

BAB II

2.1 Tinjauan Pustaka Dan Landasan Teori

Pada penelitian sebelumnya (Haryati. 2007) dengan judul “Analisis Perhitungan Gangguan dan Pengaman Surja Petir pada Jaringan Distribusi PT. PLN (PERSERO) Cilacap. Pada penelitian ini membahas tentang suatu jaringan distribusi yang tersambar surja petir sehingga menyebabkan kerusakan pada pengaman yang ada di jaringan distribusi dan gangguan yang dialami oleh pelanggan, sehingga harus ada penanganan supaya kehandalan sistem distribusi menjadi tinggi dan kebutuhan tenaga listrik untuk konsumen dapat terlayani dengan baik.

Kemudian pada penelitian yang dilakukan oleh (Aris. 2012) dengan judul “Penentuan Kinerja Arrester Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV Akibat *Stray Capacitance* Dengan Menggunakan Simulasi EMTP”. Pada penelitian ini membahas untuk menentukan bagaimana pengaruh kecepatan kinerja *arrester* akibat adanya *stray capacitance* pada jaringan tegangan menengah 20 kV, untuk pemodelan dalam menganalisis kemampuan *arrester* dengan menggunakan perangkat lunak EMTP.

Selain itu pada penelitian (Sintianingrum, Martin, dan, Komalasari. 2016). Dalam *Electrician – Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 2016) dengan judul “Simulasi Tegangan Lebih Akibat Sambaran Petir terhadap Penentuan Jarak Maksimum untuk Perlindungan Peralatan pada Gardu Induk”. Pada penelitian ini dilakukan simulasi tegangan lebih akibat sambaran petir terhadap penentuan jarak maksimum untuk perlindungan peralatan pada gardu induk, simulasi yang

dilakukan bertujuan untuk mengetahui besar tegangan yang ditimbulkan petir terhadap arrester dan menghitung jarak maksimum arrester dan transformator yang disarankan.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Widiyanto, 2014) dengan judul “Analisis Keandalan Jaringan Akibat Induksi Sambaran Petir pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 20 kV Studi Kasus Penyulang MJG 06 PT. PLN (PERSERO) Area Pelayanan Jaringan Cilacap”. Pada penelitian ini membahas keandalan jaringan terhadap gangguan sambaran petir tidak langsung (*indirect stroke*) dan bagaimana pengaruh tegangan induksi akibat sambaran petir tidak langsung terhadap *suspension type insulator*.

Penyempurnaan dari penelitian ini dari penelitian-penelitian sebelumnya yaitu pada penelitian akan membahas tentang sambaran induksi secara tidak langsung yang menyambar KBL 9 terutama pada *zone 3* serta menentukan berapa jarak yang efektif untuk pemasangan *arrester* agar dampak petir tidak mempengaruhi keperalatan lain sehingga peralatan lain tidak rusak sehingga keandalan sistem distribusi menjadi tinggi dan kebutuhan tenaga listrik kepada konsumen dapat terlayani dengan baik.

Selain itu pada penelitian ini juga akan mensimulasikan daerah yang sering tersambar petir di penyulang KBL 9 di *zone 3* dengan aplikasi ATP Draw dan juga melihat keandalan *arrester MOV* yang dipasang pada jaringan melalui aplikasi ATP Draw apakah sudah sesuai atau belum, sehingga pada nantinya bisa diusulkan ke PLN jika *arrester* belum mencapai tingkat aman.

2.2 Tegangan lebih

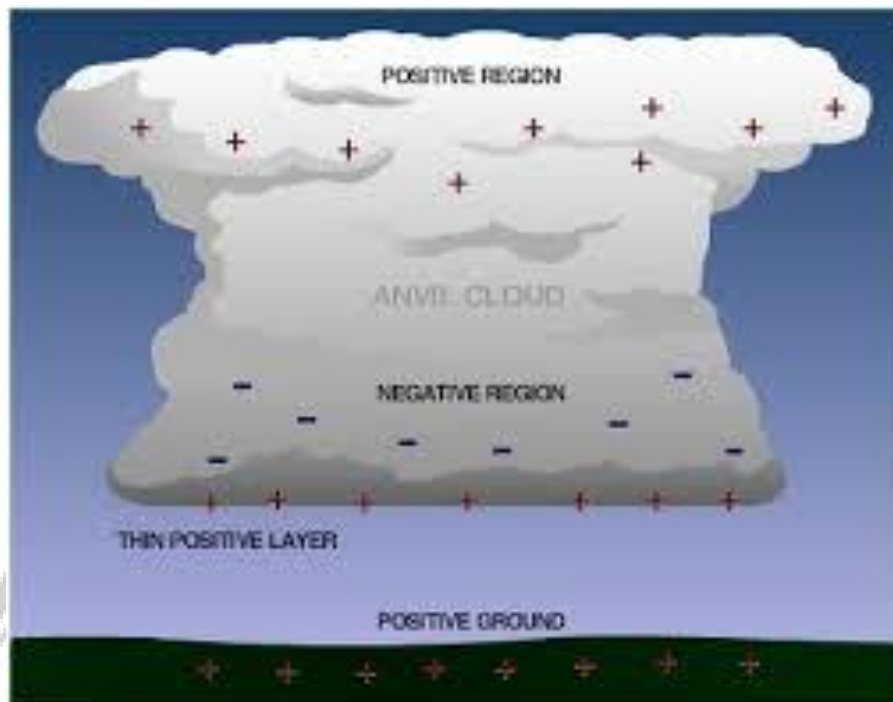
Tegangan lebih adalah tegangan yang hanya dapat ditahan untuk kurun waktu terbatas, sehingga jika tegangan lebih ini terjadi dalam kurun waktu melebihi batas kemampuan peralatan maka dapat menyebabkan terjadinya kerusakan pada peralatan yang mendapat tegangan lebih tersebut (Zoro,2009). Tegangan lebih yang sering menimbulkan gangguan dalam sistem tenaga listrik berasal dari dua sumber utama yaitu tegangan lebih internal dan tegangan lebih eksternal. Sumber tegangan internal meliputi operasi *on/off switching*. Tegangan lebih eksternal berasal dari gangguan yang terjadi di atmosfer. Penyebab utama tegangan lebih eksternal adalah sambaran petir.

2.3 Tegangan Lebih Petir

2.3.1 Fenomena Petir

Sebelum petir terbentuk biasanya udara dibagian atas awan tidak stabil. Ini berarti tekanan dan variasi temperatur di atmosfer juga tidak stabil, jika sejumlah udara bergerak ke atas, maka gerakan itu menjadi semakin besar. Persistiwa itu menjadi cikal bakal awan *cumulonimbus* yang mempunyai ketinggian pusatnya mencapai lebih dari 20 kilometer. Di tengah acuan *cumulonimbus* ini dapat terjadi gerakan awan ke atas yang mencapai kecepatan 120 Km/jam, gerakan awan keatas ini dapat membentuk putaran atau *turbulence* yang membahayakan pesawat terbang. Gerakan ke atas ini menyebabkan pula pemisahan muatan yang dapat menciptakan loncatan petir. Bagian yang satu menunjukkan distribusi muatan secara sederhana dalam bentuk awan guntur. Seperti air terjun gerakan jatuhnya air dari atas kebawah dalam jumlah besar menciptakan muatan listrik positif dan

juga terbentuk partikel yang besar yang bermuatan negatif, gerakan ke atas dari awan *cumulonimbus* ini memisahkan muatan dan membawa partikel yang bermuatan positif ke atas. Konsentrasi muatan negatif pada awan bagian bawah menyebabkan loncatan petir ketanah datar di bumi sebesar 90% (awan negatif dan bumi positif). Berpisahnya muatan listrik diawan menjadi netral. Loncatan ini dapat terjadi dari awan ke awan atau dari awan ke tanah, suatu cahaya panjang atau kilat cahaya ini dapat bergerak munculnya dari awan. Cahaya ini dapat dengan cepat bergerak ke tanah dan dapat bergerak muncul dari awan. Cahaya ini dapat dengan cepat bergerak ke tanah dan dapat bercabang menjadi banyak yang semuanya berusaha mencapai bumi. Jika suatu kilatan ini mencapai suatu tempat tanah, maka ada arus yang bergerak ke atas dari suatu *grounding* (pentanahan), gerakan ke atas pertama ini akan melengkapi hubungan listrik ke tanah dan loncatan pertama (*main discharge*) akan muncul. Suatu titik petanahan yang karena letak dan bentuknya dapat membentuk medan intensif dan dapat meluncurkan streamer (garis) petir pada titik pentanahan yang lainnya akan cenderung menjadi *lightning strike point* seperti yang ditunjukkan Gambar 2.1 di bawah ini (Haryati. 2007).

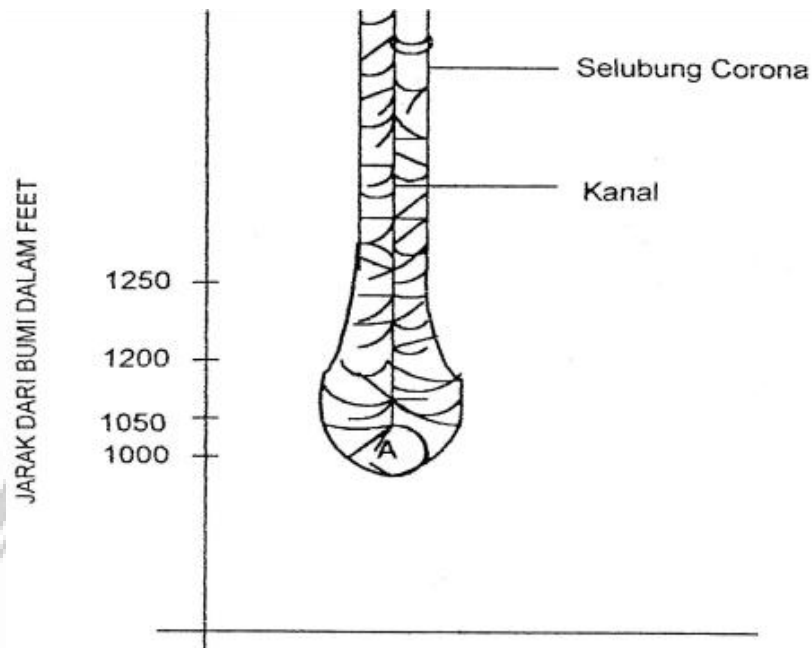


Gambar 2.1 Fenomena terjadinya petir

(Sumber: Anonim)

2.3.2 Tahap Sambaran Petir Ke Tanah

Menurut (Zoro, 2009) pada saat gradien listrik di awan melebihi harga tembus udara yang terionisasi, terjadilah *pilot streamer*, yang menentukan arah rambatan muatan dari awan udara yang ionisasinya rendah di ikuti dengan titik cahaya. Setiap sambaran bermula petir bermula sebagai suatu lidah petir (*stepped leader*) yang bergerak turun (*down leader*), dari awan bermuatan. Kemudian gerakan *pilot streamer* yang diikuti dengan lompatan-lompatan titik-titik cahaya yang di namakan (*stepped leader*) yang bergerak turun (*down leader*), dari awan bermuatan. Kemudian gerakan *pilot streamer* yang diikuti dengan lompatan-lompatan titik-titik cahaya dinamakan *stepped leader*. Arah setiap langkah *step leader* berubah-ubah, sehingga secara keseluruhan jalannya tidak lurus dan patah-patah. Gambar 2.2 Merupakan model dari *Stepped Leader*.



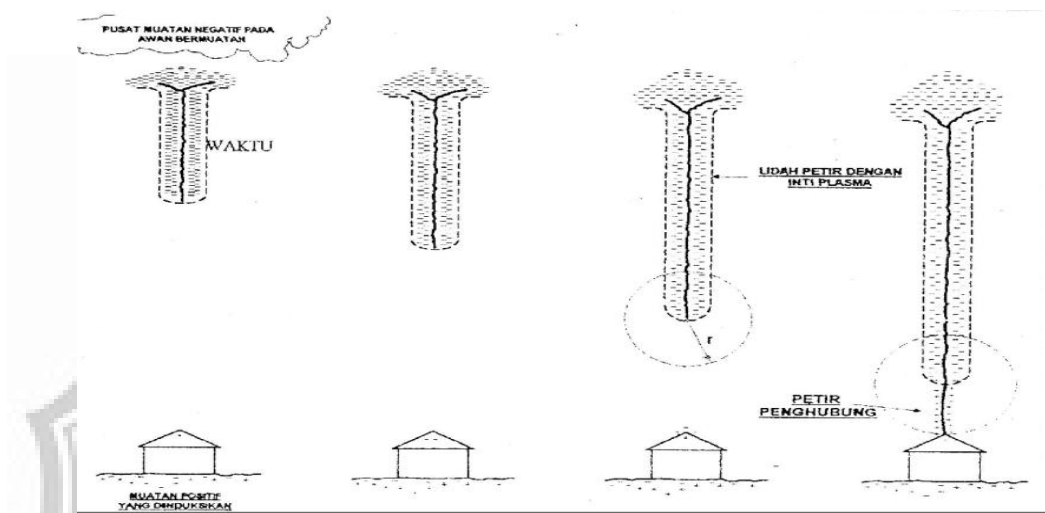
Gambar 2.2 Model *Stepped Leader*

(Sumber: Reynaldo Zoro, 2009)

Menurut hipotesa Wagner dan Hileman, *stepped leader* terdiri dari dua bagiannya yaitu suatu inti tipis berdaya hantar tinggi, disebut kanal dan di kelilingi oleh suatu muatan ruang negatif, disebut *korona*. Gradien tegangan di dalam selubung korona mempunyai karakteristik suatu pelepasan muatan korona, temperaturnya rendah, tertembus banyak alur.

Bila kanal lidah lompat dari komponen pertama petir telah dekat ke permukaan bumi, maka dengan proses yang sama dari bumi akan terbentuk pula kanal muatan positif, menunjukkan awan sebagai akibat beda potensial yang tinggi. Kanal muatan positif ini akan bertemu dengan ujung *stepped leader* di atas permukaan bumi. Pada saat itu suatu sambaran balik (*returnstroke*) yang bercahaya sangat terang bergerak dari bumi ke awan melalui jalan yang sama

dengan turunnya *stepped leader* tersebut. Sambaran balik adalah aliran muatan positif dari bumi ke suatu muatan di awan. Gambar 2.3 menunjukkan bagaimana tahapan sambaran petir ketanah.



Gambar 2.3 Tahapan Sambaran Petir ke Tanah

(Sumber: Reynaldo Zoro, 2009)

Ciri-ciri lidah sambaran petir yang kedua adalah tidak adanya pencabangan, disebut sebagai lidah panah (*dart leader*) setelah lidah panah mencapai bumi, suatu sambaran balik bergerak cepat menuju ke awan seperti sambaran balik yang pertama. Dengan dilepaskannya muatan listrik dari pusat muatan yang kedua, terbentuklah lidah petir pada saat muatan ketiga dengan proses yang sama terulang kembali. Pada umumnya hampir separuh sambaran merupakan sambaran ganda seperti di atas.

2.3.3 Jumlah Sambaran Petir ke Bumi

Jumlah sambaran petir ke bumi adalah sebanding dengan jumlah hari guruh atau *Iso Keraunic Level* (IKL) di tempat itu. Jumlah sambaran petir di Indonesia dapat dihitung dengan rumus(Hutauruk, T.S, 1991):

$$N = 0,15 \times \text{IKL} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

N = Jumlah sambaran petir per km²

IKL = Jumlah hari guruh pertahun

Sementara untuk jaringan listrik jumlah sambaran ini diperhitungkan dalam 100 km per tahun maka jumlah sambaran kilat itu menjadi:

$$NL = N \times A \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

NL = Jumlah sambaran pada saluran sepanjang 100 km per tahun

A = Luas bayang-bayang untuk 100 km panjang saluran

A = $0,1 (b + 4h^{1,09})$ km² per 100 km saluran

h = Tinggi kawat diatas tanah (m)

b = Jarak kawat satu dengan jarak dua (m)

2.3.4 Impedansi Surja Saluran Udara Menengah

Impedansi surja pada saluran udara menengah dapat di hitung dengan menggunakan rumus (Hutauruk, T.S, 1991):

Impedansi surja sendiri (Z₂₂)

$$Z_{11} = 60 \ln 2h/r \dots\dots\dots(2.3)$$

Impedansi bersama (Z₁₂)

$$Z_{12} = 60 \ln a/b \dots\dots\dots(2.4)$$

Impedansi surja rata-rata (Z_{av})

$$Z_{av} = Z_{11} + Z_{12} + \dots\dots + Z_{nn}/n \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

r = Jari-jari konduktor (m)

h = Tinggi konduktor diatas bidang potensial nol (m)

a = Jarak antara kawat satu dengan bayangan kawat dua (m)

b = Jarak antara kawat satu dengan kawat dua (m)

2.4. Sambaran Petir Pada Saluran Distribusi

Menurut Hutaruk, T.S,1991, saluran distribusi merupakan salah satu bagian dari sistem tenaga listrik. Saluran distribusi tersebut tidak luput dari ancaman gangguan petir. Gangguan petir pada saluran adalah kejadian tidak berfungsinya saluran dalam menyalurkan daya listrik karena sambaran petir baik secara langsung maupun tidak langsung. Akibat yang ditimbulkan karena adanya gangguan petir tersebut adalah :

1. Memutuskan kontinuitas pelayanan daya pada konsumen bila gangguan tersebut sampai memutus sirkuit.
2. Menyebabkan rendahnya kualitas tenaga listrik
3. Mengurangi stabilitas kerja sistem
4. Merusak peralatan pada daerah yang terkena atau terpengaruh sambaran petir.

Pada saluran udara tegangan menengah gangguan petir akibat sambaran langsung atau sambaran induksi tidak boleh diabaikan. Justru gangguan petir

akibat sambaran induksi ini lebih banyak dibandingkan dengan gangguan petir akibat sambaran langsung. Hal tersebut disebabkan karena tingkat ketahanan impuls isolasi tegangan V 50% dari isolator SUTM relatif rendah dan luasnya daerah sambaran induksi, sehingga jumlah sambaran induksi juga jauh lebih banyak di bandingkan jumlah sambaran langsung.

2.4.1 Sambaran Langsung

Menurut Hutaeruk, T.S,1991, sambaran langsung terjadi apabila kilat menyambar langsung pada kawat fasa (untuk saluran tanpa kawat tanah) atau pada kawat tanah (untuk saluran dengan kawat tanah). Pada saluran udara tegangan menengah di asumsikan bahwa saluran dengan kawat tanah tidak ada kegagalan perisaian. Asumsi ini dapat di benarkan karena tinggi kawat di atas tanah relatif rendah (10 sampai 13 meter) dan juga karena ada sudut perisaian yang biasanya lebih kecil 60° sudah dapat dianggap semua sambaran kilat mengenai kawat tanah , jadi tidak ada kegagalan perisaian.

Pada waktu kilat menyambar kawat tanah atau kawat fasa akan timbul arus sebesar dan secepat gelombang berjalan yang merambat pada kawat tanah. Arus besar ini dapat membahayakan peralatan-peralatan yang ada pada saluran. Besarnya arus atau tegangan akibat sambaran ini tergantung pada besar arus kilat, waktu muka dan jenis tiang saluran. Oleh karena itu saluran tegangan menengah tidak begitu tinggi diatas tanah, maka jumlah sambaran langsung pun rendah. Semakin tinggi tegangan sistem semakin tinggi tiangnya, dan semakin besar pula jumlah sambaran ke saluran itu.

Bila petir mengenai langsung ke penghantar SUTM, kemungkinan besar penghantar tersebut akan terputus karena gelombang petir yang menimbulkan tegangan impuls melebihi BIL (*Basic insulation level*) dari penghantar SUTM. Kalau petir yang mengenai SUTM bukan sambaran langsung tetapi induksi dari petir, gerak dari gelombang petir itu menjalar kesegala arah dengan peralatan lain terjadi gelombang berjalan sepanjang jaringan yang menuju suatu titik lainnya yang dapat menetralsir arus petir tersebut yaitu menuju ketitik pentanahan.

2.4.2 Sambaran induksi

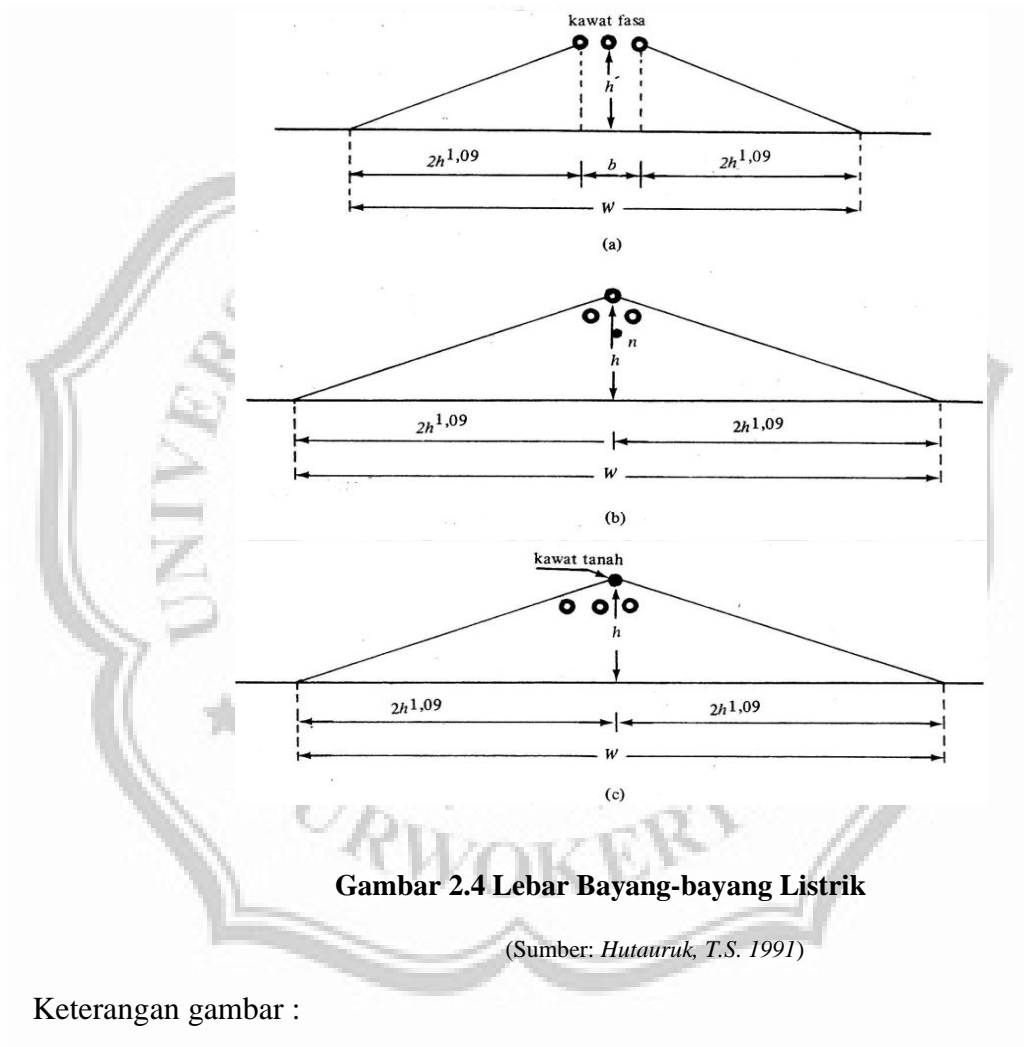
Bila terjadi sambaran kilat ke tanah didekat saluran maka akan terjadi fenomena transien yang diakibatkan oleh medan elektromagnetis dari kanal kilat. Fenomena kilat ini terjadi pada kawat penghantar. Akibat dari kejadian ini timbul tegangan lebih dan gelombang berjalan yang merambat pada kedua sisi kawat ditempat sambaran langsung.

Fenomena transien pada kawat berlangsung hanya dibawah pengaruh gaya yang memaksa muatan-muatan bergerak sepanjang hantaran. Atau dengan perkataan lain transien dapat terjadi di bawah pengaruh komponen vektor kuat medan yang berarah sejajar dengan arah penghantar. Jadi bila komponen vektor dari dari kuat medan dan berarah vertikal, dia tidak akan mempengaruhi atau menimbulkan fenomena transien pada penghantar.

Suatu saluran distribusi di atas tanah dapat membentuk bayang-bayang listrik pada tanah yang berada di bawah saluran distribusi tersebut, pada gambar 2.4 menunjukkan lebar bayang-bayang listrik. Diluar daerah perisaian kilat

dianggap menyambar langsung ketanah atau sambaran induksi. Lebar bayang-bayang listrik diberikan dengan persamaan sebagai berikut (Hatauruk, T.S, 1991) :

$$W = (b + 4^{h^{1,09}}) \text{ meter} \dots \dots \dots (2.6)$$



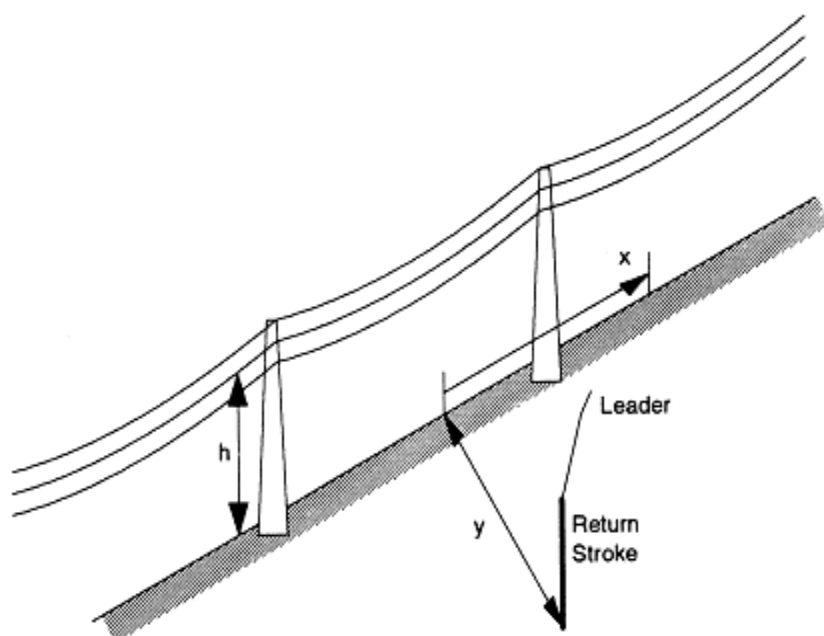
Keterangan gambar :

- (a) Saluran udara tanpa kawat tanah
- (b) Saluran udara dengan kawat netral n ($b = 0$)
- (c) Saluran udara dengan satu kawat tanah ($b = 0$)

W = Lebar bayangan listrik

2.4.3 Induksi Petir Pada Saluran Jaringan Tegangan Menengah

Sambaran tidak langsung, terjadi karena induksi elektromagnetik akibat sambaran petir didekat saluran udara atau induksi elektrostatik akibat awan bermuatan di atas saluran udara. Sambaran tidak langsung selanjutnya adalah sambaran petir ketanah di dekat saluran udara. Sambaran induksi merupakan fungsi dimana petir tersebut menyambar di dekat saluran. Tegangan lebih induksi tidak begitu berpengaruh pada saluran transmisi tetapi menyebabkan gangguan pada saluran distribusi, karena menurut penelitian tegangan yang diinduksikan sedikit lebih kecil dari tegangan transmisi sehingga efeknya tidak terasa pada level saluran tegangan yang lebih rendah. (Zoro, 2009). Gambar 2.5 menunjukkan induksi petir pada saluran udara.



Gambar 2.5 Induksi Petir pada Saluran Udara

(Sumber: *Donald G. Fink, H. Wayne Beaty, 2002*)

Menurut Rusck,2002, tegangan induksi yang terjadi pada saluran udara pendek akibat sambaran petir adalah :

$$V_{ind} = U_1 + U_2 \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan :

$$U_1(x, y, h, t) = Z_0 I_0 h \frac{v}{v_0} \frac{v_0 t - x}{y^2 + \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 (v_0 t - x)^2} K_x \dots \dots \dots (2.8)$$

$$U_2(x, y, h, t) = U_1(-x) \dots \dots \dots (2.9)$$

$$K_x = \left(1 + \frac{x + \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 (v_0 t - x)}{\sqrt{\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 (v_0 t)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2\right) (x^2 + y^2)}} \right) \dots \dots \dots (2.10)$$

Keterangan :

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \text{Impedansi Surja (ohm)} \dots \dots \dots (2.11)$$

dan

I_0 = Amplitudo step dari arus sambaran balik (kA)

h = Ketinggian saluran udara dari permukaan tanah (m)

x = Jarak sambaran petir sepanjang saluran udara (m), $x = 0$ berarti sambaran petir tepat pada ujung saluran udara

y = Jarak sambaran petir yang tegak lurus terhadap saluran udara (m), $y = 0$ berarti sambaran petir tepat pada saluran udara

V = Kecepatan sambaran balik petir ($2,9 \times 10^7$ s/d 24×10^7 m/s)

V_0 = Kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)

μ_0 = Permeabilitas magnet ruang hampa ($1,26 \times 10^{-6}$ H/m)

ϵ_0 = Permittivitas ruang hampa ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m)

$$Z_0 = 30 \text{ ohm}$$

Pada titik $x = 0$, terjadi tegangan maksimum yaitu:

$$V_{\text{ind maks}} = \frac{Z_0 I_0 h}{y} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{V}{V_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{V}{V_0}\right)^2}} \right] \dots\dots\dots(2.12)$$

2.5 Penggunaan Kawat Tanah Sebagai Penanggulangan Surja Petir

Menurut Haryati, 2007, kawat tanah atau kawat perisai adalah kawat-kawat yang ditempatkan di atas kawat fase untuk melindungi fase dari sambaran petir secara langsung serta mengurangi tegangan lebih pada saluran yang diakibatkan oleh sambaran tidak langsung.

Untuk menempatkan perlindungan yang baik, maka penempatan kawat-kawat tanah harus memenuhi beberapa persyaratan sebagai berikut :

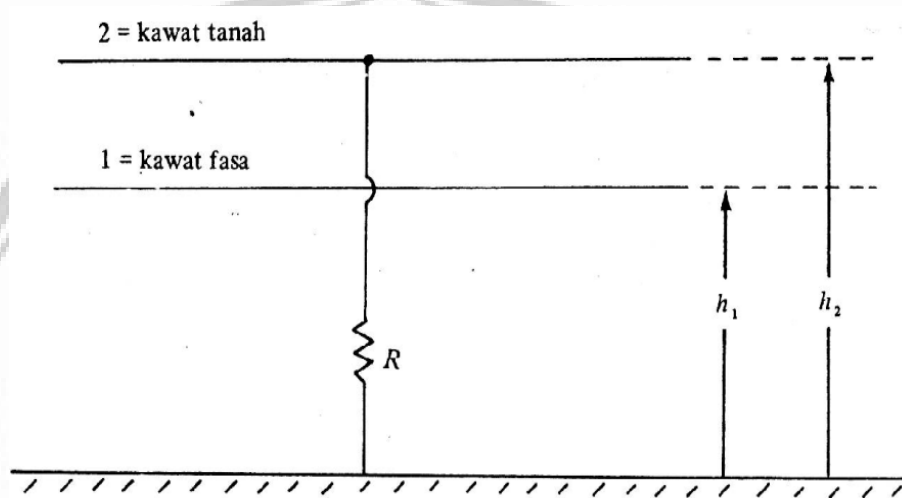
- a) Jarak kawat tanah diatas kawat fase diatur sedemikian rupa agar dapat mencegah sambaran langsung pada kawat-kawat fase.
- b) Tahanan kaki menara harus cukup rendah untuk membatasi tegangan pada isolator agar tidak terjadi lompatan api pada isolator.
- c) Dalam pemilihan kawat tanah faktor mekanisnya lebih diperhatikan dari pada faktor elektrisnya. Kawat tanah harus mempunyai tahanan tarik yang tinggi dan tidak gampang berkerat.

2.5.1 Pengaruh Kawat Tanah Terhadap Tegangan Induksi

Menurut Erhaneli Dan Desril, 2012, dalam menghitung pengaruh kawat tanah terhadap tegangan induksi diperkenalkan Faktor Perisaian (PF) yang didefinisikan sebagai hasil bagi tegangan induksi dengan kawat tanah dan tegangan induksi tanpa kawat tanah. Kawat tanah ideal adalah kawat tanah yang

mempunyai titik pengetanahan pada setiap titik sepanjang kawat tanah, sehingga potensialnya sepanjang kawat adalah nol. Pada kenyataannya tidak ada kawat ideal, jadi kawat tanah itu mempunyai beda tegangan tertentu terhadap tanah.

Contoh saluran dengan satu kawat tanah dan tahanan kontak tiang sebesar R pada gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6 Pengaruh Kawat Tanah Terhadap Tegangan Induksi

(Sumber. Huatauruk, T.S.1991)

Diasumsikan bahwa tidak terjadi pantulan ujung saluran. Bila gelombang yang timbul pada kawat 2 (kawat tanah) sebelum diketanahkan adalah V_2 , maka arus yang melalui impedansi setelah diketanahkan dengan tahanan R adalah (Huatauruk, T.S.1991)

$$I_2 = \frac{V_2}{R + \left(\frac{Z_{22}}{2}\right)} \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan :

V_2 = tegangan induksi pada kawat tanah sebelum diketanahkan

Z_{22} = Impedansi surja kawat 2

R = tahanan kontak ke tanah

I_2 = arus yang mengalir pada hubungan ke tanah

Arus ini (I_2) memberikan kenaikan pada gelombang tegangan pada kawat fasa sebesar ΔV_2 , yaitu (Huatauruk, T.S.1991)

$$\Delta V_2 = Z_{12} \left(\frac{-I_2}{2} \right) = - \frac{Z_{12} \cdot V_2}{2R + Z_{22}} \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan :

Z_{12} = impedansi surja bersama kawat tanah dengan kawat fasa

Jadi besar tegangan pada kawat fasa 1 setelah kawat tanah 2 diketanahkan,

$$V'1 = V_1 + \Delta V_2 \dots\dots\dots(2.15)$$

Atau

$$V'1 = V_1 - \frac{Z_{12} \cdot V_2}{2R + Z_{22}} \dots\dots\dots(2.16)$$

Jadi Faktor Perisaian (FP) adalah (Huatauruk, T.S.1991)

$$FP = \frac{V'1}{V_1} = 1 - \frac{Z_{12}}{2R + Z_{22}} \frac{V_2}{V_1} \dots\dots\dots(2.17)$$

Keterangan :

$V'1$ = tegangan induksi pada kawat 1 setelah kehadiran kawat tanah 2.

V_1 = tegangan induksi pada kawat 1 sebelum kehadiran kawat tanah 2.

Karena tegangan induksi sebelum diketanahkan sebanding dengan tinggi kawat di atas tanah, atau $(V_2/V_1) = (h_2/h_1)$, maka persamaan menjadi (Huatauruk, T.S.1991)

$$FP = \frac{V'_1}{V_1} = 1 - \frac{Z_{12}}{2R + Z_{22}} \frac{h_2}{h_1} \dots\dots\dots(2.18)$$

Maka persamaan untuk mencari V'_1 menjadi (Huatauruk, T.S.1991)

$$V'_1 = \left(1 - \frac{Z_{12}}{2R + Z_{22}} \frac{h_2}{h_1}\right) V_1 \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan :

h_1 = tinggi rata-rata kawat fasa 1 di atas tanah

h_2 = tinggi rata-rata kawat fasa 2 di atas tanah

Pada saluran tiga fasa empat kawat, yaitu tiga kawat fasa dan satu kawat netral, dan tidak ada kawat tanah, maka pengaruh kawat netral itu terhadap tegangan induksi pada kawat fasa sama seperti pengaruh kawat tanah pada tegangan induksi pada kawat fasa. Dalam hal ini tingkat kawat netral di atas tanah h_2 lebih rendah dari tinggi kawat fasa 1, jadi besar faktor perisaian lebih besar dibanding faktor perisaian dari saluran dengan kawat tanah.

Adakalanya kawat netral itu dipasang diatas kawat fasa, sama seperti kedudukan kawat tanah. Dalam hal ini faktor perisaian akan lebih kecil, jadi lebih baik. Tetapi dengan memasang kawat netral diatas kawat fasa akan mempertinggi tiang dan dengan demikian akan memperbesar jumlah sambaran langsung.

2.6 *Arrester* Sebagai Penanggulangan Surja Petir

Arrester petir atau disingkat *arrester* adalah suatu alat pelindung bagi peralatan system tenaga listrik terhadap surja petir. Alat pelindung terhadap gangguan surja ini berfungsi melindungi peralatan system tenaga listrik dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkan ke tanah.

Ada dua jenis *arrester* yang umum dipakai, yaitu *arrester* jenis ekspulsi dan jenis katup. Salah satu dari jenis *arrester* katup yaitu *arrester* MOV (*Metal Oxide Varistor*). (Saimuri, 2011)

Menurut Haryati, 2007, *arrester* yang ideal harus mempunyai karakteristik sebagai berikut :

1. Pada sistem tegangan yang normal *arrester* tidak bekerja
2. Setiap gelombang transien dengan tegangan puncak yang lebih tinggi dari tegangan tembus *arrester* harus mampu mengalirkan arus ke tanah.
3. *Arrester* harus mampu mengalirkan arus surja ke tanah tanpa merusak *arrester* itu sendiri tanpa menyebabkan tegangan pada terminal *arrester* lebih tinggi dari tegangan sumbernya.
4. Arus tidak boleh mengalir ke tanah setelah gangguan diatasi. Menurut (Susilawati, 2011) bagian-bagian dan jenis-jenis *arrester* meliputi,

- a. Elektroda

Terdapat dua elektroda pada *arrester*, yaitu elektroda atas yang menghubungkan dengan bagian yang bertegangan dan elektroda bawah yang dihubungkan dengan tanah.

b. *Spark Gap*

Apabila terjadi tegangan lebih oleh surja petir atau surja hubung pada *arrester* yang terpasang, maka pada *spark gap* atau sela percik akan terjadi busur api.

c. Tahanan katup/kran

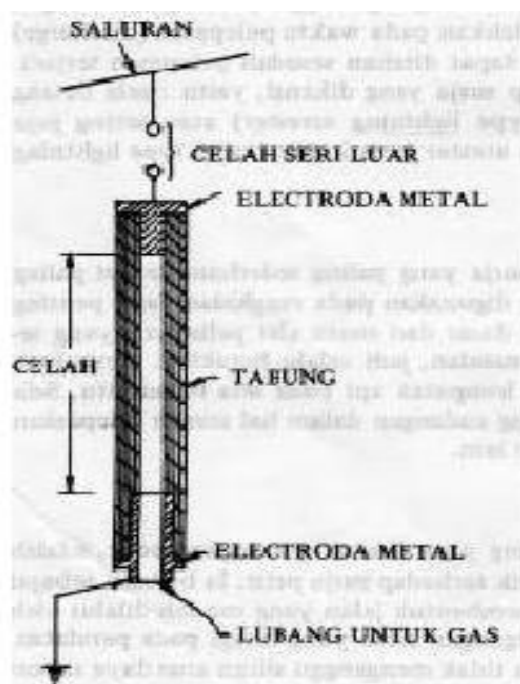
Tahanan yang di pergunakan dalam *arrester* ini adalah suatu jenis material yang sifat tahanannya dapat berubah bila mendapatkan tegangan.

Jenis – jenis *arrester* :

a. Jenis Ekpulsi

Arrester jenis ekspulsi/tabung pelindung pada prinsipnya terdiri dari sela percik yang berada dalam tabung serat dan sela percik batang yang berada diluar udara atau disebut sela seri.

Arrester ini digunakan untuk melindungi trafo distrbusi bertegangan 3-15 kV, tetapi belum memadai untuk melindungi trafo daya. Selain itu digunakan juga pada saluran transmisi untuk mengurangi surja petir yang masuk ke gardu induk, adapun *arrester* ekspulsi dapat dilihat pada Gambar 2.7.



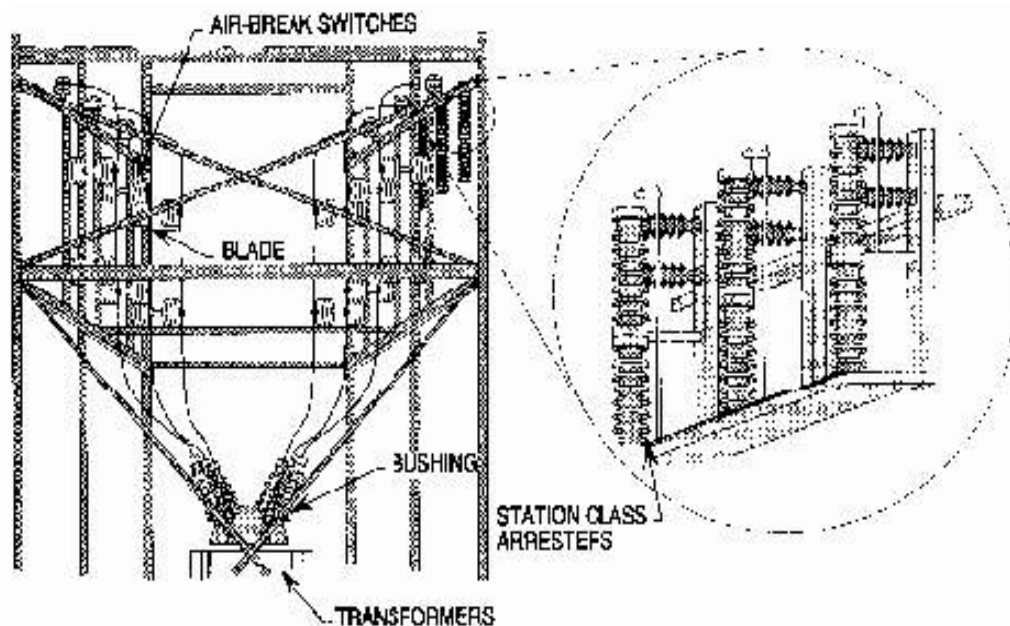
Gambar 2.7 Arrester Ekspulsi

(Sumber: *Anonim*)

b. Jenis katup

Arrester ini terdiri dari beberapa sela percik yang dihubungkan seri (series gap) dengan resistor tak linier. Resistor ini memiliki sifat khusus yaitu tahanannya rendah saat dialiri arus besar dan sebaliknya tahanannya besar saat dialiri arus kecil. Resistor yang umum digunakan untuk *arrester* terbuat dari bahan silikon karbid. Sela percik dan resistor tak linier keduanya ditempatkan dalam tabung isolasi tertutup sehingga kerja *arrester* ini tidak mempengaruhi keadaan udara sekitar.

Arrester jenis ini umumnya dipakai untuk melindungi alat-alat yang mahal pada rangkaian, biasanya dipakai untuk melindungi transformator daya. *Arrester* katup ini dibagi menjadi empat jenis, yaitu sebagai berikut.



Gambar 2.8 Arrester Katup

(Sumber: Donald G. Fink, H. Wayne Beaty, 2002)

1. *Arrester Katup Jenis Gardu*

Pemakaiannya secara umum pada gardu induk besar untuk melindungi alat-alat yang mahal pada rangkaian mulai dari 2,4 - 287 kV. Pada gambar 2.8 menunjukkan *arrester katup jenis gardu*.

2. *Arrester Katup Jenis Saluran*

Arrester jenis saluran lebih murah dari *arrester gardu*. *Arrester jenis saluran* ini dipakai pada sistem tegangan 15-59 kV.

3. *Arrester Katup Jenis Distribusi*

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

4. *Arrester* Katup Jenis Untuk Mesin-Mesin

Arrester jenis gardu ini khusus untuk melindungi mesin-mesin berputar.

Pemakaiannya untuk tegangan 2,4-15kV.

c. Jenis Seng Oksida

Arrester seng oksida yang disebut juga *metal oxide arrester* (MOA) merupakan *arrester* yang tidak memiliki sela seri, terdiri dari satu atau lebih unit yang kedap udara, yang masing-masing berisikan blok-blok tahanan katup sebagai elemen aktif dari *arrester*.

Pada dasarnya prinsip kerja *arrester* ini sama dengan *arrester* katup. Karena *arrester* ini tidak memiliki tahanan seri, maka *arrester* ini sangat bergantung pada tahanan yang ada dalam *arrester* itu sendiri. Apabila terkena petir, tahanan *arrester* langsung turun sehingga menjadi konduktor dan mengalirkan petir ke bumi. Namun setelah dilewati petir, tahanan kembali naik hingga bersifat sebagai isolator. Gambar 2.9 menunjukkan *arrester* seng oksida



Gambar 2.9 *Arrester* Seng Oksida

(Sumber: *Anonim*)

2.6.1 Pemilihan *Arrester*

Menurut Widiyanto, 2014, dalam memilih *arrester* yang sesuai untuk SUTM 20 kV, maka beberapa faktor yang harus di perhatikan, yaitu :

1. Kebutuhan perlindungan : ini berhubungan dengan kekuatan isolasi dari alat yang harus dilindungi dan karekterisitik impuls dari *arrester*.
2. Tegangan sistem : ialah tegangan maksimum yang mungkin timbul pada jepitan *arrester*.
3. Arus hubung singkat sistem : ini hanya diperlukan pada *arrester* jenis ekspulsi.
4. Jenis *arrester* : apakah *arrester* jenis gardu, jenis saluran, atau janis distrubusi.
5. Faktor kondisi luar : apakah normal atau tidak normal (2000 meter atau lebih diatas permukaan laut), temperatur dan kelembaban yang tinggi serta pengotoran.
6. Faktor ekonomi : faktor ekonomi ialah perbandingan antara ongkos pemeliharaan dan kerusakan bila tidak ada *arrester*, atau bila di pasang *arrester*.

Untuk tegangan 69 kV dan lebih tinggi dipakai jenis untuk gardu induk, sedangkan untuk tegangan 23 kV sampai 69 kV dapat dipakai pada saluran jaringan distribusi, tergantung pada segi ekonominya.

Tabel 2.1 Tegangan Kerja Arresster

(Sumber: Widiyanto, .2014)

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

Keterangan :

FOW : Tegangan Percikan Impuls Muka Gelombang

STD : Tegangan Percikan Impuls Maksimum

2.6.2 Arus Pelepasan Nominal dan Arus Pelepasan Maksimum

Menurut Paraisu, dkk. 2013, arus pelepasan nominal adalah arus pelepasan dengan nilai puncak dan bentuk gelombang tertentu yang digunakan untuk menentukan kelas *arresster* sesuai dengan kemampuan arus dan karakteristik pelindungnya dan arus pelepasan maksimum adalah arus surja maksimum yang

dapat mengalir melalui arrester setelah sela seri tembus tanpa merusak atau merubah karakteristik arrester.

Berdasarkan standar IEC besar arus pelepasan nominal dikelompokkan menjadi kelas 10 kA, 5 kA, dan 1,5 kA dan untuk besar arus pelepasan maksimum yaitu sebagai berikut :

Tabel 2.2 Arus Pelepasan Maksimum

(Sumber: Haryati, L. 2007)

Kelas Arrester (Arus Pelepasan, kA)	Harga Puncak Arus Surja (kA)
10	100
5	65
2,5	25
1,5	10

Arus pelepasan dengan harga puncak dan bentuk gelombang tertentu yang digunakan untuk menentukan kelas dari penangkapan petir sesuai dengan kemampuan melakukan arus, dan karakteristik perlindungan. Hubungan antara besarnya arus yang mengalir dan parameter yang lain diperlihatkan pada persamaan di bawah ini. (Hutauruk, TS. 1991) :

$$I = \frac{2e - E_0}{Z + R} \dots\dots\dots(2.20)$$

Keterangan :

- I = Arus pelepasan *Arrester* (A)
- e = Tegangan surja yang datang (kV)
- E₀ = Tegangan Pelepasan arrester (kV)
- Z = Impedansi surja saluran (ohm)
- R = Tahanan arrester 13 ohm

2.6.3 Impedansi Surja

Menurut Purnomo, Hery. 2010 impedansi surja dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan surja dan arus surja, dimana gelombang surja yang merambat sepanjang saluran akan mempunyai impedansi surja tertentu. Jari-jari penghantar dapat dicari dengan menggunakan luas penampang (A) yang terdapat pada penghantar kawat, maka dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut yaitu :

$$A = \pi \times r^2 \dots\dots\dots(2.21)$$

Setelah didapat jari-jari penghantar pada kawat maka kita dapat menentukan rumus induktansi (L) dan kapasitasi (C) dengan memasukan nilai jarak penempatan tinggi *arrester* dari tanah (h), yang dinyatakan dengan rumus :

$$L = 2 \left[\frac{\ln 2h}{r} \right] \times 10^{-9} \text{ H/mm} \dots\dots\dots(2.22)$$

$$C = \frac{10^{-11}}{18 \ln \left(\frac{2h}{8,74} \right)} \text{ F/mm} \dots\dots\dots(2.23)$$

Sehingga hantaran udara akan mempunyai impedansi surja (Z) sebesar :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \dots\dots\dots(2.24)$$

2.6.4 Tegangan Sistem

Tegangan sistem atau tegangan lebih ini akan timbul pada terminal *arrester* yang tergantung pada jenis gangguan. Dalam koordinasi isolasi ini, maka gangguan pada sistem yang paling diperhatikan adalah gangguan satu fasa ke tanah yang dapat menyebabkan naik tegangan fasa normal lainnya. Besarnya tegangan lebih ini tergantung pada karakteristik dari sistem dan jenis pentanahan

sistem pada gangguan terjadi. Tegangan sistem maksimum kawat ke tanah biasanya diambil 110 persen dari tegangan jala-jala.(Haryati,2007)

2.6.5 Tegangan Dasar *Arrester*

Tegangan dasar *arrester* adalah tegangan maksimum frekuensi rendah (50Hz) dimana *arrester* bisa bekerja dengan baik atau tegangan dimana penangkapan petir masih dapat bekerja sesuai dengan karakteristiknya. Penangkapan petir tidak boleh bekerja pada tegangan maksimum sistem yang direncanakan, tetapi masih tetap mampu memutuskan arus ikutan dari sistem secara efektif. "Penangkapan Petir" umumnya tidak boleh bekerja jika ada gangguan fasa ke tanah di satu tempat dalam sitem. Karena itu tegangan pengenalan dari penangkap petir harus lebih dari tegangan tegangan fasa ke tanah, jika demikian, maka *arrester* akan melakukan arus ikutan sistem yang terlalu besar yang menyebabkan *arrester* rusak akibat beban lebih *thermos (thermal over loading)* (Hasbullah, 2009).

Untuk menentukan tegangan dasar *arrester* harus diketahui sebagai berikut.

- a) Tegangan sistem tertinggi umumnya diambil 110 % dari tegangan nominal sistem.
- b) Koefisien pentanahan, didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan *rms phase* sehat ketanah dalam keadaan gangguan pada tempat dimana *arrester* dipasang. Dengan tegangan rms fasa tertinggi dari sistem dalam dari sistem dalam keadaan tidak ada gangguan. Jadi tegangan pengenalan

dari *arrester* (*arrester rating*) adalah tegangan rms fasa ketanah x 1,10 x koefisien pentanahan.

- c) Sistem yang ditanahkan langsung koefisien pentahanya 0,8. *Arrester* disebut *arrester* 80 %. Artinya suatu sistem dikatakan efektif bila pada keadaan gangguan tegangan kawat ketanah tidak melampaui 80% tegangan jala-jala sistem. Pada sistem yang ditanahkan dengan kumparan Petersen dimana tegangan maksimum pada gangguan tanah sama dengan tegangan jala-jala, koefisien pentahanya 1,0. *Arrester* ini disebut *arrester* 100%

Oleh karena itu dalam keadaan normal, *arrester* dapat memikul tegangan sistem maksimum yaitu :

$$V_{\max} = V_{fn} = 1,1 V_{\text{nom}}$$

Keterangan :

V_{\max} = tegangan maksimum sistem

V_{fn} = tegangan nominal sistem

V_{nom} = tegangan nominal sistem fasa ke fasa

2.6.6 Tegangan Puncak Fasa Ke Tanah

Menurut Rahman Eva 2002, untuk menentukan tegangan puncak antar fasa (V_{rms}) dengan tanah/ground adalah sebagai berikut :

$$V_m = \frac{V_{\text{rms}} \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.25)$$

Keterangan :

V_m = Tegangan puncak antar fasa dengan ground (kV)

V_{rms} = Tegangan nominal sistem (kV)

2.6.7 Puncak Gelombang Yang Akan Mencapai Lokasi *Arrester*

Harga puncak tegangan surja yang datang atau yang masuk ke gardu induk datang dari saluran yang dibatasi oleh BIL. Dengan mengingat variasi tegangan *flashover* dan probabilitas tembus isolator, maka 20% untuk faktor keamanannya, sehingga harga (e) adalah (Hutauruk, T.S. 1991) :

$$e = 1,2 \times \text{BIL saluran / trafo} \dots \dots \dots (2.26)$$

Keterangan :

e = tegangan surja yang datang (kV)

BIL = tingkat isolasi dasar trafo (kV)

2.6.8 Karakteristik Pelepasan Tegangan *Arrester*

Tegangan pelepasan *arrester* adalah karakteristik yang paling penting dari penangkapan petir untuk perlindungan peralatan dalam gardu induk. Tegangan pelepasan atau tegangan kerja ini menentukan tingkat perlindungan dari penangkapan petir tersebut. Jika tegangan *arrester* ada di bawah BIL dari peralatan yang dilindungi, maka dengan faktor keamanan yang cukup, perlindungan peralatan yang optimum bisa diperoleh.

Tegangan kerja penangkapan petir akan naik dengan naiknya arus pelepasan tetapi kenaikan ini sangat dibatasi oleh tahanan linier dari penangkapan petir. Tegangan yang sampai pada *arrester* untuk melindungi peralatan (dalam hal ini untuk melindungi trafo) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Arismunandar dan Kuwahara, 1991) :

$$E_t = E_a + 2\mu \cdot x/v \dots \dots \dots (2.27)$$

Keterangan :

E_t = Tegangan terminal dari peralatan yang dilindungi (kV)

E_a = Tegangan pelepasan dari *arrester* (kV)

μ = Kecepatan Gelombang (kV/ μ s)

v = Kecepatan gelombang berjalan (m/ μ s) = 300 m/ μ s

Jatuh tegangan pada *arrester* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini :

$$V = I \times R \dots\dots\dots(2.28)$$

Keterangan :

V = Jatuh tegangan pada *arrester* (kV)

I = Arus pelepasan *arrester* (kA)

R = Tahanan *arrester* 13 ohm

2.7 ATP – EMTP

Menurut Aris, S. 2012, ATP Draw adalah proprosesor versi ATP dari *Elektromagnetic Transient Program* (EMTP) pada sistem operasi windows. Program ini ditulis dengan bahasa Borland Delphi 2.0 dan dapat berjalan normal dengan perangkat lunak Windows 9x/NT/2000/XP. ATP Draw memiliki kemampuan membuat dan menyusun rangkaian listrik dan memilih komponen dari menu yang tersedia.

Elektromagnetic Transient Program (ETMP) dikembangkan pada domain public di Bonneville Power Administration (BPA) Portland, Oregon pada tahun 1984 EMTP Development Coordination Group and the Electric Power

Reserch Insititute (EPRI) di Paolo Alto, California. Kelahiran ATP pada awal tahun 1984 dan memulai berkembang secara bertahap melalui kontribusi internasional. Beberapa ahli dari berbagai negara telah memberikan kontribusinya terhadap perkembangan EMTP mulai tahun 1975.

ATP Draw mempunyai perintah standar seperti yang dimiliki oleh windows. Hampir semua standar perintah modifikasi rangkaian terdapat pada ATP Draw seperti *copy/paste, grouping, rotate, export/import, undo/redo*.

2.7.1 Modul Terintegrasi Program ATP

MODELS di ATP adalah simulasi untuk memodelkan dan mensimulasikan sistem time-variant. MODELS pada ATP menjadikan ATP mudah untuk melakukan hubungan dengan program lain atau models lain ke ATP. MODELS adalah alat yang mempunyai fungsi yang masih bisa di ubah-ubah sesuai dengan kebutuhan misalnya melakukan simulasi baik itu dalam domain waktu maupun dalam domain frekuensi.

TACS (*Transient Analysis Of Control System*) dalam ATP adalah modul simulasi untuk analisa domain waktu pada sistem kendali. Sebenarnya dibuat untuk melakukan simulasi pada kontrol konverter tegangan tinggi arus searah (*High Voltage Direct Current/HVDC*).

Untuk TACS digunakan blok diagram. TACS bisa digunakan untuk :

- a. Kontrol konverter HVDC
- b. Sistem eksitasi pada mesin sinkron
- c. Arching

Tampilan antara jaringan elektrik dan TACS membentuk pertukaran sinyal seperti titik tegangan, arus switch, status switch, resistansi berdasarkan waktu, sumber arus dan tegangan.(Aris, S.2012).

2.7.2 Kemampuan Program ATP

Menurut Aris, S. 2012, Program ATP mampu memperkirakan Hasil dari Variable tertentu (tegangan atau arus) pada sebuah rangkaian listrik dalam fungsi waktu, yang biasanya pada rangkaian tersebut terdapat gangguan. ATP menyediakan banyak model komponen listrik misalnya motor, generator, transformator, *lighting arrester*, saluran transmisi dan kabel. ATP juga menyediakan modul program untuk menganalisa kondisi transient sistem kontrol. Fasilitas ini biasa dikenal TACS. Dengan fasilitas ini, dimungkinkan untuk menganalisa respon transien sistem kontrol terhadap gejala-gejala atau gangguan nonlinier seperti surja dan gejala korona. TACS juga mampu menganalisa karakteristik dinamis sistem tanpa melalui penggambaran atau pemodelan sistem sebagai rangkaian listrik. ATP dapat digunakan untuk simulasi dalam gangguan kondisi simetris maupun tidak simetris, surja petir. ATP juga mampu menganalisa efek harmonis dari suatu sistem dengan metode injeksi arus harmonik.

Library yang disediakan oleh ATP terdapat beberapa komponen antara lain sebagai berikut :

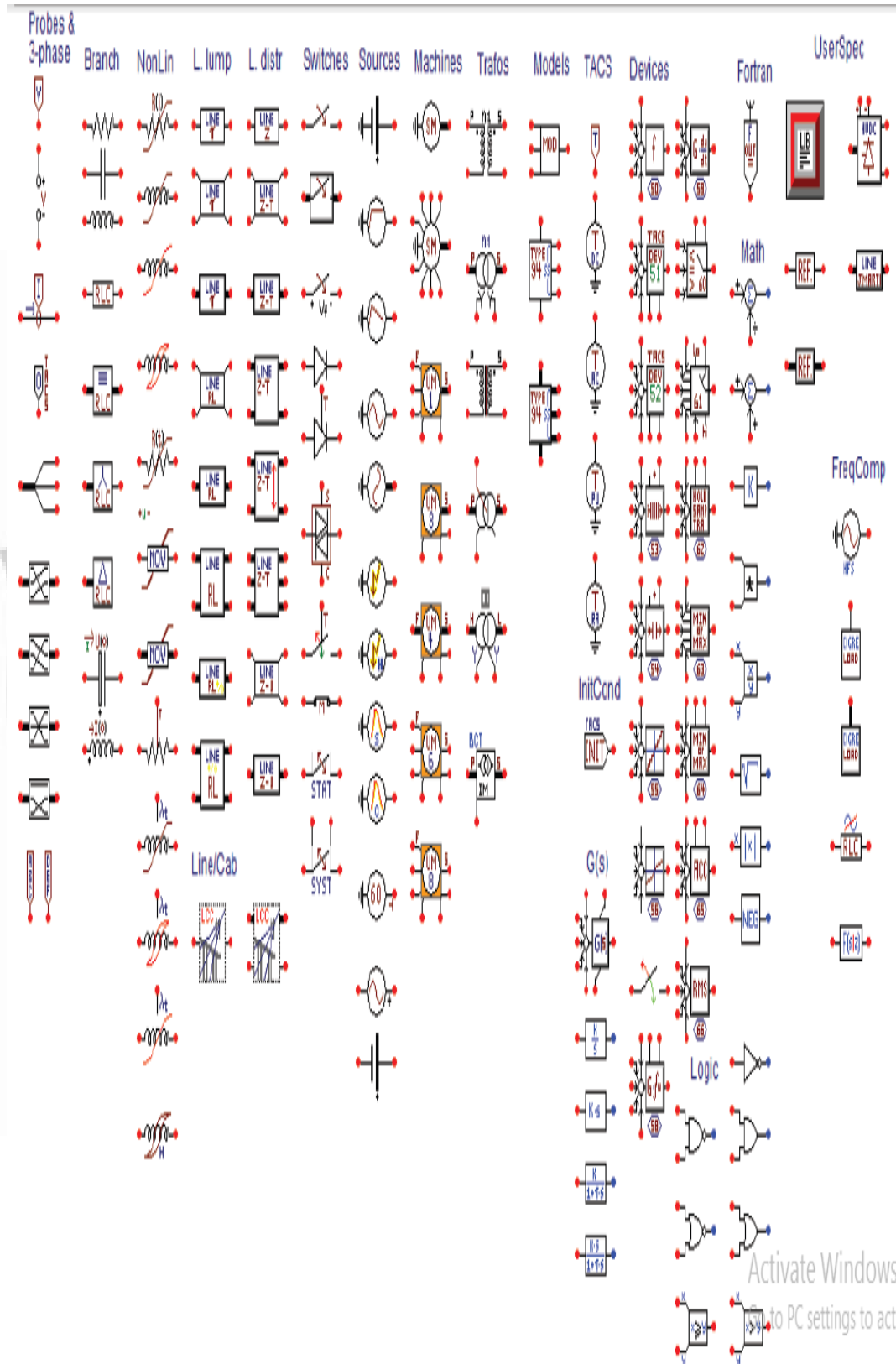
- a. Komponen RLC, baik yang terintegritas (*lumped*) maupun terpisah.
- b. Saluran transmisi dan kabel dengan parameter yang bergantung pada frekuensi

- c. Resistor dan induktor ninlinier, hysterektic induktor dan time varying resistance.
- d. Komponen-komponen kontrol (TACS)
- e. Komponen listrik yang memiliki sifat ninlinier seperti : transformator dengan saturasi dan rugi- rugi histeresis, *lighting arrester* dan komponen busur api.
- f. Dioda, thyristor dan triac.
- g. Mesin-mesin berputar : mesin sinkron 3 fasa, mode; TACS mesin listrik.
- h. Sumber arus dan tegangan.

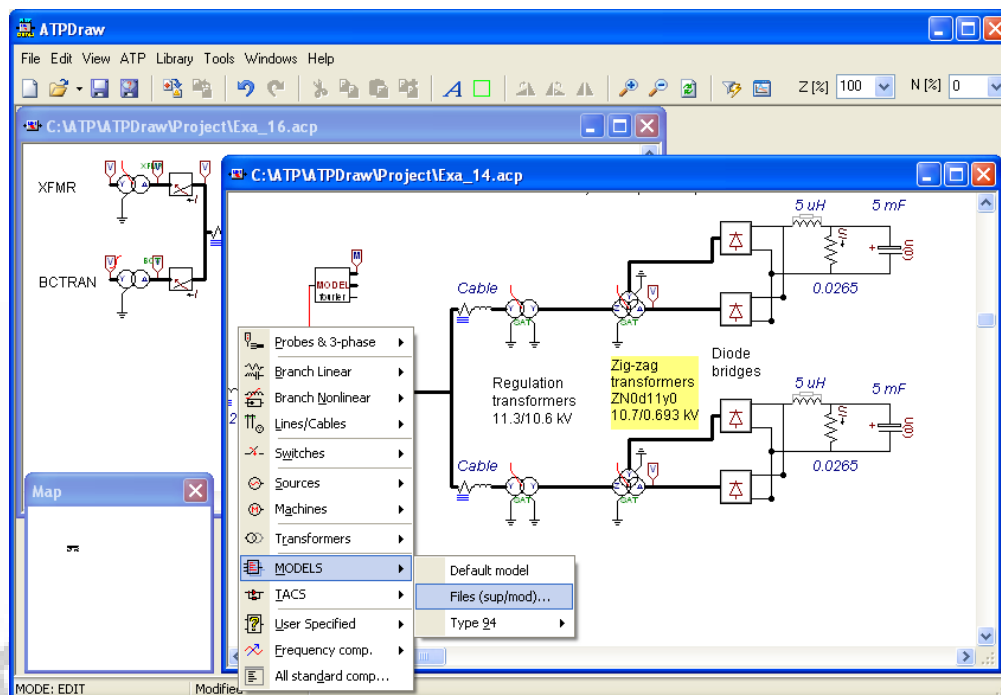
2.7.3 Menu Dasar ATP-EMTP

ATP Draw hampir semua standar yang dimiliki oleh sistem operasi windows. Ada beberapa tools penting yang perlu untuk diketahui dan dimengerti agar dapat memakai program ini dengan baik. Tools utama yang harus diketahui adalah menu utama, jendela rangkaian dan menu utama untuk memilih komponen (Aris, S.2012).

Komponen yang diperlukan dapat dipilih secara langsung dari komponen selection menu ini dengan klik kanan dan memilihh komponen yang disediakan. Adapun beberapa komponen tersebut dapat dilihat pada gambar 2.10 di bawah ini dan pada gambar 2.11 dan 2.12 menunjukkan *main window* ATP dan contoh hasil dari simulasi rangkaian.

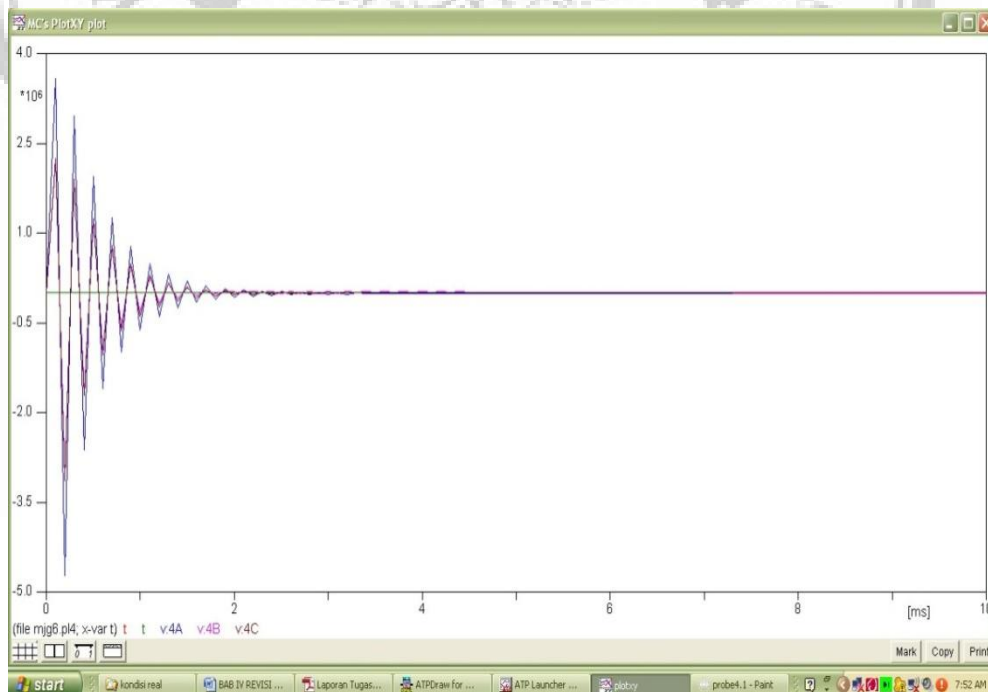


Gambar 2.10 Komponen Simulasi ATP Draw



Gambar 2.11 Main Window ATP

(Sumber: Sampe, Aris, 2012)



Gambar 2.12 Contoh Hasil Analisis Rangkaian