

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Landasan Teori

1. Sistem Perlindungan Gardu Induk

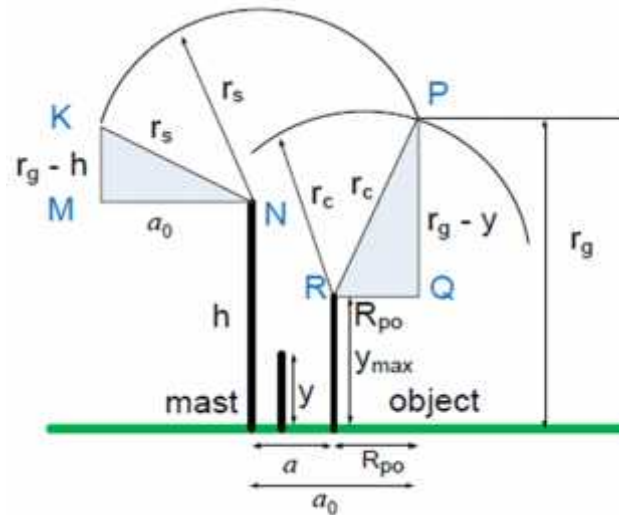
Sambaran petir pada gardu induk bisa menyebabkan kerusakan pada peralatan, hal ini akan mengakibatkan proses penyaluran daya terganggu bahkan menimbulkan dampak yang lebih besar yaitu terhentinya proses sistem tenaga listrik dalam waktu yang lama. Oleh sebab itu diperlukan sistem perlindungan menggunakan *shielding* tiang penangkal dan kawat pada gardu induk. Adapun tujuan dari sistem perlindungan menggunakan *shielding* tiang penangkal dan kawat ini adalah^[1] :

1. Kawat dan tiang penangkal berfungsi untuk menerima dan menarik sambaran petir.
2. Mengalirkan arus gangguan ke dalam tanah baik arus gangguan yang berasal dari surja hubung maupun surja petir.
3. Melindungi peralatan dari sambaran petir sehingga menjaga kinerja peralatan pada sistem energi listrik berjalan dengan baik.

2. Jarak Sambaran (*Striking Distance*)

Perlindungan gardu induk dari sambaran petir perlu mempertimbangkan tiga proses jarak sambaran (*striking distance*) seperti pada (gambar 2.1). Jarak

sambaran terhadap tiang yang merupakan r_s , jarak sambaran dengan objek yang dilindungi adalah r_c , dan jarak sambaran ke *ground* yaitu r_g . Petir akan menyambar ke tiang, objek yang dilindungi dan *ground* karena itu semua merupakan daerah jarak sambaran.



Gambar 2.1 Proses *Striking Distance*^[2]

Persamaan untuk ketiga jarak sambaran itu adalah sebagai berikut^[2] :

$$r_g = A I^b \quad (1)$$

$$r_s = \gamma_s r_g \quad (2)$$

$$r_c = \gamma_c r_g \quad (3)$$

Dimana :

A : Nilai konstanta persamaan pada model *electrogeometric*

I : Arus desain sambaran petir (kA)

b : Nilai konstanta pangkat arus desain pada model *electrogeometric*

γ_s : Nilai koefisien yang didapatkan dari jarak sambaran ke tiang penangkal

γ_c : Nilai koefisien yang didapatkan dari jarak sambaran ke objek

r_g : Jarak sambaran ke tanah (m)

r_s : Jarak sambaran ke tiang penangkal (m)

r_c : Jarak sambaran ke objek yang dilindungi (m)

3. Model *Electrogeometric*

Model *electrogeometric* adalah metode dengan memanfaatkan nilai jarak sambaran ke *ground* yang merupakan nilai batas maksimum dari ketinggian tiang dan kawat yang digunakan untuk melindungi peralatan yang ada di gardu induk. Sehingga nilai dalam beberapa model tergantung pada ketinggian peralatan sebagai objek yang dilindungi. Pada model *electrogeometric* terdapat parameter A, b, γ_c dan γ_s memiliki nilai yang berbeda pada masing-masing persamaan yaitu Young, Brown-Whitehead-CIGRE, IEEE-1992-IEEE T&D Committee dan IEEE-1995-IEEE Substation Committee Equations.

Persamaan dari model *electrogeometric* untuk menentukan nilai jarak sambaran ke *ground* ditunjukkan sebagai berikut^[3] :

a. Persamaan Young's^[3]

$$r_g = 27 I^{0.32} \quad (4)$$

$$\gamma_s = \frac{444}{462-h} \quad \text{untuk } h < 18\text{m} \quad \text{selain itu } \gamma_s = 1$$

$$\gamma_c = \frac{444}{462-h} \quad \text{untuk } y < 18\text{m} \quad \text{selain itu } \gamma_c = 1$$

b. Persamaan Brown-Whitehead-CIGRE

$$r_g = 6.4 I^{0.75} \quad (5)$$

$$\gamma_s = \frac{h-18}{108} \quad \text{untuk } h \leq 18\text{m} \quad \text{selain itu } \gamma_s = 1$$

$$\gamma_c = \frac{y-18}{108} \quad \text{untuk } y \leq 18\text{m} \quad \text{selain itu } \gamma_c = 1$$

c. Persamaan IEEE-1992-IEEE T&D Committee

$$r_g = 9.0 I^{0.65} \quad (6)$$

$$\gamma_s = \frac{1}{0.36+0.17 \ln(43-h)} \quad \text{untuk } h \leq 18\text{m} \quad \text{selain itu } \gamma_s = 1$$

$$\gamma_c = \frac{1}{0.36+0.17 \ln(43-y)} \quad \text{untuk } y \leq 18\text{m} \quad \text{selain itu } \gamma_c = 1$$

d. Persamaan IEEE-1995-IEEE Substation Committee Equations

$$r_g = 8.0 k I^{0.65} \quad (7)$$

$$\gamma_c = \gamma_s = 1$$

$k = 1$ untuk jarak sambaran ke kawat

$k = 1,2$ untuk jarak sambaran ke tiang penangkal

4. *Shielding* Pada Gardu Induk

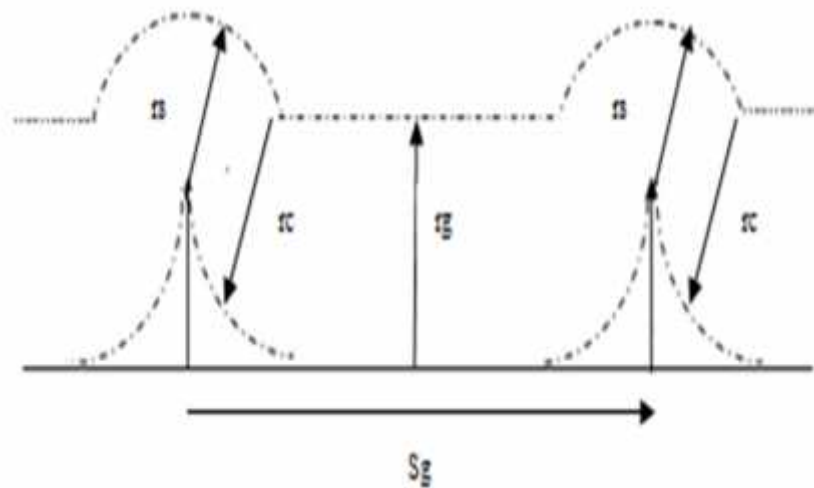
Desain dasar *shielding* untuk gardu induk sedikit berbeda dengan saluran transmisi. Desain didasarkan pada arus desain (I_d). Untuk pemilihan arus desain dapat dilihat pada (tabel 2.1).

Tabel 2.1. Nilai Arus Desain *Shielding* Pada Gardu Induk^[4]

Tegangan Nominal Sistem (kV)	I_c (kA)	I_d (kA)
34,5	1	3 6
69	2	3 3
115	3	5 4
138	3	5 4
230	5	8 7
345	6	10 8
500	10	16 13
765	12	20 16

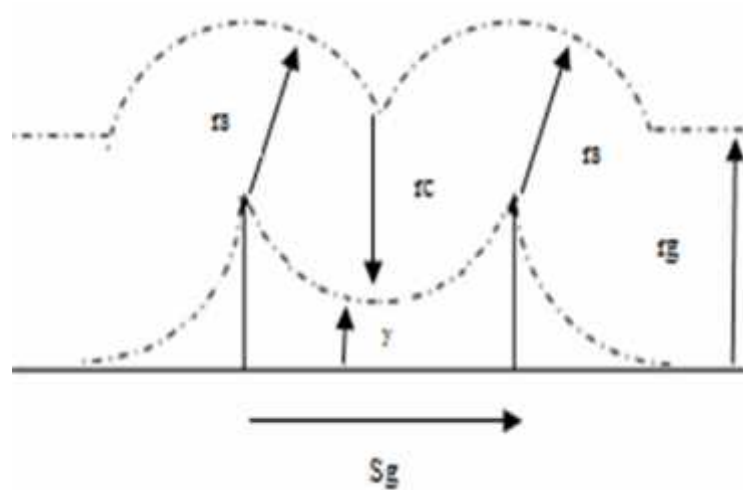
5. *Shielding* Gardu Induk Dengan Kawat

Pada (gambar 2.2) memperlihatkan daerah ketika kawat pelindung diletakkan jauh dari kawat yang lain. Gambar sebuah setengah lingkaran yang mengambil kawat pelindung sebagai titik tengah di atas kawat tanah dengan jari-jari r_s sampai pada ketinggian jarak sambaran ke *ground* r_g . Setelah mendapatkan titik potong antara r_g dan r_s , gambar busur dengan mengambil titik potong tersebut sebagai titik lingkaran. Gambar busur dari kawat tanah sampai *ground*, dan objek yang terdapat di bawah daerah tersebut adalah objek yang terlindungi^[4].



Gambar 2.2 Daerah Perlindungan Tanpa Kawat

Pada (gambar 2.3) kawat pelindung diletakkan lebih dekat dengan kawat pelindung yang lain. Kedua busur dari kawat tanah bertemu pada sebuah titik di atas jarak sambaran ke *ground*. Sehingga daerah perlindungan digambarkan dengan sebuah busur yang diambil dari titik pertemuan antara kedua busur dari kawat tersebut.



Gambar 2.3 Daerah Perlindungan Menggunakan Kawat Pelindung

6. *Shielding* Gardu Induk Dengan Tiang Penangkal

Sistem perlindungan menggunakan arrester dapat melindungi gardu induk yang disebabkan oleh sambaran petir sepanjang saluran transmisi. Namun, untuk melindungi peralatan dari sambaran petir langsung, sistem perlindungan harus dirancang menggunakan tiang penangkal. Perlu diperhatikan bahwa jumlah tiang yang digunakan harus sesuai dengan ukuran gardu induk. Hal ini untuk memastikan ketinggian minimum dari tiang penangkal yang digunakan.

a. *Shielding* Satu Tiang Penangkal

Daerah perlindungan dari satu tiang penangkal ditunjukkan pada (gambar 2.3) bahwa ada objek dari ketinggian y , dan objek dimaksudkan untuk dilindungi oleh satu tiang penangkal. Dengan satu tiang penangkal menghasilkan daerah perlindungan dalam bentuk kerucut. Jika jarak dari tiang ke objek dan tinggi objek diketahui, maka h yaitu ketinggian tiang penangkal ditentukan dengan persamaan sebagai berikut ^[5]:

$$R_{po} = \sqrt{rc^2 - (rg - y)^2} \quad (8)$$

$$a_o = a + R_{po} \quad (9)$$

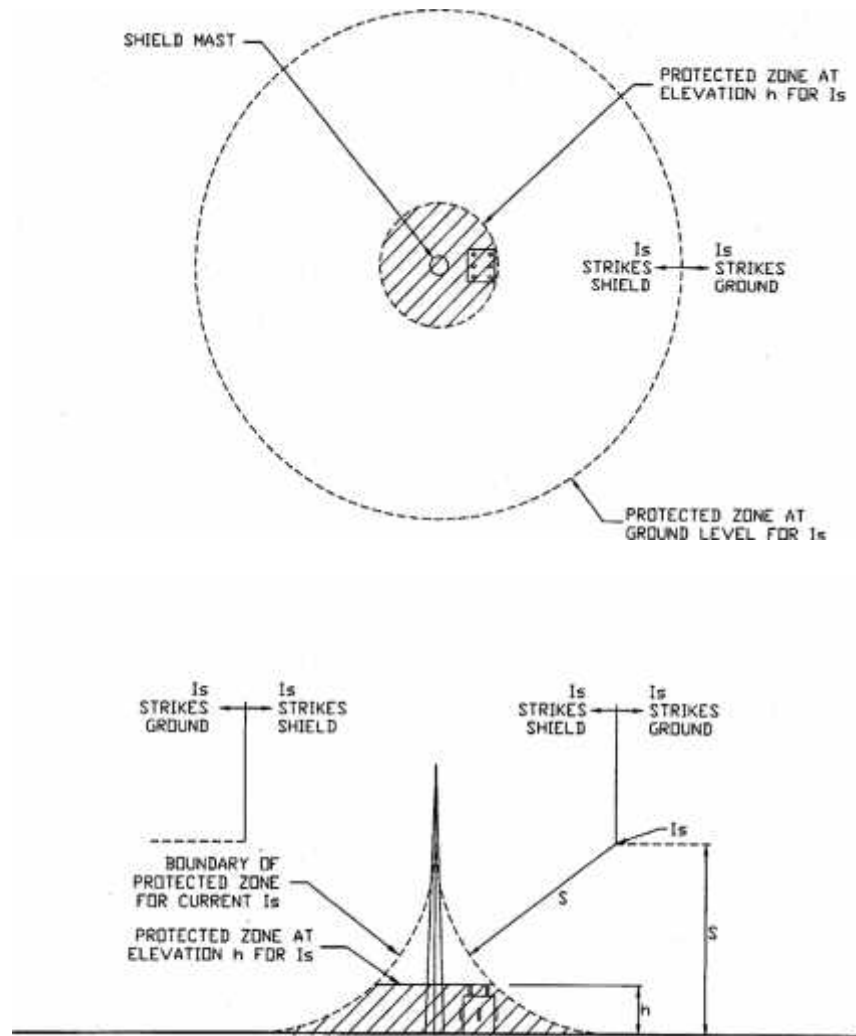
$$H = rg - \sqrt{rs^2 - a_o^2} \quad (10)$$

Dimana :

R_p : Jarak objek yang dilindungi ke titik sambaran objek (m)

a_o : Jarak tiang penangkal ke titik sambaran objek (m)

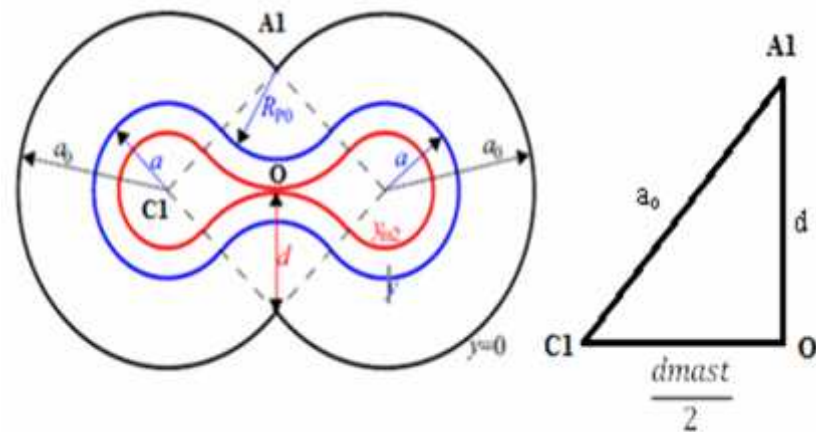
a : Jarak tiang penangkal ke objek yang dilindungi (m)



Gambar 2.4 Perlindungan Satu Tiang Penangkal^[5]

b. *Shielding* Dua Tiang Penangkal

Perlindungan dua tiang penangkal untuk melindungi objek dengan ketinggian y , maka daerah perlindungannya seperti pada (gambar 2.5). Perlindungan pada dua tiang lebih baik daripada satu tiang karena daerah perlindungan yang dihasilkan lebih luas pada objek yang dilindungi^[5].



Gambar 2.5 Perlindungan Dua Tiang Penangkal^[6]

Nilai yang harus dipertimbangkan adalah perlindungan dengan ketinggian minimum y_{m2} objek yang harus dilindungi oleh kedua tiang. Daerah yang berada di dalam garis putus-putus, merupakan daerah y_{m2} . Sehingga persamaannya sebagai berikut :

$$d = \sqrt{a_0^2 - \frac{dmast^2}{4}} \quad (11)$$

$$H = rg - \sqrt{rs^2 - \frac{dmast^2}{4} - d^2} \quad (12)$$

$$y_{m2} = rg - \sqrt{rc^2 - d^2} \quad (13)$$

Dimana :

d : Jarak titik tengah antara tiang penangkal ke jarak sambaran (m)

H : Tinggi tiang penangkal (m)

y_{m2} : Tinggi objek yang dilindungi (m)

B. Penelitian Pendukung

Beberapa penelitian yang telah dilakukan sebagai pendukung adalah sebagai berikut :

1. Nina Dahliana Nur, I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, dan R. Wahyudi, “ Pemodelan perlindungan gardu induk dari sambaran petir “, 2014. Melakukan penelitian tentang sistem perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung menggunakan metode bola bergulir. Penelitian ini dilaksanakan di Gardu Induk 150 kV Ngimbang Lamongan dengan tujuan mengetahui konfigurasi dari penggunaan tiang penangkal dan kawat tanah. Dimana tinggi dari objek yang dilindungi sebesar 13 m, dalam hal ini merupakan nilai ketinggian dari konduktor fasa. Pada gardu induk Ngimbang Lamongan dipasang kawat tanah setinggi 18 m dengan jarak pisah antara dua kawat tanah adalah 14 m. Jarak pisah maksimum untuk dua kawat tanah pada perhitungan adalah 26,34 m. Sehingga dari hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan konfigurasi pemakaian kawat tanah setinggi 18 m dengan jarak pisah 14 m seperti yang sudah ada di Gardu Induk 150 kV Ngimbang Lamongan telah aman dari sambaran petir dan diberikan alternatif perlindungan lain yaitu dengan memasang *lightning mast* (tiang penangkal). *Lightning mast* yang dibutuhkan sebanyak 23 buah dengan tinggi 26 m^[7].
2. Le Viet Dung dan K. Petcharaks, “ Lightning Protection Systems Design for Substations by Using Masts and Matlab ”, 2010. Melakukan penelitian mengenai desain sistem perlindungan untuk gardu induk dari sambaran

petir menggunakan tiang penangkal dan desain dilakukan pada *Graphical User Interface (GUI) Matlab*. Ukuran desain sistem perlindungan untuk gardu induk yang dimodelkan adalah $30 \times 40 \text{ m}^2$. Dimana terdapat tiga jenis desain sistem perlindungan yang dibutuhkan yaitu gardu induk 500 kV dengan peralatan A ketinggian 15 m, gardu induk 230 kV dengan peralatan B ketinggian 15 m, gardu induk 230 kV dengan peralatan C ketinggian 5 m. Tiang penangkal yang digunakan sebanyak 5 tiang. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa tiang 1 dan 2 digunakan untuk melindungi gardu induk 230 kV dan 500 kV, sedangkan tiang 3, 4, dan 5 digunakan untuk melindungi gardu induk 500 kV dengan ketinggian tiang penangkal yang dibutuhkan adalah 21 m, 40 m, 0 m, 28 m, dan 17 m dari masing-masing kelima tiang yang digunakan ^[6].

3. Nit Petcharaks, “ Lightning protection zone in substation using mast “, 2013. Melakukan penelitian dengan membuat desain untuk melihat daerah perlindungan yang dihasilkan tiang penangkal pada gardu induk. Ukuran gardu yang didesain adalah $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}^2$. Desain yang dibuat menggunakan 4 tiang penangkal dengan konfigurasi ketinggian dari masing-masing tiang penangkal berbeda. Saat menggunakan 1 tiang penangkal didesain dengan ketinggian 32 m, 2 tiang penangkal dengan ketinggian 17 m, 3 tiang penangkal dengan ketinggian 14 m dan 4 tiang penangkal dengan ketinggian 13 m.

Penelitian ini bertujuan melihat daerah perlindungan dari masing-masing tiang penangkal yang diberikan sehingga peralatan mampu terlindungi atau tidak dengan konfigurasi yang tersebut. Peralatan dilakukan variasi

ukuran dan ketinggiannya, dimana ada 3 jenis peralatan yaitu desain A ukuran peralatan 10 m x 10 m dengan ketinggian 10 m, desain B ukuran 12 m x 12 m dengan ketinggian 10 m, dan desain C ukuran 10 m x 10 m dengan ketinggian 12 m. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa peralatan dengan desain A mampu terlindungi semua dengan variasi jumlah dan konfigurasi tiang penangkal yang diberikan. Pada desain B terdapat peralatan yang tidak mampu dilindungi dimana dengan masing-masing jumlah tiang penangkal 1, 2, 3 dan 4 ketinggian maksimum dari peralatan yang mampu dilindungi adalah 9,31 m, 9,59 m, 10,26 m, 10,97 m, sedangkan dari desain B ketinggian peralatan yang harus dilindungi adalah 10 m sehingga penggunaan dari 1 dan 2 tiang penangkal yang tidak mampu melindungi. Saat desain C semua variasi jumlah dan konfigurasi tiang penangkal yang diberikan tidak mampu melindungi peralatan yang memiliki ketinggian 12 m, hal ini karena dari masing-masing jumlah tiang penangkal 1, 2, 3 dan 4 ketinggian maksimum dari peralatan yang mampu dilindungi adalah 10,14 m, 10,28 m, 10,26 m, dan 10,97 m^[2].