

2. TEORIPENUNJANG

2.1. Sumber-sumber Tegangan Lebih

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 lebih internal meliputi operasi *on/offswitching* dan gangguan tidak simetris terutama sistem yang netralnya tidak ditanahkan.

Tegangan lebih eksternal berasal dari gangguan yang terjadi di atmosfer. Penyebab utama tegangan lebih eksternal adalah sambaran petir. Sambaran petir ini dapat menimbulkan gangguan pada sistem tenaga listrik seperti yang akan dijelaskan dalam pembahasan selanjutnya.

2.2. Proses Terjadinya Petir

Di alam sekitar kita petir terjadi pada awan yang mulai membesar menuju awan badai. Petir terlihat sebagai lompatan bunga api raksasa yang karena begitu besarnya maka ketika melesat menyebabkan badan awan menjadi terang benderang. Suara guruh yang terdengar ketika terjadi petir disebabkan oleh gesekan antara muatan dari awan yang berkecepatan dan berenergi tinggi dengan udara di sekitarnya. Gesekan menyebabkan temperatur udara pada lintasan yang dilalui menjadi tinggi dalam waktu yang sangat cepat, sehingga udara mengembang dengan cepat dan molekulnya saling bertabrakan menyebabkan bunyi keras.

2.2.1. Pengertian Petir

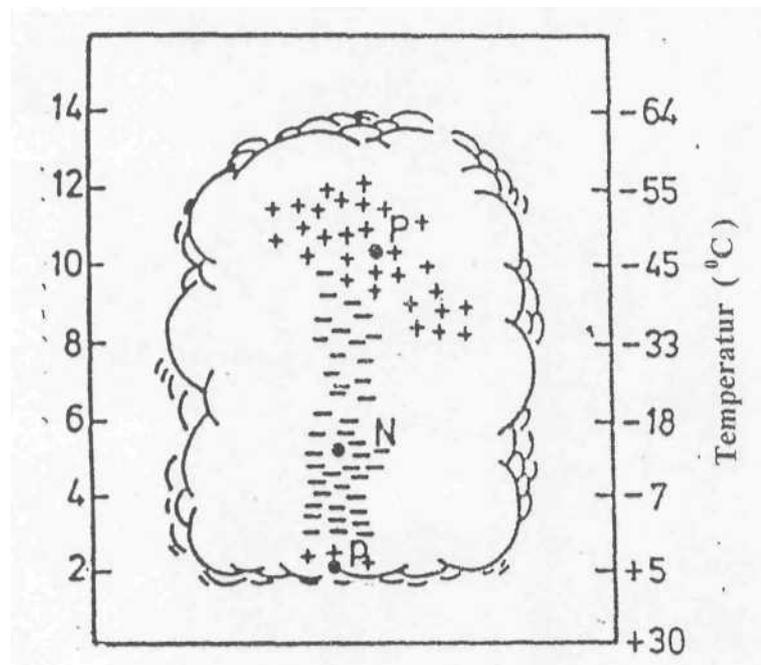
Petir terjadi apabila muatan di beberapa bagian atmosfer kuat medan listriknya mencapai nilai yang cukup tinggi menyebabkan kegagalan listrik di udara sehingga timbul peralihan muatan listrik yang besar. Peralihan muatan ini dapat terjadi di dalam awan, antara awan dan dari awan ke permukaan bumi.

Sumber terjadinya petir adalah awan *cummulonimbus* atau awan guruh yang berbentuk gumpalan dengan ukuran vertikal lebih besar dari dari ukuran

horizontal. Ukuran vertikal dapat mencapai 14 km dan ukuran horizontal berkisar 1,5 sampai 7,5 km. Karena ukuran vertikalnya yang cukup besar terjadi perbedaan temperatur antara bagian bawah dengan bagian atas. Bagian bawah bisa mencapai 5°C sedangkan bagian atas -60°C .

Loncatan diawali dengan berkumpulnya uap air di dalam awan. Karena perbedaan temperatur yang besar antara bagian bawah awan dengan bagian yang lebih di atas, butiran air bagian bawah yang temperturnya lebih hangat berusaha berpindah ke bagian atas sehingga mengalami pendinginan dan membentuk kristal es. Kristal es yang lebih berat daripada butiran air berpindah ke bagian bawah. Kristal es yang turun dan butir air yang naik saling mendesak sehingga timbul gesekan yang menimbulkan pemisahan muatan. Butir air yang bergerak naik membawa muatan positif sedangkan kristal es membawa muatan negatif sehingga terbentuk awan yang mirip dengan dipole listrik. Pada saat tegangan antara ujung awan sudah cukup besar terjadilah pelepasan muatan listrik.

Struktur listrik awan guruh dinyatakan dalam gambar 2.1 berikut ini:



Gambar 2.1. Struktur Muatan Listrik Awan Guruh

Sutnber : Gallanger, T. J. and Pearmain A. J. *High Voltage Measurement, Testing and Design*. Hal 30.

2.2.2. Mekanisme Petir

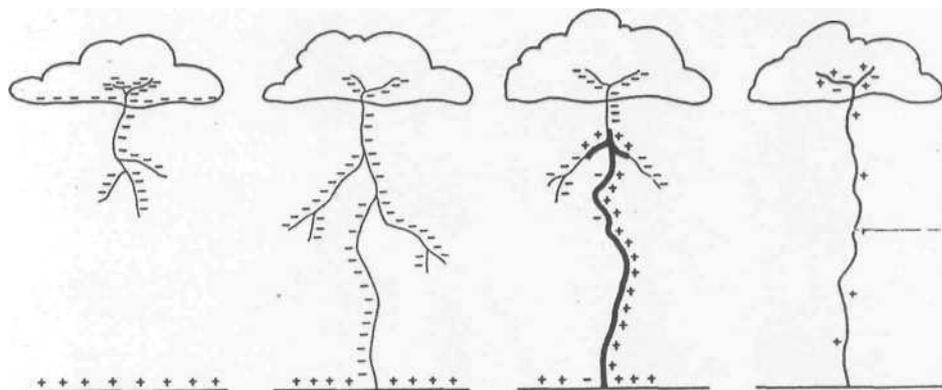
Mekanisme terjadinya sambaran petir dibagi menjadi sambaran perintis dan sambaran balik.

2.2.2.1. Sambaran Perintis (*Initial Leader*)

Peralihan muatan ke tanah dimulai dengan sambaran yang menjalar ke dekat dasar daerah bermuatan negatif dalam awan melalui beberapa tahapan. Tiap tahapan akan kelihatan sebagai kilauan yang bertambah. Hal ini disebabkan oleh udara yang terionisasi di ujung sambaran. Sambaran perintis menuju ke tanah dengan kecepatan rata-rata 10^9 cm/detik melalui lintasan zig-zag. Sambaran ini mengangkut muatan negatif sepanjang lintasannya sehingga menciptakan medan listrik dalam ruang antara ujung sambaran perintis dengan tanah.

2.2.2.2. Sambaran Balik (*Return Stroke*)

Pada saat sambaran perintis mencapai ketinggian tertentu dari permukaan bumi maka dimulailah sambaran positif ke atas untuk menemui ujung sambaran perintis yang bermuatan negatif. Kilauan cahaya dari sambaran balik ini jauh lebih besar dari sambaran perintis. Sambaran balik menjalar melalui lintasan perintis yang terionisasi dengan kecepatan 3×10^9 cm/detik. Arus dari sambaran balik inilah yang menjadi arus utama petir yang berkisar 5 kA sampai 200 kA dengan nilai rata-rata arus puncak 20 kA.



Gambar 2.2. Sambaran Perintis dan Sambaran Balik

Sumber : Khalifa, M. *High Voltage Engineering Theory and Practice*. Hal 359.

2.2.3. Hari Guruh

Hari guruh adalah banyaknya hari dimana terdengar guntur paling sedikit satu kali dalam jarak kira-kira 15 km dari stasiun pengamatan. Hari guruh biasa juga disebut hari badai guntur (*thunderstormdays*). *Isokeraunic level* adalah jumlah hari guruh dalam satu tahun di suatu tempat yang digunakan untuk menggambarkan peta isokeraunic di suatu wilayah yaitu garis pada peta yang menghubungkan daerah-daerah dengan rata-rata jumlah hari guruh yang sama.

Wilayah Indonesia yang berada di daerah khatulistiwa mempunyai keadaan iklim yang lembab dan wilayah perairan yang luas sehingga banyak terjadi pembentukan awan bermuatan yang tinggi. Hal ini memungkinkan terjadinya banyak sambaran petir setiap tahunnya.

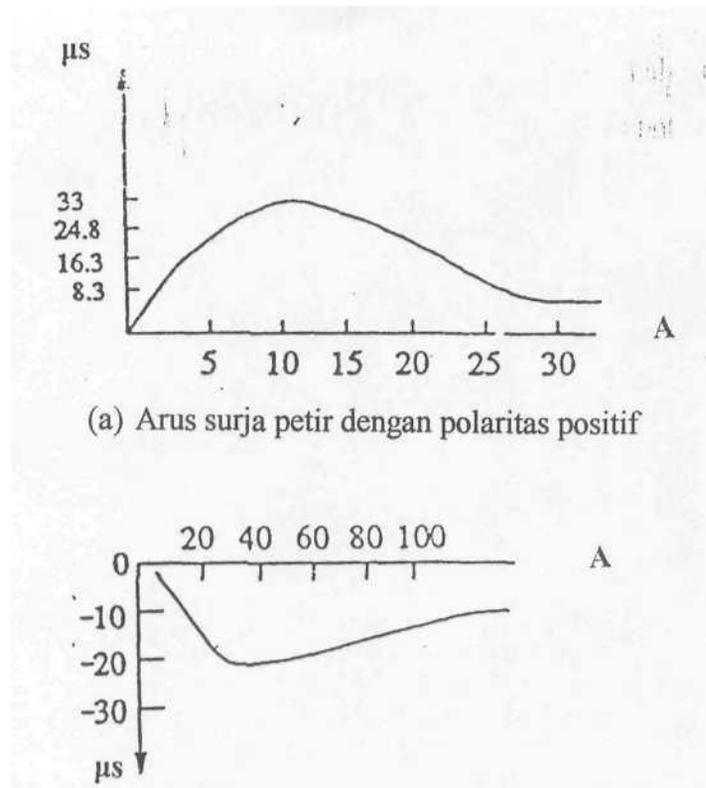
2.3. Parameter dan Karakteristik Geombang Surja Petir

Parameter dan karakteristik surja petir terdiri atas besar arus dan tegangan petir, kecepatan pembangkitan serta bentuk gelombang petir tersebut.

2.3.1. Arus Petir

Bentuk-bentuk oscilogram gelombang arus surja petir dapat dilihat pada gambar 2.3. Oscilogram dari arus petir tersebut menunjukkan bahwa bagian muka gelombang dari arus petir dicapai dalam waktu $\pm 10 \mu s$. Arus puncak mungkin dicapai dalam waktu $\pm 10 \mu s$ kemudian bagian gelombang arus berikutnya mengalami penurunan dalam durasi beberapa mikrodetik.

Arus petir diukur dengan menggunakan magnetik link yaitu batang berbentuk silinder terbuat dari baja berlapis plastik yang mempunyai tingkat kekerasan (*coercive*) yang cukup besar. Hal ini dimaksudkan supaya ketika magnetik link berada dalam medan magnet meskipun beberapa saat kemudian medan magnetnya hilang, magnet link tetap dapat menyimpan sisa magnet yang proporsional dengan intensitas medan magnet di tempat tersebut. Magnetik link umumnya dipasang pada menara telekomunikasi, bangunan tinggi atau menara transmisi.



(a) Arus surja petir dengan polaritas positif

(b) Arus surja petir dengan polaritas negatif

Gambar 2.3. Bentuk Oscilogram Gelombang Arus Surja Petir

Sumber : Naidu, M.S. & Kamaraju, V. *High Voltage Engineering*. Hal 234.

Sambaran petir pada suatu objek di bumi yang diikuti oleh aliran arus petir yang tinggi dalam waktu yang sangat singkat disebut arus impuls petir. Kerusakan yang dapat ditimbulkannya ditentukan oleh parameter tertentu yaitu:

- Arus puncak impuls petir (i): yaitu harga maksimum dari arus impuls petir yang dapat menyebabkan tegangan lebih pada tempat sambaran.
- Kecuraman arus petir (di/dt): yaitu laju kenaikan terhadap waktu yang dapat menyebabkan tegangan induksi elektromagnetik pada benda logam di dekat instalasi penangkal petir.
- Muatan listrik arus petir ($Q \sim \int i \cdot dt$): yaitu jumlah muatan arus petir yang dapat menyebabkan peleburan pada ujung objek sambaran.

- d. Integral kuadrat arus impuls ($\int I^2 dt$): efek termis yang timbul sebesar $W = R \int I^2 dt$ dapat menyebabkan panas yang berlebihan pada penghantar.

Tabel 2.1. Parameter Petir di Indonesia

No.	Lokasi	I (kA)	di/dt max (kA/sec)	Q total (C)	Qimpuls (C)	W/R (kJ/ft)
1.	Medan	89,7	29,3	12,4	4,10	4.900
2.	Pekanbaru	74,7	25,7	11,3	3,76	3.500
3.	Palembang	87,0	28,7	12,2	3,93	4.700
4.	Jakarta	81,7	27,4	11,8	3,86	4.100
5.	Cilacap	89,0	29,4	12,4	4,10	4.900
6.	Surabaya	81,9	27,3	11,6	3,80	4.100
5.	Balikpapan	87,7	20,8	12,3	3,96	4.700
6.	Sorong	90,3	90,3	12,5	4,23	5.000

Sumber: Makalah Sistem Proteksi Petir. LAPI-ITB. 19 Januari 1995.

2.3.2. Kecepatan Pembangkitan

Karakteristik petir lainnya adalah waktu untuk mencapai harga puncak dan kecepatan pembangkitannya. Berikut ini adalah tabel yang menunjukkan hubungan amplitudo arus petir, waktu pencapaian harga puncak dan kemungkinan terjadinya.

Tabel 2.2. Amplitudo Arus Petir dan Kemungkinan Terjadinya

Arus petir (kA)	% terjadinya
20	45,52
40	30,48
60	15,51
80	5,35
>100	2,14

Sumber : *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*. Hal 377.

Tabel 2.3. Waktu Pencapaian Harga Puncak dan Kemungkinan Terjadinya

Muka gelombang (jas)	% terjadinya
0,5	34,27
1,0	26,22
1,5	18,18
2,0	12,59
>2,5	8,74

Sumber : *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*. Hal 378.

2.3.3. Tegangan Petir

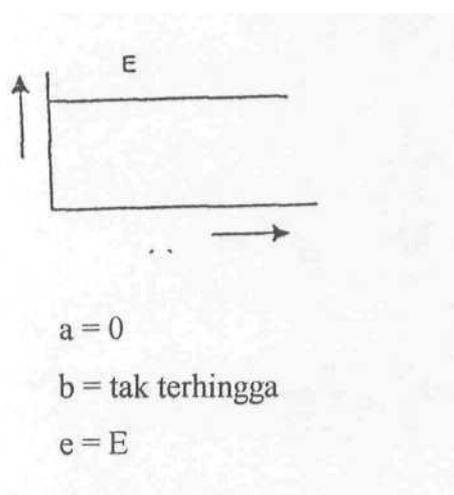
Transient overvoltages yang disebabkan oleh petir dapat digolongkan sebagai suatu gelombang berjalan yang secara matematis mempunyai persamaan:

$$e(t) = E(e^{-at} - e^{bt}) \quad (2.1)^1$$

dimana : E, a, b adalah konstanta.

Dengan mengganti nilai a dan b dapat diperoleh berbagai bentuk gelombang yang dapat dipakai sebagai pendekatan dari gelombang berjalan antara lain :²

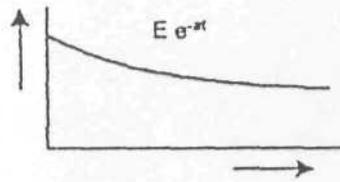
a. Gelombang persegi yang sangat panjang



Hutauruk, T.S. *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Penerbit Erlangga. Hal 5.

² Ibid. Hal 6.

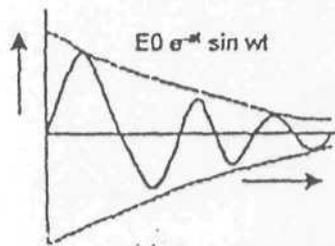
b. Gelombang eksponensial



$b = \text{tak terhingga}$

$$e = E \cdot e^{-at}$$

c. Gelombang sinusoidal terpotong



$$a = \alpha - j\omega$$

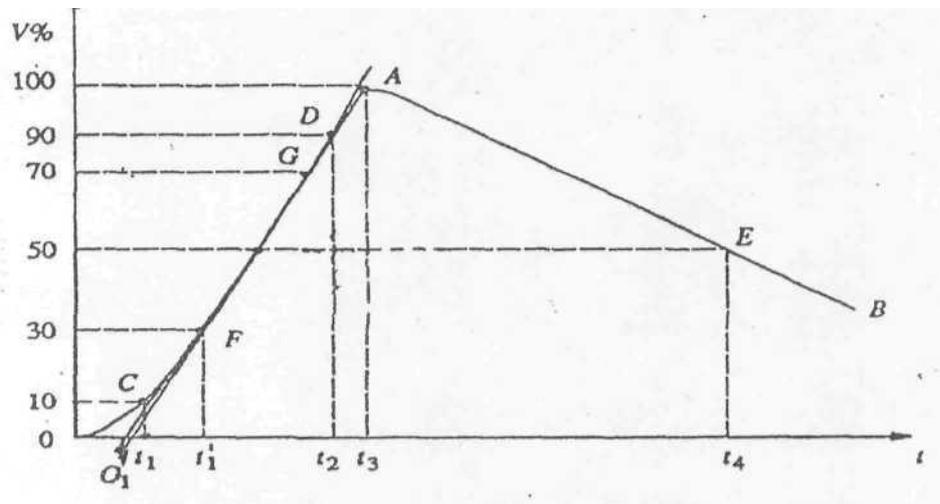
$$b = \alpha + j\omega$$

$$E = E_0/2j$$

$$e = \frac{E_0}{2je^{-at}(e^{j\omega t} - e^{-j\omega t})} = Ee^{-at} \sin \omega t$$

2.3.4. Bentuk Gelombang

Adapun bentuk gelombang berjalan yang memenuhi dan merupakan bentuk gelombang dari surja petir yang disebut gelombang kilat tipikal seperti terlihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Gelombang Kilat Tipikal

Sumber : Hutaeruk, T.S. *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Hal 4.

Spesifikasi dari gelombang tersebut adalah:

- Puncak gelombang (*crest*), E (kV), yaitu amplitudo maksimum dari gelombang.
- Muka gelombang, t_i (μ s), yaitu waktu dari permulaan sampai puncak, biasanya diambil 10% E sampai 90% E .
- Ekor gelombang, yaitu bagian di belakang puncak. Panjang gelombangnya adalah t_2 (μ s), yaitu waktu dari permulaan sampai titik 50% E pada ekor gelombang.
- Polaritas, yaitu polaritas dari gelombang apakah negatif atau positif.

Gelombang dengan suatu polaritas positif, puncak 1000 kV muka gelombang 3 JIS, panjang gelombang 21 μ s sering dituliskan sebagai: +1000, 3 x 21. Gelombang kilat tipikal merupakan bentuk gelombang yang paling mirip dengan bentuk gelombang surja petir (*lightning surge*). Bentuk gelombang ini tergantung dari harga-harga a dan b . Bila spesifikasi gelombang diberikan maka harga-harga a , b dan E dapat dicari sedangkan jika a , b dan E sudah diketahui dapat dicari spesifikasi gelombang tersebut yaitu puncak gelombang, muka gelombang dan panjangnya.

2.3.4.1. Puncak dan Muka Gelombang

Puncak gelombang terjadi pada saat $t = t_1$, yaitu waktu untuk mencapai tegangan puncak. Sehingga untuk $t = t_1$:

$$\frac{d e(t)}{dt} = E(-a e^{-at_1} + b e^{-bt_1}) = 0 \quad (2.2)^3$$

$$a e^{-at_1} = b e^{-bt_1} \quad (2.3)^4$$

maka

$$t_1 = \frac{\ln \frac{b}{a}}{b-a} = \frac{1}{\left(a \frac{\ln \frac{b}{a}}{\frac{b}{a}-1} \right)} = \frac{B}{a} \quad (2.4)^5$$

dan diperoleh tegangan puncak yaitu:

$$E_{puncak} = E \left(e^B - e^{-\frac{B}{a}} \right) \quad (2.5)^6$$

2.3.4.2. Panjang Gelombang

Waktu untuk mencapai $\frac{1}{2}$ puncak = t_2 , sehingga

$$\begin{aligned} \frac{E_{puncak}}{2} &= E(e^{-at_2} - e^{-bt_2}) \\ &= E \left(e^{-\frac{Bt_2}{a}} - e^{-\frac{Bt_2}{1}} \right) \end{aligned} \quad (2.6)^7$$

Hutaunik, T.S. *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Penerbit Erlangga. Hal 7.

⁴ Ibid.

⁵ Ibid.

⁶ Ibid.

⁷ Ibid.

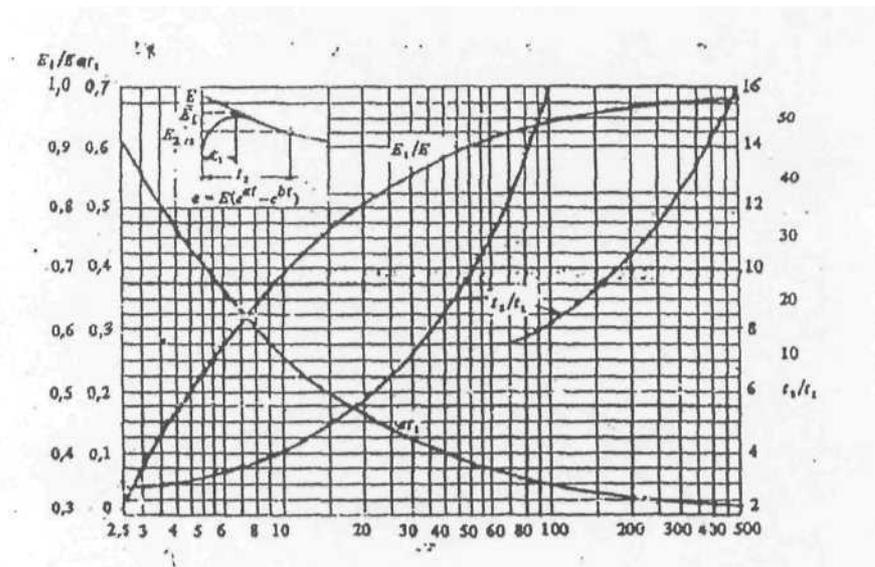
⁸ Ibid.

$$\frac{1}{2}E \left(e^{-B} - e^{-\frac{Bb}{a}} \right) = E \left(e^{-\frac{Bt_1}{t_2}} - e^{-\left(\frac{b-Bt_2}{a} \right) t_1} \right) \tag{2.7}^8$$

Persamaan ini menyatakan hubungan antara t_2/t_1 untuk berbagai harga tertentu dari a/b . Namun karena persamaan ini cukup rumit maka untuk memperoleh t_2/t_1 harus dengan jalan mengisi dengan harga-harga tertentu. Untuk memudahkan dengan menggunakan grafik seperti gambar 2.5

Grafik ini menunjukkan hubungan-hubungan antara:

- atj sebagai fungsi b/a dari persamaan 2.5.
- E1/E2 sebagai fungsi b/a dari persamaan 2.6.
- t2/t1 sebagai fungsi b/a dari persamaan 2.7.



Gambar 2.5. Grafik Spesifikasi Gelombang Tipe Kilat

Sumber: Hutaaruk, T.S. *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Hal 7

Cara menggunakan grafik tersebut adalah sebagai berikut:

Untuk harga-harga t_1 dan t_2 yang diketahui, dicari harga b/a , a/t_1 dan E_1/E_2 dari lengkung t_2/t_1 . Kemudian dicari harga a dari a/t_1 dan b dari b/a .

' Hutaaruk, T.S. *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Penerbit Erlangga. Hal 7.

Contoh :

Untuk gelombang dimana harga-harga a , b dan E diketahui +1000,3x21 diperoleh $t_2/t_1 = 7$.

Dari lengkung t_2/t_1 diperoleh $b/a = 28,5$. Dari b/a ini diperoleh $a t_1 = 0,122$ dan $E_1/E_2 = 0,085$.

Sehingga $a = 0,122/3 = 0,041$.

$$b = 28,5 a = 28,5 \times 0,041 = 1,15.$$

$$E = E_1/0,0852 = 1000/0,0852 = 1175.$$

Persamaan gelombang tersebut adalah:

$$e(t) = 1175 \left(e^{-0,041t} - e^{-1,15t} \right) \text{ kV}.$$

2.4. Akibat yang Ditimbulkan oleh Sambaran Petir

Petir bisa menimbulkan bermacam-macam gangguan yang tidak hanya membahayakan peralatan namun juga bisa mengancam keselamatan jiwa manusia baik secara langsung maupun tidak langsung.

2.4.1. Gangguan pada Jaringan dan Instalasi Listrik

Gangguan jenis ini dikelompokkan menjadi 2 bagian yaitu sambaran petir mengenai kawat tanah dan sambaran petir mengenai kawat fasa.

Sambaran petir langsung mengenai kawat tanah dapat mengakibatkan hal-hal sebagai berikut:

a. Terputusnya kawat tanah.

Arus yang besar menyebabkan panas yang tinggi pada kawat tanah yang dapat melampaui kekuatan kawat untuk menahannya.

b. Naiknya potensial kawat tanah yang diikuti oleh *backflashover* ke kawat fasa.

Pada saat terjadi sambaran pada kawat tanah, dengan cepat potensialnya naik mencapai nilai yang cukup tinggi sehingga dapat mengakibatkan lompatan muatan listrik ke kawat fasa di dekatnya.

c. Naiknya potensial pentanahan menara transmisi yang menyebabkan bahaya tegangan langkah.

Pada saat petir menyambar permukaan tanah, sejumlah arus petir dilepaskan ke bumi. Jika seseorang berdiri di dekat titik di mana terjadi sambaran, timbul beda potensial antara kakinya. Beda potensial ini akan mengakibatkan arus mengalir melewati kaki dan mengalir ke badan. Meskipun kecil, tetapi arus ini jika mengenai organ vital seperti otak, jantung dan paru-paru akan mengakibatkan kematian.

Jika dikenal ada tegangan langkah, ada juga tegangan yang disebut tegangan sentuh yang terjadi ketika seseorang menyentuh benda yang dialiri arus. Pada peralatan yang tidak ditanahkan arus tersebut akan mengalir lewat tubuh orang itu. Sambaran langsung mengenai kawat fasa mengakibatkan kenaikan tegangan tinggi pada kawat fasa. Kenaikan tegangan yang cukup tinggi ini dapat menyebabkan pecahnya isolator, kerusakan trafo tenaga, dan pecahnya *arrester*.

2.4.2. Gangguan Petir pada Peralatan Elektronik dan Listrik

Sambaran petir pada suatu struktur bangunan maupun saluran transmisi dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan elektronik, peralatan kontrol, komputer, telekomunikasi dan peralatan lainnya dalam suatu bangunan.

Gangguan dan kerusakan pada peralatan elektronik, kontrol, dan telekomunikasi berdasarkan jenis sambarannya dibedakan menjadi kerusakan akibat sambaran langsung dan kerusakan akibat sambaran tidak langsung.

2.4.2.1. Kerusakan akibat sambaran langsung

Kerusakan ini terjadi karena sambaran petir mengenai suatu struktur bangunan dan merusak bangunan tersebut sekaligus peralatan elektronik yang ada di dalamnya. Kerusakan yang diakibatkan dapat berupa kebakaran gedung, keretakan pada dinding bangunan, kebakaran pada peralatan elektronik, kontrol, telekomunikasi jaringan data dan sebagainya.

2.4.2.2. Kerusakan akibat sambaran tidak langsung

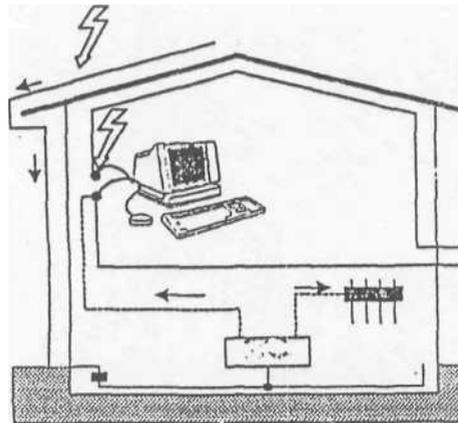
Kerusakan jenis ini terjadi karena petir menyambar suatu titik lokasi misalnya pada suatu menara transmisi atau menara telekomunikasi kemudian

terjadi hantaran secara induksi melalui kabel aliran listrik, kabel telekomunikasi atau peralatan lain yang bersifat konduktif sampai jarak tertentu yang tanpa disadari telah merusak peralatan elektronik yang jaraknya jauh dari lokasi sambaran semula.

Mekanisme induksi karena secara tidak langsung sambaran petir menyebabkan kenaikan potensial pada peralatan elektronika dijelaskan sebagai berikut:

a. Kopling Resistif

Ketika permukaan bangunan terkena sambaran petir, arus yang mengalir ke dalam tanah membangkitkan tegangan yang bisa mencapai ribuan volt di antara tegangan suplai 220 V, jaringan data dan pentanahan. Hal ini menyebabkan sebagian arus mengalir pada bagian penghantar luar misalnya kabel yang terhubung dengan bangunan dan terus menuju ke pembumian.

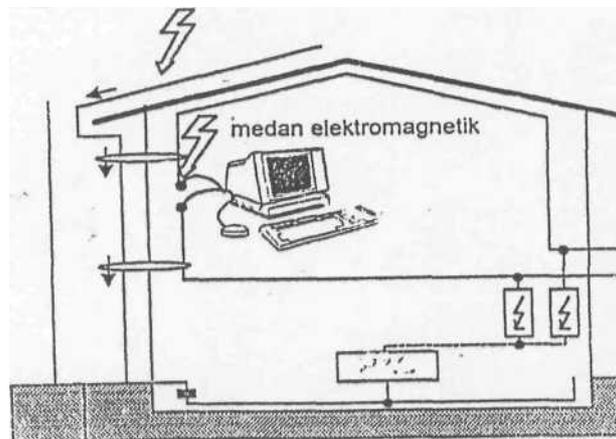


Gambar 2.6. Kopling Resistif

Sumber : Hasse, Peter. *Overvoltage Protection o/Low Voltage System*. Hal 36.

b. Kopling Induktif

Arus petir mengalir dalam suatu penghantar akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet akan berhubungan dengan penghantar lainnya sehingga menyebabkan terjadinya loop tegangan dengan nilai tegangan yang cukup tinggi.

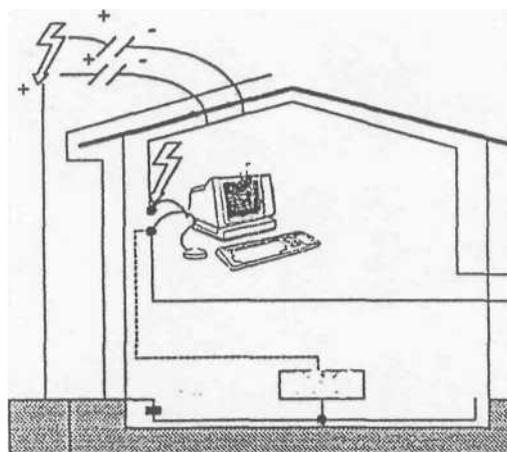


Gambar 2.7. Kopling Induktif

Sumber : Hasse, Peter. *Overvoltage Protection of Low Voltage System*. Hal 38.

c. Kopling Kapasitif

Saluran petir dekat sambaran petir dapat menyebabkan medan kapasitif yang tinggi pada peralatan penghantar seperti suatu kapasitor yang sangat besar dengan udara sebagai dielektriknya. Melalui cara ini terjadi kenaikan tegangan tinggi pada kabel meskipun bangunan tidak terkena sambaran langsung.



Gambar 2.8. Kopling Kapasitif

Sumber : Hasse, Peter. *Overvoltage Protection of Low Voltage System*. Hal 39.

2.5. Kebutuhan Bangunan akan Perlindungan terhadap Sambaran Petir

Suatu instalasi proteksi petir harus dapat melindungi semua bagian dari suatu bangunan, termasuk manusia dan peralatan yang ada di dalamnya terhadap bahaya dan kerusakan akibat sambaran petir. Berikut ini akan dibahas cara penentuan besarnya kebutuhan bangunan akan proteksi petir menggunakan beberapa standar yaitu Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir, National Fire Protection Association 780, International Electrotechnical Commission 1024-1-1.

2.5.1. Kebutuhan Bangunan akan Perlindungan terhadap Sambaran Petir Berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir

Jenis bangunan yang perlu diberi penangkal petir dikelompokkan menjadi:

- a. Bangunan-bangunan tinggi seperti gedung bertingkat, menara dan cerobong pabrik.
- b. Bangunan-bangunan penyimpanan bahan yang mudah terbakar atau meledak misalnya pabrik amunisi, gudang bahan peledak, gudang penyimpanan cairan atau gas yang mudah terbakar.
- c. Bangunan-bangunan untuk kepentingan umum misalnya gedung pertunjukan, gedung sekolah, stasiun dan sebagainya.
- d. Bangunan-bangunan yang mempunyai fungsi khusus dan nilai estetika yang perlu dilindungi misalnya museum, gedung yang menyimpan arsip-arsip negara, dan sebagainya.

Besarnya kebutuhan suatu bangunan akan suatu instalasi proteksi petir ditentukan oleh besarnya kemungkinan kerusakan serta bahaya yang terjadi jika bangunan tersebut tersambar petir. Berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir besarnya kebutuhan tersebut ditentukan berdasarkan penjumlahan indeks-indeks tertentu yang mewakili keadaan bangunan di suatu lokasi dan dituliskan sebagai:

$$R = A + B + C + D + E \quad (2.8)^9$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa semakin besar nilai indeks semakin besar pula resiko (R) yang ditanggung suatu bangunan sehingga semakin besar kebutuhan bangunan akan sistem proteksi petir.

Indeks-indeks perkiraan bahaya petir ditunjukkan dalam tabel-tabel berikut ini.

Tabel 2.4. Indeks A : Bahaya Berdasarkan Jenis Bangunan

Penggunaan dan isi	Indeks A
Bangunan biasa yang tak perlu diamankan baik bangunan maupun isinya.	-10
Bangunan dan isinya jarang dipergunakan misalnya dangau di tengah sawah atau ladang, menara atau tiang dari metal.	0
Bangunan yang berisi peralatan sehari-hari atau tempat tinggal misalnya rumah tinggal, industri kecil, dan stasiun kereta api.	1
Bangunan atau isinya cukup penting misalnya menara air, toko barang-barang berharga dan kantor pemerintah.	2
Bangunan yang berisi banyak sekali orang misalnya bioskop, sarana ibadah, sekolah, dan monumen bersejarah yang penting.	3
Instalasi gas, minyak atau bensin, dan rumah sakit	5
Bangunan yang mudah meledak dan dapat menimbulkan bahaya yang tidak terkendali bagi sekitarnya misalnya instalasi nuklir	15

Sumber : Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. *Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir untuk Bangunan di Indonesia*. Hal 17.

Tabel 2.5. Indeks B: Bahaya Berdasarkan Konstruksi Bangunan

Konstruksi bangunan	Indeks B
Seluruh bangunan terbuat dari logam dan mudah menyalurkan listrik.	0
Bangunan dengan konstruksi beton bertulang atau rangka besi dengan atap logam.	1
Bangunan dengan konstruksi beton bertulang, kerangka besi dan atap bukan logam.	2
Bangunan kayu dengan atap bukan logam	3

Sumber: Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. *Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir untuk Bangunan di Indonesia*. Hal 18.

Tabel 2.6. Indeks C : Bahaya Berdasarkan Tinggi Bangunan

Tinggi bangunan sampai dengan (m)	Indeks C
6	0
12	2
17	3
25	4
35	5
50	6
70	7
100	8
140	9
200	10

Sumber : Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. *Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir untuk Bangunan di Indonesia*. Hal 18.

Tabel 2.7. Indeks D : Bahaya Berdasarkan Situasi Bangunan

Situasi bangunan	Indeks D
Di tanah datar pada semua ketinggian	0
Di kaki bukit sampai % tinggi bukit atau di pegunungan sampai 1000meter.	1
Di puncak gunung atau pegunungan yang lebih dari 1000 meter.	2

Sumber: Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. *Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir untuk Bangunan di Indonesia*. Hal 19.

Tabel 2.8. Indeks E : Bahaya Berdasarkan Hari Guruh

Hari guruh per tahun	Indeks E
2	0
4	1
8	2
16	3
32	4
64	5
128	6
256	7

Sumber: Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. *Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir untuk Bangunan di Indonesia*. Hal 19.

Dengan memperhatikan keadaan di tempat yang hendak dicari tingkat resikonya dan kemudian menjumlahkan indeks-indeks tersebut diperoleh suatu perkiraan bahaya yang ditanggung bangunan dan tingkat pengamanan yang harus diterapkan.

Tabel 2.9. Perkiraan Bahaya Sambaran Petir Berdasarkan PUIPP

R		Perkiraan bahaya	Pengamanan
Di bawah	11	Diabaikan	Tidak perlu
Sama dengan	11	Kecil	Tidak perlu
	12	Sedang	Dianjuikan
	13	Agak besar	Dianjiirkan
	14	Besar	Sangatdianjurkan
Lebih dari	14	Sangat besar	Sangat perlu

Sumber: Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. *Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir untuk Bangunan di Indonesia*. Hal 19.

2.5.2. Kebutuhan Bangunan akan Perlindungan terhadap Sambaran Petir Berdasarkan National Fire Protection Association (NFPA) 780

Cara penentuan yang digunakan pada standar NFPA 780 hampir sama dengan cara yang digunakan pada PUIPP yaitu dengan menjumlahkan sejumlah indeks yang mewakili keadaan lokasi struktur berada kemudian hasil penjumlahan dibagi dengan indeks yang mewakili isokeraunic level di daerah tersebut. Secara matematik dituliskan sebagai:

$$R = \frac{A+B+C+D+E}{F} \quad (2.9)^{10}$$

Indeks-indeksnya dinyatakan dalam tabel-tabel berikut ini.

¹⁰National Fire Protection Association 780. Hal 34.

Tabel 2.10. Indeks A : Jenis Struktur

Jenis Struktur	Indeks A
Rumah kediaman yang kurang dari 465 m ²	1
Rumah kediaman yang lebih dari 465 m ²	2
Perumahan, kantor atau bangunan pabrik dengan tinggi kurang dari 15 meter	
- Melingkupi area kurang dari 2323 m ²	3
- Melingkupi area lebih dari 2323 m	5
Perumahan, kantor atau bangunan pabrik dengan tinggi 15-23 meter	4
Perumahan, kantor atau bangunan pabrik dengan tinggi 23-46 meter	5
Perumahan, kantor atau bangunan pabrik dengan tinggi lebih dari 46 meter	8
Kantor pelayanan milik pemerintah misalnya pemadam kebakaran, kantor polisi dan perusahaan air minum	7
Hangar pesawat terbang	7
Pembangkit listrik dan sentral telepon	8
Menara air dan <i>cooling tower</i>	8
Perpustakaan, museum dan bangunan bersejarah	8
Bangunan pertanian	9
Tempat bernaung di daerah rekreasi	9
Bangunan yang berisi banyak orang misalnya sekolah, tempat ibadah, bioskop dan stadion olahraga	9
Struktur yang ramping dan tinggi misalnya cerobong asap, menara pengawas dan mercu suar	10
Rumah sakit, penampungan para lansia dan penyandang cacat	10
Bangunan tempat membuat dan menyimpan bahan berbahaya misalnya zat kimia	10

Sumber: *National Fire Protection Association* 780. Hal 35.

Tabel 2.11. Indeks B : Jenis Konstruksi

Kerangka Struktur	Jenis Atap	Indeks B
Bukan logam	Kayu	5
	Campuran asphalt,ter atau genteng	3
	Logam yang tidak saling terhubung	4
	Logam yang terhubung secara elektrik	1
Kayu	Kayu	5
	Campuran asphalt,ter atau genteng	3
	Logam yang tidak saling terhubung	4
	Logam yang terhubung secara elektrik	2
Beton bertulang	Kayu	5
	Campuran asphalt,ter atau genteng	3
	Logam yang tidak saling terhubung	4
	Logam yang terhubung secara elektrik	1
Kerangka baja	Kayu	4
	Campuran asphalt,ter atau genteng	3
	Logam yang tidak saling terhubung	3
	Logam yang terhubung secara elektrik	1

Sumber: *National Fire Protection Association 780*. Hal 35.

Tabel 2.12. Indeks C : Lokasi Bangunan

Lokasi Bangunan	Indeks C
Bangunan dalam area bangunan yang lebih tinggi	
- Bangunan kecil, melingkupi area kurang dari 929 m ²	1
- Bangunan besar, melingkupi area lebih dari 929 m ²	2
Bangunan dalam area bangunan yang lebih rendah	
- Bangunan kecil, melingkupi area kurang dari 929 m ²	4
- Bangunan besar, melingkupi area lebih dari 929 m ²	5
Struktur diperpanjang sampai 15,2 m di atas permukaan tanah	7
Struktur diperpanjang sampai lebih dari 15,2 m di atas permukaan tanah	10

Sumber: *National Fire Protection Association* 780. Hal 35.

Tabel 2.13. Indeks D : Topografi

Lokasi	Indeks D
Pada tanah datar	1
Pada sisi bukit	2
Di atas puncak bukit	4
Di atas puncak gunung	5

Sumber : *National Fire Protection Association* 780. Hal 35.

Tabel 2.14. Indeks E : Penggunaan dan Isi Bangunan

Penggunaan dan Isi Bangunan	Indeks E
Bahan yang tidak mudah terbakar	1
Perabotan rumah tangga	2
Perlengkapan atau perabotan biasa	2
Temak piaraan	3
Bangunan berisi sedikit orang (kurang dari 50 orang)	4
Bahan yang mudah terbakar	5
Bangunan berisi banyak orang (50 orang atau lebih)	6
Peralatan atau barang berharga	7
Pelayanan umum seperti pemadam kebakaran dan kantor polisi	8
Gas atau cairan yang mudah meledak	8
Peralatan operasi yang sensitive	9
Benda bersejarah	10
Peledak dan bahan pembuatnya	10

Sumber : *National Fire Protection Association* 780. Hal 35.

Tabel 2.15. Indeks F : Isokeraunic Level

Isokeraunic Level	Indeks F
0-5	9
6-10	8
11-20	7
21-30	6
31-40	5
41-50	4
51-60	3
61-70	2
Lebih dari 70	1

Sumber : *National Fire Protection Association* 780. Hal 35.

Tabel 2.16. Perkiraan Bahaya Sambaran Petir Berdasarkan NFPA 780

R	Pengamanan
0-2	Tidak perlu
2-3	Dianjurkan
3-4	Dianjurkan
4-7	Sangat dianjurkan
Lebih dari 7	Sangat perlu

Sumber: *National Fire Protection Association 780*. Hal 34.

2.5.3. Kebutuhan Bangunan akan Perlindungan terhadap Sambaran Petir Berdasarkan International Electrotechnical Commission (IEC) 1024-1-1.

Untuk keperluan perhitungan yang lebih terperinci digunakan standar IEC 1024-1-1. Berdasarkan standart ini, pemilihan tingkat proteksi yang memadai untuk suatu sistem proteksi petir didasarkan pada frekwensi sambaran petir langsung setempat (N_d) yang diperkirakan ke struktur yang diproteksi dan frekwensi sambaran petir tahunan setempat (N_c) yang diperbolehkan.

Kerapatan kilat petir ke tanah atau kerapatan sambaran petir ke tanah rata-rata tahunan di daerah tempat suatu struktur berada dinyatakan sebagai:

$$N_g = 0,04 \cdot DCL^{0,5} / \text{km}^2 / \text{tahun} \quad (2.10)^{11}$$

dimana IKL adalah *isokeraunic level* di daerah tempat struktur yang akan diproteksi.

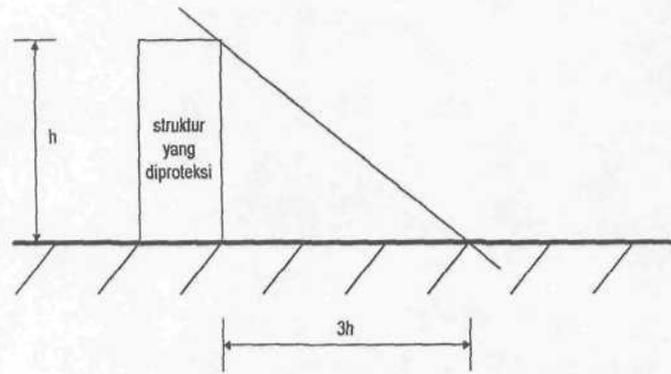
$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot 10^h / \text{tahun} \quad (2.11)^{12}$$

dimana A_e adalah area cakupan dari struktur (m^2) yaitu daerah permukaan tanah yang dianggap sebagai struktur yang mempunyai frekwensi sambaran langsung tahunan. Daerah yang diproteksi adalah daerah di sekitar struktur sejauh $3h$ dimana h adalah tinggi struktur yang diproteksi.

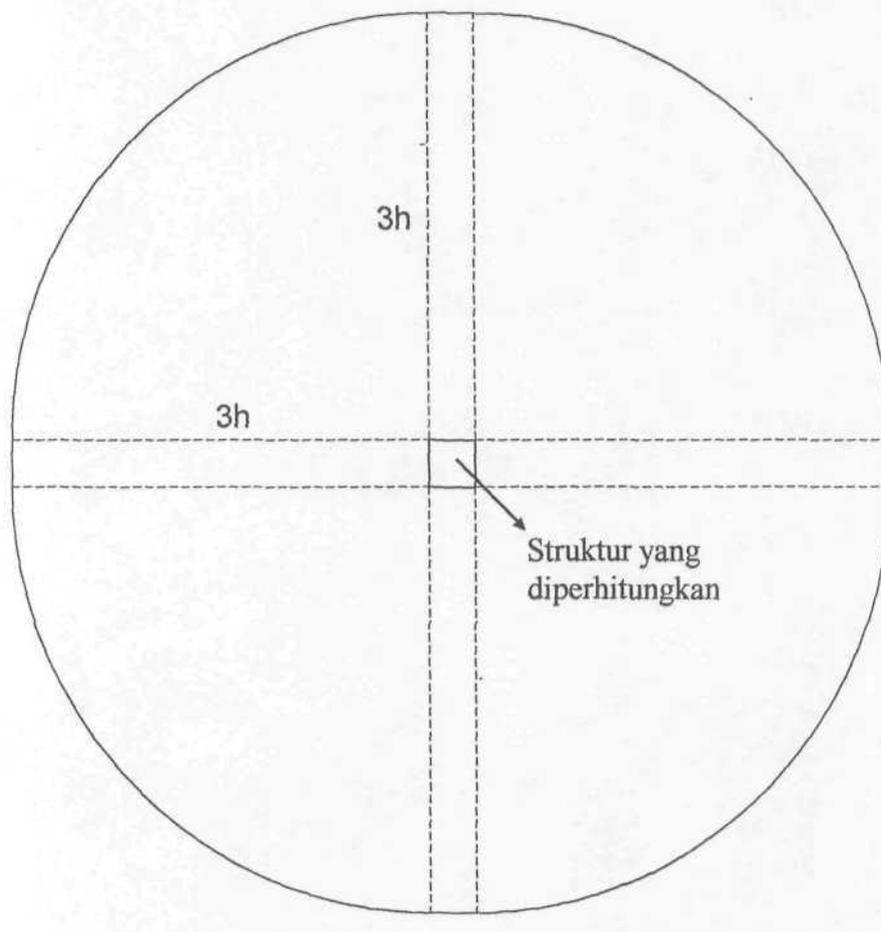
Contoh penentuan A_e ditunjukkan sebagai berikut:

¹¹ IEC 1024-1-1. Hal 21.

¹² IEC 1024-1-1. Hal 17.



(a) Proyeksi ke bidang vertikal.



(b) Proyeksi ke bidang horizontal.

Gambar 2.9. Penentuan Area Cakupan Struktur (A_e)

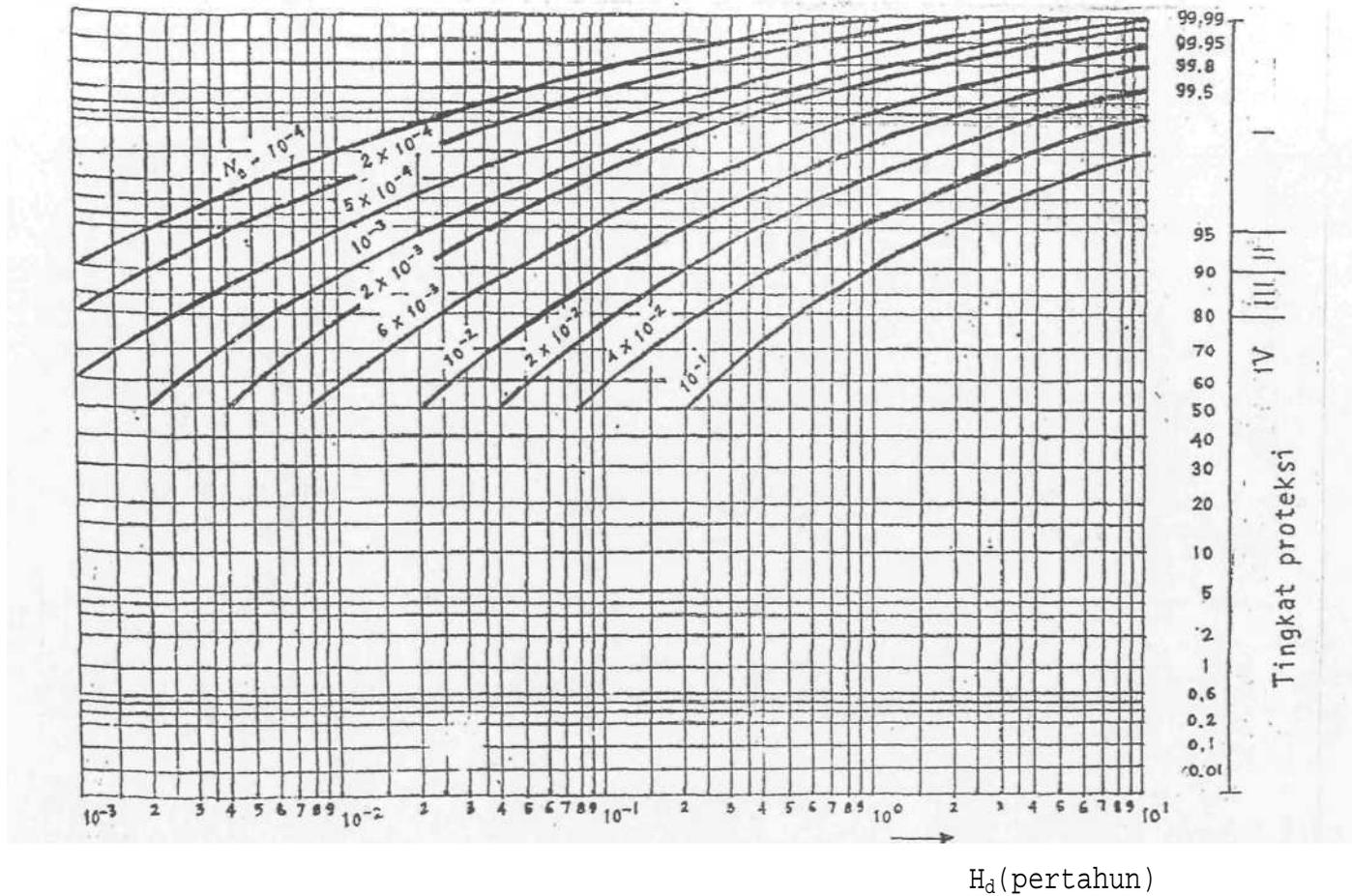
Pengambilan keputusan perlu atau tidaknya memasang sistem proteksi petir pada bangunan berdasarkan perhitungan N_d dan N_c dilakukan sebagai berikut:

- a. Jika $N_d < N_c$ tidak perlu sistem proteksi petir.
- b. Jika $N_d > N_c$ diperlukan sistem proteksi petir dengan efisiensi:

$$E > 1 - N_c / N_d \quad \text{---} \quad (2.12)^{13}$$

dengan tingkat proteksi sesuai tabel 2.17.

Nilai kritis efisiensi sistem proteksi petir yang diperlukan ditunjukkan dalam gambar 2.10.



Gambar 2.10. Nilai Kritis Efisiensi Sistem Proteksi Petir

Sumber : *Standar Engineering Pertamina* 1999. Hal 24.

Tabel 2.17. Efisiensi Sistem Proteksi Petir

Tingkat Proteksi	Efisiensi SPP
I	0,98
II	0,95
III	0,90
IV	0,80

Sumber : *Standar Engineehng Pertamina* 1999. Hal 20.

2.6. Sistem Proteksi terhadap Sambaran Petir

Berdasarkan Intemational Electrotechnical Commision TC 81, sistem proteksi yang sempurna harus terdiri dari 3 bagian yaitu proteksi eksternal, proteksi internal dan sistem pembumian.

2.6.1. Proteksi Eksternal

Yang disebut proteksi eksternal adalah instalasi dan alat-alat di luar suatu struktur untuk menangkap dan menghantarkan arus petir ke sistem pembumian. Dengan kata lain, proteksi eksternal berfungsi sebagai ujung tombak penangkap muatan listrik dan arus petir di tempat tertinggi.

2.6.1.1. Terminasi udara (*air termination*)

Terminasi udara adalah bagian sistem proteksi petir eksternal yang dikhususkan untuk menangkap sambaran petir, berupa elektroda logam yang dipasang secara tegak maupun mendatar. Penangkap petir ditempatkan dengan sedemikian rupa sehingga mampu menangkap semua petir yang mengenainya tanpa mengenai bagian yang dilindunginya.

Finial adalah penangkap petir berupa batang pendek yang dipasang pada bangunan atap datar khususnya yang menggunakan instalasi penangkal petir sangkar Faraday (*Faraday cage*). Finial yang dipasang pada penghantar mendatar harus mempunyai jarak maksimum antara 2 finial yang berdekatan

sebesar 5 meter dengan tinggi finial minimum 0,2 meter. Penghantar-penghantar mendatar harus dipasang sepanjang tepi, sudut-sudut dan bagian runcing dari tepi atap. Bila pada atap terdapat bagian yang menonjol, bagian yang menonjol tersebut harus dilindungi dengan penghantar mendatar atau dilengkapi dengan penangkap petir batang pendek.

Pada perancangan sistem terminasi udara ada 3 metode yang digunakan untuk menentukan penempatan terminasi udara sekaligus untuk mengetahui daerah proteksi.

Metode tersebut adalah:

a. Metode jala (*mesh size method*)

Metode ini digunakan untuk keperluan perlindungan pertnukaan yang datar karena bisa melindungi seluruh permukaan bangunan. Daerah yang diproteksi adalah keseluruhan daerah yang ada di dalam jala-jala. Permukaan samping pada struktur yang yang tingginya lebih dari radius bola bergulir, yang sesuai dengan tingkat proteksi yang dipilih harus dilengkapi sistem terminasi udara.

Dimensi jala pada sistem terminasi udara tidak boleh lebih dari harga yang sesuai dengan tingkat proteksi yang dipilih. Ukuran jala sesuai tingkat proteksi yang dipilih tersebut dapat dilihat pada tabel 2.18. Pada umumnya digunakan ketentuan bahwa ukuran jala (*mesh*) adalah 5 sampai 20 meter. Penghantar terminasi udara harus dipasang khususnya pada tepi atap, garis bubungan atap atau pada menara di atap. Penghantar terminasi udara harus menggunakan lintasan sependek mungkin dan langsung menuju ke sistem terminasi pembumian supaya induktansinya bisa sekecil mungkin. Tinggi batang penangkap petir (*rods*) yang digunakan antara 2-3 meter. Selain batang terminasi udara yang mendatar, juga digunakan *finial* dengan tinggi minimum 0,2 meter dan jarak *finial* tidak lebih dari 5 meter.

Atap dengan lembaran logam yang dilapisi pelindung atau atap berupa lembaran logam dengan lapisan tipis isolasi untuk isolasi thermal harus diberi terminasi udara seperti jika atap tidak terbuat dari logam. Atap yang terbuat dari bahan yang mudah terbakar harus dilindungi dari pengaruh bahaya pemanasan oleh arus petir yang mengalir melalui penghantar terminasi udara.

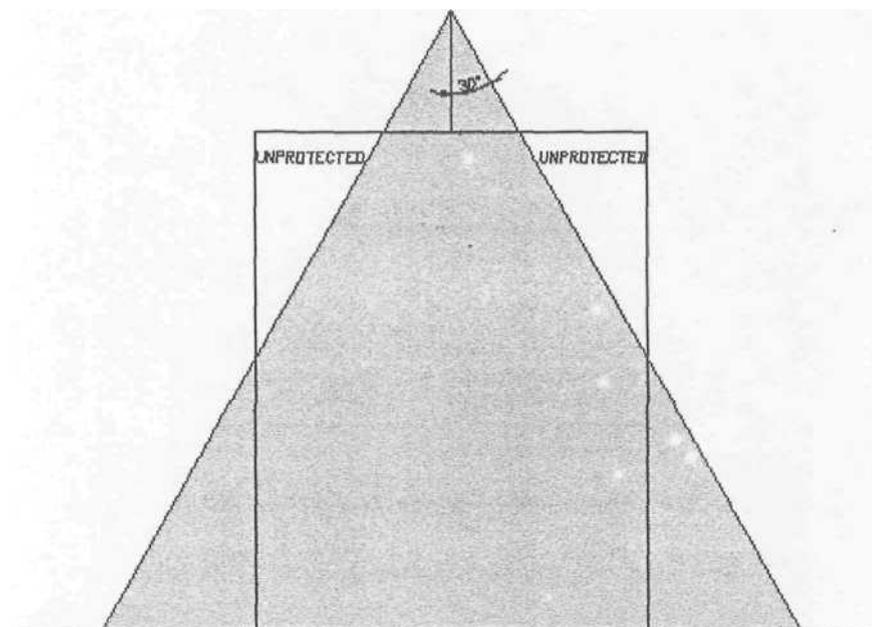
Usaha yang dapat dilakukan untuk mengurangi pemanasan adalah:

- a. Mengurangi temperatur konduktor dengan cara memperbesar luas penampang konduktor.
- b. Menambah jarak antar konduktor dengan konduktor yang dilindungi.
- c. Menyelipkan lapisan pelindung panas antara konduktor riengan material atap yang mudah terbakar.

Konduktor di puncak atap harus dipasang dengan penopang konduktor agar kuat. Adapun jika ada tiang antenna di atas atap struktur maka tiang tersebut perlu diikat ke sistem terminasi udara dengan menggunakan kabel antenna koaksial. Kabel antenna sebaiknya masuk ke struktur atau dekat dengan batang pengikat utama.

- b. Metode sudut proteksi (*protective angle method*)

Metode sudut proteksi tidak digunakan untuk perlindungan struktur yang lebih tinggi dari radius bola bergulir sesuai tabel 2.18 karena secara geometris akan ada bagian dari struktur yang tidak diproteksi. Dalam hal ini bagian tersebut tidak terlindung terhadap sambaran petir.



Gambar 2.11. Metode Sudut Proteksi

c. Metode bola bergulir (*rolling sphere method*)

Metode bola bergulir baik digunakan pada bangunan yang bentuknya rumit. Dengan metode ini seolah-olah ada suatu bola dengan radius R yang bergulir di atas tanah, sekeliling struktur dan di atas struktur ke segala arah hingga bertemu dengan tanah atau struktur yang berhubungan dengan permukaan bumi yang mampu bekerja sebagai penghantar. Titik sentuh bola bergulir pada struktur adalah titik yang dapat disambar petir dan pada titik tersebut harus diproteksi oleh konduktor terminasi udara.

Semua petir yang berjarak R dari ujung penangkap petir akan mempunyai kesempatan yang sama untuk menyambar bangunan. Besarnya R berhubungan dengan besar arus petir dan dinyatakan sebagai:

$$(2.13)^{14}$$

Bila ada arus petir yang lebih kecil dari I tersebut mengenai bangunan, bangunan masih bisa tahan. Bila arus petir lebih besar dari I tersebut, akan ditangkap oleh penangkap petir.

Tabel 2.18. Penempatan Terminasi Udara Sesuai dengan Tingkat Proteksi

Tingkat proteksi	h (m)	20	30	45	60	Lebar jala (m)
	R (m)	α^0	α^0	α^0	α^0	
I	20	25	-	-	-	5
II	30	35	25	-	-	10
III	45	45	35	25	-	15
IV	60	55	45	35	25	20

Sumber : *Standar Engineering Pertamina* 1999. Hal 42.

¹⁴R. H. Golde. *Lightning*. Volume 1.

2.6.1.2. Konduktor ke bawah (*down conductor*)

Konduktor ke bawah adalah bagian sistem proteksi eksternal yang dimaksudkan untuk melewatkan arus petir dari sistem terminasi udara ke sistem pembumian. Konduktor ke bawah terbagi menjadi konduktor penyalur utama dan konduktor penyalur pembantu.

- a. Konduktor penyalur utama adalah jenis logam yang disiapkan secara khusus untuk menyalurkan arus petir ke tanah.
- b. Konduktor penyalur pembantu adalah semua penghantar lain berupa pipa air hujan dari logam atau bahan konstruksi bangunan dari logam yang dimanfaatkan untuk penyalur arus petir ke tanah.

Konduktor penyalur diletakkan pada penyangga dengan konstruksi yang cukup kuat untuk menahan penghantar. Klem dan sekrup yang digunakan pada penyangga diusahakan sama bahannya dengan konduktor penyalur. Apabila tidak sama harus dilakukan tindakan untuk pencegahan korosi.

2.6.1.3. Penyamaan potensial (*equipotensialisasi*)

Penyamaan potensial adalah penyambungan metal dan bagian konduktif lainnya untuk menyamakan tegangan di bagian-bagian bangunan dan peralatan yang diproteksi. Tindakan menyamakan potensial sangat penting untuk mengurangi bahaya kebakaran dan ledakan di dalam ruangan yang diproteksi. Penyamaan potensial dilakukan dengan memasang konduktor pengikat (*bonding conductor*) antara kerangka logam pada struktur, instalasi logam, instalasi listrik dan instalasi telekomunikasi di dalam ruang yang dilindungi.

Pengikat penyama potensial (*equipotential bonding*) dipasang pada lokasi:

- a. Di dalam ruang bawah tanah atau mendekati permukaan tanah. Batang pengikat (*bonding bar*) harus dihubungkan ke sistem terminasi pembumian.
- b. Pada struktur yang tingginya lebih dari 20 meter, batang pengikat di atas tanah pada interval vertikal yang tidak lebih dari 20 meter harus dihubungkan ke konduktor cincin horizontal yang terikat dengan konduktor ke bawah.

Dimensi minimum untuk konduktor pengikat yang menyalurkan bagian arus petir dinyatakan dalam tabel 2.19 berikut ini.

Tabel 2.19. Dimensi Minimum Konduktor Pengikat

Tingkat Proteksi	Material	Luas Penampang (mm ²)
I-IV	Cu (tembaga)	16
	Al (aluminium)	25
	Fe (besi)	50

Sumber: *Standar Engineering Pertamina* 1999. Hal 62.

2.6.2. Proteksi Intemal

Proteksi internal adalah proteksi peralatan elektronik terhadap efek dari arus petir terutama efek medan magnet dan medan listrik terhadap instalasi listrik atau instalasi yang terdiri dari metal.

Langkah proteksi yang dilakukan merupakan integrasi dari sarana penyama potensial, pemasangan *arrester* arus dan *arresier* tegangan serta tindakan perlindungan dengan pencadaran (*screening*). Penyamaan potensial dilakukan dengan menghubungkan konduktor *bonding* yang terbuat dari logam, instalasi dari logam, instalasi listrik dan instalasi telekomunikasi dalam bangunan yang diproteksi. Di dalam proteksi petir dengan sistem penyamaan potensial, *arrester* tegangan rendah dipasang pada titik dimana kabel tenaga masuk ke dalam bangunan.

Surge arrester atau yang biasa juga disebut *surge diverter* berfungsi untuk melindungi peralatan sistem tenaga listrik dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkannya ke tanah. Berdasarkan fungsi tersebut, *arrester* harus dapat menahan tegangan untuk waktu yang tak terbatas dan harus dapat pula melewatkan arus surja ke tanah tanpa mengalami kerusakan.

Besaran-besaran kerja *arrester*:

- a. Rating tegangan (U_n) : adalah tegangan yang ditetapkan untuk pengoperasian *arrester*.

- b. Tegangan maksimum yang boleh melewati arrester (V_{bn}) : adalah tegangan maksimum yang harus bisa ditahan oleh *arrester* secara terus-menerus.
- c. Tegangan percik (V_{ag}) : tegangan yang apabila nilainya naik melampaui tegangan yang seharusnya dikenakan pada *arrester* akan mengakibatkan peralatan langsung bekerja.
- d. Tegangan impuls percikan (V_{as}): adalah harga tertinggi tegangan impuls yang melewati *arrester* selama terjadinya percikan.
- e. Waktu percikan (T_{as}) : adalah selang waktu dari titik awal terjadinya gelombang tegangan impuls sampai saat terjadinya percikan.
- f. Arus pelepasan (I_s) : adalah harga puncak arus impuls yang mengalir melalui *arrester*.
- g. Periode operasi (T_d): adalah waktu antara mulainya percikan sampai arus berhenti mengalir.

Tingkat proteksi yang diperlukan tidak ditentukan secara langsung dengan mencocokkan nilai *Basic Insulation Level* (BIL) dengan nilai pelepasan *arrester*, melainkan masih harus memperhitungkan efek *voltage-doubling*. Fenomena ini terjadi jika gelombang berjalan pada suatu saluran direfleksikan sehingga tegangannya menjadi 2 kali tegangan semula.

Pada penggunaan arrester dikenal ratio proteksi atau *protective margin* (PM). Ratio proteksi adalah ukuran kemampuan *arrester* untuk melindungi peralatan atau sistem. Perhitungannya menggunakan perbandingan rating BIL dari peralatan yang akan diproteksi dengan harga pelepasan *arrester*.

Contoh:

Dimisalkan suatu kabel dengan rating BIL 125 kV dipasang pada sistem 24,9 kV. Jenis *arrester* Silicon-Carbide (SiC) yang akan digunakan mempunyai harga pelepasan 67 kV. Apakah *arrester* ini sesuai?

Jika dilihat secara sepintas, *arrester* tampaknya telah sesuai karena tegangan pelepasannya sudah lebih besar dari BIL kabel. Akan tetapi dengan memperhitungkan efek dari *voltage-doubling* maka tegangan surja akan menjadi 2 kalinya yaitu sebesar 134 kV. Nilai ini ternyata lebih besar 9 kV dari BIL kabel.

$$PM_{diperoleh} = 9kV/125 kV = 0,072 = 7,2 \%$$

Nilai ini dituliskan sebagai - 7,2 %. Karena nilai ratio proteksinya negatif berarti *arrester* tidak sesuai.

Untuk mendapatkan tingkat ekonomis yang lebih baik pada penerapan sistem proteksi intemal, tidak semua peralatan listrik diberi peralatan proteksi dalam hal ini *arrester*. Peletakan *arrester* diupayakan seefektif mungkin dengan menerapkan konsep *Zoning Area Protection* yaitu membagi cakupan yang akan diproteksi dalam bagian tertentu yang dibentuk oleh dinding bangunan, ruangan-ruangan peralatan-peralatan dan permukaan dari logam.

Zone Proteksi Petir atau *Lightning Protection Zone* (LPZ) dimulai dari zone 0 yaitu daerah yang memungkinkan terjadi sambaran petir langsung. Zone proteksi yang berikutnya sesuai dengan penurunan level resiko gangguan akibat petir.

LPZOA : terjadi sambaran petir langsung dan medan elektromagnetik tinggi.

LPZ 0B : tidak ada sambaran langsung dan ada medan elektromagnetik tinggi.

LPZ 1 : tidak ada sambaran langsung medan elektromagnetik lemah.

LPZ 2 : daerah dengan medan elektromagnetik sangat lemah.

LPZ 3 : daerah proteksi dalam peralatan itu sendiri.

Usaha lain yang dilakukan pada proteksi internal adalah tindakan pencadangan (*screening*). Perlindungan jenis ini dilakukan dengan meletakkan perlengkapan yang bisa terpengaruh oleh medan elektromagnetik dalam suatu lapisan yang membatasi peralatan tersebut. Misalnya perangkat komputer diberi pelindung berlapis berupa kerangka logam dan pelindung pada kabelnya. Pelindung kabel umumnya berbentuk pipa.

Pada peralatan yang sensitif, usaha untuk mengurangi pengaruh gelombang transient dilakukan dengan menasang instalasi TVSS (*Transient Voltage Surge Supressor*). Protektor surja dipasang di dekat peralatan yang sensitif untuk melindunginya terhadap residu tegangan surja yang melewati sistem ketika beroperasinya *arrester*.

Jenis TVSS adalah:

a. *Crowbar devices* yang antara lain terdiri dari *air gap* (*arrester* yang berisi sela udara), *gas discharge tube* dan *switching devices*. Peralatan-peralatan tersebut tidak aktif sampai tegangan melewati suatu nilai tertentu. Pada titik tersebut, peralatan mulai menghantarkan dan membentuk jalur *short circuit* ke pentanahan.

- *Gap-type devices*

Pada peralatan ini diperlukan 300 sampai 700 V untuk mengawali terjadinya percikan melewati sela (*gap*). Selama proses penghantarannya, peralatan tidak hanya membawa energi dari gelombang transient melainkan juga arus *short circuit* dari sistem yang dialirkan ke tanah dengan durasi 8 ms atau lebih. Pada saat tidak ada arus yang mengalir lagi, energi transient dalam durasi yang cukup singkat tersebut didisipasikan dan tegangan sistem tidak cukup besar lagi untuk menimbulkan percikan. Sela akan kembali ke keadaan semula.

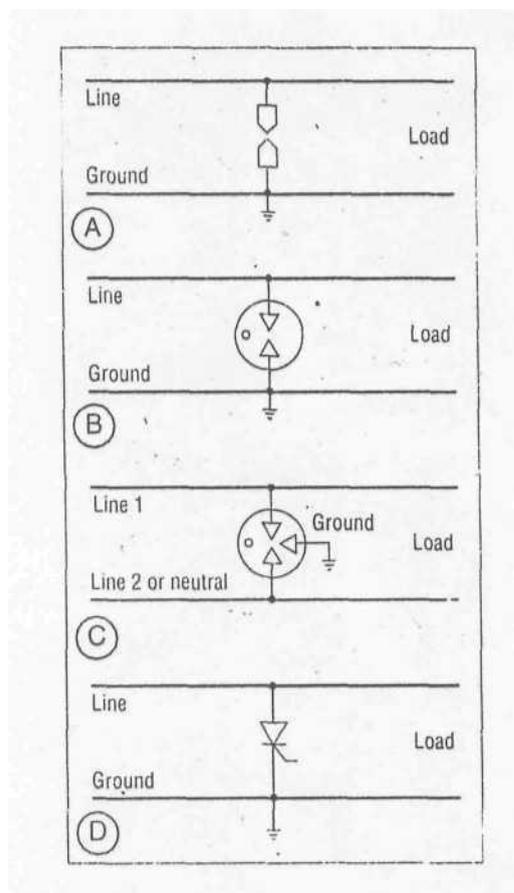
- *Gas-discharge tubes (GDTs)*

GDTs merupakan peralatan sela yang umum digunakan pada sistem komputer dan peralatan elektronik sensitif lainnya. GDTs terdiri dari 2 atau 3 elektroda yang ditutup dalam tabung gelas berisi campuran gas bertekanan rendah. Elektrodanya membentuk 1 atau 2 sela metalik. GDTs mempunyai umur yang relatif lama dan kemampuan membawa arus yang bernilai besar.

- *Carbon-block Spark Gaps*

Alat ini digunakan pada peralatan tegangan rendah berupa telepon dan sistem data. Peralatan ini terdiri dari 2 carbon-block elektroda yang dipisahkan oleh sela udara. Peralatan jenis ini terbilang murah harganya tetapi kemampuannya dalam menahan arus tidak besar dan umurnya singkat. Tegangan percik yang ditimbulkan oleh satu unitnya tidak konstan, rangenya antara 300-1000 V.

Crowbar devices operasinya agak lambat, memerlukan beberapa mikrosekon untuk beroperasi sedangkan sistem membutuhkan proteksi terhadap kenaikan tegangan yang sangat cepat. Untuk mengatasi hal ini diperlukan proteksi surja tambahan yaitu jenis *voltage-clamping devices*.



Gambar 2.12. Crowbar Devices

- A. Airgap carbonblock
- B. Two electrode gas discharge tube
- C. Three electrode gas discharge tube
- D. Thyristor switching circuit

Sumber : *Guide 's Book to Quality Powerfor Sensitive Electronic Equipment.*

Hal 68.

b. *Voltage-clamping devices*

Antara lain terdiri dari *varistor* (*non linear resistor*), *metal oxide varistor* (MOV), *zener* (*avalanche*) *diode* dan *selenium rectifiers*.

Peralatan bertindak sebagai penghantar searah sampai tegangan *breakdown* dimana pada saat itu peralatan menghantarkan dalam arah sebaliknya.

Pada tegangan *clamping*, impedansi berkurang. Arus bertambah maka impedansinya berkurang sehingga membentuk *shunt* dengan transient dari beban. Impedansi *clamping devices* dalam keadaan seri dengan impedansi sumber bertindak sebagai pembagi tegangan dan menjaga sistem tetap pada tegangan *clamping*. *Clamping devices* beroperasi pada range nanosekon, ribuan kali lebih cepat daripada *crowbar devices* tetapi mempunyai kemampuan mendisipasikan energi transient yang bernilai kecil.

Jenis-jenisnya adalah:

- *Metal-oxide varistor* (MOV)

Peralatan ini sesuai untuk range arus dan tegangan yang lebar mulai dari tegangan saluran data 4 V sampai tegangan sistem tenaga ribuan volt, atau untuk arus puncak yang hanya beberapa ampere sampai yang bernilai puluhan ribu ampere. MOV harganya relatif murah, ukurannya mudah disesuaikan dan mudah dipasang.

- *Zener diode*

Zener diode digunakan juga untuk menghasilkan tegangan *clamping*. Peralatan ini adalah *avalanche devices* yang menjaga impedansi tinggi sampai tegangan *breakdown* kemudian dengan cepat impedansinya berkurang untuk menyiapkan tindakan *clamping*.

Di bawah kondisi *avalanche*, pada saat diode membersihkan tegangan lebih, arus utama harus mengalir melewati sambungan tipis semikonduktor. Kemampuan untuk mendisipasikan panas yang dihasilkan pada sambungan membatasi energi maksimum yang bisa ditangani *zener diode*.

Zener diode lebih cepat reaksinya dari MOV dan memberikan *clamping* yang baik untuk tegangan yang hampir konstan tetapi dengan energi terbatas.

2.6.3. Sistem Pembumian

Bagian yang juga sangat penting dari sistem proteksi petir adalah sistem pembumian. Pembumian dilakukan dengan menghubungkan semua elektroda tunggal ke bumi untuk menyebarkan arus petir ke dalam tanah. Tujuannya adalah membatasi tegangan antara bagian peralatan yang tidak dialiri arus dan antara bagian ini dengan tanah sampai harga yang aman untuk kondisi operasi.

Tugas sistem pembumian adalah :

- a. Menyalurkan arus petir ke bumi.
- b. Menjadi pengikat ekipotensial antara konduktor ke bawah.
- c. Sebagai kontrol potensial di sekitar dinding bangunan.
- d. Menangkap arus petir yang menyebar di permukaan bumi.

Pembumian dapat menggunakan elektroda pita, elektroda batang dan elektroda pembumian pondasi.

- a. Elektroda pita adalah elektroda berbentuk pita atau kawat dengan tanpa memperhitungkan luas penampangnya di dalam tanah, kedalamannya sekurang-kurangnya berjarak 50 cm dari permukaan tanah.
- b. Elektroda batang adalah elektroda berbentuk batang dapat berupa pipa logam, batang logam bulat pejal atau plat strip yang ditanam secara tegak ke dalam tanah.
- c. Elektroda pembumian pondasi adalah pembumian yang memanfaatkan tulang beton pondasi untuk menyalurkan arus petir. Apabila pembumian menggunakan elektroda ini maka diperlukan penyambungan antara elektroda pembumian dengan konduktor penyalur utama dan konduktor penyalur pembantu.

Syarat-syarat konduktor sistem pembumian:

- a. Memiliki daya hantar jenis (konduktivitas) yang cukup besar sehingga tidak akan memperbesar beda potensial.

- b. Memiliki kekuatan mekanis tinggi.
- c. Tahan terhadap peledakan karena sambungan yang buruk walaupun konduktor tersebut akan terkena arus gangguan dalam waktu yang lama.
- d. Tahan terhadap korosi.

Tindakan terhadap korosi pada sistem pembumian:

- a. Jika pipa logam diletakkan di dalam tanah dan disambung ke sistem pengikat ekipotensial dan ke sistem terminasi pembumian, material pipa yang tidak terisolasi dan material konduktor pembumian sebaiknya sama dalam hal sifat elektrokimia dan galvanisnya. Pipa yang menggunakan pelindung cat atau asphalt dianggap tidak terisolasi.
- b. Konduktor dengan lapisan timbal sebaiknya tidak secara langsung dipasang ke beton melainkan terlebih dahulu dilindungi terhadap korosi dengan menyediakan ikatan anti korosi atau dengan menggunakan pelindung dari PVC.
- c. Konduktor terminasi pembumian pada titik masuk ke tanah sebaiknya dilindungi terhadap korosi yaitu 0,3 meter di atas tanah dan di bawah permukaan tanah dengan cara dibalut dengan lapisan anti korosi.

Ketentuan pemasangan sistem pembumian:

- a. Semua elektroda pembumian pita sedapat mungkin memiliki jarak 1 meter dari pondasi bangunan dan ditanam sekurang-kurangnya pada kedalaman 0,5 meter.
- b. Menghindari penanaman elektroda pembumian pada daerah yang dilalui sumber panas karena kondisi tanah akan menjadi kering akibat pemanasan. Temperatur tanah harus tetap di bawah 100° C untuk menjaga jangan sampai terjadi penguapan kandungan air di dalam tanah. Penguapan akan mengurangi air di dalam tanah dan akan mempengaruhi tahanan tanah.

Hubungan kerapatan arus, diameter batang pembumian, panas spesifik tanah, kenaikan suhu, tahanan jenis tanah dan lama arus gangguan dinyatakan sebagai:

$$i = 3,1414 \times 10^{-5} d \sqrt{\frac{\delta \theta}{\rho t}} \quad (2.14)^{15}$$

¹⁵Majalah Elektro Indonesia No.23. Edisi 15. November 1998.

dimana:

- i : kerapatan arus yang diizinkan (A/cm)
- d : diameter batang pembumian (mm)
- ρ : panas spesifik rata-rata tanah ($\pm 1,75 \times 10^6$ watt detik/m²/ °C)
- θ : kenaikan suhu tanah yang diizinkan (°C)
- p : tahanan jenis tanah (Ω m)
- t : lamanya arus gangguan (detik)

Tahanan jenis tanah berdasarkan pasal 320-1 PUIL 2000 dinyatakan dalam tabel 2.20.

Tabel 2.20. Tahanan Jenis Tanah

Jenis tanah	Tahanan jenis tanah p (ftm)
Tanah rawa	10...40
Tanah liat dan tanah lading	20... 100
Pasir basah	50...200
Kerikil basah	200... 3000
Pasir kering	<10000
Tanah berbatu	2000... 3000
Air laut dan air tawar	10...100

Sumber : PUIL 2000 Pasal 320-1.

2.6.3.1. Penentuan Jumlah Batang Pembumian

Panjang batang pembumian yang diperlukan dihitung dari pembagian arus gangguan ke tanah dengan kerapatan arus yang diizinkan. Jumlah minimum batang pembumian yang diperlukan diperoleh dari pembagian panjang total dengan panjang satu batang, dituliskan sebagai:

$$N_{\min} = I_g / L \cdot i \quad (2.15)^{16}$$

¹⁶MajalahElektroIndonesiaNo.23.Edisi 15. November 1998.

dimana:

N_{min} : Jumlah minimum batang pbumian yang dibutuhkan

I_g : Arus gangguan ke tanah (A)

L : Panjang batang (cm)

i : Kerapatan arus yang diizinkan (A/cm)

2.6.3.2. Susunan Pbumian

Dalam sistem pbumian, ada 2 tipe susunan pbumian yang digunakan yaitu pbumian tipe A dan B.

Susunan pbumian tipe A terdiri dari elektroda pbumian radial atau vertikal dimana setiap konduktor ke bawah harus dihubungkan paling tidak dengan sebuah elektroda pbumian.

Panjang minimum setiap elektroda adalah :

U untuk elektroda horizontal radial

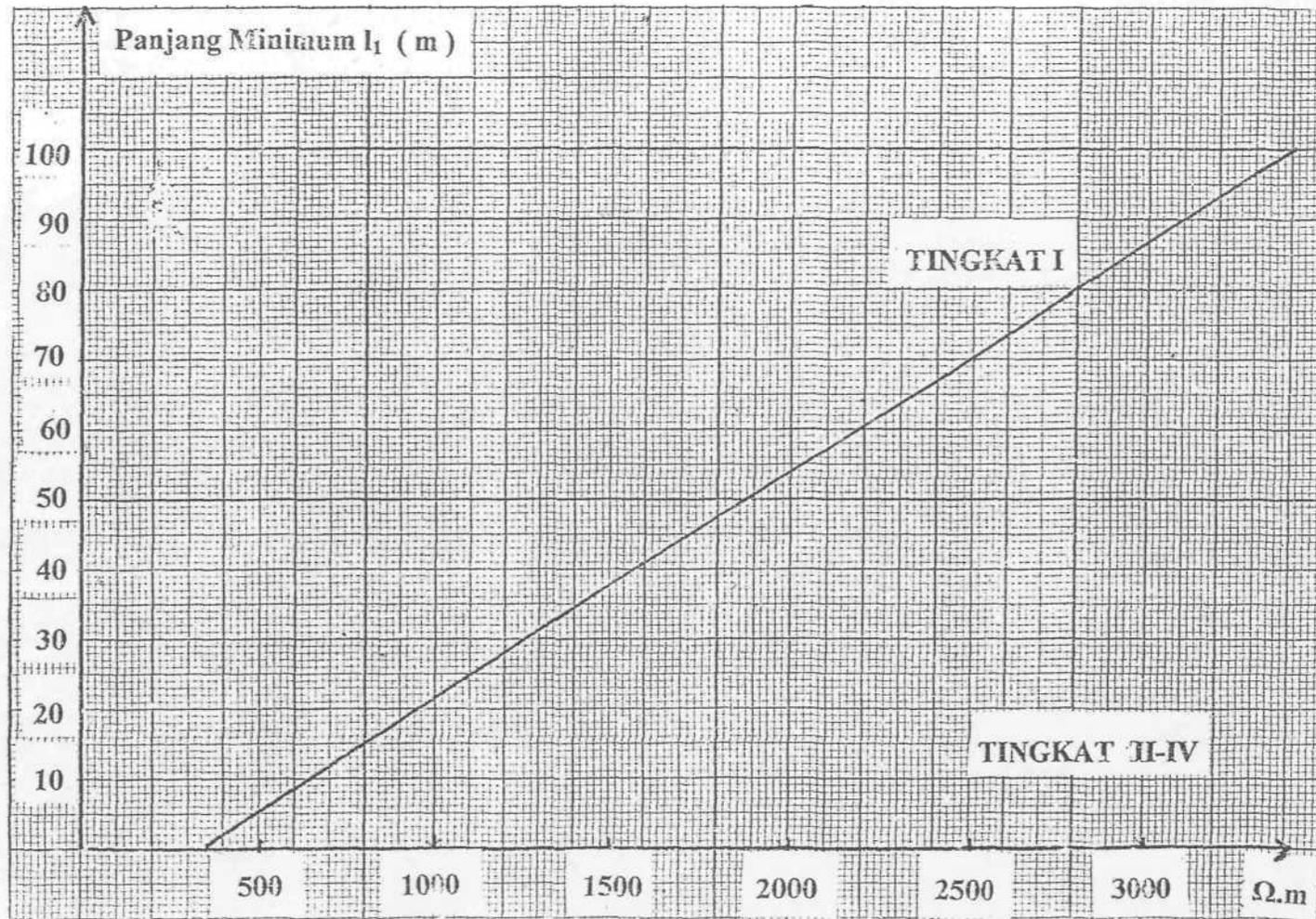
$0,5 li$ untuk elektroda vertikal

dimana nilai h dapat dilihat pada gambar 2.13.

Susunan pbumian tipe B digunakan untuk elektroda bumi cincin atau elektroda pbumian pondasi dengan radius rata-rata (r) dari area yang dicakup oleh elektroda tidak lebih kecil dari harga li yang dinyatakan dalam gambar 2.13.

Elektroda-elektroda tipe B harus dipasang lebih 1 meter dari struktur dengan kedalaman 0,5 meter atau lebih, mengelilingi seluruh struktur yang dilindungi. Elektroda cincin dipasang lebih dalam di bawah permukaan tanah yaitu 4 meter dari struktur dengan kedalaman 1 meter, 7 meter dari struktur dengan kedalaman 1,5 meter atau 10 meter dari struktur dengan kedalaman 2 meter. Elektroda ini disambung dengan menggunakan konduktor radial.

Pbumian internal tidak disatukan dengan pbumian eksternal karena bisa terjadi *loop* yang menyebabkan arus lebih yang berasal dari sambaran petir mengalir ke peralatan.



Gambar 2.13. Panjang Minimum Elektroda Pembeduan

Sumber : *Standar Engineering Perlamina* 1999. Hal 58.

Tabel 2.21. Jenis Bahan untuk Proteksi dan Ukuran Terkecil

No.	Komponen	Jenis Bahan	Bentuk	Ukuran Terkecil
1.	Penangkap Petir			
1.1.	Penangkap petir tegak			
1.1.1.	Kepala dengan dudukan	Tembaga	Pejal runcing	ϕ 1 in
		Baja galvanis	Pejal runcing	ϕ 1 in
		Aluminium	Pejal runcing	ϕ 1 in
1.1.2.	Batang tegak	Tembaga	Silinder pejal Pita pejal	ϕ 10 mm 25mmx3mm
		Baja galvanis	Pipa silinder pejal Pipa pejal	ϕ 1 in 25mmx3mm
		Aluminium	Silinder pejal Pita pejal	ϕ 1 in 25mmx4mm
1.2.	Penangkap petir batang pendek	Tembaga	Silinder pejal Pita pejal	ϕ 8 mm 25mmx3mm
		Baja galvanis	Silinder pejal Pita pejal	ϕ 8 mm 25mmx3mm
		Aluminium	Silinder pejal Pita pejal	ϕ ½ in 25mmx4mm
1.3.	Penangkap petir datar	Tembaga	Silinder pejal Pita pejal Pilin	ϕ 8 mm 25mmx3mm 50 mm ²
		Baja galvanis	Silinder pejal Pita pejal	ϕ ½ in 25mmx4mm

Tabel 2.21 (sambungan)

2.	Penghantar penyalur utama	Tembaga	Silinder pejal	ϕ 8 mm
			Pita pejal	25mmx3mm
			Pilin	50 mm ²
		Baja galvanis	Silinder pejal	ϕ 8 mm
			Pita pejal	25mmx3mm
		Aluminium	Silinder pejal	ϕ ½ in
			Pita pejal	25mmx4mm
3.	Elektroda pbumian	Tembaga	Silinder pejal	ϕ ½ in
			Pita pejal	25mmx4mm
		Baja galvanis	Silinder pejal	ϕ ½ in
			Pita pejal	25mmx4mm

Sumber : Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. *Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir di Indonesia*. Hal 25.

2.7. Pemeriksaan dan Pemeliharaan Sistem Proteksi Petir

Pemeriksaan secara berkala harus dilakukan pada semua elemen sistem penangkal petir. Jangka waktu pemeriksaan mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut:

- a. Klasifikasi struktur dan daerah yang dilindungi. Semakin besar tingkat bahaya yang ditanggung suatu bangunan maka pemeriksaan harus semakin rutin dilakukan yaitu minimal 2 tahun sekali.
- b. Kondisi lingkungan terutama yang mempengaruhi sifat korosif bahan, misalnya pada daerah yang berkelembaban tinggi. Instalasi penangkal petir harus diperiksa minimal 2 tahun sekali karena bahan akan semakin cepat mengalami korosi di tempat lembab apalagi jika ada sambungan antara bahan yang tidak sama jenisnya.
- c. Jenis material komponen sistem. Setiap jenis material mempunyai umur dan kekuatan yang berbeda sehingga harus diperiksa secara rutin untuk memastikan jika ada bahan yang sudah rusak dan harus segera diganti.

Sebagai tambahan, sistem penangkal petir harus diperiksa jika dilakukan penggantian atau perbaikan pada sistem penangkal petir.

Kegiatan pemeriksaan dilakukan untuk mengetahui:

- a. Sistem berada dalam kondisi yang baik.
- b. Tidak ada kerusakan pada sambungan atau ikatan (*bonding*) yang dapat menimbulkan tahanan kontak yang tinggi.
- c. Tidak ada bagian sistem yang melemah karena korosi atau getaran.
- d. Semua konduktor penyalur dan konduktor pentanahan berada dalam keadaan utuh/tidak terputus.

Program pemeliharaan secara periodik sebaiknya dilakukan untuk semua sistem proteksi petir dengan program pemeliharaan berisi kegiatan :

- a. Pengencangan semua konduktor sistem proteksi petir.
- b. Pengecekan semua klem dan sekrup.
- c. Pemeriksaan kontinuitas listrik pada instalasi sistem penangkal petir.
- d. Pengukuran tahanan bumi dan pemeriksaan terminal pbumian.
- e. Pemeriksaan terhadap perubahan konstruksi struktur dan instalasinya serta pengaruh yang ditimbulkan oleh perubahan tersebut terhadap sistem proteksi petir.