

Analisis Pentanahan Gardu Induk Akibat Surja Petir Menggunakan *Finite Element Method*

Ayu Fitriani
Prodi Teknik Elektro
Universitas Tjut Nyak Dhien
Medan, Indonesia
ayufitriani2796@gmail.com

Syafriwel
Prodi Teknik Elektro
Universitas Tjut Nyak Dhien
Medan, Indonesia
syafriwel.lp3i@gmail.com

Jhoni Hidayat
Prodi Teknik Elektro
Universitas Tjut Nyak Dhien
Medan, Indonesia

Joel Panjaitan
Prodi Teknik Elektro
Akademi Teknik Deli Serdang
Medan, Indonesia
joel.panjaitan@gmail.com

Syofyan Anwar Syahputra
Prodi Teknik Elektro
Akademi Teknik Deli Serdang
Medan, Indonesia
joel.panjaitan@gmail.com

Diterima : Juni 2023
Disetujui : Juli 2023
Dipublikasi : Juli 2023

Abstrak- Sambaran petir pada sistem tenaga bisa mengganggu keandalan sistem, serta senantiasa jadi salah satu tantangan utama dalam proses desain gardu induk. Hal-hal yang butuh dicermati dalam mendesain sistem pentanahan diantaranya, peningkatan tegangan tanah (*Ground Potential Rise*), keamanan tegangan langkah serta tegangan sentuh pada gardu induk, dan besarnya nilai impedansi akibat dari surja petir. Tujuan dari penelitian ini untuk melihat besar arus sambaran petir yang terjadi pada gardu induk dengan variasi area zona pentanahan grid pada gardu induk. Adapun simulasinya menggunakan aplikasi ETAP memakai metode FEM (*Finite Element Method*) dibuat untuk menampilkan ikatan antara luas zona grid, dimensi konduktor serta peningkatan GPR akibat sambaran surja petir. Nilai kenaikan tegangan yaitu sebesar 13289V, tegangan sentuh yang didapat sebesar 490,1V pada bobot badan 50kg dan 663,4V bobot badan 70kg, sedangkan untuk tegangan langkah yaitu sebesar 1372,5V pada bobot badan 50kg dan 1857,6V bobot badan 70kg pada luas zona grid 10 x 10 m². tegangan sentuh yang didapat sebesar 832,87V pada bobot badan 50kg dan 1127,2V bobot badan 70kg. sedangkan untuk tegangan langkah yaitu sebesar 2743,2V pada bobot badan 50kg dan 3712,8V bobot badan 70kg pada luas zona grid 50 x 50 m². Hasil akumulasi arus gangguan akibat sirja petir dengan variasi arus injeksi dimana semakin besar arus injeksi yang diberikan maka semakin besar arus gangguan surja petir yang timbul.

Kata Kunci— FEM; GPR; Tegangan Sentuh; Tegangan Langkah

Abctrak- *Lightning strikes in power systems can compromise system reliability and have always been one of the major challenges in the substation design process. Things that need to be considered in designing a grounding system include ground voltage increase (Ground Potential Rise), step voltage safety and touch voltage at the substation, and the magnitude of the impedance value due to lightning surges. The purpose of this study is to see the magnitude of the lightning strike current that occurs*

at the substation with variations in the area of the grid grounding zone at the substation. The simulation using the ETAP application using the FEM (Finite Element Method) method is made to display the bond between the grid zone area, conductor dimensions, and the increase in GPR due to lightning strikes. The voltage increase value is 13289V, the touch voltage obtained is 490.1V at 50kg body weight and 663.4V 70kg body weight, while the step voltage is 1372.5V at 50kg body weight and 1857.6V 70kg body weight at zone area grids 10 x 10 m². The touch voltage obtained is 832.87V for a body weight of 50kg and 1127.2V for a body weight of 70kg. while the step voltage is 2743.2V for a body weight of 50kg and 3712.8V for a body weight of 70kg for a grid zone area of 50 x 50 m². The accumulated fault current results from lightning surges with injection current variations where the greater the injection current, the greater the lightning surge fault current that arises.

Keywords – FEM; GPR; Touch Voltage; Step Voltage

I. PENDAHULUAN

Dalam sesuatu sistem pentanahan, ada harapan yang kokoh supaya sistem pentanahan senantiasa berperan dengan baik terhadap bermacam kendala, tercantum ragam tegangan serta arus transien yang wajib dibuang dan dialirkan ke tanah. Sebab keadaan alam yang tidak menentu dari frekuensi serta posisi sambaran petir, hingga butuh dicoba analisis arus transien pada jaringan pentanahan gardu induk akibat sambaran petir pada penghantar tanah sampai ragam titik posisi sambaran [1]. Dengan perencanaan yang baik, diharapkan sistem pentanahan bisa terus berperan secara maksimal guna menjauhi pengaruh lain yang bisa mengacaukan sistem serta gardu induk ataupun menghasilkan zona yang berpotensi beresiko, mengancam keselamatan orang ataupun pekerja di zona gardu induk [2].

Bahaya surja petir bisa berlangsung di antara awan dengan awan, ataupun di dalam awan, serta pula antara awan dengan tanah. Petir dapat berlangsung dari hasil terkumpulnya muatan listrik pada awan [3]. Surja petir ialah

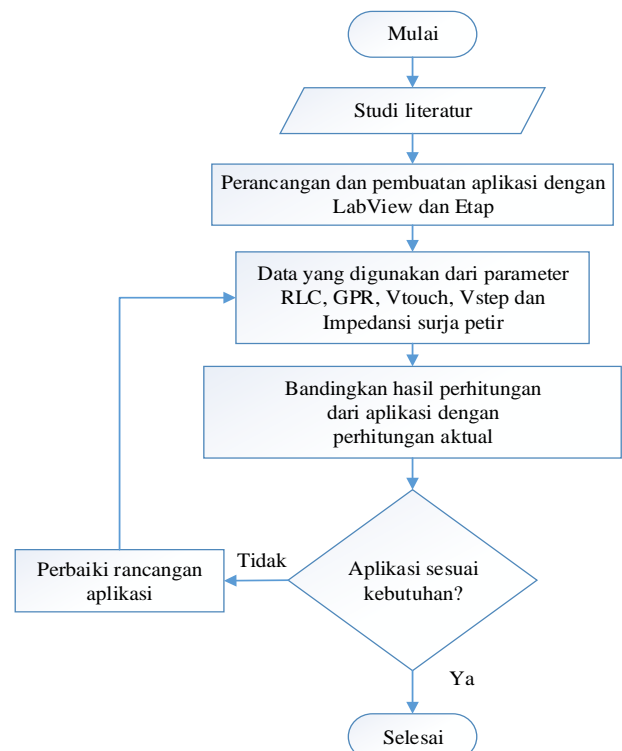
peristiwa pelepasan muatan listrik yang menyambar ke bumi dengan nilai serta menyertakan arus yang sangat besar, serta peristiwa tersebut berlangsung dalam waktu yang sangat pendek dengan akibat yang sangat beresiko. Sehingga Lonjakan yang diakibatkan oleh sambaran petir pada sistem tenaga bisa mengganggu sistem serta kurangi keandalan sistem, serta senantiasa jadi salah satu tantangan utama dalam proses desain gardu induk [4]. Sebab banyaknya fitur di gardu induk, kendala bisa timbul akibat sambaran petir. Petir merupakan timbulnya lampu listrik dengan keseriusan sinar serta suara yang berarti durasi gelombang transien ini sangat pendek namun frekuensi gelombang ini sangat besar.

Survei terdahulu pada suatu perlengkapan gardu induk GIS 400kV akibat lonjakan mendadak akibat surja petir pada perlengkapan gardu induk GIS saluran transmisi listrik disimulasikan dengan memakai aplikasi *EMTP* [5]. Kendala transien pada sistem pentanahan berlapis banyak akibat sambaran petir dihitung dengan tata cara *Invers Fourier Transform* memakai MATLAB dengan parameter kabel pentanahan yang dipasang secara horizontal serta vertikal pada pentanahan grid [6]. Model pentanahan netral generator memakai tata cara pentanahan lewat transformator distribusi dengan parameter pentanahan di implementasikan memakai aplikasi *Labview GUI* [7]. Tata cara yang diusulkan buat mengevaluasi distribusi arus petir dalam sistem pentanahan yang lingkungan sehingga potensial transien serta impedansi transien dari sistem pembumian bisa dihitung [8].

Penelitian ini memiliki kelebihan dimana hasil dari pengujian dapat di lihat secara visual dengan menggunakan aplikasi yang berbeda yaitu *Etap*. Sedangkan penelitian terdahulu hanya memvalidasi atau mengakumulasi setiap parameter kedalam bentuk aplikasi, baik dalam bentuk blok diagram atau diagram panel dengan aplikasi *Labview*. Kekurangan dari penelitian ini belum di dapat hasil yang akurat untuk untuk lama durasi terjadinya gangguan transien akibat sambaran surja petir yang berpengaruh terhadap kenaikan tegangan, tegangan sentuh dan teganga langkah.

II. METODE

Sistem pentanahan wajib didesain dengan sedemikian rupa sehingga menentukan keamanan perlengkapan serta operator sepanjang dalam suasana wajar serta dalam suasana kendala [9]. Sistem pembedahan yang nyaman pada gardu induk sangat berguna dicermati di antara lain pada nilai tegangan langkah serta tegangan sentuh, besarnya nilai resistansi pentanahan, peningkatan nilai GPR (*Ground Potensial Rise*) serta pengaruh nilai impedansi surja pentanahan [10]. Hal- hal yang butuh dicermati dalam mendesain sistem pentanahan diantaranya, peningkatan tegangan tanah, keamanan dari tegangan langkah beresiko serta tegangan sentuh pada gardu induk. Oleh sebab itu tegangan langkah serta tegangan sentuh ialah parameter kinerja dalam desain pentanahan ini. Ada pula diagram alir riset bisa ditunjukkan pada gambar 1:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

A. Pentanahan Gardu Induk

Sistem pentanahan gardu induk didesain untuk menyediakan stabilitas kondisi tegangan, mencegah tegangan puncak berlebihan selama gangguan, menyediakan perlindungan sambaran petir dan menjamin keamanan manusia selama gangguan tanah dalam sistem tenaga [11]. Resistansi pentanahan dapat diartikan sebagai resistansi antara elektroda dengan titik yang sangat jauh (titik dengan potensi nol) pada bumi. Nilai resistansi, induktansi dan kapasitansi dari pentanahan netral peralatan dapat ditunjukkan [12]:

$$R_i = \frac{\rho}{l_i} \left(\ln \frac{8l_i}{d} - 1 \right) [\Omega] \quad (1)$$

$$L_i = 2l \left(\ln \frac{4l_i}{d} \times 10^{-7} \right) [\text{H}] \quad (2)$$

$$C = \frac{\epsilon_{rl_i}}{18 \ln \left(\frac{4l_i}{d} \right)} \times 10^{-9} [\text{F}] \quad (3)$$

B. GPR (Ground Potensial Rise)

GPR (*Ground Potensial Rise*) atau kenaikan potensial tanah terjadi karena adanya arus yang mengalir pada sistem yang ditanahkan [13]. Untuk menentukan nilai GPR pada sistem pentanahan gardu induk, dimana terlebih dahulu dihitung nilai arus surja petir dapat dirumuskan dalam persamaan [14] [15]:

$$I_s = S_f \times 3I_0 \quad (\text{A}) \quad (4)$$

Menentukan nilai GPR pada pentanahan sistem distribusi dapat dirumuskan dengan:

$$GPR_s = I_s \times R_i \quad (5)$$

C. Tegangan Sentuh Yang diizinkan

Standar toleransi tegangan sentuh yang diizinkan dengan asumsi bobot badan manusia 50kg dan 70kg [16] [17].

$$E_{touch(50)} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

$$E_{touch(70)} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \times \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (7)$$

D. Tegangan langkah Yang Diizinkan

Batas nilai dari tegangan langkah yang diizinkan untuk bobot badan 50kg dan 70kg ditunjukkan melalui:

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{p}{p_s})}{h_s + 0.09} \quad (8)$$

$$E_{step(50)} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (9)$$

$$E_{step(70)} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \times \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (10)$$

E. Impedansi Surja Pentanahan

Sistem pentanahan merupakan salah satu cara untuk menciptakan kestabilan sistem tenaga dengan menjaga perbedaan potensial, sehingga pada saat keadaan gangguan dapat segera diketanahkan. Impedansi surja pentanahan dapat diartikan sebagai besarnya nilai tegangan surja petir dibandingkan dengan nilai arus surja petir atau dalam persamaan dapat ditunjukkan [18] [19]:

$$Z(t) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (11)$$

dengan $i(t)$ dan $v(t)$ dapat dicari dengan,

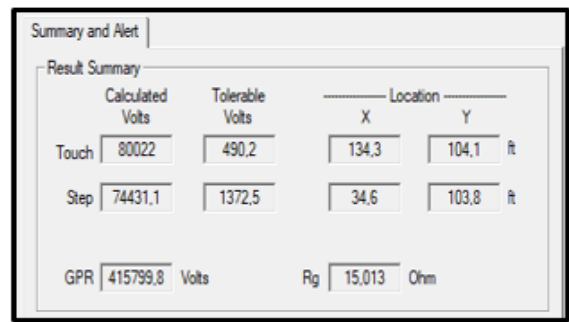
$$i(t) = I_m (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (12)$$

Untuk menentukan nilai α dan β dapat ditunjukkan:

$$\alpha = \frac{0.396}{T_t} \text{ dan } \beta = \frac{2.746}{T_f} \quad (13)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil verifikasi aplikasi terdiri dari hasil verifikasi rancangan awal dan hasil verifikasi parameter desain gangguan pada sistem pentanahan akibat surja petir yang berpengaruh terhadap kenaikan tegangan (*Ground Potential Rise*), tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diizinkan. Nilai resistansi yang diimplementasikan sebesar 1000Ω dengan luas area grid $10 \times 10 \text{ m}^2$ dan $50 \times 50 \text{ m}^2$ pada luas area yang sama. Adapun hasil verifikasi kenaikan tegangan dapat ditunjukkan pada gambar 2.



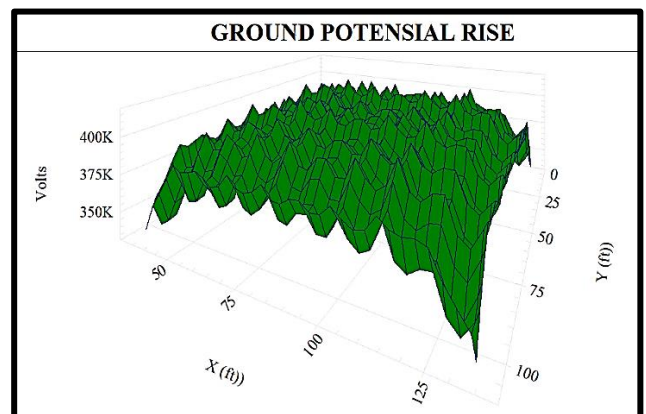
Gambar 2. Hasil Verifikasi Data Pada Luas Area $10 \times 10 \text{ m}^2$

Hasil verifikasi perbandingan antara Labview dan ETAP pada luas area grid $10 \times 10 \text{ m}^2$ dapat ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Verifikasi Tegangan Sentuh dan Tegangan langkah

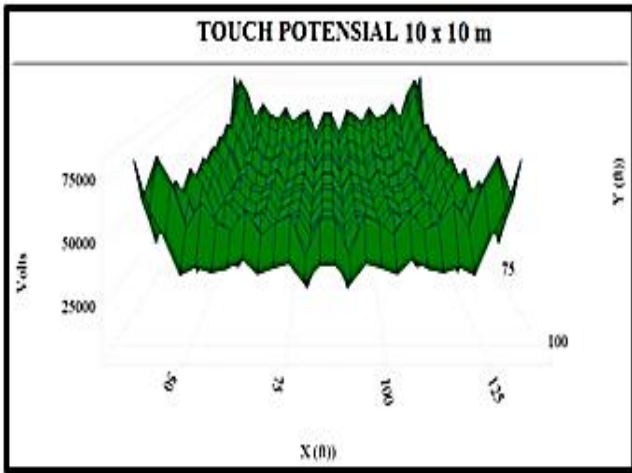
Uraian	Tegangan Sentuh		Tegangan Langkah		GPR (v)
	50 KG	70Kg	50Kg	70Kg	
Labview	490,1	663,4	1373,5	1857,6	-
Etap	490,2	663,4	1372,5	1857,6	415799,8

Gambar 3 merupakan simulasi kenaikan tegangan (*ground potensial rise*) pada luas area pentanahan $10 \times 10 \text{ m}^2$ dengan panjang konduktor 13532 m, dimana nilai *GPR* nya sebesar 415799,8V.

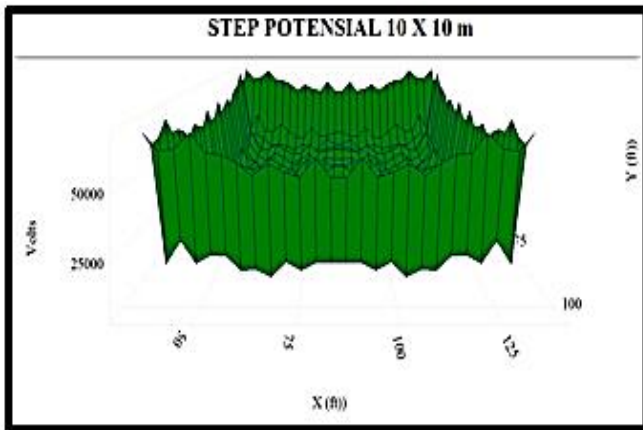


Gambar 3. Hasil verifikasi kenaikan nilai tegangan

Simulasi nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah pada gambar 4 dan 5 menunjukkan bahwa nilai tegangan sentuh yang didapat sebesar 490,1V pada bobot badan 50kg dan 663,4V bobot badan 70kg, sedangkan untuk tegangan langkah yaitu sebesar 1372,5V pada bobot badan 50kg dan 1857,6V bobot badan 70kg.



Gambar 4. Hasil verifikasi tegangan sentuh



Gambar 5. Hasil verifikasi tegangan langkah

Adapun hasil verifikasi kenaikan tegangan, tegangan sentuh dan tegangan langkah dapat ditunjukkan pada gambar 6 dengan luas area pentanahan grid 50 x 50 m².

Result Summary			
Calculated Volts	Tolerable Volts	Location	
		X	Y
Touch 34419.5	717.3	234.3	204.1 ft
Step 28551.9	2280.8	34.6	203.8 ft
GPR 204044.8 Volts		Rg 7.367 Ohm	

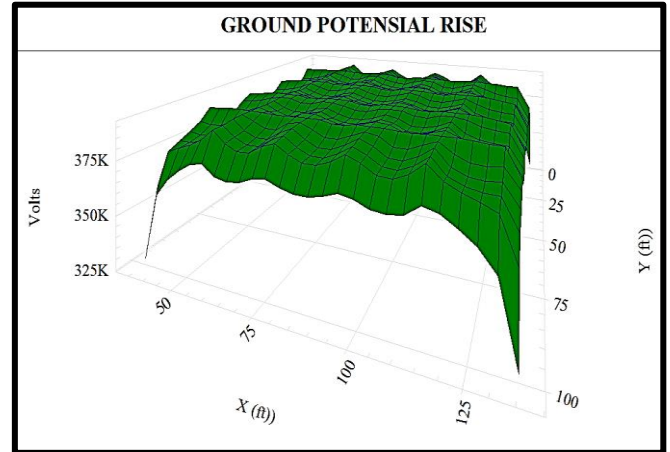
FAKTOR TEGANGAN SENTUH DAN TEGANGAN LANGKAH			
Diagram		Dizinkan	
ps	2000	Estep 50 kg	Estep 70 kg
ts	0,35	2743,26 volt	3712,86 volt
Etouch		Etouch 50 kg	Etouch 70 kg
		832,872 volt	1127,25 volt

Gambar 6. Hasil Verifikasi Data Pada Luas Area 50 x 50 m²

Tabel 2. Hasil Verifikasi Tegangan Sentuh dan Tegangan langkah

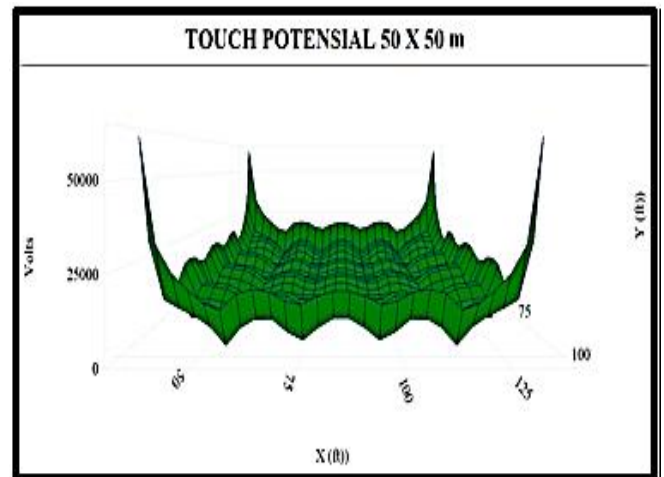
Uraian	Tegangan Sentuh		Tegangan Langkah		GPR (v)
	50Kg	70Kg	50Kg	70Kg	
Labview	832,87	1127,2	2743,2	3712,8	-
Etap	717,3	970,8	2280,8	3086,9	204044,8

Simulasi kenaikan tegangan (*ground potential rise*) pada luas area 50 x 50 m² dengan panjang konduktor 53732 m, dimana nilai GPR nya sebesar 204044,8V dapat ditunjukkan dalam gambar 7.



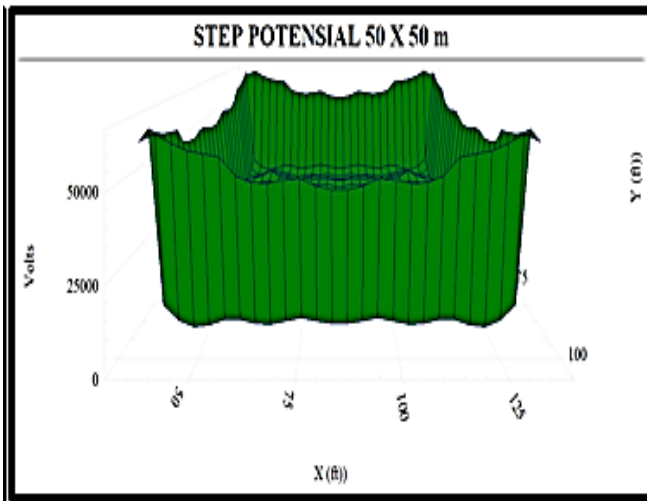
Gambar 7. Hasil verifikasi kenaikan nilai tegangan

Simulasi nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah pada gambar 7 dan 8 menunjukkan bahwa nilai tegangan sentuh yang didapat sebesar 832,87V pada bobot badan 50kg dan 1127,2V bobot badan 70kg, sedangkan untuk tegangan langkah yaitu sebesar 2743,2V pada bobot badan 50 kg dan 3712,8V bobot badan 70kg.



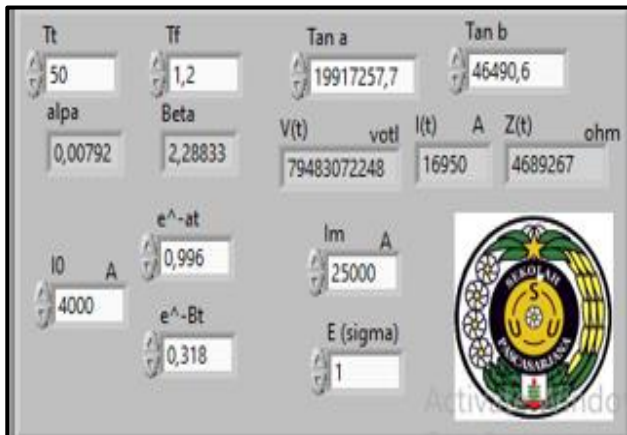
Gambar 8. Hasil verifikasi tegangan sentuh

Hasil verifikasi perbandingan antara Labview dan ETAP pada luas area grid 50 x 50 m² dapat ditunjukkan dalam Tabel 2.



Gambar 9. Hasil verifikasi tegangan langkah

Untuk hasil verifikasi sistem pentanahan gardu induk akibat surja petir dengan batasan nilai arus injeksi yang digunakan dapat ditunjukkan dalam gambar 10 yang telah dikalkulasikan kedalam bentuk block diagram menggunakan aplikasi *Labview*.



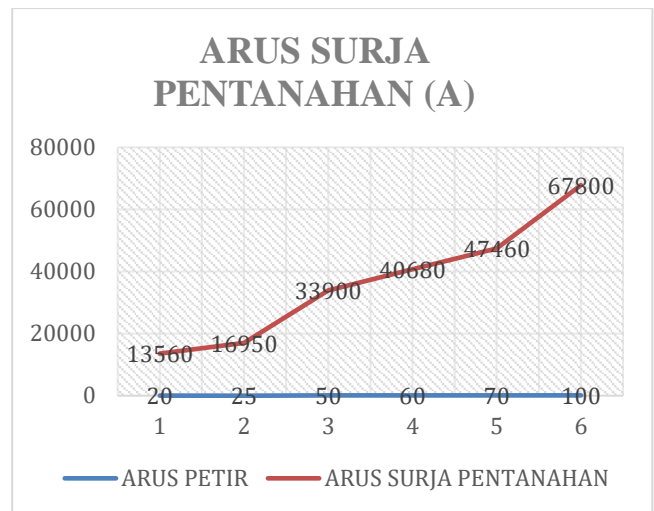
Gambar 10. Hasil verifikasi arus surja pentanahan

Hasil verifikasi surja pentanahan dengan menggunakan arus injeksi surja petir sebesar 20 kA, 25 kA, 50 kA, 60 kA, 70 kA dan 100 kA dapat ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hasil verifikasi arus surja pentanahan

Arus Injeksi (kA)	Arus Surja Pentanahan (kA)
20	13560
25	16950
50	33900
60	40680
70	47460
100	67800

Hasil verifikasi arus surja pentanahan akibat sambaran surja petir dapat ditunjukkan dalam bentuk grafik dalam gambar 11, dimana semakin besar arus injeksi yang diberikan maka semakin besar arus gangguan surja petir yang timbul



Gambar 11. Grafik Hasil Verifikasi Arus Surja Pentanahan

IV. KESIMPULAN

Hasil simulasi arus gangguan akibat sambaran petir dengan aplikasi *ETAP* menggunakan metode FEM (*Finite Element Method*) untuk menampilkan hubungan antara luas zona grid, panjang konduktor dan kenaikan nilai tegangan (*Ground Potensial Rise*) akibat pengaruh dari sambaran surja petir. Maka didapat nilai kenaikan tegangan yaitu sebesar 13289V tegangan sentuh yang didapat sebesar 490,1V pada bobot badan 50kg dan 663,4V bobot badan 70kg. sedangkan untuk tegangan langkah yaitu sebesar 1372,5V pada bobot badan 50kg dan 1857,6V bobot badan 70kg pada luas zona grid 10 x 10 m². Tegangan sentuh yang didapat sebesar 832,87V pada bobot badan 50kg dan 1127,2V bobot badan 70kg, sedangkan untuk tegangan langkah yaitu sebesar 2743,2V pada bobot badan 50kg dan 3712,8V bobot badan 70kg pada luas zona grid 50 x 50 m². Hasil akumulasi arus gangguan akibat sirja petir dengan variasi arus injeksi dimana semakin besar arus injeksi yang diberikan maka semakin besar arus gangguan surja petir yang timbul.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih untuk semua rekan-rekan dosen yang telah membantu memberikan ide dan support dalam penulisan paper ini sehingga dapat ditulis sesuai dengan standar penulisan jurnal ilmiah.

REFERENSI

- [1] Nihal Bayramoğlu, Burak Esenboğa, "The Development of Lightning Protection and Grounding Systems: A Survey", *TEPES*, Vol.1, Issue. 1, 54-59, 2021.
- [2] Vuyani Michel Nicholas Dladla, Agha Francis Nnachi, Rembuluwani Philip Tshubwana, "Analysis of Design Parameters on Substation Earth Grid Safety Limits", *Science Publishing Group*, 10(2): 61-72, 2022.
- [3] Premalatha Potta, R.Balakrishnan, "ETAP Model for Earth Mat Design", *Proceedings of International Academic Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering*, ISBN: 978-93-82702-28-3, 8th Sept. 2013.

- [4] Ossama E. Gouda, Adel Z. El Dein, Ghada M. Amer, "Parameters Affecting the Back Flashover across the Overhead Transmission Line Insulator Caused by Lightning ", Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), Page(s)44-49, Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010.
- [5] Zahira Anane, Abdelhafid Bayadi and Alen Bernadić, "Analysis of Lightning Strike with Corona on OHTL Near the Substation by EMTP", *Advances in Engineering: an International Journal (ADEIJ)*, Vol. 1, No.1, September 2016.
- [6] Saeid Gholami Farkoush, Abdul Wadood, Tahir Khurshaid, Chang-Wang Kim, Muhammad Irfan, Sang-Bong Rhee, "Reducing the Effect of Lightning on Step and Touch Voltages in a Grounding Grid Using a Nature-inspired Genetic Algorithm with ATP-EMTP", *VOLUME XX*, 2019.
- [7] Zulkurnain Abdul-Malek, Mohammad Shahrin Affendy Yaman, Muhammad Adnan, "Effects of soil profile on the transient performance of substation grounding system", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 20, No. 2, pp. 870~877, November 2020.
- [8] Surya Hardi 1, Ayu Fitriani1, Emerson P. Sinulingga, "Modeling Of Generator Neutral Grounding Through Distribution Transformer Using Lab View Graphical User Interface", *ICOSTA* 2020.
- [9] Surya Hardi, Azwar Nasution, Fanindia Purnamasari, "Modeling of Substation Grounding Grid Design Using Lab View Graphical User Interface", *International Conference on Electrical, The 3rd Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*, 2019.
- [10] ANSI/IEEE Std, 80-2013/Cor 1-2015, "IEEE` Guide for safety in AC substation grounding", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, All rights reserved, Published 15 May 2015.
- [11] Ebadollah Amouzad Mahdiraji, "Investigation Of Overvoltages Caused By Lightning Strikes On Transmission Lines And Gis Substation Equipment", *Crpase: Transactions Of Electrical, Electronic And Computer Engineering*, Vol. 06(04), 238-244, December 2020.
- [12] K. P. Sengar and K. Chandrasekaran, "Transient behavior of grounding systems in multilayer soil under lightning strikes," *Electrical Engineering*, vol. 104, no. 3, pp. 1205–1218, Jun. 2022, doi: 10.1007/s00202-021-013676.
- [13] Yongchang Meng, Chuntao Liu, Xuemin Huang, "Influence of Grounding Design around Down Lead on Lightning Transient Behavior of Substation Grounding Grid", *Pacific Internasional Conference On Lightning*, Juni 12-14 Hongkong-China, 2019.
- [14] O. E. Gouda, G. M. Amer, and T. M. El-Saied, "Factors Affecting Transient Response of Grounding Grid Systems."5th International Multi-Conference on Systems, Signals, and Devices 2008
- [15] Samuel Marco Gunawan, Julius Santosa, "Analisa Perancangan Gardu Induk Sistem Outdoor 150 kV di Tallasa, Kabupaten Takalar, Sulawesi Selatan", *Jurnal Dimensi Teknik Elektro* Vol. 1, No. 1, 2013.
- [16] J. G. Sverak, G. Hi, and N. York, "Simplified Analysis of Electrical Gradients above a Ground Grid," 1984.
- [17] A. Z. El Dein and A. S. T. Line, "Parameters Affecting the Back Flashover Across The Overhead Transmission Line Insulator Caused by Lightning", Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10) pp. 44–49, 2010.
- [18] ANSI/IEEE Std, 80-2013/Cor 1-2015, "IEEE` Guide for safety in AC substation grounding", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, All rights reserved, Published 15 May 2015.
- [19] Catra Indra Cahyadi, Kurniaty Atmia, Ayu Fitriani, Analisis Pengaruh Rugi-Rugi Daya Pada Saluran Transmisi 150 kV, *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Volume 4 Nomor 2 Juli 2022.