

PENENTUAN LOKASI PEMASANGAN *LIGHTNING MASTS* PADA MENARA TRANSMISI UNTUK MENGURANGI KEGAGALAN PERLINDUNGAN AKIBAT SAMBARAN PETIR

Agung Nugroho, Abdul Syakur
Jurusan Teknik Elektro – Fakultas Teknik Undip
Jl. Prof. Sudharto, Tembalang - Semarang

Abstrak

Sambaran petir pada saluran transmisi udara terbuka dapat mengenai kawat fasa apabila sistem perlindungan kawat tanah gagal dalam mengantisipasi sambaran tersebut. Pada menara transmisi yang menggunakan sistem perisaian sempurna kemungkinan sambaran petir pada kawat fasa ini dapat dikurangi sekecil mungkin. Untuk menara tertentu seperti menara tension yang digunakan untuk jalur belokan (aspan) kemungkinan terjadinya sambaran petir pada kawat fasa masih ada walaupun telah menggunakan sistem perisaian sempurna. Untuk mengatasinya maka pada menara yang memiliki kemungkinan yang besar terkena sambaran petir dapat dipasang pelindung tambahan berupa batang penangkal petir atau sering disebut lightning masts. Penentuan menara yang perlu dipasang Lightning Masts didasarkan pada pertimbangan tingkat kebutuhan dan nilai tahanan kaki menara. Makalah ini merupakan studi kasus pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 KV Ungaran – Krapyak.

I. PENDAHULUAN

Sampai saat ini untuk melindungi kawat fasa dari sambaran petir telah menggunakan kawat tanah yang dipasang diatas kawat fasa. Apabila terjadi sambaran petir pada kawat fasa maka keadaan ini disebut dengan kegagalan perlindungan (*shielding failure*), dimana kawat tanah gagal melindungi kawat fasa dari sambaran petir. Walaupun untuk mengurangi kegagalan perlindungan pada saluran transmisi telah menggunakan sistem perlindungan sempurna, namun kemungkinan sambaran petir pada kawat fasa masih mungkin terjadi terutama pada menara tension untuk jalur belokan (aspan).

Untuk mengurangi gangguan akibat sambaran petir pada kawat fasa, maka dipasang sistem proteksi tambahan menggunakan elektroda batang penangkal petir yang disebut *lightning mast*. Namun tidak semua menara dapat dilakukan pemasangan lightning masts karena pertimbangan nilai tahanan kaki menara. Penentuan menara yang perlu dipasang *lightning masts* harus dilakukan dengan mempertimbangkan kemungkinan sambaran petir pada menara tersebut dan nilai tahanan kaki menaranya.

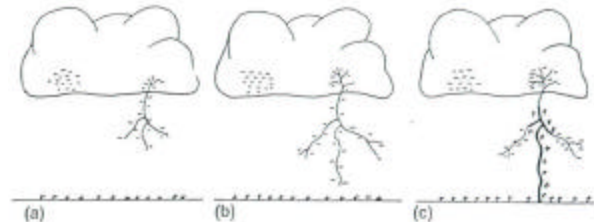
II. PARAMETER PETIR DAN SALURAN TRANSMISI

A. Mekanisme Terjadinya Petir

Petir merupakan hasil pemisahan muatan

listrik secara alami di dalam awan-awan badai. Di dalam awan terjadi pemisahan muatan dimana beberapa teori menyatakan bahwasanya didalam awan, kristal es bermuatan positif, sedangkan titik-titik air bermuatan negatif. Mekanisme selanjutnya adalah peluahan petir yang diawali dengan pengembangan sambaran perintis (*stepped downward leader*). Gerakan ke bawah ini bertahap sampai dekat ke tanah, sehingga muatan negatif yang dibawa oleh *stepped leader* tersebut memperbesar induksi muatan positif di permukaan tanah, akibatnya gradien tegangan antara dasar awan dengan tanah semakin besar.

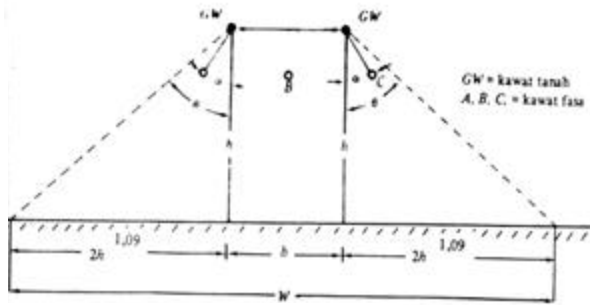
Apabila kedua akumulasi muatan ini saling tarik, maka muatan positif dalam jumlah yang besar akan bergerak ke atas menyambut gerakan *stepped leader* yang bergerak kebawah, akhirnya terjadi kontak pertemuan antara keduanya. Gerakan ke atas muatan positif tersebut membentuk suatu streamer yang bergerak ke atas (*upward moving streamer*), atau yang lebih populer disebut sebagai sambaran balik (*return stroke*) yang menyamakan perbedaan potensial.



Gambar 1. Proses terjadinya sambaran petir. a) sambaran perintis mulai b) sambaran perintis mendekati tanah c) sambaran keatas

B. Perlindungan Saluran Transmisi dari Sambaran Kilat

Suatu saluran transmisi di atas tanah dapat dikatakan membentuk bayang-bayang listrik pada tanah yang berada di bawah saluran transmisi itu. Lebar bayang-bayang listrik untuk suatu saluran transmisi telah diberikan oleh Whitehead seperti ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Bidang perlindungan kawat

Lebar bayang-bayang W dirumuskan :

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

di mana,

b = jarak pemisah antara kedua kawat tanah, meter
(bila kawat tanah hanya satu, $b = 0$)

h = tinggi rata-rata kawat tanah di atas tanah

h_1 = tinggi kawat tanah pada menara, meter.

Jadi luas bayang-bayang untuk suatu span (L) saluran transmisi, dirumuskan :

$$A = L.(km) x (b + 4h^{1,09}) x 10^{-3} (km) \text{ atau}$$

$$A = 0,001 . L . (b + 4h^{1,09}) . km^2 \dots\dots\dots (2)$$

C. Jumlah Sambaran Kilat ke Saluran Transmisi

Jumlah sambaran kilat ke bumi adalah sebanding dengan jumlah hari guruh per tahun atau "Iso Keraunic Level" (IKL) di tempat itu. Banyak para penyelidik yang telah memberikan penelitian ke arah ini dan mengemukakan rumus-rumus yang berlainan. Dalam makalah ini penulis menggunakan rumus :

$$N_g = 0,15 . IKL \dots\dots\dots (3)$$

di mana N_g adalah jumlah sambaran per km² per tahun dan IKL adalah jumlah hari guruh per tahun.

Jadi jumlah sambaran pada saluran transmisi adalah,

$$N_D = N_g x A$$

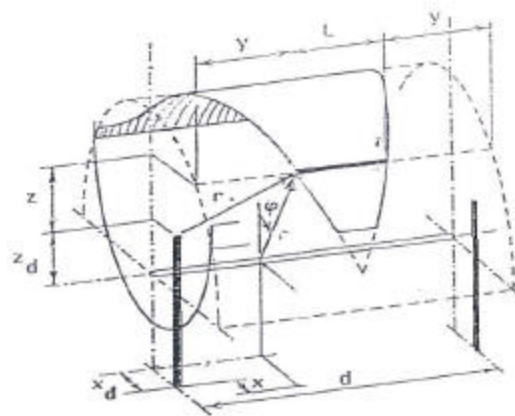
atau

$$N_D = 0,15 . IKL (b + 4h^{1,09}) \text{ sambaran/tahun} \dots\dots (4)$$

Volume keseluruhan dari ruang proteksi dari suatu obyek terdiri atas semua titik dimana obyek mungkin akan tersambar petir dan volume dari sistem perlindungan petir pada obyek tersebut. Volume tersebut dikenal dengan volume atraktif (*attractive volume*), yang memiliki frekuensi tersambar petir dalam jumlah yang sama dengan frekuensi sambaran petir pada obyek (Eriksson 1986).

Pada saluran transmisi sistem perlindungan merupakan sistem perlindungan menggunakan kawat horisontal terhadap suatu obyek berupa kawat horisontal (*horizontal line protected by horizontal line*). Untuk pemasangan batang penangkal petir pada kawat

transmisi, maka sistem perlindungan yang digunakan adalah kawat horisontal dilindungi oleh dua batang vertikal (*horizontal line protected by two rods*). Gambar luasan melintang dari sistem ini ditunjukkan gambar (3).



Gambar 3 Luasan permukaan pada volume atraktif kawat horisontal yang dilindungi oleh dua batang vertikal.

Luasan atraktif ekuivalen dari batang vertikal dan kawat horisontal dipisahkan oleh suatu permukaan yang dihasilkan melalui pergeseran sebuah parabola. Bentuk luasan ini ditentukan oleh panjang kawat dan tinggi batang vertikal.

Setelah nilai A_{eq} didapat maka frekuensi sambaran petir yang diharapkan pada sistem perlindungan petir adalah :

$$N = N_g . A_{eq} \text{ sambaran pertahun} \dots\dots\dots (5)$$

Rumusan diatas adalah rumit dan tidak mudah diaplikasikan, oleh karena itu untuk penghitungan berdasar metode luasan atraktif, Petrov dan Alessandro menggunakan persamaan:

$$R_a = 0,56 . [(h + 15) I_p]^2 / 3 \dots\dots\dots (6)$$

luas ekuivalen area (A_{eq}) untuk suatu struktur didapatkan dari penghitungan integral :

$$A_{eq} = p \int_0^{\infty} R_a^2(i, h) f(i) . di \dots\dots\dots (7)$$

dimana $f(i)$ adalah fungsi probabilitas kerapatan arus. Jika arus terdistribusi normal maka :

$$f(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s} i} \exp \left[- \frac{(\ln i - \ln \bar{I})^2}{2s^2} \right] \dots\dots\dots (8)$$

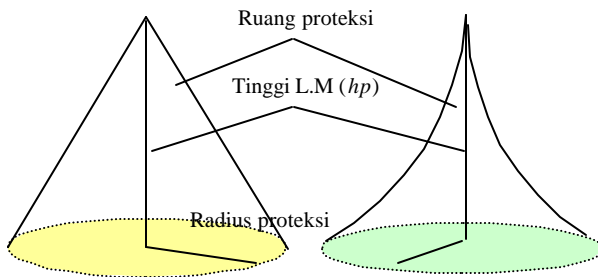
dimana \bar{I} adalah arus median dan σ adalah standar deviasi dari logaritma natural arus. Radius atraktif R_a bergantung pada ketinggian struktur arus puncak I_p . Dengan mensubstitusikan persamaan (8) ke persamaan (7) maka didapatkan

$$A_{eq} = 0,31p(h+15)^{4/3} \cdot \exp \left[-\frac{\ln^2 I}{2s^2} + \frac{s^2}{2} \left(\frac{4}{3} + \frac{\ln I}{s^2} \right)^2 \right] \tag{9}$$

III. SISTEM PERLINDUNGAN TERHADAP SAMBARAN PETIR DENGAN LIGHTNING MASTS

A. Konsep ruang proteksi Lightning masts

Pada masa awal diketemukannya penangkal petir dan beberapa tahun setelah itu, ruang proteksi dari suatu penangkal petir berbentuk ruang kerucut dengan sudut puncak kerucut berkisar antara 30° hingga 60°. Ruang proteksi menurut electrogeometric model hampir sama dengan ruang proteksi berdasarkan konsep lama, yaitu berbentuk ruang kerucut juga, hanya saja bidang miring dari kerucut tersebut melengkung dengan jari-jari tertentu (lihat Gambar 4). Besarnya jari-jari ini sama dengan besarnya jarak sambar dari lidah petir. Jarak sambar dari lidah petir ini ditentukan oleh besarnya arus petir yang terjadi. Dengan demikian, derajat kelengkungan dari bidang miring kerucut dipengaruhi oleh besarnya arus petir yang terjadi.



Gambar 4 Ruang proteksi lightning masts (a) konvensional dan (b) menurut elektro geometri

B. Penentuan Besarnya Kebutuhan Akan Penangkal Petir

Sambaran petir dapat menimbulkan gangguan pada sistem tenaga listrik. Pada bangunan bertingkat atau menara, efek gangguan akibat sambaran petir ini semakin besar sesuai dengan semakin tingginya bangunan tersebut. Kebutuhan bangunan akan proteksi petir ditentukan dengan cara klasifikasi area tempat bangunan atau dengan perhitungan menggunakan parameter hari guruh dan koefisien N_g , N_d dan N_e .

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 standar Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP), *National Fire Protection Association* (NFPA) 780 dan *International Electrotechnical Commission* (IEC)1024-1-1.

1. Berdasarkan PUIPP besarnya kebutuhan tersebut ditentukan berdasarkan penjumlahan indeks-indeks tertentu yang mewakili keadaan bangunan di suatu lokasi dan dituliskan sebagai:

$$R = A + B + C + D + E \tag{10}$$

(Besar index di atas, lihat pada lampiran)

2. 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 bangunan kemudian hasil penjumlahan dibagi dengan indeks yang mewakili isokeraunic level di daerah tersebut. Secara matematik dituliskan sebagai :

$$R = \frac{A + B + C + D + E}{F} \tag{11}$$

(Besar index di atas, lihat pada lampiran)

IV. PERHITUNGAN JUMLAH SAMBARAN PETIR PADA SALURAN TRANSMISI 150 KV UNGARAN – KRAPYAK

A. Gambaran Umum Transmisi 150 KV Ungaran – Krapyak.

Jaringan transmisi Ungaran – Krapyak yang terbentang sepanjang 21.819 meter menghubungkan gardu induk Ungaran dan gardu induk Krapyak. Tipe jaringan adalah sirkuit ganda dengan dua kawat tanah, menggunakan penghantar berkas dengan satu sub konduktor. Tiang menara yang digunakan adalah tipe *steel pole* dengan ketinggian yang berbeda dari masing-masing tiang.

Berdasarkan data yang diperoleh dari PLN dapat dihitung jumlah sambaran petir pada jaringan sebelum dan sesudah dipasang penangkal petir (*lightning mast*) pada menara transmisi. Nilai Isokeraunik Level (IKL) berdasarkan data dari Badan Meteorologi dan Geofisika Stasiun Kelas I Semarang sebesar : **91 per km² per tahun**. Sedangkan nilai frekuensi sambaran petir tahunan setempat (N_c) yang diperbolehkan adalah sebesar : **0,1 per tahun**

B. Jumlah Sambaran Sebelum Dipasang Lightning Masts

Dengan mengasumsikan bahwa tinggi maksimum kawat tanah pada span (hgwt) adalah setengah jarak antara kawat tanah dan kawat fasa paling atas. Maka dari persamaan (2) dapat dicari luas daerah perlindungan.

Perhitungan pada menara nomor 2 : tipe tower TT 38; jarak tower 1 – 2 = 335,6 meter ; 2 – 3 = 346,8 meter; tinggi tower atau tinggi maksimum kawat tanah (hgkt) = 3800 cm; tinggi maksimum kawat fasa (hgkf) = 3475 cm; jarak antar kawat tanah (b) = 795 cm

$$hgwt = hgkt - \frac{1}{2} (hgkt - hgkf)$$

$$\begin{aligned}
 hg &= 3637,5 \text{ cm} \\
 &= hg_{kt} - 2/3 (hg_{kt} - hg_{wkt}) \\
 &= 36,91667 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

Lebar daerah bayang-bayang perlindungan saluran transmisi pada menara 2 (W_2)

$$\begin{aligned}
 W_2 &= (b + 4.hg^{1,09}) \\
 &= (7,95 + 4.(36,91667)^{1,09}) \\
 &= 0,21228 \text{ km}
 \end{aligned}$$

Dengan panjang span tower 2 adalah rata-rata dari jarak (1 – 2) dan (2 – 3)

$$\begin{aligned}
 L_2 &= (0,3356 + 0.3468)/2 \text{ kilometer} \\
 &= 0,3412 \text{ kilometer}
 \end{aligned}$$

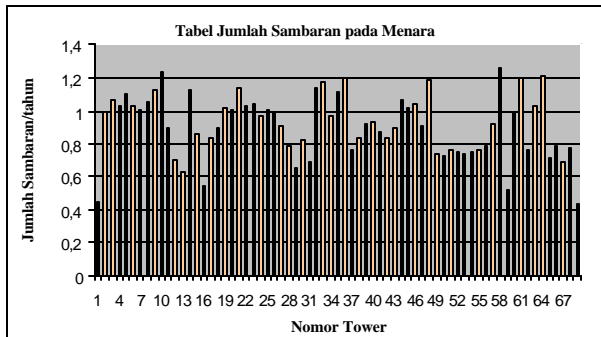
luas daerah perlindungan span menara 2 (A_2) adalah :

$$\begin{aligned}
 A_2 &= W_2 \times L_2 \\
 &= 0,21228 \text{ km} \times 0,3412 \text{ km} \\
 &= 0,072429994 \text{ km}^2
 \end{aligned}$$

nilai sambaran pada struktur (N_D) dapat diketahui.

$$\begin{aligned}
 N_D &= 0,15.IKL.A \\
 &= 0,15.(91).(0,032485566) \\
 &= 0,988669415 \text{ sambaran per tahun}
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan untuk menara yang lain ditunjukkan pada grafik berikut :



Gambar 5. Jumlah sambaran petir berdasar rumusan whitehead

Pada tower yang tinggi dan memiliki jarak antar menara yang lebar, sambaran petir yang mengenai tower tersebut akan semakin banyak. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah sambaran yang mengenai menara dipengaruhi oleh tinggi menara dan lebar span (jarak antar menara). Semakin tinggi menara maka lebar daerah perlindungan semakin besar, sehingga luasan daerah perlindungan antar menara juga lebar. Pada daerah yang lebar kemungkinan petir menyambar daerah tersebut juga akan semakin tinggi. Kategori sambaran sedang dan tinggi ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 1. Kategori banyak sambaran petir pada tower sebelum dipasang penangkal petir

Kategori	Menara
Sedang ($N_D = 0,91$ /tahun)	2, 24, 34, 39, 40, 57, 60
Tinggi ($N_D = 1,00$ /tahun) (Perlu dipasang Lightning Masts)	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 32, 33, 35, 36, 44, 45, 46, 48, 58, 61, 63, 64

Untuk menara yang memiliki kategori sambaran petir per tahun yang tinggi maka lightning masts perlu ditambahkan untuk menghindari sambaran petir pada kawat fasa (*shielding failure*).

C. Perhitungan Jumlah Sambaran Petir Berdasar Metode Luasan Atraktif

Luasan atraktif ekuivalen merupakan luas daerah perlindungan yang dibentuk oleh lightning masts yang memiliki kemungkinan terkena sambaran petir dengan frekuensi yang sama pada obyek. Untuk penghitungan luasan atraktif ekuivalen, parameter yang diperlukan adalah :

1. radius proteksi lightning masts, R_a
2. ketinggian lightning masts, h
3. fungsi probabilitas kerapatan arus petir $f(i)$
4. nilai median arus petir, \bar{I}
5. standar deviasi logaritma natural (\ln) arus petir σ
6. fungsi distribusi arus petir, $P(i)$

Untuk menghitung luasan ekuivalen digunakan persamaan (9)

$$A_{eq} = 0,31.p(h+15)^{4/3} \cdot \exp \left[-\frac{\ln^2 \bar{I}}{2.s^2} + \frac{s^2}{2} \left(\frac{4}{3} + \frac{\ln \bar{I}}{s^2} \right)^2 \right]$$

untuk nilai $\bar{I} = 31$ kA dan $\sigma = 0,7368$ maka didapatkan nilai A_{eq} :

$$A_{eq} = 153(h+15)^{4/3} \text{ m}^2$$

dengan menggunakan persamaan (5) jumlah sambaran per tahun untuk suatu lightning masts dengan ketinggian (h) dapat dinyatakan dengan :

$$N_D = 153 \times 10^6 N_g (h+15)^{4/3}$$

Dimana di Indonesia

$$N_g = 0,15 \text{ IKL}$$

Apabila memperhatikan fungsi probabilitas $P(i_{min} < i < i_{max})$

$$P(i_{min} < i < i_{max}) = \int_{i_{min}}^{i_{max}} f(i).di$$

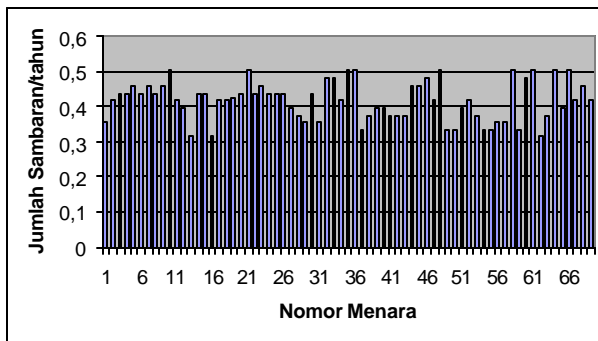
berdasarkan rumusan IEEE Working Group :

$$P(i) = \frac{1}{1 + (i/\bar{I})^{2,6}}, f(i) = -\frac{dP}{di} = \frac{2,6}{\bar{I}^{2,6}} \cdot \frac{i^{2,6}}{[1 + (i/\bar{I})^{2,6}]^2}$$

dari perhitungan pada persamaan (3.9) menggunakan fungsi distribusi arus ini untuk $P(1 \text{ kA} < i < 500 \text{ kA}) = 0,999$ menghasilkan :

$$A_{eq} = 147(h+15)^{4/3} \text{ m}^2$$

rumusan diatas tidak jauh berbeda dengan rumusan A_{eq} sebelumnya, sehingga dapat diambil satu dari kedua rumusan diatas. Hasil perhitungan jumlah sambaran petir pada menara transmisi Ungaran – Krpyak adalah sebagai berikut :



Gambar 6. Jumlah sambaran petir berdasar metode luasan atraktif

D. Penentuan Kebutuhan akan Proteksi Petir Berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP)

Dengan menggunakan data hari guruh di Semarang dan keadaan lokasi jaringan transmisi Ungaran – Krapyak, maka dapat dilakukan penentuan jenis kategori menara berdasar pada Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP) [6]. Untuk tower transmisi dapat dikategorikan :

Tabel 2 Deskripsi tower nomor 2 transmisi Ungaran – Krapyak berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP)

Indeks	Deskripsi	Bobot
A	Obyek yang isinya cukup penting	2
B	Bangunan kerangka beton atau rangka besi	1
C	Tinggi struktur 38 meter	6
D	Di kaki bukit (bukit Ungaran)	1
E	Hari guruh per tahun 91	6

Sehingga diperoleh :

$$R = A + B + C + D + E = 2 + 1 + 6 + 1 + 6 = 16$$

Dengan nilai $R > 14$, menunjukkan bahwa menara transmisi nomor 2 **sangat dianjurkan** dipasang sistem penangkal petir.

Untuk tower nomor 51 sampai 69 berada pada lokasi mendarat. Sehingga indeks D untuk tower tersebut akan bernilai nol. Menurut hasil perhitungan berdasar Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIP) diatas dapat dilihat bahwa semua menara sangat dianjurkan untuk dipasang penangkal petir. Hal tersebut disebabkan karena nilai kategori struktur pada Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP) didasarkan pada pertimbangan kegunaan obyek, bahan, ketinggian obyek dan lokasi obyek berada

E. Perhitungan Besarnya Kebutuhan Sistem Penangkal Petir pada Menara Transmisi Berdasarkan *National Fire Protection Association* (NFPA) 780

Dengan menggunakan data hari guruh di Semarang dan keadaan lokasi transmisi Ungaran – Krapyak, maka untuk tower transmisi dapat dikategorikan :

Tabel 3 Kategori tingkat kebutuhan penangkal petir berdasarakan *National Fire Protection Association* (NFPA) 780

Indeks	Deskripsi	Bobot
A	Struktur ramping dan tinggi (menara)	10
B	Struktur logam yang terhubung secara elektrik	1
C	Lokasi obyek dapat diperpanjang sampai lebih dari 15,2 m diatas permukaan tanah	10
D	Pada sisi bukit	2
E	Peralatan operasi yang sensitif	9
F	Isokeraunik Level 91	1

Sehingga diperoleh :

$$R = \frac{A + B + C + D + E}{F} = \frac{10 + 1 + 10 + 2 + 9}{1} = \frac{32}{1} = 32$$

Dengan nilai $R > 7$, menunjukkan bahwa menara transmisi masuk pada kategori sangat memerlukan sistem penangkal petir.

F. Penentuan Menara yang Memungkinkan Untuk Pemasangan *Lightning Masts* Pada Jalur Ungaran – Krapyak.

Pada perhitungan sebelumnya dapat diketahui jumlah sambaran petir per tahun pada tiap-tiap menara. Dari perhitungan tersebut maka kita dapat mengetahui menara yang mengalami sambaran petir paling tinggi dan tingkat kebutuhan akan penangkal petir pada menara tersebut. Pada kenyataannya tidak bisa asal memasang penangkal petir pada menara tertentu tanpa mempertimbangkan nilai tahanan kaki menara. Berikut akan ditentukan kemungkinan pemasangan penangkal petir pada tiap-tiap menara dengan mempertimbangkan nilai tahanan kaki menara tersebut, dengan asumsi bahwa nilai tahanan menara maksimum untuk dapat dipasang *lightning masts* adalah sebesar 0,5 ohm. Apabila tahanan kaki menara lebih dari nilai tersebut maka menara tidak dapat dipasang *lightning masts*.

Tabel Menara yang dapat dipasang *Lightning Masts*

Nomor Menara	Keterangan
1 14, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 31, 32, 33, 35, 36, 44, 45, 46, 48, 53, 58, 63, 64, 65, 66, 69	Jumlah sambaran tinggi
1, 9, 31, 53, 65, 69	Belokan (Aspan)

Tabel Menara yang tidak memungkinkan dipasang Lightning Masts

Nomor Menara	Keterangan
3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 61	resistansi tinggi

V. KESIMPULAN

1. Sebelum dipasang *lightning masts*, sistem perlindungan terhadap sambaran petir telah menggunakan kawat tanah sehingga jumlah sambaran petir yang dialami tiap menara per tahun ditentukan oleh ketinggian kawat tanah dan nilai isokeraunik level (IKL). Setelah dipasang *lightning masts* pada menara maka akan mengubah nilai ketinggian perlindungan (h_g) dan jarak antar kawat tanah ($b = 0$).
2. Luasan atraktif suatu obyek (A_{eq}) adalah daerah disekitar obyek yang memiliki frekuensi sambaran petir yang sama tiap tahun. Luasan atraktif ini dipengaruhi oleh bentuk obyek, ketinggian obyek dan sistem perlindungan terhadap sambaran petir pada obyek tersebut.
3. Pada hasil perhitungan tingkat kebutuhan akan penangkal petir berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP) dan *National Fire Protection Association* (NFPA) 780 menunjukkan bahwa semua menara transmisi Ungaran – Krpyak memerlukan penangkal petir.
4. Penentuan menara yang memungkinkan untuk pemasangan *lightning masts* pada Transmsi 150 KV jalur ungaran – krpyak didasarkan pada kategori jumlah sambaran petir per tahun berdasar luas daerah bayang-bayang saluran transmisi, luas atraktif (A_{eq}), jalur atau track menara dan nilai tahanan kaki menara. Untuk nilai tahanan menara yang besar maka tidak mungkin dilakukanya pemasangan *lightning masts* pada menara tersebut.
5. Pada menara nomor : 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, dan 61. Berdasarkan perhitungan, menara tersebut mengalami jumlah sambaran petir per tahun yang tinggi, namun nilai tahanan kaki menara pada menara tersebut cukup tinggi. Apabila petir menyambar menara tersebut, arus surja petir akan sulit untuk diketanahkan karena tahanan kaki menara yang tinggi. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya *back flashover* (BFO) atau lompatan denyar balik dari kawat tanah menuju kawat fasa.

REFERENSI

- [1]. Anderson, J.G. *Transmission Lines Reference Book 345 KV and Above*, Second Edition, Palo Alto California.1962
- [2]. *IEC 1024-1-1 : Protection of Structure Against Lightning*, International Electrotechnical Commision 81.
- [3]. Hutaaruk TS, Ir, M.E.E, Gelombang Berjal an dan Proteksi Surja. Erlangga. 1991.
- [4]. Reynaldo Zoro, Dr.Ir. Workshop Sistem Proteksi dan Deteksi Petir. PLN Udiklat Semarang. 2004
- [5]. Syahrawardi, Bonggas Ltobing & Sri Widodo. Korelasi Ketinggian Lightning Masts Terhadap Radius Proteksi. Seminar dann Workshop Tegangan Tinggi. 2002.
- [6]. Abdul Syakur, Tedjo Sukmadi, Hermawan. Pengaruh Konfigurasi Menara Tranmisi Terhadap Kegagalan Perisaian. Seminar dann Workshop Tegangan Tinggi. 2002
- [7]. Pranyoto, Ir. Ruang Proteksi Penangkal Petir. Energi & Listrik Volume XII September 2002
- [8]. Agung Nugroho, Ir. Kegagalan Perisaian Petir Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 KV. 2004
- [9]. Emmy Hosea.Penerapan Metode Jala, Sudut Proteksi dan Bola Bergulir Pada sistem proteksi Petir Eksternal yang Diaplikasikan pada Gedung W Universitas Kristen petra. 2004