

**ARESTER PCB (*PRINTED CIRCUIT BOARD*) BENTUK BAJI
SEBAGAI ALTERNATIF PEMOTONG TEGANGAN LEBIH IMPULS**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



TITO ARDIANSYAH PUTRA
NIM. 125060300111080

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2016

repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN

ARESTER PCB (*PRINTED CIRCUIT BOARD*) BENTUK BAJI

SEBAGAI ALTERNATIF PEMOTONG TEGANGAN LEBIH IMPULS

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



TITO ARDIANSYAH PUTRA

NIM. 125060300111080

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 15 Juli 2016

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Drs. Ir. Moch Dhofir, M.T.
NIP. 19600701 199002 1 001

Ir. Hery Purnomo, M.T.
NIP. 19550708 198212 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Azis Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001



JUDUL SKRIPSI:

**ARESTER PCB (*PRINTED CIRCUIT BOARD*) BENTUK BAJI SEBAGAI
ALTERNATIF PEMOTONG TEGANGAN LEBIH IMPULS**

Nama Mahasiswa : Tito Ardiansyah Putra

NIM : 125060300111080

Program Studi : Teknik Elektro

Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik

KOMISI PEMBIMBING :

Ketua : Drs. Ir. Mochammad Dhofir, M.T.

Anggota : Ir. Hery Purnomo, M.T.

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji I : Dr. Rini Nur H., S.T., M.Sc.

Dosen Penguji II : Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.

Dosen Penguji III : Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.

Tanggal Ujian : 23 Juni 2016

SK Penguji : 781/UN10.6/SK/2016

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam Naskah Skripsi adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik disuatu perguruan tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah Skripsi ini dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 15 Juni 2016

Mahasiswa

Materai 6000

Tito Ardiansyah Putra

NIM. 125060300111080



RINGKASAN

Tito Ardiansyah Putra, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Juni 2016. **Arrester PCB (*Printed Circuit Board*) Bentuk Baji Sebagai Alternatif Pemotong Tegangan Lebih Impuls**. Dosen Pembimbing : Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. dan Ir. Hery Purnomo, M.T.

Skripsi ini menguraikan tentang rekayasa arrester sela udara sebagai pemotong tegangan lebih impuls dengan menggunakan PCB (*Printed Circuit Board*) berbentuk baji. Perancangan arrester disesuaikan dengan standar DIN VDE 0110/IEC Publ.664a yang termasuk dalam kategori 1 dengan tingkat proteksi 1,5 kV. Susunan elektroda menggunakan bahan PCB karena lebih ekonomis dan rekayasanya lebih mudah. Variabel pengujian yang dilakukan yaitu meliputi pengaruh jarak sela dan sudut baji terhadap tegangan potong yang dihasilkan. Jarak sela yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 5 variasi ukuran yaitu 0,3 mm; 0,4 mm; 0,5 mm; 0,6 mm; dan 0,8 mm, sedangkan untuk ukuran sudut baji terdiri dari 3 ukuran yaitu 15°, 30°, dan 60°. Pengukuran nilai tegangan potong dilakukan dengan menggunakan variasi tegangan uji yang hasilnya akan ditampilkan pada osiloskop. Pada Penelitian ini dilakukan juga pengujian pengaruh perbesaran arrester dan analisis karakteristik tegangan-waktu arrester.

Dari hasil analisis diperoleh kesimpulan pengaruh dari penambahan jarak sela dan sudut baji yaitu meningkatkan nilai tegangan potong arrester. Kemudian dilakukan pengujian perbesaran arrester dengan susunan keping elektroda, dimana semakin banyak susunan keping elektroda, maka tegangan potong yang dihasilkan akan semakin kecil. Selanjutnya dilakukan pengujian dan analisis kurva karakteristik tegangan-waktu arrester. Semakin tinggi amplitudo tegangan impuls maka semakin tinggi pula tegangan potongnya, sedangkan waktu potongnya akan semakin kecil. Berdasarkan pengujian maka didapatkan pemotong tegangan lebih impuls dengan menggunakan elektroda PCB bentuk baji untuk tingkat proteksi 1,5 kV dengan dimensi jarak sela 0,3 mm dan sudut baji 30°, serta 15 susunan keping elektroda.

Kata kunci – tegangan lebih impuls, arrester PCB, karakteristik tegangan-waktu

SUMMARY

Tito Ardiansyah Putra, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya. June 2016. **Arresters PCB (Printed Circuit Board) with Appearance Sharp As An Alternative Cutting Overvoltage Impuls**. Academic Supervisor : Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. dan Ir. Hery Purnomo, M.T.

This thesis describes the result of research about arresters air gap design for cutting impulse overvoltage by using PCB (Printed Circuit Board) that wedge-shaped. Design arrester adapted to the standard DIN VDE 0110 / IEC Publ.664a included in category 1 with a protection level of 1.5 kV. The material of the electrode using PCB because it is more economical and engineering easier. Variables observed that is the effect of gap distance and angle of the wedge to the residual voltage generated. Distance air gap used in this study consisted of five variations in sizes of 0.3 mm; 0.4 mm; 0.5 mm; 0.6 mm; and 0.8 mm, while the size of the wedge angle consists of three sizes of 15°, 30°, and 60°. Measurement of the value of the residual voltage is using variation of test voltage that results will be displayed on the oscilloscope. This research was conducted also on the influence of magnification arrester testing and analysis of the characteristics of voltage-time arresters.

From the analysis we concluded the effect of the addition of air gap distance and angle wedge that increase the value of the residual voltage arresters. Then testing magnification arresters with electrode arrangement of pieces, where the addition each electrode arrangement of pieces, the residual voltage generated will be smaller. Furthermore testing and analysis of voltage-time characteristic curve arresters. The higher the amplitude of the voltage impulse, the residual voltage getting higher, while the time of intersection getting smaller. From the test results, obtained residual voltage of impulse overvoltage by using electrodes PCB wedge-shaped for protection level of 1.5 kV with distance of gap 0.3 mm, wedge angle of 30°, and 15 pieces of the arrangement of pieces electrode.

Keywords – impulse overvoltage, PCB arresters, voltage-time characteristics

PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT dengan rahmat dan hidayah-Nya skripsi berjudul “Studi Pemanfaatan Arang Kulit Buah Kakao Untuk Menurunkan Resistansi Pentanahan Jenis Elektroda Plat Berbentuk Lingkaran” dapat terselesaikan. Dalam kesempatan ini diucapkan terima kasih kepada yang telah berkenan memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung kepada:

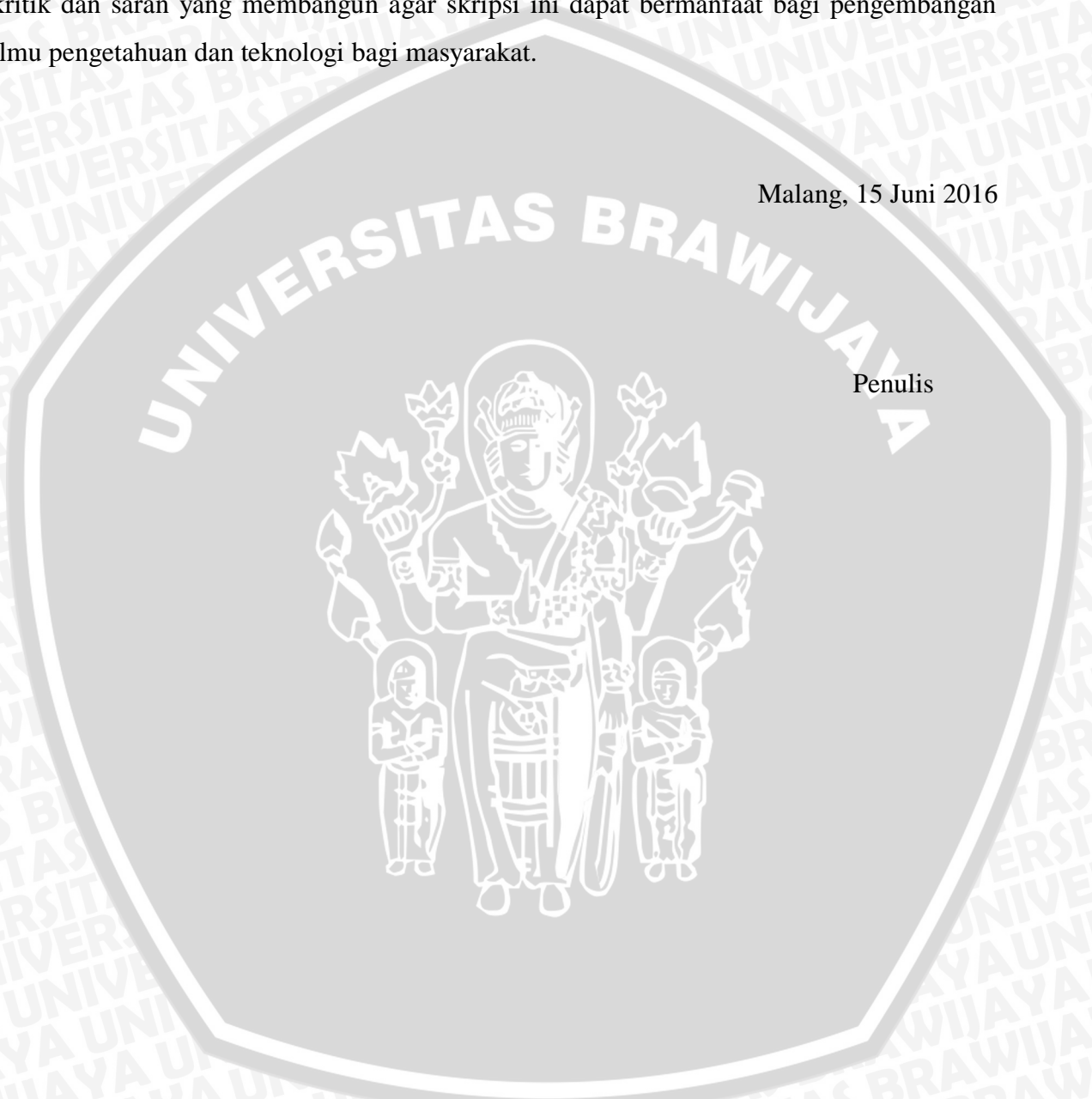
1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
2. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. dan Bapak Ali Mustofa S.T., M.T. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik dan Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Drs. Ir. Moch Dhofir, M.T. dan Bapak Ir. Hery Purnomo, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi atas segala bimbingan, kritik, dan saran yang telah diberikan.
4. Ir. Nanang Sulistyanto, M.T. selaku dosen pembimbing akademik, beserta seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro yang selalu membantu selama perkuliahan.
5. Keluarga tercinta Ayahanda Sudaryanto dan Ibunda Pantjastuti Utari yang selalu memberikan kasih sayang dan do'anya yang tiada akhir, serta adek-adek tercinta Raditya Aryansyah Putra, dan Intan Yanrisyah Putri atas segala macam dukungan yang telah diberikan.
6. Seluruh Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang telah turut andil memberikan memberikan waktu, tenaga, pikiran, kebersamaan, semangat, dan saling mendukung dalam pengerjaan skripsi.
7. Seluruh teman-teman angkatan 2012 (Voltage), terutama teman-teman konsentrasi Teknik Energi Elektrik (Power 2012) yang telah berbagi suka dan duka dalam perkuliahan dan memberikan semangat dalam proses pengerjaan skripsi ini.
8. Seluruh anggota Workshop terutama Divisi Mikrokontroler yang telah memberikan pengalaman dan pembelajaran selama perkuliahan ini.
9. Seluruh teman-teman BK atas bantuan, motivasi, kerjasama, dan kebersamaan dalam proses pengerjaan skripsi.
10. Teman-teman Praktek Kerja Lapangan di GI Sengkaling atas kerjasama dan pengalaman selama praktek dan perkuliahan.

11. Semua pihak yang telah membantu dan tidak bisa disebut satu persatu, terimakasih banyak atas semua bantuannya.

Disadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi bagi masyarakat.

Malang, 15 Juni 2016

Penulis



DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan	3
1.5. Sistematika Penulisan	3
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Arester.....	5
2.1.1 Arester Tegangan Rendah.....	5
2.1.2 Arester PCB	6
2.2 Tegangan Lebih	7
2.2.1 Pemotongan Tegangan Lebih	8
2.2.2 Karakteristik Tegangan-Waktu.....	8
2.2.3 Tingkat Isolasi Dasar dan Koordinasi Isolasi	9
2.3 Tegangan Impuls.....	10
2.3.1 Parameter Tegangan Impuls	11
2.3.2 Pembangkitan Tegangan Impuls.....	12
2.4 Faktor Efisiensi Medan Listrik	13
2.5 Hukum Perbesaran (Enlargement Law).....	15
BAB III.....	17
METODE PENELITIAN	17
3.1 Studi Literatur	17
3.2 Variabel Penelitian.....	17
3.3 Objek Uji.....	17

3.4	Diagram Alir Penelitian	18
3.5	Perencanaan Arester.....	18
3.6	Pembuatan Arester Bentuk Baji.....	18
3.6.1	Jarak Sela	19
3.7	Bahan dan Peralatan.....	19
3.7.1	Fungsi Peralatan.....	20
3.8	Rangkaian Pengujian	21
3.9	Pembumian	21
3.10	Langkah-langkah Pengujian.....	22
3.11	Analisis Data	22
BAB IV		23
HASIL DAN PEMBAHASAN		23
4.1	Spesifikasi Arester PCB.....	23
4.2	Penentuan Dimensi Arester.....	23
4.2.1	Perkiraan Tegangan Tembus pada Elektroda Sela Udara.....	24
4.2.2	Karakteristik Jarak Sela Arester Terhadap Tegangan Potong	24
4.2.3	Karakteristik Sudut Baji Terhadap Tegangan Potong.....	33
4.2.4	Pengaruh Perbesaran dengan Susunan Keping Elektroda Terhadap Tegangan Potong	35
4.3	Analisis Distribusi Medan Listrik Pada Sela Udara	38
4.4	Efisiensi Medan Listrik.....	39
4.5	Perancangan Arester PCB Bentuk Baji.....	40
4.5.1	Bentuk Geometri.....	40
4.5.2	Jarak Sela Arester	40
4.5.3	Sudut Baji.....	41
4.5.4	Perbesaran Arester	42
4.6	Pengujian Tegangan Tembus Arester dengan Metode Naik-Turun	43
4.7	Karakteristik Tegangan Waktu Arester	44
BAB V		49
PENUTUP		49
5.1.	Kesimpulan	49
5.2	Saran	49
DAFTAR PUSTAKA.....		51



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bentuk elektroda GDT.....	6
Gambar 2.2 Arester PCB.....	7
Gambar 2.3 Lengkung volt-waktu.....	8
Gambar 2.4 Karakteristik tegangan impuls-waktu.....	9
Gambar 2.5 Bentuk gelombang impuls tegangan tinggi.....	11
Gambar 2.6 Parameter tegangan uji impuls petir standar.....	11
Gambar 2.7 Rangkaian Pembangkitan Tegangan Impuls.....	12
Gambar 2.8 Perbesaran dimensi elektroda.....	15
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Pembuatan Arester.....	18
Gambar 3.2 Bentuk Geometri Rancang Bangun Arester.....	19
Gambar 3.3 Rangkaian percobaan pembangkitan tegangan impuls 1,2/50 μ s.....	21
Gambar 4.2 Arester Baji Model B.....	28
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Jarak Sela Arester Model A Terhadap Tegangan Potong....	32
Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Jarak Sela Arester Model B Terhadap Tegangan Potong....	32
Gambar 4.5 Grafik Pengaruh Sudut Baji Terhadap Tegangan Potong.....	34
Gambar 4.6 Grafik Pengaruh Perbesaran Arester Terhadap Tegangan Potong.....	36
Gambar 4.7 Perencanaan dan Distribusi Medan Listrik dengan Program FEMM 4.2.....	38
Gambar 4.8 Hasil Simulasi Grafik Kuat Medan Listrik.....	39
Gambar 4.9 Bentuk Geometri Rancang Bangun Arester PCB Bentuk Baji.....	40
Gambar 4.10 Jarak Sela yang Dipilih.....	41
Gambar 4.11 Pengujian Tegangan Tembus Arester dengan Metode Naik-Turun.....	43
Gambar 4.12 Gelombang Impuls Sebelum Terpotong.....	45
Gambar 4.13 Gelombang Impuls Setelah Terpotong.....	45
Gambar 4.14 Karakteristik Tegangan-Waktu Arester PCB Bentuk Baji.....	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kategori peralatan yang dilindungi 10

Tabel 4.1 Pengujian Jarak Sela 0,3 mm Arester Model A Terhadap Tegangan Potong 25

Tabel 4.2 Pengujian Jarak Sela 0,4 mm Arester Model A Terhadap Tegangan Potong 25

Tabel 4.3 Pengujian Jarak Sela 0,5 mm Arester Model A Terhadap Tegangan Potong 26

Tabel 4.4 Pengujian Jarak Sela 0,6 mm Arester Model A Terhadap Tegangan Potong 27

Tabel 4.5 Pengujian Jarak Sela 0,8 mm Arester Model A Terhadap Tegangan Potong 27

Tabel 4.6 Pengujian Jarak Sela 0,3 mm Arester Model B Terhadap Tegangan Potong 28

Tabel 4.7 Pengujian Jarak Sela 0,4 mm Arester Model B Terhadap Tegangan Potong 29

Tabel 4.8 Pengujian Jarak Sela 0,5 mm Arester Model B Terhadap Tegangan Potong 30

Tabel 4.9 Pengujian Jarak Sela 0,6 mm Arester Model B Terhadap Tegangan Potong 30

Tabel 4.10 Pengujian Jarak Sela 0,8 mm Arester Model B Terhadap Tegangan Potong ... 31

Tabel 4.11 Pengujian Pengaruh Sudut Baji Terhadap Tegangan Potong 33

Tabel 4.12 Perbandingan Data Pengujian Pengaruh Sudut Baji Terhadap Tegangan Potong
Arester 35

Tabel 4.13 Pengaruh Perbesaran Arester Terhadap Tegangan Potong Arester 36

Tabel 4.14 Perbandingan Data Pengujian Pengaruh Perbesaran Arester Terhadap Tegangan
Potong Arester 37

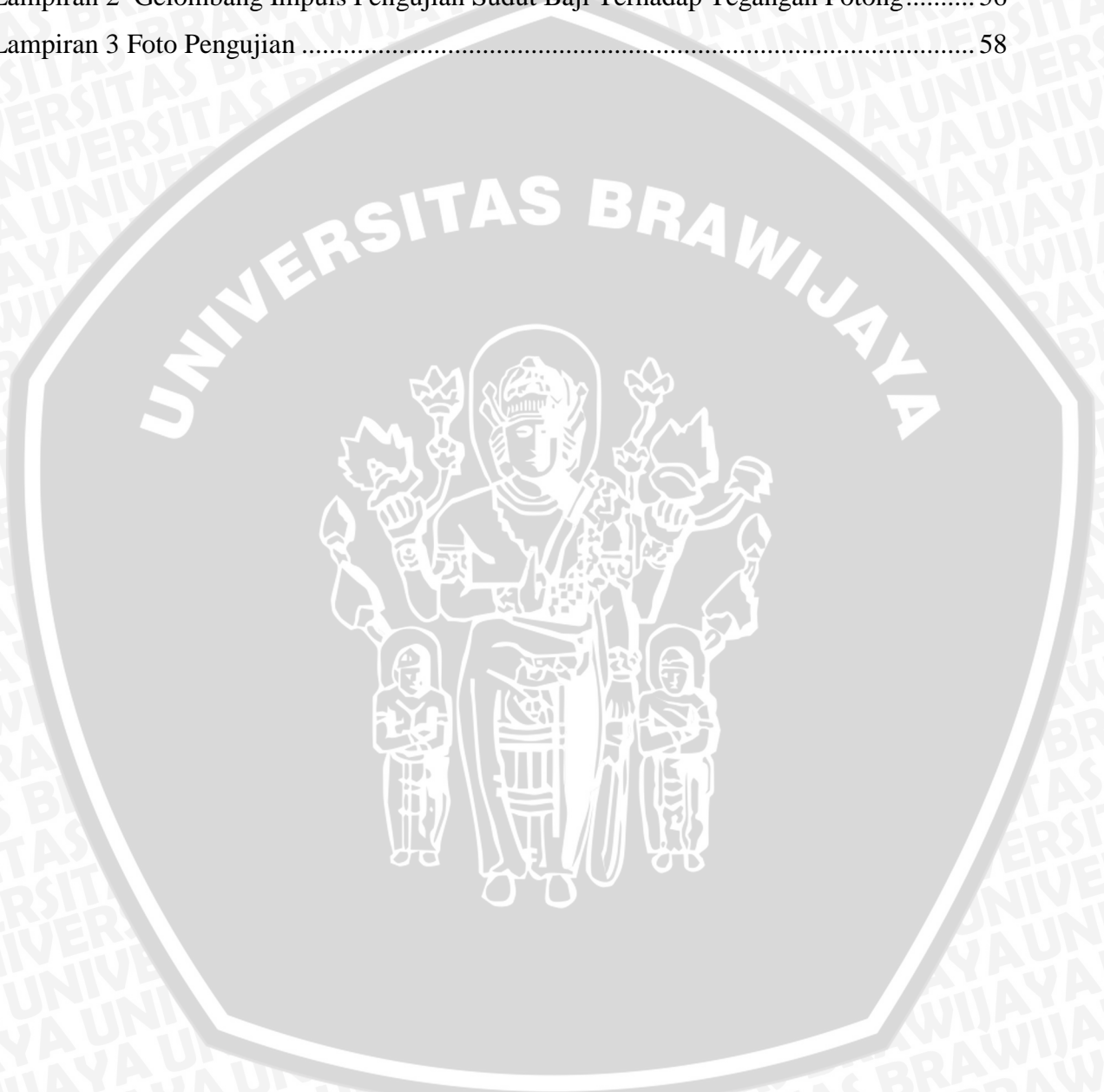
Tabel 4.15 Pengujian tegangan tembus arester 44

Tabel 4.16 Pengujian Karakteristik Tegangan – Waktu Arester PCB Bentuk Baji 46



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Gelombang Impuls Pengujian Pengaruh Jarak Sela Terhadap Tegangan Potong.....	54
Lampiran 2 Gelombang Impuls Pengujian Sudut Baji Terhadap Tegangan Potong.....	56
Lampiran 3 Foto Pengujian	58



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

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

Posisi geografis Indonesia yang terletak pada iklim tropis menyebabkan kejadian frekuensi petir di Indonesia sangat besar yaitu $12/\text{km}^2/\text{tahun}$ yang berarti setiap luas area 1 km^2 berpotensi menerima sambaran sebanyak 12 kali setiap tahunnya (LAPAN, 2014). Hal ini menunjukkan bahwa ancaman kerusakan peralatan elektronik akibat tegangan lebih impuls yang ditimbulkan oleh sambaran petir menjadi lebih besar. Selain itu, gangguan tegangan lebih impuls juga dapat terjadi dari faktor internal seperti surja hubung. Salah satu cara perlindungan peralatan elektronik dari tegangan lebih impuls adalah menggunakan arester.

Arester merupakan suatu alat pelindung bagi peralatan sistem tenaga listrik dari tegangan lebih (Bonggas, 2014:161). Alat pelindung terhadap gangguan surja ini berfungsi melindungi peralatan sistem tenaga listrik dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang masuk ke sistem dan mengalirkannya ke tanah. Selain dari faktor eksternal seperti sambaran petir, tegangan lebih juga dapat timbul karena faktor internal seperti surja hubung. Sehingga sebagai upaya untuk melindungi dan menambah usia dari suatu peralatan, pemakaian arester menjadi sering digunakan.

Setiap arester memiliki karakteristik pemotongan yang berbeda, yakni meliputi besarnya tegangan potong dan waktu potong. Karakteristik inilah yang menentukan arester ini dipasang pada sistem dengan tegangan rendah atau tinggi. Terdapat beberapa jenis arester yang biasa digunakan yaitu arester jenis ekspulsi (*expulsion type*), arester katup (*valve type*), dan arester jenis kancing (*gas discharge tube*).

Pada sistem tegangan rendah arester yang sering digunakan yaitu arester jenis kancing. Arestor ini memiliki bentuk elektroda berupa kepingan logam berbentuk piringan yang disusun sejajar. Dalam proses pembuatannya, arester jenis kancing ini memiliki beberapa kerumitan salah satunya pembentukan elektroda piring yang rata dan harus memiliki jarak yang sama antar elektrodanya. Seiring dengan semakin meningkatnya kebutuhan akan arester, oleh karena itu perlu kiranya untuk memproduksi arester dengan bentuk elektroda yang lebih sederhana yaitu dengan menggunakan PCB (*Printed Circuit Board*). Penggunaan bahan PCB sebagai arester merupakan suatu inovasi yang memudahkan setiap orang untuk membuat arester sendiri karena bahannya yang mudah didapat dan biayanya yang murah. Menurut DIN VDE/IEC Publ.664, terdapat 4 kategori pemotongan peralatan listrik. Peralatan kategori IV memiliki ketahanan impuls 6 kV. Kategori III memiliki ketahanan impuls hingga 4 kV. Kategori II memiliki ketahanan impuls hingga 2,5 kV. Kategori I memiliki ketahanan impuls hingga 1,5 kV.

Penelitian tentang rekayasa arester PCB telah dilakukan pada peralatan listrik 3 fasa dengan tingkat proteksi 4 kV oleh Desinta Ayu dan pada peralatan listrik 1 fasa dengan tingkat proteksi 1,5 kV oleh Ayu Puspitasari. Pada skripsi Ayu Puspitasari yang berjudul “Rancang Bangun Peralatan Proteksi Lampu Penerangan Jalan Umum 1 Fasa Terhadap Bahaya Surja Petir Menggunakan PCB” dikemukakan bahwa pada penelitian terdapat kesulitan dalam membentuk arester PCB dengan bentuk permukaan yang rata, sehingga perlu adanya percobaan untuk bentuk elektroda yang baik dalam memotong tegangan impuls dengan tegangan proteksi 1,5 kV.

Berdasarkan pembahasan diatas, dalam penelitian ini akan direkayasa sebuah arester sela udara dengan menggunakan PCB (*Printed Circuit Board*) sebagai arester tegangan rendah dengan tingkat proteksi 1,5 kV yang dibentuk baji untuk menguji tingkat tegangan proteksi dan karakteristik impulsnya. Dari karakteristik tersebut akan didapatkan probabilitas tembus dan kelayakan arester untuk memproteksi tegangan. Diharapkan penelitian ini dapat dijadikan sebagai dasar pertimbangan dalam perancangan dan pembuatan arester untuk proteksi tegangan rendah.

1.2. Rumusan Masalah

Sesuai dengan latar belakang di atas maka rumusan masalah yang disusun adalah :

1. Berapa jarak sela dan sudut baji arester PCB bentuk baji dengan perbesaran yang memberikan tingkat proteksi 1,5 kV.

2. Bagaimana karakteristik pemotongan gelombang impuls menggunakan PCB bentuk baji terhadap peralatan listrik tegangan rendah.

1.3. Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas dalam penelitian mencapai sasaran yang diharapkan, maka perlu diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Arester digunakan pada sistem catu daya peralatan listrik tegangan rendah 220V.
2. Pada penelitian ini tingkat tegangan proteksi arester sebesar 1,5 kV.
3. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tegangan impuls 1,2/50 μ s.
4. Kondisi tekanan dan temperatur udara pada ruang pengujian dibuat tetap.
5. Digunakan PCB satu lapis (single layer) dengan bahan PCB yang sama.
6. Sudut baji yang digunakan yaitu 15°, 30°, dan 60°
7. Pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Jurusan teknik Elektro Universitas Brawijaya.

1.4. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan pemotong tegangan lebih impuls menggunakan PCB bentuk baji dengan tingkat proteksi 1,5kV.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian ini meliputi:

- **BAB I. PENDAHULUAN**
Membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan dalam penelitian ini.
- **BAB II. TINJAUAN PUSTAKA**
Membahas tentang dasar teori yang mendukung penelitian dalam penyusunan penelitian.
- **BAB III. METODE PENELITIAN**
Membahas tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini seperti, studi literatur, obyek penelitian, variabel penelitian, perencanaan arester, analisis, serta penarikan kesimpulan.

- **BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Membahas tentang pengujian dan analisis data arester untuk tegangan rendah.

- **BAB V. PENUTUP**

Membahas tentang kesimpulan dan saran sehingga penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dan diaplikasikan dalam kehidupan.

- **DAFTAR PUSTAKA**

Memaparkan tentang sumber-sumber literatur yang digunakan dalam penelitian.







BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Arester

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

Berdasarkan DIN VDE 0110/IEC Publ.664, terdapat 4 kategori ketahanan tegangan surja dan tingkat pemotongan tegangan oleh arester:

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

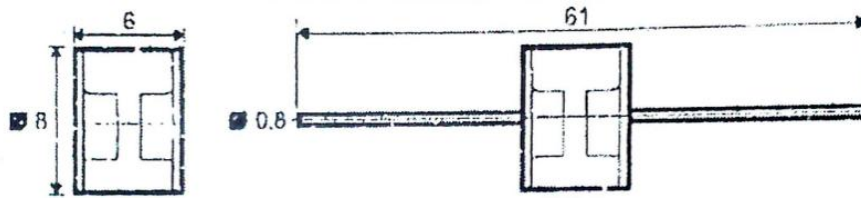
2.1.1 Arester Tegangan Rendah

Arester tegangan rendah merupakan suatu alat pelindung peralatan listrik dari tegangan lebih impuls dengan tingkat pemotongan pada level yang rendah. Terdapat beberapa jenis arester tegangan rendah yang biasa digunakan di lapangan, salah satu yang membedakan diantara arester-arester tersebut adalah bentuk elektrodanya. Bentuk

elektroda ini memiliki pengaruh besar dalam menghasilkan tegangan potong dari suatu arester. Hal ini dapat dijelaskan sesuai dengan persamaan berikut:

$$U_d = E_d \cdot s \cdot \eta \quad (2-1)$$

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



Gambar 2.1 Bentuk elektroda GDT

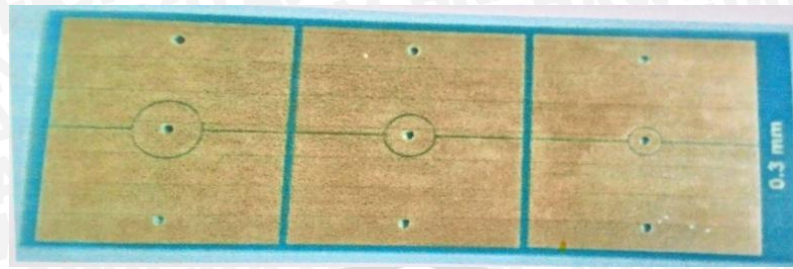
Sumber : Citel –BB GDT Data Sheet, tanpa tahun

Salah satu contoh arester tegangan rendah yaitu arester GDT (*Gas Discharge Tubes*). Bentuk elektroda dari arester GDT seperti terlihat pada Gambar 2.1 yaitu memiliki elektroda piring-piring yang disusun sejajar. Tingkat proteksi GDT dipengaruhi oleh jarak sela elektrodanya dan kondisi tekanan udara dalam tabung arester.

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

2.1.2 Arestor PCB

Sela udara merupakan salah satu komponen pelindung surja primer. Tingkat proteksi dari sela udara ditentukan oleh bentuk, material, dan jarak antar elektroda. Salah satu bentuk inovasi dari arester sela udara adalah arester PCB, seperti terlihat pada Gambar 2.2. Arestor PCB biasanya digunakan pada aplikasi sistem catu daya tegangan rendah. Pengujian arester jenis ini dilakukan antar fasa-ground dimana saat tegangan dinaikkan hingga mencapai nilai tertentu akan terjadi tembus di arester tersebut.



Gambar 2.2 Aresters PCB
Sumber : Puspitasari, 2013:13

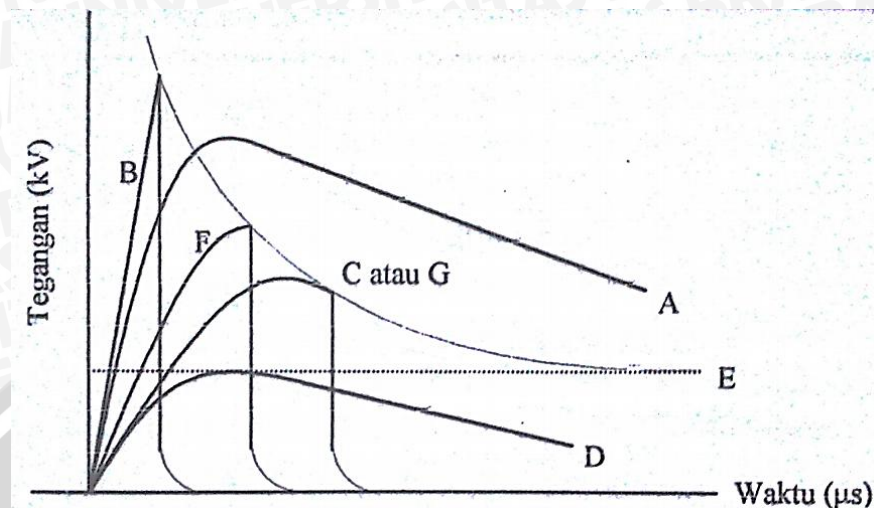
2.2 Tegangan Lebih

Tegangan lebih adalah tegangan pada sistem tenaga listrik yang bersifat temporer dan nilainya melebihi tegangan puncak maksimum sistem. Pada sistem yang mengalami gangguan dapat beroperasi di atas tegangan yang diizinkan, sehingga sistem dinyatakan memikul tegangan lebih. Tegangan lebih mempunyai dampak merusak peralatan elektronik, oleh karena itu peralatan perlu dilindungi agar tidak rusak akibat adanya tegangan lebih. Dilihat dari sumbernya tegangan lebih dibagi dua jenis, yaitu: tegangan lebih internal dan tegangan lebih eksternal.

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 ataupun operasi pembukaan
3. Tegangan lebih sementara (*temporary over voltage*) yang disebabkan oleh sistem

2.2.1 Pemotongan Tegangan Lebih



Gambar 2.3 Lengkung volt-waktu
Sumber : Arismunandar, 1983 : 115

Jika ada surja petir datang ke sebuah peralatan, dapat digambarkan gelombangnya menyerupai karakteristik A pada Gambar 2.3 Surja yang datang ke peralatan sebagai gelombang curam yang terpotong pada mukanya (karakteristik B dan F) atau sebagai gelombang curam yang terpotong pada ekornya (karakteristik C atau G) atau surja yang datang dapat berbentuk gelombang penuh (karakteristik D). Arestor yang ideal adalah arester yang selalu mampu memotong setiap tegangan lebih di bagian muka dan tingkat pemotongan tegangannya selalu sama.

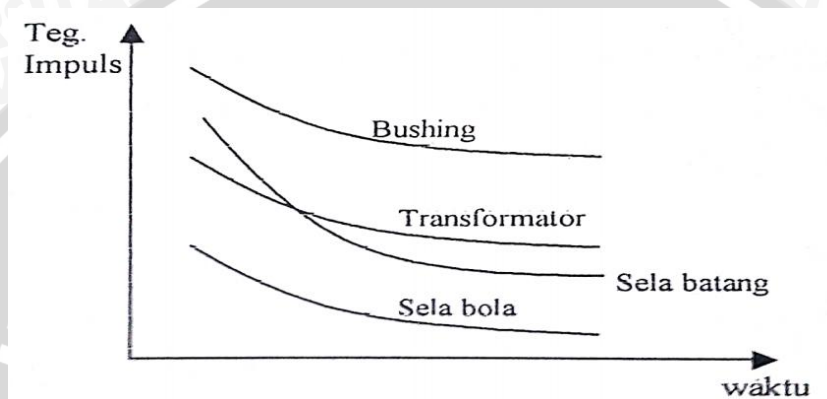
2.2.2 Karakteristik Tegangan-Waktu

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

Karakteristik 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 potong koordinat (t_{potong} , U_{potong}).

2.2.3 Tingkat Isolasi Dasar dan Koordinasi Isolasi

Tingkat Isolasi Dasar atau biasa yang disebut dengan BIL (*Basic Insulation Level*) merupakan batas kekuatan isolasi suatu peralatan untuk menerima tegangan impuls. Selain itu, BIL juga dapat didefinisikan sebagai tingkat-tingkat patokan yang dinyatakan dalam puncak tegangan impuls dengan gelombang standar. Karakteristik kekuatan isolasi peralatan ini sangat penting diketahui, hal ini karena berkaitan dengan perencanaan sistem proteksinya.



Gambar 2.4 Karakteristik tegangan impuls-waktu
Sumber : Naidu dan Kamaraju, 1982 : 24

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

Untuk mendapatkan isolasi yang baik terhadap tegangan impuls, maka karakteristik lengkung v-t sebuah perangkat isolasi haruslah berada di bawah nilai tegangan maksimum yang diperbolehkan masuk ke dalam sistem. Pada Gambar 2.4 dapat dilihat beberapa karakteristik lengkung v-t dari beberapa perangkat isolasi. IEC Report 664 dan DIN VDE 0110 menampilkan suatu dimensi tegangan impuls maksimum yang diperbolehkan masuk ke suatu peralatan dengan tegangan referensi tertentu. Terdapat 4 kategori sesuai dengan jenis peralatan yang dilindungi seperti terlihat pada Tabel 2.1.

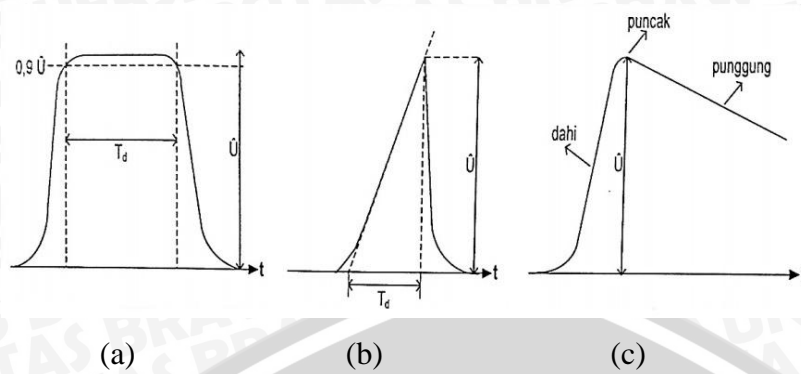
Tabel 2.1 Kategori peralatan yang dilindungi

Kategori	Peralatan yang dilindungi
I	Peralatan telekomunikasi, elektronika, peralatan khusus atau bagian lain dari kategori II
II	Peralatan atau mesin yang mudah dibawa, bagian lain yang berhubungan dengan kategori III
III	Instalasi peralatan yang tidak bergerak dan bagian lain yang berhubungan dengan kategori IV
IV	Jaringan distribusi utama tegangan rendah di atas tanah dan kabel, rel penghubung dan alat pengaman arus lebih yang berhubungan

Sumber : Hasse, 1992 : 73

2.3 Tegangan Impuls

Tegangan impuls merupakan suatu tegangan yang naik mencapai puncaknya secara cepat dan turun secara perlahan menuju nol. Ada tiga bentuk gelombang impuls seperti pada tampak Gambar 2.5 yaitu tegangan impuls persegi, tegangan impuls terpotong (taji), dan tegangan impuls eksponensial ganda. Tegangan impuls persegi mengalami waktu muka yang sangat singkat dan menjadi konstan setelah mencapai puncak sesaat sebelum terjadi tembus. Sedangkan tegangan impuls terpotong adalah tegangan impuls yang tiba-tiba menjadi nol pada saat mencapai puncak, sewaktu di dahi atau sewaktu di punggung. Tegangan impuls eksponensial ganda biasa digunakan untuk peniruan surja petir dan tegangan surja hubung. Perbedaan bentuk dari gelombang impuls ini ditentukan pada lama waktu dahi dan waktu punggung.

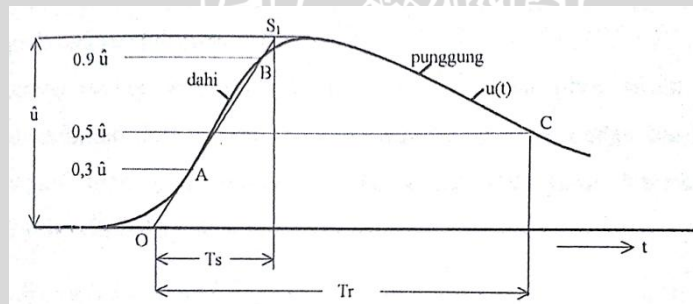


Gambar 2.5 Bentuk gelombang impuls tegangan tinggi
 (a) Tegangan impuls persegi
 (b) Tegangan impuls terpotong (taji)
 (c) Tegangan impuls eksponensial ganda

Sumber : Kind, 1993 : 32

2.3.1 Parameter Tegangan Impuls

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



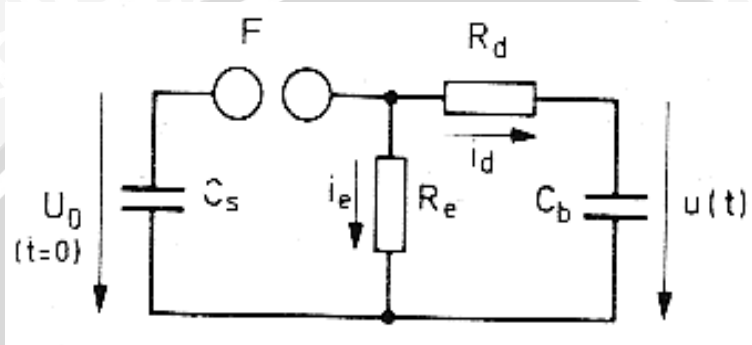
Gambar 2.6 Parameter tegangan uji impuls petir standar
 Sumber : Kind, 1993 : 34

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



2.3.2 Pembangkitan Tegangan Impuls

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



Gambar 2.7 Rangkaian Pembangkitan Tegangan Impuls

Sumber : Kind, 1993 : 35

Prinsip kerja rangkaian pembangkit tegangan impuls pada Gambar 2.7 dapat dijelaskan sebagai berikut. Kapasitor impuls C_s dimuati melalui suatu resistansi dengan tegangan searah U_0 . Kemudian dengan memberikan trigger ke sela percik F maka saklar impuls ini akan menjadi tertutup dan meluahkan muatan yang berada pada kapasitor C_s . Tegangan impuls $U(t)$ akan muncul pada kapasitor beban C_b . Lama waktu pengisian muatan pada kapasitor C_b merupakan waktu dahi (waktu yang diperlukan untuk mencapai nilai puncak). Setelah itu saklar impuls F kembali pada posisi terbuka dan terjadi peluahan muatan kapasitor C_b . Proses peluahan ini terjadi secara lambat tidak secepat proses pengisiannya. Lama waktu peluahan muatan kapasitor C_b merupakan waktu punggung. Semakin kecil nilai $R_d C_b$ maka akan semakin cepat $U(t)$ mencapai nilai puncak. Nilai puncak tegangan impuls akan selalu lebih rendah dari pada nilai puncak tegangan DC yang dibangkitkan, hal ini karena adanya tahanan R_e . Untuk mendapatkan tegangan impuls puncak yang setinggi mungkin maka harus dipilih $C_s \gg C_b$.

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

$$U(t) = \frac{U_0}{R_d C_b} \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2} \right) \quad (2-2)$$

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

$$T_1 = R_e(C_s + C_b) \quad (2-3)$$

$$T_2 = R_d \left(\frac{C_s C_b}{C_s + C_b} \right) \quad (2-4)$$

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

$$T_s = k_2 T_2 \quad (2-5)$$

$$T_r = k_1 T_1 \quad (2-6)$$

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

2.4 Faktor Efisiensi Medan Listrik

Pada berbagai susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu melalui pengujian tegangan tinggi tentu akan memiliki karakteristik tegangan tembus yang berbeda pula. Hal ini disebabkan karena dengan susunan elektroda dengan geometris yang berbeda, distribusi medan listriknya juga akan berbeda. Dikarenakan distribusi medan yang berbeda pula maka tidak hanya karakteristik tegangan tembus yang berbeda, tetapi mempengaruhi karakteristik yang lain juga. Misalnya pada susunan elektroda bola-piring tentu berbeda distribusi medan listriknya dengan susunan elektroda jarum-piring. Besar faktor efisiensi medan listrik (η) pada berbagai konfigurasi susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu dapat didefinisikan menurut Schwaiger yaitu sebagai berikut: (Schwaiger, 2005):

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maksimum}} \quad (2-7)$$

atau dapat ditulis,

$$E_{rata-rata} = \eta \cdot E_{maksimum} \quad (2-8)$$

$$E_{rata-rata} = \frac{U_d}{s} \quad (2-9)$$

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)

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

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

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

$$p = \frac{s+r}{r} \quad (2-10)$$

$$q = \frac{R}{r} \quad (2-11)$$

dengan: s : jarak sela (cm)

r : jari-jari elektroda bawah (cm)

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

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

$$U_d = E_d \times s \times \eta \quad (2-12)$$

$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} \quad (2-13)$$

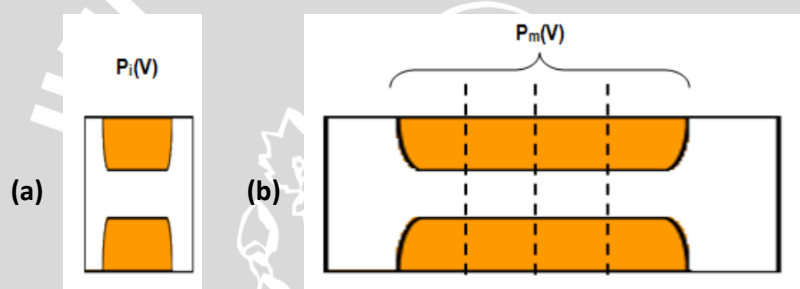
dengan:

U_d : tegangan tembus pada susunan elektroda (kV)

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

2.5 Hukum Perbesaran (Enlargement Law)

Proses tembus pada sela udara merupakan kejadian yang probabilistik-statistik yang mengilhami munculnya Hukum Perbesaran (Dokopoulos, 1968). Hukum perbesaran ini menggambarkan bahwa tegangan tembus pada sela udara akan mengalami penurunan pada saat dimensi elektrodanya bertambah. Hal ini dapat juga dapat diartikan sebagai peningkatan jumlah elemen yang mengalami tekanan listrik dalam paralel seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Perbesaran dimensi elektroda
 (a) Dimensi elektroda awal
 (b) Dimensi elektroda setelah perbesaran

Sumber : Hauschild, W., 1992:260

Untuk menurunkan hukum perbesaran, dimisalkan ada m susunan isolasi yang identik dan secara statistik bebas satu dengan yang lainnya dengan ilustrasi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Dimisalkan fungsi distribusi probabilitas tembus setiap elemen isolasi adalah $P_i(V)$, maka probabilitas bahwa sebuah susunan individu tidak akan tembus adalah $1 - P_i(V)$. 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 $[1 - P_i(V)]^m$.

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

$$P_m(V) = 1 - [1 - P_i(V)]^m \quad (2-14)$$

Apabila nilai $P_i(V)$ sangat kecil, maka persamaan (2-14) dapat didekati dengan persamaan yang lebih sederhana, yaitu:

$$P_m(V) \approx m P_i(V) \quad (2-15)$$

Dari persamaan (2-15) dapat diamati bagaimana perbesaran dimensi elektroda dapat memperkecil tegangan tembus. Dari persamaan ini dapat diilustrasikan bahwa apabila satu elemen isolasi memiliki probabilitas tembus individu sebesar 0,01 pada tegangan V ($P_i(V) = 0,01$), maka untuk perbesaran dimensi 10 kali ($m = 10$), maka probabilitas tembus susunan yang sudah diperbesar adalah,

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

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



BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian memberikan gambaran urutan langkah-langkah yang akan dilaksanakan dalam mencapai tujuan penyusunan penelitian, dimana akan dilakukan perhitungan dan analisa terhadap data – data yang didapatkan Adapun urutan langkah - langkah yang akan dilaksanakan dalam penyusunan penelitian ini adalah:

3.1 Studi Literatur

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

3.2 Variabel Penelitian

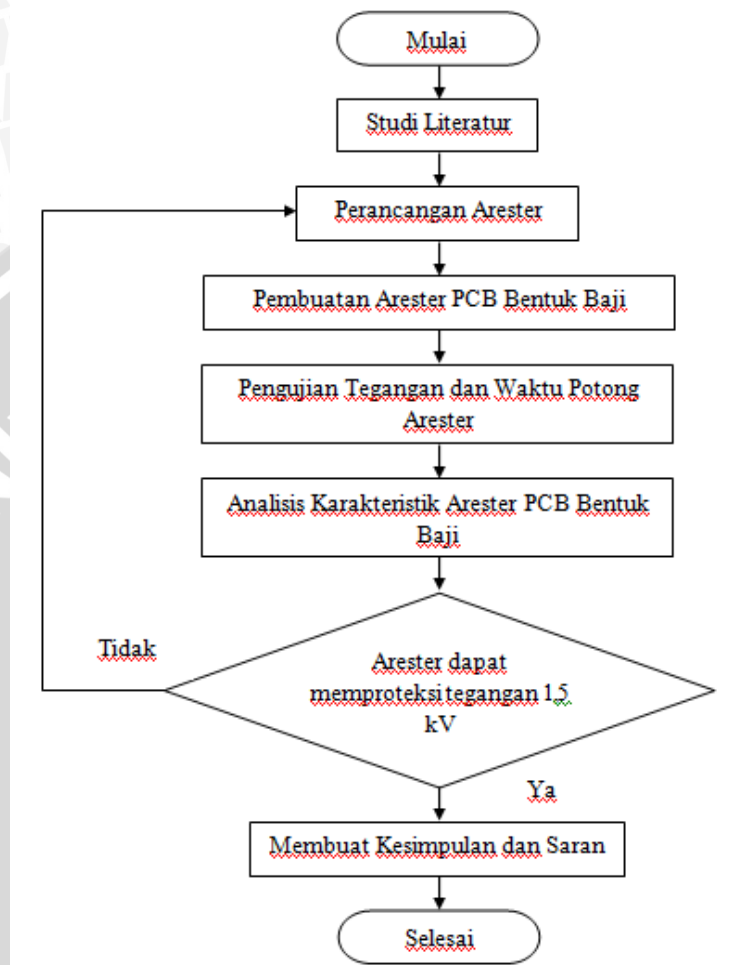
Dalam penelitian ini ada beberapa hal yang akan diamati, antara lain jarak sela dan sudut baji yang digunakan sebagai elektroda dalam penelitian ini.

3.3 Objek Uji

Dalam pengujian ini menggunakan objek uji berupa elektroda PCB bentuk baji dengan variabel yang diubah-ubah yaitu jarak sela dan sudut baji.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Pada Gambar 3.1 merupakan diagram alir proses rekayasa penelitian pembuatan arester PCB bentuk baji.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Pembuatan Arestor

3.5 Perencanaan Arestor

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

3.6 Pembuatan Arestor Bentuk Baji

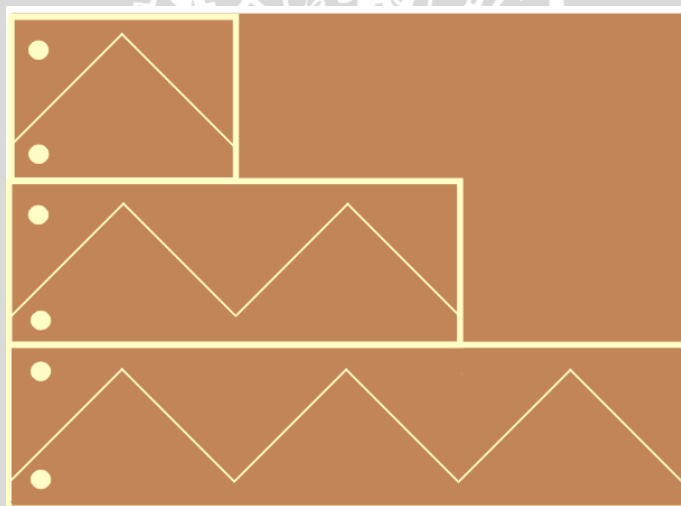
Berdasarkan beberapa kriteria dalam pemilihan bentuk elektroda yaitu pemakaian bahan elektroda yang lebih hemat, dan kemudahan dalam perakitan maka disimpulkan menggunakan arester dengan bahan PCB yang didesain agar berbentuk baji. PCB

merupakan konduktor yang berbahan tembaga. Penggunaan bahan dari tembaga memiliki konduktivitas yang baik dibandingkan dengan bahan lainnya.

Pada pengujian jarak sela sebelumnya dilakukan dengan bentuk elektroda yang berbentuk piring mempunyai kesulitan dalam membuat permukaan elektroda yang rata sehingga mempengaruhi level tegangan tebus. Oleh karena itu, pada pengujian ini menggunakan elektroda bentuk baji dimana hanya mempunyai satu titik untuk terjadinya tegangan tembus dimana pada efisiensi yang sama bentuk baji mempunyai tegangan tembus yang kecil.

3.6.1 Jarak Sela

Jarak sela minimum ditentukan dengan mempertimbangkan batas tembus sela elektroda pada keadaan operasi normal yaitu saat dibebani tegangan 220 V AC. Dalam percobaan ini akan digunakan beberapa jarak sela untuk mendapatkan jarak sela dengan tingkat pemotongan sebesar 1500 V.



Gambar 3.2 Bentuk Geometri Rancangan Bangun Arrester

Sumber : Perencanaan

3.7 Bahan dan Peralatan

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

- Arrester : Obyek uji
- HV Transformer* (Trafo Uji) : 220 V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz
- R_L : Tahanan pengaman (10 M Ω)
- Dioda : Penyearah tegangan (140 kV)

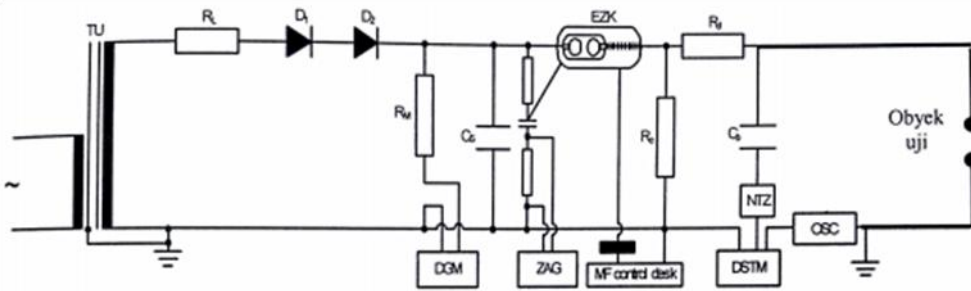
- e. R_M : Tahanan pembagi HVDC (280 M Ω)
- f. C_S : Pembagi kapasitif (10000 pF)
- g. *EZK* : Bola pemicu
- h. R_E : Tahanan peluahan (6100 Ω)
- i. R_D : Tahanan redaman (260 Ω)
- j. C_B : Kapasitor beban (1200 pF)
- k. *NTZ* : Pembagi tegangan
- l. *ZAG* : Pemicu
- m. DGM : Alat ukur tegangan tinggi DC
- n. DSTM : Alat ukur tegangan tinggi impuls
- o. OSC : Osiloskop

3.7.1 Fungsi Peralatan

- a. Arester, sebagai obyek uji yang akan diteliti.
- b. *HV Transformer* (Trafo Uji), transformator ini dapat menaikkan tegangan sampai 100 kV, dengan daya yang dikeluarkan sebesar 5 kVA, dan frekuensi yang digunakan sesuai standar PLN, yaitu 50 Hz.
- c. R_L merupakan tahanan yang digunakan sebagai pembatas arus dan untuk mengamankan trafo.
- d. Dioda, digunakan sebagai penyearah tegangan keluaran trafo.
- e. R_M merupakan tahanan yang digunakan sebagai pengaman DGM.
- f. C_S merupakan kapasitor yang digunakan untuk menyimpan muatan dan mengeluarkannya dalam bentuk tegangan impuls.
- g. *EZK*, digunakan sebagai saklar tegangan tinggi impuls.
- h. R_E merupakan tahanan yang digunakan untuk meluahkan muatan ke tanah.
- i. R_D merupakan tahanan yang digunakan sebagai tahanan peredam.
- j. C_B merupakan kapasitor yang digunakan sebagai tempat terjadinya tegangan tinggi impuls.
- k. *NTZ*, digunakan sebagai pembagi tegangan impuls pada sisi tegangan rendah.
- l. *ZAG*, digunakan sebagai pemicu saklar tegangan tinggi impuls.
- m. DGM, digunakan sebagai alat ukur tegangan tinggi DC.
- n. DSTM, digunakan sebagai alat ukur tegangan tinggi impuls.
- o. OSC, digunakan untuk menampilkan bentuk gelombang impuls.

3.8 Rangkaian Pengujian

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



Gambar 3.3 Rangkaian percobaan pembangkitan tegangan impuls $1,2/50 \mu\text{s}$

Sumber: Dieter Kind, 1993: 19

Trafo uji disusun secara seri dengan tahanan R_L dan dua buah dioda. Pada rangkaian ini menggunakan dioda karena tegangan tinggi impuls yang dibangkitkan merupakan tegangan tinggi impuls DC. Selanjutnya tahanan R_M dipasang seri dengan DGM (alat ukur tegangan tinggi DC). Tegangan tinggi DC ini kemudian disimpan muatannya di dalam kapasitor C_S yang disusun secara paralel. Setelah itu diberikan *triger* melalui ZAG, sehingga EZK yang awalnya pada kondisi *open circuit* menjadi *short circuit* hanya untuk waktu yang singkat. Muatan yang tersimpan dalam kapasitor C_S selanjutnya akan mengalir ke kapasitor C_B melewati tahanan R_D . Pada kapasitor C_B inilah tempat terjadinya tegangan tinggi impuls. Dengan dipasangnya arester secara paralel dengan kapasitor C_B , maka tegangan impuls akan terpotong. Gelombang impuls ini dapat dilihat pada osiloskop.

3.9 Pembumian

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

3.10 Langkah-langkah Pengujian

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

3.11 Analisis Data

1. Analisis pengaruh perubahan jarak sela dan sudut baji terhadap tegangan potong arester.
2. Menganalisis untuk setiap nilai jarak sela dan sudut baji elektroda tersebut, ditentukan banyaknya keping elektroda yang menghasilkan tegangan potong arester sebesar 1500 V.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan diuraikan perancangan arester PCB (*Printed Circuit Board*). Perancangan ini dilakukan dengan beberapa tahapan, yaitu menggunakan arester PCB yang berbahan tembaga dan melakukan pengujian arester PCB, untuk mendapatkan nilai-nilai variabel yang digunakan dalam perancangan arester PCB. Tujuan pengujian ini yaitu untuk menganalisis pengaruh perubahan jarak sela dan sudut baji terhadap tegangan tembus dan faktor efisiensi.

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 3.2 dengan konfigurasi yang sudah ditentukan, hasil pengujian ini digunakan untuk mengetahui karakteristik proteksi arester hasil perancangan.

4.1 Spesifikasi Arestor PCB

Arestor yang akan dirancang memiliki maksimal tegangan potong 1,5 kV. Sesuai standar DIN VDE 0110/IEC Publ.664, arester ini dikategorikan kedalam kategori I. Untuk pembagian kelas arester, arester PCB ini masuk ke dalam arester kelas D yaitu, tempat dari aplikasi fungsi/tujuan arester kelas ini sebagai proteksi surja untuk peralatan elektronika.

4.2 Penentuan Dimensi Arestor

Dimensi dari arester yang dimaksud yaitu jarak sela, sudut baji, dan panjang arester. Bentuk elektroda yang digunakan merupakan rekayasa bentuk elektroda sela udara menggunakan PCB dengan bentuk geometri baji. Pemilihan bentuk baji berdasarkan dimensinya yang lebih kecil medannya yang tidak homogen, dimana tegangan tembus yang diberikan lebih kecil sehingga dapat digunakan memotong tegangan rendah 1,5 kV.

Untuk mengetahui karakteristik jarak sela dan sudut baji, maka dilakukan pengujian terlebih dahulu dengan,

1. Karakteristik jara sela tekrhadap tegangan potong.
2. Karakteristik sudut baji terhadap tegangan potong.

4.2.1 Perkiraan Tegangan Tembus pada Elektroda Sela Udara

Untuk mengetahui besarnya tegangan tembus secara teori dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2-12. Besarnya nilai tegangan tembus ini bergantung dengan nilai faktor efisiensi medan, kuat medan, dan jarak sela. Kekuatan dielektrik udara pada impuls sebesar 30 kV/cm atau 3 kV/mm.

Dengan tingkat proteksi sebesar 1,5 kV sesuai dengan standar DIN VDE 0110/IEC Publ.664 yaitu arester kategori I, maka jarak sela sebagai berikut :

$$U_d = E_d \times s \times \eta$$

$$1,5 = 3 \times s \times 1$$

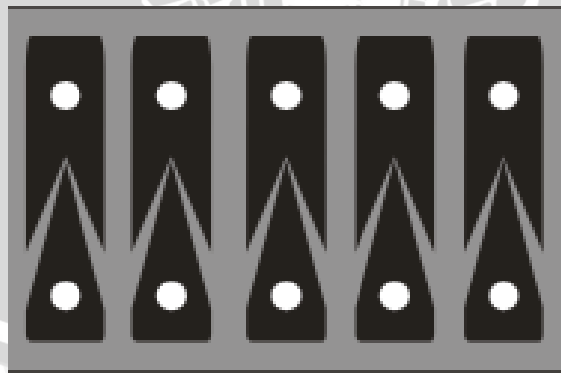
$$s = \frac{1,5}{3}$$

$$s = 0,5 \text{ mm}$$

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

4.2.2 Karakteristik Jarak Sela Arestor Terhadap Tegangan Potong

Karakteristik pengaruh jarak sela terhadap tegangan tembus dibuat beberapa model elektroda bentuk baji untuk mendapatkan nilai variable dengan sudut baji tetap, pada jarak sela yang berbeda beda.



Gambar 4.1 Arestor Baji Model A

Pada pengujian dilakukan pengambilan data sebanyak tiga kali untuk setiap sampel kemudian diambil nilai rata-ratanya. Nilai U_i merupakan nilai tegangan masukan, U_d merupakan nilai tegangan potong arester, dan \bar{U}_d merupakan nilai rata-rata tegangan potong arester.

Tabel 4.1 Pengujian Jarak Sela 0,3 mm Arester Model A Terhadap Tegangan Potong

Jarak sela (mm)	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
0,3	3,19	1,48	1,47
		1,48	
		1,45	
	6,12	1,51	1,51
		1,52	
		1,51	
	9,10	1,97	2,00
		2,08	
		1,94	
	12,06	2,38	2,35
		2,34	
		2,34	
15,06	2,96	2,90	
	2,89		
	2,85		

Pada Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,3 mm. Saat arester diberi tegangan uji sebesar 3,19 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,47 kV. Selanjutnya menggunakan tegangan uji sebesar 6,12 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,51 kV. Untuk pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 9,10 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,00 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 12,06 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,35 kV. Kemudian ketika menggunakan tegangan uji sebesar 15,06 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,90 kV.

Tabel 4.2 Pengujian Jarak Sela 0,4 mm Arester Model A Terhadap Tegangan Potong

Jarak sela (mm)	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
0,4	3,19	1,61	1,53
		1,50	
		1,49	
	6,12	1,61	1,58
		1,56	
		1,56	
	9,10	2,23	2,20
		2,16	
		2,23	
	12,06	2,48	2,45
		2,41	
		2,45	
15,06	3,00	3,01	
	3,03		
	3,00		

Pada Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,4 mm. Saat arester diberi tegangan uji sebesar 3,19 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,53 kV. Selanjutnya menggunakan tegangan uji sebesar 6,12 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,58 kV. Untuk pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 9,10 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,20 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 12,06 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,45 kV. Kemudian ketika menggunakan tegangan uji sebesar 15,06 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 3,01 kV.

Tabel 4.3 Pengujian Jarak Sela 0,5 mm Arestor Model A Terhadap Tegangan Potong

Jarak sela (mm)	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
0,5	3,19	1,61	1,58
		1,57	
		1,57	
	6,12	1,79	1,71
		1,68	
		1,64	
	9,10	2,38	2,30
		2,23	
		2,30	
	12,06	2,56	2,53
		2,52	
		2,52	
15,06	3,00	3,03	
	3,18		
	2,92		

Pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,5 mm. Saat arester diberi tegangan uji sebesar 3,19 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,58 kV. Selanjutnya menggunakan tegangan uji sebesar 6,12 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,71 kV. Untuk pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 9,10 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,30 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 12,06 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,53 kV. Kemudian ketika menggunakan tegangan uji sebesar 15,06 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 3,03 kV.

Tabel 4.4 Pengujian Jarak Sela 0,6 mm Arester Model A Terhadap Tegangan Potong

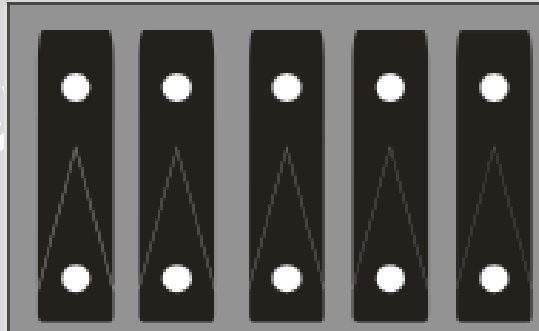
Jarak sela (mm)	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
0,6	3,19	1,79	1,80
		1,79	
		1,83	
	6,12	1,90	1,85
		1,83	
		1,83	
	9,10	2,48	2,39
		2,38	
		2,30	
	12,06	2,74	2,69
		2,67	
		2,67	
15,06	3,18	3,17	
	3,11		
	3,22		

Pada Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,6 mm. Saat arester diberi tegangan uji sebesar 3,19 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,80 kV. Selanjutnya menggunakan tegangan uji sebesar 6,12 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,85 kV. Untuk pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 9,10 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,39 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 12,06 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,69 kV. Kemudian ketika menggunakan tegangan uji sebesar 15,06 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 3,17 kV.

Tabel 4.5 Pengujian Jarak Sela 0,8 mm Arester Model A Terhadap Tegangan Potong

Jarak sela (mm)	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
0,8	3,19	1,90	1,89
		1,94	
		1,83	
	6,12	1,90	1,92
		1,94	
		1,94	
	9,10	2,48	2,51
		2,52	
		2,52	
	12,06	2,89	2,79
		2,89	
		2,59	
15,06	3,29	3,28	
	3,29		
	3,25		

Pada Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,8 mm. Saat arester diberi tegangan uji sebesar 3,19 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,89 kV. Selanjutnya menggunakan tegangan uji sebesar 6,12 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,92 kV. Untuk pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 9,10 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,51 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 12,06 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,79 kV. Kemudian ketika menggunakan tegangan uji sebesar 15,06 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 3,28 kV.



Gambar 4.2 Arestor Baji Model B

Pada pengujian dilakukan pengambilan data sebanyak tiga kali untuk setiap sampel kemudian diambil nilai rata-ratanya. Nilai U_i merupakan nilai tegangan masukan, U_d merupakan nilai tegangan potong arester, dan \bar{U}_d merupakan nilai rata-rata tegangan potong arester.

Tabel 4.6 Pengujian Jarak Sela 0,3 mm Arestor Model B Terhadap Tegangan Potong

Jarak sela (mm)	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
0,3	3,27	0,85	0,85
		0,85	
		0,85	
	6,19	0,94	0,97
		0,99	
		0,99	
	9,34	1,68	1,73
		1,80	
		1,72	
	12,01	2,28	2,31
		2,30	
		2,34	
15,11	2,67	2,68	
	2,67		
	2,70		

Pada Tabel 4.6 dapat dilihat bahwa pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,3 mm. Saat arester diberi tegangan uji sebesar 3,27 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 0,85 kV. Selanjutnya menggunakan tegangan uji sebesar 6,19 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 0,97 kV. Untuk pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 9,34 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,73 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 12,01 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,31 kV. Kemudian ketika menggunakan tegangan uji sebesar 15,11 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,68 kV.

Tabel 4.7 Pengujian Jarak Sela 0,4 mm Arestor Model B Terhadap Tegangan Potong

Jarak sela (mm)	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
0,4	3,27	1,40	1,45
		1,42	
		1,52	
	6,19	1,65	1,57
		1,59	
		1,48	
	9,34	2,27	2,18
		2,19	
		2,19	
	12,01	2,38	2,41
		2,42	
		2,42	
	15,11	2,92	2,96
		3,03	
		2,92	

Pada Tabel 4.7 dapat dilihat bahwa pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,4 mm. Saat arester diberi tegangan uji sebesar 3,27 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,45 kV. Selanjutnya menggunakan tegangan uji sebesar 6,19 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,57 kV. Untuk pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 9,34 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,18 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 12,01 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,41 kV. Kemudian ketika menggunakan tegangan uji sebesar 15,11 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,96 kV.

Tabel 4.8 Pengujian Jarak Sela 0,5 mm Arester Model B Terhadap Tegangan Potong

Jarak sela (mm)	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
0,5	3,27	1,52	1,56
		1,58	
		1,58	
	6,19	1,61	1,65
		1,65	
		1,68	
	9,34	2,23	2,22
		2,23	
		2,08	
12,01	2,60	2,56	
	2,56		
	2,52		
15,11	3,11	3,07	
	3,00		
	3,11		

Pada Tabel 4.8 dapat dilihat bahwa pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,5 mm. Saat arester diberi tegangan uji sebesar 3,27 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,56 kV. Selanjutnya menggunakan tegangan uji sebesar 6,19 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,65 kV. Untuk pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 9,34 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,22 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 12,01 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,56 kV. Kemudian ketika menggunakan tegangan uji sebesar 15,11 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 3,07 kV.

Tabel 4.9 Pengujian Jarak Sela 0,6 mm Arester Model B Terhadap Tegangan Potong

Jarak sela (mm)	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
0,6	3,27	1,80	1,77
		1,71	
		1,80	
	6,19	1,86	1,91
		2,01	
		1,86	
	9,34	2,38	2,35
		2,30	
		2,38	
	12,01	2,66	2,67
		2,68	
		2,66	
15,11	3,11	3,17	
	3,22		
	3,18		

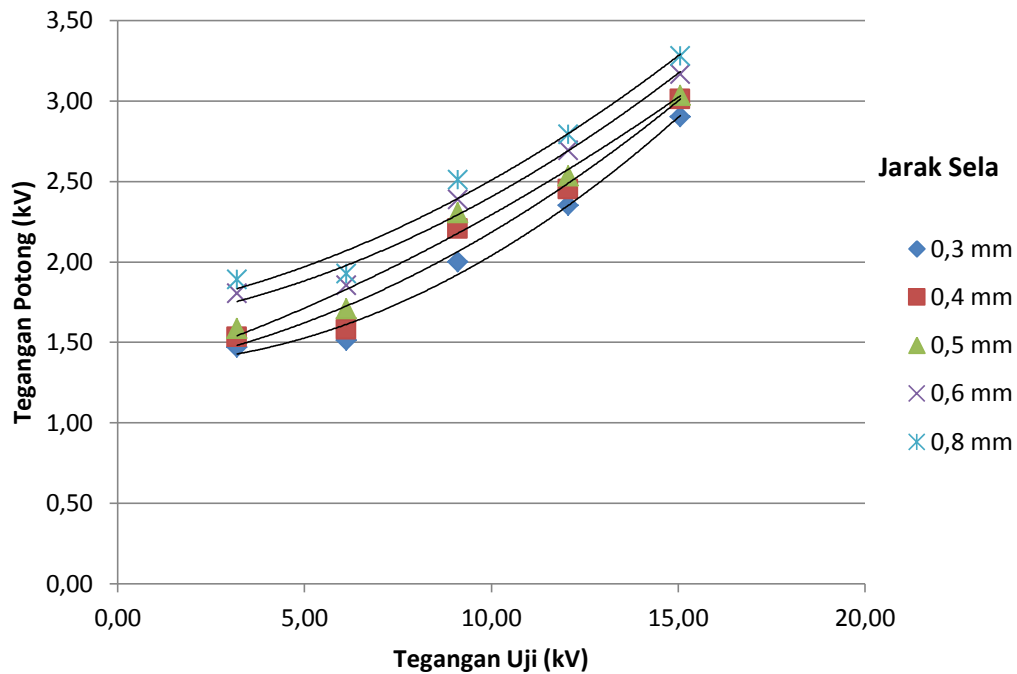
Pada Tabel 4.9 dapat dilihat bahwa pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,6 mm. Saat arester diberi tegangan uji sebesar 3,27 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,77 kV. Selanjutnya menggunakan tegangan uji sebesar 6,19 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,91 kV. Untuk pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 9,34 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,35 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 12,01 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,67 kV. Kemudian ketika menggunakan tegangan uji sebesar 15,11 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 3,17 kV.

Tabel 4.10 Pengujian Jarak Sela 0,8 mm Arestor Model B Terhadap Tegangan Potong

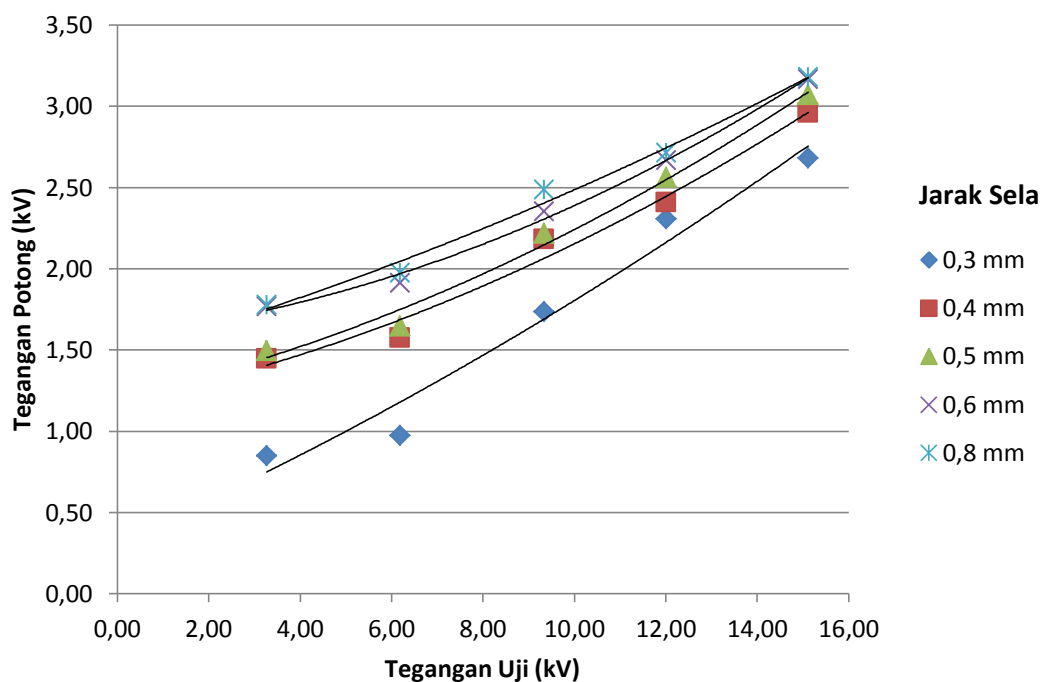
Jarak sela (mm)	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
0,8	3,27	1,79	1,78
		1,72	
		1,83	
	6,19	1,97	1,97
		1,94	
		2,01	
	9,34	2,56	2,48
		2,48	
		2,41	
	12,01	2,72	2,71
		2,74	
		2,68	
	15,11	3,11	3,18
		3,25	
		3,18	

Pada Tabel 4.10 dapat dilihat bahwa pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,8 mm. Saat arester diberi tegangan uji sebesar 3,27 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,78 kV. Selanjutnya menggunakan tegangan uji sebesar 6,19 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,97 kV. Untuk pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 9,34 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 2,48 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan tegangan uji sebesar 12,01 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,71 kV. Kemudian ketika menggunakan tegangan uji sebesar 15,11 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 3,18 kV.

Dari tabel dan grafik yang telah didapat pada pengujian jarak sela arester model A dan model B dengan tegangan uji yang bervariasi maka didapatkan grafik hubungan pengaruh perubahan jarak sela terhadap tegangan potong yang ditunjukkan seperti pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Jarak Sela Arester Model A Terhadap Tegangan Potong



Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Jarak Sela Arester Model B Terhadap Tegangan Potong

Pada Gambar 4.3 dan 4.4 dapat dilihat bahwa seiring dengan bertambahnya jarak sela, maka nilai tegangan potong naik secara eksponensial. Kenaikan ini berlaku untuk sudut baji dan dimensi elektroda yang sama.

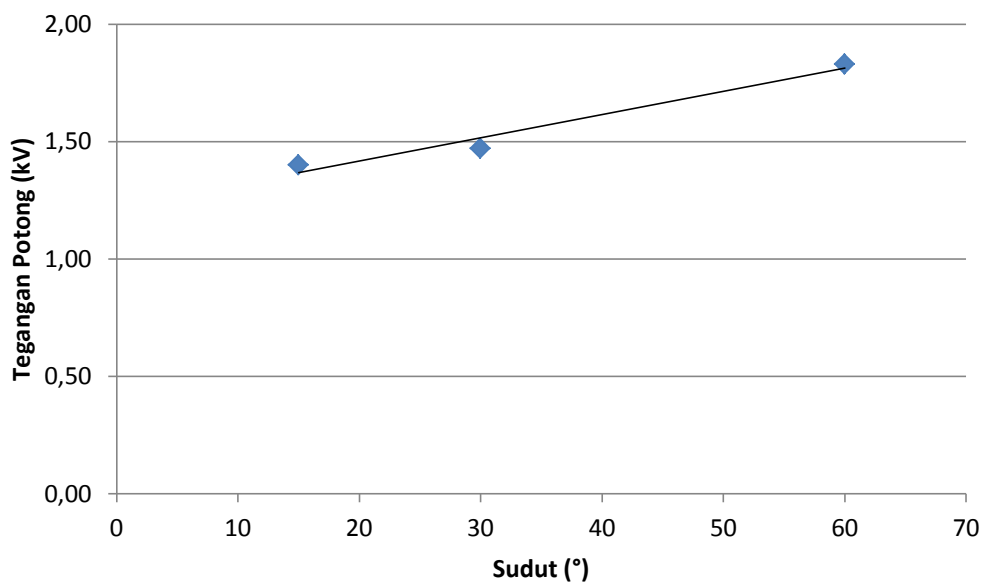
4.2.3 Karakteristik Sudut Baji Terhadap Tegangan Potong

Tabel 4.11 merupakan tabel data pengujian nilai tegangan potong arester dengan beberapa sudut baji yang berbeda. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap sampel kemudian diambil nilai rata-ratanya. Nilai U_i merupakan nilai tegangan masukan, U_d merupakan nilai tegangan potong arester, dan \bar{U}_d merupakan nilai rata-rata tegangan potong arester.

Tabel 4.11 Pengujian Pengaruh Sudut Baji Terhadap Tegangan Potong

No.	Jarak sela (mm)	Sudut	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
1	0.3	15°	4.21	1.39	1.40
				1.42	
				1.39	
2	0.3	30°	4.23	1.48	1.47
				1.48	
				1.45	
3	0.3	60°	4.26	1.83	1.83
				1.75	
				1.90	

Pada Tabel 4.11 dapat dilihat bahwa saat pengujian arester dengan sudut baji 15° dan diberi tegangan uji 4,28 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,40 kV. Saat pengujian menggunakan arester dengan sudut baji 30° dan diberi tegangan uji 4,23 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,47 kV. Selanjutnya pada pengujian arester dengan sudut baji 60° dan diberi tegangan uji 4,26 kV didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,83 kV.



Gambar 4.5 Grafik Pengaruh Sudut Baji Terhadap Tegangan Potong

Dengan menggunakan data pada Tabel 4.11, maka dapat di buat grafik pengaruh sudut baji terhadap tegangan potong arester yang diberikan pada Gambar 4.5.

Gambar 4.5 merupakan grafik perubahan sudut baji arester, dari gambar dapat dilihat bahwa semakin besar sudut baji maka tegangan potong menjadi semakin besar.

Fungsi dari grafik diatas adalah :

$$U = 0,009X + 1,22$$

$$R^2 = 0,967$$

Pada grafik didapatkan persamaan untuk setiap perbesaran sudut baji, dengan U merupakan tegangan potong arester dan X adalah sudut baji. Dengan mengambil contoh untuk sudut baji 15° , maka perhitungannya sebagai berikut,

$$U = 0,009X + 1,22$$

$$U = 0,009 (15) + 1,22$$

$$U = 1,355$$

Untuk perhitungan selanjutnya setiap penambahan sudut baji dapat dilihat pada Tabel 4.12 yang merupakan perbandingan data pengujian dengan data menurut *trendline* untuk sudut baji yang berbeda.

Tabel 4.12 Perbandingan Data Pengujian Pengaruh Sudut Baji Terhadap Tegangan Potong

Arester

Sudut	Tegangan Potong Pengujian (kV)	Tegangan Potong <i>Trendline</i> (kV)	ΔU (kV)
15°	1,40	1,355	0,045
30°	1,47	1,490	0,020
60°	1,83	1,760	0,070
Rata-rata penyimpangan			0,045

Dari Tabel 4.12 dapat dilihat perbandingan data pengujian dengan data *trendline* memiliki rata-rata penyimpangan bernilai 0,046 pada pengujian tegangan potong untuk sudut baji yang berbeda.

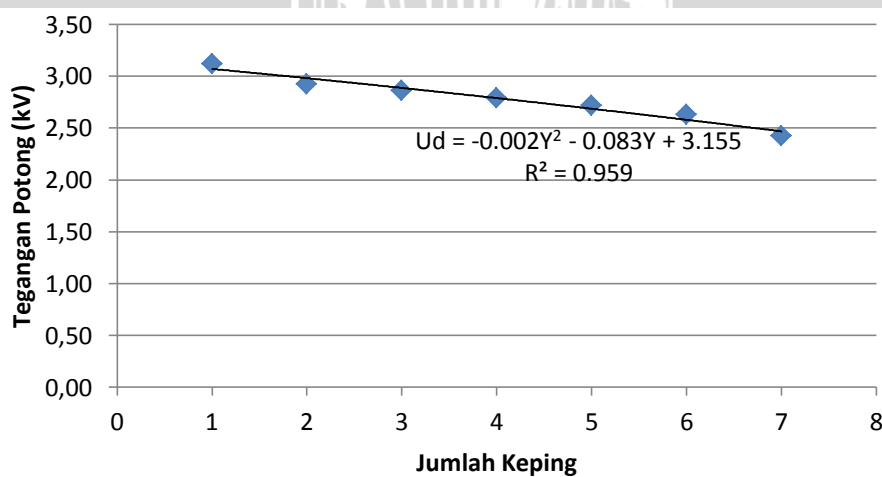
4.2.4 Pengaruh Perbesaran dengan Susunan Keping Elektroda Terhadap Tegangan Potong

Pada Tabel 4.13 merupakan hasil data pengujian pengaruh perbesaran arester terhadap nilai tegangan potong arester dengan cara menambahkan susunan keping elektroda yang dihubungkan secara paralel. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap sampel kemudian diambil nilai rata-ratanya. Nilai U_i merupakan nilai tegangan masukan, U_d merupakan nilai tegangan potong arester, dan $\overline{U_d}$ merupakan nilai rata-rata tegangan potong arester.

Tabel 4.13 Pengaruh Perbesaran Arester Terhadap Tegangan Potong Arester

No	Jumlah Keping	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)
1.	1	15,03	3,33	3,12
			3,00	
			3,03	
2.	2	15,03	2,89	2,92
			2,92	
			2,96	
3.	3	15,03	2,81	2,86
			2,85	
			2,92	
4.	4	15,03	2,78	2,79
			2,74	
			2,85	
5.	5	15,03	2,74	2,72
			2,70	
			2,70	
6.	6	15,03	2,56	2,63
			2,67	
			2,67	
7.	7	15,03	2,30	2,42
			2,45	
			2,52	

Berdasarkan Tabel 4.13, selanjutnya dapat dibuat grafik hubungan antara perbesaran arester dan tegangan potong rata-ratanya yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik Pengaruh Perbesaran Arester Terhadap Tegangan Potong

Gambar 4.6 merupakan grafik perubahan perbesaran arester, dari gambar dapat dilihat bahwa semakin banyak susunan keping elektroda maka tegangan potong menjadi semakin besar. Fungsi dari grafik diatas adalah :

$$U_d = -0,002Y^2 - 0.083Y + 3.155$$

$$R^2 = 0,959$$

Pada grafik didapatkan persamaan untuk setiap penambahan keping elektroda, dengan U_d merupakan tegangan potong arester dan Y adalah jumlah kepingan. Dengan penambahan susunan keping elektroda sebagai perbesaran arester maka dapat diambil contoh arester dengan susunan 1 keping elektroda, sehingga perhitungannya sebagai berikut,

$$U_d = -0,002Y^2 - 0.083Y + 3.155$$

$$U_d = -0,002(1)^2 - 0.083(1) + 3.155$$

$$U = 3,07$$

Untuk perhitungan selanjutnya setiap penambahan keping dapat dilihat pada Tabel 4.14 yang merupakan perbandingan data pengujian dengan data menurut *trendline* untuk jumlah keping yang berbeda.

Tabel 4.14 Perbandingan Data Pengujian Pengaruh Perbesaran Arestor Terhadap Tegangan Potong Arestor

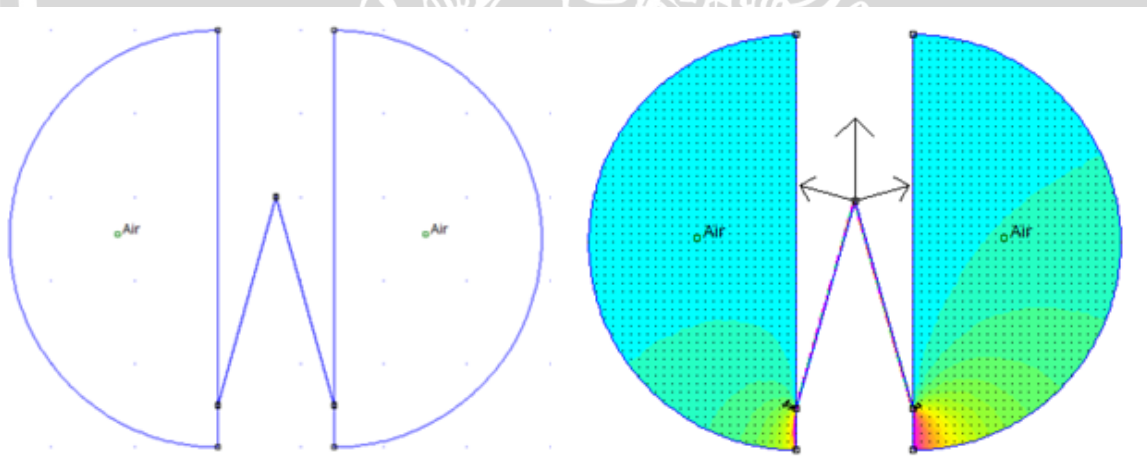
Jumlah Keping	Tegangan Potong Pengujian (kV)	Tegangan Potong <i>Trendline</i> (kV)	ΔU (kV)
1	3,120	3,070	0,050
2	2,920	2,981	0,061
3	2,860	2,888	0,028
4	2,790	2,791	0,001
5	2,720	2,69	0,030
6	2,630	2,585	0,045
7	2,420	2,476	0,056
Rata-rata penyimpangan			0,039

Dari Tabel 4.14 dapat dilihat perbandingan data pengujian dengan data *trendline* memiliki rata-rata penyimpangan bernilai 0,039 pada pengujian tegangan potong untuk penambahan panjang arester.

4.3 Analisis Distribusi Medan Listrik Pada Sela Udara

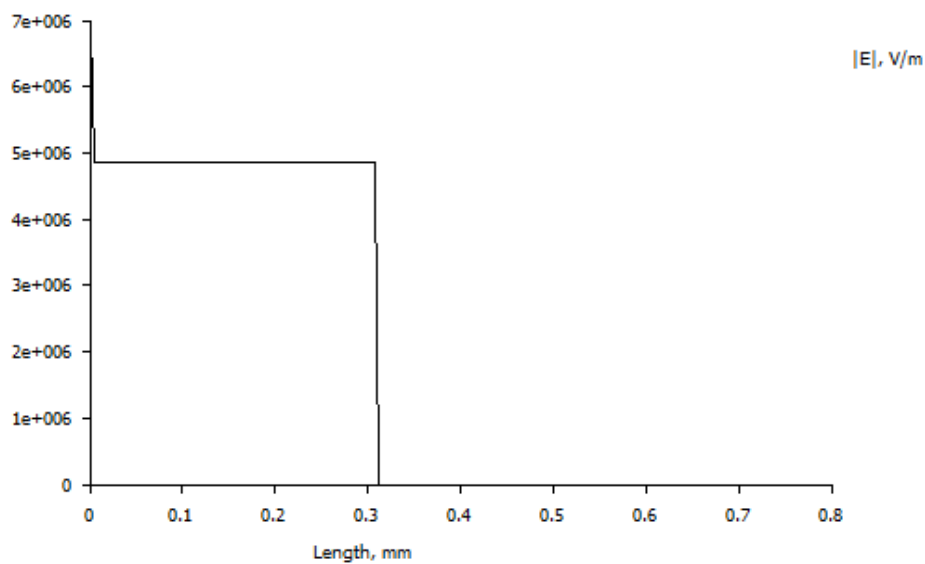
Distribusi medan listrik pada elektroda sela udara dapat disimulasikan dengan menggunakan program FEMM 4.2. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menentukan efisiensi medan listrik elektroda sela udara. Untuk menentukan efisiensi itu sendiri dibutuhkan nilai kuat medan listrik maksimum (E_{maks}) yang akan didapatkan dari hasil simulasi distribusi medan dengan menggunakan FEMM 4.2. Gambar simulasi dengan menggunakan FEMM 4.2 ditunjukkan seperti Gambar 4.7

Gambar simulasi yang digambarkan pada Gambar 4.7 adalah simulasi pengujian tembus elektroda sela udara dengan jarak sela 0,3 mm, sudut baji 30°, dan panjang arester 5 x 1,3 cm. Isolator yang digunakan antara elektroda adalah isolator sela udara. Tegangan masukan pada simulasi distribusi medan listrik sebesar 1,5 kV.



Gambar 4.7 Perencanaan dan Distribusi Medan Listrik dengan Program FEMM 4.2

Berdasarkan hasil dari simulasi distribusi medan listrik dengan menggunakan FEMM 4.2 maka akan didapatkan kuat medan listrik maksimum yang ditunjukkan pada grafik Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Hasil Simulasi Grafik Kuat Medan Listrik

Berdasarkan grafik Gambar 4.8, maka simulasi pengujian tembus elektroda sela udara dengan jarak sela 0,3 mm, sudut baji 30°, dan panjang arester 5 x 1,3 cm didapatkan kuat medan listrik maksimum sebesar 6,593 kV/mm.

4.4 Efisiensi Medan Listrik

Efisiensi medan listrik merupakan salah satu yang menentukan tingkat homogenitas suatu arester. Rentang nilai efisiensi medan listrik yaitu antara 0-1. Semakin mendekati nilai 1 maka semakin tinggi tingkat homogenitas dari arester. Setelah mendapatkan nilai kuat medan maksimum, maka dapat dihitung berapa efisiensi dari arester elektroda bentuk baji ini. Dengan menggunakan Persamaan 2-9, terlebih dahulu dihitung medan rata-ratanya. Dengan U_d sebesar 1,5 kV dan jarak sela (s) sebesar 0,3 mm, maka nilai meda rata-ratanya adalah sebagai berikut,

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

$$E_{rata-rata} = \frac{1,5}{0,3}$$

$$E_{rata-rata} = 5 \text{ kV/mm}$$

Dengan nilai kuat medan listrik maksimum sebesar 6,593 kV/mm dan nilai kuat medan rata-ratanya sebesar 5 kV/mm, maka dengan menggunakan Persamaan 2-7 faktor efisiensi medan listrik pada arester bentuk baji adalah sebagai berikut,

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

$$\eta = \frac{5}{6,593}$$

$$\eta = 0,72$$

4.5 Perancangan Arester PCB Bentuk Baji

Untuk perancangan arester elektroda PCB bentuk baji dengan tingkat proteksi 1,5 kV terdapat beberapa pertimbangan yaitu bentuk geometri, jarak sela, sudut baji, dan panjang arester. Berdasarkan data yang didapatkan sebelumnya berikut rancangan arester PCB bentuk baji.

4.5.1 Bentuk Geometri

Sesuai dengan analisis distribusi medan listrik pada sela udara dan efisiensi medan listrik didapatkan desain rancang bangun arester PCB seperti pada Gambar 4.9.



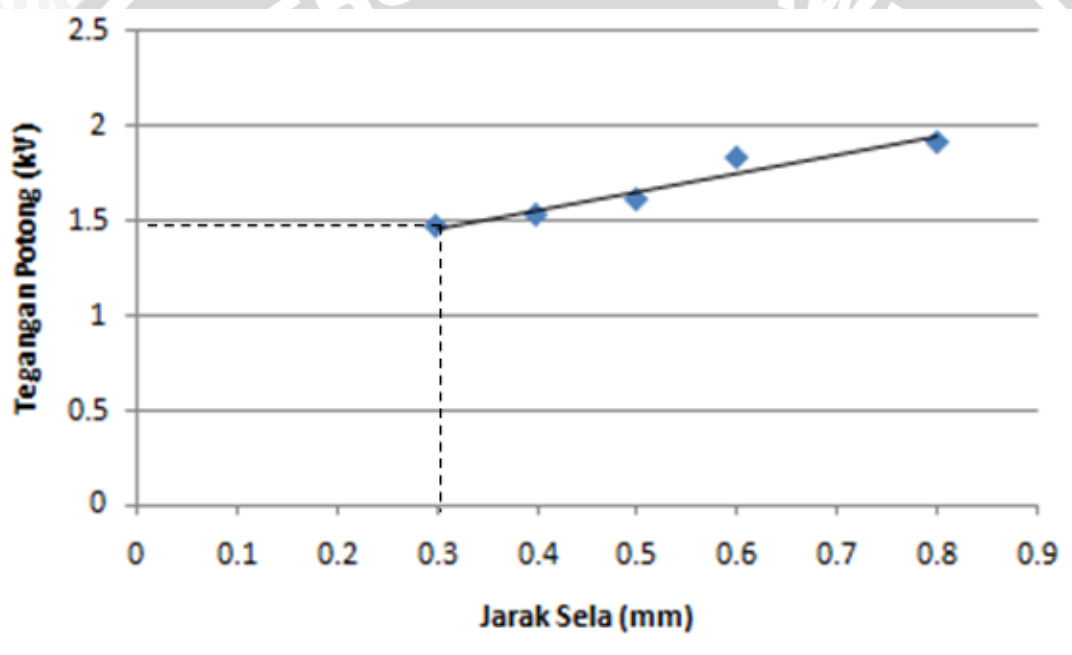
Gambar 4.9 Bentuk Geometri Rancang Bangun Arester PCB Bentuk Baji

Dari Gambar 4.9 didapatkan bahwa bentuk geometri dari perancangan diatas sama dengan plat bentuk baji sebagai fasa dan piring sebagai ground. Bentuk plat pada fasa dibuat runcing karena pada distribusi medan listrik yang kurang homogenitasnya mempunyai tegangan tembus yang kecil.

4.5.2 Jarak Sela Arester

Pada pengujian jarak sela yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, didapatkan bahwa semakin besar jarak sela, maka tegangan potong yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan semakin besar jarak sela dari suatu arester maka akan dibutuhkan energi

yang lebih besar pula bagi elektron untuk bergerak. Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa pengujian menggunakan arester dengan jarak sela yang berbeda dengan diberi tegangan uji sebesar 3,19 kV. Saat menggunakan arester dengan jarak sela 0,3 mm didapatkan nilai tegangan potongnya kurang dari 1,5 kV. Selanjutnya pada pengujian menggunakan arester dengan jarak sela 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm, dan 0,8 mm didapatkan nilai tegangan potong lebih dari 1,5 kV. Dari data pengujian tersebut jarak sela yang menghasilkan tegangan potong sebesar 1,5 kV yaitu pada jarak sela antara 0,3 – 0,4 mm. Oleh karena itu jarak sela dalam rentang 0,3 - 0,4 mm akan digunakan sebagai jarak sela arester seperti pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Jarak Sela yang Dipilih

4.5.3 Sudut Baji

Pada pengujian sudut baji yang ditunjukkan pada Gambar 4.5, didapatkan bahwa semakin besar sudut baji, maka tegangan potong yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan semakin besar sudut baji arester maka medan yang dihasilkan akan semakin homogen. Pada Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa saat pengujian arester dengan sudut baji 15° didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,40 kV. Saat pengujian menggunakan arester dengan sudut baji 30° didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,47 kV. Selanjutnya pada pengujian arester dengan sudut baji 60° didapatkan nilai tegangan potongnya sebesar 1,83 kV. Dari data hasil pengujian tersebut sudut yang

menghasilkan tegangan potong 1,5 kV yaitu sudut 15° dan 30°. Oleh karena sudut yang mendekati tegangan potong 1,5 kV adalah 30° maka yang akan digunakan sebagai sudut arester PCB bentuk baji yaitu sudut 30°.

4.5.4 Perbesaran Arester

Pada pengujian sudut baji yang ditunjukkan pada Gambar 4.6, didapatkan bahwa semakin banyak susunan keping elektroda, maka tegangan potong yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini dikarenakan semakin banyak susunan keping elektroda maka terjadi perbesaran dimensi elektroda, sehingga elektron membutuhkan energi yang lebih sedikit untuk bergerak yang menyebabkan probabilitas tembusnya menjadi meningkat. Pernyataan ini sesuai dengan hukum perbesaran yaitu, tegangan tembus pada susunan elektroda yang diperbesar secara dimensi akan lebih kecil dibandingkan tegangan tembus pada susunan elektroda satu elemen.

Berdasarkan pada grafik hubungan antara tegangan potong dan penambahan susunan keping elektroda pada Gambar 4.6 didapatkan persamaan *polynomial* untuk tingkat proteksi 1,5 kV yaitu :

$$U_d = -0,002Y^2 - 0,083Y + 3,155$$

$$1,5 = -0,002Y^2 - 0,083Y + 3,155$$

$$-0,002Y^2 - 0,083Y + 1,655 = 0$$

Dari hasil persamaan diatas digunakan rumus abc untuk mengetahui nilai akar-akar persamaannya

$$Y_1, Y_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$Y_1, Y_2 = \frac{-(-0,083) \pm \sqrt{(0,083)^2 - 4 \cdot (0,002) \cdot (1,655)}}{2 \cdot (-0,002)}$$

$$Y_1, Y_2 = \frac{0,083 \pm \sqrt{0,006889 + 0,01324}}{-0,004}$$

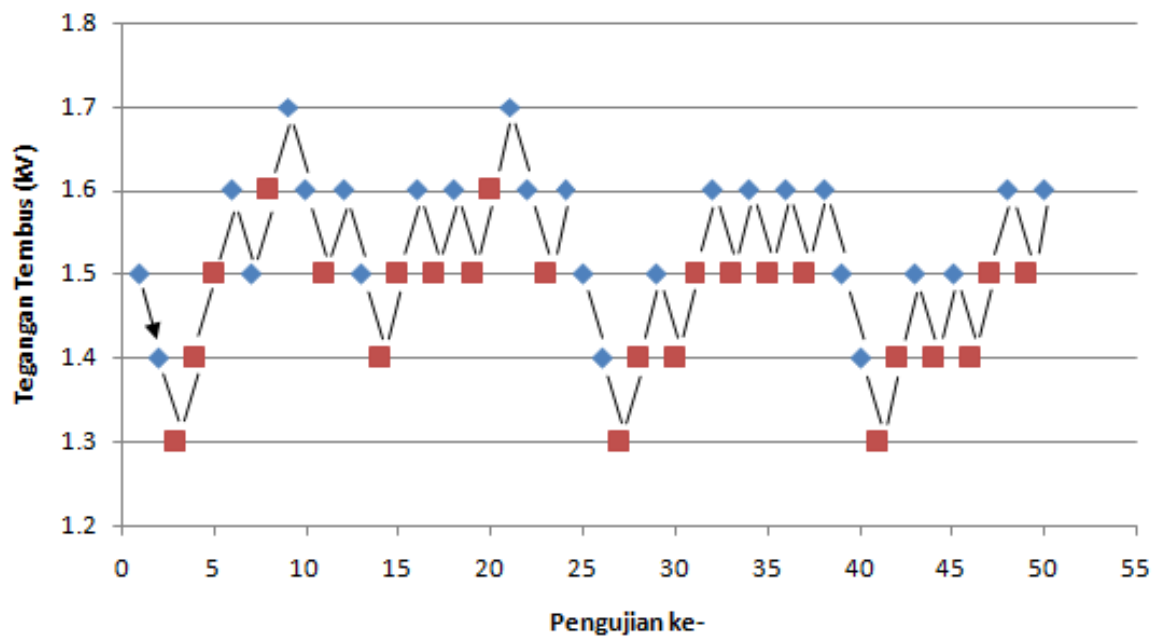
$$Y_1, Y_2 = \frac{0,083 \pm 0,1419}{0,004}$$

$$Y_1 = \frac{0,083 + 0,1419}{-0,004} = -56,2 \text{ atau } Y_2 = \frac{0,083 - 0,1419}{-0,004} = 14,7$$

Dari persamaan kuadrat dengan menggunakan rumus abc maka didapatkan akar-akar persamaannya yaitu -56,2 dan 14,7. Namun untuk perbesaran elektroda yang maka persamaan yang digunakan adalah 14,7 yang kemudian dibulatkan menjadi 15 keping susunan elektroda.

4.6 Pengujian Tegangan Tembus Arester dengan Metode Naik-Turun

Pengujian tegangan tembus dengan metode naik-turun berfungsi untuk mengukur tegangan tembus yang dihasilkan oleh arester PCB bentuk baji. Pengujian dilakukan dengan pertama-tama memberikan tegangan di sekitar 1,5 kV pada arester selanjutnya apabila terjadi tembus maka tegangan diturunkan. Sedangkan apabila tidak terjadi tembus maka tegangan dinaikkan.



Gambar 4.11 Pengujian Tegangan Tembus Arester dengan Metode Naik-Turun

Keterangan:

- ◆ : Terjadi tembus
- : Tidak terjadi tembus

Dari Gambar 4.11 dapat dibuat tabel dengan x merupakan tingkat tegangan dimana “■” terjadi, n_x merupakan jumlah “■” yang terjadi pada tingkat x , dan dimana tidak terjadi tembus maka $x = 0$.

Tabel 4.15 Pengujian tegangan tembus arester

x	n_x	$x \cdot n_x$
3	2	6
2	12	24
1	7	7
0	3	0
Jumlah	24	37

Dari Tabel 4.15 dapat dilakukan perhitungan untuk mengetahui tegangan tembus yang dihasilkan arester. Dengan U_{min} merupakan tegangan yang terjadi pada tanda “■” terendah, dan U_x merupakan tegangan pada tingkat x (tertinggi).

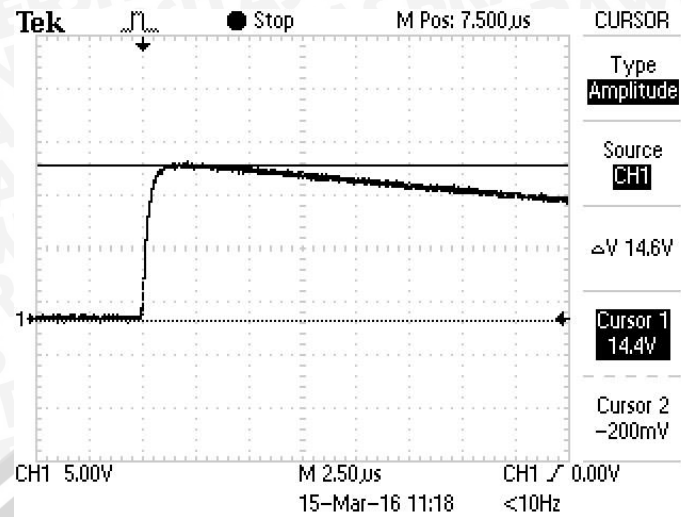
$$U = U_{min} + (U_x - U_{x-1}) \times \left(\frac{\sum x \cdot n_x}{\sum n_x} + \frac{1}{2} \right)$$

$$U = 1,3 + (1,7 - 1,6) \times \left(\frac{37}{24} + \frac{1}{2} \right)$$

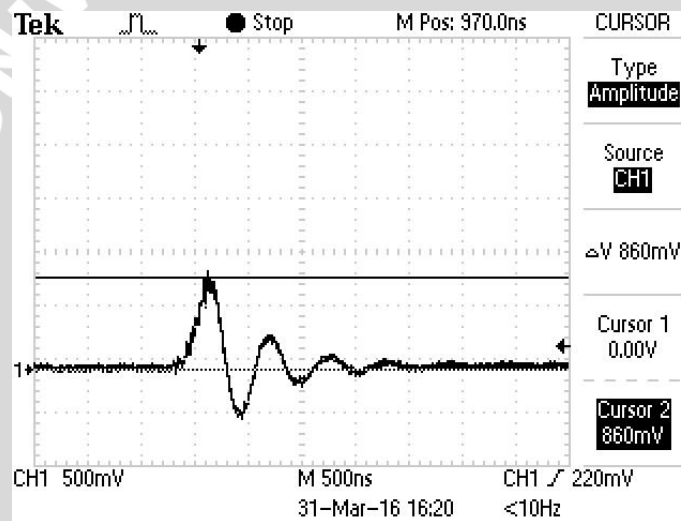
$$U = 1,504 \text{ kV}$$

4.7 Karakteristik Tegangan Waktu Arestor

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kurva karakteristik pemotongan tegangan impuls oleh arester PCB. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan uji yang nilainya bervariasi terhadap arester. Tegangan impuls yang diberikan pada pengujian ini merupakan tegangan impuls eksponensial ganda 1,2/50 μ s. Kemudian gelombang yang muncul pada osiloskop dicatat besarnya tegangan potong dan waktu potong dari arester. Beberapa tegangan uji yang diberikan yaitu 3 kV, 6 kV, 9 kV, 12 kV, dan 15 kV. Untuk gelombang impuls sebelum terpotong dapat terlihat pada Gambar 4.12 dan gelombang impuls pada saat terpotong arester seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13



Gambar 4.12 Gelombang Impuls Sebelum Terpotong



Gambar 4.13 Gelombang Impuls Setelah Terpotong

Tabel 4.16 merupakan tabel data pengujian karakteristik tegangan-waktu arester PCB bentuk baji. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap tegangan uji yang berbeda-beda kemudian diambil nilai rata-ratanya. Nilai U_i merupakan nilai tegangan masukan, U_d merupakan nilai tegangan potong arester, $\overline{U_d}$ merupakan nilai rata-rata tegangan potong arester, t_d merupakan nilai waktu potong arester, dan $\overline{t_d}$ merupakan nilai rata-rata waktu potong arester.

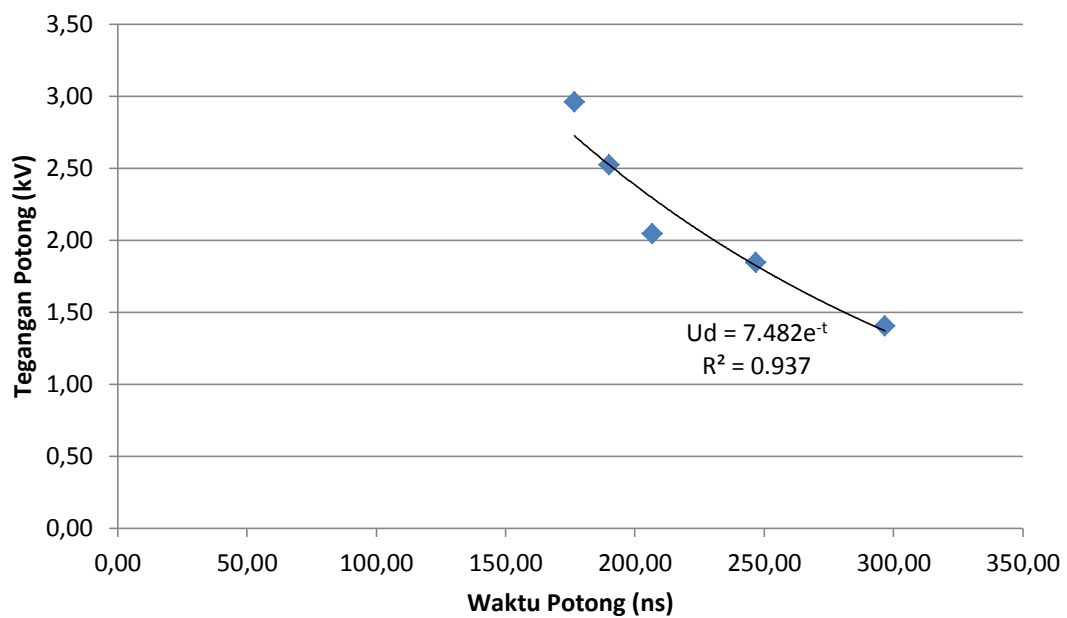
Tabel 4.16 Pengujian Karakteristik Tegangan – Waktu Arester PCB Bentuk Baji

No.	U_i (kV)	U_d (kV)	\bar{U}_d (kV)	t_d (ns)	\bar{t}_d (ns)
1	3,19	1,40	1,41	270	296,67
		1,40		300	
		1,42		320	
2	6,06	1,85	1,90	250	246,67
		1,90		260	
		1,95		230	
3	9,01	2,05	2,13	200	206,67
		2,16		210	
		2,19		210	
4	12,03	2,52	2,51	190	190,00
		2,56		180	
		2,45		200	
5	15,02	2,96	2,90	180	176,67
		3,03		190	
		2,70		160	

Pada Tabel 4.16 dapat dilihat bahwa pada saat pengujian karakteristik tegangan-waktu dengan tegangan uji yang berbeda. Saat diberikan tegangan uji sebesar 3,19 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 1,41 kV dan waktu potongnya 296,67 ns. Selanjutnya pada saat diberikan tegangan uji sebesar 6,06 kV didapatkan nilai tegangan potong 1,90 kV dan waktu potongnya 246,67 ns. Pada pengujian dengan tegangan uji sebesar 9,01 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,13 kV dan waktu potongnya 206,67 ns. Pada pengujian dengan tegangan uji sebesar 12,03 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,51 kV dan waktu potongnya 190 ns. Pada pengujian dengan tegangan uji sebesar 15,02 kV didapatkan nilai tegangan potong sebesar 2,90 kV dan waktu potongnya 176,67 ns.

Dari data pada Tabel 4.16 dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya tegangan uji yang diberikan pada arester maka nilai tegangan potong yang dihasilkan semakin tinggi, sedangkan untuk waktu potong nilainya akan semakin kecil seiring dengan bertambahnya tegangan uji.

Dengan menggunakan data dari Tabel 4.16, maka dapat dibuat grafik karakteristik tegangan waktu arester PCB bentuk baji yang ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Karakteristik Tegangan-Waktu Arester PCB Bentuk Baji

Gambar 4.14 menunjukkan grafik dari karakteristik tegangan-waktu arester PCB bentuk baji, dari gambar dapat dilihat bahwa nilai tegangan potong akan semakin kecil seiring dengan bertambahnya waktu potong yang dihasilkan.

Fungsi dari Grafik 4.14 adalah :

$$U_d = 7.482e^{-t}$$

$$R^2 = 0.937$$



BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis yang telah dilaksanakan pada penelitian ini, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pemotongan tegangan lebih impuls menggunakan variabel variasi jarak sela dan sudut baji. Dari variable tersebut maka didapatkan pemotong tegangan lebih impuls dengan menggunakan elektroda PCB bentuk baji untuk tingkat proteksi 1,5 kV dengan dimensi jarak sela 0,3 mm dan sudut baji 30° , serta 15 susunan keping elektroda.
2. Arester elektroda PCB bentuk baji mampu menghasilkan tegangan potong pada bagian muka gelombang dengan tingkat proteksi 1,5 kV yang sesuai standar DIN VDE 0110/IEC Publ.664, arester ini dikategorikan kedalam kategori I untuk melindungi peralatan elektronik. Didapatkan pula karakteristik arester, dimana semakin tinggi amplitudo tegangan impuls maka semakin tinggi pula tegangan potongnya, sedangkan waktu potongnya akan semakin kecil.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian yang akan datang dari hasil penelitian ini sebagai berikut :

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut terkait pengaruh permukaan elektroda PCB yang tidak rata, karena dapat mempengaruhi karakteristik pemotongan tegangan impuls dari elektroda PCB tersebut.
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut terkait elektroda PCB dengan bentuk geometri yang berbeda dan penggunaan PCB *double layer*.



DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, A., Prof. Dr. 1983. *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Hauschild, W dan W. Mosch. 1984. *Statistical Techniques For High-Voltage Engineering*. Berlin : VEB Verlag Technik.
- Hendreswari, A. 2014. *Rancang Bangun Pemotong Surja Tegangan Pada KWHmeter Tiga Fasa Menggunakan PCB (Printed Circuit Board)*. Malang : Universitas Brawijaya
- Kind, D. 1993. *Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Terjemahan K.T. Sirait. Bandung : Penerbit ITB.
- Mansuri. 2002. *Perencanaan dan Pembuatan Prototipe Arrester Jenis Kancing untuk Proteksi Tegangan Rendah*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Puspitasari, A. 2014. *Rancang Bangun Peralatan Proteksi Lampu Penerangan Jalan Umum Satu Fasa Terhadap Bahaya SurjaPetir Menggunakan PCB (Printed Circuit Board)*. Malang : Universitas Brawijaya
- Tobing , B. 2012. *Dasar - Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- <http://psta.lapan.go.id/index.php/subblog/read/2014/13/Pupuk-Dari-Atmosfer/articles>

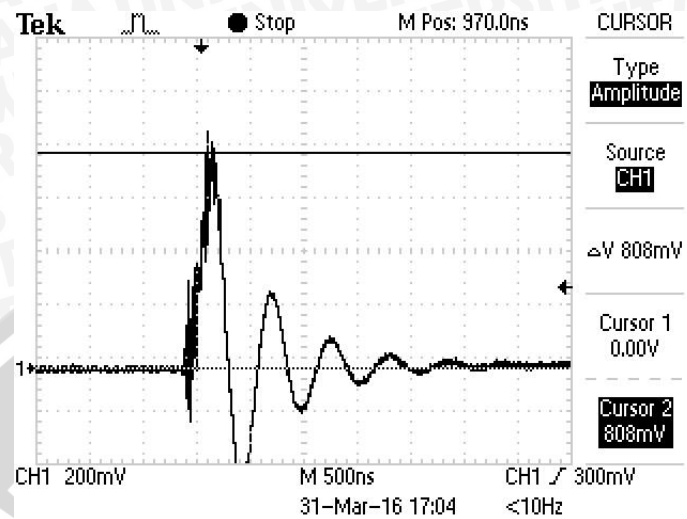




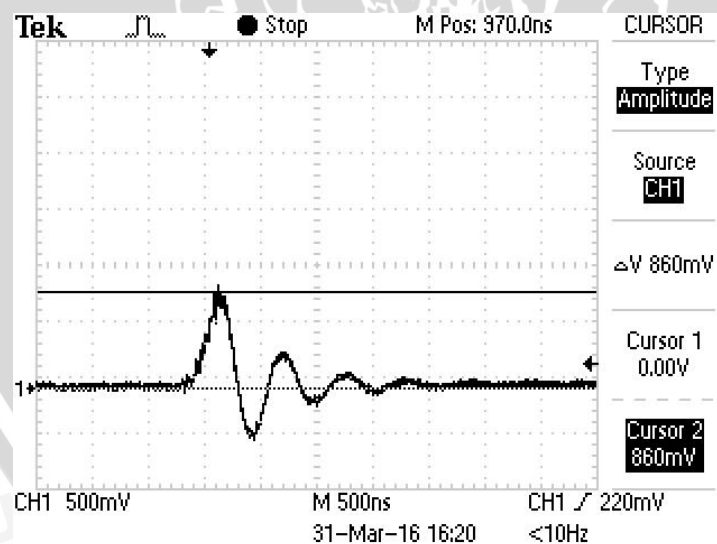
LAMPIRAN



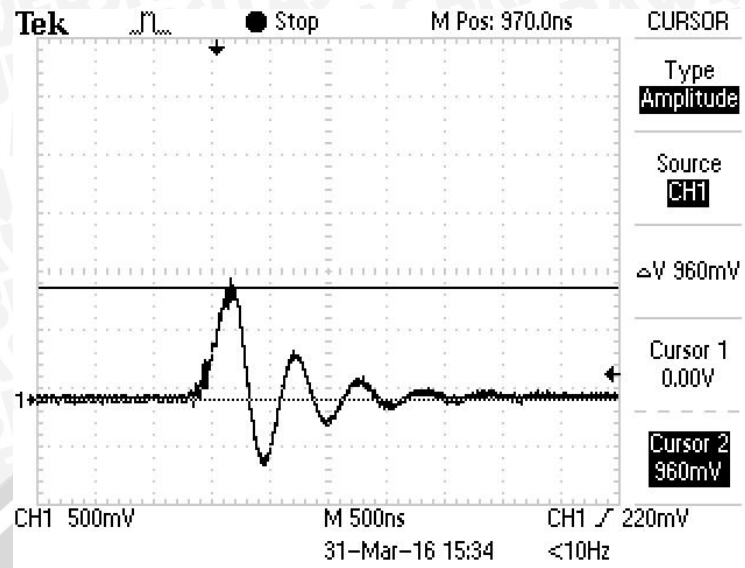
Lampiran 1 Gelombang Impuls Pengujian Pengaruh Jarak Sela Terhadap Tegangan Potong



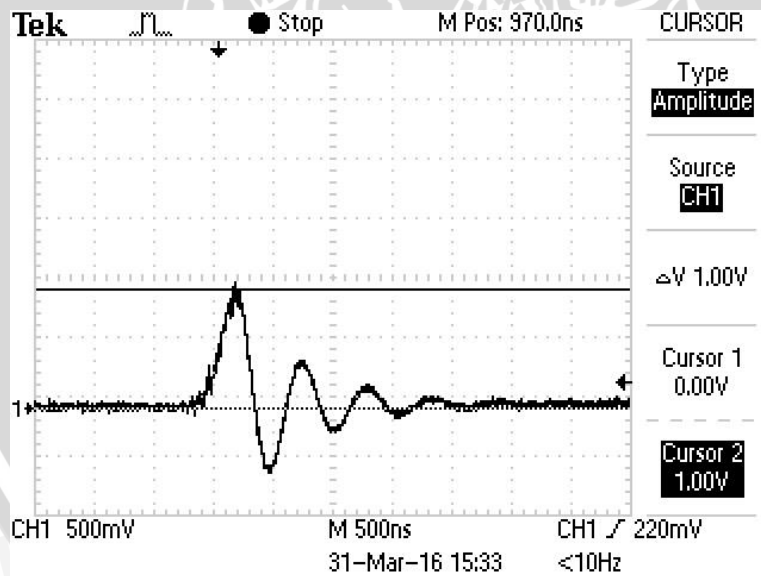
Gambar 1. Gelombang Impuls dengan Jarak Sela 0,3 mm



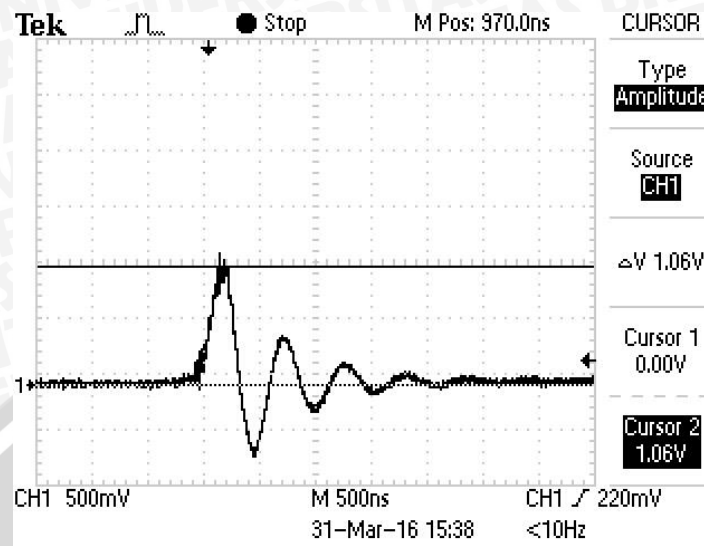
Gambar 2. Gelombang Impuls dengan Jarak Sela 0,4 mm



Gambar 3. Gelombang Impuls dengan Jarak Sela 0,5 mm

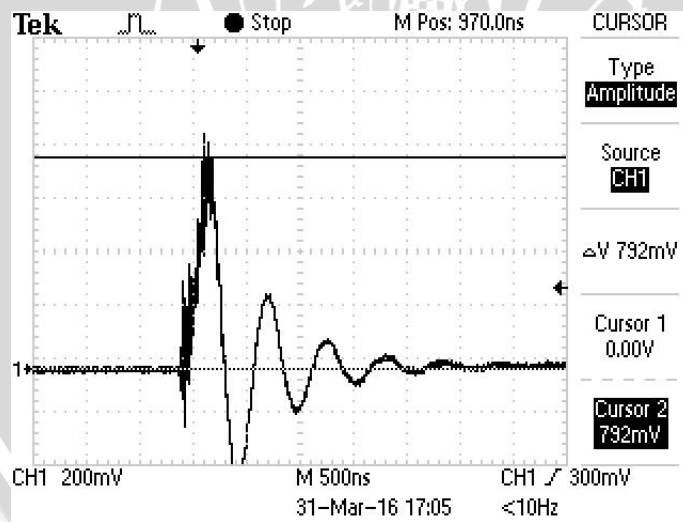


Gambar 4. Gelombang Impuls dengan Jarak Sela 0,6 mm

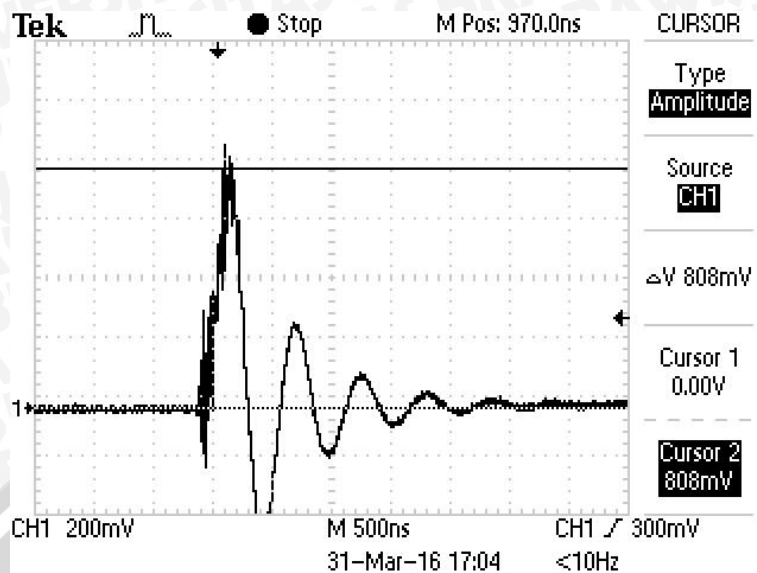


Gambar 5. Gelombang Impuls dengan Jarak Sela 0,8 mm

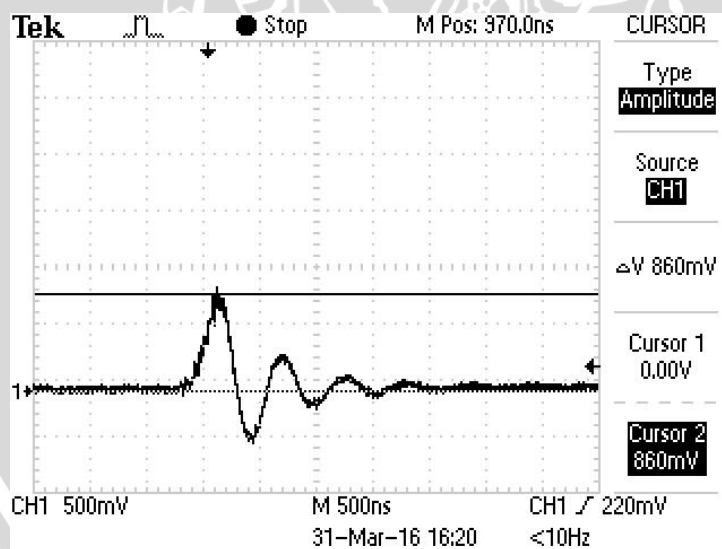
Lampiran 2 Gelombang Impuls Pengujian Sudut Baji Terhadap Tegangan Potong



Gambar 6. Gelombang Impuls dengan Sudut Baji 15°



Gambar 7. Gelombang Impuls dengan Sudut Baji 30°



Gambar 8. Gelombang Impuls dengan Sudut Baji 60°

Lampiran 3 Foto Pengujian

Gambar 9. Alat Ukur Tegangan Tinggi Impuls Pada *Control Desk*



Gambar 10. Rangkaian Pengujian Tegangan Tinggi Impuls



Gambar 11. Arester dengan Sudut Baji 15° dan Variasi Jarak Sela



Gambar 12. Arester dengan Sudut Baji 30° dan Variasi Jarak Sela



Gambar 13. Arester dengan Sudut Baji 35° dan Variasi Jarak Sela