

ANALISIS TEGANGAN LEBIH INDUKSI AKIBAT MEDAN LISTRIK (E) DAN MEDAN MAGNET (H) PADA DUA BUAH TOWER YANG TERINJEKSI ARUS PETIR

(Studi Kasus: Dua Buah Tower Telekomunikasi Di Jalan Guru Bangkol,
Pagesangan Timur, Kota Mataram)

Analysis of Overvoltage Induction due to Electricity Field (E) and Magnetic Field (H) at Two Towers Injected by Lightning Current

(Case Study: Two Telecommunication Towers On Guru Bangkol Street, East Pagesangan, Mataram City)

Ni Made Seniari¹, Aan Kurniawan², I Made Ginarsa³

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas mataram, NTB

Email:¹seniari_nimade@unram.ac.id, ²aan.andes12@gmail.com, ³kadekgin@unram.ac.id

ABSTRAK

Sambaran petir dapat merusak objek yang disambar secara langsung maupun tidak langsung. Di sekitar titik sambaran petir terinduksi medan listrik (E), medan magnet (H) dan tegangan induksi (V_{ind}). Pada sebuah studi kasus, terdapat dua buah tower telekomunikasi yang bertempat di jalan Guru Bangkol, Pagesangan Timur, Kota Mataram yang disimulasikan tersambar petir secara langsung. Jarak antara kedua tower adalah 25 m dengan tinggi yang sama yaitu 40 m. Bangunan (objek) yang disambar tidak langsung yaitu salah satu rumah warga disekitar tower tersebut, dengan jarak dari tower 1=5 m dan dari tower 2=12 m. Parameter petir yang menyambar kedua tower, disimulasikan sebesar 392, 30, 18 kA dan 200, 100, 25 kHz. Simulasi menunjukkan bahwa dengan injeksi arus 18 kA dan frekuensi petir 200 kHz pada kedua tower, maka yang dirasakan objek dari tower 1 dan tower 2, masing-masing adalah medan listrik (E) = 358,119 dan 144,489 kV/m, medan magnet (H) = 142,235 dan 57,386 A/m, dan tegangan induksi (V_{ind})= 5.391,454 dan 3.657,047 kV. Hasil simulasi dibandingkan dengan standar ICNIRP, dan IEC. Nilai medan listrik (E) dan tegangan induksi (V_{ind}) berada diatas ambang batas yang diizinkan, sedangkan nilai medan magnet (H) masih berada dibawah ambang batas yang diizinkan.

Kata kunci: Tower telekomunikasi, Medan listrik, Medan magnet, Tegangan induksi

ABSTRACT

Lightning strike can damage the object directly or indirectly. Around the point of lightning strike injected electricity field (E), magnetic field (H) and induction voltage (V_{ind}). In the case study, there were two telecommunication towers located on Guru Bangkol Street, East Pagesangan, Mataram City that was simulated to be struck by lightning directly. The distance of both towers is 25 m with the same height of 40 m. The building (object) that was struck indirectly is one of the residents' houses around the tower, with the distance from tower 1 = 5 m and from tower 2 = 12 m. The injection simulated of lightning current was about 18, 30 and 392 kA with the frequencies between 25, 100 and 200 kHz. The simulation showed with 18 kA current injection and 200 kHz frequency in both towers, then the object received from tower 1 and tower 2, respectively are E = 358,119 and 144,488 kV/m, H = 142,235 and 57,386 A/m, and V_{ind} = 297.454 and 113,047 kV. The simulation results are compared with the ICNIRP standard (for E and H) and IEC (for V_{ind}). The value of the electricity field (E) and the induction voltage (V_{ind}) are above the permitted verge, while the value of the magnetic field (H) is still below the permitted verge.

Keywords : Telecommunication tower, Electricity field, Magnetic field, Induction voltage

PENDAHULUAN

Petir merupakan peristiwa listrik alam yang sangat berbahaya. Sambaran petir dapat menyambar objek secara langsung, sehingga

menimbulkan kerusakan bangunan, kerusakan peralatan listrik atau elektronik, dan dapat mengancam nyawa makhluk hidup. Objek yang berada disekitar titik sambaran

petir juga akan mengalami gangguan akibat terinduksi gelombang elektromagnetik antara lain medan listrik (E), medan magnet (H) dan tegangan induksi (V_{ind}).

Pada studi kasus, terdapat dua buah tower telekomunikasi di jalan Guru Bangkol, Pagesangan Timur, Kota Mataram, dengan jarak antara *down conductor* masing-masing tower ± 25 m. Kedua tower tersebut dibangun disekitar perumahan warga, dimana hal ini dapat menimbulkan dampak-dampak negatif seperti dampak terhadap kesehatan hingga dampak terhadap keselamatan. Pusat Penelitian Ekologi dan Status Kesehatan yang berganti nama menjadi Pusat Teknologi Intervensi Kesehatan Masyarakat telah melakukan penelitian dengan judul “Pengaruh Medan Elektromagnetik Terhadap Kesehatan Masyarakat Di Sekitar Menara Pemancar Telepon Seluler (BTS) di Jakarta dan Bandung”, dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh pajanan medan elektromagnetik (radiasi) yang berasal dari menara telepon seluler (BTS) terhadap kesehatan (termasuk kecemasan) masyarakat yang bermukim di sekitar BTS. Selain dampak negatif tersebut, adapula dampak lain seperti dampak medan listrik (E), medan magnet (H) dan tegangan lebih induksi (V_{ind}) yang terjadi akibat sambaran petir langsung terhadap tower tersebut yang dapat membahayakan makhluk hidup dan peralatan listrik atau elektronik disekitar titik sambaran.

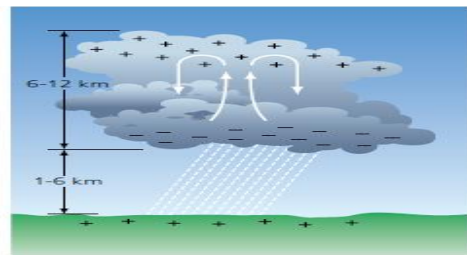
Dampak-dampak tersebut dapat merugikan semua pihak, dari pemilik tower hingga warga yang tinggal disekitar tower. Sehingga untuk mengurangi dampak negatif dari sambaran petir tersebut, diperlukan perhitungan dan analisa untuk mengetahui besarnya medan listrik (E), medan magnet (H) dan tegangan induksi (V_{ind}) disekitar titik sambaran, serta pengkajian faktor-faktor yang mempengaruhi besaran-besaran tersebut.

Mekanisme Sambaran Petir

Awan bermuatan dapat terbentuk :

- a. Jika suatu daerah terdapat udara yang lembab
- b. Terjadinya pergerakan udara ke atas
- c. Terdapatnya inti higroskopis.

Kontribusi ketiga elemen ini akan menghasilkan awan *cumulonimbus* yang bermuatan listrik, dengan diameter beberapa kilometer dan tinggi sampai 12 km serta tinggi awan terendah antara 1-6 km diatas tanah. Distribusi muatan awan *cumulonimbus* dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 1. Tipe distribusi muatan awan *cumulonimbus* (Eritech, 2009)

Karakteristik petir tropis

Posisi Indonesia yang terletak pada koordinat 6°LU - 11°LS dan 95°BB - 141°BT telah menempatkan wilayah Indonesia pada daerah dengan iklim tropis. Sambaran petir di daerah tropis khususnya Indonesia memiliki karakteristik petir yang berbeda dengan daerah sub-tropis. Untuk mendapatkan data petir di daerah tropis dilakukan pengukuran di Gunung Tangkuban Perahu. (Zoro, 1999).

Tabel 1. Karakteristik petir tropis (Zoro, 1999).

Karakteristik petir	Polaritas negatif	Polaritas positif	
	Maksimum	335 kA	392 kA
Arus puncak	Probability 50 %	40 kA	18 kA
	Rata-rata	41 kA	30 kA
Kecuraman (di/dt)	Maksimum	119 kA/μs	120 kA/μs
	Probability 50 %	30 kA/μs	20 kA/μs
Kerapatan sambaran (sambaran/km ² /tahun)		4,1 – 12,4	1,5 – 3,8
	Kerapatan sambaran total (sambaran/km ² /tahun)	7,9 – 15,5	

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 kontinyu 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): (Hayt Jr, 2006)

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

Jika muatan listrik petir (Q) dinyatakan dalam magnitudenya, maka persamaan diatas menjadi :

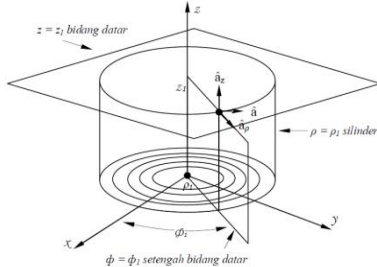
$$\rho_L = \frac{MQ}{L} [C/m] \dots\dots\dots (2)$$

Dengan:

- ρ_L = Kerapatan muatan Luas (C/m)
- Q = Muatan listrik petir (Coloumb)
- MQ = Magnitude muatan listrik petir (Coloumb)
- L = Panjang muatan garis (m)

Kuat Medan Listrik

Kuat medan listrik atau 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 2. Posisi koordinat dan vector dasar dalam sistem koordinat silinder (Demarest,1998)

Pada Gambar 2 dapat dilihat medan parsial di titik P, disebabkan oleh keberadaan muatan parsial $dE = dE_r \hat{r} + dE_z \hat{z}$, didapatkan :

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

menghasilkan,

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

Keterangan:

- ρ_L = Kerapatan muatan Luas (C/m)
- ϵ_u = Permittivitas udara (F/m)
- r = Jarak (m)

Kuat Medan Magnetik

Sumber medan magnetik berupa arus searah dapat dibayangkan berupa arus *differensial* yang merupakan bagian kecil dari filamen konduktor yang dialiri arus, yang filamennya merupakan limit dari tabung konduktor berpenampang lingkaran yang jejarinya menuju nol.

$$dH = \frac{Idz' a_z \times (ra_r - z'a_z)}{4\pi (r^2 + z'^2)^{3/2}} [A/m] \dots\dots\dots(5)$$

Menghasilkan:

$$H = \frac{1}{4\pi} \int \frac{rdz'}{(r^2 + z'^2)^{3/2}} [A/m] \dots\dots\dots(6)$$

Potensial Listrik oleh Muatan Garis

Potensial disebuah titik didefinisikan sebagai kerja yang dilakukan untuk memindahkan sebuah muatan satuan positif dari titik referensi nol ke titik yang dimaksud, dan besarnya kerja ini tidak tergantung pada lintasan perpindahan yang dipilih. Jadi, medan potensial dari sebuah muatan titik tunggal Q_1 yang berkedudukan di titik r_1 hanya akan bergantung pada jarak $|r - r_1|$, yaitu

jarak dari muatan Q_1 ketitik r tempat dimana kita hendak menemukan potensial.

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_u} \int \frac{\rho_s ds'}{|r - r'|} [V] \dots\dots\dots(7)$$

Dengan nilai $|r - r'| = \sqrt{r^2 + z'^2}$ untuk distribusi muatan garis, maka Pers.(7) menjadi:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_u} \int \frac{\rho_l dl'}{\sqrt{r^2 + z'^2}} [V] \dots\dots\dots(8)$$

Mekanisme Induksi Medan Magnetik

Arus petir mengalir pada suatu *down conductor*, mengakibatkan daerah sekeliling *down conductor* akan mengalami induksi elektromagnetik atau *mutual inductance* yang menginduksikan peralatan listrik pada bangunan di sekitarnya. Besar nilai *mutual inductance* pada suatu kabel penghantar terhadap peralatan listrik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$L_M = 0.2 \times h \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right) [H] \dots\dots\dots(9)$$

Harga tegangan induksi akibat kopling induktif, yaitu :

$$V_{Ind-L} = L_M \times \frac{dI}{dt} [V] \dots\dots\dots(10)$$

dengan :

- L_M = Mutual induktansi [Henry]
- dI/dt = kecuraman arus petir [kA/ μ s]
- h = Tinggi loop pada bangunan (m)
- f = Jarak antara *down conductor* dengan loop dalam pada bangunan (m)
- $f+e$ = Jarak antara *down konduktor* dengan loop luar pada bangunan (m)

Mekanisme Kopling Kapasitif

Dua buah konduktor yang berada di dalam sebuah ruang yang dipenuhi oleh suatu bahan dielektrum bukan ruang hampa. Konduktor M_2 membawa muatan positif total sebesar Q , dan konduktor M_1 membawa muatan negatif yang setara, tidak ada muatan lainnya di dalam ruangan tersebut, dan nilai muatan total yang dikandung sistem adalah nol. (Hayt, 2006).

$$V_0 = V_{ind-C} = \int_{atas}^{bawah} E \cdot dL = - \int_d^0 E \cdot dz = E \cdot d \dots\dots\dots(11)$$

Dengan :

- V_{ind-C} = Tegangan induksi kopling kapasitif
- E = Medan listrik (V/m)
- d = Jarak (m).

Mekanisme Kopling Galvanik

Kopling galvanic merupakan 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, (Helita, 2011).

$$U = \frac{\rho x I_p}{2\pi x D} [V] \dots\dots\dots (12)$$

Dengan:

- U = Tegangan (Volt)
- ρ = Resistivitas tanah ($\Omega.m$)
- I_p = Arus puncak petir (A)
- $D = r$ = jarak antara *grounding* (m)

Sehingga tegangan induksi akibat kopling Galvanik adalah:

$$\Delta U = U_1 - U_2 [V] \dots\dots\dots (13)$$

Dengan:

- U_1 = Tegangan pada *grounding* objek yang diamati.
- U_2 = Tegangan pada terminal netral yang dekat dengan objek yang diamati.

Tegangan Induksi Total ($V_{ind-total}$)

Tegangan lebih induksi total yang diterima oleh peralatan listrik pada bangunan merupakan penjumlahan dari masing-masing tegangan sebagai akibat dari potensial listrik serta kopling-kopling yang terjadi akibat sambaran petir. Sehingga untuk total tegangan lebih induksi yang diterima dapat menggunakan persamaan berikut :

$$V_{ind-total} = V_{ind-E} + V_{ind-L} + V_{ind-C} + V_{ind-G} \dots\dots (14)$$

Dengan :

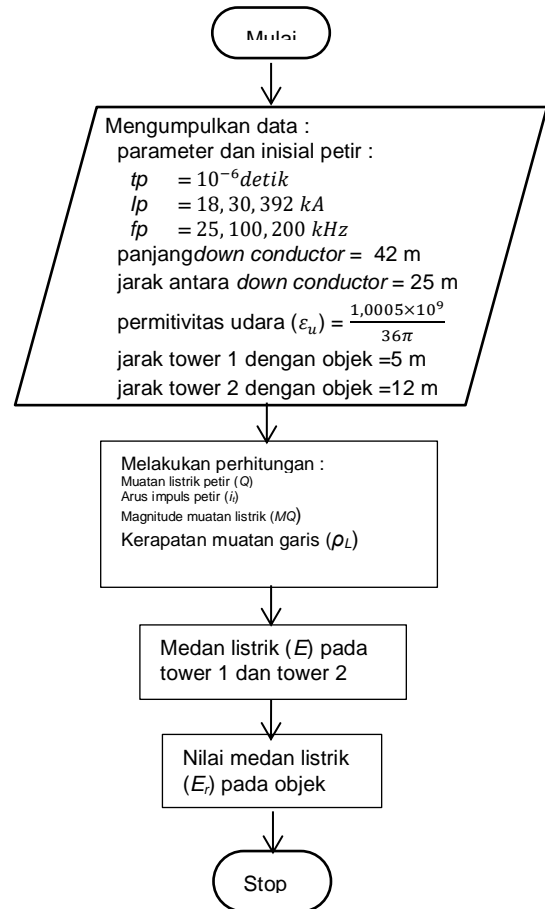
- $V_{ind-total}$ = Tegangan lebih induksi total
- V_{ind-E} = Potensial listrik akibat medan listrik
- V_{ind-L} = Tegangan induksi akibat kopling induktif
- V_{ind-C} = Tegangan induksi akibat kopling kapasitif
- V_{ind-G} = Tegangan lebih induksi akibat kopling galvanik

METODE PENELITIAN

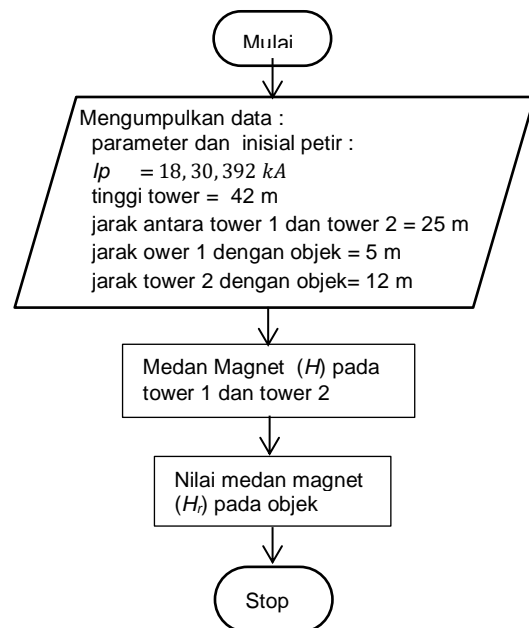
Penelitian ini menggunakan metode perhitungan dalam menentukan besarnya medan listrik (E), medan magnet (H) dan tegangan induksi total ($V_{ind-total}$) pada objek (bangunan disekitar tower) akibat injeksi arus petir pada dua buah tower telekomunikasi yang relatif berdekatan. Asumsi bahwa arus petir menyambar kedua tower tersebut dengan injeksi arus yang sama besar pada masing-masing tower.

Penelitian ini dilakukan pada dua buah tower telekomunikasi yang bertempat di jalan Guru Bangkol, Pagesangan Timur, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia.

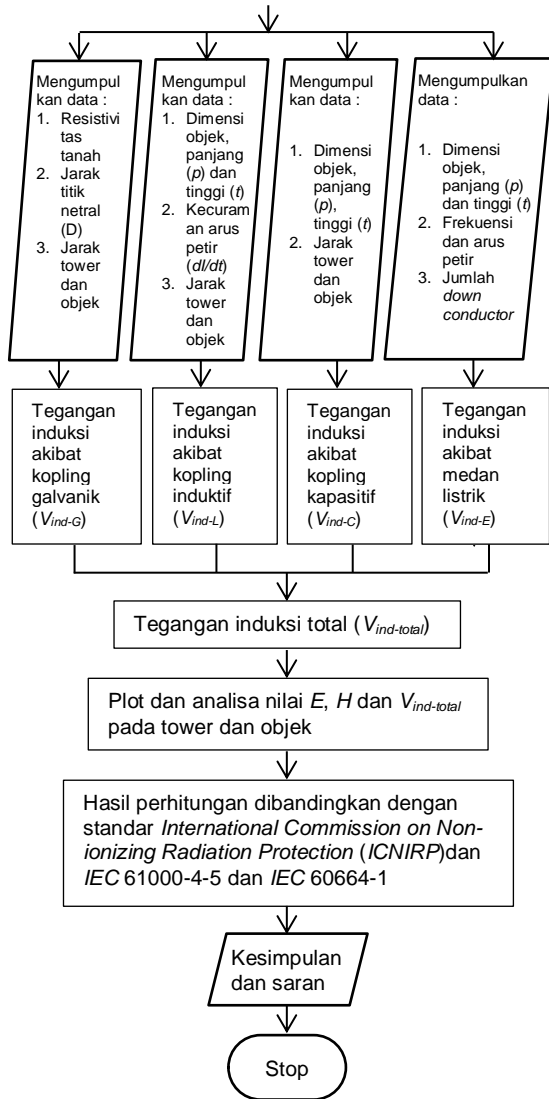
Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. Diagram Alir Analisis Perhitungan Medan Listrik (E) Pada Tower dan Objek



Gambar 4. Diagram Alir Analisis Perhitungan Medan Magnet (H) Pada Tower dan Objek



Gambar 5. Diagram Alir Analisis Perhitungan Pada Tower dan Objek

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas proses perhitungan parameter medan listrik (E), medan magnet (H), tegangan induksi total (V_{ind-total}) yang terjadi disekitar titik sambaran. Sesuai kondisi riil di lapangan, yaitu sambaran petir langsung pada dua buah tower telekomunikasi yang bertempat di jalan Guru Bangkol, PAGESANGAN Timur, Kota Mataram. Parameter petir yang digunakan mengikuti standar internasional seperti standar International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP) dan International Electrotechnical Commission (IEC).

Perhitungan ini mensimulasikan arus puncak petir (I_p) yaitu 18, 30, dan 392 kA serta frekuensi arus petir (f_p) yaitu 25, 100,

dan 200 kHz, kemudian kondisi di lapangan seperti ukuran, jumlah dan jarak antar down conductor dengan jarak titik sambaran yang diamati serta dimensi tower dan objek yang diamati.

Perhitungan Intensitas Medan Listrik (E) dan Intensitas Medan Magnet (H)

Dengan Injeksi arus petir polaritas positif sesuai dengan data Zoro yaitu arus puncak (I_p) = 18 kA dan frekuensi arus petir (f_p) = 200 kHz, maka muatan petir (Q) yang didapat adalah 0,00884 < 35,98°. Panjang down conductor (L) pada tower adalah 42 m, sehingga kerapatan muatan petir (ρ_L) pada down conductor adalah 0,0002 C/m. Kerapatan muatan petir akan menimbulkan medan listrik (E) dan medan magnet (H). Menganalisa E dan H dengan menggunakan koordinat tabung, sehingga E dan H yang timbul hanya pada sumbu r. Hasil perhitungan E dan H, pada kedua tower serta objek dengan jarak 5 m dari tower 1 dan 12 m dari tower 2 dibandingkan dengan standar ICNIRP.

Tabel 2. Hasil perhitungan medan listrik dan medan magnet (H)

Objek	Jarak Sambara titik ukur n (r) [m]	Medan Listrik (E) [kV/m]		Medan Magnet (H) [A/m]	
		Hitung	Standar	Hitung	Standar
Tower I	0,1	1.807		7.162	
	12,5	13,83		54,92	
	25,0	6,198		24,62	
	5	35,81	10	142,2	800
Tower II	0,1	1.807		7.162	
	12,5	13,83		54,92	
	25,0	6,198		24,62	
	12	10,50		57,38	

Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel diatas dengan arus puncak petir (I_p) = 18 kA dan frekuensi arus petir (f_p) = 200 kHz, dapat diketahui bahwa semakin jauh jarak (r) dari titik sambaran maka nilai medan listrik (E) dan medan magnet (H) akan semakin kecil, karena E dan H berbanding terbalik dengan jarak. Besaran E berada diatas standar International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP) yaitu 10 kV/m untuk medan listrik (E) dan yaitu 800 A/m untuk medan magnet (H).

Perhitungan Tegangan Induksi (V_{ind})

Dengan injeksi arus petir sesuai dengan data Zoro yaitu arus puncak (I_p) = 18 kA dan frekuensi arus petir (f_p) = 200 kHz, didapatkan kerapatan muatan garis 0,0002 C/m, maka dapat dihitung nilai tegangan induksi akibat medan listrik (V_{ind-E}). Tinggi objek yaitu 3,5 m

sangat mempengaruhi besarnya tegangan induksi akibat kopling kapasitif (V_{ind-C}). Kuat medan magnetik akan menimbulkan loop tertutup berdasarkan dimensi objek dengan kecuraman arus petir (di/dt) yaitu 120 kA/ μ s, maka menimbulkan tegangan induksi akibat kopling Induktif (V_{ind-L}). Injeksi arus di permukaan tanah akibat petir menyambar sistem proteksi petir (SPP) tower, sehingga menyebabkan kenaikan tegangan pada

grounding

tower dan objek. Resistansi tanah di sekitar tower yang diamati yaitu 132 Ω pada tower 1 dan 117,5 Ω pada tower 2, sehingga didapatkan nilai resistivitas pada tower 1 = 4.147 Ω .m dan pada tower 2 = 3.691 Ω .m. Nilai resistivitas tanah akan mempengaruhi besarnya tegangan induksi akibat kopling galvanik (V_{ind-G}).

Tabel 3. Hasil perhitungan tegangan induksi ($V_{ind-total}$) pada objek

Titik sambaran	Jarak (r) objek [m]	Tegangan Induksi (V_{ind}) Akibat				Tegangan Induksi total ($V_{ind-total}$)	
		Medan Listrik (V_{ind-E})[V]	Kopling Induktif (V_{ind-L})[V]	Kopling Kapasitif (V_{ind-C})[V]	Kopling Galvanik (V_{ind-G})[V]	Hitung [kV]	Standar [kV]
Tower 1	5	0.000045041	86,488	0,000009122	347.376,606	347,463	6
Tower 2	12	0.000031342	47,007	0,000004454	127.090,578	127,138	

Berdasarkan perhitungan di atas dengan arus puncak petir (I_p) = 18.000 A dan frekuensi petir (f_p) = 200 kHz, tegangan induksi total yang diterima objek pada jarak 5 m dari tower 1 dan 12 m dari tower 2 berturut-turut yaitu 347,463 kV dan 127,138 kV. Semakin jauh jarak (r) dari titik sambaran, maka semakin kecil tegangan induksi total ($V_{ind-tot}$) yang dirasakan objek, karena tegangan induksi berbanding terbalik dengan jarak. Besaran tersebut masih berada diatas ambang batas standar yang diizinkan oleh IEC yaitu 6 kV.

Nilai E dan H pada I_p dan f_p yang berbeda untuk objek

Dengan data penelitian karakteristik petir daerah tropis oleh Zoro yaitu I_p polaritas positif = 392,30 dan 18 kA serta variasi frekuensi petir (f_p) = 25, 100 dan 200 kHz, maka didapatkan untuk objek pada tabel 4a dan 4b. Hasil perhitungan E dan H tersebut dibandingkan dengan standar ICNIRP.

Tabel 4a. Nilai medan listrik (E) dan medan magnet (H) pada objek dari tower 1

Titik Sambaran	Arus petir (I_p)[kA]	Frekuensi arus petir (f_p) [kHz]	Medan Listrik [kV/m]		Medan Magnet[A/m]	
			Hitung	Standar ICNIRP	Hitung	Standar ICNIRP
Tower 1	18	25	382,433			
		100	376,555		142,235	
		200	358,119			
	30	25	651,372			
		100	627,587	10	237,058	800
		200	596,870			
	392	25	832,836			
		100	820,047		3.097,56	
	200	779,911				

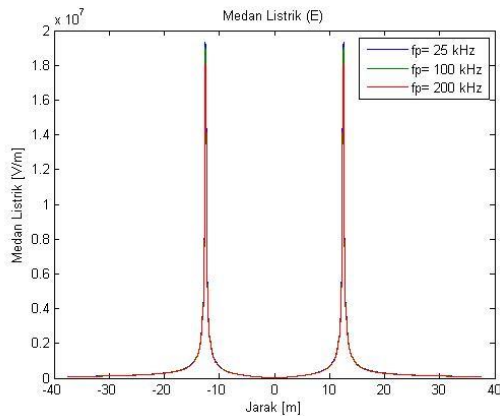
Tabel 4b. Nilai medan listrik (E) dan medanmagnet (H) pada objek dari tower 2

Titik Sambaran	Arus petir (I_p)[kA]	Frekuensi arus petir (f_p) [kHz]	Medan Listrik [kV/m]		Medan Magnet[A/m]	
			Hitung	Standar ICNIRP	Hitung	Standar ICNIRP
Tower 2	18	25	154,294			
		100	151,925		57,386	
		200	144,489			
	30	25	257,157			
		100	253,208	10	95,644	800
		200	240,815			
	392	25	336,019			
		100	330,859		1.249,75	
	200	314,666				

Berdasarkan Tabel 4a dan 4b, nilai medan listrik(E) pada objek dari kedua tower tersebut berada diatas ambang batas standar ICNIRP yaitu 10 kV/m. sedangkan nilai medan magnet (H) saat arus petir 18 kA dan 30 kA masih berada dibawah ambang batas standar ICNIRP yaitu 800 A/m.

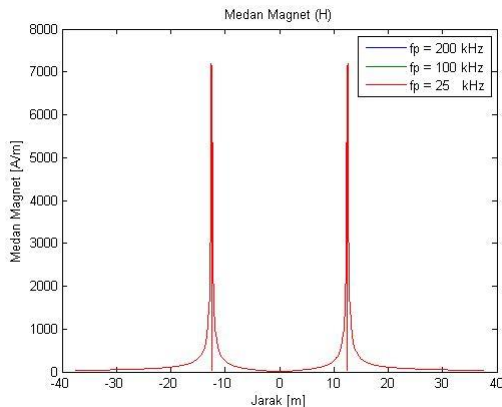
Dampak medan listrik (E) bagi mahluk hidup bila melebihi ambang batas, menurut Malmivuo dalam buku *Bioelectromagnetik* (1995) menyatakan bahwa metabolisme mahluk hidup seperti sistem kerja dan pembelahan sel, aliran darah, detak jantung, sistem kerja saraf, sistem kerja otot, bekerja berdasarkan vektor. Apabila mahluk hidup terpapar medan listrik (E) berbentuk vektor dari luar, maka metabolisme mahluk hidup akan terganggu.

Pengaruh jarak (r) dan frekuensi arus petir (f_p) dengan injeksi arus puncak petir I_p = 18 kA terhadap medan listrik (E) dan medan magnet (H) pada kedua tower, dapat diplot sebagai berikut:



Gambar 6. Pengaruh frekuensi (f_p) terhadap medan listrik (E)

Pada Gambar 6, dengan injeksi arus petir (I_p) = 18 kA dan variasi frekuensi arus petir (f_p) yang semakin besar, yaitu = 25, 100 dan 200 kHz, maka nilai medan listrik (E) yang dihasilkan akan cenderung menurun meskipun dampaknya sangat kecil. Nilai medan listrik (E) akan menurun bila jarak (r) yang diamati semakin jauh dari titik sambaran petir.



Gambar 7. Pengaruh frekuensi (f_p) terhadap medan magnet (H)

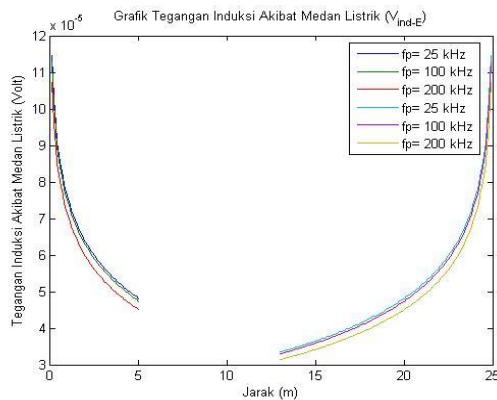
Pada Gambar 7, dengan injeksi arus petir (I_p) = 18 kA dan variasi frekuensi arus petir (f_p), yaitu = 25, 100 dan 200 kHz, dapat dilihat bahwa variasi nilai frekuensi arus petir (f_p) tidak mempengaruhi nilai medan magnet, namun semakin jauh jarak (r) titik ukur dari titik sambaran petir maka kuat medan magnet (H) akan semakin kecil. Hal ini menyatakan bahwa nilai medan magnet berbanding terbalik dengan jarak (r).

Perhitungan tegangan induksi pada objek menggunakan teorema superposisi, dimana saat menghitung tegangan pada objek dari tower 1 maka tegangan yang timbul dari tower 2 dianggap bernilai 0 volt. Sebaliknya, saat menghitung tegangan pada objek dari tower 2

maka tegangan yang timbul dari tower 1 dianggap bernilai 0 volt. Diasumsikan tower 1 berada pada titik koordinat (0,0) dan tower 2 pada titik (0,25) dengan posisi objek tidak berada pada garis dari tower 1 ke tower 2.

Nilai Tegangan Induksi Akibat Medan Listrik (V_{ind-E}) pada I_p dan f_p yang berbeda untuk objek

Mengacu pada perhitungan tegangan induksi akibat medan listrik (V_{ind-E}) pada objek disekitar titik sambaran petir (tower) dengan jarak (r) dari tower 1 = 5 m, jarak (r) dari tower 2 = 12 m, arus puncak petir (I_p) = 18 kA dengan variasi frekuensi arus petir (f_p) = 200, 100 dan 25 kHz. Pengaruh frekuensi arus petir (f_p) yang divariasikan untuk menghitung tegangan induksi akibat muatan garis (V_{ind-E}) dapat diplot sebagai berikut :



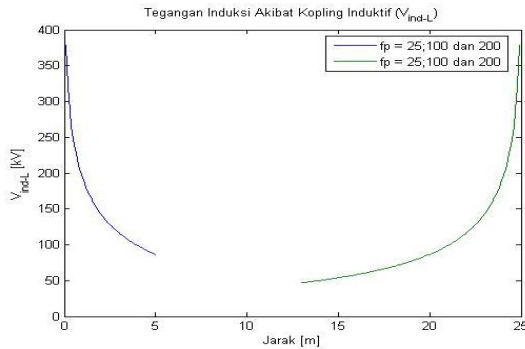
Gambar 8. Pengaruh frekuensi arus petir (f_p) terhadap tegangan induksi akibat medan listrik (V_{ind-E})

Berdasarkan gambar 8 diatas, dapat dilihat bahwa dengan injeksi arus petir I_p = 18 kA dan variasi frekuensi arus petir f_p = 200, 100 dan 25 kHz, maka tegangan induksi akibat medan listrik (V_{ind-E}) pada objek dengan jarak (r) dari tower 1 = 5 m dan dari tower 2 = 12 m akan bernilai semakin kecil dengan bertambahnya jarak (r) titik ukur dari titik sambaran petir, begitu juga variasi nilai f_p yang semakin besar mengakibatkan nilai V_{ind-E} yang semakin kecil. Hal ini menyatakan bahwa V_{ind-E} berbanding terbalik dengan f_p dan r .

Nilai Tegangan Induksi Akibat Koping Induktif (V_{ind-L}) pada I_p dan f_p yang berbeda untuk objek

Mengacu pada perhitungan tegangan induksi koping induktif (V_{ind-L}) pada objek di sekitar titik sambaran petir (tower) dengan jarak (r) dari tower 1 = 5 m, jarak (r) dari tower 2 = 16 m, injeksi arus petir (I_p) = 18 kA, variasi

frekuensi arus petir (f_p) = 200, 100 dan 25 kHz dan kecuraman arus petir (dl/dt). Pengaruh jarak (r) dan variasi frekuensi arus petir (f_p) terhadap tegangan induksi kopling induktif dapat diplot sebagai berikut :

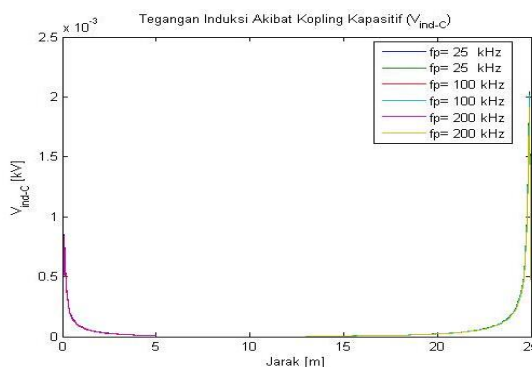


Gambar 9. Pengaruh frekuensi arus petir (f_p) terhadap tegangan induksi akibat kopling induktif (V_{ind-L})

Pada gambar 9 diatas, dapat dilihat bahwa tegangan induksi kopling induktif (V_{ind-L}) tidak dipengaruhi oleh variasi nilai frekuensi arus petir (f_p). Semakin jauh jarak (r) titik ukur dari titik sambaran petir maka tegangan induksi yang diterima akan semakin kecil.

Nilai Tegangan Induksi Akibat Kopling Kapasitif (V_{ind-C}) pada I_p dan f_p yang berbeda untuk objek

Mengacu pada perhitungan tegangan induksi kopling kapasitif (V_{ind-C}) dengan injeksi arus petir (I_p) = 18, 30 dan 392 kA dan variasi frekuensi arus petir (f_p) = 200, 100 dan 25 kHz. Pengaruh jarak (r) dan variasi frekuensi arus petir (f_p) dengan injeksi arus puncak petir I_p = 18 kA terhadap tegangan induksi kopling kapasitif (V_{ind-C}) pada objek dapat diplot sebagai berikut :



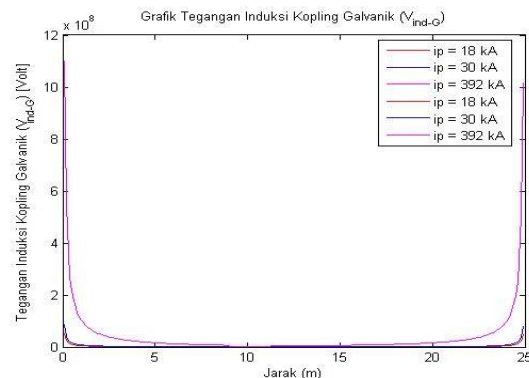
Gambar 10. Pengaruh frekuensi arus petir (f_p) terhadap tegangan induksi akibat kopling kapasitif (V_{ind-C})

Berdasarkan gambar 10 diatas dengan I_p = 18 kA dan variasi nilai f_p = 25, 100 dan 200 kHz, didapatkan nilai tegangan induksi kopling kapasitif yang semakin kecil dengan f_p yang

semakin besar dan titik ukur (r) yang semakin jauh dari titik sambaran. Hal ini menyatakan bahwa nilai tegangan induksi kopling kapasitif berbanding terbalik dengan nilai frekuensi arus petir (f_p) dan jarak (r).

Nilai Tegangan Induksi Akibat Kopling Galfanik (V_{ind-G}) pada I_p dan f_p yang berbeda untuk objek

Mengacu pada perhitungan tegangan induksi kopling galvanik (V_{ind-G}) dengan variasi injeksi arus petir I_p = 18, 30 dan 392 kA, variasi frekuensi arus petir (f_p) = 200, 100 dan 25 kHz, jarak (r) *grounding* objek dari tower 1 = 8 m dan dari tower 2 = 16 m, jarak (r) *grounding* titik netral objek dari tower 1 = 18 m dan dari tower 2 = 26 m. Pengaruh jarak (r) dan variasi frekuensi arus petir (f_p) dengan injeksi arus puncak petir I_p = 18 kA terhadap tegangan induksi akibat kopling galvanik (V_{ind-G}) pada objek sebagai berikut :

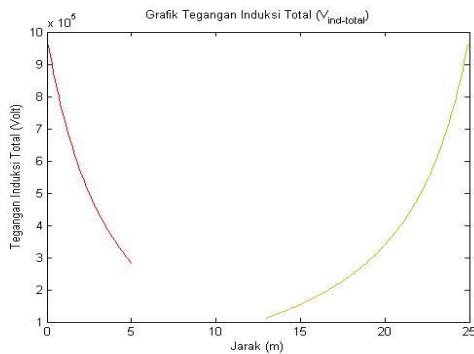


Gambar 11. Pengaruh variasi arus puncak petir (I_p) terhadap tegangan induksi akibat kopling galvanik (V_{ind-G})

Berdasarkan gambar 11 diatas dapat dilihat bahwa nilai arus divariasikan untuk mengetahui nilai tegangan induksi akibat kopling Galvanik (V_{ind-G}), dimana saat arus semakin besar maka nilai tegangan induksi akibat kopling Galvanik akan semakin besar pula, karena nilai V_{ind-G} berbanding lurus dengan nilai arus petir. Nilai tegangan induksi (V_{ind-G}) tidak dipengaruhi oleh variasi nilai frekuensi (f_p), namun akan semakin menurun bila jarak (r) objek yang diamati semakin jauh dari titik sambaran petir.

Nilai Tegangan Induksi Total ($V_{ind-total}$) pada I_p dan f_p yang berbeda untuk objek

Mengacu pada perhitungan tegangan lebih induksi ($V_{ind-total}$) pada objek dengan injeksi arus puncak petir I_p = 18, 30 dan 392 kA dan variasi frekuensi arus petir (f_p) = 25, 100 dan 200 kHz. Tegangan lebih induksi ($V_{ind-total}$) pada objek dapat diplot sebagai berikut :



Gambar 12. Pengaruh jarak terhadap tegangan induksi ($V_{ind-total}$)

Berdasarkan gambar 12 diatas dengan injeksi arus puncak petir $I_p = 18$ kA, dapat dilihat bahwa variasi nilai frekuensi arus petir, yaitu $f_p = 25, 100$ dan 200 kHz, menghasilkan Nilai tegangan induksi ($V_{ind-total}$) pada objek yang akan cenderung menurun namun dampaknya sangat kecil. Nilai tegangan lebih

induksi akan semakin kecil setiap penambahan jarak (r) dari titik sambaran. Hal ini menyatakan bahwa nilai tegangan induksi berbanding terbalik dengan jarak.

Membandingkan Besaran Parameter E, H dan Tegangan Induksi Total ($V_{ind-total}$) Berdasarkan Standar

Mengacu pada hasil perhitungan medan listrik (E), medan magnet (H) dan tegangan induksi total ($V_{ind-total}$) pada objek (jarak (r) dari tower 1 = 5 m dan dari tower 2 = 12 m) dengan injeksi arus puncak petir (I_p) sesuai dengan hasil pengukuran Reynaldo Zoro pada arus petir polaritas positif yaitu 18, 30 dan 392 kA, dengan variasi frekuensi arus petir (f_p) = 25, 100 dan 200 kHz. Nilai E, H dan $V_{ind-total}$ pada objek dengan variasi arus puncak petir dan frekuensi arus petir, didapatkan hasil seperti pada tabel berikut :

Tabel 5. Nilai E, H dan $V_{ind-total}$ pada objek dengan $f_p = 25$ kHz

Titik Sambaran	I_p (kA)	f_p (kHz)	Medan Listrik (kV/m)		Medan Magnet (A/m)		Tegangan Induksi total ($V_{ind-total}$) [kV]	
			Hitung	Standar	Hitung	Standar	Hitung	Standar
Tower 1	18	25	382,433	10	142,235	800	347,463	6
	30		637,382		237,058		579,047	
	392		8.396,483		3.097,564		7.565,177	
Tower 2	18		154,298		57,386		127,137	
	30		257,160		95,644		211,864	
	392		3.387,678		1.249,756		2.767,797	

Tabel 6 Nilai E, H dan $V_{ind-total}$ pada objek dengan $f_p = 100$ kHz

Titik Sambaran	I_p (kA)	f_p (kHz)	Medan Listrik (kV/m)		Medan Magnet (A/m)		Tegangan Induksi total ($V_{ind-total}$) [kV]	
			Hitung	Standar	Hitung	Standar	Hitung	Standar
Tower 1	18	100	376,555	10	142,235	800	347,463	6
	30		627,592		237,058		579,047	
	392		8.217,834		3.097,564		7.565,177	
Tower 2	18		151,926		57,386		127,137	
	30		253,210		95,644		211,864	
	392		3.315,600		1.249,756		2.767,797	

Tabel 7. Nilai E, H dan $V_{ind-total}$ pada objek dengan $f_p = 200$ kHz

Titik Sambaran	I_p (kA)	f_p (kHz)	Medan Listrik (kV/m)		Medan Magnet (A/m)		Tegangan Induksi total ($V_{ind-total}$) [kV]	
			Hitung	Standar	Hitung	Standar	Hitung	Standar
Tower 1	18	200	358,119	10	142,223	800	347,463	6
	30		596,864		237,058		579,047	
	392		7.860,537		3.097,564		7.565,177	
Tower 2	18		144,488		57,386		127,137	
	30		240,813		95,644		211,864	
	392		3.171,443		1.249,756		2.767,797	

Mengacu pada standar *International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP)* tahun 1998, seperti pada Lampiran IV. Hasil perhitungan nilai pada objek dari kedua tower tersebut berada diatas ambang batas standar medan listrik (E) akan tetapi nilai medan magnet (H) pada objek masih sesuai dengan standar yang diizinkan,

Mengacu pada standar *IEC 61000-4-5* dan *IEC 60664-1*, spesifikasi untuk peralatan listrik menahan tegangan *impulse*, dapat dilihat pada Lampiran IV. Nilai maksimal peralatan listrik dapat menahan tegangan *impulse* adalah 6 kV, dan objek menerima tegangan induksi yang berada diatas ambang batas standar yang diizinkan.

KESIMPULAN

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

Nilai medan listrik (E) dan medan magnet (H) pada tower 1 = tower 2, dikarenakan *down conductor* kedua tower sama panjang. Sehingga didapatkan :

- Nilai medan listrik (E) pada jarak (r) = 0,1 m dari tower adalah $18,07 \cdot 10^3$ kV/m.
- Nilai medan magnet (H) pada jarak (r) = 0,1 m dari tower adalah 7.162 A/m.

Medan listrik (E), medan magnet (H) dan tegangan induksi (V_{ind}) pada objek dengan jarak 5 m dari tower 1 dan jarak 12 m dari tower 2, sehingga didapatkan:

- Nilai medan listrik (E) pada objek dari tower 1 dan tower 2 berturut-turut adalah 358,119 dan 144,488 kV/m.
- Nilai medan magnet (H) pada objek dari tower 1 dan tower 2 berturut-turut adalah 142,235 dan 57,386 A/m.
- Nilai tegangan induksi V_{ind-E} , V_{ind-L} , V_{ind-C} dan V_{ind-G} pada objek berturut-turut dari tower 1 adalah $4,504 \cdot 10^{-8}$ kV; 0,086488 kV; $9,122 \cdot 10^{-9}$ kV dan 297,368 kV, serta dari tower 2 adalah $3,134 \cdot 10^{-8}$ kV; 47,007 kV; $4,454 \cdot 10^{-9}$ kV dan 112,999 kV.

Berdasarkan nilai V_{ind-E} , V_{ind-L} , V_{ind-C} dan V_{ind-G} , sehingga besar $V_{ind-total}$ pada objek dari tower 1 dan tower 2 berturut-turut adalah 297,454 kV dan 113,047 kV.

Variasi nilai f_p yang semakin besar mengakibatkan nilai E , V_{ind-E} dan V_{ind-C} semakin kecil, karena f_p berbanding terbalik dengan nilai-nilai tersebut. Sedangkan nilai H , V_{ind-L} dan V_{ind-G} tidak dipengaruhi oleh nilai f_p . Nilai $V_{ind-total}$ dipengaruhi oleh f_p , namun pengaruhnya sangat kecil.

Mengacu pada standar ICNIRP (standar nilai E dan H) serta standar IEC (standar nilai $V_{ind-total}$), maka dari hasil perhitungan didapatkan bahwa nilai medan listrik (E) berada diatas ambang batas standar yang diizinkan yaitu 10 kV/m, sedangkan nilai medan magnet (H) berada dibawah ambang batas standar yang diizinkan yaitu 800 A/m. Untuk nilai tegangan induksi total ($V_{ind-total}$) berada diatas ambang batas standar yang diizinkan, yaitu 6 kV.

SARAN

Pemilik bangunan disekitar tower dan penanggungjawab tower tersebut agar memperhitungkan kembali dampak-dampak negatif seperti medan listrik (E), medan magnet (H), tegangan induksi (V_{ind}), dan dampak-dampak lain yang dapat merugikan

semua pihak, serta mencari solusi untuk menanggulangi dampak tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Demarest, K. R., 1998, Engineering Electromagnetics, International Edition, Prentice-Hall International, Inc. USA.
- Eritech, 2009, *Lightning Protection Handbook Designing To The IEC 62305 Series of Lightning Protection Standard*, ERICO International Corporation.
- Malmivuo, J., dan Plonsey, R., 1995, *Bioelectromagnetism principles and Application of Bioelectric and Biomagnetic Field*, Oxford University Pres, New York
- Seniari, N. M. dan Hadiyanti, 2012, *Studi Koping Induksi Pada Peralatan Listrik Di Sekitar Gedung Rektorat Unram Akibat Sambaran Petir*, Prosiding Seminar Nasional 2012, Teknik Elektro dan Informatika Dalam Pengembangan Teknologi Berkelanjutan, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Mataram
- Sutrisna, I W., Seniari, N. M., Ginarsa, I M., 2017, *Analisis Tegangan Lebih Induksi Disekitar Down Conductor yang Terinjeksi Arus Petir (Studi Kasus Gedung STAHN GDE PUDJA Mataram dan Gardu Hubung Gomong)*, DIELEKTRIKA, [S.I.] v.4, n.1, p.1-9, aug. 2017. ISSN 2579-650X
- Zoro, R., 1999. *Karakteristik Petir Tropis*, Seminar Nasional dan Workshop Teknik Tegangan Tinggi II, UGM, Yogyakarta.
- Zoro, R., 2009, "Induksi dan konduksi Gelombang Elektromagnetik Akibat Sambaran Petir Pada Jaringan Rendah", Makara Teknologi Vol.13, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung.