

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Dalam bab II (dua) ini akan membahas mengenai tinjauan pustaka yang mendukung dalam melakukan penelitian tugas akhir dan dasar teori yang akan di terapkan pada penelitian ini.

1.1. Tinjauan Pustaka

Dalam mengembangkan materi penelitian yang akan dibuat, penulis menggunakan beberapa penelitian terdahulu sebagai acuan dan juga referensi diantaranya:

1. Rahmad Wahyudi Syaifulloh Alumni Teknik Elektro Universitas Riau dan Eddy Hamdani Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau “Analisa Pengaruh Sambaran Petir Pada Jaringan Distribusi 13,8 kV di BOB PT. BPS – Pertamina Hulu Bandari Pedada Menggunakan Software ATP-EMTP”, pada penelitian ini objek yang di pilih adalah jaringan distribusi 13,8 kV di BOB PT. BSP-Pertamina Hulu Bandari Pedada.

Penelitian ini meneliti pengaruh induksi tegangan yang diakibatkan oleh sambaran petir tidak langsung (induksi) terhadap saluran, kinerja *lightning* arrester 15 kV dan kawat tanah yang terpasang pada saluran tersebut menggunakan simulasi Software ATP-EMTP. Perhitungan besaran tegangan maksimum akibat sambaran petir Induksi dihitung menggunakan persamaan yang diturunkan oleh Rusck. Dengan menggunakan arus puncak sebesar 199 kA dan 253 kA, dengan waktu antara muka dan ekor sebesar 1,2\50 μ s dengan durasi sambaran selama 0,001 s. Jarak sambaran dari saluran adalah 400 m, 300 m dan 200 m.

Dalam percobaan ini peneliti menggunakan 5 kondisi percobaan yaitu:

- a. Tanpa gangguan sambaran tidak langsung, pada kondisi ini didapat bahwa nilai tegangan antar sisi penerima dan sisi pengirim tanpa adanya gangguan nilainya stabil yaitu pada sisi pengirim tegangan maksimal sebesar 11,2677 kV dan pada sisi penerima tegangan maksimumnya sebesar 11,2677 kV.
- b. Saat terjadi sambaran namun tanpa menggunakan *lightning arrester* 15 kV dan tanpa kawat tanah, pada kondisi ini yaitu terjadinya induksi tegangan akibat sambaran petir dengan tegangan maksimum sebesar 236,5553 kV (tanpa menggunakan kawat tanah), maka nilai tegangan yang terjadi pada sisi pengirim dan sisi penerima berbeda dan cenderung meningkat dengan drastis dikarenakan sambaran tidak

- langsung tersebut. Dengan kenaikan tegangan pada sisi pengirim sebesar 265,8462 kV dan disisi penerima menjadi 504,5965 kV.
- c. Menggunakan kawat tanah dan tanpa *lightning arrester* 15 kV, pada percobaan ini karena terdapat kawat tanah maka dapat mereduksi sambaran Induksi sehingga nilai tegangan maksimal yang terjadi disisi pengirim sebesar 57,78015 kV dan pada sisi penerima sebesar 82,3703 kV.
 - d. Menggunakan *lightning arrester* 15 kV dan tanpa kawat tanah, adanya *lightning arrester* 15 kV pada percobaan ini maka dapat mereduksi tegangan sambaran petir induksi lebih baik dari pada kawat tanah yaitu dengan nilai tegangan maksimum yang didapat pada sisi pengirim sebesar 39,6777 kV dan pada sisi penerima sebesar 47,7052 kV.
 - e. Pada percobaan terakhir yaitu menggunakan *lightning arrester 15 kV* dan kawat tanah, maka dengan menggunakan kedua pengamanan tersebut maka saat terjadi sambaran tidak langsung (induksi) maka tegangan maksimal yang berada pada sisi pengirim sebesar 11,2677 kV dan pada sisi penerima sebesar 11,2677 kV.
2. Muhammad Ibrahim, Edy Erfianto, dengan judul “Pengaruh Sambaran Petir Terhadap Sistem Proteksi Pada Peralatan Telekomunikasi PT. Telkom Pekamaru” dengan hasil penelitian pengukuran menggunakan simulasi ATP-EMTP dengan stimulus arus petir sebesar 200 kA, maka besar pengaruh arus yang melewati saluran PLN adalah 4.7 kA, pada genset adalah 4,9 kA, pada pada sentral adalah 6,2 kA, pada *rectifier* adalah 10,8 kA, dan pada distribusi sebesar 7,6 kA , serta pada transmisi sebesar 8 kA. Sehingga di sarankan untuk saluran PLN dan genset menggunakan arrester yang memiliki kapasitas arus surja sebesar 50 kA, dan untuk saluran *rectifier* disarankan menggunakan arrester dengan kapasitas arus surja sebesar 20 kA, sedangkan untuk saluran distribusi, saluran transmisi dan dan saluran sentral menggunakan arrester dengan kapasitas arus surja 10 kA. Pada saat *impluse* arus petir sebesar 4,56 kA maka arus yang melewati saluran PLN adalah 980 A, genset adalah 1 kA, sentral adalah 1,3 kA, *rectifier* adalah 2,2 kA, distribusi adalah 1,5 kA, dan transmisi sebesar 1,6 kA. Maka rekomendasi arrester yang memiliki kapasitas arus surja untuk saluran PLN dan genset adalah 50 kA, pada saluran *rectifier* sebesar 7 kA dan pada saluran transmisi distribusi dan sentral sebesar 2 kA.

3. Havel Alindo Sano dan Fri Murdiya dengan judul “Analisis Sistem Proteksi Pada SUTT 150 kV Menggunakan *Software* ATP”. Hasil penelitian menunjukkan bahwa saluran distribusi udara 150 kV dengan memvariasikan penempatan lokasi arrester pada saluran udara. Dengan pemilihan tegangan maksimum sambaran petir sebesar 10 MV pada menara transmisi menggunakan simulasi ATP, menunjukkan bahwa hasil terbaik adalah dengan memasang arrester pada setiap fase menara dengan data penurunan tegangan sebesar (menara 1) 0.4679 mv (92,81%), menara 2 yaitu 0.5674 MV (92,64%), menara 3 yaitu 1,2248 MV (85,79%), menara 4 yaitu 10 MV (0%), menara 5 yaitu 1,2322 MV (86,09%) dan menara 6 yaitu 0,6219 MV (92,53%).
4. Cecillia Stevanny dan Fri Murdiya dengan judul “Analisis Sambaran Petir Terhadap Kinerja Arrester Pada Transformator Daya 150 kV menggunakan *Program* ATP”. Menunjukkan bahwa variasi pada Tsta implus petir tidak mempengaruhi muatan arus dan integral kuadran arus, variasi waktu gelombang pada implus petir akan mempengaruhi muatan arus dan integral kuadran arus pada arrester. Pada saat waktu muka gelombang pada ketiga fase sama namun pada ketika mencapai puncak fasa A lebih cepat mengalami kenaikan dari pada fase B dan C. Variasi lamanya waktu sambaran pada implus petir akan sangat berpengaruh terhadap muatan arus dan integral kuadran arus yaitu pada saat mencapai titik puncak gelombang ketiga fase sama, namun ketika selesai arus pucak fase A akan lebih cepat turun sampai nol (0) dari pada fase B dan C. Untuk variasi waktu sambaran dan waktu gelombang tidak menyebabkan lebihnya arus maksimum tahanan arrester yaitu 100 kA, dan muatan arus pada arrester tidak melebihi batas muatan (colombo) yaitu 3,2 Colombo.
5. R.D. Purioleh R.D. Puriyangto, T. Haryono, Arivin Nur Widiyastuti, JITEKI Vol. 2, No. 2, 2016, dengan judul “Perbandingan Tegangan Residu Arrester SiC dan ZnO Terhadap Variasi *Front Time*”. Dengan hasil bahwa arrester dengan berbahan ZnO memiliki karakteristik perlindungan lebih baik dari pada arrester berbahan SiC karena pada Arrester ZnO memiliki tegangan residu murni tanpa adanya tegangan gagal pada sela seperti pada arrester SiC.
6. A A Gd Dharma Putra, I Made Yulista Negara, dkk dengan judul “Analisis Persebaran Medan Listrik Pada *Lightning arrester* 20 kV Menggunakan *Finite Elemen Method*” dengan hasil saat diberi tegangan nominal dengan diberi arus implus maka

perbandingan nilai listrik antara badan dan atar sirip memiliki perbedaan yang sangat jauh karena saat terkena arus *impluse* maka tegangannya akan menjadi sangat kecil bahkan nol (0). Pembentukan sudut kontak butir air garam mempengaruhi nilai medan listrik pada sirip pertama arrester, pengaruh viod pada permukaan sirip pertama arrester mempengaruhi nilai medan keseluruhan pada sirip pertama arrester, perbandingan nilai medan listrik dengan kontaminasi debu dengan saat minimal pada sirip pertama arrester.

7. Meta Sinaga dan Zulkarnaen Pane dengan judul “Analisis Usia Arrester Pada Jaringan Distribusi Terhadap Kilat Dengan Menggunakan ATP-EMTP Studi Kasus PLN Ranting Medan Johor” dengan hasil bahwa arrester jika selamanya dapat menyalurkan petir ke tanah ada kalanya arrester akan mengalami kegagalan dalam melindungi peralatan sistem tenaga, kegagalan ini biasanya disebabkan karena usia arrester itu sendiri, dari percobaan ini didapat bahwa probabilitas kegagalan arrester sebesar $0,73479 \times 10^{-3}$ dan usia yang mampu dicapai arrester untuk kondisi kerapatan sambaran rata-rata yaitu 6 tahun 10 bulan 28 hari.
8. Rahayu dan Ansori dengan judul “Analisis Proteksi Petir Pada Gardu Induk Distribusi 20 kV PT PLN (Persero) Rayon Inderalata” dengan hasil bahwa banyaknya sambaran kesaluran sebesar 106,63223 sambaran per 100km per tahun, dan besar tegangan Induksi kesaluran sebesar 225, 08706 kV, dengan jarak ideal menurut perhitungan antara arrester dan transformator adalah 2, 06573 m, sedangkankan di lapangan terpasang dengan jarak 1,5 m. Dengan tegangan yang dirasakan oleh transformator di bawah BIL yaitu selama 0,005 μ s.
9. Nugroho, Susanto Handoko dan Karnoto dengan judul “Optimasi Penempatan Arrester Terhadap Tegangan Lebih Transien Pada Transformator Daya Dengan Metode Algoritma Genetika” dengan hasil pengujian berupa jarak antara arrester dan transformator daya dengan hasil pada pengujian tegangan 20 kV menghasilkan jarak antara saluran kawat –kawat (X1) = 1,035 m dan saluran kawat-kabel (X2) = 9,009 m. Pengujian tegangan 150 kV jarak maksimum saluran X1 adalah 1,035 m dan saluran X2 adalah 1,297 m. Sedangkan pengujian pada tegangan 500 kV jarak aman X1 adalah 2,74 m dan jarak aman saluran X2 adalah 19, 177
10. Maragongan dan Fri Murdiya dengan judul “Desain Dan Analisis Sistem Proteksi Petir Pada Rumah Sakit Universitas Riau” dengan bangunan rumah sakit seluas (p x l x t)

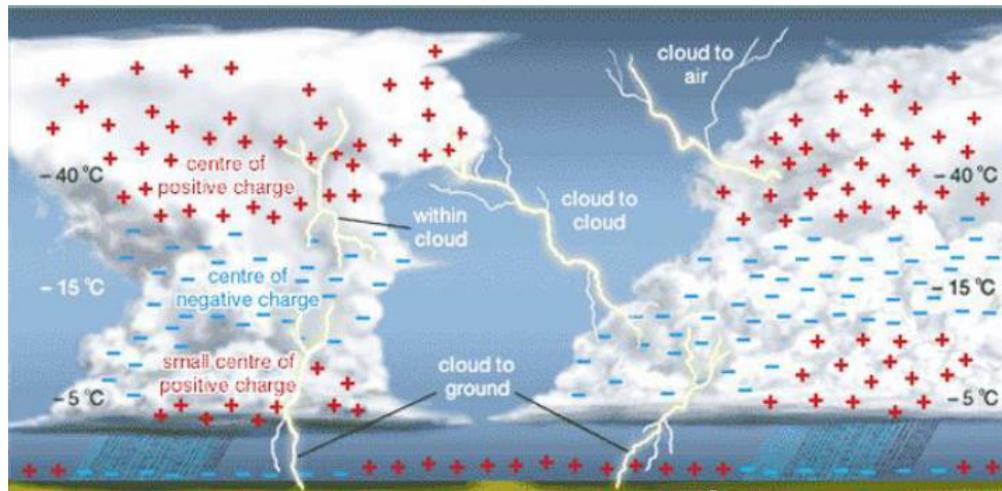
61m x 31m x 27m, menghasilkan data bahwa indeks proteksi petir sebesar 17 dengan kerapatan sambaran petir pada tahun 2015 yaitu 23,8228 sambaran per km² per tahun, dengan luas sekian maka kemungkinan bangunan tersambar petir 0,8915 sambaran per tahun, dengan tingkat proteksi berada pada tingkatan IV maka dengan menggunakan metode Bola Bergulir dan aplikasi *Autocad* bahwa jumlah arrester yang dapat melindungi bangunan dari sambaran petir sebanyak 8 buah dan dengan tinggi final setinggi 1 meter.

1.2. Dasar Teori

1.2.1. Fenomena Petir

Proses awal terjadinya petir disebabkan karena adanya awan yang bermuatan di atas bumi. Pembentukan awan bermuatan disebabkan karena adanya kelembaban udara dan adanya gerakan udara keatas (*up draft*). Kelembaban udara yang timbul oleh pengaruh sinar matahari yang kemudian akan menyebabkan penguapan air dan uap air akan naik karena gerakan *up draft*. Proses ini yang terjadi terus menerus akan membentuk awan bermuatan.

Setelah timbulnya awan yang bermuatan maka terbentuklah kristal-kristal es yang akan berubah muatan menjadi tidak netral dikarenakan adanya gesekan pada kristal kristal es tersebut yang disebabkan oleh tiupan angin, sehingga awan akan terdapat muatan positif (+) dan negatif (-). Muatan positif tersebut akan berkumpul pada bagian atas awan, sedangkan muatan negatif akan berada pada bagian bawah awan. Dan permukaan bumi dianggap memiliki muatan positif sehingga akan terjadi tarik menarik antara muatan positif yang berasal dari permukaan bumi yang akan menarik muatan negatif yang berada pada bagian bawah awan. Saat terjadinya proses pengaliran muatan dari awan ke bumi ini yang dinamakan petir.



Gambar 2. 1. Proses terjadinya petir

sumber: Rogerio-IEEE, 2015:4

1.2.2. Poses Penyambaran Petir

1. Lidah Mula

Setiap sambaran petir selalu diawali dengan datangnya cahanya lemah yang disebut dengan luahan perintis (*pilot streamer*). Luahan perintis ini yang akan menentukan kemana arah perambatan muatan awan ke udara. Akibat kuat medan listrik yang terbentuk akibat banyaknya medan negatif (-) dari pada medan positif (+) di bagian bawah awan maka akan mengakibatkan adanya tembus listrik lokal di dalam awan. Arus yang berhubungan dengan peluahan perintis ini hanya beberapa ampere yang menandakan sangat kecilnya arus yang berhubungan dengan peluahan perintis ini. Tembus listrik lokal ini akan mengakibatkan muatan akan bergerak dan bergesekan dengan uap air pada temperature tinggi sehingga akan mengakibatkan bertambahnya muatan negatif pada awan, yang akan mengakibatkan lebihnya muatan negatif dari batas kritisnya sehingga menyebabkan terbentuknya lidah yang bermuatan negatif. Lidah bermuatan negatif ini adalah gejala peluahan muatan sebagian yang dikenal dengan nama sambaran perintis (*stepped leader*).

Langkah dari sambaran perintis ini akan selalu diikuti oleh kilatan cahanya yang akan bergerak dari awan mendekati permukaan bumi yang jalur sambarannya melompat-lompat lurus dengan arah lompatan langkahnya tidak lurus sehingga keseluruhan jalannya tidak lurus dan patah patah. Selama pusat muatan di awan dapat memberikan muatannya untuk mempertahankan gradien tegangan pada ujung sambaran perintis yang dapat menembus udara, maka lidah berikutnya akan terjadi dan lidah perintis berhenti.

2. Sambaran Balik

Apabila sambaran perintis telah mendekati permukaan bumi, maka muatan kanal yang berasal dari bumi akan naik menyambut datangnya sambaran petir. Muatan pada kanal ini berbeda dengan muatan pada lidah lompat dan akan menyongsong sambaran petir dan bergerak ke atas dari bumi ke awan. Pertemuan kedua kanal ini akan menyebabkan ujung sambaran perintis mengalami hubungan singkat dengan tanah dan seketika gelombang muatan positif dari bumi naik bergerak ke atas menuju pusat awan. Peristiwa penyambaran dari awan ke bumi atau dari bumi ke awan ini yang dinamakan dengan sambaran balik (*return stroke*).

Kecepatan sambaran balik ini berada dalam rentang 3.10^6 sampai 3.10^7 m/s dalam waktu seratus mikrodetik dan arus utama peluahan muatan yang besarnya lebih dari 20 kV. Arus ini akan membentuk implus dengan harga puncak yang dapat dicapai dalam satuan waktu mikrodetik. Terjadinya arus sambaran ini akan mengakibatkan netralnya muatan pada muatan pusat awan yang akan berakibat penurunan secara drastis potensial pada muatan awan tersebut. Sehingga antara pusat muatan pertama yang sudah di netralkan dengan pusat muatan kedua pada awan yang sama terjadi beda potensial yang tinggi. Terbentuklah lidah petir antara kedua pusat muatan yang saling bertemu membentuk kanal yang konduktif.

3. Sambaran Berulang

Sambaran perintis kedua atau sambaran berulang yaitu apabila sambaran balik telah berhenti dan masih tersedianya muatan di bagian awan yang lain maka samabatan berikutnya dapat terjadi. Sambaran perintis kedua ini memiliki

kecepatan $8 \times 10^8 \text{ m/s}$, yang mengalir secara langsung dari awan ke tanah dengan lintasan yang telah terbentuk sebelumnya oleh sambaran perintis pertama tanpa mengalami percabangan. Sambaran perintis kedua ini biasanya disebut dengan nama pelopor panah (*darit leader*) yang diikuti oleh sambaran balik kedua. Sambaran balik dan sambaran pelopor panah yang mengikutinya disebut dengan sambaran berulang (*multiple stroke*).

1.2.3. Parameter Petir

Petir yang menyamban dari awan ke permukaan bumi yang diikuti dengan arus akan memiliki bentuk gelombang yang khusus. Adapun beberapa besaran besaran dari bentuk gelombang yang ditimbulkan akibat sambaran petir yaitu:

1. Arus puncak (i)

Arus puncak merupakan harga tertinggi dari gelombang arus petir, gelombang ini akan berpengaruh pada terjadinya jatuh tegangan terutama pada tahanan pentanahan. Pada saluran transmisi terdapat gelombang berjalan yang nilai puncaknya ditentukan oleh tahanan pada menara transmisi dan kawat pada saluran transmisi tersebut. Menurut penelitian dan telah ditetapkan oleh IEC untuk mencapai nilai arus puncak pada gelombang petir membutuhkan waktu sekitar 1,2 mikrodetik.

2. Kecuraman arus petir (di/dt)

Besaran kecuraman arus petir akan berpengaruh pada jatuh konduktor yang dilalui arus. Di/dt disini berarti perubahan nilai arus terhadap nilai waktu yang dihitung dalam periode waktu mikrodetik.

3. Muatan listrik atau arus listrik (i.dt)

Muatan listrik merupakan jumlah energi yang terjadi pada titik sambaran, nilai ini akan semakin berkurang dan mengecil apabila gelombang semakin menjauh dari titik sambaran.

4. Arus kuadrat implus

Arus kuadrat implus merupakan besaran yang berhubungan dengan semua efek mekanis yang timbul akibat sambaran petir dan berpengaruh juga pada pemanasan impuls listrik pada tahanan.

1.2.4. Bahaya Sambaran Petir

Kecenderungan petir yang suka menyambar bangunan-bangunan yang menjulang tinggi merupakan bunga api listrik yang menggosongkan muatan pada awan dalam waktu yang sangat singkat dalam hitungan mikrodetik dengan arus puncak yang sangat tinggi. Kesamaan gejala sambaran petir dengan arus listrik yang mengalir pada penghantar listrik maka dapat menimbulkan bahaya-bahaya sebagai berikut:

- a. Beban termal, yaitu terjadinya panas pada bagian-bagian yang dialiri oleh arus petir tersebut.
- b. Beban mekanis, beban ini akan terjadi karena adanya gaya elektrodinamis dikarenakan tingginya arus puncak.
- c. Terjadinya korosi dikarenakan proses elektrokimia yang terjadi pada saat mengalirnya arus sambaran petir pada penghantar dan pentanahan.
- d. Adanya beban getaran mekanis yang diakibatkan oleh guntur.
- e. Tegangan lebih yang dapat membahayakan peralatan elektronika yang disebabkan adanya induksi tegangan dan pergeseran-pergeseran potensial di dalam bangunan.

Selain bahaya yang akan terjadi pada bangunan, namun sambaran petir juga dapat membahayakan makhluk hidup khususnya manusia yang disebabkan oleh sambaran langsung maupun sambaran tidak langsung. Apabila sambaran petir tersebut mengenai manusia maka arus yang dikeluarkan oleh petir akan mengalir ke dalam tubuh manusia dan akan membuat bagian-bagian dari organ manusia mengalami kejutan listrik yang dapat mengakibatkan gagalnya fungsi organ-organ tersebut bahkan dapat sampai menyebabkan kematian. Dengan tahanan manusia berkisar antara 500 Ohm sampai 100k Ohm, dengan tahanan sebesar itu maka tingkat bahaya yang akan terjadi jika sambaran petir langsung mengenai manusia maka tegangan yang akan mengenai manusia berkisar dalam orde kiloVolt (kV). Apabila sambaran tidak langsung mengenai manusia maka resiko yang akan dialami cukup besar walaupun tidak sebesar jika sambaran langsung mengenai manusia karena di sekitar titik sambaran terdapat kerapatan muatan yang besar, dimana muatan tersebut akan menyebar di dalam tanah yang akan menimbulkan sambaran di daerah sekitar titik sambaran.

1.2.5. Sambaran Petir Langsung

Sambaran langsung yaitu sambaran yang arah alirannya mengenai langsung konstruksi bangunan di atas tanah tanpa melalui perantara. Sambaran petir yang mengenai suatu bangunan atau pepohonan yang menjulang tinggi dan akan mengalirkan arus surja meluvalu struktur bangunan baik berupa struktur bangunan konduktif maupun non konduktif yang akan menyalurkannya ke tanah atau langsung menyambar sistem tenaga listrik disebut sambaran langsung. Untuk menanggulangi kerusakan yang diakibatkan oleh sambaran langsung yang dapat mengakibatkan ledakan, kematian, kerusakan maka digunakan proteksi eksternal pada daerah yang memiliki resiko sambaran langsung. Tegangan yang terjadi akibat sambaran pada saluran (kawat penghantar) dapat dibaca oleh isolator, dan persamaan matematis yang dibaca oleh isolator adalah sebagai berikut:

$$V = Z I / 2 \dots\dots\dots(2.1)$$

Sedangkan persamaan yang dapat dijadikan acuan dalam menentukan nilai impedansi surja pada kawat penghantar yaitu sebagai berikut (heleman).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana Z_0 adalah impedansi sujar natural

Nilai impedansi dan kapasitansi konduktor saluran udara dengan jari-jari r dan tinggi h di atas permukaan tanah maka dapat diperoleh persamaan sebagai berikut (Henry)

$$\begin{aligned} L &= \left(\frac{1}{2} + 2 \ln 2h/r\right) 10^{-9} && \text{dalam satuan cm} \\ &= 2 (\ln 2h/r) 10^{-7} && \text{dalam satuan m} \dots\dots\dots(2.3) \end{aligned}$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln 2h/r} \quad \text{dalam satuan m} \dots\dots\dots(2.4)$$

Sehingga didapat nilai impedansi surja saat sambaran petir secara langsung sebagai berikut:

Dengan hantaran udara :

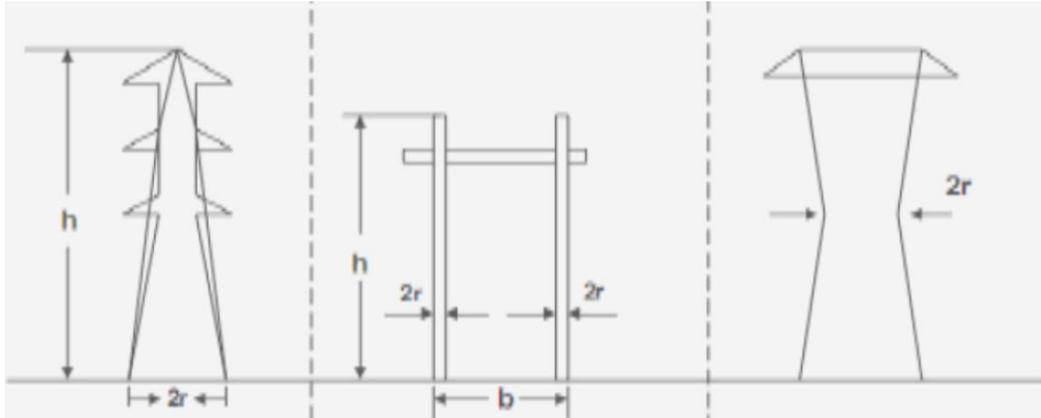
$$z = E / I = 1 / Cv = vL$$

$$z = \sqrt{\frac{L}{C}} = 60 \ln 2h/r \text{ ohm} \dots\dots\dots(2.5.a)$$

maka diperoleh impedansi surja sebagai berikut:

$$Z = \sqrt{Z_0 \times Z_c^L} \dots\dots\dots(2.5.b)$$

Sedangkan sambaran yang terjadi pada menara dapat diketahui nilai impedansinya menggunakan rumus-rumus Sargent dan Daveniza.



Gambar 2. 2. Jenis-jenis menara transmisi

Jenis A

Jenis B

Jenis C

Untuk menara jenis A :

$$Z_t = 30 \ln \left[\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right] \dots\dots\dots(2.6)$$

Menara jenis B :

$$Z_t = \frac{1}{2}(Z_s + Z_m) \dots\dots\dots(2.6.a)$$

Sedangkan untuk nilai Z_m dan Z_s dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Z_s = 60 \ln (h/r) + 90 (h/r) - 60 \dots\dots\dots(2.6.b)$$

$$Z_m = 60 \ln (h/b) + 90 (h/r) - 60 \dots\dots\dots(2.6.c)$$

Menara jenis C:

$$Z_t = 60 \left[\ln(\sqrt{2} \frac{2h}{r}) - 1 \right] \dots\dots\dots(2.7)$$

Sedangkan untuk mendapatkan nilai resitansi dan induktansi pada menara yang dapat mempengaruhi tegangan yang timbul pada tiang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$R_i = \Delta R_i \cdot x_i \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \frac{2 \cdot Z_{t1}}{(h - x_4)} \cdot \ln [1/a_1] \dots\dots\dots(2.9)$$

$$\Delta R_4 = \frac{2 \cdot Z_{t4}}{h} \cdot \ln [1/a_4] \dots\dots\dots(2.10)$$

$$L_i = 2 \cdot \tau \cdot R_i \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana waktu berjalan sepanjang tower : $\tau = h/C_0$

Konstanta atenuasi sepanjang tower : $a_1 = a_4 = 0,89$

Kecepatan cahanya : $C_0 = 300$ meter per mikrodetik

1.2.6. Sambaran Petir Tidak Langsung

Sambaran petir tidak langsung disebabkan oleh sambaran yang mengenai dekat bangunan/instansi atau disebabkan oleh terdapatnya awan petir (*thunder cloud*) di atas bangunan/instansi. Hal-hal yang dapat diakibatkan karena sambaran tidak langsung adalah sebagai berikut:

1. Kenaikan tegangan pada titik petanahan.
2. Radiasi elektromagnetik yang menghasilkan tegangan pada bahan konduktif.
3. Induksi elektromagnetik yang menyebabkan kopling kapasitif dan kopling induktif.
4. Konduksi pada hantaran konduktif berupa gelombang berjalan di udara atau dalam tanah.

Sambaran tidak langsung dapat mengenai saluran transmisi udara tegangan tinggi yaitu dengan menyambar pada daerah luar saluran transmisi yang dimana daerah tersebut telah dilindungi oleh kawat petir. Sambaran tidak langsung yang terjadi di saluran transmisi biasanya disebut sambaran induksi. Akibat dari adanya sambaran tidak langsung pada saluran transmisi adalah adanya induksi yang dapat mengakibatkan adanya gangguan pada saluran distribusi tersebut.

1.2.7. Gelombang Berjalan

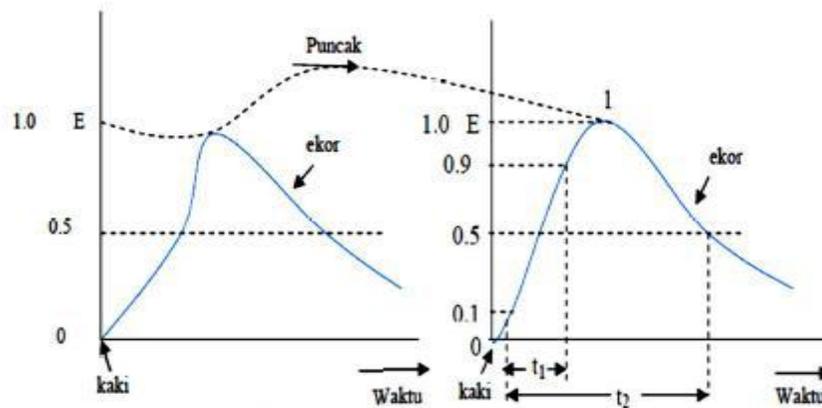
Sambaran petir yang mengenai kawat penghantar dapat menimbulkan gelombang berjalan dengan kecepatan merambat gelombang berjalan tergantung dari konstanta-konstanta kawat. Pada kawat di udara, kecepatan merambat kira-kira 300 meter per mikrodetik yang memiliki kecepatan sama dengan kecepatan cahanya. Sedangkan pada kabel tanah kira-kira 150 meter per mikrodetik. (Hutauruk, 1998).

Sampai saat ini baru beberapa sebab yang telah diteliti yang dapat menyebabkan gelombang berjalan, antara lain:

1. Sambaran langsung pada kawat yang mengakibatkan timbulnya sujar petir.
2. Sambaran petir tidak langsung pada kawat (induksi).
3. Operasi pemutusan (*swiching oprations*).
4. Busur tanah (*arcing ground*).
5. Gangguan pada sistem oleh berbagai kesalahan.
6. Tegangan mantap sistem.

Bentuk umum suatu gelombang berjalan yang ditimbulkan oleh sambaran surja petir. Tipikal gelombang berjalan yang disebabkan oleh sambaran petir yaitu gelombang naik sampai ke gelombang puncak hanya membutuhkan waktu yang singkat kemudian disusul oleh penurunan gelombang yang lambat.

Gelombang berjalan tersebut dapat dilihat di gambar 2.2 gelombang berjalan di bawah ini:



Gambar 2. 3 Spesifikasi gelombang berjalan

Gelombang berjalan sendiri memiliki spesifikasi sebagai berikut:

1. Puncak (*crest*) gelombang, E (kv), yaitu amplitudo maksimum dari gelombang.
2. Muka gelombang, t_1 (mikrodetik) yaitu waktu dari permulaan sampai puncak. Dalam praktek ini diambil dari 10% E sampai 90% E terlihat pada gambar 2.2.b.
3. Ekor gelombang, yaitu bagian di belakang puncak. Panjang gelombang, t_2 (mikrodetik) yaitu waktu permulaan sampai titik 50% E pada ekor gelombang.
4. Polaritas, yaitu polaritas dari gelombang positif dan negatif.

Suatu gelombang berjalan (sujar) dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$E = t_1 \times t_2 \dots\dots\dots(2.12)$$

E = tegangan puncak gelombang (kV).

$t_1 \times t_2$ = rasio muka gelombang dikali dengan ekor gelombang (ms).

1.2.8. Transformator

Transformator adalah suatu peralatan tegangan tinggi yang digunakan untuk memindahkan daya dari suatu rangkaian ke rangkaian lain dengan mengubah tegangannya baik itu menaikannya (*step up*) maupun menurunkannya (*step down*) tanpa mengubah nilai frekuensinya dan berdasar atas prinsip induksi elektromagnetik. Dalam bentuknya yang paling sederhana sebuah transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) dan satu induktansi mutual. Kumparan primer adalah yang menerima daya dan kumparan sekunder terhubung pada beban. Kedua kumparan tersebut dibelit pada suatu inti besi yang yang terdiri atas material magnetik berlaminasi.

Ramadoni Syahputra (2015:104-105 dan 107) menyebutkan secara umum bagian-bagian transformator yaitu:

1. Bagian masukan, bagian masukan atau yang disebut juga sebagai bagian primer trafo. Bagian inilah yang dihubungkan dengan sumber energi listrik yang akan diubah.
2. Bagian keluaran, bagian keluaran atau yang disebut juga sebagai sekunder trafo. Bagian inilah yang dihubungkan dengan beban.
3. Bagian belitan atau koil, transformator memiliki dua macam belitan, yaitu belitan primer dan belitan sekunder. Belitan primer menarik energi listrik dari sumber untuk kemudian ditransformasikan (diubah tegangannya) ke beban. Pada umumnya bagian primer dan sekunder transformator dipisah-pisahkan menjadi beberapa koil Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi pembentukan fluks yang tidak menghubungkan bagian primer dan sekunder. Pentransformasian hanya akan terjadi saat fluks (*mutual flux*) menghubungkan bagian primer dan sekunder transformator, sementara untuk fluks yang tidak menghubungkan bagian primer dan sekunder disebut fluks bocor (*leakage flux*). Belitannya pun biasanya dibagi-bagi untuk menurunkan besar tegangan per koil. Hal ini sangat penting pada penggunaan untuk transformator

tegangan tinggi, karena ketebalan isolasi antar belitan akan memengaruhi konstruksi transformator.

4. Bagian inti (*core*), bagian ini digunakan agar fluks magnetisasi yang terbentuk lebih terarah. Inti transformator tidak berupa suatu besi yang padat, namun berupa lapisan-lapisan besi tipis yang ditumpuk. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi panas yang terbentuk sehingga mengurangi rugi-rugi daya trafo. Karena rangkaian primer dan sekunder tidak terhubung secara elektronis, maka inti besi ini memiliki peranan penting dalam pengiriman tenaga listrik dari primer ke sekunder melalui induksi magnetik.

1.2.9. Arrester

Lightning arrester atau LA yang biasa disebut arrester yaitu berfungsi sebagai pengaman instalasi (peralatan listrik pada instalasi) dari gangguan yang diakibatkan oleh sambaran petir maupun oleh sujar hubung. (Rahmawati, 2008).

Dengan dipasangnya alat arrester maka dapat memperkecil resiko kerusakan yang disebabkan oleh sambaran petir baik secara langsung maupun induktif atau tidak langsung yang dimana fungsi arrester sendiri adalah sebagai pengaman peralatan instalasi dari gangguan tegangan lebih akibat sambaran petir, maupun oleh surja hubung.

Alat ini sebagai *bay pas* yang memudahkan arus yang dihasilkan oleh kilat untuk lewat sehingga tidak menimbulkan kerusakan pada peralatan instalasi yang dilindungi. Yaitu ketika sujar petir mengenai jepitan arrester kedua sela percik, baik yang di luar maupun yang berada di dalam tabung serat akan tembus seketika dan membentuk jalan penghantar dalam yang berbentuk busur api. Jadi LA menjadi konduktor dengan impedansi rendah dan menyalurkannya ke bumi. Dimana karakteristik arrester sendiri yaitu yang bersifat insulator yaitu pada saat keadaan normal atau tegangan operasi maka arrester tidak akan mengganggu jaringan karena adanya pengaruh *follow current* namun pada saat tegangan operasi arus bocor masih tetap ada berupa arus yang mengalir ke tanah namun arus tersebut sangatlah kecil yaitu dalam bilangan mili-Ampere dan arus bocor ini cenderung mayoritas berbentuk arus kapasitif sehingga tidak begitu berbahaya bagi alat instalasi di sekitar arrester karena kapasitas arus bocor yang sangat kecil.

Pada saat terjadinya sujar petir yang mengenai arrester maka arrester akan menjadi bersifat konduktif namun dengan nilai resistansi yang sangat rendah akan mengalirkan arus yang dihasilkan oleh sambaran surja petir ke tanah melalu jalur yang telah terbentuk dengan kapasitansi dalam orde kilo-Ampere. Dengan kapasitas arus yang dihasilkan oleh surja petir jika mengenai langsung pada peralatan instalasi maka peralatan tersebut akan mengalami kerusakan bahkan kegagalan dalam sistem. Setelah surja petir menyambar arrester dan arus yang dihasilkan telah berhasil dilewatkan ke tanah maka arrester akan kembali bersifat isolator sehingga akan menghilangkan pengaruh *follow current*.

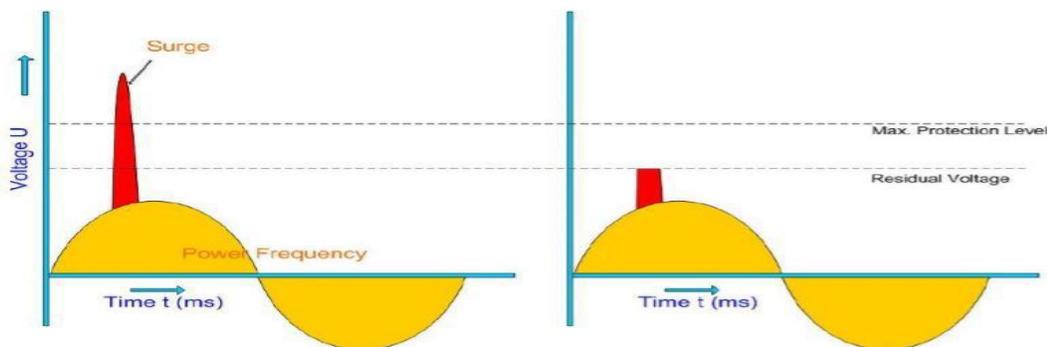
Pada umumnya pada gardu induk arrester akan di tempatkan berada dekat dengan peralatan peralatan utama seperti pada transformator dan peralatan lainnya agar dapat melindungi dari tegangan lebih yang diakibatkan oleh sujar petir atau sujar hubung. Adapun gambar penempatan arrester di sekitar transformator.



Gambar 2. 4. Penempatan arrester terhadap transformator

(sumber: Andriawan, 2014:1)

Maka pada saat terjadi *over voltage* akibat surja petir transformator akan aman karena arus yang dihasilkan oleh surja petir terlebih dahulu mengenai arrester dan dialirkan ke tanah sebelum arus tersebut sampai pada transformator dan peralatan lainnya. Di bawah ini adalah gambaran perbandingan gelombang tegangan terhadap waktu pada menggunakan arrester aupun tanpa menggunakan arrester.



Gambar 2. 5. Gelombang tegangan lebih *Transients*. Kiri tanpa arrester, kanan menggunakan arrester

(sumber: Rogerio IEEE, 2015:114)

Tegangan dasar arrester ditentukan berdasarkan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi. Tegangan ini dipilih berdasarkan kenaikan tegangan dari fase-fase yang sehat pada waktu ada gangguan 1-fase ke tanah di tambah suatu toleransi :

$$E_r = \alpha \cdot \beta \cdot U_m \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana :

E_r = tegangan dasar arrester

A = koefisien pembumian

β = toleransi

U_m = tegangan sistem maksimum

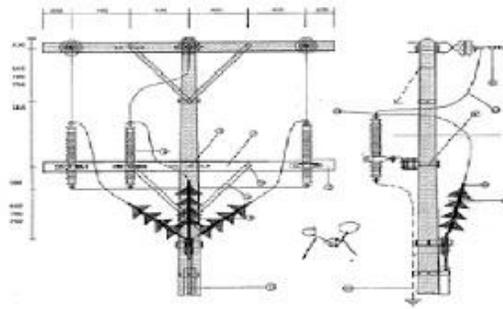
Koefisien α yang menunjukkan kenaikan dari fase yang sehat pada waktu ada gangguan 1-fase ke tanah, tegangan dari impedansi-impedansi urutan positif, negatif, dan nol dilihat dari titik gangguan. Nilai α kurang dari 0,8 bila $R_0/X_1 < 1$, $X_0/X_1 \leq 3$ pada sistem pembumian dengan tahanan harga α adalah 1,0. Tetapi jika saluran transmisinya panjang impedansi – impedansinya menjadi kapasitif dan nilai α nya menjadi lebih dari 1,0. Biasanya tegangan-tegangan dasar arrester dipilih antara 0,7 – 0,85. U_m (termasuk toleransi) dengan sistem untuk pembumian efektif dan kira kira 1,2 U_m untuk sistem dengan pembumian dengan tanah.

1.2.10. Prinsip Kerja Arrester

Arrester merupakan sebuah alat yang sangat vital dalam proteksi pada sistem tenaga listrik, arrester dipasang secara paralel dengan peralatan yang dilindungi. Penentuan lokasi arrester sangat penting sehingga tegangan lebih yang terjadi tidak akan mengenai alat yang dilindungi karena terlebih dahulu mengenai alat pelindung

(arrester). Pada gambar 2.6 memperlihatkan suatu alat pelindung tegangan lebih pada sambungan kawat dengan jaringan hantar udara. Pada keadaan tegangan operasi sampai 1.1 tegangan operasi arrester berperan sebagai isolator atau hanya sedikit mengalirkan atau bahkan tidak sama sekali menghantarkan arus jaringan ke tanah. Namun jika

Penempatan Pengaman Arrester Pada Tiang Opstijg Cable



terjadi tegangan lebih impuls tiba pada terminal arrester maka arrester akan berperan sebagai konduktor yang akan langsung mengalirkan arus tegangan lebih ke tanah sebelum mengenai alat yang dilindungi. Sehingga amplitudo tegangan lebih yang merambat menuju alat yang dilindungi masih dalam ambang batas yang ketahanan implus peralatan yang dilindungi.

Gambar 2. 6. Penempatan arrester pada tiang

(sumber. <https://cvaristonkupang.com>)

Arrester akan mengalirkan arus tegangan lebih ke tanah maka dari itu teknologi yang digunakan harus dapat dengan baik menghantarkan arus ke tanah. Ada pun teknologi arrester yang dikembangkan sejak 100 tahun silam adalah sebagai berikut: (PT PLN (persero). 2014)

1. 1892 – 1908 : Penggunaan air gaps
2. 1908 – 1930 : Multiple gaps dengan resistor
3. 1920 – 1930 : Lead oxide dengan resistor
4. 1930 – 1960 : Passive gapped silicon carbide (SiC)
5. 1960 – 1982 : Active gapped silicon carbide (SiC)
6. 1976 – sekarang : Zinc Oxide (ZnO) tanpa gap
7. 1985 – sekarang : Zinc Oxide (ZnO) tanpa gap dengan housing polymare

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.

1.2.11. Jenis - Jenis Arrester

Arrester memiliki berbagai jenis kelas dan golongan tergantung dari cara kerjanya dan maupun harga (ekonomis). Adapun jenisnya antara lain:

1. Arrester Eksplusi

Arrester jenis ini biasanya digunakan pada peralatan listrik bertegangan tinggi hingga 33 kV. Kontruksi arrester eksplusi memiliki dua sela yang terhubung seri seperti terlihat pada gambar 2.6. Relay yang terhubung seri ini merupakan sela luar dan sela dalam. Fungsi kedua sela ini adalah agar arrester dapat memikul tegangan tinggi frekuensi daya tanpa menimbulkan efek korona dan kebocoran arus ke tanah. Tegangan tembus kedua sela di buat lebih rendah dari pada tegangan lompat api isolator.

Apabila pada terminal arrester terkena tegangan implus akibat surja petir, maka kedua sela akan sama-sama terpercik, yang mengakibatkan arus mengalir ke dalam tanah. Arus petir akan mengakibatkan busur api, namun karena sambaran petir hanya berlangsung dalam waktu mikrodetik maka panas yang disebabkan oleh busur api relatif rendah. Setelah arus petir dialirkan ke tanah maka arus akan menjadi nol (0). Maka selanjutnya adalah akan terjadi arus susulan yang ditimbulkan oleh tegangan frekuensi daya dengan rentang waktu yang lebih lama yaitu milidetik sehingga energi panas yang ditimbulkan cukup besar, karena tegangan tembus lebih rendah dari pada tegangan lompatan api, maka energi panas akan dialirkan pada tabung serat dan akan membuat bahan organik yang berada di dalam tabung menguap dan menghasilkan gas bertekanan tinggi. Maka gas tersebut akan terdorong keluar dari lobang pipa dielektrik sela dalam yang ditanam di tanah (dibumikan). Gas ini yang berfungsi untuk mendinginkan busur api pada sela dalam.

Kemampuan gas untuk memadamkan busur api tergantung dari besarnya energi panas yang ada pada busur api, energi panas ini tergantung pada arus susulan yang terjadi, sedangkan arus susulan ini tergantung pada tegangan sistem dan parameter impedansi pada sistem, maka dari ini apabila regangan sistem semakin besar maka arus susulan dan otomatis busur api yang kan dihasilkan pula akan semakin besar. Yang akan berakibat pada ketidakmampuannya gas yang dihasilkan untuk mendinginkan busur api yang berakibat pada tidak berhentinya arus susulan, maka biasanya arrester jenis ini hanya digunakan untuk pengaman tegangan kurang dari 33 kV. Dalam praktiknya biasanya arrester ini digunakan untuk melindungi transformator distribusi bertegangan 3 – 15 kV. Menurut (Tobing L. Bonggas. 2012)

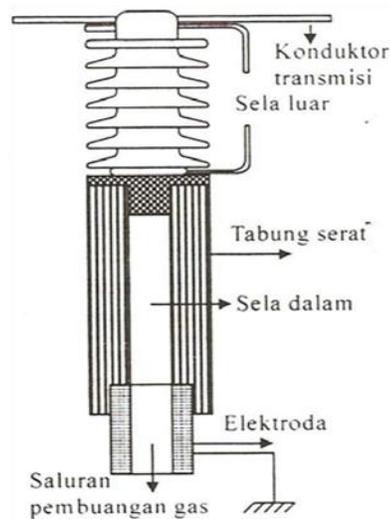
Keuntungan arrester tipe ini adalah:

1. Karena konstruksinya sederhana mengakibatkan harganya terjangkau.
2. Unjuk kerjanya lebih baik dari pada sela batang karena dapat memadamkan sendiri arus susulan.
3. Karakteristik volt-waktu arrester ini lebih baik dari pada sela batang.
4. Pemasangannya mudah.

Sedangkan kelemahannya adalah :

1. Setelah beberapa kali bekerja maka arester harus diganti karena setiap kali arrester bekerja, tabung serat mengeluarkan gas yang mengakibatkan sebagian material tabung terkelupas.
2. Adanya gas buang mengakibatkan arrester tidak dapat di tempatkan berdampingan dengan peralatan yang dilindungi.

3. Karakteristik volt-waktu arrester ini masih kurang baik sehingga tidak dapat digunakan untuk melindungi peralatan yang harganya mahal.



Gambar 2. 7. Arrester eksplosi

2. Arrester Katup

Berdasarkan sela percikanya arrester katup terdiri dari tiga jenis yaitu arrester sela pasif, arrester sela aktif dan arrester tanpa sela percik. Penempatan masing masing arrester berbeda-beda, untuk arrester sela pasif biasanya digunakan untuk jaringan distribusi hantaran udara dan untuk sela aktif digunakan pada jaringan tegangan tinggi dan pada pusat jaringan distribusi. Sedangkan untuk arrester tanpa sela percik digunakan untuk semua tingkat tegangan.

a. Arrester Katup Sela Pasif

Konstruksi arrester tipe ini tersusun atas sela percik, isolator tabung dan resisitor non-linier. Karena kerja arrester ini tidak terpengaruh oleh keadaan udara luar maka, sela percik yang tersusun dari plat-plat elektroda yang tersusun seri dan resisitor non-linear yang tersusun atas piringan- piringan silikon karbida (*silicon carbide*) yang tersusun secara seri di tempatkan di dalam tabung isolasi tertutup. Dengan nilai resistansi resisitor yang akan berubah menjadi besar ketika dialiri arus lemah namun sebaliknya saat dilewati arus yang kuat maka nilai resistor akan menjadi kecil.

Tegangan nominal arrester dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_t = i_p \cdot R \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

V_t = tegangan termal arrester saat teraliri arus

i_p = arus petir

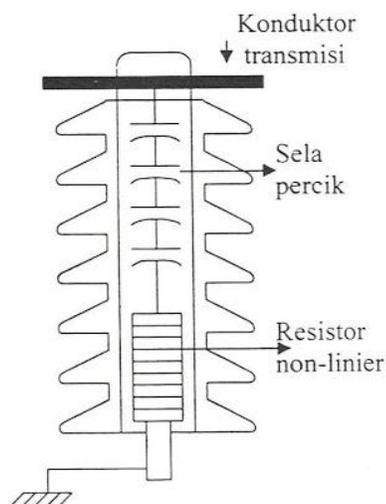
R = resistansi resistor non-linier

Pada saat sambaran petir mengenai arrester ini maka nilai resistansi akan mengecil dan nilai kenaikan tegangan yang di disebabkan oleh sambaran petir akan dibatasi (V_a) sehingga tidak akan sampai mencapai tegangan maksimum (V_t). Seperti pada gambar 2.8. karena arus puncak petir terjadi sangat cepat dan penurunnya lebih lambat maka selama selang waktu $t_1 - t_2$ (pada gambar 122c) maka resistansi resistor akan membesar yang mengakibatkan arus susulan menjadi kecil yang disebut arus kendali yang besarnya kurang dari 50 A. Ketika arus kendali menjadi nol (0) maka busur api akan padam .

Gambar 2. 8. Arrester katup sela percik

b. Arrester Katup Sela Aktif

Pada arrester katup sela aktif konstruksinya hampir menyerupai sela pastif



namun terdapat perbedaan pada metode pemadaman busur api. Pada sela katup aktif usaha untuk memadamkan busur api dengan cara memperpanjang dan

mendinginkan serta adanya pembangkitan medan magnet untuk memadamkan busur api.

Arrester katup sela aktif terdiri atas sel utama (Gu) kumparan (K), sela bantu (Gb) dan resistor non linier. Semuanya berada dalam tabung isolasi porselen, saat terjadi sujar petir maka sela utama akan terpeceik dan arus petir akan mengalir ke tanah melalui sela utama, kumpatan dan resistor (gambar b). Setelah arus menjadi nol (0) karena telah mengalir maka datanglah arus susulan yang berfrekuensi daya mengakibatkan terjadinya busur api yang tidak stabil dan energi panasnya kecil. Semua arus susulan mengalir pada kumparan yang membangkitkan medan magnet yang menerpa busur api pada sel utama dan membuat lintasan busur api semakin panjang sehingga membuat arus susulan bernilai nol (0) dan busur api pun padam.

c. Arrester Katup Tanpa Sela Percik

Arrester ini biasanya disebut dengan arrester MO karena bahan utama dari arrester ini menggunakan resistor non-linier yang berbahan logam oksidasi (*Metal – Okside*). Konstruksi dari arrester jenis ini adalah resistor non-linier yang terbuat dari kolom logam metal oksida yang tersusun secara seri yang dikurung oleh beberapa batang penyangga yang membuat arrester ini dapat berdiri dengan kokoh. Diantara sela tumpukan kolom isolator non linier terdapat mediun logam yang terbuat dari logam aluminium yang berfungsi untuk menghubungkan dua kolom logam oksidasi dan sekaligus sebagai pendingin.

Resistor logam oksida masukan dalam bejana isolasi keramik. Terdapat dua buah *peer* yang dipasang di kedua ujung resistor sebagai penghubung resistor dengan penutup bejana yang terbuat dari diafragma bahan anti korosi biasanya terbuat dari nikel atau baja murni. Saat logam oksida mengalami pemanasan berlebih maka tekanan yang berada pada ruang bejana isolasi akan naik mengakibatkan tertembusnya diafragma dan udara dapat keluar melalui lubang-lubang ventilasi pada kedua ujung arrester.

Karena resistor non-linier terhubung langsung pada jaringan maka pada saat tegangan operasi arrester hanya mengalirkan arus yang sangat rendah ke tanah dalam ordo 10^{-4} Ampere pada tegangan hingga 350 kV. Pada saat terjadi

tegangan lebih arrester akan merespon dengan kecepatan tanggap dalam ordo 0,5 nanosekon. Pada saat tegangan lebih mengenai terminal arrester maka resistor non-linier akan menurun sehingga akan mengalirkan arus ke tanah dalam ordo yang tinggi sampai ratusan kiloampere.

Kelemahan dari arrester ini adalah adanya kebocoran arus yang berkelanjutan ke tanah walaupun hanya nanoampere, menyerap energi yang besar dan mengandung kapasitansi, yaitu kapasitansi yang terbentuk oleh kepingan logam-logam oksida.

1.2.12. Pemilihan Arrester

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

1. Kebutuhan perlindungan, berhubungan dengan kekuatan isolasi peralatan yang harus dilindungi dan karakteristik impuls dari arrester.
2. Tegangan sistem adalah tegangan pada terminal arrester.
3. Arus hubung singkat, sistem ini hanya diperlukan pada arrester jenis ekspulsi.
4. Faktor kondisi luar, apakah normal atau tidak normal dan temperatur atau kelembaban yang tinggi serta pengotoran.
5. Faktor ekonomi, adalah perbandingan antara biaya pemeliharaan dan kerusakan bila tidak ada arrester atau dipasang arrester yang lebih rendah mutunya.

1.2.13. Pemeliharaan Arrester

Pemeliharaan arrester yaitu pemeliharaan yang bertujuan untuk mencegah terjadinya kegagalan peralatan saat melakukan proteksi tegangan lebih. Perawatan arrester terdapat dua kegiatan yaitu kegiatan *reactive maintenance* (kegiatan perbaikan pasca gangguan) dan *proaktive maintenace*, kegiatan proaktif sendiri terbagi menjadi 2 tahapan yaitu preventive dan prediktive maintenance.

Preventive maintenance atau lebih dikenal dengan *Time Base Maintenance* (TBM). Dalam pemeliharaan ini kegiatan pemeliharannya dilaksanakan dengan interval waktu tertentu, tanpa memperhatikan keadaan kondisi arrester.

1.2.14. Pemilihan Tingkat Isolasi Dasar

Basic Insulation Level (BIL) merupakan suatu referensi level yang berfungsi sebagai standari yang dinyatakan dalam impuls *crest voltage* (tegangan puncak impuls)

dengan standari suatu gelombang 1,2.50 μ s sehingga isolasi dari peralatan-peralatan listrik harus memiliki karakteristik ketahanan impuls sama atau bahkan lebih tinggi dari BIL tersebut (Hendra, 2016). Maka dari itu pemilihan tingkat isoilasi sangatlah penting untuk menunjang *live time* atau masa keawatan transformator.

1. Tegangan Pengenal Arrester

Tegangan pengenal merupakan tegangan efektif tertinggi yang mungkin dapat dipikul oleh arrester. Pata arrester sela percik cara mentukan regangan pengenal arrester dapat di ketahui melalui persamaan sebagai berikut:

$$V_{\text{pengenal}} = 1.075 (1,1 k_g \cdot V_{\text{nom}}) \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana:

V_{pengenal} = tegangan pengenal arrester

k_g = ketahanan ground

V_{nom} = tegangan nominal

Sedangkan untuk menentukan tegangan pada pengenal arrester tipe sela tanpa percik menggunakan persamaan berikut:

$$V_{\text{ptt}} = \frac{V_{\text{tt}}}{k_{\text{tls}}} \dots\dots\dots(2.16.a)$$

$$V_{\text{tt}} = k_g \cdot V_{\text{max}} \dots\dots\dots(2.16.b)$$

Dimana:

V_{ptt} = Tegangan pengenal arester tipe sela percik

V_{tt} = Tegangan tertinggi

k_g = ketahanan *ground*

V_{max} = Tegangan maksimum

k_{tls} = Ketahanan tegangan lebih sementara

2. Tegangan Nominal Arrester

U_a (Nominal Voltage Arrester) adalah tegangan dimana arrester masih dapat bekerja sesuai dengan karakteristiknya, yaitu dimana jika tingkat perlindungan arrester di bawah BIL (tegangan kerja penangkal petir dibawah BIL) maka peralatan

yang akan dilindungi cukup aman. Tegangan nominal arrester tergantung pada arus pelepasan dari arrester I_a dan kecuraman gelombang arus (di/dt).

3. Tegangan Percikan Impuls Maksimum

Tegangan percik impuls maksimum merupakan puncak tegangan impuls yang akan membuat arrester terpeccik atau membuat arrester akan bekerja dan memotor surja petir serta mengalirkannya ke tanah. Misalnya suatu arrester memiliki tegangan percik impuls maksimum sebesar 65 kV, jika arrester tersebut di uji dengan tegangan 65 kV - 1,2/50 μ s berupa impuls positif sebanyak 5 kali, maka sela arrester akan terpeccik sebanyak 5 kali, demikian pula dengan tegangan impuls negatif.

Tabel 2. 1. Karakteristik arrester

Pengenal Arrester (kv)	Kecuraman FOW (kv/ μ s)	10 kA dan 5 kA		5 kA	
		STD (kV)	FOW (kV)	STD (kV)	FOW (kV)
3	25	13	15	13	15
4,5	37	17,5	20	17,5	20
6	50	22,6	26	22,6	26
7,5	62	28	31	28	31
9	76	32,5	38	32,5	38
12	100	43	50	43	50
15	125	54	62	54	62
18	150	65	75	65	75
21	175	76	88	76	88
24	200	87	100	87	100
27	225	97	112	97	112
30	250	108	125	108	125
33	275	119	137	119	137
36	300	130	150	130	150

4. Penentuan Arus Pelepasan Nominal/Arus Peluahan Nominal

Arus pelepasan/peluahan nominal adalah sebuah standari yang digunakan sebagai acuan dalam pemilihan kelas arrester sebagai pelindung dari terjadinya sujar petir menurut standari IEC 60099-1 penentuan arus pelepasan nominal pada arrester tipe sela percik sebagai berikut dengan klasifikasi arrester menurut kemampuan mengalirkan arus peluahan 10/20 μ s, dengan standari arus peluahan nominal arrester:

1. 10 kA, 10/20 μ s, digunakan pada gardu induk yang berkawasan sering terjadinya sambaran petir dan pada tegangan sistem > 66 kV.
2. 5 kA, 10/20 μ s, digunakan pada gardu induk bertegangan \leq 66 kV.
3. 2,5 kA, 10/20 μ s digunakan pada sistem bertegangan \leq 22 kV.
4. 1,5 kA 10/20 μ s, digunakan pada sistem distribusi bertegangan \leq 22 kV.

Sedangkan pada jenis arrester tanpa sela percik dengan standari menurut IEC 600099-4 dengan besar puncak arus impuls 8/20 μ s dengan standari arus peluahan nominal arrester:

1. 2,5 kA, digunakan untuk tegangan nominal \leq 36 kV.
2. 5 kA, digunakan untuk tegangan nominal \leq 132 kV.
3. 10 kA, digunakan untuk tegangan nominal 3 – 360 kV.
4. 20 kA, digunakan untuk tegangan nominal diatas 360 kV hingga 756 kV.

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

$$I\alpha = \frac{2 U_d - U_a}{Z} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dengan :

$I\alpha$ = 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:

$$R = \frac{U_a}{I_a} \dots\dots\dots(2.18)$$

Dengan :

R = Resistansi arrester (Ω)

U_a = Tegangan kerja/tegangan sisa arrester (kV)

I_a = Arus pelepasan arrester (kV)

Tabel 2. 2. Penetapan tingkat isolasi transformator dan penangkal 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	Efektif	Efektif
Transformator tegangan Pengenal (sisi tegangan tinggi)	150 kV	66 kV	20 kV
Tingkat Isolasi Dasar (TID)	650 kV	325 kV	125 kV
Penangkap Petir Tegangan Pengenal	138 kV	75 kV	21 kV
	150 kV		24 kV
Arus Pelepasan Nominal	15 kA	10 kA 5 kA	5 kA
Tegangan Pelepasan	460 kV	270 kV	76 kV
	570 kV		87 kV
Tegangan Percikan Denyut Muka Gelombang (MG)	530 kV	310 kV	88 kV
	677 kV		100 kV
Tegangan Percikan Denyut standari *	460 kV	270 kV	76 kV
	570 kV		78 kV
Kelas	10 kA Tugas Berat	10 kA Tugas Ringan	5 kA Seri A
	10 kA Tugas Ringan	5 kA Seri A	

1.2.15. 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. Adapun jarak lindung arrester ke peralatan yang dilindungi adalah menggunakan persamaan:

$$L = \frac{U_t - U_a}{2 \frac{du}{dt}} V \quad (2.19)$$

Dengan:

- L = Jarak antara arrester dengan peralatan yang dilindungi (m)
- U_t = Tegangan ketahanan terhadap gelombang impuls dari peralatan yang dilindungi (kV)
- U_a = Tegangan kerja arrester (kV)
- du/dt = Kecuraman dari gelombang yang datang (kV/ μ s) nilai berkisar antara 1000 kV/ μ s – 2000 kV/ μ s
- V = Kecepatan propagasi gelombang tegangan lebih: 300 m/ μ s untuk saluran udara, 150 m/ μ s untuk kabel.

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:).

$$Ep = Ea + 2 A S / v \dots\dots\dots(2.20)$$

Dengan :

- Ea = Tegangan percik arrester (kV)
- Ep = Tegangan pada jepitan transformator (kV)
- $A:de/dt$ = Kecuraman gelombang datang konstan (1000 kV/ μ s)
- S = Jarak arrester dan transformator (m)
- v = Kecepatan merambat gelombang (300 m/ μ s)

1.2.16. Spesifikasi Arrester Gardu Induk 150 kV Kentungan

Adapun spesifikasi arrester yang terpasang pada Gardu Induk 150 kV Kentungan adalah sebagai berikut:

1. Arrester transformator tenaga II (60 MVA)

Merek	: OHIO BRASS
Pabrik	: HUBBELL POWER SYSTEM,INC.AIKEN, SHOUT CAROLINA- WADSWORTH, OHIO, USA
Tahun pembuatan	: 2015
Type	: PH317OGV132AA
Standari	: IEC 99-4 1991
Rating Tegangan	: 105.6 kV RMS
Tegangan Refrensi	: 132 kV RMS
Ur (48-62 Hz)	
Hubung Singkat	: 63 kA RMS
Arus Peluahan Nominal	: 10 Ka
Panjang arrester	: 1.2 meter

Adapun tabel karakteristik arrester yang digunakan di Gardu Induk 150 kV Pada transformator tenaga II adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 3. Karakteristik arrester transformator tenaga II

Arus (A)	Tegangan (V)
1500	271000
3000	282000
5000	295000
10000	166000
20000	420000
40000	390000

2. Arrester transformator tenaga III (60 MVA)

Merek	: TRIDELTA
Tempat Pembuatan	: German
Kode Produk (R/S/T)	: 1139.6-0150.00
Type	: SB 150/10.3-0

Standari	: IEC 60099-4
Rating Tegangan (RMCOV/Uc)	: 150 kV
Tegangan Refrensi Ur (48-62 Hz)	: 120 kV
Reting frekuensi	: 48 -62 Hz
Hubung Singkat	: 20 kA RMS
Arus Peluahan Nominal	: 10 kA

Adapun tabel katakteristik arrester yang digunakan di Gardu Induk 150 kV pada transformator tenaga III adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 4. Katakteristik transformator tenaga III

Arus (A)	Tegangan (V)
1500	298000
3000	311000
5000	325000
10000	368000
20000	384000
40000	436000

1.2.17. Software ATP Draw

EMTP (*Electromagnetic Transient Program*) adalah sebuah paket program komputer terintegasi yang secara khusus didesain untuk meyelesaikan permasalahan peralihan (*transient*) pada sistem tenaga listrik untuk rangkaian terkonsentrasi, rangkaian terdistribusi atau kombinasi dari kedua rangakian 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 transient 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 transient 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 transient 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).