

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini akan dibahas mengenai tinjauan pustaka dan teori-teori yang mendukung tugas akhir ini yaitu, fenomena terjadinya petir, proses terjadinya tegangan lebih (*over voltage*) pada saluran udara tegangan tinggi (SUTT), lightning arrester, transformator tenaga 150/20 kV di Gardu Induk Bantul 150 kV serta pengenalan dan simulasi menggunakan *software* ATP (*Analysis Transient Programme*).

2.1 Tinjauan Pustaka

Ayu Sintianingrum (2016), mahasiswa Universitas Lampung dengan penelitiannya “Simulasi tegangan lebih akibat sambaran petir terhadap penentuan jarak maksimum untuk perlindungan peralatan pada gardu induk”. Dalam penelitiannya, ayu melakukan analisis tentang jarak ideal penempatan arrester untuk perlindungan transformator terhadap sambaran petir dan melakukan perbandingan besarnya tegangan dan arus surja yang mengalir pada jaringan SUTT gardu induk Teluk Betung, Lampung dengan adanya arrester atau tidak. Pada penelitiannya, ayu mensimulasikan dengan menggunakan *software* ATP Draw untuk merancang *single line diagram* gardu induk Teluk Betung dan memberikan asumsi sambaran petir dengan injeksi tegangan dan durasi waktu tertentu .

Dari hasil penelitian tersebut diperoleh bahwa hubungan antara perubahan tegangan dan arus di tiga titik, yaitu arrester, saluran transmisi dan transformator. Saat diberikan arus petir 10 kA dengan durasi 1.2/50 μ s di titik arrester, saluran transmisi dan transformator adalah 125 kV, 200 kV dan 225 kV. Kemudian ketika diberikan arus petir 20 kA dengan durasi dan titik yang sama diperoleh tegangan sebesar 140 kV, 210 kV dan 270 kV. Sedangkan untuk penambahan durasi menjadi 2/50 μ s namun pada titik yang sama, maka tegangan yang diperoleh adalah 125 kV, 75 kV dan 75 kV (untuk arus petir 10 kA) 110 kV, 130 kV dan 225 kV (untuk arus petir 20 kA).

Untuk perbandingan tegangan busbar transformator dengan menggunakan arrester dan tanpa arrester dengan durasi 1.2/50 μ s dan arus petir 10 kA diperoleh

hasil 200 kV (dengan arrester) dan 230 kV (tanpa arrester). Kemudian jika diberikan arus petir 20 kA, maka diperoleh 210 kV (dengan arrester) dan perubahan yang cukup signifikan jika arrester yaitu 345 kV. Sedangkan untuk penentuan jarak ideal arrester dengan transformator yang diizinkan adalah dengan menghitung $E_p = E_s + 2A \sqrt{v}$. Dengan memasukkan nilai E_p (tegangan jepitan transformator) = 650 kV; E_s (tegangan percik arrester) = 454 kV; A (kecuraman gelombang) = 1000 kV/ μ s dan v (kecepatan cahaya) = 300 m/ μ s Maka diperoleh hasil S (jarak) = 29,4 m

Berdasarkan data hasil penelitian tersebut, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa Tegangan lebih dengan durasi waktu $1,2/50 \mu\text{s} > 2/50 \mu\text{s}$ hal ini disebabkan karena semakin kecil durasi waktu sambaran petir, maka waktu yang dibutuhkan untuk mencapai puncak tegangan akan semakin cepat. Agar transformator dapat terlindung dari pengaruh surja petir, maka jarak ideal dari hasil simulasi antara arrester dan transformator dengan simulasi ATP Draw adalah sebesar 29,4 meter.

Herman Halomoan Sinaga (2005), dosen Universitas Lampung dengan penelitiannya “Model arrester SiC menggunakan model arrester ZnO IEEE WG 3.4.11”. Dalam penelitian ini, Herman melakukan pemodelan arrester SiC yang didasarkan pada model IEEE WG 3.11 tahun 1992, menggunakan perangkat lunak EMTP. Arrester dengan bahan SiC mempunyai sela (*gap*) yang dimodelkan dengan menggunakan arrester ZnO standard IEEE WG.3.4.11 tahun 1992, dengan adanya penambahan saklar yang dipengaruhi tegangan. Maksud dari penambahan sela (*gap*) bertujuan untuk menirukan proses *flashover* pada sela arrester. Saklar ini dipasang secara serial dengan arrester SiC yang digunakan.

Dari hasil penelitian tersebut dilakukan perbandingan antara respon simulasi arrester, respon pengujian arrester, dan respon arrester terhadap surja tegangan 51 kV dan menggunakan arrester SiC 12 kV dengan durasi waktu 1.2 μ s dan diperoleh hasil ketika tegangan surja simulasi 1.6×10^4 kV dengan waktu 6.1×10^{-5} s dan tegangan surja pengujian 1.6×10^4 kV dengan waktu 7×10^{-5} s, maka respon arrester pengujian dan arrester simulasi adalah 1.6×10^4 kV dengan waktu 1.7×10^{-5} s dan 0.8×10^4 kV dengan waktu 1.7×10^{-5} s.

Dari hasil penelitian tersebut dilakukan perbandingan antara *spark over* arrester tegangan uji 51 kV dan tegangan residual arrester 51 kV sehingga diperoleh

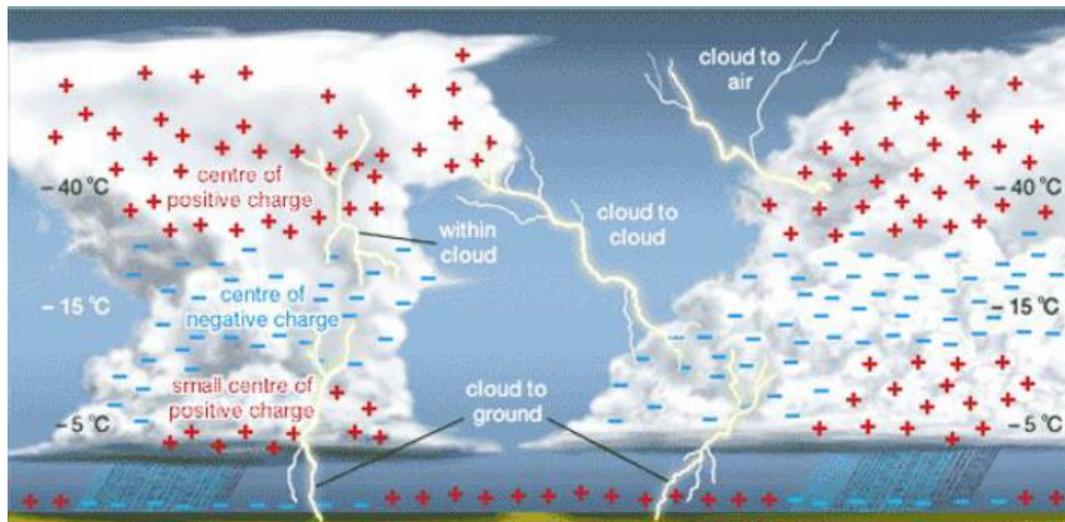
hasil ketika *spark over* arrester 51 kV tegangan surja uji dan tegangan surja simulasi dengan durasi 1.2 μ s adalah 490 kV sedangkan ketika tegangan residual arrester 51 kV tegangan surja uji dan tegangan surja simulasi dengan durasi 1.2 μ s adalah 225 kV. Kemudian ketika diberikan impuls tegangan 54 kV pada *spark over* dan tegangan residual arrester dengan durasi 1.2 μ s, maka tegangan surja uji dan tegangan surja simulasi pada *spark over* arrester adalah 530 kV dan 495 kV sedangkan untuk tegangan surja uji dan tegangan surja simulasi residual arrester adalah sama yaitu 225 kV.

Berdasarkan data hasil penelitian tersebut, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa arrester ZnO oleh IEEE WG 3.4.11 tahun 1992 dapat digunakan sebagai dasar pemodelan dari arrester SiC. Pada arrester SiC 12 kV, menghasilkan selisih tegangan potong (*spark over*) sebesar 4.332% dan selisih tegangan residu arus sebesar 3.259%.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Fenomena Terjadinya Petir

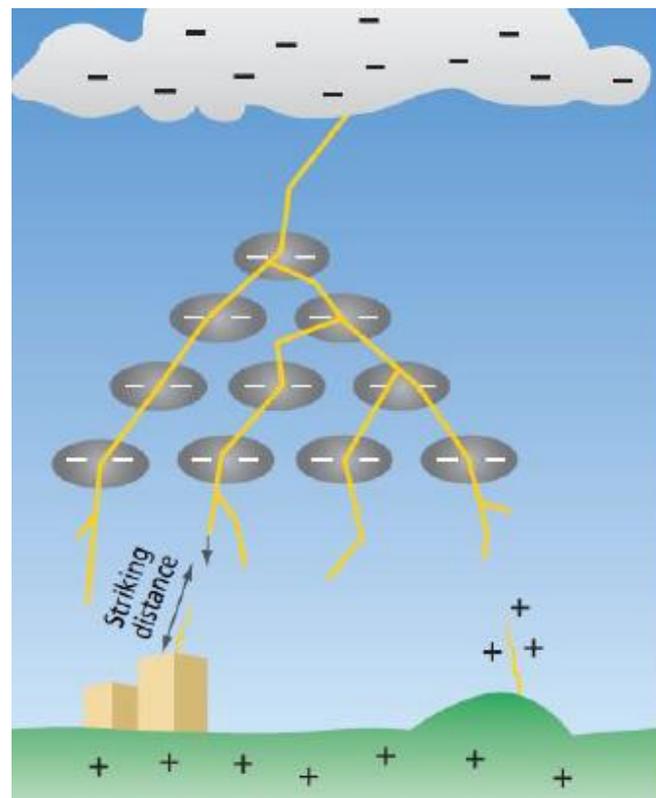
Awan terdiri dari daerah bermuatan positif dan negatif. Pusat-pusat muatan ini menginduksikan muatan berpolaritas berlawanan ke awan terdekat atau ke bumi. Gradien potensial di udara antara pusat-pusat muatan di awan atau antara awan dan bumi tidak seragam tapi gradien tersebut timbul pada bagian konsentrasi muatan tinggi. Ketika gradien tegangan tinggi pada titik konsentrasi muatan dari awan melebihi harga tembus udara yang terionisasi, maka udara di daerah konsentrasi tekanan tinggi mengionisasi atau tembus (*breakdown*). Muatan dari pusat muatan mengalir ke dalam kanal terionisasi mempertahankan gradien tegangan tinggi pada ujung kanal dan melanjutkan proses tembus listrik. Sambaran petir ke bumi mulai ketika suatu muatan sepanjang pinggir awan menginduksikan suatu muatan lawan ke bumi seperti gambar berikut.



Gambar 2.1 Proses pembentukan awan bermuatan

(sumber: Rogerio-IEEE, 2015:4)

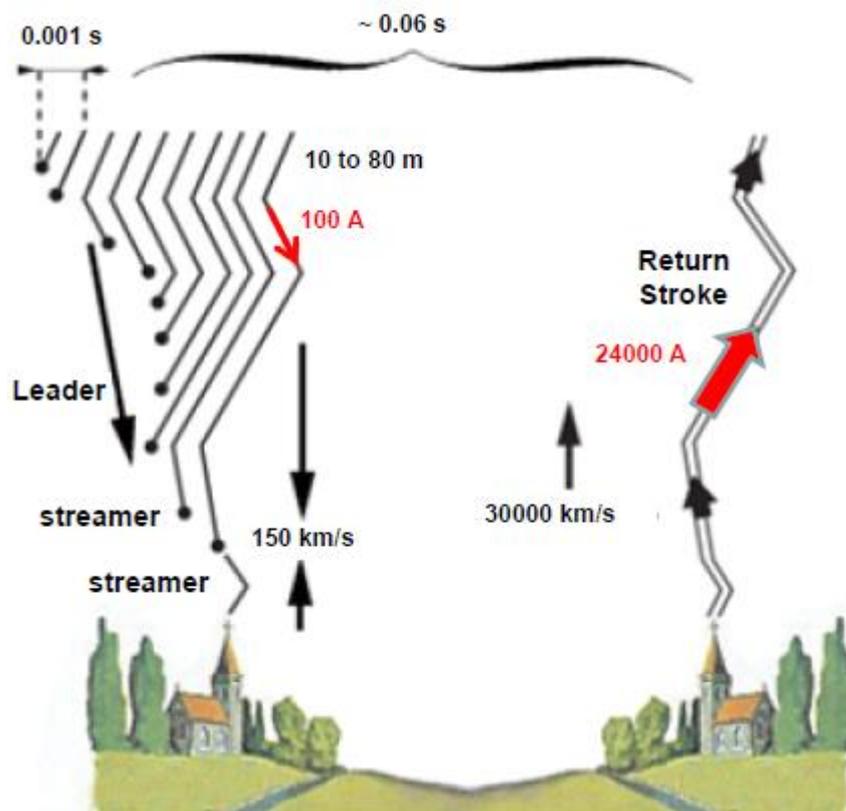
Kemudian akan timbul lidah petir kearah bawah yang menyebar dari awan ke bumi seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 2.2 Lidah petir menjalar ke arah bumi

(sumber: Rogerio-IEEE, 2015:5)

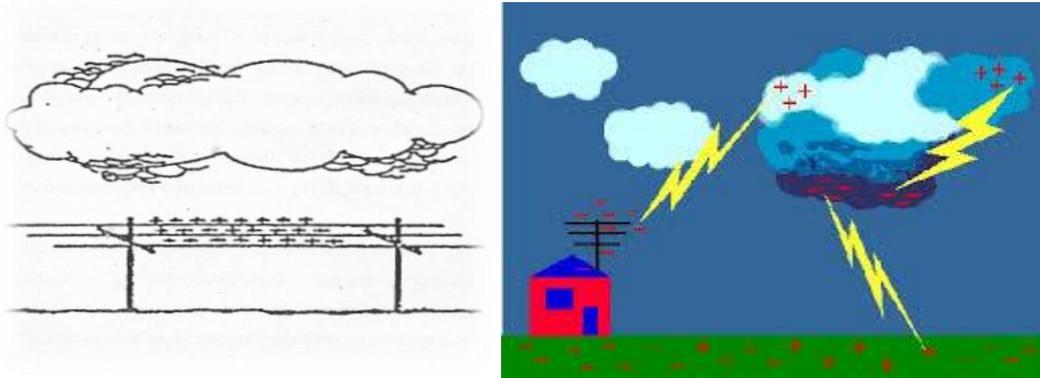
Ketika lidah petir menjalar ke permukaan bumi, maka selang beberapa mili detik akan timbul sambaran petir kembali kearah atas (awan) dan biasanya dari titik sambaran petir tertinggi disekitarnya. Bila lidah petir kearah atas dan kearah bawah bertemu (150 km/s) seperti terlihat pada gambar dibawah, maka akan terjadi suatu hubungan awan dan bumi sehingga proses pelepasan energi muatan awan ke dalam tanah (*ground*) terjadi.



Gambar 2.3 Kilat sambaran balik dari bumi ke awan

(sumber: Rogerio-IEEE, 2015:6)

Kemudian muatan dari awan tersebut akan terinduksi ke saluran transmisi (jaringan listrik) yang berada disekitar sambaran petir ke tanah. Walaupun muatan awan dan bumi tersebut akan dinetralisir oleh tanah, namun kemungkinan terjadinya tegangan lebih (*over voltage*) akibat induksi pada saluran transmisi sangat tinggi sehingga diperlukan proteksi (kabel *ground*) pada saluran transmisi. Berikut adalah gambar dari proses netralisir muatan awan ke bumi.



Gambar 2.4 Kumpulan muatan pada saluran distribusi

(sumber: Warsito, 2009:172)

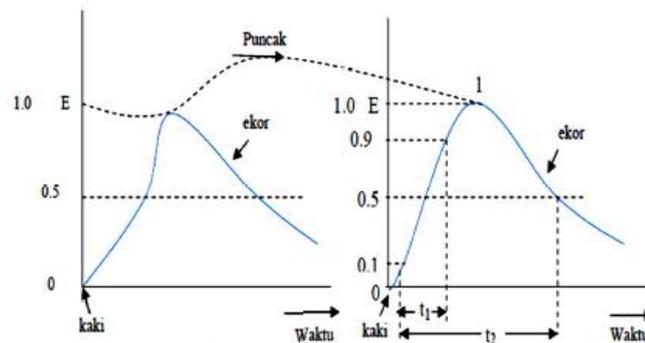
Sampai saat ini belum ada ilmuwan yang pernah mencetuskan langsung bagaimana proses terjadinya sambaran petir. Namun, para ilmuwan menduga bahwa lompatan bunga api listrik (muatan positif dan negatif) yang ada pada petir diakibatkan karena adanya beberapa tahapan. Berikut adalah tahapan penyebab terjadinya petir yaitu:

1. Tahap pemampatan muatan yang terjadi di awan (mengumpulnya uap air di dalam awan).
2. Terjadi loncatan muatan listrik (positif dan negatif) antara awan dengan bumi.
3. Ketinggian antara permukaan atas dan permukaan bawah pada awan dapat mencapai jarak sekitar 8 km dengan temperatur bagian bawah sekitar -5°C dan temperatur bagian atas sekitar -40°C . Akibatnya, di dalam awan tersebut akan terbentuk kristal-kristal es.
4. Karena di dalam awan terdapat angin ke segala arah, maka kristal-kristal es tersebut akan saling bertumbukan dan bergesekan sehingga terpisahkan antara muatan positif dan muatan negatif.
5. Bagian atas awan bermuatan negatif, bagian tengah awan bermuatan positif dan di bagian bawah awan bercampur antara muatan positif dan negatif. Pemisahan muatan inilah yang menjadi penyebab utama terjadinya sambaran petir.

2.2.2 Gelombang Berjalan (*Travelling Wave*)^{[9][13]}

Bentuk umum suatu gelombang berjalan digambarkan seperti pada gambar 2.5 berikut. Adapun spesifikasi dari suatu gelombang berjalan antara lain:

- Puncak (*crest*) gelombang, E (kV) yaitu amplitudo maksimum dari gelombang.
- Muka gelombang, t_1 (mikro detik) yaitu waktu dari permulaan sampai puncak gelombang. Dalam praktek ini diambil dari 10% E (gambar 2.5)
- Ekor gelombang, yaitu bagian dibelakang puncak. Panjang gelombang t_2 (mikro detik) yaitu waktu dari permulaan sampai titik 50% E pada ekor gelombang.
- Polaritas, yaitu polaritas dari suatu gelombang berjalan (positif atau negatif).



Gambar 2.5 Spesifikasi gelombang berjalan

(sumber: Wibowo, 2012:31)

Suatu gelombang berjalan (surja) dapat dinyatakan dengan perbandingan sebagai berikut:

$$E, t_1/t_2 \quad (2.1)$$

E = Tegangan puncak gelombang (kV)

t_1/t_2 = Rasio muka gelombang terhadap ekor gelombang surja (ms)

Jika polaritas positif suatu gelombang surja dengan puncak 1000 kV, maka tiap 3 μ s, dan panjang 21 μ s dapat dinyatakan sebagai : +1000, 3/21.

Berdasarkan gangguannya sebab-sebab terjadinya gelombang berjalan dapat dibagi menjadi 5, yaitu sebagai berikut:

1. Sambaran petir secara langsung (*direct strike*) pada kawat penghantar,
2. Sambaran petir tidak langsung pada kawat (induksi),
3. Operasi pemutusan (*switching operation*),
4. Busur tanah (*arching ground*),
5. Gangguan-gangguan pada sistem oleh berbagai kesalahan

2.2.3 Proses Terjadinya Tegangan Lebih (*Over Voltage*) Akibat Surja Petir (*Lightning Surge*) Pada Saluran Transmisi

Tegangan lebih (*over voltage*) adalah tegangan yang terjadi pada kawat penghantar tegangan tinggi yang disebabkan karena adanya penyuntikan energi secara tiba-tiba pada kawat fasa baik karena sambaran petir (*surge voltage*) atau hubung singkat (*switching*). Tegangan lebih (*over voltage*) merupakan tegangan yang melewati batas (*rating*) dasar peralatan atau BIL (*Basic Impulse Insulation Level*) peralatan serta hanya dapat ditahan oleh sistem pada waktu yang terbatas. Tegangan lebih merupakan tegangan peralihan (*transient*) dari kondisi abnormal ke kondisi normal. Salah satu gangguan dari luar sistem adalah sambran petir, baik secara langsung maupun tidak langsung (induksi) mengenai kawat penghantar atau kawat tanah dari saluran udara tegangan tinggi.

Dalam menghitung pengaruh kawat tanah terhadap tegangan induksi diperkenalkan faktor perisaian (FP) yang didefinisikan sebagai hasil bagi tegangan induksi dengan kawat tanah dan tegangan induksi tanpa kawat tanah. Apabila saluran udara tegangan tinggi disambar oleh petir, maka pada saluran tersebut terjadi kegagalan perisaian yang mengakibatkan petir menyambar langsung kawat fasa sehingga muatan yang dilepas oleh petir pada konduktor akan mengalir ke dua arah yang berlawanan (*upstream* dan *downstream*) dalam bentuk gelombang berjalan (surja). Berikut adalah gambar dari tegangan (muatan) yang terbagi menjadi dua bagian.



Gambar 2.6 Sambaran langsung pada kawat fasa yang mengalir ke dua arah
(*upstream* dan *downstream*)
(sumber: Gassing, 2012:4)

Tegangan induksi didefinisikan sebagai tegangan yang disebabkan oleh adanya muatan pada sambaran petir yang terjadi disuatu titik disekitar saluran fasa (konduktor). Saat terjadi sambaran petir pada kawat fasa (konduktor), maka akan timbul nilai impedansi surja. Impedansi surja dipengaruhi oleh nilai dari konstanta induktansi (L) dan kapasitansi (C) yang merambat pada kawat penghantar. Kedua konstanta tersebut akan dipengaruhi oleh karakteristik dari kawat penghantar (konduktor). Secara matematis impedansi surja untuk kawat udara dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$Z = \sqrt{L/C} = 60 \ln \left(2 \frac{h}{r} \right) \Omega^{[5]} \quad (2.2)$$

Keterangan:

r = Jari-jari kawat (cm)

h = Tinggi kawat diatas tanah (m)

Berdasarkan cara sambarannya, sambaran petir dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

2.2.3.1 Sambaran Langsung (*Direct Strike*)

Berdasarkan objeknya sambaran langsung (*direct strike*) dibagi kedalam tiga jenis sambaran, yaitu:

- a. Sambaran pada kawat fasa

Jika sambaran petir tersebut mengenai kawat fasa pada suatu titik maka akan muncul gelombang berjalan ke dua arah yang berlawanan pada saluran tersebut. Tegangan yang terjadi pada suatu titik di saluran (kawat penghantar) akibat sambaran petir akan dibaca oleh isolator. Persamaan matematis dari tegangan yang dibaca oleh isolator adalah sebagai berikut.

$$V = \frac{Z I}{2} \quad (2.3)$$

Sedangkan nilai impedansi surja pada kawat fasa dapat ditentukan dari persamaan berikut ini (Hileman).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.4)$$

Dengan

Z_0 = Impedansi surja natural

Dimana nilai induktansi dan kapasitansi konduktor saluran udara tegangan tinggi diperoleh dari persamaan berikut:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2h}{r} \quad (2.5)$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln \frac{2h}{r}} \quad (2.6)$$

Sehingga diperoleh nilai impedansi surja (*surge impedance*) pada saat sambaran petir secara langsung adalah sebagai berikut.

$$Z = \sqrt{Z_0 \cdot Z_C^1} \quad (2.7)$$

Dimana, nilai dari Z_C^1 diperoleh dari persamaan berikut.

$$Z_C^1 = 60 \ln \frac{2h_f}{R} \Omega \quad (2.8)$$

Keterangan:

h_f = Jarak rata-rata kawat fasa ke tanah (m)

R = Jari-jari efektif kawat fasa dipengaruhi korona (m)

Tabel 2.1 Nilai Z_0 menurut IEC *Publication 71-2*

Jumlah Subkonduktor	Z_0 yang diasumsikan (Ω)
1	450
2	350
3 atau 4	320
6 atau 8	300

b. Sambaran pada menara

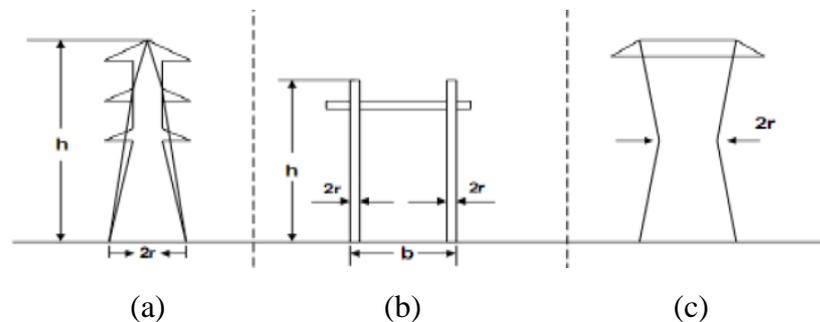
Tegangan lebih yang timbul pada menara akibat terkena sambaran petir akan dibaca oleh isolator sebagai berikut.

$$V = IR + L \frac{dI}{dt} \quad (2.9)$$

Dengan

R = Tahanan kaki menara (*tower footing resistance*)

Menurut Guidelines dari IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineering*) tahanan kaki menara dianggap konstan sedangkan menurut Cigre tahanan dipengaruhi juga oleh ionisasi tanah. Menara dapat direpresentasikan sebagai impedansi surja atau induktansi. Tegangan lebih yang terjadi pada menara sebagai impedansi surja berbanding lurus dengan arus puncak, sedangkan pada menara sebagai induktansi tegangan lebih berbanding lurus dengan kecuraman arus. Impedansi surja menara diturunkan dari bentuk geometri menara. Menurut Sargent dan Darveniza, impedansi surja menara (Z_t) tipe kerucut adalah seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.7 Penampang menara transmisi untuk menghitung impedansi surja menara
(sumber: Hutahuruk, 1991:144)

Nilai impedansi (Z_t) menara (a) persegi, (b) gantry dan (c) Korset dapat dinyatakan pada persamaan 2.10; 2.11; dan 2.12 berikut ini:

$$Z_t = 30 \ln \frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \quad (2.10)$$

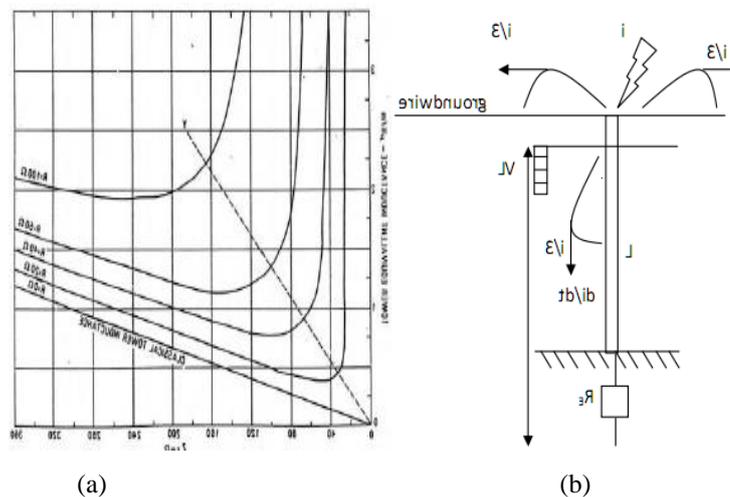
$$Z_t = \frac{1}{2} (Z_s + Z_m) \quad (2.11)$$

$$Z_t = 60 \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

Sedangkan untuk nilai Z_s dan Z_m dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$Z_m = 60 \ln \left(\frac{h}{h} \right) + 90 \left(\frac{b}{h} \right) \quad (2.13)$$

$$Z_s = 60 \ln \left(\frac{h}{r} \right) + 90 \left(\frac{r}{h} \right) \quad (2.14)$$



Gambar 2.8 (a) Kurva induktansi menara (b) Sambaran langsung pada menara transmisi
(sumber: Gassing, 2012:5)

c. Sambaran pada kawat tanah

Jika kawat tanah disambar petir, maka sebagian arus yang muncul akan mengalir ke menara. Berikut adalah persamaan matematis tegangan yang timbul pada menara.

$$V_{menara} = I \cdot R + L \frac{dI}{dt} \quad (2.15)$$

Keterangan:

dI/dt = Kecuraman arus puncak (kA/ μ s)

L = Induktansi menara (μ H)

R = Tahanan kaki menara (Ω)

Sedangkan besar tegangan lebih (*over voltage*) yang timbul pada isolator menara (*tower*) adalah sebagai berikut.

$$V = k VM \quad (2.16)$$

Keterangan:

k	= Faktor kopling kawat tanah dan kawat fasa(m)
hg	= Tinggi kawat tanah rata-rata = $h - 2/3 s$ (m)
h	= Tinggi menara (m)
s	= Panjang saluran kawat tanah (m)

2.2.3.2 Sambaran Tidak Langsung (*Indirect Strike*)

Sambaran tidak langsung terjadi apabila petir menyambar objek atau benda yang berada disekitar saluran transmisi. Pada sambaran tidak langsung ini saluran transmisi mendapat induksi sambaran petir (*lightning surge*) dari objek yang tersambar di sekitar saluran. Sambaran tidak langsung berpengaruh sangat kecil terhadap sistem kerja saluran udara tegangan tinggi. Sambaran tidak langsung (*indirect strike*) lebih berpengaruh terhadap saluran udara tegangan menengah dan tegangan rendah karena pada saluran udara tegangan menengah dan tegangan rendah relatif lebih dekat terhadap objek sekitarnya (*ground*).

2.2.4 Transformator Tenaga (*Power Transformer*)

Transformator tenaga adalah peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan terdiri dari dua atau lebih belitan (*winding*). Transformator tenaga bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik (hukum faraday) yang berfungsi untuk mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem *alternating current* (ac) ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076-1:2012). Transformator hanya dapat bekerja pada tegangan yang berarus bolak balik (*alternating current*). Transformator memegang peranan yang sangat penting dalam proses pendistribusian energi listrik dari pembangkit sampai ke beban.

Transformator tenaga (*step down*) dapat menurunkan tegangan yang berasal dari saluran transmisi 150 kV hingga menjadi 20 kV dan selanjutnya akan diturunkan kembali tegangannya menggunakan transformator *step-down* distribusi

jaringan tegangan menengah 20 kV ke jaringan tegangan rendah 380/220 volt. Oleh karena itu, dalam memberikan perlindungan transformator dari kondisi abnormal terhadap tegangan lebih (*over voltage*) yang diakibatkan oleh sambaran petir (*lightning impulse*) dan surja hubung (*switching*) harus optimal sehingga dalam pendistribusian energi listrik menuju beban dapat andal. Berikut adalah gambar dari transformator tenaga I di Gardu Induk Bantul 150 kV.



Gambar 2.9 Transformator tenaga (*power transformer*)
(sumber: GI Bantul 150 kV)

Basic Impulse Insulation Level (BIL) atau tingkat isolasi dasar impuls transformator adalah batas kemampuan transformator dalam melewati tegangan lebih (*over voltage*) akibat sambaran petir (*lightning strike*) dan hubung singkat (*switching*). Pada Gardu Induk Bantul 150 kV diperlukan kekuatan BIL sampai 750 kV atau lima kali lipat dari tegangan sistem agar dapat menghindari adanya kerusakan pada transformator tenaga akibat adanya kondisi abnormal.

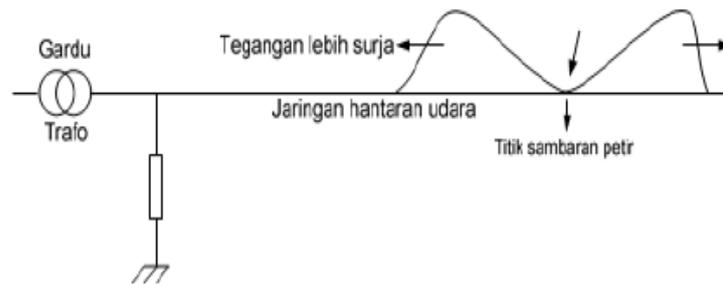
2.2.5 *Lightning Arrester* (LA)

Lightning Arrester atau biasa dikenal dengan arrester adalah sebuah alat pelindung untuk komponen sistem tenaga listrik terhadap tegangan lebih (*over voltage*), baik yang disebabkan oleh surja petir (*lightning impulse*) maupun surja hubung (*switching*). Alat ini bersifat sebagai *by pass* di sekitar isolasi yang membentuk jalan dan mudah dilalui oleh arus kilat sehingga tegangan lebih yang ditimbulkan tidak sampai mengalir pada peralatan yang dilindungi. Jalan tersebut

harus sedemikian sehingga tidak mengganggu sistem frekuensi 50 hertz. Pada keadaan normal arrester berlaku sebagai isolator, namun sebaliknya bila terjadi kondisi abnormal seperti sambaran petir atau hubung singkat, maka arrester akan menjadi konduktor yang tahanannya relatif rendah, sehingga dapat mengalirkan arus surja ke tanah (*ground*). Setelah surja hilang, maka arrester harus dengan cepat kembali bertindak sebagai isolator sehingga pemutus tenaga (PMT) tidak akan beroperasi untuk membuka. Sesuai dengan fungsinya, yaitu melindungi peralatan listrik pada sistem jaringan terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh surja hubung atau surja petir, maka pada umumnya arrester dipasang pada setiap ujung saluran transmisi yang masuk ke gardu induk.

Menurut buku "*Petunjuk Lightning Arrester*" pada PT. PLN menyebutkan bahwa arester merupakan peralatan yang didesain untuk melindungi peralatan lain dari tegangan surja baik surja hubung maupun surja petir dan pengaruh *follow current*. Sebuah arester harus mampu bertindak sebagai insulator, maksudnya pada keadaan normal tegangan sistem dapat mengalirkan beberapa miliampere arus bocor ke tanah dan dapat berubah menjadi konduktor yang sangat baik dengan mengalirkan ribuan ampere arus surja ke tanah dalam keadaan gangguan (*fault*). Arrester harus memiliki tegangan yang lebih rendah daripada tegangan *withstand* dari peralatan ketika terjadi tegangan lebih (*over voltage*) dan setelah surja petir atau surja hubung berhasil dibumikan (*ground*), maka arrester harus dapat menghilangkan arus susulan yang mengalir dari sistem (*power follow current*).

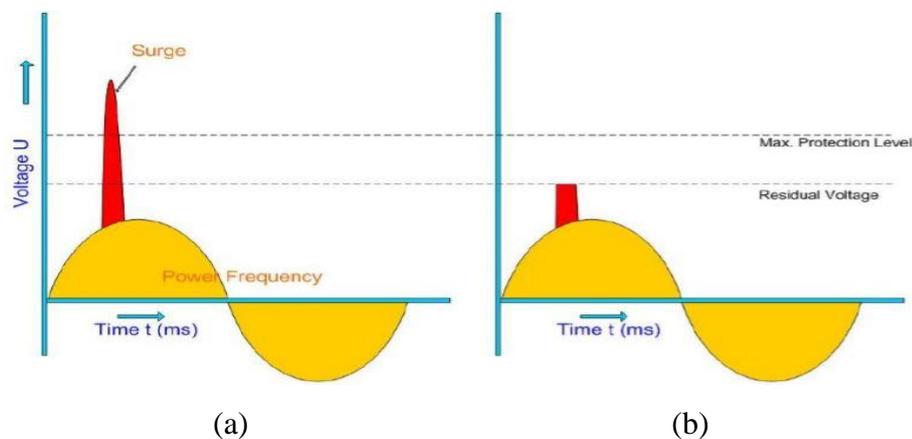
Pada gardu induk umumnya arrester dipasang pada transformator dan peralatan lainnya untuk memberikan perlindungan yang optimal terhadap tegangan lebih (*over voltage*). Adapun gambar skema penempatan arrester terhadap transformator adalah sebagai berikut.



Gambar 2.10 Penempatan arrester terhadap transformator

(sumber: Andriawan, 2014:1)

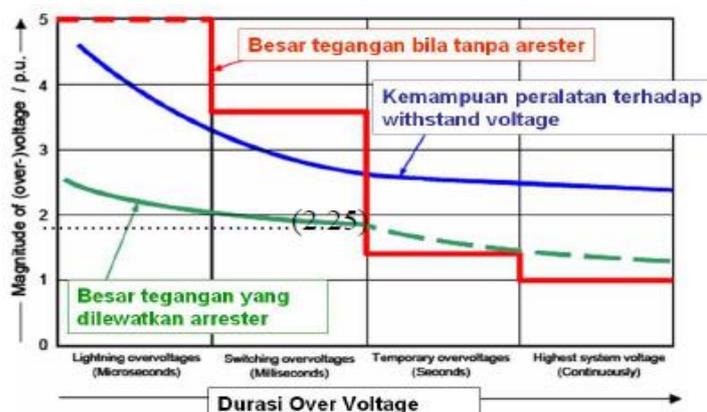
Pada saat terjadi sambaran petir atau tegangan lebih sebelum sampai ke transformator atau peralatan tegangan tinggi lainnya, arrester akan memotong dan menyalurkan tegangan lebih akibat surja petir (*lightning impulse*) ke tanah sehingga transformator atau peralatan tegangan tinggi lainnya aman dari adanya sambaran petir (*lightning impulse*). Berikut adalah gambar perbandingan gelombang tegangan terhadap waktu dalam penggunaan arrester dan tanpa arrester akibat adanya tegangan surja (*surge impulse*) dari sambaran petir.



Gambar 2.11 Gelombang tegangan lebih transien (a) Tanpa arrester (b) Dengan arrester

(sumber: Rogerio IEEE, 2015:114)

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



Gambar 2.12 Grafik level tegangan sistem yang dilewatkan menggunakan arrester dan tanpa arrester akibat sambaran petir pada peralatan gardu induk

(sumber: Hinrichsen, 2001:5)

2.2.5.1 Penelitian Arrester

Berikut ini adalah penelitian tentang arrester yang pernah dilakukan antara lain:

1. Penelitian oleh Saengsuwan dan Thipprasert dalam “*Lightning Arrester Modelling Using ATP-EMTP*”, membahas mengenai pemodelan *lightning arrester* menggunakan ATP/EMTP yang mendeskripsikan analisis operasi dari surja arrester metal oksida dari model IEEE W.G. 3.4.11 dan Pincetti menggunakan ATP/EMTP^[20].
2. Penelitian oleh Agung Setiawan dalam “*Karakteristik Unjuk Kerja Arrester ZnO Tegangan Rendah 220 volt*”, mendeskripsikan tentang karakteristik arrester ZnO 220 volt dalam mengatasi impuls untuk digunakan sebagai sistem proteksi saluran tegangan rendah dengan melakukan simulasi menggunakan program EMTP. Pada penelitian tersebut dilakukan perbandingan antara hasil pengujian arrester ZnO 220 volt dengan hasil simulasi. Pengujian dilakukan menggunakan tegangan impuls kapasitif dengan tegangan uji impuls dari 1200 volt hingga 1700 volt. Pada simulasi dilakukan dengan melakukan simulasi terhadap 3 model ZnO yaitu model IEEE, pincetti dan Saha. Dari hasil penelitian tersebut diperoleh bahwa

arrester ZnO 220 volt memiliki tegangan potong dan tegangan residu yang masih berada di bawah batas BIL. Dan model arrester IEEE dapat diterapkan sebagai model arrester tegangan rendah 220 volt dikarenakan memiliki presentase tegangan residu terkecil dibandingkan model lainnya terhadap pengujian yaitu sebesar 483 volt^[14].

3. Penelitian oleh Violeta Chis et all, mengenai "*Simulation Of Lightning Overvoltages With ATP-EMTP And PSCAD/EMTDC*" mendeskripsikan tentang pemodelan tegangan lebih petir dengan membandingkan menggunakan 2 program tersebut. Simulasi dilakukan untuk saluran transmisi 220 kV dengan menara setinggi 40 meter dan berjarak 280 meter serta tahanan kaki sebesar 30 ohm. Simulasi tegangan lebih petir selanjutnya dilakukan menggunakan *software* ATP dan PSCAD^[18].
4. Penelitian oleh Sapto Nugroho dalam "*Analisis Pengaruh Tegangan Induksi Akibat Sambaran Petir Tak Langsung di Penyulang Badai 20 kV PLN Cabang Tanjung Karang Menggunakan Simulasi EMTP*" mendeskripsikan tentang pengaruh tegangan induksi dengan jarak tertentu di saluran udara tegangan menengah terhadap besar ketahanan impuls isolasi. Penelitian dilakukan dengan menggunakan jarak sambaran yang bervariasi yaitu pada 30 m dan 50 m dari titik saluran dan arus sambaran balik petir yang digunakan dimulai dari 10 kA kemudian ke 50 kA hingga 100 kA. Simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan memodelkan penyulang Badai 20 kV PLN Cabang Tanjung Karang sebanyak 10 tiang. Pengaruh dari induksi tegangan dari saluran diukur melalui voltmeter yang terpasang pada titik awal, titik tengah dan titik akhir saluran. Pada simulasi dilakukan pemasangan arester dengan jarak pemasangan antara 300 m sampai 400 m pada saluran. Dari hasil penelitian diperoleh bahwa semakin jauh jarak sambaran maka semakin kecil nilai tegangan induksi, serta pemasangan arester dengan jarak 300 m cukup efektif untuk mengurangi tegangan lebih akibat sambaran petir tak langsung^[10].
5. Syakur Abdul et al, dalam "*Kinerja Arrester Akibat Induksi Sambaran Petir Pada Jaringan Tegangan Menengah*" membahas mengenai kinerja arrester

pada jaringan 20 kV yang disebabkan oleh induksi sambaran petir secara berulang. Rangkaian simulasi berdasarkan pada jaringan tegangan menengah 3 fasa distribusi Mojosoongo, penyulang 1. Simulasi induksi sambaran terjadi pada tiang 16 pada fasa R dan T yang disebabkan oleh sambaran berulang pada fasa S. Sambaran petir terjadi tiga kali pada saluran. Sambaran pertama 20 kA, selanjutnya 12 kA dan 9 kA. Waktu sambaran yang digunakan dari 0,6 ms dan 0,3 ms. Hasil simulasi menunjukkan pada sambaran pertama induksi tegangan fasa R sebesar 795,39 kV dan dipotong oleh arrester menjadi sebesar 11,375 kV. Sambaran kedua menyebabkan kenaikan tegangan pada fasa R sebesar 729,89 kV dan dipotong oleh arrester menjadi sebesar 2,6434 kV. Sambaran ketiga menyebabkan kenaikan tegangan induksi fasa R 497,82 kV dan dipotong arrester menjadi 11,309 kV, dimana setelah dilakukan perbandingan pada setiap fasa setelah arrester bekerja diketahui bahwa arrester tersebut dapat memotong kenaikan induksi tegangan yang cukup besar dan mampu menetralkan gangguan tegangan induksi akibat petir^[15].

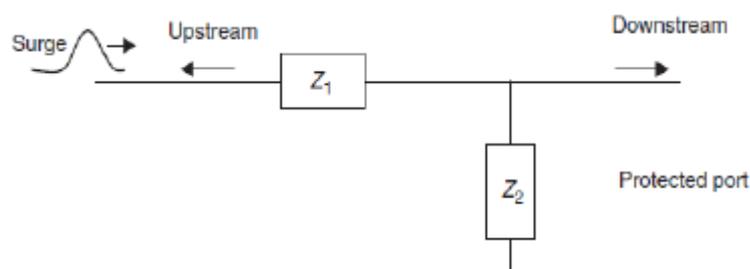
2.2.5.2 Prinsip Kerja Arrester

Lightning arrester atau biasa yang dikenal dengan arester adalah suatu alat vital dalam proteksi pada sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk melindungi saluran transmisi dan distribusi maupun peralatan penting lainnya dari bahaya tegangan lebih (*over voltage*) yang diakibatkan baik oleh sambaran petir (*lightning strike*) maupun gelombang hubung singkat (*switching*). Alat ini dihubungkan antara kawat fasa dan tanah, artinya setiap kawat fasa akan dilengkapi dengan masing-masing arrester disetiap ujungnya sebelum memasuki gardu distribusi dan bekerja dengan prinsip membatasi tegangan lebih yang datang dan berlaku sebagai jalan pintas dengan membentuk jalur yang mudah dilalui oleh arus surja menuju tanah (*ground*). Alat ini harus mampu menahan tegangan sistem normal dalam waktu yang tak terbatas dan harus dapat melewatkan arus surja ke tanah tanpa mengalami kerusakan. Arestre mampu bersifat sebagai isolator maupun konduktor tergantung dari kondisi tegangan sistem, maksudnya ketika tegangan sistem yang normal

arester bersifat sebagai isolator, namun apabila timbul tegangan lebih pada sistem yang melebihi karakteristiknya maka alat ini bersifat sebagai konduktor dengan mengalirkan arus surja ke tanah sampai batas aman untuk peralatan.

Menurut IEEE Std 1410™ (2010) dalam jurnal Kartiko (2013) mengatakan bahwa kegagalan fungsi arester dapat disebabkan karena adanya energi yang besar dari sambaran surja (*lightning surge*) sehingga semakin lama dalam pemakaian arrester maka akan berpengaruh pada kurangnya tingkat kemampuan arrester dalam memberikan perlindungan tegangan lebih (*over voltage*). Selain itu, kegagalan ini dapat terjadi saat batas *temporary overvoltage* (TOV) dari arester terlampaui [5].

Prinsip kerja rangkaian proteksi surja (arrester) secara umum ditunjukkan pada gambar dibawah ini. Sebuah rangkaian proteksi surja tidak boleh mempengaruhi operasi normal dari sistem yang diproteksi. Artinya, impedansi seri harus sangat kecil ($Z_1 \ll Z_2$) dan impedansi paralel harus sangat besar ($Z_2 \gg Z_L$) untuk tegangan dan frekuensi sinyal normal. Misalkan Z_L adalah impedansi beban seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.13 Rangkaian proteksi surja secara umum

(sumber: Vernon Cooray, 2010)

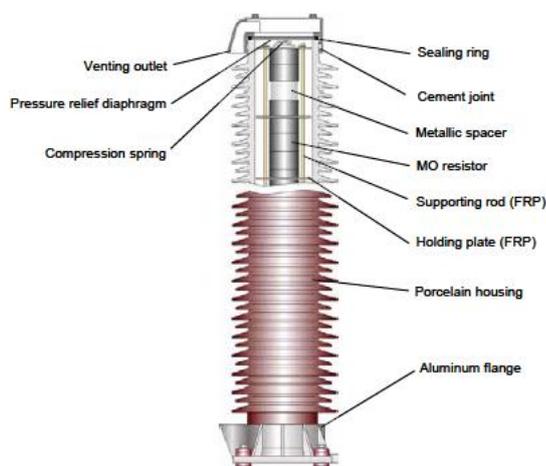
Pengalihan surja ke konduktor referensi atau bumi memiliki kelemahan, yaitu ketika arus gelombang surja yang besar menyebar melalui jaringan referensi dengan cara yang tidak terkendali, ini akan menyebabkan gangguan dalam sistem lainnya. Oleh karena itu, perlindungan dengan cara pemasangan serial lebih baik agar dapat mengendalikan gelombang surja pada sistem jaringan. Namun, sampai saat ini tidak ada perangkat non linier serial yang kuat, cepat dan handal yang dapat menggantikan perlindungan paralel arrester. Dari persyaratan tersebut, maka piranti proteksi (proteksi surja) harus *non-linear*.

Berdasarkan perangkatnya komponen *non-linear* dapat dikelompokkan menjadi 3 kelompok, yaitu:

1. Perangkat yang memiliki tegangan *konstan* selama konduksi surja (pemotongan)
2. Perangkat yang mengubah keadaan saat terjadinya sambaran petir dari isolator menjadi konduktor yang baik.
3. Perangkat yang memiliki impedansi seri yang besar untuk tegangan CM (isolator disisipkan dalam seri, misalnya CM filter, isolasi transformator, opto-isolator. Proteksi surja seri yang lain atau piranti pembatas termasuk sekering, pemutus rangkaian, induktor dan *temperature dependent resistors*).

2.2.5.3 Konstruksi Arrester

Arrester pada saluran transmisi atau gardu induk distribusi memiliki konstruksi yang hampir sama. Komponen utama arrester adalah varistor/komponen aktif yang terbuat dari *zinc oxide*. Komponen aktif (*zinc oxide*) ini berbentuk seperti keping blok dan tersusun didalam *housing*/kompartemen yang terbuat dari porselen atau *polymer*. Selain sebagai penyangga, *housing* ini juga berfungsi untuk menginsulasi antara bagian bertegangan dengan tanah pada saat arrester beroperasi. Berikut adalah gambar dari konstruksi arrester.



Gambar 2.14 Konstruksi arrester (*porcelain housed MO arrester*)

(sumber: Siemens AG, 2012:18)

Arrester juga dilengkapi dengan katup *pressure relief* dikedua ujungnya. Katup ini berfungsi untuk melepas tekanan internal yang berlebih saat arrester

dilalui arus surja. Adapun konstruksi lain dari arrester terdiri dari struktur penyangga (beton), *grading ring* untuk arrester pada transformator arus (*current transformer*) di gardu induk, pentanahan (*grounding*), dan alat monitoring (miliammeter dan *counter*).

2.2.5.4 Bagian-bagian Arrester

Adapun bagian-bagian peralatan proteksi tegangan lebih (arrester) dapat dibagi menjadi 10 bagian, yaitu sebagai berikut:

1. Varistor *Active* (*zinc oxide/metal oxide varistor*)

Menurut Vernon (2010) dalam jurnal Suwarti (2013) mengatakan bahwa *metal oxide* varistor atau oksida logam adalah piranti yang sangat populer dalam proteksi instalasi tegangan rendah. Terdiri dari kolom varistor *zinc oxide* (ZnO). Keping *zinc oxide* dicetak dalam bentuk silinder yang besaran diameter tergantung pada kemampuan penyerapan energi dan nilai *discharge* arus. Material silinder ini terbuat dari alumunium. Selain memiliki kemampuan mekanis, silinder ini dapat berfungsi sebagai pendingin. Diameter keping bervariasi dari ukuran 30 mm untuk arrester kelas distribusi sampai 100 mm untuk arrester tegangan tinggi. Setiap keping blok memiliki tinggi yang bervariasi dari 20 sampai 45 mm. Berikut adalah gambar dari komponen aktif keping *metal oxide varistor* pada arrester.



Gambar 2.15 *Metal oxide* varistor (MOV)

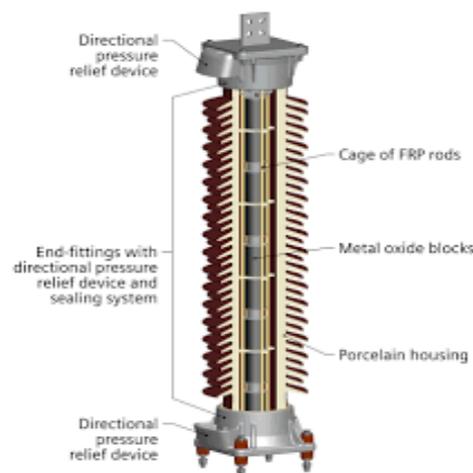
(sumber: Siemens AG, 2012:19)

Nilai *residual voltage* untuk setiap keping ZnO pada saat dilewati arus surja bergantung dari diameter keping tersebut. Misalnya, pada keping yang

berdiameter 32 mm, maka nilai *residual voltage* sebesar 450 volt/mm dan untuk keping yang berdiameter 70 mm nilai *residual voltage* menurun menjadi 280 volt/mm. Hal ini berarti, pada satu keping ZnO dengan diameter 70 mm dengan tinggi 45 mm terdapat kemampuan *residual voltage* sebesar 12,6 kV. Namun, bila nilai *residual voltage* yang diinginkan sebesar 823 kV, maka diperlukan 66 keping ZnO yang disusun secara vertikal. Sehingga diperkirakan tinggi arrester dengan kapasitas *residual voltage* 823 kV mencapai 3 meter dan mengakibatkan tingkat kestabilan arrester menjadi berkurang. Oleh karena itu, dalam pengaplikasiannya apabila arrester yang ingin digunakan memiliki tinggi diatas 1 meter, maka harus dipasang secara bertingkat (*stacked*) agar dapat meningkatkan kestabilan dari arrester tersebut.

2. *Housing* dan Terminal arrester

Tumpukan keping ZnO diletakkan dalam sangkar *rod*, umumnya terbuat dari FGRP (*Fiber Glass Reinforced Plastic*). *Compression spring* dipasang pada kedua ujung kolom *active part* untuk memastikan susunan keping ZnO memiliki ketahanan mekanis. *Kompartement housing* terbuat dari porselen atau *polymer*. *Aluminium flange* direkatkan pada kedua ujung *housing* dengan menggunakan semen. Berikut adalah gambar dari *housing* dan terminal arrester secara umum.



Gambar 2.16 *Housing* arrester

(sumber: Energy.siemens.com)

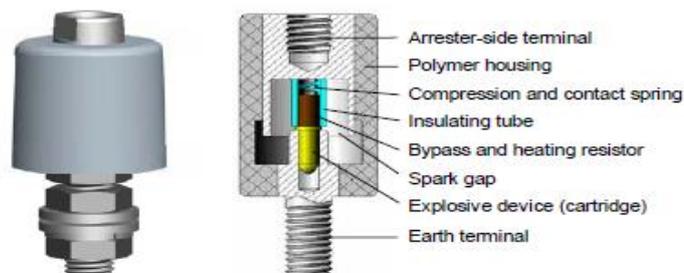
Pada ujung atas *housing* akan dihubungkan dengan konduktor fasa menggunakan terminal arrester. Umumnya terminal yang digunakan pada arrester ada dua jenis yaitu, terminal pejal dan terminal plat. Pada dasarnya desain dan dimensi dari kedua jenis terminal ini sama sehingga pemakaiannya tergantung dari jenis konduktor fasa yang akan dihubungkan ke terminal. Berikut adalah gambar dari kedua jenis terminal (pejal dan plat) yang terpasang pada ujung-ujung arrester.



Gambar 2.17 Terminal pejal (kiri) dan Terminal plat (kanan)
(sumber: Siemens AG, 2012:27)

3. Pemisah (*Disconnect*)

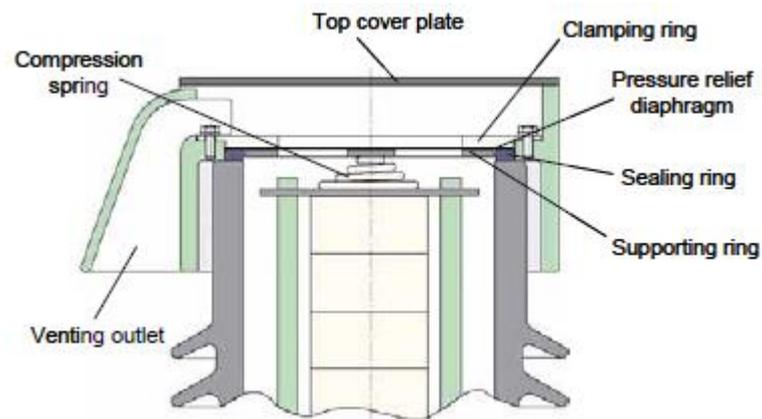
Disconnect adalah sebuah perangkat pada terminal pembumian arrester yang memisahkan arrester dari sistem setelah terjadinya gangguan (kelebihan beban). Perangkat ini berperan sangat penting dalam menghubungkan polimer dengan rumah (*housing*) arrester. Apabila terjadi gangguan dan kegagalan dalam beroperasi, maka *housing* arrester tidak akan rusak karena *explosive device* akan memisahkan diri dari sisi terminal arrester. Tanpa pemisah (*disconnect*) sistem netral yang dibumikan pada arrester saat terjadi gangguan tidak akan bekerja lagi.



Gambar 2.18 Pemisah (*disconnect*)
(sumber: Siemens AG, 2012:88)

4. *Sealing dan pressure relief system*

Sealing dan pressure relief system dipasang dikedua ujung arrester. *Sealing ring* terbuat dari material sintetis dan *pressure relief* terbuat dari baja/nikel dengan kualitas tinggi. *Pressure relief* bekerja sebagai katup pelepasan tekanan internal pada saat arrester mengalirkan arus lebih surja sambaran petir. Berikut adalah gambar dari *sealing dan pressure relief system* pada arrester.

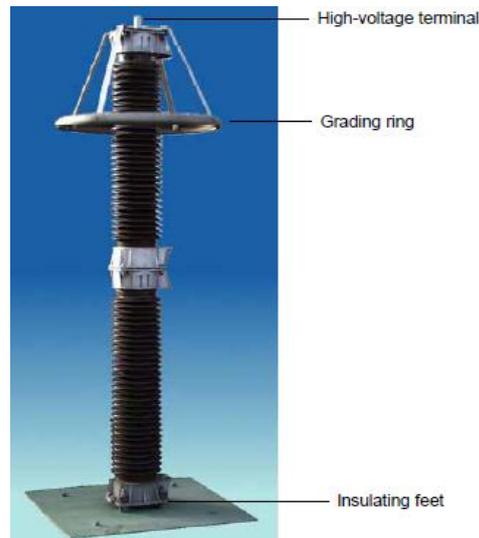


Gambar 2.19 *Sealing and pressure relief system of high voltage porcelain housed MO arrester*

(sumber: Siemens AG, 2012:19)

5. *Grading ring*

Grading ring diperlukan pada arrester dengan ketinggian > 1.5 meter atau pada arrester yang dipasang bertingkat. *Grading ring* berfungsi sebagai kontrol distribusi medan listrik sepanjang permukaan arrester. Medan listrik pada bagian yang dekat dengan tegangan akan lebih tinggi sehingga *stress* pada *active part* diposisi tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan pada posisi dibawahnya. *Stress* ini dapat menyebabkan degradasi pada komponen *active part*. Pemilihan ukuran *grading ring* perlu mempertimbangkan jarak antar fasa. Jarak aman antar konduktor sama dengan jarak antar *grading ring* dengan fasa dari arrester. Berikut adalah gambar dari susunan dua arrester tegangan tinggi dengan *grading ring*.



Gambar 2.20 Susunan dua buah arrester tegangan tinggi dengan *grading ring*
(sumber: Siemens AG, 2012:19)

6. Peralatan monitoring dan insulator dudukan arrester

Arrester harus dilengkapi dengan peralatan monitoring, yakni *discharge counter* dan miliammeter (mA). Sebelum ditanahkan kawat pentanahan dilewatkan terlebih dahulu melalui peralatan monitoring. Oleh karena itu, isolator dudukan perlu dipasang dengan baik pada kedua ujung peralatan monitor dan dudukan arrester agar arus yang melewati arrester hanya melalui kawat pentanahan. Berikut adalah gambar dari insulator dudukan arrester.



Gambar 2.21 Isolator dudukan arrester
(sumber: GI Bantul 150 kV dan Siemens AG, 2012:25)

Adapun peralatan monitoring arrester adalah sebagai berikut:

a. Miliammeter (mA)

Miliammeter digunakan untuk memantau arus bocor yang dipasang antara arrester dan konduktor pentanahan. Jika arus bocor melewati batas yang diijinkan (2 mA), maka isolator arrester harus dibersihkan. Pada saat arrester bekerja (*discharge*), sela percikan (*spark gap*) akan menyala tanpa melalui miliammeter. Setelah arrester bekerja, maka dengan cepat percikan api padam sehingga miliammeter siap untuk operasi kembali. Berikut adalah gambar dan bagian-bagian dari *counter* dan miliammeter.



Gambar 2.22 *Discharge counter* dan miliammeter (mA)
(sumber: GI Bantul 150 kV dan Siemens AG, 2012:95)

b. *Discharge counter*

Discharge counter berfungsi untuk memantau jumlah kerja arrester yang terpasang antara arrester dan terminal pentanahan. Berikut adalah gambar dari *discharge counter* di Gardu Induk Bantul 150 kV.



Gambar 2.23 *Discharge counter* arrester dan miliammeter (mA)
(sumber: GI Bantul 150 kV)

Rumah (1) terbuat dari campuran alumunium yang tahan korosi, bagian depannya ditutup dengan pelat baja tahan karat dan dihubungkan ke tanah melalui terminal. Terminal berisolator (2) dihubungkan dengan terminal bawah arrester. Pemasangan miliammeter dan *discharge counter* dihubung seri dengan arrester dan diletakkan antara arrester dan pentanahan, dengan susunan sebagai berikut.



Gambar 2.24 Posisi pemasangan perlengkapan arrester
(sumber: GI Bantul 150 kV)

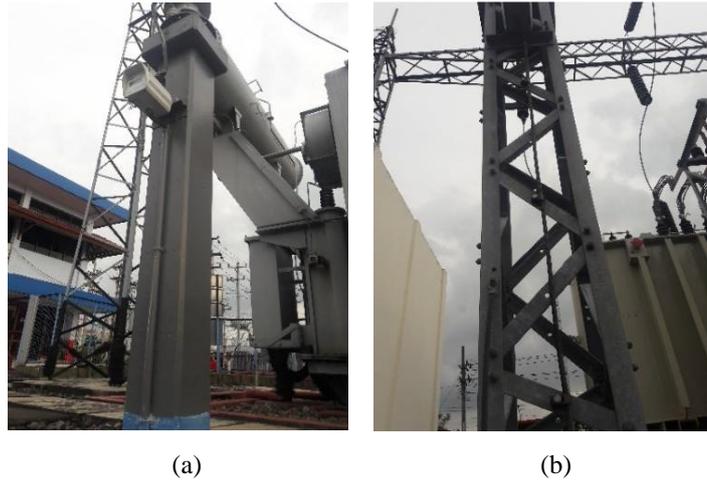
Keterangan:

- | | |
|---------------------|------------------------------------|
| 1. Konduktor fasa | 4. <i>Discharge counter</i> |
| 2. Arrester | 5. Pentanahan (<i>grounding</i>) |
| 3. Miliammeter (mA) | |

Umumnya miliammeter (mA) dan *discharge counter* dipasang di satu tempat seperti yang ditunjukkan pada gambar diatas (3 dan 4). Hal ini bertujuan untuk memudahkan bagi teknisi dalam pengecekan apabila terjadi gangguan selama beroperasi.

7. Struktur penyangga arrester

Arrester dipasang pada ketinggian tertentu dari permukaan tanah, maka diperlukan struktur penyangga yang terdiri dari pondasi dan struktur besi penyangga yang kuat dan kokoh. Berikut adalah penyangga arrester yang terbuat dari beton dan baja di Gardu Induk Bantul 150 kV.



Gambar 2.25 Struktur penyangga arrester dari (a) Besi yang dilapisi beton (b) Baja
(sumber: GI Bantul 150 kV)

8. Elektroda

Elektroda adalah terminal dari arrester. Terdapat dua elektroda pada arrester, yaitu elektroda atas yang berhubungan langsung dengan bagian yang bertegangan (kabel konduktor/fasa) dan elektroda bagian bawah yang dihubungkan ke tanah. Berdasarkan besar tegangannya elektroda pada arrester dibagi menjadi dua jenis yaitu elektroda 3 fasa dan elektroda 2 fasa. Berikut adalah gambar dari masing-masing elektroda pada arrester.



(a) Elektroda 3 fasa (b) Elektroda 2 fasa

Gambar 2.26 Elektroda pada arrester
(sumber: Indonesianalibaba.com)

9. Sela percikan (*Spark gap*)

Apabila terjadi tegangan lebih (*over voltage*) oleh sambaran petir (surja) atau hubung singkat (*switching*) pada arrester yang terpasang, maka pada sela percikan (*spark gap*) akan terjadi loncatan bola api (busur api). Pada beberapa tipe arrester busur api tersebut ditiup keluar oleh tekanan gas yang ditimbulkan oleh tabung fiber yang terbakar. Umumnya *Spark gap* terdapat dalam tabung keramik yang diisi dengan gas inert (gas tabung *discharge*).

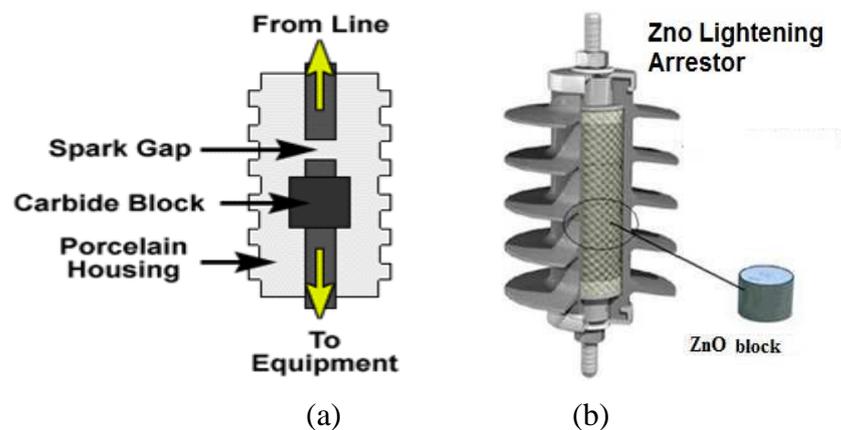


Gambar 2.27 *Spark gap* arrester

(sumber: eham.net dan exportersindia.com)

10. Tahanan katup (*valve resistor*)

Tahanan yang digunakan dalam arrester ini adalah jenis material yang sifat tahanannya dapat berubah-ubah bila mendapatkan perubahan tegangan. Berdasarkan materialnya, tahanan katup (*valve resistor*) dibedakan menjadi dua yaitu jenis *silicon carbid* (SiC) dan jenis *Zinc Oxide* (ZnO). Berikut adalah gambar dari kedua jenis tahanan katup (*valve resistor*) pada arrester.



Gambar 2.28 Tahanan katup varistor (*valve resistor*)

(a) jenis SiC (*Sillicon Carbid*) (b) ZnO (*Zinc Oxide*)

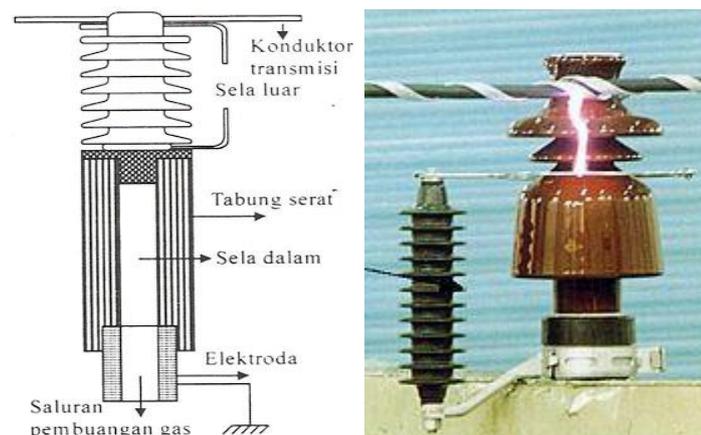
(sumber: apoogenet.com dan researchgate.com)

2.2.5.5 Jenis Arrester

Seperti peralatan yang lain pada gardu induk, arrester juga memiliki bermacam jenis, kelas dan golongan. Hal ini berdasarkan kemampuan arrester dari berbagai aspek, seperti kemampuan alat dalam bekerja maupun dari segi harga (ekonomis). Berdasarkan cara kerjanya, arrester dibagi dalam dua jenis, yaitu:

1. Jenis Ekspulsi (*expulsion type*)

Arrester jenis ekspulsi/tabung pelindung pada prinsipnya adalah jika suatu gangguan tegangan lebih (*over voltage*) mencapai titik terminal arrester, maka akan terjadi *spark over* pada serat dan sela percik batang yang berada di luar (*gap luar/sela seri*) dan sela percik yang berada dalam tabung (*gap dalam*). Bila di terminal arrester tersambar petir, maka kedua sela terpercik sehingga muatan listrik dapat langsung dibumikan. Pada harga tegangan tertentu arrester bersifat konduktor dan pada saat itu mengalir *discharger current* tegangan lebih. Bila tegangan lebih telah hilang, maka akan mengalirkan arus (*flow current*) yang berasal dari tegangan sistem. Pemanasan yang terjadi akibat mengalirnya arus pada tabung arrester membangkitkan gas dari dinding fiber akibat tekanan udara dalam tabung naik dan gas keluar. Berikut adalah gambar dari jenis arrester ekspulsi pada jaringan tegangan menengah.



Gambar 2.29 Arrester jenis ekspulsi (*expulsion type*)

(sumber: Mukhalidillah.blogspot.com)

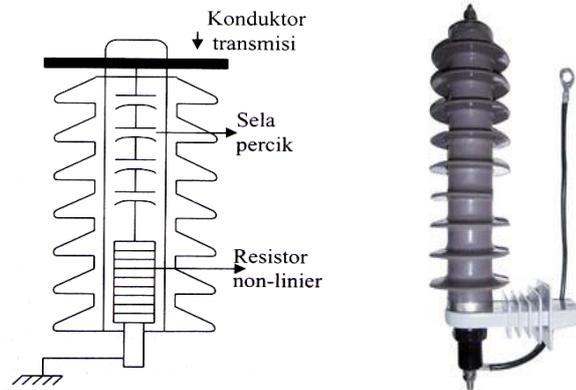
Udara keluar lewat gas tabung ventilasi dari tabung arrester. Proses ini memutuskan arus (*flow current*) dan kemudian arrester bertindak sebagai isolator kembali. Arrester jenis ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu tipe transmisi yang digunakan untuk proteksi saluran transmisi agar dapat mengurangi besar tegangan surja petir yang masuk ke gardu induk dan tipe distribusi yang digunakan untuk proteksi jaringan distribusi agar dapat mengurangi besarnya tegangan surja petir menuju beban. Oleh karena itu, arrester ini dapat digunakan untuk melindungi transformator distribusi bertegangan 3-15 kV, namun belum optimal untuk melindungi transformator daya (*power transformer*).

2. Jenis Katup (*valve type*)

Bentuk arrester ini lebih besar dari tipe ekspulsi dan harganya lebih mahal. Arrester ini terdiri dari beberapa sela percik yang dihubungkan seri (*series gap*) dengan elemen tahanan yang mempunyai karakteristik tak linier. Tahanan ini memiliki sifat khusus yaitu rendah saat dialiri arus besar dan sebaliknya tahanan akan berubah menjadi besar saat dialiri arus kecil. Tahanan yang umum digunakan untuk arrester ini terbuat dari bahan *silicon carbid* (SiC). Sela percik dan tahanan tak linier ditempatkan dalam tabung isolasi tertutup sehingga kerja dari arrester ini tidak dipengaruhi oleh keadaan udara sekitar. Prinsip kerjanya adalah dalam kondisi normal bertindak sebagai isolator. Bila ada gangguan tegangan lebih pada arrester akan terjadi *spark over* pada *gap* seri. Pada saat itu, *discharger current* berupa tahanan *non linier*. Makin besar tegangan terminal, maka tahanannya akan semakin rendah.

Dengan demikian pada *discharger current* yang besar, tegangan jepitan antar arrester tetap ada harga-harga yang tidak membahayakan. Setelah tegangan turun atau mengecil, tahanan *valve element* naik. Oleh *valve element* arus *volt current* makin kecil, pada akhirnya melewati titik nol perjalanan arus. *Gap* seri berfungsi sebagai tempat terjadinya *discharger current*, sedangkan *valve element* berfungsi sebagai pengatur besarnya

discharger current dan akhirnya dapat memutuskan *flow current* oleh *gap* seri bersama dengan *valve element*. Dengan terputusnya *flow current* maka arrester kembali seperti semula yaitu sebagai isolator.



Gambar 2.30 Arrester jenis katup (*valve type*)

(sumber: Indiamart.com)

Adapun kelebihan arrester jenis katup dengan gas aktif lainnya, yaitu sebagai berikut:

- a. Kemampuan dalam memutuskan arus lebih baik
- b. Level *discharger voltage* lebih rendah
- c. Memiliki kapasitas *discharger* yang lebih besar

Arrester jenis ini umumnya dipakai untuk melindungi alat-alat yang mahal pada rangkaian, biasanya dipakai untuk melindungi transformator daya. Berdasarkan tingkat perlindungannya arrester katup dibagi menjadi empat jenis, yaitu:

- a. Jenis gardu

Pemakaiannya secara umum pada gardu induk besar untuk melindungi alat-alat yang mahal pada rangkaian mulai dari 2.4-287 kV.

- b. Jenis saluran

Arrester jenis saluran lebih murah dari arrester gardu. Arrester jenis saluran ini dipakai pada sistem tegangan 15-69 kV.

c. Jenis distribusi untuk mesin-mesin

Seperti namanya arrester ini digunakan untuk melindungi transformator pada saluran distribusi. Arrester jenis ini dipakai pada peralatan dengan tegangan 120-750 volt.



Gambar 2.31 *Metal oxide* arrester jenis saluran distribusi

(sumber: Siemens AG, 2012:30)

d. Jenis gardu untuk mesin-mesin

Arrester jenis gardu ini khusus untuk melindungi mesin-mesin berputar. Pemakaiannya untuk tegangan 2.4-15 kV.

IEC 60099-4 mengklasifikasi lima jenis arrester berdasarkan level arus dan tegangan pengenalnya seperti yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.2 *Discharge currents* nominal berdasarkan IEC 60099-4

(sumber: Siemens AG, 2012:41)

1.5 kA	2.5 kA	5 kA	10 kA	20 kA
Dibawah toleransi	$U_r \leq 36$ kV	$U_r \leq 132$ kV	$3 \text{ kV} \leq U_r \leq 36$ kV	$360 \text{ kV} \leq U_r \leq 756$ kV

Adapun klasifikasi arrester katup berdasarkan level tegangannya seperti yang tunjukkan pada gambar dibawah ini.

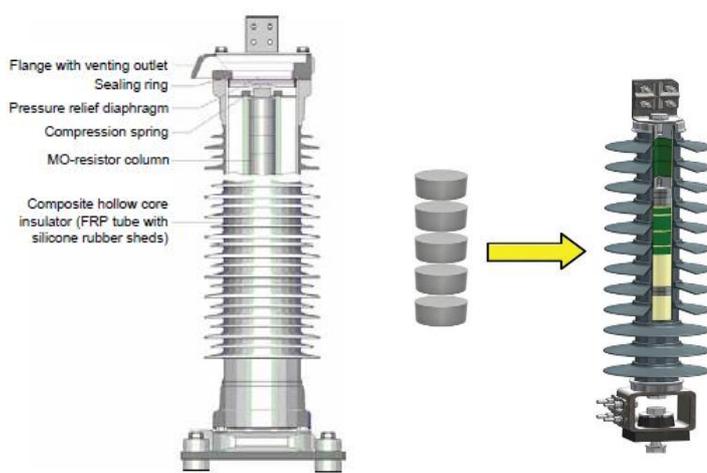


Gambar 2.32 Klasifikasi arrester katup berdasarkan level tegangannya
(sumber: Indonesianalibaba.com)

Berdasarkan materialnya, arrester jenis tahanan katup/varistor (*valve resistor*) dibedakan menjadi dua jenis, yaitu material jenis *zinc oxide* (ZnO) dan material jenis *silicon carbid* (SiC).

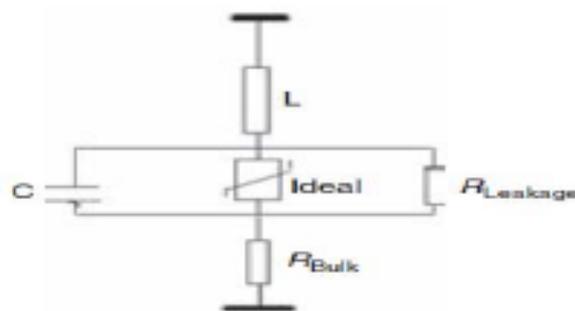
a. Jenis Seng Oksida (*zinc oxide*/ZnO)

Arrester jenis seng oksida atau yang biasa dikenal dengan nama *metal oxide arrester* (MOA) merupakan arrester yang tidak memiliki sela seri dan terdiri dari satu atau lebih unit yang kedap udara yang masing-masing berisikan blok-blok ZnO (*zinc oxide*) sebagai elemen aktif tahanan katup (*valve resistor*) dari arrester ini. Berikut adalah gambar dari arrester katup dengan elemen aktif seng oksida (ZnO).



Gambar 2.33 Arester seng oksida dengan elemen aktif (*zinc oxide*/ZnO)
(sumber: Siemens AG, 2012:32 dan inmr.com)

Arrester surja jenis *metal oxide arrester* dengan elemen aktif ZnO (*zinc oxide*) didesain tanpa menggunakan celah (*gapless*). Arrester jenis ini biasa dikenal dengan MOV (*metal oxide varistor*) dan merupakan arrester yang banyak diterapkan pada sistem tenaga listrik baik tegangan tinggi, tegangan menengah dan tegangan rendah tergantung dari jenis resistor yang digunakan. Arrester jenis MOV memiliki *rating* arus pelepasan sebesar 1 kA hingga 15 kA. Biasanya, varistor ZnO (*zinc oxide*) dibuat dalam bentuk piringan atau kepingan dan memiliki nilai kapasitansi sebesar 0.2-10 nF. Induktansi pada kaki tahanan katup (*valve resistor*) juga dilengkapi dengan rangkaian MOV dan R_{Bulk} yang disusun secara serial, seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah.



Gambar 2.34 Model rangkaian ekuivalen dari varistor (*valve resistor*) ZnO

(sumber: Vernon Cooray, 2010)

Metal oxide arrester (MOA) tidak memiliki tahanan sela seri, sehingga arrester ini sangat bergantung pada tahanan yang ada dalam arrester itu sendiri (keping ZnO). Apabila terjadi tegangan lebih (*over voltage*) akibat sambaran petir atau *switching*, maka tahanan (keping ZnO) pada arrester ini akan langsung turun sehingga menjadi konduktor dan mengalirkan arus sambaran petir ke bumi. Namun, pada saat kondisi kembali normal maka tahanan (keping ZnO) arrester kembali naik sehingga bersifat sebagai isolator.

Varistor jenis ZnO adalah perangkat yang bertindak cepat dengan tanggapan waktu kurang dari 0.5 μ s. Kinerja ZnO dipengaruhi oleh suhu sehingga apabila ada kebocoran arus yang berlebih maka dapat dengan cepat

menaikkan suhu dari ZnO tersebut. Karena varistor jenis ZnO memiliki koefisien suhu negatif, maka arus akan meningkat jika timbul panas yang berlebihan pada varistor jenis ZnO. Varistor jenis ZnO biasanya digunakan untuk melindungi sistem elektronik dari tegangan lebih transien yang merambat pada listrik.

Energi yang diserap dalam keramik pada varistor jenis ZnO akan didistribusikan keseluruhan keramik melalui butiran-butiran ZnO (*zinc oxide*). Varistor ZnO dapat menahan *transient pulse* tunggal sampai dengan 150 % dari arus pengenalnya, namun tahanan ini akan rusak saat *transient multipulse* mencapai 75 % dari puncak arus pengenalnya. Sedangkan dalam keadaan normal varistor ZnO dapat dioperasikan pada tegangan operasi sistem 40 % dari arus pengenal dalam lingkungan *multipulse*.

b. Jenis *Sillicon Carbide* (SiC)

Arrester non linear umumnya terdiri dari beberapa celah (*spark gaps*) yang terpasang secara serial dengan elemen resistor SiC (*silicon carbide*). Arrester ini terhubung dengan konduktor fasa dan bumi (*ground*). Selama kondisi tegangan sistem beroperasi normal, celah (*spark gaps*) antar resistor material SiC tidak melakukan pemisahan konduktor bertegangan tinggi dari bumi. Ketika tegangan lebih yang diakibatkan oleh sambaran petir secara langsung atau akibat hubung singkat terjadi dan membahayakan isolasi pada peralatan proteksi tegangan lebih, maka celah (*spark gap*) antar resistor *sillicon carbide* bekerja dengan cara menyalurkan tegangan lebih ke bumi

Karakteristik volt ampere dari resistor non linier pada penangkal petir dapat diturunkan dengan persamaan sebagai berikut.

$$V = K I^\beta \quad (2.17)$$

Dimana K dan β bergantung pada komposisi dan proses pembuatan resistor non linier (NLR). Nilai β pada umumnya berkisar pada 0.3 dan 0.45 untuk arrester petir silikon karbida (SiC). Jika tegangan melewati resistor non linear (NLR) dua kali lipat, arus akan meningkat kira-kira menjadi 10 kali. Oleh karena itu, dengan *multiple spark gap* arrester dapat menahan laju

pemulihan tegangan (*Rate of Recovery Voltage/RRRV*) yang tinggi. Distribusi tegangan yang tidak seragam antara celah (yang ada dalam rangkaian penangkal petir/arrester jenis SiC) dapat menimbulkan masalah. Salah satu solusinya yaitu dengan pemasangan kapasitor dan resistor non linier yang dihubungkan secara serial setiap celah. Namun, untuk kasus penangkal petir (arrester SiC) yang digunakan untuk aplikasi tegangan tinggi kapasitor dan resistor non linier dihubungkan tidak serial. Dengan adanya lonjakan gelombang tegangan impuls yang curam, tegangan ini dikendalikan oleh kapasitor pada frekuensi daya oleh resistor non linier (SiC). Hal ini berdampak ketika terjadi tegangan lebih (*over voltage*) akan menghancurkan rangkaian *gap* pada SiC, sehingga menyebabkan peningkatan arus. Tegangan tertinggi yang muncul di penangkal petir dapat dalam bentuk percikan di arrester atau tegangan yang bertambah melewati *resistor non linier* (SiC) selama lonjakan arus. Percikan terendah dari tegangan arrester disebut percikan impuls seratus persen di atas tegangan arrester. Tegangan yang bertambah melewati resistor non linier selama lonjakan arus disebut tegangan sisa. Semakin rendah nilai tegangan yang bertambah semakin baik perlindungan dari penangkal petir.

Adapun kelebihan dan kekurangan dari penggunaan arrester jenis *silicon carbide* (SiC) dibandingkan dengan arrester jenis *metal oxide* (ZnO), yaitu sebagai berikut:

1. Kelebihan arrester SiC

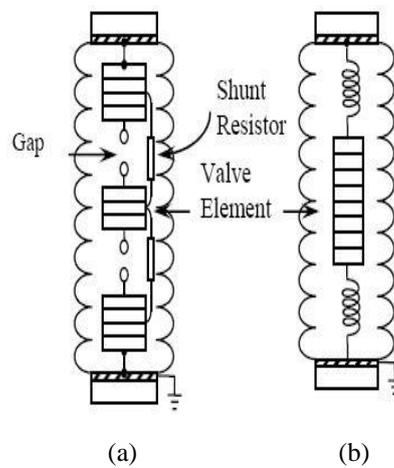
Karena adanya celah (*gaps*) yang cukup jauh antar material SiC, maka pada arrester ini nilai tegangan, frekuensi dan daya selama operasi normal dapat diabaikan. Oleh karena itu, pada arrester jenis SiC dapat meminimalisir terjadinya aliran arus bocor antara terminal penghantar dan terminal bumi (*ground*).

2. Kekurangan arrester SiC

- a. Arrester jenis *Silicon Carbide* (SiC) memiliki karakteristik perbandingan tegangan dan arus yang lebih rendah dibandingkan dengan arrester jenis *metal oxide* (ZnO).

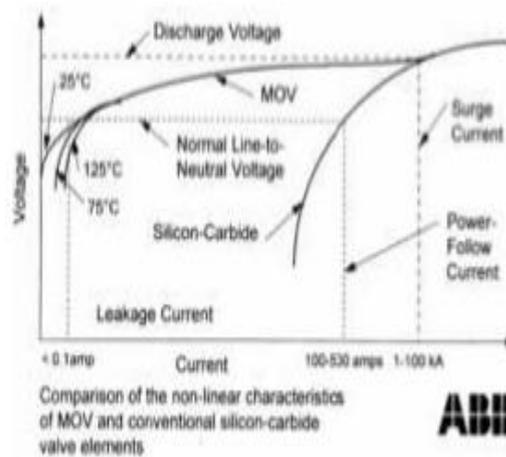
- b. Kemampuan dalam penyerapan energi akibat sambaran petir lebih rendah dibandingkan dengan arrester jenis *metal oxide* ZnO
- c. Hubung singkat antar celah (*gaps*) dapat terjadi

Berikut adalah material terpasang dan grafik perbandingan antara tegangan dan arus pada arrester jenis SiC (*silicon carbide*) dan ZnO (*metal oxide*).



Gambar 2.35 Posisi material terpasang antara arrester jenis
(a) SiC dan (b) ZnO

(sumber: Bandri, 2015:72)



Gambar 2.36 Grafik perbandingan tegangan dan arus antar ZnO dan SiC

(sumber: Bandri, 2015:72)

2.2.5.6 Pemilihan Arrester

Dalam pemilihan jenis arrester yang sesuai untuk suatu perlindungan tertentu, terdapat beberapa faktor yang harus diperhatikan, yaitu:

1. Kebutuhan perlindungan

Kebutuhan perlindungan berhubungan dengan kekuatan isolasi peralatan yang harus dilindungi dan karakteristik impuls dari arrester.

2. Tegangan sistem

Tegangan sistem adalah tegangan pada terminal arrester.

3. Arus hubung singkat

Arus hubung singkat sistem ini hanya diperlukan pada arrester jenis ekspulsi.

4. Faktor kondisi luar

Faktor kondisi luar apakah normal atau tidak normal dan temperatur atau kelembaban yang tinggi serta pengotoran.

5. Faktor ekonomi

Faktor ini adalah perbandingan antara biaya pemeliharaan dan kerusakan bila tidak ada arrester atau dipasang arrester yang lebih rendah mutunya.

2.2.5.7 Karakteristik Arrester

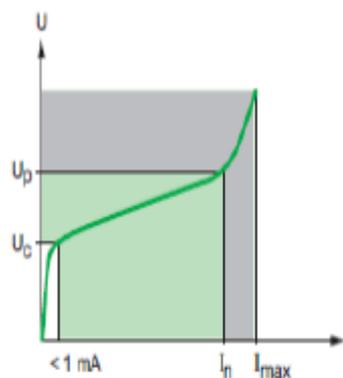
Lightning arrester yang ideal memiliki karakteristik sebagai berikut^[1]:

1. Arrester mempunyai karakteristik yang dibatasi oleh tegangan (*voltage limiting*) apabila dilalui beberapa jenis arus petir. Karakteristik pembatas tegangan merupakan harga tegangan pada terminal yang mampu ditahan oleh arrester pada waktu menyalurkan arus tertentu (harga ini berubah dengan besarnya arus).
2. Arrester mempunyai batasan termis, yaitu kemampuan melewatkan arus sambaran petir dalam durasi yang lama dan berulang-ulang.
3. Pada jenis arrester ini bekerja berdasarkan tahanan tidak linier, maksudnya ketika arrester bekerja tahanan tidak linier ini akan turun nilainya sehingga arrester berubah menjadi konduktor sedangkan ketika tegangan sistem kembali normal tahanan tidak linier arrester bernilai besar sehingga arrester bersifat

isolator dan dapat bekerja seperti semula setelah terjadinya pemutusan arus susulan.

4. Arester harus mampu melepaskan tegangan lebih melalui aliran arus surja ke tanah tanpa merusak arester itu sendiri dan harus memiliki harga tahanan di bawah 5 ohm.

Standar internasional IEC 61643-1 Edition 2.0 (03/2005) mendefinisikan karakteristik dan tes untuk perangkat perlindungan surja/petir (*surge protection device*) pada sistem distribusi tegangan rendah seperti yang diperlihatkan pada grafik dibawah ini.



Gambar 2.37 Karakteristik arus/waktu dari sebuah SPD dengan varistor
(sumber: *Overvoltage protection*, Chapter J, Schneider Electric Electrical installation guide 2010)

2.2.5.8 Spesifikasi (*Nameplate*) Arrester Gardu Induk Bantul 150 kV

Adapun spesifikasi (*nameplate*) arrester yang terpasang pada tiga transformator tenaga (*power transformer*) di Gardu Induk Bantul 150 kV adalah sebagai berikut:

1. Arrester Transformator Tenaga I (60 MVA)

Berikut adalah gambar dari arrester yang terpasang pada transformator tenaga I di Gardu Induk Bantul 150 kV.



Gambar 2.38 Arrester pada transformator tenaga I
(sumber: GI Bantul 150 kV)

Merk	: OHIO BRASS
Pabrik	: HUBBELL POWER SYSTEM, INC. AIKEN, SOUTH CAROLINA - WADSWORTH, OHIO, USA
Tahun pembuatan	: 2015
Serial No TOP (R/S/T)	: 63119/63734/63135
Serial No Bottom (R/S/T)	: 63129/63744/63145
Type	: PH317OGV132AA
Standar	: IEC 99-4 1991
Rating Tegangan (RMC _{OV} /U _c)	: 105.6 kV RMS
Tegangan Refrensi Ur (48-62 Hz)	: 132 kV RMS

Hubung Singkat	: 63 kA RMS
Arus Peluahan Nominal	: 10 kA
Panjang arrester	: 1.2 meter
Jumlah Kolom (bagian bawah)	: 9
Jumlah Kolom (bagian atas)	: 9

Adapun tabel karakteristik arrester yang digunakan di Gardu Induk Bantul 150 kV pada transformator tenaga I dengan durasi waktu 8/20 μ s *lightning impulse* dan 36/90 μ s *switching impulse* adalah sebagai berikut.

Tabel 2.3 Karakteristik arrester OHIO BRASS type PH317OGV132AA
saat waktu *lightning impulse* 8/20 μ s

Arus [A]	Tegangan [V]
1500	271000
3000	282000
5000	295000
10000	316000
20000	342000
40000	390000

Tabel 2.4 Karakteristik arrester OHIO BRASS type PH317OGV132AA
saat waktu *switching impulse* 36/90 μ s

Arus [A]	Tegangan [V]
1500	271000
3000	282000
5000	295000
10000	316000
20000	342000
40000	390000

2. Arrester Transformator Tenaga II (60 MVA)

Berikut adalah gambar dari arrester yang terpasang pada transformator tenaga II di Gardu Induk Bantul 150 kV.



Gambar 2.39 Arrester pada transformator tenaga II
(sumber: GI Bantul 150 kV)

Merk	: SIEMENS
Pabrik	: HUBBELL POWER SYSTEM, INC. AIKEN, SOUTH CAROLINA – WADSWORTH, OHIO, USA
Tahun pembuatan	: 2015
Type	: 3EL2 144-6PP42-4NA1-Z
Standar	: S/N URG/12422017
Rating Tegangan (RCMOV/U _c)	: 115 kV RMS
Tegangan Refrensi Ur (48-62 Hz)	: 144 kV RMS
Hubung Singkat	: 65 kA RMS
Arus Peluahan Nominal	: 20 kA
Panjang arrester	: 1.5 meter
Jumlah Kolom (bagian bawah)	: 8
Jumlah Kolom (bagian atas)	: 18

Adapun tabel karakteristik arrester yang digunakan di Gardu Induk Bantul 150 kV pada transformator tenaga II dengan durasi waktu 8/20 μ s *lightning impulse* dan 45/90 μ s *switching impulse* adalah sebagai berikut.

Tabel 2.5 Karakteristik arrester SIEMENS type 3EL2 144-6PP42-4NA1-Z
saat waktu *lightning impulse* 8/20 μ s

Arus [A]	Tegangan [V]
1500	298000
3000	311000
5000	325000
10000	346000
20000	384000
40000	436000

Tabel 2.6 Karakteristik arrester SIEMENS type 3EL2 144-6PP42-4NA1-Z
saat waktu *switching impulse* 45/90 μ s

Arus [A]	Tegangan [V]
250	270000
500	277000

3. Arrester Transformator Tenaga III (60 MVA)

Berikut adalah gambar dari arrester yang terpasang pada transformator tenaga III di Gardu Induk Bantul 150 kV.



Gambar 2.40 Arrester pada transformator tenaga III
(sumber: GI Bantul 150 kV)

Merk	: BOWTHORPE EMP BRIGHTON ENGLAND
Pabrik	: EMP BRIGHTON ENGLAND
Tahun pembuatan	: 1993
Serial No (R/S/T)	: L 130 34/L 130 35/L 130 36
Type	: 1 MBA 4-50 A
Standar	: IEC 99-4 1991
Rating Tegangan (RMCOV/U _c)	: 120 kV
Tegangan Refrensi Ur (48-62 Hz)	: 150 kV
Hubung Singkat	: 20 kA RMS
Arus Peluahan Nominal	: 10 kA
Panjang arrester	: 1.5 Meter
Jumlah Kolom (bagian bawah)	: 8
Jumlah Kolom (bagian atas)	: 18

Adapun tabel karakteristik arrester yang digunakan di Gardu Induk Bantul 150 kV pada transformator tenaga III dengan durasi waktu 30/60 μs *switching surge* dan 8/20 μs *lightning current* adalah sebagai berikut.

Tabel 2.7 Karakteristik arrester BOWTHORPE EMP type MBA4150L2E1M1 saat waktu 30/60 μs (*switching surge*)

Arus [A]	Tegangan [V]
125	293000
250	301000
500	311000
1000	324000
2000	339000

Tabel 2.8 Karakteristik arrester BOWTHORPE EMP type MBA4150L2E1M1 saat waktu 8/20 μs (*lightning current*)

Arus [A]	Tegangan [V]
5000	293000
10000	301000
20000	311000
40000	324000

Sedangkan untuk karakteristik arus dan tegangan *metal oxide* arrester *type-92* dengan menggunakan pemodelan arrester IEEE W.G. 3.4.11 adalah seperti yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.9 Karakteristik arrester IEEE W.G. 3.4.11

Arus [A]	Tegangan (V)	
	A ₀	A ₁
10	213182	182078
100	235357	186103
1000	257127	208367
2000	265326	216697
4000	273900	225028
6000	278967	231091
8000	285309	234625
10000	290138	235244
12000	294591	237652
14000	299554	241188
16000	305673	242706
18000	313455	242706
20000	319584	244342

2.2.5.9 Isolasi Tahanan Tegangan Arrester

Isolasi tahanan tegangan merupakan tingkat isolasi arrester dalam menahan atau melewati tegangan lebih (*over voltage*) pada kondisi abnormal (*switching*). Berikut adalah lembar data *rating* arrester dan tingkat maksimal sambaran petir (*lightning impulse*) berdasarkan IEEE C62.11-2012 seperti yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.10 Isolasi tahanan tegangan akibat sambaran petir menurut IEEE C62.11-2012

Arrester ratings	Arrester MCOV	1.2/50 impulse	<i>Switching surge impulse</i>	60 Hz / 60 seconds	60 Hz wet 10 seconds	Jarak Rambat
kV RMS	kV RMS	kV RMS	kV RMS	kV RMS	kV RMS	Inches
9	7.65	149	153	102	68	20.3
10	8.4	149	153	102	68	20.3
18	15.3	193	189	126	93	28.4
27	22	236	216	144	117	36.5
54	42	344	273	182	178	56.7
60	48	366	288	192	190	60.8
84	68	602	495	330	308	97.2
90	70	623	507	338	320	101.3
96	76	644	519	346	332	105.3
108	84	710	561	374	368	117.5
120	98	732	576	384	380	128.1
144	115	890	776	517	467	166.5
180	144	1029	960	586	533	192.2
192	152	1212	1166	690	633	222
198	160	1256	1208	708	657	230.6

2.2.5.10 Pemeliharaan (*Maintenance*) Arrester

Untuk mendapatkan operasi dan kinerja yang optimal diperlukan pemeliharaan yang baik terhadap peralatan proteksi (arrester). Adapun pemeliharaan arrester terdiri dari empat tahapan, yaitu:

1. Pemeliharaan harian

Pemeliharaan harian dilaksanakan dalam kondisi arrester beroperasi.

Berikut adalah tabel dari pemeliharaan harian arrester.

Tabel 2.11 Pemeliharaan harian arrester

No.	Bagian yang diperiksa	Cara pelaksanaan
1	Rumah Isolator	Memeriksa dan memebersihkan rumah isolator secara visual (dengan melihat ada tidaknya keretakan)
2	Miliammeter (mA)	Memeriksa dan mencatat jarum penunjuk mililammeter analog.
3	<i>Discharge Counter</i>	Memeriksa dan membersihkan <i>discharge counter</i> dan mencatat bila ada kenaikan angka gangguan

2. Pemeliharaan bulanan

Pemeliharaan bulanan dilaksanakan untuk memeriksa pada thermophisi yaitu pengecekan panas, apabila terjadi panas yang berlebihan akan memunculkan bunga api.

3. Pemeliharaan tahunan

Pemeliharaan tahunan dilaksanakan dalam keadaan tidak operasi, dan sebaiknya dilakukan menjelang musim hujan. Berikut adalah tabel pemeriksaan tahunan arrester di Gardu Induk Bantul 150 kV.

Tabel 2.12 Pemeliharaan tahunan arrester

No.	Bagian yang diperiksa	Cara pelaksanaan
1	Rumah isolator	Membersihkan rumah isolator dan memeriksa apakah ada keretakan
2	Tahanan antar elektroda	Mengukur tahanan antara elektroda (atas dengan tengah, tengah dengan bawah atau atas dengan bawah) apakah masih memenuhi standar persyaratan
3	Tahanan pentanahan	Mengukur tahanan pentanahan arrester apakah masih memenuhi standar persyaratan
4	Miliammeter (mA)	Melakukan pengujian fungsional dengan alat uji LCM (<i>leackage Current Measurment</i>) dan batas alat arrester dalam pemakaian maksimum adalah 1 A
5	<i>Discharge counter</i>	Melakukan pengujian fungsional dengan memberikan tegangan impuls 220 V

4. Pemeliharaan 10 tahun

Dalam pemeliharaan ini dilaksanakan dengan mengirim arrester baik yang mengalami masalah atau tidak ke laboratorium untuk di tes dan di uji kembali secara fungsional.

2.2.5.11 Penyebabnya Kegagalan Arrester

Sampai saat ini proteksi tegangan lebih (*over voltage*) yang optimal adalah arrester. Namun, ada saatnya ketika alat pengamanan telah terpasang dengan baik tetapi mengalami kerusakan pada saat terkena sambaran petir (surja) baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga menyebabkan kegagalan dalam pengamanan.

Adapun faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan dalam proteksi arrester terhadap tegangan lebih, yaitu:

1. Sambungan kawat arrester pada terminal arrester tidak baik atau tidak kencang.
2. Sambungan kawat arrester pada kawat fasa jaringan tidak baik atau tidak kencang.
3. Sambungan kawat arrester ke terminal tanah arrester tidak baik atau tidak kencang.
4. Sambungan kawat pentanahan arrester dengan kawat (batang pentanahan) tidak baik atau tidak kencang.
5. Tahanan pentanahan arrester > 1 ohm
6. Jarak arrester terlalu jauh baik pada tiang arrester yang satu dengan tiang arrester yang lain atau dengan peralatan yang dilindungi (transformator tenaga)
7. Arrester sudah tidak dapat bekerja optimal meskipun tidak ada sambaran petir.
8. Pentanahan kawat tanah tidak sempurna (> 1 ohm) misalnya sambungan pada konektor longgar, korosinya elektroda bumi, perubahan kondisi dan struktur tanah.
9. Jika arrester meledak karena sambaran petir baik secara langsung ataupun tidak pada saluran transmisi, berarti arrester dapat bekerja sebagaimana mestinya, maksudnya arrester tidak dapat mengubah dirinya menjadi penghantar lagi sehingga arrester harus diganti.

2.2.6 Persamaan Empiris Arrester

2.2.6.6 Penentuan Tegangan Arrester

Tegangan dasar arrester ditentukan berdasarkan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi. Tegangan ini dipilih berdasarkan kenaikan tegangan dari fasa-fasa yang normal pada waktu ada gangguan 1 fasa ke tanah ditambah suatu toleransi. Dalam menentukan tegangan dasar arrester dapat ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$E_r = \alpha \beta U_m \quad (2.18)$$

Keterangan:

E_r = Tegangan dasar arrester (kV)

α = Koefisien pembumian

β = Toleransi guna memperhitungkan fluktuasi tegangan, efek ferranti, dan sebagainya

U_m = Tegangan sistem maksimum (kV)

Koefisien α menunjukkan kenaikan tegangan dari fasa yang normal pada waktu ada gangguan 1 fasa ke tanah, tergantung dari impedansi-impedansi urutan positif, negatif dan nol dilihat dari titik gangguan.

2.2.6.7 Penentuan Arus Pelepasan Nominal (*Nominal Discharge Current*)

Arus pelepasan nominal adalah arus dengan harga puncak dan bentuk gelombang tertentu yang digunakan untuk menentukan kelas dari arester yang sesuai dengan kemampuan arus dan karakteristik pelindungnya. Menurut standar Inggris/Eropa (IEC) durasi arus pelepasan nominal arrester bekerja adalah $8 \mu\text{s} / 20 \mu\text{s}$ dan menurut standar Amerika adalah $10 \mu\text{s} / 20 \mu\text{s}$ dengan kelas PP 10 kA, 2.5 kA dan 1.5 kA. Berdasarkan spesifikasi level arus nominal *discharge current* dan tegangan sambarannya arrester dibagi ke dalam empat kelas, yaitu:

- a. Kelas arus 10 kA, untuk perlindungan gardu induk yang besar dengan frekuensi sambaran petir yang cukup tinggi dengan tegangan sistem diatas 70 kV.
- b. Kelas arus 5 kA, untuk tegangan sistem dibawah 70 kV.

- c. Kelas arus 2.5 kA, untuk gardu-gardu kecil dengan tegangan sistem dibawah 22 kV, dimana pemakaian kelas 5 kA tidak lagi ekonomis.
- d. Kelas arus 1.5 kA, untuk melindungi tranformator kecil

Adapun arus pelepasan arrester dalam peristiwa gelombang berjalan (*travelling wave*) dapat ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_a = \frac{2 U_d - U_A}{Z} \quad (2.19)$$

Keterangan:

- I_a = Arus pelepasan arrester (kA)
- U_d = Tegangan gelombang datang (kV)
- U_A = Tegangan kerja/tegangan sisa (kV)
- Z = Impedansi surja (Ω)

Sedangkan untuk nilai resistansi arrester pada gelombang berjalan (*travelling wave*) dapat ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$R = \frac{U_a}{I_a} \quad (2.20)$$

Keterangan:

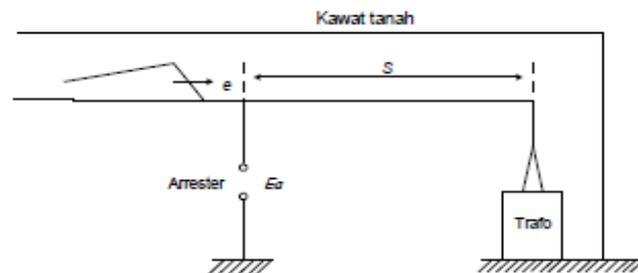
- R = Resistansi arrester (Ω)
- U_a = Tegangan kerja/tegangan sisa arrester (kV)
- I_a = Arus pelepasan arrester (kV)

2.2.6.8 Tegangan Pelepasan/Tegangan Kerja (U_a) Arrester

Tegangan kerja atau tegangan pelepasan merupakan salah satu faktor yang menentukan tingkat perlindungan dari penangkal petir. Jika tegangan kerja penangkal petir ada di bawah BIL dari peralatan yang dilindungi, maka faktor keamanan yang cukup untuk perlindungan peralatan yang optimum dapat diperoleh. Tegangan kerja tergantung pada arus pelepasan dari arrester (I_a) dan kecuraman gelombang arus (di/dt).

2.2.6.9 Jarak Optimum Arrester dan Transformator

Perlindungan yang baik diperoleh jika arrester ditempatkan sedekat mungkin dengan transformator. Tetapi, dalam kenyataannya, arrester harus ditempatkan dengan jarak tertentu, agar perlindungan dapat berlangsung dengan baik.



Gambar 2.41 Transformator dan arrester terpisah sejauh S
(sumber: Susilawati, 2010:5)

Jika arrester dihubungkan dengan menggunakan saluran udara terhadap alat yang dilindungi, maka untuk menentukan jarak ideal antara arrester dengan transformator, dapat dinyatakan dengan persamaan (TS. Hutahuruk, 1989:113).

$$E_p = E_a + 2 A S/v \quad (2.21)$$

Keterangan:

E_a = Tegangan percik arrester (kV)

E_p = Tegangan pada jepitan transformator (kV)

$A : \frac{de}{dt}$ = Kecuraman gelombang datang konstan ($1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$)

S = Jarak arrester dan transformator (m)

v = Kecepatan merambat gelombang ($300 \text{ m}/\mu\text{s}$)

2.2.7 Software ATP Draw



Gambar 2.42 Icon software ATP Draw

(sumber: Software ATP)

EMTP (*Electromagnetic Transient Programme*) adalah sebuah paket program komputer terintegasi yang secara khusus didesain untuk menyelesaikan permasalahan peralihan (*transient*) pada sistem tenaga listrik untuk rangkaian terkonsentrasi, rangkaian terdistribusi, atau kombinasi dari kedua rangkaian tersebut. Program ini pertama kali dikembangkan oleh H.M. Dommel di *Munich Institute of Technology* pada awal tahun 1960-an. H.M. Dommel melanjutkan pekerjaannya tersebut di BPA (*Bonneville Power Administration*) dan bekerja sama dengan S. Meyer. Selanjutnya H.M.

Kemudian pada awal tahun 2012, EMTP dikembangkan menjadi program ATP Draw oleh Dr. Hans Kr. Høidalen di *SINTEF Energy Reseach/Norwegian University of Science and Technology in Norway*, dan didukung oleh *Bonneville Power Administration, Portland-Oregon-USA*.

Seperti disebutkan diatas, ATP Draw dan EMTP lebih ditekankan untuk menyelesaikan persoalan transien pada sistem tenaga listrik, walaupun demikian program ini juga dapat menyelesaikan persoalan tenaga listrik dalam keadaan tunak. ATP Draw dan EMTP dapat digunakan untuk menganalisis *transients* pada rangkaian yang mengandung parameter terkonsentrasi (R, L, dan C), saluran transmisi dengan parameter terdistribusi, saluran yang ditransposisi atau saluran yang tidak ditransposisi. ATP Draw dan EMTP sangat tepat jika digunakan untuk menganalisis transien pada operasi surja hubung (*switching surge*) atau surja petir (*lightning surge*) karena program ini secara khusus menyediakan fasilitas pemodelan untuk generator, *circuit breaker*, transformator, sumber surja petir dan pemodelan berbagai jenis saluran transmisi. (Dommel, Herman, 1996).