

PERHITUNGAN TEGANGAN-LEBIH KONDUKTOR FASA SUTET 500 KV PASCASAMBARAN PETIR PADA PUNCAK MENARA

Budi Utama

Jurusan Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta
Jl. Babarsari No. 1, Depok, Sleman, D.I, Yogyakarta, Indonesia
budiutamaduutama@ymail.com

Abstrak

Nilai magnitud tegangan lebih pada konduktor fasa ketika terjadi sambaran petir di puncak menara transmisi yang dikaitkan dengan amplitudo arus petir adalah hal yang sulit ditentukan. Padahal data besaran tegangan lebih sangat penting dalam memprediksi kinerja petir pada saluran transmisi, perhitungan tegangan flashover pada isolator suspensi, dan penentuan intensitas medan listrik pada jalur transmisi tegangan ekstra tinggi. Tulisan ini menyajikan sebuah metoda perhitungan tegangan lebih dengan menggunakan komputer dimana sebuah "aliran-penghubung-naik" untuk sebuah sambaran petir ikut dipertimbangkan. Hasil akhirnya adalah bahwa hubungan antara arus petir, parameter menara, dan pemunculan tegangan lebih dapat disajikan melalui beberapa kurvanya.

Kata kunci: Menara, Petir, SUTET, Tegangan.

Abstract

The Magnitude of overvoltage at the phase conductors when happened lightning stroke at the top of the transmission tower that associated with amplitudo of the lightning current is difficult thing determined. The magnitude data of the overvoltage is very important in the prediction lightning performance of transmission lines, calculation of flashover voltage at suspension isolator, and determining of intensity of electric field under extra high voltage transmission lines. This paper presents a method of the calculation overvoltage using the computer where a upward streamer of the lightning stroke at the top transmission lines tower is considered. Finally, the relation between amplitudo of lightning current, the tower parameter, and arise of overvoltage can be presented through several their curves.

Keywords : Tower, Lightning, UHV Transmission, Voltage.

1. Pendahuluan

Ketika sebuah sambaran petir terjadi maka akan tampak perjalanan sebuah alur petir yang dipresentasikan sebagai lidah lompat (*stepped leader*), Kecepatan lidah lompat ini kira kira mendekati 3 % dari kecepatan cahaya dengan alur jalan patah patah (*zig-zag*). Pasca pemunculan lidah lompat dari permukaan bagian bawah awan, ujung dari lidah lompat ini akan berjalan mengarah ke bumi. Dalam proses penyongsongan lidah lompat (*stepped leader*) ini ada aliran pergerakan kanal muatan listrik yang muncul dari permukaan bumi bergerak ke arah atas lalu bertemu dan menyambut (menyongsong) ujung lidah lompat ini sebagaimana disebut sebagai "aliran penghubung naik" (*upward streamer*). Pemunculan "aliran-penghubung-naik" ini tidak semata mata hanya dapat muncul pada permukaan tanah / bumi, namun dapat juga melalui struktur/objek yang berkonduktiv dengan tanah. Contoh : menara tiang (tower), struktur kapal laut/sungai, bangunan yang berstruktur vertikal tinggi, pohon-pohon, hewan bahkan manusia sekalipun.

Menara tiang (tower) saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) adalah salah satu bentuk / perwujudan media yang dapat dilalui oleh aliran penghubung naik (*upward streamer*). Menara SUTET ini terbentang pada rute yang menghubungkan bagian sisi ujung barat pulau Jawa hingga ujung timur pulau Jawa. Rentang rute jarak yang begitu jauh, mem buat menara SUTET ini menjadi rentan/rawan terhadap sambaran petir langsung (*direct lightning strike*) pada kawasan kawasan tertentu. Apalagi ketika jatuh pada musim penghujan dimana sebagian besar pulau Jawa akan mengalami badai petir (*thunderstorm*). Berdasarkan laporan statistik dari Cina Selatan [1] bahwa sistem jaringan SUTET 500 kV mengalami

trip-outs yang disebabkan oleh sambaran petir sebesar 73 % untuk kawasan pegunungan dan perbukitan. Menurut sebuah studi pengamatan selama tujuh tahun di wilayah tenggara Cina bahwa insiden/kecelakaan akibat sambaran petir 56 % terjadi di jalur SU TET 500 kV yang terjadi di kawasan pegunungan dan 26 % terjadi di kawasan perbukitan, serta 18 % terjadi di kawasan dengan kontur permukaan tanah flat/datar [1].

Bagaimana di Indonesia ?. Untuk negara Indonesia masih sedikit informasi tentang jumlah gangguan petir yang didokumentasikan, namun demikian untuk gambaran beberapa tahun belakangan dapat dijadikan indikasi bahwa SUTT dan SUTET di Indonesia juga mengalami gangguan dari sambaran petir.

Didasarkan dari pengalaman pengoperasian SUTET 500 kV yang diperoleh dari PT PLN-P3B Jawa-Bali selama 13 tahun terakhir (1985 sd 1998). Penyebab gangguan menunjukkan bahwa sambaran petir merupakan penyebab utama, yaitu sebesar 31.6 %), diikuti dengan kesalahan operasi dari proteksi rele (malfunction of protection relays) sebanyak 21.4 %, kesalahan manusia sebanyak 9.8 %, gangguan pohon pohon sebanyak 8.1 %, layang layang dan balon 7.7 %, peralatan yang rusak 6.3 %, kesalahan operasi dan peralatan signal 5.9 %, lewat denyar (*flashover*)/polusi 4.2 %, dan penyebab faktor faktor lain 3.8 % [2].

Sedangkan untuk P3B Sumatera UPT Tanjung Karang, pada tahun 2011 terdapat enam kali gangguan petir pada saluran *backbone* dengan total lama padam SUTT selama 1 jam 52 menit dan total energi tidak tersalurkan sebesar 1.098,8 MWh. Sedangkan pada tahun 2012 gangguan petir pada saluran transmisi backbone telah mengakibatkan 4 kali pada konsumen dengan total energi tidak tersalurkan sebesar 1,804.94 MWh [3]. Kondisi ketika sebuah menara (tower) SUTET-500 kV tersambar oleh petir (*direct lightning strike*) maka akan timbul potensial/tegangan yang menginduksi ke kawat tanah, konduktor fasa dan pada struktur menara tiangnya. Bentuk kanal muatan listrik ini berupa “aliran penghubung naik” (*upward streamer*) yang muncul di puncak menara tiang dan menyongsong lidah lompat (*stepped leader*) yang dalam perjalanannya (alurnya patah-patah) dari permukaan dasar awan menuju bumi. Hubungan antara aliran penghubung naik (I_s) dan amplitudo petir (I_s) adalah : $I_s = 0.5 \times 0.71 \times (I_s)^{0.75}$ dengan I_s dalam satuan meter dan I_s dalam satuan (kA). Kanal I_s ini mampu menaikan tegangan pada konduktor konduktor fasa SUTET yang dipasangkan pada menaranya.

Untuk SUTET 500 kV, AC, yang ada di bagian selatan Cina, yaitu *China Southern Grid* (CSG), sekitar 217 terjadi lewat denyar (*flashover*) dan 10 terjadi lewat denyar yang berhasil dilalui, kira kira 69 % amplitudo arus petir menyebabkan kegagalan *tripout* dengan amplitudo arus antara 30 kA sampai dengan 50 kA. Sedangkan pada jaringan SUTET 500 kV, DC (masih dalam sistem CSG), ada 83 lewat denyar, 3 lewat denyar dapat dilalui, 87 % amplitudo arus petir menyebabkan *tripout* yaitu di bawah 50 kA, sementara itu, sistem CSG pada SUTET (Saluran Udara Tegangan Ultra Tinggi) 800 kV, DC, terdapat 6 insiden *tripout* dengan amplitudo arus lebih kecil daripada 50 kA [4]. Penelitian yang disponsori PLN Cabang Depok, pada bulan April, Mei dan Juni 2002, dengan menggunakan teknologi *Lightning Position and Tracking System* (LPATS), untuk mengenali perilaku petir (*lightning performance*) pada wilayah kota, diselatan Jakarta. Ternyata hasil yang ditemukan : arus petir negatif berkekuatan 379,2 kA (kilo Ampere) dan petir positif mencapai 441,1 kA. Fenomena selanjutnya, amplitudo arus yang cukup besar ini akan memicu pemunculan surja tegangan (*voltage impulse*) yang beresiko menimbulkan tegangan lebih (*overvoltage*).

Deskripsi di atas menunjukkan bahwa kontribusi penelitian yang telah dikerjakan sebelumnya memberikan data kontribusi dalam bentuk ‘tingkat kegagalan’ (*probability of failure*) dalam penyaluran energi listrik kepada pelanggan. Tingkat kegagalan ini tervisualisasi dalam fenomena lewat denyar (*flash over*), lewat denyar balik (*back flash over*) dan angka total energi (dalam satuan Megawatt hour) yang tak tersalurkan kekonsumen.

Tulisan ini menyajikan dan bertujuan menentukan angka nilai tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir di puncak menara transmisi tegangan ekstra tinggi (*extra high voltage transmission lines*) yang merupakan faktor penyebab kegagalan dan terputusnya penyaluran energi (*tripout*) dengan menggunakan komputer (sebagai simulaturnya) dimana program Matlab versi R2013a digunakan. Variabel tegangan lebih dan amplitudo arus petir serta parameter struktur menara SUTET ikut dipertimbangkan. Sedangkan objek penelitiannya berupa data parameter desainer menara (tower) yang digunakan pada rute jaringan SUTET-500 kV di pulau Jawa.

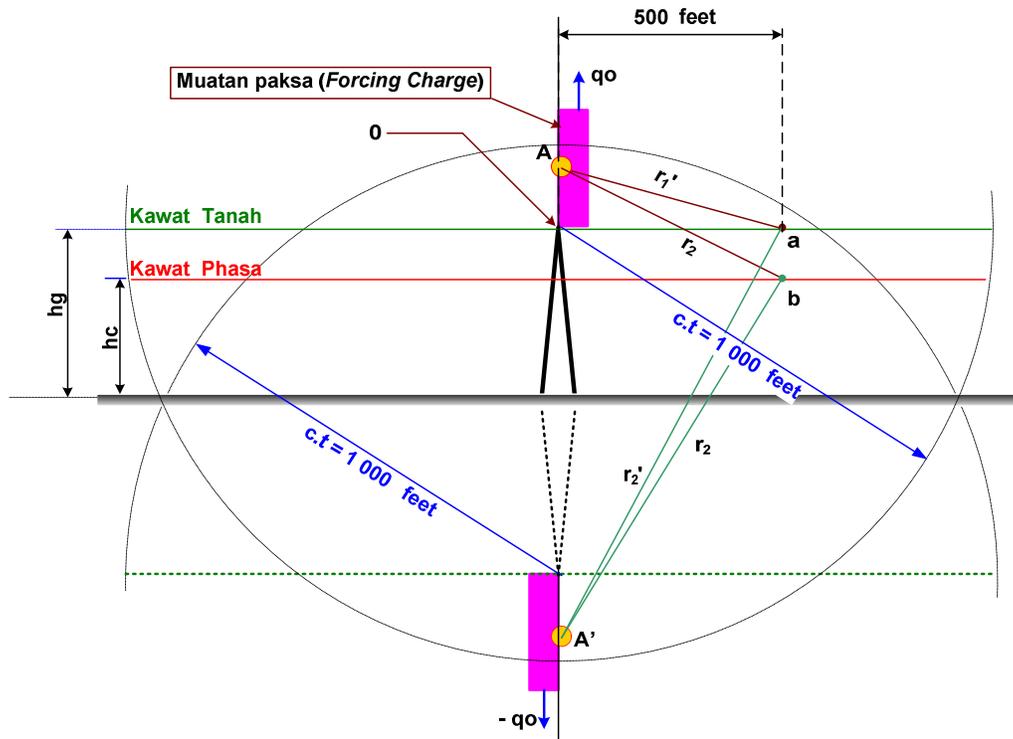
2. Metode Penelitian

Perhitungan tegangan lebih dilakukan dengan menggunakan komponen tegangan yang disebabkan oleh pengaruh muatan di dalam kanal sebuah sambaran petir dan menyertakan variabel “aliran-penghubung-naik” (*upward streamer*) yang muncul di atas puncak menara SUTET tersebut dalam bentuk

muatan q_0 (Gbr.1). Ilustrasi dan hubungan antara tegangan lebih dan aliran-penghubung-naik ini ditunjukkan melalui *diagram block* Gambar 3 yang menggambarkan amplitudo arus petir (I_s) melalui parameter menara (*tower*) yang menghasilkan tegangan lebih sebesar V_C . Tegangan V_C adalah tegangan yang terakumulasi disetiap konduktor fasa dan akan tersuperposisi dengan tegangan operasional SUTET yaitu sebesar 500 kV yang menimbulkan tegangan lebih (*overvoltage*) dan tegangan turun (*under voltage*)

2.1. Pengaruh Gelombang Muatan Paksa (*Forcing Charge*) di atas Menara

Untuk mengetahui pengaruh gelombang muatan paksa ini terhadap jangkauan (radius) sejauh 1000 feet (1 feet = 0.3048 meter) diperlukan contoh dan sketsa/ilustrasi seperti Gambar 1 [5],



Gambar 1
Model Ilustrasi Pengaruh Muatan Paksa di atas Puncak Menara [5]

Gambar 1. Model Ilustrasi Pengaruh Muatan Paksa di atas Puncak Menara

Asumsikan menara terisolir dari sentuhan permukaan tanah dan semua muatan positif terkonsentrasi dititik A (hati hati, notasi titik “A” berbeda pengertiannya dengan titik “a”) dan juga diasumsikan bahwa kerapatan muatan yang terdistribusi di sepanjang sosok gelombang segi empat menghasilkan arus dengan magnitud 50 000 Amper dengan kecepatan 30 % dari kecepatan cahaya, c. Jadi disini nilai kecepatannya (v) = 0.3. Dengan demikian diperoleh hubungan [5],

$$q_0 = \left(\frac{I_s}{v \cdot c} \right) = \frac{50\,000 \text{ Amper}}{(0.3 \times 3 \times 10^{10}) \cdot \left(\frac{cm}{sec} \right)} = 5.5 \times 10^{-6} \text{ (C/Cm)} \tag{1}$$

Total muatan paksa yang muncul dalam waktu 1 mikro detik adalah, $Q_0 = q_0 \cdot v \cdot c \cdot t = (5.5 \times 10^{-6}) \cdot (0.3) \cdot (3 \times 10^{10}) \cdot (10^{-6}) = 0.05$ Coulomb. Dengan memperhatikan Gambar 2, gelombang muatan bayangan berjalan dari titik puncak menara bayangan dan menghasilkan muatan sebesar $-Q_0$ yang terkonsentrasi pada titik A’. Besarpotensial di titik“a” diambil sebagai titik referensi pengukuran saat titik tersebut terisolasi dari konduktor, dan kawat tanah diasumsikan tidak ada. Setiap elemen konduktor yang terisolasi memperoleh sebuah potensial yang berbeda, tetapi saat elemen elemen yang terisolasi itu dihubungkan bersama membentuk sebuah konduktor yang kontinyu (diasumsikan kawat tanah tidak ada), maka potensial yang sesungguhnya mempunyai nilai yang sama dengan potensial rata rata. Pengaruh konduktor dalam menyamakan potensial memerlukan suatu redistribusi muatan yang berlangsung

disepanjang konduktornya. Porsi/ bagian konduktor yang paling dekat dengan titik muatan paksa (*forcing charge*) berada akan menjadi bermuatan negative dan bagian segmen konduktor yang lebih jauh (terpencil) akan menjadi bermuatan positif. Bagaimanapun juga, konduktor secara keseluruhan tetap pada kondisi berpotensi sama. Potensial paksa rata rata konduktor relatif terhadap tanah dinotasikan sebagai V_C . Jika kawat tanah ada (hadir) dan terisolasi dari tanah, maka kawat tanah ini akan memiliki (mendapatkan) nilai potensial relatif terhadap tanah. Contoh, potensial di titik “b” terhadap tanah (sebagai titik pengukuran) adalah [5]:

$$\psi_b = (9 \times 10^{11}) \cdot Q_0 \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = 630 \text{ kV} \quad (2)$$

Kehadiran konduktor mempunyai pengaruh yang kecil terhadap potensial, kondisi ini terjadi karena muatan total pada konduktor besarnya nol. Setiap elemen yang terisolasi pada kawat tanahnya mendapat potensial yang berbeda .Bagaimanapun juga, bila elemen elemen ini terisolasi dihubungkan bersama tetapi tidak ditanahkan, maka semua elemen atau titik harus berpotensi sama. Kawat tanah memperoleh potensial yang sama, sebesar V_g , semua potensial ini disebabkan oleh muatan paksa, q_0 . Jika kawat tanah ditanahkan melalui sebuah konduktor dengan diameter kecil tak berhingga, makamuatan tidak dapat menetap pada konduktor ini, muatan-muatan ditarik dari tanah, dan kawat tanah berpotensi menjadi $(-V_g)$. Jadi potensial dari kawat tanah menjadi nol yaitu $(V_g + (-V_g)) = 0$.

2.2. Model Struktur Menara SUTET

Model menara transmisi dengan konfigurasi vertikal dalam konsep bayangan (*electric dipole*) ketika puncaknya disambar petir (dengan I_s dan q_0 adalah amplitudo arus aliran-penghubung-naik dan muatannya) ditunjukkan oleh Gbr. 2. Besar potensial yang dicapai oleh konduktor fasa ketika terjadi sambaran petir di puncak menara adalah sama dengan potensial rata-rata, V_C . Potensial V_C ini disebabkan karena ada muatan paksa (*forcing charges*) q_0 dipuncak menara (lihat Gbr. 2) [6],

$$V_C = \frac{1}{z_3} \cdot \left[\int_0^{z_2} (\psi_{res} + \psi'_{res}) \cdot dz + \int_{z_2}^{z_3} \psi_{res} \cdot dz \right] \quad (3)$$

dengan,

$$z_2 = \sqrt{(c \cdot t)^2 - (dis)^2} \quad ; \quad z_3 = \sqrt{(c \cdot t)^2 - (ds)^2} \quad ; \quad dis = \sqrt{a^2 + (2h + Is - x_1)^2} \quad ;$$

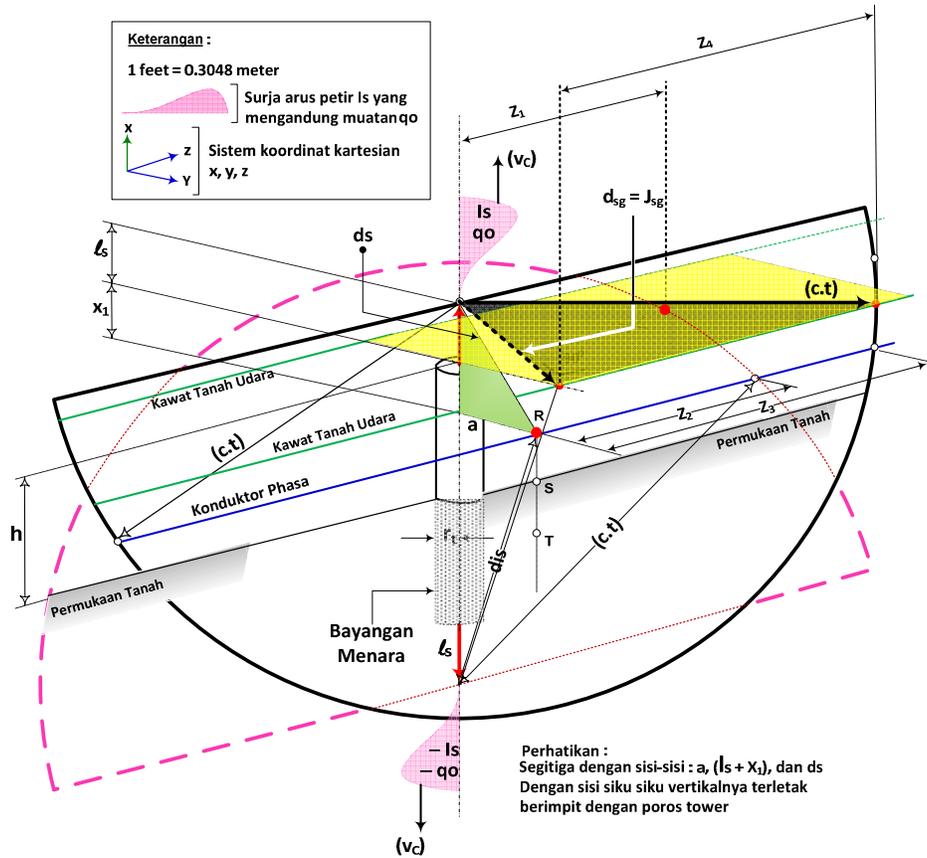
$$ds = \sqrt{a^2 + (x_1 + Is)^2} \quad ; \quad \psi_{res} = \text{Potensial keterlambatan (retarded potential)} \quad ;$$

ψ'_{res} = potensial keterlambatan bayangan (dipakai istilah 'bayangan' karena metoda dari konsep *electric dipole*).

Potensial keterlambatan (ψ_{res}) adalah potensial yang muncul dari fenomena elektromagnetik yang disebabkan ada besaran arus listrik (I) atau penyebaran besaran muatan (q) pada saat kondisi (masa) lalu. Persamaan nilai potensial 'keterlambatan' ini dapat ditentukan dalam bentuk fungsi dari besaran dimensi struktur menara, dimensi jarak tinjauan, dan keterlibatan dari kehadiran “aliran-penghubung-naik” dengan dimensi panjang sebesar ($Is = Is$). Secara formulasi nilai potensial keterlambatan ini dapat ditentukan sebagai persamaan yang disebabkan oleh ‘gelombang muatan paksa’ (*the forcing wave of charge*) berikut [6].

$$\psi_{res} = \left(\frac{30 \cdot I_s}{v} \right) \times \left[\sinh^{-1} \left(\frac{v \cdot c \cdot t + x}{\sqrt{(z^2 + y^2) \cdot (1 - v^2)}} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{z^2 + y^2}} \right) + \ln \left(\frac{1 - v}{1 + v} \right) \right] \quad (2)$$

Sedangkan untuk ‘gelombang muatan paksa bayangan’ (*the image forcing wave of charge*), dibutuhkan membuat harga $a = \sqrt{z^2 + y^2}$ (lihat Gbr. 1) dan butuh perubahan variabel $x = 2 \cdot (h + Is) - x$. Jadi nilai potensial keterlambatan (*retarded potential*) menjadi [6],



Gambar 2. Sistem saluran transmisi dalam koordinat x, y, z dengan nomenklaturnya[6]

$$\psi'_{RES} = \left(\frac{30 \cdot I_S}{v}\right) \times \left[\sinh^{-1} \left(\frac{2 \cdot (h + l_S) - x}{\sqrt{z^2 + y^2}} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{v \cdot c \cdot t + 2 \cdot (h + l_S) - x}{\sqrt{(z^2 + y^2) \cdot (1 - v^2)}} \right) - \ln \left(\frac{1 - v}{1 + v} \right) \right] \quad (3)$$

$x = x_1 + l_S$ dan $(y = a)$ di dalam persamaan (2) dan (3).
 kondisi persamaan (3) ini hanya bertahan/berlaku untuk nilai :

$$(c \cdot t) > \sqrt{((2) \cdot (h + l_S) - x)^2 + y^2 + z^2}$$

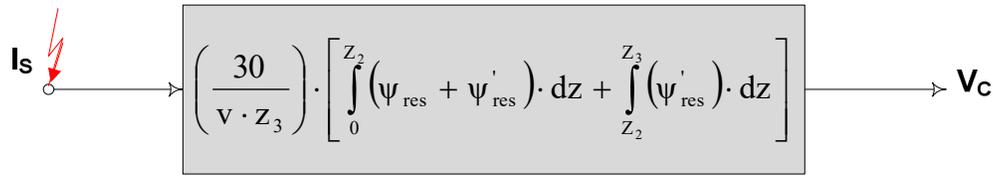
Nilai $(c \cdot t) > \left(\sqrt{((2) \cdot (h + l_S) - x)^2 + y^2 + z^2} \right)$ adalah menetapkan/mendefinisikan paparan bidang

2.3. Model Parameter Struktur Menara SUTET

Model parameter struktur menara Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi yang dianalisis adalah SUTET-500 kV, rutenya membentang melewati Dusun Gabusan, Bantul, Yogyakarta. Model parameter stuktur menara diperoleh dengan cara mengeliminir persamaan (2) dan persamaan (3) dan kemudian di substitusikan ke persamaan (3) sehingga menjadi :

$$V_C = \left(\frac{30 \cdot I_S}{v \cdot z_2}\right) \left[\int_0^{z_2} (\psi_{RES} + \psi'_{RES}) \cdot dz + \int_{z_2}^{z_3} (\psi'_{RES}) \cdot dz \right] =$$

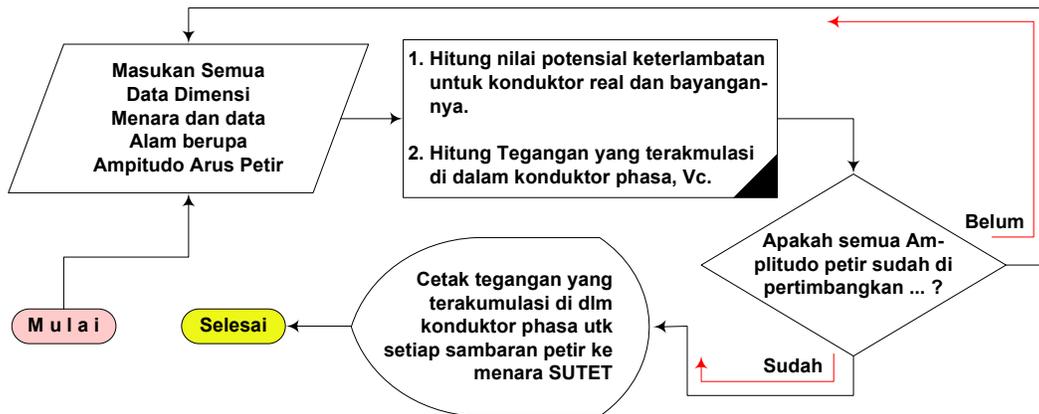
$$\left(\frac{V_c}{I_s}\right) = \left(\frac{30}{v \cdot z_3}\right) \cdot \left[\int_0^{z_2} (\psi_{res} + \psi'_{res}) \cdot dz + \int_{z_2}^{z_3} (\psi'_{res}) \cdot dz \right] \quad (4)$$



Is adalah Arus sambaran petir di puncak menara SUTET-500 kV.

Gambar 3. Diagram *block* untuk sistem parameter struktur menara dengan arus Sambaran petir sebesar Is

Karena penyelesaian akhir dari persamaan (4) cukup sulit (jika dikerjakan secara manual) maka proses untuk mendapatkan harga tegangan yang terakumulasi di dalam konduktor fasa digunakan algoritma seperti di bawah ini dimana komputer sebagai simulatornya.



Gambar 4. Algoritma Komputer untuk perhitungan tegangan yang terakumulasi ke dalam konduktor fasa

Data dimensi adalah : ketinggian tiang, Jarak horizontal antar konduktor fasa, jarak vertikal konduktor fasa, dan semua data yang tertulis pada nomenklatur Gbr. 2. Sedangkan data alam adalah besar amplitudo sambaran petir dalam satuan ampere. Program komputer dengan diagram alir seperti Gbr. 4 dikerjakan dengan Matlab versi R2013a dengan tampilan luarannya berupa nilai nilai tegangan yang terakumulasi ke dalam konduktor fasa. Amplitudo petir yang digunakan dalam satuan kilo-Ampere, parameter struktur menara SUTET nya dalam satuan kilo-Volt per arus sambaran dalam kilo-Ampere dan tegangan Vc yang muncul dalam satuan kilo-Volt (kV).

3. Hasil dan Analisis

Setelah sesaat ($t = 0^+$) sambaran petir di puncak menara maka akan muncul tegangan yang terakumulasi di setiap konduktor fasa.

- a. Akumulasi Tegangan pada fasa “R” saat 1 mikrodetik pascasambaran petir

Tabel 1. Tegangan yang terakumulasi pada konduktor "R"

No	Arus Petir (kA)	Teg. yg terakumulasi pada fasa "R" (kV)	No	Arus Petir (kA)	Teg. yg terakumulasi pada fasa "R" (kV)
1	10	192.04	24	56	1075.4
2	12	230.44	25	58	1113.8
3	14	268.85	26	60	1152.2
4	16	307.26	27	62	1190.6
5	18	345.66	28	64	1229
6	20	384.07	29	66	1267.4
7	22	422.48	30	68	1305.8
8	24	460.89	31	70	1344.3
9	26	499.29	32	72	1382.7
10	28	537.7	33	74	1421.1
11	30	576.11	34	76	1459.5
12	32	614.52	35	78	1497.9
13	34	652.92	36	80	1536.3
14	36	691.33	37	82	1574.7
15	38	729.74	38	84	1613.1
16	40	768.14	39	86	1651.5
17	42	806.55	40	88	1689.9
18	44	844.96	41	90	1728.3
19	46	883.37	42	92	1766.7
20	48	921.77	43	94	1805.1
21	50	960.18	44	96	1843.5
22	52	998.59	45	98	1882
23	54	1037	46	100	1920.4

b. Akumulasi Tegangan ke konduktor Fasa

Terjadi akumulasi tegangan secara superposisi pascasambaran petir di puncak menara sebesar :

$$= V_{\text{sistem}} - V_{\text{petir}}$$

Jika tegangan sistem bersiklus dengan sudut fasa : (0°) ; (-120°) ; (240°) maka besar tegangan sistem untuk masing masing fasa (R, S, T) :

$$V_R = \left(\frac{500}{\sqrt{3}}\right) \angle 0^\circ = (288.7 + j 0) \text{ kV} ; V_S = \left(\frac{500}{\sqrt{3}}\right) \angle -120^\circ = (-144.3 - j 250) \text{ kV}$$

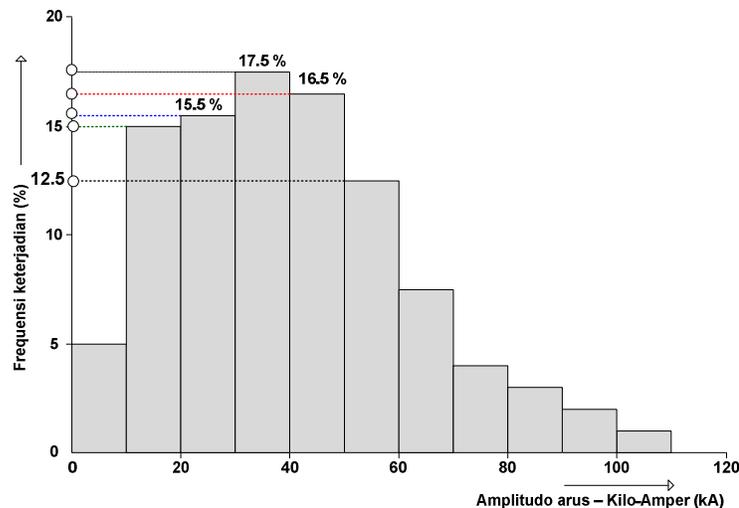
$$V_T = \left(\frac{500}{\sqrt{3}}\right) \angle -240^\circ = (-144.3 + j 250) \text{ kV}$$

Dengan demikian jika amplitudo petir yang menyambar dipilih berdasarkan histogram Andron, 1961 [7], dimana amplitudo arus : lebih besar 10 kA dan lebih kecil 20 kA mempunyai tingkat sering terjadi sebesar 15 % ; lebih besar 20 kA dan lebih kecil 30 kA sering terjadi 15.5 % ; lebih besar 30 kA dan lebih kecil 40 kA sering terjadi 17.5 % ; serta lebih besar 40 kA dan lebih kecil 50 kA tingkat kesering terjadinya sebesar 16.5 % maka ketika terjadi sambaran petir dengan amplitudo arus petir 10 kA tegangan

Pada konduktor fasa R pascasambaran adalah $(288.7 + j 0) - 192.04 = (96.66 + j 0) \text{ kV}$. Untuk sambaran petir 40 kA dan 50 kA fasa R merasakan tegangan sebesar $(-479.44 + j 0) \text{ kV}$ dan $(-671.48 + j 0) \text{ kV}$. Untuk fasa-fasa R, S, T, dan U, V, W (untuk rangkaian ganda) ditunjukkan Tabel : 2.

Tabel 2. Peningkatan dan penurunan nilai tegangan pada konduktor-konduktor fase Pascasambaran petir 1 mikro-detik di puncak menara SUTET.

No	Arus Petir (kA)	Frekuensi keterjadiannya (%)	Tegangan injeksi petir (kV)	Konduktor Fase	Tegangan <i>line-to-netral</i> Konduktor fase 1 mikro-detik pascasambaran petir (kV)	
					Kompleks	Polar
1	10	15	- 192.04	R = U	96.66 + j 0	96.66 $\angle 0^\circ$
				S = V	-336.34 - j 250	419.08 $\angle -143.4^\circ$
				T = W	- 336.34 + j 250	419.08 $\angle -216.6^\circ$
2	40	16.5	- 768.14	R = U	- 479.44 + j 0	479.44 $\angle 0^\circ$
				S = V	- 912.44 - j 250	946.07 $\angle -164.7^\circ$
				T = W	- 912.44 + j 250	946.07 $\angle -195.32^\circ$
3	50	16.5	- 960.18	R = U	- 671.48 + j 0	671.48 $\angle 0^\circ$
				S = V	- 1104.5 - j 250	1132.44 $\angle -192.75^\circ$
				T = W	- 1104.5 + j 250	1132.44 $\angle -180.11^\circ$



Gambar 5
Frekuensi Histogram Magnitud arus petir pada saluran transmisi sebagaimana yang dihitung dengan data lapangan yang digabung [7]

Gambar 5. Frekuensi Histogram Magnitud Arus Petir pada Saluran Transmisi sebagaimana yang Dihitung dengan Data Lapangan yang Digabung [7]

Untuk sambaran petir dengan amplitudo 50 kA tegangan *line-to-line* pada masing masing fase R, S, T menjadi : 1163.04 kV, 1961.44 kV, dan 1961.44 kV. Nilai tegangan lebih ini sudah melampaui Tingkat Isolasi Dasar (*Basic Insulation Level, BIL*) atau TID pada *insulation coordination* pada peralatan dan komponen utama di gardu induk, yaitu sebesar 1 800 kV [8] . Hal yang sama untuk sambaran petir 40 kA, dimana terjadi kenikan tegangan menjadi tegangan lebih (*overvoltage*) pada fase R, S, T masing masing sebesar 830.41 kV, 1638.64 kV, dan 1638.64 kV untuk fase T. Sedangkan untuk arus sambaran 10 kA, tegangan lebih pada fase S, sama dengan fase T, yaitu sebesar : 725.87 kV, dan fase R mengalami *under voltage* pada tegangan *line-to-line* sebesar 167. 4 kV. Sedangkan tegangan SUTET di Indonesia sebesar 500 kV.

Nilai kenaikan tegangan untuk setiap fasa terhadap arus sambaran petir ditunjukkan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Arus Petir Versus Akumulasi tegangan pada Konduktor Fasa R, S, T dan U, V, W saat 1 mikro-detik Pascasambaran Petir ke Puncak Menara

4. Kesimpulan

Setelah melakukan analisis sambaran petir saat 1 mikrodetik pascasambaran petir di puncak struktur menara SUTET-500 kV dapat disimpulkan beberapa hal :

1. Setelah 1 mikro detik pasca sambaran petir, tegangan lebih terjadi pd konduktor-konduktor fasa. R, S, T masing sebesar 1163 kV, 1961 kV, dan 1961 kV sama pada fasa U, V, W.
2. Terungkap bahwa tegangan lebih yang termuncurl melebihi BIL 1 800 kV (*Basic Insulation Level*, BIL) peralatan dan perlengkapan di Gardu Induk (*substation*).
3. Pada sambaran petir 10 kA. terjadi kondisi *under voltage* pada fasa 'R' dimana dua fasa lainnya (S dan fasa T) mengalami hal sebaliknya, yaitu bertegangan lebih (*overvoltage*). Sedangkan untuk sambaran petir dgn amplitudo arus 40 kA dan 50 kA kondisi disemua konduktor fasa terjadi tegangan lebih (*overvoltage*).
4. Penelitian simulasi ini belum meneliti untuk waktu tinjauan pada waktu tertentu yang durasinya lebih kecil dan lebih besar 1 mikro-detik pascasambaran petir.

Daftar Pustaka

- [1] Cuaran. J., Roman, F., Becerra, M.,, "Lightning Shielding Analysis of EHV and UHV Transmission Lines : On the Effect of Terrain Topography", The IEEE 33th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 08 – 30 Sept. 2016, DOI : 10.1109/ICLP.2016.7791371., p. : 1 – 6., Estoril, Portugal (PRT). 2016
- [2] Utama. B., "Visualisasi Medan Listrik Impuls Petir pada Sistem Pemodelan SUTET-500 – 50 Hz", Yogyakarta Jur. Tek. Elektro – Fak. Teknik, UniversitasGadjah Mada. 2002
- [3] Wihartady, H., Prasetyo, P., Rahmady, MB., Hidayat, R., Wibowo, AT., "Mitigasi Gangguan akibat Peir pada PT. PLN (Persero) P3B Sumatera UPT Tanjung – Karang", LaporanPT. PLN (Persero) P3B Sumatra UPT Tanjung Karang Jl. Basuki Rahmat No.19, Bandar Lampung – Indonesia (IDN).
- [4] Cai. H., Jia. L., Liu. G., Hu. S., Shi. J., He. H., Zhao. X., He. J., "Lightning Performance of EHV and UHV Overhead Transmission Lines in China Southern Power Power Grid", The IEEE 33 th International Conference on Lightning Protection (ICLP), DOI : 10.1109/ICLP. 2016. 7791355., 08 – 30 Sept. 2016, p. :1– 6., Estoril, Portugal (PRT). 2016
- [5] Wagner. CF., dan Hileman. AR., "A New approach to the Calculation of the Lightning Performance of Trasmision Lines : III–A simplified Method: Stroke to Tower", Transaction of the

- American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, DOI: 10.1109/AIEEPAS.1960.4500810, October Vol. 79, Part III, pp. 589 – 603, Pennsylvania (Pa) – United State of America (USA). 1960
- [6] Liew. AC., dan Darveniza. M., “A Sensitivity Analysis of Lightning Performance Calculations for Transmission Lines”, The IEEE Summer Power Meeting and EHV Conference, The IEEE Conference, The IEEE Transmission & Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, DOI :10.1109/TPAS.1971.293128., July 12-17, p. 1443-1451, Los Angeles, California (CA) – United State of America (USA). 1971
- [7] Anderson, JG., “Monte Carlo Computer Calculation of Transmission Lines Lightning Performance”, AIEE Transection Part III, vol.80, p. 414 – 420., 1961.
- [8] Republic of Indonesia Perusahaan Umum Listrik negara., “Java 500 kV Transmission System Engineerig Report”, Volume 1., p. 4.2., Merz and McLellan Amberley, Killingworth, Newcastle upon Tyne NE 12 0RS, England-In Association with the PT Encona Engineering Inc Jl. Angkasa No 32, Blok B5.6.7, Kemayoran – Jakarta, Indonesia. 1980