mm



Gambar 8. Gelombang impuls dengan diameter 21 mm

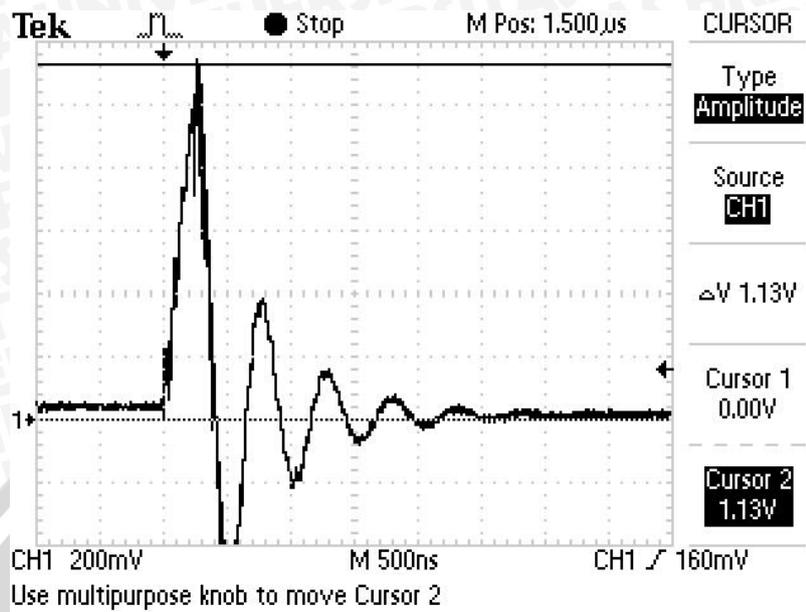


Gambar 9. Gelombang impuls dengan diameter 22 mm

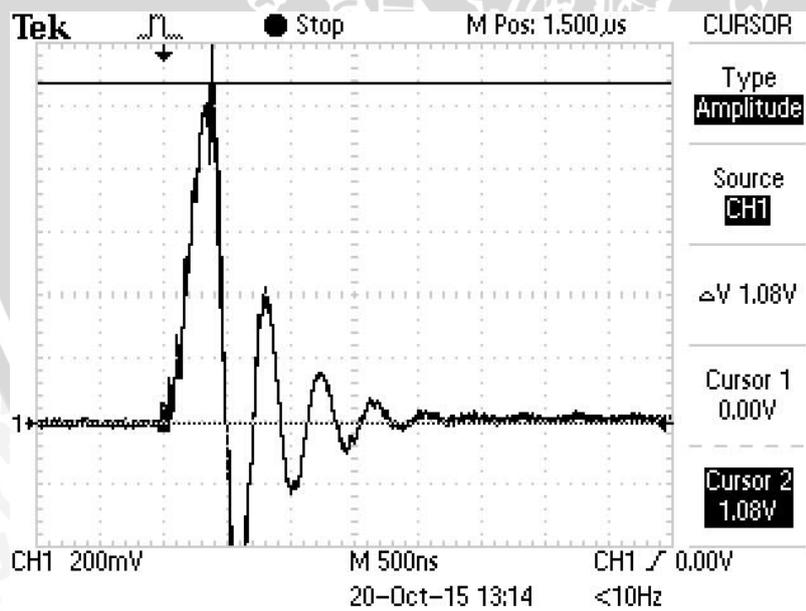


Gambar 10. Gelombang impuls dengan diameter 23 mm

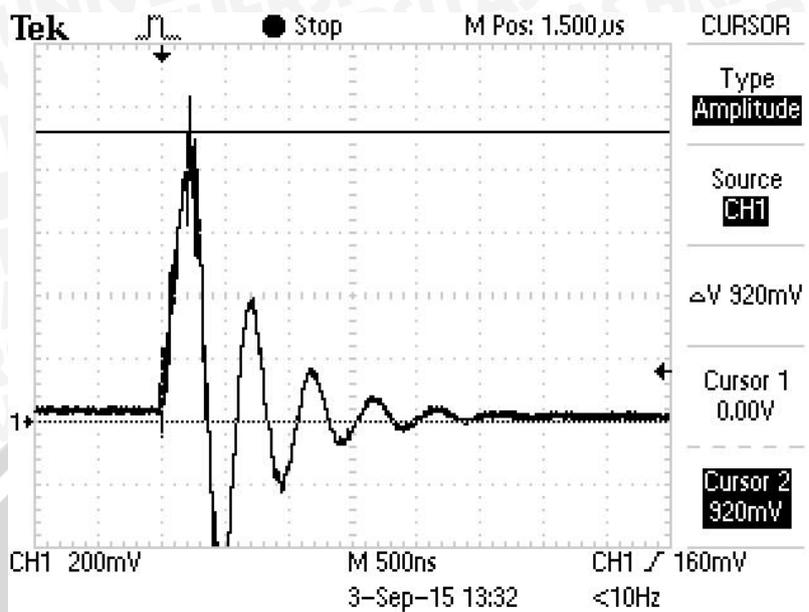
## Lampiran 3 Gelombang Impuls Pengujian Pengaruh Panjang Terhadap Tegangan Potong



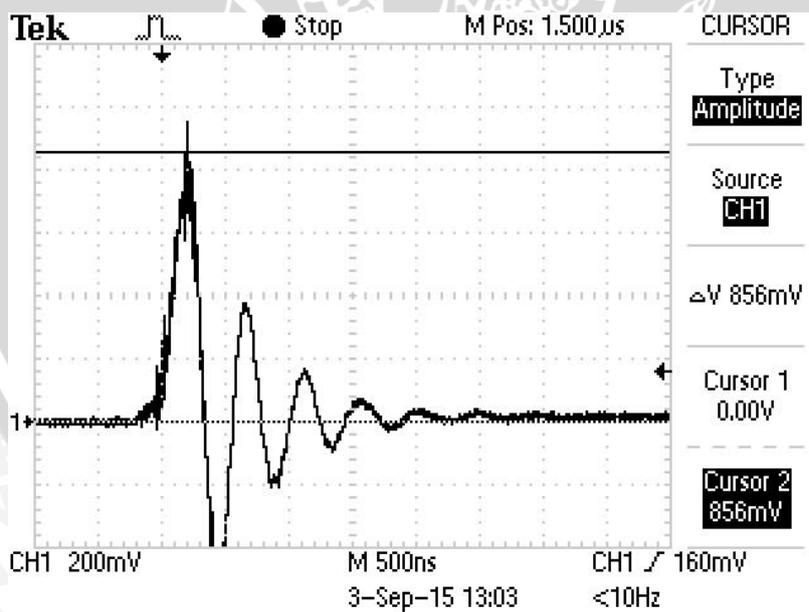
Gambar 11. Gelombang impuls dengan panjang 20 mm



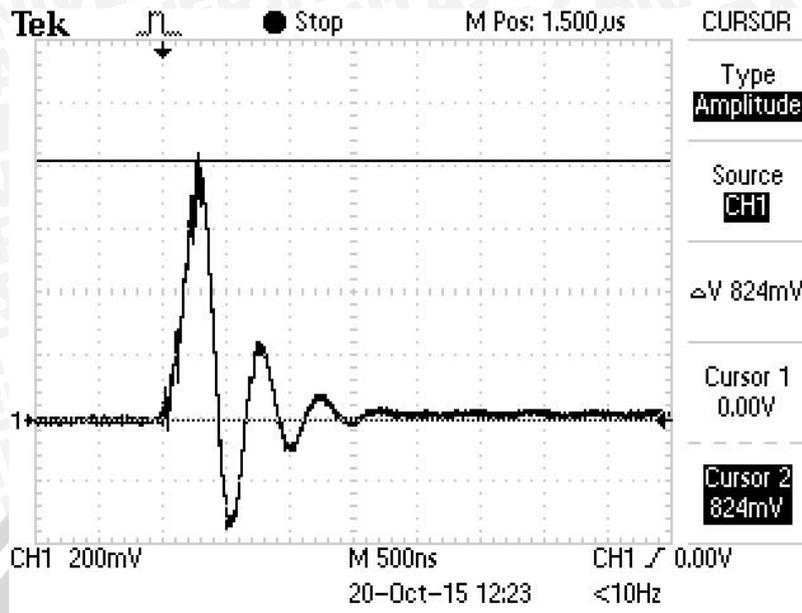
Gambar 12. Gelombang impuls dengan panjang 30 mm



Gambar 13. Gelombang impuls dengan panjang 40 mm



Gambar 14. Gelombang impuls dengan panjang 50 mm



Gambar 15. Gelombang impuls dengan panjang 60 mm

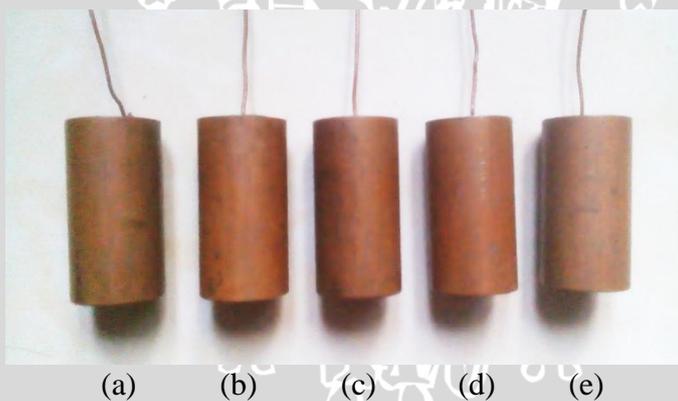
Lampiran 4 Foto Pengujian



Gambar 16. Alat ukur tegangan tinggi impuls pada control desk

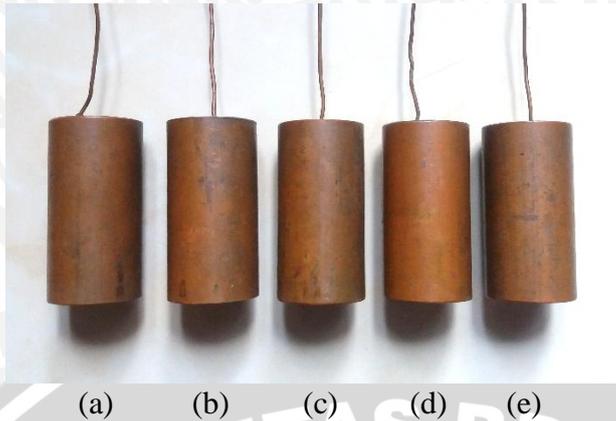


Gambar 17. Rangkaian penelitian tegangan tinggi impuls



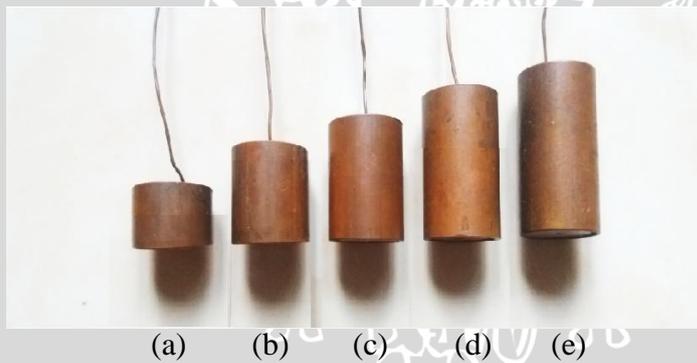
Gambar 18. Arester yang diuji dengan variasi jarak sela

- (a) Panjang 50 mm, diameter 23 mm, dan jarak sela 0,2 mm
- (b) Panjang 50 mm, diameter 23 mm, dan jarak sela 0,3 mm
- (c) Panjang 50 mm, diameter 23 mm, dan jarak sela 0,4 mm
- (d) Panjang 50 mm, diameter 23 mm, dan jarak sela 0,5 mm
- (e) Panjang 50 mm, diameter 23 mm, dan jarak sela 0,6 mm



Gambar 19. Arester yang diuji dengan variasi diameter

- (a) Panjang 50 mm, jarak sela 0,4 mm, dan diameter 19 mm
- (b) Panjang 50 mm, jarak sela 0,4 mm, dan diameter 20 mm
- (c) Panjang 50 mm, jarak sela 0,4 mm, dan diameter 21 mm
- (d) Panjang 50 mm, jarak sela 0,4 mm, dan diameter 22 mm
- (e) Panjang 50 mm, jarak sela 0,4 mm, dan diameter 23 mm



Gambar 20. Arester yang diuji dengan variasi panjang

- (a) Jarak sela 0,4 mm, diameter 21 mm, dan panjang 20 mm
- (b) Jarak sela 0,4 mm, diameter 21 mm, dan panjang 30 mm
- (c) Jarak sela 0,4 mm, diameter 21 mm, dan panjang 40 mm
- (d) Jarak sela 0,4 mm, diameter 21 mm, dan panjang 50 mm
- (e) Jarak sela 0,4 mm, diameter 21 mm, dan panjang 60 mm