

ANALISIS SISTEM PENGETANAHAN ELEKTRODA PLAT PADA GARDU HUBUNG GOMONG MATARAM DI TINJAU DARI TEGANGAN LANGKAH

Analysis of Plate Electrode Grounding System at Gomong Mataram Substation from the Step Voltage Point of View

. Ni Made Seniari¹, Nawi Naufan Nada¹, I Made Ginarsa¹

¹⁾Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mataram, Lombok, Nusa Tenggara Barat
Email: seniari_nimade@unram.ac.id, nawi_naufan@yahoo.com, kadekgin@unram.ac.id

ABSTRAK

Sistem proteksi petir eksternal yang berfungsi menyalurkan arus petir didalam tanah (bumi) adalah elektroda pengetanahan. Arus petir yang dialirkan didalam tanah menimbulkan medan listrik, tegangan langkah dan arus di permukaan tanah. Ke tiga besaran tersebut dapat membahayakan objek disekitar sistem proteksi petir. Gardu hubung Gomong Mataram dengan sistem pengetanahan dua elektroda plat, disimulasikan dengan menginjeksikan arus petir langsung yaitu arus puncak petir 18, 30, 392 kA; 25,100, 200 kHz. Dua elektroda plat sejajar $1 \times 0,5 \text{ m}^2$ berjarak 12 m, yang ditanam 1 m dibawah permukaan tanah. Hasil simulasi menunjukkan dengan injeksi 392 kA; 200 kHz pada posisi masing-masing (0;-6;-1,5) dan (0;6;-1,5) menghasilkan nilai medan listrik, tegangan langkah, dan arus di permukaan tanah masing-masing: 0,1282 V/m, 2,137 V dan 0,007916 A. Direkomendasikan bahwa tidak perlu penambahan elektroda pelat dan pengetanahan grid, karena nilai tegangan langkah masih dibawah standar *IEEE std 80-2000* yaitu maksimal 7 kV.

Kata kunci: Sambaran Arus Petir, Elektroda Plat, Medan Listrik, Tegangan Langkah, Arus permukaan.

ABSTRACT

*The external lightning protection system (SPP) that has a function in distributing the lightning current into the ground (earth) is the grounding electrode. The current flowing in the soil will give step voltage and current stresses in the soil, this may endanger the object around the SPP. Objects observed is Gomong Mataram substation which was struck by direct lightning 18, 30, 392 kA with the frequency of lightning peak currents 25,100, 200 kHz at the 2 parallel plates grounding $1 \times 0,5 \text{ m}^2$ that planted 1 m below the soil surface. Simulation shows that with 392 kA lightning injection with frequency 200 kHz at position (0;-6;-1,5) and (0;6;-1,5) produce value $E = 0,1282 \text{ V/m}$, $\Delta V = 2,137 \text{ V}$, and $I_T = 0,007916 \text{ A}$. The grounding plates addition and grounding grid recommendations are not performed because the step voltage values are still below the *IEEE std 80-2000* standard of 7 kV.*

Keyword: Lightning, Electrode Plate, Electric Field (E), Step Voltage (ΔV), Current Surface (I_T).

PENDAHULUAN

Sistem proteksi petir (SPP) eksternal yang berfungsi untuk menyalurkan arus petir di dalam tanah (bumi) adalah elektroda pengetanahan (*grounding*). Arus yang dialirkan di dalam tanah akan menimbulkan medan listrik (E), tegangan langkah (ΔV), dan arus di permukaan tanah (I_T). Ketiga besaran ini dapat membahayakan objek di sekitar SPP apabila besarnya melebihi batas angka keamanan yang diizinkan. Ketiga besaran tersebut tergantung dari karakteristik petir yaitu arus puncak petir (I_p), frekuensi arus petir (f) serta tergantung dari media tanah

yang dilalui, meliputi permitivitas tanah. Sistem penangkal petir di katakan handal apabila arus petir mampu di dialirkan dengan cepat ke dalam tanah. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain jenis, jumlah dan dimensi elektroda serta faktor-faktor kondisi lingkungan tanah tempat elektroda di tanam.

Gedung gardu hubung (GH) Gomong Mataram berukuran $12 \times 6 \text{ m}^2$ memiliki sistem pengetanahan dengan 2 buah elektroda plat tembaga ($1 \times 0,5 \text{ m}^2$) yang berjarak 12 m. Untuk mengetahui kemampuan dari sistem pengetanahannya perlu dilakukan analisa tegangan langkah, dengan asumsi di tengah-tengah gedung

adalah posisi dari (0,0,0) dan posisi masing-masing plat yang di tanam 1 m di bawah permukaan tanah adalah (0, -6,-1)m dan (0,6,-1)m.

LANDASAN TEORI

Gardu hubung (GH) atau *Switching substation* adalah gardu yang berfungsi sebagai sarana manuver pengendali beban listrik jika terjadi gangguan aliran listrik, program pemeliharaan atau untuk maksud mempertahankan kontinuitas pelayanan.

Petir merupakan gejala alam dengan aliran arus impuls yang sangat tinggi. Petir terjadi karena adanya aliran muatan listrik dari awan ke tanah atau dari tanah ke awan, apabila intensitas medan listrik (E) melebihi permitivitas udara (Dehn-Sohne,2014).

Mekanisme terjadinya petir bermula dari awan yang bermuatan. Awan bermuatan terbentuk karena adanya kelembaban, udara yang berhembus naik, dan partikel bebas atau aerosol. Ketiga elemen ini akan menyebabkan timbulnya muatan dalam awan *Cumulonimbus*. Seberapa besar muatan yang ada dalam awan, maka di bawah gumpalan awan yang berjarak kilometer dengan tanah, maka di permukaan tanah juga akan terjadi muatan yang sama besar dengan muatan yang ada di awan, tetapi dengan polaritas yang berlawanan. Muatan yang berada di awan dan muatan yang ada di permukaan tanah menimbulkan intensitas medan Listrik (E) dari kumpulan muatan positif menuju kumpulan muatan negative Hayt Jr., 2006).

Jika muatan listrik di awan dan ndi tanah besar, maka intensitas medan listrik juga besar. Apabila intensitas medan listrik bisa menembus permitivitas udara, maka terjadi pelepasan muatan berupa petir atau terjadi sambaran petir, yang bergerak dari muatan positif menuju muatan negative dengan kecepatan cahaya (Bandri, 2014).

Posisi Indonesia yang terletak pada koordinat 6° LU - 11° LS dan 95° BB – 141° BT menempatkan wilayah Indonesia pada daerah iklim tropis. Sambaran petir di daerah tropis khususnya Indonesia mempunyai karakteristik petir yang berbeda dengan daerah sub-tropis.

Adanya muatan-muatan listrik (Q) yang bergerak pada suatu titik tertentu

akan menghasilkan arus listrik (i). (Hayt Jr., 2006).

$$Q = \int i dt \text{ [C]} \dots\dots\dots(1)$$

$$i(t) = I_p e^{j2\pi f t p} \text{ [A]} \dots\dots\dots(2)$$

$$i(t) = I_p e^{j\omega} \text{ Atau } i(t) = I_p e^{j2\pi f t p} \dots\dots\dots(3)$$

dengan:

i = Arus Impuls petir [A]

I_p = Arus puncak Impuls petir

Q = Muatan petir [C]

Arus petir yang terinjeksi pada sebuah konduktor yang berbentuk sebuah luasan dengan kerapatan yang seragam diseluruh permukaannya akan membentuk kerapatan muatan luas , yaitu (Hayt Jr., 2006):

$$\rho_s = \frac{MQ}{S} \text{ [C/m}^2\text{]} \dots\dots\dots(4)$$

dengan:

ρ_s = Kerapatan muatan luas [C/m²]

MQ = Magnitude muatan listrik petir [C]

S = Luas permukaan elektroda plat [m²]

Intensitas medan listrik (E) merupakan sebuah medan vektor yang memiliki besar dan arah. Medan listrik pada sumbu x dan z yang dihasilkan oleh muatan yang simetris terhadap titik medan akan saling menghilangkan, sehingga nilai medan Listrik hanya akan mengarah ke arah sumbu y (Hayt Jr., 2006).

$$E_y = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_t} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y dx'}{x^2 + y^2} \text{ [V/m]} \dots\dots\dots(5)$$

$$E_y = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_t} \tan^{-1} \frac{x'}{y} \Big|_{-\infty}^{\infty} \text{ [V/m]} \dots\dots\dots(6)$$

dengan: ϵ_t = Permittivitas tanah

Potensial suatu muatan dari titik satu ke titik lainnya di definisikan sebagai usaha yang dilakukan dalam memindahkan suatu satuan muatan positif (Q). Persamaan potensial listrik antara dua titik adalah (Hayt JR., 2006):

$$V_{AB} = \frac{W}{Q} = - \int_B^A E \cdot dl \text{ [J/C atau V]} \dots\dots\dots(7)$$

$$V_{AB} = - \int_B^A E \cdot dl \text{ [V]} \dots\dots\dots(8)$$

Tegangan langkah adalah perbedaan tegangan antara kaki seseorang saat berjalan di atas permukaan tanah pada jarak 1 meter tanpa menyentuh objek apapun (Dehn-Sohne, 2014).

Beda potensial atau tegangan langkah di antara dua buah titik persamaannya dapat ditulis sebagai berikut (Hayt Jr., 2006)

$$\Delta V = V_2 - V_1 \text{ [V]} \dots\dots\dots(9)$$

Arus yang mengalir melewati suatu luasan material akan menghasilkan kerapatan arus (J). Kerapatan arus (J) adalah sebuah besaran vektor yang memiliki satuan (A/m²). (Hayt Jr., 2006).

$$I_T = I_C + I_D \quad (A/m^2)..... (10)$$

dengan,

$$I_C = \sigma E \quad (A/m^2).....(11)$$

$$I_D = \frac{\partial}{\partial t} (D) = \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_t E) = j2\pi f E \quad (A/m^2)..(12)$$

dengan,

D = Kerapatan fluks listrik (C/m^2)

I_T = Arus total yang mengalir di permukaan tanah (A/m^2)

I_D = Kerapatan arus perpindahan (A/m^2)

I_C = Kerapatan arus konduksi (A/m^2)

Arus petir yang terinjeksi mengalir melewati elektroda plat akan menimbulkan arus perpindahan (I_D) dan arus konduksi (I_C) di dalam tanah. Tanah merupakan bahan penghantar yang tidak baik atau dielektrik yang sempurna, sehingga dapat terjadi arus perpindahan (I_D) dan arus konduksi (I_C). Dari persamaan 11 dan 12 terlihat bahwa arus petir yang mengalir di dalam tanah di dominasi oleh arus perpindahan. Besarnya arus perpindahan dipengaruhi oleh frekuensi arus petir. Rapat arus total dalam tanah persamaannya adalah (Edminister, 1993):

$$I_T = I_C + I_D \quad (A).....(13)$$

$$I_T = \iint J_C dS + \iint J_D dS \quad (A).....(14)$$

$$I_T = \iint \sigma E dS + \iint j\omega \epsilon E dS \quad (A).....(15)$$

dengan:

I_T = Arus permukaan tanah [A]

σ_t = Konduktivitas tanah

ϵ_t = Permittivitas tanah

E = Intensitas Medan listrik [V/m]

$\omega = 2\pi f$

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menganalisis besar tegangan langkah (ΔV) disekitar 2 elektroda pengetanahan tembaga berbentuk plat di GH Gomong Mataram, saat terinjeksi arus petir. Analisis tegangan langkah diawali dengan mensimulasikan besar arus puncak petir dan frekuensi arus petir. Selanjutnya menghitung besarnya arus petir sebagai fungsi waktu, menghitung besarnya muatan petir, dan kerapatan muatan luas (ρ_s) di dalam elektroda plat tembaga. Berawal dari kerapatan muatan luas elektroda plat, selanjutnya dihitung intensitas medan listrik (E), tegangan pada titik tertentu (V) dan arus di permukaan tanah (I_T). Di mana arus di permukaan tanah di pengaruhi oleh arus konduksi dan arus perpindahan. Terakhir di hitung besar tegangan langkah (ΔV). Tujuannya adalah untuk mengetahui apakah tegangan langkah di permukaan

tanah masih dalam batas aman yang diijinkan dalam IEEE std 80-2000.

Gardu Hubung (GH) Gomong Mataram berukuran $12 \times 6 \text{ m}^2$, berlokasi di Jalan Erlangga Mataram. GH ini di lengkapi dengan system proteksi petir eksternal (SPP) dengan elektroda pentanahan tembaga berbentuk plat dengan ukuran $0,5 \times 1 \text{ m}^2$. Kedua plat di tanam pada kedalaman 1 m di bawah permukaan tanah, dan di tanam di ujung-ujung bangunan, sehingga berjarak 12 m antara satu plat dengan plat yang lainnya. Dengan menggunakan data parameter petir dari Jadpen ITB bekerjasama dengan LIPPO Group yaitu arus puncak petir, frekuensi arus petir dan waktu yang di butuhkan untuk mencapai puncak arus petir. Dengan simulasi parameter petir tersebut di injeksikan pada elektroda 2 buah elektroda plat. Posisi titik (0,0,-1,5) di asumsikan di tengah-tengah gedung. Posisi plat A (0,6,-1,5)m dan posisi plat B (0,-6, -1,5)m.

Nilai tahanan jenis, konduktivitas dan permitivitas tanah serta, konduktivitas tembaga mengacu pada buku Hayt, Jr, 2006. Hasil simulasi arus petir dan besar tegangan langkah yg terjadi selanjutnya di bandingkan dengan IEEE std 80-2000 yaitu batas aman tegangan langkah maksimum yang di iijinkan adalah 7 kV.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Parameter Petir dan Tetapan Bahan

Parameter petir yg di simulasikan mengacu pada hasil penelitian yang dilakukan oleh Jadpen ITB yg dilakukan oleh Zorro dkk, bekerja sama dengan Lippo Group USA di daerah tropis pegunungan Tangkuban Perahu, tahun 1999, dengan pengukuran sambaran petir langsung ke menara ukur.

Parameter petir :

1. Arus puncak petir (I_p)= 18, 30, 392 kA.

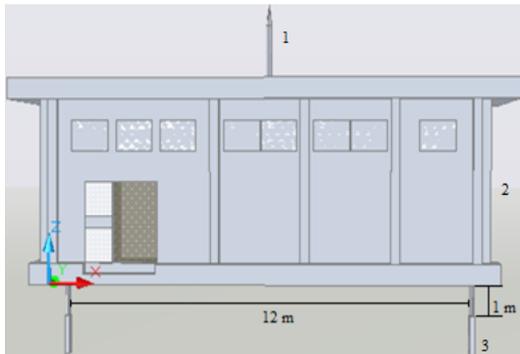
Data waktu dan frekuensi arus petir:

1. Waktu yang dibutuhkan petir untuk mencapai nilai puncak (t)= $1 \mu s = 10^{-6} \text{ s}$.
2. Frekuensi Arus Petir (f) = 25, 100, 200 kHz.

Tetapan bahan yang digunakan adalah (Hayt Jr., 2006):

Permittivitas tanah (ϵ_t) = 2,8.

Konduktivitas tanah kering (σ_t) = 10^{-5} S/m .



Gambar 1. Gardu Hubung Gomong Mataram dan SPP Eksternal

Keterangan:

1. Finial
2. Down Conductor
3. Elektroda pengetanahan plat (Grounding plat)

Dengan simulasi besaran arus petir (I_p), selanjutnya dihitung muatan arus petir (Q), Magnitude muatan arus petir (MQ), dengan perhitungan sebagai berikut :

a. Arus Impuls dan Muatan arus petir

Dengan karakteristik petir yang bervariasi, maka dalam contoh perhitungan ini diambil sampel arus puncak petir 392 kA, 200 kHz. Dari persamaan 3, didapatkan arus impuls petir $i(t)$ yaitu arus sebagai fungsi waktu, adalah:

$$i(t) = I_p e^{j\omega t} \text{ Atau } i(t) = I_p e^{j2\pi f t}$$

Dengan :

$$I_p = 392 \text{ kA}$$

$$f = 200 \text{ kHz}$$

Gardu Hubung Gomong menggunakan 2 (dua) down conductor plat yang terpasang di sisi gedung berupa maka :

$$i(t) = \frac{I_p}{2} e^{j2\pi f t} \text{ A}$$

$$i(t) = \frac{392 \cdot 10^3}{2} e^{-j2\pi \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}}$$

$$i(t) = 196.000 e^{-j2\pi \cdot 200 \cdot 10^{-3}}$$

$$i(t) = 196.000 e^{-j1,256}$$

Dengan, $e^{j2\pi f t} = e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$

$$\omega t = 1,256$$

$$\frac{\omega t}{180^\circ} = \frac{1,256}{\pi}$$

$$180^\circ = \frac{\pi}{1,256} \times 180^\circ$$

$$\omega t = 71,96^\circ$$

Sehingga diperoleh arus impuls petir $i(t)$,

$$i(t) = 196.000 (\cos 71,96 + j 71,96)$$

$$i(t) = 60697,452 + j 186364,747$$

$$i(t) = 196.000 \angle 71,96^\circ$$

Selanjutnya di hitung muatan dan magnitude listrik arus petir.

$$Q = \int i dt [C]$$

Diperoleh,

$$Q = \int_0^{10^{-6}} 196.000 e^{-j400000\pi t} dt$$

$$= 196.000 \times \int_0^{10^{-6}} e^{-j400000\pi t} dt$$

$$= 196.000 \times \left[-j \frac{e^{-j400000\pi t}}{400000\pi} \right] \Big|_0^{10^{-6}}$$

$$= \frac{49}{100\pi} \times [e^{-j400000\pi t}]_0^{10^{-6}}$$

Dengan: $e^{j2\pi f t} = e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$, maka:

$$Q = -\frac{49}{100\pi} \times j [\cos \omega t + j \sin \omega t] \Big|_0^{10^{-6}}$$

$$= -\frac{49}{100\pi} \times j [(\cos 71,96^\circ + j \sin 71,96^\circ) - (\cos 0 + j \sin 0)]$$

$$= -\frac{49}{100\pi} \times j [(0,3096 - 1) + (j 0,9508)]$$

$$= -\frac{49}{100\pi} \times j [-0,6904 + (j 0,9508)]$$

$$= 0,148298 + j 0,107682 \text{ C atau}$$

$$= 0,183269 \angle 35,98^\circ \text{ C}$$

Magnitude muatan listrik petir adalah :

$$MQ = \sqrt{0,148298^2 + 0,107682^2}$$

$$= 0,183269 \text{ C}$$

Selanjutnya di hitung kerapatan muatan arus petir, dalam hal ini adalah kerapatan muatan luas (ρ_s), dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\rho_s = \frac{MQ}{S}$$

Dengan, S (dimensi elektroda plat) = 1 x 0,5 m. Sehingga kerapatan muatan luas (ρ_s) adalah: $\rho_s = \frac{0,183269}{1 \times 0,5} = 0,3665 \text{ C/m}^2$

Untuk arus puncak petir 18, 30, 392 kA dan frekuensi arus petir 25, 100, 200 kHz di perhatikan tabel 1.

Tabel 1. Muatan listrik (Q), Magnitude muatan listrik (MQ), dan kerapatan muatan luas (ρ_s)

I_p (kA)	f_p (kHz)	Q (C)	MQ (C)	ρ_s (C/m ²)
18	25	0,008963+j0,008963	0,00899	0,01798
	100	0,008419+j0,002735	0,008852	0,01771
	200	0,006811+j0,004948	0,008419	0,01684
30	25	0,014938 + j0,001175	0,014984	0,02997
	100	0,014032 + j0,004559	0,014754	0,02951
	200	0,011352 + j0,008248	0,014032	0,02806
392	25	0,195194+ j0,015362	0,195798	0,391597
	100	0,183355+ j0,059575	0,192791	0,385583
	200	0,148298+ j0,107682	0,183269	0,366538

b. Intesitas Medan Listrik

Besarnya kerapatan muatan listrik selanjutnya di gunakan untuk menghitung medan listrik (E) sebagai berikut :

$$E_y = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_t} \int \frac{y dx'}{x^2 + y'^2}$$

$$E_y = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_t} \tan^{-1} \frac{x}{y} \text{ V/m.}$$

Intensitas medan listrik di dalam, di antara ke dua plat (posisi 0;0;-1,5)m.

1. Medan listrik untuk pelat A

$$E_y = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_t} \int \frac{y dx'}{x^2 + y'^2}$$

$$E_y = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_t} \left[\left(\tan^{-1} \frac{x}{y} \right) \right]_{-0,25}^{0,25}$$

$$E_y = \frac{0,366538}{2\pi \cdot 2,8} \left[\left(\tan^{-1} \frac{0,25}{6} - \tan^{-1} \frac{-0,25}{6} \right) \right]$$

$$E_y = \frac{0,366538}{2\pi \cdot 2,8} [(2,385 - (-2,385))]$$

$$E_y = \frac{0,366538}{2\pi \cdot 2,8} [(4,77)]$$

$$E_y = 0,0993591 a_y \text{ V/m}$$

2. Medan listrik untuk pelat B

$$E_y = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_t} \int \frac{y dx'}{x^2 + y'^2}$$

$$E_y = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_t} \left[\left(\tan^{-1} \frac{x}{y} \right) \right]_{-0,25}^{0,25}$$

$$E_y = \frac{0,366538}{2\pi \cdot 2,8} \left[\left(\tan^{-1} \frac{0,25}{6} - \tan^{-1} \frac{-0,25}{6} \right) \right]$$

$$E_y = \frac{0,366538}{2\pi \cdot 2,8} [(2,385 - (-2,385))]$$

$$E_y = \frac{0,366538}{2\pi \cdot 2,8} [(4,77)]$$

$$E_y = 0,0993591 a_y \text{ V/m}$$

Intensitas medan listrik pada plat B sama dengan plat A, karena di asumsikan arus petir terbagi dua secara merata dan material elektroda plat homogen. Sama-sama memiliki jarak pengukuran yang sama yaitu sejauh y = 6 m. Sehingga nilai E total dari kedua plat adalah :

$$E_{Total} = E_{A\hat{y}} + E_{B\hat{y}}$$

$$= 0,09936 a_y + 0,09936 a_y \text{ V/m}$$

Besar medan listrik disajikan Tabel 2 dan 3.

Tabel 2. Intensitas medan listrik total antara plat A dan Plat B. Plat A (0;-6;-1,5)m, Plat B (0;6;-1,5)m. Posisi di tengah-tengah antara ke dua plat (0;0;-1,5)m.

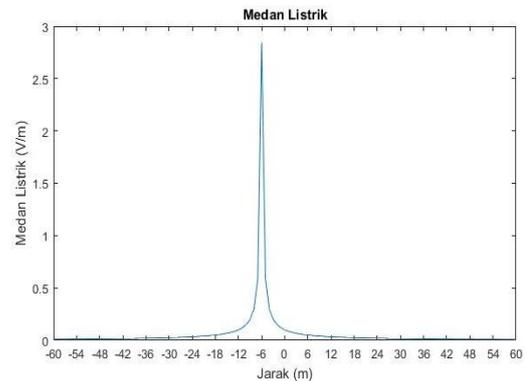
Intensitas Medan Listrik di permukaan tanah (dy) di antara plat A dan plat B (V/m)											
-4			-2			2			4		
E _A	E _B	E _{total}	E _A	E _B	E _{total}	E _A	E _B	E _{total}	E _A	E _B	E _{total}
0.29	0.05	0.24	0.14	0.07	0.07	0.07	0.14	0.07	0.05	0.29	0.24

Tabel 2. menunjukkan intensitas medan listrik total diantara plat A dan plat B yang mana besarnya sama di tinjau dari titik tengah gardu hubung. Medan vektor yang saling berlawanan arahnya akan saling menghilangkan satu sama lain.

Tabel 3. Intensitas medan listrik di luar plat A (0;-6;-1,5)m dan plat B(0;6;-1,5)m, dimana posisi pertengahan plat (0;0, -1,5)m

Intensitas Medan Listrik di permukaan tanah (dy) di luar plat A dan plat B (V/m)											
-10			-8			10			8		
E _A	E _B	E _{total}	E _A	E _B	E _{total}	E _A	E _B	E _{total}	E _A	E _B	E _{total}
0.14	0.03	0.17	0.29	0.04	0.33	0.14	0.03	0.17	0.29	0.04	0.33

Tabel 3. menunjukkan intensitas medan listrik diluar pelat A dan pelat B, nilai medan listrik total yang dihasilkan sama pada jarak yang sama dari titik pusat yg di gunakan. Medan vektor yang searah akan saling menjumlahkan satu sama lain. Jadi total intensitas Medan listrik, misalnya pada posisi sejajar permukaan tanah atau y=-10m adalah penjumlahan dari intensitas Medan Listrik oleh plat A dan oleh plat B.

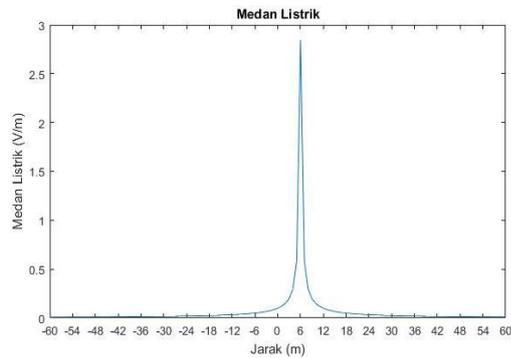


Gambar 2. Intensitas medan listrik di sekitar pelat A dengan injeksi arus petir 392 kA, 200 kHz.

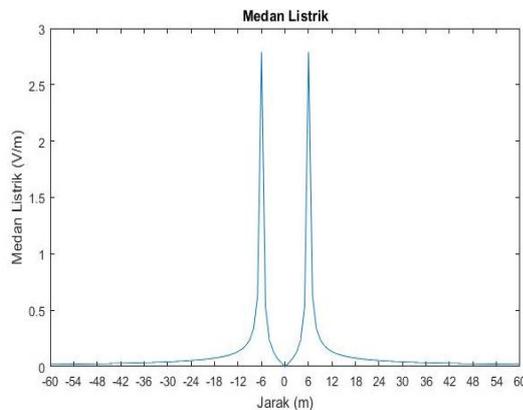
Gambar 2. menunjukkan intensitas medan listrik di sekitar pelat A (E_A) , dengan injeksi 392 kA, 200 kHz. Asumsi pelat B tdak terinjeksi arus petir. Intensitas medan listrik yang dihasilkan akan berbanding terbalik terhadap jarak pengamatan (dy) terhadap plat A. Nilai medan listrik akan semakin mengecil apabila jarak pengamatan terhadap plat A semakin jauh.

Gambar 3. menunjukkan intensitas medan listrik di sekitar pelat B, dengan injeksi arus petir 392 kA, 200 kHz. Asumsi pelat A tidak terinjeksi arus petir. Nilai medan listrik akan semakin mengecil apabila jarak pengamatan terhadap plat B

semakin jauh. Intensitas medan listrik di antara kedua plat dan di luar ke dua plat.



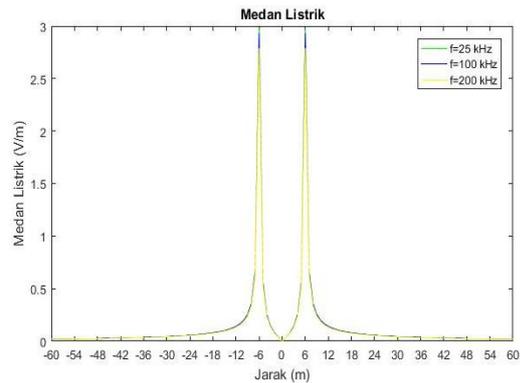
Gambar 3. Intensitas medan listrik di sekitar pelat B (E_B), pada injeksi arus petir 392 kA, 200 kHz



Gambar 4. Intensitas medan listrik di antara dan di sekitar plat A dan B, pada injeksi arus petir 392 kA, 200 kHz

Gambar 4 menunjukkan intensitas medan listrik (E) pada kedua plat, dengan injeksi 392 kA, 200 kHz. Intensitas medan listrik diantara kedua plat A (E_A) dan pelat B (E_B), akan saling mengurangi karena arahnya saling berlawanan. Intensitas Medan listrik tepat di tengah-tengah di antara kedua plat bernilai 0 V/m, karena intensitas listrik di titik (0;0;-1,5) adalah penjumlahan dari E_A dan E_B yang sama besar tapi berlawanan arah. Sedangkan intensitas medan listrik pada posisi di luar plat akan memiliki nilai yang semakin mengecil bila semakin jauh dari plat. Nilai medan listrik (E) berbanding terbalik terhadap jarak plat.

Gambar 5. menunjukkan grafik intensitas medan listrik (E) terhadap jarak pengamatan pada kedua plat dengan injeksi arus petir $I_p = 392$ kA, frekuensi arus petir bervariasi yaitu 25, 100, 200 kHz. Di antara posisi kedua plat ($6 > y > -6$), intensitas



Gambar 5. Intensitas medan listrik pada injeksi arus petir 392 kA, 25, 100, 200 kHz

medan listrik versus jarak menurun lebih cepat di dibandingkan dengan intensitas listrik di luar elektroda plat. Hal ini juga berlaku pada tabel 2 dan tabel 3, yang di plot dalam gambar 4 dan 5. Kejadian ini di sebabkan oleh adanya intensitas listrik yang arahnya saling berlawanan, sehingga medan listrik saling melemahkan satu dengan yg lainnya. Dan tepat pada posisi $y=0$, besar medan listrik yg di sebabkan oleh plat A dan plat B sama besar dan berlawanan arah sehingga saling menghilangkan dan pada posisi tersebut medan listrik sama dengan nol. Intensitas medan listrik versus jarak pada posisi di luar plat semakin menurun juga, tetapi penurunannya lebih landai di dibandingkan dengan medan listrik di antara kedua plat A dan plat B. Hal ini di sebabkan karena intensitas listrik di luar plat saling menjumlahkan antara medan listrik yang disebabkan oleh plat A dan plat B.

Saat frekuensi arus petir bervariasi di simulasikan, dihasilkan Intensitas medan nilai E yang sangat mendekati satu sama lainnya. Dengan kata lain frekuensi tidak berpengaruh secara signifikan terhadap intensitas medan listrik yang dihasilkan.

Potensial Listrik dan Beda Potensial di antara Dua Titik

Potensial titik A terhadap B didefinisikan sebagai usaha yang dilakukan dalam memindahkan suatu muatan positif Q dari posisi B ke posisi A. Titik acuan pada integral V merupakan batas bawah dan yang lainnya adalah batas atas integral. Perhitungan potensial listrik (V) dapat dihitung dengan Pers.8.

$$V_{AB} = - \int_B^A E \cdot dl \quad (V)$$

Beda potensial V merupakan selisih potensial diantara dua buah titik berdasarkan Pers.9 sebagai berikut:

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad (V)$$

A. Potensial listrik posisi (0;7;-1,5)

1. Potensial listrik untuk pelat A

$$V = - \int_0^{13} 0,63078 \, dl$$

$$V = -0,63078 \times l \Big|_0^{13}$$

$$V = -8,20014 \, V$$

Batas integral atas adalah 13, karena yang di amati pada $y = 7$ atau (0,7,-1,5). Di tengah-tengah di antara 2 pelat posisi (0,0,-15). Sedangkan posisi dari pelat A (0,-6,-1,5).

2. Potensial listrik untuk pelat B

$$V = - \int_0^1 0,63078 \, dl$$

$$V = -0,63078 \times l \Big|_0^1$$

$$V = -0,63078 \, V$$

Potensial listrik total dari kedua pelat di (0;7;-1,5) adalah :

$$V_{Total} = V_A + V_B$$

$$= -8,20014 + (-0,63078)$$

$$= -8,83092 \, V$$

B. Potensial listrik posisi (0;8;-1,5)

1. Nilai potensial listrik untuk plat A

$$V = - \int_0^{14} 0,33952 \, dl$$

$$V = -0,33952 \times l \Big|_0^{14}$$

$$V = -4,75328 \, V$$

2. Nilai potensial listrik untuk pelat B

$$V = - \int_0^2 0,33952 \, dl$$

$$V = -0,33952 \times l \Big|_0^2$$

$$V = -0,67904 \, V$$

Nilai potensial listrik total dari kedua plat adalah :

$$V_{Total} = V_A + V_B$$

$$= -4,75328 + (-0,67904)$$

$$= -5,43232 \, V$$

Nilai beda potensial atau tegangan langkah pada posisi (0,7,0) dan (0,8,0) adalah:

$$\Delta V = V_8 + V_7 = -5,43232 + (-8,83092) = 3,399$$

V.

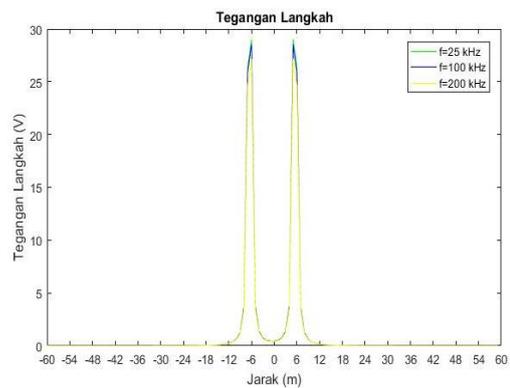
Tegangan langkah selanjutnya dihitung (ΔV) disajikan pada Tabel 4.

Tegangan langkah pada posisi (5 dan 6) sebesar 27,1317 V, hal ini disebabkan tegangan langkah (ΔV) mengikuti nilai

intensitas medan listrik (E) pada posisi tersebut yaitu 2,7916 V/m.

Tabel 4. Tegangan langkah (ΔV) dengan $I_0=392 \, kA$, $f=200kHz$.

Jarak (dy) [m]	Tegangan langkah (ΔV) [V]	Standar (ΔV) [V] IEEE std 80-2000
$\Delta V_{(0-1)}$	0,4847	7000
$\Delta V_{(1-2)}$	0,6930	
$\Delta V_{(2-3)}$	1,2602	
$\Delta V_{(3-4)}$	3,5208	
$\Delta V_{(5-6)}$	27,1317	
$\Delta V_{(6-7)}$	24,6683	
$\Delta V_{(7-8)}$	3,3986	



Gambar 6. Tegangan langkah (ΔV) pada injeksi arus petir 392 kA, 25, 100, 200 kHz

Tegangan langkah yang dihasilkan akan berbanding terbalik terhadap jarak pengamatan (dy) terhadap kedua plat. Nilai tegangan langkah akan semakin mengecil apabila jarak pengamatan terhadap kedua plat semakin jauh.

d. Arus Di Permukaan Tanah

Arus yang mengalir pada tubuh manusia disebabkan adanya tegangan langkah yang timbul pada tanah. Arus petir yang mengalir ke dalam tanah di alirkan ke seluruh permukaan elektroda plat, mengalir juga sampai ke permukaan tanah. Ketika kaki manusia yang kiri dan yang kanan menginjak permukaan tanah pada tempat yang memiliki beda potensial, maka ada arus yang mengalir ke tubuh manusia tersebut. Semakin besar beda potensial antara kaki kiri dan kaki kanan manusia, maka tegangan langkahnya akan semakin besar dan semakin berbahaya pada keselamatan umat manusia.

Arus total yang mengalir di permukaan tanah (I_T) mengalir dari satu kaki melewati badan menuju kaki yang satunya. Arus konduksi di dalam tanah (I_C) dipengaruhi oleh konduktivitas tanah (σ), sedangkan

arus perpindahan (I_D) dipengaruhi oleh frekuensi arus yang terinjeksi pada elektroda plat.

Perhitungan arus total di dalam tanah (I_T) dapat dihitung dengan pers.17:

$$I_T = I_C + I_D$$

A. Arus di dalam tanah pada plat A posisi (0;7;-1,5) m.

$$I_T = I_C + I_D$$

$$I_T = \iint J_C \cdot dS + \iint J_D \cdot dS$$

$$I_T = \iint \sigma_t \cdot E \cdot dS + \iint j \cdot \omega \cdot \epsilon_t \cdot E \cdot dS$$

$$I_T = \iint \sigma_t \cdot E \cdot dS + \iint j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_t \cdot E \cdot dS$$

Perhitungan I_C dan I_D oleh plat A pada (0;7;-1,5) m. :

1. Perhitungan I_C

$$I_C = \int_0^1 \int_{13}^{14} 1 \times 10^{-5} \cdot 0,630777 \cdot dS$$

$$I_C = \int_0^1 8,830878 \times 10^{-5} - 8,200101 \times 10^{-5} dS$$

$$I_C = [(0,630777 \times 10^{-5})]_0^1$$

$$I_C = (0,630777 \times 10^{-5}) - (0)$$

$$I_C = 0,630777 \times 10^{-5} \text{ A}$$

2. Perhitungan I_D

$$I_D = \int_0^1 \int_{13}^{14} j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 200 \times 10^3 \cdot 0,05 \cdot 0,630777 \cdot dS$$

$$I_D = \int_0^1 j554863,37 - j515230,27 dS$$

$$I_D = [(j39633,1)]_0^1$$

$$I_D = (j39633,1) - (0)$$

$$I_D = j39633,1 \text{ A}$$

Nilai arus total dari plat A adalah:

$$I_T = I_C + I_D$$

$$I_T = 0,630777 \times 10^{-5} + j39633,1 \text{ A}$$

B. Arus di permukaan tanah pada plat B (posisi 0;7;-1,5) m

$$I_T = I_C + I_D$$

$$I_T = \iint J_C \cdot dS + \iint J_D \cdot dS$$

$$I_T = \iint \sigma_t \cdot E \cdot dS + \iint j \cdot \omega \cdot \epsilon_t \cdot E \cdot dS$$

$$I_T = \iint \sigma_t \cdot E \cdot dS + \iint j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_t \cdot E \cdot dS$$

Perhitungan I_C dan I_D plat B.

1. Perhitungan I_C

$$I_C = \int_0^1 \int_1^2 1 \times 10^{-5} \cdot 0,630777 \cdot dS$$

$$I_C = \int_0^1 1,261554 \times 10^{-5} - 0,630777 \times 10^{-5} dS$$

$$I_C = [(0,630777 \times 10^{-5})]_0^1$$

$$I_C = (0,630777 \times 10^{-5}) - (0)$$

$$I_C = 0,630777 \times 10^{-5} \text{ A}$$

2. Perhitungan I_D

$$I_D =$$

$$\int_0^1 \int_1^2 j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 200 \times$$

$$10^3 \cdot 0,05 \cdot 0,630777 \cdot dS$$

$$I_D = \int_0^1 j79266,19 - j39633,09 dS$$

$$I_D = [(j39633,1)]_0^1$$

$$I_D = (j39633,1) - (0)$$

$$I_D = j39633,1 \text{ A}$$

Arus total dari plat A adalah:

$$I_T = I_C + I_D$$

$$I_T = 0,630777 \times 10^{-5} + j39633,1 \text{ A}$$

Arus total 1 m di bawah permukaan tanah adalah:

$$I_T = I_{TA} + I_{TB}$$

$$I_T = (0,630777 \times 10^{-5} + j39633,1) + (0,630777 \times 10^{-5} + j39633,1)$$

$$I_T = 1,261554 \times 10^{-5} + j79266,1 \text{ A}$$

Nilai magnitude I_T adalah:

$$I_T = \sqrt{Re[I_T]^2 + Im[I_T]^2}$$

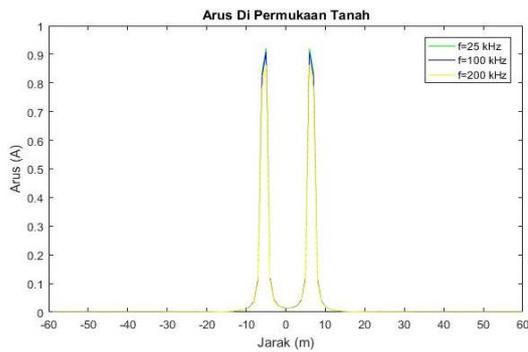
$$I_T = \sqrt{(1,261554 \times 10^{-5})^2 + (79266,1)^2}$$

$$I_T = 79266,19 \text{ A}$$

Tabel 5. Hasil perhitungan arus permukaan tanah (I_T) dengan $I_p = 392 \text{ kA}$, $f = 200 \text{ kHz}$.

Jarak (dy) dari pelat [m]	Arus permukaan tanah (I_T) [A]
1	0,0129
2	0,0153
3	0,022
4	0,04
5	0,117
6	0,8613
7	0,7831

Tabel 5 menunjukkan besar arus permukaan tanah dengan injeksi arus petir $I_p = 392 \text{ kA}$, $f = 200 \text{ kHz}$, yaitu 0,8613 A pada posisi $y = 6$. Arus di permukaan tanah mengalami penurunan yang sangat kecil saat jarak semakin jauh dari posisi plat.



Gambar 7. Arus di permukaan tanah pada injeksi arus petir 392 kA, dengan variasi frekuensi arus petir pada kedua plat A dan B.

Gambar 7 menunjukkan grafik perbandingan antara nilai arus di permukaan tanah (I_T) terhadap jarak pengamatan pada kedua pelat dengan injeksi arus petir 392 kA, dan frekuensi arus petir bervariasi 25, 100, 200 kHz. Nilai arus di permukaan tanah yang dihasilkan akan berbanding terbalik terhadap jarak pengamatan (d_y) terhadap kedua plat. Arus di permukaan tanah akan semakin mengecil apabila jarak pengamatan terhadap kedua plat semakin jauh.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dengan arus petir yang terinjeksi ke elektroda plat : 392 kA, 25, 100 dan 200 kHz, dan diamati di tempat yang paling dekat dengan posisi plat (0;7;-1,5), (0;-7;-1,5) dan tepat di tengah-tengah jarak antara kedua plat atau tepat di tengah-tengah gedung GH(0,0,-1,5), maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Intensitas medan listrik (E) pada gardu hubung Gomong Mataram masing-masing 0,6739, 0,6635, dan 0 V/m.
2. Tegangan langkah (ΔV) yang timbul masing-masing 26,3548, 25,9501, dan 24,6683 V. Tegangan langkah pada gardu hubung Gomong, masih dibawah kriteria yaitu 7 kV berdasarkan IEEE Std 80-2000.
3. Arus di permukaan tanah masing-masing 0,8366, 0,8238 dan 0,7831 A.

SARAN

1. Mensimulasikan data-data petir lebih detail lagi, untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dari penelitian ini.

2. Untuk lebih mudah dipahami dan lebih detail hasil penelitian ini, disarankan menggunakan software yang di lengkapi dengan visualisasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Edminister. Joseph A., Teori dan Soal-soal Elektromagnetika, Jakarta, 1997
- [2] IEEE std 80-2000, "IEEE Guide For Safety In Ac Substation Grounding", IEEE inc. New York
- [3] Hayt, Jr ,William H. dan Jhon A. Buck, 2006, *Elektromagnetika*, Edisi Ketujuh, Penerbit Erlangga, Jakarta
- [4] Bandri, Sepannur, 2014, *Sistem Proteksi Petir Internal dan Eksternal*. Jurnal teknik Elektro ITP, Vol.3, No. 1. institut teknologi padang
- [5] Dehn-Sohne, 2014, *Lightning Protection Guide*, Germany. www.dehn.de