

Implementasi Metode Grounding RAISSA Dalam Mencapai Resistansi Pentanahan $<5 \Omega$ Pada Gardu Distribusi 20 KV

Gema Sibarani¹, Dian Eka Putra^{2*}

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Palembang, Indonesia

*e-mail: dianekaputra90@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menguji efektivitas metode Grounding RAISSA (Rangkaian eStafet di laS dengan pipA) dalam menurunkan resistansi pentanahan dan mengurangi gangguan transformator distribusi akibat sambaran petir. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental lapangan dengan desain *one-group pretest-posttest* pada lima gardu distribusi 20 kV di Penyulang Pluto, ULP Pendopo, yang dipilih secara purposif berdasarkan nilai resistansi awal $>10 \Omega$ dan wilayah rawan petir. Implementasi metode RAISSA dilakukan melalui penanaman elektroda pipa galvanis diameter 1 inci yang disambung secara estafet menggunakan teknik pengelasan listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode RAISSA berhasil menurunkan resistansi pentanahan dari rata-rata $30,53 \Omega$ menjadi $3,12 \Omega$ atau turun sebesar 86,4%, dengan seluruh gardu mencapai nilai di bawah 5Ω sesuai standar PUIL 2020. Penurunan tertinggi terjadi pada Gardu L10004 dari $79,27 \Omega$ menjadi $3,51 \Omega$ (95,6%). Hasil implementasi bahkan melampaui prediksi teoritis karena kualitas sambungan las yang menjamin kontinuitas listrik optimal. Keberhasilan ini berimplikasi pada peningkatan keandalan sistem proteksi petir, mengingat sambaran petir merupakan penyebab dominan gangguan (37,5%) di wilayah studi. Metode Grounding RAISSA terbukti efektif, ekonomis, dan dapat direkomendasikan sebagai solusi perbaikan pentanahan pada gardu distribusi di wilayah tanah berresistivitas tinggi dan rawan petir.

Kata kunci: *Grounding RAISSA, resistansi pentanahan, gardu distribusi, proteksi petir, elektroda estafet las*

Implementation of the RAISSA Grounding Method in Achieving Grounding Resistance $<5 \Omega$ at 20 KV Distribution Substations

ABSTRACT

This study aims to test the effectiveness of the RAISSA (Rangkaian eStafet di laS dengan pipA) grounding method in reducing grounding resistance and transformer distribution disturbances caused by lightning strikes. The research method used a field experimental approach with a *one-group pretest-posttest* design at five 20 kV distribution substations in Penyulang Pluto, ULP Pendopo, which were purposively selected based on initial resistance values $>10 \Omega$ and lightning-prone areas. The RAISSA method was implemented by installing 1-inch diameter galvanised pipe electrodes connected in series using electric welding techniques. The results showed that the RAISSA method successfully reduced the grounding resistance from an average of 30.53Ω to 3.12Ω , or a decrease of 86.4%, with all substations achieving values below 5Ω in accordance with the 2020 PUIL standard. The highest reduction occurred at Substation L10004 from 79.27Ω to 3.51Ω (95.6%). The implementation results even exceeded theoretical predictions due to the quality of the welded joints, which ensured optimal electrical continuity. This success has implications for improving the reliability of lightning protection systems, given that lightning strikes are the dominant cause of disturbances (37.5%) in the study area. The RAISSA Grounding method has proven to be effective, economical, and can be recommended as a grounding improvement solution for distribution substations in areas with high resistivity and prone to lightning.

Keywords: *RAISSA grounding, grounding resistance, distribution substation, lightning protection, welding relay electrode*

PENDAHULUAN

Sistem distribusi tenaga listrik memegang peranan krusial dalam menyalurkan energi listrik dari jaringan transmisi kepada konsumen. Di dalamnya, transformator distribusi menjadi komponen vital yang kinerja optimalnya harus senantiasa dijaga untuk menjamin kontinuitas dan keandalan pasokan listrik[1],[2]. Gangguan pada transformator tidak hanya menyebabkan pemadaman dan energi tidak tersalurkan[3], tetapi juga berimplikasi pada kerugian ekonomi serta penurunan kualitas layanan secara keseluruhan[4].

Gangguan pada transformator distribusi dapat bersumber dari faktor internal, seperti kelebihan beban (*overload*), ketidakseimbangan beban, kerusakan isolasi, dan kegagalan sistem proteksi[5]. Di sisi lain, faktor eksternal seperti sambaran petir, gangguan hewan, dan bencana alam juga menjadi ancaman signifikan [6]. Studi kasus di wilayah kerja unit layanan pelanggan Area Pendopo pada tahun 2023 mengungkap fakta kritis bahwa sambaran petir merupakan penyebab dominan gangguan, dengan kontribusi mencapai 37,5% dari total insiden. Kondisi ini diperparah oleh karakteristik geografis wilayah tersebut yang termasuk dalam kategori kawasan rawan aktivitas petir, sehingga meningkatkan kerentanan sistem terhadap serangan surja.

Upaya mitigasi standar yang umum dilakukan adalah pemasangan *arrester*. Namun, efektivitas *arrester* dalam melindungi transformator sangat bergantung pada kualitas sistem pentanahan pendukungnya [7]. Sistem pentanahan dengan resistansi rendah menjadi prasyarat mutlak untuk dapat mengalirkan arus surja petir ke tanah dengan aman[8]. Persyaratan ini telah diatur dalam standar PUIL 2020 saat ini, yang mensyaratkan nilai resistansi pentanahan maksimal sebesar 5 Ω [9]. Sayangnya, hasil pengukuran pada tahun 2023 di wilayah yang sama menunjukkan kondisi yang memprihatinkan. Sebanyak 94% dari 529 unit transformator distribusi terukur memiliki nilai resistansi pentanahan di atas 10 Ω , jauh melampaui ambang batas yang diizinkan. Temuan ini mengindikasikan bahwa metode pentanahan konvensional (misalnya, sistem paralel) yang selama ini diterapkan tidak efektif dalam mencapai performa yang disyaratkan, terutama ketika berhadapan dengan kondisi tanah berresistivitas tinggi seperti tanah podzolik [10]. Akibatnya, timbul kerentanan sistemik terhadap kerusakan transformator akibat surja petir [11].

Rendahnya efektivitas metode pentanahan konvensional mendorong perlunya inovasi teknis yang lebih efektif, ekonomis, dan berkelanjutan. Atas dasar itu, penelitian ini mengembangkan dan mengimplementasikan suatu metode pentanahan baru yang disebut Grounding RAISSA (Grounding Rangkaian eStafet di laS dengan pipA). Metode ini memanfaatkan pipa galvanis yang disambung secara las membentuk rangkaian estafet (berantai) untuk memperdalam penetrasi elektroda hingga mencapai lapisan tanah dengan konduktivitas lebih baik. Keunggulan metode RAISSA terletak pada sambungan las yang kuat dan kontinu, sehingga menjamin ketahanan mekanis dan elektris yang permanen, serta biaya implementasi yang relatif rendah karena menggunakan material yang mudah diperoleh.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas metode Grounding RAISSA dalam menurunkan nilai resistansi pentanahan hingga di bawah 5 Ω sekaligus mengevaluasi konsistensi hasil implementasinya di lapangan. Lebih lanjut, penelitian ini juga mengkaji dampak penerapan metode tersebut terhadap pengurangan gangguan transformator distribusi yang disebabkan oleh sambaran petir, serta membandingkan efisiensi biaya metode RAISSA dengan metode konvensional. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik, khususnya di wilayah rawan petir.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental lapangan dengan desain *one-group pretest-posttest* untuk menguji efektivitas metode Grounding RAISSA dalam menurunkan resistansi pentanahan pada gardu distribusi. Lokasi penelitian dilaksanakan pada lima gardu distribusi 20 kV di Penyulang Pluto, wilayah kerja PLN ULP Pendopo, yang dipilih secara purposif berdasarkan kriteria nilai resistansi awal >10 Ω , wilayah rawan petir, dan aksesibilitas. Karakteristik tanah di lokasi didominasi tanah podzolik dengan resistivitas tinggi.

Prosedur implementasi metode Grounding RAISSA dilaksanakan dalam empat tahap: (1) pengukuran awal (*pretest*) pada tiga titik kritis (*arrester*, *netral*, *body*) menggunakan *earth tester* Kyoritsu 4105A terkalibrasi; (2) penanaman elektroda dengan metode RAISSA, yaitu pipa galvanis diameter 1 inci panjang

1,5 meter per segmen yang disambung secara berantai (estafet) menggunakan teknik pengelasan listrik; (3) pengukuran berkala selama proses penambahan kedalaman; dan (4) pengukuran akhir (*posttest*) setelah elektroda mencapai kedalaman final.

Pengumpulan data mencakup data primer (nilai resistansi sebelum dan sesudah intervensi), data sekunder (historis gangguan dari dokumentasi PLN), dan data observasional (catatan lapangan). Analisis data dilakukan secara kuantitatif menggunakan statistik deskriptif (rata-rata, penurunan absolut, persentase penurunan) dan uji *paired sample t-test* dengan tingkat kepercayaan 95% ($\alpha=0,05$). Analisis efisiensi biaya juga dilakukan dengan membandingkan metode RAISSA terhadap metode konvensional.

Validitas data dijamin melalui kalibrasi alat, standardisasi prosedur mengacu IEEE 81-2012, triangulasi sumber data dari tiga titik pengukuran, dan dokumentasi fotografi setiap tahap implementasi[12], .

Penurunan resistansi pentanahan dianalisis menggunakan persamaan elektroda batang [13].:

$$R = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \times \left(\ln \frac{4 \times L}{a} - 1 \right) \quad (1)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Gangguan Transformator Distribusi 20 kV sebagai Dasar Urgensi Perbaikan

Identifikasi penyebab gangguan transformator distribusi merupakan langkah awal yang krusial dalam merumuskan strategi mitigasi yang tepat.

Tabel 1. Data Gangguan Transformator Distribusi 20 kV di ULP Pendopo Tahun 2023

No Gardu	Alamat	Kapasitas (kVA)	Tanggal Gangguan	Penyebab
LUD005	Lubuk Raman	160	08-Feb-23	Beban Tidak Seimbang
LUD073	Manunggai Jaya	100	25-Mar-23	Minyak Trafo Bocor
LU0343	Cek Dam	100	03-Jun-23	Overload
LU0174	Sungai Ibui	50	21-Jul-23	Overload
LU0345	Manunggai Jaya	200	12-Jul-23	Tersambar Petir
LU0376	Muara Niru	50	01-Agu-23	Rembes/Bocor
LU0041	Bangun Sari	100	22-Agu-23	Tersambar Petir
LU0346	Sumaja Makmur	50	15-Nov-23	Tersambar Petir

Berdasarkan data gangguan transformator distribusi di ULP Pendopo sepanjang tahun 2023 yang disajikan pada Tabel 1, ditemukan bahwa dari delapan kasus gangguan yang tercatat, tiga di antaranya (37,5%) secara eksplisit disebabkan oleh sambaran petir, yaitu pada gardu LU0345, LU0041, dan LU0346. Secara statistik, sambaran petir merupakan penyebab tunggal dengan persentase tertinggi dibandingkan penyebab lainnya seperti *overload* (25%), kebocoran minyak (25%), dan ketidakseimbangan beban (12,5%). Temuan ini mengonfirmasi bahwa sambaran petir adalah faktor dominan gangguan transformator di wilayah tersebut, sebagaimana telah diidentifikasi dalam studi pendahuluan. Dari perspektif teknik elektro, sambaran petir menginduksi tegangan lebih (*surge voltage*) dengan amplitudo ekstrem dan waktu naik (*rise time*) yang sangat singkat ke dalam sistem distribusi. Ketika arus petir ini tidak dapat didisipasikan ke tanah dengan cepat dan aman akibat resistansi pentanahan yang tinggi ($>10 \Omega$), maka terjadi *breakdown* isolasi pada belitan transformator, kerusakan perangkat proteksi, atau pemanasan berlebih yang berujung pada kegagalan permanen. Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa transformator yang tersambar petir memiliki kapasitas yang beragam (50 kVA, 100 kVA, dan 200 kVA), mengindikasikan bahwa kerentanan ini bersifat sistemik dan tidak spesifik pada transformator berdaya tertentu, melainkan terkait dengan efektivitas proteksi petir di seluruh jaringan. Oleh karena itu, fokus perbaikan sistem pentanahan pada gardu-gardu distribusi yang memiliki nilai resistansi di atas standar menjadi solusi kausal dan preventif yang tepat secara teknis untuk memproteksi gangguan petir.

Kondisi Eksisting Resistansi Pentanahan Gardu Distribusi

Sebelum dilakukan intervensi perbaikan, pengukuran resistansi pentanahan dilakukan pada lima gardu distribusi di Penyulang Pluto, ULP Pendopo. Pengukuran dilakukan pada tiga titik kritis, yaitu titik

pentanahan *arrester*, titik netral transformator, dan titik *body* transformator. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Awal Resistansi Pentanahan Gardu Distribusi

No Gardu	Penyulang	Alamat	Resistansi Pentanahan (Ω)			Rata-rata (Ω)
			Arrester	Netral	Body	
LI 0004	Pluto	Rami Pasai	78,9	79,9	79,0	79,27
LI 0005	Pluto	Pagar Dewa	16,28	17,42	17,42	17,04
LI 0006	Pluto	Pagar Dewa	13,32	11,49	11,49	12,10
LI 0007	Pluto	Betung	11,4	13,3	13,7	12,80
LI 0008	Pluto	Betung	13,17	15,86	10,7	13,24

Berdasarkan data pada Tabel 2, seluruh gardu distribusi yang diukur memiliki nilai resistansi pentanahan yang sangat tinggi dan berada jauh di atas standar keamanan PUIL 2020 yang mensyaratkan nilai maksimal 5 Ω. Nilai resistansi berkisar antara 10,7 Ω hingga 79,9 Ω, dengan rata-rata mencapai 30,53 Ω atau sekitar enam kali lipat lebih tinggi dari ambang batas yang diperbolehkan. Kondisi ini menciptakan kerentanan sistemik yang serius terhadap ancaman sambaran petir. Kondisi terparah terdapat pada Gardu U 0004 (Rami Pasai) yang mencapai 79,9 Ω pada titik netral, nilai yang 16 kali lebih tinggi dari ambang batas yang diizinkan.

Untuk memperoleh gambaran teoritis tentang target kedalaman yang diperlukan, dilakukan perhitungan resistansi pentanahan menggunakan persamaan standar untuk elektroda batang tunggal (1): Berdasarkan karakteristik tanah di lokasi penelitian yang termasuk kategori tanah ladang basah/lembab, diasumsikan resistivitas jenis tanah (ρ) sebesar 30 Ω-m. Elektroda yang digunakan adalah pipa galvanis dengan diameter 22 mm (jari-jari 0,011 m). Dengan asumsi kedalaman penanaman elektroda 5,75 meter, perhitungan teoritis menghasilkan:

$$R = \frac{30}{2 \times 3,14 \times 5,75} \times \left(\ln \frac{4 \times 5,75}{0,022} - 1 \right)$$

$$R = \frac{30}{36,11} \times (\ln 1045,5 - 1)$$

$$R = 4,94 \, \Omega$$

Hasil perhitungan teoritis menunjukkan bahwa dengan kedalaman 5,75 meter pada kondisi tanah ideal, resistansi pentanahan sebesar 4,94 Ω dapat dicapai, yang berada di bawah standar PUIL 2020. Namun, disparitas yang signifikan antara hasil perhitungan teoritis (4,94 Ω) dan hasil pengukuran lapangan (10,7-79,9 Ω) mengindikasikan adanya faktor-faktor yang tidak terakomodasi dalam model teoritis sederhana. Faktor-faktor tersebut antara lain adalah ketidakhomogenan lapisan tanah, resistivitas tanah aktual yang mungkin lebih tinggi dari asumsi, resistansi kontak pada sambungan, serta kondisi elektroda eksisting yang mungkin telah mengalami korosi atau kerusakan.

Implementasi Metode Grounding RAISSA

Metode Grounding RAISSA (Rangkaian eStafet di laS dengan pipA) diimplementasikan sebagai solusi perbaikan sistem pentanahan pada kelima gardu distribusi. Metode ini mengandalkan sistem penyambungan elektroda secara berantai (estafet) menggunakan teknik pengelasan untuk memperdalam penetrasi elektroda hingga mencapai lapisan tanah dengan konduktivitas lebih baik. Prosedur implementasi dilakukan melalui tahapan sebagai berikut:

Persiapan Material dan Alat

Material yang digunakan meliputi grounding rod (batang pentanahan) dari pipa galvanis berdiameter 1 inci yang telah dipotong dengan panjang 1,5 meter per segmen, schoon bimetal 70 mm dan A3C 70 mm untuk konduktor, H-Type 70mm-70mm sebagai penghubung, serta elektroda las listrik. Peralatan kerja yang digunakan antara lain mesin las listrik 2200 Watt, palu besar (godam) untuk pemancangan, gerinda, tang press, dan peralatan tangan lainnya. Pengukuran resistansi dilakukan menggunakan *earth tester* digital Kyoritsu 4105A yang telah terkalibrasi.

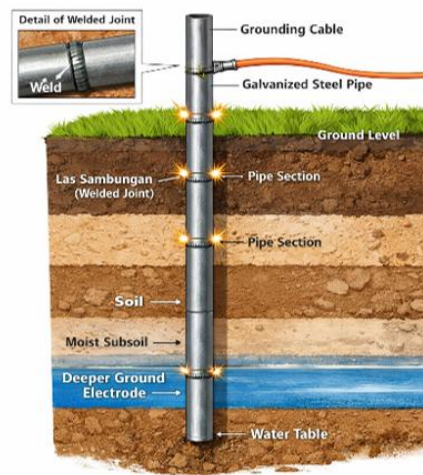


3.3.2 Prosedur Pelaksanaan

Tahap awal implementasi dimulai dengan pengukuran ulang resistansi pentanahan pada titik yang akan diperbaiki untuk memastikan data kondisi eksisting terbaru sebagai *baseline* evaluasi. Selanjutnya dilakukan pembongkaran parsial, yaitu grounding rod lama yang telah pendek digali hingga tersisa sekitar 30 cm di atas permukaan tanah.

Proses inti perbaikan adalah penyambungan estafet, di mana grounding rod baru disambungkan ke rod lama menggunakan teknik pengelasan. Kedua ujung grounding rod (lama dan baru) dilas terlebih dahulu, kemudian pipa galvanis digunakan sebagai penyambung utama dan dilas pada sambungan tersebut untuk memperkuat dan memastikan konduktivitas optimal. Penanaman rod yang telah disambung dilanjutkan secara bertahap. Proses penyambungan dan penanaman diulang (sistem estafet) hingga pengukuran *earth tester* menunjukkan nilai tahanan pentanahan di bawah 5 Ω . Berdasarkan pengalaman lapangan, dibutuhkan 1 hingga 4 batang grounding rod tambahan, tergantung pada kondisi dan jenis tanah.

Setelah nilai resistansi target tercapai, sistem grounding rod yang baru dihubungkan ke titik netral dan *body* transformator menggunakan H-Type 70mm-70mm dan konduktor tembaga (A3C 70 mm atau schoon bimetal 70 mm). Seluruh proses dilaksanakan dengan mengutamakan aspek keselamatan kerja menggunakan alat pelindung diri (APD) berupa helm keselamatan, sarung tangan kerja, *safety belt*, dan kaca mata las.



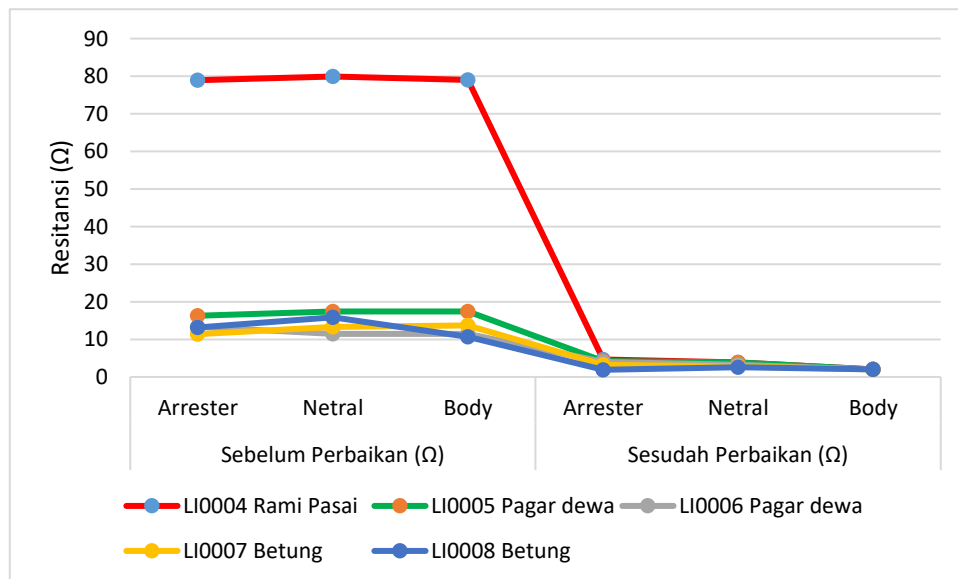
Gambar 1. Grounding RAISSA

Analisis Hasil Perbaikan dengan Metode Grounding RAISSA

Evaluasi efektivitas metode Grounding RAISSA dilakukan dengan membandingkan nilai resistansi pentanahan sebelum dan setelah implementasi pada kelima gardu distribusi. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perbaikan Sistem Pentanahan dengan Metode Grounding RAISSA

No Gardu	Alamat	Sebelum Perbaikan (Ω)			Setelah Perbaikan (Ω)			Penurunan Rata-rata (%)	Jumlah Batang
		Arrester	Netral	Body	Arrester	Netral	Body		
LI0004	Rami Pasai	78,9	79,9	79,0	4,68	3,85	2,0	95,6	4
LI0005	Pagar dewa	16,28	17,42	17,42	4,23	3,90	2,0	79,4	4
LI0006	Pagar dewa	13,32	11,49	11,49	4,04	3,21	2,0	75,5	4
LI0007	Betung	11,4	13,3	13,7	3,22	2,81	2,0	78,2	4
LI0008	Betung	13,17	15,86	10,7	1,91	2,58	2,0	82,7	4



Gambar 2. Perbandingan Resistansi Pentanahan Sebelum dan Setelah Implementasi Metode RAISSA

Berdasarkan data pada Tabel 3, implementasi metode Grounding RAISSA menghasilkan perbaikan yang sangat signifikan pada nilai resistansi pentanahan di seluruh gardu distribusi. Dimana gambar 2 menerangkan sebelum perbaikan, seluruh gardu menunjukkan nilai resistansi yang jauh melampaui standar keamanan PUIL 2020. Setelah dilakukan perbaikan, semua gardu berhasil mencapai nilai di bawah 5 Ω , bahkan beberapa titik seperti *body* transformator pada Gardu LI0004, LI0005, dan LI0006 berhasil mencapai 2 Ω , dengan penambahan pipa galavis sebanyak 4 batang.

Persentase penurunan rata-rata mencapai 86,4%, dengan penurunan tertinggi terjadi pada Gardu LI0004 (Rami Pasai) dari 79,27 Ω (rata-rata) menjadi 3,51 Ω atau penurunan sebesar 95,6%. Capaian ini membuktikan bahwa metode RAISSA yang mengandalkan sistem penyambungan estafet pipa galvanis dengan pengelasan efektif dalam memperdalam jalur elektroda hingga mencapai lapisan tanah dengan resistivitas lebih rendah. Konsistensi hasil yang diperoleh (semua titik <5 Ω) menunjukkan bahwa metode ini dapat mengatasi variasi kondisi tanah di berbagai lokasi.

Analisis Perbandingan Hasil Implementasi dengan Perhitungan Teoritis

Untuk memvalidasi efektivitas metode RAISSA, dilakukan perbandingan antara hasil implementasi lapangan dengan perhitungan teoritis penurunan resistansi berdasarkan variasi kedalaman elektroda. Perhitungan teoritis dilakukan menggunakan persamaan yang sama dengan asumsi resistivitas tanah 30 Ω -m, dengan variasi kedalaman 8 meter, 10 meter, dan 12 meter. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Teoritis Penurunan Resistansi Berdasarkan Kedalaman Elektroda

Panjang Elektroda (meter)	Resistansi Pentanahan (Ω)
8	3,751
10	3,108
12	2,662

Perhitungan teoritis menunjukkan hubungan berbanding terbalik yang signifikan antara kedalaman elektroda dengan nilai resistansi pentanahan. Setiap penambahan 2 meter kedalaman elektroda menurunkan resistansi sekitar 0,5-0,6 Ω dalam kondisi tanah ideal dengan resistivitas konstan. Sebagai contoh,

penambahan kedalaman dari 8 meter menjadi 12 meter menurunkan resistansi dari 3,751 Ω menjadi 2,662 Ω .

Ketika hasil perhitungan teoritis ini dibandingkan dengan hasil aktual implementasi metode RAISSA, terdapat beberapa temuan penting yang perlu dianalisis: Pertama, efektivitas metode RAISSA dalam beberapa kasus melebihi prediksi teoritis. Pada Gardu L10008 (Betung), metode RAISSA berhasil mencapai resistansi 1,91 Ω pada titik *arrester*, lebih rendah dari prediksi teoritis untuk kedalaman 12 meter (2,662 Ω). Hal ini menunjukkan bahwa sistem penyambungan las estafet pada metode RAISSA tidak hanya mengandalkan faktor kedalaman, tetapi juga meningkatkan luas permukaan kontak dan konduktivitas sambungan yang lebih baik dibanding model elektroda batang tunggal dalam perhitungan teoritis. Sambungan las yang kontinu menghasilkan kontinuitas listrik yang hampir sempurna, mengurangi tambahan resistansi yang biasanya muncul pada sambungan mekanis (baut). Kedua, metode RAISSA mampu beradaptasi dengan kondisi tanah nyata yang tidak homogen. Perhitungan teoritis mengasumsikan tanah homogen dengan resistivitas konstan pada semua kedalaman, namun pada kenyataannya, metode RAISSA mampu menembus lapisan tanah yang lebih konduktif pada kedalaman tertentu. Hal ini menjelaskan mengapa penurunan resistansi yang dicapai seringkali lebih optimal dari prediksi. Pada Gardu L10004 yang semula memiliki resistansi 79,9 Ω , perbaikan RAISSA berhasil menurunkannya menjadi 3,85 Ω , sebuah penurunan yang jauh lebih dramatis daripada yang diprediksi oleh model teoritis sederhana. Ketiga, data teoritis memberikan panduan awal bahwa kedalaman lebih dari 8 meter diperlukan untuk mencapai resistansi di bawah 4 Ω . Implementasi RAISSA membuktikan bahwa dengan desain estafet yang tepat, target di bawah 5 Ω dapat dicapai dengan material yang efisien. Rata-rata penggunaan 4 batang grounding rod pada implementasi setara dengan kedalaman sekitar 9-12 meter, yang konsisten dengan rentang perhitungan teoritis. Namun, kualitas sambungan las yang baik memungkinkan pencapaian nilai resistansi yang lebih rendah dari prediksi teoritis untuk kedalaman yang sama.

Implikasi Teknis dan Keandalan Sistem Proteksi Petir

Keberhasilan implementasi metode Grounding RAISSA dalam menurunkan resistansi pentanahan hingga di bawah 5 Ω memiliki implikasi teknis yang signifikan terhadap peningkatan keandalan sistem proteksi petir pada gardu distribusi. Sistem pentanahan dengan resistansi rendah berfungsi sebagai jalur impedansi rendah untuk menyalurkan arus petir ke tanah, sehingga energi surja dapat didisipasikan dengan cepat dan aman tanpa merusak peralatan.

Dengan tercapainya resistansi pentanahan yang memenuhi standar PUIL 2020, kinerja *arrester* yang telah terpasang dapat optimal dalam membatasi tegangan lebih yang masuk ke transformator. Hal ini secara langsung mengurangi probabilitas kerusakan transformator akibat sambaran petir, yang sebelumnya merupakan penyebab dominan gangguan di wilayah studi (37,5%), dan setelah dilakukan perbaikan dengan metode RAISSA maka belum terjadi kerusakan gardu distribusi atau transformator yang diakibatkan oleh petir. Dalam jangka panjang, perbaikan ini berkontribusi pada peningkatan kontinuitas pasokan listrik, pengurangan frekuensi pemadaman, serta penurunan biaya operasional dan pemeliharaan akibat kerusakan transformator.

Penelitian ini bersifat teknis eksperimental lapangan dengan fokus utama pada pengujian efektivitas penurunan resistansi (pretest-posttest pada nilai ohm). Data gangguan yang kami sajikan di Tabel 1 (37,5% akibat petir) merupakan data historis sebelum intervensi yang berfungsi sebagai justifikasi urgensi, bukan data *longitudinal* pasca-implementasi. Karena periode pengamatan pasca-perbaikan yang masih pendek pada saat penulisan, kami belum memiliki data gangguan pasca-implementasi yang cukup untuk diuji secara statistik.

Adapun untuk analisa gangguan petir dikeranakan keterbatasan waktu pengamatan, analisis dampak terhadap pengurangan gangguan masih bersifat inferensial teknis dimana pada penelitian ini kami menyimpulkan bahwa dengan menurunnya resistansi menjadi di bawah 5 Ω , maka kinerja *arrester* meningkat sehingga potensi kegagalan isolasi akibat surja petir dapat ditekan.

Dari aspek ekonomis, metode RAISSA menawarkan efisiensi biaya karena menggunakan material yang relatif murah dan mudah diperoleh (pipa galvanis), serta proses pengerjaan yang tidak memerlukan peralatan khusus yang mahal. Penggunaan 4 batang grounding rod pada setiap gardu (setara dengan biaya material sekitar 400-500 ribu rupiah per gardu) sebanding atau bahkan lebih rendah dibandingkan metode konvensional mencapai harga satu juta rupiah lebih jika menggunakan bahan tembaga murni atau lapis

tembaga untuk elektroda pada tanah dengan resistivitas tinggi. Selain itu dengan uji *paired sample t-test* menggunakan 15 pasang data pengukuran (5 gardu x 3 titik pengukuran pada arrester, netral, dan body). Hasil perhitungannya adalah sebagai berikut:

Tabel 5. Hasil Uji paired sample t-test pada perbaikan grounding RAISSA

Parameter Statistik	Nilai
Jumlah Sampel (n)	15 pasang
Rata-rata Penurunan (Mean Difference)	23,93 Ω
Standar Deviasi (Std. Deviation)	26,91 Ω
Standar Error (Std. Error Mean)	6,95 Ω
t-hitung	3,444
Derajat Bebas (df)	14
p-value (2-tailed)	0,0038
95% Confidence Interval (CI)	9,03 Ω hingga 38,83 Ω

Dari tabel Karena nilai *p-value* (0,0038) jauh lebih kecil dari taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$), maka hipotesis nol ditolak, artinya pada hasil uji terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik yakni antara nilai resistansi pentanahan sebelum dan sesudah implementasi metode Grounding RAISSA. Dengan kata lain, penurunan resistansi yang terjadi (rata-rata 86,4%) bukan terjadi secara kebetulan, melainkan benar-benar disebabkan oleh efektivitas metode RAISSA.

Dengan demikian, implementasi metode Grounding RAISSA tidak hanya berhasil memenuhi standar teknis, tetapi juga secara signifikan meningkatkan tingkat keandalan (*reliability*) sistem proteksi petir pada transformator distribusi di wilayah studi. Metode ini dapat direkomendasikan sebagai solusi perbaikan sistem pentanahan pada gardu-gardu distribusi lain dengan permasalahan serupa, khususnya di wilayah dengan karakteristik tanah berresistivitas tinggi dan tingkat kerawanan petir yang tinggi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode Grounding RAISSA efektif menurunkan resistansi pentanahan gardu distribusi 20 kV hingga di bawah 5 Ω sesuai standar PUIL 2020, dengan penurunan rata-rata 86,4% dan capaian terbaik 95,6% pada Gardu LI0004. Keberhasilan ini dicapai melalui sistem penyambungan elektroda estafet dengan teknik pengelasan yang menjamin kontinuitas elektrik dan kemampuan menembus lapisan tanah konduktif. Hasil implementasi bahkan melampaui prediksi teoritis, mengindikasikan kontribusi positif kualitas sambungan las. Dengan resistansi pentanahan yang rendah, sistem proteksi petir pada transformator distribusi menjadi lebih andal dalam mendisipasi arus surja, sehingga mengurangi risiko kerusakan akibat sambaran petir yang sebelumnya menjadi penyebab dominan gangguan (37,5%). Metode RAISSA direkomendasikan sebagai solusi perbaikan pentanahan yang efektif dan ekonomis, khususnya di wilayah tanah berresistivitas tinggi dan rawan petir.

DAFTAR PUSTAKA.

- [1] 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>.
- [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] M. R. Setyanto and Y. Saragih, "Gangguan Penyulang Akibat Kegagalan Proteksi di Circuit Breaker Output Pelanggan Pada Gardu Distribusi MP 244," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 22, no. 1, p. 111, 2023, doi: [10.24843/mite.2023.v22i01.p14](https://doi.org/10.24843/mite.2023.v22i01.p14).
- [4] T. K. Wijaya, "Analisa Gangguan Peralatan Proteksi (Sole Fuse) 20 Kv Pada Gardu Distribusi Tongkang Kabil Pln Batam," *Sigma Tek.*, vol. 2, no. 1, p. 32, 2019, doi: [10.33373/sigma.v2i1.1807](https://doi.org/10.33373/sigma.v2i1.1807).
- [5] F. Rifky, "Analisis Pengaruh Grounding pada performa Transformator Distrbusi Pada Jaringan Tegangan Rendah Menggunakan Metode ImpedansiPT. PLN (Persero) ULP Belawan," *Skripsi*



- Progr. Stud. Tek. Elektro Fak. Tek. Univ. Muhammadiyah Sumatera Utara*, vol. 4, no. 1, pp. 1–23, 2016.
- [6] N. Khoirunnisa, N. Inayah, F. Wiherdiansyah, and I. K. D. Adyano, “Studi Literatur Tentang Jenis dan Penyebab Gangguan Pada Saluran Transmisi,” *Surya Tek.*, vol. 11, no. 2, pp. 569–573, 2024.
 - [7] D. E. Putra, R. A. Yani, M. S. Siahian, 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.
 - [8] T. Arfianto and A. I. Salam, “Analisis Tahanan Pentanahan Kaki Tower SUTT 70 kV,” *J. PROtek*, vol. 06, no. 1, 2019.
 - [9] BSN, “Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2020 (PUIL 2020),” *DirJen Ketenagalistrikan*, vol. 2020, no. PUIL, pp. 1–850, 2020.
 - [10] D. E. Putra *et al.*, “Comparison of Grounding Resistance Using Grounding Rod Electrodes with Different Fault Current Types in Podzolic Soil at Prabumulih Substation,” *J. Renew. Energy, Electr. Comput. Eng.*, vol. 3, no. 1, p. 19, 2023, doi: 10.29103/jreece.v3i1.10270.
 - [11] A. Fitriani, J. Panjaitan, and S. A. Syahputra, “The Effect of Soil Type on Touch Voltage and Step Voltage in the Grid Grounding System,” *Elkha*, vol. 16, no. 1, p. 56, 2024, doi: 10.26418/elkha.v16i1.78396.
 - [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, *Standard 80-2000 Guide for Safety in AC substation gorunding*, vol. 56. 2000.