

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Proses dan segala bentuk penulisan skripsi ini menggunakan acuan atau referensi sebagai bahan dan sumber penelitian yang dilakukan. Beberapa referensi terkait penelitian proyek akhir yang menunjang disampaikan pada BAB ini.

1. [1], pada penelitian yang dilakukan oleh Suharno (2018) berjudul *“Analisis Nilai Tahanan Pentanahan pada Tower SUTT 150 kV Menggunakan Metode Wenner”* menjelaskan bahwa variasi resistivitas tanah sangat mempengaruhi hasil pengukuran tahanan pentanahan. Dalam penelitiannya, pengukuran dilakukan pada beberapa titik lokasi dengan karakteristik tanah berbeda. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tanah dengan kandungan air tinggi memiliki resistivitas yang rendah dan menghasilkan tahanan pentanahan yang lebih kecil, sebaliknya tanah berbatu dan kering menunjukkan nilai tahanan yang tinggi.
2. [2], jurnal penelitian oleh Ramdani dan Fitriansyah (2020) dalam jurnal *Teknik Energi dan Kelistrikan* yang berjudul *“Evaluasi Efektivitas Sistem Grounding pada Jaringan Transmisi 150 kV di Wilayah Kalimantan Tengah”* membahas konfigurasi sistem pentanahan menggunakan beberapa elektroda batang (rod electrode) yang dihubungkan secara paralel. Penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi paralel mampu menurunkan nilai tahanan pentanahan hingga 40% dibandingkan konfigurasi tunggal, serta lebih stabil terhadap perubahan kelembaban tanah.
3. [3], pada jurnal penelitiannya Putra dkk (2021) *“Pengaruh Variasi Panjang Elektroda Grounding terhadap Nilai Tahanan Tanah”* menganalisis hubungan antara panjang elektroda dengan efisiensi sistem pentanahan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa

peningkatan panjang elektroda efektif menurunkan tahanan tanah secara signifikan hingga panjang tertentu (sekitar 6 meter). Namun, setelah melewati batas tersebut, penurunan tahanan menjadi tidak signifikan lagi karena pengaruh distribusi arus tanah yang melemah pada kedalaman lebih besar.

4. [4], dalam penelitian Wijaya (2023) berjudul “*Analisis Pengaruh Kondisi Tanah terhadap Desain Sistem Pentanahan Menurut Standar PLN KEPDIR No. 0520.K/DIR/2014*” mengkaji penerapan standar PLN dalam desain sistem pentanahan tower transmisi. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa standar PLN tersebut memberikan batas maksimum nilai tahanan pentanahan sebesar $10\ \Omega$ untuk sistem transmisi 150 kV. Dalam kondisi tanah dengan resistivitas tinggi seperti tanah gambut, dibutuhkan sistem pentanahan tambahan seperti *ground grid* atau penambahan elektroda vertikal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Pentanahan (*Grounding Ssistem*)

Sistem pentanahan atau *grounding ssistem* merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mengalirkan arus gangguan atau arus petir ke bumi sehingga tidak menimbulkan tegangan berlebih pada peralatan listrik maupun struktur logam. Menurut KEPDIR PLN No. 0520.K/DIR/2014, sistem pentanahan pada jaringan transmisi berfungsi untuk menjaga keselamatan manusia, peralatan, dan keandalan sistem tenaga listrik dari bahaya akibat tegangan sentuh (*touch voltage*) dan tegangan langkah (*step voltage*). Pada tower transmisi 150 kV, sistem pentanahan terdiri atas beberapa elektroda logam yang ditanam di tanah dan dihubungkan dengan struktur tower. Arus gangguan yang terjadi akibat hubung singkat, induksi, atau sambaran petir akan dialirkan ke tanah melalui elektroda tersebut.



Gambar 2.1 Sistem *Grounding* pada Tower SUTT 150 kV

Efektivitas sistem grounding sangat dipengaruhi oleh nilai tahanan pentanahan yang ditentukan oleh resistivitas tanah, bentuk elektroda, serta kedalaman dan jarak antar elektroda.

2.2.2 Standar dan Ketentuan Menurut KEPDIR PLN No. 0520.K/DIR/2014

Dalam sistem transmisi tenaga listrik, aspek keandalan dan keselamatan sangat bergantung pada desain dan kualitas sistem pentanahan. Oleh karena itu, PLN telah menetapkan standar teknis melalui Keputusan Direksi PLN No.0520.K/DIR/2014 tentang Standar Konstruksi Jaringan Transmisi Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi, yang menjadi acuan dalam perencanaan, pemasangan, dan pengujian sistem pentanahan pada tower SUTT dan SUTET di seluruh wilayah Indonesia.

Standar ini mengatur berbagai aspek, mulai dari nilai tahanan pentanahan maksimum yang diizinkan, jenis elektroda pentanahan, hingga prosedur pengukuran dan pengujian di lapangan. Ketentuan tersebut bertujuan untuk memastikan agar sistem pentanahan mampu melindungi peralatan dan manusia dari potensi bahaya arus gangguan, sambaran petir, maupun tegangan lebih transien.

2.2.3 Jenis – Jenis Pentanahan Tower Pada SUTT/SUTET

1. Elektroda bar yaitu suatu rel logam yang ditanam di dalam tanah. Pentanahan ini merupakan sistem pentanahan paling sederhana dan banyak digunakan pada tower transmisi. Elektroda ini berupa batang logam (biasanya tembaga atau baja galvanis) yang ditanam vertikal ke dalam tanah. Jenis ini efektif digunakan pada daerah dengan resistivitas tanah rendah hingga sedang karena mampu memberikan nilai tahanan pentanahan yang relatif kecil dan mudah dalam instalasi serta pemeliharaan.
2. Elektroda plat yaitu plat merupakan jenis pentanahan yang menggunakan pelat logam berbentuk persegi atau persegi panjang yang ditanam secara horizontal atau vertikal pada kedalaman tertentu. Sistem ini umumnya digunakan sebagai pelengkap sistem proteksi petir, karena permukaannya yang luas memungkinkan penyebaran arus sambaran petir ke tanah secara merata.
3. Counterpoise electrode adalah konduktor logam yang digelar secara horizontal di bawah permukaan tanah dengan panjang tertentu, biasanya dihubungkan langsung ke kaki tower. Sistem ini digunakan pada daerah dengan resistivitas tanah tinggi, seperti tanah berbatu atau kering, di mana elektroda batang tunggal kurang efektif. Counterpoise berfungsi untuk menurunkan nilai tahanan pentanahan secara signifikan dengan memperluas bidang kontak antara konduktor dan tanah.
4. Meshelectrode yaitu sistem pentanahan yang terdiri atas jaringan konduktor yang digelar secara horizontal di bawah permukaan tanah dan saling terhubung membentuk pola kisi (*mesh*). Sistem ini cocok digunakan pada daerah dengan kontur tanah miring atau berbukit. Selain menurunkan tahanan pentanahan, mesh electrode juga berfungsi untuk mengurangi potensi tegangan langkah (*step voltage*) dan tegangan sentuh (*touch voltage*) pada area di sekitar

tower.

Keempat jenis sistem pentanahan tersebut dapat digunakan secara tunggal maupun kombinasi, tergantung pada kondisi tanah dan kebutuhan teknis di lapangan. Dalam penelitian ini, jenis yang dikaji adalah elektroda batang (bar electrode), karena jenis ini digunakan secara dominan pada tower transmisi SUTT 150 kV Palangkaraya – Sebangau serta direkomendasikan oleh PLN untuk kondisi operasi normal jaringan transmisi.

2.2.4 Komponen - Komponen Pentanahan Tower

1. Konduktor Pentanahan berfungsi sebagai penghantar utama arus gangguan dari bagian logam tower menuju ke elektroda tanah. Konduktor ini harus terbuat dari bahan yang memiliki konduktivitas tinggi dan tahanan jenis rendah, seperti tembaga (Cu) atau baja galvanis (GI). Selain itu, konduktor harus tahan terhadap korosi karena dipasang di lingkungan luar yang lembap.
2. Klem pentanahan digunakan untuk menghubungkan konduktor pentanahan dengan struktur tower atau dengan kabel lainnya. Klem harus memiliki sambungan mekanis yang kuat dan tahan terhadap korosi, agar arus gangguan dapat mengalir tanpa hambatan yang berarti.
3. Batang pentanahan adalah media utama untuk mengalirkan arus ke tanah. Biasanya terbuat dari baja berlapis tembaga atau baja galvanis dengan panjang antara 2 hingga 3 meter, ditanam secara vertikal di dalam tanah di sekitar kaki tower. Jumlah dan konfigurasi batang pentanahan dapat disesuaikan dengan nilai tahanan tanah (resistivitas tanah) agar diperoleh nilai tahanan pentanahan total $\leq 10 \Omega$ sesuai standar PLN.

Klem ini digunakan untuk menghubungkan antar konduktor atau antara konduktor dengan batang pentanahan. Jenis sambungan bisa berupa klem baut, sambungan las (exothermic

welding), atau klem tekan, dengan syarat harus memiliki kontak listrik yang baik dan tahan terhadap korosi.

2.2.5 Rod Pentanahan (*Grounding*)

Rod pentanahan adalah perlengkapan pembumian sistem transmisi yang berfungsi untuk meneruskan arus listrik dari tower ke tanah dan menghindari terjadinya back flashover pada isolator saat grounding sistem terkena sambaran petir. Pentanahan tower terdiri dari konduktor tembaga atau konduktor baja yang diklaim pada pipa pentanahan yang ditanam di dekat pondasi tiang, atau dengan menanam plat aluminium/ tembaga di sekitar pondasi tower yang berfungsi untuk mengalirkan arus dari konduktor tanah akibat sambaran petir.



Gambar 2.2 Rod pentanahan (*Grounding*)

2.2.6 Pengaruh Struktur Tanah Berlapis terhadap Sistem Pentanahan

Tanah pada lokasi transmisi tidak selalu homogen, melainkan terdiri dari beberapa lapisan dengan nilai resistivitas berbeda. Struktur tanah berlapis sangat berpengaruh terhadap distribusi arus gangguan yang mengalir dari elektroda pentanahan. Misalnya, lapisan atas tanah mungkin terdiri dari tanah berpasir dengan resistivitas tinggi, sementara lapisan bawahnya berupa tanah

liat yang lebih konduktif. Kondisi ini menyebabkan arus lebih cenderung mengalir ke lapisan yang lebih konduktif sehingga mempengaruhi besar kecilnya nilai resistansi total. Konsep tanah berlapis penting dalam memahami karakteristik pembacaan alat ukur. Apabila elektroda dipasang pada lapisan kurang konduktif, nilai pentanahan akan tampak tinggi meskipun lapisan bawah jauh lebih konduktif. Hal ini sering terjadi pada tower yang berada di tanah berbatu, di mana lapisan batu di permukaan menutupi lapisan tanah yang lebih baik di bawahnya. Pemasangan counterpoise menjadi solusi efektif dalam kasus ini karena konduktor menjangkau area lebih luas dan menembus beberapa lapisan tanah.

Analisis struktur tanah berlapis diperlukan untuk menentukan panjang counterpoise dan kedalaman elektroda tambahan yang digunakan pada tower transmisi. Dengan mengetahui model distribusi resistivitas tanah, metode perbaikan pentanahan dapat diaplikasikan secara tepat sehingga nilai tahanan dapat mencapai standar $PLN \leq 10 \Omega$.

2.2.7 Alat Pengukuran Pentanahan Metode 3 Titik (*Fall of Potential Method*)

Alat pengukuran pentanahan merupakan instrumen penting untuk mengetahui nilai tahanan pentanahan (ground resistance) dari suatu sistem grounding. Salah satu metode yang umum digunakan dalam pengukuran ini adalah metode tiga titik atau dikenal dengan metode Fall of Potential (FoP). Metode ini digunakan untuk mengukur tahanan pentanahan dari sebuah elektroda pembumian tunggal yang terpasang di lapangan dengan ketelitian yang cukup tinggi.

Secara prinsip, metode tiga titik menggunakan alat ukur Earth Tester atau Ground Resistance Tester, yang dilengkapi dengan tiga terminal pengukuran - yaitu terminal arus (C1 dan C2) serta terminal potensial (P1 dan P2). Dalam praktik lapangan, elektroda yang diukur dihubungkan ke terminal C1 dan P1, sedangkan dua elektroda bantu

(spike) ditanam di tanah sejajar garis lurus dari elektroda utama dengan jarak tertentu. Satu elektroda bantu berfungsi sebagai elektroda arus (C2), dan yang lainnya sebagai elektroda potensial (P2). Alat Earth Tester akan mengalirkan arus bolak-balik (AC) melalui elektroda arus ke tanah dan mengukur beda potensial antara elektroda uji dengan elektroda potensial.

Hasil pengukuran ini menggambarkan sejauh mana sistem pentanahan mampu menghantarkan arus gangguan ke bumi. Nilai yang dihasilkan kemudian dibandingkan dengan standar dari KEPDIR PLN No. 0520.K/DIR/2014, yang mensyaratkan bahwa nilai tahanan pentanahan untuk tower transmisi 150 kV sebaiknya tidak melebihi 10 Ohm, agar sistem tetap aman dan efektif dalam melepas arus gangguan.



Gambar 2.3 Alat pengukuran pentanahan

2.2.8 Sistem *Counterpoise*

Counterpoise merupakan konduktor horizontal yang dipasang di dalam tanah dan dihubungkan dengan sistem pentanahan tower. Pemasangan *counterpoise* bertujuan untuk memperluas area kontak antara konduktor dan tanah sehingga dapat menurunkan nilai tahanan pentanahan, khususnya pada tanah dengan resistivitas tinggi seperti tanah berbatu dan berpasir. Penggunaan *counterpoise* banyak

diterapkan sebagai metode perbaikan sistem pentanahan pada tower transmisi yang memiliki nilai tahanan di atas standar.



Gambar 2.4 Sistem counter poise pada tower

Gambar tersebut memperlihatkan sistem counterpoise yang diterapkan pada tower SUTT 150 kV. Counterpoise berupa konduktor yang dipasang secara horizontal dan ditanam di dalam tanah di sekitar kaki tower, kemudian dihubungkan langsung dengan sistem pentanahan utama tower. Pemasangan konduktor secara horizontal bertujuan untuk memperluas area kontak antara sistem pentanahan dan tanah di sekitarnya.

Dengan bertambahnya panjang konduktor yang tertanam di dalam tanah, jalur aliran arus gangguan menuju bumi menjadi lebih luas sehingga nilai tahanan pentanahan total dapat diturunkan. Sistem counterpoise umumnya digunakan pada lokasi dengan karakteristik tanah beresistivitas tinggi, seperti tanah berbatu dan berpasir, di mana penggunaan elektroda batang tunggal sering kali tidak mampu menghasilkan nilai tahanan pentanahan yang memenuhi standar.

2.2.9 Faktor–Faktor yang Mempengaruhi Nilai Tahanan Pentanahan

Nilai tahanan pentanahan pada suatu sistem grounding sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kimia tanah di lokasi pemasangan elektroda. Faktor pertama yang memiliki pengaruh besar adalah jenis tanah. Tanah gambut dengan kandungan air tinggi umumnya memiliki resistivitas rendah, sedangkan tanah pasir dan berbatu memiliki resistivitas tinggi akibat minimnya jalur konduktif. Selain jenis tanah, kandungan mineral dan salinitas juga menentukan besar kecilnya resistivitas. Tanah yang kaya mineral atau garam lebih mudah menghantarkan arus sehingga nilai tahanan pentanahannya cenderung lebih rendah. Faktor kedua adalah kondisi lingkungan, terutama kelembapan tanah dan suhu tanah. Tanah yang basah memiliki tingkat konduktivitas lebih baik karena air berperan sebagai media ionik yang membantu arus mengalir ke bumi. Sebaliknya, pada musim kemarau ketika kadar air menurun, resistivitas tanah meningkat sehingga nilai tahanan pentanahan menjadi lebih tinggi. Suhu tanah juga mempengaruhi mobilitas ion; tanah bersuhu lebih panas cenderung memiliki konduktivitas lebih baik dibanding tanah yang dingin. Variasi musim dan cuaca inilah yang menyebabkan nilai pengukuran pentanahan dapat berubah dari waktu ke waktu meskipun menggunakan sistem grounding yang sama.

Faktor berikutnya adalah karakteristik fisik elektroda dan konfigurasi instalasi. Kedalaman elektroda, panjang konduktor, diameter batang, serta bentuk elektroda menentukan luas permukaan kontak antara logam dan tanah. Elektroda yang lebih panjang atau berbentuk plat umumnya memberikan nilai tahanan lebih rendah. Selain itu, penggunaan lebih dari satu elektroda atau sistem konduktor tambahan seperti counterpoise dapat memperbesar daerah disipasi arus sehingga nilai tahanan total menurun. Penempatan elektroda arus dan potensial saat pengukuran pun harus mengikuti standar agar tidak terjadi interferensi yang menyebabkan pembacaan tidak akurat.

Seluruh faktor tersebut saling berkaitan dan mempengaruhi kualitas sistem pentanahan pada tower transmisi.

2.2.10 Resistivitas Tanah dan Pengaruhnya pada Sistem Pentanahan

Resistivitas tanah merupakan parameter yang menentukan kemampuan tanah dalam menghantarkan arus listrik. Semakin tinggi resistivitas tanah, semakin buruk kemampuan tanah dalam mengalirkan arus, sehingga nilai tahanan pentanahan menjadi besar. Faktor utama yang memengaruhi resistivitas tanah adalah komposisi tanah itu sendiri—apakah terdiri dari pasir, kerikil, batuan, atau material organik. Tanah yang mengandung partikel halus dan kaya mineral cenderung memiliki resistivitas yang lebih rendah karena banyak menyediakan jalur konduktif bagi arus.

Selain komposisi material, kondisi lingkungan seperti kadar air dan temperatur sangat berpengaruh terhadap resistivitas tanah. Air berfungsi sebagai media penghantar ion sehingga semakin tinggi kadar air dalam tanah, semakin rendah resistivitasnya. Ketika musim kemarau tiba, tanah akan mengering dan resistivitas meningkat drastis, terutama pada tanah berpasir. Temperatur tanah juga berpengaruh karena ion akan bergerak lebih bebas pada suhu yang lebih tinggi sehingga tanah menjadi lebih konduktif. Perubahan musim membuat nilai resistivitas tanah bersifat dinamis dan perlu diperhatikan saat merancang sistem grounding. Pengaruh resistivitas tanah terhadap sistem pentanahan sangat signifikan, terutama pada jaringan transmisi tegangan tinggi yang membutuhkan jalur grounding dengan impedansi rendah. Pada tanah dengan resistivitas tinggi, penggunaan elektroda tunggal tidak mampu menghasilkan nilai pentanahan yang memadai sehingga diperlukan teknik tambahan seperti memperdalam elektroda, menambah jumlah elektroda, atau memasang sistem counterpoise. Dengan memahami resistivitas tanah, perancangan sistem pentanahan dapat disesuaikan agar tetap memenuhi standar keandalan dan keamanan instalasi listrik.

2.2.11 Karakteristik Tanah Gambut, Berpasir, dan Berbatu

Tanah gambut memiliki karakteristik yang unik karena terdiri dari material organik dengan kadar air yang tinggi. Kondisi ini menjadikan tanah gambut memiliki resistivitas rendah sehingga secara alami cocok digunakan untuk sistem pentanahan. Namun, kelembapan yang tinggi juga menyebabkan tingkat keasaman tanah meningkat, sehingga risiko korosi pada elektroda pentanahan menjadi lebih besar. Oleh karena itu, pada wilayah dengan tanah gambut diperlukan material elektroda yang tahan korosi seperti tembaga berlapis atau galvanized steel. Tanah berpasir memiliki struktur yang longgar dan pori-pori besar sehingga tidak mampu menahan air dalam jangka waktu lama. Hal ini menyebabkan resistivitas tanah berpasir cenderung tinggi terutama pada kondisi kering. Pada lokasi seperti ini, sistem pentanahan memerlukan metode tambahan karena elektroda tunggal tidak mampu memberikan nilai tahanan yang sesuai standar. Penambahan elektroda, pemadatan tanah, atau pemasangan counterpoise sering digunakan sebagai solusi untuk menurunkan nilai tahanan pentanahan pada tanah berpasir.

Sementara itu, tanah berbatu merupakan jenis tanah dengan resistivitas tertinggi karena jalur konduktif yang tersedia sangat terbatas. Tanah berbatu biasanya tidak memiliki kelembapan yang stabil dan sulit ditembus arus gangguan sehingga nilai tahanannya dapat mencapai puluhan ohm. Pada kondisi seperti ini, konduktor counterpoise atau grid grounding harus diterapkan untuk memperluas jalur arus ke tanah. Pemahaman terhadap karakteristik tanah ini penting agar metode perbaikan pentanahan dapat disesuaikan dengan kondisi lapangan yang sebenarnya.

2.2.12 Sistem Counterpoise pada Jalur Transmisi

Counterpoise merupakan konduktor yang ditanam memanjang di permukaan tanah dengan tujuan memperluas area kontak antara elektroda grounding dan tanah. Sistem ini bekerja dengan memanjangkan jalur aliran arus gangguan sehingga distribusi arus menjadi lebih luas dan nilai pentanahan dapat diturunkan. Counterpoise biasanya ditempatkan pada kedalaman tertentu dan dihubungkan langsung ke kaki tower untuk memberikan jalur impedansi rendah bagi arus petir atau gangguan hubung singkat. Selain memberikan nilai tahanan yang rendah, counterpoise memiliki kelebihan yaitu mampu menjaga performa pentanahan secara stabil dalam jangka panjang. Karena panjang konduktor cukup besar, perubahan kelembapan tanah tidak terlalu mempengaruhi nilai resistansi seperti yang terjadi pada elektroda batang tunggal. Hal ini membuat counterpoise menjadi solusi yang banyak digunakan pada area dengan resistivitas tinggi seperti tanah berbatu atau berpasir.

Penerapan counterpoise harus mengikuti standar seperti yang tercantum dalam IEEE Std 80 dan pedoman PLN. Panjang konduktor, arah penanaman, serta metode penyambungan menentukan efektivitas sistem. Pada tower transmisi 150 kV, counterpoise umumnya dipasang sejajar atau radial dari struktur tower. Dengan desain yang tepat, counterpoise dapat menurunkan nilai pentanahan secara signifikan sehingga sistem proteksi dapat berfungsi secara optimal.

2.2.13 Standar Tahanan Pentanahan pada Sistem Transmisi 150 kV

Standar tahanan pentanahan pada sistem transmisi diatur oleh SPLN 142 dan pedoman teknis PLN 0520, yang menetapkan batas nilai tahanan pentanahan sebesar $\leq 10 \Omega$. Nilai ini dipilih berdasarkan pertimbangan kemampuan sistem proteksi dalam mengalirkan arus gangguan secara aman dan cepat. Nilai yang lebih rendah dari standar akan menghasilkan kinerja proteksi yang lebih

baik, terutama dalam meredam tegangan sentuh dan tegangan langkah yang berpotensi membahayakan personel maupun peralatan. Selain sebagai persyaratan teknis, standar pentanahan juga terkait erat dengan aspek keandalan jaringan transmisi. Jika nilai tahanan pentanahan terlalu tinggi, sebagian arus gangguan dapat kembali ke jaringan atau menimbulkan tegangan lebih pada struktur tower. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan isolator, kegagalan peralatan proteksi, hingga risiko kebakaran. Oleh karena itu, pemeliharaan nilai pentanahan menjadi aktivitas penting dalam menjamin kontinuitas suplai energi listrik.

Dalam praktiknya, mencapai nilai $\leq 10 \Omega$ tidak selalu mudah terutama pada daerah dengan resistivitas tanah tinggi. Pada wilayah seperti ini diperlukan tindakan perbaikan seperti pemasangan counterpoise, penambahan elektroda batang, atau penggunaan material kimia pembantu konduktivitas. Dengan menerapkan metode yang sesuai kondisi lapangan, nilai pentanahan dapat dipertahankan dalam batas aman sesuai standar yang telah ditetapkan.

2.2.14 Prinsip Dasar Arus Gangguan pada Tower SUTT

Tower transmisi berfungsi sebagai jalur konduktif bagi arus gangguan seperti petir dan hubung singkat untuk dialirkan langsung ke tanah. Ketika arus gangguan terjadi, sistem pentanahan harus menyediakan jalur impedansi rendah agar arus dapat segera merambat ke bumi tanpa menimbulkan tegangan lebih pada struktur tower.

Semakin rendah nilai tahanan pentanahan, semakin baik kemampuan tower untuk meredam dan mengalirkan arus gangguan tersebut. Jika tahanan pentanahan tinggi, arus gangguan tidak dapat langsung teralirkan sehingga sebagian energi dapat memantul kembali menuju sistem proteksi atau struktur tower. Kondisi ini dapat meningkatkan tegangan sentuh dan tegangan langkah di

sekitar tower, yang berbahaya bagi personel lapangan. Selain itu, tegangan lebih yang tidak teralirkan dengan baik dapat merusak peralatan transmisi serta mengganggu kestabilan sistem tenaga listrik. Prinsip dasar pengelolaan arus gangguan pada tower SUTT menekankan pentingnya nilai pentanahan yang rendah, instalasi grounding yang baik, dan pemeliharaan berkala. Dengan sistem pentanahan yang memadai, arus gangguan dapat dialirkan secara aman sehingga jaringan transmisi tetap beroperasi stabil dan risiko kerusakan dapat diminimalkan.

2.2.15 Ground Potential Rise (GPR) pada Sistem Transmisi

Ground Potential Rise (GPR) merupakan fenomena kenaikan potensial tanah yang terjadi ketika arus gangguan, seperti petir atau hubung singkat, mengalir menuju sistem pentanahan tower. Ketika arus besar memasuki tanah melalui elektroda pentanahan, terjadi perbedaan tegangan antara titik pentanahan tower dan tanah di sekitarnya. Semakin besar arus gangguan dan semakin tinggi tahanan pentanahan, maka nilai GPR akan semakin tinggi pula. GPR ini menjadi salah satu parameter utama dalam studi sistem pentanahan transmisi. Nilai GPR yang tinggi dapat menimbulkan peningkatan tegangan di sepanjang struktur tower dan pada area tanah sekitarnya. Hal ini menyebabkan distribusi tegangan menjadi tidak merata sehingga membentuk gradien tegangan yang berbahaya. Ketika gradien tegangan terlalu besar, risiko kejutan listrik pada manusia dan kerusakan peralatan dapat meningkat. Oleh karena itu, sistem pentanahan pada tower harus mampu menurunkan GPR hingga level aman sesuai standar internasional seperti IEEE Std 80.

Dalam konteks transmisi 150 kV, analisis GPR sangat penting terutama pada tower dengan tanah berbatu atau berpasir yang memiliki resistivitas tinggi. Pemasangan counterpoise menjadi salah satu cara untuk menurunkan nilai tahanan pentanahan sehingga GPR dapat dikurangi. Dengan menurunnya GPR, maka distribusi

tegangan pada tanah di sekitar tower akan lebih terkendali sehingga meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem transmisi.

2.2.16 Tegangan Langkah dan Tegangan Sentuh

Tegangan langkah (step voltage) adalah perbedaan tegangan yang terjadi antara dua titik di permukaan tanah yang berjarak satu langkah kaki manusia ketika terjadi arus gangguan. Tegangan ini dapat menyebabkan arus mengalir melalui tubuh manusia jika posisi berdiri berada di area yang memiliki gradien tegangan tinggi. Semakin besar GPR yang terjadi, semakin besar pula kemungkinan timbulnya tegangan langkah yang berbahaya. Oleh karena itu, pengendalian GPR sangat berkaitan dengan pengurangan risiko tegangan langkah. Tegangan sentuh (touch voltage) adalah perbedaan tegangan antara struktur logam yang terhubung dengan sistem pentanahan dan tanah tempat manusia berdiri. Apabila nilai tegangan sentuh melebihi batas aman, maka dapat terjadi kejutan listrik ketika seseorang menyentuh struktur tower atau peralatan yang terhubung ke tanah. Tegangan sentuh menjadi lebih berbahaya pada area tanah yang memiliki resistivitas tinggi karena arus cenderung mengalir melalui jalur yang lebih sempit menuju tanah.

Both tegangan langkah dan tegangan sentuh merupakan indikator keamanan penting yang harus dikendalikan dalam desain grounding tower SUTT. Dengan menurunkan nilai tahanan pentanahan, maka gradien tegangan dapat diperkecil sehingga risiko bagi manusia dapat diminimalisir. Hal ini memperkuat pentingnya evaluasi sistem pentanahan dan penggunaan metode perbaikan seperti counterpoise pada area resistivitas tinggi.

2.2.17 Sistem Proteksi terhadap Tegangan Lebih pada Jalur Transmisi

Sistem proteksi pada jaringan transmisi dirancang untuk merespons gangguan secara cepat dan selektif. Salah satu fungsi utama proteksi adalah mengatasi tegangan lebih yang diakibatkan oleh petir maupun gangguan internal seperti hubung singkat. Dalam

konteks ini, sistem pentanahan bekerja secara langsung dengan peralatan proteksi, karena nilai pentanahan menentukan efektivitas pengaliran arus gangguan ke tanah. Jika nilai pentanahan terlalu tinggi, peralatan proteksi seperti arrester dan relay dapat gagal bekerja dengan baik.

Sistem proteksi yang terintegrasi dengan baik membutuhkan jalur pentanahan yang memiliki impedansi rendah agar arus gangguan dapat segera dialirkan ke tanah. Arrester petir berfungsi membatasi tegangan lebih dengan mengalirkan arus petir menuju tanah melalui sistem pentanahan tower. Oleh karena itu, ketidaksempurnaan grounding akan mengakibatkan arrester gagal meredam lonjakan tegangan sehingga isolator atau peralatan lain berisiko mengalami kerusakan. Kombinasi sistem proteksi dan pentanahan menjadi kunci keselamatan dan keandalan jaringan transmisi. Pada daerah dengan resistivitas tinggi, counterpoise digunakan untuk memastikan bahwa grounding memiliki impedansi rendah sehingga sistem proteksi dapat bekerja optimal. Dengan demikian, integritas jaringan transmisi dapat tetap terjaga meskipun terjadi gangguan yang signifikan.

2.2.18 Peran Sistem Pentanahan dalam Keandalan Proteksi

Sistem pentanahan memiliki peran penting dalam menentukan sensitivitas dan kecepatan peralatan proteksi. Relay proteksi memerlukan jalur kembali arus gangguan yang stabil agar mampu mendeteksi besar arus secara akurat. Jika jalur pentanahan memiliki impedansi tinggi, sinyal gangguan yang diterima relay dapat tereduksi sehingga relay gagal memutus jaringan sesuai kebutuhan. Kondisi ini dapat memicu gangguan yang lebih besar dan merambat ke bagian sistem lain. Selain itu, sistem pentanahan yang baik juga dapat mengurangi potensi “back-flashover” pada tower SUTT. Back-flashover terjadi ketika tegangan lebih dari arus petir tidak dapat dialirkan ke tanah secara efektif, sehingga tegangan tersebut melompat kembali ke fasa jaringan. Hal ini dapat menyebabkan

gangguan sistem skala luas dan merusak peralatan transmisi. Dengan grounding yang baik, potensi back-flashover dapat diminimalkan.

Penguatan sistem pentanahan dengan counterpoise terbukti meningkatkan keandalan proteksi. Dengan nilai tahanan pentanahan yang rendah, pemutusan gangguan dapat dilakukan lebih cepat dan risiko kerusakan peralatan dapat dikurangi. Untuk itu, sistem pentanahan harus selalu dipelihara dan dievaluasi terutama pada area yang rawan resistivitas tinggi seperti tanah berbatu.

2.2.19 Metode Pengukuran Tahanan Pentanahan

Metode pengukuran tahanan pentanahan yang paling umum digunakan adalah metode tiga titik (Fall of Potential Method). Metode ini melakukan pengukuran berdasarkan perbandingan antara tegangan yang diukur pada elektroda potensial dan arus yang dialirkan melalui elektroda arus. Metode ini dinilai akurat karena mampu memberikan gambaran nyata kondisi resistansi tanah di sekitar elektroda pentanahan. Untuk memperoleh hasil yang lebih akurat, jarak elektroda bantu harus ditempatkan sesuai ketentuan standar seperti IEEE Std 81.

Selain metode tiga titik, terdapat metode lainnya seperti metode empat titik (Wenner) dan metode Clamp-on. Metode Wenner digunakan untuk mengetahui resistivitas tanah secara langsung, sedangkan metode Clamp-on digunakan untuk mengukur tahanan pentanahan tanpa memutuskan sambungan grounding. Namun dalam konteks tower transmisi yang memiliki sistem grounding kompleks, metode tiga titik tetap menjadi pilihan utama karena memberikan hasil paling representatif terhadap kondisi lapangan. Pemilihan metode pengukuran yang tepat sangat penting agar interpretasi nilai tahanan pentanahan tidak salah. Error pengukuran dapat muncul jika elektroda bantu ditempatkan terlalu dekat atau jika tanah memiliki lapisan resistivitas berbeda. Oleh karena itu, pemahaman metode sangat berpengaruh terhadap

keakuratan penentuan nilai pentanahan dan pengambilan keputusan terkait perbaikan seperti pemasangan counterpoise.

2.2.20 Faktor Kesalahan (Error) dan Akurasi Pengukuran

Faktor kesalahan dalam pengukuran tahanan pentanahan dapat berasal dari kondisi tanah, penempatan elektroda, hingga kualitas alat ukur. Salah satu penyebab utama error adalah adanya gangguan arus liar di tanah, misalnya dari instalasi grounding lain di sekitar lokasi pengukuran. Arus gangguan dapat mempengaruhi pembacaan tegangan sehingga menghasilkan nilai pentanahan yang tidak akurat. Selain itu, ketidakseragaman lapisan tanah juga dapat menimbulkan variasi pembacaan meskipun pengukuran dilakukan pada titik yang sama. Faktor lainnya adalah penempatan elektroda potensial dan elektroda arus. Jika kedua elektroda ditempatkan terlalu dekat atau berada dalam zona pengaruh elektroda utama, maka pembacaan tegangan tidak akan mencerminkan nilai potensial tanah yang sebenarnya. Jarak elektroda harus mengikuti ketentuan standar, umumnya 5–10 kali panjang elektroda utama atau sesuai dengan SNI dan IEEE. Tanah yang memiliki resistivitas tinggi seperti tanah berbatu juga dapat menimbulkan nilai pembacaan yang fluktuatif.

Untuk meningkatkan akurasi pengukuran, alat ukur harus dikalibrasi dan kondisi lingkungan harus dicatat. Pengulangan pengukuran diperlukan untuk memastikan konsistensi data. Selain itu, pengukuran sebaiknya dilakukan pada waktu tanah memiliki kelembapan stabil seperti pagi hari. Dengan memperhatikan semua faktor tersebut, nilai tahanan pentanahan yang diperoleh akan lebih akurat sehingga keputusan perbaikan seperti pemasangan counterpoise dapat dilakukan dengan dasar data yang valid.

2.2.21 Model Resistivitas Tanah Menurut IEEE Std 81

IEEE Std 81 memperkenalkan beberapa model resistivitas tanah yang digunakan dalam analisis dan desain sistem grounding. Model pertama adalah homogeneous soil model yang

mengasumsikan tanah memiliki resistivitas seragam. Model ini digunakan untuk perhitungan sederhana namun kurang akurat pada kondisi tanah yang nyata. Model kedua adalah two-layer soil model yang menggambarkan tanah terdiri dari dua lapisan dengan resistivitas berbeda. Model ini lebih realistis dan banyak digunakan pada wilayah transmisi. Model lainnya adalah multi-layer soil model, yang menggambarkan tanah sebagai susunan beberapa lapisan resistivitas. Model ini umum digunakan pada studi sistem grounding skala besar seperti gardu induk dan jalur transmisi. Dengan model ini, analisis penyebaran arus gangguan menjadi lebih akurat karena perhitungan mempertimbangkan jalur arus yang mengikuti lapisan tanah terbaik. Penggunaan perangkat lunak simulasi biasanya diperlukan untuk menghitung model tanah multilayer.

Pemahaman model resistivitas tanah penting dalam menentukan efektivitas metode perbaikan pentanahan seperti penambahan elektroda, pemadatan tanah, atau pemasangan counterpoise. Dengan mengetahui model tanah yang paling sesuai, sistem grounding dapat dirancang atau diperbaiki dengan hasil yang jauh lebih presisi.

2.2.22 Sistem Grounding pada Tower Transmisi 150 kV

Tower transmisi 150 kV menggunakan sistem grounding untuk menyediakan jalur impedansi rendah bagi arus gangguan. Sistem pentanahan biasanya terdiri dari elektroda batang, konduktor horizontal, serta sambungan ke kaki tower. Pada tower tertentu, terutama di daerah dengan resistivitas tinggi, ditambahkan konduktor counterpoise yang ditanam radial atau memanjang mengikuti jalur ROW. Sistem grounding ini dirancang agar arus gangguan dapat dialirkan ke tanah dengan distribusi yang merata. Kinerja sistem grounding menentukan tingkat keamanan dan keandalan operasi jalur transmisi. Jika nilai tahanan pentanahan terlalu tinggi, tegangan sentuh dan langkah di sekitar tower dapat

meningkat, menimbulkan risiko bagi pekerja dan peralatan. Oleh karena itu, tower dengan resistansi tinggi harus segera diperbaiki untuk mencegah kegagalan fungsi proteksi seperti arrester dan relay gangguan tanah.

Sistem grounding yang baik juga melindungi asset transmisi seperti isolator, konduktor, dan struktur tower dari tegangan lebih yang berbahaya. Dengan pentanahan yang efektif, risiko back-flashover dapat dikurangi sehingga kontinuitas suplai listrik tetap terjaga. Metode counterpoise menjadi pilihan utama untuk meningkatkan kinerja grounding pada tanah berpasir dan berbatu.