

ANALISIS TEGANGAN LEBIH INDUKSI DISEKITAR DOWN CONDUCTOR YANG TERINJEKSI ARUS PETIR (Studi Kasus Gedung STAHN GDE PUDJA MATARAM DAN GARDU HUBUNG GOMONG)

*Induction Overvoltage Analysis Around
The Down Conductor Injected By Lightning Current
(Case Study STAHN Building Gde Pudja Mataram and Substation Circuit Gomong)*

I Wayan Sutrisna¹; Ni Made Seniari²; I Made Ginarsa³

ABSTRAK

Petir merupakan peristiwa listrik alam yang sangat berbahaya dalam kehidupan. Sambaran petir dapat merusak objek yang disambar langsung maupun objek disekitar titik sambaran petir. Disekitar titik sambaran petir terinduksi medan listrik (E), medan magnet (H) dan tegangan lebih induksi (V_{ind}). Objek di sekitar titik sambaran yang diamati Objek I dan Objek II adalah gedung kampus STAHN Gde Pudja Mataram dan Gardu Hubung Gomong, akibat gedung Rektorat STAHN Gde Pudja tersambar petir langsung 10, 50, 100 kA dan 25, 50, 100, 150, 200 kHz. Parameter petir tersebut menghasilkan E , H dan V_{ind} pada objek yang diamati, dengan H sesuai standar, tetapi E dan V_{ind} tidak sesuai standar. Rekomendasi untuk penurunan E dan V_{ind} menambahkan SPP eksternal dengan pemasangan konduktor bentuk mesh sejumlah 2x4 mesh dengan ukuran 10x6,5 m pada kerangka plapon gedung. Injeksi 100 kA, 200 kHz pada rangkaian mesh tersebut menurunkan E , H dan V_{ind} pada objek I dan objek II masing-masing 3,586 kV/m; 16,393 A/m; 344,459 kV dan 0,184 kV/m; 0,875A/m; 63,699 kV. Penambahan rangkaian konduktor mesh pada SPP eksternal tersebut dapat mengurangi nilai medan listrik (E), medan magnet (H) dan tegangan induksi (V_{ind}) hingga 50 % dari nilai sebelumnya.

Kata kunci: Petir, down conductor, Medan listrik (E), Medan magnet (H), Tegangan induksi (V_{ind}), mesh.

ABSTRACT

Lightning, an electrical event of nature, is a very dangerous phenomenon in daily life. Lightning strikes can harm both the object struck directly by lightning and the object around lightning strikes point. Object around the point of a lightning strike is induced by electric field (E), magnetic field (H) and overvoltage induction (V_{ind}). Objects around lightning strike point observed in this paper objects one and two are STAHN Gde Pudja Mataram building and Gomong Substation circuit due to the fact that STAHN Gde Pudja Rectorate building was directly struck by lightning of 10, 50, 100 kA and 25, 50, 100, 150, 200 kHz. The lightning parameters showed the value of E , H and V_{ind} on the observed. It is revealed that H value meets the standards while E and V_{ind} values did not meet standards. In order to standardize the E and V_{ind} values, it is recommended to add external SPP of 2x4 mesh with sized mesh of 10x6,5 m shaped conductor installation on framework ceiling. The Injection of 100 kA, 200 kHz from the mesh circuit decrease E , H and V_{ind} value for the first and the second objects each 3.586 kV/m; 16.393 A/m; 344.459 kV and 0.184 kV/m; 0.875A/m; 63.699 kV. It can be conclude that the addition of mesh conductor circuit on the external SPP could reduce the value of the electric field (E), magnetic field (H) and the induced voltage (V_{ind}) up to 50% of the initial value.

Keywords: Lightning, down conductor, electric field (E), magnetic field (H), voltage induction (V_{ind}), mesh.

PENDAHULUAN

Petir merupakan peristiwa listrik alam yang sangat berbahaya bagi mahluk hidup, bangunan, peralatan listrik, jaringan data. Sambaran petir dapat membahayakan objek yang disambar langsung maupun objek disekitar titik sambaran. Objek yang berada disekitar titik sambaran petir akan mendapatkan kerusakan akibat terinduksi

gelombang elektromagnetik antara lain medan listrik (E), medan magnet (H) dan tegangan lebih induksi (V_{ind}).

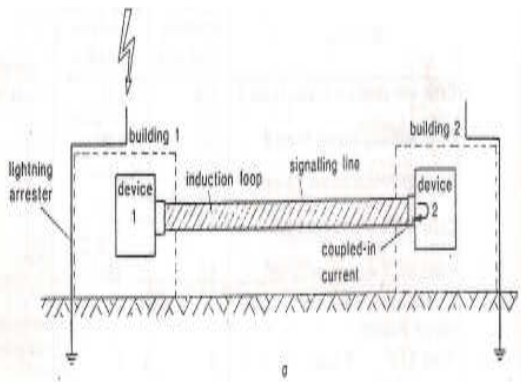
Gedung Rektorat STAHN Gde Pudja Mataram memiliki perbedaan ketinggian dengan gedung disekitarnya. Gedung Rektorat STAHN tersambar petir secara langsung bulan Februari 2016, sehingga

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia
Email : sutrisna1909@gmail.com, seniari2012@gmail.com, kadekgin@yahoo.com

menyebabkan kerusakan peralatan listrik dan terjadi pemadaman listrik pada gedung tersebut dan di sekitar titik sambaran. Objek di sekitar titik sambaran mengalami kerusakan karena menerima induksi tegangan dari gedung Rektorat yang tersambar petir. Gedung Kampus STAHN Gde Pudja (Objek I) yang berjarak 70 m dan Gardu Hubung Gomong (Objek II) yang berjarak 300 m dari gedung Rektorat STAHN.

Kampus STAHN Gde Pudja memiliki beberapa peralatan elektronik dan tempat aktivitas perkuliahan mahasiswa, sedangkan Gardu Hubung Gomong memiliki peralatan proteksi serta peralatan penunjang lainnya seperti alat ukur, relay dan switching. Peralatan penunjang tersebut sangat sensitif terhadap gangguan induksi gelombang elektromagnetik atau tegangan induksi.

Sumber – Sumber Tegangan Lebih. Penyebab tegangan lebih eksternal adalah sambaran petir. Mekanisme induksi sambaran petir dapat dijelaskan sebagai berikut:

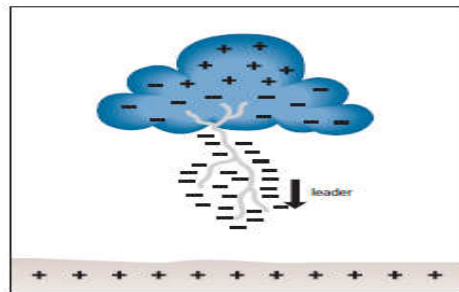


Gambar 1. Kopling induktif (Hasse,1992)

- a. **Kopling Induktif.** Medan magnet yang disebabkan oleh sambaran petir akan menimbulkan tegangan lebih pada loop kabel. Sambaran petir dari proteksi eksternal gedung akan menginduksikan tegangan lebih dalam loop tertutup yang dibentuk oleh kabel.
- b. **Kopling Galvanik (ohmic coupling).** arus petir mengalir melalui bumi yang akan menyebabkan kenaikan tegangan di tanah dan konsekuensinya tegangan dari proteksi konduktor pembumian mencapai beberapa ribu volt.
- c. **Kopling Kapasitif.** Petir menyambar tanah atau batang penangkal petir, maka tegangan pada saluran di udara atau penangkal petir akan naik sampai beberapa ratus kV lebih tinggi dari sekitarnya.

- d. **Kopling Konduktif.** timbulnya induksi elektromagnetik yang masuk kesistem yang diproteksi akibat adanya sambaran didekat sistem melalui hantaran. (Hasse,1992)

Mekanisme Sambaran Petir. Konsentrasi muatan negatif pada bagian bawah awan ini akan menyebabkan terinduksinya muatan positif diatas permukaan tanah, sehingga membentuk medan listrik antara awan dan tanah. Jika muatan listrik cukup besar dan kuat medan listrik udara dilampaui, maka terjadi pelepasan muatan berupa petir. Sambaran petir merupakan pelepasan muatan listrik yang sangat berbahaya, arus puncak petir dapat mencapai 200.000 Ampere dan menghasilkan tegangan sampai beberapa puluh juta volt. (Dehn,2014)



Gambar 2. Mekanisme sambaran petir (Dehn,2014)

Distribusi Muatan Garis. Distribusi partikel kecil yang terdiri dari banyak muatan yang jaraknya berdekatan dalam suatu ruang dan bekerja dengan muatan ruang dapat disebut sebagai distribusi kontinu yang dinyatakan dengan kerapatan muatan volume. Jika ditinjau distribusi suatu kerapatan muatan volume dalam bentuk filamen atau garis lurus maka muatan tersebut dapat dinyatakan sebagai muatan garis dengan kerapatan muatan garis (ρ_L) (Haytt,2006) :

$$\rho_L = \frac{Q}{L} \quad [C/m] \dots\dots\dots(1)$$

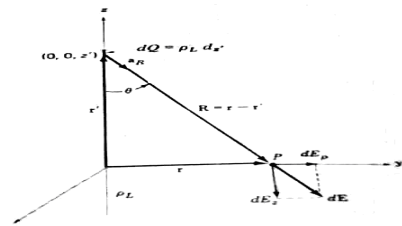
dengan,

$$\rho_L = \text{Kerapatan muatan listrik [C/m]}$$

$$Q = \text{Muatan listrik petir [Coloumb]}$$

$$L = \text{Panjang muatan garis[m]}$$

Medan Listrik oleh Muatan Garis. Kuat medan listrik disebut sebagai intensitas medan listrik merupakan sebuah medan vektor. Dalam penelitian ini memakai asumsi sebuah medan muatan garis yang dianalisa dengan menggunakan sistem koordinat tabung.



Gambar 3. Medan parsial (Haytt,2006).

Medan parsial di P, yang disebabkan oleh keberadaan elemen muatan atau muatan parsial $dE = dE_r \hat{a}_r + dE_z \hat{a}_z$ didapatkan (Hayt, 2006) :

$$dE = \frac{\rho_L dz' (r - r')}{4\pi\epsilon_u |r - r'|^3} \dots\dots\dots(2)$$

menghasilkan,

$$E_r = \int \frac{\rho_L r dz'}{4\pi\epsilon_u (r^2 + z'^2)^{3/2}} [V/m] \dots\dots\dots(3)$$

dengan

ρ_L = Kerapatan muatan garis [C/m]

ϵ_u = Permittivitas udara [F/m]

Potensial Listrik oleh Muatan Garis.

Potensial di sebuah titik didefinisikan sebagai kerja yang dilakukan untuk memindahkan sebuah muatan satuan positif dari titik referensi nol ketitik yang dimaksud, dan besarnya kerja ini tidak tergantung pada lintasan perpindahan yang dipilih. distribusi muatan sumber mengambil bentuk sebuah garis atau sebuah bidang permukaan, maka integral garis adalah (Haytt,2006) :

$$v = \frac{1}{4\pi\epsilon_u} \int \frac{\rho_L dl'}{|r - r'|} [V] \dots\dots\dots(4)$$

dengan $|r - r'| = \sqrt{r^2 + z'^2}$ untuk distribusi muatan garis maka persamaan (4) menjadi :

$$v = \frac{1}{4\pi\epsilon_u} \int \frac{\rho_L dl'}{\sqrt{r^2 + z'^2}} [V] \dots\dots\dots(5)$$

Kuat Medan Magnetik.

Sumber medan magnetik berupa filamen konduktor yang dialiri arus, yang filamennya merupakan limit dari tabung konduktor berpenampang lingkaran yang jearinya menuju nol. Dimana arus I tersebut mengalir pada filamen yang panjang vektor differensialnya dL (Haytt,2006).

$$dH = \frac{I dL \times a_R}{4\pi R^2} [A/m] \dots\dots\dots(6)$$

menghasilkan,

$$H = \frac{1}{4\pi} \int \frac{r dz' a_\theta}{(r^2 + z'^2)^{3/2}} [A/m] \dots\dots\dots(7)$$

Mekanisme Induksi Medan Magnetik.

Arus petir mengalir dalam suatu penghantar akan

menghasilkan medan magnet, sehingga menyebabkan terjadinya loop tegangan dengan nilai tegangan yang cukup tinggi. Secara umum kemampuan tegangan induksi (V) memasuki loop yaitu (Dehn,2014):

$$V_{Ind} = \frac{\frac{dI}{dt} \times h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} \dots\dots\dots(8)$$

Persamaan diatas dapat ditulis sebagai:

$$V_{Ind} = L_M \times \frac{dI}{dt} [V] \dots\dots\dots(9)$$

dengan :

L_M = Mutual induktansi [Henry]

dI/dt = kecuraman arus petir [kA/ μ s].

Kapasitansi.

Dua buah konduktor yang berada di dalam sebuah ruang yang dipenuhi oleh suatu bahan dielektrum. Konduktor M_2 membawa muatan positif total sebesar Q , dan konduktor M_1 membawa muatan negatif yang setara, Muatan ini terdistribusi di permukaan konduktor sebagai kerapatan muatan permukaan, dan bahwa medan listrik yang dihasilkannya adalah normal terhadap konduktor. Beda potensial antara bidang sebelah bawah dan bidang sebelah atas adalah (Haytt, 2006) :

$$V_\sigma = \int_{atas}^{bawah} E \cdot dL = - \int_d^0 E \cdot dz = E \cdot d \dots\dots(10)$$

Mekanisme kopling Galvanik.

Kopling yang terjadi akibat adanya perbedaan tegangan antara dua bangunan pada saat petir menyambar. Perbedaan tegangan terjadi karena tahanan pembumian pada bangunan tidak saling terhubung. Sambaran petir kebumi akan menyebabkan kenaikan tegangan sebagai berikut diamati (Helita dan Soule, 2011) :

$$U = \frac{\rho \times I_p}{2\pi \times D} \dots\dots\dots(11)$$

Sehingga tegangan induksi akibat kopling Galvanik adalah :

$$\Delta U = U_1 - U_2 \dots\dots\dots(12)$$

Dengan,

ρ = resistivitas tanah

I_p = Arus puncak petir (A)

$D = r$ = jarak (m)

U_1 = Tegangan pada grounding objek yang di amati

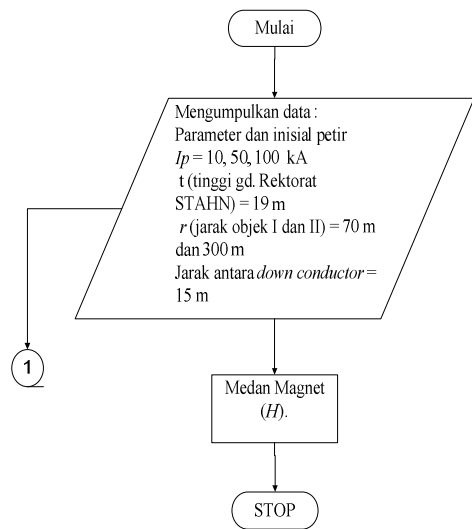
U_2 = Tegangan pada terminal netral yang dekat dengan objek yang. Tegangan lebih total yang diterima pada peralatan listrik atau bangunan dengan persamaan (Hasse, 1992; Zoro,2002) :

$$V_{tot} = V_{ind-E} + V_{ind-L} + V_{ind-C} + V_{ind-G} + V_{ind-K} \dots\dots\dots(13)$$

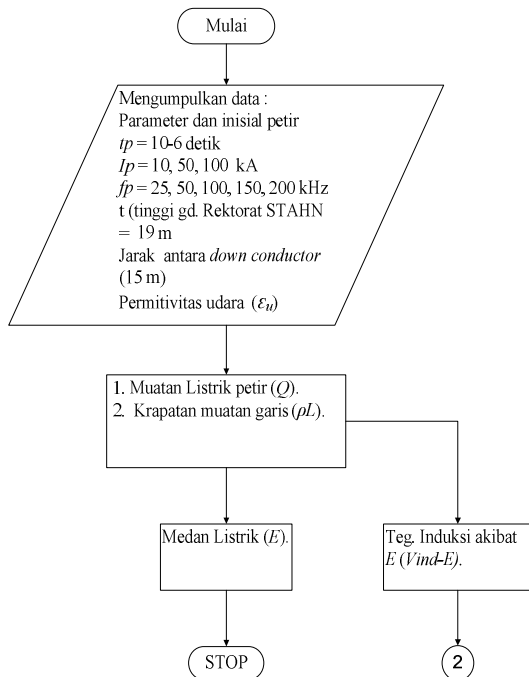
METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode perhitungan dalam menentukan besarnya medan listrik (E), medan magnet (H) dan tegangan induksi total (V_{ind}) pada gedung yang berada disekitar titik sambaran petir yaitu gedung Kampus STAHN Gde Pudja Mataram dan Gardu Hubung Gomong akibat dari petir yang menyambar gedung Rektorat STAHN Gde Pudja Mataram.

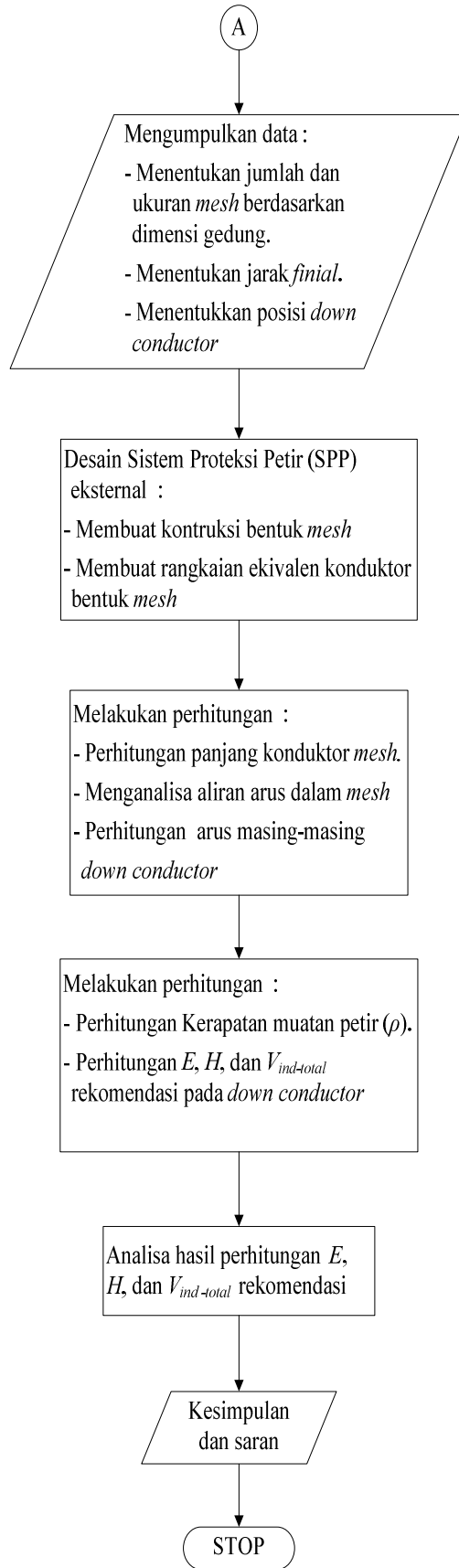
Diagram Alir Penelitian



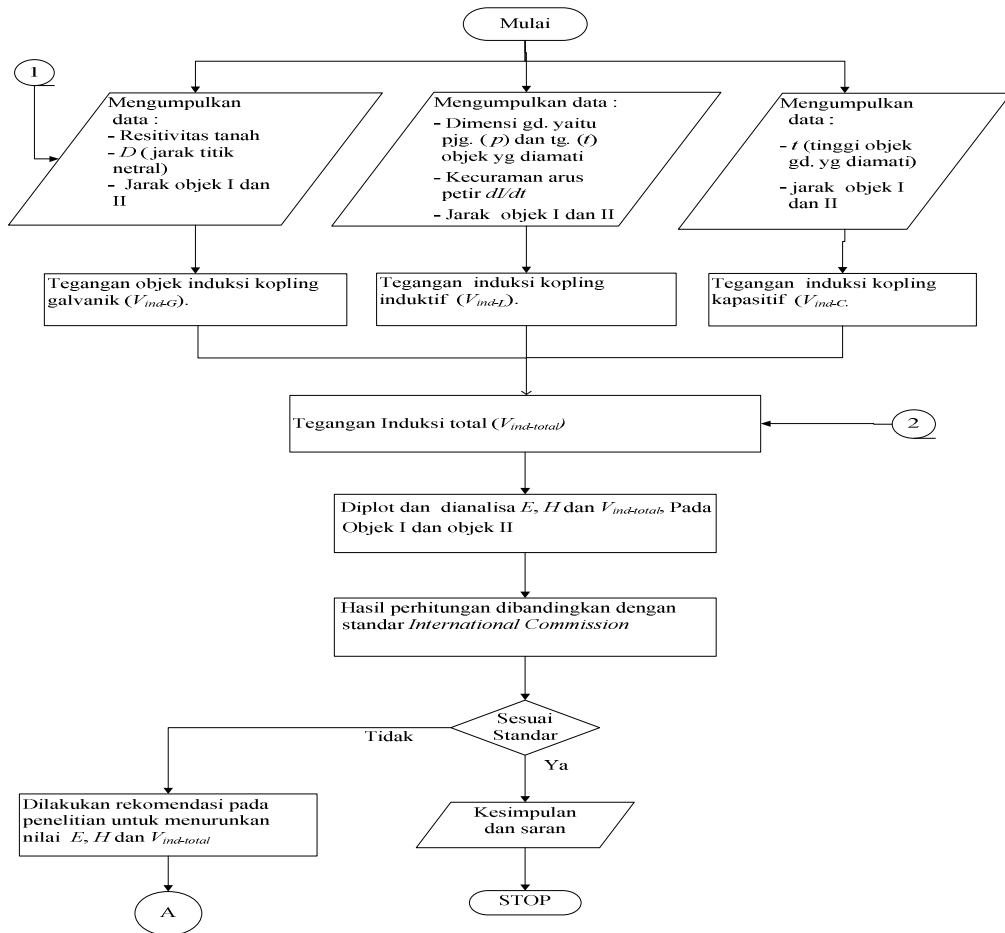
Gambar 4. Diagram alir perhitungan H



Gambar 5. Diagram alir perhitungan E



Gambar 6. Diagram alir E, H dan V_{ind} rekomendasi



Gambar 7. Diagram alir perhitungan Tegangan Induksi Total ($V_{ind-total}$)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter-parameter petir yang digunakan dalam perhitungan mengikuti standar-standar internasional dan dipadukan dengan hasil-hasil penelitian untuk karakteristik petir daerah tropis. Perhitungan ini mensimulasikan arus puncak petir (I_p) dan frekuensi arus petir (f_p), dari parameter tersebut didapatkan perhitungan medan listrik (E), medan Magnet (H), tegangan lebih induksi (V_{ind}) disekitar titik sambaran, sesuai kondisi riil di lapangan, yaitu sambaran petir tidak langsung pada gedung kuliah Kampus STAHN Gde Pudja Mataram yang selanjutnya disebut objek I, dan Gardu Hubung Gomong yang selanjutnya disebut Objek II, ketika gedung Rektorat STAHN Gde Pudja disambar petir langsung.

Nilai medan listrik (E) dan medan magnet (H) pada Objek I dan Objek II. Dengan Injeksi arus petir sesuai dengan *Lightning Protection Level* yaitu $I_p = 10$ kA, frekuensi arus petir $f_p = 200$ kHz, dengan dua (2) down conductor yang terpasang pada sisi gedung,

maka muatan petir (Q) yang didapat adalah $0,004673 < 35,98^\circ$ C. Panjang Down conductor (L) pada gedung adalah 19 m, sehingga kerapatan muatan petir pada down conductor adalah $0,00024594$ C/m. Kerapatan muatan petir akan menimbulkan medan listrik (E) dan arus yang mengalir pada conductor akan menimbulkan medan magnet (H). Menganalisa E dan H dengan menggunakan koordinat tabung, dengan objek yang diamati berada pada sumbu r sehingga E dan H yang timbul hanya pada sumbu r . Hasil perhitungan medan listrik (E) dan medan magnet (H), objek I dan objek II yang berada pada jarak 70 m dan 300 m dibandingkan dengan standar-standar yang berlaku.

Tabel 1. Hasil perhitungan medan listrik (E) dan medan magnet (H), pada objek I

Ip (kA)	fp (kHz)	Medan Listrik		Medan Magnet	
		Hitung	Stand ar	Hitung	Stand ar
10	200	11,47 kV/m	10 kV/m	29,14 A/m	800 A/m
50		57,36 kV/m		14,57 A/m	
100		114,72 kV/m		291,46 A/m	

Tabel 2. Hasil perhitungan medan listrik (E) dan medan magnet (H) pada objek II

I_p (kA)	f_p (kHz)	Medan Listrik		Medan Magnet	
		Hitung	Standar	Hitung	Standar
10	200	0,659 kV/m	5 kV/m	0,167 A/m	160 A/m
50		3,295 kV/m		0,837 A/m	
100		6,787 kV/m		167,4 A/m	

Sesuai dengan standar *International Commission on Non-ionizing Radiation Protection*, nilai E pada objek 1 dan objek II saat injeksi $I_p = 100$ kA masih melebihi ambang batas yang di izinkan, namun pada objek II saat injeksi arus 10 dan 50 kA sudah sesuai dengan standar. Medan magnet (H) pada objek I dan objek II sudah sesuai dengan standar. Dampak Medan listrik (E) dan Medan magnet (H) bagi Mahluk Hidup bila melebihi ambang batas, Menurut Malmivuo dan Plonsey dalam buku *Bioelectromagnetik* (1995) menyatakan metabolisme mahluk hidup seperti sistem kerja dan pembelahan sel, aliran darah, sistem kerja syaraf, bekerja berdasarkan vektor. Apabila mahluk hidup terpapar medan listrik dan medan magnet dari luar, maka metabolisme mahluk hidup akan terganggu. Dampak jangka pendek seperti perasaan gelisah, susah tidur, kepala pusing, Sedangkan dampak jangka panjang dapat menimbulkan mutasi gen dan menurun secara generative. Medan listrik (E) akan menimbulkan tegangan induksi yang berbahaya bagi peralatan listrik.

Nilai Tegangan Induksi (V_{ind}) pada Objek I dan Objek II. Injeksi arus petir sesuai dengan *Lightning Protection Level* yaitu $I_p = 10$ kA, frekuensi arus petir $f_p = 200$ kHz. Berdasarkan data konstanta permitivitas udara (ϵ_u) adalah $1,0006 \times 10^{-9} / 36\pi$, jarak objek I dan objek II dari titik sambaran petir adalah 70 m dan 300 m, dan hasil perhitungan kerapatan muatan garis $\rho_L = 0,000245947C/m$, maka di dapatkan nilai tegangan induksi akibat medan listrik (V_{ind-E}). Tinggi gedung pada objek I dan objek II yaitu 12 m dan 5 m akan mempengaruhi besarnya tegangan induksi akibat kopling kapasitif (V_{ind-C}), kuat medan magnetik akan menimbulkan loop tertutup berdasarkan dimensi gedung dengan kecuraman arus petir (di/dt) adalah 100 kA/ μs maka menimbulkan tegangan induksi akibat kopling Induktif (V_{ind-L}), injeksi arus di permukaan tanah akibat petir

menyambar finial pada gedung, sehingga menyebabkan kenaikan tegangan pada grounding gedung yang tersambar petir, akan mempengaruhi grounding pada gedung disekitar titik sambaran petir dan grounding lainnya. Resistansi tanah pada gedung adalah 23 Ω dan tanah diasumsikan homogen maka didapatkan nilai resistivitas tanah. Resistivitas tanah akan mempengaruhi tegangan dipermukaan tanah, yang akan menimbulkan tegangan induksi akibat kopling galvanik (V_{ind-G}). Tegangan induksi total merupakan penjumlahan dari tegangan induksi. Nilai tegangan induksi dibandingkan dengan standar yang berlaku.

Tabel 3. Nilai Tegangan Induksi total ($V_{ind-total}$) pada objek I

I_p (kA)	f_p (kHz)	Tegangan Induksi (V_{ind})				Tegangan Induksi	
		V_{ind-E}	V_{ind-L}	V_{ind-C}	V_{ind-G}	Hitung	Standar
10	200	593,8 78 kV	135,2 8 kV	519,1 7 kV	0,547 kV	1248, 88 kV	6 kV
50		2969, 39 kV		2595, 85 kV	2,738 kV	5703, 28 kV	
100		5938, 79 kV		5191, 71 kV	5,476 kV	1127 1,27 kV	

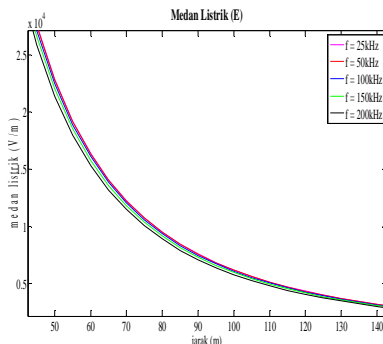
Tabel 4. Nilai Tegangan Induksi total ($V_{ind-total}$) pada objek II

I_p (kA)	f_p (kHz)	Tegangan Induksi (V_{ind})				Tegangan Induksi	
		V_{ind-E}	V_{ind-L}	V_{ind-C}	V_{ind-G}	Hitung	Standar
10	200	140,1 4 kV	3,92 kV	52,12 7 kV	0,031 4 kV	196,2 2 kV	6 kV
50		700,7 2 kV		260,6 3 kV	0,157 kV	965,4 4 kV	
100		1401, 45 kV		521,2 7 kV	0,314 kV	1926, 97 kV	

Berdasarkan Tabel 3 dan Tabel 4 Semakin besar injeksi arus petir, dengan frekuensi arus petir yang tetap 200 kHz, maka semakin besar tegangan induksi yang diterima pada peralatan listrik tersebut. Tegangan lebih induksi yang dihasilkan masih diatas ambang batas/standar yang ditetapkan pada standar *IEC 61000-4-5* dan standar *IEC 60664-1* sehingga akan berdampak pada peralatan listrik di gedung tersebut. Dampak tegangan induksi menurut Hasse pada buku *over voltage protection of low voltage system* (1992), yaitu dapat Merusak peralatan elektronik melalui kegagalan isolasi akibat menerima tegangan lebih induksi dan

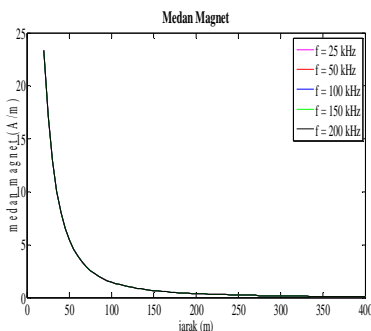
memperpendek umur penggunaan peralatan elektronik.

Pengaruh Frekuensi Arus Petir (f) terhadap Medan Listrik (E). Injeksi arus petir $I_p = 10$ kA dan variasi frekuensi arus petir $f = 25, 50, 100, 150, 200$ kHz, maka nilai parameter medan listrik (E) yang dihasilkan, akan cenderung menurun meskipun dampaknya sangat kecil. Nilai medan listrik (E) semakin menurun bila jarak (r) yang diamati semakin jauh dari titik sambaran petir.



Gambar 8. Pengaruh (f_p) terhadap medan listrik (E), pada jarak (20 - 400 m)

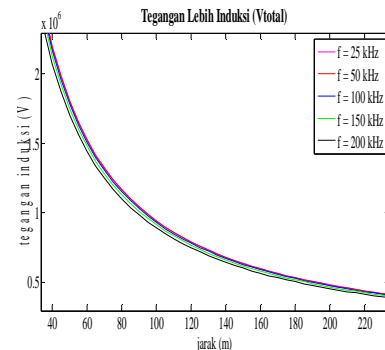
Pengaruh Frekuensi Arus Petir (f) terhadap Medan Magnet (H). Berdasarkan grafik diatas, dilihat bahwa kuat medan magnet (H), tidak di pengaruhi oleh variasi frekuensi arus petir (f) yang semakin besar.



Gambar 9. Pengaruh f_p terhadap medan magnet (H) pada jarak (20 - 400 m)

Pengaruh Frekuensi Arus Petir (f) terhadap Tegangan Lebih Induksi (V_{total}). Injeksi arus puncak petir (I_p) = 10 kA, dengan variasi frekuensi yang semakin besar, yaitu $f = 25, 50, 100, 150, 200$ kHz, maka tegangan lebih induksi ($V_{ind-total}$) yang dihasilkan pada objek I dan objek II, akan cenderung menurun meskipun dampaknya sangat kecil. Nilai tegangan lebih induksi pada objek I lebih besar, disebabkan karena dimensi gedung pada objek I lebih besar dari

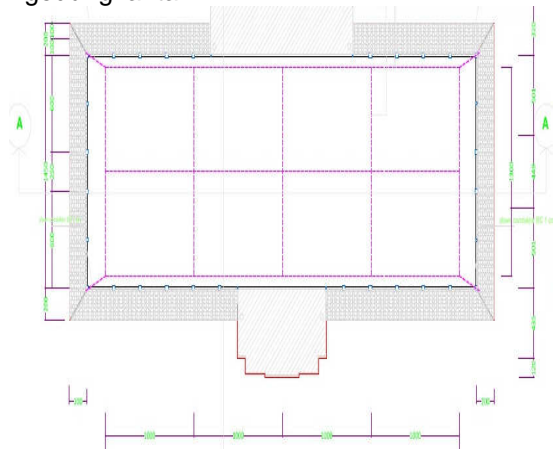
pada objek II dan jarak dari titik sambaran petir yang lebih dekat.



Gambar 10. Pengaruh f_p terhadap $V_{ind-total}$ pada jarak (20 - 400 m)

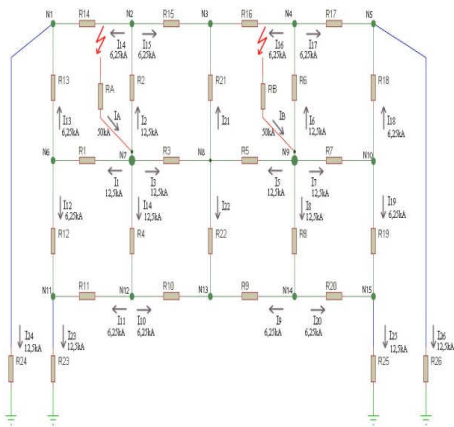
Desain Sistem Proteksi Petir (SPP) Eksternal Konduktor bentuk Mesh.

Berdasarkan parameter arus petir (I_p) dan frekuensi arus petir (f), menghasilkan perhitungan nilai E , H dan V_{ind} yang di dapatkan melebihi standar yang diizinkan untuk makhluk hidup dan peralatan listrik, maka direkomendasikan pada gedung Rektorat STAHN Gde Pudja memasang konduktor mesh pada kerangka flapon gedung lantai III.



Gambar 11. Kontruksi bentuk mesh pada gedung Rektorat STAHN Gde Pudja

Rangkaian Konduktor bentuk Mesh dengan 4 Down Conductor. Bentuk konduktor mesh pada gedung disesuaikan dengan ukuran dimensi gedung, sesuai dengan standar *Lightning Protection System*, Sehingga jumlah mesh yang digunakan 2×4 mesh dengan ukuran konduktor mesh yaitu $10 \times 6,5$ m, dan 4 down conductor. Pada rangkaian bentuk mesh, nilai resistansi konduktor mesh dan down conductor diasumsikan $\approx 0 \Omega$ (nilai resistansi adalah nol ohm).



Gambar 12. Kontruksi bentuk mesh ukuran 10x 6,5 meter

Medan Listrik (E) dan Medan Magnet (H) Rekomendasi. Dengan adanya konduktor mesh pada kerangka gedung, sehingga akan mengurangi besarnya medan listrik (E) dan medan Magnet (H) dengan $I_p = 100$ kA dan $f_p = 200$ kHz, $\epsilon_u = 1,0006 \times 10^{-9} / 36\pi F/m$, $L = 250,54$ m dan kerapatan muatan petir (ρ_L) adalah $4,6659 \times 10^{-5} C / m$ Pada Objek I dan objek II .

Tabel 5. Hasil Perhitungan Medan Listrik (E) dan Medan Magnet (H) Pada objek I

Ip (kA)	fp (kHz)	Medan Listrik		Medan Magnet	
		Hitung	Stand ar	Hitung	Stand ar
10	200	0,35 kV/m	10 kV/m	1,63 A/m	800 A/m
50		1,79 kV/m		8,19 A/m	
100		3,58 kV/m		16,39 A/m	

Tabel 6. Hasil Perhitungan Medan Listrik (E) dan Medan Magnet (H) pada objek II

Ip (kA)	fp (kHz)	Medan Listrik		Medan Magnet	
		Hitung	Stand ar	Hitung	Stand ar
10	200	0,018 kV/m	5 kV/m	0,087 A/m	160 A/m
50		0,092 kV/m		0,437 A/m	
100		0,184 kV/m		0,875 A/m	

Berdasarkan Tabel 5 dan Tabel 6, dengan injeksi arus petir 10, 50, 100 kA dan frekuensi arus petir 200 kHz pada objek I dan objek II, dengan menggunakan metode konduktor mesh dengan 4 down conductor dapat mengurangi besarnya medan listrik (E) dan medan magnet (H) dari perhitungan kondisi eksiting. Nilai E dan H yang

dihasilkan pada rekomendasi ini sudah memenuhi standar yang diizinkan untuk objek I dan objek II.

Tegangan Induksi (V_{ind}) Rekomendasi

Pada konduktor mesh dapat mengurangi besarnya tegangan induksi pada objek disekitar titik sambaran petir, dengan injeksi arus petir (I_p) = 10, 50, dan 100 kA, $f_p = 200$ kHz, $\epsilon_u = 1,0006 \times 10^{-9} \times (1/36\pi)$, kecuraman arus petir (di/dt) = 50 kA/ μ s, tinggi gedung = 12 m, panjang gedung = 53m, r = 70 m pada Objek I dan tinggi gedung = 5 m , panjang gedung = 12m, r = 300 m pada Objek II.

Tabel 7. Hasil perhitungan tegangan induksi pada objek I

Ip (kA)	fp (kHz)	Tegangan Induksi (V _{ind})				Tegangan Induksi	
		V _{ind-E}	V _{ind-L}	V _{ind-C}	V _{ind-G}	Hitun g	Stand ar
10	200	11,25 kV	67,64 kV	16,28 kV	0,136 kV	95,32 kV	6 kV
50		56,29 kV		81,42 kV	0,684 kV	206,0 kV	
100		112,5 kV		162,8 kV	1,36 kV	344,4 kV	

Tabel 8. Hasil perhitungan tegangan induksi pada objek II

Ip (kA)	fp (kHz)	Tegangan Induksi (V _{ind})				Tegangan Induksi	
		V _{ind-E}	V _{ind-L}	V _{ind-C}	V _{ind-G}	Hitun g	Stand ar
10	200	2,65 kV	1,96 kV	0,81 kV	0,007 kV	5,44 kV	6 kV
50		13,28 kV		17,54 kV	0,039 kV	32,83 kV	
100		26,57 kV		35,08 kV	0,078 kV	63,69 kV	

Dengan konduktor bentuk mesh pada kerangka flapon gedung lantai III, dengan injeksi arus petir (I_p) = 10, 50, 100 dan frekuensi arus petir (f_p) = 200 kHz, dari parameter tersebut menghasilkan tegangan induksi total akibat medan listrik, kopling induktif, kopling kapasitif dan kopling galvanik. Tegangan induksi total yang diterima pada objek I dan objek II dapat mengurangi tegangan induksi yang diterima pada peralatan listrik pada gedung di sekitar titik sambaran petir, akan tetapi hasil dari tegangan induksi, masih di atas standar yang diizinkan maka perlu ditingkatkan proteksi pada peralatan listrik tersebut karena tegangan induksi ini dapat merusak peralatan melalui kegagalan isolasi menahan tegangan induksi (Hasse, 1992).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kuat medan listrik (E) dan kuat medan magnet (H) pada objek I (gedung Kampus STAHN Gde Pudja) dan objek II (Gardu Hubung Gomong) yang terinjeksi arus petir 10 kA, 200 kHz adalah 11,46 kV/m; 2,9146 A/m dan 0,658 kV/m; 0,16645 A/m.
2. Tegangan lebih induksi (V_{ind}) yang terinduksi disekitar titik sambaran petir adalah :
 - a. Tegangan induksi akibat kuat medan listrik (V_{ind-E}) yang timbul pada objek I dan objek II berturut-turut 593,3 kV dan 140,1 kV. Nilai tegangan lebih akibat E (V_{ind-E}) yang timbul berbanding terbalik dengan jarak dari sambaran petir. Sehingga di setiap penambahan jarak nilai (V_{ind-E}) akan semakin kecil.
 - b. Tegangan induksi akibat kopling induktif, kopling kapasitif, kopling galvanik, dan tegangan lebih total pada :
 - Objek I masing-masing : 135,285 kV; 517,288 kV; 606,3044 V; $V_{ind-total} = 1246,4$ kV.
 - Objek II masing-masing: 3,92 kV; 52,069 kV; 34,7889 Volt; $V_{ind-total} = 196,036$ kV.
3. Pengaruh frekuensi arus petir (f_p) saat injeksi arus petir (I_p) yang konstan terhadap parameter-parameter E , H dan tegangan induksi (V_{ind}) yaitu :
 - a. Medan listrik (E) dan tegangan induksi akibat medan listrik (V_{ind-E}) dipengaruhi oleh variasi frekuensi arus petir, semakin besar frekuensi arus petir maka semakin kecil nilai E dan V_{ind-E} .
 - b. Medan magnet (H) tidak di pengaruhi oleh variasi frekuensi arus petir (f_p).
 - c. Tegangan induksi akibat kopling induktif (V_{ind-L}) tidak dipengaruhi oleh variasi frekuensi arus petir (f_p).
 - d. Tegangan induksi akibat kopling Kapasitif (V_{ind-C}) dipengaruhi oleh variasi frekuensi arus petir (f_p), semakin tinggi frekuensi arus petir maka V_{ind-C} akan semakin kecil.
 - e. Tegangan induksi akibat kopling galvanik (V_{ind-G}) tidak dipengaruhi oleh variasi frekuensi arus petir (f_p).
4. Rekomendasi untuk gedung Rektorat STAHN Gde Pudja menggunakan SPP eksternal yang dilengkapi konduktor mesh dengan jumlah 2×4 mesh, ukuran mesh

$10 \times 6,5$ m dan empat (4) *down conductor*, untuk mendapatkan besaran E , H dan V_{ind} pada injeksi $I_p = 100$ kA, $f_p = 200$ kHz masing-masing pada :

- a. Objek I dari 114,724 kV/m menjadi 3,586 kV/m, 29,1469 A/m menjadi 16,393 A/m dan 11.271,87 kV menjadi 344,459 kV
- b. Objek II dari 6,5905 kV/m menjadi 0,184 kV/m, 1,67479 A/m menjadi 0,875 A/m dan 1.927,004 kV menjadi 63,699 kV

SARAN

Menganalisa sistem proteksi yang sudah direncanakan dari hasil perhitungan berdasarkan LPZ (*Lightning Protection Zone*) dengan metode yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Dehn-Sohne, 2014, *Lightning Protection Guide*, germany www.dehn.de
- Hasse, P., 1992, *Overvoltage Protection of Low Voltage System*, England by short run press Ltd., Exceter, institution of electrical engineers
- Helita and Soule, P., 2011, *Lightning and Surge Protection OVR Range*, Avenue des preseigneurs-LaBoisse/France, www.abb.com
- Hyatt, Jr., W.H., 2006, *Elektromagnetika*, Edisi Ketujuh, Penerbit Erlangga, Jakarta
- Malmivuo, J., dan Plonsey, R., 1995, *Bioelectromagnetism principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Field*, Oxford University Pres, New York
- Zoro, R., 2002, *Proteksi Tegangan Lebih Pada Peralatan Elektronik dan Bangunan*, PT. LAPI ELPATSINDO, Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Bandung
- _____, 2012, BS EN/IEC 62305 *Lightning Protection Standard*, Furse, wilford road, Nottingham NG2 1EB, www.furse.com