

## METODE UNTUK MENGHITUNG GANGGUAN KILAT PADA KAWAT TRANSMISI TEGANGAN TINGGI

T.S. Hutauruk

Bagian Elektroteknik, Dept. Mesin-Elektro.

(Diterima : September 1964)

### ICHTISAR

*Metode AIEE<sup>1</sup> yang lebih dari sepuluh tahun terakhir ini dipakai untuk menghitung gangguan kilat pada kawat transmisi, ternyata tidak dapat lagi dipakai untuk kawat transmisi tegangan tinggi (150 Kv atau lebih). Metode ini memberikan hasil yang terlampau rendah. Metode<sup>2</sup> yang lain (Teori Gelombang Berjalan<sup>2</sup>, Teori Medan<sup>3,4</sup> dan Metode Computer Monte Carlo<sup>5</sup>) telah ditjoba dan memberikan hasil yang lebih memuaskan.*

*Berdasarkan teori<sup>2</sup> yang disebut diatas penulis mentjoba menguraikan satu metode analitis yang dapat dipergunakan untuk computer atau dengan pertolongan mistar hitung.*

### ABSTRACT.

*AIEE method<sup>1</sup> for calculating the lightning outages of transmission lines has been accepted and applied for more than a decade. It is realized that for extra high voltages (150 Kv and higher) this method can no longer be applied. It gives too low values compared to observations. Some other methods (Traveling Wave Theory<sup>2</sup>, Field Theory<sup>3,4</sup> and Monte Carlo Computer Method<sup>5</sup>) have been tried and give more satisfactory results. Based on the theories mentioned above the writer tries to outline an analytical method that can be applied to either computers or by mean of slide rules.*

### PENDAHULUAN :

Kilat adalah pelepasan (discharge) muatan listrik di udara: antara gumpalan<sup>2</sup> embun, antara gumpalan embun dan bumi, atau antara gumpalan embun dan sesuatu benda di bumi. Sering kilat mendatangkan kerugian karena merusakkan benda<sup>2</sup> bahkan mengambil banjak korban manusia. Sampai sekarang belum ada sardjana<sup>2</sup> yang menundjukkan kegunaan kilat bagi kehidupan. Apa yang kita ketahui hanjalah kerusakan<sup>2</sup> yang ditimbulkan olehnja. Kilat itu tidak dapat sebelumnya diramalkan akan besarnja, waktu, frekwensi, dan tempat dimana ia akan melepaskan muatannja dipermukaan

bumi. Sardjana<sup>2</sup> belum mendapat djalan untuk mentjegahnja. Walaupun demikian dengan alat pengaman dapat dikontrol besar enersi kilat jang mengenai sesuatu alat. Salah satu alat pengaman ialah kawat tanah (static wire) untuk melindungi kawat fasa dari kawat transmisi. Karena kilat itu selalu mentjari djalan jang terpendek untuk pelepasan muatan listriknja maka kawat tanah itu harus dibuat lebih tinggi dari kawat fasa.

Tulisan ini bermaksud memberikan suatu tjara menghitung gangguan kilat pada kawat transmisi berdasarkan teori<sup>2</sup> jang telah ada.

Jang dimaksud dengan gangguan kilat pada kawat transmisi ialah gangguan karena kilat menjambar kawat transmisi, baik pada kawat tanah maupun pada kawat fasa, dan menjebabkan terganggunja kawat transmisi itu menghantarkan daja listrik. Satuan gangguan biasanja dipakai djumlah gangguan per 100 km per tahun. Gangguan karena kilat ini biasanja dibagi menurut tempat dimana kilat itu mengenai kawat transmisi. Pembagian jang umum dipakai ialah:

- a. gangguan kilat pada kawat tanah, dan
- b. gangguan kilat pada kawat fasa (= shielding failures).

Untuk keperluan perhitungan, gangguan kilat pada kawat tanah dibagi lagi dalam tiga matjam gangguan, jaitu:

1. gangguan kilat pada menara transmisi (stroke to towers),
2. gangguan kilat pada seperempat djarak dari menara transmisi (stroke to quarter-span), dan
3. gangguan kilat pada pertengahan antara dua menara transmisi (stroke to mid-span).

Djadi dengan rumus djumlah gangguan itu dapat diinjatakan sebagai

$$O = SF + O_t + O_q + O_m \quad (1)$$

dimana

SF = djumlah gangguan kilat pada kawat fasa,

$O_t$  = djumlah gangguan kilat pada menara transmisi,

$O_q$  = djumlah gangguan kilat pada seperempat djarak dari menara, dan

$O_m$  = djumlah gangguan kilat pada pertengahan antara dua menara transmisi.

Tidak semua kilat jang mengenai kawat tanah menimbulkan gangguan, tetapi kilat jang mengenai kawat fasa dapat dianggap selalu menimbulkan gangguan.

Sampai saat ini telah banjak tjara ditjoba untuk menghitung djumlah gangguan pada kawat transmisi jang ditimbulkan oleh kilat. Disini disebut empat metode jang dikenal oleh penulis, jaitu Metode AIEE<sup>1</sup>, Teori Gelombang Berdjalan<sup>2</sup>, Teori Medan<sup>3,4</sup>, dan Metode Computer Monte Carlo<sup>5</sup>.

Dengan bertambah besarnja tegangan kerdja telah terbukti bahwa Metode AIEE tidak dapat dipakai lagi. Metode ini memberikan djumlah gangguan jang djauh terlalu rendah dibandingkan dengan gangguan jang sesungguhnya terjadi untuk kawat transmisi tegangan tinggi (dengan tegangan kerdja lebih dari 138 KV). Hanja untuk tegangan kerdja jang lebih rendah dari 138 KV metode ini masih dapat dianggap memberikan hasil jang memuaskan.

Metode<sup>2</sup> Gelombang Berdjalan dan Teori Medan mempunyai persamaan dalam banjak hal. Teori Medan memberikan hasil jang lebih teliti dibandingkan dengan Teori Gelombang Berdjalan, tetapi perbedaan persentase antara kedua teori itu berkurang dengan bertambahnja besar permukaan<sup>2</sup> gelombang (= wavefronts) dari arus (tegangan) kilat, dan ketjuali dalam hal wavefronts persegi (rectangular wavefronts) kedua teori itu memberi hasil jang hampir sama.

Kesulitan dari baik Teori Gelombang Berdjalan maupun Teori Medan timbul karena kekurangan pengetahuan kita akan sifat<sup>2</sup> dari arus kilat, antara lain bentuk gelombang kilat, seringnja terjadi (frequency of occurrence), dan harga puntjak (peak values) dari kilat itu.

Metode Computer Monte Carlo jang dikemukakan oleh Anderson telah mulai dipakai sedjak tahun 1960 di Amerika Serikat. Metode ini sungguh<sup>2</sup> mendorong para teknisi kawat transmisi. Kesulitannya ialah karena metode ini memerlukan model dari kawat transmisi, sebuah surge generator, dan sebuah digital, computer. Lagi pula kadang<sup>2</sup> hasilnya masih merupakan tanda tanja, karena hasilnya terlalu tinggi.<sup>6</sup>

Menurut pengalaman<sup>7</sup> hampir semua „flashovers” terjadi pada kawat fasa jang paling atas. Hal ini sesuai dengan teori gelombang berdjalan, karena gelombang refleksi negatip jang datang dari dasar menara telah terlebih dahulu memperketjil gelombang pada tempat kawat fasa jang paling bawah. (Menurut teori<sup>1</sup> jang selama ini diterima umumnja isolator<sup>2</sup> jang paling bawahlah jang selalu rusak). Oleh karena itu dalam tulisan ini penulis menganggap hanja isolator jang paling atas jang mungkin akan rusak karena sambaran kilat pada menara.

Sebagai tjontoh pemakaian metode ini penulis telah menghitung djumlah gangguan kilat pada salah satu kawat transmisi 345 KV dari „Illinois Power Company”, suatu perusahaan listrik di Amerika Serikat. Tjontch ini diberikan dalam Appendix.

Penulis bermaksud djuga menghitung djumlah gangguan kilat pada kawat transmisi bertegangan tinggi jang telah ada di tanah air kita (Djatiluhur — Tjigareleng, 150 KV), tetapi oleh karena sampai saat ini penulis belum mempunjai data jang lengkap maksud tersebut belum dapat dilaksanakan.

### SHIELDING FAILURES.

Mulai tahun duapuluhan telah banjak teori<sup>2</sup>, pertjobaan<sup>2</sup>, dan pengalaman<sup>2</sup> dikemukakan mengenai fungsi kawat tanah untuk melindungi kawat fasa dari kawat transmisi. Pada tahun 1960 Provoost<sup>8</sup> mengemukakan suatu résumé jang sangat baik mengenai peranan kawat tanah. Berdasarkan teori itu Provoost menarik kesimpulan bahwa:

1. untuk sudut proteksi  $0 \leq 18^\circ$  perlindungan kawat transmisi itu *baik*,
2. untuk sudut proteksi  $0 \leq 30^\circ$  *kurang baik*, dan
3. untuk sudut proteksi  $0 > 40^\circ$  *djelek*.

Kemudian Kostenko, Polovoy, dan Rosenfeld<sup>9</sup> dalam tahun 1961 mengemukakan karangan jang lebih menarik lagi. Mereka menundjukkan bahwa djumlah gangguan kilat pada kawat fasa adalah sebagai fungsi dari sudut proteksi  $\theta$  dan tinggi menara  $h_t$  seperti terlihat dari relasi empiris dibawah ini

$$\log \varnothing = \frac{\theta \sqrt{h_t}}{90} - 4 \quad (2)$$

dimana

- $\varnothing$  = hasil bagi dari djumlah kilat (strokes) jang mengenai kawat fasa dan djumlah kilat jang mengenai kawat transmisi,
- $\theta$  = sudut proteksi pada menara, deradjat,
- $h_t$  = tinggi kawat tanah pada menara, meter.

Persamaan (2) diatas dianggap oleh sebagian besar teknisi<sup>2</sup> kawat transmisi lebih unggul dari tjara<sup>2</sup> jang lain.

Achir<sup>2</sup> ini Young, Clayton, dan Hileman<sup>10</sup> menulis karangan dengan tudjuan serupa. Keuntungan tjara jang terachir ini ialah karena tjara ini memperhitungkan pengaruh dari djarak vertikal dan horizontal dari kawat fasa terhadap kawat tanah sepanjang kawat antara dua menara. Tetapi tjara menghitungnja sangat susah dan memerlukan digital computer.

Untuk kawat transmisi di Indonesia dengan tegangan kerdja jang sampai sekarang baru mentjapai 150 KV maka pada hemat penulis tjara Kostenko lah jang paling praktis.

Djuga penulis akan memakai persamaan (2) diatas untuk menghitung djumlah gangguan kilat pada kawat fasa.

Djadi bila  $L$  menjatakan djumlah kilat jang mungkin mengenai kawat transmisi maka djumlah gangguan kilat pada kawat fasa ialah  $SF = \emptyset L$  gangguan per 100 km per tahun. (Tjara menghitung  $L$  dapat dilihat pada langkah 13, 14, dan 15 dibawah titel „Gangguan Kilat Pada Menara”).

### GANGGUAN KILAT PADA KAWAT TANAH.

Didalam bab pendahuluan telah disebut bahwa metode AIEE itu tidak dapat lagi dipergunakan untuk menghitung gangguan kilat pada kawat transmisi tegangan tinggi, jaitu dengan tegangan kerdja lebih besar dari 138 KV. Djadi perlu kiranja ditjari suatu tjara jang tjotjok untuk keadaan Indonesia, dimana digital computer untuk keperluan teknik dan ilmu pengetahuan eksakta belum ada, untuk menggantikan tjara jang lama itu. Djuga telah disebut bahwa gangguan kilat pada kawat tanah dibagi dalam tiga matjam gangguan berdasarkan pada tempat dimana kilat mengenai kawat tanah.

Dalam tulisan ini penulis mengusulkan untuk memakai teori gelombang berdjalan untuk menghitung djumlah gangguan kilat pada menara transmisi dan memakai metode AIEE untuk menghitung gangguan kilat pada seperempat djarak dan setengah djarak dari menara.

Menurut Anderson<sup>5</sup> perbandingan djumlah kilat jang mengenai menara, seperempat djarak dari menara, dan setengah djarak dari menara berturut-turut adalah sebagai 60%, 30%, dan 10%. Dari "frequency histogram"<sup>11</sup> arus kilat dapat dibagi dalam beberapa kategori. Didalam Tabel 1 arus kilat itu dibagi dalam 5 kategori. Tabel 1 ini memberikan hubungan antara besar arus kilat dan seringnja terdjadi. Tabel 2 memberikan hubungan antara waktu untuk mentjapai harga puntjak (pandjangnja wavefronts) dan seringnja terdjadi. Dalam tulisan ini bentuk gelombang kilat itu dianggap sebagai berikut: mula<sup>2</sup> besarnja naik dari nol sampai harga tertentu, jaitu harga puntjak, setjara linier dan kemudian mendatar.

**TABEL 1.**

Hubungan antara arus kilat dan seringnja terdjadi.

Arus Kilat (ka)	Seringnja Terdjadi (%)
20	36
40	34
60	20
80	8
100	2

TABEL 2.

Hubungan antara waktu untuk mentjapai harga puntjak dan seringnja terdjadi.

Waktu untuk mentjapai harga puntjak (ms)	Seringnja terdjadi (%)
0,5	7
1,0	23
1,5	22
2,0	18
> 2,0	30

### GANGGUAN KILAT PADA MENARA.

Untuk menghitung gangguan kilat pada menara dipakai teori gelombang berdjalan dan urutannya adalah sebagai berikut:

1. Hitung kopeling,  $K$ , antara kawat tanah dan kawat fasa jang paling atas. (Untuk kawat transmisi jang tersusun horizontal antara kawat tanah dan kawat fasa jang paling pinggir).

Gambar 1.

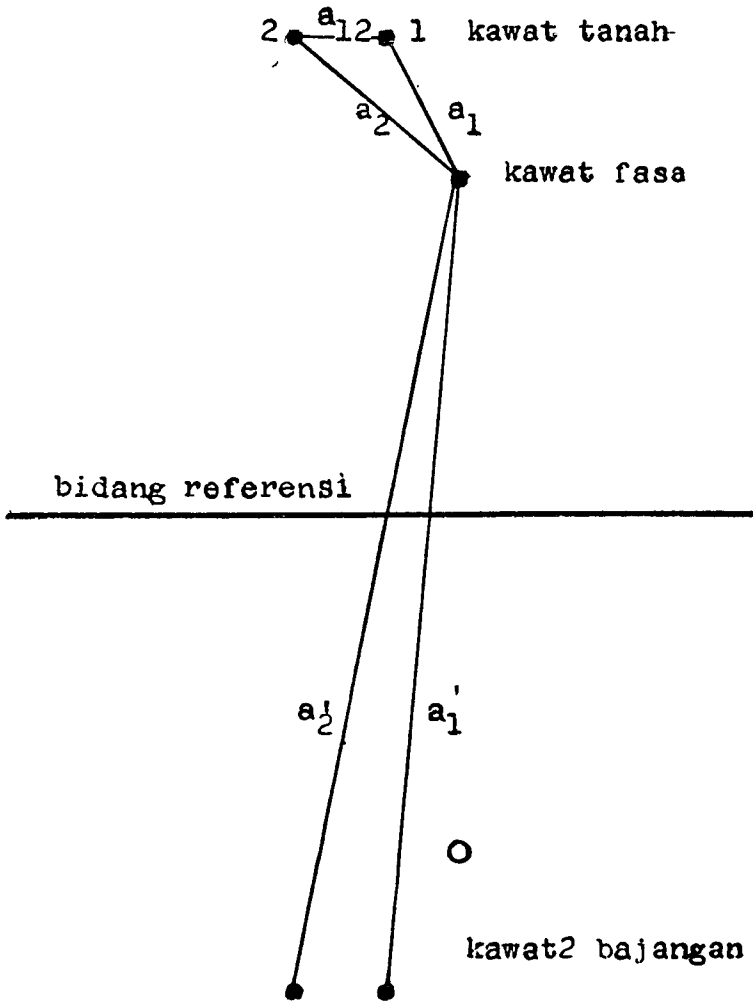
$$K = \frac{\ln a_1'/a_1}{\ln(2h_g/r)} \text{ untuk satu kawat tanah} \quad (3)$$

$$K = \frac{\ln \sqrt{(a_1' a_2')/(a_1 a_2)}}{\ln(2h_g/\sqrt{a_{12}r})} \text{ untuk dua kawat tanah}$$

dimana

- $a_1$  = djarak antara kawat tanah-1 dan kawat fasa, meter,
- $a_1'$  = djarak antara kawat tanah-1 dan kawat fasa bajangan (image), meter,
- $a_2$  = djarak antara kawat tanah-2 dan kawat fasa, meter,
- $a_2'$  = djarak antara kawat tanah-2 dan kawat fasa bajangan, meter.
- $h_g$  = tinggi rata<sup>2</sup> kawat tanah diatas tanah, meter,
- $r$  = radius kawat tanah, meter,
- $a_{12}$  = djarak antara kawat tanah-1 dan kawat tanah-2, meter.

Tinggi rata<sup>2</sup> kawat tanah,  $h_g$ , ialah tinggi kawat pada menara,  $h_t$ , dikurangi dua-pertiga dari sag.



Gamb. 1. Gambar kawat transmisi.

Sebelum menghitung  $a_1$  dan  $a_2$  harus terlebih dahulu dihitung tinggi rata<sup>2</sup> kawat tanah dan kawat fasa diatas tanah.

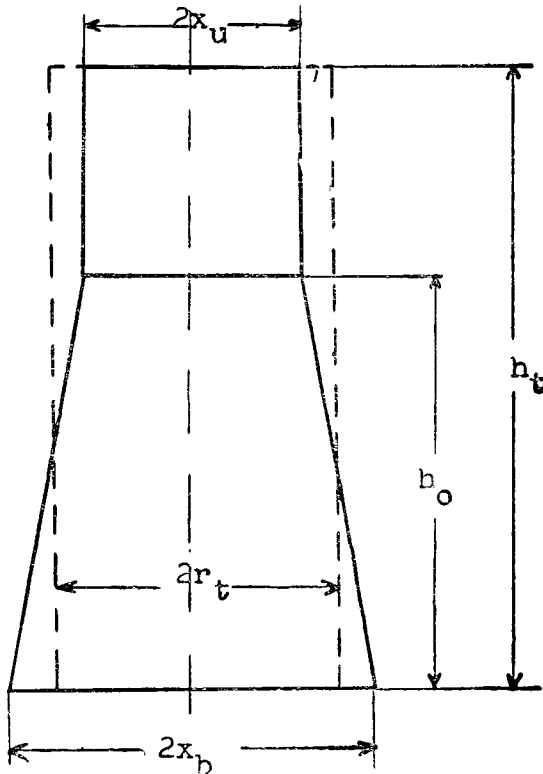
2. Hitung „surge impedance” kawat tanah,  $Z_g$ :

$$Z_g = 60 \ln \left( \frac{2h_g}{r} \right) \text{ untuk satu kawat tanah}$$

dan

$$Z_g = 60 \ln \left( \frac{2h_g}{\sqrt{a_{12}r}} \right) \text{ untuk dua kawat tanah} \quad (4)$$

3. Hitung djari-djari ekivalen dari menara menurut rumus Anderson dan Hagenguth<sup>12</sup>. (Lihat Gambar 2).



Gamb. 2. Penampang menara transmisi untuk menghitung djari<sup>2</sup> ekivalen,  $r_t$ .

$$\ln r_t = \frac{h_0}{h_t(x_b - x_u)} \{x_b (\ln x_b - 0,87) - x_u (\ln x_u - 0,87)\} + \frac{h_t - h_0}{h_t} \ln (1,14 x_u) \quad (5)$$

dimana  $r_t$ ,  $h_0$ ,  $h_t$ ,  $x_b$ , dan  $x_u$  dalam feet.

4. Hitung surge impedance menara<sup>4</sup>,  $Z_t$ :

$$Z_t = 60 \ln \left( \sqrt{2} \frac{2 h_t}{r_t} \right) \quad (6)$$

dimana  $h_t$  dan  $r_t$  harus dinjatakan dalam satuan jang sama.

5. Hitung koefisien transmisi,  $a$ , pada puntjak menara untuk gelombang<sup>2</sup> jang datang dari dasar menara:

$$a = \frac{2 Z_g}{Z_g + 2 Z_t} \quad (7)$$



6. Hitung koefisien refleksi,  $b$ , pada puntjak menara untuk gelombang<sup>2</sup> jang datang dari dasar menara:

$$b = a - 1 \tag{8}$$

7. Hitung tegangan pada puntjak menara,  $e$  :

$$e = \frac{Z_g Z_t}{Z_g + 2 Z_t} I_s \quad KV \tag{9}$$

dimana

$$I_s = \text{ arus kilat, } Ka,$$

dan

$$I_s = I_o \ t \ Ka \ \text{ untuk } 0 \leq t \leq T$$

$$I_s = I \ Ka \ \text{ untuk } t \geq T$$

$I$  = harga puntjak dari arus kilat jang melalui menara,  $Ka$ ,

$T$  = waktu untuk mentjapai harga puntjak atau pandjang wavefront dari kilat, mikrodetik.

8. Pilih harga tahanan tanah (tower footing resistance),  $R_f$ , dan hitung koefisien refleksi,  $d$ , pada dasar menara untuk gelombang<sup>2</sup> jang datang dari puntjak menara:

$$d = \frac{R_f - Z_t}{R_f + Z_t} \tag{10}$$

Bila tahanan tanah,  $R_f$ , pada daerah itu berbeda-beda pada tiap tempat, perhitungan harus dilakukan untuk tiap harga  $R$ , atau setjara pendekatan dapat diambil harga rata<sup>2</sup> tahanan untuk daerah itu .

9. Pilih salah satu harga wavefront,  $T$ , dari Tabe 2 dan hitung waktu kritik,  $t_c$ , jaitu waktu pada saat mana tegangan pada puntjak berkurang setjara mendadak karena gelombang refleksi negatip dari dasar menara:

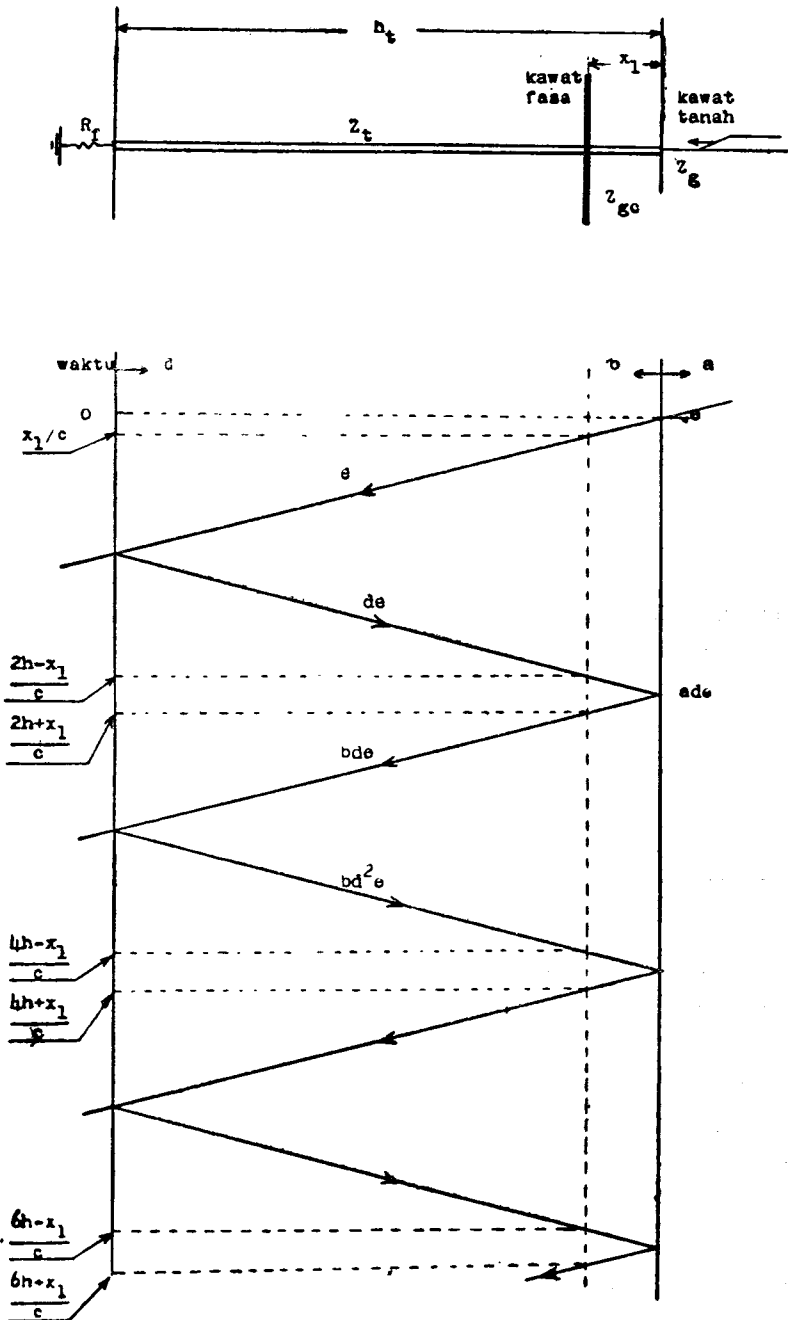
$$t_c = T + x_1/c \ (\text{mikrodetik}) \tag{11}$$

dimana

$x_1$  = djarak vertikal antara puntjak menara dan kawat fasa pada menara, meter

$c$  = ketjepatan merambat tjahaja = 300 meter per mikrodetik.

10. Pilih salah satu harga arus kilat,  $I$ , dari Tabel 1, dan hitung tegangan pada isolator,  $V_i$ , (Lihat djuga diagram tangga pada Gambar 3.)



Gamb. 3. Diagram Tangga untuk Menghitung Tegangan Isolator.

$$\begin{aligned}
 V_i = & e_o (1 - K) (t_c - x_1/c) + \\
 & d e_o \left( t_c - \frac{2h_t - x_1}{c} \right) + \\
 & d e_o (b - Ka) \left( t_c - \frac{2h_t + x_1}{c} \right) + \\
 & d^2 b e_o \left( t_c - \frac{4h_t - x_1}{c} \right) + \\
 & d^2 b e_o (b - Ka) \left( t_c - \frac{4h_t + x_1}{c} \right) + \\
 & d^3 b^2 e_o \left( t_c - \frac{6h_t - x_1}{c} \right) + \\
 & d^3 b^2 e_o (b - Ka) \left( t_c - \frac{6h_t + x_1}{c} \right) + \\
 & \dots \dots \dots (12)
 \end{aligned}$$

dengan syarat bahwa:  $t_c - x_1/c > 0$   
 $t_c - \frac{2h_t + x_1}{c} > 0$   
 $t_c - \frac{4h_t + x_1}{c} > 0$   
 dst.

Didalam persamaan (12):

$$e_o = \frac{Z_g Z_t}{Z_g + 2Z_t} I_o$$

Karena b biasanja sangat ketjil maka b<sup>2</sup> sangat ketjil, djadi suku ke-6 dan suku<sup>2</sup> setelah itu dapat diabaikan.

11. Bandingkanlah V<sub>i</sub> jang diperoleh dari langkah 10 dengan BIL (Basic Insulation Level) isolator<sup>2</sup> jang dipakai. Bila BIL lebih besar dari V<sub>i</sub> tidak ada gangguan, tetapi bila BIL lebih ketjil dari V<sub>i</sub> terdjadi gangguan.
12. Ulangi lagi langkah 9 dan 10 sampai semua harga<sup>2</sup> dalam Tabel 1 dan Tabel 2 telah dipergunakan. Setelah itu hitunglah djumlah persentase kemungkinan, P, jang mungkin menimbulkan gangguan.
13. Hitung daerah, A, jang dilindungi kawat tanah untuk tiap span S dengan rumus Hagenguth.<sup>13</sup>

$$A = (2\pi + 1) h_t^2 + 4 h_g (S - h_t) \quad (13)$$

dimana

S = span rata<sup>2</sup>, meter,

A = daerah dilindungi, meter persegi.

14. Hitung kepadatan kilat (stroke density), D:

$$\begin{aligned} D &= 0,23 \text{ IKL kilat per mil persegi per tahun}^5. \\ &= 8,875 \times 10^{-8} \text{ IKL kilat per meter persegi per tahun.} \end{aligned} \quad (14)$$

IKL ialah djumlah hari guruh per tahun; di Bandung IKL adalah kira<sup>2</sup> 70.

15. Hitung djumlah kilat, L, jang mungkin mengenai kawat transmisi per 100 km pandjang kawat per tahun:

$$L = 100 \text{ (km)} \times \frac{1000}{S} \times A \times D \text{ kilat per 100 km per tahun}$$

dimana S dalam meter. (15)

16. Hitung djumlah gangguan kilat pada menara,  $O_t$ :

$$\begin{aligned} O_t &= 60\% \times L \times P \\ &= 60\% \times \left( 100 \text{ (km)} \times \frac{1000}{S} \times A \times D \right) \times P \text{ gangguan} \\ &\text{per 100 km per tahun.} \end{aligned} \quad (16)$$

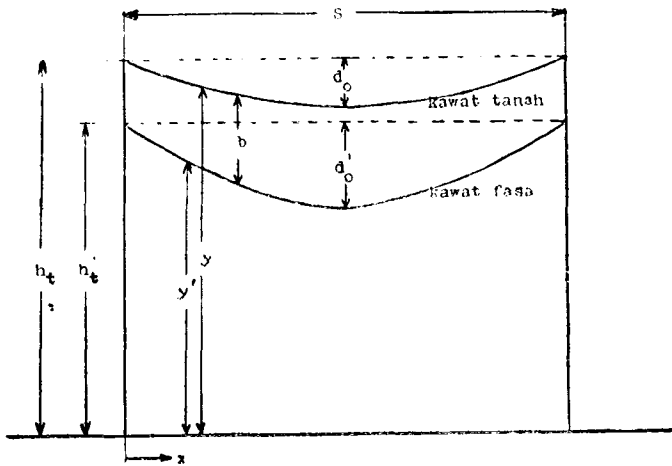
### Tjataan:

Pengaruh dari tegangan kerdja, tinggi tempat, dan keadaan atmosfir setempat dapat digabungkan dalam perhitungan dengan mengadakan koreksi pada BIL isolator<sup>2</sup>.

## GANGGUAN KILAT PADA SEPEREMPAT DJARAK DAN SETENGAH DJARAK DARI MENARA TRANSMISI:

Untuk menghitung gangguan kilat pada seperempat dan setengah jarak dari menara dipakai metode AIEE, djadi dengan membandingkan kekuatan isolasi dari jarak antara kawat tanah dan kawat fasa terhadap tegangan jang timbul oleh karena arus (tegangan) kilat pada tempat jang diinginkan. Kekuatan isolasi ditentukan oleh jarak antara kedua kawat.

Djarak vertikal antara kawat tanah dan kawat fasa diperoleh dengan memisalkan lengkung kawat itu memenuhi persamaan parabola. (Gambar 4.)



Gamb. 4. Gambar kawat tanah dan kawat fasa dari kawat transmisi.

Djadi bila:

- $y$  = tinggi kawat tanah diatas tanah, meter,
- $y'$  = tinggi kawat fasa diatas tanah, meter,
- $d_o$  = denjut maksimum kawat tanah, meter,
- $d'_o$  = denjut maksimum kawat fasa, meter,
- $b$  = djarak vertikal antara kawat tanah dan kawat fasa, meter,
- $b_m$  = djarak vertikal antara kawat tanah dan kawat fasa pada pertengahan antara dua menara, meter,
- $b_q$  = djarak vertikal antara kawat tanah dan kawat fasa pada seprempat djarak dari menara, meter,

maka

$$y = h_t - \frac{d_o}{(S/2)^2} x^2 \tag{17}$$

$$y' = h'_t - \frac{d'_o}{(S/2)^2} x^2 \tag{18}$$

$$b = y - y' \tag{19}$$

$$b_q = \left( h_t - \frac{d_o}{4} \right) - \left( h'_t - \frac{d'_o}{4} \right) \tag{20}$$

$$b_m = (h_t - d_o) - (h'_t - d'_o) \tag{21}$$

Bila

$p$  = djarak horizontal antara kawat tanah dan kawat fasa, meter

maka djarak antara kawat tanah dan kawat fasa:

$$d_q = \sqrt{b_q^2 + p^2} \text{ meter} \quad (22)$$

$$d_m = \sqrt{b_m^2 + p^2} \text{ meter} \quad (23)$$

Djarak<sup>2</sup>  $d_q$  dan  $d_m$  menentukan berapa gangguan pada seperempat dan setengah djarak dari menara.

Banyak gangguan yang diperoleh harus lagi dikalikan dengan 0,3 untuk memperoleh gangguan pada seperempat djarak dari menara,  $O_q$ , dan dengan 0,1 untuk memperoleh gangguan pada setengah djarak dari menara,  $O_m$ .

Tetapi dalam metode yang diusulkan oleh penulis ini, kemungkinan gangguan pada seperempat dan setengah djarak dari menara dapat diperoleh dari Gambar 4, Ref. 14, halaman 582.

### KESIMPULAN<sup>2</sup>:

1. Metode AIEE tidak dapat lagi dipakai untuk menghitung gangguan kilat pada kawat transmisi tegangan tinggi ekstra.
2. Teori gelombang berdjalan disertai teori<sup>2</sup> lain dapat dipakai untuk menghitung gangguan kilat pada kawat transmisi dan dianggap lebih unggul dari metode AIEE.
3. Untuk memperoleh hasil yang lebih teliti perlu dipelajari lebih mendalam sifat<sup>2</sup> arus (tegangan) kilat dan kenaikan (increment) pada Tabel 1 dan Tabel 2 perlu diperketjil.
4. Gangguan kilat pada kawat fasa tidak dapat lagi diabaikan seperti dikemukakan metode AIEE. Bahkan untuk beberapa kawat transmisi gangguan kilat pada kawat fasa lebih besar dari gangguan kilat pada kawat tanah.<sup>10</sup>

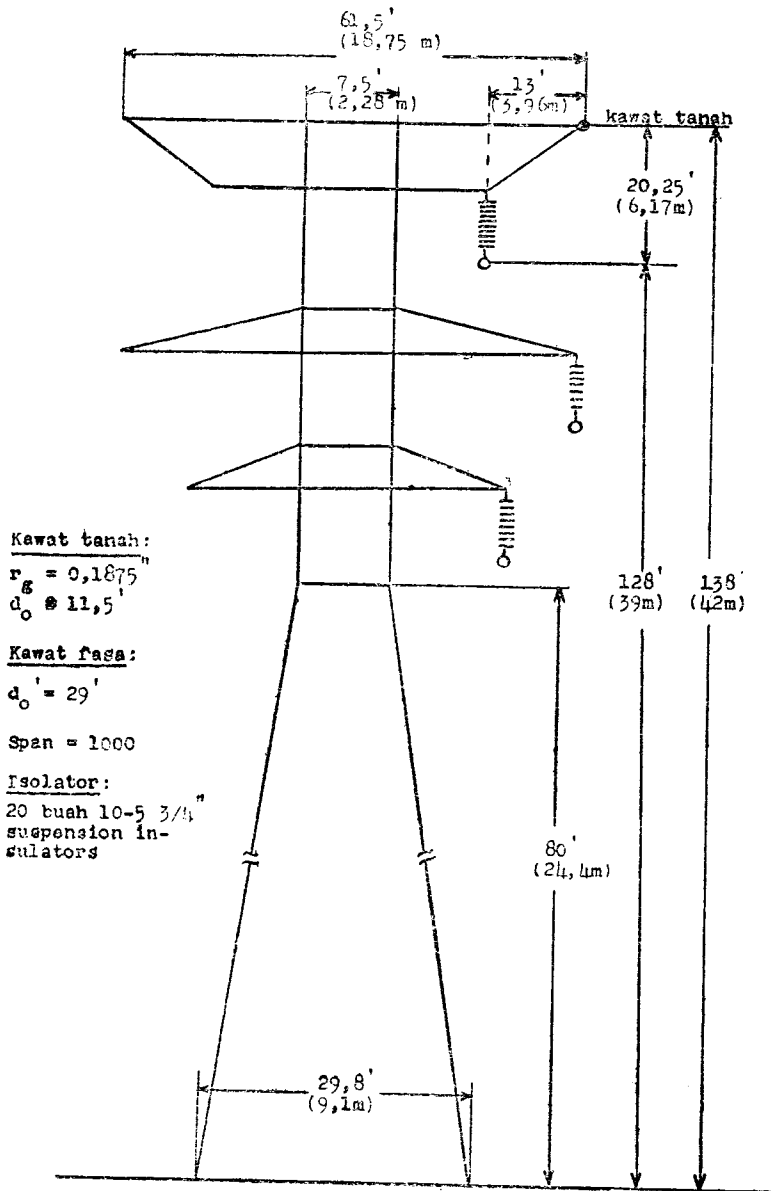
### APPENDIX.

Dalam Appendix ini diberikan satu contoh perhitungan gangguan kilat pada kawat transmisi 345 KV dari "Illinois Power Company" di Amerika Serikat dengan mempergunakan metode dalam tulisan ini. Gambar 5 menggambarkan kawat transmisi yang dipakai.

#### Gangguan Kilat Pada Menara:

1. Koppeling K:

$$\begin{aligned} K &= \frac{\ln(a_1'/a_1)}{\ln(2h_1/r)} & (3) \\ &= \frac{\ln(229/34,5)}{\ln(260,66 \times 64)} \\ &= \underline{\underline{0,195}} \end{aligned}$$



Gamb. 5. Gambar Kawat Transmisi untuk Tjontoh Perhitungan dalam Appendix.

2. Surge Impedance kawat Tanah  $Z_g$ :

$$\begin{aligned} Z_g &= 60 \ln\left(\frac{2h_g}{r}\right) \\ &= 60 \ln(260,66 \times 64) \\ &= \underline{\underline{583 \text{ ohm}}} \end{aligned} \quad (4)$$

3. Djari<sup>2</sup> Ekivalen Menara  $r_t$ :

$$\begin{aligned} \ln r_t &= \frac{h_o}{h_t (x_b - x_u)} \{x_b (\ln x_b - 0,87) - \\ &\quad x_u (\ln x_u - 0,87)\} + \\ &\quad \frac{h_t - h_o}{h_t} \ln(1,14 x_u) \\ &= \frac{80}{138 (14,9 - 3,75)} \{14,9(\ln 14,9 - 0,87) \\ &\quad - 3,75 (\ln 3,75 - 0,87)\} \\ &\quad + \frac{138 - 80}{138} \ln (1,14 \times 3,75) \\ &= 1,9045 \\ r_t &= \underline{\underline{6,72 \text{ feet}}} \end{aligned} \quad (5)$$

4. Surge Impedance Menara  $Z_t$ :

$$\begin{aligned} Z_t &= 60 \ln\left(\sqrt{2} \frac{2h_t}{r_t}\right) \\ &= 60 \ln\left(\sqrt{2} \frac{276}{6,72}\right) \\ &= \underline{\underline{244 \text{ ohm}}} \end{aligned} \quad (6)$$

5. Koefisien Transmisi a:

$$\begin{aligned} a &= \frac{2 Z_g}{Z_g + 2 Z_t} \\ &= \frac{2 \times 583}{583 + 488} \\ &= \underline{\underline{1,09}} \end{aligned} \quad (7)$$



## 6. Koefisien Refleksi b:

$$\begin{aligned}
 b &= a - 1 \\
 &= 1,09 - 1 \\
 &= \underline{\underline{0,09}}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

## 7. Tegangan Puntjak Menara e:

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{Z_g Z_t}{Z_g + 2Z_t} I_s \\
 &= \frac{583 \times 244}{583 + 488} I_s \\
 &= 133 I_s \\
 &= 133 I_0 t \\
 &= e_0 t
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

dimana

$$e_0 = 133 I_s$$

8. Pilih harga tahanan tanah,  $R_f$ , dan hitung koefisien refleksi d:

$$d = \frac{R_f - Z_t}{R_f + Z_t} \tag{10}$$

Harga tahanan untuk daerah itu adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 R_f &= 10 \text{ ohm untuk } 40\% \text{ pandjang kawat} \\
 &= 20 \text{ ohm untuk } 30\% \text{ pandjang kawat} \\
 &= 30 \text{ ohm untuk } 30\% \text{ pandjang kawat} \\
 R_f &= 50 \text{ ohm untuk } 10\% \text{ pandjang kawat.}
 \end{aligned}$$

Djadi

$$\begin{aligned}
 d &= \dots 0,92 \text{ untuk } R_f = 10 \text{ ohm} \\
 &= \dots 0,85 \text{ untuk } R_f = 20 \text{ ohm} \\
 &= \dots 0,78 \text{ untuk } R_f = 30 \text{ ohm} \\
 &= \dots 0,66 \text{ untuk } R_f = 50 \text{ ohm.}
 \end{aligned}$$

9. Waktu kritik  $t_c$ :

$$\begin{aligned}
 t_c &= T + \frac{x_1}{c} \\
 &= T + 0,02 \\
 &= 0,52 \text{ untuk } T = 0,5 \\
 &= 1,02 \text{ untuk } T = 1,0 \\
 &= 1,52 \text{ untuk } T = 1,5 \\
 &= 2,02 \text{ untuk } T = 2,0
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

10. Tegangan Isolator  $V_i$ :

$$\begin{aligned}
 V_i &= e_o(1 - K) \left( t_c - \frac{x_1}{c} \right) + \\
 &de_o \left( t_c - \frac{2h_t - x_1}{c} \right) + \\
 &de_o(b - Ka) \left( t_c - \frac{2h_t + x_1}{c} \right) + \\
 &\text{dst.}
 \end{aligned}$$

Untuk  $T = 0,5$  mikrodetik:

a)  $R_f = 10 \text{ ohm}, d = 0,92$

$$\begin{aligned}
 V_i &= 4920 \text{ Kv untuk } I = 100 \text{ Ka} \\
 &= 3970 \text{ Kv untuk } = 80 \text{ Ka} \\
 &= 2950 \text{ Kv untuk } = 60 \text{ Ka} \\
 &= 1960 \text{ Kv untuk } = 40 \text{ Ka} \\
 &= 980 \text{ Kv untuk } = 20 \text{ Ka}
 \end{aligned}$$

b)  $R_f = 20 \text{ ohm}, d = 0,85$

$$\begin{aligned}
 V_i &= 5360 \text{ Kv untuk } I = 100 \text{ Ka} \\
 &= 4300 \text{ Kv untuk } = 80 \text{ Ka} \\
 &= 3220 \text{ Kv untuk } = 60 \text{ Ka} \\
 &= 2140 \text{ Kv untuk } = 40 \text{ Ka} \\
 &= 1070 \text{ Kv untuk } = 20 \text{ Ka}
 \end{aligned}$$

c)  $R_f = 30 \text{ ohm}, d = 0,78$

$$\begin{aligned}
 V_i &= 5800 \text{ Kv untuk } I = 100 \text{ Ka} \\
 &= 4630 \text{ Kv untuk } = 80 \text{ Ka} \\
 &= 3480 \text{ Kv untuk } = 60 \text{ Ka} \\
 &= 2320 \text{ Kv untuk } = 40 \text{ Ka} \\
 &= 1160 \text{ Kv untuk } = 20 \text{ Ka}
 \end{aligned}$$

d)  $R_f = 50 \text{ ohm}, d = 0,66$

$$\begin{aligned}
 V_i &= 6550 \text{ Kv untuk } I = 100 \text{ Ka} \\
 &= 5240 \text{ Kv untuk } = 80 \text{ Ka} \\
 &= 3930 \text{ Kv untuk } = 60 \text{ Ka} \\
 &= 2620 \text{ Kv untuk } = 40 \text{ Ka} \\
 &= 1310 \text{ Kv untuk } = 20 \text{ Ka}
 \end{aligned}$$

Untuk gelombang<sup>2</sup> dengan T = 1,0; 1,5; dan 2,0 mikrodetik telah dihitung dan hasilnya dikumpulkan dalam Tabel 3.

Gelombang<sup>2</sup> dengan T yang lebih besar dari 2 mikrodetik dapat dianggap hanya dalam hal R<sub>f</sub> = 50 ohm dan I = 100 Ka akan menimbulkan gangguan, karena pada saat ini gelombang refleksi negatif dari menara yang berdekatan telah sampai pada menara yang disambar kilat. Gelombang ini akan memperketil tegangan puntjak menara. (Span rata<sup>2</sup> adalah 1000 ft yang sama dengan waktu 1 mikrodetik.)

11. Bandingkan V<sub>i</sub> dengan BIL isolator<sup>2</sup>. Untuk memperoleh BIL isolator<sup>2</sup> dipakai "volt-time-curves" yang didasarkan atas gelombang positif 1,5 × 40 mikrodetik. Dari Gambar 8.3, halaman 232, buku "The Protection of Transmission Systems Against Lightning", W.W. Lewis, BIL ini dapat diperoleh BIL yang dimaksud telah diberikan dalam Tabel 3.

12. Persentase kemungkinan, P:

Dari Tabel 3 diperoleh

$$P = 7 \times 0,068 + 23 \times 0,036 + 22 \times 0,02 + 18 \times 0,034 + 30 \times 0,002\% \\ = \underline{\underline{2,053\%}}$$

13. Daerah yang dilindungi kawat tanah A:

$$A = (2\pi + 1)h_t^2 + 4h_g(S - h_t) \tag{13}$$

$$A = (2\pi + 1) 138^2 + 4 \times 130,33 (1000 - 138) \\ = 58,9 \times 10^4 \text{ ft}^2 \\ = \underline{\underline{0,0211 \text{ mil persegi}}}$$

14. Kepadatan kilat D:

$$D = 0,23 \text{ IKL} \tag{14} \\ = 0,23 \times 60 = \underline{\underline{13,8 \text{ kilat permil-persegi.}}}$$

15. Djumlah kilat yang mungkin mengenai transmisi L:

$$L = 100 \times \frac{1000(\text{m})}{305(\text{m})} \times 0,0211 \times 13,8 \tag{15} \\ = \underline{\underline{95,4 \text{ kilat per 100 km per tahun}}}$$

16. Djumlah gangguan kilat pada menara O<sub>t</sub>:

$$O_t = 60\% \times L \times P \tag{16} \\ = 0,6 \times 95,4 \times 0,02053 \\ = \underline{\underline{1,17 \text{ gangguan per 100 km per tahun}}}$$

**Gangguan Kilat Pada Seperempat Djarak Dari Menara:**

$$b_g = \left( h_t - \frac{d_o}{4} \right) - \left( h_t' - \frac{d_o'}{4} \right) \quad (20)$$

$$\left( 138 - \frac{11,5}{4} \right) - \left( 117,75 - \frac{29}{4} \right)$$

$$= 24,6 \text{ ft}$$

$$p = 13 \text{ ft}$$

$$d_q = \sqrt{b_g^2 + p^2} \quad (22)$$

$$= \sqrt{24,6^2 + 13^2}$$

$$= 27,9 \text{ ft}$$

$$O_q = 0,3 \times 0,8 \times 60/30 \times 1/1,61$$

$$= \underline{\underline{0,30 \text{ gangguan per 100 km per tahun}}}$$

**Gangguan Kilat Pada Pertengahan Dua Menara  $O_m$ :**

$$b_m = (h_t - d_o) - (h_t' - d_o') \quad (21)$$

$$= (138 - 11,5) - (117,5 - 29)$$

$$= 38 \text{ ft}$$

$$d_m = \sqrt{38^2 + 13^2}$$

$$= 40 \text{ ft}$$

$$O_m = 10\% \times 0,3 \times 60/30 \times 1/1 \times 1/1,61$$

$$= \underline{\underline{0,037 \text{ gangguan per 100 km per tahun}}}$$

**Gangguan Kilat Pada Kawat Fasa:**

$$\log \varnothing = \frac{\varnothing \sqrt{h_t}}{90} - 4 \quad (2)$$

$$\varnothing = 26,9^3$$

$$\log \varnothing = \frac{26,9 \sqrt{42}}{90} - 4$$

$$= 1,94 - 4$$

$$\varnothing = 8,71 \times 10^{-3}$$

$$SF = 8,71 \times 10^{-3} \times L$$

$$= 8,71 \times 10^{-3} \times 95,4$$

$$= 0,83 \text{ gangguan per 100 km per tahun}$$

TABEL 3.

Hasil<sup>2</sup> perhitungan untuk menentukan gangguan kilat pada menara.

T (ms)	I (Ka)	Seringnja terdjadi (%)	R <sub>f</sub> = 10 ohm 40% kawat			R <sub>f</sub> = 20 ohm 30% kawat			R <sub>f</sub> = 30 ohm 20% kawat			R <sub>f</sub> = 50 ohm 10% kawat			Djumlah Gang- guan (%)	Djumlah Gang- guan (%)
			V <sub>i</sub> Kv	BIL* Kv	Gang- guan %	V <sub>i</sub> Kv	BIL* Kv	Gang- guan %	V <sub>i</sub> Kv	BIL* Kv	Gang- guan %	V <sub>i</sub> Kv	BIL* Kv	Gang- guan %		
0.5	20	36	980	4000	0	1070	4000	0	1160	4000	0	1310	4000	0	0	6,8
	40	34	1960		0	2140		0	2320		0	2620		0	0	
	60	20	2950		0	3220		0	3480		0	3930		0	0	
	80	8	3970		0	4300		2,4	4630		1,6	5240		0,8	4,8	
	100	2	4920		0,8	5360		0,6	5800		0,4	6550		0,2	2,0	
1.0	20	36	485	3070	0	688	3070	0	800	3070	0	990	3070	0	0	3,6
	40	34	970		0	1375		0	1600		0	1930		0	0	
	60	20	1460		0	2065		0	2500		0	2930		0	0	
	80	8	1940		0	2750		0	3200		1,6	3960		1,8	2,4	
	100	2	2430		0	3440		0,6	4000		0,4	4960		0,2	1,2	
1.5	20	36	440	2750	0	560	2750	0	685	2750	0	895	2750	0	0	2,0
	40	34	880		0	1120		0	1370		0	1790		0	0	
	60	20	1320		0	1680		0	2050		0	2690		0	0	
	80	8	1760		0	2240		0	2740		0	3580		0,8	0,8	
	100	2	2200		0	2800		0,6	3420		0,4	4470		2,0	1,2	
2.0	20	36	375	2530	0	500	2530	0	630	2530	0	850	2530	0	0	3,4
	40	34	750		0	1000		0	1260		0	1700		0	0	
	60	20	1130		0	1500		0	1890		0	2550		2,0	2,0	
	80	8	1500		0	2000		0	2530		0	3400		0,8	0,8	
	100	2	1880		0	2500		0	3150		0,4	4250		0,2	0,6	

Tjataan: 1 K = 0,195

2. Akibat dari tegangan kerdja, tinggi tempat, dan keadaan atmosfir belum dimasukkan dalam perhitungan.

\* BIL diperoleh dari buku "The Protection of Transmission Systems Against Lightning", W.W. Lewis, Gambar 8.3 halaman 232.

**Djumlah gangguan kilat seluruhnja:**

$$\begin{aligned}
 O &= SF + O_t + O_q + O_m \\
 &= 0,83 + 1,17 + 0,3 + 0,037 \\
 &= 2,337
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Djadi gangguan kilat untuk kawat transmisi ini seluruhnja ialah

$$\underline{\underline{O, = 2,34 \text{ gangguan kilat per 100 km per tahun.}}}$$

**REFERENSI<sup>2</sup>:**

1. A method of Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. AIEE Committee Report, AIEE Transactions, pt. II, vol. 69, 1950, pp. 1187-96.
2. **Traveling Waves on Transmission Systems (book)**, L.V. Bewley, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., second editions 1951.
3. Calculation of Transmission Line Lightning Voltages by Field Concepts. R. Lundholm, R.B. Finn, Jr., W.S. Price, AIEE Transactions, pt. II, vol. 76, 1957, pp. 1271-83.
4. A new Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines, C.F. Wagner, A.R. Hileman, AIEE Transactions, pt. III, vol. 79, 1960, pp. 589-603.
5. Monte Carlo Computer Calculation of Transmission-Line Lightning Performance, J.G. Anderson, AIEE Transactions, pt. III, vol. 80, 1961, pp. 414-20.
6. Lightning Outage Investigation on Transmission-Lines of the Illincis Power Company. Report 62 PT 135, General Electric Company, August 1962.
7. Analytical Studies of Lightning Performance of 1- and 2- Ground-wire 138 KV Double-Circuit Lines of the Commonwealth Edison Company. R.W. Caswell, E.T.B. Gross, E.F. Koncel, Jr., AIEE Transactions, pt. III, vol. 77, 1958, pp. 254-63.
8. Report on the Work of Study Committee No. 8 (Lightning and Surges). Appendix II. The Shielding Effect of Overhead Earth Wire, P.G. Provost. Paper No. 314, CIGRE, Paris, France, 1960.
9. The Role of Lightning Strikes to the Conductors Bypassing the Ground Wires in the Protection of High-Voltage Class Lines, M.V. Kostenko, I.F. Polovoy, A.N. Rosenfeld. Elektrichestvo, Moscow, USSR, no. 4, 1961, pp. 20-26.

10. Shielding of Transmission Lines, F.S. Young, J.M. Clayton, A.R. Hillemann, **IEEE Conference Paper**, April 1963.
11. The Frequency of Occurrence and the Distribution of Lightning Flashes to Transmission Lines, R.H. Golde, **AIEE Transactions**, pt. I, vol. 64, 1945, pp. 902-10.
12. Magnetic Fields Around a Transmission Line Tower, J.G. Anderson, J.H. Hagenguth, **AIEE Transactions**, pt. III, vol. 77, 1958, pp. 1644-50.
13. 1956 Lightning Field Investigation on the OVEC 345-KV System, R.H. Schломann, W.S. Price, I.B. Johnson, J.G. Anderson, **AIEE Transactions**, pt. III, vol. 76, 1957, pp. 1447-59.  
Discussion by J.H. Hagenguth, pp. 1457-58.
14. Electric Transmission and Distribution Reference Book (buku), Central station Engineers, **Westinghouse Electric Corporation**, Pittsburgh, Pa. 1950.