

**ANALISA PENEMPATAN JARAK MAKSIMUM LIGHTNING ARRESTER  
SEBAGAI PELINDUNG TRANSFORMATOR TERHADAP TEGANGAN  
LEBIH DI GARDU INDUK 150 KV NEW BATANG MENGGUNAKAN  
METODE PANTULAN BERULANG**

**LAPORAN TUGAS AKHIR**

LAPORAN INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT  
MEMPEROLEH GELAR S1 PADA PRODI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG



**DISUSUN OLEH:**

**NUR TIFFANI P'MAL ZAQI**

**NIM 30602000035**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG  
SEMARANG**

**2024**

***ANALYSIS OF MAXIMUM DISTANCE PLACEMENT OF LIGHTNING  
ARRESTERS AS TRANSFORMER PROTECTION AGAINST OVERVOLTAGE  
AT 150 KV NEW BATANG SUBSTATION USING THE REPEATED  
REFLECTION METHOD***

***FINAL PROJECT REPORT***

*Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (S1) at  
Departement of Electrical Engineering  
Faculty of Industrial Technology  
Universitas Islam Sultan Agung*



***ARRANGED BY:***

***NUR TIFFANI I'MAL ZAQI***

***NIM 30602000035***

***DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG  
SEMARANG  
2024***

## LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul "Analisa Penempatan Jarak Maksimum Lightning Arrester Sebagai Pelindung Transformator Terhadap Tegangan Lebih Di Gardu Induk 150 kV New Batang Menggunakan Metode Pantulan Berulang" ini disusun oleh:

Nama : Nur Tiffani P'mal Zaqi

NIM : 30602000035

Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada :

Hari : Kamis

Tanggal : 29 Agustus 2024

Pembimbing



Dedi Nugroho, ST., MT  
NIDN. 0617126602

Mengetahui,  
Ketua Program Studi Teknik Elektro



030824  
TEKNIK ELEKTRO  
Jenny Putri Hapsari, ST., MT  
NIDN. 0607018501

## LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul "Analisa Penempatan Jarak Maksimum Lightning Arrester Sebagai Pelindung Transformator Terhadap Tegangan Lebih Di Gardu Induk 150 kV New Batang Menggunakan Metode Pantulan Berulang" ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari :

Tanggal :

**Tim Penguji**

**Tanda Tangan**

Ir. Arief Marwanto, ST.,M.Eng.,Ph.D  
NIDN : 0628097501  
Ketua Penguji

Jenny Putri Hapsari, ST., MT.  
NIDN : 0607018501  
Penguji II

Dedi Nugroho, S.T., M.T  
NIDN : 0617126602  
Penguji III

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nur Tiffani I'mal Zaqi  
NIM : 30602000035  
Fakultas : Teknologi Industri  
Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro di Fakultas Teknologi UNISSULA Semarang dengan judul "Judul Tugas Akhir", adalah asli (orisinal) dan bukan menjiplak (plagiat) dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan dimanapun dalam bentuk apapun baik sebagian atau keseluruhan, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab. Apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa Karya Tugas Akhir tersebut adalah hasil karya orang lain atau pihak lain, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis.

Semarang, 02 September 2024

Yang Menyatakan

Mahasiswa



Nur Tiffani I'mal Zaqi

NIM.30602000035

## SURAT PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nur Tiffani I'mal Zaqi  
NIM : 30602000035  
Program Studi : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tugas Akhir dengan Judul :  
**“Analisa Penempatan Jarak Maksimum Lightuing Arrester Sebagai Pelindung  
Transformator Terhadap Tegangan Lebih Di Gardu Induk 150 kV New Batang  
Menggunakan Metode Pantulan Berulang”**

Menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasikan di internet dan media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik hak cipta. Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiatisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 02 September 2024

Yang Menyatakan

Mahasiswa



Nur Tiffani I'mal Zaqi

NIM. 30601900043

## HALAMAN PERSEMBAHAN

### بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji Syukur kehadiran Allah subhanahu wata'ala, yang telah melimpahkan rahmat serta hidayahnya kepada penulis, sholawat seta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu alaihi wassalam, yang syafa'atnya selalu menjadi harapan seluruh umatnya kelak di Yaumul akhir. Dengan terselesaikannya Laporan Penelitian ini yang sederhana ini kepada orang yang penulis sayangi,

#### **Pertama**

penulis mempersembahkan Penelitian ini kepada kedua orang tua penulis (Bapak Abdul Badi dan Ibu Nur Khasanah) mereka adalah orang yang luar biasa hebat yang senantiasa memberikan dukungan materil maupun non materil, semangat, dan kasih sayang. Serta kepada kakak penulis (Laela Zuliana dan Moh. Khasbullah) yang selalu menjadi motivator kepada penulis. Dan tidak lupa kepada pacar penulis (Yulisa Widya Ningsih) yang menjadi penyemangat ketika malas menerpa. Terimakasih saya ucapkan kepada semuanya. Dengan terselesaikannya penelitian ini, penulis sudah bisa memenuhi kepercayaan kedua orang tua, selama menjadi mahasiswa di Universitas Islam Sultan Agung.

#### **Kedua**

Terima kasih juga penulis sampaikan kepada dosen pembimbing, ( Bapak Dedi Nugroho,ST.,MT. ), yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan saran yang sangat berharga sepanjang proses penelitian ini. Kesabaran dan dedikasi beliau dalam membimbing. Serta kepada seluruh jajaran dosen Fakultas Teknologi Industri Prodi Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung yang telah memberikan ilmu, fasilitas, dan dukungan akademik yang sangat bermanfaat.

Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan dan bantuan yang telah diberikan, serta memberikan yang terbaik untuk kita semua. Skripsi ini adalah wujud dari kerja keras dan doa dari semua pihak yang telah membantu. Terima kasih atas segala dukungan yang telah diberikan.

## HALAMAN MOTTO

“Kerja keras adalah wujud cinta dan pengorbanan, dan Ayah adalah teladan sejati dari keduanya”

“Kasih ibu adalah cermin dari cinta Tuhan, dan kesabaran ibu adalah pengorbanan yang membimbing saya dengan penuh harapan dan ketulusan”  
*(Anak Laki-Laki Ayah Ibu)*

“Ketika dalam kesulitan orang-orang meninggalkanmu, itu bisa jadi ALLAH sendirilah yang akan mengurusmu”  
*(Imam Syafi'i)*

“Bersyukur adalah satu-satunya cara agar kita merasa cukup”



## KATA PENGANTAR

*Bismillahirrahmanirrahim*

*Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh*

Alhamdulillah puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan Rahmat dan Nikmatnya sehingga masih berkesempatan untuk menuntut ilmu dalam keadaan sehat wal'afiat, Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW, semoga kelak kita mendapatkan syafaatnya. *Aamiin Ya Rabbal Alamin.*

Penyusunan penelitian ini adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada Fakultas Teknologi Industri di Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam penulisan penelitian ini tentunya banyak pihak yang memberikan bantuan secara moril maupun materil. Oleh karena itu, penulis menyampaikan upacara terima kasih yang tiada hingganya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan ridhonya serta memberikan ketabahan, kesabaran dan kelapangan hati serta pikiran dalam menimba ilmu.
2. Kedua orang tua, yakni bapak Abdul Badi dan ibu Nur Khasanah yang telah memberikan dukungan baik materil maupun non materil dan tidak pernah berhenti mendo'akan di setiap sholatnya.
3. Saudara sekandung, kakak dan adik penulis tercinta Laela Zuliana dan Helmy Zulfa Amala, yang selalu mendoa'akan, memberi semangat dan selalu membuat penulis selalu bangkit dan optimis.
4. Bapak Prof. Dr. Gunarto SH., MHum. selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
5. Ibu Dr. Hj. Novi Marlyana, S.T., M.T. Selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
6. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T. Selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

7. Bapak Dedi Nugroho ST., MT., selaku dosen pembimbing yang memberikan ilmu yang bermanfaat, memberikan banyak arahan, dan dengan sabar membimbing, sehingga dapat menyelesaikan laporan penelitian ini.
8. Bapak Dr. Muhammad Khosyi'in, S.T., M.T. Selaku Koordinator penelitian Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung.
9. Seluruh dosen dan karyawan Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas ilmu, bimbingan, dan dukungan dalam penyusunan penelitian ini.
10. Yulisa Widya Ningsih yang selalu memberikan semangat dan motivasi serta do'a.
11. Teman-teman Team Robotik yang telah membantu penelitian, sehingga penelitian laporan penelitian ini dapat berjalan dengan semestinya.
12. Teman Teknik Elektro angkatan 2020 senantiasa memberikan dukungan, semangat, dan doa.
13. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu atas segala dukungan, semangat, ilmu dalam menyelesaikan penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa di dalam penyusunan laporan ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu kritik dan saran sangat diharapkan untuk mencapai hasil yang lebih baik. Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak pada terutama Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang dan dapat menambah wawasan.

***Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.***

Semarang, 16 Agustus 2024

Nur Tiffani I'mal Zaqi

## DAFTAR ISI

LAPORAN TUGAS AKHIR .....	i
<i>FINAL PROJECT REPORT</i> .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING .....	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI TIM PENGUJI.....	iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAAN TUGAS AKHIR.....	v
SURAT PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN .....	vii
HALAMAN MOTTO .....	viii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xv
ABSTRAK .....	xvi
<i>ABSTRACT</i> .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI .....	5
2.1. Tinjauan Pustaka .....	5
2.2. Landasan Teori .....	7
2.2.1. Surge .....	7

2.2.2.	Sistem Tenaga Listrik .....	8
2.2.3.	Lightning Arrester .....	9
2.2.4.	Tingkat Isolasi Dasar (TID) .....	19
2.1.1.	Pemilihan Arrester .....	22
2.1.2.	Tegangan sistem.....	23
2.1.3.	Pengenal arrester .....	24
2.1.4.	Kelonggaran Perlindungan.....	25
2.1.5.	Kecepatan gelombang berjalan .....	25
2.1.6.	Tegangan Percik Lightning Arrester.....	26
2.1.7.	Naik Tegangan Pada Transformator .....	30
2.1.8.	Teori Gelombang Berjalan Pada Saluran Udara.....	31
2.1.9.	Teori Pantulan Berulang Dan Diagram Tangga.....	32
2.1.10.	Persamaan Interpolasi linier.....	36
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>38</b>
3.1	Model Penelitian.....	38
3.2	Alat dan Bahan .....	38
3.2.1	Alat yang digunakan .....	38
3.2.1	Data yang digunakan.....	38
3.3	Tahapan Penelitian .....	43
3.4	Flowchart Penelitian.....	44
3.5	Lokasi dan Objek Penelitan.....	45
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>46</b>
4.1.	Mencari tegangan tertinggi system.....	46
4.2.	Mencari rating pengenal arrester .....	46
4.3.	Perhitungan kecepatan gelombang berjalan .....	47
4.4.	Perhitungan impedensi surja.....	47
4.5.	Perhitungan jarak maksimum proteksi arrester pada transformator menggunakan metode pantulan berulang .....	48
4.6.	Perhitungan tegangan percik arrester .....	49

4.6.1	Perhitungan tegangan percik arrester dengan jarak 23,7 meter .....	50
4.6.2	Perhitungan tegangan percik arrester dengan jarak 4 meter .....	54
4.7.	Perhitungan naik tegangan pada transformator .....	58
4.7.1	Perhitungan naik tegangan pada transformator dengan jarak 23,7 meter ..	58
4.7.2	Perhitungan naik tegangan pada transformator dengan jarak 4 meter .....	60
BAB V PENUTUP.....		65
5.1.	Kesimpulan.....	65
5.2.	SARAN .....	66
DAFTAR PUSAKA.....		67



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem tenaga listrik sederhana. ....	9
Gambar 2. 2 Lightning arrester. ....	10
Gambar 2. 3 Penampang arrester. ....	11
Gambar 2. 4 Arrester Jenis Ekspulsi. ....	12
Gambar 2. 5 Arrester Jenis Katup. ....	13
Gambar 2. 6 Sela Api (Spark Gap). ....	14
Gambar 2. 7 Tahanan Tak Linear. ....	15
Gambar 2. 8 Karakteristik tahanan katup. ....	15
Gambar 2. 9 Karakteristik tegangan gagal sela arrester. ....	18
Gambar 2. 10 Pengaruh Arrester Terhadap Surja Tegangan ....	19
Gambar 2. 11 tegangan maksimum kawat ke tanah pada tempat gangguan untuk. ....	24
Gambar 2. 12 Rangkaian satu saluran. ....	26
Gambar 2. 13 Diagram tangga. ....	33
Gambar 2. 14 Transformator dan arrester terpisah sejauh S. ....	34
Gambar 2. 15 Koefisien $a_0$ dan $a_1$ . ....	36
Gambar 3. 1 Single Line Diagram Gardu Induk 150 kV New Batang. ....	39
Gambar 3. 2 Transformator gardu induk 150 KV New Batang. ....	39
Gambar 3. 3 Nameplate Transformator gardu induk 150 KV New Batang. ....	40
Gambar 3. 4 Lightning Arrester gardu induk 150 KV New Batang. ....	41
Gambar 3. 5 data karakteristik lightning arrester merk siemens. ....	41
Gambar 3. 6 Nameplate lightning arrester gardu induk 150 KV New Batang. ....	42
Gambar 3. 7 Flowchart Penelitian. ....	44
Gambar 4. 1 Transformator dan lightning arrester terpisah jarak S. ....	48
Gambar 4. 2 analisis diagram tangga dengan jarak 23,7 m. ....	50
Gambar 4. 3 Grafik kecuraman gelombang surja petir dengan jarak 23,7 m. ....	53
Gambar 4. 4 analisis diagram tangga dengan jarak 4 m. ....	54
Gambar 4. 5 Grafik kecuraman gelombang surja petir dengan jarak 4 m. ....	57
Gambar 4. 6 Grafik Perhitungan Naik Tegangan Pada Trafo dengan jarak 23,7 m. ....	59
Gambar 4. 7 Grafik Perhitungan Naik Tegangan Pada Trafo dengan jarak 4 m. ....	62

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 TID (BIL peralatan sistem yang ditanahkan).....	20
Tabel 2. 2 Penetapan Tingkat Isolasi Transformator dan Penangkal Petir .....	21
Tabel 4. 1 Hasil perhitungan kecuraman gelombang surja petir dengan jarak 23,7 m .....	52
Tabel 4. 2 Hasil perhitungan kecuraman gelombang surja petir dengan jarak 4 m .....	56



## ABSTRAK

Transformator adalah peralatan yang sangat penting dalam system tenaga listrik. Akan tetapi transformator juga dapat mengalami kerusakan akibat gangguan. Untuk mencegahnya diperlukan proteksi berupa lightning arrester. Pemasangan arrester harus memperhatikan jarak, penelitian ini bertujuan untuk menghitung jarak pemasangan lightning arrester dengan transformator di gardu induk 150 kV new batang. Penelitian ini menggunakan metode pantulan berulang untuk menentukan jarak maksimum pemasangan lightning arrester. Hasil dari penelitian ini adalah penentuan jarak aman harus memperhatikan tegangan percikan arester, tegangan penjepit trafo, kecuraman gelombang masuk, BIL (*Basic Isolation Level*), induktansi penghantar lightning arrester dan kecepatan rambat gelombang. Jarak maksimum pemasangan lightning arrester di gardu induk 150 kV new batang adalah 23,7 meter, dengan waktu percik arrester 0,379  $\mu$ detik dan tegangan percik 334 kV untuk kenaikan tegangan transformatornya sebesar 650 kV. Kemudian jarak pemasangan yang sebenarnya di gardu induk 150 kV new batang adalah 4 meter dengan waktu percik arrester 0,063  $\mu$ detik dan tegangan percik 334 kV, kemudian untuk kenaikan tegangan pada transformator adalah 387,33 kV. Pada jarak maksimum pemasangan arrester kenaikan tegangan pada transfor matol sebesar 650 kV atau sama dengan BIL dari transformator yaitu 650 kV. Dalam hal ini transfor mator berada pada batas maksimum tegangan. Maka sangat di anjurkan untuk pemasangan lightning arrester sedekan mungkin dengan transformator Hal ini dikarenakan jarak (s) pemasangan berpengaruh dengan kenaikan tegangan pada transformator (EP).

## **ABSTRACT**

*A transformer is a crucial piece of equipment in an electrical power system. However, transformers can also suffer damage due to disturbances. To prevent this, protection in the form of a lightning arrester is required. When installing an arrester, the distance must be carefully considered. This study aims to calculate the installation distance of lightning arresters from the transformer at the 150 kV New Batang substation. The study uses the repeated reflection method to determine the maximum distance for installing the lightning arrester. The results indicate that the safe distance must take into account the arrester's sparkover voltage, transformer clamp voltage, incoming wave steepness, basic isolation level (BIL), the inductance of the lightning arrester conductor, and wave propagation speed. The maximum distance for installing a lightning arrester at the 150 kV New Batang substation is 23.7 meters, with an arrester sparkover time of  $0.379 \mu\text{s}$  and a sparkover voltage of 334 kV, for a transformer voltage rise of 650 kV. The actual installation distance at the 150 kV New Batang substation is 4 meters, with an arrester sparkover time of  $0.063 \mu\text{s}$  and a sparkover voltage of 334 kV, resulting in a transformer voltage rise of 387.33 kV. At the maximum arrester installation distance, the voltage rise in the transformer is 650 kV, which matches the BIL of the transformer, i.e., 650 kV. In this case, the transformer is at the maximum voltage limit. Therefore, it is recommended to install the lightning arrester as close as possible to the transformer because the installation distance ( $S$ ) affects the voltage rise in the transformer (EP).*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Di era sekarang ini, kehidupan manusia tidak dapat dipisahkan dari segala peralatan listrik. Kebutuhan tenaga listrik dari tahun ke tahun semakin meningkat seiring dengan meningkatnya taraf hidup masyarakat. Untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik tersebut diperlukan peningkatan kualitas sistem distribusi tenaga listrik. Salah satu komponen penting dalam sistem transmisi tenaga listrik adalah gardu induk yang mempunyai peranan penting dalam sistem distribusi tenaga listrik yaitu menurunkan tegangan dari 150 kV menjadi 20 kV agar dapat diterima oleh pengguna. Oleh karena itu, untuk mengurangi frekuensi kerusakan pada peralatan listrik, diperlukan peralatan yang dapat mencegah terjadinya gangguan. trafo adalah Salah satu peralatan penting di gardu induk yang memiliki berperan untuk mendistribusikan tenaga listrik dengan cara menaikkan atau menurunkan tegangan, Transformator memiliki proteksi *lighning arrester* untuk melindunginya dari lonjakan tegangan seperti surja hubung, dan surja petir[1]

Penempatan *lighning arrester* harus memperhatikan jarak antara arester dengan trafo. tapi untuk menentukan jarak yang aman harus memperhatikan beberapa hal agar arrester dapat melindungi secara optimal. Gardu Induk 150 KV New Batang merupakan Gardu induk yang baru beroperasi pada tahun 2018. Pada Gardu Induk PLTU Batang terdapat dua transformator daya dengan masing – masing mempunyai kapasitas 60 MVA. Masing – masing transformator tersebut memiliki sebuah pengaman dari surja lebih yaitu *lighning arrester* dengan merk SIEMEN type 3EP6 132-3PF41-2XA1-Z. Dengan jarak pemasangan antara transformator dan *lighning arrester* adalah 4 meter. Maka dari itu diperlukan evaluasi untuk efisiensi pemasangan pengaman yang terpasang.

Penelitian ini membahas tentang analisa penempatan jarak maksimum *lighning arrester* sebagai pelindung transformator pada Gardu Induk 150 KV New

Batang, menggunakan metode pantulan berulang. Sehingga nantinya dapat diketahui nilai jarak proteksi *lightning arrester* pada transformator di Gardu Induk PLTU Batang.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang diuraikan, maka dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menentukan jarak maksimum *lightning arrester* terhadap transformator di Gardu Induk 150 KV New Batang menggunakan metode pantulan berulang.
2. Bagaimana nilai jarak proteksi *lightning arrester* terhadap transformator di Gardu Induk 150 KV New Batang menggunakan metode pantulan berulang.

## 1.3 Batasan Masalah

Agar isi dan pembahasan menjadi terarah dan dapat mencapai hasil yang diharapkan, maka penulis memberi batasan penelitian, Oleh sebab itu, penulis membatasi masalahnya sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya menganalisa jarak maksimum proteksi *lightning arrester* pada transformator di Gardu Induk 150 KV New Batang menggunakan metode pantulan berulang
2. Membandingkan nilai proteksi untuk jarak terpasang di Gardu Induk 150 KV New Batang dengan jarak maksimum proteksi *lightning arrester* terhadap transformator Gardu Induk 150 KV New Batang.
3. Penelitian ini tidak memperhitungkan ketinggian dari Lightning Arrester.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui apakah jarak pemasangan *lightning arrester* di Gardu Induk 150 KV New Batang sudah memiliki tingkat perlindungan yang baik.
2. Menghitung nilai jarak maksimum proteksi *lightning arrester* terhadap transformator di Gardu Induk 150 KV New Batang menggunakan metode pantulan berulang.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat menjadi referensi dalam menentukan jarak maksimum arrester sebagai proteksi transformator yang terdapat pada Gardu Induk 150 KV New Batang.
2. Memberi informasi kepada PT. PLN akan nilai proteksi *lightning arrester* terhadap transformator di Gardu Induk 150 Kv New Batang.
3. Penelitian ini dapat memberikan kontribusi pada pemahaman lebih mendalam mengenai penentuan jarak maksimum *lightning arrester* sebagai proteksi transformator.

#### 1.6 Sistematika Penulisan

Ada beberapa sistematika penulisan dalam penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut:

##### BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan.

##### BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Bab ini akan membahas mengenai rujukan-rujukan dari penelitian sebelumnya yang tentunya berkaitan dengan penelitian yang dibuat.

Selain itu, bab ini juga berisikan berbagai teori dan juga konsep yang mendukung dalam pembuatan penelitian ini.

**BAB III : METODE PENELITIAN**

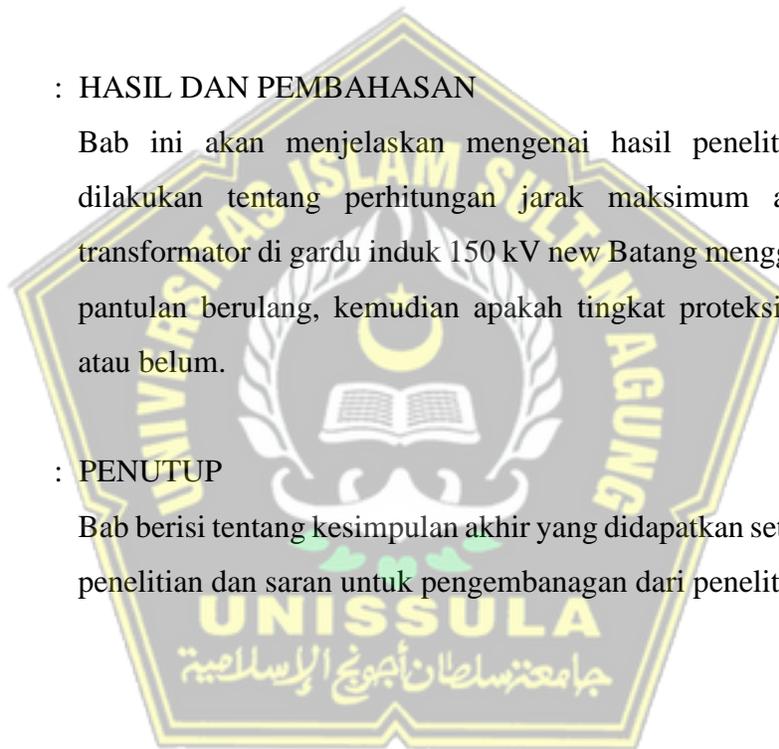
Bab ini akan membahas mengenai metode penelitian yang di gunakan, tahapan penelitian, flowchart, dan metode yang di gunakan untuk menghitung jarak maksimum arrester sebagai alat pengaman transformator.

**BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini akan menjelaskan mengenai hasil penelitian yang telah dilakukan tentang perhitungan jarak maksimum arrester dengan transformator di gardu induk 150 kV new Batang menggunakan metode pantulan berulang, kemudian apakah tingkat proteksinya sudah baik atau belum.

**BAB V : PENUTUP**

Bab berisi tentang kesimpulan akhir yang didapatkan setelah melakukan penelitian dan saran untuk pengembangan dari penelitian.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Beberapa referensi dari penelitian-penelitian sebelumnya mengenai penangkal petir, yang dapat digunakan sebagai dasar untuk memulai penelitian ini dan sebagai sumber untuk tugas skripsi ini. Salah satu contohnya adalah penelitian yang dilakukan oleh Toyib dan M. Zainuddin dengan judul **Jarak Penempatan *Lightning Arrester* sebagai Pelindung Transformator terhadap Tegangan Lebih pada Gardu Induk 150 Kv Harapan Baru**. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan jarak maksimum antara lightning arrester dan transformator sebagai perlindungan terhadap tegangan lebih di gardu induk 150 kV Harapan Baru. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jarak maksimum antara arrester dan transformator adalah 10,96 meter, sementara jarak pemasangan di lapangan adalah 3,2 meter. Dengan demikian, arrester masih dapat melindungi transformator karena jaraknya masih berada di bawah batas maksimum yang diizinkan. Setelah arrester aktif selama 9,54  $\mu$ s, tegangan pada transformator akan menurun. Mengingat batas tegangan impuls *Basic Insulation Level* transformator adalah 650 kV dan tegangan puncaknya mencapai 751,3 kV dalam 300  $\mu$ s, arrester masih mampu memberikan perlindungan yang efektif. [2]

Selanjutnya, penelitian oleh Nurul Hidayatulloh yang berjudul **Kemampuan Arester Untuk Pengaman Tranformator Pada Gardu Induk Sronдол 150 Kv**. Tujuan penelitian ini adalah untuk menilai kemampuan arrester di Gardu Induk Sronдол 150 kV dalam melindungi transformator berdasarkan jarak penempatannya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jarak maksimum antara arrester dan transformator (S) yang terpasang di gardu induk Sronдол 150 kV adalah 9,75 meter. Analisis matematis menunjukkan bahwa pemasangan arrester tipe X AR 170 A1/162 dapat melindungi transformator dari gangguan surja petir dan surja hubung dengan tegangan hingga 1000 kV, karena masih berada dalam batas jarak aman yaitu 3 meter. Oleh karena itu, arrester harus dipasang dalam jarak aman maksimum 9,75 meter dari transformator.[3]

Penelitian oleh Saiful Amri dengan judul *Analisis Arrester pada Jaringan 20 kV di PLN (Persero) Rayon Soppeng* bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik kerja arrester dalam melindungi peralatan pada saluran distribusi 20 kV di PT. PLN Rayon Soppeng dan menentukan jarak maksimum antara arrester dan peralatan di saluran distribusi tersebut. Temuan dari studi ini menunjukkan bahwa pada jaringan 20 kV penyulang empat Soppeng, transformator memiliki Tingkat Isolasi Dasar (TID) sebesar 5 kA dengan 125 kV. Karakteristik arrester mencakup tegangan pengenalan 24 kV, tegangan pelepasan 87 kV, dan arus pelepasan 5 kA, dengan tingkat perlindungan mencapai 95,7 kV. Hal ini sesuai dengan standar SPLN 7:1978 yang menetapkan isolasi dasar untuk transformator dan arrester. Selain itu, perhitungan menunjukkan bahwa jarak maksimum penempatan arrester dari transformator adalah 2,745 meter, sesuai dengan kondisi teknis yang ada di lapangan, sehingga penempatan arrester berada dalam batas yang diizinkan. Namun, sistem perlindungan ini bisa ditingkatkan dengan meningkatkan tahanan isolasi pada hantaran udara dan menempatkan arrester pada lokasi-lokasi rawan sambaran petir sepanjang jaringan distribusi, dengan jarak penempatannya tidak melebihi 2,745 meter.[4]

Penelitian oleh Aryatul Mahmudah yang berjudul *Analisis Jarak Penempatan Arrester Sebagai Pengaman Transformator Daya Dari Gangguan Surja Petir* bertujuan untuk menentukan jarak ideal penempatan lightning arrester sebagai pelindung transformator. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa tinggi tower transmisi yang dihitung adalah 41,9 meter. Karakteristik arrester yang diidentifikasi mencakup tegangan maksimum ( $V_m$ ) sebesar 165 kV, tegangan pengenalan ( $E_a$ ) sebesar 500 kV, faktor perlindungan ( $V_p$ ) sebesar 160 kV, margin ( $M$ ) sebesar 490 kV, faktor perlindungan terhadap Tingkat Isolasi Dasar (TID) peralatan ( $F_p$ ) sebesar 73,3%, dan faktor perlindungan dari arrester ( $F_p$ ) sebesar 306,2%. Selain itu, arus pelepasan ( $I_a$ ) adalah 16,5 kA dan jarak optimal penempatan arrester ( $S$ ) adalah 22,5 meter.[1]

Penelitian oleh Abdul Azis yang berjudul *Evaluasi Sistem Analisa Jarak Lindung Lightning Arrester Terhadap Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk Sungai Juaro Palembang* menunjukkan bahwa jarak antara lightning arrester dan

transformator daya 20 MVA yang dipasang adalah 7 meter, sementara perhitungan menunjukkan jarak ideal sebesar 5,7812 meter. Pada saluran transmisi di Gardu Induk Sungai Juaro Palembang, yang merupakan sistem transmisi sirkuit ganda, sesuai dengan SPLN 7:1978, jarak maksimum antara penangkal petir dan transformator untuk sistem 66 kV tidak boleh melebihi 34 meter. Dengan demikian, jarak antara lightning arrester dan transformator daya 20 MVA masih dalam batas yang diperbolehkan oleh PT PLN. Selain itu, kenaikan tegangan pada transformator juga masih di bawah batas isolasi dasar (BIL), memastikan bahwa peralatan tetap terlindungi oleh lightning arrester, karena pemasangannya sesuai dengan batas maksimum yang ditetapkan dan belum melampaui standar BIL.[5]

Penelitian oleh Toga Simorangkir yang berjudul *Studi Kemampuan Arrester Untuk Pengaman Transformator Pada Gardu Induk Tanjung Morawa 150 KV*. Jarak maksimum antara Transformator dan Arrester adalah 10,96 meter. Sementara itu, di Gardu Induk TAMORA, Transformator dipasang pada jarak 3 meter dari Arrester. Di Gardu Induk TAMORA 150 kV, jarak antara Arrester dan peralatan yang diproteksi adalah 3 meter, yang masih di bawah jarak maksimum. Oleh karena itu, jarak tersebut masih cukup untuk melindungi peralatan dari gangguan surja petir.[5]

## **2.2. Landasan Teori**

### **2.2.1. Surge**

#### **a. Pengertian Surge**

Surge, atau lonjakan tegangan, adalah peningkatan tegangan listrik yang terjadi secara tiba tiba di suatu sistem yang melampaui batas tegangan operasional normal. Lonjakan ini biasanya berlangsung dalam durasi yang sangat singkat, dari beberapa nanodetik hingga mikrodetik, namun cukup kuat untuk merusak perangkat listrik dan elektronik yang terhubung ke jaringan.[6]

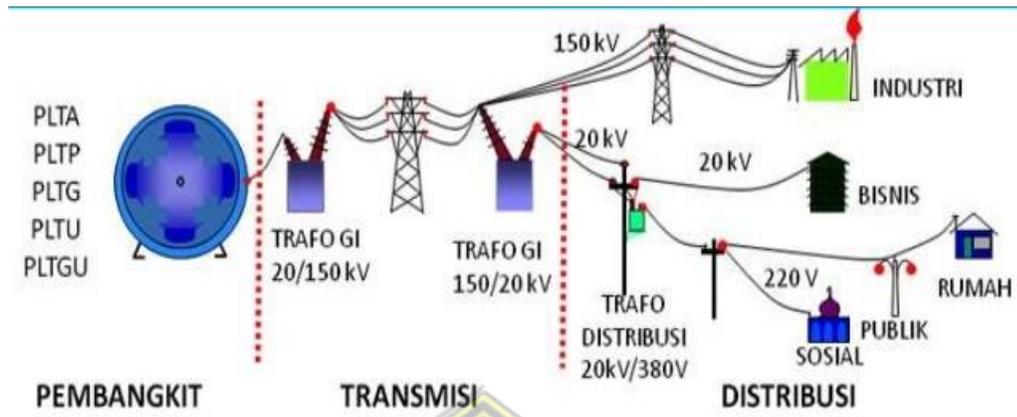
## b. Penyebab Surge

Lonjakan tegangan dapat terjadi karena berbagai faktor, antara lain:

1. **Petir (Lightning):** Salah satu penyebab surge yang paling umum adalah sambaran petir yang mengenai jaringan listrik atau struktur yang terhubung. Energi besar yang dilepaskan oleh petir bisa menimbulkan lonjakan tegangan yang signifikan.
2. **Switching Transients:** Operasi switching dalam sistem tenaga listrik, seperti saat sakelar dibuka atau ditutup, dapat mengganggu aliran arus yang mengakibatkan lonjakan tegangan.
3. **Kondisi Kesalahan (Fault Conditions):** Gangguan dalam sistem tenaga listrik, seperti hubungan pendek, juga dapat memicu terjadinya surge.
4. **Back EMF (Electromotive Force):** Motor listrik atau perangkat yang mengandung komponen induktif dapat menghasilkan lonjakan tegangan ketika aliran arus terputus.[6]

### 2.2.2. Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik merupakan kumpulan pusat tenaga listrik dan pusat beban yang saling terhubung melalui jaringan transmisi dan distribusi sehingga membentuk suatu kesatuan interkoneksi. Energi listrik dihasilkan oleh pusat-pusat ketenagalistrikan. Kemudian energi listrik tersebut disalurkan melalui saluran transmisi dan disalurkan ke beban-beban melalui saluran distribusi.[7]



Gambar 2. 1 Sistem tenaga listrik sederhana.

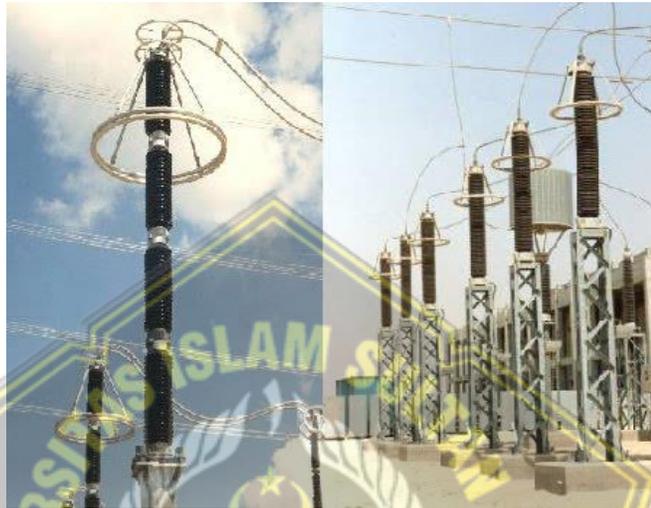
Sumber: catatanwsn.wordpress.com

Sistem tenaga listrik pada hakikatnya merupakan jaringan pusat pembangkitan dan beban yang saling terhubung melalui sistem transmisi dan distribusi sehingga menjadi satu kesatuan sistem. Sistem ini meliputi empat komponen utama, yaitu pembangkitan, transmisi, distribusi, dan konsumsi listrik. Di Indonesia, listrik yang dihasilkan di pembangkit listrik dinaikkan tegangannya menggunakan trafo step-up agar distribusinya lebih efisien. Karena pembangkit listrik biasanya terletak jauh dari pusat konsumsi utama seperti kota dan industri, listrik yang dihasilkan harus disalurkan melalui jarak yang jauh. Jaringan transmisi di Indonesia memanfaatkan saluran 150 kV yang dikenal dengan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan saluran 500 kV yang disebut dengan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET).[8]

### 2.2.3. Lightning Arrester

Arrester adalah perangkat pelindung yang dirancang untuk melindungi peralatan sistem tenaga listrik dari sambaran petir. Fungsinya adalah untuk menyediakan jalur bypass di sekitar isolasi, memungkinkan arus petir mengalir tanpa menyebabkan tegangan berlebih pada peralatan. Jalur bypass ini harus dirancang sedemikian rupa agar tidak mengganggu aliran arus daya pada frekuensi 50 Hz. Dalam kondisi normal, arrester berfungsi sebagai isolator, tetapi saat terjadi lonjakan arus akibat sambaran

petir, arrester berubah menjadi konduktor untuk mengalirkan arus tinggi ke tanah. Setelah lonjakan tersebut berakhir, arrester harus cepat kembali berfungsi sebagai isolator, agar pemutus daya tidak perlu melakukan pemutusan.[9]

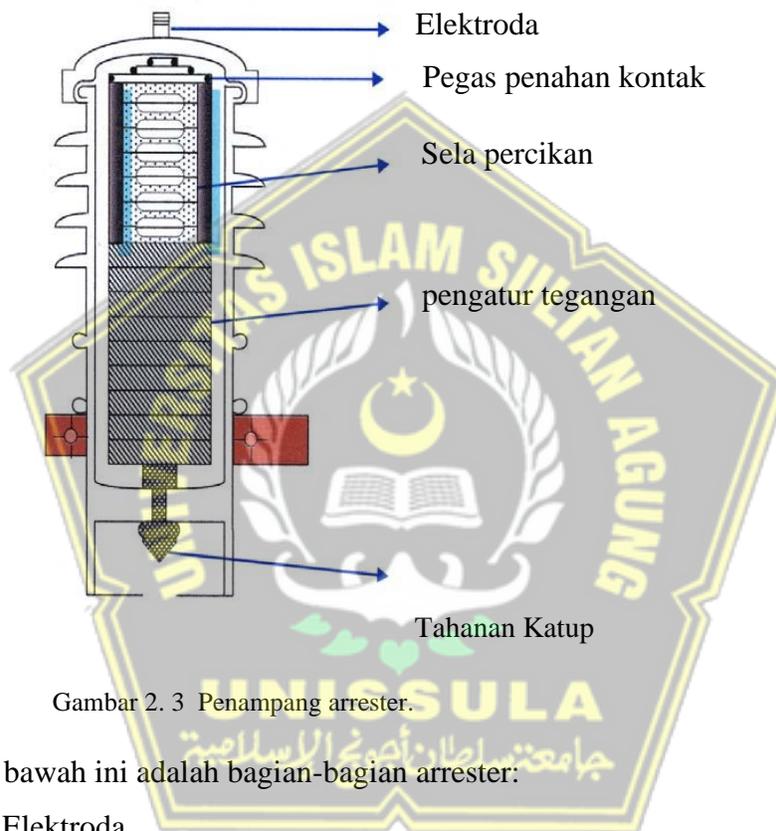


Gambar 2. 2 Lightning arrester.

Sistem tenaga listrik pada hakikatnya adalah jaringan pembangkit daya dan pusat beban yang saling terhubung melalui jaringan transmisi dan distribusi, sehingga menjadi satu kesatuan yang utuh. Sistem ini terdiri dari empat komponen utama: pembangkit, jaringan transmisi, jaringan distribusi, dan konsumen. Di Indonesia, listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik terlebih dahulu dinaikkan tegangannya melalui transformator agar transmisi dapat berjalan dengan efisien. Karena pembangkit listrik sering kali berada jauh dari pusat kota dan kawasan industri, listrik yang dihasilkan harus disalurkan melalui jarak yang jauh agar dapat menjangkau pengguna akhir. Infrastruktur transmisi di Indonesia meliputi saluran udara tegangan tinggi (SUTT) 150 kV dan saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) 500 kV. Untuk meminimalkan kerugian—baik kerugian energi maupun penurunan tegangan—listrik harus disalurkan pada tegangan tinggi atau ekstra tinggi. Sistem tenaga listrik meliputi saluran transmisi, gardu induk (GI), dan saluran distribusi. Pengelolaan elemen-elemen ini sebagai satu kesatuan sistem sangatlah penting karena gangguan pada satu bagian dapat

memengaruhi seluruh jaringan transmisi. Pengelolaan yang tepat akan menjamin keandalan dan efisiensi penyaluran listrik di seluruh jaringan.

#### A. Bagian-bagian arrester



Gambar 2. 3 Penampang arrester.

Di bawah ini adalah bagian-bagian arrester:

##### 1. Elektroda

Elektroda adalah terminal pada arrester yang terhubung ke bagian bertegangan di atas, sedangkan elektroda bagian bawah terhubung ke tanah

##### 2. Sela Percikan

Jika terjadi lonjakan tegangan akibat sambaran petir atau arus berlebih pada arrester, busur api akan muncul pada sela percikan (spark gap). Busur api ini kemudian akan ditiup keluar oleh tekanan gas yang dihasilkan dari pembakaran tabung fiber

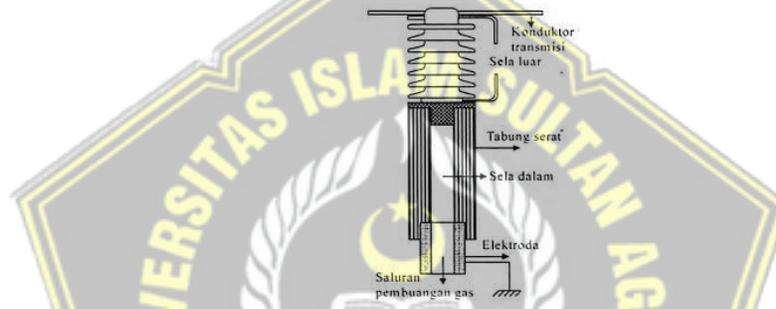
### 3. Tahanan Katup

Tahanan yang digunakan dalam arrester adalah jenis material yang sifat tahanannya dapat berubah seiring dengan perubahan tegangan.[10]

#### B. Jenis-Jenis Lightning Arrester

Arrester terbagi dari dua jenis, jenis ekspulsi (expulsion type) atau tabung pelindung (protector tube), dan jenis katup (valve type).

##### 1. Arrester Jenis Ekspulsi atau tabung pelindung

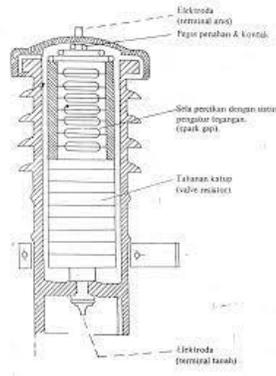


Gambar 2. 4 Arrester Jenis Ekspulsi.

Arrester jenis ekspulsi memiliki karakteristik dapat memutuskan arus susulan dan memiliki volt-waktu yang lebih baik dibandingkan dengan arrester jenis sela batang, tetapi tegangan percik impulsnya lebih tinggi dibandingkan dengan arrester jenis katup. Kemampuan arrester jenis ekspulsi dalam memutuskan arus susulan bergantung pada tingkat arus hubung singkat di sistem pada titik pemasangan arrester tersebut.[11]

##### 2. Arrester Jenis Katup

Arrester tipe katup diklasifikasikan menjadi tiga kategori: arrester gardu induk, arrester saluran, dan arrester untuk mesin berputar. Arrester ini memiliki celah percikan seri yang dikombinasikan dengan elemen resistansi non-linier.[8]



Gambar 2. 5 Arester Jenis Katup.

a) Arester Katup Jenis Gardu

Jenis penahan katup ini umumnya digunakan di gardu induk besar dan dikenal sangat efisien sekaligus mahal. Jenis ini biasanya digunakan untuk melindungi peralatan berharga di sirkuit dengan tegangan mulai dari 2.400 volt hingga 287 kV dan seterusnya.

b) Arester Katup Jenis Saluran

Arester ini lebih hemat biaya dibandingkan dengan arester tipe gardu induk. Istilah "jaringan" di sini tidak mengacu pada perlindungan jaringan transmisi. Seperti arester tipe gardu induk, arester ini dirancang untuk melindungi peralatan tegangan tinggi dalam sistem dengan tegangan berkisar antara 15 kV hingga 69 kV.

c) Arester Katup Jenis Gardu untuk mesin-mesin

Jenis arester ini dirancang khusus untuk melindungi mesin yang berputar. Arester ini digunakan untuk tegangan mulai dari 2,4 kV hingga 15 kV.[9]

C. Prinsip Kerja Arrester

Arrester berfungsi sebagai pelindung dalam sistem tenaga listrik dengan cara menangani lonjakan tegangan yang tiba-tiba dan berlebihan. Ketika terjadi lonjakan tegangan, misalnya akibat petir atau gangguan pada jaringan listrik, arrester berperan untuk mendeteksi kondisi tersebut. Arrester bekerja dengan

memanfaatkan komponen seperti varistor atau gas discharge tube, yang secara otomatis akan mengalihkan aliran energi lonjakan ke jalur pembumian, yakni ke tanah. Proses ini melibatkan penyimpanan dan penyaluran energi lonjakan tersebut agar tidak merusak perangkat listrik yang terhubung. Setelah lonjakan berhasil diredam, arrester kembali ke kondisi normal dan siap untuk melindungi dari lonjakan berikutnya. Dengan desain yang memungkinkan penanganan lonjakan berulang kali, arrester membantu memastikan bahwa peralatan dan sistem listrik tetap aman dan berfungsi dengan baik, meskipun kadang perlu dilakukan pemeriksaan atau penggantian jika terjadi lonjakan besar. Arrester adalah alat pelindung yang sangat efektif dan sering disebut juga sebagai surge diverter. Secara umum, arrester terdiri dari dua unsur utama:[12]

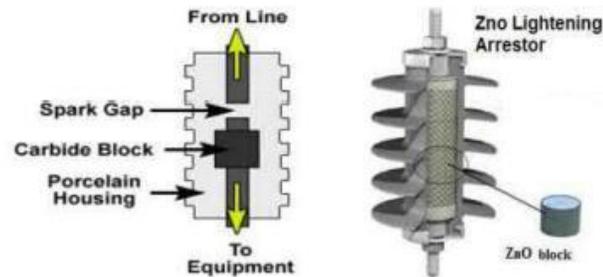
1. Sela api (spark gap).



Gambar 2. 6 Sela Api (Spark Gap).

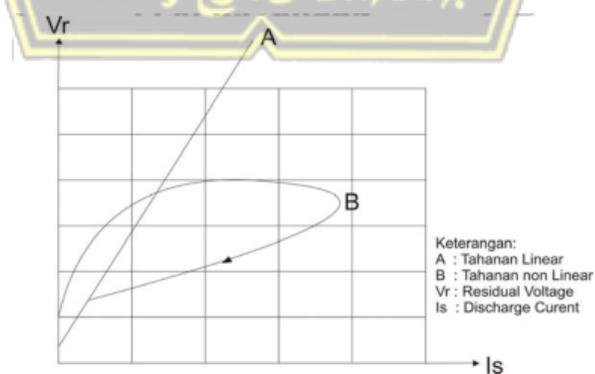
Bila tegangan lebih terjadi akibat sambaran petir (lonjakan) atau hubungan pendek (switching) pada penangkal petir yang terpasang, busur api (bola api) akan terbentuk di celah percikan. Pada beberapa jenis penangkal petir, busur api dipadamkan oleh tekanan gas yang dihasilkan oleh pembakaran tabung serat. Umumnya, celah percikan api tertahan di dalam tabung keramik yang diisi dengan gas inert (gas tabung pelepasan).[9]

## 2. Tahanan Tak Linear



Gambar 2. 7 Tahanan Tak Linear.

Batas atas dan batas bawah dari tegangan percikan pada arester ditentukan oleh tegangan maksimum sistem dan tingkat isolasi peralatan yang dilindungi. Jika arester digunakan hanya untuk melindungi isolasi dari kerusakan akibat gangguan tanpa memperhatikan dampaknya terhadap layanan, maka dapat digunakan sela batang yang memungkinkan terjadinya percikan saat tegangan mencapai level berbahaya. Tegangan sistem bolak-balik akan terus mempertahankan busur api hingga pemutus beban berfungsi. Untuk memadamkan busur api, sela api ini dapat dihubungkan dengan tahanan. Namun, jika tahanan tersebut memiliki nilai tetap, tegangan yang jatuh menjadi sangat besar sehingga perlindungan isolasi tidak efektif. Oleh karena itu, digunakan tahanan kran yang memiliki sifat khusus, yaitu tahanan yang sangat kecil saat tegangan dan arus tinggi..



Gambar 2. 8 Karakteristik tahanan katup

Sumber: (Hutauruk, 1991).

Batas atas dan batas bawah dari tegangan percikan pada arester ditentukan oleh tegangan maksimum sistem dan tingkat isolasi peralatan yang dilindungi. Jika arester hanya digunakan untuk melindungi isolasi dari kerusakan akibat gangguan tanpa memperhatikan dampak terhadap layanan, maka sela batang dapat digunakan untuk memungkinkan terjadinya percikan pada tingkat tegangan yang berbahaya. Tegangan sistem bolak-balik akan terus mempertahankan busur api hingga pemutus beban berfungsi. Untuk memadamkan busur api, sela api ini dapat dihubungkan dengan tahanan. Namun, jika tahanan tersebut memiliki nilai tetap, tegangan yang jatuh dapat menjadi sangat tinggi, sehingga perlindungan isolasi tidak efektif. Oleh karena itu, digunakan tahanan kran yang memiliki sifat khusus, yaitu tahanan yang sangat kecil pada tegangan dan arus tinggi.[13]

Pada dasarnya, arrester terdiri dari dua komponen utama: sela api (spark gap) dan tahanan katup (valve resistor), yang dihubungkan secara seri. Batas atas dan bawah dari tegangan percikan ditentukan oleh tegangan maksimum sistem dan tingkat isolasi peralatan yang dilindungi. Untuk aplikasi khusus, arrester dapat dilengkapi dengan satu komponen tambahan yaitu tahanan katup dan sistem pengaturan atau pembagian tegangan (grading system).[5]

Jika tujuan hanya untuk melindungi isolasi dari kerusakan akibat gangguan tanpa mempertimbangkan dampaknya terhadap layanan, maka sela batang yang memungkinkan terjadinya percikan saat tegangan mencapai level bahaya sudah memadai. Dalam kondisi ini, tegangan sistem bolak-balik akan terus mempertahankan busur api sampai pemutus beban berfungsi. Untuk memadamkan busur api, sela api dapat dihubungkan dengan tahanan. Namun, jika tahanan tersebut memiliki nilai tetap, tegangan yang jatuh menjadi sangat tinggi, sehingga perlindungan terhadap tegangan lebih menjadi tidak efektif dan perlindungan isolasi gagal. Oleh karena itu, disarankan menggunakan tahanan katup (valve

resistor), yang memiliki karakteristik khusus yaitu tahanan yang sangat kecil saat tegangan dan arus tinggi.[14]

Proses pengecilan tahanan terjadi dengan cepat saat tegangan lebih mencapai puncaknya. Tegangan lebih menyebabkan penurunan drastis pada tahanan, sehingga tegangan jatuh dibatasi meskipun arusnya besar. Setelah tegangan lebih menghilang dan hanya tersisa tegangan normal, tahanan meningkat kembali untuk membatasi arus susulan sekitar 50 ampere. Arus susulan ini akhirnya dimatikan oleh sela api saat tegangan sistem mencapai titik nol pertama kali, sehingga alat ini berfungsi sebagai kran yang menutup arus, yang menjelaskan nama tahanan katup (valve resistor) [4]

#### D. Karakteristik Arrester

Untuk melindungi terhadap sambaran petir, arrester harus memiliki karakteristik berikut:

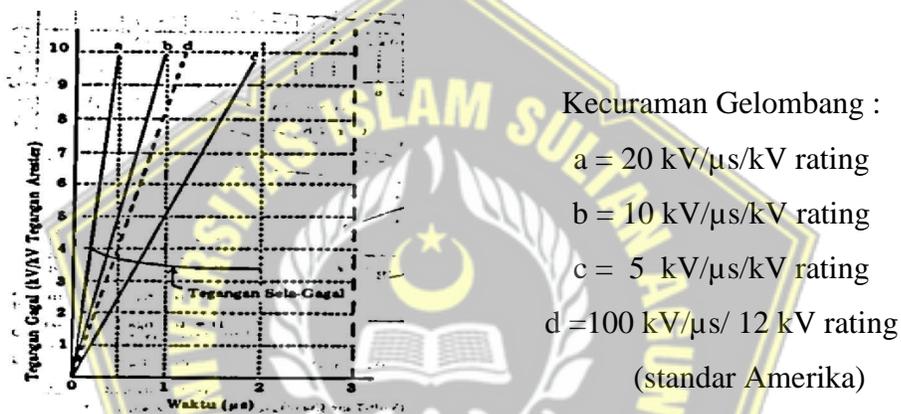
- a. Harus memiliki tegangan pengenal 50 Hz yang tidak boleh dilampaui.
- b. Harus memiliki karakteristik pembatas tegangan saat terkena berbagai jenis arus petir.
- c. Harus menyertakan batas termal.

Untuk meminimalkan tegangan isolasi, sistem proteksi tegangan lebih harus memenuhi kriteria berikut:

- a. Harus mampu melepaskan tegangan lebih ke tanah tanpa menimbulkan gangguan tanah (gangguan tanah jenuh).
- b. Harus mampu memutus arus sisa.
- c. Harus memiliki tingkat proteksi rendah, yang berarti tegangan celah percikan dan tegangan pelepasan harus rendah.

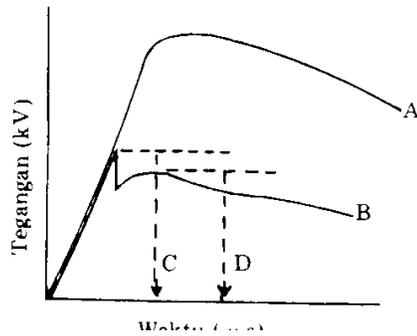
Karakteristik perlindungan arrester telah mengalami banyak perubahan seiring waktu. Salah satu perubahan utama adalah bahwa tegangan celah dan tegangan pelepasan maksimum kini sebanding dengan tegangan dasarnya untuk tipe arrester

tertentu. Tegangan celah, atau tegangan percikan, perlu memiliki nilai yang tinggi pada frekuensi 50 Hz untuk mengurangi pelepasan yang disebabkan oleh hubung singkat ke tanah dan lonjakan arus. Tegangan pelepasan, atau tegangan residual (IR drop), adalah tegangan yang terukur di antara terminal-terminal arrester saat arus surja mengalir. Tegangan celah dipengaruhi oleh kecuraman tegangan yang masuk, yang menentukan tegangan pelepasan awal pada arrester. Penurunan tegangan pada elemen katup, yang bergantung pada kecuraman dan besar arus surja, mempengaruhi tegangan arrester selama proses pelepasan.



Gambar 2. 9 Karakteristik tegangan gagal sela arrester

Gambar 2.9 dengan jelas menggambarkan dampak penangkal petir pada lonjakan tegangan lebih. Efektivitas proteksi sangat bergantung pada tegangan pelepasan. Untuk tegangan impuls yang tinggi, tegangan percikan dapat melebihi tegangan sisa. Namun, hal ini dianggap kurang kritis karena durasi yang sangat singkat sebelum kegagalan terjadi.



Keterangan :

A = gelombang surja di gardu Tanpa arrester

B = gelombang surja di gardu dengan arrester

C = tegangan percikan arrester

D = tegangan pelepasan (sisa)

Gambar 2. 10 Pengaruh Arrester Terhadap Surja Tegangan

Efisiensi perlindungan terutama ditentukan oleh tegangan pelepasan. Tegangan percikan untuk impuls yang curam mungkin lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan sisa. Namun, hal ini dianggap kurang signifikan karena durasi kejadian kegagalan yang sangat singkat sebelum efeknya terjadi.[4]

#### 2.2.4. Tingkat Isolasi Dasar (TID)

Tingkat Isolasi Dasar (TID), yang juga dikenal sebagai Basic Impulse Insulation Level (BIL), merujuk pada tingkat perlindungan isolasi dari peralatan. Untuk memastikan sistem yang sangat andal, berbagai pendekatan dapat digunakan untuk menyelaraskan isolasi peralatan jaringan dengan perangkat proteksinya. Salah satu pendekatan yang efektif adalah menentukan level isolasi tertentu. Peralatan harus memiliki tingkat isolasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan level isolasi yang ditetapkan, dengan memperhatikan beberapa pertimbangan berikut:

1. Menentukan level isolasi yang paling sesuai.
2. Memastikan bahwa kekuatan breakdown dan flashover dari semua isolasi peralatan minimal sama dengan level yang ditentukan.
3. Menggunakan alat proteksi yang memadai, baik dari segi kualitas maupun biaya.

Penentuan level isolasi didasarkan pada data hasil observasi dari lapangan dan laboratorium yang dipadukan dengan karakteristik tegangan impuls. Isolasi peralatan

harus memiliki tingkat isolasi yang setara atau lebih tinggi dari BIL yang tertera di kolom 2 tabel 2.1. Angka tersebut dapat dijadikan acuan dalam memilih standar BIL permukaan, tanpa memperhitungkan apakah sistem tersebut terhubung ke tanah atau tidak.[15]

Tabel 2. 1 TID (BIL peralatan sistem yang ditanahkan)

<b>Kelas (kV)</b>	<b>Referensi</b>	<b>BIL (kV)</b>	<b>80% BIL KV</b>
1,2		30	24
8,7		75	60
12		95	76
23		150	120
34,5		200	160
66		250	200
49		350	280
92		450	360
115		550	440
138		650	520
161		750	600
180		825	660
196		900	720
230		1050	840
260		1175	940
287		1300	1040
345		1550	1240

Sumber : (Hutauruk, 1991).

Tabel 2. 2 Penetapan Tingkat Isolasi Transformator dan Penangkal Petir

Spesifikasi	Tegangan Nominal		
	150	66	50
	kV		
Tegangan Tinggi Untuk Peralatan	170	72,5	24
Pentanahan	Efektif	Tahanan	Tahanan
Tegangan Transformator	150	66	20
Tingkat Isolasi Dasar (TID)	650	325	125
Penangkal Petir			
Tegangan Pengenal	138	75	24
Arus Pelepasan Nominal	10 kA	10 kA	5 kA
Tegangan Pelepasan	460	270	87
Tegangan Percik Denyut Muka gelombang (MG)	530	310	100
Tegangan Percik Denyut Setandar	460	270	87
Kelas	10 kA	10 kA	5 kA

Sumber: (Hutauruk, 1991).

BIL (Basic Impulse Insulation Level) mengindikasikan tingkat isolasi terhadap sambaran petir. Untuk memastikan bahwa penggunaan arrester dalam koordinasi isolasi memberikan hasil maksimal, perlu mengikuti prinsip-prinsip tertentu. Salah satu prinsipnya adalah bahwa area perlindungan harus memiliki jangkauan yang cukup untuk melindungi seluruh peralatan di gardu induk yang memiliki BIL (Basic Insulation Level) sama atau lebih tinggi dari area perlindungan tersebut.

Untuk menghitung dari margin perlindungan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$IM = (BIL/ KIA - 1) \times 100\% \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\begin{aligned} IM &= (125 \text{ kV}/ 133,3 - 1) \times 100\% \\ &= 94,5\% \text{ (Hermagasantos,1994:134)} \end{aligned}$$

Keterangan:

IM = Impuls Margin (%)

KIA = Tegangan pelepasan maksimum arester(kV)

BIL = Tingkat isolasi dasar (kV)

Berdasarkan rumus di atas, tingkat perlindungan untuk transformator daya dapat ditentukan. Kriteria yang berlaku adalah jika MP (Margin Protection) lebih dari 20%, maka perlindungan dianggap memadai untuk melindungi transformator. (Hermagasantos, 1994).

### 2.1.1. Pemilihan Arrester

Saat memilih arrester yang tepat untuk kebutuhan tertentu, beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan meliputi:

- a. Kebutuhan Perlindungan: Ini mencakup kekuatan isolasi dari peralatan yang akan dilindungi serta karakteristik impuls dari arrester.
- b. Tegangan Sistem: Merujuk pada tegangan maksimum yang mungkin terjadi pada terminal arrester.
- c. Arus Hubung Singkat Sistem: Ini relevan hanya untuk arrester jenis ekspulsi.
- d. Jenis Arrester: Menentukan apakah arrester tersebut adalah jenis gardu, jenis saluran, atau jenis distribusi.

- e. Faktor Kondisi Lingkungan: Mencakup kondisi seperti ketinggian di atas permukaan laut (2.000 meter atau lebih), suhu, kelembaban tinggi, serta tingkat kontaminasi lingkungan.
- f. Faktor Ekonomi: Melibatkan perbandingan antara biaya pemeliharaan dengan potensi kerusakan yang bisa terjadi jika tidak menggunakan arrester atau menggunakan arrester dengan kualitas yang lebih rendah.

Untuk tegangan 69 kV dan lebih tinggi, digunakan arrester jenis gardu. Sementara itu, untuk tegangan antara 23 kV hingga 69 kV, dapat digunakan salah satu jenis arrester yang sesuai, tergantung pada pertimbangan ekonomi.[16]

### 2.1.2. Tegangan sistem

Tegangan sistem mengacu pada tegangan tertinggi yang dapat terjadi pada kawat, terutama saat terjadi gangguan kawat ke tanah. Tegangan maksimum ini juga dipengaruhi oleh metode pengetanahan sistem. Biasanya, tegangan maksimum pada kawat tanah dianggap sebesar 110 persen dari tegangan jala-jala. Berikut ini akan dibahas secara singkat bagaimana sistem pengetanahan memengaruhi tegangan maksimum yang mungkin terjadi pada kawat selama gangguan ke tanah.[9]

Untuk mencari tegangan tertinggi sistem dapat menggunakan persamaan:

$$V_m = 1,1 \times V_n \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

$V_m$  = Tegangan maksimum

$V_n$  = Tegangan nominal

#### 1. Sistem diketanahkan dengan impedensi

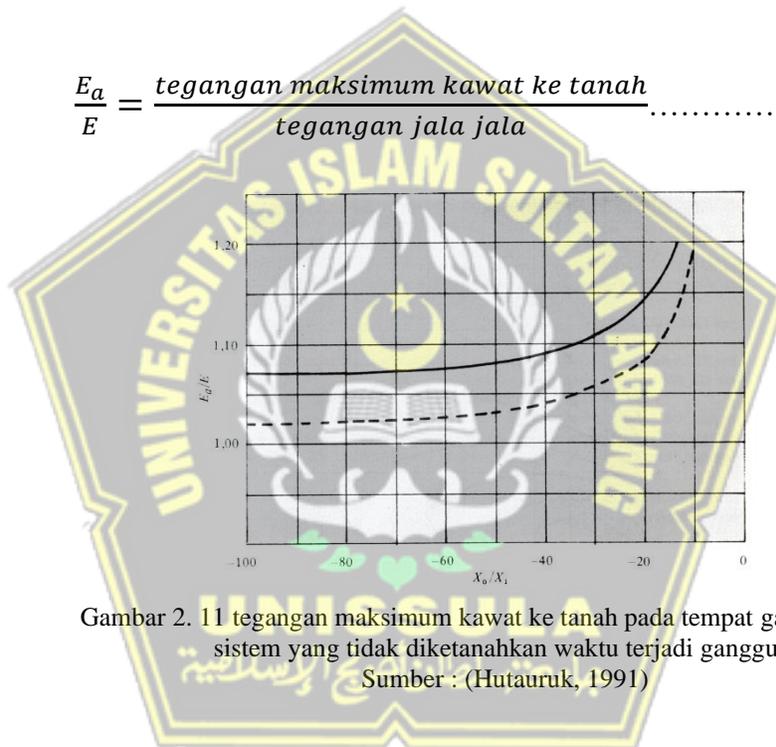
Sistem yang diketanahkan dengan impedensi dapat dibagi dalam dua kelas yaitu:

pengetanahan efektif dan pengetanahan tidak efektif.

a. Sistem yang diketanahkan efektif

Sebuah sistem dianggap diketanahkan secara efektif jika, dalam kondisi gangguan, tegangan kawat ke tanah tidak melebihi 80% dari tegangan jala-jala sistem. Untuk mencapai hal ini, diperlukan persyaratan berikut:  $R_0/X_1 \leq 1$  dan  $X_0/X_1 \leq 3$ . Jadi pada sistem misalnya 150 KV, yang diketanahkan efektif pengenal arrester dapat diambil:  $0,8 \times 1,1 \times 150KV = 132$ . [2]

$$\frac{E_a}{E} = \frac{\text{tegangan maksimum kawat ke tanah}}{\text{tegangan jala jala}} \dots\dots\dots(2.3)$$



Gambar 2. 11 tegangan maksimum kawat ke tanah pada tempat gangguan untuk sistem yang tidak diketanahkan waktu terjadi gangguan  
Sumber : (Hutauruk, 1991)

### 2.1.3. Pengenal arrester

Umumnya, penandaan atau "rating" pada arrester hanya mencakup tegangan. Namun, pada beberapa tabung pelindung atau arrester jenis ekspulsi, penting juga untuk mencantumkan rating arus yang menentukan kapasitas termal arrester tersebut. Agar penggunaan arrester lebih efektif dan ekonomis, empat karakteristik berikut perlu diketahui:

1. Pengenal tegangan: minimal sama dengan tegangan maksimum yang mungkin timbul selma terjadi gangguan.
2. Karakteristik perlindungan atau karakteristik impuls: berguna untuk koordinasi yang baik antara arrester dan peralatan yang dilindungi.
3. Kemampuan pemutus arus frekuensi besar.
4. Kemampuan menahan atau melewati arus surja .[9]

Untuk mencari riting pengenal arrester

$$Tegangan\ pengenal = V_m \times Koefisien\ pentanahan\ (0,8) \dots \dots \dots (2.4)$$

dimana  $V_m$  adalah tegangan maksimum arrester di kali koefisian pentamaham 80% (0,8).

#### 2.1.4. Kelonggaran Perlindungan

Kelonggaran pelindung atau 'protective margin' adalah selisih antara tingkat isolasi dasar (TID) dari peralatan yang dilindungi dan tingkat perlindungan arrester. Kelonggaran ini biasanya diambil sebesar 20% dari TID peralatan, asalkan arrester dipasang cukup dekat dengan peralatan.[9]

#### 2.1.5. Kecepatan gelombang berjalan

Gelombang yang merambat melalui kawat dengan konstanta L dan C menghasilkan gelombang tegangan dan arus yang merambat dengan kecepatan yang sama. Selain itu, kecepatan rambat gelombang juga dipengaruhi oleh faktor proporsional, yaitu karakteristik kawat yang dilalui. Dengan demikian, kecepatan rambat gelombang pada kawat udara dapat dihitung sebagai berikut:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots \dots \dots (2.5)$$

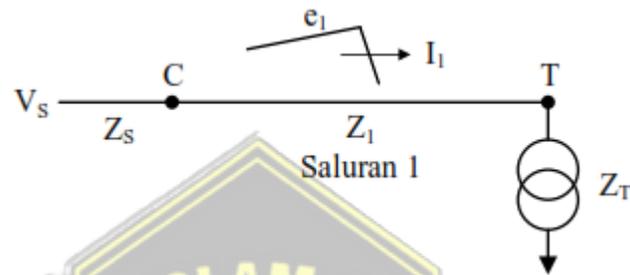
dimana :

$v$  = kecepatan rambat gelombang (m/s)

$L$  = induktansi saluran (H/m)

$C$  = kapasitansi saluran (F/m)

### 2.1.6. Tegangan Percik Lightning Arrester



Gambar 2. 12 Rangkaian satu saluran

Metode refleksi berulang, yang sering direpresentasikan sebagai diagram tangga, merupakan cara yang efektif untuk melacak refleksi gelombang lonjakan yang bergerak di sepanjang saluran. Dalam diagram ini, sumbu horizontal mewakili garis refleksi di sepanjang saluran, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan interval waktu, yang sesuai dengan total waktu yang dibutuhkan gelombang lonjakan untuk bergerak sepanjang saluran dalam satu arah,  $S/v$ . Diagram ini memungkinkan penentuan tegangan lonjakan total di setiap titik dan waktu di sepanjang saluran. Penerapan metode ini dapat dirinci lebih lanjut untuk menghitung tegangan lonjakan dan arus lonjakan untuk konfigurasi rangkaian yang digambarkan pada Gambar 2.12. (Hutauruk, 1991).

Pada Gambar 14, titik C dan T menggambarkan sambungan antara dua segmen dengan nilai impedansi lonjakan yang berbeda. Saluran-1, yang memiliki impedansi lonjakan ( $Z_1$ ), membentang sepanjang total  $S$  dari titik C ke titik T. Dengan asumsi ( $Z_s$ ) adalah impedansi lonjakan pada sisi sumber dan ( $Z_T$ ) adalah impedansi lonjakan pada sisi beban, menerapkan tegangan lonjakan ( $V_s$ ) dari sisi sumber ke saluran-1 akan

menghasilkan gelombang tegangan lonjakan ( $e_1$ ) dan arus lonjakan ( $i_1$ ) yang menjalar dari titik C ke titik T.[9]

Ketika gelombang lonjakan mencapai titik pertemuan dua impedansi lonjakan yang berbeda (titik transisi), gelombang tersebut akan menghasilkan gelombang lonjakan yang dipantulkan. Gelombang lonjakan yang masuk ( $e_1$ ) dan ( $i_1$ ), pada saluran-1 akan menghasilkan gelombang lonjakan yang dipantulkan pada titik T setelah mencapainya pada waktu  $t$ . Gelombang lonjakan yang dipantulkan ini kemudian akan bergerak dan tiba di titik C pada waktu  $2t$ , di mana ia akan menciptakan gelombang lonjakan yang dipantulkan baru. Gelombang pantulan baru ini akan bergerak kembali ke titik T, menyebabkan pantulan lain terjadi setelah mencapai titik T pada waktu  $3t$ . Proses pantulan ini akan terus berlanjut tanpa batas antara titik T dan titik C. Pada setiap contoh, total tegangan lonjakan atau arus lonjakan pada setiap titik di sepanjang saluran adalah jumlah dari semua gelombang tegangan lonjakan atau arus lonjakan yang ada di lokasi dan waktu tersebut. Waktu  $t$  didefinisikan sebagai durasi yang dibutuhkan gelombang lonjakan untuk bergerak antara titik C dan titik T, atau sebaliknya, dengan catatan kecepatan rambat gelombang adalah  $v$  dan panjang saluran adalah  $S$ . Dengan demikian, waktu  $t$  diberikan oleh:

$$t = \frac{S}{v} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

$t$  = Waktu (detik)

$S$  = Panjang saluran (m)

$v$  = Kecepatan gelombang surja (m/ $\mu$ detik)

Gambar 2.12 mengilustrasikan gelombang petir yang datang dari arah kiri. Setelah mencapai titik pemasangan penangkal petir, sebagian gelombang akan dipantulkan sementara sisanya akan diteruskan. Untuk menghitung tegangan percikan penangkal petir, pertama-tama perlu ditentukan operator pemantulan dan transmisi.[9]

$$a = \frac{Z_c - Z_1}{Z_c + Z_1} \quad b = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} \quad a' = \frac{2Z_c}{Z_c + Z_1} \quad b' = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_c} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana:

$(Z_1)$  = Impedansi surja untuk penghantar udara (O)

$(Z_c)$  = Impedansi surja untuk kabel (O)

$a$  = Operator pantulan untuk gelombang yang datang dari arah kiri

$b$  = Operator pantulan untuk gelombang yang datang dari arah kanan

$a'$  = Operator lanjutan untuk gelombang yang datang dari arah kiri

$b'$  = Operator lanjutan untuk gelombang yang datang dari arah kanan

Untuk menentukan kecuraman gelombang yang datang pertama kali, perlu diketahui waktu kecuraman gelombang saat memasuki gardu induk atau transformator. Diasumsikan bahwa waktu kecuraman gelombang ( $t$ ) adalah setiap 2  $\mu$ detik dengan surja petir ( $A$ ) sebesar 1.000 kV, dan faktor redaman ( $\alpha$ ) dihitung sebagai  $A \times a'$ . Apabila:

$i = 0, 2, 4, \dots, n$  adalah indeks dari waktu kecuraman gelombang setiap 2  $\mu$ detik dimisalkan:  $i = 2, 6, 10, \dots, n$  adalah indeks dari waktu kecuraman gelombang datang, dan  $i = 4, 8, 12, \dots, n$  adalah indeks dari waktu kecuraman gelombang pantul

$j = 1, 3, 5, \dots, n$  adalah indeks dari faktor redaman

Untuk menentukan nilai tegangan pada titik sambungan kabel kawat udara dimulai dari pada  $t = 0$ , tegangan pada waktu berikutnya adalah jumlah antara nilai tegangan sebelumnya dengan faktor redaman. Tegangan gelombang pantul adalah sama dengan tegangan gelombang yang datang. Dengan demikian, tegangan pada titik sambungan kabel kawat udara setiap 2 mikrodetik, jika tidak ada lightning arrester, adalah :

$$t = 0 \mu\text{detik}; e_{t=0} = 0$$

$$\begin{aligned}
 t &= 2 \mu\text{detik}; e_{t=2} = e_{t=0} + a^1/10^0 \\
 t &= 4 \mu\text{detik}; e_{t=4} = e_{t=2} \\
 t &= 6 \mu\text{detik}; e_{t=6} = e_{t=4} + a^1/10^0 + a^3/10^4 \\
 t &= 8 \mu\text{detik}; e_{t=8} = e_{t=6} \\
 t &= 10 \mu\text{detik}; e_{t=10} = e_{t=8} + a^3/10^4 + a^5/10^8 \\
 t &= 12 \mu\text{detik}; e_{t=12} = e_{t=10} \dots\dots\dots(2.8)
 \end{aligned}$$

Selanjutnya, waktu percik lightning arrester ( $t_{so}$ ) pada lokasi pemasangan arrester dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$(t_{so}) = 8 + \Delta t \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

$t_{so}$  = Waktu percik lightning arester ( $\mu$ detik)

8 = Waktu pada saat 8  $\mu$ detik

$\Delta t$  = Waktu tegangan berdasarkan waktu muka gelombang ( $\mu$ detik)

Sedangkan waktu tegangan berdasarkan waktu muka gelombang lightning arester ( $\Delta t$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Hutauruk, 1991):

$$E_a = e_{t=8} + b' \left( \frac{a^3/10^4}{2} \right) \Delta t \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\Delta t = (E_a - e_{t=8})/b' \left( \frac{a^3/10^4}{2} \right) \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana:

$\Delta t$  = Waktu tembus atau waktu lompatan api ( $\mu$ detik)

$V_a$  = Tingkat isolasi dasar lightning arrester (kV)

$e_{t=8}$  = Tegangan pada titik sambungan pada waktu 8  $\mu$ detik

$b'$  = Operator terusan untuk gelombang yang datang dari kanan

Untuk menemukan tegangan pada titik sambungan kabel udara mulai dari ( $e_t = t_{s0}$ ), dan pada waktu berikutnya, Anda menambahkan faktor redaman ke nilai tegangan sebelumnya. Tegangan gelombang yang dipantulkan identik dengan gelombang yang masuk. Oleh karena itu, tegangan pada titik sambungan kabel udara, tanpa adanya penangkal petir, untuk setiap 2 mikrodetik adalah:

$$e_{t=8+\Delta t} = e_{t=8} + \left( \frac{e_{t=10} - e_{t=8}}{2} \right) \Delta t \dots\dots\dots (2.12)$$

$$e_{t=10+\Delta t} = e_{t=8+\Delta t} - \left( \frac{e_{t=10} - e_{t=8}}{2} \right) (2\mu t - \Delta t) \dots\dots\dots (2.13)$$

### 2.1.7. Naik Tegangan Pada Transformator

Kenaikan tegangan pada transformator mengacu pada peningkatan tegangan yang terjadi selama lonjakan. Jika kenaikan tegangan ini lebih rendah dari tingkat isolasi dasar transformator, transformator dapat diamankan. Kenaikan tegangan pada transformator dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$t = 0 \mu\text{detik}; e_{t=0} = 0$$

$$t = 2 \mu\text{detik}; e_{t=2} = 0$$

$$t = 4 \mu\text{detik}; e_{t=4} = e_{t=2} + 2a^1A$$

$$t = 6 \mu\text{detik}; e_{t=6} = e_{t=4}$$

$$t = 8 \mu\text{detik}; e_{t=8} = e_{t=6} \times (1 + b)$$

$$t = 10 \mu\text{detik}; e_{t=10} = e_{t=8}$$

$$t = 12\mu\text{detik}; e_{t=12} = e_{t=6} \times (1 + b(b)^2) \dots\dots\dots (2.14)$$

### 2.1.8. Teori Gelombang Berjalan Pada Saluran Udara

Teori gelombang berjalan pada kawat transmisi mulai dikembangkan secara intensif sejak tahun 1910, terutama pada tahun 1930-an. Masalah yang berkaitan dengan gelombang berjalan ini sangat kompleks, sehingga banyak penyederhanaan diperlukan agar teori ini dapat diterapkan dalam bidang Teknik

Studi mengenai gelombang berjalan telah dilakukan pada:

- a. Kawat tunggal
- b. Kawat majemuk, dan
- c. Kecepatan majemuk gelombang berjalan.

Aspek utama dalam studi gangguan pada sistem transmisi adalah teori gelombang berjalan, yang meliputi analisis tentang sumber gelombang, karakteristik gelombang, dan kondisi pada titik transisi di kawat transmisi. Untuk penggunaan sehari-hari, teori kawat tunggal, yang hanya mempertimbangkan satu kawat dengan tanah sebagai jalur kembali, sudah memadai.

Sumber-sumber gelombang berjalan

- a. Sambaran kilat langsung pada kawat,
- b. Sambaran tidak langsung pada kawat (induksi),
- c. Operasi pemutusan (switching operation),
- d. Busur tanah (arching ground),
- e. Gangguan-gangguan dalam sistem akibat berbagai kesalahan, dan
- f. Tegangan stabil sistem.

Dari segi energi, surja pada kawat disebabkan oleh penyuntikan energi secara tiba-tiba ke dalam kawat. Energi ini kemudian menyebar melalui kawat, mirip dengan efek yang terjadi ketika batu dilempar ke dalam air tenang di kolam. Energi yang menyebar ini terdiri dari arus dan tegangan. Kecepatan penyebaran gelombang pada kawat bergantung pada konstanta-konstanta kawat tersebut. Pada kawat yang berada di udara, kecepatan gelombangnya sekitar 300 meter per mikrodetik. Ketika gelombang

mencapai titik peralihan atau diskontinuitas, gelombang tersebut mengalami perubahan, sehingga gelombang yang diteruskan sedikit berbeda dari gelombang yang asal.[9]

### **2.1.9. Teori Pantulan Berulang Dan Diagram Tangga**

#### **1. Kegunaan teori Pantulan Berulang**

Pada banyak kasus, ketika terjadi surja akibat switching atau sambaran petir pada kawat transmisi, penting untuk memperhitungkan pantulan berulang dari gelombang yang merambat. Menghitung besarnya tegangan akibat pantulan berulang ini bisa sangat sulit. Oleh karena itu, perhitungan ini sering memerlukan penggunaan diagram tangga (lattice diagram) atau diagram waktu-ruang. Dengan diagram tangga, kita dapat memantau posisi dan arah gerak setiap gelombang yang datang, gelombang pantulan, dan gelombang terusan dalam sistem pada setiap saat. Diagram ini juga memungkinkan kita untuk memasukkan faktor redaman dan distorsi dalam perhitungan.[9]

#### **2. Diagram Tangga**

Pada Gambar 2.13, digambarkan sebuah kawat yang dihubungkan ke tanah di titik-titik 1 dan 2. Gelombang yang datang dianggap berasal dari arah kiri. Setelah mencapai titik 1, sebagian gelombang akan dipantulkan dan sebagian lainnya diteruskan. Gelombang yang diteruskan kemudian mencapai titik 2, di mana juga sebagian dipantulkan dan sebagian diteruskan. Proses serupa terjadi di titik 3 dan seterusnya. Sirkuit-sirkuit antara titik-titik sambungan tersebut terdiri dari kawat udara atau kabel yang memiliki impedansi surja, kecepatan rambat, dan redaman yang berbeda-beda.[9]

Pada Gambar 14:

$\alpha$  : Operator pantulan yang datang dari kiri

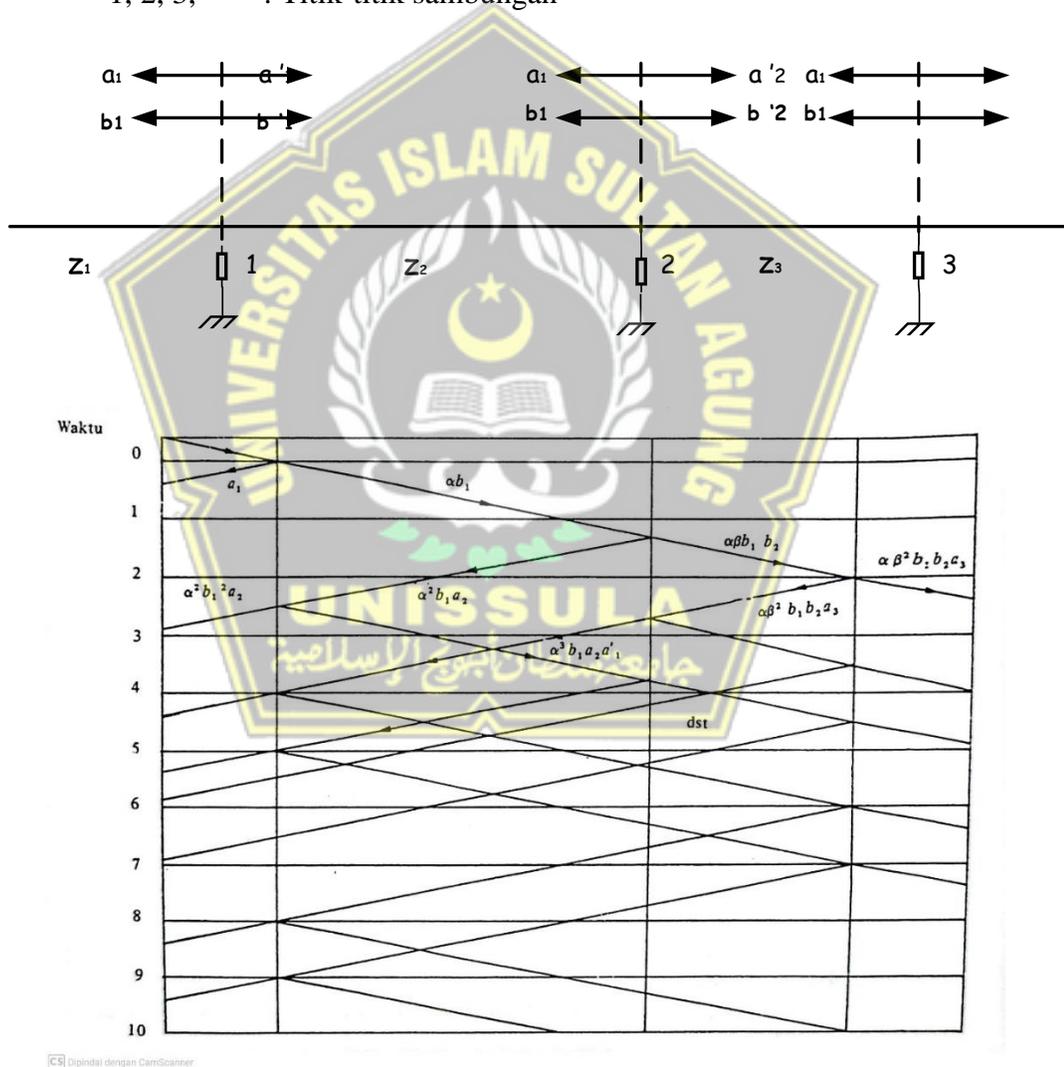
$\alpha'$  : Operator pantulan yang datang dari kanan

$b$  : Operator terusan yang datang dari kiri

$b'$  : Operator terusan yang datang dari kanan

$\alpha, \beta$ : Konstanta redaman

1, 2, 3, : Titik-titik sambungan



Gambar 2. 13 Diagram tangga.

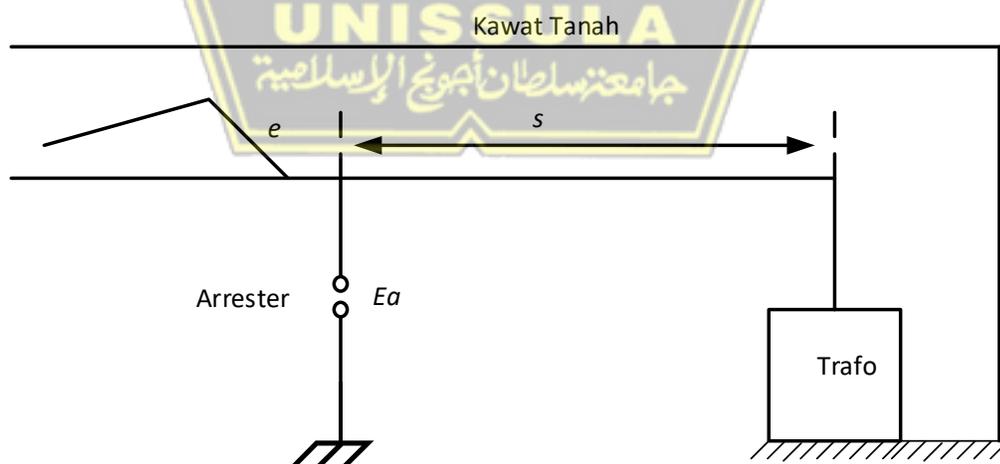
Sumber : (Hutauruk, 1991).

Dari diagram tangga di atas dapat dilihat pada gambar 2.13:

- a. Sambaran petir yang langsung mengenai kabel
- b. Sambaran petir yang mengenai kabel melalui induksi
- c. Operasi yang melibatkan penyalaan listrik
- d. Busur listrik yang terjadi di tanah
- e. Gangguan sistem yang disebabkan oleh berbagai gangguan
- f. Tegangan dalam sistem dalam kondisi stabil.

Penggunaan Teori Pantulan Berulang Untuk Menentukan Jarak Maksimum Arrester dan Peralatan Jarak maksimum antara arrester dan peralatan, atau panjang maksimum kabel penghubung, dapat ditentukan secara pendekatan menggunakan teori pantulan berulang. [9]

Jarak maksimum antara arrester dan transformator yang dihubungkan dengan saluran udara dapat ditentukan dengan mempertimbangkan saluran udara sebagai sambungan terbuka. Untuk itu, perhitungan dilakukan dengan referensi pada gambar yang disediakan di bawah ini:



Gambar 2. 14 Transformator dan arrester terpisah sejauh S

Sumber : (Hutauruk, 1991).

Perlindungan optimal tercapai jika arrester dipasang sedekat mungkin dengan sambungan transformator. Namun, dalam praktiknya, arrester harus dipasang pada jarak  $S$  dari transformator yang dilindungi. Oleh karena itu, jarak ini harus ditentukan dengan hati-hati untuk memastikan perlindungan yang efektif. Misalnya:

$E_a$  = Tegangan percik arrester (*arrester sparkover voltage*)

$E_p$  = Tegangan pada jepitan trafo

$A$  =  $de/dt$  = kecuraman gel datang, dan dianggap konstan

$s$  = Jarak antara arrester dengan trafo

$v$  = kecepatan rambat gelombang

Jika trafo dianggap sebagai jepitan terbuka, yang merupakan kondisi paling berbahaya, maka ketika gelombang mencapai trafo, akan terjadi pantulan total. Gelombang ini kemudian kembali ke kawat saluran dengan polaritas yang sama. Waktu yang diperlukan bagi gelombang untuk kembali ke arrester adalah  $2S/v$ . Ketika arrester mulai memercik, tegangan pada jepitan arrester adalah.

$$\begin{aligned} E_a &= At + A(t - 2s/v) \\ &= 2At - 2As/v \dots \dots \dots (2.17) \end{aligned}$$

Apabila waktu percik arrester  $t_{so}$  dihitung mulai dari gelombang itu pertama kali sampai ke arrester, maka dari persamaan diatas menjadi:

$$t_{so} = \frac{E_a + 2As/v}{2A} \dots \dots \dots (2.18)$$

Setelah terjadi percikan maka arrester berlaku sebagai jepitan hubung singkat, dan menghasilkan gelombang sebesar:

$$- A(t - t_{so}) \dots \dots \dots (2.19)$$

Gelombang negatif ini akan merambat ke trafo, dan setelah pantulan pertama pada trafo terjadi, jumlah tegangan pada trafo menjadi:

$$E_p = 2At - 2A(t - t_{so}) = 2At_{so} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$2A = \frac{E_a + 2As/v}{2A} \dots\dots\dots (2.21)$$

atau

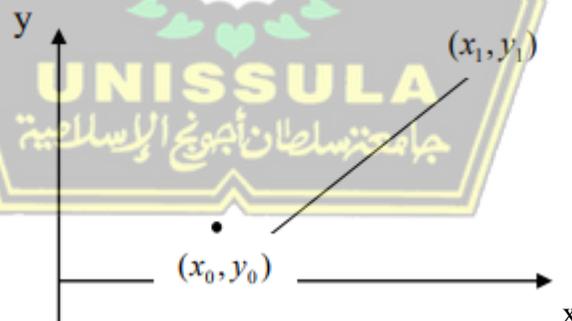
$$E_p = E_a + 2As/v \dots\dots\dots (2.22)$$

Harga maksimum  $E_p = 2E_a$ .

Jika tegangan tembus insulasi trafo =  $E_p$ , maka  $E_p$  harus lebih besar dari  $(E_a + 2As/v)$  untuk memberikan proteksi yang memadai. Untuk mengubah harga  $E_p$ , ubah saja  $s$ . Artinya, semakin kecil  $s$  maka semakin kecil  $E_p$  nya.[9]

#### 2.1.10. Persamaan Interpolasi linier

Interpolasi linier adalah interpolasi dua buah titik dengan sebuah garis lurus. Misal diberikan dua buah titik,  $(x_0, y_0)$  dan  $(x_1, y_1)$ . Polinom yang menginterpolasi kedua titik itu adalah persamaan garis lurus yang berbentuk:



Gambar 2. 15 Koefisien  $a_0$  dan  $a_1$

Sumber : (Buku Analisa Numerik)

Koefisien  $a_0$  dan  $a_1$  dicari dengan proses substitusi dan eliminasi. Dengan substitusi  $(x_0, y_0)$  dan  $(x_1, y_1)$ , diperoleh dua persamaan linier:

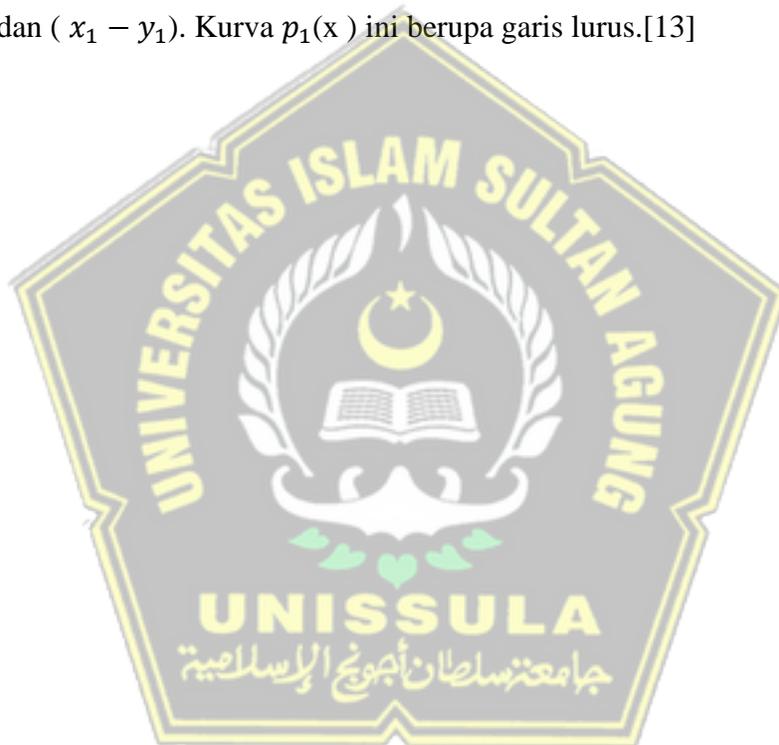
$$y_0 = a_0 + a_1x_0$$

$$y_1 = a_0 + a_1x_1$$

Kedua persamaan di atas jika diselesaikan dengan eliminasi akan memberikan persamaan berikut:

$$p_1(x) = y_0 + \frac{(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)}(x - x_0) \dots\dots\dots(2.23)$$

Persamaan di atas adalah persamaan garis lurus yang melalui dua buah titik  $(x_1, y_1)$  dan  $(x_0, y_0)$ . Kurva  $p_1(x)$  ini berupa garis lurus.[13]



## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Model Penelitian**

Penelitian ini dilakukan dengan cara studi dokumentasi, yaitu dengan mengumpulkan informasi dan mempelajari dokumen-dokumen untuk memperoleh informasi yang di butuhkan untuk penelitian ini. yaitu dengan cara berkoordinasi dengan pihak Gardu Induk 150 KV New Batang untuk mendapatkan data yang di perlukan. Setelah data di dapatkan maka akan dilakukan perhitungan matematis dengan metode pantulan berulang. Kemudian hasil yang di dapatkan akan di analisis apakah sudah sesuai dengan setandar yang berlaku.

#### **3.2 Alat dan Bahan**

##### **3.2.1 Alat yang digunakan**

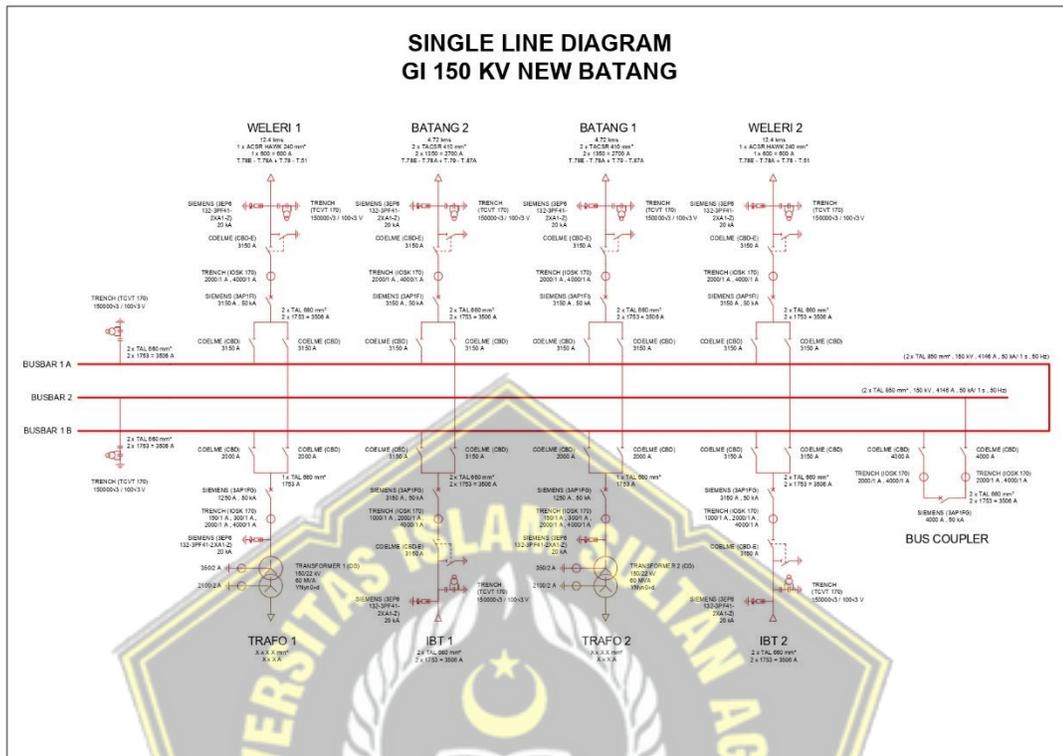
Untuk memudahkan dalam perhitungan dalam penelitian ini menggunakan komputer sebagai alat perhitungan dengan spesifikasi sebagai berikut :

1. Laptop merk HP ProBook
2. Operasi system Windows 10.
3. Sedangkan untuk software yang menggunakan Microsoft Excel tahun 2021

##### **3.2.1 Data yang digunakan**

Untuk data yang di butuhkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Single line diagram Gardu Induk 150 kV New Batang



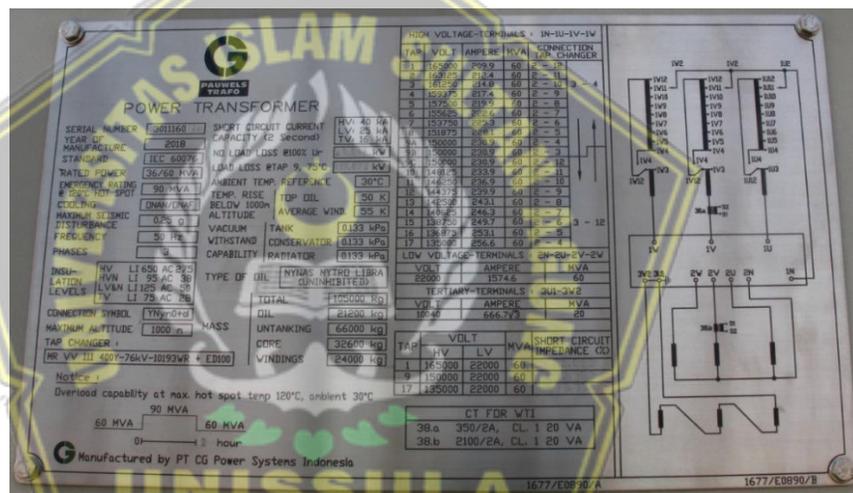
Gambar 3. 1 Single Line Diagram Gardu Induk 150 kV New Batang

2. Data Transformator



Gambar 3. 2 Transformator gardu induk 150 KV New Batang

PAUWELS TRAF0	
Serial Numbers	3011160
Manufacture	2018
Rated Power	60 MVA
Tegangan	150/22kV
Frequency	50 Hz
Phases	3
BIL (HV)	650 kv



Gambar 3. 3 Nameplate Transformator gardu induk 150 KV New Batang

Terdapat dua buah Transformator di Gardu Induk 150kV New Batang yang masing masing memiliki kapasitas 60 MVA dengan merk yang sama yaitu PAUWELS TRAF0 dengan nomer seri 3011160128. Berikut adalah name plate Transformator.

### 3. Data Lightning Arrester



Gambar 3. 4 Lightning Arrester gardu induk 150 KV New Batang

Electrical characteristics – phase arresters											
Highest voltage of the system	Rated voltage	Continuous operating voltage	Line discharge class	Long duration current 2ms	Maximum values of the residual voltages at discharge currents of the following impulses						
					30/60 $\mu$ s 0.5 kA	30/60 $\mu$ s 1 kA	30/60 $\mu$ s 2 kA	8/20 $\mu$ s 5 kA	8/20 $\mu$ s 10 kA	8/20 $\mu$ s 20 kA	8/20 $\mu$ s 40 kA
U <sub>m</sub> kV	U <sub>n</sub> kV	U <sub>c</sub> kV	LD Class	A	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV
123	96	77	3	1100	184	189	198	217	230	256	290
	96	77	4	1600	179	183	192	208	221	243	265
	102	82	3	1100	196	201	211	230	245	272	308
	102	82	4	1600	190	195	204	221	235	258	282
	108	86	3	1100	207	213	223	244	259	288	327
	108	86	4	1600	201	206	216	233	248	273	298
	154	123	3	1100	296	303	318	347	370	410	466
154	123	4	1600	287	294	308	333	354	390	425	
145	120	96	3	1100	230	236	248	271	288	320	363
	120	96	4	1600	224	229	240	259	276	304	331
	132	106	3	1100	253	260	272	298	317	352	399
	132	106	4	1600	246	252	264	285	304	334	364
	144	115	3	1100	276	283	297	325	346	384	435
	144	115	4	1600	268	275	288	311	331	364	397

Gambar 3. 5 data karakteristik lightning arrester merk siemens

SIEMENS			
Type	3EP6 132-3PF41-2XA1-Z		
Tegangan pengenalan $U_r$	132 kV	Tegangan maksimum $U_c$	106 kV
Arus nominal $I_n$	20 kA	Arus Pelepasan PR-CL	65 kA
TID	650	Tegangan percik	334 kV
Tanggal Produksi	2017		

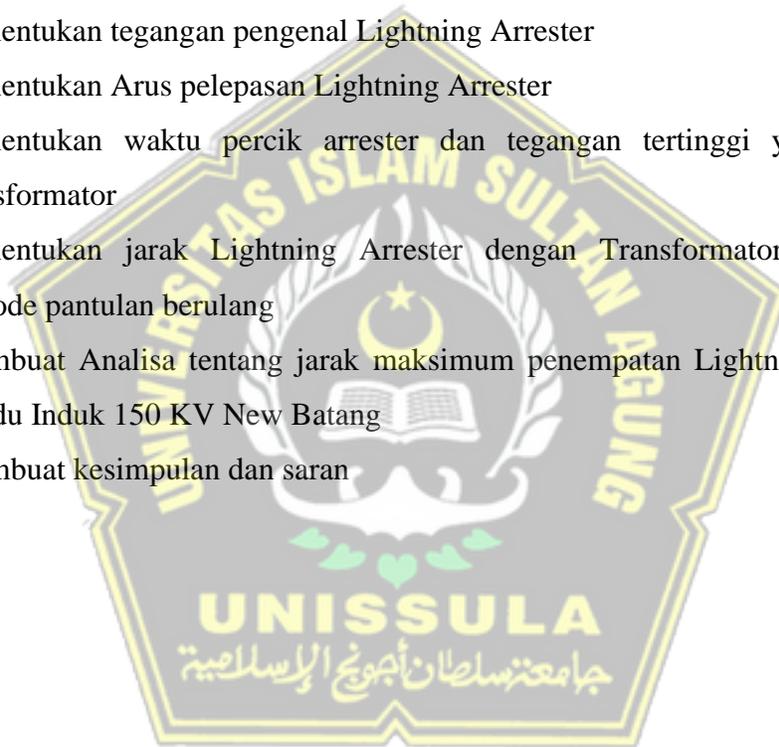


Gambar 3. 6 Nameplate lightning arrester gardu induk 150 KV New Batang

Di Gardu Induk 150kV New Batang terdapat dua buah Lightning Aresster merk SIEMENS dengan type 3EP6 132-3PF41-2XA1-Z yang terhubung dengan Transformator satu dan dua. Berikut adalah name plat Lightning Aresster

### 3.3 Tahapan Penelitian

1. Menentukan tempat penelitian
2. Menentukan data yang akan dibutuhkan
3. Mengumpulkan data – data penelitian yang dibutuhkan
4. Data – data penelitian yang di kumpulkan yaitu data spesifikasi Lightning Aresster, spesifikasi Transformator, jarak Lightning Aresster dengan Transformator
5. Menentukan tegangan pengenalan Lightning Arrester
6. Menentukan Arus pelepasan Lightning Arrester
7. Menentukan waktu percik arrester dan tegangan tertinggi yang tiba pada transformator
8. Menentukan jarak Lightning Arrester dengan Transformator menggunakan metode pantulan berulang
9. Membuat Analisa tentang jarak maksimum penempatan Lightning Aresster do Gardu Induk 150 KV New Batang
10. Membuat kesimpulan dan saran



### 3.4 Flowchart Penelitian



Gambar 3. 7 Flowchart Penelitian

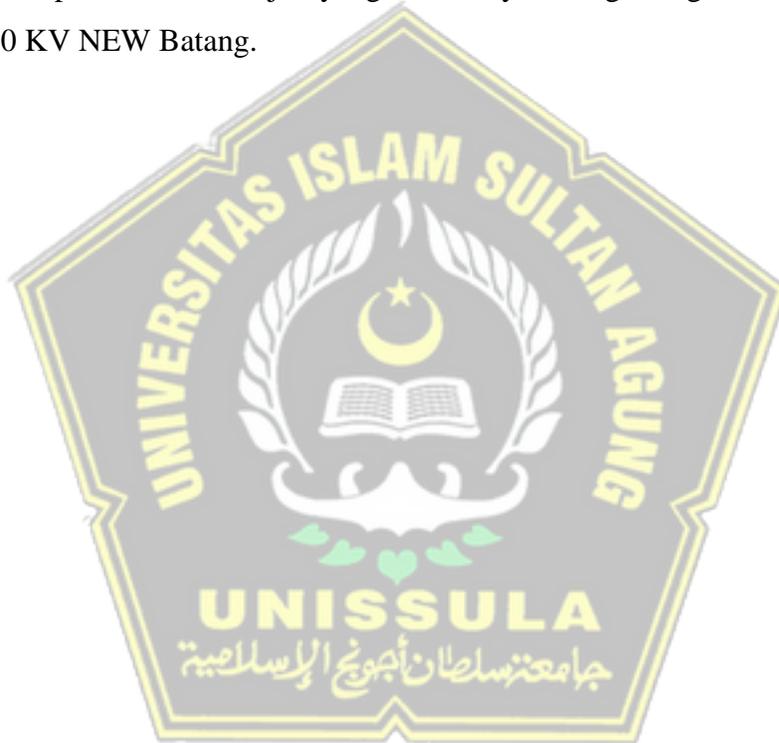
### 3.5 Lokasi dan Objek Penelitian

#### 1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dilokasi yang di Gardu Induk 150 KV NEW Batang yang terletak di Ds. Kenconorejo, Kec. Tulis, Kab. Batang.

#### 2. Objek Penelitian

Pada penelitian ini objek yang di teliti yaitu Lightning Aresster pada Gardu Induk 150 KV NEW Batang.



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Mencari tegangan tertinggi system

Tegangan system adalah tegangan maksimum yang dapat terjadi akibat gangguan. Tegangan sistem maksimum kawat tanah biasanya di ambil harga 110 persen dari tegangan jala-jala. Jadi untuk mencari tegangan tertinggi system dapat digunakan persamaan 2.2 sebagai berikut:

Diketahui :

$$V_n = 150 \text{ kV}$$

$$\text{Tegangan sistem maksimum kawat tanah} = 110\% = 1,1$$

Ditanya  $V_m = \dots?$

$$V_m = 1,1 \times V_n$$

$$V_m = 1,1 \times 150 \text{ KV}$$

$$= 165 \text{ KV}$$

### 4.2. Mencari rating pengenal arrester

Untuk mencari rating pengenal arrester ini menggunakan system yang diketanahkan langsung dengan koefisien pentanahan 0,8 sehingga di sebut system pentanahan 80%. Jadi dapat di cari dengan persamaan 2.4:

Diketahui :

$$V_m = 165 \text{ kV}$$

$$\text{Koefisien Pentanahan} = 80\% (0,8)$$

Ditanya  $U_r = \dots?$

$$U_r = V_m \times \text{Koefisien pentanahan} (0,8)$$

$$165 \times 0,8 = 132 \text{ kV}$$

### 4.3. Perhitungan kecepatan gelombang berjalan

Kecepatan gelombang berjalan atau kecepatan rambat gelombang dapat ditentukan dengan persamaan 2.5:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{18 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) 10^{11}}{2 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) 10^{-9}} = 3 \times 10^{10} \text{ cm/detik} = 300 \text{ m}/\mu\text{detik}$$

Kecepatan rambat gelombang dalam kabel  $300 \text{ m}/\mu\text{detik} \times \frac{1}{2} = 150 \text{ m}/\mu\text{detik}$

### 4.4. Perhitungan impedansi surja

Berdasarkan hasil koordinasi dengan pihak gardu induk 150 KV new Batang diketahui penghantar yang di gunakan adalah jenis ASCR ukuran 435/55. Dengan diameter 28.80 mm dan tinggi rata rata penghantar adalah 17,5 m. dari data diatas dapat ditentukan untuk mencari nilai r adalah:

Diketahui :

$$D = 28,80 \text{ mm}$$

$$h = 17,5 \text{ m}$$

Ditanya  $r = \dots?$

$$r = \frac{D}{2} = \frac{28,80}{2} = 14,40 \text{ mm} = 0,0144 \text{ m}$$

Setelah nilai  $r$  dan  $h$  diketahui, selanjutnya mencari impedansi surja menggunakan persamaan berikut :

$$Z_1 = 60 \ln \frac{2h}{r}$$

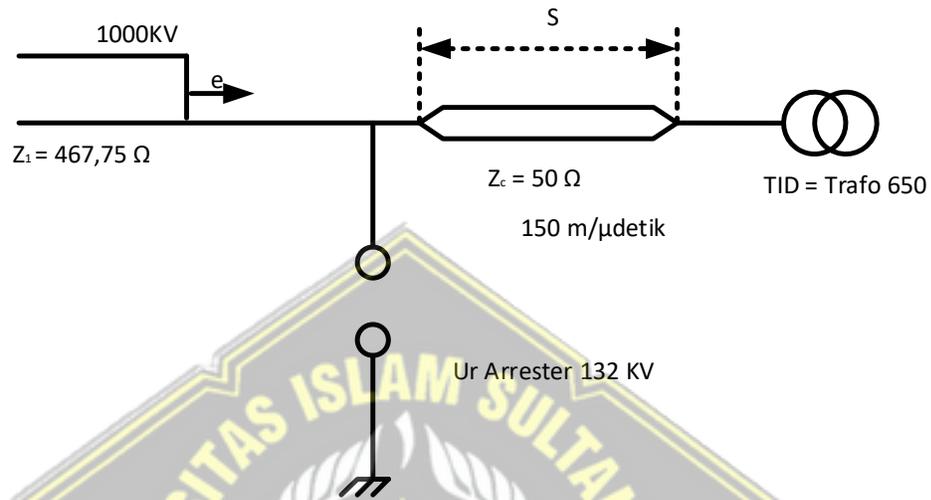
$$Z_1 = 60 \ln \left( \frac{2 \times 17,5}{0,0144} \right)$$

$$Z_1 = 60 \ln 2.361,11$$

$$Z_1 = 467,75 \Omega$$

Maka impedansi untuk kabel adalah  $Z_1 = 50 \Omega$

#### 4.5. Perhitungan jarak maksimum proteksi arrester pada transformator menggunakan metode pantulan berulang



Gambar 4. 1 Transformator dan lightning arrester terpisah jarak S

Dari gambar 4.1. diketahui tegangan sistem di Gardu Induk 150 kV NEW Batang adalah sebagai berikut, tegangan transmisi 150 kV dengan BIL trafo 650 kV . Trafo dilindungi oleh arester dengan tegangan percik ( $Ea$ ) 334 kV dengan jarak pemasangan lightning arrester terhadap transformator adalah 4 meter, surja datang menuju peralatan yang dilindungi arrester dengan kecepatan  $v = 150\mu\text{detik}$ , maka untuk mencari jarak maksimum pemasangan arrester dengan transformator dapat menggunakan persamaan 2.22?

Disini untuk mencari jarak maksimum ( $s$ ), maka kita samakan nilai tegangan pada jepitan trafo ( $EP$ ) dengan nilai  $BIL$  trafo sebesar 650 kV.

Diketahui:

$$Ea = 334 \text{ KV}$$

$$A = 1000 \frac{dv}{dt}$$

$$EP = 650 \text{ KV}$$

$$v = 150 \text{ m}/\mu\text{detik}$$

Dengan kecuraman gelombang datang yaitu 1000 dv/dt maka bisa diketahui jarak sebagai berikut

$$EP = Ea + 2 \frac{A \times s}{v}$$

$$650 = 334 + 2 \frac{1000 \times s}{150}$$

$$316 = \frac{1000 \times s}{75}$$

$$s = \frac{23700}{1000}$$

$$s = 23,7 \text{ m}$$

#### 4.6. Perhitungan tegangan percik arrester

Untuk mengetahui waktu percik arrester, Operator pantulan dan terusan harus ditentukan terlebih dahulu untuk mencapai tegangan percik lightning arrester. Gelombang surya petir yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. menggambarkan surja petir yang datang dari sebelah kiri. Setelah gelombang mencapai lokasi pemasangan lightning arrester, sebagian dari gelombang tersebut akan dipantulkan kembali, sementara sebagian lainnya akan diteruskan. Proporsi pantulan dan transmisi gelombang ini dapat ditentukan dengan menggunakan rumus 2.7.

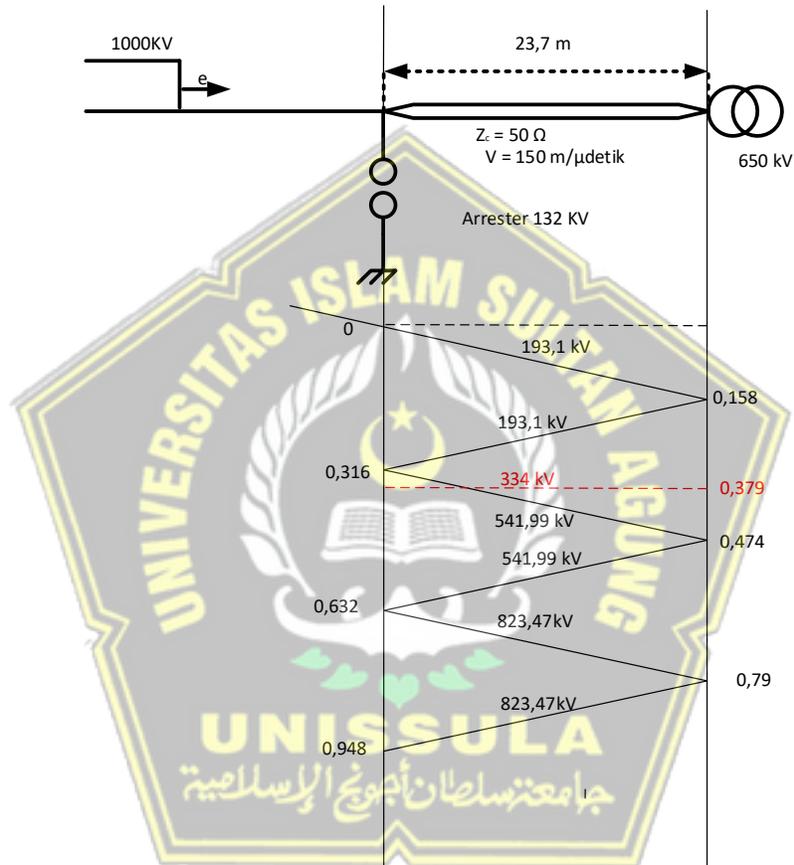
$$a = \frac{Z_c - Z_1}{Z_c + Z_1} = \frac{50 - 467,75}{50 + 467,75} = -0,8068$$

$$b = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} = \frac{467,75 - 50}{467,75 + 50} = 0,8068$$

$$a' = \frac{2Z_c}{Z_c + Z_1} = \frac{2 \times 50}{467,75 + 50} = 0,1931$$

$$b' = \frac{2Z_1}{Z_c + Z_1} = \frac{2 \times 467,75}{467,75 + 50} = 1,8068$$

#### 4.6.1 Perhitungan tegangan percik arrester dengan jarak 23,7 meter



Gambar 4. 2 analisis diagram tangga dengan jarak 23,7 m

Gambar 4.2. diagram tangga untuk jarak 23,7 m. Untuk mengetahui waktu percik arrester dengan jarak 23,7 m. maka harus menentukan waktu kecuraman gelombang memasuki gardu induk atau transformator, dan didapatkan nilai:

Diketahui :

$$t = \frac{23,7}{150} = 0,158 \mu\text{detik}$$

$$A = 1000kV$$

$$a = A \times a' = 1000 \times 0,1931 = 193,1$$

Selanjutnya untuk mengetahui nilai tegangan pada titik sambungan kabel di mulai pada  $t = 0$ , dan nilai tegangan selanjutnya adalah nilai dari tegangan sebelumnya dengan faktor redaman. Kemudian untuk operator pantulan nilainya sama dengan gelombang datang. Maka untuk mencari nilai tegangan di setiap  $0,158 \mu\text{detik}$  dapat di tentukan menggunakan persamaan 2.8.

$$t = 0 \mu\text{detik}: e_0 = 0$$

$$\begin{aligned} t = 0,158 \mu\text{detik}: e_{0,158} &= e_0 \text{ arrester} + (A \times a') \\ &= 0 + (1000 kV \times 0,1931 kV) \\ &= 193,1 kV \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t = 0,316 \mu\text{detik}: e_{0,316} &= e_{0,158} \text{ arrester} \times 1 \\ &= 193,1 \times 1 \\ &= 193,1 kV \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t = 0,474 \mu\text{detik}: e_{0,474} &= e_{0,316} \text{ arrester} + e_{0,158} \text{ arrester} + (e_{0,316} \times b) \\ &= 193,1 kV + 193,1 kV + (193,1 kV \times 0,8068) \\ &= 541,99 kV \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t = 0,632 \mu\text{detik}: e_{0,632} &= e_{0,474} \text{ arrester} \times 1 \\ &= 541,99 \times 1 \\ &= 541,99 kV \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t = 0,79 \mu\text{detik}: e_{0,79} &= e_{0,632} \text{ arrester} + (e_{0,474} \text{ arrester} \times b) \\ &\quad + (e_{0,316} \text{ arrester} \times b \times b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 541,99 \text{ kV} + (193,1 \text{ kV} \times 0,8068) \\
 &+(193,1 \text{ kV} \times 0,8068 \times 0,8068) \\
 &= 541,99 \text{ kV} + 155,79 \text{ kV} + (155,79 \text{ kV} \times 0,8068) \\
 &= 541,99 \text{ kV} + 155,79 \text{ kV} + 125,69 \text{ kV} \\
 &= 823,47 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

$$t = 0,948 \mu\text{detik}: e_{0,948} = e_{0,79} \text{arrester} \times 1$$

$$= 823,47 \text{ kV} \times 1$$

$$= 823,47 \text{ kV}$$

Tabel 4. 1 Hasil perhitungan kecuraman gelombang surja petir dengan jarak 23,7 m

NO	Waktu $\mu\text{detik}$	Kecuraman Gelombang (kV)
1	0	0
2	0,158	193,1
3	0,316	193,1
4	0,474	541,99
5	0,632	541,99
6	0,79	823,47
7	0,948	823,47



Gambar 4. 3 Grafik kecuraman gelombang surja petir dengan jarak 23,7 m

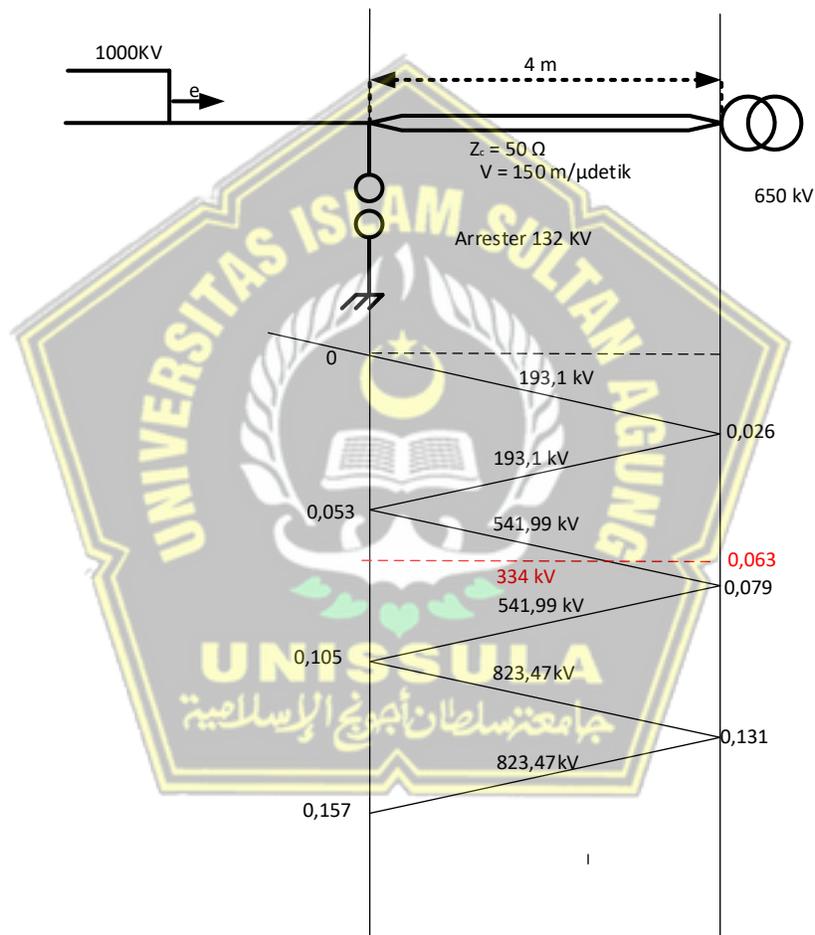
Berdasarkan gambar 4.3 kecuraman gelombang terus meningkat berbanding lurus dengan bertambahnya waktu. kemudian arrester akan memercik pada saat tegangan mencapai 334 kV. Untuk mencari waktu percik lightning arrester  $t_{so}$  pada lokasi pemasangan arrester dengan jarak 23,7 m dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.23:

Diketahui tegangan percik arrester adalah 334 kV, berdasarkan hasil dari gambar 4.3 waktu percik arrester antara  $t = 0,316\mu\text{detik}$  dan  $t = 0,474\mu\text{detik}$

$$\begin{aligned}
 t_{so} &= \frac{(0,474 - 0,316)(334 - 193,1)}{541,99 - 193,1} + 0,316 \\
 &= \frac{0,158 \times 140,9}{448,89} + 0,316 \\
 &= 0,379 \mu\text{detik}
 \end{aligned}$$

Jadi pada jarak 23,7 meter surja datang dengan kecuraman 1000 dv/dt dengan kecepatan gelombang merambat pada kabel adalah  $150 \text{ m}/\mu\text{detik}$  arrester memercik pada  $0,379 \mu\text{detik}$ .

#### 4.6.2 Perhitungan tegangan percik arrester dengan jarak 4 meter



Gambar 4. 4 analisis diagram tangga dengan jarak 4 m.

Untuk mengetahui waktu percik arrester dengan jarak 4 m. maka harus menentukan waktu kecuraman gelombang memasuki gardu induk atau transformator, dan didapatkan nilai:

$$t = \frac{4}{150} = 0,026 \mu\text{detik}$$

$$A = 1000KV$$

$$a = A \times a' = 1000 \times 0,1931 = 193,1$$

Selanjutnya untuk mengetahui nilai tegangan pada titik sambungan kabel di mulai pada  $t = 0$ , dan nilai tegangan selanjutnya adalah nilai dari tegangan sebelumnya dengan faktor redaman. Kemudian untuk operator pantulan nilainya sama dengan gelombang datang. Maka untuk mencari nilai tegangan di setiap  $0,026 \mu\text{detik}$  dapat di tentukan menggunakan persamaan 2.8.

$$t = 0\mu\text{detik:} \quad e_0 = 0$$

$$\begin{aligned} t = 0,026 \mu\text{detik:} \quad e_{0,026} &= e_0 \text{ arrester} + (A \times a') \\ &= 0 + (1000 \text{ kV} \times 0,1931 \text{ kV}) \\ &= 193,1 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t = 0,053\mu\text{detik:} \quad e_{0,053} &= e_{0,026} \text{ arrester} \times 1 \\ &= 193,1 \times 1 \\ &= 193,1 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t = 0,079\mu\text{detik:} \quad e_{0,079} &= e_{0,053} \text{ arrester} + e_{0,026} \text{ arrester} + (e_{0,053} \times b) \\ &= 193,1 \text{ kV} + 193,1 \text{ kV} + (193,1 \text{ kV} \times 0,8068) \\ &= 541,99 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t = 0,105\mu\text{detik:} \quad e_{0,105} &= e_{0,079} \text{ arrester} \times 1 \\ &= 541,99 \times 1 \\ &= 541,99 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t = 0,131\mu\text{detik: } e_{0,131} &= e_{0,105} \text{ arrester} + (e_{0,079} \text{ arrester} \times b) \\
 &+ (e_4 \text{ arrester} \times b \times b) \\
 &= 541,99 \text{ kV} + (193,1 \text{ kV} \times 0,8068) \\
 &+ (193,1 \text{ kV} \times 0,8068 \times 0,8068) \\
 &= 541,99 \text{ kV} + 155,79 \text{ kV} + (155,79 \text{ kV} \times 0,8068) \\
 &= 541,99 \text{ kV} + 155,79 \text{ kV} + 125,69 \text{ kV} \\
 &= 823,47 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t = 0,157\mu\text{detik: } e_{0,157} &= e_{0,131} \text{ arrester} \times 1 \\
 &= 823,47 \text{ kV} \times 1 \\
 &= 823,47 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 2 Hasil perhitungan kecuraman gelombang surja petir dengan jarak 4 m

NO	Waktu $\mu$ detik	Kecuraman Gelombang (kV)
1	0	0
2	0,026	193,1
3	0,053	193,1
4	0,079	541,99
5	0,105	541,99
6	0,131	823,47
7	0,157	823,47



Gambar 4. 5 Grafik kecuraman gelombang surja petir dengan jarak 4 m.

Berdasarkan gambar 4.5 kecuraman gelombang terus meningkat berbanding lurus dengan bertambahnya waktu. kemudian arrester akan memercik pada saat tegangan mencapai 334 kV. Untuk mencari waktu percik lightning arrester  $t_{so}$  pada lokasi pemasangan arrester dengan jarak 4 m dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.23.

Diketahui tegangan percik arrester adalah 334 kV, berdasarkan hasil dari gambar 4.5 waktu percik arrester antara  $t = 0,053 \mu\text{detik}$  dan  $t = 0,079 \mu\text{detik}$

$$\begin{aligned}
 t_{so} &= \frac{(0,079 - 0,053)(334 - 193,1)}{541,99 - 193,1} + 0,053 \\
 &= \frac{0,026 \times 140,9}{448,89} + 0,053 \\
 &= 0,063 \mu\text{detik}
 \end{aligned}$$

Jadi pada jarak 4 meter surja datang dengan kecuraman 1000 dv/dt dengan kecepatan gelombang merambat pada kabel adalah 150 m/ $\mu\text{detik}$  arrester memercik pada 0,063  $\mu\text{detik}$ .

#### 4.7. Perhitungan naik tegangan pada transformator

##### 4.7.1 Perhitungan naik tegangan pada transformator dengan jarak 23,7 meter

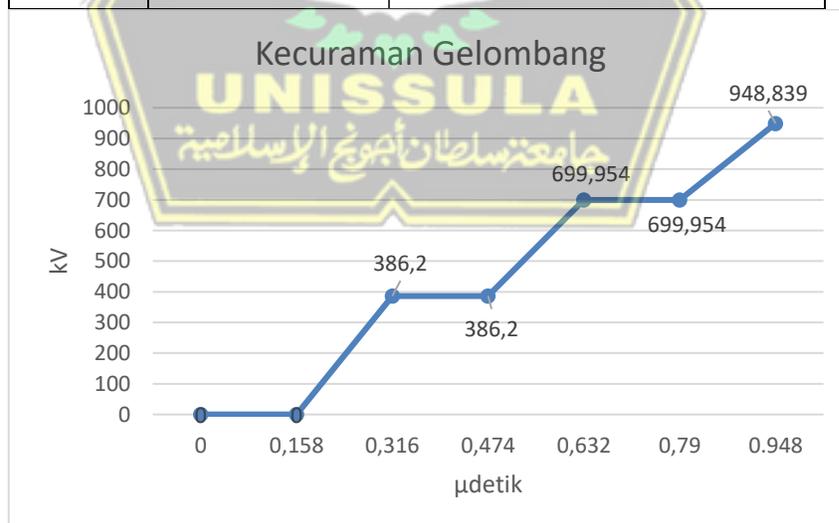
Diketahui waktu percik arrester  $t_{s0} = 0,158 \mu\text{detik}$  dengan tegangan percik 334 kV dan jarak 23,7 m. misal arrester belum terpasang maka naik tegangan pada transformator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.14.

$$\begin{aligned}
 t = 0 \mu\text{detik} & \quad e_0 = 0 \\
 t = 0,158 \mu\text{detik} & \quad e_{0,158} = 0 \\
 t = 0,316 \mu\text{detik} & \quad e_{0,316} = e_{0,158} \text{arrester} + (2 \times A \times a') \\
 & \quad = 0 + (2 \times 1000 \text{ kV} \times 0,1931 \text{ kV}) \\
 & \quad = 386,2 \text{ kV} \\
 t = 0,474 \mu\text{detik} & \quad e_{0,474} = e_{0,316} \text{arrester} \times 1 \\
 & \quad = 386,2 \times 1 \\
 & \quad = 386,2 \text{ kV} \\
 t = 0,632 \mu\text{detik} & \quad e_{0,632} = e_{0,316} \text{arrester} \times (1 + b) \\
 & \quad = 386,2 \text{ kV} \times (1 + 0,8068) \\
 & \quad = 387,4 \text{ kV} \times 1,8068 \text{ kV} \\
 & \quad = 699,954 \text{ kV} \\
 t = 0,79 \mu\text{detik} & \quad e_{0,79} = e_{0,632} \text{arrester} \times 1 \\
 & \quad = 699,954 \text{ kV} \times 1 \\
 & \quad = 699,954 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t = 0,948 \mu\text{detik} \quad e_{0,948} &= e_{0,474} \text{arrester} \times (1 + b(b)^2) \\
 &= 386,2 \times (1 + 0,8068 + (0,8068)^2) \\
 &= 386,2 \times 2,457 \\
 &= 948,893 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 3 Hasil perhitungan naik tegangan pada transformator dengan jarak 23,7 m.

NO	Waktu $\mu\text{detik}$	Kecuraman Gelombang (kV)
1	0	0
2	0,158	0
3	0,316	386,2
4	0,474	386,2
5	0,632	699,954
6	0,79	699,954
7	0.948	948,839



Gambar 4. 6 Grafik Perhitungan Naik Tegangan Pada Trafo dengan jarak 23,7 m.

Dari gambar 4.6 tegangan akan semakin meningkat seiring waktu. tetapi Ketika arrester terpasang maka pada deitik ke  $0,365 \mu\text{detik}$  arrester memercik, dan untuk menentukan tegangan yang sampai pada transformator dapat menggunakan persamaan 2.22 :

$$EP = Ea + 2 \frac{A \times S}{v}$$

$$EP = 334 + 2 \frac{1000 \times 23,7}{150}$$

$$EP = 650 \text{ kV}$$

Dari hasil perhitungan di atas tegangan pada transformator ketika arrester memercik adalah 650 kV. Nilai tersebut sama dengan BIL dari transformator yaitu 650 kV dan transformator dalam batas maksimum, untuk itu maka saat memasang arrester sebaiknya sedekat mungkin dengan transformator sehingga dapat terlindungi dengan baik.

#### 4.7.2 Perhitungan naik tegangan pada transformator dengan jarak 4 meter

Diketahui waktu percik arrester  $t_{s0} = 0,061 \mu\text{detik}$  dengan tegangan percik 334 kV dan jarak 4 m. misal arrester belum terpasang maka naik tegangan pada transformator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.14.

$$t = 0 \mu\text{detik} \quad e_0 = 0$$

$$t = 0,026 \mu\text{detik} \quad e_{0,026} = 0$$

$$t = 0,053 \mu\text{detik} \quad e_{0,053} = e_{0,026} \text{arrester} + (2 \times A \times a')$$

$$= 0 + (2 \times 1000 \text{ kV} \times 0,1931 \text{ kV})$$

$$= 386,2 \text{ kV}$$

$$t = 0,079 \text{ } \mu\text{detik} \quad e_{0,079} = e_{0,053} \text{ arrester} \times 1$$

$$= 386,2 \times 1$$

$$= 386,2 \text{ kV}$$

$$t = 0,105 \text{ } \mu\text{detik} \quad e_{0,105} = e_{0,079} \text{ arrester} \times (1 + b)$$

$$= 386,2 \text{ kV} \times (1 + 0,8068)$$

$$= 387,4 \text{ kV} \times 1,8068 \text{ kV}$$

$$= 699,954 \text{ kV}$$

$$t = 0,131 \text{ } \mu\text{detik} \quad e_{0,131} = e_{0,105} \text{ arrester} \times 1$$

$$= 699,954 \text{ kV} \times 1$$

$$= 699,954 \text{ kV}$$

$$t = 0,157 \text{ } \mu\text{detik} \quad e_{0,157} = e_{0,079} \text{ arrester} \times (1 + b(b)^2)$$

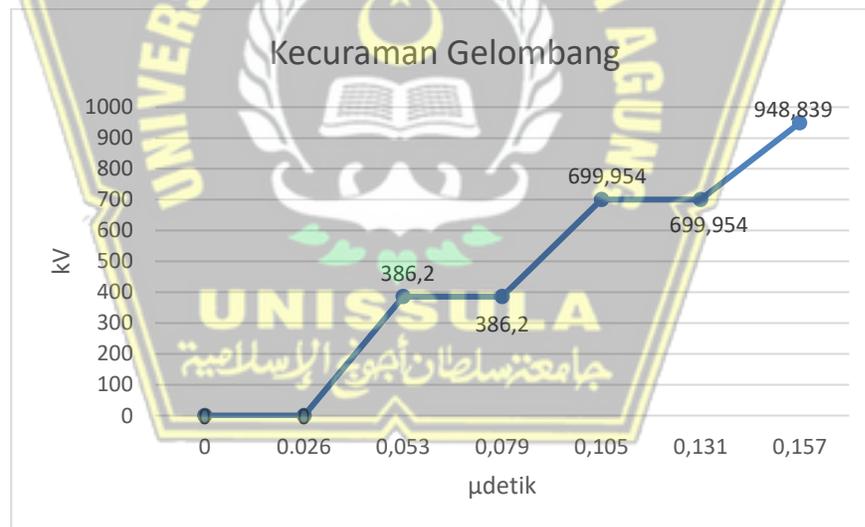
$$= 386,2 \times (1 + 0,8068 + (0,8068)^2)$$

$$= 386,2 \times 2,457$$

$$= 948,893 \text{ kV}$$

Tabel 4. 4 Hasil perhitungan naik tegangan pada transformator dengan jarak 4 m.

NO	Waktu $\mu$ detik	Kecuraman Gelombang (kV)
1	0	0
2	0,026	0
3	0,053	386,2
4	0,079	386,2
5	0,105	699,954
6	0,131	699,954
7	0,157	948,839



Gambar 4. 7 Grafik Perhitungan Naik Tegangan Pada Trafo dengan jarak 4 m.

Berdasarkan gambar 4.7 tegangan yang timbul akan terus naik, tetapi ketika arrester sudah terpasang sebelum sampai pada  $t = 0,105 \mu$ detik lightning arrester

terlebih dahulu memercik atau sparkover pada  $t = 0,61 \mu\text{detik}$  dan untuk menentukan tegangan pada transformator dapat menggunakan persamaan 2.14 :

$$EP = Ea + 2 \frac{A \times S}{v}$$

$$EP = 334 + 2 \frac{1000 \times 4}{150}$$

$$EP = 387,33 \text{ kV}$$

Dari hasil perhitungan di atas naik tegangan pada transformator ketika arrester memercik adalah 387,33 kV. Berdasarkan data spesifikasi transformator merek SIEMENS nilai tersebut sebesar 59,6% dari Nilai BIL dari transformator yaitu 650 kV. Dengan demikian transformator masih aman dalam perlindungan arrester.

Dari hasil perhitungan di atas jarak pemasangan arrester terhadap ketinggian arrester dapat mempengaruhi efektivitas perlindungan yang diberikan oleh arrester terhadap Transformator. Jika arrester dipasang pada jarak yang lebih jauh dari Transformator, terutama jika tingginya juga signifikan, ada kemungkinan peningkatan tegangan sisa (*residual voltage*) pada peralatan yang dilindungi. Hal ini karena tegangan perlindungan arrester dapat meningkat dengan jarak, membuat peralatan lebih rentan terhadap kerusakan akibat lonjakan tegangan.

Kemudian juga untuk Induktansi kabel penghubung antara arrester dan transformator akan menambah tegangan tambahan selama transien petir. Semakin tinggi arrester dipasang (atau semakin panjang kabel penghubung), semakin besar induktansi, yang dapat mengurangi efektivitas arrester. Oleh karena itu, disarankan agar kabel penghubung dibuat sesingkat mungkin.

Jika arrester dipasang dengan jarak yang jauh atau jarak maksimum yaitu 23,7 m dari Transformator, waktu respons untuk mengatasi lonjakan tegangan bisa menjadi lebih lambat dengan waktu respon  $0,379 \mu\text{detik}$ , sehingga mengakibatkan tegangan

pada jepitan transformator (*EP*) menjadi tinggi dan apabila sampai melebihi dari nilai *BIL* yaitu 650 *kV* hal itu dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan sebelum lonjakan tegangan bisa di redam sepenuhnya. Ketinggian arrester juga mempengaruhi efektivitas sistem pembumian. Jika arrester dipasang lebih tinggi, maka potensi lebih besar untuk lonjakan tegangan ke tanah melalui jalur yang kurang efektif, yang bisa mengurangi kinerja arrester. Untuk jarak ideal pemasangan arrester adalah sedekat mungkin dengan peralatan yang di harapkan agar arrester dapat memercik secepat mungkin dan tegangan pada jepitan transformator (*EP*) tidak melebihi dari *BIL* transformator.



## BAB V PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat di buat kesimpulan sebagai berikut:

1. Jarak pemasangan lightning arrester di Gardu Induk 150 kV New Batang adalah 4 meter, dari hasil perhitungna kenaikan tegangan pada transformator Ketika arrester memercik untuk jarak 4 meter adalah 387,33 kV. Nilai tersebut sebesar 59,6% dari Nilai BIL dari tranformator yaitu 650 kV. Dengan demikian transformator masih aman dalam perlindungan arrester.
2. Dari hasil perhitungan yang di dapat jarak maksimum pemasangan lightning arrester di Gardu Induk 150 kV New Batang adalah 23,7 meter. Kenaikan tegangan pada transformator Ketika arrester memercik pada  $t_{s0} = 0,365 \mu\text{detik}$  adalah 650 kV. Nilai tersebut adalah sama dengan BIL dari transformator yaitu 650 kV transformator berada dalam batas maksimum.
3. Jarak pemasangan lightning arrester harus sedekat mungkin dengan transformator. Hal ini dikarenakan jarak ( $s$ ) berpengaruh terhadap nilai dari kenaikan tegangan pada transformator ( $E_p$ ). Semakin jauh jarak ( $s$ ) maka akan semakin besar nilai dari kenaikan tegangan pada transformator ( $E_p$ ).
4. Jarak pemasangan lightning arrester ( $s$ ) mempengaruhi waktu respon atau waktu percik lightning arrester, semakin jauh Jarak pemasangan lightning arrester ( $s$ ) maka waktu percik lightning arrester semakin lama dan sebaliknya, hal ini dapat di lihat dari hasil perhitungan untuk jarak ( $s$ ) = 4 m maka waktu respon atau waktu percik adalah  $0,063 \mu\text{detik}$  dan untuk jarak  $23,7 \mu\text{detik}$  waktu responnya  $0,379 \mu\text{detik}$ . Semakin cepat respon arrester maka tingkat perlindungan terhadap transformator akan semakin baik.

## 5.2. SARAN

1. Penelitian dapat dilakukan dengan menggunakan metode perhitungan dan tempat yang berbeda.
2. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan objek transformator dengan kapasitas yang berbeda.



## DAFTAR PUSAKA

- [1] M. H. Ulawia, "Evaluasi Pengaruh Lokasi Pemasangan Surja Arrester Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (Sutt) 150 Kv Terhadap Tegangan Lebih Switching," Pp. 1–127, 2015.
- [2] M. . Paraisu, F. Lisi, L. . Patras, And S. Silimang, "Analisa Rating Lightning Arrester Pada Jaringan Transmisi 70 Kv Tomohon-Teling," *Anal. Rat. Light. Arrester Pada Jar. Transm. 70 Kv Tomohon-Teling*, P. 9, 2013.
- [3] S. H. Ibnu Salam, "Baterai-Charger Pada Gardu Induk 150 Kv Sronдол," Vol. 8719, No. 2006, Pp. 1–9, 2010.
- [4] Saiful Ambri, "Analisis Arrester Pada Jaringan Distribusi 20 Kv Di Pt. Pln Rayon Soppeng," P. 78, 2018.
- [5] J. Manihuruk, T. Simorangkir, And N. L. Sitanggang, "Studi Kemampuan Arrester Untuk Pengaman Transformator Pada Gardu Induk Tanjung Morawa 150 Kv," *J. Elpotecs*, Vol. 4, No. 1, Pp. 16–25, 2021, Doi: 10.51622/Elpotecs.V4i1.447.
- [6] G. Induk, K. V Bumi, And S. Baru, "Transmisi Yang Masuk Ke Trafo Daya I 20 Mva Di Dengan Metode Diagram Tangga Final Project Over Voltage Analysis Of Lightning Surge From Incoming Transmission To Bumi Semarang Baru 150 Kvsustasion With Lattice Diagram Methods," 2022.
- [7] O. A. M. A. H Kara, "Pengaruh Pembelajaran Berbasis Gamifikasi Dengan Menggunakan Classdojo Terhadap Motivasi Dan Hasil Belajar Siswa Kelas Vii Smp Diponegoro Depok Pada Pokok Bahasan Garis Dan Sudut Tahun Ajaran 2020/2021 Skripsi," *Pap. Knowl. . Towar. A Media Hist. Doc.*, Vol. 7, No. 2, Pp. 107–15, 2014.
- [8] R. Labado And P. Eko Pambudi, "Analisis Penempatan Arrester Terhadap

- Efektifitas Proteksi Transformator Pada Pt. Pln (Persero) P3b Jawa-Bali App Salatiga Gardu Induk 150 Kv Bantul,” *J. Elektr.*, Vol. 2, No. 2, Pp. 79–87, 2015.
- [9] Ir.T.S. Hutauruk. Mee., “Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja,” *Gelombang Berjalan Dan Prot. Surja*, P. 198, 1988.
- [10] N. Hidayatulloh, “Tranformator Pada Gardu Induk Sronдол 150 Kv,” 2009.
- [11] Ependi, S. Hani, And I. Prastyono Eko Pambudi, “Evaluasi Sistem Penempatan Lightning Arester Pada Transformator Gardu Induk 150 Kv Pedan,” *J. Elektr.*, Vol. 5, No. 2, Pp. 47–53, 2018.
- [12] T. Barlian, Y. Apriani, N. Savitri, And M. Hurairah, “Analisis Kapasitor Bank Untuk Memperbaiki Tegangan,” *J. Surya Energy*, Vol. 4, No. 2, Pp. 391–396, 2020, Doi: 10.32502/Jse.V4i2.2562.
- [13] Swasti Maharani & Edy Suprpto, *Analisis Numerik Berbasis Group Investigation Untuk Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kritis*, Vol. 48, No. 3. 2018.
- [14] R. Nasution And A. Yusmartato, “Analisa Penempatan Lightning Arester Sebagai Pengaman Gangguan Petir Di Gardu Induk Langsa,” *Cetak) Bul. Utama Tek.*, Vol. 14, No. 3, Pp. 1410–4520, 2019.
- [15] D. P. Yudha Prawira, I. G. Dyana Arjana, And C. G. Indra Partha, “Analisa Lightning Arrester Akibat Uprating Transformator 150/20 Kv Dari 30 Mva Ke 60 Mva Di Gardu Induk Sanur,” *J. Spektrum*, Vol. 5, No. 2, P. 207, 2018, Doi: 10.24843/Spektrum.2018.V05.I02.P26.
- [16] D. Of, A. Performance, And O. N. Medium, “Penentuan Kinerja Arrester Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 Kv Akibat Stray Capacitance Dengan Program Pascasarjana,” 2012.