

## **ANALISIS UNJUK KERJASALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI 500kV 2 SALURAN DAN 4 SALURAN DI SUMATERA**

Andi Junaidi

Program Studi Magister Teknik Elektro, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika  
Institut Teknologi Bandung  
anjunalkarim@gmail.com

Abstrak: Energi listrik sangat penting peranannya dalam kehidupan manusia. Pertumbuhan penduduk yang pesat mengakibatkan meningkatnya kebutuhan energi listrik di Indonesia. Oleh karena itu PLN sebagai penyedia energi listrik semaksimal mungkin untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Salah satu langkah yang dilakukan yaitu dengan merencanakan membangun saluran transmisi 500 kV di Sumatera. Dengan adanya rencana pembangunan saluran transmisi tersebut, perlu juga dilakukan perencanaan penyaluran energi listrik yaitu dengan menganalisis keandalan saluran transmisi terhadap gangguan sambaran petir. Dalam Tugas Akhir ini akan dibahas tentang perencanaan pembangunan saluran transmisi 500 kV dengan membandingkan 2 model menara saluran transmisi. Model saluran yang pertama adalah saluran transmisi dengan 2 saluran dan 2 kawat tanah, dimana ketinggian menara tersebut adalah 71,625 meter. Sedangkan model menara yang kedua adalah saluran transmisi dengan 4 saluran dan 2 kawat tanah, dengan ketinggian menara transmisi 108.545 meter. Dari kedua jenis menara transmisi tersebut akan dianalisis lightning performance terhadap sambaran petir dari masing-masing menara transmisi. Saluran transmisi 500 kV ini diharapkan dapat mensuplai energi listrik dan meningkatkan keandalan sistem kelistrikan di daerah Sumatera yang merupakan daerah dengan kebutuhan energi listrik yang cukup tinggi.

Kata kunci : transmisi 500 kV, lightning performance, menara transmisi



## **I. PENDAHULUAN**

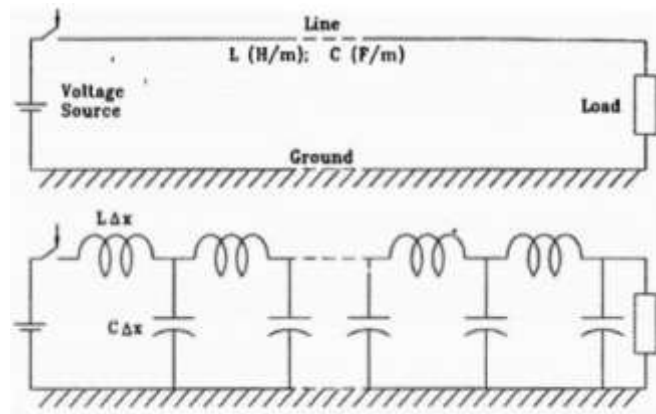
Energi listrik sangat penting peranannya dalam kehidupan manusia. Pertumbuhan penduduk yang pesat mengakibatkan meningkatnya kebutuhan energi listrik. Oleh karena itu PLN sebagai penyedia energi listrik semaksimal mungkin untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Salah satu langkah yang dilakukan yaitu dengan merencanakan membangun saluran transmisi di Sumatera. Dengan adanya rencana pembangunan saluran transmisi tersebut, perlu juga dilakukan kajian untuk pemilihan saluran transmisi yang handal dan memiliki kinerja yang baik. Pada sistem SUTET 500 kV menjadi objek yang mudah terkena sambaran petir, karena ketinggiannya. Sementara itu SUTET 500 kV merupakan saluran yang vital dalam transmisi daya sistem tenaga listrik yang akan dibangun di pulau Sumatera. Sehingga tingkat keandalannya harus tinggi terutama terhadap sambaran petir, maka perlu dikaji lebih lanjut untuk meningkatkan keandalan saluran transmisi sehingga tidak mudah terjadi gangguan.

## **II. METODE PENELITIAN**

Pengaruh sambaran petir pada saluran transmisi sangatlah besar terhadap sistem tenaga listrik. Hal ini akan menyebabkan beberapa fenomena yang harus diperhatikan dalam keamanan dan keandalannya, yaitu proteksi surja, koordinasi isolasi, perlindungan, keamanan dari peralatan sistem tenaga dan personil, serta menyangkut masalah kontinuitas energi listrik. Oleh karena itu, pertama kita harus memperkirakan area dan jumlah surja petir pada sistem tenaga listrik.

Menurut Pritindra Chowdhuri [1] sebuah rugi-rugi dan saluran transmisi yang seragam dapat dinyatakan dengan induktansi yang seragam dan parallel dengan distribusi kapasitor yang seragam, seperti pada gambar dibawah ini:





Gambar II.1. Skematik rugi-rugi pada saluran transmisi

Pada gambar diatas diketahui dimana, L adalah induktansi saluran per meter, C adalah kapasitansi saluran terhadap tanah per meter.

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2h}{r}, (H/m), C = \frac{k 10^{-9}}{18 \ln \frac{2h}{r}}, (F/m) \quad (2.1)$$

Dimana, h adalah tinggi saluran diatas tanah (m), r adalah jari-jari konduktor (m), dan k adalah konstanta dielektrik medium (k=1 untuk udara)

Menurut Anderson[2] untuk jaringan dengan gabungan konduktor (bundled konduktor), r dalam persamaan diubah dengan jari-jari ekuivalen konduktor saluran:

$$R_{eq} = \sqrt[N]{r_1 r_2 r_3 \dots r_n} \quad (2.2)$$

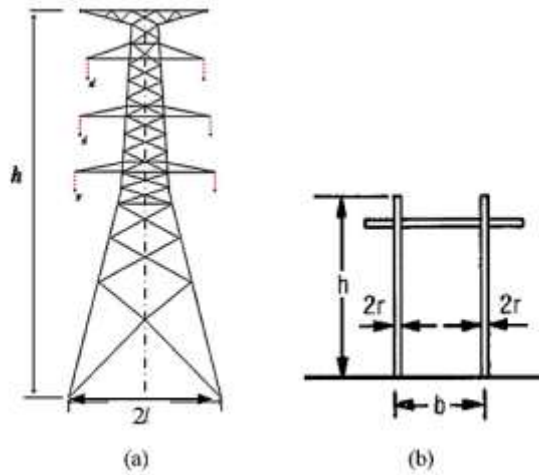
Dimana,  $R_{eq}$  adalah jari-jari ekuivalen konduktor, N adalah jumlah subkonduktor per fasa,  $r_1$  adalah jari-jari subkonduktor 1 dan  $r_n$  adalah jarak dari konduktor 1 ke konduktor n

Tabel II.1. Nilai  $Z_0$  menurut IEC publication 71-2 untuk korona polaritas negatif

Jumlah Subkonduktor	$Z_0$ yang diasumsikan ( $\Omega$ )
1	450
2	350
3 atau 4	320
6 atau 8	300



Impedansi surja menara pada gambar dibawah ini menurut Anderson [2] dapat dimodelkan sebagai berikut



Gambar II.2. Tipikal konfigurasi menara (a) Kelas (Cone), (b) kelas 2 (H-Frame)

Impedansi surja menara kelas 1 (Cone) didapatkan menggunakan persamaan:

$$Z_T = 30 \ln \left[ \frac{2(h^2 + l^2)}{l^2} \right] \quad (2.3)$$

Sedangkan impedansi menara kelas 1 (H-Frame) adalah:

$$Z_T = \frac{1}{2} \cdot (Z_s + Z_m) \quad (2.4)$$

$$Z_s = 60 \ln \left( \frac{h}{r} \right) + 90 \left( \frac{r}{h} \right) - 60$$

$$Z_m = 60 \ln \left( \frac{h}{b} \right) + 90 \left( \frac{b}{h} \right) - 60$$

Impedansi surja kawat telah ditentukan dari konfigurasi dan jari-jarinya. Untuk satu kawat tanah impedansi surjanya adalah [3]

$$Z_g = 60 \cdot \ln \left( \frac{2h}{r} \right) \quad (2.5)$$

Jika dua kawat tanah, maka impedasni surjanya:

$$Z_g = 60 \cdot \ln \left( \frac{2h}{\sqrt{d} \cdot r} \right) \quad (2.6)$$

Dimana, h adalah tinggi kawat tanah diatas permukaan tanah (m), d adalah jarak antara kawat tanah (m), r adalah jari-jari kawat tanah (m).

A. Sambaran pada kawat fasa

Jika sambaran tersebut mengenai kawat fasa pada suatu titik maka akan timbul gelombang berjalan kedua arah yang berlawanan pada saluran tersebut. Tegangan yang terjadi pada suatu titik disaluran tersebut dan dibaca isolator adalah [3]:

$$V = \frac{Z \cdot I}{2} \tag{2.7}$$

Dimana, Z adalah Impedansi surja konduktor, I adalah arus puncak petir.

B. Sambaran pada menara

Menara dapat direpresentasikan sebagai impedansi surja atau induktansi. Bila tiang direpresentasikan sebagai induktansi, maka ada penyesuaian nilai impedansi surja kawat tanah ( $Z_g$ ) dan nilai tahanan pentanahan ( $R_0$ )[4]

$$Z'_g = \frac{2 Z_g Z_T}{Z_g + 2 Z_T} \tag{2.8}$$

$$R'_0 = \frac{R \cdot Z_T}{Z_T - R} \tag{2.9}$$

Dimana,  $Z_g$  adalah impedansi surja kawat tanah,  $Z_T$  adalah impedansi surja menara,  $R_0$  adalah nilai pentanahan tower. Impedansi gelombang menara didapatkan dengan menggunakan persamaan:

$$Z_w = \left( \frac{2 Z_g^2 Z_T}{(Z_g + 2 Z_T)^2} \right) \left( \frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \tag{2.10}$$

Faktor dumping menara:

$$\psi = \left( \frac{2 Z_T - Z_g}{2 Z_T + Z_g} \right) \left( \frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \tag{2.11}$$

Maka akan didapatkan nilai induktansi menara:

$$L = \left( \frac{Z'_g + 2 R'_0}{Z'_g} \right)^2 \frac{2 Z_w \tau_i}{(1 - \psi)^2} \tag{2.12}$$

Untuk  $R \neq 0$  dan  $L = Z_t \tau_t$  untuk  $R=0$

Dimana, R adalah tahanan pentanahan tipikal,  $R_0$  adalah tahanan pentanahan penyesuaian,  $Z_g$  adalah Impedansi surja kawat tanah,  $Z'_g$  adalah impedansi surja kawat tanah penyesuaian,  $Z_T$  adalah impedansi surja menara,  $Z_w$  adalah Impedansi surja,  $\psi$  adalah factor dumping menara,  $\tau_i$  adalah waktu tempuh gelombang petir dimenara.



Tegangan lebih yang terjadi pada menara sebagai impedansi surja berbanding lurus dengan arus puncak petir, sedangkan untuk menara sebagai induktansi akan berbanding lurus dengan kecuraman arus. Pada kejadian ini, saluran dianggap tanpa kawat tanah ( $Z_g=0$ ) sehingga tegangan pada menara adalah

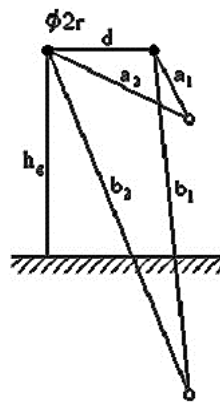
$$V = I.(Z_i + R_0) = I.R_0 + L \frac{di}{dt} + V_s \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \tag{2.13}$$

Dimana,  $V$  adalah tegangan yang terjadi pada tiang (kV),  $I$  adalah arus puncak petir ke tiang (kA),  $di/dt$  adalah kecuraman arus puncak (kA/ $\mu$ s),  $L$  adalah induktansi tiang ( $\mu$ H),  $R$  adalah tahanan kaki tiang ( $\Omega$ ),  $V_s$  adalah tegangan sistem

C. Sambaran pada kawat tanah

Jika kawat tanah disambar petir maka arus tersebut sebagian akan dialirkan ke tiang. Besarnya tegangan lebih yang timbul pada isolator adalah

$$V = K.V_M \tag{2.14}$$



Gambar II.3 Bayang-bayang kawat pada saluran multikonduktor

Dimana  $K$  adalah faktor kopling kawat tanah dan kawat fasa

$$K = \frac{\ln\left(\frac{b_1}{a_1}\right)}{\ln\left(2 \cdot \frac{h_g}{r}\right)} \text{ untuk satu kawat tanah} \tag{2.15}$$

$$K = \frac{\ln\sqrt{\frac{(b_1 \cdot b_2)}{(a_1 \cdot a_2)}}}{\ln\left(2 \cdot \frac{h_g}{\sqrt{d} \cdot r}\right)} \text{ untuk dua kawat tanah} \tag{2.16}$$



Dimana  $a_n$  adalah jarak antara kawat tanah dengan kawat fasa (m),  $b_n$  adalah jarak antara kawat tanah dengan bayangan kawat fasa (m),  $h_g$  adalah tinggi kawat tanah (m),  $d$  adalah jarak antar kawat tanah (m),  $r$  adalah jari-jari kawat tanah (m)

Sambaran petir ke tanah yang mungkin mengenai suatu struktur ditentukan dengan mengetahui daerah bayangbayang struktur tersebut. Menurut Hileman [3]:

$$N_L = N_g \left( \frac{28 \cdot h^{0.6} d}{10} \right)$$

Di mana,  $N_L$  adalah jumlah sambaran yang mungkin mengenai struktur (sambaran/100km/tahun),  $N_g$  adalah Number Flash to Ground, yakni jumlah sambaran petir ke tanah yang dihitung dalam : jumlah sambaran/ 100km/ tahun,  $h$  adalah tinggi struktur (m),  $d$  adalah lebar struktur (m)

Ketika petir menyambar kawat tanah maka arus tersebut sebagian akan dialirkan ke menara, maka timbul tegangan tinggi pada isolator, apabila tegangan tinggi ini melampaui tegangan tembus isolator maka akan terjadi lewat denyar balik. Parameter-parameter yang harus diketahui menurut Hileman [3] dalam menghitung rasio lewat denyar balik (*Back flashover Rate*) adalah:

Induktansi menara (L)

$$L(R) = (0.5638 e^{0.005671 \cdot R} + 0.03546 e^{0.03749 \cdot R})h \tag{2.17}$$

Dimana,  $R$  adalah Tahanan kaki menara (ohm),  $h$  adalah Tinggi menara (m)

Arus petir minimum yang menyebabkan lewat denyar balik,  $I_f$

$$I_f = \frac{(1.5 \text{ CFO}/k) - L \, di/dt}{R} \dots \dots (kA) \tag{2.18}$$

Dimana,  $k$  adalah factor kopling kawat fasa dengan kawat tanah,  $L$  adalah Induktansi menara ( $\mu H$ ),  $R$  adalah Tahanan kaki menara (ohm), CFO adalah Tegangan kritis terjadinya lewat denyar (kV), dan  $di/dt$  adalah kecuraman arus (kA)

Probabilitas peralihan lewat denyar menjadi gangguan,

$$\eta = 0.3196 \cdot \ln(E) - 0.6578 \tag{2.20}$$

Back Flashover Ratio (BFOR) untuk setiap kawat fasa

$$\text{BFOR} = \eta \cdot P \cdot L \dots \dots (\text{gangguan}/100\text{km}/\text{tahun}) \tag{2.21}$$

Total Back Flashover Ratio (BFOR)



$$BFOR_{total} = \sum BFOR_n \dots (\text{gangguan}/100\text{km}/\text{tahun})$$

Untuk harga tahanan kaki yang beragam, maka BFOR total adalah jumlah dari BFOR sebagai fungsi tahanan tanah dikali dengan prosentase keberadaannya (Q)

$$BFOR_{total} = \sum_{i=1}^n [BFOR(R_i)Q(R_i)] (\text{gangguan}/100\text{km}/\text{tahun})$$

#### D. Rasio Kegagalan Perlindungan

Kegagalan Perlindungan menurut Anderson adalah gagalnya kawat tanah melindungi kawat fasa dari sambaran petir yang disebabkan ketidaksempurnaan peletakkan kawat tanah pada menara. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan metode Anderson [2] yang digunakan sebagai standar IEEE [5].

Gradien batas tegangan tembus isolator menurut standart IEEE (5) adalah:

$$E_0 = \frac{V_{LN}}{n \cdot s} \tag{2.19}$$

Dimana,  $V_{LN}$  adalah Tegangan sistem fasa tanah, n adalah jumlah isolator (buah), s adalah Creepage distance (m). Kemudian nilai probabilitas peralihan lewat denyar menjadi gangguan dapat dihitung dengan persamaan:

$$\eta = 0.3196 \cdot \ln(E) - 0.6578 \tag{2.23}$$

Maka jumlah gangguan akibat kegagalan perlindungan, SFFOR adalah

$$SFFOR = 0.5 \eta P(I_{max}) X_s 0.1 N_g (\text{gangguan}/100\text{km}/\text{tahun}) \text{ dan}$$

$$SFFOR_{total} = \sum SFFOR (\text{gangguan}/100\text{km}/\text{tahun})$$

#### E. Lightning Performance pada Saluran Transmisi

Pada saluran transmisi tegangan ekstra tinggi, gangguan akibat sambaran induksi sangat kecil kemungkinannya hal ini dikarenakan tegangan induksi besarnya antara 100-200 kV dan muka gelombangnya lebih dari 10  $\mu$ s dan karena itu diabaikan. Sebagai acuan untuk menghitung sifat kerja saluran transmisi tegangan ekstra 500 kV Sumatera. Tegangan lebih petir pada SUTET dapat menimbulkan kegagalan, kegagalan tersebut ditunjukkan dengan angka gangguan yang dinyatakan dalam Flashover Rate (FOR), yang menurut IEEE 1243 [5], yaitu jumlah terjadinya lewat denyar pada isolator akibat tegangan lebih petir pada saluran udara. Bila kinerja petir sama dengan FOR atau diasumsikan setiap kali terjadi flashover terjadi gangguan, maka angka yang dihitung adalah kemungkinan





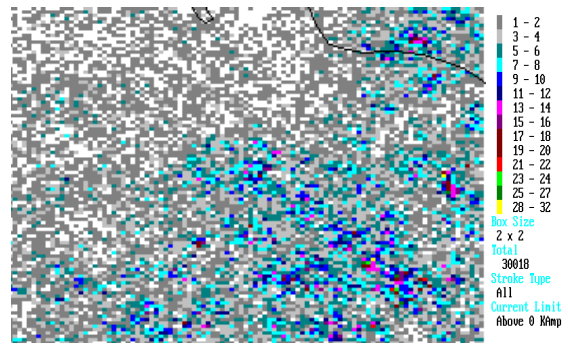
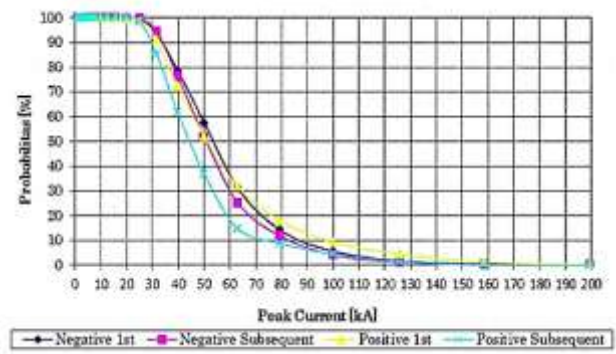
terburuk. Angka gangguan spesifik, *Lighting Performance*(LP) merupakan gangguan antara gangguan yang disebabkan oleh Shielding Failure Flashover Rate (SFFOR) dan *Back Flashover Rate*(BFOR) sehingga dapat dituliskan:

$$LP = SFFOR + BFOR$$

### **III. HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **A. Data Petir**

Data petir didaerah yang di teliti diambil dari data petir historik yaitu data sambaran petir ke tanah yang direkam oleh sistem deteksi petir JADPEN (Jaringan Data Petir National) yang dioperasikan oleh Institut Teknologi Bandung. Jaringan ini menggunakan teknologi Time of Arrival (TOA) dengan nama Penentu Posisi dan Pelacak Sambaran Petir yang dikenal dengan nama LPATS (Lightning Position and Tracking System) produksi Atmospheric Research Institute, Inc, USA. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data historik yang diambil pada saat LPATS melakukan pengukuran antara tahun 31 Oktober 2001 - 1 Januari 2002. Dari data historik ini diperoleh parameter petir, antara lain arus puncak petir, probabilitas kejadian dan kepadatan sambaran ke tanah. Untuk mengetahui pengaruh petir terhadap saluran dilakukan pemetaan menggunakan data GPS (Global Positioning System) SUTET 500 kV PT.Caltex Pacific Indonesia (PT.CPI) yang kemudian dijadikan batasan daerah yang akan diteliti.

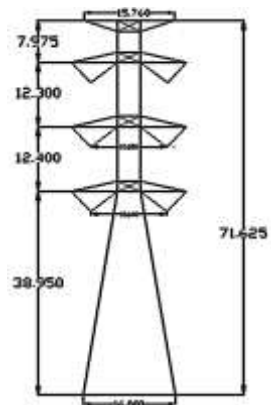


Gambar III.1 Probabilitas arus puncak petir

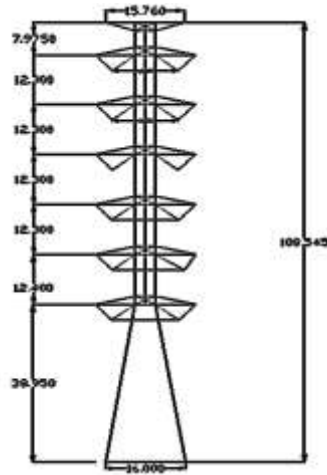
Gambar III.2 Kerapatan sambaran petir

B. Data Menara

Data SUTET ini mempunyai dua macam konfigurasi. Konfigurasi yang pertama yaitu satu menara untuk empat saluran dan mempunyai ketinggian 108.545 meter. Sementara untuk konfigurasi yang kedua adalah satu menara untuk dua saluran dengan ketinggian menara 71.625 meter. Jarak antar menara untuk kedua jenis konfigurasi menara ini adalah 400 meter. Material konduktor yang digunakan adalah ACSR Gannet dengan diameter 23.55 mm. Sedangkan material kawat tanah menggunakan Galvanis Steel Wire 2 buah dengan jarak antar kawat tanah 15.76 meter. Besarnya andongan pada konduktor adalah 12.1 meter.



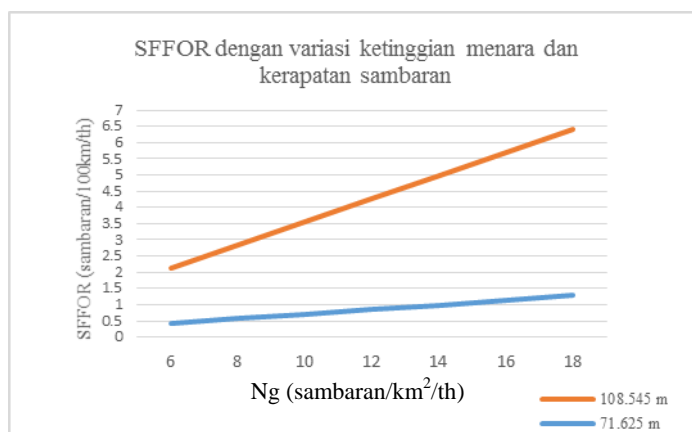
Gambar III.3 Konfigurasi SUTET 500 kV dua saluran



Gambar III.4 Konfigurasi SUTET 500 kV empat saluran

C. Perhitungan Kegagalan Perlindungan Kawat Tanah.

Hasil perhitungan didapat arus minimum yang dapat menyebabkan terjadinya kegagalan perlindungan (*Shielding Failure*) adalah 14,86 kA untuk menara dengan ketinggian 71.625, sedangkan untuk menara dengan ketinggian 108.545 meter arus minimum yang dapat menyebabkan terjadinya kegagalan perlindungan adalah 13.46 kA. Dari gambar 10 dapat diketahui bahwa semakin tinggi menara maka rasio kegagalan perlindungannya makin besar, untuk menara dengan nilai ketinggian yang semakin besar.



Gambar IV.1 SFFOR dengan variasi kerapatan sambaran dan ketinggian menara

sesuai dengan data perhitungan menara 71.625 meter rasio kegagalan perlindungan yang baik, hal ini didapatkan dari hasil perhitungan bahwa nilai rasio kegagalan perlindungannya yaitu 0.851 gangguan/100 km/tahun. Sedangkan untuk ketinggian 108.545 meter rasio kegagalan perlindungannya meningkat menjadi 3.41 gangguan/100 km/tahun.

D. Sambaran Langsung pada Kawat Tanah

Dari gambar dapat dilihat terjadinya lewat denyar balik pada isolator akibat sambaran petir pada kawat tanah terjadi pada tahanan tanah sama dengan atau lebih besar dari 25 ohm, isolator yang sering terganggu adalah isolator pada fasa A. Hal ini menunjukkan bahwa sambaran pada kawat tanah di span antar menara tidak menjadi penyebab yang dominan terjadinya lewat denyar balik karena jika terjadi sambaran pada kawat tanah maka arus akan terbagi menjadi dua ke arah yang berlawanan menuju masing-masing menara yang saling berhadapan, sehingga besarnya lebih kecil dibanding sambaran langsung pada menara. Dari gambar 14 untuk BFOR total pada daerah dengan kerapatan sambaran maksimum 12 sambaran/km<sup>2</sup>/tahun dengan harga tahanan kaki menara sebesar 10 ohm adalah 0.7 kali gangguan/100km/tahun. Gambar 15. BFOR terhadap tahanan kaki menara pada kerapatan sambaran 12 sambaran/km<sup>2</sup>/tahun untuk berbagai ketinggian menara.

Tabel IV.6. BFOR total dengan beberapa tahanan kaki menara dengan tinggi 71.625 meter pada daerah dengan kerapatan sambaran maksimum 12 sambaran/km<sup>2</sup>/tahun.

No	Tahanan Kaki menara (ohm)	BFOR total (gangguan/100km/tahun)
1	1	0.0000
2	5	0.0003
3	10	0.0026
4	15	0.0090
5	20	0.0223

Pada hasil perhitungan maka kita akan mendapatkan nilai Flashover Rate untuk menara dengan ketinggian 71.625 meter dengan tahanan tanah sebesar 20 ohm adalah sebagai berikut:

$$FOR = 0.851 + 0.022 = 0.873 \text{ sambaran/100 km/ tahun}$$

Sedangkan untuk menara dengan ketinggian 108.545 meter dengan nilai tahanan tanah yang sama akan didapatkan nilai Flashover ratenya adalah:

$$FOR = 3.41 + 0.04 = 3.45 \text{ sambaran/ 100 km/ tahun}$$

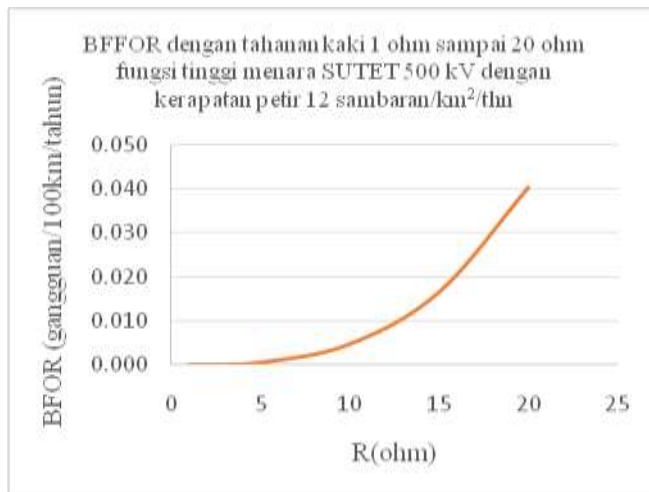


Gambar IV.2. BFOR untuk ketinggian menara 71.625 m dengan tahanan kaki menara 1 ohm sampai 20 ohm pada kerapatan sambaran 12 sambaran/km<sup>2</sup>/thn.

Tabel IV.6. BFOR total dengan beberapa tahanan kaki menara dengan tinggi 108.545 meter pada daerah dengan kerapatan sambaran maksimum 12 sambaran/km<sup>2</sup>/tahun.

No	Tahanan Kaki menara (ohm)	BFOR total (gangguan/100km/tahun)
1	1	0.0000
2	5	0.0005
3	10	0.0047
4	15	0.0165
5	20	0.0404





Gambar IV.3. BFOR untuk ketinggian menara 108.545 m dengan tahanan kaki menara 1 ohm sampai 20 ohm pada kerapatan sambaran 12 sambaran/km<sup>2</sup>/thn.

Untuk menghitung kinerja SUTET 500 kV sehingga dapat dikualifikasikan pada kinerja tertentu untuk mengetahui keandalannya sehingga dapat dilakukan langkah-langkah improvementnya. Berikut ini tabel penilaian tingkat keandalan saluran dan kualifikasi sebuah transmisi:

Tabel IV.7. Penilaian Lightning Performance

<i>Performance Order</i>	<i>Standard Tripout (100km/year) for THD = 40 or Ng=5.8 flash/km/year</i>	<i>Qualitative Comments</i>
-4	0-0.0625	"Lightning proof"
-3	0.125	Superior grounding and shielding
-2	0.25	Excellent grounding and shielding
-2	0.5	Good grounding and shielding
0	1	Good or fair grounding ; good or fair shielding
1	2	Good grounding ; fair shielding

2	4	<i>Fair grounding ; poor shielding</i>
3	8	<i>Poor grounding and/or poor shielding</i>
4-5	16-32	<i>Poor grounding ; poor shielding ; low insulation level or unshielded lines</i>

Bila FOR yang dicapai SUTET ini menurut kesimpulan diatas dengan ketinggian menara 71.625 meter adalah:  $0.87 \text{ gangguan}/100\text{km}/\text{tahun}$  dengan  $N_g=5.8$  (seperti tabel) maka FOR adalah  $5.8/12 \times 0.873 = 0.42 \text{ gangguan}/100\text{km}/\text{tahun}$ . Nilai lightning Performance nya adalah 0.5 dengan kualifikasi "*good grounding and shielding*". Sedangkan untuk menara dengan ketinggian 108.545 meter adalah:  $3.45 \text{ gangguan}/100\text{km}/\text{tahun}$  dengan  $N_g=5.8$  (seperti tabel) maka FOR adalah  $5.8/12 \times 3.45 = 1.67 \text{ gangguan}/100\text{km}/\text{tahun}$ . Nilai lightning Performance nya adalah 2 dengan kualifikasi "*Good grounding ; fair shielding*".

Tinggi menara mempunyai korelasi dengan besarnya angka SFFOR, menara semakin tinggi maka menara tersebut akan lebih sering mengalami SFFOR, dan kerapatan sambaran juga akan mengakibatkan tingginya nilai SFFOR.

## V. KESIMPULAN

Dari hasil evaluasi dan observasi data dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. SUTET 500 kV di Sumatera dengan ketinggian 71.625 meter mempunyai nilai lightning performance sebesar 0.5 sehingga menurut standar hal ini memiliki kualifikasi "*Good Grounding and Shielding*".
2. SUTET 500 kV dengan ketinggian 108.545 meter mempunyai nilai lightning performance sebesar 2 sehingga menurut standar hal ini memiliki kualifikasi "*Good Grounding and Fair Shielding*".
3. Tinggi menara mempunyai korelasi dengan besarnya angka SFFOR, menara semakin tinggi maka menara tersebut akan lebih sering mengalami flashover akibat sambaran petir.
4. Semakin tinggi frekuensi terjadi gangguan akan mengakibatkan rendahnya kehandalan saluran transmisi maka dibutuhkan peralatan-peralatan untuk mengurangi gangguan pada saluran transmisi akibat tegangan lebih petir.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chowduri, P., 'Parameters of Lightning Strokes and Their Effects on Power Systems', Proc. of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, 2005. Hileman, A.R., 'Insulation Coordination for Power Systems', Marcel Dekker, Inc., New York, 1999.
- [2] Anderson, J.G., 'Lightning Performance of Transmission Lines', dalam Transmission Lines Reference Book : 345 kV and Above, Bab 12, LaForest, J.J., Editor, Palo Alto, California, 1982, halaman 545 – 597.
- [3] Hileman, A.R.(1999), Insulation Coordination for Power System, Marcel Vekker, Inc., New York
- [4] Hutaeruk, T.S. (1991), Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [5] IEEE, 'IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines', IEEE Standard 1243-1997, Dec. 1997.
- [6] Berger, K., 'The Earth Flash', dalam Lightning Volume 1: Physics of Lightning, Bob Golde, R.H., Editor, Academic Press, London, 1977, halaman 119 – 190.
- [7] Ragaller, K., 'Surge in High Voltage Networks', Plenum Publishing, Co., New York, 1980.
- [8] Whitehead, E.R., 'Protection of Transmission Lines', dalam Lightning Volume 2 : Lightning Protection, Bab 22, Golde, R.H., Editor, Academic Press, London, 1977, halaman 697 – 746.
- [9] Cliff, J.S., 'Insulation Coordination', dalam Lightning Volume 2 : Lightning Protection, Bab 24, Golde, R.H., Editor, Academic Press, London, 1977, halaman 773 – 792.
- [10] Zoro, R., 'Proteksi Terhadap Tegangan Lebih pada Sistem Tenaga Listrik (Surge Protection)', dalam Proteksi Sistem Tenaga Bagian I , ITB, Bandung, 1987.





- [11] Zoro., R., 'Karakteristik Petir dan Kondisi Cuaca di Daerah Tropis: Kasus di Gn. Tangkuban Perahu Indonesia', Disertasi Program Doktor, ITB, Bandung, 1999.
- [12] Kinoshita\_Y., dkk., 'Lightning Surge Response of Actual 500 kV Transmission Tower with Overhead Ground Wires', Proc. 27th International Conference on Lightning Protection, Avignon, 2004, halaman 6b3.
- [13] CIGRE Working Group 01 of study committee 33, 'Guide To Procedures For Estimating The Lightning Performance of Transmission Lines', Electra, Paris, 1991.
- [14] Yoh Yasuda, dkk., 'Lightning Surge Analysis for 500 kV Transmission line using Grounding Model with Dynamic Characteristic', Proc. in International Conference on Power Systems Transients, Montreal, 2005.
- [15] Omura, H., dkk., 'Observation of Lightning Overvoltage at Japanese EHV Station', Proc. 27th International Conference on Lightning Protection, Avignon, 2005, halaman 6P8.
- [16] Hidayat, S., Ishii, M. 'Lightning Discharge on Land and Sea in Indonesia,' Proc in ICPADM 2006, Vol 1, Denpasar Bali. 2006, materi nomor K-7.
- [17] Soetjipto, S., Sunoto, M. A., Iskanto, E., 'Polarity and probability of lightning current magnitude in Java Island of Indonesia', Proc. 8<sup>th</sup> ISH, Yokohama, 1993, materi nomor 17.12.
- [18] Greenwood, A., 'Electrical Transients in Power Systems', Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1991.