

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Petir

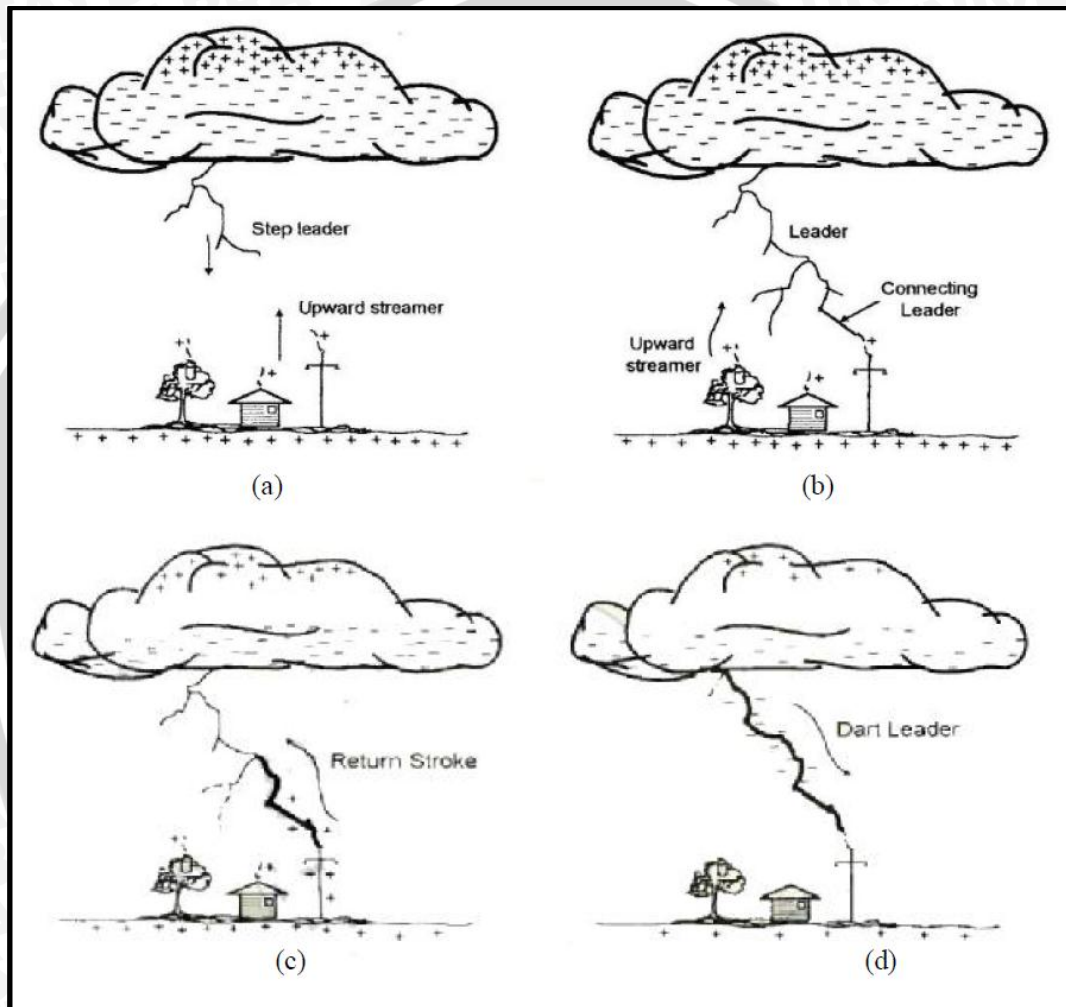
Petir merupakan fenomena alamiah yang terjadi di atmosfer bawah yang merupakan proses pelepasan muatan antara awan bermuatan dengan bumi atau dengan awan bermuatan lainnya. Dengan adanya awan yang bermuatan pada permukaan bumi ini sehingga menimbulkan medan listrik antara awan dengan bumi.

Awan yang terus bergerak, baik secara horizontal maupun vertikal, dan terjadinya benturan antara titik-titik air dalam awan tersebut dengan partikel-partikel udara memungkinkan terjadinya pemisahan muatan listrik di dalam awan tersebut. Butiran air yang bermuatan positif biasanya berada di bagian atas dan yang bermuatan negatif di bagian bawah. Jika perbedaan potensial antara awan dan bumi cukup besar, maka akan terjadi pelepasan muatan dari awan ke bumi atau sebaliknya. Terjadinya pelepasan muatan inilah yang disebut sebagai petir.

Setiap sambaran petir bermula dari suatu lidah petir (*leader*) yang bergerak turun dari awan bermuatan dan disebut *downward leader* yang diilustrasikan pada Gambar 2.1.a. *Downward leader* ini bergerak menuju bumi dalam bentuk langkah-langkah yang disebut *step leader*. Pergerakan *step leader* ini arahnya tidak beraturan dan patah-patah.

Ketika *leader* bergerak mendekati bumi, maka terdapat beda potensial yang semakin tinggi antara ujung *step leader* dengan bumi sehingga terbentuk peluahan mula yang disebut *upward streamer* pada permukaan bumi atau objek. *Upward streamer* ini akan bergerak ke atas menuju ujung dari *step leader*. Apabila *upward leader* telah masuk ke dalam zona jarak sambaran (*striking distance*), maka akan terbentuk petir penghubung (*connecting leader*) yang menghubungkan ujung *step leader* dengan objek yang disambar seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 2.1.b. Setelah itu akan timbul sambaran balik (*return stroke*) yang bercahaya sangat terang bergerak dari bumi atau objek menuju awan dan melepas muatan yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.c.

Jalur yang ditempuh *returnstroke* sama dengan jalur turunnya *step leader*, hanya arahnya yang berlawanan. Selanjutnya terjadi sambaran susulan (*subsequent stroke*) dari awan menuju bumi atau objek sambaran tersebut. Sambaran susulan ini tidak memiliki percabangan dan biasa disebut lidah panah atau *dart leader* yang dapat dilihat pada Gambar 2.1.d. Pergerakan *dart leader* ini sekitar 10 kali lebih cepat dari sambaran yang pertama.



Gambar 2.1 Tahapan Proses Terjadinya Sambaran Petir

Sumber : Vernon Cooray, 2010: 16

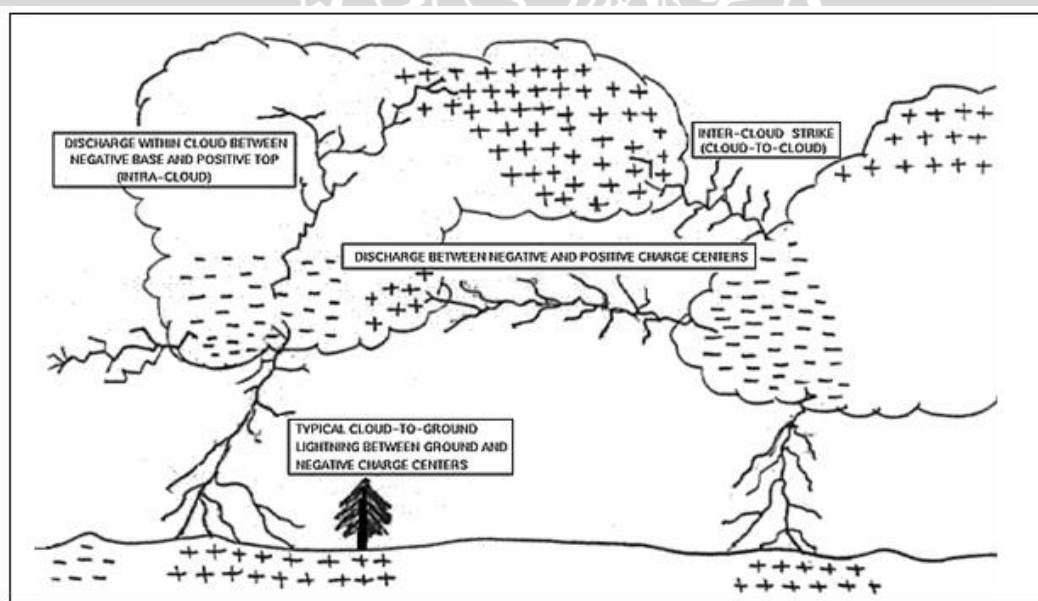
2.2. Jenis Petir

Jenis-jenis petir dapat digolongkan berdasarkan interaksi antara ion-ion yang bermuatan negatif dan positif. Interaksi ini mengklasifikasikan petir menjadi 4 jenis yaitu, petir di dalam awan (*intracloud*), petir antar awan (*cloud to cloud*),

dan petir dari awan ke udara (*cloud to air*), dan petir dari awan ke bumi (*cloud to ground*). Jenis-jenis petir ini ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Intracloud lighting adalah petir yang terjadi karena adanya tubrukan muatan positif dan muatan negatif di dalam awan, petir ini tidak dapat dilihat mata telanjang. *Cloud to cloud lightning* terjadi antara dua buah awan atau lebih yang disebabkan adanya interaksi muatan negatif dengan muatan positif. *Cloud to air lightning* biasanya terjadi jika udara disekitar awan bermuatan positif berinteraksi dengan udara yang beruatan negatif. Sedangkan *cloud to ground lightning* adalah petir yang paling sering terjadi di alam.

Petir awan ke bumi atau yang disebut dengan *cloud to ground* merupakan petir yang bisa diamati langsung dengan mata telanjang dan merupakan jenis petir yang sering menyebabkan kerusakan. Pada petir jenis ini, ion-ion yang bermuatan positif berasal dari bumi dan ion yang bermuatan negatif berasal dari awan, atau sebaliknya. Kebanyakan sambara petir awan-bumi membawa energi negatif ke permukaan tanah, namun ada pula diantaranya yang membawa energi positif, tapi ini jarang terjadi.



Gambar 2.2 Empat Jenis Petir

Sumber: <http://information-humanstudy.blogspot.com/2010/10/mengenal-petir-1.html>

2.3. Gelombang Petir

Petir memiliki bentuk gelombang berupa gelombang impuls. Sesuai pengertian pada standar internasional, gelombang impuls adalah gelombang yang memiliki polaritas tertentu dan mampu mencapai nilai puncak dalam waktu sangat singkat yang selanjutnya turun perlahan mendekati nilai nol.

Bentuk gelombang tegangan petir dapat dinyatakan dalam persamaan berikut: (Hutaeruk, 1988:5)

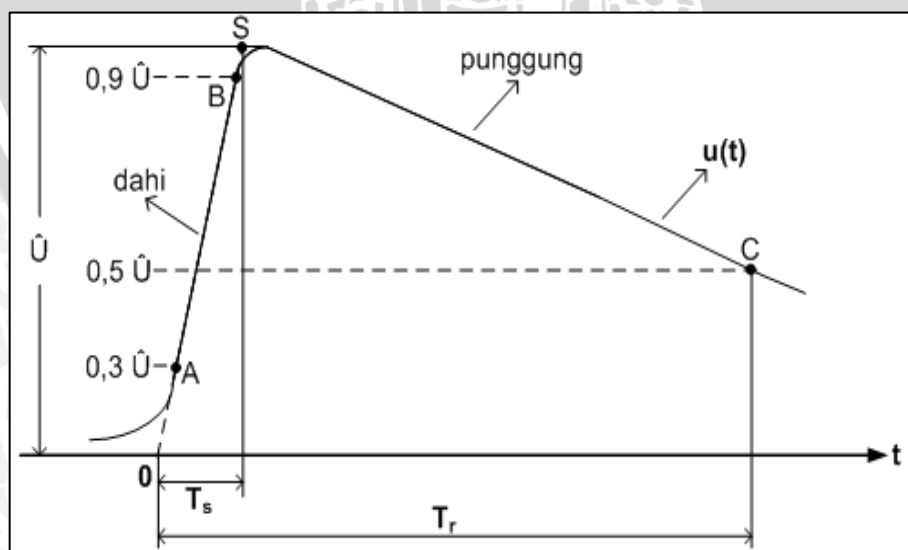
$$e(t) = E(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2-1)$$

Dengan E, a, dan b adalah konstanta

Sedangkan bentuk gelombang arus petir didapatkan dari persamaan gelombang tegangannya, sebagai berikut: (Hutaeruk, 1988: 5)

$$i(t) = A_I \cdot I_m(e^{-at} - e^{-bt}) \cdot 10^{-6} \quad (2-2)$$

Gelombang impuls petir memiliki beberapa parameter seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Waktu muka (T_s) ialah waktu yang terjadi pada muka gelombang dimulai dari titik perpotongan sumbu waktu t dengan garis lurus yang dibentuk dari titik 0,3 \hat{U} (A), 0,9 \hat{U} (B) dan S hingga mencapai titik potong sumbu waktu t dengan garis vertikal dari titik S. Sedangkan waktu paruh punggung (T_r) adalah waktu yang dibutuhkan mulai dari titik nol hingga mencapai setengah dari nilai puncak tegangan 0,5 \hat{U} (titik C) pada ekor gelombang.

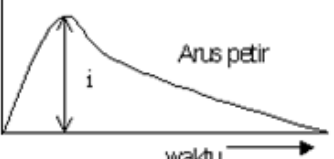

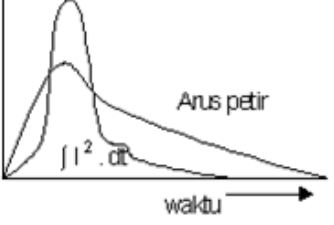
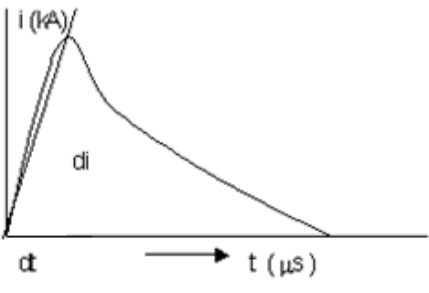


Gambar 2.3 Bentuk gelombang petir

Sumber: Golde, R.H. 1981: 25

2.4. Parameter Petir

Setiap sambaran petir dapat diuraikan secara matematis kelistrikan. Hal tersebut diperlukan guna mengetahui sejauh mana akibat pada objek sambaran yang ditimbulkan masing-masing parameter tersebut dan untuk menentukan level proteksi yang harus didesain. Berikut ini merupakan parameter-parameter petir yang sangat penting dalam penentuan sistem proteksi petir. Secara umum parameter petir ditunjukkan pada Gambar 2.4.

<p>1. Arus Puncak Petir</p> $U_m = I_m \cdot R_E$	
<p>2. Muatan petir</p> $Q = \int i \, dt$ $W = Q \cdot U_{A,K}$	
<p>3. Arus Kuadrat Impuls</p> $E = \int i^2 \, dt$	
<p>4. Kecuraman Arus Petir</p> $U_m = M \left(\frac{di}{dt} \right)$	

Gambar 2.4 Parameter Parameter Petir

Sumber: <http://www.telkomrdc-media.com/index.php?ch=8&lang=&n=346>

2.4.1. Arus Puncak Petir (I_m)

Arus puncak petir (I_m) merupakan nilai maksimum arus impuls petir yang dapat menyebabkan tegangan lebih pada tempat sambaran. Arus puncak petir menentukan tinggi tegangan jatuh pada tahanan pentanahan objek yang disambar sesuai dengan persamaan berikut: (Peter Hasse, 2008:48)

$$U_m = I_m \cdot R_E \quad (2-3)$$

Dengan :

U_m : tegangan (volt)

I_m : arus puncak petir (ampere)

R_E : tahanan tanah (Ω)

Arus puncak petir juga dapat menentukan tingkat proteksi dari sebuah sistem proteksi petir seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Nilai Arus Puncak Petir Sesuai dengan Perencanaan Tingkat Proteksi

Tingkat Proteksi	Nilai I_m (kA)
I	200
II	150
III-IV	100

Sumber : Peter Hasse, 2008:49

2.4.2. Muatan Petir (Q)

Muatan arus petir (Q) adalah jumlah muatan arus petir yang mengalir atau integral arus petir terhadap waktu. Muatan arus petir menentukan jumlah energi (W) yang terwujud dalam busur listrik yang menembus isolasi. Muatan ini menyebabkan terjadinya pelelehan ujung finial penangkap petir, kulit aluminium pesawat terbang, atau logam yang digunakan sebagai titik sambaran petir. Muatan arus petir dapat dinyatakan dalam persamaan berikut: (Dehn+Söhne, 2007:20)

$$Q = \int_0^t i dt \text{ (As atau coulomb)} \quad (2-4)$$

Sedangkan besarnya nilai batas muatan petir tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Volume pelelehan logam yang disebabkan muatan arus petir dapat dinyatakan dalam persamaan berikut: (Dehn+Söhne, 2007:20)

$$Vol = \frac{W}{\gamma c_w \theta + c_s} \text{ (m}^3\text{)} \quad (2-5)$$

Dengan :

W : energi busur listrik (joule)

θ : temperatur leleh ($^{\circ}\text{C}$)

c_s : panas leleh spesifik (J/kg)

- c_w : kapasitas tanah spesifik (J/kg)
 γ : kerapatan massa (kg/m^3)

Tabel 2.2 Nilai Batas Muatan Arus Petir Menurut Hasil Pengukuran Berger

Tingkat proteksi	Nilai batas muatan Q (As)	Probabilitas dilampauinya nilai batas muatan arus (%)	
		Petir negatif	Petir positif
Normal	50	± 2	-
Tinggi	300	-	± 10
Sangat tinggi	600	-	± 1

Sumber : Vernon Cooray, 2010: 50

Energi W merupakan nilai perkalian dari muatan Q dan tegangan jatuh pada anoda-katoda dalam satuan mikrometer ($U_{A,K}$) yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 dan di ekspresikan dalam persamaan berikut: (Dehn+Söhne, 2007:20)

$$W = Q \cdot U_{A,K} \quad (2-6)$$

Dengan:

Q : Muatan dari arus petir (joule)

$U_{A,K}$: Tegangan jatuh pada anoda-katoda (volt)

Nilai rata-rata dari $U_{A,K}$ ini sebesar puluhan volt dan sangat dipengaruhi oleh tinggi dan bentuk gelombang arus.

2.4.3. Arus Kuadrat Impuls

Arus kuadrat impuls adalah suatu aksi integral yang bertanggung jawab terhadap efek pemanasan dan elektro-mekanis. Kuadrat impuls menentukan tingginya pemanasan dan tekanan elektrodinamis pada konduktor yang dialiri arus petir. Besarnya energi pemanasan dapat ditunjukkan pada persamaan berikut: (Dehn+Söhne, 2007:21)

$$E = \int_0^t i^2 dt \quad (2-7)$$

$$E = \frac{W}{R} \quad (2-8)$$

Sehingga,

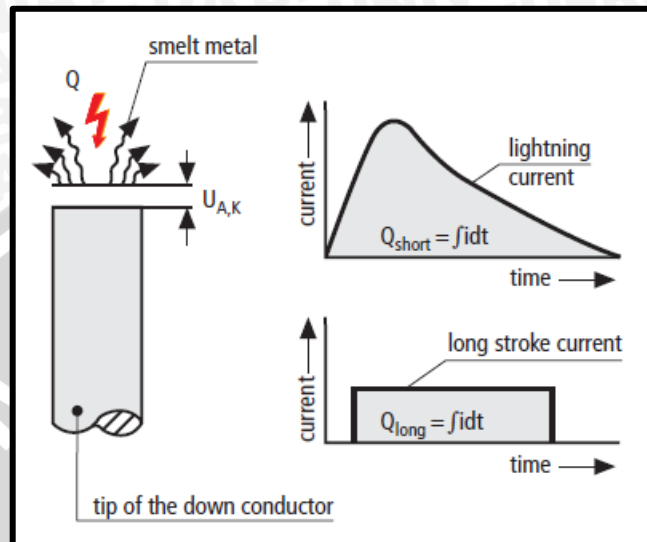
$$\frac{W}{R} = \int_0^t i^2 dt \quad (2-9)$$

Dengan :

W : Energi pemanasan (joule)

I : Arus petir (kA)

R : Tahanan pada konduktor (Ω)



Gambar 2.5 Energi W dalam Titik Sambaran Arus Petir

Sumber : Dehn+Söhne, 2007:20

Penentuan dimensi penangkal petir dapat menggunakan perhitungan Berger mengenai nilai kuadrat impuls yang ditunjukkan pada Tabel 2.3.

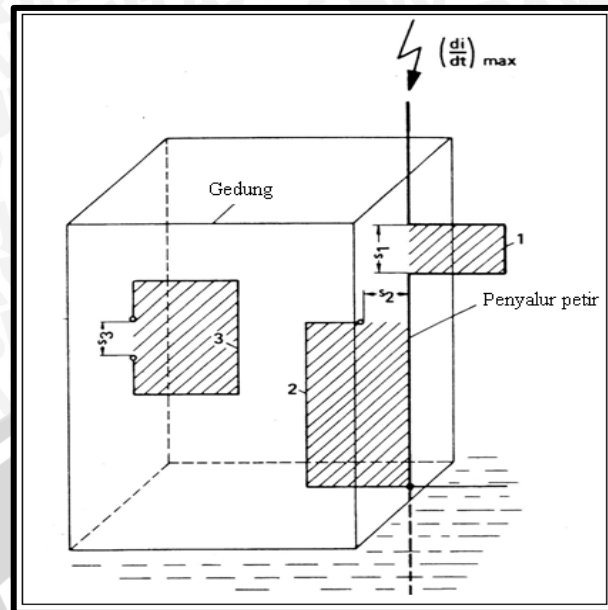
Tabel 2.3 Nilai Kuadrat Impuls Menurut Perhitungan Berger

Tingkat proteksi	Nilai batas kuadrat arus impuls (A^2s atau J/Ω)	Probabilitas dilampauinya nilai batas muatan arus (%)	
		Petir negatif	Petir positif
Normal	10^6	± 2	-
Tinggi	$10 \cdot 10^6$	-	± 10
Sangat tinggi	$100 \cdot 10^6$	-	± 1

Sumber : Vernon Cooray, 2010:50

2.4.4. Kecuraman Arus Petir

Kecuraman arus petir maksimum menyebabkan timbulnya induksi elektromagnetik pada loop yang terdapat di dalam suatu instalasi atau konstruksi yang tertutup atau yang terletak di dekat konduktor yang dialiri arus. Loop yang terbentuk dapat diamati pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Kecuraman maksimum arus petir (di/dt)

Sumber : Peter Hasse, 2008:50

Pengaruh parameter ini dapat menyebabkan adanya tegangan induksi elektromagnetik pada benda logam di dekat instalasi proteksi petir. Besarnya tegangan induksi yang timbul dapat dinyatakan dalam persamaan berikut: (Peter Hasse, 2008:49)

$$U_m = M \left(\frac{di}{dt} \right) \quad (2-10)$$

Dengan:

U_m : Tegangan Induksi (V)

M : Induktansi pada loop (H)

di/dt : Kenaikan arus (A/s)

Nilai tertinggi parameter ini terjadi pada sambaran positif. Efek merusak yang ditimbulkan tegangan induksi, berkaitan dengan kecuraman muka kurva arus petir. Untuk kepentingan perancangan penting diketahui batas nilai kecuraman arus seperti dalam perhitungan Berger yang ditunjukkan pada Tabel 2.4.

2.5. Kerapatan Sambaran Petir dan Hari Guruh

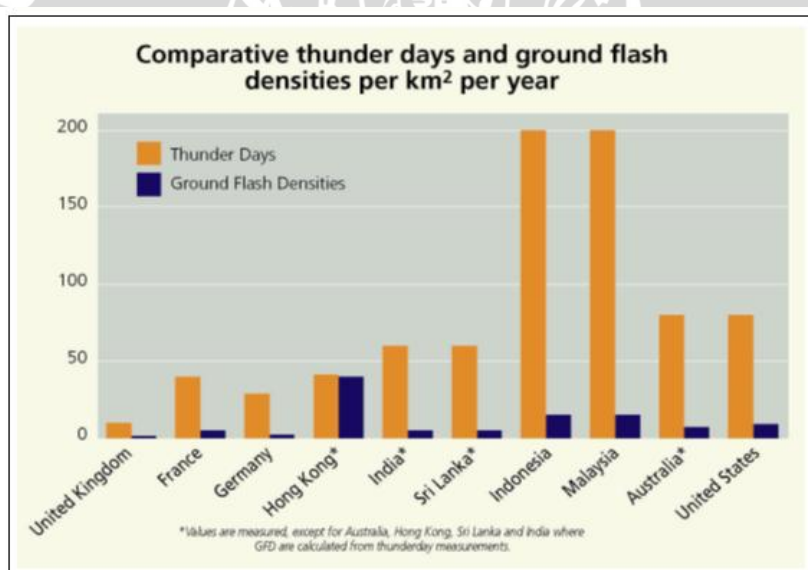
Kerapatan sambaran petir didefinisikan sebagai jumlah sambaran petir pada suatu daerah dalam satu tahun. Kerapatan sambaran petir (N_g) suatu wilayah dapat diestimasi dengan menghitung jumlah sambaran petir pada wilayah

tersebut melalui satelit ataupun alat penghitung sambaran petir. Sedangkan hari guruh adalah banyaknya hari di mana terdengar guruh setidaknya satu kali dalam waktu 24 jam. Data hari guruh tidak mencakup data mengenai jumlah sambaran petir dalam satu hari. Perbandingan data hari guruh dan kerapatan sambaran petir di dunia ditunjukkan pada Gambar 2.7.

Tabel 2.4 Nilai Batas Kecuraman Arus Petir Menurut Perhitungan Berger

Tingkat proteksi	Nilai batas kecuraman arus (A/s)	Probabilitas dilampauinya nilai batas muatan arus (%)	
		Petir negatif	Petir positif
Normal	$60 \cdot 10^9$	± 2	-
Tinggi	$80 \cdot 10^9$	$\pm 0,5$	± 10
Sangat tinggi	$100 \cdot 10^9$	$\pm 0,1$	± 1

Sumber: Vernon Cooray, 2010: 51



Gambar 2.7 Perbandingan Hari Guruh dan Kerapatan Sambaran Petir per km² per tahun di Beberapa Belahan Dunia

Sumber: Reynaldo Zoro, 2011:12

Indonesia adalah kontinen maritim yang terletak di sekitar daerah khatulistiwa dengan hari guruh yang cukup tinggi di dunia, yaitu dengan aktivitas 25 sampai 200 hari guruh pertahun. Ini berarti tingkat sambaran petirnya sangat tinggi, baik frekuensi maupun intensitas arus sambarannya. Informasi kejadian

petir di Indonesia dapat diperoleh dari Jaringan Deteksi Petir Nasional (JADPEN) maupun dari stasiun BMG yang menggunakan sistem deteksi petir real time.

Bagaimanapun juga, kerapatan sambaran petir dapat dihitung menggunakan data hari guruh sebagai berikut: (SNI 03-7015-2004:8)

$$N_g = aT_d^b \text{ sambaran/km}^2 \text{ tahun} \quad (2-11)$$

Dengan T_d adalah jumlah hari guruh. Nilai a dan b berbeda-beda sesuai dengan studi yang banyak dilakukan oleh para ilmuwan. Tetapi menurut SNI 03-7015-2004 nilai a dan b adalah 0,04 dan 1,25. Sehingga dengan memasukkan nilai a dan b pada persamaan (2-11) didapatkan persamaan berikut: (SNI 03-7015-2004:8)

$$N_g = 0,04T_d^{1,25} \text{ sambaran/km}^2 \text{ tahun} \quad (2-12)$$

2.6. Sistem Proteksi Petir

Timbulnya kerusakan akibat sambaran petir, maka munculah berbagai usaha untuk mengatasi bahaya yang diakibatkan sambaran petir. Sistem proteksi yang harus diterapkan bertujuan untuk melindungi bangunan dari sambaran langsung maupun sambaran tidak langsung. Mengacu pada IEC TC 81/1989 tentang konsep Lightning Protection Zone (LPZ), sistem proteksi petir yang sempurna terdiri dari tiga (3) bagian yang ditunjukkan pada Gambar 2.8, yaitu:

- Proteksi Eksternal, yaitu instalasi dan alat-alat di luar sebuah struktur untuk menangkap dan menghantarkan arus petir ke sistem pentanahan, atau berfungsi sebagai ujung tombak penangkap arus petir di tempat tertinggi. Proteksi eksternal yang baik terdiri dari terminasi udara (*finial*), penghantar penyalur (*down conductor*) dan ekuipotensial.
- Proteksi Pentanahan, merupakan bagian terpenting dalam instalasi sistem proteksi petir. Kesulitan dari sistem pentanahan biasanya disebabkan berbagai macam jenis tanah. Hal ini dapat di atasi dengan perencanaan dan teknik penerapan yang tepat, serta menghubungkan semua ekuipotensial dengan sistem penatanahan sesuai dengan IEC TC 81.
- Proteksi Internal, merupakan proteksi peralatan elektronik terhadap efek dari arus petir. Terutama efek medan magnet dan medan listrik

pada instalasi metal atau sistem listrik. Sesuai dengan standar DIV VDE 0185, IEC 1024-1. Proteksi internal terdiri atas pencegahan terhadap dampak sambaran langsung, pencegahan terhadap sambaran tidak langsung, dan ekuiopotensial.



Gambar 2.8. Sistem Proteksi Petir

Sumber : <http://ngelmuelektro.wordpress.com/>

Salah satu sistem pengaman yang dibutuhkan oleh suatu bangunan atau gedung adalah sistem proteksi petir. Suatu instalasi proteksi petir harus dapat melindungi semua bagian dari bangunan, termasuk manusia dan peralatan yang ada di dalamnya terhadap bahaya dan kerusakan akibat sambaran petir. Maka berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir bangunan yang membutuhkan proteksi adalah:

- Bangunan tinggi seperti gedung bertingkat, menara, dan cerobong pabrik.
- Bangunan tempat penyimpanan bahan yang mudah terbakar atau meledak seperti pabrik amunisi atau gudang penyimpanan bahan peledak.
- Bangunan sara umum, seperti sekolah, gedung bertingkat pusat perbelanjaan, gedung pemerintahan.

2.7. Tingkat Proteksi Petir

Besarnya kebutuhan suatu bangunan akan suatu instalasi proteksi petir ditentukan oleh besarnya kemungkinan kerusakan serta bahaya yang terjadi jika bangunan tersebut terkena sambaran petir. Berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP) besarnya kebutuhan tersebut ditentukan berdasarkan penjumlahan indeks-indeks tertentu yang mewakili keadaan bangunan di suatu lokasi dan dirumuskan sebagai: (Emy Hosea, 2004:1)

$$R = A + B + C + D + E \quad (2-13)$$

Besarnya nilai indeks A, B, C, D, dan E di atas diperoleh dari tabel-tabel yang terdapat pada lampiran nantinya. Dari persamaan (2-13) terlihat bahwa semakin besar nilai indeks maka semakin besar pula resiko (R) suatu bangunan sehingga semakin besar kebutuhan suatu bangunan akan adanya sistem proteksi petir.

Untuk keperluan perhitungan yang lebih terperinci maka dapat digunakan standar IEC 1024-1-1. Berdasarkan standar ini, pemilihan tingkat proteksi yang memadai untuk suatu sistem proteksi petir didasarkan pada frekuensi sambaran petir langsung setempat (N_d) yang diperkirakan untuk struktur yang diproteksi dan frekuensi sambaran petir tahunan setempat (N_e) yang diperbolehkan. Kerapatan sambaran petir ke tanah rata-rata tahunan di daerah suatu struktur berada telah dinyatakan sebagai berikut (SNI 03-7015-2004:8)

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_d \cdot 10^6 \text{ per tahun} \quad (2-14)$$

Dengan:

A_e : Luas daerah proteksi efektif pada gedung (m^2)

N_g : Kerapatan sambaran petir pada gedung (sambaran/ km^2 tahun)

C_d : Faktor *site*

Besarnya nilai C_d ditentukan sesuai dengan Tabel 2.5, sedangkan nilai A_e dapat dihitung secara grafis maupun secara matematis. Luas daerah proteksi efektif pada gedung yang seragam ditunjukkan pada Gambar 2.9. Sedangkan perhitungan nilai A_e untuk gedung yang berbentuk seragam dapat dilakukan melalui persamaan berikut: (SNI 03-7015-2004:12)

$$A_e = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \quad (2-15)$$

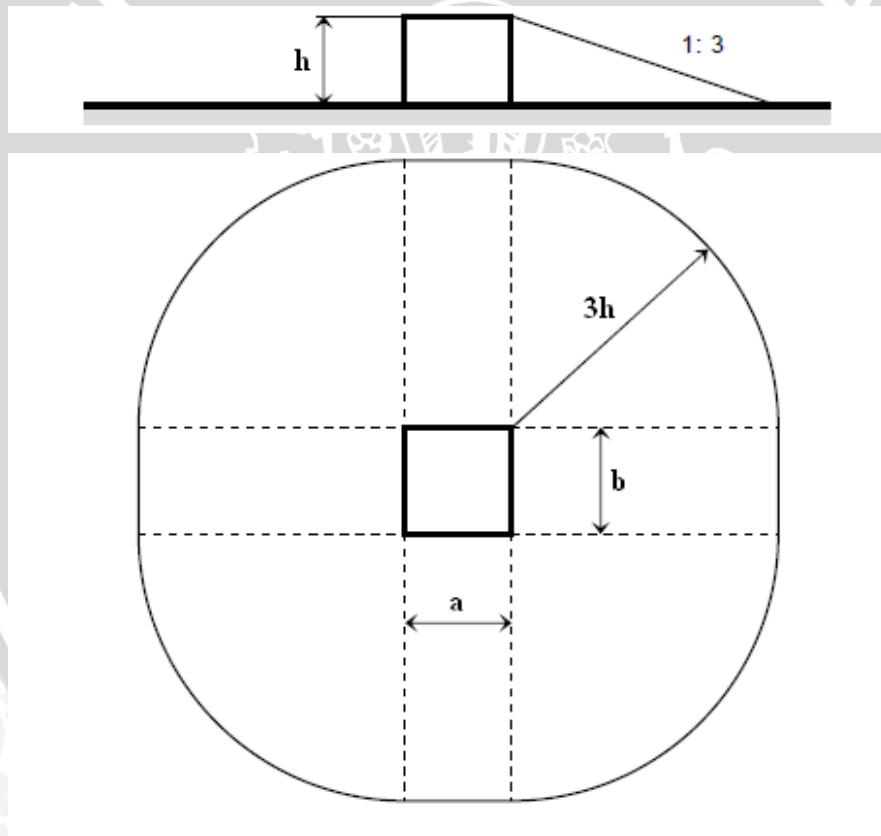
Dengan:

- a : panjang atap gedung (meter)
- b : Lebar atap gedung (meter)
- h : Tinggi gedung (meter) pada tanah datar

Tabel 2.5 Faktor Site (C_d)

Wilayah di Sekitar Gedung	C_d
Objek dikelilingi oleh objek yang lebih tinggi atau pepohonan	0,25
Objek dikelilingi oleh objek lain atau pepohonan yang sama tinggi atau lebih rendah	0,5
Objek yang berdiri bebas : tidak terdapat objek lain didekatnya ($\approx 3h$)	1
Objek yang berdiri bebas di atas pegunungan atau perbukitan	2

Sumber : Dehn+Söhne, 2007:31



Gamabr 2.9 Luas Daerah Proteksi (A_e) pada Gedung yang Seragam

Sumber : SNI 03-7015-2004:12

Sedangkan untuk bangunan yang berbentuk kompleks seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, maka metode grafis harus digunakan untuk menentukan nilai A_e , karena akan terdapat perbedaan yang cukup besar jika nilai

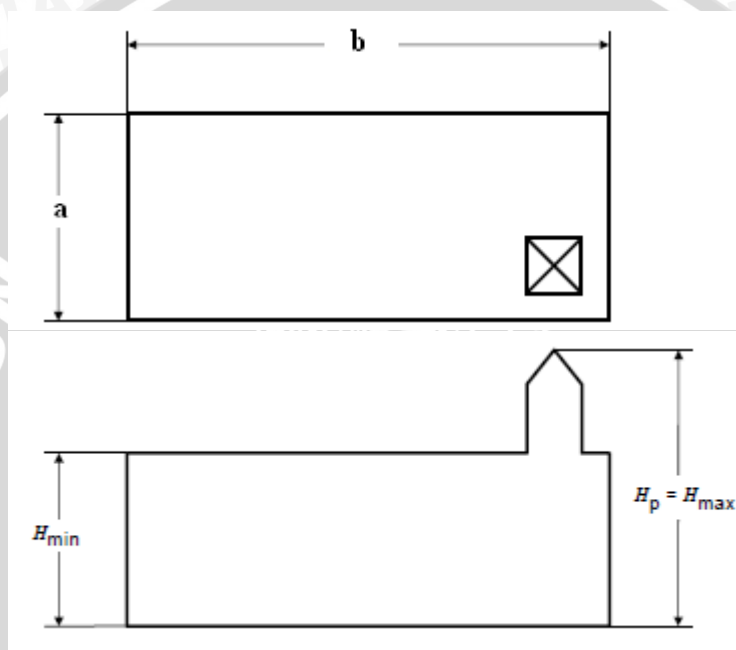
A_e pada ketinggian maksimum dan A_e pada ketinggian minimum digunakan. Sebuah persamaan dapat digunakan untuk mendapatkan nilai yang mendekati antara nilai A_{emin} dan A_{emax} , sebagaimana berikut: (IEC 62305-2,2006:89)

$$A_e' = 9\pi(H_p)^2 \quad (2-16)$$

Dengan:

A_e' : Luas daerah ekuivalen rata-rata (m^2)

H_p : Tinggi gedung maksimum (meter)



Gambar 2.10 Luas Daerah Proteksi (A_e) pada Gedung yang Seragam

Sumber : IEC 62305-2, 2006:91

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

- Jika $N_d \leq N_c$ maka tidak dibutuhkan sistem proteksi petir.
- Jika $N_d > N_c$ maka diperlukan sistem proteksi dengan efisiensi yang ditunjukkan pada persamaan berikut: (SNI 03-7015-2004:12)

$$E \geq 1 - N_c/N_d \quad (2-17)$$

Sesuai dengan standar IEC, tingkat proteksi dibagi ke dalam empat tingkat yaitu tingkat I, II, III, dan IV yang ditunjukkan pada Tabel 2.5. Berdasarkan distribusi statistik dari arus puncak pertama *return stroke*, dapat diestimasikan bahwa tingkat proteksi I akan memproteksi 99% dari keseluruhan *ground flashes*

dan juga untuk tingkat proteksi IV akan memproteksi 84% dari keseluruhan *ground flashes*.

Tabel 2.6 Efisiensi Sistem Proteksi Petir

Tingkat Proteksi	Efisiensi SPP
I	0,99
II	0,97
III	0,91
IV	0,84

Sumber : Vernon Cooray, 2010:173

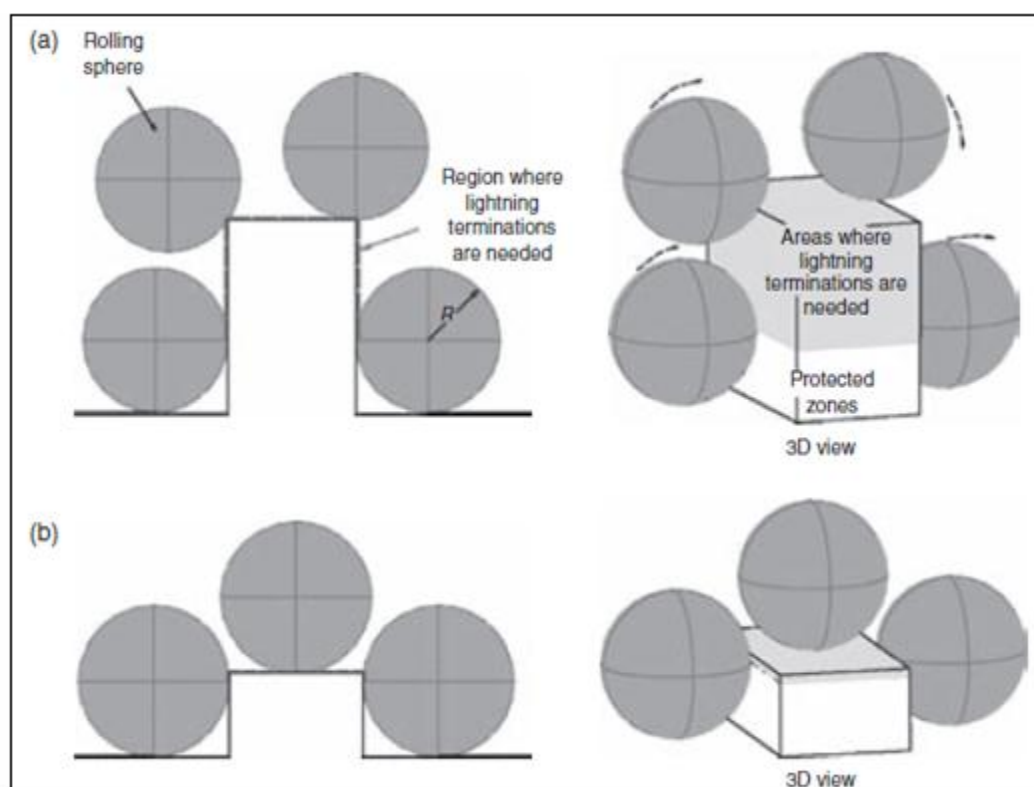
2.8. Metode Bola Gelinding (*Rolling Sphere Method*)

Konsep dari metode bola gelinding berawal dari model elektrogeometri yang didasarkan pada asumsi bahwa *stepped leader* telah mendekati nilai kritis jarak sambar sebelum mengenai bangunan. Konsep ini mengasumsikan bahwa terdapat daerah berbentuk bola, dengan besarnya jari-jari bola sama dengan jarak sambar dan terletak disekitar ujung dari *stepped leader*. Berdasarkan konsep ini sistem terminasi udara harus diletakkan sedemikian rupa sehingga ketika sebuah bola, dengan nilai radius yang telah ditentukan, digelindingkan pada gedung, tepi bola hanya menyentuh konduktor dari sistem proteksi petir yang terpasang. Contoh penerapan dari metode bola gelinding dapat ditunjukkan pada Gambar 2.11.

Pada gambar tersebut ditunjukkan bahwa suatu gedung yang menggunakan sistem proteksi melalui pendekatan metode bola gelinding, ketika bola dengan radius R digelindingkan pada permukaan bangunan, maka bola hanya boleh menyentuh siste proteksi eksternal gedung. Jika tinggi gedung melebihi radius bola, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.a maka sistem proteksi harus mampu melindungi sisi vertikal dinding gedung. Tetapi jika tinggi gedung tidak melebihi radius bola, seperti yang ditunjukkan gambar 2.11.b, maka perlindungan pada sisi vertikal gedung tidak diperlukan.

Jari-jari bola, yang diasumsikan sebagai jarak sambar, diasosiasikan sebagai arus puncak *return stroke* (I_{crit}). Untuk *stepped leader* dengan arus puncak *return stroke* yang lebih besar dari I_{crit} , maka dapat diasosiasikan menggunakan

bola dengan radius yang lebih besar, sehingga *stepped leader* ini tidak dapat memasuki sistem proteksi petir. Sebaliknya, *stepped leader* yang memiliki nilai arus puncak *return stroke* yang lebih kecil dari I_{crit} , akan diasosiasikan menggunakan bola dengan radius yang lebih kecil, sehingga *stepped leader* seperti ini dapat langsung menyambar sistem proteksi petir. Oleh karena itu, untuk mendapatkan sistem proteksi petir yang lebih sensitif terhadap sambaran petir, sebaiknya digunakan bola dengan radius yang lebih kecil dalam desain sistem proteksi petir.



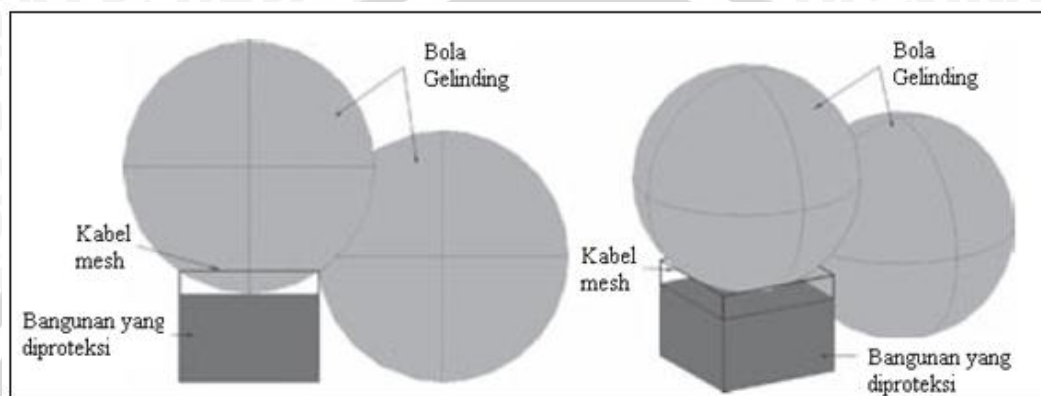
Gambar 2.12 Proteksi Gedung Menggunakan Metode Bola Gelinding

Sumber : Vernon Cooray. 2010:171

Seuai dengan standar proteksi petir menurut IEC, sistem proteksi petir tingkat I memiliki nilai arus puncak kritis *return stroke* sebesar 2,9 kA. Artinya, untuk nilai arus yang lebih besar dari 2,9 kA tidak akan dapat menyambar sistem proteksi yang terpasang. Begitu juga untuk tingkat II, III, dan IV yang memiliki nilai arus puncak kritis *return stroke* sebesar 5,4 kA; 10,1 kA; dan 15,7 kA.

Metode bola gelinding dapat dikombinasikan dengan metode mata jala (mesh) untuk menghasilkan proteksi yang lebih baik untuk melindungi gedung

dari sambaran petir. Metode bola gelinding memprediksi bahwa petir dapat menyambar gedung, jika *mesh* diletakkan langsung menempel pada struktur bangunan. Sehingga untuk menghindari kejadian tersebut, *mesh wire* diletakkan dengan jarak tertentu di atas struktur yang diproteksi, di mana besarnya jarak ini akan semakin kecil dengan semakin meningkatnya tingkat proteksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Peletakan Mesh pada Gedung yang Diproteksi Menggunakan Metode Bola Bergulir

Sumber : Vernon Cooray, 2010:171

2.9. Daerah Lindung

Daerah lindung ditentukan oleh jarak sambar yang terkait dengan nilai puncak arus petir. Jarak sambar adalah jarak sambaran petir terhadap suatu Objek. Hubungan antara jarak sambar dan arus puncak petir dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$h_B = 2I_m + 30(1 - e^{-\frac{I_m}{6,8}}) \quad (2-18)$$

Dengan :

h_B : jarak sambar (meter)

I_m : arus puncak petir (kA)

Hubungan ini memperlihatkan bahwa petir dengan arus puncak yang kecil memiliki jarak sambar yang pendek. Semakin tinggi suatu tingkat proteksi suatu sistem proteksi eksternal maka semakin kecil arus puncak petir yang harus diperhatikan. Hubungan tersebut dapat terlihat pada Tabel 2.7 dan 2.8.

Teori yang mendasari penentuan daerah lindung disebut teori elektro-geometri. Teori elektro-geometri adalah teori yang mengaitkan hubungan sifat listrik sambaran petir dengan geometri sistem penangkap petir. Seperti yang ditunjukkan Gambar 2.11, daerah lindung menurut teori elektro-geometri mirip dengan daerah lindung konvensional, yakni berbentuk kerucut, tetapi bidang miring dari kerucut tersebut melengkung dengan jari-jari sama dengan jarak sambar petir.

Tabel 2.7 Nilai Minimum Parameter Arus Petir dan Probabilitasnya

Tingkat Proteksi Petir	Nilai Minimum		
	Minimum Arus Puncak Petir	Probabilitas arus puncak petir melampaui nilai minimalnya	Jari-jari dari Bola Gelinding
I	3 kA	99 %	20 m
II	5 kA	97 %	30 m
III	10 kA	91 %	45 m
IV	16 kA	84 %	60 m

Sumber : Dehn+Söhne, 2007:23

Tabel 2.8 Nilai Maksimum Arus Petir dan Probabilitasnya

Tingkat Proteksi Petir	Nilai Maksimum	
	Maksimum Arus Puncak Petir	Probabilitas arus puncak petir kurang dari nilai maksimalnya
I	200 kA	99 %
II	150 kA	98 %
III	100 kA	97 %
IV	100 kA	97 %

Sumber : Dehn+Söhne, 2007:23

2.10. Sistem Proteksi Eksternal

Sistem proteksi suatu bangunan terhadap sambaran petir pada hakekatnya adalah suatu sistem yang direncanakan dan dilaksanakan dengan baik sehingga jika terjadi sambaran petir maka sarana ini yang akan menyalurkan arus petir ke

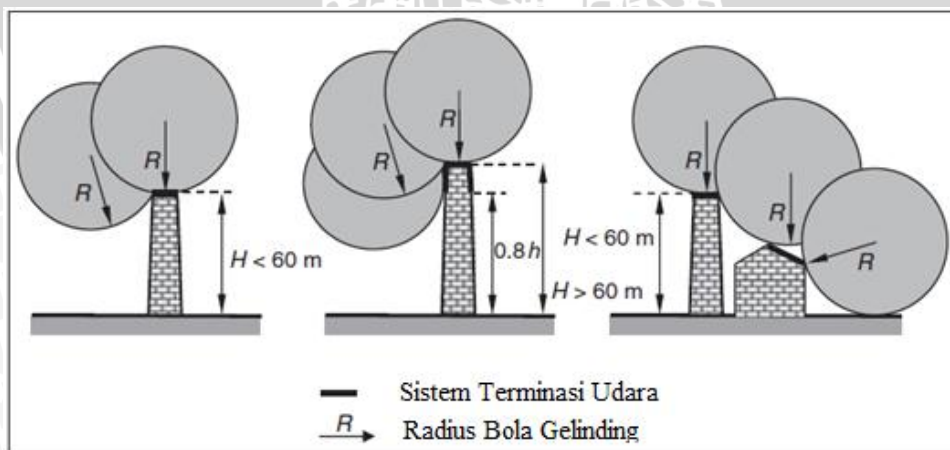
dalam tanah dengan aman tanpa menimbulkan bahaya bagi manusia atau benda berbahaya yang berada di sekitar bangunan. Instalasi sistem proteksi petir eksternal meliputi sistem terminasi udara (*air termination system*), sistem penghantar penyalur (*down conductor system*) dan sistem pembumian (*grounding system* atau *earth termination system*).

2.10.1. Sistem Terminasi Udara (Air Termination System)

Sistem terminasi udara adalah bagian pertama dari sistem proteksi petir eksternal yang bertujuan untuk menangkap petir. Sistem terminasi udara harus dipasang pada titik tertinggi dari suatu bangunan atau peralatan yang ingin dilindungi dari sambaran petir. *Finial* adalah penangkap petir berupa batang pendek yang dipasang pada atap bangunan. Dengan berkembangnya penelitian untuk mengatasi bahaya petir, maka peletakan finial ini dapat menggunakan beberapa pendekatan melalui metode-metode lain seperti metode bola gelinding.

(a) Peletakan Sistem Terminasi Udara pada Bangunan

Sistem terminasi udara dapat disusun dari kombinasi beberapa batang vertikal, *catenary wires*, dan konduktor horizontal atau *mesh*. Batang-batang konduktor ini saling dihubungkan di atap bangunan untuk memastikan adanya pembagian arus. Komponen terminasi udara yang dipasang pada sebuah bangunan dapat diletakkan pada ujung ataupun di beberapa tempat yang langsung terekspose, seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Desain Sistem Terminasi Udara Menggunakan Metode Bola Gelinding

Sumber : Vernon Cooray. 2010: 310

Pada bangunan tinggi, dengan tinggi bangunan lebih besar daripada radius bola ($H > R$). Setiap titik percabangan dari bangunan yang disentuh oleh bola gelinding memungkinkan untuk menjadi titik sambaran. Bagaimanapun juga, probabilitas sambaran petir biasanya diabaikan untuk bangunan yang tingginya kurang dari 60 meter.

(b) **Konstruksi Sistem Terminasi Udara**

Konstruksi sistem terminasi udara sangat ditentukan oleh parameter petir pada wilayah instalasi. Sistem terminasi udara berupa batang vertikal yang biasa disebut *franklin rod* atau *finial*, dapat dibuat dari berbagai macam logam. Setiap logam memiliki nilai karakteristik yang berhubungan dengan volume pelelehan logam tersebut yang ditunjukkan pada persamaan (2-6). Berikut ini merupakan tabel besaran material logam penyusun *finial*.

Tabel 2.9 Besaran material logam

Besaran	Alumunium	Besi	Tembaga
γ (kg/m ³)	2700	7700	8920
θ (°C)	658	1350	1080
c_s (J/kg)	$356 \cdot 10^3$	$272 \cdot 10^3$	$209 \cdot 10^3$
C_w (J/kg·K)	908	469	385

Sumber : G.F. Moore BSc, 1997: 80

Penentuan besarnya lubang akibat tekanan busur listrik pada suatu plat logam dapat dihitung menggunakan persamaan (R.Golde: 146)

$$\frac{A}{Q} = 25 \cdot S^{-k} \text{ (mm}^2/\text{As)} \quad (2-19)$$

Dengan :

A : luas lubang metal (mm²)

Q : muatan (As)

S : ketebalan plat (mm)

k : konstanta

Konstanta (k) bernilai 0,9 untuk $0 \leq S \leq 0,9$ mm dan bernilai 1,5 untuk $0,9 \leq S \leq 1,5$ mm.

2.10.2. Sistem Penghantar Penyalur (*Down Conductor*)

Sistem penghantar penyalur adalah bagian dari sistem proteksi eksternal yang menghantarkan arus petir dari sistem terminasi udara menuju sistem pembumian. Penghantar penyalur ini harus dipasang vertikal sehingga tercipta jarak terpendek antara ujung bangunan dengan bumi.

(a) Penempatan penghantar penyalur pada bangunan

Pemilihan jumlah dan penempatan penghantar penyalur harus mempertimbangkan fakta bahwa arus petir dapat terbagi dalam beberapa penghantar penyalur sehingga resiko sambaran samping (*side flashes*) dan gangguan elektromagnetik dapat berkurang. Penghantar penyalur seharusnya dipasang seragam dengan susunan simetris sepanjang keliling bangunan. Pembagian arus dapat ditingkatkan tidak hanya dengan menambah jumlah penghantar penyalur tetapi juga dengan menambahkan cincin interkoneksi ekuipotensial.

Pada penghantar penyalur merambat sepasang gelombang berjalan. Gelombang tegangan yang merambat pada penghantar merupakan fungsi jarak dan waktu, sehingga tegangan di suatu titik pada penghantar dapat bervariasi menurut waktu.

Sistem penghantar penyalur mengalirkan arus petir yang diterima oleh batang *finial*. Sesuai dengan analisis gelombang berjalan, maka arus yang mengalir pada penghantar dapat dihitung melalui persamaan berikut: (Hutauruk,1988:34)

$$i_t = 2 \left(1 - \frac{1}{n} \right) i_i \quad (2-20)$$

Dengan:

i_t : arus keluar

i_i ; arus masuk

n : jumlah penghantar

Jarak antar penghantar penyalur yang sesuai dengan ketentuan IEC 62305-3 ditunjukkan pada Tabel 2.10. Hubungan lateral setiap penghantar tidak hanya dipasang pada bagian atas maupun bawah bangunan saja, tetapi untuk setiap tinggi 10 - 20 meter harus dipasang penghubung lateral atarpenghantar sesuai dengan Tabel 2.10 berdasarkan IEC 62305-3.

Tabel 2.10 Nilai Jarak Tipikal Antar Penghantar Penyalur dan Antar Cincin
Penghantar Sesuai dengan Tingkat Proteksi

Tingkat proteksi	Minimum Jarak Tipikal (m)
I	10
II	10
III	15
IV	20

Sumber : Vernon Cooray. 2010:321

Sistem penghantar penyalur dapat langsung dipasang menempel pada struktur bangunan selama kenaikan temperatur yang terjadi pada setiap saluran tidak melebihi dari batas kenaikan temperatur seperti yang terdapat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Kenaikan Temperatur Maksimum Pada Beberapa Bahan Penghantar

q mm ²	Ø	Tingkat Proteksi Petir								
		Aluminium (K)			Besi (K)			Tembaga (K)		
		III+IV	II	I	III+IV	II	I	III+IV	II	I
16		146	454	*	1120	*	*	56	143	309
50	8 mm	12	28	52	37	96	211	5	12	22
78	10 mm	4	9	17	15	34	66	3	5	9

Sumber : Dehn + Sohne 2007:82

Jika dinding terbuat dari bahan yang dapat terbakar dan kenaikan suhu pada penghantar melebihi dari ketentuan yang telah diberikan pada IEC, maka dibutuhkan jarak antara pemasangan sistem penghantar penyalur dengan dinding lebih besar dari 0,1 meter. Pada praktisnya dipasaran, *clamp* yang digunakan unruk memasang penghantar penyalur rata-rata memiliki jarak 20 cm.

(b) Konstruksi sistem penghantar penyalur

Jika dimungkinkan, penghantar penyalur seharusnya dipasang pada setiap sudut terbuka pada gedung yang diproteksi. Penghantar penyalur harus dipasang lurus dan vertikal, sehingga terbentuk jalur terpendek dari sistem terminasi udara sampai sistem pembumian. Semakin pendek penghantar penyalur, maka semakin kecil pula nilai induktansinya.

Berikut ini merupakan tabel dimensi minimum penghantar penyalur menurut material penyusunnya.

Tabel 2.12 Dimensi Minimum Penghantar Penyalur

Material	Dimensi minimum (mm ²)
Tembaga (Cu)	16
Aluminium (Al)	25
Besi (Fe)	30

Sumber : SNI 03-7015-2004:31

Di dalam penentuan dimensi penghantar, juga perlu dipertimbangkan mengenai kenaikan temperatur yang terjadi. Pada Tabel 2.13 ditunjukkan pula parameter dari material penghantar penyalur yang digunakan sebagai variabel dalam persamaan 2-19. Kenaikan temperatur dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\int i^2 dt \alpha \rho}{q^2 \gamma c_w} - 1 \right] \quad (2-21)$$

Dengan :

- θ : Kenaikan temperatur (°K)
- α : Koefisien temperatur dari tahanan (1/°K)
- ρ : Resistivitas Spesifik (Ωm)
- q : luas penampang kabel (m²)
- γ : Kerapatan massa (kg/m³)
- c_w : Energi panas spesifik (J/kg·K)

Tabel 2.13 Material Logam Penghantar

Besaran	Aluminium	Besi	Tembaga
α (1/°K)	$4 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^3$
ρ (Ωm)	$2,9 \cdot 10^{-8}$	$12 \cdot 10^{-8}$	$3,92 \cdot 10^{-8}$
γ (kg/m ³)	2700	7700	8920
c_w (J/kg·K)	908	469	385

Sumber : G.F. Moore BSc, 1997: 80

2.10.3. Sistem Pembumian (*Grounding System*)

Sistem pembumian adalah bagian dari sistem proteksi eksternal yang berfungsi untuk mengalirkan arus petir ke tanah. Selain itu terdapat beberapa fungsi lain yaitu untuk mendisipasi energi petir ke dalam tanah, jalur resistansi rendah ke tanah, memberikan jalur pada arus gangguan, mengurangi noise dalam rangkaian sinyal dan rangkaian kontrol, dan sebagai potensial acuan. Ujung penghantar penyalur dihubungkan dengan tahanan pembumian. Untuk mendapatkan tahanan pembumian yang kecil, diperlukan elektroda pembumian. Prinsip dasar untuk memperoleh tahanan pembumian yang kecil adalah dengan membuat permukaan elektroda bersentuhan dengan tanah sebesar mungkin. Sesuai dengan persamaan

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2-22)$$

Dengan :

R : resistansi pembumian (Ω)

ρ : tahanan jenis tanah (Ωm)

L : panjang lintasan arus di tanah (m)

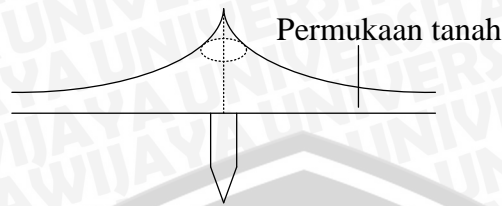
A : luas penampang lintasan arus di tanah (m^2)

Pada awalnya sistem pembumian dilakukan dengan melakukan pemasangan batang-batang elektroda pembumian yang ditanam secara tegak lurus dalam tanah. Jika tahanan pembumian masih terlalu tinggi, maka perlu adanya penambahan elektroda pembumian yang berfungsi untuk menurunkan tahanannya. Cara yang dilakukan dengan menanam batang-batang elektroda tegak lurus kedalam tanah ini lazim disebut pembumian batang atau pembumian rod.

(a) Pembumian Batang Vertikal

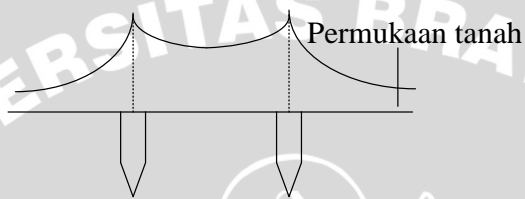
Tujuan dari pembumian batang vertikal adalah untuk memperoleh tahanan tanah yang rendah sehingga dapat memungkinkan arus gangguan yang terjadi dengan cepat dapat terdistribusi ke tanah. Jika dengan 1 batang elektroda pembumian vertikal masih diperoleh tahanan tanah yang tinggi maka dapat dilakukan dengan cara menggunakan beberapa batang elektroda pembumian vertikal sehingga diperoleh tahanan tanah yang rendah dan diharapkan distribusi tegangan yang terjadi lebih merata. Namun untuk areal pembumian yang luas dan

mempunyai tahanan jenis tanah yang besar maka penanaman elektroda dengan beberapa batang vertikal perlu dikaji karena dari segi ekonomis kurang efisien.



Gambar 2.15 Distribusi Tegangan Sekitar Satu Batang Elektroda

Sumber: <http://ngelmuelektro.wordpress.com/>



Gambar 2.16 Distribusi Tegangan Sekitar Dua Batang Elektroda

Sumber: <http://ngelmuelektro.wordpress.com/>

Pada Gambar 2.15 dan 2.16 di atas diperlihatkan distribusi tegangan yang terjadi untuk satu batang elektroda dan dua batang elektroda yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah, di mana arus kesalahan mengalir dari elektroda tersebut ke tanah sekitarnya.

Dengan demikian untuk jumlah elektroda yang lebih banyak yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah maka tahanan pentanahan semakin kecil dan distribusi tegangan akan lebih merata.

(b) Tahanan Jenis Tanah

Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung dari beberapa faktor, yaitu :

- Jenis tanah : tanah liat, barpasir, barbatu dan lain-lain.
- Lapisan tanah : berlapis-lapis dengan tahanan jenis berlainan atau uniform.
- Kelembaban tanah
- Temperatur

Tahanan jenis tanah bervariasi dari 500 sampai 50.000 Ohm per cm^3 . kadang-kadang harga ini dinyatakan dalam Ohm-cm. Pernyataan Ohm-cm

merepresentasikan tahanan antara dua permukaan yang berlawanan dari suatu volume tanah yang berisi 1 cm^3 .

Harga tahanan jenis tanah pada kedalaman yang terbatas sangat bergantung dengan keadaan cuaca. Untuk mendapatkan tahanan jenis tanah rata-rata untuk keperluan perencanaan maka diperlukan penyelidikan atau pengukuran dalam jangka waktu tertentu misalnya selama satu tahun. Biasanya tahanan tanah juga tergantung dari tingginya permukaan tanah dari permukaan air yang konstan.

Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim, pembumian dapat dilakukan dengan menanamkan elektroda pembumian sampai mencapai kedalaman dimana terdapat air tanah yang konstan. Pada sistem pembumian yang tidak mungkin atau tidak perlu untuk ditanam lebih dalam sehingga mencapai air tanah yang konstan, variasi tahanan jenis tanah sangat besar.

Beberapa tahanan jenis dari berbagai unsur tanah ditunjukkan pada Tabel 2.14 di bawah ini :

Tabel 2.14 Harga Tahanan Jenis Beberapa Unsur Tanah

Jenis Tanah	Tahanan Jenis ($\Omega \cdot \text{cm}$)
Tanah liat, tanah kebun	500-5.000
Tanah Liat	800-5.000
Campuran tanah liat, pasir dan kerikil	4.000-25.000
Pasir dan kerikil	6.000-10.000
Batu tulis, pasir berbatu, dll	1.000-50.000
Batu Karang	20.000-1.000.000

Sumber: Tagg, G.F., 1964: 4

Tahanan pembumian atau resistansi pembumian dari satu batang elektroda dapat dihitung melalui persamaan:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (2-23)$$

Dengan:

R : tahanan pembumian satu batang elektroda (Ω)

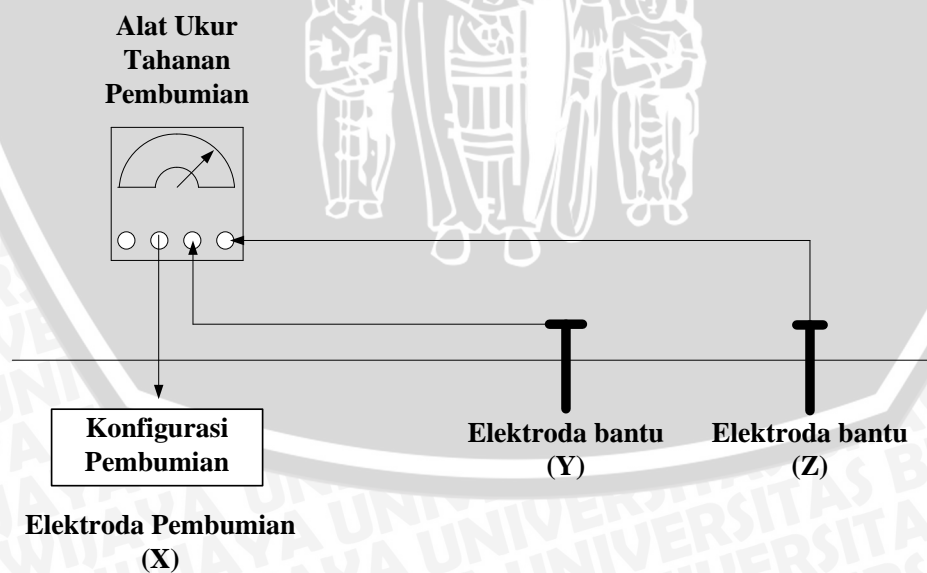
- ρ : tahanan jenis tanah (Ωm)
 L : panjang elektroda pbumian (m)
 a : jari-jari elektroda pbumian (m)

(c) **Pengukuran Tahanan Sistem Pbumian**

Resistansi pbumian biasanya diasumsikan sebagai resistansi rod pbumian, yaitu resistansi ohmik antara sebuah elektrode pbumian dan sebuah elektrode acuan (sebagai elektrode bantu) yang dibumikan dan ditempatkan pada jarak yang jauh dari sistem pbumian yang diuji. Jarak yang jauh ini dimaksudkan agar tidak terjadi interaksi antara kedua elektrode tersebut.

Dalam praktek pengukuran resistansi pbumian diukur antara dua titik, yaitu rod dibawah pengujian dan elektroda bantu yang dihubungkan dengan terminal Y dari tester pbumian seperti terlihat pada Gambar 2.17. Metode pengukuran ini diacu sebagai metode jatuh tegangan. Agar hubungan dengan bumi terbentuk, dua elektroda bantu (elektroda arus Z dan elektroda tegangan Y) yang ditanam di tanah dibuat segaris.

Sebuah generator arus mensuplai arus konstan antara rod yang diuji dan elektroda bantu Z. Pengukuran jatuh tegangan antara rod yang diuji dan elektroda Y dilakukan selangkah demi selangkah bergerak dari elektroda yang diuji ke arah elektroda Z.



Gambar 2.17 Prinsip Pengukuran Resistansi Pbumian

Sumber : Instruction Manual "Analogue Earth Tester" Model 4102