

Analisis Perbandingan *Shielding* Gardu Induk Menggunakan Model *Electrogeometric*

Rahmad Dwi Prima¹, Yul Martin², Endah Komalasari³

Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, Bandar Lampung
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung 35145

¹rahmaddwiprima@gmail.com

²yul.martin@eng.unila.ac.id

³endah.komalasari@eng.unila.ac.id

Intisari — Sistem perlindungan gardu induk dari sambaran petir merupakan hal yang sangat penting bagi sistem kelistrikan, dimana gardu induk terdapat peralatan listrik yang berfungsi untuk mentransformasikan tenaga listrik tegangan tinggi yang satu ke tegangan tinggi yang lainnya. Untuk menjaga agar peralatan pada gardu induk terhindar dari kerusakan akibat sambaran petir, maka digunakan sistem perlindungan. Sistem perlindungan yang digunakan yaitu *shielding* tiang penangkal (*mast*) dan *shielding* kawat pentanahan / *ground steel wire* (GSW). Nilai ketinggian minimum tiang penangkal dan kawat dihasilkan menggunakan persamaan Young, Brown Whitehead - CIGREE, IEEE 1992 dan IEEE 1995 dalam model *electrogeometric*. Pada model *electrogeometric* dilakukan variasi nilai ketinggian objek yang dilindungi untuk memperlihatkan nilai ketinggian minimum yang diperlukan. Sehingga penelitian ini membandingkan ketinggian minimum yang dihasilkan antara *shielding* tiang penangkal (*mast*) dan *shielding* kawat pentanahan / *ground steel wire* (GSW) berdasarkan model *electrogeometric* dari objek yang dapat dilindungi. Dari hasil analisis didapatkan bahwa *shielding* kawat pentanahan / *ground steel wire* (GSW) mampu memberikan daerah perlindungan yang lebih baik dan lebih besar dengan ketinggian minimum yang diperoleh yaitu lebih rendah. Selain itu, model *electrogeometric* dengan persamaan Young secara umum mampu melindungi semua peralatan yang divariasikan mulai dari 1 m sampai 13 m dengan nilai ketinggian minimum yang diperoleh paling rendah dibanding persamaan lainnya.

Kata kunci—*Shielding* Gardu Induk, Model *Electrogeometric*, *Mast*, *Ground Steel Wire* (GSW)

Abstract — Protection system substation from a lightning strike is very important for the electrical system, where substation there are electrical device which function to transform electricity high voltage by high voltage other. To keep the equipment in substation protected from damage cause by lightning strikes, then used the protection system. Protection system used is *shielding mast* and *shielding wire / grounding of steel wire* (GSW). The minimum height values of mast and wire produced using the equation Young, Brown Whitehead - CIGREE, IEEE 1992 and IEEE 1995 model *electrogeometric*. On the model *electrogeometric* done variation of the height object protected to show the value of the minimum height required. So this research compare the minimum height the resulting between *shielding mast* and *shielding wire / grounding of steel wire* (GSW) based on a model *electrogeometric* of the object that can be protected. From the results of analysis show that *shielding wire / grounding of steel wire* (GSW) is able to give better protection zone and larger with a minimum height obtained is lower. In addition, model *electrogeometric* with the equation Young in general able to protect all the equipment varied from 1 m to 13 m with a minimum height values obtained the lowest compared to other equations.

Keywords—Substation *Shielding*, *Electrogeometric* Model, *Mast*, *Ground Steel Wire* (GSW)

I. PENDAHULUAN

Penyaluran daya dari suatu sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh kemampuan gardu induk dalam menahan tegangan lebih yang berasal dari sambaran petir langsung. Pada gardu induk terdapat peralatan-peralatan yang penting dalam proses penyaluran daya, diantaranya adalah transformator arus, transformator tegangan kapasitif, *circuit breaker*, *disconnecting switch* dan transformator daya. Setiap peralatan pada gardu induk memiliki tingkat isolasi dasar / *basic insulation level* (BIL). Jika tegangan surja yang terjadi pada peralatan gardu induk melebihi tingkat isolasi dasar peralatan, maka bahan isolasi pada peralatan tidak mampu menahan tegangan lebih transien sehingga akan merusak peralatan tersebut.

Untuk melindungi semua peralatan dari sambaran petir langsung, maka digunakan sistem perlindungan dengan *shielding* tiang penangkal (*mast*) dan *shielding* kawat pentanahan / *ground steel wire* (GSW). Perlindungan ini menyalurkan arus petir ke tanah dan menghilangkan peluang petir menyambar peralatan-peralatan pada gardu induk. Persamaan jarak sambaran (*striking distance*) digunakan untuk menentukan jarak sambaran petir ke tanah (*ground*), peralatan dan tiang penangkal. Semua peralatan harus berada pada daerah perlindungan yang dihasilkan tiang penangkal dan kawat pentanahan agar peralatan tidak mengalami kerusakan yang diakibatkan sambaran petir.

Nilai ketinggian *shielding* tiang penangkal (*mast*) dan *shielding* kawat pentanahan / *ground steel wire* (GSW) dihasilkan dalam model *electrogeometric* menggunakan persamaan Young, Brown Whitehead-CIGREE, IEEE 1992 dan IEEE 1995 dengan melakukan variasi nilai ketinggian objek yang dilindungi. Sehingga penelitian ini membandingkan hasil ketinggian minimum antara *shielding* tiang penangkal dan kawat pentanahan berdasarkan model

electrogeometric dari nilai objek yang dapat dilindungi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Landasan Teori

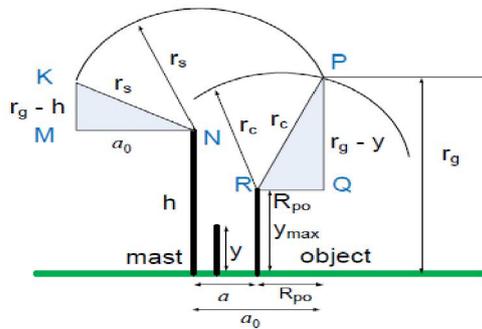
1) Sistem Perlindungan Gardu Induk

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^[4] :

- Kawat dan tiang penangkal berfungsi untuk menerima dan menarik sambaran petir.
- Mengalirkan arus gangguan ke dalam tanah baik arus gangguan yang berasal dari surja hubung maupun surja petir.
- Melindungi peralatan dari sembaran 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 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.

Gbr. 1. Proses *striking distance*^[6]

Persamaan untuk ketiga jarak sambaran itu adalah sebagai berikut^[1] :

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

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

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

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 tabel di bawah ini^[2] :

Tabel. 1 Nilai Persamaan Pada Model *Electrogeometric*^[5]

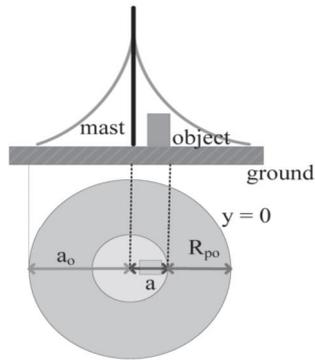
EM Model	A	B	γ_c	γ_s
Young	27	0.32	$\gamma_c = \frac{444}{462-y}$	$\gamma_s = \frac{444}{462-h}$
			untuk $y \geq 18\text{m}$	untuk $h \geq 18\text{m}$
			selain itu $\gamma_c = 1$	selain itu $\gamma_s = 1$
Brown-White Head	6.4	0.75	$\gamma_c = \frac{y-18}{108}$	$\gamma_s = \frac{h-18}{108}$
			untuk $y \geq 18\text{m}$	untuk $h \geq 18\text{m}$
			selain itu $\gamma_c = 1$	selain itu $\gamma_s = 1$
IEEE 1992	9	0.65	1	1
IEEE-1995	8	0.65	1	1

4) *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.

a. *Shielding* Satu Tiang Penangkal

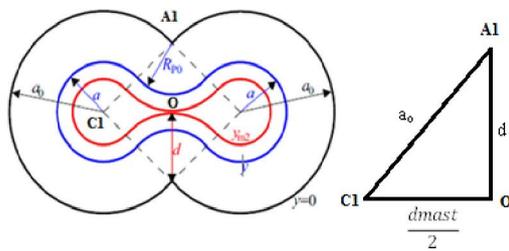
Daerah perlindungan dari satu tiang penangkal ditunjukkan pada (gambar 2) bahwa ada objek dari ketinggian y, dan objek dimaksudkan untuk dilindungi oleh satu tiang penangkal. Dengan satu tiang penangkal menghasilkan daerah perlindungan dalam bentuk kerucut^[6].



Gbr. 2. Perlindungan Satu Tiang Penangkal^[6]

b. *Shielding* Dua Tiang Penangkal

Shielding dua tiang penangkal untuk melindungi objek dengan ketinggian y , maka daerah perlingkungannya seperti pada (gambar 3). Perlindungan pada dua tiang lebih baik daripada satu tiang karena daerah perlindungan yang dihasilkan lebih luas pada objek yang dilindungi^[6].

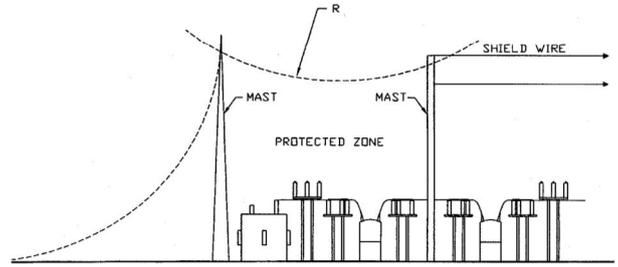


Gbr. 3. Perlindungan Dua Tiang Penangkal^[6]

III. METODE PENELITIAN

A. Metode Penelitian

Metode yang digunakan yaitu model *electrogeometric* dengan memanfaatkan jarak sambaran yang ditimbulkan dari sambaran petir sehingga menghasilkan daerah perlindungan. Selanjutnya metode ini diaplikasikan dalam *shielding* gardu induk yaitu menggunakan *shielding* tiang penangkal (*mast*) dan *shielding* kawat pentanahan / *ground steel wire* (GSW) yang dapat dilihat dalam (gambar 4).



Gbr. 4. Perlindungan Menggunakan *Shielding Wire* dan Tiang Penangkal^[8]

B. Perancangan Perhitungan

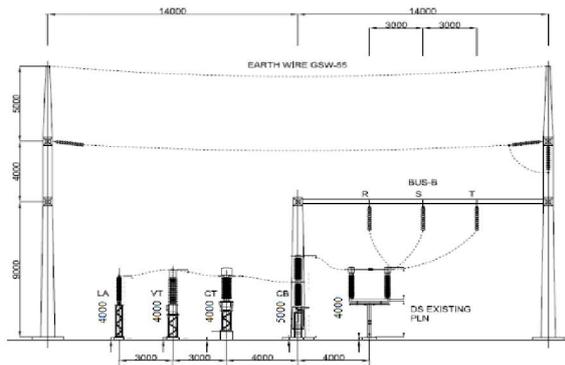
Matlab digunakan dalam analisis ini dengan persamaan matematis untuk menghasilkan ketinggian minimum dari daerah perlindungan yang didapatkan berdasarkan (tabel 2).

Tabel. 2 Persamaan Pada Masing-Masing Tipe *Shielding*

Type <i>Shielding</i>	Persamaan <i>Shielding</i>
Satu Kawat Pentanahan (<i>Wire</i>)	$H = rg - \sqrt{rs^2 - ao^2}$ $ao = x + \sqrt{rc^2 - (rg - y)^2}$
Dua Kawat Pentanahan (<i>Wire</i>)	$H = y + rc - \sqrt{rs^2 - rc^2}$ $a = \sqrt{rc^2 - (rg - h)^2} + \sqrt{rc^2 - (rg - y)^2}$
Satu Tiang Penangkal (<i>mast</i>)	$H = rg - \sqrt{rs^2 - ao^2}$ $ao = \sqrt{x^2 - Sg^2} + \sqrt{rc^2 - (rg - y)^2}$
Dua Tiang Penangkal (<i>mast</i>)	$H = rg - \sqrt{rs^2 - ao^2}$ $ao = \sqrt{(Rpo + x)^2 + (Rc)^2}$ $Rpo = \sqrt{rc^2 - (rg - y)^2}$

Masing-masing elemen rumus mewakili nilai jarak sambaran (*striking distance*), ketinggian peralatan yang dilindungi (y), jarak titik tengah dari peralatan yang dilindungi (x), radius daerah perlindungan (a), jarak tiang penangkal atau kawat pentanahan ke titik terakhir peralatan yang dilindungi (Sg) dan jarak titik tengah ke tiang penangkal atau kawat pentanahan (Rc) sehingga secara keseluruhan akan mendapatkan nilai ketinggian minimum yang dibutuhkan untuk melindungi peralatan pada gardu induk. Adapun parameter tersebut disesuaikan nilainya berdasarkan desain yang ada di Gardu Induk Teluk Betung 150 kV. Dimana hanya

satu section yang digunakan sebagai desain yaitu dengan ukuran 28 m x 28 m dapat dilihat pada gambar 5.



Gbr. 5. Desain Satu *Section* Pada Gardu Induk Teluk Betung 150 kV

Nilai jarak sambaran (*striking distance*) dinyatakan berdasarkan model *electrogeometric* dengan persamaan Young, Brown-Whitehead-CIGREE, IEEE 1992 dan IEEE 1995 yang dihasilkan menggunakan persamaan (4), (5), (6), dan (7). Nilai arus desain yang disimulasikan sebesar 5 kA dan 10 kA, hal ini didasarkan pada (tabel 2.1) yaitu tegangan nominal yang digunakan pada sistem transmisi adalah 150 kV dan 500 kV. Ketinggian peralatan yang dilindungi memiliki variasi nilai sebesar 1 m sampai 13 m dengan setiap variasi kenaikan adalah 1 m, sedangkan ukuran panjang dan lebar daerah perlindungan yang diinginkan peralatan untuk dilindungi yaitu 14 m x 14 m.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penentuan Jarak Sambaran (*Striking Distance*)

Model *Electrogeometric* memberikan batasan maksimum dari setiap tiang dan kawat yang berguna untuk melindungi dari sambaran petir. Hal ini juga berpengaruh terhadap radius daerah perlindungan dari jarak sambaran ke objek yang dilindungi. Ketika menggunakan satu dan dua tiang serta kawat pentanahan tunggal sangat dipengaruhi oleh jarak sambaran sehingga peralatan yang

membutuhkan perlindungan yang lebih tinggi nilainya dari jarak sambaran akan terkena sambaran petir. Sedangkan untuk hasil simulasi, persamaan yang digunakan dalam empat model *Electrogeometric* diberikan batasan maksimum sehingga ketinggian minimum daerah perlindungan yang sama dengan jarak sambaran dianggap tidak aman untuk melindungi peralatan.

Tabel. 3. Nilai Jarak Sambaran Pada Model *Electrogeometric*

Arus Desain (kA)	Jarak Sambaran (m)			
	Persamaan Young	Persamaan CIGREE	Persamaan IEEE 1992	Persamaan IEEE 1995
5	45.19	21.40	25.62	27.33
10	56.41	35.99	40.20	42.88

B. Hasil *Shielding* Gardu Induk Menggunakan Satu Tiang Penangkal

1) Ketinggian Minimum Satu Tiang Dengan Arus Desain 5 kA

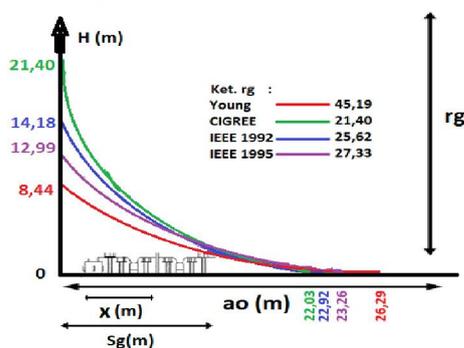
Tabel 3 memperlihatkan nilai ketinggian minimum yang dibutuhkan untuk melindungi peralatan pada satu tiang penangkal. Terlihat bahwa model *electrogeometric* pada persamaan Young mampu melindungi semua peralatan dengan ketinggian yang bervariasi dari 1 m sampai 13 m. Sedangkan pada persamaan IEEE 1992 hanya mampu memberikan perlindungan untuk peralatan dengan ketinggian 1 m sampai 3 m. Ketika ketinggian peralatan 4 m sampai 13 m dibutuhkan ketinggian tiang di atas 25.62 m, nilai ini adalah jarak sambaran, sedangkan daerah perlindungan yang dibutuhkan berada di atas nilai tersebut (tabel 4) sehingga akan menjadi tidak aman untuk digunakan karena nilai tersebut merupakan batas maksimum dari ketinggian tiang yang diperlukan. Pada persamaan IEEE 1995 dapat melindungi 1 m sampai 4 m dan persamaan CIGREE hanya mampu melindungi peralatan dengan ketinggian 1 m. Hal ini karena saat variasi ketinggian peralatan lebih tinggi, jarak daerah perlindungan yang dibutuhkan menjadi lebih

besar. Akibatnya nilai jarak sambaran akan terlewat dari nilai jarak daerah perlindungan yang dibutuhkan, sehingga menjadi tidak aman apabila ketinggian tiang nilainya sama dengan nilai dari jarak sambaran.

Tabel. 4 Ketinggian Minimum Satu Tiang Penangkal Saat Arus Desain 5 kA

Tinggi Objek (m)	Ketinggian Minimum Tiang Penangkal (H)			
	Persamaan Young (m)	Persamaan CIGREE (m)	Persamaan IEEE 1992 (m)	Persamaan IEEE 1995 (m)
1	5.97	12.51	9.72	9.06
2	8.44	21.40	14.18	12.99
3	10.69	21.40	20.15	17.37
4	12.87	21.40	25.62	25.07
5	15.04	21.40	25.62	27.33
6	17.23	21.40	25.62	27.33
7	19.47	21.40	25.62	27.33
8	21.81	21.40	25.62	27.33
9	24.28	21.40	25.62	27.33
10	26.96	21.40	25.62	27.33
11	29.97	21.40	25.62	27.33
12	33.56	21.40	25.62	27.33
13	38.67	21.40	25.62	27.33

Pada tabel 4 dapat diambil salah satu hasil dengan tinggi peralatan yang dilindungi sebesar 2 m akan terlihat sistem *shielding* yang diberikan dari masing-masing persamaan adalah terlihat di bawah ini.



Gbr. 6 Daerah Perlindungan Yang Dihasilkan Dari Ketinggian Minimum Satu Tiang Saat Melindungi Peralatan Dengan Tinggi 2 m Pada Arus Desain 5 kA

Pada gambar 6 terlihat bahwa persamaan Young dibutuhkan ketinggian tiang sebesar 8,44 m untuk melindungi peralatan dengan

tinggi 2 m, dan sesuai standar dari IEEE 1992 dan IEEE 1995 ketinggian minimum yang diperlukan yaitu 12,99 m dan 14,18 m. Sedangkan pada persamaan CIGREE berbeda yaitu dengan ketinggian tiang yang diberikan adalah 21,40 m. Hal ini diakibatkan jarak daerah perlindungan yang dibutuhkan untuk melindungi peralatan setinggi 2 m yaitu 22,03 m. Sedangkan ketinggian maksimum dari tiang yang aman berada di bawah 21,40 m yang menjadi nilai dari jarak sambaran, namun penggunaan persamaan CIGREE membutuhkan jarak daerah perlindungan yang lebih besar dari nilai tersebut, sehingga menjadi tidak aman dari segi perlindungan yang dihasilkan.

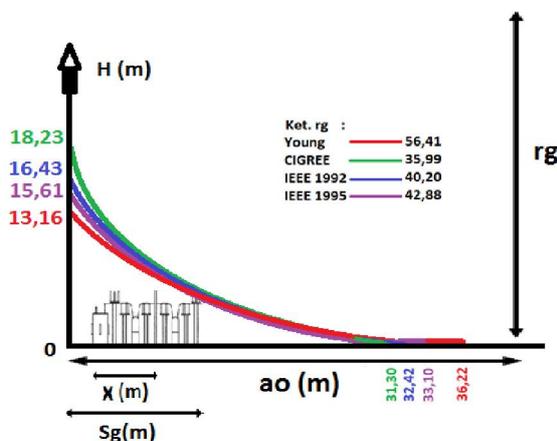
2) Ketinggian Minimum Satu Tiang Dengan Arus Desain 10 kA

Tabel. 5 Ketinggian Minimum Satu Tiang Penangkal Saat Arus Desain 10 kA

Tinggi Objek (m)	Ketinggian Minimum Tiang Penangkal (H)			
	Persamaan Young (m)	Persamaan CIGREE (m)	Persamaan IEEE 1992 (m)	Persamaan IEEE 1995 (m)
1	5.16	7.07	6.50	6.20
2	7.38	9.94	9.14	8.74
3	9.38	12.64	11.59	11.07
4	11.29	15.36	13.99	13.34
5	13.16	18.23	16.43	15.61
6	15.01	21.39	18.96	17.93
7	16.85	25.18	21.65	20.34
8	18.71	30.87	24.64	22.90
9	20.58	35.99	28.14	25.69
10	22.48	35.99	32.90	28.86
11	24.43	35.99	40.20	32.79
12	26.43	35.99	40.20	39.55
13	28.50	35.99	40.20	42.88

Terlihat bahwa model *electrogeometric* menggunakan persamaan Young dengan ketinggian peralatan 1 m sampai 13 m dapat terlindungi semua, sedangkan dengan persamaan CIGREE hanya mampu melindungi peralatan secara aman dari ketinggian 1 m sampai 8 m. Sementara itu,

pada persamaan IEEE 1992 mampu memberikan perlindungan yang aman untuk peralatan dengan ketinggian 1 m sampai 10 m dan persamaan IEEE 1995 dapat melindungi 1 m sampai 12 m. Hasil perbandingan saat arus desain 10 kA didapatkan bahwa variasi ketinggian peralatan yang dapat dilindungi dengan aman menjadi lebih luas dibandingkan saat arus desain yang digunakan sebesar 5 kA. Perbedaan ini dikarenakan nilai ketinggian minimum dari tiang yang dibutuhkan menjadi lebih kecil dari setiap variasi ketinggian peralatan dan dengan arus desain 10 kA nilai jarak sambaran ke *ground* (r_g) yang dihasilkan membesar sehingga jarak sambaran ke tiang (r_s) meningkat dan diikuti dengan jarak sambaran ke objek (r_c) yang mengakibatkan jangkauan jarak daerah perlindungan semakin besar.



Gbr. 7. Daerah Perlindungan Yang Dihasilkan Dari Ketinggian Minimum Satu Tiang Saat Melindungi Peralatan Dengan Tinggi 5 m Pada Arus Desain 10 kA

Pada gambar 7 menunjukkan dengan jarak daerah perlindungan yang lebih luas dari lainnya yaitu sebesar 36,22 m (tabel 4.5), persamaan Young mampu memberikan pilihan yang efektif dari sisi penggunaan biaya dalam pemasangan tiang penangkal untuk melindungi peralatan yang di desain dengan tinggi 5 m. Dimana ketinggian yang diperlukan dari persamaan tersebut adalah 13,16 m. Hal ini terlihat juga dari masing-

masing persamaan memberikan pilihan yang aman dalam penggunaan tiang yaitu terlihat bahwa jarak daerah perlindungan yang dibutuhkan nilainya berada di bawah nilai jarak sambaran yang dihasilkan sehingga peralatan dengan tinggi 5 m mampu terlindungi.

C. Hasil Shielding Gardu Induk Menggunakan Dua Tiang Penangkal

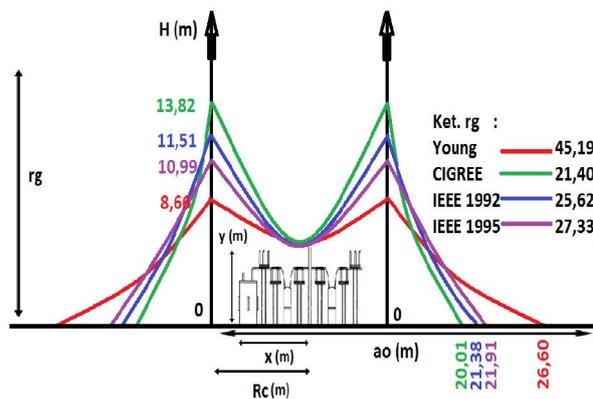
1) Ketinggian Minimum Dua Tiang Dengan Arus Desain 5 kA

Nilai jarak sambaran untuk hasil keempat persamaan dari model *electrogeometric* dapat dilihat pada tabel 6. Nilai ini sama seperti saat menggunakan *shielding* satu tiang, tetapi pada hasil ini peralatan yang dilindungi terletak di antara dua tiang sehingga pengaruh dari jarak sambaran akan berada di sisi samping dan tidak berada di atas objek yang dilindungi sehingga jarak daerah perlindungan dua tiang akan lebih kecil dibandingkan dengan satu tiang yang dapat dilihat pada gambar 7. Hal ini mengakibatkan jangkauan dari ketinggian minimum tiang yang diperlukan untuk melindungi ketinggian peralatan yang sama akan menjadi lebih besar dari sisi variasi yang diberikan.

Tabel. 6 Ketinggian Minimum Dua Tiang Penangkal Saat Arus Desain 5 kA

Tinggi Objek (m)	Ketinggian Minimum Tiang Penangkal (H)			
	Persamaan Young (m)	Persamaan CIGREE (m)	Persamaan IEEE 1992 (m)	Persamaan IEEE 1995 (m)
1	2.95	4.74	4.14	3.96
2	4.47	6.84	6.01	5.77
3	5.90	8.94	7.81	7.49
4	7.29	11.19	9.62	9.22
5	8.66	13.82	11.51	10.99
6	10.02	17.58	13.53	12.84
7	11.38	21.40	15.79	14.81
8	12.75	21.40	18.52	17.01
9	14.12	21.40	22.93	19.63
10	15.51	21.40	25.62	23.46
11	16.92	21.40	25.62	27.33
12	18.34	21.40	25.62	27.33
13	19.79	21.40	25.62	27.33

Pada tabel 6 dapat diambil salah satu hasil dengan tinggi peralatan yang dilindungi sebesar 5 m akan terlihat sistem *shielding* yang diberikan dari masing-masing persamaan adalah terlihat pada gambar 8.



Gbr. 8. Daerah Perlindungan Yang Dihasilkan Dari Ketinggian Minimum Dua Tiang Saat Melindungi Peralatan Dengan Tinggi 5 m Pada Arus Desain 5 kA

Pada gambar 8 terlihat bahwa persamaan Young dibutuhkan ketinggian tiang sebesar 8,66 m untuk melindungi peralatan dengan tinggi 5 m, dan sesuai standar dari IEEE 1992 dan IEEE 1995 ketinggian minimum yang diperlukan yaitu 10,99 m dan 11,51 m. Sedangkan pada persamaan CIGREE

ketinggian tiang yang diberikan adalah 13,82 m. Hal ini terlihat dari masing-masing persamaan memberikan pilihan yang aman dalam penggunaan tiang yaitu terlihat bahwa jarak daerah perlindungan yang dibutuhkan (tabel 7) nilainya berada di bawah nilai jarak sambaran yang dihasilkan sehingga peralatan dengan tinggi 5 m mampu terlindungi.

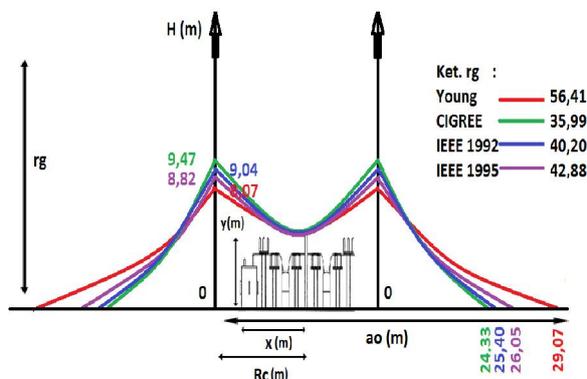
1) Ketinggian Minimum Dua Tiang Dengan Arus Desain 10 kA

Tabel. 7 Ketinggian Minimum Satu Tiang Penangkal Saat Arus Desain 10 kA

Tinggi Objek (m)	Ketinggian Minimum Tiang Penangkal (H)			
	Persamaan Young (m)	Persamaan CIGREE (m)	Persamaan IEEE 1992 (m)	Persamaan IEEE 1995 (m)
1	2.65	3.34	3.14	3.03
2	4.09	4.96	4.70	4.57
3	5.45	6.49	6.18	6.02
4	6.77	7.98	7.62	7.43
5	8.07	9.47	9.04	8.82
6	9.36	10.96	10.46	10.21
7	10.64	12.47	11.89	11.60
8	11.91	14.01	13.33	12.99
9	13.19	15.58	14.78	14.40
10	14.47	17.21	16.27	15.83
11	15.75	18.92	17.79	17.28
12	17.03	20.72	19.35	18.75
13	18.33	22.66	20.97	20.27

Terlihat bahwa model *electrogeometric* menggunakan persamaan Young, CIGREE, IEEE 1992 dan IEEE 1995 dengan ketinggian peralatan 1 m sampai 13 m dapat terlindungi semua secara aman. Jangkauan daerah perlindungan yang dihasilkan arus desain 10 kA lebih besar dibandingkan arus desain 5 kA, hal ini dipengaruhi oleh nilai jarak sambaran (r_g) yang meningkat sehingga didapatkan nilai ketinggian tiang penangkal yang lebih pendek dan mampu melindungi peralatan dengan variasi ketinggian peralatan yang lebih besar. Pada gambar 9 didapatkan ketinggian minimum yang dibutuhkan dari masing-masing persamaan adalah 8,07 m,

9,47 m, 9,04 m dan 8,82 m. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan arus desain yang lebih besar dari sebelumnya mengakibatkan penurunan nilai ketinggian tiang yang dibutuhkan. Dalam hal ini dari sisi ekonomi lebih efektif dalam penggunaannya untuk melindungi peralatan dengan tinggi 5 m. Namun akan tidak diizinkan apabila penggunaan langsung disesuaikan dengan nilai yang didapat dalam pemasangan tiang penangkal untuk melindungi peralatan. Karena apabila sambaran petir yang menyambar peralatan berada di bawah 10 kA maka akan ada peralatan yang tidak terlindungi oleh tiang penangkal. Sehingga akan lebih baik digunakan standar yang ada yaitu menggunakan standar IEEE 1992 dan IEEE 1995 yang aman dalam memberikan perlindungan.



Gbr. 9. Daerah Perlindungan Yang Dihasilkan Dari Ketinggian Minimum Dua Tiang Saat Melindungi Peralatan Dengan Tinggi 5 m Pada Arus Desain 10 kA

D. Hasil Shielding Gardu Induk Menggunakan Kawat

1) Ketinggian Minimum Satu Kawat Dengan Arus Desain 5 kA

Tabel 8 menunjukkan bahwa persamaan Young dari model electrogeometric mampu memberikan perlindungan aman untuk semua variasi ketinggian peralatan dari 1 m sampai 13 m. Sedangkan persamaan CIGREE memberikan perlindungan yang aman untuk peralatan yang dilindungi sebesar 1 m sampai

7 m, hal ini lebih baik dibandingkan menggunakan shielding tiang penangkal yang sama sekali tidak mampu memberikan perlindungan secara aman. Pada persamaan IEEE 1992 mampu melindungi peralatan dengan ketinggian 1 m sampai 10 m dan persamaan IEEE 1995 dapat melindungi peralatan dengan tinggi 1 m sampai 8 m.

Tabel. 8 Ketinggian Minimum Satu Kawat Saat Arus Desain 5 kA

Tinggi Objek (m)	Ketinggian Minimum Kawat (H)			
	Persamaan Young (m)	Persamaan CIGREE (m)	Persamaan IEEE 1992 (m)	Persamaan IEEE 1995 (m)
1	2.37	3.33	3.03	3.22
2	3.87	5.24	4.80	5.08
3	5.28	7.11	6.48	6.87
4	6.64	9.02	8.16	8.68
5	7.99	11.08	9.87	10.59
6	9.33	13.43	11.65	12.66
7	10.67	16.50	13.55	15.06
8	12.00	21.40	15.65	18.31
9	13.35	21.40	18.12	22.77
10	14.70	21.40	21.63	22.77
11	16.06	21.40	25.62	22.77
12	17.44	21.40	25.62	22.77
13	18.85	21.40	25.62	22.77

2) Ketinggian Minimum Satu Kawat Dengan Arus Desain 10 kA

Dengan arus desain sebesar 10 kA, model electrogeometric menggunakan persamaan Young, CIGREE, IEEE 1992 dan IEEE 1995 mampu memberikan perlindungan aman untuk semua variasi ketinggian peralatan dari 1 m sampai 13 m. Nilai jarak sambaran pada shielding menggunakan kawat dari persamaan IEEE 1995 akan berbeda yaitu didapatkan nilainya sebesar 22,77 saat 5 kA dan 35,73 saat 10 kA. Perbedaan tersebut dapat dilihat dalam tabel 9, hal ini karena jarak sambaran pada kawat nilai koefisiennya bernilai 1, sedangkan pada tiang penangkal adalah 1,2.

Tabel. 9 Ketinggian Minimum Satu Kawat Saat Arus Desain 10 kA

Tinggi Objek (m)	Ketinggian Minimum Kawat (H)			
	Persamaan Young (m)	Persamaan CIGREE (m)	Persamaan IEEE 1992 (m)	Persamaan IEEE 1995 (m)
1	2.19	2.60	2.48	2.61
2	3.62	4.18	4.02	4.19
3	4.97	5.67	5.47	5.68
4	6.28	7.12	6.87	7.14
5	7.57	8.56	8.26	8.58
6	8.84	10.00	9.65	10.03
7	10.10	11.45	11.04	11.48
8	11.37	12.92	12.43	12.96
9	12.63	14.42	13.84	14.46
10	13.89	15.95	15.27	16.00
11	15.15	17.54	16.72	17.60
12	16.42	19.19	18.21	19.27
13	17.69	20.94	19.73	21.03

Sehingga jarak sambaran ke objek (r_c) menggunakan persamaan IEEE 1995 akan berpengaruh dan menjadi lebih rendah. Namun dari jangkauan jarak daerah perlindungan yang dihasilkan menggunakan kawat masih lebih baik sehingga mampu melindungi peralatan dengan variasi ketinggian yang lebih besar.

3) Ketinggian Minimum Dua Kawat Dengan Arus Desain 5 kA

Metode perlindungan yang dihasilkan dengan penggunaan dua kawat hampir sama dengan satu kawat, tetapi jangkauan daerah perlindungan yang dihasilkan jauh lebih baik dan ketinggian minimum yang diperlukan untuk melindungi peralatan menjadi lebih rendah. Nilai jarak sambaran pada *shielding* menggunakan dua kawat adalah sama nilainya saat menggunakan satu kawat. Sehingga tabel 10 menunjukkan bahwa semua empat persamaan dari model *electrogeometric* yang digunakan mampu memberikan perlindungan yang aman untuk peralatan dari sambaran petir yaitu dengan variasi ketinggian peralatan dari 1 m sampai 13 m.

Tabel. 10 Ketinggian Minimum Dua Kawat Saat Arus Desain 5 kA

Tinggi Objek (m)	Ketinggian Minimum Kawat (H)			
	Persamaan Young (m)	Persamaan CIGREE (m)	Persamaan IEEE 1992 (m)	Persamaan IEEE 1995 (m)
1	1.55	2.18	1.97	2.10
2	2.55	3.18	2.97	3.10
3	3.55	4.18	3.97	4.10
4	4.55	5.18	4.97	5.10
5	5.55	6.18	5.97	6.10
6	6.55	7.18	6.97	7.10
7	7.55	8.18	7.97	8.10
8	8.55	9.18	8.97	9.10
9	9.55	10.18	9.97	10.10
10	10.55	11.18	10.97	11.10
11	11.55	12.18	11.97	12.10
12	12.55	13.18	12.97	13.10
13	13.55	14.18	13.97	14.10

4) Ketinggian Minimum Dua Tiang Dengan Arus Desain 10 kA

Hasil ini dilakukan menggunakan arus desain sebesar 10 kA dengan ukuran daerah Terlihat bahwa dengan keempat persamaan dari model *electrogeometric* yang digunakan mampu memberikan perlindungan yang aman untuk peralatan dari sambaran petir yaitu dengan variasi ketinggian peralatan dari 1 m sampai 13 m. Nilai jarak sambaran pada *shielding* menggunakan dua kawat saat arus desain 10 kA akan meningkat, hal ini mengakibatkan daerah perlindungan yang dihasilkan lebih besar dan ketinggian minimum yang diperlukan untuk melindungi peralatan menjadi lebih rendah.

Sehingga dengan membandingkan hasil antara *shielding* tiang penangkal (*mast*) dan *shielding* kawat pentanahan / *ground steel wire* (GSW) berdasarkan model *electrogeometric* dari nilai objek yang dapat dilindungi, terlihat bahwa dengan *shielding* kawat pentanahan / *ground steel wire* (GSW) mampu memberikan perlindungan yang lebih baik dan lebih besar daripada *shielding* tiang

penangkal (*mast*). Selain itu ketinggian minimum yang dihasilkan pada shielding kawat pentanahan / ground steel wire (GSW) lebih rendah dibandingkan menggunakan tiang penangkal.

Tabel. 11 Ketinggian Minimum Dua Kawat Saat Arus Desain 10 kA

Tinggi Objek (m)	Ketinggian Minimum Kawat (H)			
	Persamaan Young (m)	Persamaan CIGREE (m)	Persamaan IEEE 1992 (m)	Persamaan IEEE 1995 (m)
1	1.44	1.69	1.61	1.69
2	2.44	2.69	2.61	2.69
3	3.44	3.69	3.61	3.69
4	4.44	4.69	4.61	4.69
5	5.44	5.69	5.61	5.69
6	6.44	6.69	6.61	6.69
7	7.44	7.69	7.61	7.69
8	8.44	8.69	8.61	8.69
9	9.44	9.69	9.61	9.69
10	10.44	10.69	10.61	10.69
11	11.44	11.69	11.61	11.69
12	12.44	12.69	12.61	12.69
13	13.44	13.69	13.61	13.69

V. PENUTUP

Setelah dilakukan analisa memperlihatkan bahwa secara umum model *electrogeometric* dengan persamaan Young lebih baik karena mampu melindungi semua peralatan yang divariasikan mulai dari 3 m sampai 18 m dengan aman dibandingkan menggunakan persamaan lainnya. Selain itu, dengan membandingkan hasil antara *shielding* tiang penangkal (*mast*) dan *shielding* kawat pentanahan / *ground steel wire* (GSW) berdasarkan model *electrogeometric* dari nilai objek yang dapat dilindungi, terlihat bahwa dengan *shielding* kawat pentanahan / *ground steel wire* (GSW) mampu memberikan

perlindungan yang lebih baik dan lebih besar daripada *shielding* tiang penangkal (*mast*).

REFERENSI

- [1] Andrew R. Hileman, "Insulation Coordination for Power System", Marcel Dekker, New York, Buku, Vol 71 Part 6, Juni 1999.
- [2] F.S. Young, J. M. Clayton dan A.R. Hileman, "Shielding of transmission lines", IEEE Trans. On Power Apparatus and System, Vol 82, pp. 132-154, 1963.
- [3] Hutauruk, T. S., "Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja", Buku Erlangga, Jakarta, 1991.
- [4] Nur, N. D., dan Wahyudi R., "Pemodelan Perlindungan Gardu Induk dari Sambaran Petir Langsung di PT. PLN Gardu Induk 150 kV Ngimbang-Lamongan", Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh, November 2014.
- [5] IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substation. Journal, IEEE Std 998-1996, 20 Desember 1996.
- [6] Petcharaks, N., "Lightning Protection Zone In Substation Using Mast", Jurnal, Departement of Electrical Engineering, Dhurakij Pundit University, Bangkok, Thailand, Januari 2013.
- [7] Dung, L., V., dan Petcharaks, K., "Lightning Protection Systems Design for Substations by Using Masts and Matlab", Jurnal, Departement of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2010.