RANCANG BANGUN PERALATAN PROTEKSI LAMPU PENERANGAN JALAN UMUM SATU FASA TERHADAP BAHAYA SURJA PETIR MENGGUNAKAN PCB (*PRINTED CIRCUIT BOARD*)

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Disusun oleh:

AYU PUSPITASARI
NIM. 0910633003-63

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2014

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LEMBAR PERSETUJUAN

RANCANG BANGUN PERALATAN PROTEKSI LAMPU PENERANGAN JALAN UMUM 1 FASA TERHADAP BAHAYA SURJA PETIR MENGGUNAKAN PCB
(*PRINTED CIRCUIT BOARD*)

SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Disusun oleh:
AYU PUSPITASARI
NIM. 0910633003-63

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT.	**Dr. Ir. Harry Soekotjo D., M.Sc**
NIP. 19600701 199002 1 001	**NIP.19490309 198602 1 001**

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. atas nikmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi dengan judul "**Rancang Bangun Peralatan Proteksi Lampu Penerangan Jalan Umum 1 Fasa Terhadap Bahaya Surja Petir menggunakan PCB (*Printed Circuit Board*)**" dapat diselesaikan. Hanya kepada-Nya kita menyembah dan memohon. Serta sholawat terhadap junjungan Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat serta seluruh umat-Nya. Skripsi ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi Teknik Energi Elektrik Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Tidak banyak yang bisa disampaikan kecuali ungkapan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan bimbingan, arahan dan dukungan sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan. Untuk itu disampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak M.Azis Muslim, ST., MT., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
2. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
3. Bapak Mochammad Rif'an, ST., MT. selaku Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
4. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, ST., M.Sc selaku KKDK Teknik Energi Elektrik serta dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
5. Bapak Drs. Ir. Moch.Dhofir, MT. dan Bapak Dr. Ir. Harry Soekotjo Dahlan, M.Sc. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun
6. Ayah dan Mama, Amin Jauhari dan Retno Lestari, yang memberikan semangat dan selalu memanjatkan doa yang tidak pernah terputus. Skripsi ini buat Ayah dan Mama
7. Adik-adik tercinta, M.Ichwan Causa Prasetya, M.Ilham Fadilla Akbar, dan Adiiba Putri Hanifah terima kasih selalu ada untuk memberikan dukungan dan selalu menghibur saya

8. Melati Putri C., Desinta Ayu W.H., dan Arfinna Cahyani yang telah banyak membantu dalam pengerjaan skripsi ini
9. Teman-teman Angkatan 2009, rekan-rekan Konsentrasi Teknik Energi Elektrik, rekan-rekan Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang dan Departemen Eksternal Periode 2010-2013 Himpunan Mahasiswa Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
10. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik yang tidak dapat disebutkan satu persatu secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini

Disadari bahwa skripsi ini belum sempurna, oleh karena itu saran dan kritik mengenai penelitian ini diharapkan agar penelitian ini dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan berguna.

Malang, Januari 2014

Ayu Puspitasari

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....i
DAFTAR ISI.....iii
DAFTAR GAMBAR.....vi
DAFTAR TABEL.....viii
DAFTAR LAMPIRAN.....ix
ABSTRAK.....x
BAB I PENDAHULUAN.....1
1.1 Latar Belakang.....1
1.2 Rumusan Masalah.....2
1.3 Batasan Masalah.....3
1.4 Ruang Lingkup.....3
1.5 Tujuan.....3
1.6 Sistematika Pembahasan.....3
BAB II DASAR TEORI.....5
2.1 Proteksi.....5
2.2 Petir.....5
2.2.1 Parameter Petir.....5
2.2.2 Surja Petir.....6
2.3 Tegangan Lebih.....6
2.3.1 Jenis Sambaran Petir.....7
2.4 Bahaya Surja Terhadap Komponen Sensitif.....7
2.5 Tegangan Ketahanan Impuls dan Karakteristik.....8
2.5.1 Arester Sela Udara.....9
2.5.2 Arester PCB (*Printed Circuit Board*).....10
2.5.3 Karakteristik Tegangan Potong Arester.....11
2.5.4 Pemotongan Tegangan Lebih.....12
2.5.5 Karakteristik volt-waktu (v-t curve).....12
2.5.6 Basic Insulation Level (BIL) dan Koordinasi Isolasi.....13
2.6 Tegangan Tinggi Impuls.....13
2.6.1 Gelombang Tegangan Tinggi Impuls Petir Standar.....14
2.6.2 Pembangkitan Tegangan Tinggi Impuls.....14
2.7 Susunan Elektroda.....15

2.8 Pengaruh Bentuk Geometri Terhadap Tegangan Tembus.....16
2.9 Hukum Perbesaran (Enlargementr Law).....17
2.10 Karakteristik Tembus pada Medan Seragam.....19
2.11 Karakteristik Tembus pada Medan Tak Seragam.....20
2.12 Penentuan Nilai Probabilitas dan Distribusi Normal (Gauss).....20
BAB III METODE PENELITIAN.....23
3.1 Studi Literatur.....23
3.2 Variabel Perencanaan.....23
3.3 Realisasi PCB (*Printed Circuit Board*).....24
3.4 Rangkaian Pengujian.....25
3.5 Komponen – komponen Peralatan Pengujian.....25
3.6 Pengujian Arester PCB (*Printed Circuit Board*).....26
3.6.1 Peralatan.....27
3.6.2 Prosedur Pengujian.....27
3.7 Analisis Data.....28
3.8 Penarikan Kesimpulan.....28
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....29
4.1 Tinjauan Umum.....29
4.2 Spesifikasi Arester PCB (*Printed Circuit Board*).....29
4.3 Karakteristik Pengaruh Perbesaran Jarak Sela Terhadap Tegangan Tembus.....29
4.4 Perkiraan Tegangan Tembus pada Elektroda Sela Udara.....31
4.5 Penentuan Karakteristik v-t Hasil Pengujian.....31
4.6 Analisis Distribusi Medan Listrik pada Elektroda Sela Udara.....32
4.6.1 Perhitungan Faktor Efisiensi Medan dengan Variasi Diameter.....34
4.7 Pengaruh Jarak Sela terhadap Tegangan Potong.....35
4.7.1 Penentuan Jarak Sela.....35
4.8 Karakteristik v-t Arester.....36
4.8.1 Pengujian Arester pada Fasa – Ground dan Netral Ground.36
4.9 Penentuan Dimensi Arester PCB (*Printed Circuit Board*).....38
4.9.1 Karakteristik Pengaruh Perbesaran Dimensi Terhadap Tegangan Tembus.....38

4.10 Pengujian Arester PCB (*Printed Circuit Board*) terhadap Tegangan AC (*Alternating Current*).....41
4.11 Probabilitas Tembus pada Pengujian Tegangan Tinggi Impuls 42
BAB V PENUTUP 47
5.1 Kesimpulan.....47
5.2 Saran.....47
DAFTAR PUSTAKA.....48
LAMPIRAN.....49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kategori tegangan ketahanan surja dan tingkat pemotongan tegangan oleh arester....8
Gambar 2.2 Bentuk elektroda GDT menurut Citel 10
Gambar 2.3 Arester PCB (*Printed Circuit Board*)....11
Gambar 2.4 Karakteristik volt-waktu....12
Gambar 2.5 Karakteristik tegangan impuls-waktu....13
Gambar 2.6 Parameter tegangan impuls surja petir....14
Gambar 2.7 Diagram rangkaian dasar pembangkit tegangan tinggi impuls....15
Gambar 2.8 Susunan elektroda dan distribusi intensitas medan listrik....16
Gambar 2.9 Representasi perbesaran dimensi elektroda....18
Gambar 2.10 Distribusi medan listrik pada FEMM 4.2....20
Gambar 2.11 Probabilitas distribusi Gauss....21
Gambar 3.1 PCB yang dirancang....23
Gambar 3.2 Diagram alir realisasi arester....24
Gambar 3.3 Rangkaian pengujian pembangkitan tegangan impuls 1,2/50 µs....25
Gambar 3.4 Sistem pengujian arester....26
Gambar 3.5 Pengujian arester....27
Gambar 3.6 Diagram alir penelitian....28
Gambar 4.1 Arester perubahan jarak sela,dimensi elektroda tetap 29
Gambar 4.2 Grafik hubungan tegangan potong terhadap perubahan jarak sela....30
Gambar 4.3 Gelombang impuls 1,2/50µs yang terpotong pada bagian muka gelombang oleh sela elektroda d = 10mm dan s = 0,1mm....32
Gambar 4.4 Perencanaan simulasi arester....32
Gambar 4.5 Perencanaan simulasi equipotensial elektroda sela udara 33
Gambar 4.6 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya *(Magnitude of Field Intensity, \|E\|)* 33
Gambar 4.7 Grafik hubungan tegangan potong terhadap jarak sela....35
Gambar 4.8 Karakteristik v-t arester dengan panjang sela 10 mm jarak sela 0,3mm 37
Gambar 4.9 Karakteristik v-t arester dengan panjang sela 15 mm jarak sela 0,3mm 38
Gambar 4.10 Arester perubahan dimensi elektroda, jarak sela tetap 39

Gambar 4.11 Grafik hubungan tegangan potong terhadap perbesaran dimensi elektroda 40
Gambar 4.12 Karakteristik v-t arester dengan panjang sela 20 mm jarak sela 0,3 mm 41
Gambar 4.13 Karakteristik v-t arester dengan panjang sela 10 mm, 15 mm, dan 20 mm.....41
Gambar 4.14 Grafik probabilitas tembus dengan panjang sela 15 mm.....44
Gambar 4.15 Grafik probabilitas tembus dengan panjang sela 10 mm.....45
Gambar 4.16 Grafik probabilitas tembus dengan panjang sela 20 mm.....45

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data hasil pengujian perubahan jarak sela pada p=964 mbar dan t=25 ºC 30
Tabel 4.2 Data hasil pengujian panjang sela dan perubahan jarak sela pada p=964 mbar dan t=25ºC.....31
Tabel 4.3 Perhitungan faktor efisiensi medan dengan perubahan panjang sela 34
Tabel 4.4 Data hasil pengujian karakteristik v-t arester pada panjang sela 10 mm dan jarak sela 0,3 mm.....36
Tabel 4.5 Data hasil pengujian karakteristik v-t arester pada panjang sela 15 mm dan jarak sela 0,3mm.....37
Tabel 4.6 Data hasil pengujian perbesaran dimensi pada p=964 mbar dan t=25ºC 39
Tabel 4.7 Data hasil pengujian karakteristik v-t arester pada panjang sela 20mm dan jarak sela 0,3mm.....40
Tabel 4.8 Hasil pengujian probabilitas dengan panjang sela 15mm 42
Tabel 4.9 Hasil perhitungan probabilitas 43

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Gambar gelombang impuls terpotong 49
Lampiran 2 Grafik kuat medan listrik 52
Lampiran 3 Foto arester PCB (*Printed Circuit Board*).....53
Lampiran 4 Tabel Pengujian Probabilitas Tembus 56

repository.ub.ac.id

RINGKASAN

Ayu Puspitasari. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2014. **Rancang Bangun Peralatan Proteksi Lampu Penerangan Jalan Umum Satu Fasa Terhadap Bahaya Surja Petir Menggunakan PCB (*Printed Circuit Board*)**. Dosen pembimbing: Moch. Dhofir, Drs., Ir., MT., Harry Soekotjo Dahlan, Dr., Ir., M.Sc.

Penelitian ini menguraikan tentang rancang bangun peralatan proteksi lampu penerangan jalan umum satu fasa terhadap bahaya surja petir menggunakan PCB (*Printed Circuit Board*). Arester ini dapat digunakan pada kategori I yang memiliki ketahanan terhadap tegangan impuls sebesar 1,5 kV. Pada peralatan listrik tegangan rendah dapat diamankan dengan menggunakan arester berupa susunan elektroda sela udara yang sederhana dan mudah dalam rekayasanya. Adapun macam-macam arester yang sudah pernah dibuat untuk proteksi pada tegangan rendah berupa arester koaksial, arester katup, arester kancing, dan arester GDT. Dalam penelitian ini dilakukan suatu eksperimen dimana akan dibuat rekayasa arester sela udara yang terbuat dari PCB (*Printed Circuit Board*) yang nantinya akan digunakan sebagai dasar pertimbangan dalam perancangan arester karena mudah dalam rekayasa dan murah. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah perencanaan arester, pengujian dan analisis. Perencanaan arester meliputi bentuk geometri elektroda, perubahan jarak sela dan perbesaran dimensi elektroda (panjang sela) . Elektroda sela udara yang dirancang menggunakan pendekatan perkiraan tegangan tembus kemudian pengaruh distribusi medan listrik arester hasil perancangan disimulasikan dengan menggunakan FEMM 4.2. Maka akan didapatkan jarak sela yang dapat memotong pada tegangan 1,5 kV yang nantinya akan digunakan dalam perancangan dan pengujian, kemudian dilakukan analisis probabilitas tembus arester, analisis v-t *Curve* arester dan pengujian ketahanan arester terhadap tegangan AC. Dari hasil pengujian, didapatkan bahwa perbesaran jarak sela dan panjang sela dapat memotong tegangan impuls sebesar 1,5 kV sesaat sebelum puncak impuls dengan jarak sela yaitu 0,3 mm dan panjang sela 20 mm. Semakin tinggi tegangan impuls yang terpotong, maka akan semakin cepat pula waktu potongnya dan didapatkan kepastian tembus lebih dari 95% yaitu sebesar 1,5 kV.

Kata Kunci : *Tegangan impuls, Arester PCB, Probabilitas tembus, v-t Curve*

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di masa sekarang ini kebutuhan energi listrik semakin meningkat. Pemakaian peralatan elektronik di bidang perdagangan, industri bahkan rumah tangga terus meningkat. Peralatan ini mempunyai sensitivitas tinggi terhadap tegangan lebih karena dapat menyebabkan terjadinya kerusakan pada peralatan listrik tersebut. Maka dari itu, perkembangan yang pesat ini harus diikuti dengan perbaikan mutu energi listrik yang dihasilkan, yaitu harus memiliki kualitas dan keandalan yang tinggi.

Sebagai negara yang terletak di daerah khatulistiwa, Indonesia memiliki tingkat curah hujan dan jumlah hari guruh (*thunderstorm days*) yang tinggi yaitu pada tahun 2013 menurut Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG) bahwa di Indonesia terjadi hari guruh sebesar 90 – 200 hari dengan kerapatan petir sebesar 12 sambaran/km^2. Dari kasus ini menunjukkan bahwa ancaman kerusakan akibat tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir menjadi lebih besar.

Pengujian di Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang yang dilakukan oleh PT. Rumpun Wahana Karya yang menguji peralatan elektronik lampu penerangan jalan umum dimana kerusakan peralatan elektronik tersebut disebabkan oleh sambaran petir. Petir dapat menimbulkan surja yang dapat membahayakan peralatan listrik. Dikarenakan lampu penerangan jalan umum berada dalam zona elektromagnetik nol dimana bahaya medan elektromagnetik paling tinggi. Surja ini bisa masuk ke lampu melalui mekanisme kopling, yaitu kopling konduktif, kopling induktif, dan kopling kapasitif. Keberadaan alat pelindung terhadap tegangan lebih surja petir pada penerangan jalan umum menjadi sangat penting. Tegangan lebih pada peralatan listrik tegangan rendah dapat diamankan dengan menggunakan arester. Arester tegangan rendah untuk catu daya 220 V dapat berupa susunan elektroda sela udara yang sederhana dan mudah dalam pembuatannya.

Menurut standar DIN VDE 0110/IEC Publ.664, peralatan listrik tegangan dibagi kedalam empat kategori berdasarkan tingkat (level) ketahanan terhadap tegangan impuls. Peralatan kategori IV memiliki ketahanan impuls hingga 6 kV, kategori III memiliki katahan impuls hingga 4 kV, kategori II memiliki ketahanan

impuls hingga 2,5 kV, dan kategori I memiliki ketahanan impuls hingga 1,5 kV. Oleh karena itu peralatan proteksi yang digunakan harus mampu memotong setiap tegangan lebih hingga kurang dari tegangan ketahanan pada masing-masing kategori tersebut.

Adapun bentuk arester yang sudah pernah dirancang sebelumnya yaitu arester tabung pelindung, arester koaksial, arester katup dan sebagainya. Pada bahasan ini, akan mencoba untuk menginovasi suatu arester dengan menggunakan PCB (*Printed Circuit Board*). Arester ini menggunakan PCB karena memiliki bentuk yang sederhana, mudah didapatkan, harga yang terjangkau dan dalam segi pembuatan tidak terlalu lama dan mudah. Selain itu juga, tembaga yang terdapat pada PCB tersebut memiliki konduktivitas yang cukup baik.

Oleh karena itu, skripsi ini akan membahas masalah rancang bangun peralatan proteksi menggunakan PCB. Arester ini akan di desain dengan tingkat (level) proteksi 1,5 kV agar dapat memproteksi tegangan impulsnya. Dari karakteristik tersebut dapat terlihat arester layak atau tidak untuk menjadi alat proteksi terhadap tegangan lebih.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, dapat disusun rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana rancang bangun arester PCB dengan level proteksi 1,5 kV
2. Berapa jarak sela dan panjang sela arester PCB yang menghasilkan level proteksi 1,5 kV
3. Bagaimana karakteristik v-t arester PCB hasil dari perancangan yang menghasilkan level proteksi 1,5 kV
4. Bagaimana probabilitas tembus arester PCB hasil perancangan dengan level proteksi 1,5 kV

1.3 Batasan Masalah

Dengan mengacu pada permasalahan yang telah dirumuskan, maka hal-hal yang berkaitan akan diberi batasan sebagai berikut:

1. PCB yang digunakan adalah PCB single layer
2. Arester digunakan pada sistem catu daya peralatan listrik tegangan

rendah 220 V/50 Hz

3. Tegangan pengujian menggunakan tegangan impuls 1,2/50 µs
4. Tingkat tegangan proteksi arester PCB adalah 1,5 kV, sesuai standar DIN VDE 0110/IEC Publ.664
5. Pengujian dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pembahasan skripsi ini adalah :

1. Menggambarkan medan listrik dari susunan elektroda
2. Menentukan distribusi medan listrik dan efisiensi medan dari susunan elektroda
3. Melakukan pengujian untuk mendapatkan karakteristik proteksi untuk membatasi tegangan hingga level 1,5 kV

1.5 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, merealisasikan dan menguji suatu peralatan proteksi tegangan lebih pada lampu penerangan jalan umum dengan tingkat proteksi sebesar 1,5 kV terhadap karakteristik proteksi arester tegangan rendah.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dalam skripsi ini sebagai berikut :

BAB I **:** Pendahuluan, memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, ruang lingkup, tujuan dan sistematika penulisan

BAB II **:** Tinjauan pustaka, membahas teori-teori yang mendukung yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan

BAB III **:** Metode penelitian, berisi tentang obyek penelitian, susunan rangkaian pengujian, dan menjelaskan metode penelitian yang dilakukan

BAB IV : Perancangan, pengujian dan analisis terhadap hasil perancangan dan pengujian tegangan tembus susunan elektroda dengan jarak sela yang berbeda dan perubahan dimensi elektroda (panjang sela)

BAB V : Kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan

BAB II
DASAR TEORI

2.1 Proteksi

Suatu pengaman terhadap peralatan listrik, yang diakibatkan adanya gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi dan penyebab yang lainnya. Fungsi proteksi adalah untuk memisahkan bagian sistem yang terganggu sehingga bagian sistem lainnya dapat terus beroperasi.

Proteksi Internal, terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

a. Bonding/penyama tegangan (PEB)
b. Arester (pemotongan tegangan)
c. Perisaian dan filtering

Tujuan proteksi internal adalah untuk mengamankan peralatan listrik dan elektronik sehingga performa keandalan kerjanya baik.

Sedangkan proteksi Eksternal, terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

a. Finial/Penangkal petir
b. Konduktor penyalur
c. Pentanahan

Tujuan proteksi eksternal adalah untuk mencegah kebakaran, kematian, kehancuran dan ledakan dari sambaran petir langsung.

2.2 Petir

Suatu gejala alam/fenomena alam yang merupakan pelepasan muatan elektrostatis yang biasanya muncul pada musim hujan dimana muncul berupa kilatan cahaya sesaat yang menyilaukan dan beberapa saat kemudian disusul oleh suara yang menggelegar (BMKG,2013).

2.2.1 Parameter Petir

Ada empat parameter petir, yaitu :

1. Arus puncak impuls petir (Im), yaitu harga maksimum dari impuls petir
2. Kecuraman arus petir (d_i/d_t), yaitu laju kenaikan dari arus petir terhadap waktu.
3. Muatan arus petir, yaitu jumlah muatan arus petir yang mengalir atau

integral dari arus petir terhadap waktu.

$$Q = \int_0^t i dt \quad (2.1)$$

4. Arus kuadrat impuls/energi spesifik, yaitu suatu aksi integral yang bertanggung jawab terhadap terjadinya efek pemanasan dan efek elektromekanis.

$$\frac{W}{R} = \int_0^t i^2 \, \mathrm{dt} \quad (2.2)$$

Setiap parameter–parameter diatas menghasilkan bahaya tersendiri. Arus puncak petir akan menimbulkan kenaikan tegangan di titik pembumian dan kenaikan tegangan ini juga akan dirasakan oleh semua peralatan yang dihubungkan ke pembumian tersebut. Turunan arus terhadap waktu menghasilkan tegangan induksi pada setiap loop. Muatan dari petir akan mengakibatkan peleburan/pelelehan pada permukaan finial yang tersambar langsung oleh petir, sedangkan parameter energi spesifik akan menimbulkan pemanasan dan efek elektromagnetik pada penghantar yang dilewatinya. Setiap parameter di atas bisa berdampak kerusakan pada peralatan listrik maupun elektronik.

2.2.2 Surja Petir

Adalah gejala tegangan lebih transien yang disebabkan oleh sambaran petir. Tegangan lebih tersebut dapat merusak peralatan isolasi serta komponen-komponen dalam sistem tenaga listrik. Jika tingkat tegangannya melebihi BIL (*Basic Insulation Level*) peralatan isolasi serta komponen sistem tenaga listrik yang dipakai akan rusak.

Surja petir merupakan faktor yang lebih dominan dalam menimbulkan tegangan lebih transien. Tegangan lebih transien yaitu tegangan yang mempunyai amplitudo sangat besar dan berlangsung sangat singkat.

2.3 Tegangan Lebih

Tegangan lebih adalah tegangan yang hanya dapat ditahan untuk waktu yang terbatas (Sirait dan Zorro, 1987). Ditinjau dari bentuknya ada dua jenis tegangan lebih, yaitu :

1. Tegangan lebih periodik (bentuk gelombang tegangan : sinusoida 50 Hz)

2. Tegangan lebih aperiodik (bentuk gelombang tegangan : impuls)

Menurut IEC, tegangan lebih berdasarkan sumbernya ditimbulkan oleh :

1. Tegangan lebih petir (*lightening over voltage*) pada peralatan listrik sambaran langsung, tidak langsung, maupun secara induksi
2. Tegangan lebih surja hubung (*switching over voltage*) baik akibat operasi penutupan maupun operasi pembukaan
3. Tegangan lebih sementara (*temporary over voltage*) yang disebabkan oleh sistem

2.3.1 Jenis Sambaran Petir

Sambaran petir secara langsung dapat menyebabkan kerusakan fisik yang sangat besar. Sambaran petir yang mengenai peralatan mengakibatkan munculnya tegangan lebih pada peralatan tersebut. Tidak hanya itu, sambaran petir tidak langsung dari sambaran terdekat juga dapat menyebabkan kerusakan melalui induksi surja tegangan. Induksi surja tegangan yang disebabkan oleh petir merupakan pengaruh sekunder dari petir. Berdasarkan jenis sambarannya, sumber tegangan lebih dibagi menjadi dua yaitu sambaran langsung dan tidak langsung. Sambaran langsung adalah sambaran petir yang langsung mengenai obyek atau gedung yang diproteksi, misalnya sambaran pada hantaran udara. Pada sambaran ini, peralatan pelindung petir akan dialiri oleh sebagian/seluruh arus petir. Sambaran langsung dapat diminimalisir pengaruhnya terhadap peralatan listrik, peralatan telekomunikasi maupun peralatan elektronika apabila sistem penangkal petir bekerja dengan baik.

Sambaran tidak langsung adalah sambaran petir yang tidak langsung mengenai obyek/peralatan, melainkan mengenai peralatan lain dan masuknya melalui induksi. Pada jenis sambaran ini, peralatan proteksi tegangan lebih akan dialiri oleh sebagian kecil arus petir atau arus induksi. Sambaran ini dapat masuk pada peralatan melalui beberapa cara, yaitu dengan mekanisme kopling konduktif, kopling induktif dan kopling kapasitif.

2.4 Bahaya Surja Terhadap Komponen Sensitif

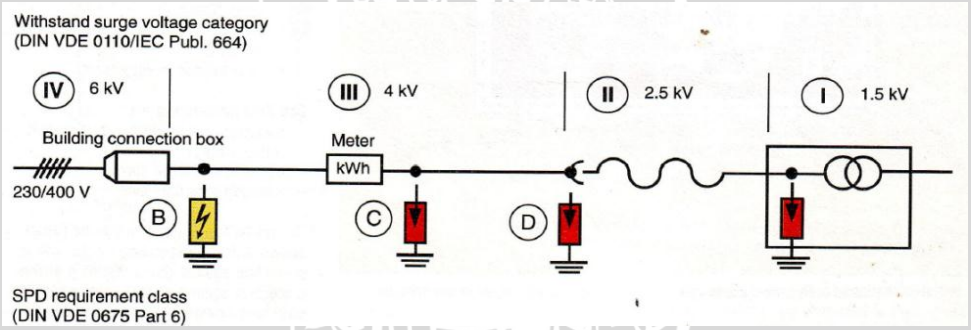
Pada dasarnya peralatan listrik dapat dibedakan menjadi dua kelompok yaitu tanpa menggunakan komponen semikonduktor dan menggunakan komponen semikonduktor. Komponen semikonduktor adalah komponen elektronika yang pada

umumnya merupakan bagian dari perangkat pengontrol atau pengubah daya. Sedangkan peralatan listrik yang tidak menggunakan komponen semikonduktor lebih tahan terhadap surja petir. Berbeda dengan peralatan listrik yang menggunakan komponen semikonduktor yang sangat sensitif terhadap surja petir.

Komponen semikonduktor sangat rentan terhadap perubahan tegangan atau arus yang mendadak. Apabila batas toleransi perubahan tegangan atau arus tersebut berlebih maka peralatan tersebut akan rusak. Hal ini akan menyebabkan seluruh sistem peralatan akan tidak berfungsi lagi.

2.5 Tegangan Ketahanan Impuls dan Karakteristik

Pada Gambar 2.1 menurut standart DIN VDE 0110/IEC Publ.664, peralatan listrik tegangan dibagi kedalam empat kategori berdasarkan tingkat (level) ketahanan terhadap tegangan impuls yaitu kategori IV memiliki ketahanan impuls hinga 6 kV, kategori III memiliki ketahanan impuls hingga 4 kV, kategori II memiliki ketahanan impuls hingga 2,5 kV dan kategori I memiliki ketahanan impuls hingga 1,5 kV.



Gambar 2.1 Kategori tegangan ketahanan surjadan tingkat pemotongan tegangan oleh arester dan pembagian kelas arester
Sumber : IEC Publ. 664

Peralatan proteksi untuk sistem catu daya berdasarkan DIN VDE 0675 Part.6/11.89 diklasifikasikan ke dalam spesifikasi kelas B, C dan D sebagai berikut :

1. Kelas B : Arester yang dipasang untuk tujuan proteksi internal petir yaitu bonding ekuipotensial atau proteksi surja dari sistem dan untuk pemutusan energi dari arus petir terusan. Arester digunakan pada titik mauk saluran catu daya ke dalam gedung.
2. Kelas C : Arester yang dipasang untuk tujuan perlindungan surja pada instalasi tetap, untuk proteksi tegangan lebih pada sistem, untuk pemotongan yang lebih jauh dari sisa tegangan arester arus petir, untuk

pembataan dari surja yang terhubung dengan eksternal. Arester digunakan untuk instalasi listrik tetap pada gedung.

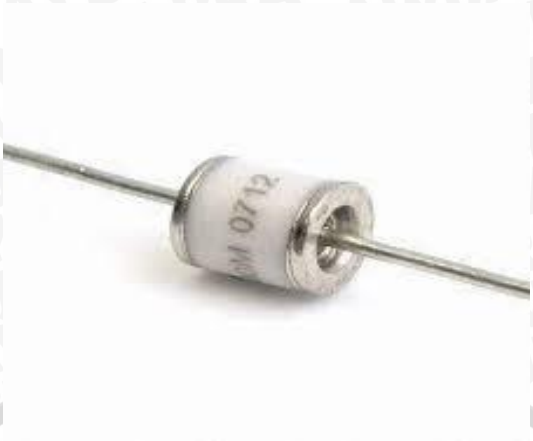
3. Kelas D : Arester yang dipasang untuk tujuan proteksi surja pada peralatan, untuk pembatasan dari surja yang disebabkan operasi *switching*, untuk pemotongan dari sisa tegangan arester yang sebelumnya. Arester digunakan untuk instalasi listrik tetap pada gedung.

Peralatan pelindung terhadap tegangan surja berfungsi untuk melindungi peralatan dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkannya ke tanah. Arester digunakan untuk mengamankan peralatan sistem terhadap gangguan petir secara tidak langsung. Arester dirancang untuk dapat membatasi tegangan lebih surja di sistem pada harga yang aman. Pada kondisi normal, arester bersifat sebagai isolator. Namun ketika terdapat surja, arester bersifat sebagai konduktor dengan meneruskan surja 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.

2.5.1 Arester Sela Udara

Arester sela udara merupakan salah satu komponen pelindung surja. Udara termasuk isolasi jenis gas yang banyak digunakan untuk mengisolasi peralatan listrik tegangan tinggi. Bahan isolasi gas terutama udara merupakan bahan isolasi yang banyak digunakan pada peralatan tegangan tinggi karena udara pada keadaan normal (udara yang ideal) merupakan isolator yang sempurna dan juga murah, mudah, sederhana dan mampu memulihkan keadaan sendiri setelah suatu kegagalan. Bentuk elektroda yang digunakan dalam pengujian tegangan tembus udara dapat berupa elektroda bola-bola. Untuk mengetahui pengaruh dari elektroda terhadap tegangan tembus media isolasi udara dilakukan pengujian dengan elektroda lainnya. Misalnya pada arester elektroda bola piring, batang-batang, jarum-piring dan lainnya.

Adapun arester yang sering digunakan pada proteksi tegangan rendah yaitu dengan menggunakan GDT biasanya digunakan pada penghubung saluran dan tanah dimana pelepasan dapat terjadi diantaranya. Tingkat proteksinya ditentukan oleh jarak sela dan kondisi udaranya.



Gambar 2.2 Bentuk elektroda GDT menurut Citel
Sumber : Citel-BB GDT Data Sheet, tanpa tahun : 3

Gambar 2.2 menunjukkan bentuk elektroda GDT. GDT biasanya memiliki jarak sela ± 1mm dengan diameter elektroda berkisar antara 5,5 mm sampai dengan 6,8 mm.

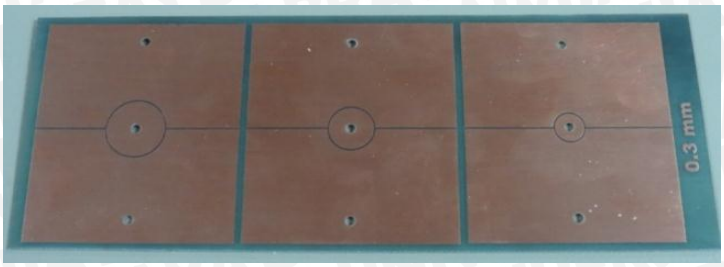
Arester ini memiliki batas pemotongan tegangan yaitu tegangan puncak keluaran hingga mencapai 1200 V setelah diuji dengan tegangan impuls 6 kV (Citel-BB GDT Data Sheet, tanpa tahun : 3). Prinsip kerja dari GDT adalah bila terdapat arus kecil yang mengalir maka beda tegangan di tabung menjadi besar, namun bila arus besar mengalir maka tegangan menjadi kecil karena resistansi antar celah tabung bersifat non linier (Rifa'i, 2001 : 23).

2.5.2 Arester PCB (*Printed Circuit Board*)

Arester PCB (*Printed Circuit Board*) merupakan salah satu inovasi dari arester sela udara. Adapun rekayasa arester jenis PCB (*Printed Circuit Board*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.

Arester ini adalah salah satu komponen pelindung surja yang digunakan pada sistem tegangan rendah. PCB(*Printed Circuit Board*) umumnya digunakan untuk komponen-komponen elektronika tetapi juga dapat menjadi suatu alat proteksi tegangan lebih. Tingkat proteksi (*protection level*) pada arester ini ditentukan oleh perubahan jarak sela dan perbesaran dimensi elektroda tersebut.

Prinsip kerja arester ini adalah pelepasan terjadi di sela udara pada tembaga. Tingkat proteksinya berdasarkan jarak sela dan perubahan panjang sela. Prinsip kerja arester ini yaitu arester di uji antara fasa-ground, dimana pada saat fasa dikenai tegangan lebih maka arester bisa mengalirkan tegangan lebih tersebut ke tanah.



Gambar 2.3 Arester PCB (*Printed Circuit Board*)

2.5.3 Karakteristik Tegangan Potong Arester

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

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

1. Arester mempunyai tegangan dasar yang tidak boleh dilampaui. Karena arester adalah 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 (*voltage limiting*) 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.

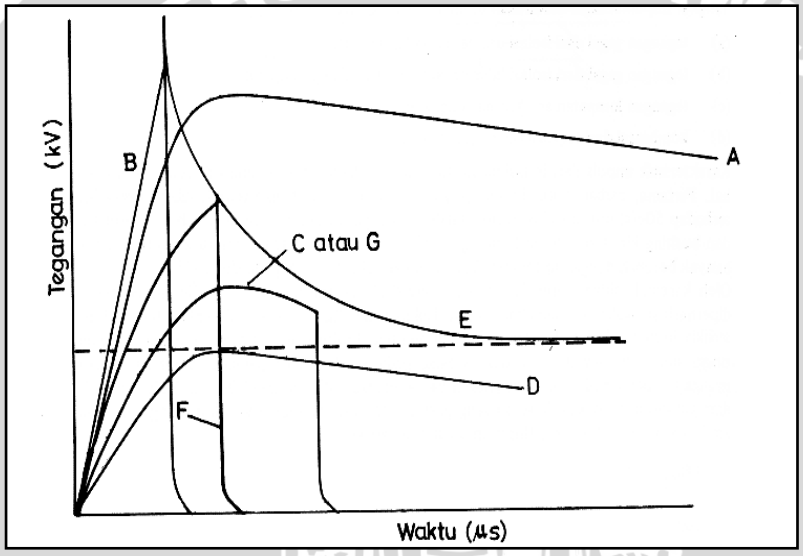
2.5.4 Pemotongan Tegangan Lebih

Jika ada surja petir datang ke sebuah peralatan, dapat digambarkan gelombangnya menyerupai karakteristik A pada Gambar 2.4. 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.

Surja yang datang ke peralatan sebagai gelombang curam yang terpotong pada mukanya (karakteristik A) atau sebagai gelombang curam yang terpotong pada ekornya (karakteristik C) atau surja yang datang dapat berbentuk gelombang penuh (karakteristik D).

Arester yang ideal adalah arester yang selalu mampu memotong setiap tegangan lebih di bagian muka dan tingkat pemotongan tegangannya selalu sama. Gambar 2.4 menunjukkan karakteristik volt-waktu.



Gambar 2.4Karakteristik volt-waktu
Sumber : Arismunandar, 1983 : 115

2.5.5 Karakteristik volt-waktu (*v-t Curve*)

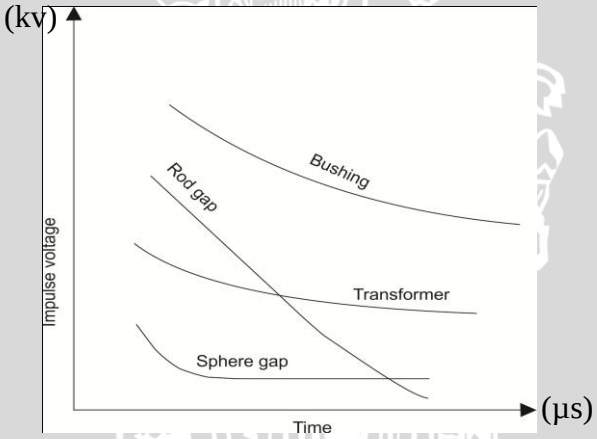
Karakteristik E yang didapat dengan menghubungkan ketiga puncak dari tiga gelombang di atas, merupakan karakteristik volt-waktu dari tiga gelombang tegangan yang datang ke peralatan. Karakteristik ini juga melalui titik-titik lompatan api pada puncak (karakteristik F).

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

2.5.6 *Basic Insulation Level (BIL)* dan Koordinasi Isolasi

Basic Insulation Level atau tingkat isolasi dasar merupakan batas kekuatan isolasi suatu peralatan menerima tegangan impuls. Didefinisikan juga sebagai tingkat-tingkat patokan yang dinyatakan dalam puncak tegangan impuls dengan gelombang standar. Koordinasi isolasi didefinisikan sebagai korelasi 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 v-t (Mansuri, 2002 : 11).

Agar didapatkan koordinasi isolasi yang baik terhadap tegangan impuls maka karakteristik volt-waktu suatu peralatan pelindung harus lebih rendah dari peralatan yang dilindungi untuk setiap nilai kecuraman tegangan impuls. Gambar 2.5 menunjukkan karakteristik tegangaan impuls dan waktu.



Gambar 2.5 Karakteristik tegangan impuls-waktu
Sumber : Naidu dan Kamaraju, 1982 : 24

2.6 Tegangan Tinggi Impuls

Di dalam teknik tegangan tinggi, pengertian tegangan tinggi impuls adalah tegangan impuls dengan suatu polaritas tertentu dan bentuk serta lamanya ditentukan oleh cara pembangkitannya. Tegangan impuls diperlukan dalam pengujian tegangan tinggi untuk mensimulasi terpaan akibat tegangan lebih dalam dan luar serta untuk meneliti mekanisme tembus.

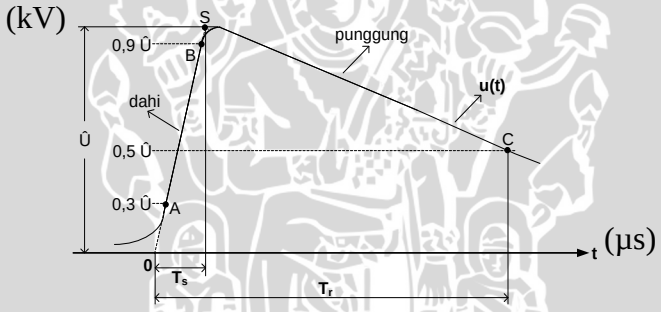
Umumnya tegangan tinggi impuls dibangkitkan dengan meluahkan muatan kapasitor tegangan tinggi (melalui sela percik bola) pada suatu rangkaian resistor dan kapasitor. Nilai puncak dari tegangan tinggi impuls dapat ditentukan dengan bantuan

sela ukur atau dengan rangkaian elektronik yang dikombinasikan dengan pembagi tegangan. Alat ukur tegangan impuls yang terpenting adalah osiloskop sinar katoda yang memungkinkan penentuan nilai-nilai sesaat melalui pembagi tegangan.

2.6.1 Gelombang Tegangan Tinggi Impuls Petir Standar

Untuk keperluan pengujian di laboratorium, maka tegangan tinggi impuls yang dipilih ialah tegangan impuls eksponensial ganda jenis impuls petir dengan karakteristik 1,2/50 μs yang berarti besar waktu dahi T_s = 1,2 μs dan waktu paruh punggung T_r = 50 μs seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6. Muka gelombang impuls petir didefinisikan sebagai bagian dari gelombang yang dimulai dari titik nol hingga mencapai titik puncak, sedangkan sisanya adalah ekor gelombang. Setengah puncak gelombang adalah titik-titik pada muka dan ekor yaitu besar tegangannya adalah setengah dari nilai puncak (0,5Û).

Parameter-parameter tegangan tinggi impuls petir untuk standar pengujian dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2.6 Parameter tegangan impuls surja petir
Sumber : Kind, 1993 : 34

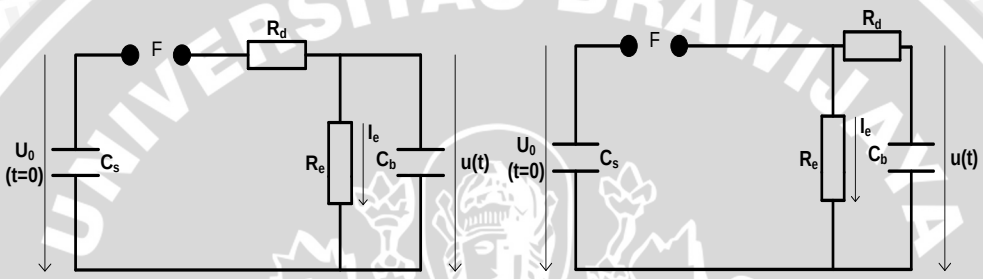
Waktu muka (T_s) ialah waktu yang terjadi pada muka gelombang dimulai dari titik perpotongan sumbu waktu (t) dengan garis lurus yang dibentuk dari titik 0,3Û (titik A), 0,9Û (titik B) dan S hingga mencapai titik potong sumbu waktu (t) dengan garis vertikal dari titik S. Sedangkan waktu paruh punggung (T_r) adalah waktu yang dibutuhkan mulai dari titik nol hingga mencapai setengah dari nilai puncak tegangan 0,5Û (titik C) pada ekor gelombang.

2.6.2 Pembangkitan Tegangan Tinggi Impuls

Rangkaian dasar pembangkitan tegangan impuls petir dan impuls hubung untuk pengujian adalah sama, hanya berbeda besar elemen-elemen rangkaiannya.

Rangkaian dasar yang biasa digunakan ialah rangkaian kapasitif yaitu rangkaian a dan rangkaian b seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.7.

Prinsip kerja rangkaian di atas yaitu kapasitor pemuatan C_s dimuati dengan tegangan tinggi searah U_0. Dengan penyalaan sela percik bola F, terjadi peluahan muatan untuk mengisi kapasitor beban C_b dan tahanan peluahan R_e. Tegangan tinggi impuls u(t) diperoleh pada terminal kapasitor beban C_b. Jika diinginkan waktu dahi T_s yang singkat, maka peluahan muatan yang mengisi kapasitor beban C_b harus secepat mungkin untuk mencapai tegangan puncak $\hat{U}$, sedangkan waktu punggung T_r yang lama ditentukan oleh tahanan peluahan R_e yang jauh lebih besar dibandingkan tahanan peredam R_d.



rangkaian a rangkaian b

Gambar 2.7 Diagram rangkaian dasar pembangkit tegangan tinggi impuls
Sumber : Kind, 1993 : 35

2.7 Susunan Elektroda

Elektroda adalah salah satu bagian yang penting dalam pembuatan arester jenis GDT. Barium, magnesium, alumunium, stainless stell adalah material yang sering digunakan sebagai elektroda. Beberapa pertimbangan yang digunakan dalam menentukan bahan dari elektroda adalah (Mansuri, 2002 : 24):

1. Memiliki fungsi kerja yang rendah, sehingga energi yang dibutuhkan untuk menarik elektron menjadi lebih kecil
2. Memiliki ketahanan mekanik yang tinggi, sehingga tidak terjadi deformasi sebagai akibat dari benturan dengan elektron atau ion positif
3. Memiliki tegangan tembus yang baik
4. Faktor ekenomis

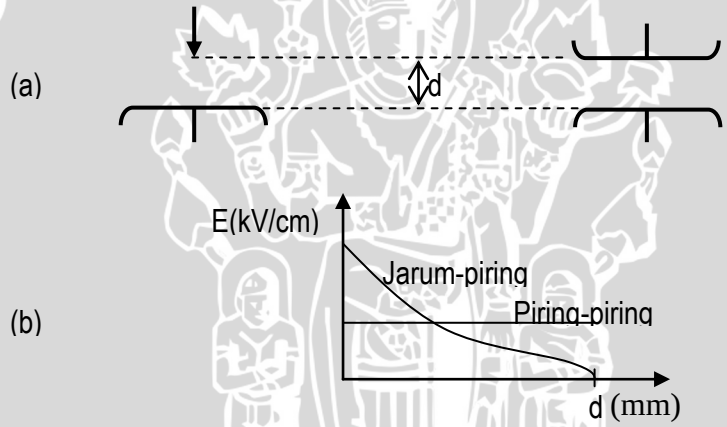
Selain itu, permasalahan mengenai bentuk elektroda juga menjadi salah satu faktor yang sangat penting. Karakteristik tembus pada medan seragam sangat dipengaruhi oleh bentuk fisik dari elektroda yang digunakan dimana pada sisi tepi dari elektroda piring radius lengkungan harus dikurangi secara bertahap sehingga

tidak terdapat titik dimana kuat medannya melebihi kuat medan di bagian tengah dari elektroda. Dalam hal ini pertimbangan yang digunakan adalah (Mansuri, 2002 : 25) :

1. Distribusi medan listriknya seragam
2. Volume ruang gas (udara)
3. Kemudahan dalam perakitan

2.8 Pengaruh Bentuk Geometri Terhadap Tegangan Tembus

Ada dua bentuk geometri elektroda, pertama adalah yang menghasilkan medan listrik homogen dan kedua yang menghasilkan medan listrik tidak homogen. Bentuk elektroda medan sangat tidak homogen ditunjukkan oleh susunan elektroda jarum-piring dan bentuk elektroda medan seragam ditunjukkan oleh susunan elektroda piring-piring sejajar seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8.a. Distribusi intensitas medan listrik dari masing-masing susunan elektroda ditunjukkan pada Gambar 2.8.b.



Gambar 2.8 Susunan elektroda dan distribusi intensitas medan listrik
(a) Susunan elektroda jarum-piring dan piring-piring
(b) Distribusi intensitas medan listrik elektroda jarum-piring dan piring-piring

Sumber : Kind, D., 1992

Homogenitas suatu susunan tidak hanya bergantung pada bentuk geometri elektrodanya, tetapi juga pada jarak sela elektroda. Semakin besar jarak sela dari suatu susunan elektroda, maka semakin berkurang homogenitasnya. Pengaruh bentuk geometri elektroda atau homogenitas medan yang direpresentasikan dalam faktor efisiensi medan terhadap tingkat tegangan tembus, oleh Kind dinyatakan oleh persamaan berikut :

$$U_d = E_d \times s \times \eta \qquad (2.3)$$

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maksimum}} \quad (2.4)$$

$$E_{rata\text{-}rata} = \frac{U_d}{s} \quad (2.5)$$

dengan :

η : 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)

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

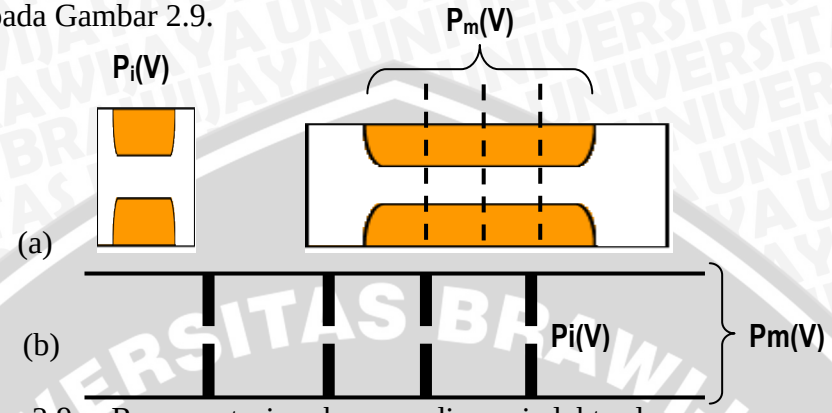
Pada susunan elektroda keping sejajar, distribusi medan listriknya homogen sehingga besar $E_{maksimum}$ sama dengan $E_{rata-rata}$. Sebaliknya pada distribusi medan listrik non homogen akan terdapat kuat medan listrik lokal pada daerah tertentu dalam jarak sela yang nilainya lebih besar dari kuat medan listrik rata-ratanya. $E_{maksimum}$ merupakan kekuatan dielektrik udara pada impuls dengan kerapatan udara sebesar 41 kV/cm. Dengan demikian maka batas nilai faktor efisiensi medan listrik untuk berbagai susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu memenuhi syarat : $\eta \leq 1$. Besar faktor efisiensi medan listrik bergantung pada bentuk geometris dari susunan elektroda, yaitu untuk susunan elektroda yang memberikan distribusi medan listrik homogen semisal susunan pelat sejajar maka η =1, sedangkan pada susunan elektroda yang menghasilkan distribusi medan listrik non homogen seperti jarum-piring, batang-bola, maka nilai $\eta < 1$ (Modul Praktikum Tegangan Tinggi).

2.9 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 reduksi tegangan tembus terjadi ketika sistem isolasi diperbesar (bertambah) dimensinya, yang juga dapat

diinterpretasikan sebagai peningkatan jumlah elemen yang mengalami tekanan listrik dalam paralel seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.

Untuk menurunkan hukum perbesaran, dimisalkan ada m susunan isolasi yang identik yang secara statistik bebas satu dengan lainnya dengan ilustrasi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Representasi perbesaran dimensi elektroda
(a) Susunan awal dan susunan dengan perbesaran dimensi elektroda
(b) Representasi diskrit perbesaran dimensi (a)
Sumber : Hauschild, W., 1992 : 260

Dimisalkan fungsi distribusi probabilitas tembus setiap elemen isolasi adalah $P_i(V)$, maka probabilitas bahwa sebuah susunan individu tidak akan tembus adalah,

$$1 - P_i(V) \qquad (2.6)$$

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 :

$$[1 - P_i(V)]^m \qquad (2.7)$$

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

$$P_m(V) = 1- [1 - P_i(V)]^m \qquad (2.8)$$

Apabila nilai $P_i(V)$ sangat kecil, maka pernyataakan persamaan (2.8) dapat didekati dengan persamaan yang lebih sederhana, yaitu :

$$P_m(V) \approx m\, P_i(V) \qquad (2.9)$$

Dari persamaan (2.9) 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 sebesar 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 diperbesar 10 kali, probabilitas tembusnya menurun menjadi 10% pada tegangan 100 kV. Tentu saja perbesaran ini juga akan 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.

2.10 Karakteristik Tembus pada Medan Seragam

Karakteristik tembus dalam gas antara elektroda pada medan seragam merupakan fungsi dari jarak sela dan tekanan udara. Pada medan seragam tegangan tembus naik secara linier sebanding dengan tekanan sampai pada harga 10 atm dan kemudian menjadi lebih lambat. Pada tekanan lebih tinggi, efek kumulatif dari kenaikan ionisasi pada celah dan pertumbuhan ionisasi baru pada katoda sangat berpengaruh terhadap penurunan nilai perbandingan antara tegangan dan tekanan. Untuk tekanan gas tetap, kuat medan tembus akan terus menurun sesuai dengan penambahan jarak sela. Bila jarak sela tetap, maka kuat medan tembus akan naik sesuai dengan kenaikan tekanan.

Kondisi atmosfer yang sangat bervariasi menurut waktu dan tempat, menyebabkan karakteristik tembus juga terpengaruh perubahan kondisi atmosfer. Untuk keperluan praktis, maka karakteristik tembus dapat dikonversikan ke kondisi atmosfer standar (p = 760 torr = 1013 mbar dan t =20^o C = 293 K), dimana faktor koreksinya disebut sebagai kerapatan udara relatif δ yaitu (Kuffel dan Zaengl, 1988 : 360)

$$\delta = \frac{p}{760} \times \frac{293}{273+t} = 0,386 \frac{p}{273+t} \quad \text{(p dalam torr)} \qquad (2.10)$$

$$\delta = \frac{p}{1013} \times \frac{293}{273+t} = 0,289 \frac{p}{273+t} \quad \text{(p dalam mbar)} \qquad (2.11)$$

dengan :

δ : kerapatan udara relatif

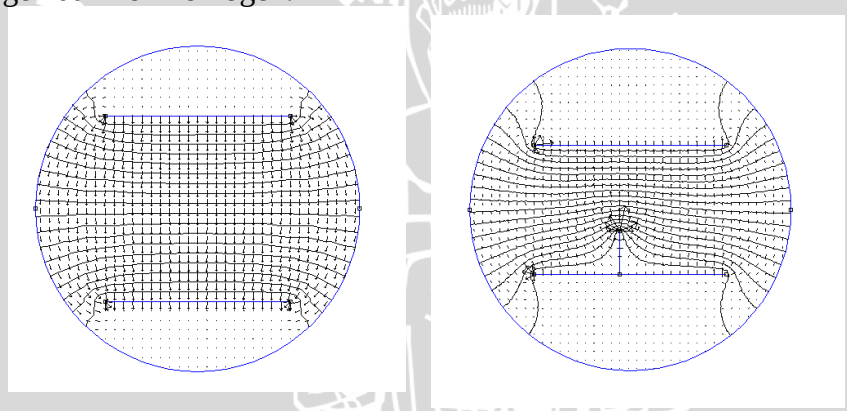
p : tekanan udara pada ruangan (mbar)

t : temperatur udara pada ruangan (^{o}C)

2.11 Karakteristik Tembus pada Medan Tak Seragam

Pada medan tak seragam seperti konfigurasi jarum-piring atau bola-piring, kuat medan dan koefisien ionisasi pertama Townsend berubah-ubah sepanjang sela. Tembus pada medan tak seragam pada tekanan rendah dan tekanan tinggi ditentukan oleh polaritas dari elektroda yang lebih kecil. Pada tekanan rendah tegangan tembus biasanya lebih rendah bila elektroda yang lebih kecil negatif, sedangkan pada tekanan tinggi tembus terjadi pada tegangan yang lebih rendah bila elektroda yang lebih kecil positif.

Pada elektroda yang runcing dalam udara akan dihasilkan ionisasi tumbukan apabila tegangan terlampaui. Karena mobilitas elektron yang tinggi maka elektron dengan cepat akan meninggalkan daerah medan listrik yang terionisasi. Ion-ion yang lebih lambat akan membentuk muatan ruang positif di dekat elektroda jarum dan mengubah distribusi potensial. Gambar 2.10 menunjukkan distribusi medan listrik homogen dan non homogen.



(a) (b)

Gambar 2.10 Distribusi medan listrik FEMM 4.2
a) Distribusi medan homogen
b) Distribusi medan non homogen

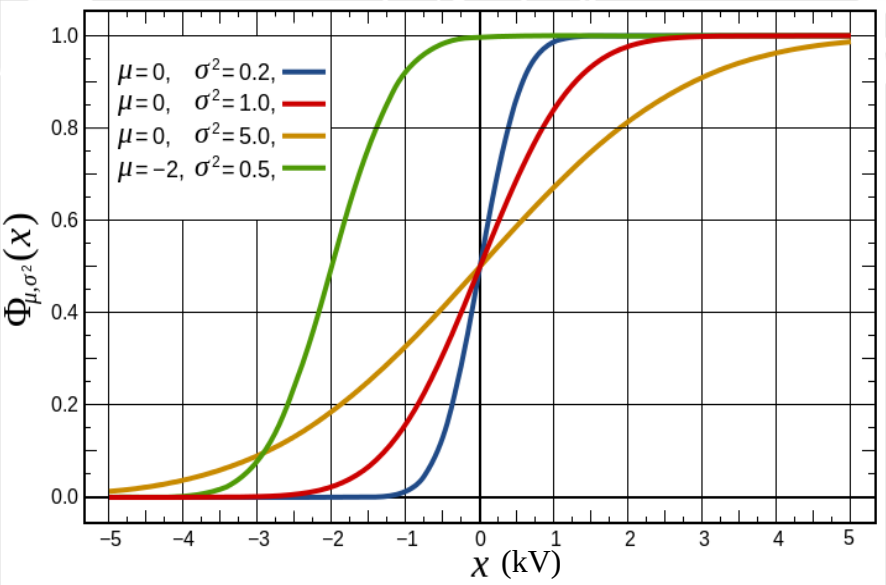
Sumber : FEMM 4.2

2.12 Penentuan Nilai Probabilitas dan Distribusi Normal (Gauss)

Pada kelompok penyelidikan yang pertama diterapkan tegangan dengan bentuk tertentu secara berulang pada sampel yang sama (atau pada beberapa sampel yang identik sehingga terjadi tembus yang merusak); jumlah peluahan tembus n_d dari seluruh penerapan n setiap saat ditentukan untuk nilai tegangan U yang tertentu. Probabilitas tembus $P(U) = n/n_d$ dengan demikian akan diperoleh secara langsung. Sebagai contoh, sewaktu menguji isolator dengan tegangan impuls penuh akan

diperoleh fungsi distribusi dari tegangan tembus secara langsung. Beberapa nilai karaktersitik yang penting ialah tegangan U_{d-5}, U_{d-50} dan U_{d-95}.

Untuk mengevaluasi maka hasil pengukuran probabilitas tembus untuk tegangan-tegangan yang berbeda digambarkan pada kertas probabilitas sehingga diperoleh hasil. Jika titik-titik hasil pengukuran hampir membentuk garis lurus seperti pada gambar tersebut, maka dapat dianggap bahwa tegangan tembus dari objek yang dikaji mengikuti hukum distribusi Normal atau Gauss. Dengan kata lain, koordinat diagram probabilitas terbagi sedemikian sehingga kurva frekuensi komutatif dari distribusi Normal menjadi suatu garis lurus. Dalam banyak hal pengandaian distribusi Normal untuk tegangan tembus dari susunan elektroda dengan isolasi gas, cair atau padat dapat diperbolehkan, jika rentang probabilitas dibatasi disekitar $5-95\%$ di luar rentang ini harus menggunakan metode-metode yang khusus. Gambar 2.11 merupakan probabilitas distribusi Gauss.



Gambar 2. 11 Probabilitas distribusi Gauss
Sumber : Wikipedia

Dengan menggambar garis lurus yang mendekati hasil-hasil pengukuran dalam diagram probabilitas, maka nilai $\bar{U}_d \approx U_{d-50}$ akan terbaca pada probabilitas tembus $P(U) = 50\%$. Selanjutnya, simpangan baku s dari rangkaian pengukuran akan diperoleh sebagai selisih tegangan-tegangan pada $P(U) = 50\%$ dan 16%, ataupun 50% dan 84% dikarenakan distribusi Gauss adalah simetris (Kind, 1993: 245-246). Fungsi kerapatan probabilitas dari variabel acak menjelaskan frekuensi yang relatif pada nilai yang berbeda terhadap variabel acak. Fungsi kerapatan

probabilitas pada distribusi normal diberikan pada Persamaan (2.11) (Lovric, 789,1738).

$$f(x;\mu,\sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (2.12)$$

dengan:

x : nilai data (kV)

μ : nilai rata-rata dari seluruh data (kV)

σ : nilai deviasi standar seluruh data (kV)

Fungsi ini akan benar jika varian σ^2 adalah tidak sama dengan nol (Endista, 2008:16).

Sedangkan untuk mencari nilai mean atau rata-rata μ dan deviasi standar σ dari data-data tersebut adalah (Lovric, 789,1739) :

$$\mu = \sum \frac{fx}{f} \quad (2.13)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^2} \quad (2.14)$$

dengan:

f : frekuensi data (kV)

x : nilai data (kV)

N : jumlah keseluruhan data

x_i : nilai data pada urutan ke-i (kV)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Studi Literatur

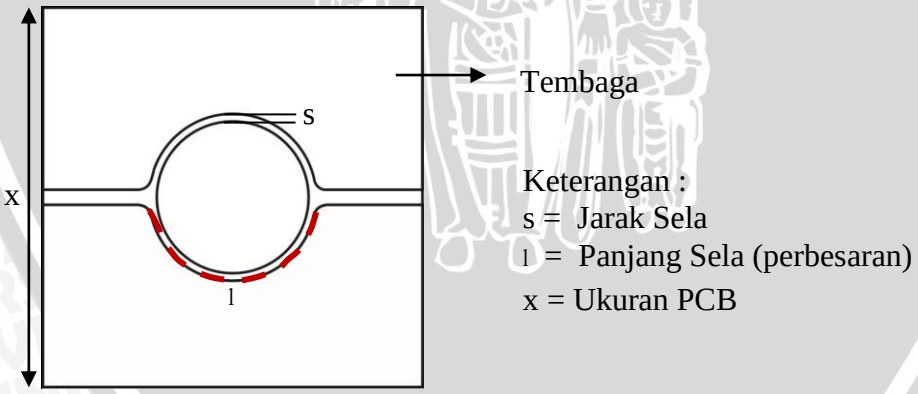
Studi literatur dilakukan dengan mempelajari buku-buku literatur maupun dari situs internet yang terkait. Dasar teori yang menunjang penyelesaian skripsi ini antara lain mengenai bahaya surja petir, arester, pemotong tegangan lebih dan pembangkitan tegangan impuls dan literatur -literatur pendukung lainnya.

3.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini ada beberapa hal yang akan diamati, antara lain bentuk geometri elektroda terhadap tingkat tegangan tembus surja petir tipe 1,2/50 μs, pengaruh perubahan jarak sela, perbesaran geometri elektroda. Oleh karena itu variabel yang terkait dengan penilitian ini adalah :

a. Jarak sela (s)
b. Perbesaran geometri elektroda merupakan perbesaran dimensi elektroda (panjang, luas, ataupun volume)
c. Bentuk geometri elektroda yang diukur dari faktor efisisensi medan (η)

Ketiga variabel tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Arester perancangan

Dalam perencanaan dilakukan tiga hal-hal sebagai berikut yaitu pemilihan bahan elektroda, pemilihan bentuk elektroda, dimensi elektroda yang direncanakan.

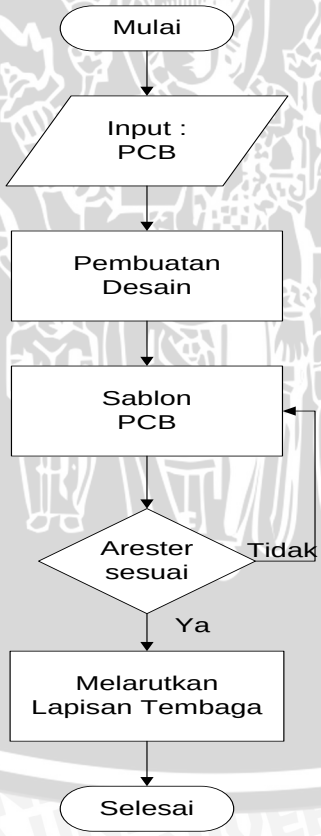
Pada pemilihan elektroda material yang digunakan sebagai elektroda adalah tembaga karena tembaga memiliki konduktivitas yang baik.

Untuk pemilihan bentuk elektroda, beberapa ketentuan di dalam pemilihan bentuk elektroda yaitu harus memiliki distribusi medan listrik yang seragam yang dapat diperoleh dari susunan elektroda yang disusun sejajar dan memenuhi standar pemotongan tegangan. Selanjutnya, dimensi elektroda yang direncanakan harus memiliki kemampuan potong terhadap tegangan impuls, tegangan potong yang sesuai serta efisiensi bahan.

Pada skripsi ini, akan di rancang arester PCB dengan variabel yang akan diamati adalah perubahan jarak sela. Dimana pada saat memperbesar sedikit jarak sela memiliki tegangan tembus yang tinggi. Maka dari itu, pada bahasan kali ini tidak hanya meneliti perubahan jarak sela melainkan juga akan meneliti perubahan panjang sela untuk melihat pengaruh tegangan potongnya.

1.3 Realisasi Arester PCB (*Printed Circuit Board*)

Adapun diagram alir untuk merealisasikan arester PCB pada Gambar 3.2.



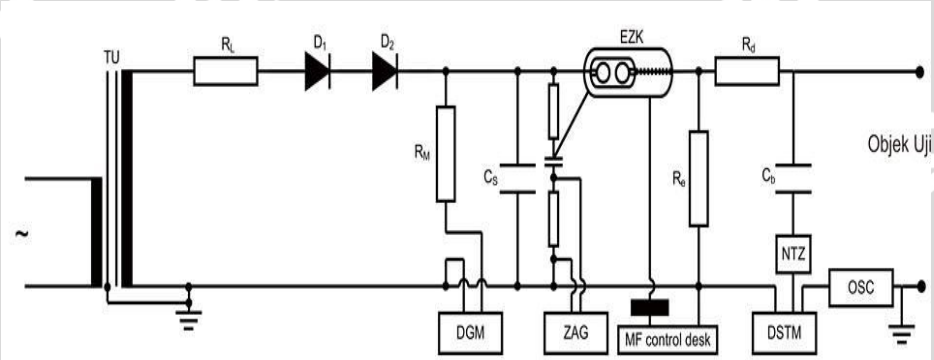
Gambar 3.2 Diagram alir realisasi arester

Pada proses pembuatan arester PCB ada beberapa langkah yang harus dilakukan, yaitu sablon PCB pada tahapan ini mencetak desain arester yang

diinginkan pada kertas *glossy* atau bisa dengan kertas transparan, lalu setrika mengikuti pola desain arester yang diinginkan dan proses penyablonan selesai, jika tidak sesuai dengan pola desain arester yang diinginkan ulangi langkah sebelumnya. Selanjutnya proses melarutkan tembaga, proses ini menggunakan larutan F_eCl_3 tunggu hingga 10-15 menit sampai lapisan tembaga yang tidak terpakai sudah hilang dan realisasi arester PCB selesai.

3.4 Rangkaian Pengujian

Rangkaian pengujian yang digunakan untuk mengetahui tingkat tegangan potong arester adalah rangkaian pembangkitan tegangan impuls terlihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Rangkaian pengujian pembangkitan tegangan impuls 1,2/50µs
Sumber: Dieter Kind, 1993: 19

Susunan rangkaian pembangkitan tegangan impuls, yaitu trafo uji disusun secara seri dengan dua buah dioda tegangan tinggi searah yang tersusun seri. Sedangkan alat ukur DGM dipasang seri dengan resistor tegangan tinggi R_M, yang kemudian disusun secara paralel dengan kapasitor Cs. Resistor Re dipasang paralel dengan kapasitor C_s dan dipasang pararel dengan kapasitor C_b yang diseri dengan resistor R_d. Alat ukur DSTM dipasang pararel dengan objek uji.

3.5 Komponen-Komponen Peralatan Pengujian

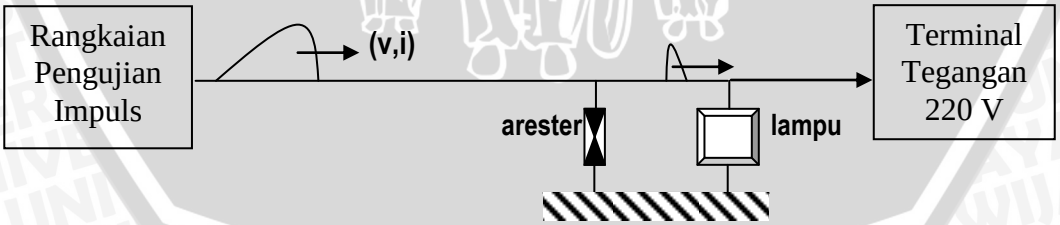
Komponen-komponen peralatan yang digunakan pada saat pengujian adalah :

a. PCB sebagai obyek uji
b. Trafo Uji (TU) adalah sumber tegangan tinggi. Trafo uji yang digunakan adalah trafo tegangan tinggi 220 V/100 kV, 3 belitan, 5 kVA

c. Dioda (D) adalah penyearah tegangan tinggi. Dioda yang digunakan adalah 140 kV, 5 mA, 100 kΩ
d. Kapasitor (CM) adalah digunakan untuk meratakan tegangan riak dari dioda penyearah (10000 pF)
e. Resistor (RM) adalah resistor ukur untuk memperbesar batas ukur dan pengaman instrument DGM (280 MΩ)
f. DGM adalah alat ukur tegangan tinggi searah. DGM di dalam rangkaian diseri dengan resistor (RM)
g. DSTM adalah alat ukur tegangan tinggi impuls. DSTM di dalam rangkaian diseri dengan NTZ. NTZ digunakan untuk memperbesar batas ukur dan pengaman instrumen DSTM
h. RL adalah resitor dengan ukuran 10 MΩ, 60W
i. RE adalah resistor gelombang dahi (6100 Ω)
j. RD adalah resitor gelombang punggung (260 Ω)
k. CB adalah kapasitor beban (1200 pF)
l. ZAG adalah pemicu dan EZK adalah sela bola yang dapat diatur
m. OSC adalah osiloskop

3.6 Pengujian Arester PCB (*Printed Circuit Board*)

Pengujian dilakukan pada arester dengan spesifikasi yang telah ditentukan yakni dapat memotong tegangan lebih 1,5 kV pada setiap perubahan jarak sela dan perubahan panjang sela. Pengujian dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi. Berikut adalah sistem pengujian arester terlihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Sistem pengujian arester

Pengujian arester PCB (*Printed Circuit Board*) menggunakan beban lampu tegangan rendah 220 V. Selain itu digunakan rangkaian pengujian pada Gambar 3.5 menunjukkan arester terpasang paralel dengan beban untuk mengetahui tegangan potong arester.

Adapun pengujian arester juga dilakukan dengan tegangan AC, untuk mengetahui ketahanan arester PCB pada saat diberi tegangan fasa antar fasa 380 V dengan menggunakan *voltage regulator*.

Gambar 3.5 Pengujian arester

3.6.1 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada saat pengujian adalah sebagai berikut :

1. Arester PCB (*Printed Circuit Board*) sesuai perancangan
2. Lampu 24 Watt 1 buah
3. Kabel Penghubung
4. Rangkaian tegangan tinggi impuls
5. Osiloskop
6. Sanwa Multimeter Digital CD772
7. *Voltage Regulator*

3.6.2 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan seperti pada Gambar 3.3. Hubungkan kabel ke sumber tegangan tinggi impuls pada fasa dan salah satunya dihubungkan pada ground. Lampu (beban) dihubung paralel dengan arester dan pengujian dilakukan dengan menaikkan tegangan dari 3 kV hingga 13 kV impuls puncak. Data-data yang diinginkan seperti U_{dc}, U_{impuls} dan gelombang pemotongan yang terukur secara waktu yang tetap pada alat ukur DGM, DSTM dan osiloskop. Setelah selesai diuji hingga 13 kV, arester dihubung open dengan lampu terlebih dahulu, lalu lampu dihubungkan ke terminal 220 V dan dapat dilihat lampu masih menyala atau tidak. Jika lampu

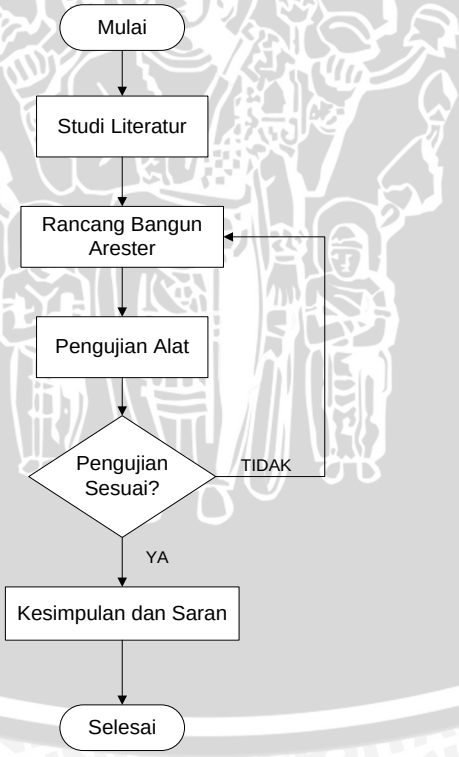
masih menyala maka arester berhasil memproteksi. Ulangi prosedur diatas untuk pengujian terhadap fasa yang lain. Catat hasil pengukuran pada tabel dan simpan hasil pemotongan tegangan dari osiloskop.

3.7 Analisis Data

Adapun analisis data yang akan didapatkan ada tiga yaitu, analisis pengaruh jarak sela dan pengaruh perubahan panjang sela terhadap tegangan potong. Lalu menganilisis karakteristik kurva v-t tegangan impuls arester hasil perancangan karena dari hasil kurva v-t tersebut akan diketahui tempat kedudukan titik-titik dengan koordinat (t_{potong}, V_{potong}). Selanjutnya menganalisis probabilitas tembus arester hasil perancangan, dimana fungsi probabilitas ini untuk mengetahui seberapa banyak terjadi tembus hingga tegangan yang ditentukan.

3.8 Penarikan Kesimpulan

Adapun diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.6 berikut ini :



Gambar 3.6 Diagram alir penelitian

BAB IV
PERANCANGAN, PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1 Tinjauan Umum

Arester PCB adalah alat pemotong tegangan lebih yang dibuat diatas bahan tembaga. Di dalam skripsi ini dilakukan perancangan variabel yang terkait dengan penelitian. Di dalam bab ini, akan menganalisis pengaruh perbesaran jarak sela dan perubahan panjang sela terhadap faktor efisiensi dan tegangan tembus.

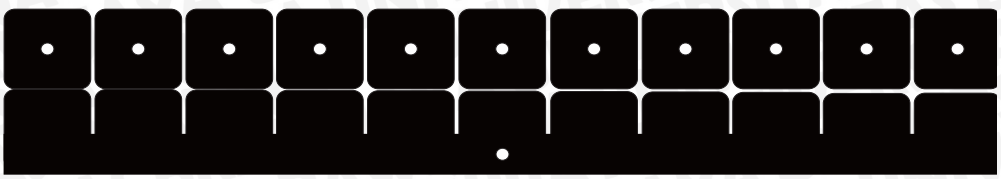
Selain itu akan menganalisis karakteristik v-t untuk aplikasi pemotongan tegangan pada level 1,5 kV. Elektroda sela udara yang akan digunakan dalam pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1 dengan konfigurasi yang sudah ditentukan. Tujuan pengujian ini yaitu untuk mengetahui karakteristik proteksi arester hasil perancangan.

4.2 Spesifikasi Arester PCB (*Printed Circuit Board*)

Menurut standar DIN VDE 0110/IEC Publ.664, arester ini dikategorikan ke dalam kategori I dimana arester ini memiliki ketahanan impuls hingga 1,5 kV. Untuk pembagian kelas arester, arester PCB ini masuk ke dalam arester kelas D yaitu tempat dari aplikasi fungsi/tujuan dari arester kelas ini sebagai proteksi surja untuk peralatan elektronika, untuk pembatasan dari surja yang disebabkan operasi *switching*. Pada ketahanan impuls 1,5 kV, aplikasi arester ini biasanya digunakan pada peralatan elektronik.

4.3 Karakteristik Pengaruh Perbesaran Jarak Sela Terhadap Tegangan Tembus

Pada Gambar 4.1, ditentukan perubahan jarak sela dimulai dari 0,08 mm, 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm, 0,7 mm, 0,8 mm, 0,9 mm, 1 mm dan dimensi elektroda dibuat tetap yaitu 2 cm x 1 cm. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.1.



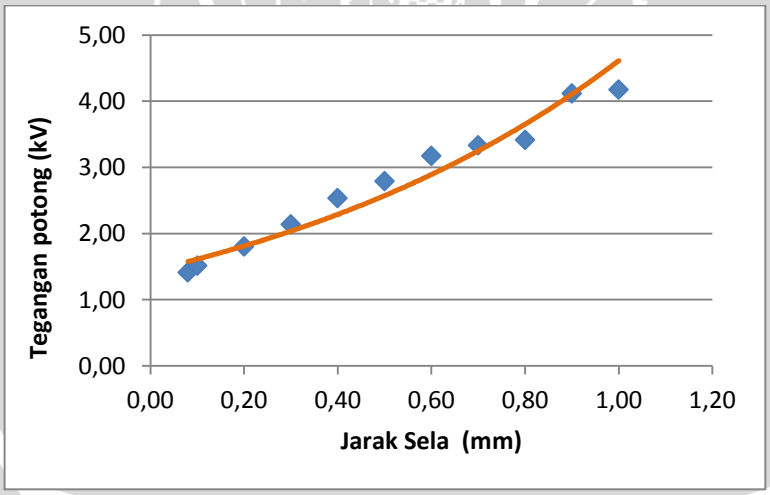
Gambar 4.1 Arester perubahan jarak sela, dimensi elektroda tetap

Tabel 4.1 Data hasil pengujian perubahan jarak sela pada p=964 mbar dan t=25ºC

No.	Jarak Sela (mm)	Teg. Puncak Impuls (kV)	Teg.Potong (kV)	Waktu Potong (ns)
1	0,08	4,20	1,41	533
2	0,1	4,20	1,51	466
3	0,2	4,20	1,81	766
4	0,3	4,20	2,14	600
5	0,4	4,20	2,53	500
6	0,5	4,20	2,79	266
7	0,6	4,20	3,17	333
8	0,7	4,20	3,33	300
9	0,8	4,20	3,41	334
10	0,9	4,20	4,11	302
11	1	4,20	4,18	800

Sumber : Hasil Pengujian

Dari Tabel 4.1 menunjukkan data hasil pengujian. Nilai U_d merupakan nilai tegangan potong dan waktu potong merupakan nilai rata-rata. Tabel 4.1 menunjukkan pengaruh kenaikan jarak sela terhadap tegangan potong. Selanjutnya dapat dibuat grafik hubungan antara tegangan potong terhadap jarak sela yang ditunjukkan seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik hubungan tegangan potong terhadap jarak sela
Sumber : Hasil pengujian

Dari Gambar 4.2, maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar jarak sela maka tegangan potong menjadi semakin besar dengan tingkat kenaikan tegangan potong yang relatif linier. Kecenderungan ini berlaku untuk semua dimensi elektroda. Hal ini disebabkan karena semakin besar jarak sela, medan listrik pada

suatu titik menjadi lebih rendah sehingga dibutuhkan tegangan yang lebih tinggi untuk terjadi tembus listrik.

4.4 Perkiraan Tegangan Tembus pada Elektroda Sela Udara

Untuk menghitung besarnya tegangan tembus secara teori dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.3). Besarnya tegangan tembus ini bergantung pada nilai faktor efisiensi medan, kuat medan serta jarak sela. Kekuatan dielektrik udara pada impuls sebesar 41 kV/cm atau 4,1 kV/mm.

Dengan tingkat proteksi sebesar 1,5 kV sesuai dengan standar arester kelas D, maka jarak sela sebagai berikut :

$U_d = Ed \times s \times \eta$

$1,5 = 4,1 \times s \times 1$

$s = \frac{1,5}{4,1}$

$s = 0,37$ mm

Jadi jarak sela yang dibutuhkan adalah 0,37 mm untuk menghasilkan tegangan potong sebesar 1,5 kV. Jarak sela ini sebagai pendekatan perhitungan yang selanjutnya akan dijadikan dasar pembuatan susunan elektroda sela udara yang akan diuji di laboratorium tegangan tinggi.

4.5 Penentuan Karakeristik v-t Hasil Pengujian

Di dalam menentukan karakteristik v-t, dilakukan pengujian tegangan tembus impuls dengan mengubah panjang sela dan jarak sela yang telah ditentukan.

Tabel 4.2 Data hasil pengujian panjang sela dan perubahan jarak sela pada p = 964 mbar, t = 25ºC

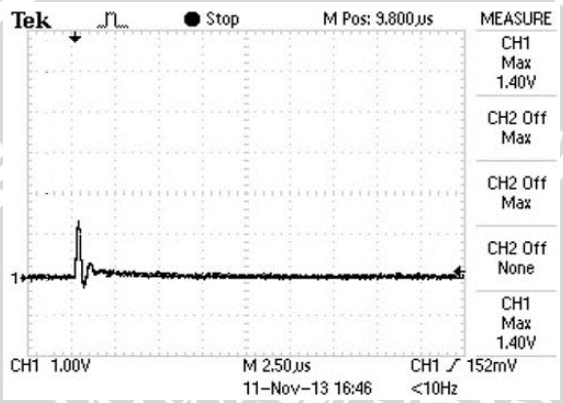
NO	Panjang Sela (mm)	Jarak Sela (mm)	Teg.Potong (kV)	Waktu Potong (ns)
1	10	0,1	0,95	100
		0,2	0,97	113
		0,3	1.13	114
2	15	0,1	1,05	114
		0,2	1,12	111
		0,3	1,21	116

Sumber : Hasil pengujian

Pengujian dimulai pada panjang sela 10 mm dan 15 mm. Dengan jarak sela 0,1 mm, 0,2 mm dan 0,3 mm. Hasil pengujian penentuan karakteristik arester dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 menunjukan data hasil pengujian. Nilai U_d merupakan nilai tegangan potong. Nilai tegangan potong dan waktu potong merupakan nilai rata-rata..

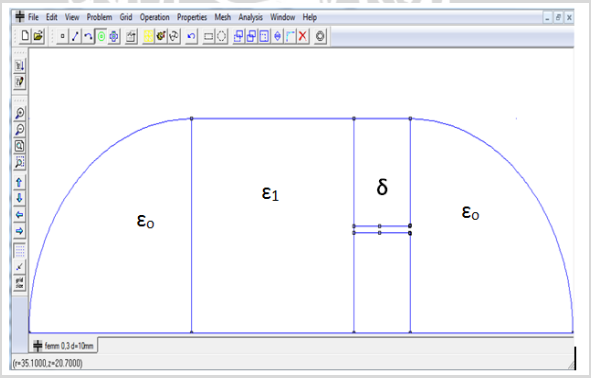
Gambar 4.3 menunjukkan bentuk gelombang hasil pemotongan tegangan impuls standar (1,2/50μs) yang dihasilkan oleh rangkaian pengujian seperti pada Gambar 3.3. Data hasil pengujian berupa tegangan potong dan waktu potong.



Gambar 4.3 Gelombang impuls 1,2/50μs yang terpotong pada bagian muka gelombang oleh sela elektroda l = 10mm dan s = 0,3mm

Sumber : Hasil pengujian

4.6 Analisis Distribusi Medan Listrik pada Elektroda Sela Udara



Gambar 4.4 Perencanaan simulasi arester

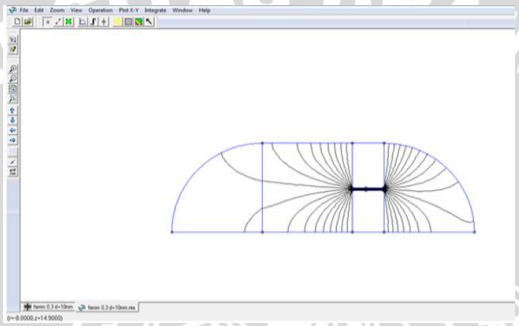
Sumber : Hasil simulasi

Distribusi medan listrik pada elektroda sela udara dapat disimulasikan dengan menggunakan program FEMM 4.2. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menentukan efisiensi medan listrik elektroda sela udara. Untuk menentukan efisiensi itu sendiri dibutuhkan nilai kuat medan listrik maksimum (E_{max}) yang akan didapatkan dari

hasil simulasi distribusi medan dengan menggunakan FEMM 4.2. Gambar simulasi dengan menggunakan program FEMM 4.2 untuk simulasi medan listrik ditunjukkan seperti pada Gambar 4.4.

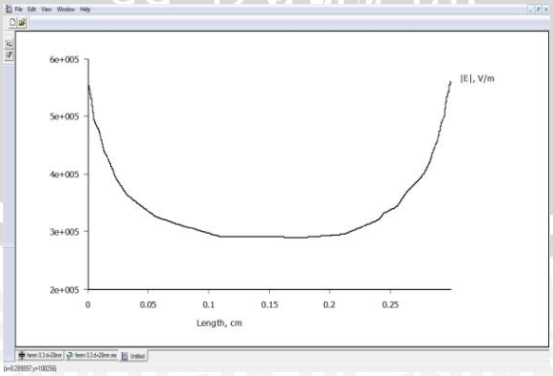
Gambar simulasi yang digambarkan pada Gambar 4.4 adalah simulasi pengujian tembus elektroda sela udara untuk panjang sela 20 mm dan jarak sela 0,3 mm. Isolator yang digunakan antara elektroda adalah isolator udara. Tegangan masukan pada simulasi distribusi medan listrik sebesar 1 kV.

Dari hasil simulasi tersebut dapat diketahui heterogenitas medan listrik dari elektroda yang diuji. Dengan menggunakan data-data tersebut, maka distribusi medan listrik dari pengujian elektroda sela udara dapat disimulasikan.



Gambar 4.5 Perencanaan simulasi equipotensial elektroda sela udara
Sumber : Hasil simulasi

Gambar 4.5 adalah hasil simulasi untuk equipotensial pada panjang sela 20 mm dan sela udara pada jarak sela 0,3 mm dengan beda potensial antar elektroda sebesar 1 kV. Equipotensial adalah diibaratkan daerah yang semua titik di dalam daerah itu pada potensial yang sama sehingga tidak ada beda potensial di antara dua titik di dalam daerah tersebut.



Gambar 4.6 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (*Magnitude of Field Intensity*, |E|) pada pinggir elektroda 20 mm
Sumber : Hasil simulasi

Dari hasil simulasi equipotensial didapatkan grafik simulasi kuat medan listrik mutlak (*magnitude of field intensity,* |E|) pada pengujian tegangan tembus pada elektroda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.

Gambar 4.6 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik pada pinggir elektroda dengan panjang sela 20 mm. Beda potensial yang diberikan adalah sebesar 1 kV dengan jarak sebesar 0,3 mm, terlihat bahwa nilai kuat medan lokal tertinggi pada pinggir elektroda bernilai 5,54 10^6V/m atau 55,4 kV/cm yang menunjukkan bahwa distribusi medan pada pinggir elektroda tidak seragam. Inilah yang dinamakan efek pinggir.

4.6.1 Perhitungan Faktor Efisiensi Medan dengan Variasi Diameter

Dengan menggunakan simulasi FEMM 4.2 dan dengan cara yang sama, nilai kuat medan listrik maksimum dapat diperoleh. Pada Gambar 4.8 didapatkan nilai kuat medan tertinggi berdasarkan hasil simulasi sebesar 5,54. 10^6 V/m atau 55,4 kV/cm. Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata-ratanya dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.5) dengan U_d sebesar 1 kV.

$$E_{rata-rata} = \frac{1}{0,3}$$

$$E_{rata-rata} = 3,33 \text{ kV/mm}$$

Setelah didapatkan $E_{rata-rata}$ sebesar 3,33 kV/mm atau 33,3 kV/cm dapat dihitung efisiensi medan listrik pada sela elektroda adalah sebesar

$$\eta = \frac{33,3}{55,4}$$

$$\eta = 0,60$$

Maka faktor efisiensi pada perubahan panjang sela yang lain dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.5) seperti diatas dan terlihat dalam Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perhitungan faktor efisiensi medan dengan perubahan panjang sela

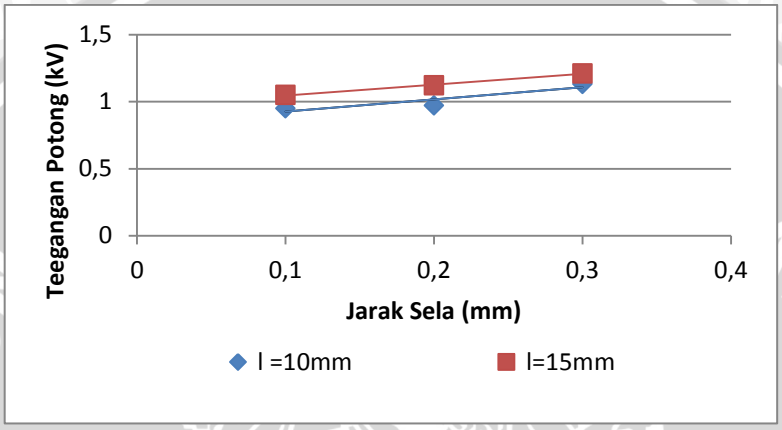
NO	Simulasi Pada	Jarak Sela (mm)	Panjang Sela (mm)	Emax (kV/cm)	Erata-rata (kV/cm)	η
1	Pinggir	0,3	10	45,9	33,3	0,73
2			15	51,1		0,65
3			20	55,4		0,60

Sumber : Hasil perhitungan

4.7 Pengaruh Jarak Sela terhadap Tegangan Potong

Pada Tabel 4.2 didapatkan nilai tegangan potong (U_d) untuk setiap perubahan panjang sela elektroda. Selanjutnya dapat dibuat grafik hubungan antara tegangan potong dan jarak sela elektroda seperti tampak pada Gambar 4.7.

Dari grafik hubungan antara tegangan potong dan jarak sela pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa semakin besar jarak sela maka tegangan potong juga semakin tinggi dengan tingkat kenaikan yang relatif linier. Kecenderungan ini berlaku untuk semua perubahan panjang sela elektroda.



Gambar 4.7 Grafik hubungan tegangan potong terhadap jarak sela
Sumber : Hasil pengujian

4.7.1 Penentuan Jarak Sela

Dari hasil pengujian, semua elektroda mampu memotong tegangan impuls di muka gelombang. Berdasarkan pada grafik hubungan antara tegangan potong dan jarak sela pada Gambar 4.7 didapatkan persamaan regresi untuk masing-masing perubahan panjang sela elektroda.

- l = 10 mm, Ud = 2,30 s + 0,8367
- l = 15 mm, Ud = 1,81 s + 0,9667

Maka jarak sela dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan regresi untuk masing-masing elektroda dengan tingkat proteksi yang diinginkan yaitu 1,5 kV adalah sebagai berikut

- d = 10 mm,

  Ud = 2,30 s + 0,8367

  1,5 = 2,30 s + 0,8367

  s = 0,28 mm
- d = 15 mm,

Ud = 1,81s + 0,9667

1,5 = 1,81 s + 0,9667

s = 0,29 mm

Dari hasil perhitungan didapatkan besar jarak sela untuk pemotongan tegangan impuls 1,5 kV pada panjang sela yang berbeda menunjukan perubahan jarak sela yang tidak terlalu tinggi yaitu hampir mendekati 0,3 mm yang nantinya akan digunakan untuk perancangan arester PCB.

4.8 Karakteristik v-t Arester

Pengujian karakteristik v-t dilakukan untuk mengetahui karakteristik tegangan potong dari arester yaitu besarnya tegangan potong dan waktu potong.

4.8.1 Pengujian Arester pada Fasa – Ground dan Netral - Ground

Tabel 4.4 adalah hasil pengujian pada fasa–ground dan netral-ground pada panjang sela 10 mm dan jarak sela 0,3 mm.

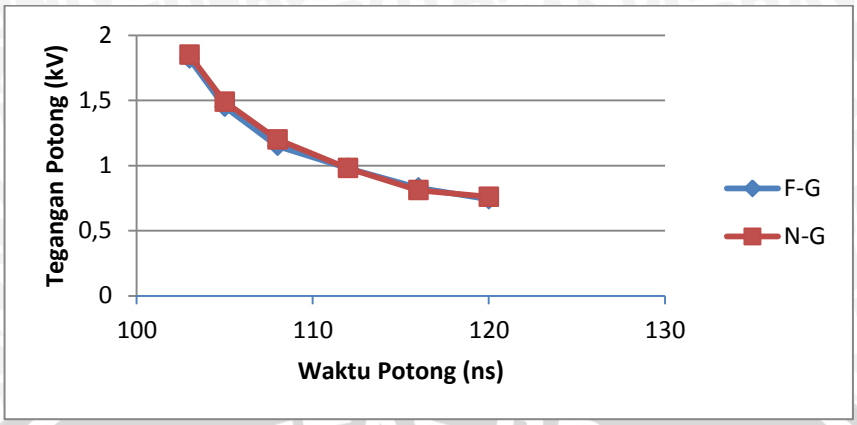
Tabel 4.4 Data hasil pengujian karakteristik v-t arester pada panjang sela 10 mm dan jarak sela 0,3 mm

	Panjang Sela (mm)	Jarak Sela (mm)	Teg.Puncak Impuls (kV)	Teg.Potong (kV)	Waktu Potong (ns)
F - G	10	0,3	3,34	0,74	120
			5,87	0,83	116
			7,37	0,98	112
			8,77	1,15	108
			10,75	1,45	105
			13,33	1,82	103
N - G	10	0,3	3,36	0,76	120
			5,82	0,81	116
			7,40	0,98	112
			8,88	1,20	108
			10,56	1,49	105
			13,16	1,85	103

Sumber : Hasil pengujian

Gambar 4.11 menunjukkan karakteristik v-t untuk arester dengan panjang sela 10 mm. Arester ini diuji pada fasa-ground menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 0,74 kV–1,82 kV untuk semua tegangan impuls yang digunakan serta waktu pemotongan antara 120 ns–103 ns. Pada netral-ground menghasilkan

tingkat pemotongan tegangan antara 0,76 kV–1,85 kV serta waktu pemotongan120 ns–103 ns.



Gambar 4.8 Karakteristik v-t arester dengan panjang sela 10 mm dan jarak sela 0,3 mm

Sumber : Hasil pengujian

Selanjutnya, Tabel 4.5 adalah hasil pengujian pada panjang sela 15 mm dan jarak sela 0,3 mm.

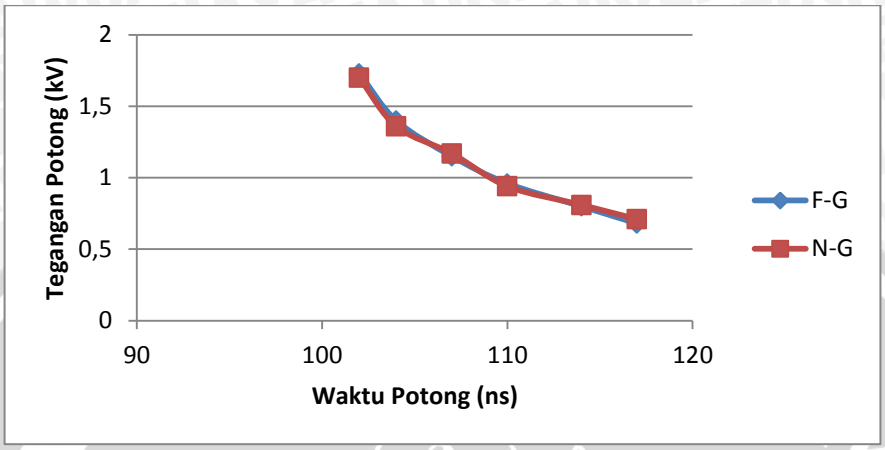
Tabel 4.5 Data hasil pengujian karakteristik v-t arester pada panjang sela 15 mm dan jarak sela 0,3 mm

	Panjang Sela (mm)	Jarak Sela (mm)	Teg.Puncak Impuls (kV)	Teg.Potong (kV)	Waktu Potong (ns)
F - G	15	0,3	3,25	0,68	117
			5,79	0,80	114
			7,28	0,96	110
			1,15	1,15	107
			1,40	1,40	104
			1,73	1,73	102
N - G	15	0,3	3,20	0,71	117
			5,77	0,81	114
			7,30	0,94	110
			9,09	1,17	107
			10,62	1,36	104
			13,46	1,70	102

Sumber : Hasil pengujian

Dari Tabel 4.6 didapatkan nilai tegangan potong (U_d) dan waktu potong. Selanjutnya dapat dibuat grafik hubungan antara tegangan potong dan waktu potong dengan pengujian fasa –ground dan netral-ground. Sehingga dibuat karakteristik v-t yang terlihat pada Gambar 4.9.

Arester ini diuji pada fasa-ground menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 0,68 kV–1,73 kV untuk semua tegangan impuls yang digunakan serta waktu pemotongan antara 117 ns–102 ns. Pada netral-ground menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 0,71 kV–1,70 kV serta waktu pemotongan 116 ns–100 ns.



Gambar 4.9 Karakteristik v-t arester dengan panjang sela 15 mm dan jarak sela 0,3 mm
Sumber : Hasil pengujian

4.9 Penentuan Dimensi Arester PCB (*Printed Circuit Board*)

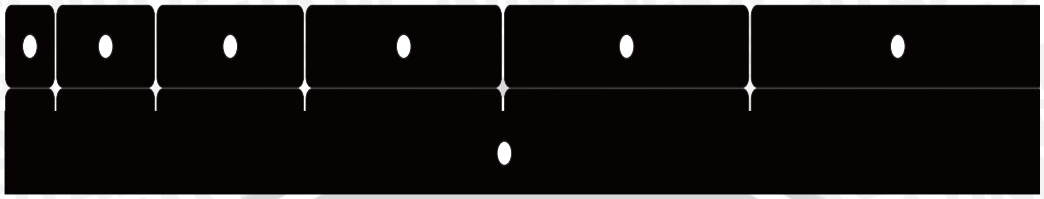
Dimensi adalah suatu besaran yang menunjukkan ukuran baik dalam bentuk panjang, luas, volume, lebar, tinggi dan sebagainya. Di dalam penentuan arester ini penentuan dimensi juga diperlukan yakni dengan merubah panjang sela elektroda. Perbesaran ini dirancang untuk mengetahui bagaimana pengaruh perubahan panjang sela elektroda terhadap tegangan potongnya.

Menurut Schwaiger, bentuk geometris dari susunan elektroda yang menghasilkan distribusi medan listrik yang homogen adalah piring-piring (susunan plat sejajar) dan bola-bola. Untuk mengetahui pengaruh dimensi elektroda maka dilakukan pengujian terlebih dahulu dengan menggunakan susunan plat sejajar. Pemilihan ini didasarkan pada kesederhanaan bentuk geometri dan kemudahan dalam proses pembuatannya.

4.9.1 Karakteristik Pengaruh Perbesaran Dimensi Terhadap Tegangan Tembus

Pada Gambar 4.10, terlihat untuk perbesaran dimensi yang telah ditentukan dan jarak sela yang dibuat tetap 0,08mm. Dari Tabel 4.6 menunjukkan data hasil

pengujian. Nilai U_d merupakan nilai tegangan potong dan waktu potong hasil nilai rata-rata. Tabel 4.6 menunjukkan pengaruh perbesaran dimensi elektroda terhadap tegangan potong. Selanjutnya dapat dibuat grafik hubungan antara tegangan potong terhadap perbesaran dimensi yang ditunjukkan seperti pada Gambar 4.11.



Gambar 4.10 Arester perubahan dimensi elektroda, jarak sela tetap

Dari Gambar 4.11, maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar dimensi elektroda maka tegangan potong menjadi semakin kecil. Kecenderungan ini berlaku untuk semua perubahan dimensi elektroda.

Tabel 4.6 Data hasil pengujian perbesaran dimensi pada p=964 mbar dan t = 25ºC

No.	Dimensi Elektroda (cm)	Teg. Puncak Impuls (kV)	Teg.Potong (kV)	Waktu Potong (ns)
1	1 x 1	1,86	0,80	467
2	2 x 1	1,86	0,79	466
3	3 x 1	1,86	0,78	533
4	4 x 1	1,86	0,77	500
5	5 x 1	1,86	0,76	534
6	6 x 1	1,86	0,75	520

Sumber : Hasil pengujian

Berdasarkan pada grafik hubungan antara tegangan potong dan perbesaran dimensi pada Gambar 4.11 didapatkan persamaan regresi untuk tingkat proteksi 1,5 kV yaitu :

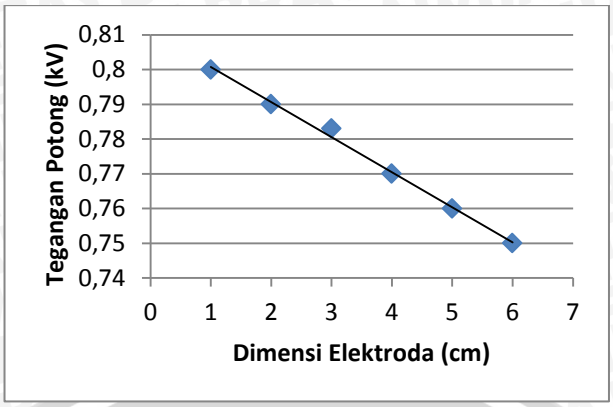
$$Ud = 0{,}034l + 0{,}8108$$

$$1{,}5 = 0{,}034l + 0{,}8108$$

$$l = 2{,}01\text{cm} = 20{,}1\text{ mm}$$

Dari hasil pengujian perbesaran didapatkan perubahan panjang sela yang sesuai untuk proteksi 1,5 kV pada arester PCB hasil perancangan adalah sebesar $l = 2{,}01$cm.

Setelah didapatkan panjang sela dan jarak sela yang sesuai untuk arester perancangan yaitu $l = 20{,}1$mm dan s = 0,3 mm, hasil ini dapat digunakan untuk perekayasaan arester perancangan yang diinginkan dengan tingkat (level) proteksi 1,5 kV dan selanjutnya akan diuji.



Gambar 4.11 Grafik hubungan tegangan potong terhadap perbesaran dimensi elektroda

Sumber : Hasil pengujian

Selanjutnya, Tabel 4.7 adalah hasil pengujian pada panjang sela 20 mm dan jarak sela 0,3 mm.

Tabel 4.7 Data hasil pengujian karakteristik v-t arester pada panjang sela 20 mm dan jarak sela 0,3 mm

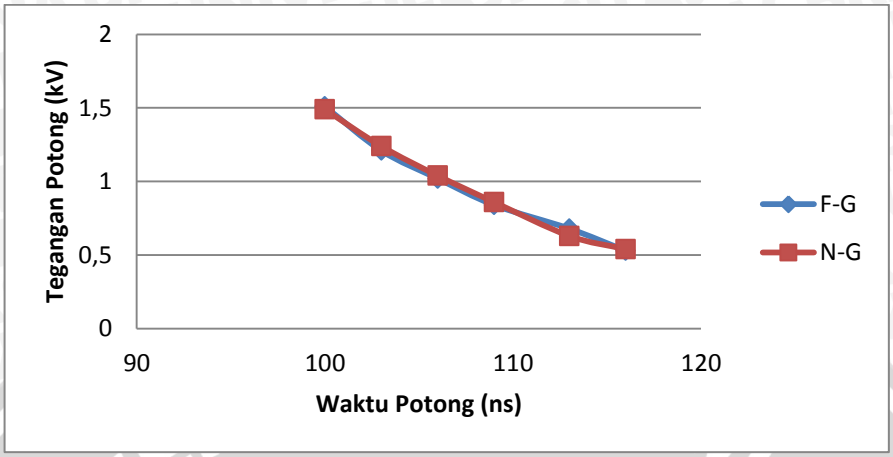
	Panjang Sela (mm)	Jarak Sela (mm)	Teg.Puncak Impuls (kV)	Teg.Potong (kV)	Waktu Potong (ns)
F - G	20	0,3	3,14	0,53	116
			5,53	0,78	113
			7,18	0,84	109
			8,99	1,13	106
			10,89	1,21	103
			13,47	1,51	100
N - G	20	0,3	3,11	0,54	116
			5,60	0,76	113
			7,21	0,84	109
			8,78	1,13	106
			10,65	1,28	103
			13,43	1,49	100

Sumber : Hasil pengujian

Dari Tabel 4.7 didapatkan nilai tegangan potong (U_d) dan waktu potong hasil nilai rata-rata. Selanjutnya dapat dibuat grafik hubungan antara tegangan potong dan waktu potong dengan pengujian fasa–ground dan netral-ground. Sehingga dibuat karakteristik v-t yang terlihat pada Gambar 4.12.

Gambar 4.12 menunjukkan karakteristik v-t untuk arester dengan panjang sela 20 mm. Arester ini diuji pada fasa-ground menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 0,53 kV–1,51 kV untuk semua tegangan impuls yang digunakan

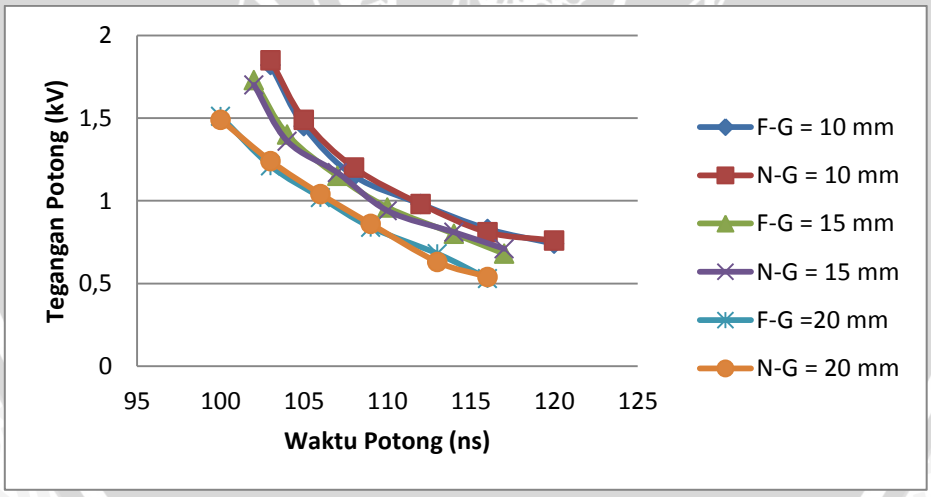
serta waktu pemotongan antara 116 ns–100 ns. Pada netral-ground menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 0,54 kV–1,49 kV serta waktu pemotongan 116 ns–100 ns.



Gambar 4.12 Karakteristik v-t arester dengan panjang sela 20 mm jarak sela 0,3 mm

Sumber : Hasil pengujian

Gambar 4.13 menunjukan karakteristik v-t untuk arester dengan panjang sela 10 mm, 15 mm dan 20 mm. Dari Gambar 4.13 terlihat bahwa perubahan panjang sela dapat memperkecil tegangan potong suatu susunan elektroda.



Gambar 4.13 Karakteristik v-t arester pada panjang sela 10 mm, 15 mm dan 20 mm

Sumber : Hasil Pengujian

4.10 Pengujian Ketahanan Arester PCB (*Printed Circuit Board*) terhadap Tegangan AC (*Alternating Current*)

Pada pengujian ini, arester diberi tegangan AC untuk menguji ketahanan arester PCB selama 5 menit dengan memberikan catu tegangan 380 Volt fasa antar

fasa dikarenakan tidak boleh terjadi tembus/*short circuit* pada tegangan sistem ini. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *Voltage Regulator*. Tegangan masukan 400 volt, ini merupakan tegangan sistem jala-jala PLN. Pada saat pengujian, terlihat fasa antar fasa pada arester tidak terjadi tembus dan arester PCB dikatakan memiliki ketahanan yang baik.

4.11 Probabilitas Tembus pada Pengujian Tegangan Tinggi Impuls

Dari hasil analisis pengujian tegangan tembus impuls, didapatkan jarak sela yang digunakan untuk pengujian tegangan tinggi impuls. Pengujian probabilitas tembus dilakukan pada arester PCB (*Printed Circuit Board*) dengan panjang sela 10 mm, 15 mm dan 20 mm.

Hasil pengujian seperti Tabel 4.8, probabilitas tegangan tembus terlihat bahwa tembus terjadi pada tegangan impuls terendah 0,67 kV dan tegangan tembus tertinggi terjadi pada tegangan impuls 1,54 kV. Hal ini menunjukkan kenaikan proses tembus semakin besar, terlihat dari prosentasi tembus tertinggi 100% pada tegangan tertinggi pada saat pengujian dengan memberikan terpaan tegangan tinggi DC sebesar 1,79 kV yang menghasilkan impuls puncak sebesar 1,54 kV.

Tabel 4.8 Hasil pengujian probabilitas dengan panjang sela 15 mm

No.	Ud (kV)	Pengujian ke-										P (Ud) %
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0,34	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0
2	0,67	√	x	x	x	x	x	x	x	x	x	10
3	1,04	√	x	x	√	√	√	x	√	x	x	50
4	1,11	√	x	√	√	√	√	√	x	x	√	70
5	1,21	√	√	√	x	√	√	x	√	√	√	80
6	1,32	√	√	√	√	x	√	√	√	√	√	90
7	1,54	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	100

Sumber : Pengujian

Keterangan :

x menunjukkan tidak adanya tembus, sedangkan √ menunjukkan adanya tembus

Dari Tabel 4.8, didapatkan nilai mean μ dan nilai deviasi standar σ, sesuai Persamaan (2.12) dan (2.13), yaitu :

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Ud$$

$$= \frac{1}{40}\sum_{i=1}^{40}((0{,}48x1) + (1{,}04x5) + (1{,}11x7) + (1{,}21x8) + (1{,}32x9) + (1{,}54x10))$$

$$= 1{,}26 \text{ kV}$$

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

$$= \sqrt{\frac{1}{40-1}\sum_{i=1}^{39}(0{,}34 - 1{,}26)^2}$$

$$= 0{,}15 \text{ kV}$$

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

Untuk x = 1,0 kV

Maka :

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi 0{,}15^2}} e^{-(1{,}0-1{,}26)^2/(2.0{,}15^2)}$$

$$f(x; \mu, \sigma^2) = 0{,}59$$

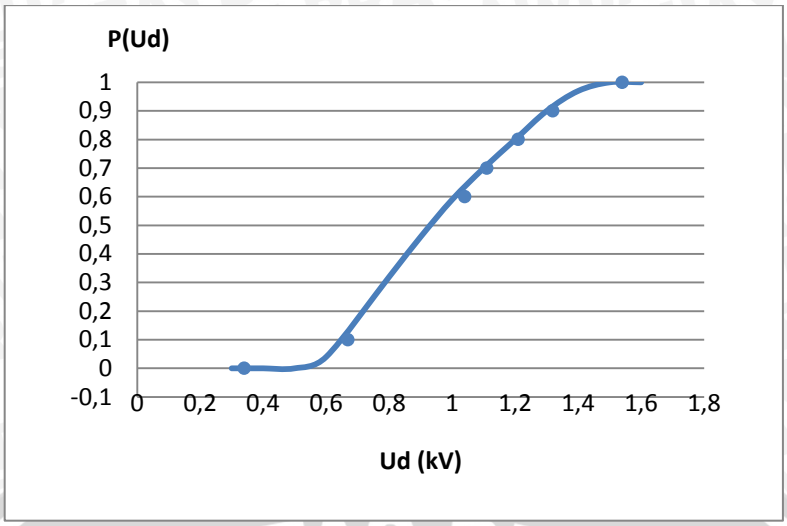
Tabel 4.9 Hasil perhitungan probabilitas

U_d (kV)	P(U_d)
0,3	0,00
0,4	0,00
1,0	0,59
1,1	0,70
1,2	0,80
1,3	0,9
1,5	1,00

Sumber : Hasil perhitungan

Dengan menggunakan Tabel 4.9, diperoleh hubungan antara probabilitas tembus P(U_d) terhadap tegangan impuls U_d dari hasil pengujian, berupa grafik probabilitas tembus hasil pengujian dengan pendekatan kurva distribusi normal (Gauss).

Gambar 4.14 adalah grafik probabilitas tembus hasil pengujian dengan pendekatan kurva distribusi normal (Gauss) untuk panjang sela 15 mm.



Gambar 4.14 Grafik probabilitas tembus dengan panjang sela 15 mm
Sumber : Hasil pengujian

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

$$0{,}95 = \frac{1}{0{,}15\sqrt{2\pi}} e^{(Ud-1{,}26)^2/2(0{,}15)^2}$$

$$0{,}95 \text{ x } 0{,}15 \text{ x } \sqrt{2\pi} = e^{\frac{(Ud-1{,}26)^2}{2(0{,}15)^2}}$$

$$\ln 0{,}3571 = e^{\frac{(Ud-1{,}26)^2}{2(0{,}15)^2}} \ln e$$

$$2(0{,}15)^2 . 1{,}0297 = (U_d - 1{,}26)^2$$

$$\sqrt{2(0{,}15)^2 . 1{,}0297} = U_d - 1{,}26$$

$U_d = 1{,}46$ kV

Sehingga, dengan menggunakan perhitungan akan didapatkan nilai sebagai berikut :

$U_{d\text{-}5} = 0{,}65$ kV

$U_{d\text{-}50} = 0{,}94$ kV

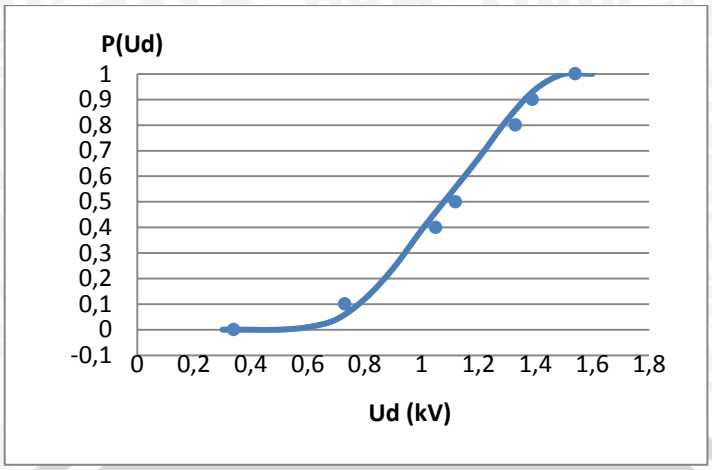
$U_{d\text{-}95} = 1{,}46$ kV

Dengan cara yang sama, akan didapatkan grafik probabilitas tembus hasil pengujian dengan pendekatan kurva distribusi normal (Gauss) didapatkan nilai mean μ dan nilai deviasi standar σ sesuai Persamaan (2.12) dan (2.13), yaitu :

$\mu = 1{,}33$ kV

$\sigma = 0{,}2$ kV

Gambar 4.15 adalah grafik probabilitas tembus hasil pengujian dengan pendekatan kurva distribusi normal (Gauss) untuk panjang sela 10 mm.



Gambar 4.15 Grafik probabilitas tembus dengan panjang sela 10 mm
Sumber : Hasil pengujian

Dengan menggunakan kurva distribusi normal (Gauss), nilai-nilai karakteristik penting akan didapatkan yaitu :

$U_{d\text{-}5}$ = 0,73 kV

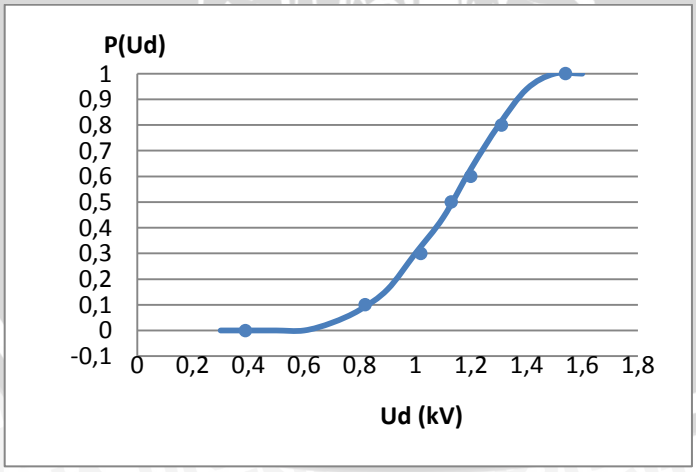
$U_{d\text{-}50}$ = 1,10 kV

$U_{d\text{-}95}$ = 1,42 kV.

Setelah itu juga akan didapatkan grafik probabilitas tembus hasil pengujian dengan pendekatan kurva distribusi normal (Gauss) dengan :

μ = 1,26 kV

σ = 0,21 kV



Gambar 4.16 Grafik probabilitas tembus dengan panjang sela 20 mm
Sumber : Hasil pengujian

Gambar 4.16 adalah grafik probabilitas tembus hasil pengujian dengan pendekatan kurva distribusi normal (Gauss) untuk panjang sela 20 mm.

Dengan menggunakan kurva distribusi normal (Gauss), nilai-nilai karakteristik penting akan didapatkan, yaitu :

$U_{d\text{-}5}$ = 0,74 kV

$U_{d\text{-}50}$ = 1,14 kV

$U_{d\text{-}95}$ = 1,45 kV

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

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Untuk mendapatkan level proteksi 1,5 kV variabel penelitian yang dilakukan yaitu dengan merubah jarak sela, setelah itu dilakukan pengujian untuk mendapatkan level proteksi yang sesuai. Apabila tidak sesuai dilakukan perbesaran dimensi elektroda (panjang sela), dan dilakukan pengujian lagi hingga mendapatkan level proteksi yang sesuai. Lalu dilakukan analisis v-t curve untuk mendapatkan waktu potong dan tegangan potong, serta menganalisis probabilitas tembus arester hasil perancangan.
2. Dimensi arester PCB yang memberikan level proteksi 1,5 kV adalah dengan jarak sela udara sebesar 0,3 mm dan panjang sela sebesar 20 mm.
3. Pada pengujian *v-t curve* menunjukkan bahwa arester PCB selalu memotong di bagian muka gelombang impuls. Pada tegangan dengan amplitudo sebesar 13 kV mampu memotong dalam waktu 100 ns.
4. Pada kurva probabilitas tembus menunjukkan bahwa arester PCB akan memotong tegangan impuls dengan amplitudo sebesar 1,5 kV dengan probabilitas tembus sebesar 100%.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pengujian maka disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut agar dapat menyempurnakan penelitian ini, hal–hal tersebut meliputi :

1. Dalam pembuatan jarak sela dan perubahan panjang sela pada arester PCB diharapkan agar lebih memperhatikan kerataan pada tembaga.
2. Perlu dilakukan percobaan untuk beragam jenis bentuk dan bahan elektroda, sehingga dapat disimpulkan bentuk dan elektroda yang paling baik untuk memotong tegangan impuls.

DAFTAR PUSTAKA

Arismunandar, A., Prof. Dr. 1983. Teknik Tegangan Tinggi Suplemen. Jakarta: Ghalia Indonesia.

Arismunandar,A. 1984. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta : PT. Pradnya Paramita

Daud, Obed Bekak. 2011. *Pemanfaatan Elektroda Koaksial Sebagai Peralatan Proteksi Tegangan Lebih pada Peralatan Listrik Tegangan Rendah*. Tesis. Malang : Jurusan Elektro FTUB.

Dhofir, Moch , dkk. 2013. *Aplikasi PCB sebagai Pemotong Tegangan Lebih Surja Petir*. Malang : Jurusan Elektro FTUB.

Frisko, Andri Utama. 2003. *Realisasi Prototipe Arester Jenis Kancing untuk Proteksi Peralatan Tegangan Rendah dan Pengujian Karakteristik v-t*. Skripsi. Malang : Jurusan Elektro FTUB.

Hauschild, W, Mosch, W.1992. *Statistical Techniques for High Votage Engineering*, London : Peter Peregrinus Ltd.

Kind, Dieter. 1993. Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi. Bandung: Penerbit ITB.

Mansuri. 2002. Perencanaan dan Pembuatan Prototipe Arester Jenis Kancing untuk Proteksi Tegangan Rendah. Skripsi. Malang : Jurusan Elektro FT UB.

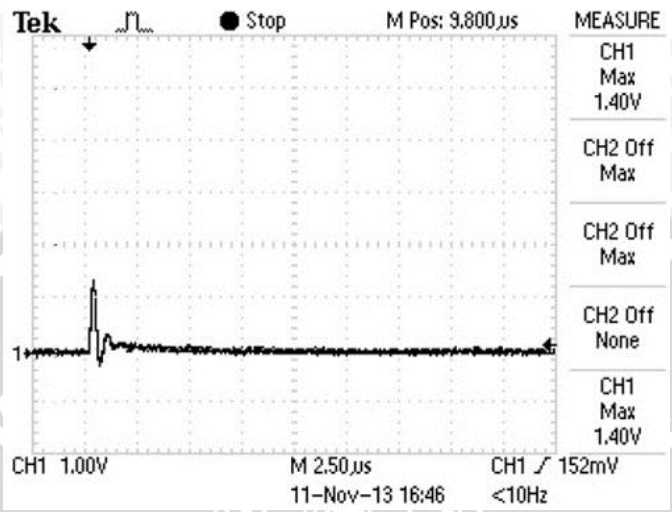
Naidu, M. S., Kamaraju, V. 1982. High Voltage Engineering. New Delhi : Tata Mc. Graw-Hill Publishing Co. Ltd.

Nikolas, Windra Pradana. 2006. *Pengaruh Perbesaran Diameter Elektroda Sela Udara Terhadap Karakteristik Volt-Waktu pada Arester Tegangan Rendah.* Skripsi. Malang : Jurusan Elektro FTUB.

Sirait, K.T. dan Zorro (1987), *Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik*. Bandung : ITB

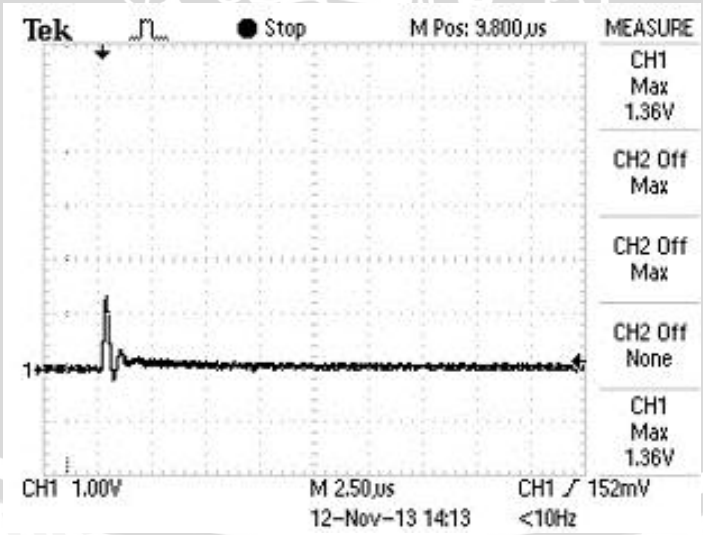
LAMPIRAN

Lampiran 1 Gambar gelombang impuls terpotong



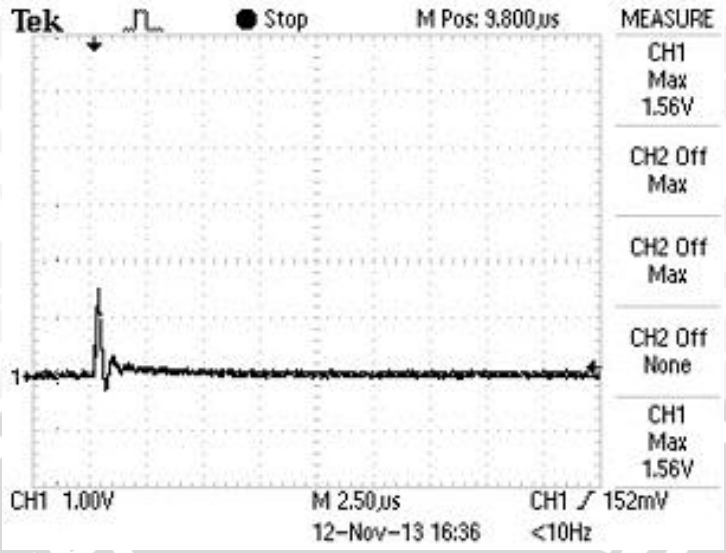
Gambar gelombang impuls 1,2/50µs pengujian fasa-ground panjang sela 10 mm dan jarak sela 0,3 mm

Sumber : Hasil pengujian



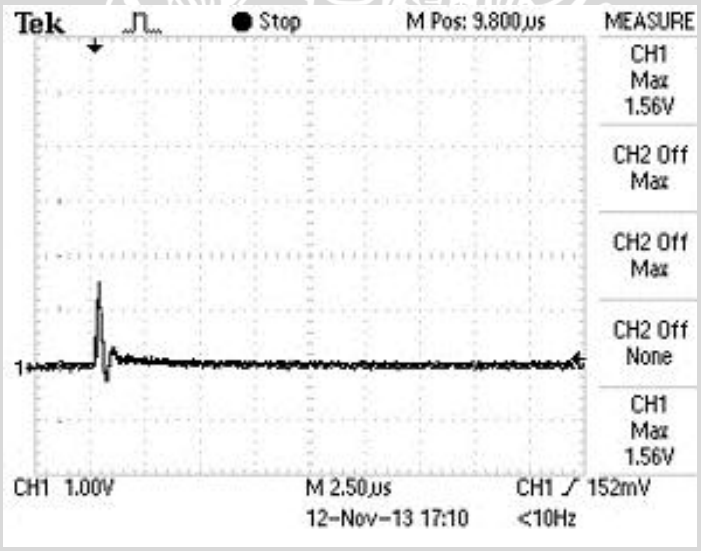
Gambar gelombang impuls 1,2/50µs pengujian netral-ground panjang sela 10 mm dan jarak sela 0,3 mm

Sumber : Hasil pengujian



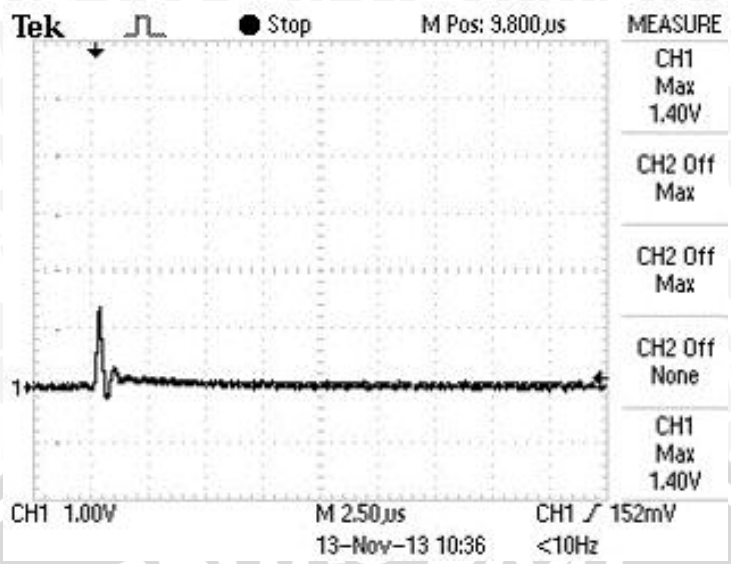
Gambar gelombang impuls 1,2/50µs pengujian fasa-ground panjang sela 15 mm dan jarak sela 0,3 mm

Sumber : Hasil pengujian



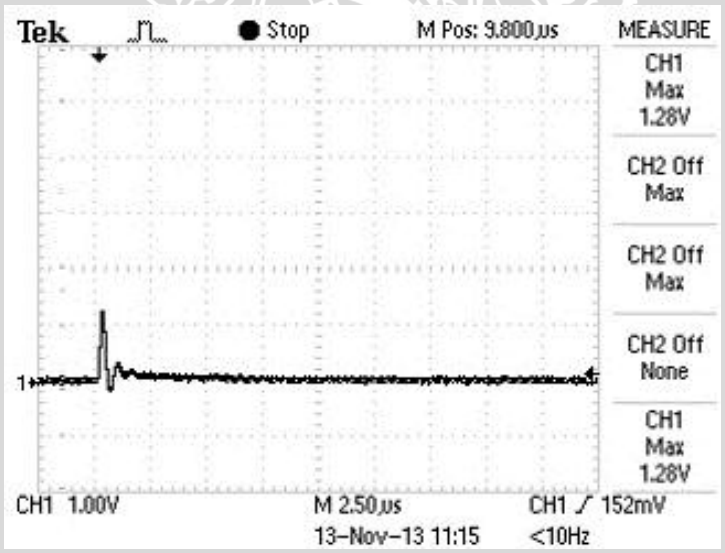
Gambar gelombang impuls 1,2/50µs pengujian netral-ground panjang sela 15 mm dan jarak sela 0,3 mm

Sumber : Hasil pengujian



Gambar gelombang impuls 1,2/50µs pengujian fasa-ground panjang sela 20 mm dan jarak sela 0,3 mm

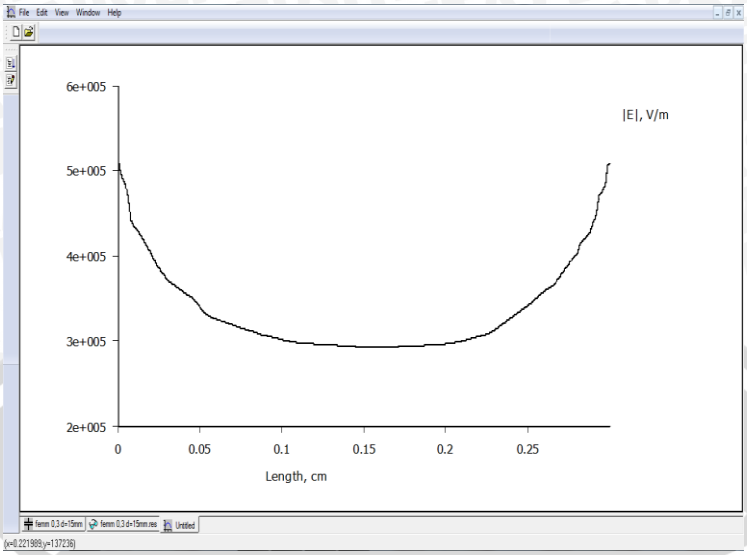
Sumber : Hasil pengujian



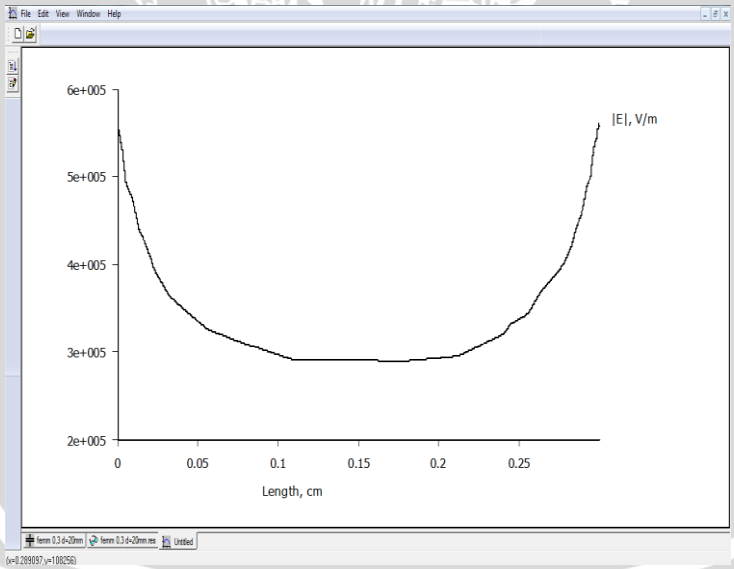
Gambar gelombang impuls 1,2/50µs pengujian netral-ground panjang sela 20 mm dan jarak sela 0,3 mm

Sumber : Hasil pengujian

Lampiran 2 Grafik Kuat Medan Listrik



Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (*Magnitude of Field Intensity*, $|E|$) pada pinggir elektroda panjang sela 10 mm



Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (*Magnitude of Field Intensity*, $|E|$) pada pinggir elektroda panjang sela 15 mm

Lampiran 3 Foto Arester PCB (*Printed Circuit Board*)

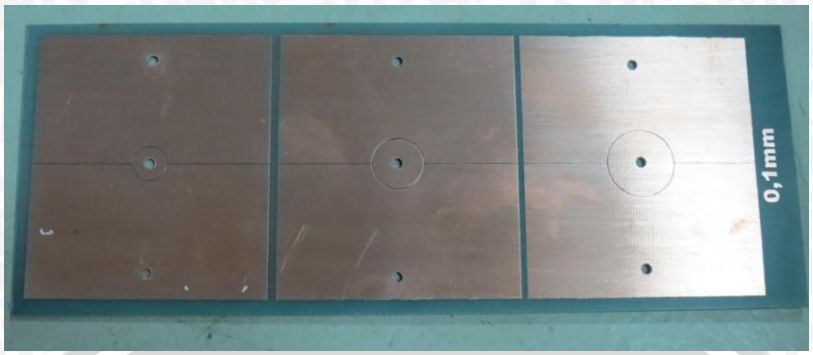


Foto Arester PCB (*Printed Circuit Board*) jarak sela 0,1 mm

Foto Arester PCB (*Printed Circuit Board*) jarak sela 0,2 mm

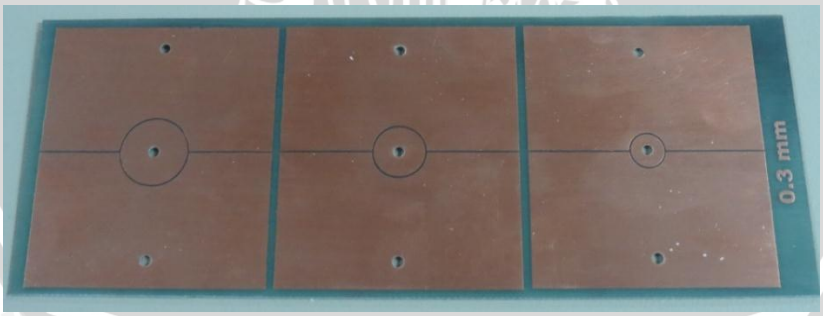


Foto Arester PCB (*Printed Circuit Board*) jarak sela 0,3 mm

Foto Rangkaian Pengujian Arester PCB (*Printed Circuit Board*)

Foto Arester PCB (*Printed Circuit Board)* terpasang Paralel dengan Lampu 220 V sebelum diuji

Foto Arester PCB (*Printed Circuit Board)* terpasang Paralel dengan Lampu 220 V setelah diuji

Foto pengujian arester PCB (*Printed Circuit Board*) terhadap tegangan AC

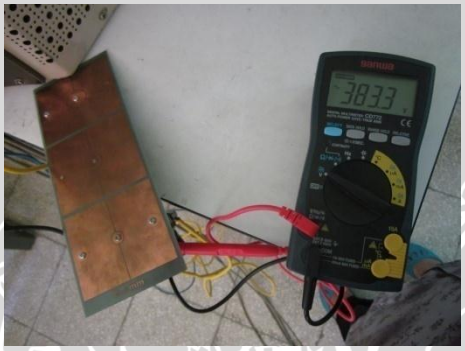


Foto pengujian arester PCB (*Printed Circuit Board*) terhadap tegangan AC

Foto pengujian arester PCB (*Printed Circuit Board*) terhadap tegangan AC

Lampiran 4 Tabel Pengujian Probabilitas Tembus

No.	Ud (kV)	Pengujian ke-										P (Ud) %
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0.34	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0
2	0.73	√	x	x	x	x	x	x	x	x	x	10
3	1.05	√	x	x	x	x	√	√	x	x	√	40
4	1.12	√	x	x	√	√	x	x	x	√	√	50
5	1.33	√	√	√	x	√	√	x	√	√	√	80
6	1.39	√	√	√	√	x	√	√	√	√	√	90
7	1.54	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	100

Tabel hasil pengujian probabilitas tembus pada perubahan panjang sela 10 mm
Sumber : Hasil pengujian

No.	Ud (kV)	Pengujian ke-										P (Ud) %
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0.39	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0
2	0.82	√	x	x	x	x	x	x	x	x	x	10
3	1.02	√	x	x	x	x	√	√	x	x	x	30
4	1.13	√	x	x	√	√	x	x	x	√	√	50
5	1.20	√	√	x	x	√	√	x	x	√	√	60
6	1.31	√	√	√	√	x	√	x	√	√	√	80
7	1.54	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	100

Tabel hasil pengujian probabilitas tembus pada perubahan panjang sela 20 mm
Sumber : Hasil pengujian

U_d (kV)	$P(U_d)$
0,3	0,00
0,7	0,04
0,9	0,24
1,0	0,39
1,3	0,82
1,5	1,00
1,6	1,00

Tabel hasil perhitungan probabilitas tembus pada panjang sela 10 mm
Sumber : Hasil perhitungan

U_d (kV)	$P(U_d)$
0,3	0,00
0,7	0,03
0,9	0,16
1,0	0,3
1,3	0,8
1,5	1,00
1,6	1,00

Tabel hasil perhitungan probabilitas tembus pada panjang sela 20 mm
Sumber : Hasil perhitungan

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA