

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Landasan Teori**

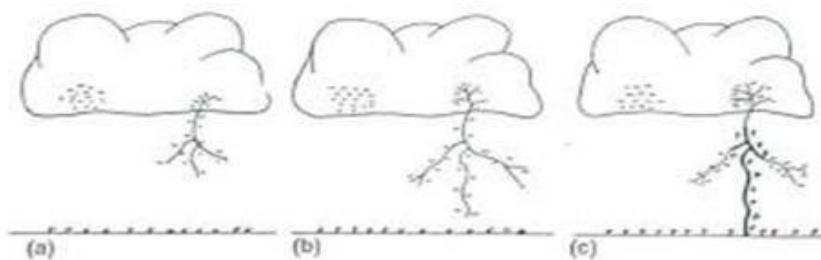
##### **2.1.1 Proses Terjadinya Petir**

Pada keadaan tertentu dalam atmosfer bumi terdapat gerakan angina ke atas membawa udara lembab makin tinggi permukaan bumi makin rendah tekanan dan suhunya. Uap air akan menjadi titik air dan membentuk awan, di dalam awan tersebut ada kalanya masih terjadi gerakan udara ke atas ( up draft ) dengan kecepatan tinggi mencapai 120 Km/jam. Gerak udara ke atas membawa butir-butir air akan membeku dan mengakibatkan timbulnya gerakan udara kebawah ( down draft ) pada bagian awan tadi, jika mempunyai kecepatan yang tinggi. Jadi ada gerakan partikel-partikel air di dalam awan tadi. Muatan listrik akan terkonsentrasi di dalam awan atau bagian dari awan dan muatan listrik yang berlawanan akan timbul pada permukaan tanah (bumi) di bawahnya, dengan demikian terbentuklah medan listrik antara awan dan permukaan bumi. Medan listrik akan membantu terbentuknya lidah-lidah muatan dari awan dari kanal-kanal muatan ( banjiran muatan ).

Jika muatan listrik pada awan bertambah, maka beda potensial antara awan dengan tanah ( bumi ) akan bertambah. Jika medan listrik tersebut melebihi kekuatan medan tembus udara, maka akan terjadi pelepasan muatan ( discharge ) dan terjadilah aliran dari awan ke tanah yang disebut kilat atau petir. Lidah kilat ( leader ) dari suatu kilat didahului oleh lidah petir pengemudi ( pilot leader ) yang menentukan arah rambatan muatan dari awan ke udara yang ionisasi rendah. Pilot leader yang membawa muatan akan mengawali aliran ketanah sehingga saluran yang dibuat oleh pilot leader ini menjadi bermuatan dan

kuat medan dari ujung leader ini sangat tinggi. Selama pusat muatan di awan mampu memberikan muatannya pada ujung leader.

Untuk mempertahankan kuat medan pada ujung leader lebih besar dari kuat medan listrik udara, maka leader ( petir ) akan terhenti dan pelepasan muatan tidak akan sempurna ( tidak ada tekanan ). Pada saat leader mendekati tanah, kuat medan statis pada permukaan tanah ( bumi ) akan naik cukup tinggi untuk menghasilkan aliran yang berbeda muatan ini di sebut "Striking Point" ( titik pertemuan ). Jika muatan pada awan telah dilepaskan ke tanah ( bumi ) maka tegangan yang lebih tinggi antara awan dengan pusat muatan yang lainnya pada awan tersebut. Akibatnya akan terulang kembali pelepasan muatan melalui kanal yang terbentuk oleh pelepasan muatan yang berurutan ( multiple lightning stroke ) yang sering terjadi di dalam.



**Gambar 2.1 Proses terjadinya sambaran petir.a) sambaran perintis mulai ; b) sambaran perintis mendekati tanah ; c) sambaran ke atas**

### 2.1.2 Efek Sambaran Petir

Mengingat bahaya yang terjadi maka kita perlu mempelajari bagaimana petir tersebut masuk keperalatan system tenaga listrik. Dengan demikian kita dapat menentukan peralatan pengamannya, peralatan pengaman ini diperlukan mengingat tegangan yang

timbul oleh petir dapat melebihi kekuatan isolasi peralatan yang akan menyebabkan terjadinya flash over ( lompatan bunga api ) atau isolasi mengalami kerusakan.

Sambaran petir dapat dibagi atas 3 bagian, yaitu :

1. Sambaran langsung

Sambaran langsung adalah sambaran yang langsung menyambar gedung atau objek yang diproteksi, misalnya : sambaran pada hantaran udara tegangan rendah; atau sambaran pada pipa metal, kabel dll. Pada jenis sambaran ini instalasi proteksi tegangan lebih akan di aliri oleh seluruh atau sebagian arus petir

2. Sambaran jauh

Sambaran jauh adalah sambaran yang misalnya menyambar hantaran udara atau induksi dari pelepasan muatan petir awan pada hantaran udara atau sambaran dekat dengan hantaran udara sehingga timbul gelombang berjalan ( electromagnetic wave ) yang menuju keperalatan listrik.

3. Sambaran tidak langsung atau induksi

Sambaran tidak langsung adalah peristiwa sambaran yang terjadi didekat sistem tenaga. Biasanya sambaran ini lebih berpengaruh pada saluran tegangan menengah di bandingkan saluran tegangan tinggi. Sambaran petir ini dapat berupa sambaran dari awan ke tanah atau awan ke awan. Bila terjadi sambaran petir ke tanah didekat saluran maka akan terjadi gejala transien pada kawat saluran. Gelombang tegangan petir tersebut akan merambat sampai ke gardu induk.

### 2.1.3 Kawat Tanah

Perlindungan kawat tanah merupakan salah satu cara untuk melindungi saluran dari sambaran petir. Prinsip dari pemakaian kawat tanah adalah diharapkan kawat tanah ini akan menjadi sasaran sambaran petir guna melindungi kawat fasa. Kawat tanah

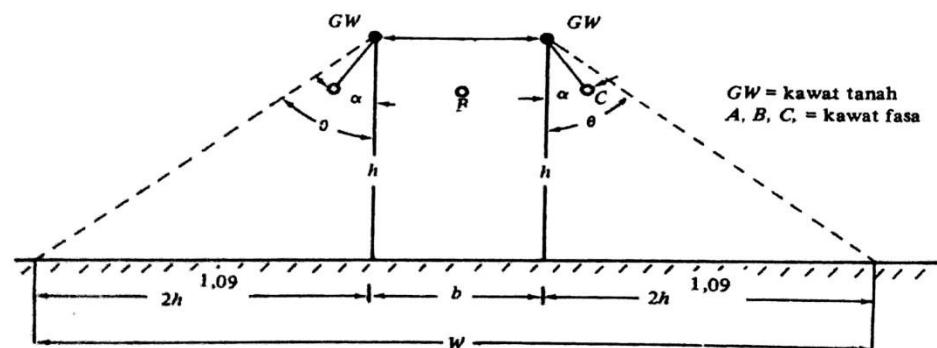
yang digunakan untuk melindungi saluran transmisi di letakkan di ujung teratas saluran transmisi dan terbentang sejajar dengan kawat fasa. Dalam beberapa system saluran transmisi sebuah kawat tanah belum cukup melindungi kawat fasa sepenuhnya dari sambaran langsung. Untuk meningkatkan performa dalam perlindungan terhadap sambaran langsung terkadang lebih dari satu kawat tanah digunakan.

Beberapa hal yang harus diperhatikan pada kawat tanah:

- Dalam pemilihan kawat tanah, kekuatan mekanis lebih di utamakan daripada kekuatan elektrisnya, kawat tanah harus punya ketahanan yang tinggi dan tidak mudah berkarat
- Sudut perlindungan yang baik sebagai proteksi sambaran yaitu sesui standar  $30^\circ$
- Tahanan pentanahan tidak melebihi 10 ohm.

Suatu saluran transmisi di atas tanah dapat dikatakan membentuk bayang-bayang listrik pada tanah yang berada di bawah saluran transmisi itu. Kilat yang biasanya menyambar tanah di dalam bayang-bayang itu akan menyambar saluran transmisi sebagai gantinya, sedang kilat diluar bayang-bayang itu tidak sama sekali menyambar saluran.

Lebar bayang-bayang listrik untuk suatu saluran transmisi telah diberikan oleh *Whitehead* seperti gambar dibawah ini :

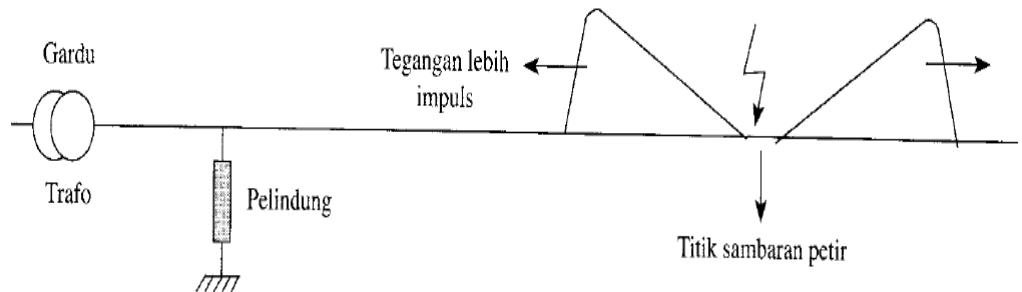


**Gambar 2.2 Lebar Jalur Perisaian Terhadap Sambaran Petir**

#### 2.1.4 Lightning Arrester

*Lightning Arrester* adalah alat pelindung bagi peralatan sistem terhadap surja petir maupun surja hubung. Surja mungkin merambat di dalam konduktor saat peristiwa sebagai berikut:

1. Kegagalan sudut perlindungan petir, sehingga surja petir mengalir di dalam konduktor fasa.
2. Back flashover akibat nilai pentahanan yang tinggi, baik di gardu induk ataupun di saluran transmisi.
3. Proses switching CB/DS (surja hubung).
4. Gangguan fasa-fasa, ataupun fasa tanah baik di saluran transmisi maupun di gardu induk.



**Gambar 2.3 Tegangan lebih akibat sambaran petir**

Pada saat peristiwa surja, *travelling wave* atau gelombang berjalan merambat di penghantar sistem transmisi dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Surja dengan panjang gelombang dalam orde mikro detik ini berbahaya bila nilai tegangan surja yang tiba di peralatan lebih tinggi dari level BIL (*Basic Insulation Level*) peralatan. Untuk itu, LA dipasang untuk memotong tegangan surja dengan cara mengalirkan arus surja ke tanah dalam orde sangat singkat, dimana pengaruh *follow current* tidak ikut serta diketanahkan.

Arrester berlaku sebagai jalan pintas (by-pass) sekitar isolasi. Arrester membentuk jalan yang mudah dilalui oleh arus

kilat atau petir, sehingga tidak timbul tegangan lebih yang tinggi pada peralatan. Jalan pintas harus sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu aliran daya sistem. Jadi pada keadaan normal arrester berlaku sebagai isolator dan bila timbul surja petir berlaku sebagai konduktor, jadi melewatkannya arus yang tinggi. Setelah surja hilang arrester harus dapat dengan cepat kembali menjadi isolator, sehingga pemutus beban tidak sempat membuka dan dapat menghilangkan pengaruh *follow current*.

Arrester harus ditempatkan sedekat mungkin dengan peralatan yang dilindungi dalam hal ini peralatan yang dilindungi adalah transformator. Tujuan agar arrester perlu ditempatkan sedekat mungkin dengan peralatan antara lain adalah :

1. Untuk mengurangi peluang tegangan impuls merambat pada kawat penghubung arrester dengan peralatan yang dilindungi.
2. Saat arrester bekerja, gelombang tegangan impuls sisa merambat pada kawat penghubung transformator dengan arrester. Setelah gelombang tegangan itu tiba pada terminal transformator, gelombang tegangan tersebut akan dipantulkan, sehingga total tegangan pada terminal arrester dua kali tegangan sisa. Peristiwa ini dapat dicegah jika arrester dipasang langsung pada terminal transformator.

#### 2.1.4.1 Teknologi Lightning Arrester

Teknologi LA sudah dikembangkan sejak 100 tahun silam, bersamaan dengan dimulainya penggunaan listrik secara massal. Secara ringkas sejarah perkembangan LA adalah sebagai berikut:

|             |                                               |
|-------------|-----------------------------------------------|
| 1892 – 1908 | : Penggunaan <i>air gaps</i>                  |
| 1908 – 1930 | : <i>Multiple gaps</i> dengan resistor        |
| 1920 – 1930 | : <i>Lead Oxide</i> dengan resistor           |
| 1930 – 1960 | : <i>Passive Gapped Silicon Carbide (SiC)</i> |
| 1960 – 1982 | : <i>Active Gapped Silicon Carbide (SiC)</i>  |

- 1976 – sekarang : *Zinc Oxide* (ZnO) tanpa gap  
 1985 – sekarang : *Zinc Oxide* (ZnO) tanpa gap dengan *housing polymer*

Keping ZnO memiliki karakteristik kerja (kurva V-I) yang jauh lebih baik dibandingkan generasi pendahulunya yang menggunakan SiC-terseri dengan gap. Mayoritas LA di sistem transmisi PLN telah menggunakan teknologi keping ZnO tanpa gap atau dikenal juga sebagai MOSA – *Metal Oxide Surge Arresters*. Di beberapa tempat di Indonesia, MOSA dengan *housing polymer* sudah mulai digunakan.

#### 2.1.4.2 Klasifikasi Lightning Arrester

Berdasarkan letak pemasangannya di Gardu Induk, arrester dikelompokkan menjadi dua, yaitu :

- LA di sisi *incoming* gardu induk
- LA di dekat peralatan transformator



**Gambar 2.4 LA di Gardu Induk dengan *housing porselen* (kiri)  
dan *housing polymer* (kanan)**

Sedangkan apabila ditinjau dari penggunaannya, *lightning arrester* diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu:

a. Jenis gardu.

Dipasang pada sistem 3-312 kV dan dirancang untuk mengalirkan arus petir diatas 100 kA. Digunakan untuk melindungi gardu induk dan transformator daya.

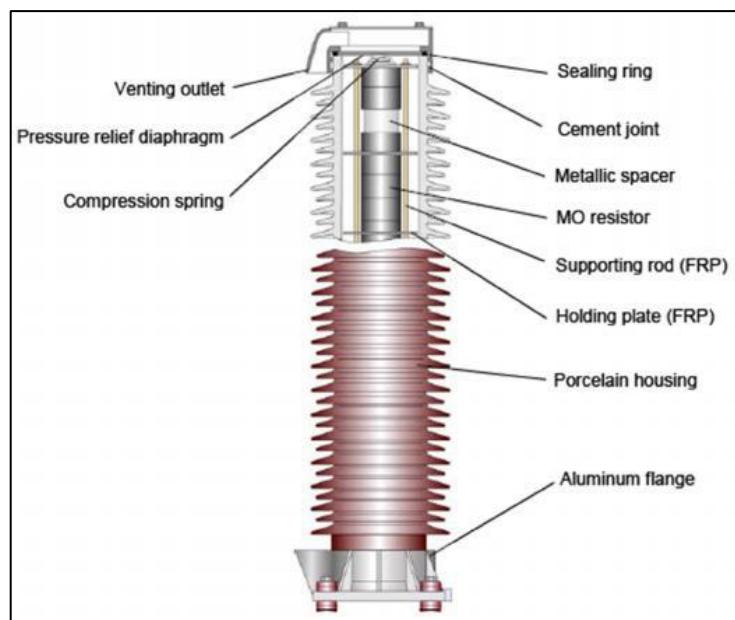
b. Jenis jaringan

Dipasang pada sistem 20-73 kV dan dirancang untuk mengalirkan arus petir 65-100 kA. Digunakan untuk melindungi transformator distribusi, transformator kapasitas rendah dan gardu kecil.

c. Jenis distribusi

Dipasang pada sistem 8-15 kV dan dirancang untuk mengalirkan arus petir dibawah 65 kA. Digunakan untuk melindungi transformator distribusi.

#### 2.1.4.3 Konstruksi Lightning Arrester



**Gambar 2.5 Konstruksi LA**

Arrester memiliki bentuk keping blok, tersusun di dalam *housing* / kompartemen yang terbuat dari porselin atau polymer. Selain sebagai penyangga, *housing* ini juga berfungsi untuk

menginsulasi antara bagian bertegangan dan tanah pada tegangan operasi arrester.

LA juga dilengkapi dengan katup *pressure relief* di kedua ujungnya. Katup ini berfungsi untuk melepas tekanan internal yang berlebih, pada saat LA dilalui arus surja.

### 1) Varistor / Active Part

*Active Part* terdiri kolom varistor Zinc Oxide (ZnO). Keping Zinc Oxide dicetak dalam bentuk silinder yang besaran diameter keping tergantung pada kemampuan absorpsi energi dan nilai discharge arus. Material silinder terbuat dari alumunium. Silinder ini selain memiliki kemampuan mekanis, juga berfungsi sebagai pendingin.

Diameter keping bervariasi dari 30 mm untuk arrester kelas distribusi hingga 100 mm untuk arrester HV/EHV. Setiap keping blok memiliki tinggi bervariasi dari 20 hingga 45 mm.



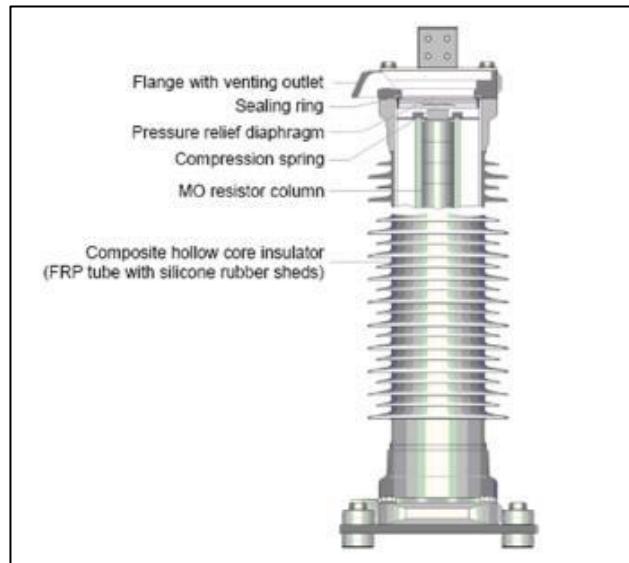
**Gambar 2.6 Keping Blok Varistor Zinc Oxide**

Nilai residual voltage untuk setiap ZnO pada saat dilewati arus surja tergantung pada diameter keping tersebut. Sebagai contoh pada keping dengan diameter 32 mm, nilai *residual voltage*nya sebesar 450 V/mm, sementara untuk diameter 70 mm nilai *residual voltage*nya sebesar menurun menjadi 280 V/mm. Hal ini berarti, pada satu keping ZnO dengan diameter 70 mm dan

tinggi 45 mm terdapat kemampuan residual voltage sebesar 12,5 kV. Bila nilai *residual voltage* yang diinginkan sebesar 823 kV, maka diperlukan 66 keping ZnO tersusun ke atas. Hal ini akan menyebabkan tinggi LA mencapai 3 meter, dimana kestabilan mekanis LA tidak baik, oleh karenanya LA juga didesain untuk dipasang bertingkat (*stacked*).

## 2) *Housing LA*

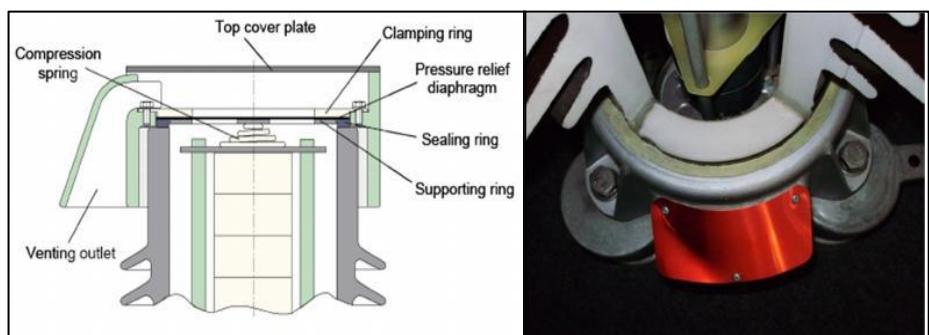
Tumpukan keping ZnO ditaruh dalam sangkar rod, umumnya terbuat dari FRP (*Fiber Glass Reinforced Plastic*). *Compression spring* dipasang pada kedua ujung kolom *active part* untuk memastikan susunan keping memiliki ketahanan mekanis. Kompartemen *housing* dapat terbuat dari porselen ataupun polimer. *Alumunium flange* direkatkan pada kedua ujung *housing* dengan menggunakan semen.



Gambar 2.7 Konstruksi Housing LA

### 3) Sealing dan Pressure Relief System

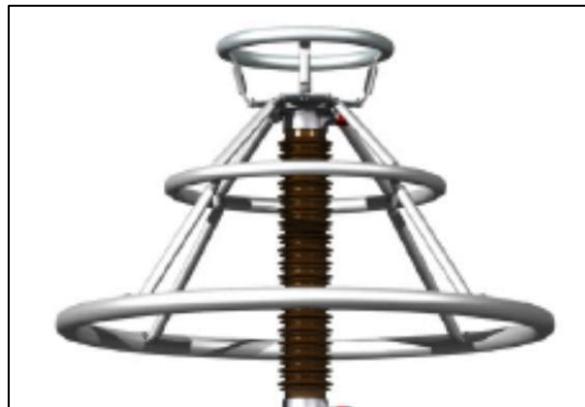
*Sealing ring* dan *pressure relief diaphgram* dipasang di kedua ujung arrester. *Sealing ring* terbuat dari material sintesis sementara *pressure relief diaphgram* terbuat dari steel / nikel dengan kualitas tinggi. *Pressure relief* bekerja sebagai katup pelepasan tekanan internal pada saat LA mengalirkan arus lebih surja.



Gambar 2.8 Sealing dan Pressure Relief System LA

### 4) Grading Ring

*Grading ring* diperlukan pada LA dengan ketinggian  $>1,5$  meter atau LA yang dipasang bertingkat. *Grading ring* berfungsi sebagai kontrol distribusi medan elektris sepanjang permukaan LA. Medan elektris pada bagian yang dekat dengan tegangan akan lebih tinggi, sehingga stres pada *active part* di posisi tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan pada posisi di bawahnya. Stress ini dapat menyebabkan degradasi pada komponen *active part*. Pemilihan ukuran *grading ring* perlu mempertimbangkan jarak antar fasa. Jarak aman antar konduktor harus sama dengan jarak antar *grading ring* antar fasa dari arrester.



**Gambar 2.9 Grading Ring LA**

5) *Peralatan Monitoring dan Insulator Dudukan*

LA dilengkapi dengan peralatan monitoring, yakni counter jumlah kerja LA dan/atau meter arus bocor total. Sebelum diketanahkan, kawat pentanahan dilewatkan dahulu pada peralatan monitoring. Oleh karenanya, insulator dudukan perlu dipasang baik pada kedua ujung peralatan monitor, maupun pada dudukan LA, agar arus yang melalui LA hanya melewati kawat pentanahan.



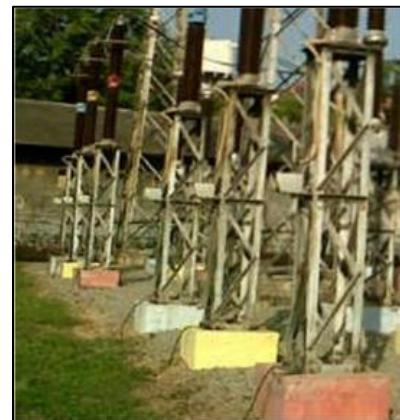
**Gambar 2.10 Counter LA dan Counter Meter Arus Bocor Total LA**



**Gambar 2.11 Insulator Dudukan LA**

6) *Struktur Penyangga Lightning Arrester*

LA dipasang pada ketinggian tertentu dari permukaan tanah, untuk itu diperlukan struktur penyangga yang terdiri dari pondasi dan struktur besi penyangga.



**Gambar 2.12 Struktur Penyangga LA**

#### 2.1.4.4 Tipe-tipe Arrester

Arrester terdiri dari dua jenis, yaitu jenis Ekspulsi dan jenis Tahanan Tak Linear.

##### 1. *Expulsion Type Lightning Arrester (protector cube)*

Arrester ini merupakan tabung yang terdiri dari dinding tabung yang terbuat dari bahan yang mudah menghasilkan gas yang dilalui arus (bahan fiber). Sela batang (*external series*) yang biasanya diletakkan pada isolator porselin berfungsi untuk

mencegah arus mengalir dan membakar fiber pada tegangan jala-jala setelah gangguan diatasi. Sela pemutus bunga api diletakkan di dalam tabung salah satu elektroda yang dihubungkan ke tanah.

Penggunaannya :

- Jenis transmisi digunakan ada jaringan transmisi untuk melindungi isolator.
- Jenis distribusi digunakan untuk melindungi trafo pada jaringan-jaringan distribusi dan peralatan-peralatan distribusi.

## 2. Non Linear Type Lightning Arrester (Arrester Tipe Tahanan Tak Linear)

### a) Jenis Silicon Carbide (SiC)

Arrester ini terdiri dari beberapa sela yang tersusun seri dengan piringan-piringan tahanan, dimana tahanan ini mempunyai karakteristik sebagai berikut : harga tahanannya turun dengan cepat pada saat arus gangguan mengalir sehingga tegangan antara terminal arrester tidak terlalu besar dan harga tahanan naik kembali jika arus gangguan sudah lewat, sehingga memotong arus ikutan pada titik nol pertamanya. Sela api (*sparks gap*) dan tahanan disusun secara seri dan ditempatkan di dalam porselein kedap air sehingga terlindung dari kelembapan, pengotoran dan hujan.

Distribusi tegangan yang tidak merata diantara celah sela api (*sparks gap*) dapat menimbulkan masalah. Untuk mengatasi hal ini maka dipasang kapasitor dan tahanan non linier paralel dengan sela api.

Pada daerah tegangan yang lebih tinggi kapasitor dan tahanan linear dihubungkan secara paralel dengan badan celah.

Bila tegangan lebih menyebabkan loncatan bunga api pada celah-celah yang diserikan, arus akan sangat tinggi untuk mempercepat redanya tegangan lebih.

Tegangan tertinggi yang akan muncul pada peralatan adalah tegangan loncatan atau tegangan yang terjadi pada tahanan tak linear pada saat lonjakan arus mengalir. Tegangan loncatan bunga api terendah dari peralatan disebut *Maximun 100% Impulse Spark Over Voltage*. Tegangan yang dibangkitkan tahanan non linear pada saat arus loncatan mengalir disebut tegangan residu. Semakin rendah nilai ini semakin baik tingkat perlindungan pada peralatan yang dilindungi.

Arus bocor yang mengalir melalui tahanan dalam keadaan operasi normal dari sistem tidak melebihi 0,1 mA. Arus ini sudah cukup untuk mempertahankan suhu di bagian dalam arrester 5 derajat lebih tinggi dari suhu sekeliling, sehingga mencegah masuknya uap air ke bagian dalam arrester.

b) Jenis *Metal Oxide* (MOV)

Arrester jenis *Metal Oxide* hanya terdiri dari unit-unit tahanan tak linear yang terhubung satu sama lainnya tanpa memakai sela percik pada setiap unit. Untuk arrester jenis *metal oxide*, material bahan tak linear pada dasarnya adalah keramik yang dibentuk dari oksida seng ( $ZnO$ ) dengan penambahan oksida lain. Bahan ini telah banyak dipakai untuk perlindungan rangkaian-rangkaian yang bekerja pada beberapa kV sampai dengan tegangan transmisi. Karena derajat ketidak linearan yang tinggi, bahan ini memungkinkan penyederhanaan dalam desain dan dapat memperbaiki penampilan dalam lingkungan tertentu.

Penggunaan arrester tipe tahanan tak linear adalah sebagai berikut :

- Jenis gardu (*Station Type*), jenis ini merupakan penangkap petir paling efisien dan mahal yang umumnya digunakan untuk melindungi peralatan-peralatan penting ada gardu-gardu besar (sistem dengan tegangan diatas 70kV).
- Jenis hantaran (*Line Type*), jenis ini lebih murah dan digunakan untuk melindungi gardu dengan tegangan kerja dibawah 70kV).
- Penangkap petir jenis gardu untuk melindungi motor/generator, digunakan untuk sistem dengan tegangan 2,2kV sampai 20kV.
- Penangkap petir sekunder (*Secondary Arrester*) berguna untuk melindungi peralatan-peralatan tegangan rendah dengan tegangan kerja sistem antara 20V s/d 750V.

#### 2.1.4.5 Karakteristik Arester

Sebagai alat pengaman tegangan lebih, arrester memiliki beberapa karakteristik yaitu :

1. Pada sistem tegangan yang normal arrester tidak boleh berkerja.
2. Bila mendapat tegangan transient abnormal diatas harga tegangan tembusnya, harus tembus (break down) dengan cepat.
3. Arus pelepasan selama break down (tembus) tidak boleh melebihi arus pelepasan nominal supaya tidak merusak.
4. Setiap gelombang transient dengan tegangan puncak yang lebih tinggi dari pada tegangan tembus pandang arrester harus mampu mengaktifkan arrester untuk mengalirkan ke tanah.
5. Arrester harus mampu melakukan arus terpa ke tanah tanpa merusak arrester itu sendiri.

6. Pada tegangan oprasi normal, harus mempunyai impedansi sangat tinggi atau tidak menarik arus listrik.
7. Arus dengan frekuensi normal harus diputuskan dengan segera apabila tegangan transient telah turun dibawah harga tegangan tembusnya.

Oleh karena itu disinggung muka arester dipakai guna menetapkan BIL (Basic Insulation Level), maka karakteristiknya perlu diketahui dengan jelas sebagai berikut:

1. Arester mempunyai tegangan dasar ( rated ) yang tidak boleh dilampaui.
2. Arester mempunyai karakteristik yang dibatasi oleh tegangan (voltage-limiting) bila dilalui oleh berbagai macam arus petir.
3. Arester mempunyai batas termis.

Batas termis adalah kemampuan untuk melakukan arus surja yang lama atau berulang-ulang, tanpa menaikkan suhu arester itu sendiri.

Sudah jelas bahwa arrester adalah sebuah peralatan tegangan dan mempunyai dasar (rating) tegangan, maka ia tidak boleh dikenakan tegangan yang melebihi dasar ini, baik dalam keadaan normal maupun dalam keadaan hubung singkat. sebab arrester ini dalam menjalankan fungsinya harus dalam keadaan hubung singkat, sebab arrester ini menjalankan fungsinya harus menanggung tegangan sistem normal dan tegangan lebih transient.

Karakteristik pembatas tegangan impuls arrester adalah harga yang dapat ditahannya pada terminal saat menyalurkan arus tertentu, harga ini berubah dengan besarnya arus. Karakteristik ini harus dapat dikenal pada waktu yang singkat misalnya pada waktu terjadi percikan pada sela bila arrester mulai bekerja (adanya surja), sebelum arus mulai mengalir.

Ciri ketiga yang dulu kurang mendapat perhatian adalah batas termisnya yaitu kemampuan untuk melakukan arus surja

hubung, tanpa menaikan suhunya. Meskipun kemampuan arrester untuk menyalurkan arus sudah mencapai 65.000-100.000 ampere, tetapi kemampuannya untuk melakukan surja hubung terutama bila saluran menjadi panjang dan berisi tenaga besar adalah lebih penting lagi.

Berhubung dengan hal-hal diatas supaya tekanan pada isolasi dapat dibuat serendah mungkin suatu sistem perlindungan tegangan lebih perlu memenuhi persyaratan seperti berikut :

1. Dapat melepas tegangan lebih ke tanah tanpa menyebabkan hubung singkat ke tanah.
2. Dapat memutuskan arus susulan.
3. Mempunyai tingkatan perlindungan (protective level) yang rendah, artinya tegangan percikan sela dan tegangan pelepasannya rendah. Mula-mula arrester dipakai semata-mata untuk melindungi isolasi terhadap surja petir. Kebutuhan untuk menurunkan biaya pada waktu tegangan sistem naik menyebabkan penurunan tingkat isolasi tingkat perlindungan arrester.

#### 2.1.4.6 Pemilihan Arrester

Dalam memilih arrester yang sesuai untuk suatu keperluan tertentu, beberapa faktor harus diperhatikan, yaitu:

- a. Kebutuhan perlindungan : ini berhubungan dengan kekuatan isolasi dari alat yang harus dilindungi dan karakteristik impuls dari petir.
- b. Tegangan sistem : ialah tegangan maksimum yang mungkin timbul pada jepitan arrester. Tegangan maksimum kawat ke tanah biasanya diambil 110% dari tegangan jala-jala.
- c. Jenis arrester : apakah arrester jenis gardu, jenis saluran atau jenis distribusi.

- d. Faktor kondisi luar : apakah normal atau tidak normal (2.000 meter atau lebih diatas permukaan laut), temperatur dan kelembapan yang tinggi serta pengotoran
- e. Faktor ekonomi : faktor ekonomi ialah perbandingan antara ongkos pemeliharaan dan kerusakan bila tidak ada arrester, atau bila dipasang arrester yang lebih rendah mutunya.

#### 2.1.4.7 Syarat – syarat Arrester

Arrester yang dipasang harus memenuhi syarat – syarat seperti:

1. Tegangan percik dan tegangan pelepasan, yaitu tegangan pada terminal saat pelepasan harus cukup rendah sehingga dapat mengamankan isolasi peralatan. Tegangan percik ini bisa juga disebut dengan gagal sela (*gap breakdown*) dan tegangan pelepasan disebut dengan tegangan sisa (*residual voltage*).
2. Arrester harus mampu mengalirkan arus surja ke tanah tanpa merusak arrester itu sendiri.
3. Arrester harus mampu memutuskan arus susulan dan dapat bekerja kembali seperti semula.
4. Arrester harus memiliki harga tahanan pentanahan di bawah 5 ohm.

#### 2.1.4.8 Pemilihan Tingkat Isolasi Dasar *Lightning Arrester*

Berdasarkan SPLN 7 : 1978, penetapan tingkat isolasi transformator dan pengangkap petir adalah sebagai berikut :

**Tabel 2.1 Penetapan Tingkat Isolasi Transformator dan Penangkap Petir**

| Spesifikasi                        | Tegangan Nominal Sistem |         |         |
|------------------------------------|-------------------------|---------|---------|
|                                    | 150 kV                  | 66 kV   | 20 kV   |
| Tegangan Tertinggi untuk Peralatan | 170 kV                  | 72,5 kV | 24 kV   |
| Pentanahan Netral                  | Efektif                 | Tahanan | Tahanan |

|                                          |                                                        |                                   |                                         |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| <u>Transformator</u>                     |                                                        |                                   |                                         |
| Tegangan Pengenal (sisi tegangan tinggi) | 150 kV                                                 | 66 kV                             | 20 kV                                   |
| Tingkat Isolasi Dasar                    | 650 kV                                                 | 325 kV                            | 125 kV                                  |
| <u>Penangkap Petir</u>                   |                                                        |                                   |                                         |
| Tegangan Pengenal                        | 138 kV <sup>1)</sup> 150 kV <sup>1)</sup>              | 75 kV <sup>1)</sup>               | 21 kV <sup>1)</sup> 24kV <sup>1)</sup>  |
| Arus Pelepasan Nominal                   | 10 kA                                                  | 10 kA                             | 5 kA <sup>2)</sup>                      |
| Tegangan Pelepasan                       | 460 kV <sup>1)</sup> 500 kV <sup>1)</sup>              | 270 kV <sup>1)</sup>              | 76 kV <sup>1)</sup> 87 kV <sup>1)</sup> |
| Tegangan Percikan                        | 530 kV 577 kV                                          | 310 kV                            | 88 kV 100 kV                            |
| Denyut Muka Gelombang                    |                                                        |                                   |                                         |
| Tegangan Percikan                        | 460 kV 500 kV                                          | 270 kV                            | 76 kV 87 kV                             |
| Denyut Standar *)                        |                                                        |                                   |                                         |
| Kelas                                    | 10 kA tugas berat<br>10 kA tugas ringan<br>5 kA seri A | 10 kA tugas ringan<br>5 kA seri A | 5 kA seri A                             |

\*) Biasa disebut juga tegangan percikan denyut 1,2/50 atau tegangan percikan denyut 100%.

Catatan :

- a. Bilamana tidak diperoleh persesuaian perihal tegangan pengenal penangkap petir, maka tingkat pengaman dari penangkap petir dipakai sebagai pedoman.
- b. Bilamana penangkap petir akan dipakai untuk melindungi gardu induk dan transformator tenaga seharusnya dipakai penangkap petir 10 kA tugas ringan.

## 2.1.5 Pengujian Arrester

### 2.1.5.1 Pengujian Ketahanan Arus Pelepasan

Berdasarkan standar, untuk pengujian arus rendah waktu lama setiap pengujian arus impuls waktu lama harus tetap 20 kali operasi, di bagi dalam 4 kelompok yang terdiri dari 5 operasi. Jarak setiap operasi 50-60 s, dan jarak kelompok antara 25 menit-30 menit. Sedangkan untuk pengujian arus tinggi waktu singkat, besarnya arus pengujian arrester kelas 10 kA pada gelombang 4/10 mikro detik adalah 100 kA. Sedangkan berdasarkan arus pengujian minimum adalah 65 kA.

#### 2.1.5.2 Pengujian Pressure Relief

Berdasarkan standar,besarnya arus pengujian pressure relief ini adalah untuk arrester kelas gardu induk pada arus tinggi sebesar 45 kA-60 kA dalam waktu 0,2s dan pada arus rendah sebesar 400-600 A dengan toleransi 10%

#### 2.1.5.3 Pengujian ketahanan isolasi

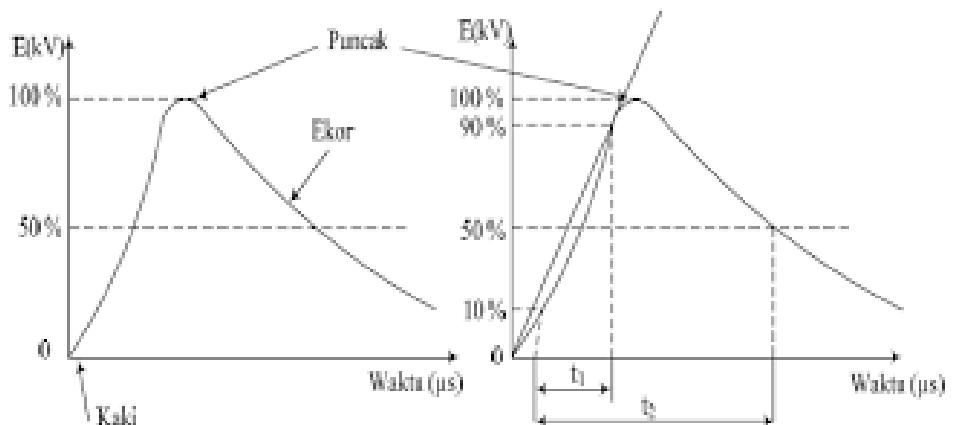
Suatu arresterdi uji ketahanan isolasinya dengan tegangan impuls  $1,2 \times 50$  mikro detik menunjukan keadaan arrester dalam keadaan baik meskipun isolasinya diatas tingkat minimum.untuk kelas arresteer 150 kV harus tahan pengujian dengan besar tegangan 335 kV dalam keadaan basah selama 1 menit dan 275 kV dalam keadaan kering selama 10 detik yang mana di lakukan sebanyak 60 kali percobaan.

#### 2.1.5.4 Pengujian tegangan pelepasan

Pengujian tegangan pelepasan ini dilakuakn dengan melakukan pengukuran tegangan puncak dengan arus 1 kA, 2 kA, 5 kA, 10 kA, dan 20 kA dengan sebuah gelombang 8/20 mikro detik

## 2.1.6 Bentuk dan Spesifikasi Gelombang Berjalan

Bentuk umum suatu gelombang berjalan digambarkan sebagai berikut, gambar 2.12.



**Gambar 2.13 Bentuk Gelombang Berjalan**

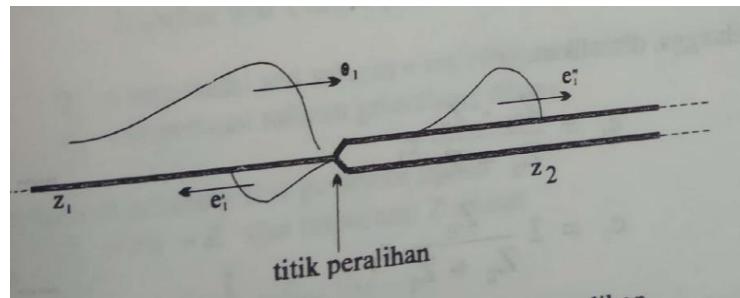
Spesifikasi dari suatu gelombang berjalan:

- Puncak (crest) gelombang,  $E$  (kV), yaitu amplitudo maksimum dari gelombang.
- Muka gelombang,  $t_1$  (mikrosekon) yaitu waktu dari permulaan sampai puncak. Diambil dari 10 %  $E$  sampai 90%  $E$ . lihat gambar 2.12
- Ekor gelombang (residual voltage), yaitu waktu dari permulaan samapi titik 50 %  $E$  pada ekor gelombang.
- Polaritas, yaitu polaritas dari gelombang, positif atau negative

## 2.1.7 Pantulan pada Gelombang berjalan

Bila suatu gelombang berjalan sampai pada titik perubahan impedansi maka sebagian gelombang dipantulkan dan bagian yang lain diteruskan. Gelombang yang datang disebut gelombang datang (*incident wave*) dan gelombang yang dipantulkan disebut gelombang pantul (*reflected wave*) dan gelombang yang

diteruskan disebut gelombang terusan (*transmitted wave*). Ketiga gelombang ini dapat dilihat pada gambar 2.13.



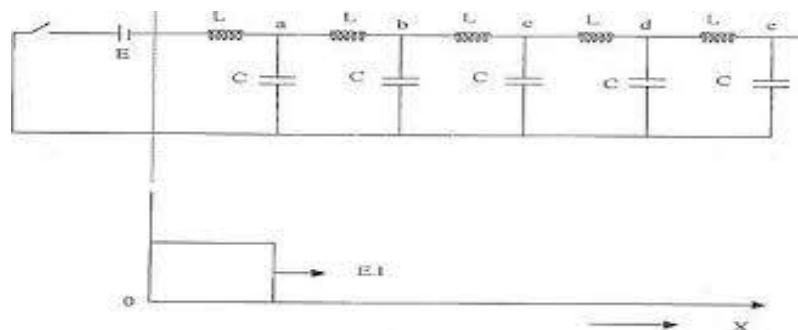
**Gambar 2.14 Gelombang dengan titik peralihan**

Keterangan gambar 2.13:

- $e_1$  adalah gelombang datang
- $e_1'$  adalah gelombang pantul
- $e_1''$  adalah gelombang terusan
- $Z_1$  adalah impedansi surja pada gelombang datang
- $Z_2$  adalah impedansi surja pada gelombang terusan

### 2.1.8 Kecepatan Rambat Gelombang Berjalan

Apabila suatu gelombang energi listrik merambat sepanjang kawat dengan konstanta  $L$  dan  $C$ , maka gelombang tegangan dan arus merambat dengan kecepatan yang sama. Kedua besaran ini dihubungkan oleh suatu faktor proporsional yaitu karakteristik kawat itu.



**Gambar 2.15 Kawat Transmisi dengan Batere**

Bila gelombang tegangan  $E$  pada gambar 2.14 sampai pada titik a, maka arus yang bersamaan dengan tegangan itu akan mengisi kapasitor C pada tegangan  $E$ .

Muatan yang dibutuhkan untuk menaikkan tegangan pada satu satuan panjang =  $C.E$

Bila keceptan merambat gelombang itu  $v$  cm/detik, maka jumlah muatan yang dibutuhkan untuk mengisi kawat sepanjang  $v$  cm tiap detik =  $C.E.v$

Muatan ini diberikan oleh arus *uniform* yang mengalir pada kawat dan untuk memberi muatan  $CEv$  dalam satu detik dibutuhkan arus sebesar :

Bila gelombang itu telah merambat sejauh  $x$  cm, maka energi elektrostatis pada bagian ini ( $x$  cm) adalah :

Bila  $L$ =induktansi kawat per cm, maka dalam waktu yang sama, energi elektrostatis pada kawat sepanjang  $x$  itu :

Bila dibutuhkan waktu  $t$  untuk merambat sepanjang  $x$  cm, maka :

$$v = \frac{x}{t}$$

Energi yang diberikan oleh batere:

$$We \equiv E_s L t$$

$$We \equiv Wc + WI$$

Jadi,

$$EIt = \frac{1}{2}C.x.E^2 + \frac{1}{2}L.x.I^2$$

$$EI = \frac{1}{2} C.v.E^2 + \frac{1}{2} L.v.I^2$$

Atau

Dari persamaan 2.2,  $I = C.E.v$  atau

$$E/I = 1/Cv \text{ dan } I/E = Cv$$

Subtitusi  $I/E = Cv$  dalam persamaan (2.5) diperoleh :

$$v = \frac{2}{\frac{1}{v} + LCv}$$

Atau

$$v^2 = 1/LC$$

Jadi

Kedua harga  $+v$  dan  $-v$  ini berlaku, yaitu :

v positif = gelombang maju

v negatif = gelombang mundur

Pada kawat udara dengan jari-jari  $r$  dan tinggi  $h$  di atas tanah :

$$C = \frac{10^{-11}}{18 \ln 2 h/r} \text{ farad/cm} \dots \dots \dots \quad (2.8)$$

Faktor  $\frac{1}{2}$  dalam persamaan 2.6 disebabkan adanya fluks lingkup di dalam kawat (*internal flux*) dengan pemisalan bahwa distribusi arus merata.

Tetapi pada gelombang berjalan efek kulit transien sangat besar sehingga arus berkumpul pada permukaan kawat. Dengan demikian fluks sangat kecil dan dapat diabaikan.

Jadi,

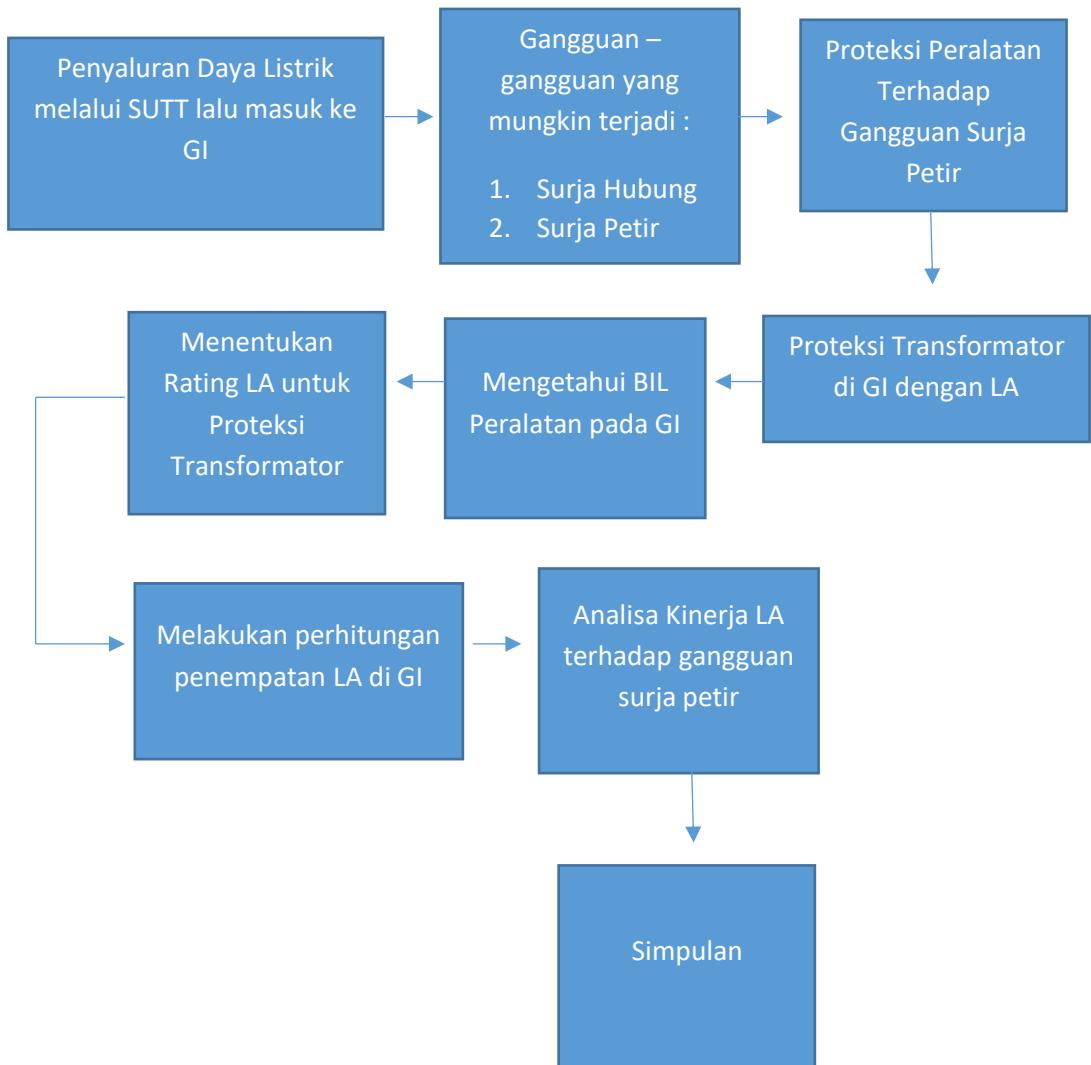
$$L = 2 (\ln 2h/r) \cdot 10^{-9} \text{ henry/cm} \quad \dots \dots \dots \quad (2.7a)$$

$$= 3 \times 10^{10} \text{ cm/detik}$$

Dimana :

- C : nilai kapasitansi kawat (F)
  - L : nilai induktansi (H)
  - E : nilai tegangan (kV)
  - I : nilai arus yang dibutuhkan muatan untuk mengisi C (kA)
  - v : kecepatan rambat gelombang (cm/s)
  - We : energi
  - Wc : energi elektrostatis berdasarkan kapasitansi kawat (Joule)
  - WI : energi elektrostatis berdasarkan induktansi kawat (Joule)
  - x : jarak rambat gelombang (m)
  - t : waktu (detik)
  - h : tinggi kawat diatas tanah (m)
  - r : jari-jari kawat (m)

## 2.2 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.16 Kerangka Pemikiran Penelitian