

Terbit online pada laman: <http://ejurnal.umri.ac.id/index.php/JST>

Jurnal Surya Teknika

| ISSN (Print) 2354-6751 | ISSN (Online) 2723-7222 |



Research Article

Metode Penurunan Resistansi Pentanahan Arrester pada Gardu Distribusi untuk Meminimalisir Terjadinya Ground Potential Rise (GPR)

Triani Mardalena Sari ^{1,*}, Dian Eka Putra ¹, Raden Ahmad Yani ¹, Nofiansah ²¹ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Palembang, Jalan Dramapala No.1 Bukit Besar, Kota Palembang 30139 Indonesia² Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Sriwijaya, Jalan Srijaya Negara, Bukit Besar, Kota Palembang 30139, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diserahkan : 14 Maret 2026
 Diterima : 8 Mei 2026
 Diterbitkan : 15 Juni 2026

KATA KUNCI

Arrester, GPR (Ground Potential Rise), Gardu Distribusi, PUIL 2020, Resistansi Pentanahan.

KORESPONDENSI

E-mail: dianekaputra90@gmail.com

A B S T R A K

Sistem pentanahan arrester yang efektif pada gardu distribusi sangat krusial untuk mengalirkan arus petir guna mencegah Ground Potential Rise (GPR). Pengukuran awal di Gardu PD.0431 menunjukkan resistansi 6,7 Ω , melampaui batas PUIL 2020 sebesar 5 Ω . Penelitian ini bertujuan menurunkan resistansi melalui penambahan elektroda batang paralel. Pengukuran menggunakan Earth Tester dengan metode jatuh potensial, sedangkan analisis GPR, tegangan sentuh, dan tegangan langkah disimulasikan dengan CYMGrd (arus gangguan 1000 A). Hasilnya, penambahan empat elektroda menurunkan resistansi dari 6,08 Ω menjadi 1,97 Ω , memenuhi standar. Simulasi menunjukkan penurunan GPR sebesar 52,7%, tegangan sentuh turun 73,9%, dan tegangan langkah turun 74,7%. Kontur potensial tanah pasca-perbaikan juga lebih merata. Penelitian ini membuktikan bahwa konfigurasi elektroda paralel efektif menurunkan resistansi sekaligus memitigasi risiko GPR. Metode ini direkomendasikan untuk gardu dengan karakteristik serupa.

A B S T R A C T

An effective arrester earthing system at distribution substations is crucial for conducting lightning currents to prevent Ground Potential Rise (GPR). Initial measurements at PD.0431 substation showed a resistance of 6.7 Ω , exceeding the PUIL 2020 limit of 5 Ω . This study aims to reduce resistance by adding parallel rod electrodes. Measurements were taken using an Earth Tester with the potential drop method, while GPR, touch voltage, and step voltage analyses were simulated with CYMGrd (1000 A fault current). The results showed that the addition of four electrodes reduced the resistance from 6.08 Ω to 1.97 Ω , meeting the standard. Simulations showed a 52.7% reduction in GPR, a 73.9% reduction in touch voltage, and a 74.7% reduction in step voltage. The post-improvement ground potential contour was also more uniform. This study proves that the parallel electrode configuration effectively reduces resistance while mitigating GPR risks. This method is recommended for substations with similar characteristics.

1. PENDAHULUAN

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan mata rantai krusial dalam penyaluran energi dari pusat pembangkit hingga ke konsumen akhir. Infrastruktur ini, yang meliputi jaringan transmisi, gardu induk, dan saluran udara tegangan menengah (SUTM), memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap berbagai gangguan, baik yang bersifat teknis maupun non-teknis [1]. Di antara ancaman non-teknis, sambaran petir menjadi penyebab utama gangguan tegangan lebih surja (*surge overvoltage*) yang dapat merusak peralatan dan mengganggu kontinuitas pelayanan [2]. Untuk memitigasi dampak destruktif dari surja petir, *arrester* (pengaman surja) dipasang sebagai lapisan pertahanan pertama. Namun, efektivitas *arrester* sangat bergantung pada kualitas sistem pentanahan pendukungnya [3]. Sistem pentanahan yang andal tidak hanya berfungsi mengalirkan arus petir ke dalam tanah secara aman, tetapi juga menjadi fondasi utama dalam menjaga keandalan operasi sistem dan melindungi aset peralatan kelistrikan [4].

Kegagalan sistem pentanahan dalam mengalirkan arus petir dengan cepat dan efektif memicu fenomena berbahaya yang dikenal sebagai *Ground Potential Rise* (GPR) [5]. GPR adalah kondisi di mana potensial elektrik pada sistem pentanahan (grid atau elektrode) meningkat secara drastis relatif terhadap tanah referensi yang jauh (*remote earth*) saat arus gangguan besar mengalir melaluinya [6]. Kenaikan potensial yang tiba-tiba ini menciptakan gradien tegangan tinggi di permukaan tanah di sekitar titik injeksi arus. Gradien ini selanjutnya menimbulkan dua risiko keselamatan utama bagi manusia, yaitu tegangan sentuh (*touch voltage*) dan tegangan langkah (*step voltage*) yang dapat berakibat fatal [7]. Dengan demikian, performa sistem pentanahan, yang secara langsung tercermin dari nilai resistansinya, berkorelasi linier dengan tingkat keamanan personel dan masyarakat di sekitar lokasi gardu distribusi.

Nilai resistansi pentanahan yang rendah merupakan parameter kunci dalam menekan amplitudo GPR. Standar nasional, seperti Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020, secara tegas menetapkan bahwa nilai resistansi pentanahan untuk gardu distribusi tidak boleh melebihi 5 ohm [8]. Resistansi yang tinggi akan menghambat disipasi arus petir ke dalam tanah. Akibatnya, energi surja tidak terbuang seluruhnya dan cenderung mencari jalur alternatif [9]. Hal ini dapat memicu timbulnya tegangan lebih pada peralatan yang terhubung, meningkatkan risiko *back flashover*, dan bahkan menyebabkan gelombang surja merambat kembali ke sistem [10]. Lebih jauh, resistansi yang melebihi standar tidak hanya mereduksi efektivitas *arrester*, tetapi justru berpotensi memperparah dampak GPR,

mengubah sistem proteksi yang seharusnya melindungi menjadi sumber bahaya baru.

Studi pendahuluan yang dilakukan melalui pengukuran langsung di Gardu Distribusi PD 0431 mengindikasikan adanya permasalahan signifikan pada sistem pentanahannya. Hasil pengukuran awal menunjukkan bahwa nilai resistansi pentanahan *arrester* di lokasi tersebut telah melampaui batas maksimum yang diizinkan oleh PUIL 2020. Temuan ini mengonfirmasi kerentanan tinggi instalasi gardu terhadap potensi kegagalan proteksi saat terjadi sambaran petir. Lebih dari sekadar ancaman terhadap peralatan, kondisi ini juga mengindikasikan potensi bahaya keselamatan jiwa yang nyata bagi personel operator maupun masyarakat yang beraktivitas di sekitar gardu akibat GPR yang mungkin timbul. Realitas di lapangan ini menegaskan bahwa desain dan implementasi sistem pentanahan yang ada sudah tidak memadai dan memerlukan tindakan korektif segera melalui intervensi teknis yang tepat.

Berdasarkan permasalahan, penelitian ini dirumuskan untuk menganalisis penyebab tingginya resistansi pentanahan dan mengusulkan metode penurunan resistansi yang paling efektif dan aplikatif untuk diterapkan di Gardu Distribusi PD 0431. Tujuan utamanya adalah untuk mengembalikan kinerja sistem proteksi *arrester* agar sesuai dengan standar yang berlaku (≤ 5 ohm), sehingga mampu meminimalkan risiko kerusakan peralatan akibat surja petir. Lebih jauh, penelitian ini secara khusus diarahkan untuk memitigasi potensi kenaikan *Ground Potential Rise* (GPR). Dengan menurunkan resistansi pentanahan, amplitudo GPR dapat ditekan ke level yang lebih aman, yang pada akhirnya bertujuan untuk meningkatkan aspek keselamatan jiwa melalui reduksi signifikan terhadap bahaya tegangan sentuh dan tegangan langkah di lingkungan gardu distribusi.

2. METODOLOGI

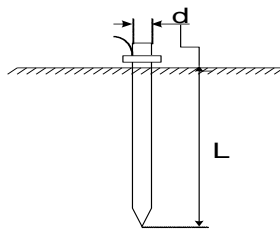
Penelitian mengenai penurunan resistansi pentanahan *arrester* pada Gardu Distribusi 20 kV PD.0431 ini dilatarbelakangi oleh tingginya frekuensi sambaran petir di lokasi tersebut, yang berimplikasi pada peningkatan kerentanan terhadap gangguan serta potensi timbulnya *Ground Potential Rise* (GPR).

Tahap awal penelitian diawali dengan observasi lapangan dan studi literatur yang komprehensif [11]. Observasi dilakukan untuk memastikan ketepatan pemilihan lokasi penelitian, sementara studi literatur

dilaksanakan untuk mengumpulkan berbagai referensi dan metode terdahulu yang relevan, guna membangun landasan teoritis yang kokoh bagi pelaksanaan penelitian.

Langkah selanjutnya adalah pengukuran resistansi pentanahan awal yang berfungsi sebagai data pembandingan (*baseline*). Pengukuran ini menggunakan metode tiga titik (*Fall of Potential Method*) dengan alat *Earth Tester Digital 4015A*, mengacu pada standar pengukuran yang berlaku [12][13]. Hasil pengukuran awal tersebut kemudian dianalisis untuk menentukan strategi perbaikan yang paling tepat. Berdasarkan hasil analisis, metode perbaikan yang dipilih adalah penambahan elektroda batang (*driven rod*). Desain konfigurasi elektroda ini dihitung menggunakan Rumus Dwight yang mengacu pada IEEE Std 81-2012, dengan tujuan memprediksi nilai resistansi akhir secara teoretis [12]. Prediksi ini menjadi penting untuk menentukan jumlah elektroda, kedalaman penanaman, serta jarak antar elektroda yang optimal sebelum dilakukan implementasi fisik di lapangan. Penelitian ini mengkaji dua variasi konfigurasi penanaman elektroda, yaitu:

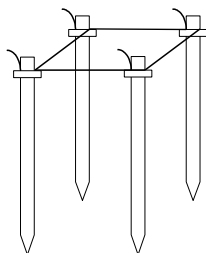
Satu batang elektroda yang ditanamkan tegak lurus, seperti ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Elektroda batang ditanamkan tegak lurus

$$R_{br} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{2L}{r}\right) \tag{1}$$

Empat batang elektroda yang ditanamkan tegak lurus dengan penempatan di lokasi yang sesuai, seperti ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Empat batang elektroda ditanamkan tegak lurus

$$R_{br} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{2L}{\sqrt[4]{2^{1/2} a^3 r}}\right) \tag{2}$$

Setelah metode perbaikan diimplementasikan di lapangan, dilakukan pengukuran ulang untuk memverifikasi besaran penurunan resistansi yang telah dicapai. Selanjutnya, untuk mengkaji aspek keselamatan, analisis *Ground Potential Rise (GPR)* dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak simulasi CYMGrd. Simulasi ini bertujuan untuk memodelkan sebaran potensial tanah setelah dilakukan perbaikan, guna mengevaluasi efektivitas sistem pentanahan dalam memitigasi risiko tegangan sentuh dan tegangan langkah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pengukuran awal menggunakan metode tiga titik dengan *Earth Tester Digital 4015A*, diperoleh data bahwa nilai resistansi pentanahan arrester pada Gardu Distribusi PD.0431 (Transformator 160 kVA) adalah 6,7 Ω. Hasil ini telah melampaui batas maksimum 5 Ω yang ditetapkan dalam standar PUIL 2020, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1.

Hasil pengukuran resistansi pentanahan arrester			
Kode Gardu	Jenis Tanah	Lokasi	Resistansi Ω
PD. 0431	Tanah Liat	Jl. Silaberanti	6,7

Berdasarkan hasil pengukuran awal yang disajikan pada Tabel 1, nilai resistansi pentanahan *arrester* di Gardu Distribusi PD. 0431 terukur sebesar 6,7 Ω. Nilai tersebut melampaui batas maksimum yang diizinkan oleh standar PUIL 2020, yaitu sebesar 5 Ω. Tingginya nilai resistansi ini tidak terlepas dari karakteristik lokasi gardu yang berada pada tanah berjenis lempung (tanah liat) dengan kondisi kelembapan yang cukup tinggi akibat pengaruh musim penghujan. Berdasarkan literatur, tanah lempung memiliki rentang resistivitas tanah (*soil resistivity*) yang cukup bervariasi, umumnya berkisar antara 20–100 Ωm [7]. Dengan demikian, nilai resistansi terukur sebesar 6,7 Ω mengindikasikan bahwa konfigurasi elektroda pentanahan yang eksisting tidak lagi memadai untuk merespons kondisi resistivitas tanah di lokasi tersebut secara efektif.

Guna merancang solusi perbaikan yang tepat, dilakukan analisis perhitungan untuk memprediksi kebutuhan elektroda pentanahan. Perhitungan ini mengacu pada Persamaan Dwight yang direkomendasikan dalam IEEE Std 81-2012 untuk memodelkan tahanan pentanahan pada konfigurasi satu atau lebih elektroda batang (*driven rod*) yang ditanam secara paralel. Untuk konfigurasi elektroda batang tunggal yang ditanam vertikal, nilai tahanan pentanahan dapat diestimasi menggunakan persamaan (1). Hasil prediksi perhitungan untuk berbagai variasi konfigurasi elektroda disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2.

Parameter-parameter Lapangan	
Parameter	Nilai
ρ : Resistivitas Tanah Liat	20 s.d 100 Ω m
ρ : Resistivitas Tanah diasumsikan	35 Ω m
L : Panjang Batang yang tertanam	10 m
d : Diameter batang Elektroda	0,02 m
r : Radius batang Elektroda	0,01 m

Tabel 3.

Hasil Perbandingan Resistansi Pentanahan Arrester

Standar PUIL 2020	Pengukuran (Ω)	Perhitungan (Ω)
5	6,7	4,84

Hasil analisis perhitungan awal menggunakan Persamaan Dwight untuk sistem pentanahan *arrester* di Gardu Distribusi PD.0431 (160 kVA) disajikan pada Tabel 3. Menariknya, nilai resistansi yang diperoleh dari perhitungan teoritis ternyata lebih tinggi dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan sebesar 6,7 Ω . Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh penyederhanaan asumsi dalam pemodelan teoritis, di mana parameter tanah seperti resistivitas dianggap homogen, sementara kondisi aktual di lapangan jauh lebih kompleks dengan variasi lapisan tanah dan kelembapan yang tidak seragam. Meskipun demikian, baik hasil pengukuran (6,7 Ω) maupun hasil perhitungan awal sama-sama menunjukkan angka yang telah melampaui batas maksimum 5 Ω yang dipersyaratkan oleh standar PUIL 2020. Temuan ini semakin mengonfirmasi bahwa sistem pentanahan eksisting tidak lagi memadai dan memerlukan intervensi perbaikan segera.

Fenomena tingginya resistansi ini semakin diperparah oleh kondisi lingkungan sekitar. Pengukuran dilaksanakan pada lokasi dengan jenis tanah lempung yang sedang dalam kondisi lembap akibat pengaruh musim penghujan. Secara teoritis, kelembapan tanah seharusnya berkontribusi terhadap penurunan resistivitas tanah, namun kenyataannya

konfigurasi elektroda tunggal yang terpasang tetap tidak mampu mencapai nilai resistansi yang aman. Hal ini mengindikasikan bahwa keterbatasan sistem pentanahan eksisting bersifat struktural, sehingga diperlukan solusi teknis yang lebih fundamental, terlepas dari fluktuasi kondisi cuaca yang terjadi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, dirancang suatu skenario perbaikan melalui penambahan elektroda batang (*driven rod*) yang dipasang secara paralel, membentuk konfigurasi grid yang terintegrasi dengan elektroda eksisting. Tahap awal analisis dilakukan dengan menghitung kinerja penambahan satu elektroda menggunakan Persamaan Dwight. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai resistansi yang diperoleh masih berada di atas ambang batas standar yang ditetapkan. Oleh karena itu, simulasi dilanjutkan dengan menambah jumlah elektroda secara bertahap. Berdasarkan persamaan untuk susunan paralel (Persamaan 2), perhitungan dengan konfigurasi empat batang elektroda yang ditanam secara paralel menghasilkan nilai resistansi teoritis sebesar 1,68 Ω .

Nilai akhir sebesar 1,68 Ω ini tidak hanya telah memenuhi, tetapi juga berada jauh di dalam batas toleransi yang dipersyaratkan oleh standar PUIL 2020 (0–5 Ω). Konfigurasi empat elektroda paralel secara teoritis mampu memperluas bidang kontak antara elektroda dengan tanah, sekaligus menciptakan jalur pembumian yang lebih efektif dan redundan. Akibatnya, sistem pentanahan dapat mengalirkan arus gangguan, khususnya arus petir, dengan lebih efisien dan aman. Pencapaian nilai resistansi yang signifikan ini menunjukkan bahwa metode penambahan elektroda secara paralel merupakan solusi yang layak dan efektif untuk menurunkan resistansi pentanahan gardu distribusi, khususnya pada kondisi tanah serupa dengan lokasi penelitian.

Tabel 4.

Nilai Resistansi Pentanahan Hasil Perhitungan

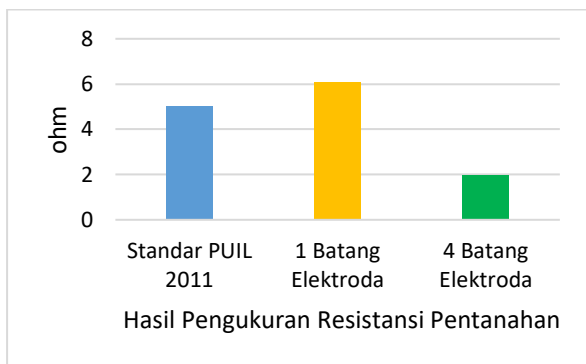
Standar PUIL 2020	Hasil Perhitungan Resistansi Pentanahan (Ω)	
	1 Batang Elektroda	4 Batang Elektroda
5	4,84	1,68

Berdasarkan implementasi penambahan elektroda batang di lapangan, hasil pengukuran resistansi pentanahan sistem arrester menunjukkan penurunan signifikan seperti yang disajikan pada tabel 5. Pengukuran dilakukan terhadap dua konfigurasi yang diuji: sistem lama dengan 1 batang elektrodadan sistem hasil perbaikan dengan 4 batang elektroda yang dipasang secara paralel.

Tabel 5.
Hasil Pengukuran Lapangan

Standar PUIL 2020	Hasil Pengukuran Resistansi Pentanahan (Ω)	
	1 Batang Elektroda	4 Batang Elektroda
5	6,08	1,97

Data tersebut mengonfirmasi bahwa penambahan jumlah elektroda berbanding terbalik dengan nilai resistansi akhir. Konfigurasi 4 batang elektroda berhasil menurunkan resistansi dari 6,08 Ω menjadi 1,97 Ω , yang telah memenuhi dan berada jauh di dalam batas aman standar PUIL (maksimal 5 Ω). Tren penurunan ini divisualisasikan secara jelas pada Gambar 3, yang menunjukkan kurva hubungan antara penambahan jumlah elektroda dengan resistansi yang dihasilkan.



Gambar 3. Grafik penurunan resistansi pentanahan dengan pengukuran lapangan

Perlu dicatat bahwa terdapat perbedaan antara nilai resistansi hasil perhitungan teoritis sebelumnya (1,68 Ω) dengan hasil pengukuran aktual (1,97 Ω). Perbedaan ini wajar dan dapat disebabkan oleh beberapa faktor lapangan, seperti variasi resistivitas tanah yang tidak homogen, kedalaman dan kondisi kontak elektroda yang tidak sempurna, atau pengaruh kelembaban tanah yang lebih tinggi selama musim penghujan. Faktor kelembaban ini justru menguntungkan karena menurunkan resistivitas tanah, sehingga berkontribusi pada pencapaian nilai resistansi yang lebih rendah.

Setelah konfirmasi bahwa nilai resistansi telah memenuhi standar, langkah kritis berikutnya adalah mengevaluasi aspek keselamatan dengan menganalisis potensi Ground Potential Rise (GPR). Analisis ini dilakukan menggunakan simulasi perangkat lunak CYMGrd untuk dua skenario: sistem dengan 4 batang elektroda pada kedalaman 3 meter dan pada kedalaman 10 meter. Simulasi dilakukan dengan mengasumsikan arus gangguan petir sebesar 1000 Ampere yang mengalir ke tanah.

Tabel 6.
Ground Potential Rise (GPR)

Uraian Penelitian	GPR	Tegangan Sentuh Volt (V)	Tegangan Langkah
Sebelum Perbaikan	359,142	427,962	297,05
Sesudah Perbaikan	169,712	111,482	75,12

Data yang tersaji pada Tabel 6 memperlihatkan penurunan yang sangat signifikan pada ketiga parameter keselamatan setelah dilakukan perbaikan sistem pentanahan melalui penambahan empat batang elektroda secara paralel. Nilai *Ground Potential Rise* (GPR) mengalami penurunan sebesar 52,7% , dari 359,142 V menjadi 169,712 V. Penurunan yang lebih drastis terjadi pada parameter yang berkaitan langsung dengan risiko terhadap manusia, yaitu tegangan sentuh (*touch voltage*) yang turun sebesar 73,9% (dari 427,962 V menjadi 111,482 V) dan tegangan langkah (*step voltage*) yang turun sebesar 74,7% (dari 297,05 V menjadi 75,12 V).

Penurunan nilai-nilai tersebut secara langsung disebabkan oleh berkurangnya resistansi pentanahan dari 6,08 Ω (konfigurasi satu elektroda) menjadi 1,97 Ω (konfigurasi empat elektroda). Berdasarkan hukum Ohm, penurunan resistansi sebesar 67,6% ini mengakibatkan potensial yang timbul pada elektroda tanah (GPR) juga menurun secara proporsional untuk besar arus gangguan yang sama. Lebih lanjut, konfigurasi elektroda paralel yang diterapkan mampu menciptakan distribusi potensial tanah yang lebih merata dan landai, sehingga gradien tegangan di permukaan tanah yang merupakan sumber utama bahaya tegangan langkah mengalami penurunan yang signifikan.

Tabel 7 dimana Penurunan resistansi dari 6,08 Ω menjadi 1,97 Ω tidak hanya memenuhi standar, tetapi juga berdampak langsung pada parameter keselamatan. Berdasarkan hukum Ohm untuk sistem pentanahan, dengan arus gangguan (petir) diasumsikan **1000 A** (sesuai simulasi CYMGrd), maka:

Tabel 7.
Kondisi sebelum dan sesudah perbaikan

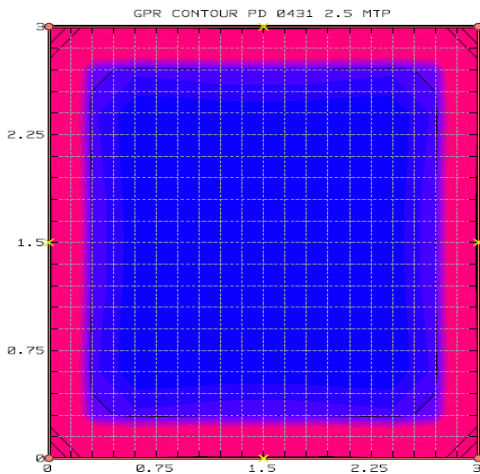
Kondisi	R (Ω)	GPR (V)	Penurunan GPR
Sebelum (1 batang)	6,08	359,14	-
Sesudah (4 batang)	1,97	169,71	52,7%

Penurunan GPR sebesar 189,43 V ini secara langsung menurunkan tegangan sentuh dan langkah (Tabel 6) masing-masing 73,9% dan 74,7%. Angka-angka tersebut menunjukkan bahwa **setiap** 1 Ω penurunan resistansi (dalam rentang 6→2 Ω)

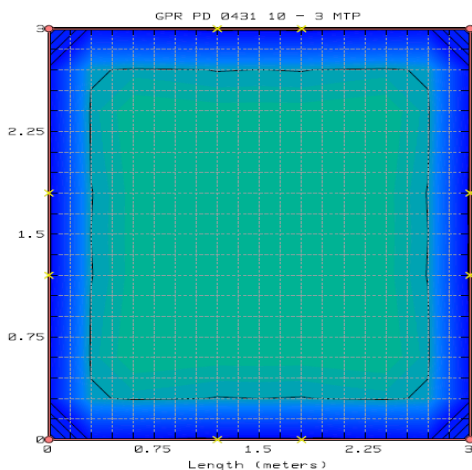
memberikan reduksi tegangan bahaya sekitar 15–20% suatu efisiensi yang sangat tinggi.

Visualisasi dari distribusi potensial tersebut disajikan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Kontur potensial sebelum perbaikan (Gambar 4) menunjukkan gradien yang sangat curam dengan area berpotensi tinggi yang terkonsentrasi di sekitar titik elektroda tunggal. Sebaliknya, kontur potensial setelah perbaikan (Gambar 5) memperlihatkan pola sebaran yang lebih luas dan halus, dengan nilai potensial maksimum yang jauh lebih rendah. Perbedaan visual ini semakin menguatkan kesimpulan bahwa sistem pentanahan yang baru telah berhasil meningkatkan efektivitas pembedaan serta mendistribusikan energi gangguan secara lebih merata ke dalam tanah.

Hasil analisis nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah pasca-perbaikan, masing-masing sebesar 111,482 V dan 75,12 V, telah berada pada level yang jauh lebih aman. Hal ini secara signifikan berpotensi menekan risiko cedera serius bahkan fatalitas (*fatality*) bagi personel operasi dan pemeliharaan di lingkungan Gardu Distribusi PD.0431.



Gambar 4. Kontur potensial sebelum perbaikan



Gambar 5. Kontur potensial setelah perbaikan sistem pentanahan

Sebelum perbaikan (Gambar 4), kontur potensial sangat curam dengan area berpotensi tinggi terpusat di sekitar elektroda tunggal. Setelah perbaikan (Gambar 5), kontur menjadi lebih landai dan menyebar. Hal ini terjadi karena:

- Luas permukaan kontak total elektroda meningkat (dari 1 batang menjadi 4 batang).
- Jarak antar elektroda (diasumsikan > 3 m) mengurangi tumpang tindih medan listrik, sehingga distribusi arus ke tanah lebih merata.

Kontur yang landai berarti gradient tegangan permukaan lebih kecil, sehingga tegangan langkah dan sentuh otomatis lebih rendah – bahkan sebelum mempertimbangkan penurunan GPR itu sendiri.

Secara keseluruhan, hasil analisis simulasi membuktikan bahwa perbaikan sistem pentanahan tidak hanya berhasil memenuhi standar resistansi yang dipersyaratkan, tetapi juga secara substansial meningkatkan tingkat keselamatan di lokasi gardu. Berdasarkan standar IEEE Std 80-2013 (IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding), keselamatan personel ditentukan oleh kemampuan sistem pentanahan dalam membatasi tegangan sentuh (*touch voltage*) dan tegangan langkah (*step voltage*) di bawah nilai ambang yang dapat ditoleransi oleh tubuh manusia. Standar ini mendefinisikan tegangan sentuh sebagai perbedaan potensial antara struktur logam yang dibumikan dengan permukaan tanah di tempat seseorang berdiri saat menyentuh struktur tersebut, sedangkan tegangan langkah adalah perbedaan potensial antara dua titik di permukaan tanah dengan jarak satu langkah (sekitar 1 meter) pada arah gradien potensial maksimum.

Dalam penelitian ini, nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah pasca-perbaikan, masing-masing sebesar 111,482 V dan 75,12 V, telah berada pada level yang jauh lebih aman. Sebagai pembandingan, perhitungan batas aman (*permissible limit*) menggunakan metodologi IEEE Std 80–2013 dengan asumsi berat badan 70 kg, waktu pemutusan gangguan 0,5 detik, dan resistivitas tanah dasar 35 Ωm menghasilkan batas tegangan sentuh yang diizinkan sekitar 189-209 V dan tegangan langkah sekitar 344-350 V. Nilai tegangan sentuh 111,482 V yang tercapai hanya sekitar 53-59% dari batas aman

standar, sedangkan tegangan langkah 75,12 V hanya sekitar 21-22% dari batas aman suatu indikator margin keselamatan yang sangat lebar. Hal ini secara signifikan berpotensi menekan risiko cedera serius bahkan fatalitas (*fatality*) bagi personel operasi dan pemeliharaan di lingkungan Gardu Distribusi PD.0431, sekaligus membuktikan bahwa desain sistem pentanahan yang diusulkan telah memenuhi kriteria keselamatan yang dipersyaratkan oleh standar internasional IEEE Std 80–2013.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode penambahan elektroda batang secara paralel terbukti efektif dalam menurunkan resistansi pentanahan *arrester* pada Gardu Distribusi PD.0431, sekaligus membuktikan bahwa desain sistem pentanahan yang diusulkan telah memenuhi kriteria keselamatan yang dipersyaratkan oleh standar internasional IEEE Std 80–2013. Nilai resistansi berhasil direduksi dari 6,08 Ω menjadi 1,97 Ω , sehingga memenuhi persyaratan teknis PUIL 2020 yang menetapkan batas maksimum resistansi pentanahan sebesar 5 Ω . Keberhasilan ini mengonfirmasi bahwa optimalisasi konfigurasi fisik elektroda merupakan solusi yang tepat untuk mengatasi tingginya resistansi pada lokasi dengan karakteristik tanah liat yang lembap.

Lebih lanjut, penurunan resistansi tersebut berdampak langsung terhadap peningkatan aspek keselamatan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perbaikan sistem pentanahan mampu mereduksi *Ground Potential Rise* (GPR) sebesar 52,7%, serta menurunkan tegangan sentuh dan tegangan langkah masing-masing sebesar 73,9% dan 74,7%. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berorientasi pada pemenuhan standar teknis, tetapi juga menegaskan bahwa sistem pentanahan yang efektif berperan krusial dalam melindungi personel dari risiko kejutan listrik sekaligus meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik secara keseluruhan.

Penelitian ini membuka prospek pengembangan lebih lanjut, antara lain penerapan metode serupa pada gardu distribusi dengan karakteristik tanah yang berbeda, seperti tanah berpasir atau gambut, untuk menguji generalisasi efektivitas metode. Selain itu, eksplorasi material elektroda alternatif seperti elektroda berpembungkus bahan konduktif (*conductive concrete*) atau penggunaan bahan

kimia *soil treatment* dapat menjadi arah riset mendatang untuk meningkatkan efisiensi penurunan resistansi. Secara aplikatif, hasil penelitian ini dapat direkomendasikan sebagai pedoman teknis bagi perusahaan listrik dalam melakukan pemeliharaan dan perbaikan sistem pentanahan gardu distribusi di wilayah dengan intensitas petir tinggi, guna meminimalisir risiko GPR dan meningkatkan keselamatan publik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. A. Yani, D. E. Putra, R. M. E. Suherman, and J. Ardian, "Use of Arrester as Security for 20 KV Distribution Substation on 160 KVA Transformer at Akasia Feeder," *AMPERE*, vol. 9, no. 2, pp. 141–149, 2024, doi: <http://doi.org/10.31851/ampere>.
- [2] Rizky Junito, Dian Eka Putra, Raden Ahmad Yani, and Nofiansah, "Pengaruh Fluktuasi Tegangan Akibat Black Out Pada Saluran Distribusi 20 KV Terhadap Kinerja Arrester," *J. Ampere*, vol. 10, no. 1, pp. 117–123, 2025, doi: [10.31851/ampere.v10i1.18283](https://doi.org/10.31851/ampere.v10i1.18283).
- [3] D. S. Prawira, T. Wrahatnolo, J. Joko, and T. Rijanto, "Analisis Kinerja Lightning Arrester Akibat Sambaran Petir Sebagai Proteksi Transformator Di PT. PLN (Persero) Distribusi Lamongan," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 4, no. 2, pp. 771–780, 2023, doi: [10.24036/jtein.v4i2.454](https://doi.org/10.24036/jtein.v4i2.454).
- [4] Junaidi, D. E. Putra, and C. Rizal, "Comparative Review of Grounding Resistance between Planning and Commissioning Test Results at 20 kV Distribution Substations," *J. Ampere*, vol. 9, no. 1, pp. 18–24, 2024, doi: <http://doi.org/10.31851/ampere>.
- [5] A. Fitriani, S. Syafriwel, J. Hidayat, J. Panjaitan, and S. A. Syahputra, "Analisis Pentanahan Gardu Induk Akibat Surja Petir Menggunakan Finite Elemen Method," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 210–215, 2023, doi: [10.37905/jjee.v5i2.20732](https://doi.org/10.37905/jjee.v5i2.20732).
- [6] D. E. Putra, R. A. Yani, M. S. Sihan, C. Rizal, and N. Nofiansah, "The Decreasing Ground Potential Rise by Lessening Soil Resistance in

Arrester Grounding System,” *IJEEIT Int. J. Electr. Eng. Inf. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 44–50, 2023, doi: 10.29138/ijeeit.v6i2.2180.

- [7] M. Y. Syam and N. Zahra, “Pengukuran Nilai Resistivitas Tanah pada Transformator Distribusi di Wilayah Makassar,” *Arus J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 2, pp. 234–239, 2024, doi: 10.57250/ajst.v2i2.592.
- [8] D. E. Putra, Y. Randika, I. Randika, and H. Inamullah, “Enhancing grounding system efficiency through biopore technique in seasonal soil conditions,” *Int. J. Adv. Technol. Eng. Explor.*, vol. 11, no. 113, 2024, doi: <http://dx.doi.org/10.19101/IJATEE.2023.10102391>.
- [9] D. Septiani, Melti. Aribowo, “Analisis Pemasangan Arrester Pada jaringan SUTM P . Dewasa untuk Pengurangan Dampak Petir PT . PLN (Persero) UP3 CIKUPA,” *Amplifier*, vol. 14, no. 2, pp. 120–124, 2024, doi: 10.33369/jamplifier.v14i2.37285.
- [10] G. U. Hardi, T. Taufiq, Raihan Putri, and F. A. Nasution, “Pengaruh Tahanan Jenis Tanah Terhadap Sistem Pentanahan Menggunakan Elektroda Batang Dilokasi Gedung Teknik Elektro Unimal,” *INSOLOGI J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 2, pp. 314–326, 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i2.1818.
- [11] M. W. Sani and Gunawan, “Dengan Multi Direct Grounding Terhadap Gangguan Petir,” *JITET (Jurnal Inform. dan Tek. Elektro Ter.*, vol. 13, no. 3, pp. 1417–1426, 2025, doi: <http://dx.doi.org/10.23960/jitet.v13i3.7300>.
- [12] IEEE Power and Energy Society - Substations Committee, *IEEE Std. 81- Guide for Measuring Earth Resistivity , Ground Impedance , and Earth Surface Potentials of a Grounding System IEEE Power and Energy Society*, vol. 2012, no. December. 2012.
- [13] IEEE Std 80, *Guía IEEE para la seguridad en la conexión a tierra de subestaciones de CA. Norma IEEE 80-2013 (revisión de la norma IEEE 80-2000/incorpora la norma IEEE 80-2013/Cor 1-2015)*. 2015.

NOMENKLATUR

ρ	Resistivitas Jenis Tanah
Ω	Resistansi Pentanahan (R-Ohm)
L	Panjang Elektroda Pentanahan
d	Diameter elektroda Pentanahan
r	Jari-jari Elektroda Pentanahan