

ANALISIS SISTEM GROUNDING PADA GARDU INDUK 150KV TEMANGGUNG DENGAN SIMULASI SOFTWARE ETAP

Friska Rizqi Pratiwi¹, Agus Suryanto²

^{1,2} Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang
Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229 INDONESIA
friskarizqi444@gmail.com¹, agusku2@mail.unnes.ac.id²

Abstract— Abstract - The grounding system is a system that connects the substation components, equipment bodies, and installations with the ground so it can protect people and installation components from the danger of abnormal voltages or currents. The grounding system that is often used is a combination of grid and rod. The purpose of this study is to analyze the grounding system of the 150 kV Temanggung substation using ETAP 12.6.0 software and to compare the actual design with other grounding system models, namely the L, T, and triangle models with the same rod and grid conductor spacing as the actual design based on the IEEE std standard. 80-2013. The results of the analysis of this study are the permissible touch stress is 1401.6 V for body weight 50 kg and 1896.9 V for body weight 70 kg and the allowable step stress is 5018 V for body weight 50 kg and 6791.6 V for body weight. 70 kg. The actual touch and step voltages are 1345.6 and 880.2 V. With a total conductor length of 1623 meters. Of the several model designs applied, the T model design is the best in terms of economics, according to the IEEE std 80-2013 standard, namely 1190 meters.

Intisari— Sistem pentanahan merupakan sistem yang menghubungkan komponen gardu induk, badan peralatan, dan instalasi dengan tanah sehingga dapat mengamankan manusia dan komponen-komponen instalasi dari bahaya tegangan atau arus abnormal. Sistem pentanahan yang sering digunakan adalah kombinasi grid dan rod. Tujuan penelitian ini yaitu menganalisis sistem pentanahan gardu induk 150 kV Temanggung menggunakan software ETAP 12.6.0 dan membandingkan rancangan sesungguhnya dengan model sistem pentanahan lain yaitu model L, T, dan segitiga dengan jarak konduktor rod dan grid yang sama dengan rancangan sesungguhnya berdasarkan standar IEEE std 80-2013. Hasil analisis penelitian ini yaitu tegangan sentuh yang diizinkan adalah 1401,6 V untuk berat badan 50 kg dan 1896,9 V untuk berat badan 70 kg serta tegangan langkah yang diizinkan adalah 5018 V untuk berat badan 50 kg dan 6791,6 V untuk berat badan 70 kg. Tegangan sentuh dan tegangan langkah sesungguhnya adalah 1345.6 dan 880,2 V. Dengan total panjang konduktor 1623 meter. Dari beberapa rancangan model yang diterapkan rancangan model T yang terbaik dari segi ekonomis sesuai standar IEEE std 80-2013 yaitu 1190 meter.

Kata Kunci— Gardu induk, sistem pentanahan grid; tegangan sentuh, tegangan langkah.

I. PENDAHULUAN

Listrik merupakan kebutuhan utama bagi masyarakat saat ini untuk memenuhi kebutuhan hidup mereka sehari-hari. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu sistem yang dapat memberikan

pasokan listrik yang baik agar dapat mendistribusikan energi listrik ke seluruh lapisan masyarakat. Keberhasilan suatu operasi sistem tenaga listrik salah satunya bergantung pada kinerja gardu induk yang efektif dan efisien. Dua masalah yang terjadi pada perancangan dan operasi sistem tenaga listrik yaitu keamanan dan keandalan, termasuk perancangan dan operasi gardu induk.

Dalam perencanaan sistem gardu induk, terdapat beberapa standar yang di gunakan dan diikuti untuk mendapatkan perencanaan yang memenuhi keamanan dan keandalan sehingga dapat mencegah bahaya pada saat gangguan, salah satunya yaitu berdasarkan standar IEEE Std 80-2013. Dalam standar ini terdapat konsep-konsep perancangan sistem pentanahan gardu induk, termasuk hal-hal yang harus diperhatikan dalam perancangan seperti tahanan jenis tanah, ukuran dan jenis konduktor atau elektroda yang digunakan sampai langkah-langkah dalam perancangan yang dijelaskan secara rinci.

Sistem pentanahan grid biasanya dipasang pada gardu induk dengan tujuan mendapatkan nilai resistansi tanah yang sangat kecil atau kurang dari 1 Ω . Sistem pentanahan yang paling umum di gunakan untuk gardu induk adalah kombinasi sistem pentanahan grid dan rod. Kombinasi antara jumlah grid dan rod-nya serta kedalaman penanaman elektroda dengan mempertimbangkan nilai dari tahanan jenis tanah, pengaruh tahanan jenis tanah untuk beberapa jenis tanah yang berbeda dengan kedalaman yang sama serta dimensi area pentanahan yang akan digunakan sehingga menghasilkan nilai tahanan pentanahan (R_g), tegangan sentuh (E_m) dan tegangan langkah (E_s) yang lebih aman dan lebih baik. Kombinasi antara grid dan rod akan membentuk beberapa model sistem pentanahan yaitu model persegi, persegi panjang, L, T, serta segitiga. [1]

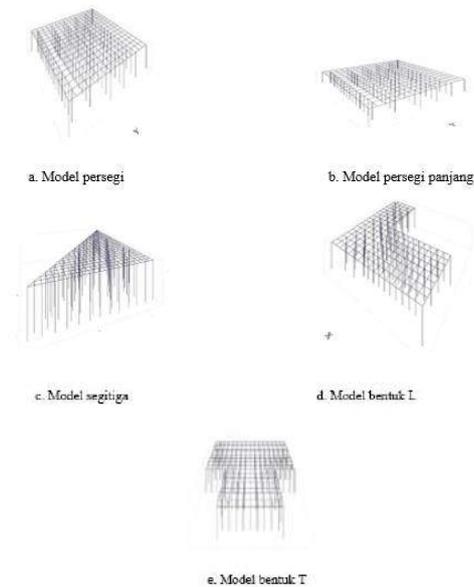
Penelitian ini akan melakukan analisa dan simulasi sistem pentanahan grid pada gardu induk 150 kV Temanggung berdasarkan standar IEEE Std 80-2013 dengan menggunakan software ETAP 12.6.0 dan akan membandingkan dengan model pentanahan yang lain yaitu model L, T, dan segitiga dengan jarak antar konduktor grid yang sama dengan keadaan yang ada untuk mendapatkan perancangan sistem pentanahan yang paling ekonomis dan aman. Berdasarkan hal tersebut penulis mencoba untuk melakukan penelitian yang berjudul “Analisis Sistem Grounding pada Gardu Induk 150Kv Temanggung dengan Simulasi Software ETAP ”

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Pentanahan Grid

Pentanahan grid merupakan salah satu sistem pentanahan yang banyak digunakan pada gardu induk karena mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan dengan sistem pentanahan lainnya. [2]

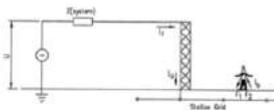
Kombinasi antara grid dan rod terdiri dari beberapa bentuk seperti bentuk persegi, persegi panjang, segitiga, bentuk L, dan bentuk T. [3]



Gbr. 1 Model Pentanahan Grid

B. Tegangan Langkah yang Diizinkan

Tegangan langkah adalah beda potensial pada permukaan tanah dari dua titik yang berjarak satu langkah (1 meter), yang dialami oleh seseorang yang menghubungkan kedua titik tersebut dengan kedua kakinya tanpa menyentuh suatu peralatan apapun seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar. 2 Tegangan Langkah

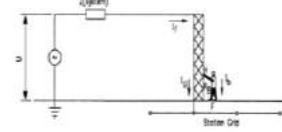
Manusia dengan berat badan 50 dan 70 kg dapat dihitung tegangan langkah menurut IEEE Std 80-2013 pada persamaan dibawah ini :

$$E_{s50} = [1000 + 6\rho_s C_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$E_{s70} = [1000 + 6\rho_s C_s] \frac{0,157}{\sqrt{t}}$$

C. Tegangan Sentuh yang Diizinkan

Tegangan sentuh adalah tegangan yang terdapat diantara suatu objek yang disentuh dan atau titik berjarak 1 meter, dengan asumsi bahwa objek yang disentuh dihubungkan dengan kisi- kisi pengetanahan yang berada dibawahnya [4]



Gbr .3 Tegangan sentuh

Manusia dengan berat badan 50 dan 70 kg yang berada diantara satu objek dapat dihitung tegangan sentuh, menurut IEEE Std 80-2013 pada persamaan dibawah ini :

$$E_{t50} = [1000 + 1,5 \rho_s C_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$E_{t70} = [1000 + 1,5 \rho_s C_s] \frac{0,157}{\sqrt{t}}$$

Faktor reduksi C_s sebagai fungsi dari faktor refleksi K dan ketebalan lapisan batu koral h_s adalah sebagai berikut :

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 h_s + 0,09}$$

D. Tegangan Langkah Sebenarnya

Tegangan langkah sebenarnya adalah perbedaan tegangan maksimum yang terdapat diantara kedua kaki bila manusia berjalan diatas tanah sistem pengetanahan pada keadaan terjadi gangguan [5]. Tegangan langkah maksimum sebenarnya dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [5]:

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s}$$

E. Tegangan Sentuh (mesh) Sebenarnya

Tegangan mesh merupakan salah satu bentuk tegangan sentuh, yaitu tegangan sentuh maksimum sebenarnya. Tegangan mesh ini didefinisikan sebagai tegangan peralatan yang dibumikan terhadap tengah-tengah daerah yang dibentuk kisi-kisi (grid) selama gangguan tanah. Tegangan ini diambil sebagai tegangan untuk rancangan yang aman [5].

Tegangan mesh secara pendekatan adalah :

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M}$$

F. Software ETAP 12.6.0

ETAP (Electrical Transient Analysis Program) adalah suatu program yang terintegrasi yang mendesain dan mensimulasikan untuk menyelesaikan permasalahan Analisis Harmonic, Analisis Transient Stability, Analisis Load Flow (Aliran Daya), ShortCircuit (ANSI and IEC), Optimal Power Flow, Ground Grid Systems, Manuver Jaringan Sistem

Transmisi dan Distribusi, Mengurangi Losses pada sistem Transmisi dan Distribusi, Pemasangan Kapasitor pada sistem Transmisi dan Distribusi. ETAP dapat dijalankan dengan mikrosoft, windows, XP, Vista 7 dan 8.

ETAP 12.6 memudahkan engineer dalam melakukan analisis hubung singkat fasa tanah. Dengan demikian, ETAP dapat digunakan untuk melakukan analisis hubung singkat fasa tanah untuk menentukan sistem proteksi yang tepat pada Sistem Tenaga Listrik. [6]

III. METODE PENELITIAN

A. Desain Penelitian

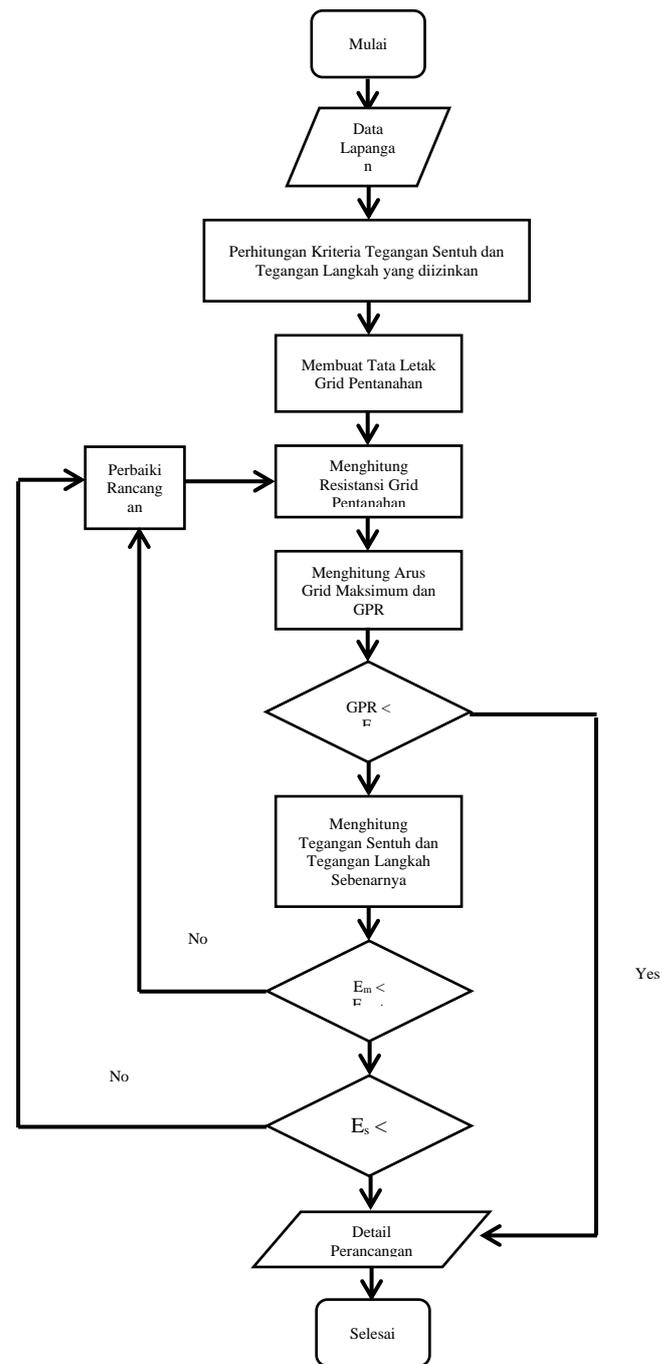
Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif dengan pendekatan statistik deskriptif. Penelitian kuantitatif merupakan suatu metode penelitian yang menggunakan proses data berupa angka sebagai alat menganalisis dan melakukan kajian penelitian, terutama tentang apa yang sudah diteliti sebelumnya [7]. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi keamanan sistem pentanahan grounding grid pada gardu induk 150 kV Temanggung, mengetahui tegangan langkah dan tegangan sentuh pada gardu induk serta membuat rancangan dalam model sistem grounding grid lain untuk mendapatkan model yang paling efektif untuk sistem grounding grid yang sesuai dengan standar IEEE Std 80-2013

B. Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mempertimbangkan tahapan-tahapan yang dikaji dengan melakukan pertimbangan studi literatur, pengambilan data, pengolahan data, proses eksekusi/ penentuan keputusan, perbaikan atau modifikasi dan eksekusi akhir.

Dalam melaksanakan penelitian, dilakukan pengumpulan data yang dibutuhkan terlebih dahulu. Data yang diperoleh selanjutnya diolah dan dilakukan simulasi dengan bantuan software ETAP 12.6.0 untuk mendapatkan bentuk sistem pentanahan grid yang paling efektif sesuai dengan standar IEEE std 80-2013. Hasil perhitungan tersebut kemudian dilakukan analisis terhadapnya menggunakan Microsoft Excell.

Adapun diagram alir penelitian ini, sebagai berikut :



Gbr.4 Diagram Alir Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

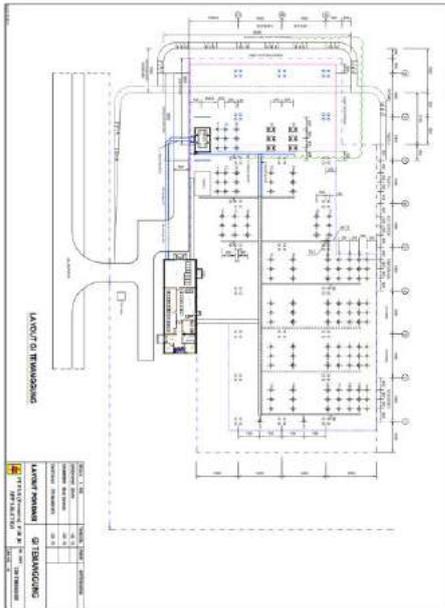
A. Hasil Penelitian

Sistem pentanahan pada gardu induk 150 kV Temanggung menggunakan sistem pentanahan kombinasi antara grid dan rod dengan model pentanahan persegi panjang. Sistem pentanahan yang menggunakan kombinasi antar grid yang ditanam secara

horizontal dan rod yang ditanam secara vertikal merupakan yang paling sering digunakan di berbagai negara. Alasannya adalah karena kombinasi antara grid dan rod akan menyebabkan gradien tegangan pada sistem akan lebih rata serta tahan pentanahan yang lebih kecil.

Sistem pentanahan grid dan rod ini dihubungkan dengan seluruh bagian peralatan yang terbuat dari logam yang berada di atasnya, titik netral transformator, pagar yang mengelilingi gardu induk dan lainnya.

Gardu Induk yang terletak di Desa Mojotengah, Kecamatan Kedu, Kabupaten Temanggung, Jawa Tengah ini memiliki kapasitas sebesar 150 kV. Layout dari sistem pertanahan gardu induk 150 kV Temanggung ditunjukkan pada Gambar 5.



Gbr. 5 Layout Gardu Induk Temanggung

Data-data pentanahan gardu induk 150 kV Temanggung seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Data – data Pentanahan Gardu Induk 150 kV Temanggung

Data	Keterangan
Jenis konduktor grid	Copper Conductor - Hard 1x150 sqm
Jenis konduktor rod	Copper d = 17,33 mm
Kedalaman penanaman grid (h)	0,8 m
Panjang konduktor rod (Lr)	2 m
Tahanan jenis tanah (ρ)	93.24 Ω .m / 187.31 Ω .m dengan kedalaman 2,8 m
Tahanan jenis batu koral (ρ_s)	5000 Ω .m
Ketebalan permukaan batu koral (h_s)	0,2 m
Faktor pembagi arus (S_f)	0,6
Faktor pengurangan (D_f)	1,128 (dengan X/R=10)
Lama waktu gangguan (t_f)	0,35 s
Arus gangguan ($3I_o$)	40000 A

Data diatas merupakan data dari sistem pentanahan dari gardu induk 150 kV Temanggung, dari data tersebut akan disimulasikan pada Software ETAP 12.6.0, untuk mengetahui kondisi sistem pentanahan gardu induk saat ini, dan rancangan sistem pentanahan yang terbaik dengan total panjang konduktor paling sedikit namun tetap dalam kondisi yang aman sesuai dengan standar IEEE Std 80-2013

B. Analisis Data

Pada bagian analisis data ini yang akan dilakukan adalah analisis pada data yang terdapat pada Tabel 1 menggunakan perhitungan manual dengan Microsoft Excel serta simulasi dan perhitungan dengan software ETAP 12.6.0 . Data yang digunakan dalam analisis sistem pentanahan grid gardu induk 150 kV Temanggung menggunakan data yang telah penulis dapatkan dalam data yang telah diambil pada tanggal 1 s.d 14 Desember 2020, data tersebut telah dirangkum pada Tabel 1. Data tersebut digunakan untuk menghitung besarnya faktor reduksi yaitu :

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 h_s + 0,09}$$

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{127,94}{5000}\right)}{2 \cdot 0,2 + 0,09} = 0,82$$

Untuk menghitung besarnya tegangan sentuh yang diizinkan dan tegangan langkah yang diizinkan untuk berat manusia 50 kg digunakan persamaan yaitu

a. Tegangan Sentuh yang Diizinkan

$$E_{t50} = [1000 + 1,5 \rho_s C_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$E_{t50} = [1000 + 1,5 \times 5000 \times 0,82] \frac{0,116}{\sqrt{0,35}} = 1406,4 \text{ V}$$

b. Tegangan Langkah yang Diizinkan

$$E_{s50} = [1000 + 6 \rho_s C_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$E_{s50} = [1000 + 6 \times 5000 \times 0,82] \frac{0,116}{\sqrt{0,35}} = 5017,6 \text{ V}$$

Untuk menghitung besarnya tegangan sentuh yang diizinkan dan tegangan langkah yang diizinkan untuk berat manusia 70 kg digunakan persamaan :

c. Tegangan Sentuh yang diizinkan

$$E_{t70} = [1000 + 1,5 \rho_s C_s] \frac{0,157}{\sqrt{t}}$$

$$E_{t70} = [1000 + 1,5 \times 5000 \times 0,82] \frac{0,157}{\sqrt{0,35}} = 1.897,3 \text{ V}$$

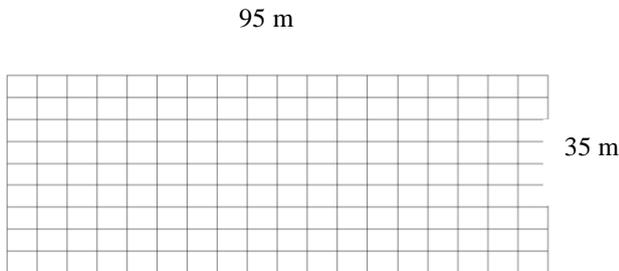
d. Tegangan Langkah yang diizinkan

$$E_{s70} = [1000 + 6 \rho_s C_s] \frac{0,157}{\sqrt{t}}$$

$$E_{s70} = [1000 + 6 \times 5000 \times 0,82] \frac{0,157}{\sqrt{0,35}} = 6.793,4 \text{ V}$$

1) *Kondisi Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 kV Temanggung*

Kondisi dari sistem pentanahan Gardu Induk 150 kV Temanggung adalah berbentuk persegi panjang dengan luas 95 m x 35 m dengan jarak antar grid yang sejajar dengan sumbu x adalah 3,5 m, dan 5 m untuk yang sejajar dengan sumbu y serta konduktor rod disetiap sisi sudutnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3



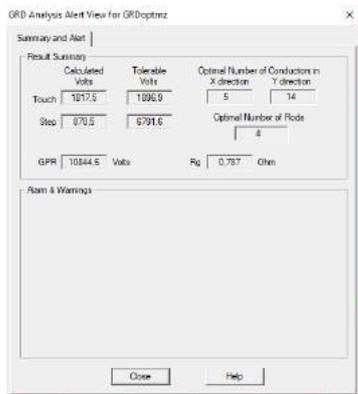
Gbr. 6 Pentanahan Gardu Induk Temanggung dengan Software ETAP 12.6.0

Dari hasil kombinasi grid dan rod diatas maka total Panjang konduktor grid dan rod yang digunakan yaitu :

$$L = L_{grid} + L_{rod} = \{(95 \times 10) + (35 \times 19) + (4 \times 2)\} = 1623 \text{ m}$$

Dari hasil simulasi software ETAP 12.6.0, sistem pentanahan gardu induk 150 kV Temanggung untuk berat badan manusia 50 kg dan 70 kg memiliki rancangan yang baik dan dikategorikan sistem pentanahan yang aman. Sebab besar tegangan sentuh sebenarnya lebih kecil dari tegangan lebih kecil dari tegangan sentuh yang diizinkan (1345,6 V < 1401,6 V untuk berat badan 50 kg dan 1345,6 V < 1896,9 V untuk berat badan 70 kg) serta tegangan langkah sebenarnya juga lebih kecil dari tegangan yang diizinkan (880,2 V < 5018 V untuk berat badan 50 kg dan 880,2 V < 6791,6 V untuk berat badan 70 kg). Untuk tahanan pentanahnya juga sangat baik yaitu 0,759 Ohm dimana sesuai dengan rekomendasi IEEE yaitu lebih kecil dari 1 Ohm.

Optimasi dari sistem pentanahan gardu induk 150 kV temanggung ditunjukkan pada Gambar 7.



Gbr. 7 Hasil Optimasi Grid dan Rod pada ETAP 12.6.0

Dari hasil optimasi maka jumlah grid dan rod yang digunakan menjadi lebih sedikit namun tetap dalam kondisi aman. Sebelum dilakukan optimasi total panjang konduktor grid dan rod yang digunakan adalah 1623 m. Setelah dilakukan optimasi pada software ETAP 12.6.0 maka total panjang konduktor grid dan rod yang digunakan berkurang menjadi 973 m. Hal ini akan menyebabkan biaya yang digunakan menjadi lebih sedikit namun sistem pentanahannya tetap dalam kondisi aman.

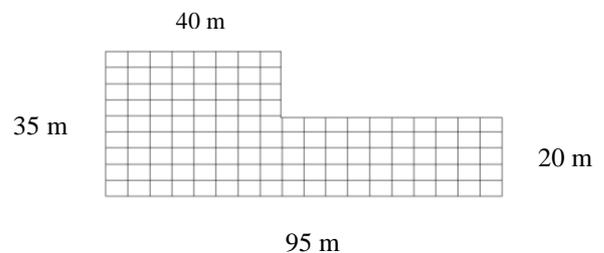
Tabel 2. Hasil Simulasi dari Kondisi dan Optimasi Grid dan Rod

Model Rancangan	Grid		Rod	Tegangan Sentuh yang Sebenarnya (V)	Tegangan Langkah yang Sebenarnya (V)	Tahanan Pentanahan (Ohm)	Total Panjang Konduktor Grid dan Rod (m)	Keterangan
	Sumbu X	Sumbu Y						
Awal	10	19	4	1345,6	880,2	0,759	1623	Aman
Optimasi	5	14	4	1817,5	870,5	0,787	973	Aman

2) *Rancangan Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 kV Temanggung Model L*

Rancangan sistem pentanahan gardu induk dengan model L menurut Thapar dan Gerez [8] seperti pada Gambar 4.12 dengan perbandingan a:b = 2:1 – 1:6, d:c = 4:1 – 1:8 dan besarnya a dan d = 10-80 m.

Rancangan sistem pentanahan model L dengan jarak antar grid sama seperti pada kondisi nyata yaitu 3,5 m untuk yang sejajar dengan sumbu x dan 5 m untuk yang sejajar dengan sumbu y serta konduktor rod disetiap sisi sudutnya yaitu sebanyak 6 batang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gbr. 8 Rancangan Model L pada Software ETAP 12.6.0

Dari hasil simulasi tersebut, rancangan sistem pentanahan gardu induk 150 kv Temanggung model L memiliki rancangan yang kurang baik dan dikategorikan sistem pentanahan yang tidak aman. Rancangan ini aman untuk berat badan 70 kg. Sebab besarnya tegangan sentuh sebenarnya lebih kecil dari tegangan sentuh yang diizinkan (1433,7 V < 1896,9 V) serta tegangan langkah sebenarnya juga lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan (1127 V < 6791,6 V). Namun untuk berat badan 50 kg hasilnya tidak aman. Walaupun besarnya tegangan langkah sebenarnya lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan (1127 V < 5081 V), namun untuk tegangan sentuh sebenarnya hasilnya lebih besar dari tegangan sentuh

yang diizinkan ($1433,7 \text{ V} > 1401,6 \text{ V}$). Hal inilah yang menyebabkan rancangan ini kurang baik dan dikategorikan sistem yang tidak aman. Untuk tahanan bentanahannya baik yaitu $0,87 \text{ Ohm}$ dimana sesuai dengan rekomendasi IEEE Std 80-2000 yaitu lebih kecil 1 Ohm . Dengan demikian secara keseluruhan model L ini tidak memenuhi syarat aman dari suatu sistem pentanahan jika digunakan pada gardu induk 150 kV Temanggung.

Rancangan ini haruslah dimodifikasi lagi agar memenuhi syarat aman dari suatu sistem pentanahan. Salah satu cara agar sistem pentanahan menjadi lebih aman adalah dengan merubah ukuran a dan d dari rancangan model L tersebut namun panjang dan lebar utama (e dan f) tetap yaitu 95 m dan 35 m . Menurut Thapar dan Gerez, ukuran a dan d adalah berkisar $10 - 80 \text{ m}$.

Hasil simulasi ETAP dari kombinasi yang aman ditabulasi dan diurut berdasarkan total panjang konduktor yang digunakan mulai dari yang paling kecil sampai yang paling besar seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Simulasi dari Rancangan yang Aman

Ukuran (m)				Total Panjang Konduktor (m)	Tegangan Sentuh yang Sebenarnya (V)	Tegangan Langkah yang Sebenarnya (V)	Tegangan Sentuh yang Diizinkan (V)	Tegangan Langkah yang Diizinkan (V)	Tahanan Pentanahan (Ohm)
a	d	e	f						
20	50	95	35	1312	1391,4	1896,9	1401,6	5018	0,851
10	70	95	35	1327	1344,3	1060,8	1401,6	5018	0,832
20	60	95	35	1382	1312,5	1034,7	1401,6	5018	0,817
10	80	95	35	1447	1252	990,5	1401,6	5018	0,794
30	10	95	35	1462	1260,9	1000,6	1401,6	5018	0,801
30	20	95	35	1482	1244,1	987,2	1401,6	5018	0,794
20	70	95	35	1492	1256	992,1	1401,6	5018	0,795
30	30	95	35	1502	1227,6	974,1	1401,6	5018	0,787
20	80	95	35	1522	1202,6	951,1	1401,6	5018	0,774
30	40	95	35	1522	1211,4	961,1	1401,6	5018	0,78
30	50	95	35	1542	1197,1	948,9	1401,6	5018	0,774
30	60	95	35	1557	1181,3	936,1	1401,6	5018	0,767
30	70	95	35	1577	1165,7	923,5	1401,6	5018	0,761
30	80	95	35	1597	1150,3	911	1401,6	5018	0,755

Rancangan model L yang paling ekonomis dan tetap aman dengan panjang $a = 20 \text{ m}$, $d = 50 \text{ m}$, $e = 95 \text{ m}$, dan $f = 35 \text{ m}$, dengan total panjang konduktor yang digunakan adalah 1312 m . Rancangan ini merupakan rancangan dengan total panjang konduktor yang digunakan paling sedikit namun masih tetap dalam kategori aman. Hasil simulasi untuk rancangan tersebut pada Gambar 9.

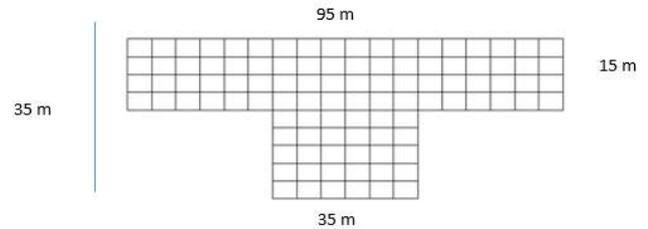


Gbr. 9 Hasil Simulasi Rancangan Grid Model L yang Paling Ekonomis

3) Rancangan Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 kV Temanggung Model T

Rancangan sistem pentanahan gardu induk dengan model T menurut Thapar dan Gerez [8] seperti pada Gambar 4.26 dengan $a : b = 3 : 1 - 1 : 4$, $a : d = 1 : 1 - 1 : 2$, $d : c = 1 : 1 = 1 : 5$ dan besarnya a dan d adalah $5 \text{ m} - 100 \text{ m}$.

Rancangan sistem pentanahan model T dengan jarak antar grid yang sama seperti kondisi yang ada yaitu $3,5 \text{ m}$ untuk yang sejajar dengan sumbu x, dan 5 m untuk yang sejajar dengan sumbu y serta konduktor rod disetiap sisi sudutnya yaitu sebanyak 8 batang ditunjukkan pada Gambar 10.



Gbr. 10 Rancangan Model T pada Software ETAP 12.6.0

Dari hasil simulasi pada Software ETAP 12.6.0, rancangan sistem pentanahan gardu induk 150 kv Temanggung model T juga memiliki rancangan yang kurang baik dan dikategorikan pada sistem pentanahan yang tidak aman. Rancangan ini aman untuk berat badan 70 kg , karena besarnya tegangan sentuh sebenarnya lebih kecil dari tegangan sentuh yang diizinkan ($1505,1 \text{ V} < 1896,9 \text{ V}$) serta tegangan langkah yang sebenarnya juga lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan ($1156,8 \text{ V} < 6791,6 \text{ V}$). Namun untuk berat badan 50 kg hasilnya tidak aman. Walaupun besarnya tegangan langkah yang sebenarnya lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan ($1156,8 \text{ V} < 5018 \text{ V}$), namun untuk tegangan sentuh yang sebenarnya hasilnya lebih besar dari tegangan sentuh yang diizinkan ($1505,1 \text{ V} > 1401,6$). Hal inilah yang menyebabkan rancangan ini kurang baik dan dikategorikan sistem yang tidak aman. Untuk tahanan pentanahannya cukup baik yaitu $0,95 \text{ Ohm}$ dimana sesuai dengan standar IEEE Std 80-2000 yaitu lebih kecil dari 1 Ohm . Dengan demikian secara keseluruhan hasil dari rancangan model T ini tidak memenuhi syarat aman dari suatu sistem pentanahan.

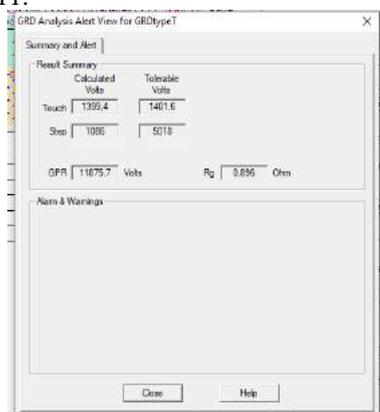
Rancangan ini harus di modifikasi lagi agar dapat memenuhi syarat aman dari suatu sistem pentanahan. salah satu cara agar pentanahan menjadi lebih aman adalah dengan merubah a dan d dari rancangan model T tersebut namun panjang dan lebar utama (e dan f) tetap yaitu 95 m dan 35 m . Menurut Thapar dan Gerez, ukuran a dan d adalah berkisar $5 - 100 \text{ m}$.

Hasil simulasi pada ETAP 12.6.0 dari kombinasi yang aman telah ditabulasi dan diurut berdasarkan total panjang konduktor yang digunakan mulai dari yang terkecil sampai yang terbesar, tegangan sentuh dan tegangan langkah yang sebenarnya, tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diizinkan dan tahanan pentanahannya seperti pada Tabel 4

Tabel 4. Hasil Simulasi dari Rancangan Aman

Ukuran (m)				Total Panjang Konduktor (m)	Tegangan Sentuh yang Sebenarnya (V)	Tegangan Langkah yang Sebenarnya (V)	Tegangan Sentuh yang Diizinkan (V)	Tegangan Langkah yang Diizinkan (V)	Tahanan Pentanahan (Ohm)
a	d	e	f						
20	30	95	35	1191	1399,4	1086	1401,6	5018	0,896
25	10	95	35	1216	1373,1	1065,7	1401,6	5018	0,873
15	50	95	35	1246	1361,7	1056,7	1401,6	5018	0,88
25	20	95	35	1266	1330	1035,6	1401,6	5018	0,855
10	60	95	35	1271	1342,3	1042,3	1401,6	5018	0,875
20	40	95	35	1301	1337,3	1042	1401,6	5018	0,866
5	70	95	35	1311	1300,9	1008,4	1401,6	5018	0,854
25	30	95	35	1316	1288,8	1006,4	1401,6	5018	0,838
20	50	95	35	1331	1285,3	1002,4	1401,6	5018	0,841
15	60	95	35	1336	1283,3	1000,2	1401,6	5018	0,845
25	40	95	35	1366	1249,5	978	1401,6	5018	0,821
10	70	95	35	1381	1248,4	973,7	1401,6	5018	0,832
20	60	95	35	1401	1229,3	961,3	1401,6	5018	0,817
25	50	95	35	1416	1216	952,2	1401,6	5018	0,807
15	70	95	35	1426	1211	946,6	1401,6	5018	0,813
5	80	95	35	1451	1189,9	927,3	1401,6	5018	0,806
25	60	95	35	1466	1179,6	925,3	1401,6	5018	0,792
30	10	95	35	1466	1197,3	947,7	1401,6	5018	0,8
20	70	95	35	1471	1176,5	921,8	1401,6	5018	0,795
30	20	95	35	1486	1181,4	935,2	1401,6	5018	0,793
10	80	95	35	1491	1163	910,6	1401,6	5018	0,794
30	30	95	35	1506	1165,8	922,8	1401,6	5018	0,787
25	70	95	35	1516	1144,8	899,2	1401,6	5018	0,778
15	80	95	35	1516	1143,9	895,7	1401,6	5018	0,784
30	40	95	35	1526	1150,4	910,4	1401,6	5018	0,78
20	80	95	35	1541	1126,7	883,9	1401,6	5018	0,774

Rancangan model T yang paling ekonomis namun masih dalam kategori aman dengan ukuran e = 95 m, f = 35 m, a = 20 m dan d = 30 m dengan total panjang konduktor yang digunakan adalah 1190 m. Rancangan ini merupakan rancangan dengan total panjang konduktor paling sedikit namun masih tetap dalam kategori sistem yang aman karena tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya lebih kecil dari tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diizinkan. Hasil tampilan simulasi untuk rancangan tersebut ditunjukkan pada Gambar 11.



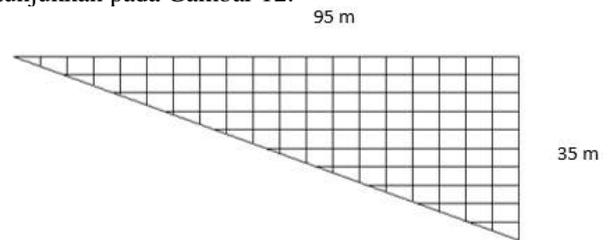
Gbr. 11 Hasil Simulasi Rancangan Grid Model T yang Paling Ekonomis

4) Rancangan Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 kV Temanggung Model Segitiga

Rancangan sistem pentanahan gardu induk dengan model segitiga menurut Thapar dan Gerez [8] seperti pada Gambar 4.40 dengan perbandingan f : e = 1:1 – 1:4, f = 20 m – 100 m

Rancangan sistem pentanahan gardu induk 150 kV Temanggung dengan model segitiga dengan jarak antar grid yang sama seperti kondisi yaitu 3,5 m untuk yang sejajar

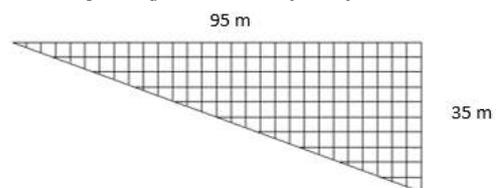
dengan sumbu x, dan 5 m untuk yang sejajar dengan sumbu y serta konduktor rod di setiap sudutnya yaitu sebanyak 3 batang ditunjukkan pada Gambar 12.



Gbr. 12 Rancangan Model Segitiga pada Software ETAP 12.6.0

Dari hasil simulasi software ETAP 12.6.0, rancangan sistem pentanahan gardu induk 150 kV Temanggung model segitiga memiliki rancangan yang kurang baik dan dikategorikan sistem pentanahan yang tidak aman. Rancangan ini aman untuk berat badan 70 kg , sebab besarnya tegangan sentuh sebenarnya lebih kecil dari tegangan sentuh yang diizinkan (1634 V < 1896,4 V) serta tegangan langkah yang sebenarnya juga lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan (1267 V < 6789,3 V) . Namun untuk berat badan 50 kg hasilnya tidak aman. Walaupun besarnya tegangan langkah yang sebenarnya lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan (1267 V < 5016,3 V), namun untuk tegangan sentuh yang sebenarnya hasilnya lebih besar dari tegangan sentuh yang diizinkan (1634 V > 1401,1 V). Hal inilah yang menyebabkan rancangan ini kurang baik dan dikategorikan sistem tidak aman. Untuk tahanan pentanahnya cukup baik yaitu 0,967 Ohm dimana sesuai dengan rekomendasi IEEE Std 2000 yaitu lebih kecil dari 1 Ohm. Dengan demikian secara keseluruhan hasil dari rancangan model segitiga ini tidak memenuhi syarat aman dari suatu sistem pentanahan.

Rancangan ini haruslah dimodifikasi lagi agar memenuhi syarat aman dari suatu sistem pentanahan. Salah satu cara agar sistem pentanahan menjadi lebih aman adalah dengan memperkecil jarak antar grid yaitu antar grid yang sejajar dengan sumbu y menjadi 2,5 m seperti pada Gambar 13.



Gbr. 13 Modifikasi Rancangan Model Segitiga pada Software ETAP 12.6.0

Dari hasil modifikasi tersebut sistem pentanahan sudah dalam kategori aman. Sebab besarnya tegangan sentuh yang sebenarnya lebih kecil dari tegangan sentuh yang diizinkan (1386,3 V < 1401,1 V untuk berat badan 50 kg dan 1386,3 V < 1896,4 V) serta tegangan langkah yang sebenarnya juga lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan (1326,1 V < 5016,3 V untuk berat badan 50 kg dan 1326,1 V < 6789,3 V untuk berat badan 70 kg). Namun hal ini tentu membutuhkan biaya yang lebih besar sebab konduktor grid nya bertambah sehingga total panjang konduktor yang digunakan menjadi 971 m

Dari hasil analisis pada rancangan segitiga, dapat dilakukan optimasi, dengan hasil analisis optimasi yaitu jumlah grid dan rod yang digunakan menjadi lebih banyak namun tetap dalam kondisi menjadi lebih aman karena tegangan sentuh sebenarnya berkurang. Sebelum dilakukan optimasi tegangan sentuh sebenarnya pada rancangan yang dimodifikasi adalah 1386,3 V. Setelah optimasi tegangan sentuh sebenarnya berkurang menjadi 1285,1 V. Namun Namun hal ini tentu membutuhkan biaya yang lebih besar sebab konduktor grid nya bertambah sehingga total panjang konduktor yang digunakan menjadi 1055,5 m. Hasil dari ketiga rancangan untuk model segitiga tersebut seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Grid Model Segitiga

Model Segitiga	Grid		Rod	Tegangan Sentuh yang Sebenarnya (V)	Tegangan Langkah yang Sebenarnya (V)	Tahanan Pentanahan (Ohm)	Total Panjang Konduktor Grid dan Rod (m)	Keterangan
	Sumbu X	Sumbu Y						
Rancangan Awal	10	19	3	1634	1267	0,967	813,5	Tidak Aman
Rancangan Modifikasi	10	28	3	1386,3	1326,1	0,955	971	Aman
Optimasi grid dan rod	11	30	4	1285,1	1351,8	0,949	1055,5	Aman

C. Pembahasan

Pada bagian pembahasan ini, membahas mengenai perbandingan antara kondisi sistem pentanahan gardu induk 150 kV Temanggung dengan rancangan model L, T dan segitiga untuk jarak antar grid yang sama ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan antara kondisi sistem pentanahan yang ada dengan rancangan model L, T dan segitiga

Model Segitiga	Grid		Rod	Tegangan Sentuh yang Sebenarnya (V)	Tegangan Langkah yang Sebenarnya (V)	Tahanan Pentanahan (Ohm)	Total Panjang Konduktor Grid dan Rod (m)	Keterangan
	Sumbu X	Sumbu Y						
Kondisi Awal	10	19	4	1345,6	880,2	0,759	1623	Aman
L	10	19	6	1391,4	1095	0,851	1312	Aman
T	10	19	8	1399,4	1086	0,896	1190	Aman
Segitiga	10	19	3	1634	1267	0,967	813,5	Tidak Aman

Dari hasil perbandingan pada tabel maka sistem pentanahan yang paling ekonomis namun tetap aman adalah rancangan model T karena total panjang konduktor yang digunakan paling sedikit namun tetap memenuhi syarat aman suatu sistem pentanahan gardu induk yaitu tegangan sentuh yang sebenarnya harus lebih kecil dari tegangan sentuh yang diizinkan dan tegangan langkah yang sebenarnya juga harus lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan.

Rancangan model T dengan ukuran $e = 95$ m, $f = 35$ m, $a = 20$ m dan $d = 30$ m dengan total panjang konduktor yang digunakan adalah 1190 m. Pada rancangan ini besarnya tegangan sentuh sebenarnya lebih kecil dari tegangan sentuh yang diizinkan yaitu $1399,4$ V < $1401,6$ V untuk berat badan 50 kg dan $1399,4$ V < $1896,9$ V untuk berat badan 70 kg serta tegangan langkah sebenarnya juga lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan yaitu 1086 V < 5018 V untuk berat badan 50 kg dan 1086 V < $6791,6$ V untuk berat badan 70 kg. Untuk tahanan pentanahannya juga cukup baik yaitu $0,896$ Ohm dimana sesuai dengan rekomendasi IEEE Std 2000 yaitu lebih kecil dari 1 Ohm.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan terkait sistem pentanahan gardu induk 150 kV Temanggung sebagai berikut :

- 1) Sistem pentanahan gardu induk 150 kV Temanggung kombinasi antara konduktor grid dan rod nya memenuhi persyaratan berdasarkan standar IEEE Std 80-2000 dan dikategorikan sebagai sistem pentanahan yang aman.
- 2) Tegangan sentuh yang sebenarnya lebih kecil dari tegangan sentuh yang diizinkan yaitu $1345,6$ V < $1401,6$ V untuk berat badan 50 kg dan $1345,6$ V < $1896,9$ V untuk berat badan 70 kg. Serta besar tegangan langkah sebenarnya juga lebih kecil dari tegangan yang diizinkan yaitu $880,2$ V < 5018 V untuk berat badan 50 kg dan $880,2$ V < $6791,6$ V untuk berat badan 70 kg. Besar tahanan pentanahnya juga baik yaitu $0,759$ Ohm dimana sesuai dengan rekomendasi IEEE yaitu lebih kecil dari 1 Ohm.
- 3) Rancangan model L memberikan ukuran paling ekonomis bila ukuran $a = 20$ m dan $d = 50$ m dengan total panjang konduktor yang digunakan adalah 1312 m
- 4) Rancangan model T memberikan ukuran paling ekonomis bila ukuran $a = 20$ m dan $d = 30$ m dengan total panjang konduktor yang digunakan adalah 1190 m
- 5) Rancangan model segitiga dikategorikan sebagai sistem yang tidak aman. Karena besarnya tegangan sentuh sebenarnya lebih besar dari tegangan sentuh yang diizinkan untuk berat badan 50 kg
- 6) Rancangan model T yang terbaik dibandingkan dengan rancangan model lainnya dari segi ekonomis, karena total panjang konduktor yang digunakan merupakan yang paling sedikit namun masih tetap dalam kondisi yang aman.

B. Saran

Pada penelitian ini telah dilakukan sesuai dengan prosedur ilmiah namun masih memiliki keterbatasan, sehingga peneliti memberikan saran kepada peneliti selanjutnya agar dapat memperbaiki penelitian dan didapatkan hasil penelitian yang lebih baik, adapun saran yang dapat diberikan untuk hasil yang lebih baik, penelitian selanjutnya bisa menggunakan metode Unequally Space Grid dimana dalam metode tersebut jarak antar konduktor tidaklah sama sehingga akan mempengaruhi hasil akhirnya.

REFERENSI

- [1] Aydiner, M. G. (2009). Grouding Design Analysis. February, 1–118.
- [2] Markovic, D Miroslav. “Grounding Grid Design In Electric Power Systems”. TESLA Institute.2000
- [3] Guclu, Mustafa Aydiner. “Grounding Design Analysis”. Middle East Technical University. 2012
- [4] Gönen, Turan. “Electric Power Distribution EngineeringThird Edition.” New York USA: CRC Press Taylor & Francis Ltd. 2014
- [5] IEEE Std 80. (2013). Guide for Safety In AC Substation Grounding. In *Group* (Vol. 2013, Issue February). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.91902>
- [6] Furqon, Z. (2013). Analisis Pengaruh Pemasangan Grounding Kabel Tanah 20 Kv Di Gardu Hubung Sarangan Pln Rayon Malang Kota Untuk Menurunkan Gangguan Penyulang Menggunakan E-Tap 12.6. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- [7] Kasiram, Moh. (2010) Metodologi penelitian: Kualitatif–Kuantitatif. UIN-Maliki Press, Malang. ISBN 978-602-958-280-2
- [8] Thapar, B., Gerez, V., Balakrishnan, A., & Blank, D. A. (1991). Evaluation of Ground Resistance of a Grounding Grid of Any Shape. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(2), 640–647. <https://doi.org/10.1109/61.131122>