

# Evaluasi Pengaruh Perubahan Konduktor Rod Terhadap Resistansi Pentanahan GITET 500 KV Ungaran

Slamet Muhsinin, Muhamad Haddin, Ida Widihastuti  
Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang  
Jl. Kaligawe Raya Km. 4, Semarang 50112  
e-mail: sinin95@std.unissula.ac.id

**Abstrak**—Gangguan fasa ke tanah menyebabkan mengalirnya arus gangguan secara langsung ke tanah, yang menimbulkan gradien tegangan. Hal ini membahayakan keselamatan manusia di area *switchyard*. Solusinya adalah dibuat sistem pentanahan peralatan. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai resistansi pentanahan adalah konduktor *rod*. Penelitian ini membahas tentang evaluasi pengaruh perubahan konduktor *rod* terhadap resistansi pentanahan Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran. Fokus penelitian dillakukan dengan mengubah jumlah dan panjang konduktor *rod* dan melihat pengaruhnya terhadap resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *Ground Potential Rise (GPR)*. Model ditetapkan sebagai sistem pentanahan *grid-rod*. Parameter yang ditentukan meliputi: luas area, panjang konduktor, resistivitas tanah, kedalaman penanaman konduktor, panjang dan lebar konduktor *grid*, serta jumlah dan panjang tiap batang *rod*. Hasil menunjukkan bahwa semakin panjang konduktor *rod*, maka semakin kecil resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, serta *GPR*. Hal ini dibuktikan pada contoh penambahan jumlah konduktor *rod* dari semula 221 menjadi 321 buah, nilai resistansi pentanahan yang semula  $0,2274 \Omega$  menjadi  $0,2272 \Omega$ , tegangan sentuh sebenarnya yang semula 57,94 volt menjadi 56,26 volt, tegangan langkah sebenarnya yang semula 30,96 volt menjadi 30,06 volt, dan *GPR* yang semula 448,07 volt menjadi 447,67 volt. Begitu pula untuk hasil dari penambahan panjang konduktor *rod* tiap batang. Hasil terbaik ada pada modifikasi panjang *rod* tiap batang menjadi 5 meter dari yang semula 3 meter, dengan resistansi pentanahan  $0,2271 \Omega$ , tegangan sentuh sebenarnya 55,49 volt, tegangan langkah sebenarnya 29,65 volt, dan *GPR* 447,48 volt.

Kata kunci : *Konduktor Rod, Resistansi Pentanahan, GITET 500 KV Ungaran, Tegangan Sentuh, Tegangan Langkah*

**Abstract**—A phase-to-ground fault causes a fault current to flow directly to ground, which creates a voltage gradient. This endangers human safety in the switchyard area. The solution is to create an equipment grounding system. One of the factors that affect the value of grounding resistance is the rod conductor. This study discusses the evaluation of the effect of changing rod conductors on the grounding resistance of the 500 KV Ungaran Extra High Voltage Substation (GITET). The focus of the research was carried out by changing the number and length of rod conductors and looking at their effect on grounding resistance, touch voltage and actual step voltage, and Ground Potential rise (GPR). The model is set as a grid-rod grounding system. Parameters determined include: area, conductor length, soil resistivity, conductor embedding depth, length and width of the grid conductor, as well as the number and length of each rod. The results show that the longer the rod conductor, the smaller the ground resistance, touch voltage and actual step voltage, as well as the GPR. This is evidenced in the example of adding the number of rod conductors from the original 221 to 321 units, the grounding resistance value which was originally 0.2274 to 0.2272 , the actual touch voltage which was originally 57.94 volts to 56.26 volts, the actual step voltage which from 30.96 volts to 30.06 volts, and GPR which was originally 448.07 volts to 447.67 volts. Likewise for the results of increasing the length of the rod conductor for each rod. The best results are in the modification of the length of each rod to 5 meters from the original 3 meters, with a grounding resistance of 0.2271 , the actual touch voltage is 55.49 volts, the actual step voltage is 29.65 volts, and the GPR is 447.48 volts.

Key words : *Rod Conductor, Grounding Resistance, GITET 500 KV Ungaran, Touch Voltage, Step Voltage*

## I. PENDAHULUAN

Sistem interkoneksi tenaga listrik di Jawa tersusun atas beberapa pusat pembangkit tenaga listrik dan beberapa Gardu Induk (GI) yang terhubung melalui saluran transmisi, yang akan tersalur ke konsumen melewati saluran distribusi.

Gardu Induk terdiri atas Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV dan Gardu Induk Tegangan Tinggi (GITT) 150 KV. GITET 500 KV Ungaran termasuk dalam salah satu GITET yang tersusun dalam sistem interkoneksi tersebut [1]. Untuk memperoleh standar keamanan yang memadai dalam sistem pentanahan Gardu Induk, diperlukan

batasan parameter pentanahan sesuai *IEEE/ANSI Std 80/2013* [2], yaitu nilai resistansi pentanahan  $\leq 1 \Omega$ , tegangan sentuh  $<$  tegangan sentuh yang diizinkan, tegangan langkah  $<$  tegangan langkah yang diizinkan, *ground potential rise*  $<$  tegangan langkah yang diizinkan.

GITET 500 KV Ungaran memiliki luas area sistem pentanahan  $41280 \text{ m}^2$ , dengan sistem pentanahan yang dipakai adalah model *grid-rod* [3]. Luas area dan pemodelan pentanahan metode *grid-rod* ini dapat mempengaruhi berapa banyak dan berapa panjang konduktor *rod* tiap batang yang digunakan dalam sistem pentanahannya. Terlebih lagi, terdapat banyak komponen utama yang terpasang pada GITET 500 KV Ungaran. Konfigurasi ini mempengaruhi besarnya nilai resistansi pentanahan, tegangan langkah sebenarnya, tegangan sentuh sebenarnya, dan *Ground Potential Rise (GPR)* pada GITET 500 KV Ungaran.

Permasalahan yang terjadi adalah gangguan fasa ke tanah menyebabkan mengalirnya arus gangguan secara langsung ke tanah. Arus gangguan ini dapat mengalir ke peralatan-peralatan yang terbuat dari metal dan dapat mengalir ke piranti pentanahan. Arus gangguan tersebut dapat menimbulkan gradien tegangan di antara peralatan dengan peralatan, peralatan dengan tanah, dan tegangan pada permukaan tanah. Hal ini berakibat membahayakan keselamatan manusia di area *switchyard* [4]. Solusinya adalah dibuat sistem pentanahan peralatan. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai resistansi pentanahan adalah konduktor *rod*. Penelitian ini membahas tentang evaluasi pengaruh perubahan konduktor *rod* terhadap resistansi pentanahan Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran untuk memastikan keamanannya.

## II. STUDI PUSTAKA

### A. Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian terdahulu yang pernah dilakukan pada sistem pentanahan adalah sebagai berikut:

Analisa Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling dengan Konstruksi *Grid* (Kisi-kisi) [5]. Penelitian ini membahas tentang dua metode perhitungan pentanahan *grid*, yaitu perhitungan tanpa batang pentanahan dan dengan batang pentanahan. Nilai resistansi *grid* tanpa batang pentanahan adalah  $0,47 \Omega$ , sedangkan jika dengan batang pentanahan nilainya menjadi  $0,18 \Omega$ . Hasilnya, solusi modifikasi berupa penambahan batang elektroda mampu menghasilkan nilai resistansi yang lebih rendah.

Pengaruh Panjang Elektroda, Resistivitas Tanah, dan Frekuensi Arus Petir Terhadap Impedansi Pentanahan Elektroda Batang [6]. Penelitian ini membahas tentang bagaimana dampak yang terjadi pada impedansi pentanahan suatu elektroda batang melalui media simulasi perubahan panjang elektroda pentanahan, tahanan jenis tanah, arus puncak petir, dan frekuensi arus petir. Didapatkan hasil berupa penurunan nilai impedansi pentanahan ketika setiap panjang elektroda ditambah  $0,5 \text{ m}$  adalah  $18,65\%$  pada resistivitas tanah  $50 \Omega\text{m}$ , dan  $37,23\%$  pada resistivitas tanah  $100 \Omega\text{m}$ . Sehingga impedansi tanah semakin kecil jika elektroda semakin panjang dan resistivitas tanah semakin kecil.

Analisa Dampak Perubahan Jarak Antar Konduktor dan Kedalaman pada Sistem Pentanahan *Grid-Rod* Berbasis *IEEE Std 80-2000* [7]. Meneliti tentang nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh, dan tegangan langkah yang dihasilkan jika jarak antar konduktor dan kedalaman sistem pentanahan dimodifikasi. Penelitian dilakukan dengan mengubah jarak antar konduktor dan kedalaman, kemudian menghitung kembali resistansi pentanahan, tegangan sentuh, dan tegangan langkah menggunakan *matlab*. Hasilnya, resistansi pentanahan berada di  $0,3 \Omega$ , dimana masih dinilai aman karena di bawah spesifikasi, yaitu  $R \leq 1\Omega$ . Begitu juga untuk tegangan sentuhnya sebesar  $59,21$  volt dan tegangan langkahnya  $57,39$  volt, yang keduanya masih dalam batas aman. Sehingga, semakin rapat jarak antar konduktor, maka nilai resistansi pentanahan dan tegangan sentuh semakin menurun, sementara tegangan langkah meningkat. Tegangan sentuh dan tegangan langkah akan semakin kecil nilainya jika penanaman konduktor semakin dalam.

### B. Dasar Teori

Sistem pentanahan *grid-rod* merupakan gabungan antara sistem pentanahan *grid* dan sistem pentanahan *rod*, yaitu dengan menanamkan batang sejajar di permukaan tanah yang terhubung satu sama lain, kemudian setiap titik ditanami elektroda *rod* yang tegak lurus di permukaan tanah. Sistem pentanahan ini adalah yang banyak digunakan dalam Gardu Induk, karena dinilai lebih efektif untuk mengurangi gangguan yang terjadi pada Gardu Induk [7]. Resistansi pentanahan ( $R_g$ ) *grid-rod* dipengaruhi oleh resistansi jenis rata-rata tanah ( $\rho$ ), jumlah total panjang konduktor ( $L$ ), kedalaman penanaman *grid* ( $h$ ), dan luas area pentanahan *grid* ( $A$ ), seperti ditunjukkan persamaan (1).

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (1)$$

Jumlah total panjang konduktor ( $L$ ) adalah jumlah panjang konduktor *grid* ( $L_c$ ) dan panjang konduktor *rod* ( $L_r$ ), seperti pada persamaan (2).

$$L = L_c + L_r \quad (2)$$

Panjang konduktor *grid* ditunjukkan pada persamaan (3), dengan dipengaruhi panjang konduktor *grid* ( $L_1$ ) dan lebarnya ( $L_2$ ), serta jumlah konduktor paralel sisi panjang ( $n$ ) dan sisi lebar ( $m$ ).

$$L_c = L_1 n + L_2 m \quad (3)$$

Panjang konduktor *rod* dipengaruhi jumlah konduktor *rod* ( $Q$ ) dan panjang konduktor *rod* tiap batang ( $P$ ), seperti pada persamaan (4).

$$L_r = Q \times P \quad (4)$$

Tegangan sentuh sebenarnya merupakan tegangan pada peralatan yang diketanahkan ke dalam daerah yang membentuk konduktor kisi-kisi selama gangguan tanah [8]. Besarnya tegangan sentuh sebenarnya tergantung pada

faktor geometrik ( $K_m$ ), faktor koreksi ( $K_i$ ), resistansi jenis tanah ( $\rho$ ), dan arus *grid* maksimum ( $I_G$ ), dengan panjang konduktor *grid* ( $L_c$ ) dan panjang konduktor *rod* ( $L_r$ ) seperti pada persamaan (5).

$$E_{tm} = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_c + 1,15 L_r} \quad (5)$$

Tegangan langkah sebenarnya merupakan tegangan yang timbul di antara dua kaki orang yang sedang berdiri di atas tanah yang sedang dialiri oleh arus gangguan ke tanah [3]. Besarnya tegangan langkah sebenarnya, tergantung pada resistansi jenis tanah ( $\rho$ ), konstanta tegangan langkah ( $K_s$ ), Faktor koreksi ( $K_i$ ), arus *grid* maksumum ( $I_G$ ), serta panjang konduktor *grid* ( $L_c$ ) dan panjang konduktor *rod* ( $L_r$ ), yang ditunjukkan pada persamaan (6).

$$E_{sm} = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_c + 1,15 L_r} \quad (6)$$

*Ground Potential Rise (GPR)* merupakan tegangan maksimum yang mampu dicapai oleh suatu pentanahan *grid* terhadap suatu titik pentanahan yang diasumsikan potensial atau voltase yang sama dengan potensial bumi. Besarnya *GPR* tergantung dari besar arus *grid* maksimum ( $I_G$ ) dan resistansi pentanahan ( $R_g$ ), yang ditunjukkan pada persamaan (7).

$$GPR = R_g I_G \quad (7)$$

Tegangan sentuh dapat membahayakan keselamatan manusia, maka tegangan sentuh yang tinggi harus diberi proteksi. Persyaratan kehandalan Gardu Induk menetapkan bahwa tegangan sentuh sebenarnya harus berada di bawah tegangan sentuh yang diizinkan, untuk memastikan keamanan manusia yang ada di area *switchyard* dari *ventricular fibrillation*, yakni suatu kondisi abnormal jantung yang berujung pada kematian [7]. Tegangan sentuh yang diizinkan ( $E_t$ ) ditunjukkan pada persamaan (8), dimana terdapat resistansi tubuh manusia ( $R_k$ ), resistansi kontak ke tanah dari satu kaki pada tanah yang diberi lapisan korai 10 cm ( $R_f$ ), dan besar arus yang melewati badan manusia ( $I_k$ ).

$$E_t = \left( R_k + \frac{R_f}{2} \right) I_k \quad (8)$$

Tegangan sentuh yang diizinkan untuk manusia dengan massa 50 kg ( $E_{t50}$ ) ditunjukkan pada persamaan (9), dengan terdapat tahanan jenis tanah di sekitar permukaan tanah ( $\rho_s$ ), faktor reduksi ( $C_s$ ), dan lama gangguan tanah ( $t$ ).

$$E_{t50} = \left( 1000 + \frac{3\rho_s}{2} C_s \right) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (9)$$

Tegangan langkah ( $E_s$ ) yaitu ketika seseorang berdiri di atas tanah kemudian terdapat tegangan yang timbul di antara dua kaki seseorang tersebut selama sedang terjadi gangguan [7]. Tegangan langkah sebenarnya dan *GPR* harus berada di bawah tegangan langkah yang diizinkan, untuk memastikan keamanan manusia yang ada di area *switchyard* dari *ventricular fibrillation*. Besarnya tegangan langkah

yang diizinkan ( $E_s$ ) dipengaruhi oleh besarnya resistansi yang mengalir pada badan seseorang ( $R_k$ ), resistansi kontak ke tanah dari satu kaki ( $R_f$ ), dan besarnya arus *fibrilasi* ( $I_k$ ), seperti pada persamaan (10).

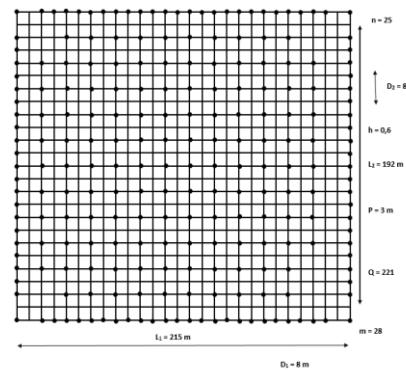
$$E_s = (R_k + 2R_f) I_k \quad (10)$$

Tegangan langkah yang diizinkan untuk manusia dengan massa 50 kg ( $E_{t50}$ ) ditunjukkan pada persamaan (11), dengan dipengaruhi lama gangguan tanah ( $t$ ).

$$E_{s50} = (R_k + 6\rho_s C_s) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (11)$$

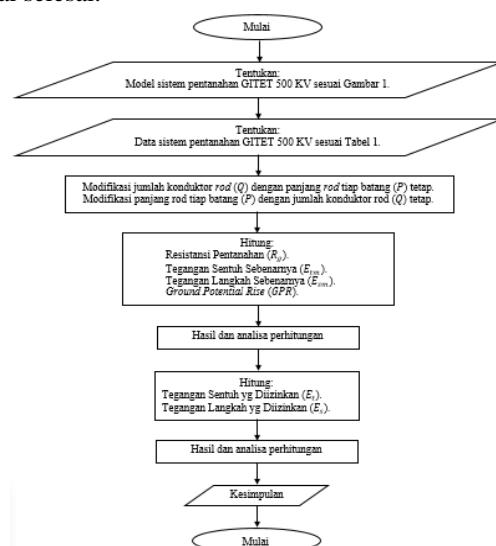
### III. METODE

Model sistem pentanahan *grid-rod* yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan nilai-nilai pentanahan yang akan dicari, ditunjukkan oleh Gambar 1. Parameter yang ditentukan adalah jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang. Penelitian dilakukan di Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran, yang beralamat di Jl. Jend. Sudirman No. 54A, Ungaran, Semarang, Jawa Tengah 50519.



Gambar 1. Model Penelitian [3]

Tahapan penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 2, sebagai rangkaian proses penelitian dari tahapan mulai sampai selesai.



Gambar 2. Diagram alir (flowchart) tahapan penelitian

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 merupakan data yang diperlukan untuk melakukan perhitungan dan analisa sistem pentanahan Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran untuk memperoleh beberapa nilai yang dicari. Mengacu pada Gambar 1 dan Tabel 1, dilakukan simulasi dengan memodifikasi panjang konduktor *rod* tiap batang (*P*) dan jumlah konduktor *rod* (*Q*).

Tabel 1. Data-data sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran [3]

No.	Deskripsi	Nilai	Satuan
1.	Resistansi pentanahan	0,3	Ohm
2.	Arus hubung singkat	3.284	Ampere
3.	Lama waktu gangguan hubung singkat	0,075	Detik
4.	Resistansi jenis rata-rata tanah	100	Ohm
5.	Jumlah konduktor <i>rod</i>	221	Buah
6.	Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang	3	Meter
7.	Kedalaman penanaman konduktor	0,6	Meter
8.	Diameter batang pentanahan	0,0127	Meter
9.	Panjang sisi konduktor <i>grid</i>	215	Meter
10.	Lebar sisi konduktor <i>grid</i>	192	Meter
11.	Jarak antar konduktor <i>grid</i>	8	Meter
12.	Ketebalan lapisan batu korral	0,1	Meter

Kemudian mencari nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *GPR* dari data modifikasi sesuai ditunjukkan Tabel 2.

Tabel 2. Pemetaan simulasi perhitungan

No.	Jumlah konduktor <i>rod</i>	Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang
1.	Variabel	Tetap
2.	Tetap	Variabel

Besarnya resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *GPR* akan dicari sesuai dengan jumlah konduktor *rod* dan panjang konduktor *rod* tiap batang yang telah dimodifikasi. Kemudian menentukan nilai mana yang paling baik untuk dapat diaplikasikan pada sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran berdasarkan hasil modifikasi yang telah dilakukan. Setelah didapatkan hasil tersebut, dilakukan perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diizinkan. Nilai-nilai pentanahan hasil modifikasi ini kemudian akan diverifikasi dengan ketentuan-ketentuan yang ada pada IEEE/ANSI Std 80/2013 sebagai tolak ukur keamanan dan kehandalan GITET 500 KV Ungaran.

##### A. Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor Rod

Jumlah konduktor *rod* (*Q*) merupakan jumlah total banyaknya konduktor yang menancap tegak lurus ke dalam tanah, yang menempel di bawah konstruksi *grid*. Simulasi yang akan dilakukan yaitu melakukan perubahan jumlah konduktor *rod* yang akan dibuat semakin sedikit dan semakin banyak dari jumlah *rod* semula. Perubahan ini dilakukan dengan panjang tiap batang *rod* yang masih tetap. Kemudian mencari nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya, tegangan langkah sebenarnya, dan *ground potential rise*.

Perhitungan resistansi pentanahan menghasilkan nilai seperti Tabel 3. Jumlah konduktor *rod* secara bertahap dikurangi dan ditambah sebanyak 50 buah untuk mengetahui pengaruh yang terjadi.

Tabel 3. Perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai resistansi pentanahan

No.	Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah)	Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter)	Nilai resistansi pentanahan ( $\Omega$ )
1.	121	3	0,2277
2.	171	3	0,2276
3.	221	3	0,2274
4.	271	3	0,2273
5.	321	3	0,2272

Selanjutnya untuk lebih mudah melihat perubahan yang terjadi pada resistansi pentanahan, divisualkan oleh grafik pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai resistansi pentanahan

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 3, jika jumlah konduktor *rod* semakin bertambah, maka resistansi pentanahan akan semakin kecil, dan jika jumlah konduktor *rod* semakin berkurang, maka resistansi pentanahan akan semakin besar. Ketika jumlah konduktor *rod* awal sebanyak 221 buah, kemudian dikurangi menjadi 171 buah, resistansi pentanahan mengalami peningkatan sebesar 0,0002  $\Omega$ . Saat jumlah konduktor *rod* disusutkan kembali menjadi 121 buah, resistansi pentanahan kembali naik sebesar 0,0001  $\Omega$ . Untuk mengetahui pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap resistansi pentanahan, dilakukan simulasi kembali dengan memperbanyak jumlah konduktor *rod* menjadi 271 buah. Maka terjadi penurunan resistansi pentanahan sebesar 0,0001  $\Omega$ . Kemudian saat konduktor *rod* ditambah lagi menjadi 321 buah, resistansi pentanahannya kembali mengalami penurunan sebesar 0,0001  $\Omega$ .

Peningkatan dan penurunan nilai resistansi pentanahan ini sangat kecil, yaitu 0,0001 sampai 0,0002  $\Omega$ , dengan hasil perhitungan antara 0,2272 sampai 0,2277  $\Omega$ . Jadi, penambahan dan penyusutan jumlah konduktor *rod* memang berpengaruh terhadap resistansi pentanahan, namun tidak besar dan masih dalam batas aman, dimana nilai tertingginya adalah 0,2277  $\Omega$  dan masih sesuai standar yaitu  $\leq 1 \Omega$ . Pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap besarnya tegangan sentuh sebenarnya diperlihatkan pada Tabel 4 dan Gambar 4.

Tabel 4. Perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya

No.	Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah)	Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter)	Nilai tegangan sentuh sebenarnya (volt)
1.	121	3	59,73
2.	171	3	58,82
3.	221	3	57,94
4.	271	3	57,09
5.	321	3	56,26

Perubahan yang terjadi pada tegangan sentuh sebenarnya, divisualkan oleh grafik pada Gambar 4.

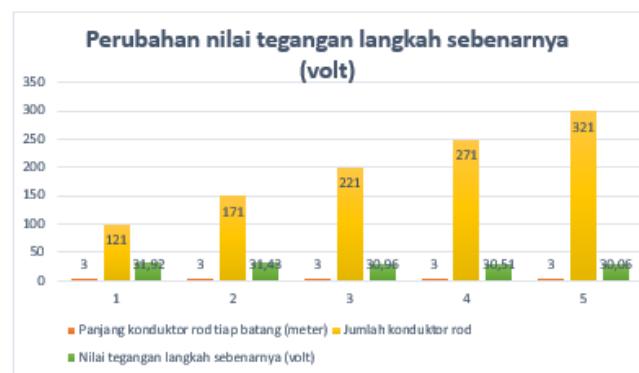
Gambar 4. Grafik perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya

Analisa dari Tabel 4 dan Gambar 4 adalah ketika jumlah konduktor *rod* semakin bertambah, maka tegangan sentuh sebenarnya akan semakin kecil, dan jika jumlah konduktor *rod* semakin berkurang, maka tegangan sentuh sebenarnya akan semakin besar. Saat jumlah konduktor *rod* awal 221 buah dikurangi menjadi 171 buah, tegangan sentuh sebenarnya meningkat 0,88 volt. Saat jumlahnya disusutkan menjadi 121 buah, tegangan sentuh sebenarnya kembali naik sebesar 0,91 volt. Simulasi kembali dilakukan dengan memperbanyak jumlah *rod* menjadi 271 buah, lalu tegangan sentuh sebenarnya menurun sebesar 0,85 volt. Saat jumlah *rod* ditambah menjadi 321 buah, tegangan sentuh sebenarnya menurun kembali sebesar 0,83 volt dari nilai sebelumnya. Terjadi penurunan dan peningkatan tegangan sentuh sebenarnya antara 0,83 sampai 0,91 volt. Jadi, penambahan dan penyusutan jumlah konduktor *rod* berpengaruh terhadap besar kecilnya tegangan langkah sebenarnya, namun tidak terlalu besar, dimana nilai tertingginya adalah 59,73 volt. Pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap tegangan langkah sebenarnya diperlihatkan Tabel 5 dan Gambar 5.

Tabel 5. Perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya

No.	Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah)	Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter)	Nilai tegangan langkah sebenarnya (volt)
1.	121	3	31,92
2.	171	3	31,43
3.	221	3	30,96
4.	271	3	30,51
5.	321	3	30,06

Perubahan yang terjadi pada tegangan langkah sebenarnya, divisualkan oleh grafik pada Gambar 5.

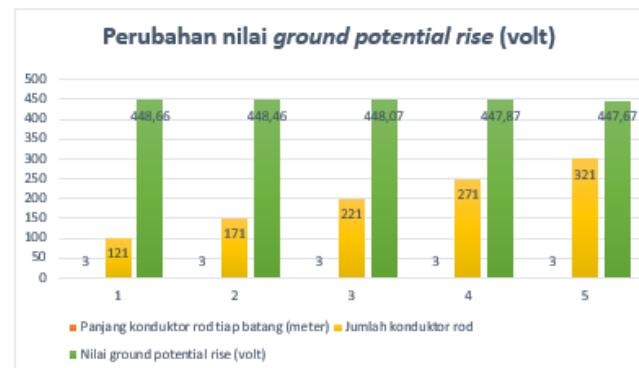
Gambar 5. Grafik perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya

Tabel 5 dan Gambar 5 menunjukkan jika jumlah konduktor *rod* semakin bertambah, maka tegangan langkah sebenarnya akan semakin kecil, begitu pula sebaliknya. Saat jumlah *rod* awal 221 buah dikurangi menjadi 171 buah, tegangan langkah sebenarnya meningkat 0,47 volt. Saat jumlahnya disusutkan menjadi 121 buah, tegangan langkah sebenarnya kembali meningkat 0,49 volt. Ketika jumlah *rod* diperbanyak menjadi 271 buah, terjadi penurunan tegangan langkah sebenarnya sebesar 0,45 volt, lalu ketika jumlah *rod* ditambah lagi menjadi 321 buah, nilai tegangan langkah sebenarnya kembali menurun sebesar 0,45 volt. Terjadi penurunan dan peningkatan tegangan langkah sebenarnya 0,45 volt sampai 0,49 volt. Jadi, penambahan dan pengurangan jumlah *rod* juga berpengaruh terhadap besar kecilnya tegangan langkah sebenarnya, namun tidak terlalu besar, dimana nilai tertingginya adalah 31,92 volt. Pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap *Ground Potential Rise* (*GPR*) diperlihatkan Tabel 6 dan Gambar 6.

Tabel 6. Perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai *ground potential rise*

No.	Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah)	Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter)	Nilai <i>ground potential rise</i> (volt)
1.	121	3	448,66
2.	171	3	448,46
3.	221	3	448,07
4.	271	3	447,87
5.	321	3	447,67

Perubahan pada *GPR*, divisualkan pada Gambar 6.

Gambar 6. Grafik perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai *ground potential rise*

Hasil dari Tabel 6 dan Gambar 6 memperlihatkan ketika jumlah konduktor *rod* semakin bertambah, maka *GPR* akan semakin kecil, dan jika jumlah konduktor *rod* semakin berkurang, maka *GPR* akan semakin besar. Saat jumlah konduktor *rod* awal 221 buah dikurangi menjadi 171 buah, *GPR* meningkat sebesar 0,39 volt. Saat jumlah rod disusutkan menjadi 121 buah, *GPR* kembali meningkat 0,20 volt. Ketika jumlah rod diperbanyak menjadi 271 buah, terjadi penurunan nilai *GPR* sebesar 0,20 volt, lalu ketika jumlah *rod* ditambah lagi menjadi 321 buah, nilai *GPR* kembali menurun sebesar 0,20 volt. Terjadi penurunan dan peningkatan *GPR* antara 0,20 sampai 0,39 volt. Jadi, penambahan dan pengurangan jumlah konduktor *rod* juga berpengaruh terhadap besar kecilnya *GPR*, namun tidak terlalu besar, dimana nilai tertingginya adalah 448,66 volt.

#### B. Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor Rod Tiap Batang

Panjang konduktor *rod* tiap batang (*P*) merupakan panjang konduktor untuk masing-masing batang *rod* yang terletak di bawah rangkaian kisi-kisi *grid* dan menancap tegak lurus ke dalam tanah. Panjang *rod* satu dengan yang lain adalah sama. Simulasi dilakukan dengan mengubah panjang *rod* tiap batang semakin pendek dan panjang dari panjang semula. Perubahan ini dilakukan dengan jumlah *rod* yang dibuat tetap. Kemudian mencari besarnya nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya, tegangan langkah sebenarnya, dan *ground potential rise*. Perhitungan resistansi pentanahan menghasilkan nilai seperti Tabel 7.

Tabel 7. Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai resistansi pentanahan

No.	Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah)	Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter)	Nilai resistansi pentanahan ( $\Omega$ )
1.	221	1	0,2278
2.	221	2	0,2276
3.	221	3	0,2274
4.	221	4	0,2273
5.	221	5	0,2271

Perubahan yang terjadi pada resistansi pentanahan, divisualkan oleh grafik pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai resistansi pentanahan

Ditinjau dari Tabel 7 dan Gambar 7, jika panjang *rod* tiap batang semakin bertambah, maka resistansi pentanahan akan semakin kecil, dan jika panjang *rod* tiap batang semakin berkurang, maka resistansi pentanahan akan semakin besar. Panjang *rod* tiap batang secara bertahap dikurangi dan ditambah sebanyak 1 meter untuk mengetahui pengaruh yang terjadi. Ketika panjang tiap batang *rod* awal 3 m dikurangi menjadi 2 m, resistansi pentanahan meningkat sebesar 0,0002  $\Omega$ . Saat panjang tiap batang *rod* diubah menjadi 1 m, resistansi pentanahan kembali naik sebesar 0,0002  $\Omega$ . Dilakukan simulasi kembali dengan menambah panjang tiap batang *rod* menjadi 4 m, terjadi penurunan resistansi pentanahan sebesar 0,0001  $\Omega$ . Kemudian panjang tiap *rod* ditambah lagi menjadi 5 m, hasilnya resistansi pentanahan kembali mengalami penurunan sebesar 0,0002  $\Omega$ .

Peningkatan dan penurunan nilai resistansi pentanahan ini sangat kecil, yaitu 0,0001 sampai 0,0002  $\Omega$ . Jadi, penambahan dan pengurangan panjang tiap batang *rod* memang berpengaruh terhadap resistansi pentanahan, namun tidak besar dan masih dalam batas aman, dimana nilai tertingginya adalah 0,2278  $\Omega$  dan masih sesuai standar yaitu  $\leq 1 \Omega$ . Pengaruh perubahan panjang tiap batang *rod* terhadap tegangan sentuh sebenarnya diperlihatkan Tabel 8 dan Gambar 8.

Tabel 8. Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya

No.	Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah)	Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter)	Nilai tegangan sentuh sebenarnya (volt)
1.	221	1	60,62
2.	221	2	59,25
3.	221	3	57,94
4.	221	4	56,69
5.	221	5	55,49

Selanjutnya, perubahan yang terjadi pada tegangan sentuh sebenarnya divisualkan oleh grafik pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya

Sesuai hasil pada Tabel 8 dan Gambar 8, ketika panjang tiap *rod* semakin bertambah, maka tegangan sentuh sebenarnya akan semakin kecil, dan berlaku sebaliknya. Saat panjang tiap *rod* awal 3 m menjadi 2 m, tegangan sentuh sebenarnya meningkat 1,31 volt. Saat panjang *rod* dikurangi lagi menjadi 1 m, tegangan sentuh sebenarnya kembali naik sebesar 1,37 volt. Simulasi kembali dilakukan

dengan menambah panjang tiap *rod* menjadi 4 m, lalu tegangan sentuh sebenarnya menurun sebesar 1,25 volt. Saat panjang tiap *rod* ditambah menjadi 5 m, tegangan sentuh sebenarnya menurun kembali sebesar 1,20 volt.

Terjadi penurunan dan peningkatan tegangan sentuh sebenarnya antara 1,20 sampai 1,37 volt. Jadi, penambahan dan penyusutan panjang tiap *rod* berpengaruh terhadap besar kecilnya tegangan sentuh sebenarnya, dimana nilai tertingginya adalah 60,62 volt. Pengaruh perubahan panjang tiap *rod* terhadap tegangan langkah sebenarnya diperlihatkan Tabel 9 dan Gambar 9.

Tabel 9. Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya

No.	Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah)	Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter)	Nilai tegangan langkah sebenarnya (volt)
1.	221	1	32,39
2.	221	2	31,66
3.	221	3	30,96
4.	221	4	30,29
5.	221	5	29,65

Sementara itu, Gambar 9 adalah grafik berdasarkan visualisasi dari Tabel 9.



Gambar 9. Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya

Mengacu pada hasil Tabel 9 dan Gambar 9, ketika panjang tiap *rod* semakin bertambah, maka tegangan langkah sebenarnya akan semakin kecil, dan berlaku sebaliknya. Saat panjang tiap *rod* awal 3 m dikurangi menjadi 2 m, tegangan langkah sebenarnya meningkat sebesar 0,70 volt. Saat panjang tiap *rod* dikurangi lagi menjadi 1 m, tegangan langkah sebenarnya kembali naik sebesar 0,73 volt. Simulasi kembali dilakukan dengan menambah panjang tiap *rod* menjadi 4 m, lalu tegangan langkah sebenarnya menurun sebesar 0,67 volt. Saat panjang tiap *rod* ditambah menjadi 5 m, tegangan langkah sebenarnya menurun kembali sebesar 0,64 volt.

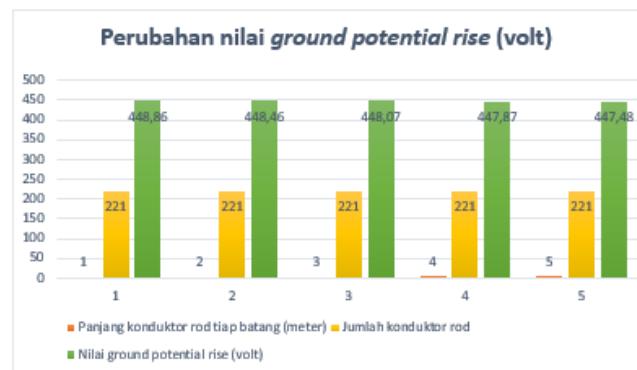
Terjadi penurunan dan peningkatan pada nilai tegangan langkah sebenarnya yaitu antara 0,64 sampai 0,73 volt. Jadi, penambahan dan penyusutan panjang tiap konduktor *rod* berpengaruh terhadap besar kecilnya nilai tegangan langkah sebenarnya, dimana nilai tertingginya berada pada 32,39 volt.

Pengaruh perubahan panjang tiap *rod* terhadap *Ground Potential Rise (GPR)* ditunjukkan Tabel 10 dan Gambar 10.

Tabel 10. Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai *ground potential rise*

No.	Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah)	Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter)	Nilai <i>ground potential rise</i> (volt)
1.	221	1	448,86
2.	221	2	448,46
3.	221	3	448,07
4.	221	4	447,87
5.	221	5	447,48

Kemudian untuk lebih mudah melihat perubahan yang terjadi terhadap *GPR*, divisualkan grafik pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai *ground potential rise*

Sesuai Tabel 10 dan Gambar 10, ketika panjang tiap *rod* semakin bertambah, maka *GPR* akan semakin kecil, dan berlaku sebaliknya. Saat panjang tiap *rod* awal 3 m dikurangi menjadi 2 m, *GPR* meningkat sebesar 0,39 volt. Saat panjang tiap *rod* dikurangi lagi menjadi 1 m, *GPR* kembali naik sebesar 0,40 volt. Simulasi kembali dilakukan dengan menambah panjang tiap *rod* menjadi 4 m, lalu *GPR* menurun sebesar 0,20 volt, sedangkan saat panjang tiap *rod* ditambah menjadi 5 m, *GPR* menurun kembali sebesar 0,39 volt. Terjadi penurunan dan peningkatan *GPR* sebesar 0,20 sampai 0,40 volt. Jadi, penambahan dan penyusutan panjang tiap *rod* berpengaruh terhadap besar kecilnya *GPR*, dimana nilai tertinggi adalah 448,86 volt.

### C. Verifikasi Hasil Modifikasi

Tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diizinkan dipakai untuk verifikasi atas hasil modifikasi yang telah dilakukan apakah masih dalam batas aman ataukah tidak. Besarnya tegangan sentuh sebenarnya harus di bawah tegangan sentuh yang diizinkan, dan tegangan langkah sebenarnya serta *GPR* juga tidak boleh melebihi tegangan langkah yang diizinkan. Tegangan sentuh yang diizinkan dapat dicari melalui perhitungan dengan persamaan (9). Sedang tegangan langkah yang diizinkan dicari dengan persamaan (11).

Hasil perhitungan tegangan sentuh dan langkah sebenarnya, resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan langkah yang diizinkan, serta *GPR* dirangkum dalam Tabel 11. Hasil di dalam Tabel 11 menunjukkan bahwa semua nilai masih terpenuhi karena masih berada di bawah batas maksimal berdasarkan standar yang telah ditentukan, yaitu nilai resistansi pentanahan  $\leq 1 \Omega$ , tegangan sentuh

sebenarnya < tegangan sentuh yang diizinkan, tegangan langkah sebenarnya dan *ground potential rise* < tegangan langkah yang diizinkan.

Tabel 11. Hasil perhitungan sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran

No.	Deskripsi	Nilai	Satuan
1.	Resistansi pentanahan	0,2274	Ohm
2.	Tegangan sentuh sebenarnya	57,94	Volt
3.	Tegangan langkah sebenarnya	30,96	Volt
4.	<i>Ground potential rise</i>	448,07	Volt
5.	Tegangan sentuh yang diizinkan	2330	Volt
6.	Tegangan langkah yang diizinkan	8048	Volt

Kemudian, jika hendak diambil satu nilai terbaik atas modifikasi dalam penelitian ini, maka yang paling baik adalah ketika panjang tiap batang *rod* dibuat menjadi 5 m dengan jumlah *rod* tetap 221 buah. Pernyataan ini diperkuat dengan Tabel 12 yang berisi hasil resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *GPR* yang merupakan nilai terkecil dari pengujian keseluruhan yang telah dilakukan.

Tabel 12. Hasil perhitungan untuk panjang *rod* tiap batang = 5 m

No.	Deskripsi	Nilai	Satuan
1.	Resistansi pentanahan	0,2271	Ohm
2.	Tegangan sentuh sebenarnya	55,49	Volt
3.	Tegangan langkah sebenarnya	29,65	Volt
4.	<i>Ground potential rise</i>	447,48	Volt

Namun dengan hasil perhitungan Tabel 11, sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran saat ini masih bisa dipakai sebagaimana mestinya, tanpa perlu melakukan perubahan signifikan pada panjang konduktor *rod* tiap batangnya. Hal ini dikarenakan nilai atas 4 parameter penentu keamanan GITET antara hasil simulasi pada Tabel 12 dengan nilai saat ini yang ditunjukkan Tabel 11, perbedaannya tidak terlalu besar. Selain itu, jika hendak dilakukan perubahan agar mendapat nilai sesuai Tabel 12, perlu material dan biaya yang lebih besar. Namun, hasil simulasi tersebut dapat dijadikan acuan ketika suatu saat hendak mendirikan GITET baru dengan spesifikasi luas area pentanahan yang sama.

## V. KESIMPULAN

Sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran telah memenuhi standar keamanan yang ada, dimana resistansi pentanahannya hanya sebesar  $0,2274 \Omega$ , masih berada di bawah  $1 \Omega$ , dengan tegangan sentuhnya 57,94 volt, jauh di bawah batas maksimumnya yaitu 2330 volt. Tegangan langkah dan *GPR*, dimana masing-masing bernilai 30,96 volt dan 448,07 volt, dengan ambang batasnya sebesar 8048 volt. Nilai-nilai ini membuat sistem pentanahan tersebut aman untuk makhluk hidup di sekitar Gardu Induk tersebut.

Perubahan panjang konduktor *rod* yang terbagi atas jumlah konduktor *rod* (*Q*) dan panjang konduktor *rod* tiap batang (*P*) mempengaruhi parameter pentanahan yang ada. Meningkatnya jumlah konduktor *rod* membuat nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *GPR* menjadi semakin menurun. Hal yang sama juga berlaku untuk semakin meningkatnya panjang konduktor *rod* tiap batang, maka akan mengakibatkan semakin menurunnya resistansi pentanahan,

tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *GPR*.

Hasil modifikasi panjang konduktor *rod* yang paling baik dari simulasi, mengarah pada simulasi dengan panjang konduktor *rod* tiap batang sebesar 5 m, yang menghasilkan nilai-nilai yang paling kecil di antara modifikasi lainnya, baik untuk resistansi pentanahan yang menjadi  $0,2271 \Omega$ , tegangan sentuh sebenarnya sebesar 55,49 volt, tegangan langkah sebenarnya sebesar 29,65 volt, dan *GPR* yang menjadi 447,48 volt. Namun tentunya diperlukan tambahan material yang cukup banyak untuk mendapatkan hasil sesuai simulasi atas modifikasi tersebut.

Mengingat masih terdapat variabel yang belum dibahas dalam penelitian ini yaitu luas area pentanahan, penulis berharap dapat dilakukan penelitian sejenis atas pengaruh dari variabel tersebut.

## REFERENSI

- [1] D. Marsudi, *Operasi Sistem Tenaga Listrik*, 1st ed. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
- [2] S. Committee, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, 2015.
- [3] M. A. Latifah, *Analisa Pengaruh Perubahan Jarak Antar Konduktor, Kedalaman, Tahanan Jenis Tanah Pada Sistem Pentanahan Grid-Rod Gardu Induk*. Semarang: Universitas Islam Sultan Agung Semarang, 2019.
- [4] M. Haddin, *Pengaruh Jumlah Konduktro Parallel Terhadap Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah pada Sistem Pentanahan GITET 500 KV*. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada, 2002.
- [5] A. Pranoto, H. Tumaliang, and G. M. C. Mangindaan, "Analisa Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling Dengan Konstruksi Grid (Kisi-kisi)," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 7, no. 3, pp. 189–198, 2018.
- [6] N. M. Seniari and B. W. D. S., "Pengaruh Panjang Elektroda, Resistivitas Tanah Dan Frekuensi Arus Petir Terhadap Impedansi Pentanahan Elektroda Batang," *Dielektr. [P-ISSN 2086-9487] [E-ISSN 2579-650x]*, vol. 8, no. 1, pp. 31–35, 2021.
- [7] M. A. Latifah and M. Haddin, "Analisa Dampak Perubahan Jarak Antar Konduktor Dan Kedalaman Pada Sistem Pentanahan Grid-Rod Berbasis IEEE Std 80 – 2000," *J. Ilm. Setrum*, vol. 8, no. 2, pp. 1–12, 2019.
- [8] H. Karuna, *Evaluasi Keamanan Pada Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 KV Jajar*. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2014.