

USE OF STEEL IN IMPROVING GROUNDING RESISTANCE OF THE ULP DISTRIBUTION SUBSTATION IN EAST MEDAN

PENGGUNAAN BAJA DALAM PERBAIKAN RESISTANSI PENTANAHAN GARDU DISTRIBUSI ULP MEDAN TIMUR

Agustinus Guntur Putra Panjaitan¹, Hamdani², dan Adisastra Pengalaman Tarigan³

¹ Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Pembangunan Pancabudi

^{2,3} Dosen Teknik Elektro Universitas Pembangunan Pancabudi

Jl. Gatot Subroto, Km. 4,5 Sei Sikambing Medan^{1,2,3}, 20122

e-mail: 182del@gmail.com

ABSTRACT

The use of steel in the distribution substation grounding system is an important aspect to improve the safety and reliability of the electric power system. This study aims to evaluate the effectiveness of the use of steel rods in reducing grounding resistance in several distribution substations in the ULP Medan Timur area. The study refers to empirical data and appropriate analysis methods based on standards with variations in soil resistivity in 5 distribution substations and the number of grounding rods. The results show that the addition of grounding rods can reduce resistance by more than 50%, but with decreasing efficiency as the number of rods increases. This study provides a basis for planning a more effective and economical grounding system in different soil conditions.

Keywords : Grounding System, Steel Grounding, Ground Resistance, Distribution Substation

ABSTRAK

Penggunaan baja dalam sistem pertanahan gardu distribusi merupakan aspek penting untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem tenaga listrik. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan batang baja dalam menurunkan resistansi pentanahan pada beberapa gardu distribusi di wilayah ULP Medan Timur. Penelitian mengacu pada data empiris dan metode analisis yang tepat berdasarkan standar dengan variasi resistivitas tanah pada 5 gardu distribusi dan jumlah batang pentanahan. Hasil menunjukkan bahwa penambahan batang pentanahan dapat menurunkan resistansi hingga lebih dari 50%, namun dengan efisiensi yang menurun seiring bertambahnya jumlah batang. Penelitian ini memberikan dasar perencanaan sistem pentanahan yang lebih efektif dan ekonomis pada kondisi tanah berbeda.

Kata Kunci: Sistem Pentanahan, Batang Baja, Resistansi Pentanahan, Gardu Distribusi

PENDAHULUAN

Penggunaan baja dalam perbaikan sistem resistansi pertanahan pada gardu distribusi merupakan hal yang sangat penting dalam menjaga keamanan dan keandalan sistem kelistrikan. Gardu distribusi, khususnya di wilayah ULP Medan Timur, berfungsi sebagai titik distribusi listrik yang menghubungkan sistem transmisi dengan konsumen akhir. Dalam operasionalnya, gardu ini harus dilengkapi dengan sistem pertanahan yang efektif untuk melindungi peralatan dan pengguna dari bahaya listrik, seperti arus bocor dan petir. Menurut penelitian oleh (Ahmad dkk., 2014), penggunaan elektroda tembaga dibandingkan dengan elektroda besi galvanis menunjukkan

perbedaan signifikan dalam resistansi tanah, di mana elektroda tembaga memiliki resistansi yang lebih rendah dan lebih efektif dalam mengalirkan arus ke tanah. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan bahan yang tepat sangat mempengaruhi performa sistem pertanahan.

Dalam konteks ini, baja sebagai material untuk sistem grounding memiliki keunggulan tertentu. Baja tidak hanya kuat dan tahan lama, tetapi juga memiliki konduktivitas yang baik. Penelitian oleh (Bashir dkk., 2012) menunjukkan bahwa peningkatan resistansi grounding dapat berakibat pada peningkatan tegangan transien yang berbahaya di dalam peralatan. Dengan demikian, pemilihan baja sebagai material grounding diharapkan dapat menurunkan

resistansi dan meningkatkan keselamatan serta keandalan sistem distribusi.

Modifikasi baja untuk meningkatkan performanya juga menjadi fokus dalam penelitian ini. Salah satu metode yang umum digunakan adalah galvanisasi, di mana baja dilapisi dengan lapisan seng untuk melindungi dari korosi. Proses ini tidak hanya meningkatkan ketahanan korosi, tetapi juga dapat meningkatkan konduktivitas listrik baja. Menurut penelitian oleh (Wangwei dkk., 2023), baja galvanis menunjukkan performa yang lebih baik dalam pengujian resistansi pentanahan dibandingkan dengan baja biasa, menjadikannya pilihan yang lebih baik untuk aplikasi elektroda.

Secara keseluruhan, sifat dan karakteristik baja menunjukkan bahwa meskipun ada beberapa kelemahan, material ini masih memiliki potensi besar dalam aplikasi sistem pentanahan. Dengan perlakuan yang tepat dan desain yang baik, baja dapat menjadi alternatif yang efisien dan ekonomis dalam meningkatkan resistansi pentanahan.

STUDI PUSTAKA

A. Sistem Pentanahan

Sistem pentanahan (*grounding system*) adalah suatu sistem yang menghubungkan bagian logam dari peralatan listrik atau sistem distribusi ke tanah (bumi), baik secara langsung maupun tidak langsung. Tujuan utamanya adalah untuk menciptakan jalur dengan impedansi rendah ke tanah agar arus gangguan (*fault current*) dan fenomena transien (petir dan operasi *switching*) dapat mengalir dengan aman ke bumi, sehingga mencegah bahaya bagi manusia maupun kerusakan pada peralatan.

Tujuan utama dari sistem pentanahan adalah:

1. Keselamatan Personil: Mencegah risiko sengatan listrik akibat beda potensial yang tinggi antara peralatan dan tanah.
2. Proteksi Peralatan: Menghindari tegangan lebih (*overvoltage*) akibat petir atau gangguan sistem.

3. Stabilitas Sistem: Memberikan referensi tegangan yang stabil terhadap tanah.

4. Pengoperasian Proteksi: Memungkinkan peralatan proteksi (seperti pemutus sirkuit) bekerja dengan andal saat terjadi gangguan.

Sistem distribusi diklasifikasikan menjadi sistem yang ditanahkan dan yang tidak ditanahkan. Sistem pentanahan dalam instalasi tenaga listrik dibedakan berdasarkan cara netral sistem dihubungkan ke tanah (IEEE Std C62.92.1, 2016):

1. Pentanahan Langsung (Solid Grounding):

- a. Netral sistem dihubungkan langsung ke tanah tanpa impedansi.

- b. Cocok untuk sistem tegangan menengah dan tinggi yang mengandalkan selektivitas proteksi.

Contoh: sistem distribusi 20 kV.

2. Pentanahan melalui Impedansi (Impedance Grounding):

- a. Menggunakan resistor atau reaktansi antara netral dan tanah.

- b. Mengontrol arus gangguan agar tidak terlalu besar dan mengurangi tegangan lebih transien.

- c. Umumnya digunakan pada sistem industri atau sistem penting.

3. Pentanahan Tidak Langsung (Ungrounded System):

- a. Netral sistem tidak dihubungkan langsung ke tanah.

- b. Cocok untuk sistem kontrol dan instrumen yang toleran terhadap gangguan sesaat.

4. Pentanahan Melalui Transformator Zig-Zag atau Delta-Grounded Wye:

- a. Digunakan untuk membentuk titik netral buatan pada sistem tanpa netral alami.

- b. Penting pada sistem distribusi 3 fasa tanpa titik netral.

Terdapat 3 pertimbangan utama dalam desain sistem pentanahan (Sen dkk., 2002):

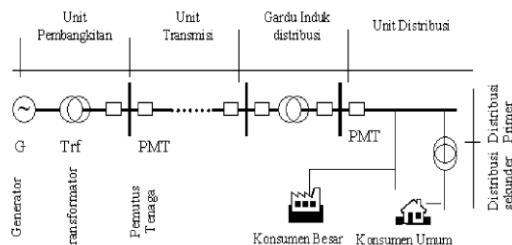
- Pentanahan harus mampu menahan arus gangguan tanah maksimum

tanpa bahaya terbakar atau meleleh.

- Pentanahan harus menghasilkan tegangan yang cukup rendah antara dua titik di tanah untuk mencegah semua bahaya bagi personel yang dinyatakan sebagai tegangan langkah, sentuh, dan *mesh*.
- Pentanahan harus meminimalkan *Ground Potential Rise (GPR)* terhadap lingkungan pentanahan (atau titik potensial nol) dengan memberikan resistansi kontak yang rendah terhadap arus gangguan tanah, dapat disebut sebagai Resistansi Tanah.

B. Gardu Distribusi

Gardu distribusi berfungsi sebagai titik penghubung antara jaringan transmisi dan konsumen akhir. Sistem pentanahan dalam gardu distribusi berfungsi untuk menjaga keselamatan operasional dan keandalan sistem, dengan memastikan bahwa arus gangguan dapat dialirkan ke tanah dengan aman. Hal ini sangat penting untuk mencegah kerusakan pada peralatan dan melindungi personel dari risiko listrik (Nelson, 2015). Gambar 1 menggambarkan suatu sistem tenaga yang sederhana, mulai dari pembangkit, transmisi, distribusi primer, hingga ke konsumen.



Gambar 1. Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik (Arsuyono, 2021)

Standar tentang pentanahan di gardu distribusi sangat penting untuk memastikan bahwa sistem memenuhi persyaratan keselamatan dan kinerja. Beberapa standar internasional seperti IEEE Std 80 dan IEC 60364 memberikan pedoman tentang desain dan pengujian sistem pentanahan. Di Indonesia, terdapat regulasi yang ditetapkan

oleh PLN dan SNI yang juga mengatur aspek-aspek teknis dari sistem pentanahan. Mematuhi standar ini tidak hanya menjamin keselamatan tetapi juga membantu dalam pengoperasian yang efisien (Moreno dkk., 2024).

Persyaratan teknis yang harus dipenuhi oleh sistem pentanahan gardu distribusi mencakup resistansi pentanahan maksimum, desain elektroda, dan pengujian berkala untuk memastikan kinerja yang optimal. Sistem pentanahan harus dirancang untuk menahan arus gangguan yang mungkin terjadi, termasuk arus petir dan arus hubung singkat. Penelitian menunjukkan bahwa resistansi pentanahan yang tinggi dapat menyebabkan risiko yang lebih besar terhadap peralatan dan keselamatan (Putra dkk., 2023). Tantangan spesifik dalam implementasi baja di gardu distribusi mencakup masalah korosi dan kebutuhan untuk pemeliharaan yang lebih sering. Meskipun baja adalah material yang ekonomis, ketahanannya terhadap korosi dalam lingkungan tertentu dapat menjadi kendala. Oleh karena itu, perlakuan tambahan seperti pelapisan atau penggunaan bahan penguat lainnya sering kali diperlukan untuk meningkatkan umur pakai sistem pentanahan (Hugo dkk., 2024).

C. Resistivitas Tanah

Tanah merupakan suatu sistem yang kompleks, terdiri dari komponen padat, cair, dan gas. Struktur dan karakteristik tanah merupakan salah satu faktor yang wajib diketahui karena mempunyai hubungan erat dengan perencanaan sistem grounding dan bagaimana pengaruhnya terhadap impedansi grounding tersebut (Rajagukguk, 2013). Sistem pentanahan harus memiliki impedansi pentanahan yang sekecil mungkin. Salah satu yang mempengaruhi nilai impedansi pentanahan yaitu resistivitas atau tahanan jenis tanah itu sendiri. Resistivitas tanah berbeda-beda pada tiap tempat di dunia dan berubah-ubah setiap musim. Resistivitas tanah ditentukan berdasarkan kandungan elektrolitnya yaitu berupa titik embun, mineral dan kandungan garamnya. Area

tanah yang kering akan mempunyai resistivitas tanah yang tinggi apabila mengandung garam yang tidak mudah larut.

Faktor yang mempengaruhi resistivitas tanah meliputi jenis tanah, komposisi kimia yang terkandung dalam tanah, konsentrasi garam yang terlarut dalam air yang berada di tanah, kelembaban udara, temperatur tanah, ukuran partikel tanah, kepadatan tanah, dan tekanan tanah. Jenis tanah, seperti berpasir, berbatu, tanah liat dan lain-lain mempengaruhi besar tahanan jenis. Berdasarkan Persyaratan Umum Instalasi Listrik, tahanan jenis tanah dari berbagai jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini :

Tabel 1. Tahanan Jenis Tanah (PUIL, 2020)

Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah ($\Omega\text{-m}$)
Tanah Rawa	30
Tanah Liat dan Tanah Ladang	100
Pasir Basah	200
Kerikil Basah	500
Pasir dan Kerikil kering	1000
Tanah Berbatu	3000

Faktor lain yang mempengaruhi resistivitas tanah adalah kandungan garam. Tanah yang memiliki kadar garam (ionik) tinggi, seperti tanah di daerah pantai atau rawa, cenderung memiliki resistivitas rendah karena ion-ion dalam larutan tanah meningkatkan konduktivitas listrik. Sebaliknya, tanah yang miskin mineral dan garam, seperti tanah berbatu atau berpasir, memiliki resistivitas lebih tinggi (IEEE Std 80, 2013). Selain itu, kelembaban tanah memiliki pengaruh signifikan. Semakin basah tanah, maka semakin baik daya hantar listriknya karena air dalam pori-pori tanah dapat bertindak sebagai media konduktif, terutama jika mengandung ion terlarut. Penurunan kelembaban secara drastis, seperti pada musim kemarau, dapat meningkatkan

resistivitas tanah secara tajam, bahkan hingga beberapa kali lipat dibanding saat kondisi jenuh air. Menurut (Mitolo dkk., 2006), resistivitas tanah dapat meningkat hingga 10 kali lipat saat kadar air menurun dari kondisi jenuh ke kering. Temperatur juga berperan penting, meskipun pengaruhnya lebih terlihat pada tanah yang memiliki kelembaban. Ketika temperatur menurun dan mencapai titik beku, air dalam tanah membeku dan kehilangan kemampuan menghantarkan listrik, sehingga resistivitas meningkat drastis. Sebaliknya, peningkatan suhu dalam batas tertentu dapat menurunkan resistivitas karena viskositas larutan berkurang, sehingga ion-ion bergerak lebih bebas (Awad & Said, 2018). Namun, pada tanah yang sangat kering, perubahan temperatur memiliki pengaruh yang lebih kecil dibanding pada tanah lembab.

D. Resistansi Pentanahan

Resistansi pentanahan adalah hambatan listrik antara sistem pentanahan dan bumi sebagai terminal referensi nol volt. Semakin rendah nilai resistansi pentanahan, maka semakin efektif sistem tersebut dalam mengalirkan arus gangguan. IEEE Std 80-1986 merekomendasikan resistansi pentanahan pada gardu distribusi maksimal 5 ohm, meskipun standar lain seperti NEC (National Electrical Code) merekomendasikan resistansi kurang dari 25 ohm untuk instalasi biasa. Namun, dalam sistem kritis seperti gardu distribusi dan pembangkit, nilai resistansi yang lebih kecil (bahkan < 1 ohm) sangat disarankan pada standar yang lebih baru seperti IEEE Std 80-2000 dan IEEE Std 80-2013.

Secara teoretis, resistansi pentanahan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti jenis tanah, kelembaban, dan desain elektroda, diukur berdasarkan impedansi sistem yang terhubung ke elektroda pentanahan. Resistansi suatu elektroda batang tunggal vertikal dalam tanah homogen dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (IEEE Std 81, 2012):

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{d} \right) - 1 \right] \dots (1)$$

Dimana:

- R = resistansi pentanahan (ohm)
- ρ = resistivitas tanah (ohm-meter)
- L = panjang batang elektroda (m)
- d = diameter batang elektroda (m)

Persamaan ini didasarkan pada model medan potensial sebar radial dari batang elektroda silindris ke dalam tanah homogen. Semakin panjang batang dan semakin kecil resistivitas tanah, maka nilai resistansi akan semakin kecil (Nahman & amon, 1984).

Jika digunakan beberapa batang elektroda yang dipasang berjajar atau membentuk pola tertentu, maka resistansi total bukan merupakan jumlah linear dari masing-masing batang karena adanya interaksi medan listrik di sekitarnya. Perhitungannya menggunakan rumus pendekatan:

$$R_n = \frac{R_1}{K_n} \dots (2)$$

Dimana:

- R_n = resistansi sistem dengan n batang
- R_1 = resistansi batang tunggal
- K_n = faktor reduksi resistansi, tergantung jumlah dan jarak antar batang

Sebagai contoh, menurut (IEEE Std 142, 2007), jika dua batang dipasang dengan jarak minimal dua kali panjang batang, maka $K_n \approx 1,6$; untuk tiga batang $K_n \approx 2,3$; dan seterusnya.

Ukuran konduktor pentanahan harus cukup untuk menahan arus gangguan maksimum yang mungkin terjadi selama waktu tertentu tanpa mengalami kerusakan termal atau mekanik. Konduktor ini harus memiliki ukuran penampang yang memadai untuk memastikan disipasi panas yang dihasilkan oleh arus gangguan tidak melebihi batas termal konduktor. Menurut (IEC 60364-5-54, 2011) dan (IEEE Std 80, 2013), luas penampang minimum A dari konduktor pentanahan dapat dihitung dengan rumus termal sebagai berikut:

$$A = \frac{I_k \sqrt{t}}{k} \dots (3)$$

Dimana:

- A = luas penampang konduktor (mm²)
- I_k = arus gangguan maksimum (A)
- t = durasi arus gangguan (detik)

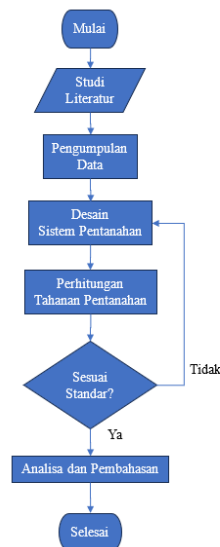
k = konstanta tergantung material konduktor dan suhu akhir yang diizinkan

Nilai k bergantung pada material konduktor dan temperatur kerja akhir, misalnya:

- Tembaga tanpa isolasi: $k \approx 115$ (untuk suhu akhir 250°C)
- Aluminium tanpa isolasi: $K_n \approx 76$

METODE PENELITIAN

Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Jenis dan Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini merupakan studi eksperimental yang berfokus pada evaluasi resistansi pertanahan menggunakan baja sebagai material utama. Ruang lingkup penelitian mencakup analisis kondisi tanah di sekitar Gardu Distribusi ULP Medan Timur, serta pengujian resistansi pertanahan dengan menggunakan berbagai konfigurasi elektroda baja. Data yang dikumpulkan akan dibandingkan dengan standar yang ada untuk menentukan efektivitas penggunaan baja dalam sistem pertanahan.

Proses dimulai dengan identifikasi masalah, diikuti dengan pengumpulan data mengenai kondisi tanah dan sistem pertanahan yang ada. Selanjutnya, dilakukan analisis terhadap data yang diperoleh, di mana variasi resistansi pertanahan akan diuji dengan menggunakan material baja.

Akhirnya, hasil analisis akan dievaluasi untuk dilakukan perbaikan.

Evaluasi kinerja sistem pentanahan yang telah diterapkan akan dilakukan dengan mengukur resistansi pentanahan secara berkala. Data yang diperoleh akan dianalisis untuk menentukan efektivitas penggunaan baja dalam sistem pentanahan. Akhirnya, hasil penelitian ini akan disusun dalam bentuk laporan yang menyajikan temuan dan rekomendasi untuk penggunaan baja dalam sistem pentanahan. Dengan metodologi yang sistematis ini, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengembangan sistem pentanahan yang lebih baik.

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini mencakup beberapa metode, antara lain survei lapangan, pengujian resistivitas tanah, dan analisis dokumen. Survei lapangan dilakukan untuk mengumpulkan data mengenai kondisi fisik lokasi gardu distribusi, termasuk jenis tanah, kedalaman, dan keberadaan infrastruktur lain yang dapat mempengaruhi pemasangan batang pentanahan yang efektif dan pengukuran resistansi pentanahan. Selain itu, survei lapangan akan dilakukan untuk mendapatkan informasi yang lebih komprehensif mengenai kondisi tanah dan lingkungan sekitar. Proses ini melibatkan pengamatan langsung terhadap berbagai faktor yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran, seperti jenis vegetasi, kelembaban tanah, dan aktivitas manusia di area tersebut. Informasi ini sangat penting untuk memahami bagaimana faktor-faktor ini dapat mempengaruhi resistansi pentanahan.

Pengujian resistivitas tanah dilakukan menggunakan alat pengukur resistivitas, seperti earth resistance tester, untuk mendapatkan data yang akurat mengenai resistivitas tanah di lokasi pada berbagai kedalaman. Data ini akan menjadi dasar dalam menentukan ukuran batang pentanahan yang digunakan. Data pengukuran resistansi dikumpulkan dalam dua tahap: sebelum dan sesudah

implementasi sistem *grounding*, dengan mempertimbangkan variasi jumlah, jenis, ukuran, dan kedalaman batang pentanahan.

Metode Analisis Data

Metode analisis data didasarkan pada penelitian eksperimental, di mana berbagai bahan yang digunakan dalam sistem pentanahan diuji untuk menentukan sifat dan kinerjanya. Untuk menilai efektivitas baja sebagai material pentanahan, dilakukan analisis komparatif dengan membandingkan nilai resistansi antara elektroda baja dan material lain, serta menghitung persentase reduksi resistansi untuk setiap jenis. Dalam mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi resistansi tanah, analisis difokuskan pada evaluasi pengaruh jenis tanah, kelembaban, dan parameter desain seperti kedalaman pemasangan dan konfigurasi elektroda. Analisis korelasi dilakukan untuk memahami hubungan antara berbagai parameter lingkungan dengan nilai resistansi yang terukur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Penelitian

Berdasarkan hasil survei lapangan pada beberapa gardu distribusi di wilayah kerja ULP Medan Timur, maka dapat dikumpulkan data mengenai kondisi fisik lokasi gardu distribusi, mencakup jenis tanah, resistivitas tanah, kelembaban tanah, dan hasil pengukuran resistansi pentanahan. Tabel 3 menyajikan ringkasan data pengukuran selama 3 tahun terakhir.

Tabel 4. Data awal gardu distribusi

No	Lokasi Gardu	Jenis Tanah	Resistivitas Tanah ($\Omega \cdot m$)	Kelembaban (%)	Resistansi Awal (Ω)
1	Mandala	Lempung	80	28	12,4
2	Sei Kera	Pasir	140	20	17,8
3	Teguh	Lempung	95	26	13,2
4	Pintu Air	Berpasir	120	23	15,6
5	Jaya	Lempung	85	30	11,8

Berdasarkan hasil pengukuran resistansi pentanahan pada beberapa gardu distribusi di wilayah kerja ULP Medan Timur, diketahui bahwa seluruh gardu memiliki nilai resistansi di atas 10 Ω , yaitu berkisar antara 11,8 Ω hingga 17,8 Ω . Jika dibandingkan dengan

standar internasional seperti IEEE Std 80-2013, IEC 60364-5-54, dan ANSI/IEEE Std 142 (Green Book), kondisi ini tetap dikategorikan tidak memenuhi syarat keamanan untuk sistem distribusi tenaga listrik. Secara umum:

- a. IEEE Std 80-2013 merekomendasikan bahwa resistansi pentanahan untuk sistem distribusi harus lebih kecil dari 1–5 ohm, tergantung pada tingkat gangguan dan sensitivitas sistem proteksi. Untuk sistem yang membutuhkan keandalan tinggi, nilai di bawah 1 ohm bahkan menjadi acuan.
- b. IEC 60364-5-54 menetapkan bahwa resistansi sistem pentanahan harus cukup rendah untuk memungkinkan pengoperasian proteksi dalam waktu yang diizinkan. Meskipun tidak menyebut angka pasti, nilai di bawah 10 ohm biasanya dianggap batas praktis atas dalam sistem tegangan rendah.
- c. ANSI/IEEE Std 142 menyarankan resistansi pentanahan di bawah 5 ohm untuk instalasi umum dan 1 ohm atau lebih rendah untuk sistem sensitif seperti gardu induk dan pusat data.

Penelitian ini menggunakan jenis elektroda batang yang ditanam vertikal ke dalam tanah dengan jenis tanah yang ada pada gardu distribusi masing-masing, diperlukan bahan dan metode penelitian yang tepat agar diperoleh hasil yang diharapkan. Penentuan konfigurasi dan material batang baja dalam sistem pentanahan dilakukan berdasarkan kombinasi antara kondisi geoteknis di lapangan, efektivitas teknis, serta efisiensi biaya. Beberapa aspek utama yang menjadi dasar pertimbangan antara lain:

1. Resistivitas Tanah. Nilai resistivitas tanah yang tinggi (misalnya di atas $100 \Omega \cdot m$) memerlukan penambahan batang lebih banyak atau penggunaan aditif seperti bentonit. Untuk daerah seperti pasir kering, resistivitas tinggi membuat sistem pentanahan kurang efektif jika hanya menggunakan satu atau dua batang.

2. Jenis dan Kelembaban Tanah. Tanah lempung yang memiliki kandungan air lebih tinggi cenderung memiliki konduktivitas yang lebih baik. Oleh karena itu, di lokasi seperti Gardu C, cukup dengan 6 batang galvanis untuk mencapai nilai $< 5 \Omega$. Sedangkan pada tanah berpasir dan kering, kombinasi batang dan bahan pendukung seperti bentonit dibutuhkan.

3. Standar Keandalan Sistem. Berdasarkan standar internasional (IEEE Std 80 dan IEC 60364-5-54), resistansi pentanahan idealnya $< 5 \Omega$ untuk sistem distribusi tegangan rendah dan menengah. Konfigurasi batang baja harus dirancang untuk memenuhi atau mendekati batas tersebut.

4. Panjang dan Jumlah Batang. Panjang batang umumnya antara 2.5–3 meter. Konfigurasi vertikal lebih efektif secara teknis, namun pada lokasi sempit atau berbatu, kombinasi vertikal dan horizontal dapat digunakan. Jumlah batang disesuaikan dengan nilai awal resistansi dan target akhir.

5. Material Baja. Pemilihan antara galvanis dan baja karbon mempertimbangkan ketahanan korosi, konduktivitas, dan biaya. Galvanis lebih tahan lama di tanah lempung atau asam, sedangkan baja karbon cukup untuk penggunaan ekonomis jangka menengah.

Berdasarkan data-data awal di atas, dilakukan penambahan batang baja dalam sistem pentanahan dengan bahan-bahan yang dibutuhkan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 5. Konfigurasi material baja tambahan

No	Lokasi Gardu	Jenis Baja	Panjang Batang (m)	Diameter (mm)	Jumlah Batang
1	Mandala	Baja Galvanis	3	16	4
2	Sei Kera	Baja Karbon Umum	2,5	12	4
3	Teguh	Baja Galvanis	3	16	6
4	Pintu Air	Baja Karbon Umum + bentonit	2,5	12	4
5	Jaya	Baja Galvanis	3	16	2

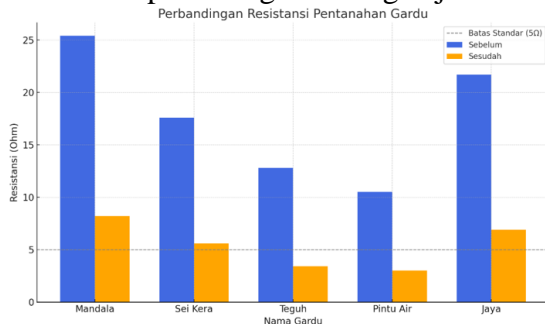
Setelah dilakukan perbaikan melalui pemasangan batang baja sebagai elektroda

tambahan (baja galvanis dan baja karbon umum), dilakukan pengukuran ulang terhadap resistansi pentanahan pada tiap gardu distribusi. Berikut adalah data hasil pengukuran resistansi pentanahan sebelum dan sesudah pemasangan batang baja di lima lokasi gardu.

Tabel 6. Penurunan resistansi pentanahan

Gardu	Resistansi Awal (Ω)	Resistansi Akhir (Ω)	Penurunan (Ω)	Penurunan (%)
Mandala	12.4	5.1	7.3	58.9%
Sei Kera	17.8	7.6	10.2	57.3%
Teguh	13.2	4.3	8.9	67.4%
Pintu Air	15.6	6.5	9.1	58.3%
Jaya	11.8	6.9	4.9	41.5%

Gambar 3 memperlihatkan grafik perbandingan resistansi pentanahan sebelum dan sesudah pemasangan batang baja



Gambar 3. Perbandingan Resistansi Awal dan Akhir pada Setiap Gardu

E. Simulasi Matlab

Perencanaan simulasi dilakukan dengan menggunakan M-File pada software matlab. Simulasi dilakukan untuk mempermudah dalam melakukan perhitungan, berikut simulasi yang dirancang:

```

clc;
clear;

% Data resistivitas tanah tiap gardu (ohm-meter)
rho_gardu = [95, 110, 102, 108, 97]; % Gardu A-E
gardu_label = {'Mandala', 'Sei Kera', 'Teguh', 'Pintu Air', 'Jaya'};
L = 2.4; % Panjang batang (meter)
d = 0.016; % Diameter batang (meter)
n = 1:10; % Jumlah batang (1 sampai 10)

% Faktor reduksi empiris (tidak linier)
reduction_factor = [1, 0.6, 0.4, 0.3, 0.25, 0.22, 0.2, 0.19, 0.18, 0.17];

% Inisialisasi matriks hasil
R_total = zeros(length(rho_gardu), length(n));

% Hitung resistansi tiap gardu
for i = 1:length(rho_gardu)

```

```

    rho = rho_gardu(i);
    R_single = (rho / (2 * pi * L)) * (log(4 * L / d) - 1);
    R_total(i, :) = R_single .* reduction_factor;
end

% Tampilkan hasil
fprintf('Simulasi Resistansi Tiap Gardu (Ohm)\n');
fprintf('Jumlah Batang: 1 s.d. 10\n');
for i = 1:length(rho_gardu)
    fprintf('Gardu %s: ', gardu_label{i});
    fprintf('%2f ', R_total(i, :));
    fprintf('\n');
end

% Plot grafik
figure;
hold on;
colors = lines(length(rho_gardu));
for i = 1:length(rho_gardu)
    plot(n, R_total(i, :), '-o', 'DisplayName', ['Gardu ' gardu_label{i}], 'Color', colors(i,:), 'LineWidth', 2);
end

```

F. Analisis Data

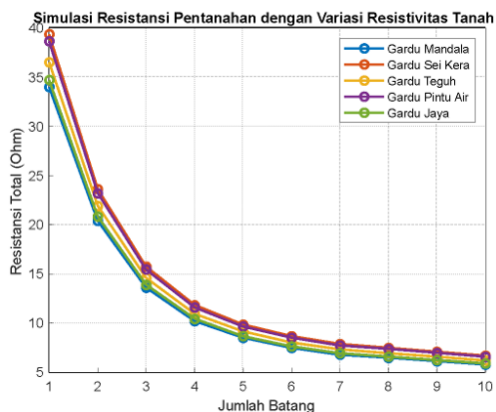
Berdasarkan hasil pengukuran, diketahui bahwa rata-rata resistansi awal adalah 14,16 Ω dan rata-rata resistansi akhir setelah perbaikan adalah 6,08 Ω . Semua gardu mengalami penurunan resistansi yang signifikan dengan resistansi rata-rata mencapai 8,08 Ω atau setara dengan 56,68%. Lokasi Gardu C menunjukkan hasil terbaik dengan resistansi akhir 4,3 Ω . Jika dibandingkan dengan standar internasional seperti IEEE Std 80-2013, IEC 60364-5-54, dan ANSI/IEEE Std 142, kondisi ini dapat dikategorikan memenuhi syarat keamanan untuk sistem distribusi tenaga listrik dengan maksimum resistansi pentanahan kecil dari 5 Ω .

Gardu E memiliki penurunan resistansi paling kecil secara absolut maupun persentase (4,9 Ω atau 41,5%). Hal ini dapat disebabkan oleh faktor tanah (misalnya tekstur berpasir atau kurangnya kelembaban) atau jumlah batang baja yang dipasang lebih sedikit dibanding gardu lain. Oleh karena itu, diperlukan perbaikan tambahan atau optimalisasi teknik pemasangan di lokasi lain, misalnya:

- Menambah jumlah batang baja
- Menggunakan bahan pendukung seperti bentonit atau arang aktif

c. Menyusun batang dalam pola segitiga atau persegi untuk efektivitas area

Dengan menggunakan Persamaan (3) dapat disimulasikan besar resistansi total variasi jumlah batang yang ditanam dan data resistivitas tanah pada kelima gardu distribusi. Selanjutnya hubungan antara jumlah batang dengan resistansi total dapat diplot dalam bentuk grafik diperlihatkan pada Hasil dari simulasi matlab menunjukan grafik seperti terlihat pada gambar berikut :



Gambar 4. Hasil simulasi resistansi pentanahan tiap gardu

Hasil simulasi menunjukkan bahwa resistansi pentanahan menurun seiring bertambahnya jumlah batang pentanahan yang ditanam secara paralel. Namun, penurunan resistansi ini tidak bersifat linier karena adanya efek interaksi antara batang satu dengan yang lain. Setiap gardu yang disimulasikan dengan resistivitas tanah berbeda-beda, mulai dari 95 hingga 110 $\Omega \cdot \text{m}$ memiliki nilai resistansi awal yang bervariasi. Gardu dengan resistivitas lebih tinggi (misalnya Gardu Sei Kera: 110 $\Omega \cdot \text{m}$) menunjukkan resistansi pentanahan yang lebih besar dibandingkan gardu dengan resistivitas tanah yang lebih rendah (misalnya Gardu Mandala: 95 $\Omega \cdot \text{m}$), untuk jumlah batang yang sama. Penambahan batang dari 1 hingga 4 menghasilkan penurunan resistansi yang signifikan, sedangkan setelah jumlah batang mencapai lebih dari 6, penurunan resistansi mulai melambat.

Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas penambahan batang akan semakin kecil setelah titik tertentu, dan perlu diperhitungkan efisiensi biaya dan ruang dalam implementasi di lapangan. Simulasi ini mengilustrasikan pentingnya menyesuaikan desain sistem pentanahan dengan kondisi resistivitas tanah lokal. Pada lokasi dengan resistivitas tinggi, penambahan jumlah batang atau penggunaan material dengan konduktivitas lebih tinggi dapat menjadi strategi untuk mencapai nilai resistansi pentanahan yang memenuhi standar, seperti ≤ 5 ohm berdasarkan IEEE Std 80. Dengan demikian, hasil ini mendukung pendekatan praktis dalam perbaikan sistem pentanahan gardu distribusi guna meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem tenaga listrik

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan:

1. Penambahan batang baja efektif menurunkan resistansi hingga lebih dari 50%.
2. Jenis tanah lempung menunjukkan hasil penurunan yang lebih baik dibanding pasir.
3. Gardu dengan 6 batang baja galvanis lebih efisien daripada 2 batang.
4. Lokasi yang belum memenuhi standar bisa menggunakan tambahan bentonit atau batang horizontal.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat dikatakan bahwa desain sistem pentanahan gardu induk dengan konfigurasi grid 150 kV menggunakan metode persegi panjang dapat meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem. Oleh karena itu diharapkan pada penelitian selanjutnya mengeksplorasi penggunaan teknologi canggih, seperti kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin, dalam merancang dan mensimulasikan sistem pbumian. Dengan memanfaatkan teknologi ini, diharapkan dapat

dikembangkan pembumian yang lebih efektif namun ekonomis.

1. Untuk lokasi gardu dengan jenis tanah berpasir, disarankan menggunakan kombinasi batang baja dan bahan tambahan seperti bentonit untuk meningkatkan konduktivitas.
2. Evaluasi berkala perlu dilakukan terhadap sistem pentanahan gardu untuk menjamin keamanan dan keandalan sistem distribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A., Saroni, M. R. A., Razak, I. A. W. A., & Ahmad, S. (2014). A case study on ground resistance based on copper electrode vs. Galvanized iron electrode. *2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 406–410. <https://doi.org/10.1109/PECON.2014.7062479>
- Arsuyono, -. (2021). *ANALISIS PERBAIKAN JATUH TEGANGAN (VOLTAGE DROP) PADA PENYULANG LUBUK JAMBI DI AREA PELAYANAN PT. PLN (PERSERO) ULP TALUK KUANTAN* [Skripsi, UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU]. <https://repository.uin-suska.ac.id/46794/>
- Awad, M. M., & Said, E.-S. S. (2018). EFFECT OF BOTH AMBIENT TEMPERATURE AND SOIL MOISTURE ON THE EARTHING RESISTANCE. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 13(49), 1300–1310. <https://doi.org/10.21608/aej.2018.18935>
- Bashir, M., Sadeh, J., Kamyab, E., & Yaghobi, H. (2012). Effect of increasing the grounding grid resistance of a ground system at a substation on the safety and transient overvoltage on the interior equipments. *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 1022–1027. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2012.6221528>
- Hugo, M. Á., Gabriel, R. M. J., Rafael, V. C. R., & Mario, T. P. (2024). Influence of the use of ground enhancement materials on the reduction of electrical resistivity in grounding systems: A review. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 36(3), Article 3. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v36.i3.pp1365-1378>
- IEC 60364-5-54. (2011). *IEC 60364-5-54:2011 (Versi 3.0)* [International Standard]. IEC Publications. <https://webstore.iec.ch/en/publication/1882>
- IEEE Std 80. (2013). *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7109078>
- IEEE Std 81. (2012). *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6392181>
- IEEE Std 142. (2007). *IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991) IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- IEEE Std C62.92.1. (2016). IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems—Part I: Introduction. *IEEE Std C62.92.1-2016 (Revision of IEEE Std C62.92.1-2000)*, 1–38. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2017.7891430>
- Anisah, S., Tharo, Z., & Suhardi, S. (2019). *ANALISIS PERBAIKAN TEGANGAN UJUNG PADA JARINGAN TEGANGAN MENENGAH 20 KV DENGAN SIMULASI E-TAP (STUDI KASUS PT PLN (PERSERO) RAYON KUALA*. *Prosiding Seminar Nasional Teknik UISU (SEMNASTEK)*, 2(1), 208–

213.
<https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/semnastek/article/view/1314>
- IEC 60287-1-2:2023. (t.t.). Diambil 11 Mei 2025, dari <https://webstore.iec.ch/en/publication/68120>
- STANDAR KONSTRUKSI
JARINGAN TEGANGAN RENDAH TENAGA LISTRIK. (t.t.). PT PLN (Persero).
- Anisah, S., Rahmانيar, R., & Khaizairani, A. (2018). Analisis Perbaikan Tegangan Ujung Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 KV Express Trienggadeng Daerah Kerja PT PLN (Persero) Area Sigli Rayon Meureudu Dengan Simulasi E-Tap. *SEMNASTEK UISU 2018*.
- Situmorang, H. F., Wibowo, P., & Lubis, Z. (2024). ANALISIS PENGGUNAAN KAPASITOR BANK DALAM UPAYA PERBAIKAN FAKTOR DAYA PADA LOW VOLTAGE MAIN DISTRIBUTION PANEL (LVMDP) DI PT.PERMATA HIJAU PALM OLEO (PHPO) KIM II. *INTECOMS: Journal of Information Technology and Computer Science*, 7(3), 990–1001. <https://doi.org/10.31539/INTECOMS.V7I3.10813>
- Pratama, R. B., Wibowo, P., & Anisah, S. (2025). Analisis Pengaruh Penggantian Konduktor pada Saluran Udara Tegangan Menengah 20kV terhadap Drop Tegangan di PT. PLN (Persero) UP3 Bangkinang. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 5(2), 803–812. <https://doi.org/10.54082/JUPIN.1361>