

## ANALISIS DAMPAK SAMBARAN PETIR TIDAK LANGSUNG DI SEKITAR GEDUNG RUMAH SAKIT PENDIDIKAN UNRAM *Analysis of the Impact of Indirect lightning Strikes Around the UNRAM Education Hospital Building*

Ni Made Seniari<sup>1</sup>, Fargan Tanjung<sup>2</sup>, , Supriyatna<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat  
Email : seniari70@unram.ac.id<sup>1</sup> ;supri1990@yahoo.com<sup>3</sup>

### ABSTRAK

Sambaran petir dapat merusak objek yang disambar langsung maupun objek di sekitar titik sambaran petir. Di sekitar titik sambaran petir terinduksi medan listrik di atas permukaan tanah ( $E_u$ ), di permukaan tanah  $E_t$ , medan magnet ( $H$ ), tegangan induksi ( $V_{ind}$ ), tegangan langkah ( $\Delta V$ ) dan arus dipermukaan tanah. Gedung 2 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM, tinggi 32,9 m, terpasang Sistem Proteksi Petir (SPP) elektrostatis di asumsikan tersambar petir. Bangunan yang di sambar tidak langsung yaitu gedung 1 dan gedung 3 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM, serta gedung Rektorat UNRAM yang melewati sebuah sungai, berjarak masing-masing 48, 50, 192 m. Parameter petir yang menyambar gedung 2, disimulasikan 392, 30, 18 kA dan 200, 100, 25 kHz. Simulasi menunjukkan dengan injeksi arus petir 18 kA, 200 kHz, pada gedung 1, gedung 3 Rumah Sakit Pendidikan dan gedung Rektorat UNRAM, masing-masing adalah  $E_u=54,38023;50,75681; 4,06130$  kV/m,  $E_t=19.376,92; 18.085,82; 1,45119$  kV/m;  $H=6,871; 15,747; 1,260$  A/m, Tegangan induksi ( $V_{ind}$ ) = 110,467; 89,047; 36,342 kV; Tegangan langkah ( $\Delta V$ ) =13.363,19; 12.795,73; 1.417,63 V; dan  $I_t=0,32; 0,31; 0,097$  A. Hasil simulasi dibandingkan dengan standart IRPA, ICNIRP, IEC dan IEEE std 80-2000. Nilai-nilai yang melebihi standar minimal yang diizinkan meliputi  $E_u$ ,  $E_t$ ,  $V_{ind}$ ,  $\Delta V$ ,  $I_t$  dan nilai yang masih dibawah standar meliputi  $H$ .

**Kata kunci:** Medan listrik, Medan Magnet, Tegangan induksi, Tegangan langkah, Arus di permukaan tanah

### ABSTRACT

Thunder can damages object even around of the target. Around of the target of thunder can induced the electric field on the soil ( $E_u$ ), soil surface ( $E_t$ ), magnetic field ( $H$ ), induction voltages ( $V_{ind}$ ), step voltages ( $\Delta V$ ) and the current on the soil ( $I_t$ ). The second building in UNRAM hospital has height of 32.9 m, applied the electrostatic thunder protection system that simulate when it targeted by thunder. The building where has targeted indirect was first building, third building of UNRAM hospital and also rektorat UNRAM building where it across the river, with the distances 48, 50, 192 m. The thunder parameter in the second building can be simulated with 392, 30, 18 kA and 200, 100, 25 kHz. The simulation show the thunder current injection is 18kA and 200 kHz in first building, UNRAM hospital, and UNRAM rektorat building, with  $E_u=54.38023; 50,75681; 4.06130$ ,  $E_t=19.376,92; 18.085,82; 1,45119$  kV/m;  $H=6,871; 15,747; 1,260$  A/m, Induction Voltage ( $V_{ind}$ ) = 110,467; 89,047; 36,342 kV; Step Voltages ( $\Delta V$ ) =13.363,19; 12.795,73; 1.417,63 V; and  $I_t=0,32; 0,31; 0,097$  A. The simulation result then compared with the standard of IRPA, ICNIRP, IEC, and IEEE std 80-2000. The value that higher than the minimal standard that can be permit is  $E_u$ ,  $E_t$ ,  $V_{ind}$ ,  $\Delta V$ ,  $I_t$  and the value that lower than the standard is ( $H$ ).

**Keywords:** electric field, magnetic field, voltage induction, step voltages, current on the soil

### PENDAHULUAN

Secara geografis Indonesia terletak pada daerah khatulistiwa dengan iklim tropis dan kelembaban tinggi. Iklim ini menyebabkan Indonesia termasuk sebagai wilayah yang memiliki hari guruh per tahun (thundherstrom day) tinggi. Kondisi seperti ini membuat Iso

Kraunik Level (IKL) untuk Indonesia sangat tinggi yaitu diatas 200 sambaran/Km2/tahun. Khusus di Mataram IKL mencapai 126 sambaran/Km2/tahun(data BMKG kota Mataram tahun 2016).

Tanggal 3 oktober 2016, di Universitas Mataram telah diresmikan Rumah Sakit

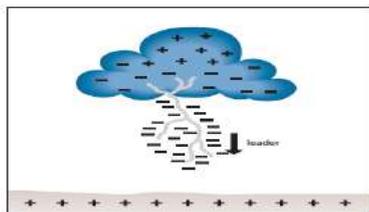
Pendidikan yang terdiri dari 3 (tiga) gedung. Gedung tersebut memiliki perbedaan ketinggian dengan gedung disekitarnya. Gedung 2 Rumah Sakit Pendidikan tinggi 32,9 m, terpasang finial elektrostatis berbasis kerja E.S.E (Early Streamer Emission) yang bekerja secara aktif. Sehingga gedung 2 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM dijadikan objek sambaran petir langsung

Dampak dari oleh sambaran petir langsung pada gedung 2 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM perlu dikaji secara khusus, dikarenakan bangunan tersebut mempunyai standar tingkat keamanan yang tinggi, nilai kesehatan, keselamatan pasien dan peralatan medis. Dampak sambaran petir tidak langsung yang diterima gedung sekitarnya yaitu gedung 1 dan 3 Rumah Sakit Pendidikan (objek I dan objek II), dan gedung Rektorat UNRAM (objek III). Posisi dari gedung 2 Rumah Sakit dengan Rektorat Unram melewati sebuah sungai. Objek 1, 2 dan 3 perlu mendapat perhatian khusus, karena pada ke tiga objek tersebut terdapat peralatan yang sangat sensitif terhadap gangguan induksi gelombang elektromagnetik antara lain Medan Listrik ( $E$ ), medan Magnet ( $H$ ), tegangan induksi ( $V_{ind}$ ), beda potensial di permukaan tanah ( $\Delta V$ ) dan arus di permukaan tanah ( $I_t$ ) yang diterima ketiga objek 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.

Jika lidah petir ini mendekati objek diatas tanah, maka pada setiap objek yang berdekatan akan terinduksi muatan yang berlawanan dan bergerak menuju lidah petir. Karena muatannya yang berlawanan, maka kedua muatan ini akan saling tarik menarik, dan muatan positif bergerak ke arah step-leader, dan disebut petir penghubung (connecting leader). (Dhen, 2014).



Gambar 1. Mekanisme sambaran negative (awan ke

tanah) (Dhen, 2014)

**Karakteristik petir tropis**

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

Karakteristik Petir		Polaritas Negatif	Polaritas Positif
Arus Puncak	Maksimum	335 kA	392 kA
	Probabilitas 50%	40 kA	18 kA
	Rata-rata	41 kA	30 kA
Kececuraman (di/dt)	Maksimum	119 kA/μs	120 kA/μs
	Probabilitas 50%	30 kA/ μs	20 kA/μs

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

**Distribusi Muatan Luas**

Saat petir menyambar Sistem Proteksi Petir (SPP) eksternal, maka arus petir yang mengalir pada down conductor akan menimbulkan kerapatan muatan luas ( $\rho_s$ ). Hal ini disebabkan karena adanya sifat efek mengulit pada arus berfrekuensi tinggi pada konduktor, yaitu arus cenderung mengalir pada kulit konduktor.

$$\rho_s = \frac{Q}{d.A} \text{ C/m}^2 \dots\dots\dots(1)$$

- Dengan:
- = Kerapatan muatan Luas (C/m<sup>2</sup>)
  - Q= muatan listrik petir (Coloumb)
  - d= diameter penampang (m)

Apabila ditinjau dari jarak yang relatif jauh (skala meter), maka kerapatan muatan luas ( ) disederhanakan menjadi kerapatan 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. (Hayt Jr., 2006).

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

Dengan:

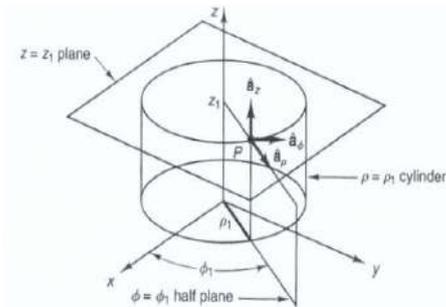
$\rho_L$  = Kerapatan muatan garis (C/m)

Q = muatan listrik petir (Coloumb)

L = Panjang muatan garis (m).

**Medan listrik oleh Sebuah Muatan Garis**

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)

Medan parsial di P, yang disebabkan oleh keberadaan elemen muatan atau muatan parsial  $dE = dE_r ar + dE_z az$ , didapatkan (Hayt, 2006):

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

menghasilkan,

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

Keterangan:

$\rho_L$  = Kerapatan muatan garis (C/m)

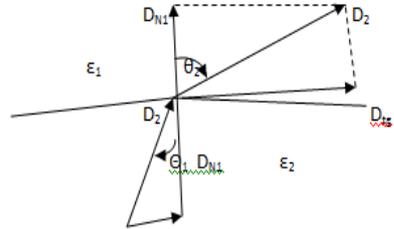
$\epsilon_u$  = Permittivitas udara (F/m)

r = Jarak (m)

**Kondisi Batas Dielektrikum Ideal**

Kondisi-kondisi pada permukaan sebuah konduktor, dimana medan-medan tangensial adalah nol. Dengan menjabarkan kondisi-

kondisi bidang perbatasan antara dua buah dielektrikum, atau antara sebuah dielektrikum dan sebuah konduktor. (Hayt, 2006).



Gambar 3. Refraksi kerapatan fluks listrik pada bidang batas sebuah dielektrikum (Hayt, 2006)

Suatu gangguan pada keseimbangan muatan total didalam dielektrikum yang mengakibatkan muatan di permukaan ini tidak lagi nol. Kecuali mengangsumsikan bahwa  $\rho_s$  bernilai nol pada permukaan bidang batas. (Hyat. 2006).

$$D_a = D_t \dots\dots\dots(5)$$

Komponen normal kerapatan fluks listrik (D) bersifat kontinu. Maka persmaan menjadi:

$$\epsilon_a E_a = \epsilon_t E_t \dots\dots\dots(6)$$

Dengan:

$E_a$  = Medan listrik dipermukaan air (V/m)

$E_t$  = Medan listrik dipermukaan tanah (V/m)

$\epsilon_t$  = Permittivitas tanah (F/m)

$\epsilon_a$  = Permittivitas air (F/m)

$D$  = Kerapatan fluks listrik daerah 1 (C/m<sup>2</sup>)

$D_a$  = Kerapatan fluks listrik daerah 2 (C/m<sup>2</sup>)

**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. (Hayt Jr., 2006).

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

Dengan nilai  $|r - r'| = \sqrt{r^2 + z^2}$  untuk distribusi muatan garis, maka Pers.(6) menjadi:

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

**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 jejaringnya menuju nol. Dimana arus *I* tersebut mengalir pada filamen yang panjang vektor *differensial* **dL**.

$$dH_2 = \frac{I dz' a_z \times (r a_r - z' a_z)}{4\pi (r^2 + z'^2)^{3/2}} \text{ [A/m]} \dots\dots\dots(9)$$

Menghasilkan:

$$H_2 = \frac{1}{4\pi} \int \frac{r dz' a_\theta}{(r^2 + z'^2)^{3/2}} \text{ [A/m]} \dots\dots\dots(10)$$

**Mekanisme Induksi Medan Magnetik Kapasitansi**

Arus petir mengalir dalam suatu penghantar akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet akan berhubungan dengan penghantar lainnya sehingga menyebabkan terjadinya loop tegangan dengan nilai tegangan yang cukup tinggi. (Hyat Jr., 2006).

$$V_{Ind} = \frac{\frac{dl}{dt} \times h \times \mu_0 \times I_m \left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} \dots\dots\dots(11)$$

Persamaan diatas dapat ditulis sebagai:

$$V_{Ind-L} = L_M \times \frac{dl}{dt} \text{ [V]} \dots\dots\dots(12)$$

dengan :

*L<sub>M</sub>* = Mutual induktansi [Henry]

*dl/dt* = kecuraman arus petir [kA/μs].

**Kapasitansi**

Dua buah konduktor yang berada di dalam sebuah ruang yang dipenuhi oleh suatu bahan dielektrum bukan ruang hampa. Konduktor *M<sub>2</sub>* membawa muatan positif total sebesar *Q*, dan konduktor *M<sub>1</sub>* membawa muatan negatif yang setara, tidak ada muatan lainnya di dalam ruangan tersebut, dan nilai muatan total yang dikandung sistem adalah nol.(Hayt, 2006).

$$V_0 = \int_{atas}^{bawah} E \cdot dL = - \int_d^0 E \cdot dz = E \cdot d \dots\dots\dots(13)$$

Dengan :

*E* = Medan listrik (V/m)

*D* = jarak (m).

**Mekanisme Kopling Galvanik**

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).

$$U = \frac{\rho \times I_p}{2\pi \times D} \text{ [V]} \dots\dots\dots(14)$$

Dengan:

*ρ* = resistivitas tanah (Ohm.m)

*I<sub>p</sub>* = Arus puncak petir (A)

*D* = *r* = jarak antara *grounding* objek dengan *grounding* pusat sambaran petir (m)

*I<sub>p</sub>* = Arus puncak petir (kA).

Sehingga tegangan induksi akibat kopling Galvanik adalah:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \text{ [V]} \dots\dots\dots(15)$$

Dengan:

*U<sub>1</sub>* = Tegangan pada *grounding* objek yang di amati.

*U<sub>2</sub>* = Tegangan pada terminal netral yang dekat dengan objek yang diamati.

**Potensial Listrik Antara Dua Titik**

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 (Hayt Jr., 2006).

$$V_{AB} = - \int_B^A E \cdot dl \text{ [V]} \dots\dots\dots(16)$$

Dengan:

*V<sub>AB</sub>* = Tegangan potensial titik A ke titik B (V)

*E* = Medan Listrik (V/m)

Selanjutnya secara umum beda potensial diantara dua buah titik dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta V = V_2 - V_1 \text{ [V]} \dots\dots\dots(17)$$

Dengan:

*V<sub>1</sub>* = Tegangan pada titik A (V)

*V<sub>2</sub>* = Tegangan pada titik B (V)

**Kerapata Arus Konduksi dan Kerapatan Arus Perpindahan**

Arus yang mengalir suatu luasan material akan menimbulkan kerapatan arus ( $J$ ) A/m<sup>2</sup>. Elektroda pengetanahan (*grounding*) yang terinjeksi arus petir, maka arus di dalam tanah akan mengalir secara konduksi ( $I_C$ ) maupun secara perpindahan ( $I_D$ ). Karena tanah adalah bahan dielektrik, maka rapat arus total dalam tanah adalah (schaum, 1993):

$$I_t = I_C + I_D \dots \dots \dots (18)$$

Dengan :

$$I_t = \iint J_C \cdot dS + \iint J_D \cdot dS \dots \dots \dots (19)$$

Karena  $J_C = \sigma E$ ;  $J_D = \frac{\partial \rho}{\partial t}$ ;  $D = \epsilon E$ ; dan  $\omega = 2\pi f$  maka :

$$I_t = \iint \sigma_t E dS + J \omega \epsilon_t E \iint dS \dots \dots \dots (20)$$

Keterangan :

- $\sigma_t$  = Konduktivitas tanah (S/m)
- $\epsilon_t$  = Permittivitas tanah (F/m)
- $I_C$  = Arus konduksi (A)
- $I_D$  = Arua perpindahan (A)

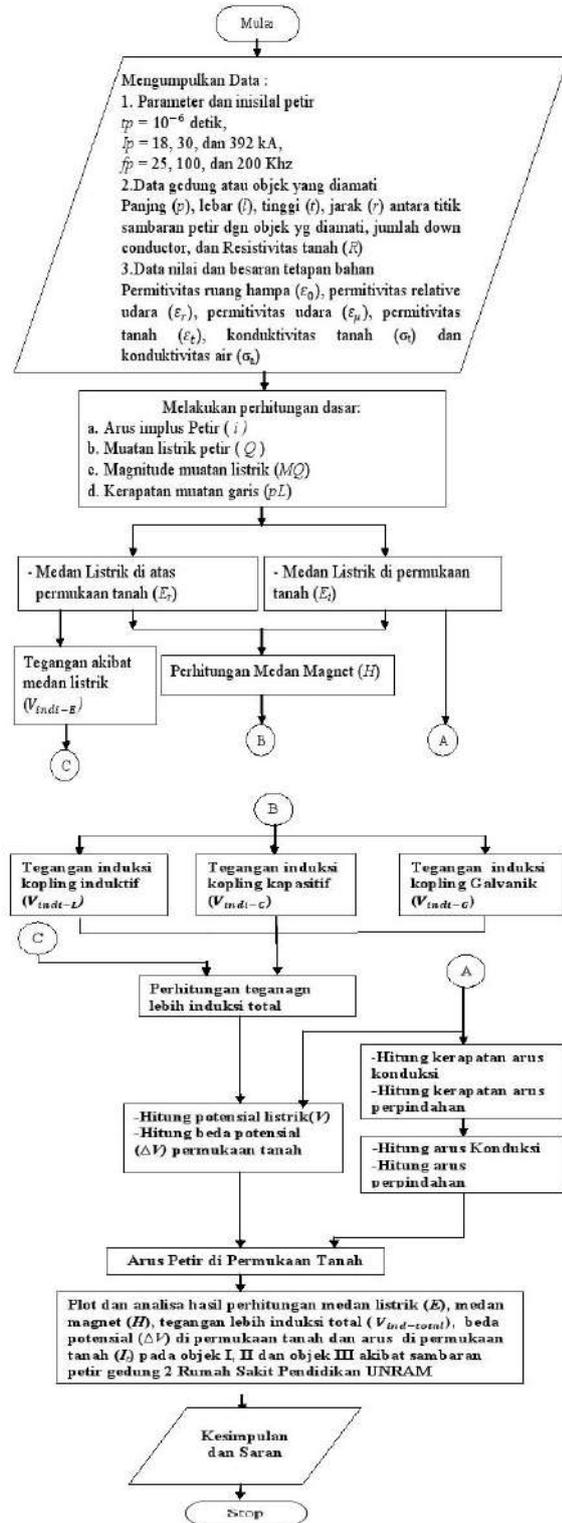
**METODOLOGI PENELITIAN**

penelitian ini menggunakan metode perhitungan dalam menentukan besarnya medan listrik atas permukaan ( $E_t$ ), di permukaan tanah ( $E_u$ ), medan magnet ( $H$ ) dan tegangan induksi total ( $V_{ind-total}$ ), serta besarnya beda potensial ( $\Delta V$ ) dan arus di permukaan tanah ( $I_t$ ) pada gedung 2 Rumah Sakit UNRAM (sebagai objek yang tersambar langsung) dan objek yang menerima sambaran petir tidak langsung yaitu gedung 1 dan gedung 3 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM dan gedung Rektorat UNRAM.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

perhitungan parameter medan listrik di atas permukaan tanah ( $E_u$ ), di permukaan tanah ( $E_t$ ), medan magnet ( $H$ ), tegangan induksi total ( $V_{ind-tot}$ ), beda potensial ( $\Delta V$ ) dan arus di permukaan tanah ( $I_t$ ) yang terjadi di sekitar titik sambaran, yaitu akibat sambaran petir tidak langsung pada gedung 1 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM (objek I), gedung 3. Rumah Sakit Pendidikan UNRAM (objek II) dan gedung Rektorat UNRAM (objek III), ketika gedung 2 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM tersambar petir secara langsung. Perhitungan ini mensimulasikan arus puncak

**Diagram Alir Penelitian**



Gambar 4. Diagram Alir Analisis Perhitungan  $E$ ,  $H$ ,  $V$ ,  $\Delta V$ , dan  $I_t$  Akibat Sambaran Petir Pada Gedung 2 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM

petir ( $I_p$ ) daerah tropis yaitu 18, 30, dan 392 kA dan frekuensi arus petir ( $f_p$ ) yaitu 25, 100, dan 200 khz.

**Perhitungan Intensitas Medan Listrik Atas permukaan ( $E_u$ ) dan Medan Listrik di Permukaan Tanah ( $E_t$ ) Pada Objek I, II dan III**

Dengan Injeksi arus petir polaritas positif probabilitas 50% sesuai dengan *Data Zorro* yaitu  $I_p = 18$  kA, frekuensi arus petir  $f_p = 200$  kHz, dengan satu (1) down conductor yang terpasang pada finial elektrostatis, maka muatan petir (Q) yang didapat adalah  $0,016831 < 35,98^\circ$ . Panjang Down conductor (L) pada gedung adalah 32,9 m, sehingga kerapatan muatan petir pada down conductor adalah  $0,000513252$  C/m. Kerapatan muatan petir akan menimbulkan medan listrik atas permukaan ( $E_u$ ) dan di permukaan tanah ( $E_t$ ). Menganalisa  $E_u$  dan  $E_t$  dengan menggunakan koordinat tabung, dengan objek yang diamati berada pada sumbu r sehingga  $E_u$  dan  $E_t$  yang timbul hanya pada sumbu r. Hasil perhitungan medan listrik atas permukaan ( $E_u$ ) dan di permukaan tanah ( $E_t$ ), objek I, II dan III masing-masing berjarak 48 m, 50 m dan 192 m dibandingkan dengan standar IRPA dan ICNIRP

Tabel 2. Hasil perhitungan medan listrik atas permukaan ( $E_u$ ) dan di permukaan tanah ( $E_t$ )

Gedung yang diamati	Jarak dari Gd. 2 RS Pendidikan UNRAM (r) [m]	Medan Listrik Di Atas Permukaan ( $E_u$ ) [kV/m]	Medan Listrik Di Permukaan ( $E_t$ ) [kV/m]	Standar minimal IRPA dan ICNIRP [kV]
Objek I	48	54,38023	19,43122	10
Objek II	50	50,75681	18,13649	
Zona daratan-sungai	39	76,12036	76,37182	5
Zona Sungai	44	66,91285	68,58289	
Zona sungai-daratan	48	54,38023	19,43122	
Zona darat (objek III)	192	4,06130	1,45119	

Berdasarkan perhitungan di atas dengan arus puncak petir ( $I_p$ ) = 18.000 A dan frekuensi arus petir maksimum ( $f$ ) = 200 kHz, intensitas medan listrik di atas permukaan ( $E_u$ ) dan di permukaan tanah ( $E_t$ ) didapatkan yaitu masih melebihi batas yang diizinkan oleh *International Radiation Protection Association (IRPA)* dan *International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP)* yaitu 10 kV.

**Perhitungan Intensitas Medan Magnet (H) pada objek I, II dan III**

Dengan Injeksi arus petir polaritas positif probabilitas 50% sesuai dengan *Data Zorro* yaitu  $I_p = 18$  kA, frekuensi arus petir  $f_p = 200$  kHz, Panjang Down conductor (L) pada gedung adalah 32,9 m, sehingga kerapatan muatan petir pada down conductor adalah

$0,000513252$  C/m. sehingga didapatkan nilai Medan Magnet (H) pada objek I, II dan III masing-masing berjarak 48 m, 50 m dan 192 m, kemudian dibandingkan dengan standar ICNIRP.

Tabel 3. Hasil perhitungan medan magnet (H)

Gd. yang diamati	Jarak dari Gd. 2 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM (r) [m]	Medan Magnet (H) [A/m]	
		Hitung	Standar minimum ICNIRP
Objek I	48	16,871	800
Objek II	50	15,747	
Objek III	192	1,260	160

**Perhitungan Tegangan Induksi (V<sub>ind</sub>) Pada Objek I, II dan III**

Dengan injeksi arus petir polaritas positif probabilitas 50% sesuai dengan *Data Zorro* yaitu  $I_p = 18$  kA, frekuensi arus petir  $f_p = 200$  kHz. Berdasarkan data konstanta permitivitas udara ( $\epsilon_u$ ) adalah  $1,0005 \times 10^{-9} \times (1/36\pi)$ . Hasil perhitungan kerapatan muatan garis  $0,000513252$  C/m, maka di dapatkan nilai tegangan induksi akibat medan listrik ( $V_{ind-E}$ ). Tinggi gedung pada objek I, II dan objek II masing-masing yaitu 32,9 m, 32,4 m dan 26 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) yaitu  $20$  kA/ $\mu$ s maka menimbulkan tegangan induksi akibat kopling induktif ( $V_{ind-L}$ ), injeksi arus di permukaan tanah akibat petir menyambar finial elektrostatis pada gedung 2 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM, sehingga menyebabkan kenaikan tegangan pada grounding gedung, akan mempengaruhi grounding pada gedung atau sistem distribusi sekitar titik sambaran petir. Resistansi tanah pada gedung yang diamati yaitu  $5,8 \Omega$  dengan nilai resistivitas  $200 \Omega \cdot m$  (jenis tanah pasir basah). 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 diizinkan oleh *International Electrotechnical Commission (IEC)*.

Berdasarkan perhitungan di atas dengan arus puncak petir ( $I_p$ ) = 18.000 A dan frekuensi arus petir maksimum ( $f$ ) = 200 kHz,

tegangan induksi total yang di terima pada objek I, II dan III yaitu 110,467 kV, 89,047 kV dan 36,342 kV. Semakin jauh jarak ( $r$ ) dari pusat sambaran, maka semakin kecil tegangan induksi total ( $V_{ind-tot}$ ) yang rasakan karena tegangan induksi berbanding terbalik dengan jarak. Besaran tersebut masih melebihi standar yang diizinkan oleh IEC.

Tabel 4. Hasil perhitungan tegangan induksi ( $V_{ind}$ )

Gd. yang diamati	Jarak ( $r$ ) dari gd. 2 Rs Pendidikan UNRAM [m]	Teg. Induksi Akibat E (Vind-E) [V]	Tegangan Induksi ( $V_{ind}$ ) Akibat Kopling [V]			Teg. Lebih Induksi ( $V_{ind-total}$ ) [kV]	Standar IEC [kV]
			Kopling Induktif ( $V_{ind-i}$ ) [V]	Kopling Kapasitif ( $V_{ind-c}$ ) [V]	Kopling Galvani ( $V_{ind-g}$ ) [V]		
Objek I	48	463,805	105.494,2	$2,3079 \times 10^{-3}$	4.509,07	110,467	6
Objek II	50	431,936	84.541,34	$2,2199 \times 10^{-3}$	4.074,09	89,047	6
Objek III	192	33,4302	36.028,66	$5,4781 \times 10^{-4}$	279,49	36,342	6

**Beda Potensial di antara Dua Titik (Tegangan Langkah) pada Objek I, II dan III**

Dengan injeksi arus petir polaritas positif probabilitas 50% sesuai dengan Data Zorro yaitu  $I_p = 18$  kA, frekuensi arus petir  $f_p = 200$  kHz. Nilai beda potensial diantara dua titik dipengaruhi oleh kaki seseorang berjalan di permukaan tanah pada jarak 1 meter. Nilai beda potensial didapat dibandingkan dengan standar IEEE std 80-2000.

Tabel 5. Hasil perhitungan tegangan langkah ( $\Delta V$ )

Gd. Yang diamati	Jarak ( $r$ ) dari gd. 2 RS UNRAM [m]	Tegangan langkah ( $\Delta V$ ) [V]	Standar minimum IEEE std 80-2000 [V]
Objek I	48	13.363,19	7.000
Objek II	50	12.795,73	
Zona daratan-sungai	39	-189.866,17	
Zona sungai	44	40.747,9	
Zona sungai-daratan	48	171.627,77	
Zona daratan (objek III)	192	1.417,63	

Berdasarkan Tabel 5, dengan arus puncak petir ( $I_p$ ) = 18.000 A dan frekuensi petir maksimum ( $f$ ) = 200 kHz, tegangan langkah ( $\Delta V$ ) yang di terima pada objek I dan objek II yaitu 13.363,19 dan 12.795,73V. Sedangkan pada objek III didapat nilai tegangan langkah ( $\Delta V$ ) pada zona daratan-sungai menjadi minus dan zona sungai-daratan menjadi lebih besar, karena potensial listrik (V) di pengaruhi oleh permitivitas tanah ( $\epsilon_t$ ) dan permitivitas air ( $\epsilon_a$ ) yang berada pada kondisi batas dielektrikum. Sedangkan pada objek III zona daratan

sungai dan zona daratan masih di bawah standar yang diizinkan oleh IEEE std 80-2000 yang dapat dirasakan manusia pada saat terjadi gangguan selama 0,1 detik.

**Arus Di Permukaan Tanah ( $I_t$ )**

Dengan injeksi arus petir polaritas positif probabilitas 50% sesuai dengan Data Zorro yaitu  $I_p = 18$  kA, frekuensi arus petir  $f_p = 200$  kHz.

Tabel 6. Hasil perhitungan arus permukaan tanah ( $I_t$ )

Gd. yang diamati	Jarak ( $r$ ) dari gd. 2 R.S Pendidikan UNRAM [m]	Arus permukaan tanah ( $I_t$ ) [A]	Standar IEEE std 80-2000 [mA]
Objek I	48	0,32	1,6 - 6
Objek II	50	0,31	
Zona daratan-sungai	39	1,039	
Zona sungai	44	0,96	
Zona sungai-daratan	48	0,32	
Zona daratan (objek III)	192	0,097	

Berdasarkan perhitungan di atas arus permukaan tanah ( $I_t$ ) yang di terima pada objek I dan objek II yaitu 0,32 A dan 0,31 A. Sedangkan pada objek III didapatkan arus permukaan tanah ( $I_t$ ) pada zona daratan-sungai, zona sungai, zona sungai-daratan dan zona daratan yaitu 1,039 A, 0,96 A, 0,32 A dan 0,097 A. Nilai arus permukaan tanah ( $I_t$ ) dipengaruhi dua bahan konduktivitas tanah ( $\sigma_t$ ) dan konduktivitas air ( $\sigma_a$ ). Besaran-besaran tersebut masih melebihi standar IEEE std 80-2000 yaitu yang dapat dirasakan manusia.

**Nilai Arus Puncak Petir ( $I_p$ ) Pada Frekuensi Arus Petir ( $f_p$ ) Yang Berbeda, untuk Nilai Medan Listrik  $E_u$  dan  $E_t$  pada Objek I, II dan III**

Dengan data penelitian karakteristik petir daerah tropis oleh Zorro R. yaitu  $I_p$  max polaritas positif = 392, 30, dan 18 kA. Variasi frekuensi arus petir  $f_p = 25, 100, \text{ dan } 200$  kHz, didapatkan hasil didapat, dibandingkan dengan standar IRPA dan ICNIRP.

Tabel 7a. Nilai medan listrik atas permukaan ( $E_u$ ) dan di permukaan tanah ( $E_t$ ) pada objek I

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Medan Listrik atas Permukaan ( $V/m$ )		Medan Listrik Permukaan ( $V/m$ )	
		Hitung	Standar IRPA dan ICNIRP	Hitung	Standar IRPA dan ICNIRP
392	25	126.111,3	10.000	45.062,260	10.000
	100	124.174,7		44.370,270	
	200	118.097,1		42.198,630	
30	25	96.513,73	10.000	34.486,42	10.000
	100	95.031,63		33.956,84	
	200	90.380,45		32.294,87	
18	25	57.908,24	10.000	20.691,85	10.000
	100	57.018,98		20.374,10	
	200	54.228,27		19.376,92	

Tabel 7b. Nilai medan listrik atas permukaan ( $E_u$ ) dan di permukaan tanah ( $E_t$ ) pada objek II

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Medan Listrik atas permukaan (V/m)		Medan Listrik permukaan (V/m)	
		Hitung	Standar IRPA dan ICNIRP	Hitung	Standar IRPA dan ICNIRP
392	25	117.708,30	10.000	42.059,710	10.000
	100	115.900,80		41.413,830	
	200	110.228,20		39.386,890	
30	25	90.082,92	10.000	32.188,56	10.000
	100	88.699,57		31.694,26	
	200	84.358,30		30.143,03	
18	25	54.049,75	10.000	19.313,13	10.000
	100	53.219,74		19.016,55	
	200	50.614,98		18.085,82	

Tabel 7c. Nilai medan listrik atas permukaan ( $E_u$ ) dan di permukaan tanah ( $E_t$ ) pada objek III

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Medan Listrik atas permukaan (V/m)		Medan Listrik permukaan (V/m)	
		Hitung	Standar IRPA dan ICNIRP	Hitung	Standar IRPA dan ICNIRP
392	25	94.184,26	5.000	33.654,05	5.000
	100	92.737,93		33.137,25	
	200	88.199,01		31515,40	
30	25	7.207,98	5.000	2.575,57	5.000
	100	7.097,29		2.536,01	
	200	6.749,92		2.411,89	
18	25	4.324,79	5.000	1.545,34	5.000
	100	4.258,37		1.521,61	
	200	4.049,96		1.447,14	

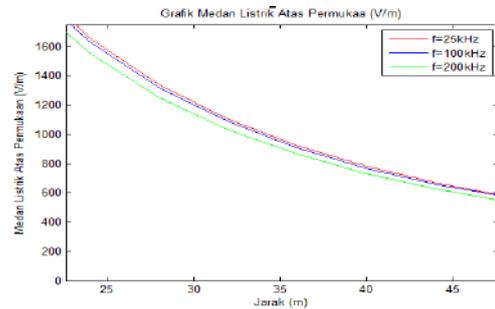
Berdasarkan Tabel 7a, 7b, dan 7c, nilai medan listrik atas permukaan ( $E_u$ ) dan di permukaan tanah ( $E_t$ ) yang dihasilkan pada objek I, II masih melebihi dengan arus petir ( $I_p$ ) = 30 dan 18 kA masih di bawah standar yang diizinkan oleh *International Radiation Protection Association (IRPA)* dan *International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP)*.

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

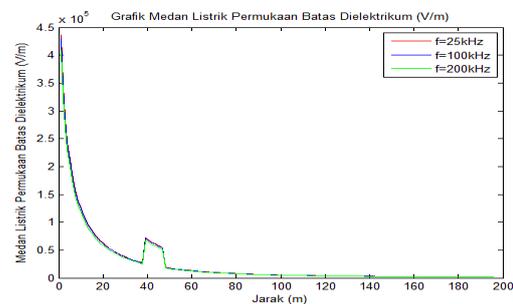
Pengaruh jarak ( $r$ ) dan frekuensi arus petir ( $f$ ) dengan injeksi arus puncak petir  $I_p= 18$  kA terhadap medan listrik di atas permukaan ( $E_u$ ) dan di permukaan tanah ( $E_t$ ), dapat diplot sebagai berikut:

Pada Gambar 5, dengan injeksi arus petir  $I_p = 18$  kA dan variasi frekuensi arus petir yaitu  $f_p = 25, 100, 200$  kHz maka nilai medan listrik di atas permukaan ( $E_u$ ) yang dihasilkan, akan cenderung menurun meskipun dampaknya sangat kecil. Nilai medan listrik di atas permukaan ( $E_u$ ) semakin menurun bila

jarak ( $r$ ) yang diamati semakin jauh dari titik sambaran petir.



Gambar 5. Pengaruh frekuensi ( $f$ ) terhadap ( $E_u$ ) dengan  $I_p = 18$  kA pada jarak (4 - 200 m)



Gambar 6. Pengaruh frekuensi ( $f$ ) terhadap ( $E_t$ ) dengan  $I_p = 18$  kA pada jarak (4 - 200 m)

Pada Gambar 6, dengan injeksi arus petir  $I_p = 18$  kA dan variasi frekuensi arus petir yaitu  $f_p = 25, 100, 200$  kHz maka nilai medan listrik di permukaan ( $E_t$ ) pada zona daratan-sungai dan zona sungai-daratan yang dihasilkan naik pada jarak 39 m dan 48 m, karena pada jarak ( $r$ ) tersebut di batasi oleh sungai dengan permitivitas air lebih kecil dari pada permitivitas tanah.

### Nilai Arus Puncak Petir ( $I_p$ ) Pada Frekuensi Arus Petir ( $f_p$ ) Yang Berbeda, untuk Nilai Medan Magnet ( $H$ ) pada Objek I, II dan III

Dengan data karakteristik petir daerah tropis oleh Zorro R. yaitu  $I_p$  max polaritas positif = 392 kA,  $I_p$  probability 50% polaritas positif = 18 kA dan  $I_p$  rata-rata polaritas positif = 30 kA. Variasi frekuensi arus petir  $f_p = 25, 100,$  dan 200 kHz, didapatkan, dibandingkan dengan standar *International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP)*.

Berdasarkan Tabel 8a, 8b, dan 8c, pada injeksi arus petir  $I_p = 392, 30,$  dan 18 kA dan frekuensi arus petir 25, 100 dan 200 kHz. Nilai medan magnet ( $H$ ) yang dihasilkan pada objek I, II dan objek III, sesuai dengan standar *International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP)* yaitu 800 A/m untuk standar medan listrik 10 kV/m dan 160 A/m untuk standar medan listrik 5 kV/m.

Dampak medan magnet bagi mahluk hidup bila melebihi ambang batas, menurut Malmivuo dalam buku *Bioelectromagnetik* (1995) menyatakan metabolisme mahluk hidup seperti sistem kerja dan pembelahan sel, aliran darah, detak jantung, sistem kerja syaraf, sistem kerja otot, bekerja berdasarkan vektor.

Tabel 8a. Nilai medan magnet ( $H$ ) pada objek I

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Medan Magnet (A/m)	
		Hitung	Standar ICNIRP
392	25	367,4186	800
	100	367,4186	
	200	367,4186	
30	25	28,11877	800
	100	28,11877	
	200	28,11877	
18	25	16,87126	160
	100	16,87126	
	200	16,87126	

Tabel 8b. Nilai medan magnet ( $H$ ) pada objek II

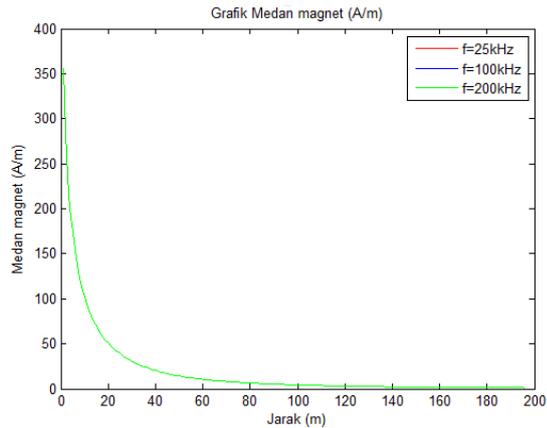
$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Medan Magnet (A/m)	
		Hitung	Standar ICNIRP
392	25	342,9371	800
	100	342,9371	
	200	342,9371	
30	25	26,24519	800
	100	26,24519	
	200	26,24519	
18	25	15,74711	160
	100	15,74711	
	200	15,74711	

Tabel 8c. Nilai medan magnet ( $H$ ) pada objek III

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Medan Magnet (A/m)	
		Hitung	Standar ICNIRP
392	25	27,44009	800
	100	27,44009	
	200	27,44009	
30	25	2,100007	800
	100	2,100007	
	200	2,100007	
18	25	1,260004	160
	100	1,260004	
	200	1,260004	

Pengaruh jarak ( $r$ ) dan frekuensi arus petir ( $f$ ) dengan injeksi arus puncak petir  $I_p = 18$  kA terhadap medan magnet, dapat diplot sebagai berikut:

Pada Gambar 7, medan magnet ( $H$ ), tidak di pengaruhi oleh variasi frekuensi arus petir ( $f$ ) yang semakin besar. Semakin jauh jarak objek dari titik sambaran petir maka kuat medan magnet akan semakin kecil, karena medan magnet berbanding terbalik dengan jarak.



Gambar 7. Pengaruh frekuensi ( $f$ ) terhadap medan magnet ( $H$ ) dengan  $I_p = 18$  kA pada jarak (4 - 200 m)

**Nilai Tegangan Induksi ( $V_{ind}$ ) pada Nilai  $I_p$  dan  $f_p$  yang berbeda Pada Objek I, II dan III**

Dengan injeksi arus petir sesuai data penelitian karakteristik petir daerah tropis oleh Zorro R. yaitu  $I_p$  max polaritas positif = 392 kA,  $I_p$  probality 50% polaritas positif = 18 kA dan  $I_p$  rata-rata polaritas positif = 30 kA. Variasi frekuensi arus petir  $f_p = 25, 100,$  dan 200 kHz, didapatkan, dibandingkan dengan standar *International Electrotechnical Commision (IEC)*.

Pada Tabel 9a, 9b dan 9c, nilai tegangan induksi total diakibatkan oleh medan listrik, kopling induktif, kopling kapasitif dan kopling galvanik dengan injeksi arus petir  $I_p = 392, 30,$  dan 18 kA dan frekuensi arus petir  $f_p = 25, 100,$  dan 200 kHz, tegangan induksi yang dihasilkan pada objek I, II dan III akan semakin semakin kecil seiring dengan semakin jauh jarak objek yang diamati, maka nilai yang dihasilkan semakin kecil yang diterima oleh peralatan listrik. Nilai dihasilkan masih diatas ambang batas yang ditetapkan oleh IEC 61000-4-5 dan standar IEC 60664-1.

Tabel 9a. Nilai tegangan induksi ( $V_{ind}$ ) pada objek I

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Tegangan induksi ( $V_{ind}$ ) [V]				Tegangan Induksi total ( $V_{ind-total}$ ) [V]	
		$V_{ind-E}$	$V_{ind-L}$	$V_{ind-C}$	$V_{ind-G}$	Hitung	Standar IEC
392	25	10.804,3	105.494,22	0,00053523	9.8197,9	300.007,952	6.000
	100	10.638,4		0,00052701		299.842,042	
	200	10.117,7		0,00050122		299.321,362	
30	25	826,8621	105.494,22	$4,096 \times 10^{-5}$	7.515,14	120.049,730	6.000
	100	814,1645		$4,033 \times 10^{-5}$		131.622,630	
	200	774,3165		$3,835 \times 10^{-5}$		120.327,930	
18	25	496,1173	105.494,2	$2,457 \times 10^{-5}$	4.509,08	111.021,820	6.000
	100	488,4987		$2,419 \times 10^{-5}$		111.014,725	
	200	464,5899		$2,301 \times 10^{-5}$		110.992,459	

Tabel 9b. Nilai tegangan induksi ( $V_{ind}$ ) pada objek II

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Tegangan induksi ( $V_{ind}$ ) [V]				Tegangan Induksi total ( $V_{ind-total}$ ) [V]	
		$V_{ind-E}$	$V_{ind-L}$	$V_{ind-C}$	$V_{ind-G}$	Hitung	Standar IEC
392	25	10.061,9	84.541,344	0,00051482	88.724,7	268.839,484	6.000
	100	99.07,42		0,00050692		268.684,969	
	200	94.22,52		0,00048211		268.200,065	
30	25	770,0464	84.541,344	$3.94 \times 10^{-3}$	6.790,15	98.645,792	6.000
	100	758,2213		$3.87 \times 10^{-3}$		98.633,967	
	200	721,1113		$3.68 \times 10^{-3}$		98.596,857	
18	25	496,1173	84.541,344	$2.36 \times 10^{-3}$	4.074,08	93.004,010	6.000
	100	488,4987		$2.37 \times 10^{-3}$		92.996,915	
	200	464,5899		$2.21 \times 10^{-3}$		92.974,649	

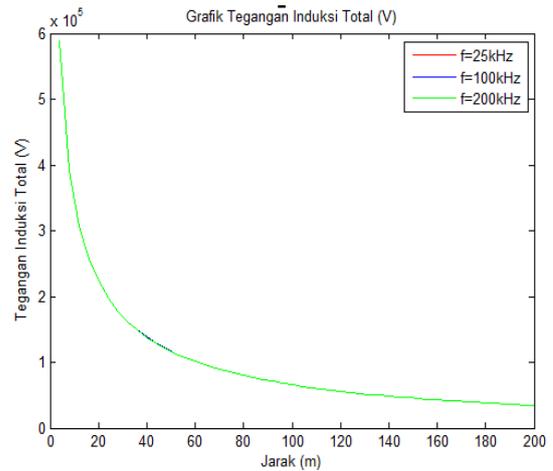
Tabel 9c. Nilai tegangan induksi ( $V_{ind}$ ) pada objek III

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Tegangan induksi ( $V_{ind}$ ) [V]				Tegangan Induksi total ( $V_{ind-total}$ ) [V]	
		$V_{ind-E}$	$V_{ind-L}$	$V_{ind-C}$	$V_{ind-G}$	Hitung	Standar IEC
392	25	777,440	38.380,786	0,0001270	6.086,7	45.244,987	6.000
	100	765,502		0,0001250		45.233,048	
	200	728,035		0,0001189		45.195,582	
30	25	59,498	38.380,786	$9,722 \times 10^{-6}$	465,823	38.906,107	6.000
	100	58,584		$9,57 \times 10^{-6}$		38.905,193	
	200	55,717		$9,10 \times 10^{-6}$		38.902,326	
18	25	35,698	38.380,786	$5,83 \times 10^{-6}$	279,494	38.695,979	6.000
	100	35,150		$5,74 \times 10^{-6}$		38.695,430	
	200	33,430		$5,46 \times 10^{-6}$		38.693,710	

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, untuk mahluk hidup disekitar titik sambaran petir berbahaya karena akan menyebabkan tegangan kejut, tegangan langkah dan tegangan sentuh.

Pengaruh jarak ( $r$ ) dan frekuensi arus petir ( $f$ ) dengan injeksi arus puncak petir  $I_p = 18$  kA terhadap tegangan induksi, dapat diplot sebagai berikut:

pada Gambar 8, dengan injeksi arus petir  $I_p = 18$  kA dan variasi frekuensi yang semakin besar, yaitu  $f = 25, 100$  dan  $200$  kHz, maka tegangan induksi total ( $V_{ind-total}$ ) yang dihasilkan pada objek I, II dan III, akan cenderung menurun meskipun dampaknya sangat kecil. Pengaruh frekuensi petir pada nilai tegangan induksi sangat kecil, sehingga nilai perbandingan yang dihasilkan tidak terlihat.



Gambar 8. Pengaruh frekuensi ( $f$ ) terhadap tegangan induksi ( $V_{ind}$ ) dengan  $I_p = 18$  kA, pada jarak (4 – 200 m)

**Nilai Tegangan Langkah ( $\Delta V$ ) pada Nilai  $I_p$  dan  $f_p$  yang berbeda untuk Objek I, II dan III**

Dengan injeksi arus petir yaitu  $I_p = 392, 30$ , dan  $18$  kA. Variasi frekuensi arus petir  $f_p = 25, 100$ , dan  $200$  kHz, didapatkan hasil, dibandingkan dengan standar *IEEE std 80-2000*.

Tabel 10a. Nilai tegangan langkah ( $\Delta V$ ) pada objek I

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Tegangan Langkah (V)	
		Hitung	Standar <i>IEEE std 80-2000</i>
392	25	309.940	7.000
	100	305.170	
	200	290.240	
30	25	23.720	7.000
	100	23.355	
	200	22.212	
18	25	14.232	7.000
	100	14.013	
	200	13.327	

Tabel 10b. Nilai tegangan langkah ( $\Delta V$ ) pada objek II

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Tegangan Langkah (V)	
		Hitung	Standar <i>IEEE std 80-2000</i>
392	25	296.740	7.000
	100	292.190	
	200	277.880	
30	25	22.710	7.000
	100	22.361	
	200	21.267	
18	25	13.626	7.000
	100	13.416,8	
	200	12.760,1	

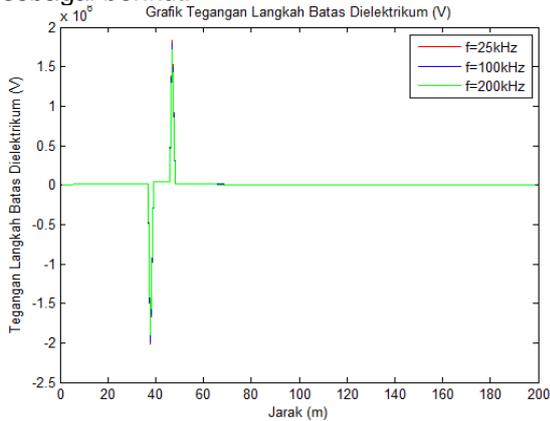
Tabel 10c. Nilai tegangan langkah ( $\Delta V$ ) pada objek III

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Tegangan Langkah (V)	
		Hitung	Standar IEEE std 80-2000
392	25	32.858	7.000
	100	32.353	
	200	30.770	
30	25	2.514,70	7.000
	100	2.476	
	200	2.354,80	
18	25	1.508,80	7.000
	100	1.485,60	
	200	1.412,90	

Berdasarkan Tabel 10a, 10b dan 10c, dengan injeksi arus petir  $I_p = 392, 30, 18$  kA dan frekuensi arus petir  $f_p = 25, 100, 200$  kHz Semakin kecil injeksi arus petir dengan frekuensi petir semakin besar, maka tegangan langkah yang dihasilkan semakin kecil. nilai tegangan langkah yang dihasilkan masih di atas standar yang diizinkan pada objek I dan II, sedangkan pada objek III dengan arus petir 30 dan 18 kA didapatkan masih di bawah ambang batas oleh IEEE std 80-2000.

Menurut Dr. dr.Anies dalam buku *Electrical Sensitivity* bahaya atau tidaknya tegangan langkah ditentukan oleh besarnya arus yang mengalir pada tubuh manusia yang melalui kedua kakinya melewati jantung pada saat kaki merentang dan terjadi tegangan langkah, atau mengalir melalui tangan menuju kaki pada saat menyentuh bangunan bertegangan.

Pengaruh jarak ( $r$ ) dan frekuensi arus petir ( $f$ ) dengan injeksi arus puncak petir  $I_p = 18$  kA terhadap tegangan langkah, dapat diplot sebagai berikut:



Gambar 9. Pengaruh frekuensi ( $f$ ) terhadap tegangan langkah ( $\Delta V$ ) dengan  $I_p = 18$  kA, pada jarak (4 – 200 m)

Gambar 9, nilai tegangan langkah ( $\Delta V$ ) menurun saat zona daratan-sungai dan naik saat zona sungai-daratan, karena pada objek III dibatasi oleh sungai. Sehingga nilai dari tegangan langkah ( $\Delta V$ ) akan mengalami

kondisi batas dielektrikum antara 2 buah dielektrikum yang berbeda.

**Nilai Arus Di Permukaan Tanah ( $I_t$ ) pada Nilai  $I_p$  dan  $f_p$  yang berbeda untuk Objek I, II dan III**

Dengan injeksi arus petir yaitu = 392, 30 dan 18 kA. Variasi frekuensi arus petir  $f_p = 25, 100,$  dan 200 kHz didapatkan, dibandingkan dengan standar IEEE std 80-2000.

Tabel 11a. Nilai arus di permukaan tanah ( $I_t$ ) pada objek I

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Arus Permukaan Tanah (A)	Standar IEEE std 80-2000 (mA)
392	25	0,944	1,6 - 6
	100	3,717	
	200	7,070	
30	25	0,072	1,6 - 6
	100	0,284	
	200	0,541	
18	25	0,043	1,6 - 6
	100	0,171	
	200	0,325	

Tabel 11b. Nilai arus di permukaan tanah ( $I_t$ ) pada objek II

$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Arus Permukaan Tanah (A)	Standar IEEE std 80-2000 (mA)
392	25	0,918	1,6 - 6
	100	3,614	
	200	6,874	
30	25	0,070	1,6 - 6
	100	0,277	
	200	0,526	
18	25	0,042	1,6 - 6
	100	0,166	
	200	0,316	

Tabel 11c. Nilai arus di permukaan tanah ( $I_t$ ) pada objek III

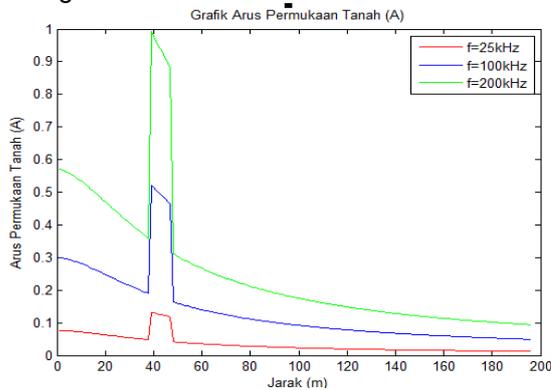
$I_p$ (kA)	$f_p$ (kHz)	Arus Permukaan Tanah (A)	Standar IEEE std 80-2000 (mA)
392	25	0,282	1,6 - 6
	100	1,110	
	200	2,112	
30	25	0,022	1,6 - 6
	100	0,085	
	200	0,162	
18	25	0,013	1,6 - 6
	100	0,051	
	200	0,097	

Berdasarkan Tabel 11a, 11b dan 11c, menghasilkan arus di permukaan tanah pada objek I, II dan objek III yaitu Semakin kecil injeksi arus petir dengan frekuensi petir semakin besar, maka semakin kecil nilai arus di permukaan tanah ( $I_t$ ) yang di rasakan oleh tubuh manusia. Arus permukaan tanah yang dihasilkan masih diatas ambang batas yang ditetapkan oleh IEEE std 80-2000

Dampak arus permukaan tanah pada manusia ialah kegagalan jantung, karena arus mengalir melalui kulit serta tahanan badan dan sebagian melalui jantung yang dapat menyebabkan henti jantung (*cardiac-arrest*).

Pengaruh jarak ( $r$ ) dan frekuensi arus petir ( $f$ ) dengan injeksi arus puncak petir  $I_p = 18$  kA

terhadap arus permukaan tanah, dapat diplot sebagai berikut:



Gambar 10. Pengaruh frekuensi ( $f$ ) terhadap arus permukaan tanah ( $I_t$ ) dengan  $I_p = 18$  kA, pada jarak (4 – 200 m)

Pada Gambar 10, dengan injeksi arus petir  $I_p = 18$  kA, dan variasi frekuensi arus petir yang semakin besar, yaitu  $f = 25, 100,$  dan  $200$  kHz, maka arus permukaan tanah ( $I_t$ ) yang dihasilkan semakin besar pula. Sedangkan bila jarak ( $r$ ) yang diamati semakin jauh dari titik sambaran petir, maka arus yang dihasilkan semakin kecil. Hal ini menyatakan bahwa arus permukaan tanah berbanding terbalik dengan jarak. Nilai arus permukaan tanah ( $I_t$ ) pada jarak 39 m (zona daratan-sungai) dan 48 m (zona sungai-daratan) lebih besar, karena arus permukaan tanah ( $I_t$ ) pada kondisi tersebut dipengaruhi oleh dua bahan dielektrikum yang berbeda yaitu konduktivitas tanah dan konduktivitas.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan Pembahasan yang telah dilakukan, maka didapatkan hasil pada objek I (gedung 1 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM), objek II (gedung 3 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM) dan objek III (gedung Rektorat UNRAM) sebagai berikut:

1. Nilai medan listrik di atas permukaan ( $E_u$ ) dan permukaan tanah ( $E_t$ ) yang didapatkan, dibandingkan dengan standar IRPA dan ICNIRP adalah:
  - a. Medan listrik di atas permukaan ( $E_u$ ) pada objek I dan II yaitu 54,38023; 50,75681, besaran tersebut masih melebihi standar minimal yang diizinkan yaitu 10 kV/m. Sedangkan pada objek III pada arus puncak petir ( $I_p$ ) = 18 kA didapatkan yaitu 4,06130 kV/m, besaran tersebut di bawah standar yaitu 5 kV/m.
  - b. Medan listrik di permukaan tanah ( $E_t$ ) pada objek I dan II yaitu 19.376,92 dan 18.085,82 kV/m, besaran tersebut

masih melebihi standar minimal yang diizinkan yaitu 10 kV/m. Sedangkan pada objek III terbagi menjadi empat zona yaitu zona perbatasan daratan-sungai, zona sungai, zona sungai-daratan dan zona darat, masing-masing = 76,37182; 68,58289; 19,43122; 1,45119 kV/m, besaran tersebut masih dibawah standar minimal yang diizinkan yaitu 5 kV/m.

2. Kuat medan magnet di udara ( $H$ ) pada objek I, II dan III masing-masing : 16,871; 15,747; dan 1,260 A/m. Besaran-besaran tersebut masih di bawah standar yang diizinkan oleh ICNIRP yaitu 800 A/m.
3. Tegangan induksi total ( $V_{ind-total}$ ) pada objek I, II dan III masing-masing yaitu 110,467; 89,047; dan 36,342 kV. Besaran-besaran tersebut masih di atas standar yang diizinkan oleh IEC yaitu 6 kV.
4. Tegangan langkah ( $\Delta V$ ) dan arus di permukaan tanah ( $I_t$ ) pada :
  - a. Objek I, II, masing-masing adalah: 13.363,19; 12.795,7 V dan 0,32; 0,31 A.
  - b. Objek III pada zona daratan-sungai, zona sungai, sungai-daratan dan zona daratan, masing-masing = - 189.866,17; 40.747,9; 171.627,77; 1.417,63 V dan 1,039; 0,96; 0,32; 0,097 A.
  - c. Tegangan langkah ( $\Delta V$ ) masih di atas standar IEEE std 80-200 yaitu 7.000 Volt gangguan selama 0,1 detik. Arus di permukaan tanah ( $I_t$ ) juga masih di atas standar yang diizinkan yaitu 1,6 - 6 mA yang dapat dirasakan manusia.

## SARAN

1. Disarankan pada gedung 2 Rumah Sakit Pendidikan UNRAM menambahkan *down conductor* berbentuk mesh agar medan listrik ( $E$ ), tegangan induksi ( $V_{ind}$ ), Tegangan langkah ( $\Delta V$ ) dan arus permukaan tanah ( $I_t$ ) yang dihasilkan tidak melebihi dari standar yang diizinkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anies, M., 2006, Electrical Sensitivity Gangguan Kesehatan Akibat Radiasi Elektromagnetik, Kes PKK.
- Dehn-Sohne, 2014, Lightning Protection Guide, germany [www.dehn.de](http://www.dehn.de)
- Demarest, K.R., 1998, *Engineering Electromagnetics*, International Edition, Prentice-Hall International, Inc. USA.

Hyatt, Jr., W.H., 2006, *Elektromagnetika*, Edisi Ketujuh, Penerbit Erlangga, Jakarta.

Helita and Soule, P., 2011, *Lightning and Surge Protection OVR Range*, Avenue des preseigneurs- LaBoisse/ France, [www.abb.com](http://www.abb.com)

Hasse, P., 1992, *Overvoltage Protection of Low Voltage Systems IEEE Power Series 12*, Peter Peregrinus Ltd., London.

IEC 10241-1, 1990, *Protection Of Structure Against Lightning*. International Standard. Geneva.

IEEE Std 80-2000, "Guide For Safety in AC Substation Grounding", New York.

Legrand, 2009, *Protection againts Lightning Effet*, world head quarters and Internasional departmen, Limoges cedax-france.

Patel, K., 2013, *Effect of Lightning on Building and Its Protection Measures*, *International Journal of Engineering and Advanced Technology* (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-2, Issue-6, August 2013.

Seniari, dkk, 2016., "Pemodelan Distribusi Arus Dan Beda Potensial Di Permukaan Tanah Pada Variasi Dimensi Elektroda Pengetanahan", *Dielektrika*, ISSN 2086-9487, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mataram.

Sutrisna, dkk., 2017., "Analisis Tegangan Lebih Induksi Disekitar Down Conductor Yang Terinjeksi Arus Petir (Studi Kasus Gedung Stahn Gde Pudja Mataram Dan Gardu Hubung Gomong)", *Dielektrika*, ISSN 2579-650x, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mataram.

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.

\_\_\_\_\_, 2000, *Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000*, SNI 04-0225-2000, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.

\_\_\_\_\_, 2004, *Sistem Proteksi Petir Pada Bangunan Gedung*, SNI 03-7015