

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pusat-pusat listrik umumnya dihubungkan dengan saluran udara transmisi yang menyalurkan tenaga ke pusat-pusat beban tenaga listrik, yaitu Gardu-gardu induk (G.I). Saluran udara yang keluar dari pusat listrik merupakan bagian instalasi listrik yang paling rawan sambaran petir dan karenanya harus diberi *lighting arester*. Selain itu, *lighting arrester* harus berada di depan setiap transformator dan harus terletak sedekat mungkin dengan transformator. Hal ini perlu karena surja petir yang merupakan gelombang berjalan menuju transformator akan melihat transformator sebagai suatu ujung terbuka (karena transformator mempunyai isolasi terhadap bumi/tanah) sehingga gelombang pantulannya akan saling memperkuat dengan gelombang yang datang. Ini berarti bahwa transformator dapat mengalami tegangan surja dua kali lebih besarnya tegangan gelombang surja yang datang. Untuk mencegah terjadinya hal ini, *lighting arrester* harus dipasang sedekat mungkin dengan transformator. (Arismunandar, Kuswahara, 2004)

Lighting arrester akan bekerja pada tegangan tertentu di atas tegangan operasi untuk membuang muatan listrik dari surja petir dan akan berhenti beroperasi pada tegangan tertentu di atas tegangan operasi agar tidak terjadi arus ikutan pada tegangan operasi. Perbandingan dua tegangan ini disebut rasio proteksi *arrester*. Tingkat isolasi dasar *arrester* harus berada di bawah tingkat isolasi dasar transformator agar apabila sampai terjadi *flashover* diharapkan terjadi pada *arrester* dan tidak pada transformator. Transformator merupakan bagian instalasi pusat listrik yang paling mahal dan rawan terhadap sambaran petir. Selain itu, apabila sampai terjadi kerusakan transformator, maka daya dari pusat listrik tidak

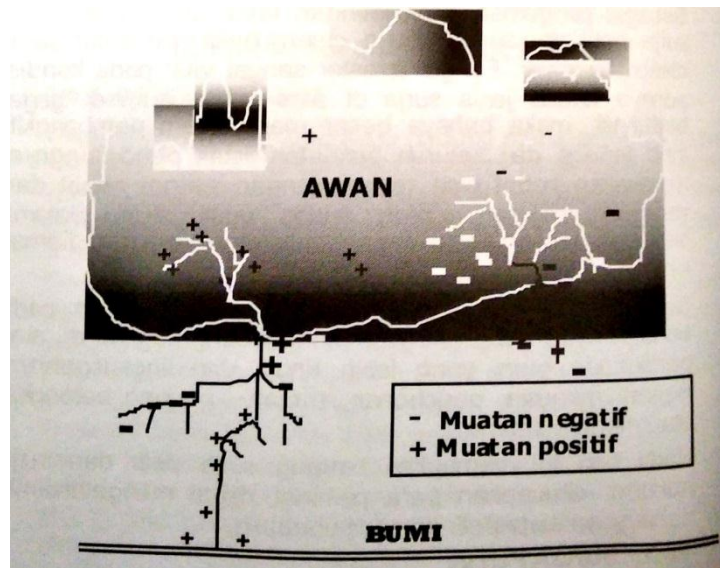
dapat sepenuhnya disalurkan. Sambaran Petir Pada Jaringan Udara merupakan suntikan muatan listrik. Suntikan muatan ini menimbulkan kenaikan tegangan pada jaringan, sehingga pada jaringan timbul tegangan lebih yang berbentuk gelombang impuls dan merambat ke ujung-ujung jaringan. Gelombang tegangan lebih akibat sambaran petir sering disebut surja petir. (N.Sarimun,2016)

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Proses Terjadinya Petir

Petir umumnya terjadi pada saat awan tebal telah terbentuk. Di dalam awan tebal, terjadi perbedaan suhu yang tajam antara bagian bawah dan bagian atas. Butir air awan bagian bawah yang lebih hangat berusaha berpindah ke atas dan kemudian di atas menjadi beku, lalu berubah menjadi kristal es. Kristal es lebih berat dari butir air dan berusaha turun kembali. Kristal es yang turun dan butir air yang naik saling mendesak, sehingga terjadi geseran-geseran yang menimbulkan pemisahan muatan listrik. Air yang naik membawa muatan positif dan es yang turun membawa muatan negatif.

Seperti terlihat pada gambar 2.1, terbentuk awan yang mirip dipole listrik dengan bagian atas terdiri dari kristal es bermuatan positif dan bagian bawah terdiri dari butir air bermuatan negatif.



Gambar 2.1 Terjadinya Petir

Ketika tegangan antara ujung awan itu sudah terlalu besar terjadilah lompatan muatan listrik, yang memiliki energi tinggi. Energi ini menyalakan udara yang melewatinya. Inilah yang disebut petir.

Jadi petir terjadi karena ada perbedaan potensial antara awan dan bumi atau dengan awan lainnya. Proses terjadinya muatan pada awan terjadi karena awan bergerak terus menerus secara teratur dan selama pergerakannya, awan akan berinteraksi dengan awan lainnya sehingga muatan negatif akan berkumpul pada salah satu sisi (atas atau bawah), sedangkan muatan positif akan berkumpul pada sisi sebaliknya. Jika perbedaan potensial antara awan dan bumi cukup besar, maka akan terjadi pembuangan muatan negatif (elektron) dari awan ke bumi atau sebaliknya untuk mencapai kesetimbangan. Pada proses pembuangan muatan ini, media yang dilalui elektron adalah udara. Pada saat elektron mampu menembus ambang batas isolasi udara inilah terjadi ledakan suara. Jadi petir lebih sering terjadi pada musim hujan, karena pada keadaan tersebut udara mengandung kadar air yang lebih tinggi sehingga daya isolasinya turun dan arus lebih mudah mengalir. Karena ada awan bermuatan negatif dan awan bermuatan positif, maka petir juga bisa terjadi antar awan yang berbeda muatan.

Bila gelombang petir dekat dengan bumi akan melepas muatannya (*discharge*) melalui benda-benda dekat dengan bumi yang mengandung logam atau air karena benda ini dapat menghantarkan aliran listrik, adapun benda sebagai pemicu aliran gelombang petir ke bumi :

- Manusia atau pepohonan
- Gedung bertingkat, tiang SUTM dan menara antena karena mengandung logam
- Benda lain yang lebih tinggi dari lingkungannya atau bumi yang mengandung logam

Negara-negara yang terletak di daerah khatulistiwa yang panas dan lembab seperti Indonesia, memiliki hari guruh yang sangat tinggi dibandingkan dengan negara-negara lain di dunia yaitu sekitar 180-260 hari per tahun. Kerapatan sambaran petir sangat besar, yaitu $12/\text{km}^2/\text{tahun}$, yang berarti pada setiap luas area 1 km^2 berpotensi menerima sambaran petir sebanyak 12 kali setiap tahunnya. Energi yang dihasilkan oleh satu sambaran petir mencapai 55 kWhours. Hal ini perlu pengamanan yang baik pada peralatan listrik yang lebih tinggi dari lingkungannya.

Ada beberapa sambaran petir sebagai berikut :

- Sambaran Langsung
Sambaran langsung adalah sambaran petir yang langsung mengenai benda di atas permukaan bumi. Sambaran petir ini yang paling besar dengan arus dan tegangan yang besar dan paling hebat diantara gelombang petir lainnya yang datang ke benda di atas permukaan bumi. Sambaran langsung menyebabkan tegangan lebih yang sangat tinggi, tidak mungkin dapat ditahan oleh isolasi yang ada (>BIL)

- Sambaran Induksi

Bila terjadi sambaran kilat ke tanah di dekat saluran maka akan timbul medan elektromagnetis pada kawat penghantar. Akibat dari kejadian ini timbul tegangan lebih dan gelombang berjalan yang merambat pada kedua sisi kawat tempat sambaran berlangsung. Tegangan induksi dapat berubah-ubah tergantung dari keadaannya, secara umum besar tegangan lebih akibat smbaran induksi antara 100 – 200 kV, muka gelombangnya (*wave front*) lebih dari 10 μ s dan ekor gelombang (*wave tail*) 50 – 100 μ s, dimana gelombang ini sebagai ancaman bagi peralatan listrik yang dekat induksi dan sambaran induksi.

- Sambaran Dekat

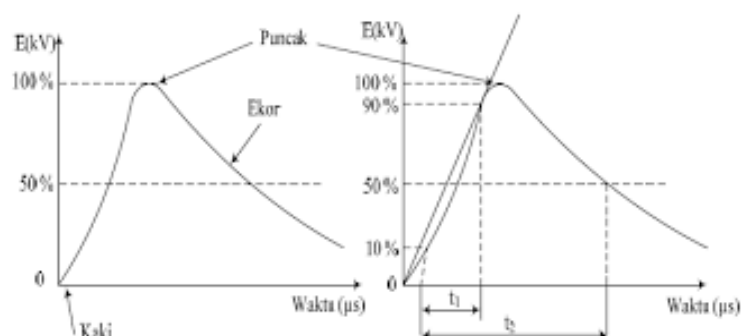
Dimana gelombang berjalan yang melalui penghantar dekat dengan peralatan listrik

- Sambaran Jauh

Bila penghantar dilindungi dengan penghantar tanah, sehingga gelombang berjalan cukup jauh mengenai penghantar fasa.

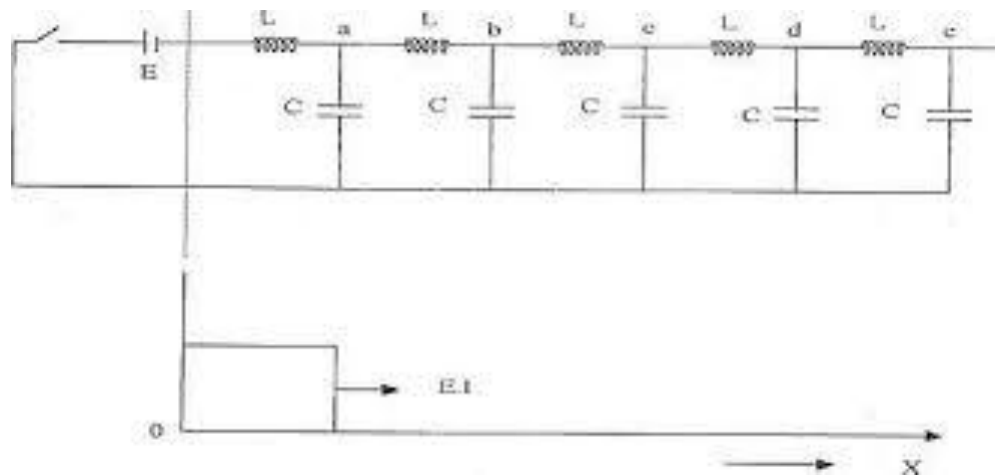
2.2.2 Gelombang Berjalan

Bentuk umum suatu gelombang berjalan digambarkan pada gambar 2.2 berikut :



Gambar 2.2 Bentuk Gelombang Berjalan

Apabila suatu gelombang surja 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 2.3 Gambar Ekuivalen Saluran Transmisi

Bila gelombang tegangan E pada gambar 2.3 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 kecepatan 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 :

$$I = C.E.v \dots\dots\dots (2.1)$$

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

$$W_c = \frac{1}{2} C.x.E^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

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

$$Wl = \frac{1}{2} L \cdot x \cdot I^2 \dots\dots\dots (2.3)$$

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

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

Energi yang diberikan oleh batere:

$$We = E \cdot I \cdot t$$

$$We = Wc + Wl$$

Jadi,

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

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

Atau

$$v = \frac{2}{C \frac{E}{I} + L \frac{I}{E}} \text{ cm/detik} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dari persamaan 2.1, $I = C \cdot E \cdot v$ atau

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

Substitusi $I/E = Cv$ dalam persamaan (2.4) diperoleh :

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

Atau

$$v^2 = 1/LC$$

Jadi

$$v = \pm \sqrt{1/LC} \text{ cm/detik} \dots\dots\dots (2.5)$$

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 :

$$L = (\frac{1}{2} + 2 \ln 2h/r) 10^{-9} \text{ henry/cm} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$C = \frac{10^{-11}}{18 \ln 2h/r} \text{ farad/cm} \dots\dots\dots (2.7)$$

Faktor ½ 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.

$$\text{Jadi, } L = 2 (\ln 2h/r) 10^{-9} \text{ henry/cm} \dots\dots\dots (2.6a)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{18 \ln 2h/r \cdot 10^{11}}{2 \ln 2h/r \cdot 10^{-9}} \dots\dots\dots (2.8)$$

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

2.2.3 Gardu Induk

Gardu induk (biasanya disingkat G.I) diklasifikasikan menurut jenis pasangan luar, jenis pasangan dalam, jenis mobil dan sebagainya sesuai dengan konstruksinya.

GI jenis pasangan luar terdiri dari peralatan tegangan tinggi pasangan luar, misalnya transformator, peralatan penghubung

(*switchgear*), dll yang mempunyai peralatan kontrol pasangan dalam seperti meja penghubung (*switchboard*) dan batere. Jenis pasangan luar memerlukan tanah yang luas, namun biaya konstruksinya murah dan pendinginannya mudah.

Dalam GI pasangan dalam, baik peralatan tegangan tinggi seperti trafo, peralatan penghubung maupun peralatan kontrolnya terpasang di dalam. Meskipun ada sejumlah kecil peralatan yang terpasang di luar GI ini disebut juga pasangan dalam.

Dalam GI jenis setengah pasangan luar (*semi outdoor substation*) sebagian dari peralatan tegangan tingginya terpasang di dalam gedung. GI ini juga bisa disebut juga GI jenis setengah pasangan dalam. Untuk GI jenis ini dipakai bermacam-macam corak dengan pertimbangan ekonomis, pencegahan kontaminasi garam, pencegahan gangguan suara, pencegahan kebakaran dan sebagainya.

GI jenis mobil dilengkapi dengan peralatan diatas kereta hela (*trailer*) atau semacam truk. GI mobil ini dipakai dalam keadaan ada gangguan di suatu GI, guna pencengahan beban berlebih secara berkala dan guna pemakaian sementara di tempat pembangunan. GI ini banyak juga dipakai untuk kereta listrik. Untuk penyediaan tenaga listrik, GI ini tidak dipakai secara luas, melainkan sebagai transformator atau peralatan penghubung yang mudah dipindah-pindah di atas kereta atau truk untuk memenuhi kebutuhan dalam keadaan darurat.

2.2.3.1 Peralatan Gardu Induk

Gardu induk dilengkapi dengan fasilitas dan peralatan yang diperlukan sesuai dengan tujuannya dan mempunyai fasilitas untuk operasi dan pemeliharaannya, sebagai berikut :

1) Transformator Daya

Trafo merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan,

secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan tegangan sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076 – 1 tahun 2011). Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum-hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet / fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi.

2) Transformator Arus

Transformator arus (*Current Transformer – CT*) yaitu peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik di sisi primer (TET, TT dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi.

3) Transformator Tegangan

Untuk memonitor dan mengendalikan kinerja suatu sistem tenaga listrik diperlukan alat ukur, lampu indikator dan relay proteksi. Pengukuran tegangan tinggi tidak dapat dilakukan langsung seperti halnya pengukuran tegangan rendah. Karena selain berbahaya bagi operator, sulit membuat voltmeter yang mampu mengukur tegangan tinggi secara langsung. Lampu indikator dan relay proteksi yang digunakan untuk memonitor kinerja sistem tenaga listrik membutuhkan tegangan rendah, sehingga diperlukan trafo tegangan untuk mentransformasi tegangan sistem menjadi tegangan rendah.

4) Kapasitor

Bank kapasitor (*capacitor banks*) adalah peralatan yang digunakan untuk memperbaiki kualitas pasokan energi listrik antara lain memperbaiki mutu tegangan di sisi beban,

memperbaiki faktor daya ($\cos \phi$) dan mengurangi rugi-rugi transmisi. Kekurangan dari pemakaian kapasitor adalah menimbulkan harmonisa pada proses *switching* dan memerlukan desain khusus PMT atau *switching controller*.

5) Reaktor

Reaktor merupakan peralatan utama atau peralatan yang terintegrasi, baik dalam jaringan sistem distribusi maupun transmisi. Dikatakan bahwa reaktor merupakan peralatan utama jika pemasangannya tidak menjadi bagian dari peralatan dasar lainnya, misalnya reaktor pembatas arus (*current limiting reactor*), reaktor paralel (*shunt reactor / steady-state reactive compensation*) dan lain-lain. Dikatakan bahwa reaktor merupakan peralatan terintegrasi jika reaktor tersebut merupakan bagian dari suatu peralatan dengan unjuk kerja tertentu, misalnya reaktor surja hubung kapasitor paralel (*shunt-capacitor-switching reactor*), reaktor peluahan kapasitor (*capacitor discharge reactor*), reaktor penyaring (*filter reactor*), dll.

6) Pemutus Tenaga (PMT)

Berdasarkan IEV (*International Electrotechnical Vocabulary*) 441-14-20 disebutkan bahwa *Circuit Breaker* (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar / *switching* mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam kondisi abnormal / gangguan seperti kondisi hubung singkat (*short circuit*).

Sedangkan definisi PMT berdasarkan IEEE C37.100:1992 (*Standart definition for power switchgear*) adalah merupakan peralatan saklar/switching mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal sesuai dengan ratingnya serta mampu menutup,

mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal/gangguan sesuai dengan ratingnya.

Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatan lain.

7) Pemisah (PMS)

Disconnecting switch atau pemisah (PMS) adalah suatu peralatan sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai saklar pemisah rangkaian listrik dalam kondisi bertegangan atau tidak bertegangan tanpa arus beban.

Penempatan PMS terpasang di antara sumber tenaga listrik dan PMT (PMTBus) serta di antara PMT dan beban (PMS Line / kabel) dilengkapi dengan PMS Tanah (*Earthing Switch*). Untuk tujuan tertentu MS Line / kabel dilengkapi dengan PMS Tanah. Umumnya antara MS Line / kabel dan PMS Tanah terdapat alat yang disebut *interlock*.

8) *Lightning Arrester*

LA merupakan peralatan yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik lain dari tegangan surja (baik surja hubung maupun surja petir).

9) Kawat Tanah

Kawat tanah berfungsi untuk melindungi kawat transmisi agar tidak disambar petir. Jika terjadi sambaran petir pada transmisi, maka yang diterpa petir adalah kawat tanah. Disamping itu, kawat tanah memberi jalan bagi gelombang tegangan impuls petir, sehingga impedansi impuls yang dilalui arus petir semakin rendah. Jika petir menyambar puncak menara, maka satu kawat tanah menjadi dua kawat paralel bagi arus petir, sehingga impedansi impuls yang

ditemui sambaran petir adalah impedansi ekuivalen dari tiga impedansi yang terhubung paralel.

10) Busbar

Busbar merupakan bagian utama dalam suatu gardu induk yang berfungsi sebagai tempat terhubungnya semua bay yang ada di gardu induk tersebut, baik bay line maupun bay trafo. Umumnya gardu induk didesign dengan konfigurasi 2 busbar (*double busbar*), namun juga masih terdapat gardu induk yang memiliki satu busbar (*single busbar*).

2.2.3.2 Perlindungan Gardu Induk

Perlindungan gardu induk terbagi dalam 2 bagian :

- a. Perlindungan terhadap sambaran langsung
- b. Perlindungan terhadap gelombang surja yang datang dari kawat transmisi

Perlindungan terhadap sambaran langsung ialah dengan kawat tanah. Bila perlindungan ini sempurna, maka yang perlu diperhatikan adalah gelombang yang datang dari kawat transmisi.

Bila kawat-kawat fasa cukup terlindung dari sambaran langsung, maka sumber gelombang berjalan biasanya adalah lompatan api dari isolator. Umumnya tegangan ini lebih tinggi dari Tingkat Isolasi Dasar (TID) dari peralatan gardu dan tegangan lebih ini harus dialirkan ke tanah oleh *lightning arrester* atau alat-alat perlindungan lainnya.

Lightning Arrester yang dipergunakan untuk perlindungan gardu biasanya ditempatkan pada sisi masuk transmisi untuk seluruh peralatan, jadi *arrester* akan melindungi peralatan dari tegangan surja yang masuk.

Metode-metode yang efektif untuk perlindungan gardu ialah :

- a. Perlindungan terhadap sambaran langsung petir bisa menggunakan kawat tanah dan penangkal petir.
- b. Sedangkan perlindungan terhadap gelombang surja bisa dengan menggunakan *lightning arrester*.
- c. *Arrester* ditempatkan pada sisi masuk transmisi dari seluruh peralatan.
- d. Tahanan tanah gardu rendah.
- e. Celah ekspulsi (*expulsion gap*) ditempatkan pada jalan masuk daerah yang dilindungi.

2.2.4 Transformator Daya

Transformator merupakan suatu peralatan yang mengubah dan menyalurkan tenaga listrik dari suatu level tegangan ke level tegangan lainnya. Trafo biasanya terdiri atas dua bagian inti besi atau lebih yang dibungkus oleh belitan-belitan kawat tembaga. Prinsip pengubahan level tegangan dilakukan dengan memanfaatkan banyaknya jumlah belitan pada inti trafo. Bila salah satu kumpulan belitan, biasanya disebut belitan primer, diberikan suatu tegangan yang berubah-ubah, maka akan menghasilkan fluks yang berubah-ubah dengan besar amplitude yang tergantung pada tegangan, frekuensi tegangan dan jumlah lilitan kawat tembaga di belitan primer. Fluks yang terjadi akan terhubung dengan belitan lain yang disebut sisi sekunder dan akan menginduksi suatu tegangan yang berubah-ubah di dalamnya dengan nilai tegangan yang bergantung pada jumlah lilitan pada belitan sekunder. Dengan mengatur perbandingan jumlah lilitan antara sisi primer dan sekunder, maka akan dapat ditentukan rasio tegangan ataupun sering disebut rasio trafo.

Penggunaan transformator yang sederhana dan andal itu merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik. Pada penyaluran tenaga listrik terjadi kerugian energi sebesar I^2R watt.detik. Kerugian ini akan banyak berkurang apabila tegangan dinaikkan. Dengan demikian maka saluran-saluran transmisi tenaga listrik senantiasa mempergunakan tegangan yang tinggi. Hal ini dilakukan terutama untuk mengurangi kerugian energi yang terjadi. Dan menaikkan tegangan listrik di pusat listrik dari tegangan generator yang biasanya berkisar antara 6 sampai 20 kV pada awal saluran transmisi, kemudian menurunkannya lagi pada ujung akhir saluran itu ke tegangan yang lebih rendah, yang dilakukan dengan transformator. Transformator yang digunakan pada sistem tenaga listrik adalah trafo tenaga.

Seperti yang telah diketahui bahwa pusat pembangkit listrik umumnya dihubungkan dengan saluran transmisi udara yang menyalurkan tenaga listrik ke dari pusat pembangkit ke pusat-pusat konsumsi tenaga listrik, yaitu gardu-gardu induk (GI). Sedangkan saluran transmisi udara ini rawan sekali terhadap sambaran petir yang menghasilkan gelombang berjalan (surja tegangan) yang dapat masuk ke pusat pembangkit listrik. Oleh karena itu, dalam pusat listrik harus ada *lightning arrester* (penangkal petir) yang berfungsi menangkal gelombang berjalan dari petir yang akan masuk ke instalasi pusat pembangkit listrik. Gelombang berjalan juga dapat berasal dari pembukaan dan penutupan pemutus tenaga atau circuit breaker (switching).

Basic Insulation Level (BIL) atau tingkat isolasi dasar impuls transformator adalah batas kemampuan transformator dalam melewati tegangan lebih (*over voltage*) akibat sambaran petir dan hubung singkat. BIL dibuat dengan memperhatikan harga puncak gelombang petir, kemampuan pengamanan dari berbagai alat

pelindung serta pengalaman dan praktek di dunia. Kekuatan isolasi dari setiap peralatan dalam sistem dipilih sesuai dengan kelas tegangannya dengan mengingat adanya alat pelindung, derajat kemampuan pengamanan, pentingnya sistem dan frekuensi sambaran petir pada sistem. Pada umumnya, kelas yang dipilih sesuai dengan tegangan nominal sistem yang dipilih, tetapi tidak selalu harus sama. Tingkat isolasi yang pertama masuk tingkat isolasi penuh (*full*) dan yang terakhir masuk tingkat isolasi yang dikurangi. Dalam praktek, tingkat isolasi penuh dipakai untuk peralatan yang dihubungkan pada sistem dengan pembumian tidak efektif dan tingkat isolasi yang dikurangi (diturunkan) untuk sistem dengan pentanahan efektif. Ini disebabkan karena kenaikan tegangan pada fasa yang sehat untuk gangguan satu fasa ke tanah pada sistem dengan pengetanahan efektif lebih rendah dibandingkan dengan keadaan pengetanahan tidak efektif; karena itu *arrester* dengan tegangan dasar yang lebih rendah dapat dipakai.

Tabel 2.1 Tingkat Isolasi yang Direkomendasikan IEC

Tegangan Maks. untuk Perencanaan Peralatan (kV)	Tegangan Pengujian (kV)	
	Isolasi Penuh	Isolasi Dikurangi
100	450	380
123	550	450
145	650	550 450
170	750	660 550
245	1050	900 825 750
300		1175 1050 900

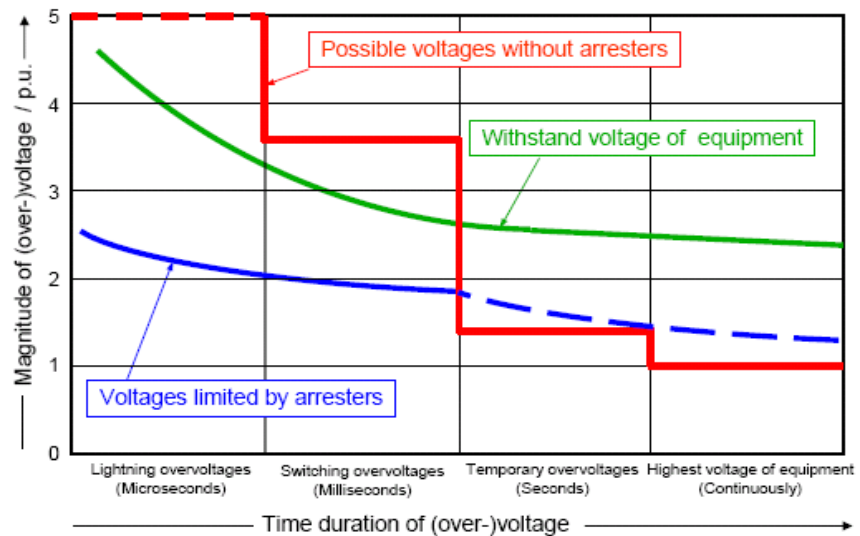
2.2.5 *Lightning Arrester*

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 pentanahan 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.

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 melewatkan 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*. Berikut adalah gambar grafik perbandingan besar tegangan terhadap waktu yang timbul pada sistem dengan *arrester* dan tanpa *arrester*.



Gambar 2.4 Grafik level tegangan sistem yang dilewatkan menggunakan *arrester* dan tanpa *arrester* akibat sambaran petir

Melalui kurva tersebut terlihat bahwa durasi *overvoltage* berbeda satu sama lain, yaitu:

- 1) *Lightning Overvoltage* – durasi *microseconds*
- 2) *Switching Overvoltage* – durasi *milliseconds*
- 3) *Temporary Overvoltage* – durasi *second*, misal akibat gangguan sistem

2.2.5.1 Teknologi Lightning Arrester

Teknologi LA sudah dikembangkan sejak 100 tahun silam, bersamaan dengan dimulainya penggunaan listrik secara massal. Secara ringkas sejarahnya 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</i> (SiC) |
| 1960 – 1982 | : <i>Active Gapped Silicon Carbide</i> (SiC) |

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.

2.2.5.2 Klasifikasi Lightning Arrester

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

- a. LA di sisi *incoming* transmisi gardu induk
- b. LA di dekat peralatan transformator



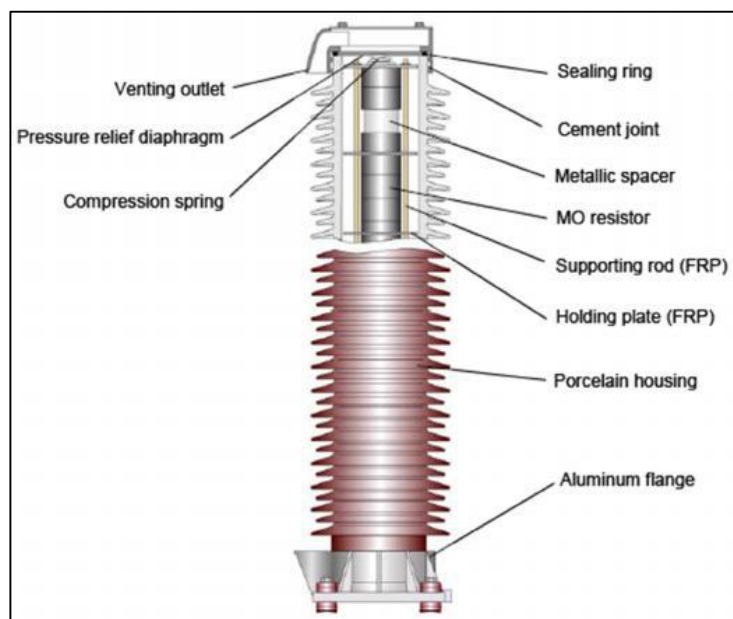
Gambar 2.5 LA di Gardu Induk dengan *housing* porselen (kiri) dan *housing polymer* (kanan)

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.

2.2.5.3 Konstruksi Lightning Arrester

Arrester memiliki bentuk keping blok, tersusun di dalam *housing* / kompartemen yang terbuat dari porselen atau polymer. Selain sebagai penyangga, *housing* ini juga berfungsi untuk menginsulasi antara bagian bertegangan dan tanah pada tegangan operasi arrester.



Gambar 2.6 Konstruksi LA

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 betuk 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.



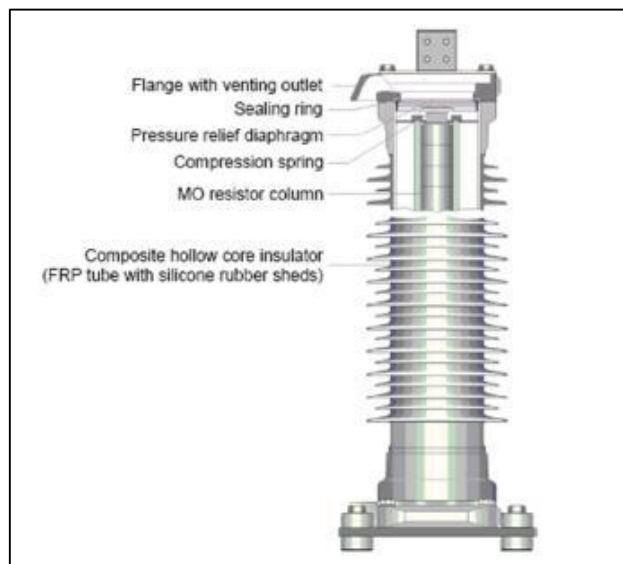
Gambar 2.7 Keping Blok Varistor Zinc Oxide

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 voltagenya* sebesar 450 V/mm, sementara untuk diameter 70 mm nilai *residual voltagenya* 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 meenyebabkan tinggi LA mencapai 3 meter,

dimana kestabilan mekanis LA tidak baik, oleh karenanya LA juga didesain untuk dipasang bertingkat (*stacked*).

2) *Housing LA*

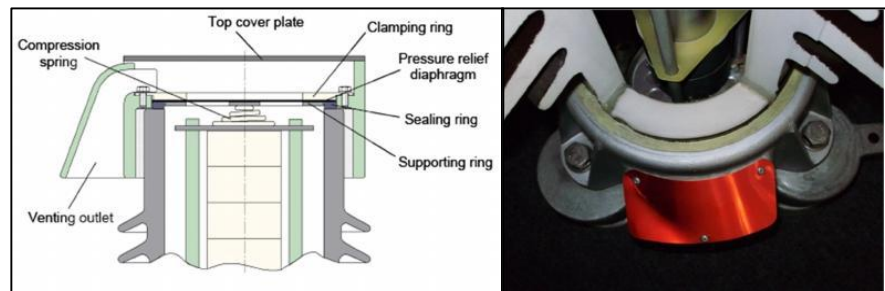
Tumpukan keping ZnO ditaruh dalam sangkar rod, umunya terbuat dari FRP (*Fiber Glass Reinforced Plastic*). *Compression spring* dipasang pada kedua ujung kolom *active part* untuk memastikan susunan keping memiliki ketahanan mekanis. Kompartemen *housing* dapat terbuat dari porselen ataupun polimer.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



Gambar 2.8 Konstruksi Housing LA

3) *Sealing dan Pressure Relief System*

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

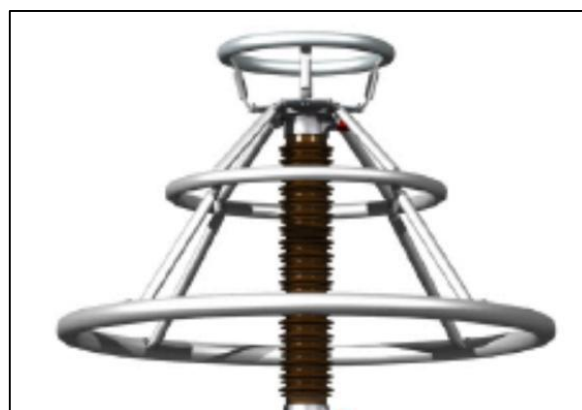


Gambar 2.9 Sealing dan Pressure Relief System LA

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 listrik sepanjang permukaan LA. Medan listrik 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 2.10 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 2.11 Counter LA dan Counter Meter Arus Bocor Total LA



Gambar 2.12 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 2.13 Struktur Penyangga LA

2.2.5.4 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 porselen 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.

2.2.5.5 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.

2.2.5.6 Pemilihan *Lightning Arrester*

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

Tabel 2.2 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	150 kV	66 kV	20 kV

tegangan tinggi) Tingkat Isolasi Dasar	650 kV	325 kV	125 kV
<u>Penangkap Petir</u>			
Tegangan Pengenal	138 kV ¹⁾ 150 kV ¹⁾	75 kV ¹⁾	21 kV ¹⁾ 24kV ¹⁾
Arus Pelepasan Nominal	10 kA	10 kA 5 kA	5 kA ²⁾
Tegangan Pelepasan	460 kV ¹⁾ 500 kV ¹⁾	270 kV ¹⁾	76 kV ¹⁾ 87 kV ¹⁾
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 10 kA tugas ringan	10 kA tugas ringan 5 kA seri A	5 kA seri A

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

Catatan : 1) Bilamana tidak diperoleh persesuaian perihal tegangan pengenal penangkap petir, maka tingkat pengaman dari penangkap petir dipakai sebagai pedoman.

2) Bilamana penangkap petir akan dipakai untuk melindungi gardu induk dan transformator tenaga seharusnya dipakai penangkap petir 10 kA tugas ringan.

2.3 Kerangka Pemikiran

Adapun langkah-langkah penelitian ini dapat dilihat pada *flow chart* berikut:



Gambar 2.14 Kerangka Pemikiran