

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurnal, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Menurut Junaidi, Dian Eka Putra & Choirul Rizal (2024), dalam jurnal *“Perbandingan Resistansi Pentanahan antara Hasil Perencanaan dan Hasil Commissioning Test di Gardu Distribusi 20 kV”* menyatakan bahwa dalam penelitian pada gardu distribusi 20 kV di Kabupaten Muara Enim ditemukan bahwa kedalaman elektroda batang dan jenis tanah memengaruhi secara signifikan nilai resistansi pentanahan. Nilai resistansi prediksi dari perencanaan dibandingkan dengan hasil lapangan menunjukkan terdapat perbedaan, dan lapangan sering menunjukkan nilai tahanan yang agak lebih rendah atau lebih tinggi tergantung kondisi tanah dan kedalaman elektroda [6].
2. Menurut Pebi Muhammad Rizki & Dian Eka Putra (2020), dalam jurnal *“Pengaruh Paralel Pentanahan Transformator dan Pentanahan Arrester terhadap Kinerja Resistansi Pentanahan Transformator Distribusi 250 kVA Gardu BA 005 di PT. PLN (Persero) UP3 Bengkulu ULP Teluk Segara”* penelitian menyebutkan bahwa pemasangan pentanahan paralel (body trafo + arrester) dapat menurunkan resistansi pentanahan dibanding sistem tunggal, terutama pada kondisi cuaca siang hari dan beban puncak. Pada penelitian tersebut, resistansi terbesar terjadi pada siang hari saat cuaca cerah, dan resistansi paralel lebih rendah dibanding resistansi masing-masing elemen pentanahan [4].
3. Menurut Subianto & Raden Ahmad Yani (2022), dalam jurnal *“Analisa Pentanahan Gardu Distribusi 20 kV dari Penyulang Air Saleh (PT. PLN (Persero) Sub Ranting Air Saleh)”* dijelaskan bahwa sistem pentanahan gardu distribusi penting untuk mengamankan peralatan dan manusia dari gangguan seperti petir dan hubung singkat. Penelitian ini mengukur tahanan pentanahan pada gardu distribusi 20 kV, menunjukkan bahwa desain pentanahan harus mempertimbangkan karakteristik tanah lokal, kondisi kelembapan, serta jarak antar elektroda agar memperoleh nilai tahanan yang sesuai.[8].

4. Menurut Dulhadi, Diah Suwarti Widyastuti & Indra Budhi Frebrianto (2021), dalam jurnal *“Pengaruh Sistem Pentanahan Gardu Distribusi terhadap Tegangan Sentuh”* penelitian menguji sistem pentanahan eksisting (solid grounding) vs sistem grid ground pada gardu distribusi. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sistem grid ground jauh lebih baik dalam mengurangi tegangan sentuh dan nilai tahanan pentanahan, dibanding sistem eksisting [9].
5. Menurut Muhammad Sidik, Sabar Setiawidayat & Mohammad Mukhsim (2020), dalam artikel *“Pengaruh Sistem Pentanahan terhadap Arus Gangguan Tanah pada Sistem Distribusi 20 kV”* dinyatakan bahwa kondisi grounding / pentanahan yang baik sangat mempengaruhi arus gangguan tanah (earth fault current), dan bahwa semakin mendekati sumber gangguan dan jenis tanah yang lebih konduktif, arus gangguan menjadi lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa nilai tahanan pentanahan dan kondisi tanah akan mempengaruhi keamanan dan efektifitas sistem proteksi.[10].

Tabel 2. 1 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	“Perbandingan Resistansi Pentanahan antara Hasil Perencanaan dan Hasil Commissioning Test di Gardu Distribusi 20 kV”	Perbedaan antara hasil perencanaan dengan hasil uji lapangan (commissioning test) pada nilai resistansi pentanahan gardu distribusi.	Penelitian menggunakan metode kuantitatif melalui pengukuran langsung dan perbandingan hasil lapangan terhadap data perencanaan teknis.	Hasil menunjukkan adanya selisih antara hasil perencanaan dan hasil lapangan karena kondisi tanah dan kedalaman elektroda yang berbeda dari asumsi desain.	“Perbandingan Resistansi Pentanahan antara Hasil Perencanaan dan Hasil Commissioning Test di Gardu Distribusi 20 kV” (Junaidi, Dian Eka Putra

	(Junaidi, Dian Eka Putra & Choirul Rizal, 2024)			Penelitian ini belum mempertimbang kan faktor ketinggian (elevasi) dan variasi kelembapan tanah.	& Choirul Rizal, 2024)
2.	“Pengaruh Paralel Pentanahan Transformat or dan Pentanahan Arrester terhadap Kinerja Resistansi Pentanahan Transformat or Distribusi 250 kVA Gardu BA 005” (Rizki & Putra, 2020)	Nilai resistansi pentanahan yang tinggi pada sistem tunggal gardu distribusi.	Metode eksperimen dengan konfigurasi paralel antara pentanahan trafo dan arrester, kemudian mengukur resistansi pada berbagai kondisi cuaca.	Sistem pentanahan paralel menghasilkan nilai resistansi lebih rendah dibanding sistem tunggal. Penelitian ini tidak meninjau pengaruh topografi atau elevasi lahan terhadap hasil resistansi.	“Pengaruh Paralel Pentanahan Transformator dan Pentanahan Arrester terhadap Kinerja Resistansi Pentanahan Transformator Distribusi 250 kVA Gardu BA 005” (Rizki & Putra, 2020)

3.	“Analisa Pentanahan Gardu Distribusi 20 kV dari Penyulang Air Saleh (PT PLN Sub Ranting Air Saleh)” (Subianto & Yani, 2022)	Nilai tahanan pentanahan gardu distribusi yang belum memenuhi standar PLN akibat kondisi tanah yang bervariasi.	Pengukuran lapangan menggunakan earth tester dan perhitungan teoritis berdasarkan standar PUIL 2011 dan SPLN.	Hasil menunjukkan bahwa kelembapan tanah berpengaruh besar terhadap nilai tahanan pentanahan. Penelitian ini fokus pada jenis tanah tanpa meninjau pengaruh elevasi atau ketinggian tempat.	“Analisa Pentanahan Gardu Distribusi 20 kV dari Penyulang Air Saleh (PT PLN Sub Ranting Air Saleh)” (Subianto & Yani, 2022)
4.	“Pengaruh Sistem Pentanahan Gardu Distribusi terhadap Tegangan Sentuh” (Dulhadi, Widyastuti & Frebrianto, 2021)	Masih tingginya tegangan sentuh pada sistem pentanahan eksisting gardu distribusi.	Metode simulasi dan pengukuran lapangan untuk membandingkan sistem pentanahan eksisting dengan sistem grid ground.	Sistem grid ground lebih efektif menurunkan tegangan sentuh dan tahanan pentanahan. Penelitian ini belum membahas hubungan antara elevasi lokasi dan variasi nilai	“Pengaruh Sistem Pentanahan Gardu Distribusi terhadap Tegangan Sentuh” (Dulhadi, Widyastuti & Frebrianto, 2021)

				tahanan pentanahan.	
5.	“Pengaruh Sistem Pentanahan terhadap Arus Gangguan Tanah pada Sistem Distribusi 20 kV” (Sidik, Setiawidaya t & Mukhsim, 2020)	Arus gangguan tanah meningkat akibat sistem pentanahan yang tidak efektif di jaringan distribusi 20 kV.	Pendekatan analitis dan simulasi dengan model sistem distribusi yang bervariasi jenis tanah dan nilai resistansinya.	Semakin kecil nilai tahanan pentanahan, semakin besar arus gangguan tanah yang dapat mengalir ke sistem proteksi. Penelitian ini belum membahas pengaruh elevasi atau kontur tanah terhadap nilai resistansi dan arus gangguan.	“Pengaruh Sistem Pentanahan terhadap Arus Gangguan Tanah pada Sistem Distribusi 20 kV” (Sidik, Setiawidayat & Mukhsim, 2020)

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Pentanahan

Sistem pentanahan merupakan bagian penting dari instalasi tenaga listrik yang berfungsi untuk mengalirkan arus gangguan ke tanah agar tidak membahayakan manusia maupun peralatan listrik. Sistem ini bekerja dengan menyalurkan arus bocor atau tegangan lebih akibat kegagalan isolasi, sambaran petir, atau gangguan hubung tanah ke permukaan bumi melalui elektroda logam. Nilai tahanan pentanahan yang baik harus memenuhi standar **PUIL 2011** dan **IEEE Std 81**, yaitu di bawah **5 ohm** agar sistem proteksi bekerja dengan efektif. Besarnya nilai tahanan pentanahan dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya **jenis dan**

resistivitas tanah, kelembaban, kedalaman dan jumlah elektroda, serta bentuk dan bahan elektroda. Semakin tinggi kelembaban tanah dan semakin banyak elektroda yang dipasang, maka semakin kecil nilai tahanan pentanahan yang dihasilkan.

Resistivitas tanah adalah ukuran hambatan tanah terhadap aliran arus listrik yang dinyatakan dalam satuan ohm-meter ($\Omega \cdot m$). Nilai ini dipengaruhi oleh jenis tanah, kandungan mineral, suhu, dan kadar air. Tanah berpasir atau berbatu umumnya memiliki resistivitas tinggi karena daya hantar listriknya rendah, sedangkan tanah lembab atau berlumpur memiliki resistivitas rendah sehingga cocok digunakan untuk sistem pentanahan. Nilai resistansi pentanahan dapat dihitung menggunakan rumus umum elektroda batang tunggal seperti dalam (2.1).

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (2.1)$$

di mana ρ adalah tahanan jenis tanah ($\Omega \cdot m$), L adalah panjang elektroda (m), dan a adalah jari-jari elektroda (m). Untuk mendapatkan nilai tahanan yang lebih kecil, dapat digunakan beberapa elektroda secara paralel atau ditanam lebih dalam. Dengan demikian, perancangan sistem pentanahan yang baik harus mempertimbangkan sifat tanah, bentuk elektroda, serta standar keamanan yang berlaku agar diperoleh sistem proteksi yang andal dan aman.

Tanah merupakan sistem alami yang sangat kompleks karena tersusun atas tiga komponen utama, yaitu padatan mineral, cairan (air), dan gas. Struktur tanah berperan penting dalam menentukan kemampuan tanah menghantarkan arus listrik. Oleh karena itu, kajian mengenai struktur tanah serta pengukuran nilai resistivitasnya menjadi aspek utama dalam perancangan sistem pentanahan, terutama dalam menentukan seberapa dalam elektroda batang harus ditanam agar diperoleh nilai tahanan yang optimal.

Gradien tegangan pada umumnya tidak memberikan pengaruh langsung terhadap resistivitas tanah, kecuali jika nilainya telah melampaui batas kritis tertentu. Nilai kritis ini berbeda-beda tergantung pada komposisi dan kandungan material di dalam tanah. Secara umum, besar gradien tegangan kritis berada pada kisaran beberapa kilovolt per sentimeter.

Tabel 2. 2 Resistansi Jenis Tanah[2].

Jenis Tanah	Resistansi Jenis tanah
	(Ohmmeter)
Tanah rawa	30
Tanah liat dan tanah ladang	100
Pasir basah	200
Kerikil basah	500
Pasir dan kerikil kering	1000
Tanah berbatu	3000

(Sumber: PUIL 2000)

Hendrika Hendrik–Analisa Pengaruh Struktur Tanah Terhadap Impedansi Grounding

Resistivitas tanah merupakan besaran yang menunjukkan kemampuan tanah dalam menghambat aliran listrik, di mana nilai resistivitas sangat dipengaruhi oleh kandungan air dan mineral terlarut di dalamnya. Semakin tinggi kadar air suatu tanah, maka semakin rendah nilai resistivitasnya karena air berperan sebagai medium penghantar ion yang meningkatkan konduktivitas listrik. Sebaliknya, tanah yang kering atau berpori udara cenderung memiliki resistivitas yang lebih tinggi. Distribusi ukuran butiran tanah juga turut memengaruhi resistivitas, tanah berbutir halus seperti lempung memiliki kemampuan menahan air lebih besar dibandingkan tanah berpasir, sehingga menunjukkan variasi resistivitas yang lebih kecil terhadap perubahan kelembapan. Hubungan antara aliran fluida dalam tanah dan aliran listrik dapat dijelaskan melalui keterkaitan antara **Hukum Darcy** dan **Hukum Ohm**, di mana konduktivitas hidrolik (permeabilitas tanah terhadap air) berbanding lurus dengan konduktivitas listrik dan berbanding terbalik dengan resistivitas. Tanah dengan permeabilitas tinggi memungkinkan pergerakan ion lebih mudah, sehingga nilai resistivitasnya rendah. Dalam penelitian tersebut, pengukuran resistivitas dilakukan dengan metode geolistrik konfigurasi **Wenner**, yang menggunakan empat elektroda untuk mengalirkan arus dan mengukur beda potensial. Melalui variasi jarak antar elektroda, diperoleh gambaran perubahan nilai resistivitas terhadap kadar air pada berbagai lintasan pengukuran. Hasil teori menunjukkan bahwa hubungan antara kadar air dan resistivitas bersifat berbanding terbalik secara konsisten. Oleh karena itu, karakteristik resistivitas tanah dapat digunakan sebagai acuan penting dalam

penentuan jenis tanah dan kesesuaiannya terhadap aplikasi kelistrikan, seperti sistem pentanahan transformator atau instalasi pembumian lainnya.[11]

Konduktivitas listrik pada tanah pada dasarnya terjadi melalui proses elektrolit. Oleh karena itu, ketika kadar air di dalam tanah berkurang hingga di bawah sekitar 15% dari berat total tanah, nilai resistivitasnya akan meningkat secara signifikan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Rahmawati *dkk.*, diperoleh hasil bahwa pada kondisi tanah kering, nilai tahanan tanah jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi tanah basah. Selain itu, hasil pengukuran juga menunjukkan bahwa nilai tahanan pentanahan cenderung bervariasi pada setiap lapisan tanah, di mana semakin mendekati permukaan, perubahan nilai tahanannya menjadi lebih berfluktuasi.

Penelitian yang dilakukan oleh Hajar dan Romadani (2023) membahas evaluasi nilai tahanan pentanahan pada peralatan *switchyard* di Gardu Induk Angke milik PT PLN (Persero). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pentanahan memiliki peran penting dalam menjaga keandalan peralatan dan keselamatan operasi sistem tenaga listrik, khususnya dalam menyalurkan arus gangguan ke tanah secara efektif. Pengukuran yang dilakukan memperlihatkan bahwa nilai tahanan pentanahan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, jenis tanah, serta konstruksi sistem pembumian yang digunakan. Oleh karena itu, pengujian dan pemeliharaan sistem pentanahan secara berkala diperlukan untuk memastikan nilai tahanan tetap memenuhi standar yang berlaku sehingga dapat meminimalkan risiko kerusakan peralatan dan gangguan sistem tenaga listrik.[7]

Penelitian yang dilakukan oleh Damiri (2024) membahas perancangan dan analisis sistem pembumian pada Gardu Induk 150 kV Tayan menggunakan perangkat lunak CYMGRD dengan metode grid grounding. Hasil kajian menunjukkan bahwa pemodelan sistem pembumian sangat penting untuk mengetahui distribusi arus gangguan, tegangan langkah, serta tegangan sentuh yang mungkin timbul di area gardu induk. Melalui simulasi tersebut dapat dievaluasi apakah sistem pembumian yang dirancang telah memenuhi standar keselamatan dan keandalan sistem tenaga listrik. Penelitian ini juga menekankan bahwa konfigurasi grid, nilai resistivitas tanah, serta kedalaman dan jarak antar konduktor pembumian sangat berpengaruh terhadap performa sistem pembumian dalam menyalurkan arus gangguan secara aman ke tanah.[19]

Penelitian yang dilakukan oleh Pranoto, Tumaliang, dan Mangindaan (2018) menganalisis sistem pentanahan pada Gardu Induk Teling dengan menggunakan konstruksi grid atau kisi-kisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pembumian berbentuk grid mampu menyebarkan arus gangguan secara lebih merata ke tanah sehingga dapat menurunkan nilai tahanan pentanahan serta mengurangi potensi tegangan sentuh dan tegangan langkah yang berbahaya bagi manusia maupun peralatan. Studi ini juga menegaskan bahwa efektivitas sistem grid sangat dipengaruhi oleh luas area pembumian, kedalaman penanaman konduktor, serta karakteristik resistivitas tanah di lokasi gardu induk. Dengan perencanaan yang tepat, sistem pentanahan grid dapat meningkatkan keandalan dan keselamatan operasi sistem tenaga listrik.[20]

2.2.2 Macam – Macam Pentanahan

Sistem pentanahan merupakan bagian penting dalam menjaga keselamatan dan keandalan instalasi tenaga listrik. Menurut Hutahuruk (1999), sistem pentanahan dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu:

a. Pentanahan Sistem

Pentanahan ini menghubungkan bagian sistem tenaga listrik seperti titik netral transformator atau generator ke tanah. Tujuannya agar gangguan tanah dapat dibatasi hanya pada bagian sistem yang terganggu tanpa mempengaruhi keseluruhan jaringan, sehingga kontinuitas pelayanan listrik tetap terjaga.

b. Pentanahan Peralatan Sistem Grid

Menggunakan beberapa batang elektroda yang ditanam sejajar di permukaan tanah dan dihubungkan menjadi satu jaringan (grid). Sistem ini bertujuan meratakan tegangan permukaan tanah agar aman bagi peralatan dan personel. Semakin banyak elektroda yang dipasang, tahanan total semakin kecil, namun biaya instalasinya meningkat.

c. Pentanahan Peralatan Sistem Rod (Batang)

Menggunakan batang elektroda yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah untuk menurunkan tahanan pentanahan. Beberapa batang dapat disusun sejajar atau dalam pola persegi untuk memperkecil resistansi total.

d. Pentanahan Arrester

Berfungsi mengalirkan arus sambaran petir atau tegangan lebih langsung ke tanah. Umumnya menggunakan elektroda batang (rod) yang dipasang dekat arrester dengan tahanan maksimum di bawah 5 Ω . Jenis arrester yang sering digunakan adalah *Expulsion Type Lightning Arrester*.

e. Pentanahan Peralatan

Berbeda dengan pentanahan sistem, jenis ini menghubungkan bagian logam peralatan yang pada kondisi normal tidak dialiri arus. Tujuannya untuk:

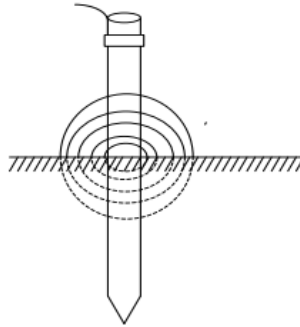
1. Membatasi tegangan antara bagian logam dengan tanah agar aman.
2. Menyediakan impedansi rendah bagi arus gangguan menuju tanah, sehingga mencegah timbulnya tegangan berbahaya bagi manusia.

Selain jenis-jenis di atas, jurnal juga menjelaskan elektroda pentanahan sebagai penghantar yang ditanam di tanah, umumnya terbuat dari tembaga, aluminium, atau besi. Tembaga dianggap paling unggul secara mekanis dan elektrik meskipun lebih mahal. Semakin luas kontak antara elektroda dan tanah, semakin kecil tahanan pentanahan yang dihasilkan.

2.2.3 Elektroda Pentanahan

Elektroda pentanahan merupakan penghantar yang ditanam di dalam tanah dan berfungsi sebagai jalur kontak langsung antara sistem kelistrikan dengan bumi. Tujuannya adalah menyediakan lintasan arus gangguan sebaik mungkin agar arus tersebut dapat segera dialirkan ke tanah[4].

Bahan elektroda yang umum digunakan antara lain **tembaga, aluminium, dan besi**. Dari ketiganya, **tembaga** memiliki sifat mekanis, elektrik, dan ketahanan korosi terbaik, meskipun biayanya lebih tinggi. Elektroda ini dapat berbentuk **batang, pipa, atau plat logam**, tergantung kebutuhan instalasi[4].



Gambar 2.1 Bentuk-bentuk Elektroda Batang[4].

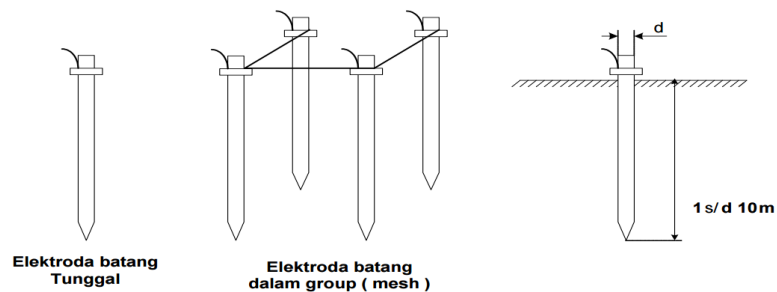
Nilai tahanan pentanahan (R) bergantung pada tahanan jenis tanah (ρ), panjang lintasan arus (L), dan luas penampang elektroda (A), dengan hubungan:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.2)$$

Untuk menurunkan nilai tahanan, diperlukan kontak permukaan elektroda dengan tanah yang luas, atau dengan menambah jumlah elektroda secara paralel agar distribusi arus merata[4].

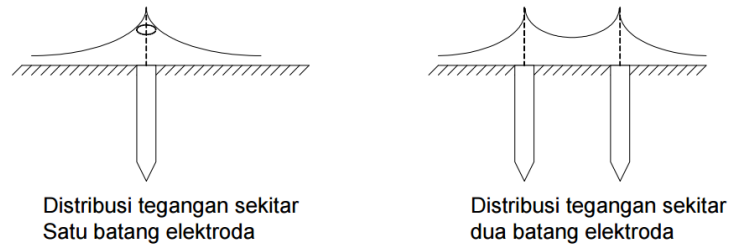
Jenis Elektroda Batang (Rod)

Elektroda batang biasanya ditanam tegak lurus ke dalam tanah dengan kedalaman antara 1 hingga 10 meter. Jika digunakan lebih dari satu batang, jaraknya diatur agar tidak saling memengaruhi potensial tanah. Susunan beberapa batang elektroda yang dipasang berkelompok akan menghasilkan tahanan yang lebih kecil dan distribusi tegangan yang lebih merata dibanding satu batang tunggal[4].



Gambar 2.2 Bentuk-bentuk Elektroda Batang[4].

Dibawah ini diperlihatkan distribusi tegangan yang terjadi pada elektroda pada saat terjadi gangguan.



Gambar 2.3 Distribusi tegangan sekitar Elektroda[4].

2.2.4 Jenis – Jenis Material Elektroda Pentanahan

a. Resistifitas volume bahan logam

Penyusunan secara paralel antara dua bidang yang berbeda pada suatu bahan konduktor dilakukan untuk menyalurkan arus listrik dengan lebih efisien. Nilai resistivitas dari berbagai jenis logam yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.2 (Raharja dan Suhendi, 2019)[3].

Tabel 2.3 Resistifitas logam[3].

Jenis Logam	Resistivitas ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$, 20°C)	Persentase Konduktivitas (% 20°C)
Perak	1,62	106
Tembaga	1,72	100
Emas	2,40	71,6
Aluminium	2,62	65,6

b. *Eart Tester*

Nilai tahanan hasil pengukuran sistem pembumian dapat diketahui menggunakan alat ukur *earth tester*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut (Yusmartato *et al.*, 2021)[3].



Gambar 2.4 *Earth tester*[3].

Pengoperasian alat ukur ini tergolong mudah, yaitu dengan memilih posisi selektor sesuai skala pengukuran dan menekan tombol pengatur untuk mengunci nilai tahanan yang terdeteksi pada alat. Sebelum digunakan, terlebih dahulu perlu ditentukan titik pengukuran dengan menghubungkan tiga kabel yang tersedia sesuai fungsi serta panjang masing-masing kabel[3].

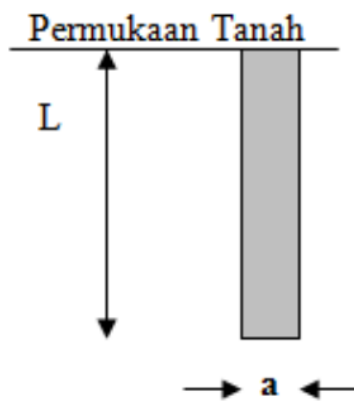
c. Batang Elektroda

Elektroda berfungsi sebagai penghantar arus lebih menuju sistem pentanahan. Berdasarkan bentuknya, elektroda dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu batang, plat, dan pita. Dalam penerapannya, beberapa jenis elektroda dapat digabungkan untuk keperluan percobaan maupun pemasangan di lapangan. Pemasangan dilakukan dengan menancapkan elektroda ke tanah secara tegak lurus agar memperoleh hasil tahanan yang optimal sesuai dengan kondisi struktur tanah. Bahan elektroda harus memiliki ketahanan terhadap korosi serta kekuatan mekanis yang baik agar tetap awet saat tertanam dalam tanah untuk jangka waktu lama. Dengan memanfaatkan kedalaman tanah yang memadai, nilai tahanan pentanahan dapat diperoleh serendah mungkin. Jenis elektroda batang sendiri terdiri atas dua tipe, yaitu **combine ground rod** dan **single ground rod**, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.5 (Yuniarti *et al.*, 2017)[3].



Gambar 2.5 Batang elektroda tembaga[3].

Pemasangan batang elektroda pada sistem pentanahan harus dilakukan dalam posisi tegak lurus terhadap permukaan tanah, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Elektroda tegak lurus[3].

d. Tembaga

Tembaga merupakan logam konduktor yang memiliki kemampuan penghantaran panas dan listrik yang sangat baik. Unsur ini umumnya ditemukan dalam bentuk bebas maupun dalam senyawa seperti kalkopirit (CuFeS_2) dan kuprit (Cu_2O). Penggunaan tembaga telah dikenal sejak sekitar 10.000 tahun yang lalu dengan sebutan *cuprum* atau *cyprim* dalam bahasa Latin, yang berasal dari nama Pulau Siprus. Ketika bereaksi dengan oksigen, tembaga tidak larut oleh air, melainkan membentuk lapisan oksida berwarna cokelat kehitaman pada permukaannya. Ilustrasi logam tembaga dapat dilihat pada Gambar 7, sedangkan karakteristik fisiknya disajikan pada Tabel 2.4 (Mubarok *et al.*, 2022)[3].

Tabel 2. 4 Karakteristik Tembaga[3].

Simbol Kimia	Cu
Nomor Atom	29
Titik Lebur	1356 K
Panas Spesifik (cp, 293 K)	0,383 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Konduktivitas Termal	394 W m ⁻¹ K ⁻¹
Modulus Elastisitas (Young)	110 × 10 ⁹ N m ⁻²
Resistivitas / Konduktivitas Elektrik	1,673 × 10 ⁻⁸ ohm·m
Koefisien Ekspansi Linier	16,5 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹

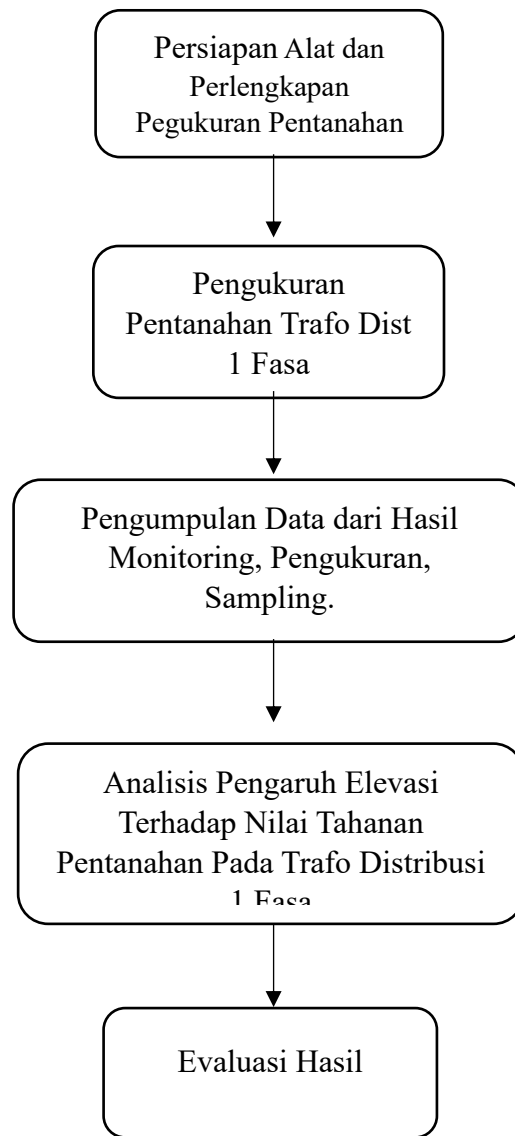
e. Aluminium

Aluminium tergolong logam ringan yang memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi dalam jangka waktu lama. Logam ini memiliki berat jenis sekitar **2,643 kg/m³** dengan kekuatan tarik berkisar antara **83 hingga 310 MPa** (Siahaan & Kurniawan, 2022)[3].

Tabel 2. 5 Karakteristik Aluminium[3].

Sifat	Kemurnian Al(%)	
	99,996	>99,0
Massa jenis (20°C)	2,6989 g/cm ³	2,71 g/cm ³
Titik cair (°C)	660,2	653 – 657
Panas jenis (cal/g·°C)	0,2226	0,2297
Hantaran listrik (%)	64,94	59 (dianil)
Koefisien tahanan listrik terhadap temperatur (1/°C)	0,00429	0,0115
Koefisien pemuaian (20°C–100°C)	23,86 × 10 ⁻⁶ /°C	23,5 × 10 ⁻⁶ /°C
Jenis kristal, konstanta kisi	fcc, a = 4,013 kX	fcc, a = 4,04 kX

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.7 **Kerangka Pemikiran**

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, sebelum dilakukan pengujian terhadap pengaruh elevasi pada nilai tahanan pentanahan, diperlukan terlebih dahulu tahap **persiapan pengujian**. Pada tahap ini, penulis menyiapkan seluruh peralatan yang akan digunakan, seperti alat ukur *earth tester*, elektroda pentanahan, kabel penghubung, serta perlengkapan pendukung lainnya. Proses persiapan dilakukan dengan mengikuti **prosedur standar operasional (SOP)** yang berlaku agar hasil pengukuran dapat diperoleh dengan akurat dan konsisten. Setelah seluruh peralatan siap dan lokasi pengujian pada beberapa titik dengan elevasi berbeda ditentukan, penulis melaksanakan **pengukuran tahanan pentanahan** pada setiap lokasi.

Data hasil pengukuran tersebut kemudian dikumpulkan dan diolah untuk mengetahui perbandingan nilai tahanan pentanahan pada tiap variasi elevasi. Selanjutnya, penulis melakukan **analisis data** untuk memahami hubungan antara perbedaan ketinggian tempat (elevasi) terhadap perubahan nilai tahanan pentanahan pada transformator distribusi 1 fasa. Dari hasil analisis ini diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai sejauh mana pengaruh elevasi terhadap kualitas sistem pentanahan dan kinerja transformator distribusi di lapangan

2.4 Tahanan Pentanahan

Tahanan pentanahan (*grounding resistance*) merupakan besaran yang menunjukkan tingkat hambatan pada sistem pembumian dalam mengalirkan arus gangguan dari instalasi listrik menuju bumi. Nilai tahanan pentanahan yang kecil sangat diperlukan untuk menjaga keselamatan manusia dan keandalan sistem, karena mampu menekan munculnya tegangan sentuh dan tegangan langkah yang berpotensi membahayakan saat terjadi gangguan atau hubungan singkat. Sistem pentanahan yang dirancang dengan baik harus menyediakan lintasan dengan impedansi rendah agar arus gangguan dapat mengalir dengan cepat ke tanah, sehingga dapat mengurangi kemungkinan kerusakan peralatan serta meningkatkan tingkat keselamatan operasional. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin rendah nilai tahanan pentanahan, maka semakin optimal pula fungsi perlindungan sistem terhadap bahaya listrik yang tidak diinginkan. [12]

Resistivitas tanah merupakan parameter utama dalam perancangan sistem pentanahan. Nilai resistivitas tanah menentukan besar kecilnya tahanan pentanahan yang dihasilkan. Oleh

karena itu, pengukuran resistivitas tanah diperlukan untuk menentukan desain sistem pentanahan yang sesuai agar memenuhi standar keselamatan sistem tenaga Listrik.[18]

Nilai tahanan pentanahan yang tinggi dapat menyebabkan meningkatnya tegangan langkah dan tegangan sentuh yang berbahaya bagi manusia dan peralatan listrik. Sistem pentanahan yang baik harus mampu menjaga nilai tegangan tersebut tetap berada dalam batas aman sesuai standar keselamatan instalasi tenaga Listrik.[18]

Besarnya nilai tahanan pentanahan dipengaruhi oleh berbagai faktor yang berkaitan dengan kondisi tanah, bentuk sistem pembumian, serta lingkungan di sekitar lokasi pemasangan. Salah satu faktor yang paling dominan adalah tahanan jenis tanah (*soil resistivity*), karena parameter ini menentukan kemampuan tanah dalam menghantarkan arus listrik menuju bumi. Selain itu, konfigurasi sistem pentanahan yang digunakan juga berpengaruh terhadap nilai tahanan yang dihasilkan. Faktor-faktor lain seperti jenis tanah, tingkat kelembaban, suhu tanah, ukuran dan diameter elektroda, serta kandungan unsur elektrolit di dalam tanah turut memengaruhi perubahan nilai tahanan pentanahan yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan.[13]

Hasil penelitian lain menunjukkan bahwa tingkat kelembaban tanah memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap nilai tahanan pentanahan. Tanah dengan kandungan air yang tinggi umumnya menghasilkan nilai tahanan pentanahan yang lebih rendah dibandingkan tanah dalam kondisi kering, karena meningkatnya kadar air akan memperbaiki kemampuan tanah dalam menghantarkan arus listrik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa nilai tahanan pentanahan tidak bersifat tetap, melainkan dapat berubah sesuai dengan kondisi lingkungan dan karakteristik fisik tanah pada lokasi pemasangan elektroda pentanahan.[14]

Nilai tahanan pentanahan memiliki hubungan yang sangat penting terhadap tingkat keselamatan dalam sistem kelistrikan. Sistem pentanahan dengan nilai tahanan yang rendah diperlukan agar arus gangguan maupun arus hubung singkat dapat segera dialirkan ke tanah, sehingga mampu menekan besarnya tegangan sentuh (*touch voltage*) dan tegangan langkah (*step voltage*) yang berpotensi membahayakan manusia maupun peralatan listrik. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan jenis tanah dan karakteristik tahanan jenis tanah berpengaruh langsung terhadap penyebaran tegangan di area sistem pentanahan. Tanah dengan nilai resistivitas yang tinggi, seperti tanah berbatu, cenderung menghasilkan tegangan sentuh dan tegangan langkah yang lebih besar, sehingga dapat

menimbulkan risiko keselamatan apabila nilainya melampaui batas aman yang telah ditetapkan oleh standar ketenagalistrikan.[15]

Nilai tahanan pentanahan yang rendah sangat diperlukan untuk menjamin sistem proteksi bekerja dengan baik dan menjaga keselamatan peralatan serta manusia. Semakin kecil nilai tahanan pentanahan maka arus gangguan dapat mengalir dengan lebih mudah ke tanah sehingga mengurangi tegangan sentuh dan tegangan langkah pada instalasi tenaga listrik [16]

Sistem pentanahan merupakan bagian penting dalam instalasi tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan arus gangguan maupun arus petir ke tanah. Sistem pembumian yang baik dapat melindungi peralatan listrik dari kerusakan serta meningkatkan keselamatan manusia di sekitar instalasi Listrik. [17]

Nilai tahanan pentanahan dapat dipengaruhi oleh desain dan konfigurasi elektroda pentanahan. Salah satu metode yang digunakan adalah pemasangan elektroda batang secara vertikal dengan jumlah lebih dari satu (multiple vertical electrodes). Metode ini dapat menurunkan nilai tahanan pentanahan karena memperbesar area kontak elektroda dengan tanah. [17]

Sistem pentanahan yang memiliki nilai tahanan tinggi dapat meningkatkan risiko terjadinya tegangan sentuh dan tegangan langkah yang berbahaya. Oleh karena itu, diperlukan perancangan sistem pentanahan yang mampu menghasilkan nilai tahanan rendah agar sistem proteksi dapat bekerja secara optimal.[17]