

**KOORDINASI PROTEKSI ARESTER PCB DAN DIODA ZENER DENGAN
ELEMEN DEKOPLING PADA PERALATAN LISTRIK TEGANGAN RENDAH**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

RESI RATNASARI

NIM. 105060307111034 - 63

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2014

LEMBAR PERSETUJUAN

**KOORDINASI PROTEKSI ARESTER PCB DAN DIODA ZENER DENGAN
ELEMEN DEKOPLING PADA PERALATAN LISTRIK TEGANGAN RENDAH**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

RESI RATNASARI

NIM. 105060307111034 - 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Moch. Dhofir, Drs., Ir., M.T.

NIP. 19600701 199002 1 001

Soemarwanto, Ir., M.T.

NIP. 19500715 198003 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

**KOORDINASI PROTEKSI ARESTER PCB DAN DIODA ZENER DENGAN
ELEMEN DEKOPLING PADA PERALATAN LISTRIK TEGANGAN RENDAH**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

RESI RATNASARI

NIM. 105060307111034 - 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 13 Oktober 2014

Dosen Penguji

Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.

NIP. 19580609 198703 1 003

Ir. Wijono, M.T., Ph.D

NIP. 19621111 198903 1 003

Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.

NIP. 19680122 199512 2 001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Muhammad Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 19741203 200012 1 001

PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, berkat dan hidayah-Nya sehingga skripsi dengan judul “**Koordinasi Proteksi Arester PCB dan Dioda Zener dengan Elemen Dekopling pada Peralatan Listrik Tegangan Rendah**” dapat diselesaikan. Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

Banyak pihak yang telah membantu, baik berupa material maupun spiritual dalam menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini disampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada:

1. Bapak Muhammad Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., selaku Sekertaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Ibu Rini Nur Hasanah, Dr. S.T., M.Sc., selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
4. Bapak Moch. Dhofir, Drs., Ir., M.T., selaku Dosen Pembimbing I.
5. Bapak Soemarwanto, Ir., M.T., selaku Dosen Pembimbing II.
6. Bapak Ir. Soeprapto, M.T., selaku Dosen Penasehat Akademik.
7. Ayahanda Drs. Muis Harianto, Ibunda Nur Hasanah dan kakak Norma Halimatus Sa'dia.
8. Teman-teman Magnet'10 dan POWER'10.
9. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Tentu saja penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu diharapkan adanya saran dan kritik yang sifatnya membangun dari siapa saja yang telah membaca skripsi ini. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Malang, Oktober 2014

Penulis

DAFTAR ISI

	halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Sistematika Pembahasan	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Arester Tegangan Rendah	4
2.1.1 Arester PCB	4
2.1.2 Dioda Zener	4
2.2 Bentuk Gelombang Berjalan	6
2.3 Perambatan Gelombang Berjalan	8
2.4 Elemen Dekopling	10
2.4.1 Resistor	10
2.4.2 Induktor	11
2.4.3 Kapasitor	13
2.5 Respon Rangkaian terhadap Berbagai Bentuk Gelombang Berjalan	14
2.5.1 Gelombang Eksponensial	14
2.5.2 Gelombang Langkah Tak Ideal	16
2.5.3 Gelombang Eksponensial Ganda	17
2.6 Pemotongan Gelombang Berjalan	17
2.6.1 Tingkat Pemotongan Tegangan	19
2.6.2 Karakteristik Tegangan Potong	20
2.7 Kaskade Arester	21
2.8 Tegangan Impuls	21

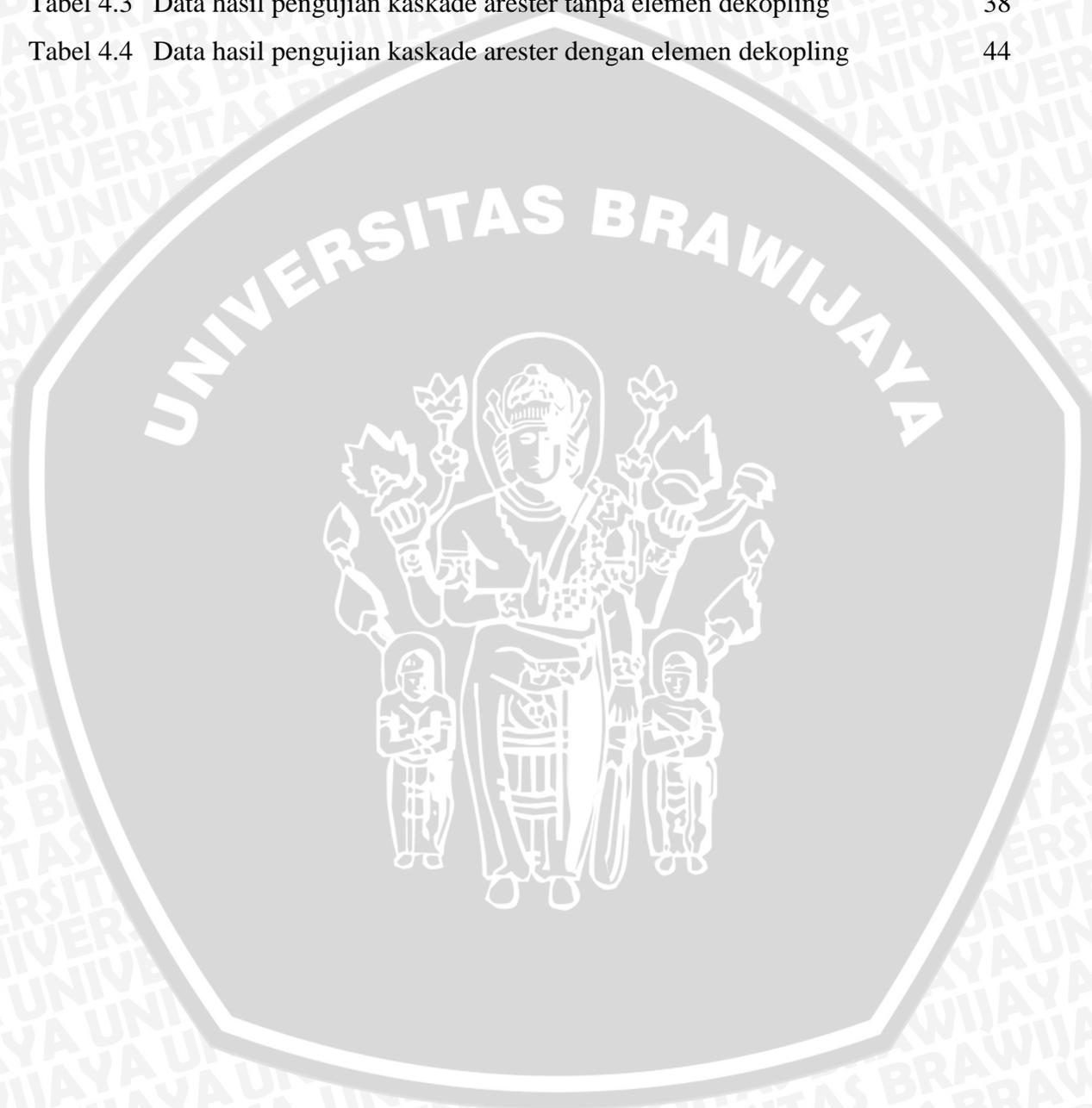


BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1 Metode Penelitian	23
3.2 Variabel Penelitian.....	24
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	24
3.4 Pengujian Koordinasi Kaskade Arester	24
3.4.1 Objek Uji.....	24
3.4.2 Rangkaian Pengujian	25
3.4.3 Sistem Pengujian.....	26
3.5 Analisis Data.....	27
3.6 Kesimpulan dan Saran	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1 Perancangan Kaskade Arester	28
4.1.1 Perancangan Arester PCB.....	28
4.1.2 Pemilihan Dioda Zener	29
4.1.3 Pemilihan Jenis Elemen Dekopling	30
4.2 Pengujian Kaskade Arester tanpa Elemen Dekopling	33
4.2.1 Pengujian Arester PCB	33
4.2.2 Pengujian Dioda Zener	35
4.2.3 Pengujian Arester PCB dan Dioda Zener	37
4.3 Perancangan Induktor	39
4.3.1 Penentuan Nilai Induktor	39
4.3.2 Penentuan Desain Induktor	41
4.4 Pengujian Kaskade Arester dengan Elemen Dekopling	43
BAB V PENUTUP	46
5.1 Kesimpulan	46
5.2 Saran	46
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 4.1	Data hasil pengujian arester PCB jarak sela 0,3 mm	34
Tabel 4.2	Data hasil pengujian dioda zener	36
Tabel 4.3	Data hasil pengujian kaskade arester tanpa elemen dekopling	38
Tabel 4.4	Data hasil pengujian kaskade arester dengan elemen dekopling	44



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Arester PCB	4
Gambar 2.2	Rangkaian dioda zener	5
Gambar 2.3	Simbol dan kurva karakteristik dioda zener	5
Gambar 2.4	Gelombang eksponensial ganda	6
Gambar 2.5	Gelombang langkah ideal	7
Gambar 2.6	Gelombang langkah tidak ideal	7
Gambar 2.7	Gelombang baji	7
Gambar 2.8	Gelombang eksponensial	8
Gambar 2.9	Gelombang kombinasi	8
Gambar 2.10	Perubahan impedansi pada titik peralihan	8
Gambar 2.11	Perbedaan impedansi surja saluran	10
Gambar 2.12	Penyisipan R seri	10
Gambar 2.13	Penyisipan L seri	12
Gambar 2.14	Penyisipan C paralel	13
Gambar 2.15	Respon rangkaian terhadap gelombang eksponensial	16
Gambar 2.16	Respon rangkaian terhadap gelombang langkah tak ideal	16
Gambar 2.17	Respon rangkaian terhadap gelombang eksponensial ganda	17
Gambar 2.18	Pemotongan gelombang tegangan oleh arester	17
Gambar 2.19	Daerah proteksi arester terhadap gelombang berbentuk baji	19
Gambar 2.20	Kategori tegangan ketahanan surja dan tingkatan pemotongan tegangan oleh arester	19
Gambar 2.21	Karakteristik v-t	20
Gambar 2.22	Rangkaian kaskade arester dengan elemen dekoupling	21
Gambar 2.23	Parameter tegangan impuls surja petir	22
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	23
Gambar 3.2	Objek uji kaskade arester dengan elemen dekoupling	25
Gambar 3.3	Rangkaian pembangkit impuls 1,2/50 μ s	25
Gambar 3.4	Pengujian Arester	26
Gambar 4.1	Desain arester PCB	28
Gambar 4.2	Hasil rancang bangun arester PCB	29
Gambar 4.3	Dioda zener 1N5388B	29

Gambar 4.4	Hasil rancang bangun arester PCB dan dioda zener	30
Gambar 4.5	Kaskade arester dengan elemen dekoping resistor	30
Gambar 4.6	Kaskade arester dengan elemen dekoping kapasitor	32
Gambar 4.7	Pengujian arester PCB	33
Gambar 4.8	Grafik karakteristik v-t arester PCB	34
Gambar 4.9	Pemotongan gelombang tegangan lebih oleh arester PCB	35
Gambar 4.10	Pengujian dioda zener	35
Gambar 4.11	Grafik karakteristik v-t dioda zener	36
Gambar 4.12	Pemotongan gelombang tegangan lebih oleh dioda zener	37
Gambar 4.13	Pengujian kaskade arester tanpa elemen dekoping	37
Gambar 4.14	Grafik karakteristik v-t kaskade arester tanpa elemen dekoping	38
Gambar 4.15	Pemotongan gelombang tegangan lebih oleh kaskade arester tanpa elemen dekoping	39
Gambar 4.16	Induktor	43
Gambar 4.17	Hasil rancang bangun kaskade arester dengan elemen dekoping	43
Gambar 4.18	Pengujian kaskade arester dengan elemen dekoping	44
Gambar 4.19	Pemotongan gelombang tegangan lebih oleh arester PCB pada kaskade arester dengan elemen dekoping	45
Gambar 4.20	Pemotongan gelombang tegangan lebih oleh dioda zener pada kaskade arester dengan elemen dekoping	45

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1	Datasheet dioda zener	47



RINGKASAN

Resi Ratnasari, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Oktober 2014, *Koordinasi Proteksi Arester PCB dan Dioda Zener dengan Elemen Dekopling pada Peralatan Listrik Tegangan Rendah*, Dosen Pembimbing: Moch Dhofir dan Soemarwanto.

Arester PCB adalah salah satu bentuk rekayasa arester sela udara yang secara luas telah digunakan sebagai arester tegangan rendah. Pada arester PCB terdapat kesulitan dalam merekayasa jarak elektroda sela udara di bawah 1 mm dengan tingkat proteksi 1,5 kV. Oleh karena itu, apabila digunakan untuk mendapatkan tingkat proteksi 0,8 kV dibutuhkan suatu inovasi teknologi berupa kombinasi proteksi antara arester PCB dan dioda zener secara kaskade. Arester PCB dan dioda zener ini akan diletakkan secara seri dengan jarak cukup pendek sehingga memerlukan suatu elemen dekopling agar koordinasi proteksi antar arester tersebut dapat berjalan dengan baik. Penelitian ini menggunakan beberapa metode yaitu perancangan, pengujian dan analisis kaskade arester. Perancangan kaskade arester meliputi perancangan arester PCB, pemilihan dioda zener dan perancangan elemen dekopling. Arester PCB berupa PCB *single layer* dengan jarak sela 0,3 mm, dioda zener dengan tegangan 200 V dan jenis elemen dekopling yang dipilih adalah didasarkan atas analisis. Selanjutnya dilakukan pengujian dan analisis terhadap pengaruh elemen dekopling terhadap koordinasi proteksi arester PCB dan dioda zener. Pengujian dilakukan dengan menaikkan tegangan dari 2 kV hingga 10 kV impuls puncak. Berdasarkan hasil pengujian didapatkan bahwa elemen dekopling yang digunakan adalah induktor 0,36 mH dengan inti ferit. Elemen dekopling ini memegang peranan penting yaitu apabila di antara arester PCB dan dioda zener tidak disisipi elemen dekopling, maka dioda zener saja yang bekerja. Pada kaskade arester PCB dan dioda zener dengan elemen dekopling untuk tegangan impuls 10 kV, kaskade arester ini mampu memotong tegangan 317 V dengan waktu pemotongan 80 ns.

Kata kunci: kaskade arester, arester PCB, dioda zener, elemen dekopling, induktor.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Petir adalah fenomena alam yang terjadi akibat pelepasan muatan listrik dari awan ke tanah. Sambaran petir dapat menimbulkan gelombang berjalan yang merambat pada saluran. Gelombang berjalan tersebut akan menyebabkan terjadinya tegangan lebih yang berujung pada kerusakan peralatan listrik. Salah satu peralatan proteksi untuk melindungi peralatan listrik dari gangguan tegangan lebih adalah arester. Jenis arester tegangan rendah yang secara luas telah digunakan yaitu arester sela udara. Salah satu bentuk rekayasa arester sela udara adalah arester PCB (*Printed Circuit Board*).

Penelitian tentang rekayasa arester PCB telah dilakukan pada peralatan listrik 3 fasa dengan tingkat proteksi 4 kV oleh Desinta Ayu dan pada peralatan 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 terdapat kesulitan dalam merekayasa jarak elektroda sela udara di bawah 1 mm dengan tingkat proteksi 1,5 kV. Oleh karena itu, teknologi dengan memperkecil sela udara akan cukup sulit diterapkan apabila digunakan untuk mendapatkan tingkat proteksi 0,8 kV. Berdasarkan kondisi ini dibutuhkan inovasi teknologi untuk mencapai tujuan tersebut yaitu dengan membuat suatu kombinasi proteksi antara arester PCB dan dioda zener secara kaskade.

Pada umumnya suatu kaskade arester akan berkoordinasi dengan baik apabila arester yang memiliki tegangan kerja lebih tinggi terletak di bagian depan dan tegangan kerja lebih rendah di bagian belakang. Di samping itu, keduanya juga terletak dalam jarak yang cukup memadai. Kenyataannya pada penelitian ini, dua arester akan diletakkan secara seri dengan jarak yang cukup pendek. Hal tersebut akan mengakibatkan sistem kaskade tidak akan bekerja karena arester yang memiliki tegangan kerja lebih rendah akan selalu beroperasi terlebih dahulu saat gelombang surja datang. Oleh karena itu, pada sistem kaskade ini diperlukan suatu impedansi agar koordinasi proteksi antar arester dapat berjalan dengan baik. Impedansi yang biasanya disebut dengan istilah elemen dekoupling ini berfungsi untuk mendapatkan tegangan jatuh yang cukup sehingga arester PCB dapat bekerja. Elemen dekoupling dapat berupa resistor, induktor atau kapasitor. Penelitian ini akan membahas koordinasi proteksi dari arester PCB dan dioda zener dengan melibatkan elemen dekoupling.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Elemen dekopling apakah yang dapat digunakan agar terjadi koordinasi yang sesuai antara arester PCB dan dioda zener.
2. Berapa nilai elemen dekopling yang diperlukan agar terjadi koordinasi antara arester PCB dan dioda zener dengan tingkat proteksi 0,8 kV.
3. Bagaimana pemotongan tegangan impuls oleh arester PCB dan dioda zener dengan elemen dekopling.

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah, agar pembahasan terfokus pada pokok pembahasan maka batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Arestor yang digunakan adalah arester PCB dan dioda zener.
2. PCB yang digunakan *single layer* dengan jarak sela 0,3 mm.
3. Dioda zener yang digunakan memiliki tegangan 200 V.
4. Elemen dekopling dapat berupa resistor, induktor atau kapasitor. Jenis elemen dekopling yang digunakan didasarkan atas analisis pemilihan elemen dekopling.
5. Elemen dekopling diasumsikan ideal.
6. Tingkat tegangan proteksi kaskade arester 0,8 kV.
7. Pengujian dilakukan menggunakan tegangan impuls 1,2/50 μ s.
8. Pengukuran tidak mengukur gelombang arus.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan elemen dekopling yang sesuai agar terjadi suatu koordinasi antara arester PCB dan dioda zener dengan tingkat proteksi 0,8 kV.

1.5 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dalam penelitian ini di antaranya sebagai berikut:

BAB I : Membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika pembahasan.

- BAB II** : Membahas tentang teori-teori yang mendukung untuk dijadikan dasar dalam penelitian ini.
- BAB III** : Membahas tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini.
- BAB IV** : Membahas tentang perancangan, pengujian dan analisis terhadap kaskade arester dengan elemen dekopling.
- BAB V** : Berisikan tentang kesimpulan dan saran dari hasil penelitian ini.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Arester Tegangan Rendah

Arester adalah peralatan proteksi sistem tenaga listrik terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh surja petir. Proteksi tersebut dilakukan dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkannya ke tanah. Pada penelitian ini, peralatan pelindung surja yang digunakan berupa arester PCB dan dioda zener.

2.1.1 Arester PCB

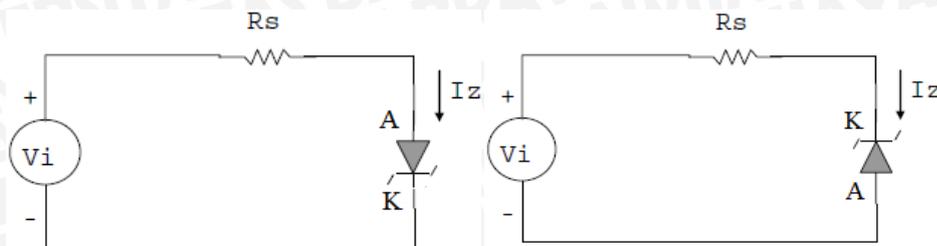
Sela udara merupakan salah satu komponen pelindung surja primer. Tingkat proteksi dari sela udara ditentukan oleh bentuk, material dan jarak antar elektroda. Salah satu bentuk inovasi dari arester sela udara adalah arester PCB, seperti terlihat pada Gambar 2.1. Arester PCB biasanya digunakan pada aplikasi 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 2.1 Arester PCB
Sumber: Puspitasari, 2013:13

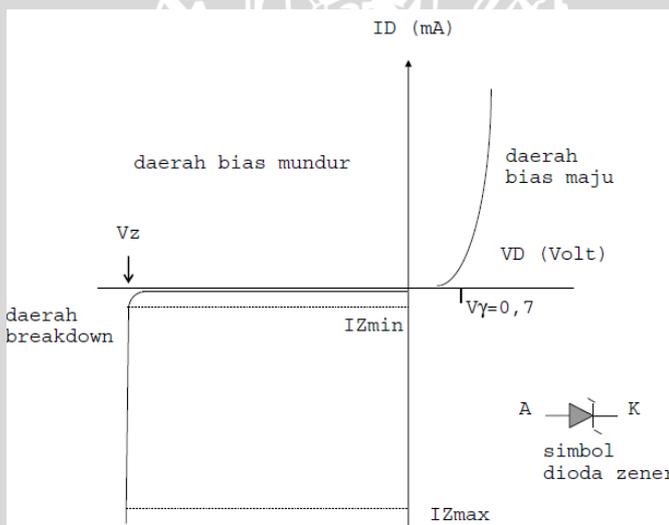
2.1.2 Dioda Zener

Dioda zener merupakan salah satu komponen pelindung surja sekunder yang digunakan untuk menjepit tegangan surja secara akurat (Dagostino dan Wujek, 2010:637). Dioda zener memiliki karakteristik mampu menyalurkan arus dalam suatu rangkaian ke arah yang berlawanan apabila terdapat tegangan yang melampaui batas tegangan zener, seperti terlihat pada Gambar 2.2. Hal ini berbeda dengan dioda penyearah yang hanya menyalurkan arus ke satu arah dalam suatu rangkaian.



Gambar 2.2 Rangkaian dioda zener (a) bias maju (b) bias mundur
 Sumber: Surjono (2011:42)

Pada Gambar 2.2 saat dioda zener dalam kondisi bias maju, yaitu katoda diberi tegangan lebih negatif terhadap anoda maka dioda zener akan berfungsi seperti dioda penyearah. Dioda penyearah akan aktif setelah mencapai tegangan *barrier* yaitu 0,7 V. Pada saat dioda zener dibias mundur, yaitu saat katoda diberi tegangan lebih positif terhadap anoda maka dioda zener akan bertindak seperti hubung singkat. Kurva karakteristik dioda zener dalam kondisi bias maju dan bias mundur diberikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Simbol dan kurva karakteristik dioda zener
 Sumber: Surjono, 2011:42

Pada Gambar 2.3 dapat dilihat bahwa apabila terdapat tegangan yang mencapai batas tegangan dioda zener V_z , maka arus dioda zener I_z akan naik dengan cepat mulai dari arus minimum hingga maksimum. Perubahan tersebut tidak berpengaruh terhadap tegangan dioda zener yang relatif konstan. Daerah *breakdown* inilah yang menjadi titik fokus untuk penerapan dioda zener. Salah satu fungsi penerapan dioda zener adalah untuk melindungi peralatan listrik dari kerusakan akibat kenaikan tegangan.

2.2 Bentuk Gelombang Berjalan

Suatu gelombang berjalan secara sistematis dinyatakan dengan persamaan berikut: (Hutauruk, 1989:5)

$$e(t) = E \left(\varepsilon^{-\frac{t}{\theta}} - \varepsilon^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2-1)$$

dimana:

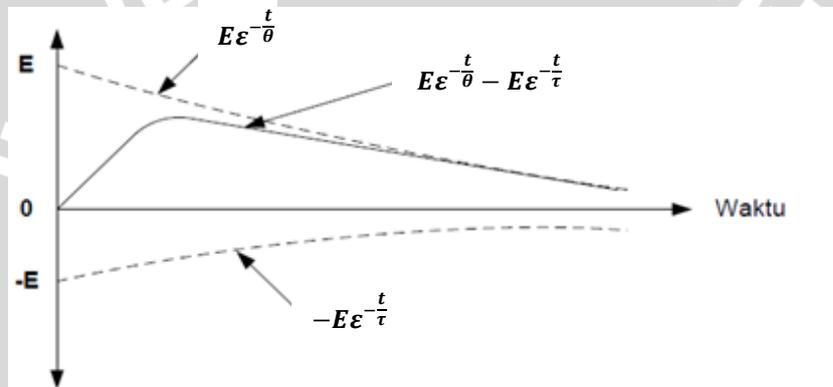
E = tegangan surja puncak (kV)

τ = konstanta waktu dahi (μ s)

θ = konstanta waktu paruh punggung (μ s)

$t \geq 0 \mu$ s

Hasil dari persamaan (2-1) dilukiskan dengan Gambar 2.4, yang memiliki bentuk mirip seperti gelombang surja pada osiloskop.



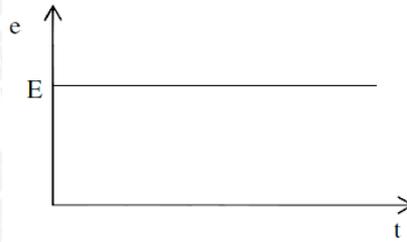
Gambar 2.4 Gelombang eksponensial ganda
Sumber: Hutauruk, 1989:6

Gelombang eksponensial ganda tergantung pada nilai $\frac{1}{\theta}$ dan $\frac{1}{\tau}$, dimana perubahan nilainya membentuk berbagai macam gelombang yang dapat digunakan sebagai pendekatan dari gelombang berjalan. Macam-macam gelombang tersebut akan diuraikan sebagai berikut.

a. Gelombang langkah ideal

Gelombang langkah ideal diberikan pada Gambar 2.5. Dari persamaan (2-1), apabila $\frac{1}{\theta} = 0$ dan $\frac{1}{\tau} = \infty$ maka akan diperoleh:

$$e = E \quad (2-2)$$

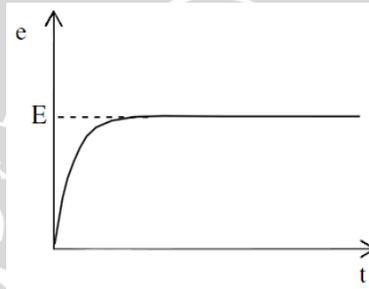


Gambar 2.5 Gelombang langkah ideal
 Sumber: Hutauruk, 1989:6

b. Gelombang langkah tidak ideal

Gelombang langkah tidak ideal diberikan pada Gambar 2.6. Dari persamaan (2-1), apabila $\frac{1}{\theta} = 0$ maka akan diperoleh:

$$e = E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \tag{2-3}$$

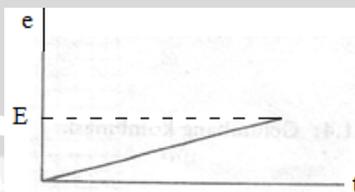


Gambar 2.6 Gelombang langkah tidak ideal
 Sumber: Hutauruk, 1989:6

Pada persamaan (2-3), jika $\frac{1}{\tau} \rightarrow 0$ dan $E \rightarrow \infty$, persamaannya menjadi:

$$e = \left(\frac{1}{\tau} E \right) t \tag{2-4}$$

Apabila dilukiskan akan menghasilkan gelombang baji seperti terlihat pada Gambar 2.7 berikut.

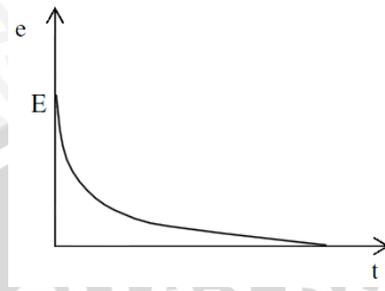


Gambar 2.7 Gelombang baji
 Sumber: Hutauruk, 1989:6

c. Gelombang eksponensial

Gelombang eksponensial diberikan pada Gambar 2.8. Dari persamaan (2-1), apabila $\frac{1}{\tau} = \infty$ maka akan diperoleh:

$$e = E\varepsilon^{-\frac{t}{\theta}} \tag{2-5}$$



Gambar 2.8 Gelombang eksponensial
Sumber: Hutaaruk, 1989:6

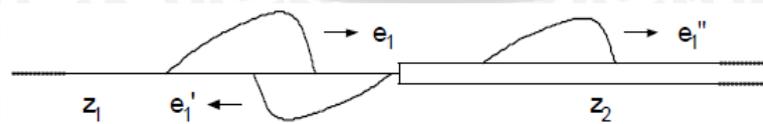
Bentuk gelombang yang lain didapat dari hasil kombinasi gelombang di atas seperti yang diberikan pada Gambar 2.9 yang merupakan kombinasi dari gelombang berbentuk baji polaritas positif dan negatif.



Gambar 2.9 Gelombang kombinasi
Sumber: Hutaaruk, 1989:6

2.3 Perambatan Gelombang Berjalan

Suatu gelombang berjalan apabila menemui titik peralihan seperti hubungan terbuka, hubungan singkat atau perubahan impedansi, maka sebagian gelombang akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Pada Gambar 2.10 gelombang datang, gelombang pantul dan gelombang terusan disimbolkan dengan e_i , e_r dan e_t , sedangkan Z_1 dan Z_2 merupakan impedansi surja saluran.



Gambar 2.10 Perubahan impedansi pada titik peralihan
Sumber: Hutaaruk, 1989:26



Pada titik peralihan tersebut berlaku persamaan arus dan tegangan sebagai berikut:
(Hutauruk, 1989:27)

$$i_1 = i_2 \quad (2-6)$$

$$e_1 = e_2 \quad (2-7)$$

Apabila persamaan (2-6) dan (2-7) diuraikan ke dalam komponen gelombang datang, gelombang pantul dan gelombang terusan, maka akan diperoleh persamaan yaitu:

$$e_i - e_r = \frac{Z_1}{Z_2} e_t \quad (2-8)$$

$$e_i + e_r = e_t \quad (2-9)$$

Gelombang pantul pada persamaan (2-8) dan (2-9) dapat dieleminasi guna memperoleh persamaan gelombang tegangan terusan.

$$e_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} e_i \quad (2-10)$$

Gelombang arus terusan didapat dari persamaan (2-10), e_i diganti dengan perkalian Z_1 dan i_i kemudian membagi kedua ruas dengan impedansi surja Z_2 sehingga diperoleh:

$$i_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} i_i \quad (2-11)$$

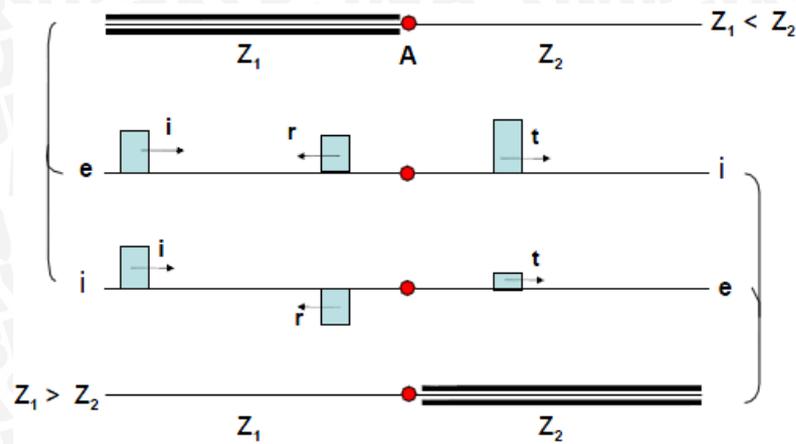
Persamaan dari pemantulan gelombang yang terjadi untuk tegangan dapat diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan (2-10) ke dalam persamaan (2-8).

$$e_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} e_i \quad (2-12)$$

Selanjutnya dengan membagi kedua ruas pada persamaan di atas dengan $-Z_1$, persamaan gelombang arus pantulnya dapat dirumuskan yaitu:

$$i_r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} i_i \quad (2-13)$$

Apabila gelombang berjalan datang menemui saluran dengan impedansi surja lebih kecil (Z_1) menuju saluran dengan impedansi surja lebih besar (Z_2), maka amplitudo gelombang terusan akan diperbesar. Di lain sisi, apabila Z_1 lebih besar dari Z_2 maka gelombang terusan akan diperkecil. Uraian tersebut seperti diberikan pada Gambar 2.11.



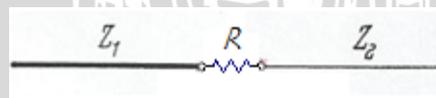
Gambar 2.11 Perbedaan impedansi surja saluran
 Sumber: Rudenberg, 1968:95

2.4 Elemen Dekopling

Elemen dekopling dapat berupa resistor, induktor atau kapasitor. Pada penelitian ini, elemen dekopling digunakan untuk koordinasi antara arester PCB dan dioda zener. Penyisipan elemen dekopling di antara dua arester akan memberikan pengaruh terhadap perilaku perambatan gelombang berjalan. Bentuk gelombang pantul dan terusnya akan mengalami distorsi gelombang yang disebabkan oleh perilaku masing-masing komponen tersebut.

2.4.1 Resistor

Gambar 2.12 menunjukkan suatu resistor dengan nilai resistansi R yang disisipkan secara seri di antara dua saluran yang mempunyai impedansi surja Z_1 dan Z_2 .



Gambar 2.12 Penyisipan R seri
 Sumber: Rudenberg, 1968:98

Berdasarkan Hukum Kirchoff, persamaan arus dan tegangannya dapat dirumuskan sebagai berikut: (Rudenberg, 1968:98)

$$i_1 = i_2 \tag{2-14}$$

$$e_1 = e_2 + Ri_2 \tag{2-15}$$

i_1 dan i_2 adalah arus yang merambat pada saluran, e_1 dan e_2 adalah tegangan pada saluran, sedangkan Ri_2 adalah jatuh tegangan pada resistansi. Apabila persamaan (2-14) dan (2-15)

diuraikan ke dalam komponen gelombang datang, gelombang pantul dan gelombang terusan, maka akan diperoleh persamaan yaitu:

$$e_i - e_r = \frac{Z_1}{Z_2} e_t \quad (2-16)$$

$$e_i + e_r = \left(1 + \frac{R}{Z_2}\right) e_t \quad (2-17)$$

Gelombang pantul pada persamaan (2-16) dan (2-17) dapat dieleminasi guna memperoleh hubungan antara gelombang datang dan gelombang terusan.

$$\frac{Z_1 + Z_2 + R}{Z_2} e_t = 2e_i \quad (2-18)$$

Apabila gelombang terusan dinyatakan sebagai gelombang langkah ideal dengan amplitudo E , kemudian disubsitusikan ke dalam persamaan (2-18), maka akan diperoleh persamaan gelombang tegangan terusan sebagai berikut.

$$e_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2 + R} E \quad (2-19)$$

Gelombang arus terusan diturunkan dari persamaan (2-19) dengan membagi kedua ruas dengan impedansi surja Z_2 .

$$i_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2 + R} I \quad (2-20)$$

Gelombang surja yang datang pada saluran 1, selain diteruskan ke saluran 2 juga akan dipantulkan kembali ke saluran 1. Persamaan dari pemantulan gelombang yang terjadi untuk tegangan dapat diperoleh dengan mensubsitusikan persamaan (2-19) ke dalam persamaan (2-16).

$$e_r = E \left(1 - \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2 + R}\right) \quad (2-21)$$

Selanjutnya dengan membagi kedua ruas pada persamaan di atas dengan $-Z_1$, persamaan gelombang arus pantulnya dapat dirumuskan yaitu:

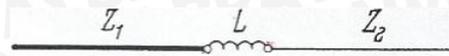
$$i_r = -I \left(1 - \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2 + R}\right) \quad (2-22)$$

2.4.2 Induktor

Induktor bersifat menghambat komponen frekuensi tinggi dari gelombang surja yang berupa tegangan dan arus. Induktor pada Gambar 2.13 diasumsikan ideal dengan nilai induktansi L tanpa resistansi dan kapasitansi. Pada titik sambungan rangkaian tersebut berlaku persamaan arus dan tegangan, yaitu: (Rudernberg, 1968:101)

$$i_1 = i_2 \quad (2-23)$$

$$e_1 = e_2 + L \frac{di_2}{dt} \quad (2-24)$$



Gambar 2.13 Penyisipan L Seri
Sumber: Rudernberg, 1968:101

Apabila keduanya diuraikan ke dalam komponen gelombang datang, gelombang pantul dan gelombang terusan, maka akan menjadi:

$$e_i - e_r = \frac{Z_1}{Z_2} e_t \quad (2-25)$$

$$e_i + e_r = e_t + \frac{L}{Z_2} \frac{de_t}{dt} \quad (2-26)$$

Eliminasi gelombang pantul dari persamaan (2-25) dan (2-26) akan menghasilkan persamaan di bawah ini:

$$\frac{de_t}{dt} + \frac{Z_1 + Z_2}{L} e_t = 2 \frac{Z_2}{L} e_i \quad (2-27)$$

Gelombang yang datang dimisalkan berupa gelombang langkah ideal sehingga penyelesaian untuk gelombang tegangan terusan berdasarkan persamaan (2-27) adalah:

$$e_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E \left(1 - \varepsilon^{-\left(\frac{Z_1 + Z_2}{L}\right)t} \right) \quad (2-28)$$

Turunan dari perumusan di atas akan menghasilkan persamaan gelombang arus terusan yaitu:

$$i_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} I \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (2-29)$$

Berdasarkan persamaan (2-28) dan (2-29) dapat diketahui bahwa muka gelombang terusan naik mencapai puncak ditentukan oleh konstanta waktu T_L yang didefinisikan dengan persamaan berikut.

$$T_L = \frac{L}{Z_1 + Z_2} \quad (2-30)$$

Semakin besar nilai induktansi, maka semakin besar konstanta waktu artinya semakin lama waktu yang diperlukan gelombang untuk naik mencapai puncak. Jadi, induktor berfungsi sebagai pelandai muka gelombang.

Persamaan gelombang pantul pada sisipan induktor diperoleh dengan mensubsitusikan persamaan gelombang tegangan terusan (2-28) ke dalam persamaan (2-25). Berikut bentuk persamaannya beserta persamaan gelombang arus pantulnya.

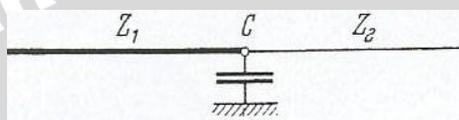
$$e_r = E - \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} E \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (2-31)$$

$$i_r = -I + \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} I \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (2-32)$$

Saat $t = 0$, suku kedua dari persamaan (2-31) dan (2-32) adalah nol. Jadi ketika gelombang datang pada induktor, gelombang tegangan pada saluran 1 akan diganda dua dan gelombang arusnya dikurangi menjadi nol. Saat $t = \sim$, nilai gelombang pantul ternyata sama dengan nilai gelombang pada sambungan dua saluran apabila tanpa sisipan induktor.

2.4.3 Kapasitor

Sebuah kapasitor disisipkan secara paralel di antara dua saluran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14. Kapasitor tersebut akan meloloskan komponen frekuensi dari gelombang surja yang berupa tegangan dan arus. Pada uraian berikut, kapasitor diasumsikan sebagai komponen ideal yang tidak memiliki resistansi dan induktansi.



Gambar 2.14 Penyisipan C Paralel
Sumber: Rudernberg, 1968:104

Pada titik sambungan rangkaian tersebut berlaku persamaan tegangan dan arus, yaitu: (Rudernberg, 1968:104)

$$e_1 = e_2 \quad (2-33)$$

$$i_1 = i_2 + C \frac{de_2}{dt} \quad (2-34)$$

Apabila keduanya diuraikan ke dalam komponen gelombang datang, gelombang pantul dan gelombang terusan, maka akan menjadi:

$$e_i + e_r = e_t \quad (2-35)$$

$$e_i - e_r = \frac{Z_1}{Z_2} e_t + Z_1 C \frac{de_t}{dt} \quad (2-36)$$

Eliminasi gelombang pantul dari persamaan (2-35) dan (2-36) akan menghasilkan persamaan di bawah ini.

$$\frac{de_t}{dt} + \frac{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}}{C} e_i = \frac{2}{Z_1 C} e_i \quad (2-37)$$

Gelombang yang datang dimisalkan berupa gelombang langkah ideal sehingga penyelesaian untuk gelombang tegangan terusan berdasarkan persamaan (2-37) adalah:

$$e_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E \left(1 - \varepsilon^{-\frac{(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2})t}{C}} \right) \quad (2-38)$$

Turunan dari perumusan diatas akan menghasilkan persamaan gelombang arus terusan yaitu:

$$i_t = \frac{2Z_1}{Z_1+Z_2} I \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{T_c}} \right) \quad (2-39)$$

Bentuk gelombang terusan sisipan kapasitor setipe dengan bentuk gelombang terusan sisipan induktor, dimana gelombang terusannya naik secara perlahan tergantung pada konstanta waktu T_c . Konstanta waktu untuk kapasitor dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$T_c = \frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2} \quad (2-40)$$

Persamaan gelombang pantul pada sisipan kapasitor diperoleh dengan mensubsitusikan persamaan gelombang tegangan terusan (2-38) ke dalam persamaan (2-35). Berikut bentuk persamaannya beserta persamaan gelombang arus pantulnya.

$$e_r = -E + \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} E \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{T_c}} \right) \quad (2-41)$$

$$i_r = I - \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} I \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{T_c}} \right) \quad (2-42)$$

Pada saat $t = 0$, suku kedua dari persamaan (2-41) dan (2-42) adalah nol sehingga gelombang tegangan pada saluran 1 bernilai nol dan gelombang arusnya meningkat hingga dua kali. Jadi, kapasitor berfungsi sebagai rangkaian hubung singkat pada bagian muka gelombang.

2.5 Respon Rangkaian terhadap Berbagai Bentuk Gelombang Berjalan

Pada uraian sebelumnya telah dijelaskan pengaruh penyisipan elemen dekoupling terhadap gelombang datang berbentuk gelombang langkah ideal. Gelombang berjalan dapat juga berupa gelombang langkah tak ideal, gelombang eksponensial dan gelombang eksponensial ganda. Berikut akan diuraikan respon rangkaian terhadap berbagai bentuk gelombang berjalan tersebut.

2.5.1 Gelombang Eksponensial

Bentuk gelombang eksponensial memiliki bagian muka seperti muka gelombang langkah dan bagian ekornya turun secara eksponensial dengan konstanta waktu θ . Hal ini dapat dinyatakan dengan persamaan berikut: (Rudernberg, 1968:106)

$$e_i = E \varepsilon^{-\frac{t}{\theta}} \quad (2-43)$$

Persamaan gelombang tegangan terusan untuk sisipan induktor mengacu pada persamaan (2-27), sedangkan untuk sisipan kapasitor mengacu pada persamaan (2-37). Apabila menggunakan konstanta waktu T pada persamaan (2-30) dan (2-40) untuk kedua kondisi sisipan tersebut, diperoleh persamaan turunan yang sama, yaitu:

$$T \frac{de_t}{dt} + e_t = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} e_i \quad (2-44)$$

Persamaan tersebut mengandung sebuah komponen tegangan e'_t yang didasarkan pada gelombang datang dari persamaan (2-43).

$$e'_t = K_1 \varepsilon^{-\frac{t}{\theta}} \quad (2-45)$$

Substitusi persamaan (2-45) ke dalam persamaan (2-44) akan mendapatkan persamaan berikut ini,

$$-\frac{T}{\theta} K_1 + K_1 = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} E \quad (2-46)$$

sehingga persamaan amplitudonya adalah:

$$K_1 = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} \frac{E}{1-\frac{T}{\theta}} \quad (2-47)$$

Komponen kedua dari persamaan (2-44) adalah e''_t yang diturunkan dari persamaan (2-45) dengan mengambil fungsi pemaksa.

$$e''_t = K_2 \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \quad (2-48)$$

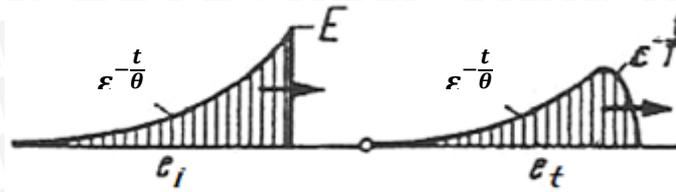
Pada $t = 0$, tegangan terusan sama dengan nol dan tidak dapat naik secara spontan. Oleh karena itu, hasil penjumlahan persamaan (2-45) dan (2-48) harus nol untuk memenuhi hubungan berikut.

$$K_2 = -K_1 \quad (2-49)$$

Persamaan lengkap gelombang tegangan terusan menjadi:

$$e_t = e'_t + e''_t = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} \frac{E}{1-\frac{T}{\theta}} \left(\varepsilon^{-\frac{t}{\theta}} - \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (2-50)$$

Berdasarkan persamaan (2-50) dapat diketahui bahwa apabila $T < \theta$, maka bagian muka gelombang naik secara bertahap ditentukan oleh konstanta waktu T dan bagian punggung jatuh secara eksponensial ditentukan oleh konstanta waktu θ . Apabila $T > \theta$, amplitudo gelombang terusan akan menjadi sangat kecil. Jadi, nilai puncak dari gelombang tegangan terusan akan selalu lebih kecil dari nilai puncak gelombang tegangan datang, seperti terlihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Respon rangkaian terhadap gelombang eksponensial
 Sumber: Rudernberg, 1968:106

Kenaikan gelombang pantul pada saat $t = 0$ didapat dengan menurunkan gelombang tegangan terusan terhadap waktu, yaitu:

$$\left(\frac{de_t}{dt}\right)_{t=0} = \frac{2Z_2 E}{Z_1 + Z_2 T} \tag{2-51}$$

Kenaikan tegangan pada muka gelombang pantul hanya ditentukan oleh konstanta waktu T .

2.5.2 Gelombang Langkah Tak Ideal

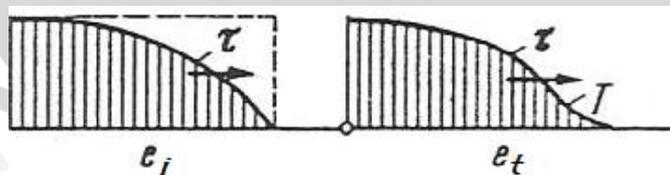
Gelombang langkah tak ideal terbentuk dari gelombang langkah positif dan gelombang eksponensial negatif dengan konstanta waktu τ , dimana bentuk fungsinya adalah: (Rudernberg, 1968:106)

$$e_i = E \left(1 - \epsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right) \tag{2-52}$$

Persamaan gelombang terusan dari penjumlahan (2-28) atau (2-38) dan persamaan (2-50), yaitu:

$$e_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E \left[\left(1 - \epsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right) - \frac{\epsilon^{-\frac{t}{\tau}} - \epsilon^{-\frac{t}{T}}}{1 - \frac{T}{\tau}} \right] \tag{2-53}$$

Saat $T < \tau$ atau $T > \tau$, gelombang terusan akan naik secara perlahan hingga mencapai nilai akhir, seperti terlihat pada Gambar 2.16. Nilai akhir gelombang tersebut ditentukan oleh impedensi surja dari saluran.

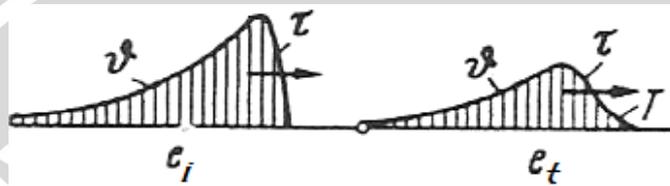


Gambar 2.16 Respon rangkaian terhadap gelombang langkah tak ideal
 Sumber: Rudernberg, 1968:107

2.5.3 Gelombang Eksponensial Ganda

Gelombang eksponensial ganda memiliki kenaikan tajam dengan konstanta waktu τ kecil dan luas punggung dengan konstanta waktu θ besar, yang dapat dirumuskan seperti persamaan (2-1). Tingkat kecuraman gelombang datang tersebut berada di antara kecuraman gelombang eksponensial dan gelombang langkah tak ideal, seperti terlihat pada Gambar 2.17. Gelombang yang diteruskan terdiri dari dua bagian dimana masing-masing ditentukan berdasarkan persamaan (2-50).

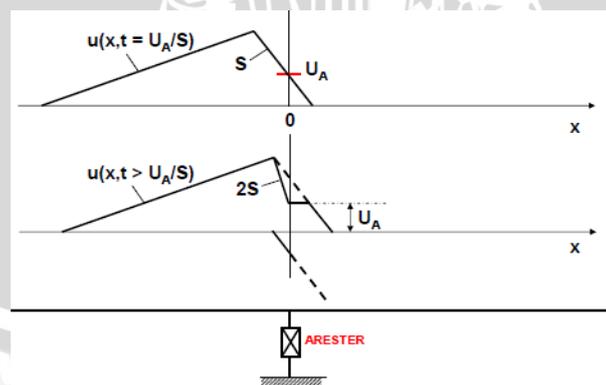
$$e_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E \left[\frac{\varepsilon^{-\frac{t}{\theta}} - \varepsilon^{-\frac{t}{T}}}{1 - \frac{T}{\theta}} - \frac{\varepsilon^{-\frac{t}{\tau}} - \varepsilon^{-\frac{t}{T}}}{1 - \frac{T}{\tau}} \right] \quad (2-54)$$



Gambar 2.17 Respon rangkaian terhadap gelombang eksponensial ganda
Sumber: Rudernberg, 1968:107

2.6 Pemotongan Gelombang Berjalan

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). Gambar 2.18 mengilustrasikan pemotongan gelombang tegangan oleh arester, dimana S adalah kemiringan muka gelombang datang.



Gambar 2.18 Pemotongan gelombang tegangan oleh arester
Sumber: Kind, 1993:213

Apabila gelombang datang memiliki tegangan yang lebih kecil dari tegangan kerja arester $U(t) < U_A$, maka arester tidak akan bekerja. Hal ini dikarenakan arester dalam

kondisi hubung buka sehingga tidak ada arus yang mengalir. Impedansi di belakang titik sambungan adalah impedansi surja saluran 1 sama dengan paralel antara impedansi surja saluran 2 dengan impedansi surja arester.

$$Z_1 = \frac{1}{\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_2}} \quad (2-55)$$

Apabila Z_1 dimisalkan Z dan Z_a hubung buka sehingga bernilai ∞ , akan diperoleh nilai impedansi surja di saluran 2 adalah:

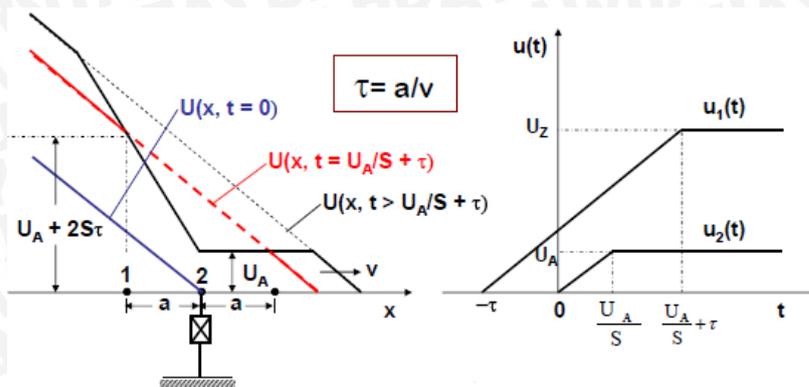
$$Z_2 = Z \quad (2-56)$$

Substitusi persamaan (2-56) ke dalam koefisien tegangan persamaan (2-10) dan (2-12) akan menghasilkan $e_r = 0$ dan $e_t = 1$. Berdasarkan nilai tersebut dapat diketahui bahwa tidak terjadi pantulan, namun gelombang tegangan terusan sama dengan gelombang tegangan datang.

Sebaliknya ketika tegangan gelombang datang lebih dari sama dengan tegangan kerja arester $U(t) \geq U_A$, arester dalam kondisi hubung singkat sehingga arus mengalir ke tanah melalui arester. Saat $Z_a = 0$ yaitu hubung singkat, nilai impedansi surja di saluran 2 juga akan bernilai 0. Kondisi ini akan menghasilkan pantulan yang berbeda polaritas dengan gelombang tegangan datang, namun tidak terjadi proses transmisi gelombang, yaitu $e_r = -1$ dan $e_t = 0$.

Misal arester diletakkan pada titik 2 sepanjang saluran transmisi homogen, seperti terlihat pada Gambar 2.19. Ketika $t = 0$, puncak gelombang tiba pada titik tersebut dimana jarak antara 1 dan 2 ditempuh dalam waktu $\tau = \frac{a}{v}$. Pada saat $t = \frac{U_A}{S}$, arester akan bekerja pada tegangan u_1 dan gelombang dipantulkan. Apabila peningkatan gelombang datang linier dan arester ideal, maka gelombang pantul pada titik 2 akan berbentuk baji dengan kemiringan muka $-S$. Pembatasan tegangan pada titik 1 berlangsung setelah selang waktu τ berikutnya, yaitu ketika $t = \frac{U_A}{S} + \tau$ sehingga nilai tegangan u_1 yaitu:

$$u_1 = U_A + 2S\tau \quad (2-57)$$



Gambar 2.19 Daerah proteksi arester terhadap gelombang berbentuk baji

Sumber: Kind, 1993:213

Apabila tegangan lebih yang diperbolehkan di titik 1 adalah sebesar U_z kemudian substitusi $\tau = \frac{a}{v}$ ke dalam persamaan (2-57), maka akan diperoleh daerah proteksi di depan dan di belakang arester adalah:

$$a = \frac{U_z - U_A}{2S} v \tag{2-58}$$

dimana:

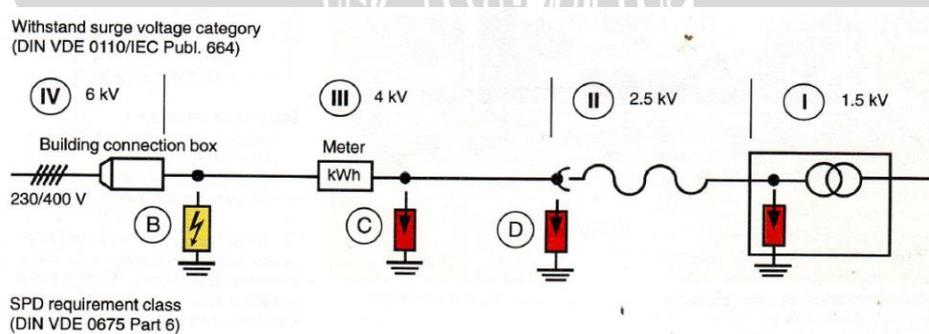
$U_z = \frac{BIL}{1.15}$, mengacu pada BIL peralatan yang diamankan (kV)

v = kecepatan rambat gelombang (m/ μ s)

$S = de/dt$ = kecuraman gelombang datang (kV/ μ s)

2.6.1 Tingkat Pemotongan Tegangan

Tingkatan pemotongan tegangan lebih oleh arester dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 Kategori tegangan ketahanan surja dan tingkatan pemotongan tegangan oleh arester

Sumber: IEC Publ. 664



Berdasarkan DIN VDE 0110/IEC Publ.664 arester diklasifikasikan menjadi 3 kelas yaitu:

a. Kelas B

Arester kelas B adalah arester yang memiliki ketahanan impuls hingga 4 kV. Kelas ini berfungsi sebagai proteksi surja untuk bonding ekipotensial dan pemutusan energi dari arus petir maupun arus petir terusan.

b. Kelas C

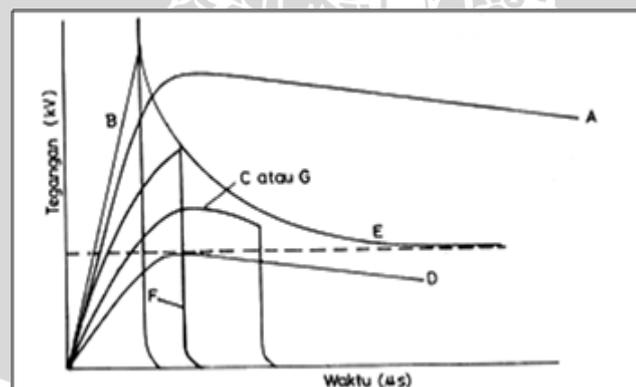
Arester kelas C adalah arester yang memiliki ketahanan impuls hingga 2,5 kV. Kelas ini berfungsi sebagai proteksi tegangan lebih untuk sistem, pemotongan sisa tegangan arester arus petir dan pembatasan surja yang terhubung dengan eksternal.

c. Kelas D

Arester kelas D adalah arester yang memiliki ketahanan impuls hingga 1,5 kV dan 0,8 kV. Kelas ini berfungsi sebagai proteksi surja untuk peralatan, pembatasan surja hubung dan pemotongan dari sisa tegangan arester yang sebelumnya.

2.6.2 Karakteristik Tegangan Potong

Karakteristik tegangan potong arester merupakan kombinasi dua variabel yaitu tegangan potong dan waktu potong. Kurva karakteristik v-t pada Gambar 2.21 berfungsi sebagai dasar koordinasi isolasi.



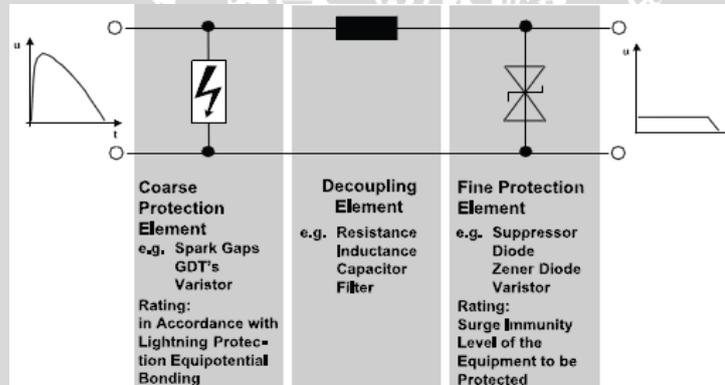
Gambar 2.21 Karakteristik v-t
Sumber: Arismunandar, 1983:115

Karakteristik v-t merupakan karakteristik yang menghubungkan puncak-puncak tegangan potong sejumlah impuls dengan bentuk tertentu. Surja yang datang ke peralatan dapat digambarkan dalam 3 bentuk. Karakteristik A berbentuk gelombang curam yang terpotong pada bagian muka, karakteristik C atau G berbentuk gelombang curam yang

terpotong pada bagian ekor dan karakteristik D berbentuk gelombang penuh. Karakteristik E diperoleh dengan menghubungkan ketiga puncak dari tiga gelombang yang datang ke peralatan dimana masing-masing titik lompatan api pada puncaknya digambarkan oleh karakteristik F. Berdasarkan karakteristik v-t tersebut dapat disimpulkan arester ideal adalah arester yang mampu memotong setiap tegangan lebih di bagian muka dengan tingkat pemotongan tegangan yang selalu sama.

2.7 Kaskade Arestor

Rangkaian dari sistem kaskade arester yang terdiri dari proteksi primer dan proteksi sekunder dengan elemen dekoupling ditunjukkan oleh Gambar 2.22. Proteksi primer berfungsi untuk mencegah surja petir. Proteksi ini mampu membawa arus induksi petir yang besar, namun memiliki respon yang lambat dan rendah dalam memicu tegangan yang dibutuhkan dalam proteksi peralatan listrik sehingga tidak mampu melindungi rangkaian dari surja. Proteksi sekunder berfungsi untuk melindungi peralatan listrik dari sisa gangguan proteksi primer. Proteksi primer dihubungkan dengan proteksi sekunder melalui suatu elemen dekoupling. Tegangan jatuh pada elemen ini dapat membantu mengaktifkan proteksi primer setelah proteksi sekunder mulai membawa arus.



Gambar 2.22 Rangkaian kaskade arester dengan elemen dekoupling
Sumber: Hasse, 2008:206

2.8 Tegangan Impuls

Eksresi matematis dari gelombang tegangan impuls $e(t)$ seperti yang ditetapkan dalam IEC 60-2, ANSI/IEEE Std 4-1978 dan ANSI C62.1-1984, diberikan oleh persamaan berikut. (Standler, 1989)

$$e(t) = A_v U_m \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right) \varepsilon^{-\frac{t}{\theta}} \quad (2-59)$$

dimana:

A_v = konstanta (1,037)

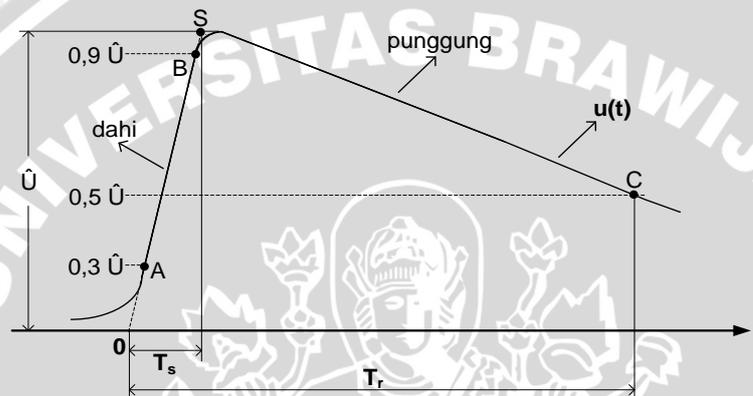
U_m = tegangan surja puncak (kV)

τ = konstanta waktu dahi (0,4074 μ s)

θ = konstanta waktu paruh punggung (68,22 μ s)

$t \geq 0$ μ s

Bentuk gelombang impuls standar menurut IEC adalah 1,2/50 μ s, 1,2 μ s menyatakan waktu dahi T_s dan 50 μ s menyatakan waktu paruh punggung T_r seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.23.



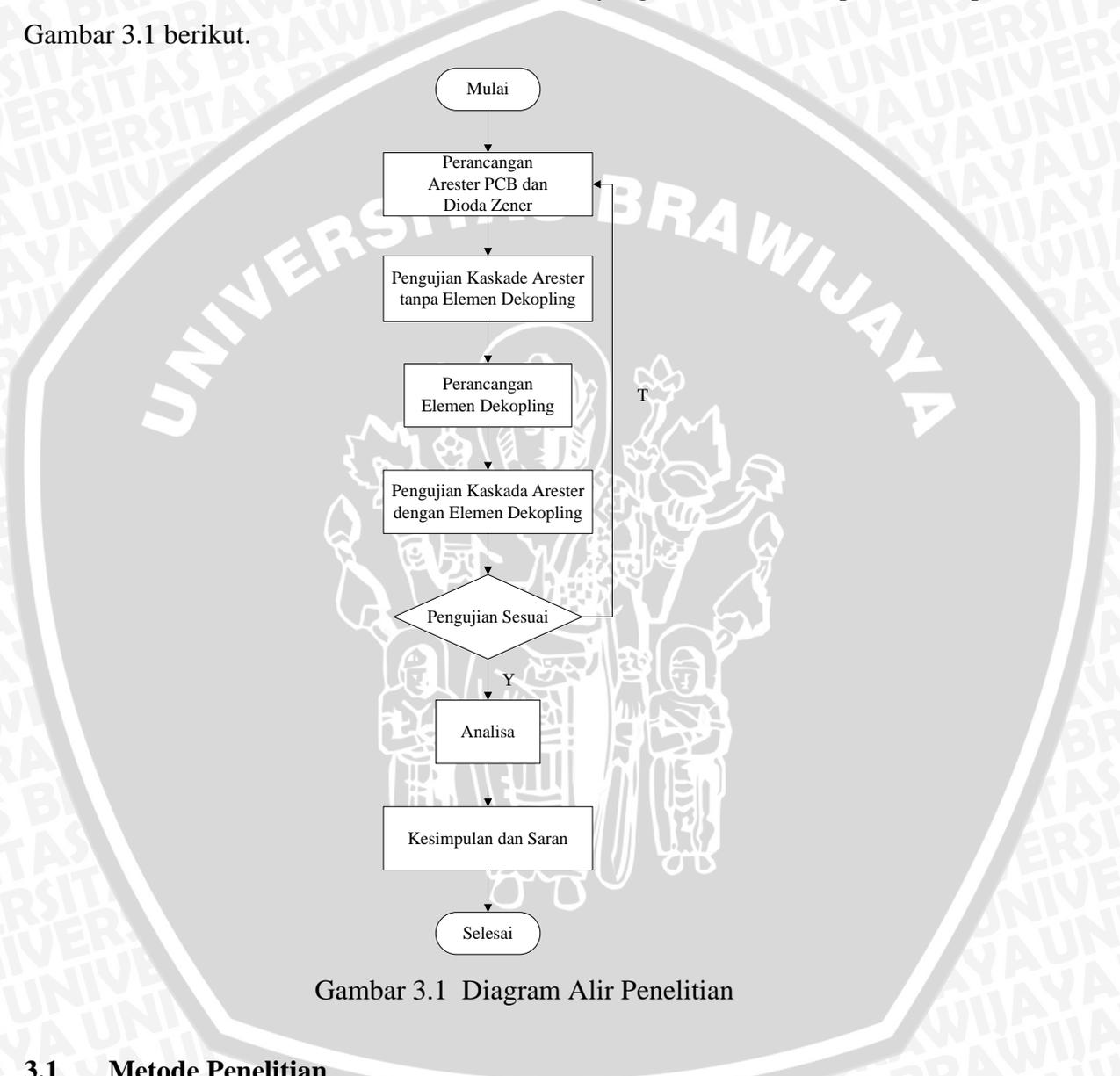
Gambar 2.23 Parameter tegangan impuls surja petir
Sumber: Kind, 1993:34

Waktu dahi adalah waktu yang terjadi pada muka gelombang dimulai dari titik perpotongan sumbu waktu t dengan garis lurus yang dibentuk dari titik A, B dan S hingga mencapai titik potong sumbu waktu t dengan garis vertikal dari titik S. Waktu paruh punggung adalah waktu yang dimulai dari titik nol hingga mencapai setengah dari nilai puncak tegangan $0,5\hat{U}$ pada ekor gelombang.

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengacu pada rumusan masalah, yaitu perencanaan kaskade arester agar dapat bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Langkah-langkah yang perlu dilakukan untuk merealisasikan kaskade arester yang akan dibuat dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Metode Penelitian

Pada skripsi dengan judul “Koordinasi Proteksi Arester PCB dan Dioda Zener dengan Elemen Dekopling pada Peralatan Listrik Tegangan Rendah”, susunan metode penelitiannya adalah sebagai berikut.

- Perancangan arester PCB dan pemilihan dioda zener
- Perancangan elemen dekopling

- c. Pengujian kaskade arester untuk mengetahui perilaku gelombang tegangan
- d. Analisis hasil pengujian untuk mengetahui koordinasi proteksi kaskade arester
- e. Penarikan kesimpulan dan pemberian saran

3.2 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini akan diamati bagaimana pengaruh elemen dekopling terhadap tingkat tegangan tembus surja petir tipe 1,2/50 μ s. Oleh karena itu, variabel yang terkait dengan penelitian ini adalah:

- a. Jenis elemen dekopling
- b. Nilai elemen dekopling
- c. Tegangan impuls 1,2/50 μ s
- d. Tegangan potong dan waktu pemotongan

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. Rangkaian pembangkit impuls
- b. Osiloskop

Bahan-bahan yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah:

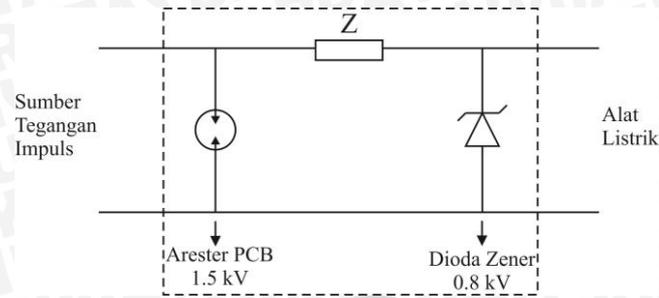
- a. Arestor PCB
- b. Dioda zener
- c. Elemen dekopling
- d. Kabel penghubung

3.4 Pengujian Koordinasi Kaskade Arestor

Pengujian dilakukan untuk mengetahui perilaku koordinasi proteksi kaskade arester. Hal ini diawali dengan mencatu tegangan impuls 1,2/50 μ s pada objek uji melalui rangkaian pembangkit impuls.

3.4.1 Objek Uji

Penentuan objek uji bertujuan agar kaskade arester mampu melindungi peralatan listrik tegangan rendah dari surja petir dengan tingkat proteksi 0,8 kV. Objek uji yang digunakan yaitu arester PCB, dioda zener dan elemen dekopling yang dilukiskan dengan Gambar 3.2.

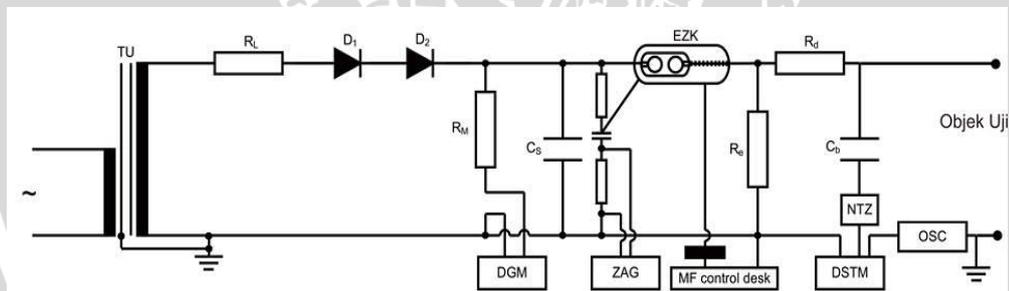


Gambar 3.2 Objek uji kaskade arester dengan elemen dekoupling

Pada Gambar 3.2 arester PCB tersebut memiliki tingkat proteksi 1,5 kV, sedangkan dioda zener memiliki tingkat proteksi 0,8 kV. Elemen dekoupling disisipkan di antara arester PCB dan dioda zener yang dapat berupa resistor, induktor atau kapasitor. Pada penelitian ini, jenis elemen dekoupling yang digunakan didasarkan atas analisis pemilihan elemen dekoupling.

3.4.2 Rangkaian Pengujian

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



Gambar 3.3 Rangkaian pembangkit impuls 1,2/50 μ s
Sumber: Kind, 1993:131

Keterangan:

- TU : Trafo uji sebagai sumber tegangan tinggi (5 kVA , 220 V/100 kV)
- R_L : Resistor (60 W, 10 M Ω)
- D_1 & D_2 : Dioda sebagai penyearah tegangan tinggi (140 kV, 20 mA, 100 k Ω)
- R_M : Resistor ukur untuk memperbesar batas ukur dan pengaman DGM (140 kV, 280 M Ω)
- C_s : Kapasitor impuls untuk meratakan tegangan riak dari dioda penyearah (140 kV, 10000 pF)

- f. R_e : Resistor gelombang dahi (60 W, 6100 Ω)
- g. R_d : Resistor gelombang punggung (60 W, 260 Ω)
- h. C_b : Kapasitor beban (140 kV, 1200 pF)
- i. DGM : Alat ukur tegangan tinggi searah
- j. ZAG : Pemicu tegangan *sphere*
- k. EZK : Sela bola
- l. NTZ : Pembagi tegangan untuk memperbesar batas ukur dan pembagi tegangan (75 kV)
- m. DSTM : Alat ukur tegangan tinggi impuls
- n. OSC : Osiloskop
- o. Objek Uji : Kaskade Arester

Susunan dari rangkaian pembangkit impuls, seperti terlihat pada Gambar 3.3 yaitu trafo uji disusun secara seri dengan resistor R_L dan dua buah dioda D_1, D_2 yang tersusun seri. Alat ukur DGM dipasang seri dengan resistor ukur R_M , yang kemudian disusun secara paralel dengan kapasitor impuls C_s . Kapasitor impuls tersebut dihubung paralel dengan resistor gelombang dahi R_e , kemudian diparalel dengan kapasitor beban C_b yang diseri dengan resistor gelombang punggung R_d . Alat ukur DSTM dipasang paralel dengan objek uji.

3.4.3 Sistem Pengujian

Pengujian dilakukan pada arester dengan spesifikasi yang telah ditentukan yaitu mampu memotong tegangan lebih 0,8 kV. Sistem pengujian arester yang dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi Teknik Elektro Universitas Brawijaya terlihat pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4 Pengujian arester

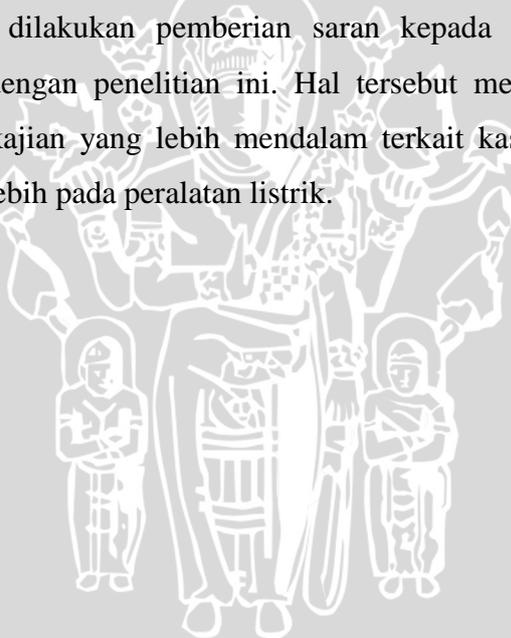
Kabel dihubungkan ke sumber tegangan tinggi impuls pada fasa dan salah satunya pada *ground*. Pengujian dilakukan dengan menaikkan tegangan dari 2 kV hingga 10 kV impuls puncak. Setiap kenaikan 1 kV diambil data-data seperti tegangan searah U_{dc} , tegangan impuls U_{impuls} dan gelombang pemotongan. Catat hasil pengukuran pada tabel dan simpan hasil pemotongan tegangan dari osiloskop.

3.5 Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mengetahui pengaruh elemen dekopling terhadap pemotongan tegangan. Di samping itu juga untuk mendapatkan elemen dekopling yang sesuai untuk koordinasi arester PCB dan dioda zener dengan tingkat proteksi 0,8 kV.

3.6 Kesimpulan dan Saran

Pengambilan kesimpulan didasarkan pada pengujian, hasil perhitungan dan analisis. Selain itu juga dilakukan pemberian saran kepada pembaca yang akan melakukan studi terkait dengan penelitian ini. Hal tersebut meliputi kendala dalam pengujian atau perlunya kajian yang lebih mendalam terkait kaskade arester sebagai pemotong surja tegangan lebih pada peralatan listrik.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

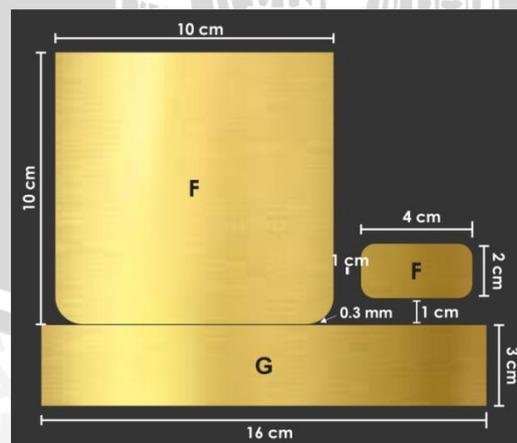
Pada bab ini akan diuraikan perancangan kaskade arester dengan menetapkan spesifikasi komponen dan pengujian kaskade arester dengan menyisipkan elemen dekoupling. Tujuan pengujian ini yaitu mengetahui perilaku gelombang tegangan pada kaskade arester hasil perancangan. Variabel dalam penelitian ini adalah jenis elemen dekoupling, nilai elemen dekoupling, tegangan impuls $1,2/50 \mu\text{s}$, tegangan potong dan waktu pemotongan yang dimaksudkan untuk mendapatkan elemen dekoupling yang sesuai dengan kaskade arester.

4.1 Perancangan Kaskade Arestor

Kaskade arester yang akan dirancang memiliki ketahanan impuls $0,8 \text{ kV}$. Menurut DIN VDE 0110/IEC Publ.664, kaskade arester ini termasuk dalam arester kelas D yang berfungsi sebagai proteksi surja untuk peralatan, pembatasan surja hubung dan pemotongan dari sisa tegangan arester yang sebelumnya. Kaskade arester ini berupa arester PCB yang dihubung seri dengan dioda zener menggunakan elemen dekoupling.

4.1.1 Perancangan Arestor PCB

Arestor PCB ini berupa PCB *single layer* dengan jarak sela $0,3 \text{ mm}$ yang didasarkan pada penelitian rekayasa arester PCB oleh Ayu Puspitasari. Arestor PCB yang dirancang memiliki desain seperti Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Desain arester PCB

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa bentuk geometri dari arester PCB berupa plat sejajar antar fasa-*ground* dimana ujung bagian fasa dibuat tumpul agar distribusi medannya dapat merata di setiap permukaan. Berikut hasil perancangan dari arester PCB, seperti terlihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil rancang bangun arester PCB

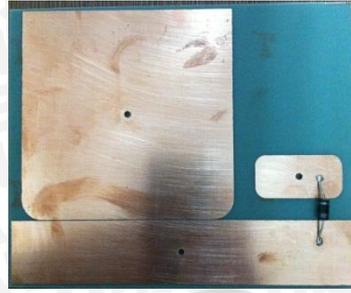
4.1.2 Pemilihan Dioda Zener

Dioda zener yang digunakan adalah tipe 1N5388B yang memiliki tegangan sebesar 200 V, seperti terlihat pada Gambar 4.3. Spesifikasi dioda zener jenis ini dapat dilihat dalam Lampiran 1.



Gambar 4.3 Dioda zener 1N5388B

Dioda zener tersebut dipasang pada fasa-*ground*, seperti terlihat pada Gambar 4.4 dimana kaki katodanya berada pada daerah fasa dan kaki anodanya berada pada daerah *ground*. Hal tersebut dimaksudkan agar saat rangkaian tersebut dikenai tegangan impuls, dioda zener mampu memotong sisa tegangan lebih dari arester PCB.



Gambar 4.4 Hasil rancang bangun arester PCB dan dioda zener

4.1.3 Pemilihan Jenis Elemen Dekopling

Elemen dekopling dapat berupa resistor, induktor atau kapasitor. Ketiga komponen tersebut disisipkan di antara dua arester secara seri untuk jenis resistor atau induktor dan secara paralel untuk jenis kapasitor.

a. Resistor

Sebuah kaskade arester PCB dan dioda zener dengan sisipan resistor dapat diilustrasikan dengan Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4.5 Kaskade arester dengan elemen dekopling resistor

Resistor pada rangkaian ini berfungsi untuk membatasi arus yang melalui dioda zener ke daerah yang aman. Menurut PUIL 2000, batas toleransi jatuh tegangan yang diperbolehkan antara -10% hingga +5%. Oleh karena itu, saat kondisi normal maka tegangan yang timbul pada resistor yaitu:

$$V_R \leq 10\%V_s$$

$$RI \leq \frac{10}{100} \times 220 \text{ V}$$

$$RI \leq 22 \text{ V}$$

Apabila daya beban diasumsikan sebesar 2200 VA dengan sumber tegangan V_s yaitu 220 V, maka arus yang mengalir melalui resistor adalah:

$$\begin{aligned} I &= \frac{S}{V_s} \\ &= \frac{2200 \text{ VA}}{220 \text{ V}} \end{aligned}$$

$$= 10 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, elemen dekoupling resistif yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$R \leq \frac{22 \text{ V}}{I}$$

$$R \leq \frac{22 \text{ V}}{10 \text{ A}}$$

$$R \leq 2,2 \Omega$$

Di lain sisi ketika gelombang surja datang menemui resistor, arus yang mengalir melaluinya cukup besar dengan orde kiloampere sehingga diperlukan resistor dengan nilai resistansi yang sangat kecil dengan orde miliohm. Berdasarkan kondisi ini dapat disimpulkan bahwa elemen dekoupling resistif yang digunakan tersebut akan berpengaruh pada kenaikan daya saat dilalui gelombang surja. Nilai daya yang terlalu tinggi ini akan menimbulkan panas berlebih yang berujung pada kerusakan resistor.

b. Induktor

Rangkaian kaskade arester dengan sisipan induktor setipe dengan rangkaian sisipan resistor. Induktor ini berfungsi sebagai tahanan. Guna mengetahui jatuh tegangan pada induktor diperlukan data berupa reaktansi induktif. Nilai dari reaktansi induktif ini dipengaruhi oleh besarnya frekuensi. Saat kondisi normal yaitu keadaan dimana arester PCB dan dioda zener tidak beroperasi, frekuensinya adalah 50 Hz sehingga nilai reaktansi induktifnya adalah:

$$\begin{aligned} X_{L1} &= \omega L \\ &= 2 \times \pi \times 50 \times L \\ &= 100\pi L \Omega \end{aligned}$$

Pada gelombang impuls $1,2/50 \mu\text{s}$, nilai konstanta waktu T berdasarkan standar IEC mendekati $0,8 \mu\text{s}$. Jadi, ketika gelombang surja datang menemui induktor akan diperoleh besar frekuensi sebagai berikut.

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{T} \\ &= \frac{1}{0,8 \times 10^{-6}} \\ &= 1,25 \times 10^6 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Saat kondisi ini, reaktansi induktif yang terdapat pada rangkaian yaitu:

$$X_{L2} = \omega L$$

$$\begin{aligned}
 &= 2 \times \pi \times 1,25 \times 10^6 \times L \\
 &= 2,5 \times 10^6 \pi L \Omega
 \end{aligned}$$

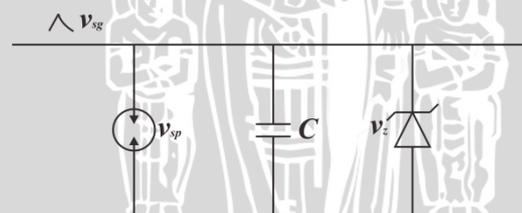
Perbandingan antara kedua nilai reaktansi induktif tersebut akan didapat hubungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \frac{X_{L1}}{X_{L2}} &= \frac{100\pi L}{2,5 \times 10^6 \pi L} \\
 X_{L2} &= 2,5 \times 10^4 X_{L1}
 \end{aligned}$$

Reaktansi induktif saat kondisi gelombang surja datang lebih besar daripada saat kondisi normal. Ketika nilai reaktansi induktif tinggi, induktor akan menahan arus dalam jumlah besar. Oleh karena itu, mengingat gelombang surja memiliki nilai arus yang tinggi maka dengan adanya induktor, arus yang melalui dioda zener akan berada di daerah yang aman.

c. Kapasitor

Rangkaian proteksi pada Gambar 4.6 ini berupa arester PCB, dioda zener dan elemen dekoupling kapasitif C yang terhubung secara paralel. Oleh karena hubungan paralel tersebut, maka tegangan pada kapasitor sama dengan tegangan arester PCB. Kondisi ini akan mengakibatkan dioda zener yang memiliki tegangan kerja lebih kecil akan bekerja terlebih dahulu ketika gelombang surja datang. Apabila hal ini terjadi, dioda zener tidak akan mampu menahan arus yang terlalu tinggi sehingga berdampak buruk terhadap kerusakan dioda zener dan kegagalan isolasi.



Gambar 4.6 Kaskade arester dengan elemen dekoupling kapasitor

Kapasitor pada rangkaian proteksi juga dapat disisipkan secara seri. Setipe dengan induktor, nilai reaktansi kapasitifnya juga dipengaruhi oleh frekuensi dimana saat kondisi normal didapat perhitungan yaitu:

$$\begin{aligned}
 X_{c1} &= \frac{1}{\omega C} \\
 &= \frac{1}{2 \times \pi \times 50 \times C} \\
 &= \frac{1}{100\pi C} \Omega
 \end{aligned}$$

Ketika gelombang surja datang dengan frekuensi 1,25 MHz, maka reaktansi kapasitifnya sebesar:

$$\begin{aligned} X_{c2} &= \frac{1}{\omega C} \\ &= \frac{1}{2 \times \pi \times 1,25 \times 10^6 \times C} \\ &= \frac{1}{2,5 \times 10^6 \pi C} \Omega \end{aligned}$$

Reaktansi kapasitif pada kedua kondisi tersebut dapat dibandingkan guna memperoleh hubungan berikut ini.

$$\begin{aligned} \frac{X_{c1}}{X_{c2}} &= \frac{\frac{1}{100\pi C}}{\frac{1}{2,5 \times 10^6 \pi C}} \\ X_{c2} &= 4 \times 10^{-5} X_{c1} \end{aligned}$$

Reaktansi kapasitif saat kondisi gelombang normal lebih besar daripada saat kondisi gelombang surja datang. Reaktansi kapasitif yang tinggi akan mengakibatkan kapasitor menahan arus yang tinggi pula. Apabila hal itu terjadi saat keadaan normal, beban peralatan elektronik tidak akan berfungsi karena tidak dialiri arus yang cukup.

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan bahwa dari ketiga komponen tersebut, jenis elemen dekoupling yang dipilih dalam koordinasi antara arester PCB dan dioda zener adalah induktor.

4.2 Pengujian Kaskade Arestor tanpa Elemen Dekoupling

4.2.1 Pengujian Arestor PCB

Pengujian arester PCB dilakukan dengan memberikan tegangan impuls pada bagian fasa dan *ground*, seperti terlihat pada Gambar 4.7 berikut ini.



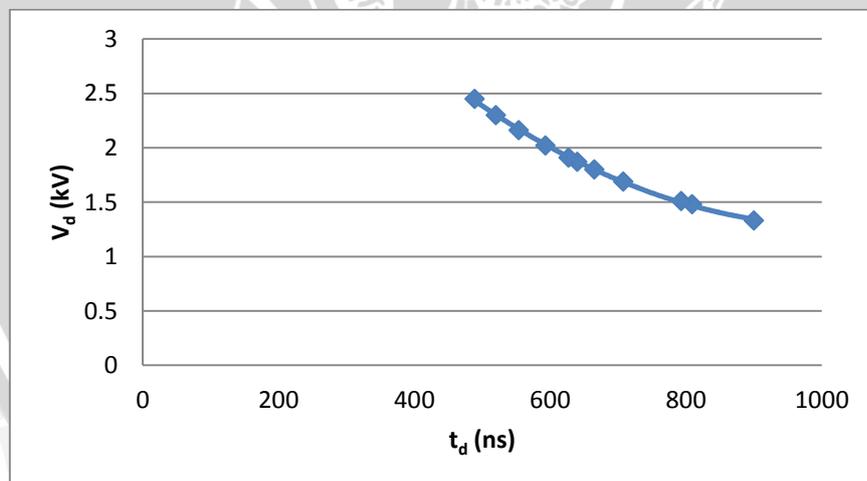
Gambar 4.7 Pengujian arester PCB

Hasil pengujian arester PCB dengan jarak sela udara 0,3 mm ditunjukkan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data hasil pengujian arester PCB jarak sela 0,3 mm

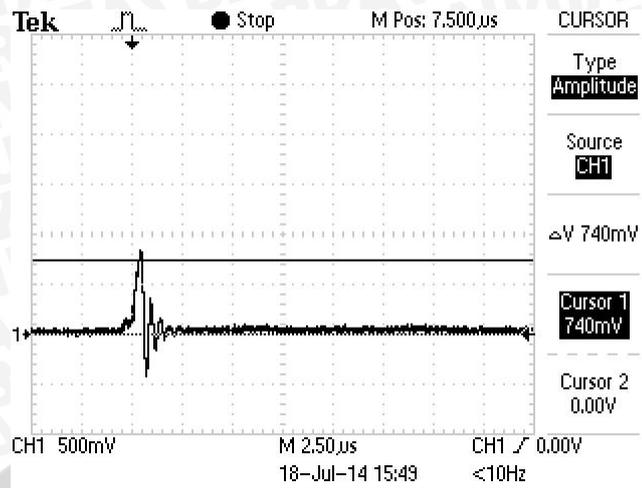
No.	Tegangan Puncak Impuls (kV)	Tegangan Potong V_d (kV)	Waktu Potong t_d (ns)
1	2,00	1,33	900
2	2,74	1,48	809
3	3,57	1,51	793
4	4,45	1,69	708
5	5,32	1,8	665
6	6,17	1,87	640
7	7,01	1,91	627
8	7,80	2,02	593
9	8,99	2,16	554
10	9,70	2,30	520
11	10,67	2,45	489

Pada Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa arester PCB ini menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 1,33 kV – 2,45 kV dan rentang waktu pemotongan antara 900 ns – 489 ns. Grafik karakteristik v-t untuk arester PCB dengan jarak sela 0.3 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik karakteristik v-t arester PCB

Gambar 4.9 berikut ini menunjukkan bentuk gelombang hasil pemotongan tegangan impuls standar 1,2/50 μ s yang dihasilkan oleh rangkaian pengujian pada Gambar 3.3.



Gambar 4.9 Pemotongan gelombang tegangan lebih oleh arester PCB

4.2.2 Pengujian Dioda Zener

Pengujian dioda zener serupa dengan pengujian arester PCB yaitu tegangan impuls diberikan antara fasa dan *ground* pada sisi dioda zener, seperti terlihat pada Gambar 4.10 berikut.



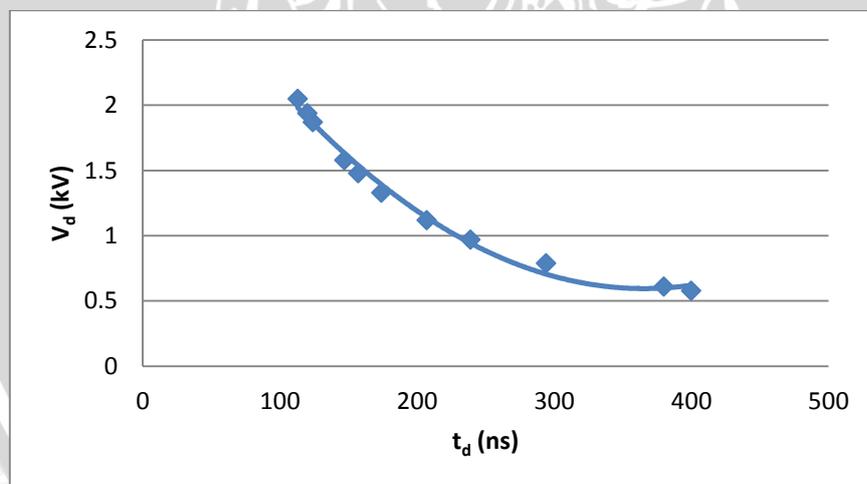
Gambar 4.10 Pengujian dioda zener

Hasil pengujian dioda zener ditunjukkan dalam Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Data hasil pengujian dioda zener

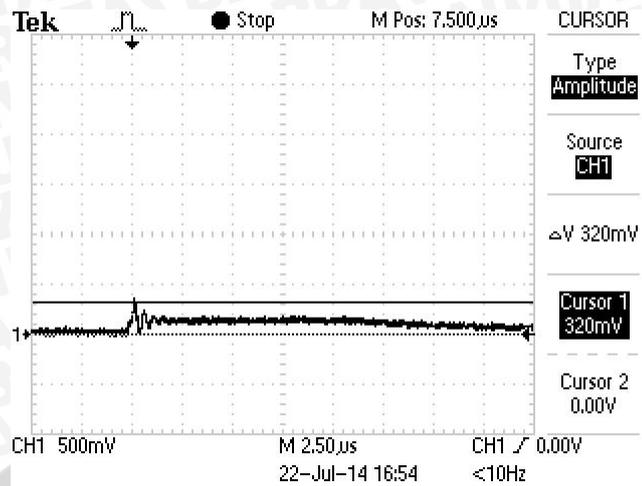
No.	Tegangan Puncak Impuls (kV)	Tegangan Potong V_d (kV)	Waktu Potong t_d (ns)
1	2,38	0,58	400
2	2,78	0,61	380
3	3,64	0,79	294
4	4,50	0,97	239
5	5,38	1,12	207
6	6,18	1,33	174
7	7,05	1,48	157
8	7,85	1,58	147
9	8,73	1,87	124
10	9,88	1,94	120
11	10,45	2,05	113

Pada Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa dioda zener ini menghasilkan tingkat pemotongan tegangan antara 0,58 kV – 2,05 kV dan rentang waktu pemotongan antara 400 ns – 113 ns. Grafik karakteristik v-t untuk dioda zener seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik karakteristik v-t dioda zener

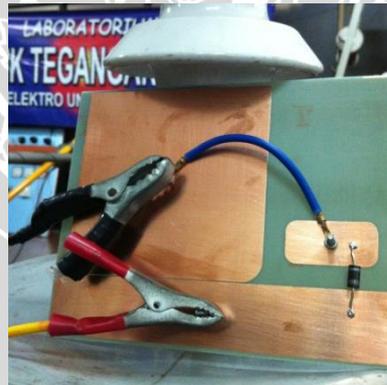
Gambar 4.12 berikut ini menunjukkan bentuk gelombang hasil pemotongan tegangan impuls standar 1,2/50 μ s yang dihasilkan oleh rangkaian pengujian pada Gambar 3.3.



Gambar 4.12 Pemotongan gelombang tegangan lebih oleh dioda zener

4.2.3 Pengujian Arester PCB dan Dioda Zener

Pengujian arester PCB dan dioda zener dilakukan dengan memberikan tegangan impuls pada bagian fasa dan *ground*, seperti terlihat pada Gambar 4.13 berikut ini.



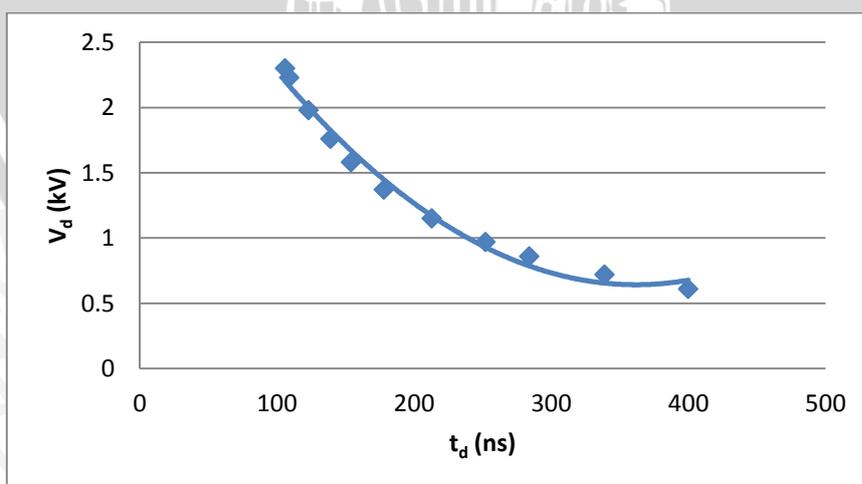
Gambar 4.13 Pengujian kaskade arester tanpa elemen dekoping

Hasil pengujian dari arester PCB dan dioda zener dapat dilihat dalam Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Data hasil pengujian kaskade arester tanpa elemen dekoupling

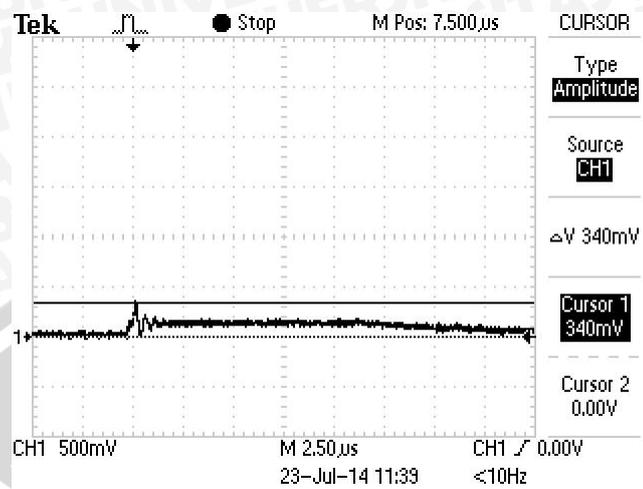
No.	Tegangan Puncak Impuls (kV)	Tegangan Potong V_d (kV)	Waktu Potong t_d (ns)
1	2,36	0,61	400
2	2,82	0,72	339
3	3,66	0,86	284
4	4,47	0,97	252
5	5,34	1,15	213
6	6,19	1,37	178
7	6,98	1,58	154
8	7,84	1,76	139
9	8,76	1,98	123
10	9,57	2,23	109
11	10,37	2,30	106

Pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa kaskade arester PCB dan dioda zener ini menghasilkan tingkat pemotongan tegangan yaitu 0,61 kV – 2,30 kV dengan rentang waktu pemotongan antara 400 ns – 106 ns. Tingkat pemotongan tegangan yang dihasilkan oleh kaskade arester PCB dan dioda zener ini hampir sama dengan tingkat pemotongan tegangan yang dihasilkan oleh dioda zener. Berdasarkan hal itu dapat disimpulkan bahwa saat kaskade arester tanpa elemen dekoupling dikenai tegangan impuls, maka hanya dioda zener yang akan bekerja. Grafik karakteristik v-t kaskade arester PCB dan dioda zener seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Grafik karakteristik v-t kaskade arester tanpa elemen dekoupling

Gambar 4.15 berikut ini menunjukkan bentuk gelombang hasil pemotongan tegangan impuls standar 1,2/50 μs yang dihasilkan oleh rangkaian pengujian pada Gambar 3.3.



Gambar 4.15 Pemotongan gelombang tegangan lebih oleh kaskade arester tanpa elemen dekoupling

4.3 Perancangan Induktor

Induktor berfungsi untuk menghasilkan tegangan jatuh yang cukup sehingga koordinasi proteksi antar arester PCB dan dioda zener dapat berjalan dengan baik. Perancangan induktor diawali dengan menghitung nilai induktansi induktor dimana nilai tersebut akan digunakan untuk menentukan desain induktor.

4.3.1 Penentuan Nilai Induktor

Nilai induktor ditentukan dengan penurunan dari gelombang tegangan terusan yang terdapat pada persamaan (2-54). Berdasarkan persamaan tersebut diperoleh persamaan turunan dari gelombang tegangan terusan yaitu:

$$\frac{de_t}{dt} = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} E \left[\frac{\left(-\frac{1}{\theta} \varepsilon^{-\frac{t}{\theta}} + \frac{1}{T} \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \right)}{1-\frac{T}{\theta}} - \frac{\left(-\frac{1}{\tau} \varepsilon^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{1}{T} \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \right)}{1-\frac{T}{\tau}} \right] \quad (4-1)$$

Pada penelitian ini, nilai impedansi surja saluran yang berupa kawat udara didapat dengan menggunakan persamaan berikut (Hutauruk, 1989:4).

$$Z = 60 \ln \frac{2h}{r} \quad (4-2)$$

dimana:

h = tinggi saluran terhadap permukaan bumi

r = jari-jari saluran

Diketahui bahwa kawat udara tersebut memiliki luas penampang sebesar 25 mm² yang terletak pada ketinggian 750 mm, maka besar impedansi surjanya adalah:

$$Z = 60 \ln \frac{2 \times 750}{0,8921}$$

$$Z \approx 445 \Omega$$

Sedangkan nilai konstanta waktunya didapat dengan menggunakan persamaan (2-30), yaitu:

$$\begin{aligned} T &= \frac{L}{Z_1 + Z_2} \\ &= \frac{L}{445 + 445} \\ &= \frac{L}{890} \text{ s} \end{aligned}$$

Diketahui tegangan surja puncak sebesar 3,6 kV. Berdasarkan tetapan dari IEC, gelombang tegangan memiliki konstanta waktu dahi τ adalah 0,4074 μ s dan konstanta waktu punggung θ adalah 68,22 μ s, maka:

$$\begin{aligned} \frac{de_t}{dt} &= \left(\frac{2 \times 445}{445 + 445} \right) \times 3,6 \times \left[\frac{\left(-\frac{1}{68,22 \times 10^{-6}} \times \varepsilon^{\frac{0,2623 \times 10^{-6}}{68,22 \times 10^{-6}}} \right) + \left(\frac{890}{L} \times \varepsilon^{-\frac{0,2623 \times 10^{-6} \times 890}{L}} \right)}{1 - \frac{L}{890 \times 68,22 \times 10^{-6}}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\left(-\frac{1}{0,4074 \times 10^{-6}} \times \varepsilon^{\frac{0,2623 \times 10^{-6}}{0,4074 \times 10^{-6}}} \right) + \left(\frac{890}{L} \times \varepsilon^{-\frac{0,2623 \times 10^{-6} \times 890}{L}} \right)}{1 - \frac{L}{890 \times 0,4074 \times 10^{-6}}} \right] \\ &= 3,6 \times \left[\frac{\left(-14.602,2056 \right) + \left(\frac{890}{L} \times \varepsilon^{\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}} \right)}{1 - \frac{L}{0,0607}} - \frac{\left(-1.289.327,541 \right) + \left(\frac{890}{L} \times \varepsilon^{-\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}} \right)}{1 - \frac{L}{3,6259 \times 10^{-4}}} \right] \\ &= \frac{\left(-52.567,9402 \right) + \left(\frac{3204}{L} \times \varepsilon^{\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}} \right)}{1 - \frac{L}{0,0607}} - \frac{\left(-4.641.579,148 \right) + \left(\frac{3204}{L} \times \varepsilon^{-\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}} \right)}{1 - \frac{L}{3,6259 \times 10^{-4}}} \\ &= \frac{\left(-52.567,9402 \right) + (144.979.012,7)L + \left(\frac{3204}{L} \times \varepsilon^{\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}} \right) - \left(8.836.426,818 \times \varepsilon^{-\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}} \right)}{1 - \frac{L}{3,6259 \times 10^{-4}} - \frac{L}{0,0607} + \frac{L^2}{2,2009 \times 10^{-5}}} \\ &\quad - \frac{\left(-4.641.579,148 \right) + (76.467.531,27)L + \left(\frac{3204}{L} \times \varepsilon^{\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}} \right) - \left(52.784,1845 \times \varepsilon^{-\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}} \right)}{1 - \frac{L}{3,6259 \times 10^{-4}} - \frac{L}{0,0607} + \frac{L^2}{2,2009 \times 10^{-5}}} \\ &= \frac{(4.589.011,208) + (68.511.481,43)L - \left(8.783.642,634 \times \varepsilon^{-\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}} \right)}{1 - \frac{0,0611L}{2,2009 \times 10^{-5}} + \frac{L^2}{2,2009 \times 10^{-5}}} \end{aligned}$$

$$= \frac{100,9996 + 1.507,8692L - \left(193,3192 \times \varepsilon^{-\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}}\right)}{L^2 - 0,0611L + (2,2009 \times 10^{-5})}$$

Hasil turunan ini disubsitusikan ke dalam komponen kedua dari persamaan (2-26) berikut.

$$e_L = \frac{L}{Z_2} \frac{de_t}{dt}$$

Tegangan pada induktor dapat dimisalkan dengan mensubsitusikan tingkat pemotongan tegangan masing-masing arester ke dalam persamaan (2-24).

$$e_1 = e_2 + L \frac{di_2}{dt}$$

$$1,5 = 0,8 + e_L$$

$$e_L = 0,7 \text{ kV}$$

Selanjutnya masukkan nilai dari tegangan induktor tersebut seperti berikut ini.

$$700 = \frac{L}{445} \times \frac{100,9996 + 1.507,8692L - \left(193,3192 \times \varepsilon^{-\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}}\right)}{L^2 - 0,0611L + (2,2009 \times 10^{-5})}$$

$$311.500L^2 - 19.032,65L + 6,8558 = 100,9996L + 1.507,8692L^2 - \left(193,3192L \times \varepsilon^{-\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}}\right)$$

$$309.992,1308L^2 - 19.133,6496L + 6,8558 + \left(193,3192L \times \varepsilon^{-\frac{2,3345 \times 10^{-4}}{L}}\right) = 0$$

Nilai induktansi induktor L yang didapat adalah:

$$L = -0,000033034 \text{ H} = -0,03 \text{ mH}$$

$$L = 0,000362361 \text{ H} = 0,36 \text{ mH}$$

$$L = 0,0607377 \text{ H} = 60,74 \text{ mH}$$

Dari ketiga nilai induktor tersebut, nilai induktansi yang dipilih adalah 0,36 mH.

4.3.2 Penentuan Desain Induktor

Pada pembuatan induktor terdapat beberapa faktor yang perlu diperhatikan seperti permeabilitas inti, jumlah lilitan, luas penampang inti dan panjang inti yang akan mempengaruhi besar induktansi suatu induktor. Hal tersebut dapat dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$L = \frac{\mu_o \mu_r N^2 A}{l} \quad (4-3)$$

dimana:

L = induktansi (H)

μ_o = permeabilitas absolut ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)

μ_r = permeabilitas relatif inti

N = banyaknya lilitan

A = luas lilitan pada inti (m^2)

l = panjang lilitan (m)

Bahan inti induktor ada 3 macam, yaitu udara, besi dan ferit. Inti induktor udara memiliki nilai permeabilitas paling rendah. Berdasarkan persamaan (4-1) dapat dilihat bahwa semakin rendah nilai permeabilitas, maka semakin rendah nilai induktansinya. Jadi, apabila digunakan untuk mendapatkan nilai induktansi yang tinggi diperlukan kumparan yang sangat besar. Selain itu, pada induktor jenis ini terdapat getaran mekanis pada kumparan yang dapat mengakibatkan nilai induktansinya kurang stabil.

Inti induktor besi dapat menyebabkan kerugian daya pada frekuensi tinggi karena adanya arus eddy, sedangkan pada inti induktor ferit tidak menyebabkan kerugian daya. Hal ini dikarenakan inti induktor ferit memiliki lengkung histerisis yang sempit dan resistivitas yang tinggi.

Berdasarkan uraian tersebut, maka induktor yang akan dirancang menggunakan inti ferit. Induktor ini akan dibuat dengan bentuk solenoid yang memiliki diameter inti sebesar 10 mm. Setelah menentukan inti induktor, langkah berikutnya adalah memilih jenis konduktor yang akan dijadikan kumparan pada induktor. Konduktor yang digunakan adalah jenis kawat email dengan diameter 0,8 mm.

Permeabilitas inti ferit tidak diketahui dikarenakan bahan inti yang terdapat di pasaran tidak diketahui spesifikasinya, maka nilai tersebutlah yang pertama kali dicari. Misalnya diambil contoh pada induktor inti ferit dengan jumlah lilitan sebanyak 56 lilitan dengan panjang lilitan adalah 25 mm. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan LCR meter, didapatkan besar nilai induktansi induktor yaitu 0,15 mH.

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}$$

$$0,15 \times 10^{-3} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times \mu_r \times N^2 \times \pi \times (5 \times 10^{-3})^2}{0,025}$$

$$3,75 \times 10^{-6} = 3,0951 \times 10^{-7} \times \mu_r$$

$$\mu_r = 12,12$$

Nilai permeabilitas relatif inti ferit yang didapatkan dari perhitungan di atas adalah 12,12. Selanjutnya nilai permeabilitas itu digunakan untuk menghitung jumlah lilitan pada induktor inti ferit dengan nilai induktansi 0,36 mH dan panjang lilitan 45 mm.

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}$$

$$0,36 \times 10^{-3} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 12,12 \times N^2 \times \pi \times (5 \times 10^{-3})^2}{0,045}$$

$$1,62 \times 10^{-5} = 1,1962 \times 10^{-9} \times N^2$$

$$N^2 = 13542,9305$$

$$N = 116 \text{ lilitan}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, diperoleh banyaknya lilitan untuk induktor dengan nilai induktansi 0,36 mH adalah 116 lilitan. Gambar 4.16 berikut ini merupakan induktor hasil perancangan.



Gambar 4.16 Induktor inti ferit 0,36 mH

4.4 Pengujian Kaskade Arester dengan Elemen Dekopling

Pada pengujian kaskade arester dengan elemen dekopling, induktor diletakkan pada daerah fasa dimana salah satu ujungnya di sisi arester PCB dan ujung yang lain di sisi dioda zener, seperti terlihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Hasil rancang bangun kaskade arester dengan elemen dekopling

Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan impuls pada bagian fasa dan *ground*.



Gambar 4.18 Pengujian kaskade arester dengan elemen dekoupling

Hasil pengujian dari kaskade arester dengan elemen dekoupling dapat dilihat dalam Tabel 4.4 berikut.

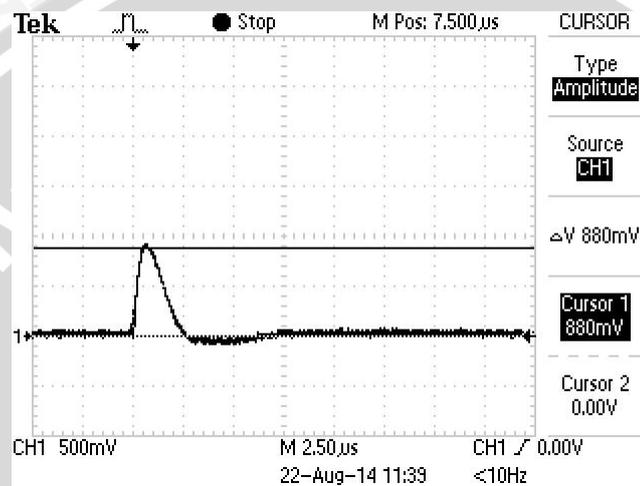
Tabel 4.4 Data hasil pengujian kaskade arester dengan elemen dekoupling

No.	Tegangan Puncak Impuls (kV)	Arester PCB		Dioda Zener	
		Tegangan Potong V_d (kV)	Waktu Potong t_d (ns)	Tegangan Potong V_d (V)	Waktu Potong t_d (ns)
1	2,30	1,58	600	210	120
2	2,78	1,62	585	215	117
3	3,72	1,66	571	221	114
4	4,55	1,69	561	225	112
5	5,30	1,73	548	230	110
6	6,15	1,76	539	234	108
7	7,10	1,87	507	249	101
8	7,90	2,09	454	278	91
9	8,71	2,23	425	297	85
10	9,66	2,27	418	301	84
11	10,42	2,38	398	317	80

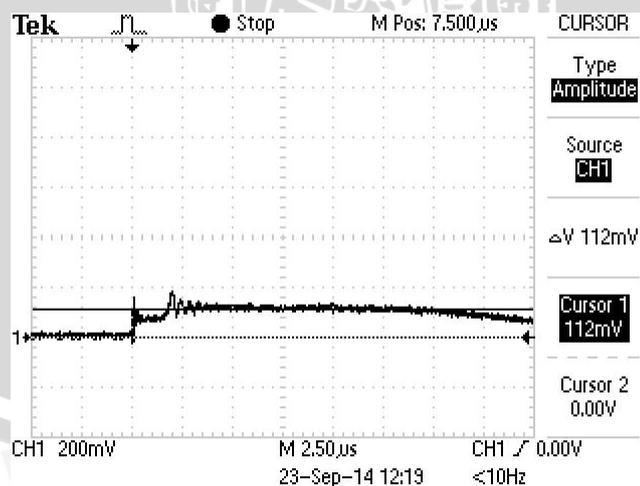
Pada Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa pada saat kaskade arester dengan elemen dekoupling ini diberi masukan dengan kenaikan tegangan dari 2 kV hingga 10 kV impuls puncak terjadi proses pemotongan tegangan oleh arester PCB yaitu 1,58 kV – 2,38 kV dengan rentang waktu pemotongan 600 ns – 398 ns. Selanjutnya, sisa pemotongan tegangan dari arester PCB tersebut dipotong kembali oleh dioda zener sehingga menghasilkan tingkat pemotongan tegangan yaitu 200 kV – 317 kV dimana rentang waktu pemotongannya antara 120 ns – 80 ns.

Berdasarkan uraian tersebut, pada kaskade arester dengan elemen dekoupling, keberadaan induktor memberikan pengaruh terhadap koordinasi antara arester PCB dan dioda zener. Ketika gelombang surja datang, kedua arester tersebut bekerja dimana arester PCB bekerja pertama kali dan tahap berikutnya sisa tegangan surja dipotong oleh dioda zener.

Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 berikut ini menunjukkan koordinasi kaskade arester PCB dan dioda zener dalam pemotongan gelombang tegangan impuls standar 1,2/50 μs yang dihasilkan oleh rangkaian pengujian pada Gambar 3.3.



Gambar 4.19 Pemotongan gelombang tegangan lebih oleh arester PCB pada kaskade arester dengan elemen dekoupling



Gambar 4.20 Pemotongan gelombang tegangan lebih oleh dioda zener pada kaskade arester dengan elemen dekoupling

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Elemen dekopling yang digunakan dalam koordinasi arester PCB dan dioda zener adalah induktor. Pemilihan ini didasarkan pada kemampuan induktor yang mampu menahan arus dalam jumlah besar saat dilalui gelombang surja. Pada sistem kaskade arester tanpa elemen dekopling, saat gelombang surja datang maka dioda zener saja yang bekerja.
2. Nilai induktor yang diperlukan dalam koordinasi arester PCB dan dioda zener adalah 0,36 mH dengan inti ferit.
3. Pada kaskade arester PCB dan dioda zener dengan elemen dekopling untuk tegangan impuls 10 kV, kaskade arester ini mampu memotong tegangan 317 V dengan waktu pemotongan 80 ns.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pengujian maka disarankan untuk melakukan penelitian untuk jenis elemen proteksi sekunder yang lain, sehingga dapat disimpulkan komponen yang paling baik untuk memotong sisa tegangan impuls dari arester PCB selain dioda zener.

DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, A. 1983. *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*. Jakarta: GhaliaIndonesia.
- Dagostino, F & Wujek, J. B. 2005. *Mechanical and Electrical System in Construction and Architecture*. Pearson Prentice Hall: Technology & Engineering.
- Desinta, A. 2013. *Rancang Bangun Pemotong Surja Tegangan pada kWh Meter Tiga Fasa Menggunakan PCB (Printed Circuit Board)*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hasse, P. 2008. *Overvoltage Protection of Low Voltage Systems*. London: The Institution of Engineering and Technology.
- Hutautruk, T. S. 1989. *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Jakarta: Erlangga.
- Kind, D. 1993. *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Bandung: ITB.
- Mansuri. 2002. *Perencanaan dan Pembuatan Prototipe Arester Jenis Kancing untuk Proteksi Tegangan Rendah*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Puspitasari, A. 2013. *Rancang Bangun Peralatan Proteksi Lampu Penerangan Jalan Umum 1 Fasa Terhadap Bahaya Surja Petir Menggunakan PCB*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Rudenberg, R.1968. *Electrical Shock Waves in Power Systems*. Massachusetts: Harvard University Press.
- Standler, R.B. 1989. *Protection of Electronic Circuits from Overvoltage*. Wiley: Interscience.
- Surjono, HD. 2007. *Elektronika: Teori dan Penerapan*. Jember: Cerdas Ulet Kreatif.

LAMPIRAN