

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Nurcahyo Hajar Saputro (2016) berjudul Analisis Pentanahan Kaki Menara Transmisi 150 Kv Rembang-Blora Bertahanan Tinggi dan Usaha Menurunkannya. Penelitian ini diselesaikan dalam waktu tiga bulan dan memasukkan tahapan studi literatur, studi lapangan, dan pembuatan laporan. Data dikumpulkan dari berbagai referensi dan informasi terkait penelitian. Sumber informasi termasuk artikel publikasi, buku, skripsi, dan karya ilmiah lainnya. adalah teknik untuk mengumpulkan data secara langsung dari lokasi penelitian, dan proses pengumpulan data dilakukan dengan cara-cara berikut:

1. Observasi, yaitu dengan mengamati secara langsung untuk mendapatkan data primer yang lebih akurat tentang subjek penelitian.
2. Bertanya secara langsung kepada petugas di lapangan. Penelitian ini dilakukan pada bulan Mei 2011 di tower saluran udara tegangan tinggi 150 KV transmisi Rembang-Blora. Ada 92 tower di jarak 29,46 km, dan dibagi menjadi dua tim, masing-masing untuk pemeliharaan Gardu Induk Tegangan Tinggi Rembang dan Blora.

Penelitian Bambang Minto Basuki (2024) menyelidiki pola ketahanan pentanahan menara Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 KV Sekarputih–Ngoro. Langkah-langkah penelitian yang dilakukan sesuai dengan alur antara lain sebagai berikut:

1. Gunakan pengukur tanah untuk mengukur nilai pentanahan menara SUTT 150 kV transmisi Sekarputih–Ngoro.
2. Analisa data yang diperoleh dari pengukuran dan tentukan torehan mana yang harus diperbaiki.
3. Ukur nilai tahanan jenis tanah pada tanah di sekitar torehan yang memiliki nilai impedansi pentanahan tinggi.
4. Hitung dan analisis ukuran dan jumlah elektroda tambahan.

5. Setelah perbaikan, lakukan pengukuran jika sudah sesuai dengan standar yang ditentukan (<10 ohm), maka perbaikan berhasil.

Dengan menanam elektroda tegak lurus dekat permukaan tanah, nilai tanahanan pentanahan akan didapat di bawah standar. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai tanahanan pentanahan sudah berada di kisaran yang diizinkan. Ahmad Rosyd Idris (2021) menyelidiki pengaruh pemasangan counterpoise pada menara transmisi saluran udara tegangan tinggi 70 kV jalur Mandai-Pangkep. Penelitian ini mempelajari menara transmisi saluran udara tegangan tinggi 70 kV jalur 70 dan 39 Mandai Pangkep, yang masing-masing memiliki nilai tahanan lebih dari 5 Ohm. Penelitian dilakukan di Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk (ULTG) Maros PT PLN (Persero). Studi ini dilakukan dalam beberapa tahapan berikut:

1. Mengenali permasalahan yang terjadi.
2. Melakukan studi literatur dan pengumpulan data yang diperoleh dari PT. PLN (Persero) ULTG Maros. Data yang dimaksud berupa:
 - a. *Single line diagram* transmisi ULTG Maros,
 - b. Data nilai tahanan pentanahan tower transmisi, dan
 - c. Data gangguan saluran transmisi *line* Mandai Pangkep.
3. Membuat simulasi program GUI (*Graphical User Interface*) pada *software* MATLAB R2016a berdasarkan data yang diperoleh dan persamaan-persamaan yang terdapat pada tinjauan pustaka.
4. Menganalisis pengaruh pemasangan pentanahan metode *counterpoise* dalam memperbaiki nilai resistansi pentanahan dengan cara sebagai berikut:
 - a. Membandingkan nilai resistansi pentanahan sebelum dan setelah dilakukan pemasangan pentanahan metode *counterpoise* dengan hasil setelah pemasangan sesuai dengan SK DIR 520.

- b. Pada metode *counterpoise* dilakukan perhitungan nilai resistansi pentanahan tower menggunakan persamaan (9) dan membandingkan dengan nilai hasil pengukuran.
5. Jika semua tahapan telah dilakukan, maka analisis data penelitian telah selesai. Selanjutnya adalah penyusunan laporan yang diakhiri dengan menarik kesimpulan dari analisis yang telah dilakukan sehingga laporan skripsi dinyatakan selesai.

Bab ini membahas obyek penelitian, alat-alat penelitian, data-data penelitian, metode penelitian, tahapan penelitian, dan flowchart. Bab ini juga membahas hasil penelitian, yaitu data hasil pengukuran pentanahan dan analisis hasil pengukuran pentanahan yang diperoleh dari perhilitan. Dalam tugas akhir ini, subjek penelitian penulis adalah Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150kV Jelok-Bringin. Saluran ini menghubungkan GI 150kV Jelok dengan GI 150kV Bringin dan terletak di Unit Pelaksana Transmisi Salatiga PT PLN (Persero), yang terletak di Jl. Diponegoro No. 149, Kota Salatiga. Penghantar SUTT 150kV Jelok-Bringin memiliki total tower sebanyak 24 buah tower dengan panjang sirkuit 8,287 kms (kilometer sirkuit).

Dia Eka Putra melakukan penelitian pada tahun 2018 tentang Sistem Pentanahan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) Penghantar 150 KV Lubuk Linggau - Pekalongan Pt. Pln (Persero) Unit Pembangkit Dan Tramsisi (Upt) di Bengkulu. Penelitian dimulai dengan memilih lokasi pentanahan tower penyulang saluran udara tegangan tinggi (SUTT) 150 KV, yang melibatkan pentanahan yang terjadi di kaki tower. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengukur kembali resitasi pentanahan tower Setelah pengukuran selesai, data dikumpulkan, dihitung, dan diselidiki, terutama pada resistansi pentanahan yang bermasalah—resistansi yang melebihi 10 ohm. Dari hasil perhitungan dan analisis ini, diputuskan bahwa resistansi pentanahan yang bermasalah harus diperbaiki. Alat yang digunakan adalah Tes Tanah, yang dirancang dan diproduksi sesuai dengan standar keamanan IEC-1010 (EN 61010). Alat ini untuk mengukur tanahan elektrode pentanahan. Ada berbagai macam instrument pengukur tanahan pentanahan. Pada instrument cara

pengukuran ada 2 macam yaitu Pengukuran normal (metoda 3 kutub) dan Pengukuran praktis (metoda 2 kutub), (Putra,D.E.,&Jaka.U, 2018).

Menurut data yang diperoleh dari pengukuran lokasi Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) Penghantar 150 kV Lubuk Linggau - Pekalongan yang menggunakan konduktor ACSR 2 x 340 mm² yang ditopang oleh 214 menara dengan jarak total 69,9 km, tahanan pentanahan yang telah diambil sebagian besar masih di bawah nilai maksimum yang disyaratkan (dibawah 10 ohm). Satu batang, dua batang, tiga batang, atau empat batang elektroda atau lebih memiliki tahanan tanah yang berbeda, menurut UB. Dwight. Akibatnya, setelah hasil pengukuran diketahui bahwa menara memiliki nilai pentanahan yang melebihi standar (10 Ohm), menara SUTT Penghantar 150 kV Lubuk Linggau – Pekalongan memiliki masalah dengan tahanan pentanahan, yaitu berada dalam kondisi tanah liat atau lading. Dari hasil pengukuran didapatkan 2 tower yang berdiri pada kondisi tanah liat yang nilai tahanan pentanahannya melebihi standar maksimum yang diperbolehkan (10 Ohm) antara lain tower T.20 dan T.53 diasumsikan memiliki tahanan jenis tanah yang nilainya 100 Ohm meter (nilai maksimum tahanan jenis tanah kondisi tanah liat/ladang)

2.2 Tinjauan Teoretis Gangguan Petir pada Sistem Transmisi

2.2.1 Karakteristik Arus Petir

Petir merupakan fenomena pelepasan muatan listrik statis antara awan dengan tanah atau antar awan yang memiliki beda potensial sangat tinggi. Arus petir yang menyambar sistem transmisi dapat mencapai amplitudo 5 kA hingga 200 kA, dengan nilai rata-rata berkisar 30 kA. Gelombang arus petir umumnya memiliki bentuk impuls dengan waktu naik (rise time) yang sangat cepat, sekitar 1–10 mikrodetik, dan waktu turun sekitar 20–100 mikrodetik.

Secara umum, gelombang arus petir direpresentasikan dengan bentuk standar 8/20 μ s atau 10/350 μ s. Artinya, arus mencapai puncak dalam 8 mikrodetik dan turun hingga 50% dalam 20 mikrodetik.

Besar tegangan yang timbul akibat sambaran petir pada sistem pentanahan dapat dihitung dengan:

$$V = I \times R$$

di mana:

V = tegangan pada tower (Volt)

I = arus petir (Ampere)

R = resistansi pentanahan (Ohm)

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa semakin besar nilai resistansi pentanahan, maka semakin besar pula tegangan yang muncul pada struktur tower saat terjadi sambaran petir. Tegangan inilah yang berpotensi menyebabkan back flashover pada isolator.

2.2.2 Mekanisme Back Flashover

Back flashover terjadi ketika arus petir yang mengalir melalui tower menyebabkan kenaikan potensial struktur tower melebihi tegangan tembus isolator. Jika tegangan tower lebih tinggi dibandingkan tegangan pada konduktor fasa, maka akan terjadi loncatan busur listrik dari tower menuju konduktor melalui isolator.

Tegangan kritis isolator dipengaruhi oleh:

1. Panjang isolator
2. Kondisi permukaan isolator
3. Kelembapan udara
4. Tingkat polusi
5. Sudut datang petir

Semakin tinggi resistansi pentanahan, semakin besar kemungkinan terjadinya ground potential rise (GPR) yang memicu back flashover.

2.3 Teori Medan Listrik dan Resistivitas Tanah

2.3.1 Konsep Resistivitas Tanah

Resistivitas tanah (ρ) adalah kemampuan tanah dalam menghambat aliran arus listrik. Nilainya sangat dipengaruhi oleh:

1. Jenis tanah (liat, pasir, batuan)
2. Kandungan air
3. Temperatur
4. Kandungan mineral dan garam

Nilai resistivitas tanah secara umum:

- Tanah liat basah: 10 – 100 Ωm
- Tanah liat kering: 100 – 1000 Ωm
- Tanah berbatu: 1000 – 10.000 Ωm

Hubungan antara resistivitas dan resistansi dapat dinyatakan dengan:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

di mana:

R = resistansi (Ohm)

ρ = resistivitas tanah (Ωm)

L = panjang konduktor (m)

A = luas penampang (m^2)

Dalam sistem pentanahan, bentuk konduktor bukan berupa batang lurus horizontal, melainkan elektroda vertikal, sehingga diperlukan model matematis khusus seperti persamaan Dwight.

2.3.2 Medan Listrik dalam Tanah

Ketika arus petir mengalir ke dalam tanah melalui elektroda, arus tersebut menyebar secara radial ke segala arah. Distribusi arus ini membentuk medan listrik di sekitar elektroda.

Potensial pada jarak r dari elektroda batang dapat diturunkan dari hukum Ohm diferensial dan hukum kontinuitas arus:

$$E = \rho J$$

di mana:

E = medan listrik (V/m)

ρ = resistivitas tanah (Ωm)

J = kerapatan arus (A/m^2)

Karena arus menyebar secara radial, maka kerapatan arus berkurang sebanding dengan luas permukaan silinder imajiner di sekitar elektroda. Hal inilah yang menyebabkan resistansi elektroda sangat bergantung pada panjang dan kedalaman penanaman elektroda.

Semakin dalam elektroda ditanam, semakin besar volume tanah efektif yang dilibatkan dalam penyebaran arus, sehingga resistansi total menurun.

2.4 Teori Perhitungan Resistansi Elektroda Batang (Rumus Dwight)

Salah satu persamaan yang paling sering digunakan dalam analisis sistem pentanahan adalah persamaan Dwight untuk elektroda batang vertikal.

2.4.1 Rumus Resistansi Satu Elektroda Batang

Untuk satu batang elektroda vertikal dengan panjang L dan diameter d , resistansi dapat dihitung menggunakan:

di mana:

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

R = resistansi elektroda (Ohm)

ρ = resistivitas tanah (Ωm)

L = panjang elektroda (m)

d = diameter elektroda (m)

$\ln$ = logaritma natural

Dari persamaan tersebut dapat dianalisis bahwa:

1. Semakin besar panjang elektroda (L), maka R semakin kecil.
2. Semakin kecil resistivitas tanah (ρ), maka R semakin kecil.
3. Diameter elektroda memiliki pengaruh, tetapi tidak sebesar panjang elektroda.

2.4.2 Resistansi Beberapa Elektroda Paralel (Multi Rod Grounding)

Jika digunakan beberapa batang elektroda yang dipasang paralel dan memiliki jarak cukup jauh (minimal $2L$), maka resistansi total dapat diperkirakan dengan:

$$R_{total} > \frac{R}{n}$$

di mana:

R_{total} = resistansi total

R = resistansi satu batang

n = jumlah batang

Namun dalam praktiknya, karena adanya efek interferensi medan arus di dalam tanah (mutual resistance), maka nilai sebenarnya:

$$R_{total} > \frac{R}{n}$$

Sehingga diperlukan faktor koreksi jarak antar batang.

Jika jarak antar batang kurang dari $2L$, maka pengaruh saling interferensi menyebabkan efektivitas penurunan resistansi menjadi lebih kecil.

2.4.3 Analisis Efektivitas MRG vs Direct Grounding

Secara teoritis:

1. Direct Grounding hanya menambah satu jalur arus.
2. Multi Rod Grounding membagi arus ke beberapa jalur paralel.
3. Distribusi arus lebih merata.
4. Tegangan naik pada tower lebih kecil.

Jika arus petir sebesar 30 kA dan resistansi pentanahan:

1. $15 \Omega \rightarrow V = 450 \text{ kV}$
2. $5 \Omega \rightarrow V = 150 \text{ kV}$

Perbedaan ini sangat signifikan dalam menentukan apakah terjadi flashover atau tidak.

2.5 Hubungan Resistivitas Tanah dan Keandalan Sistem Transmisi

Semakin tinggi resistivitas tanah:

1. Semakin sulit menurunkan resistansi pentanahan
2. Semakin besar Ground Potential Rise
3. Semakin tinggi probabilitas back flashover
4. Semakin sering terjadi trip pada PMT

Karena jalur Poso–Sidera berada pada wilayah dengan kondisi tanah berbatu dan topografi pegunungan, maka metode konvensional satu batang elektroda seringkali tidak cukup efektif.

Oleh karena itu, pendekatan Multi Rod Grounding secara teoritis lebih sesuai untuk lokasi dengan resistivitas tinggi.

2.6 Urgensi Akademik dan Teknis Penelitian

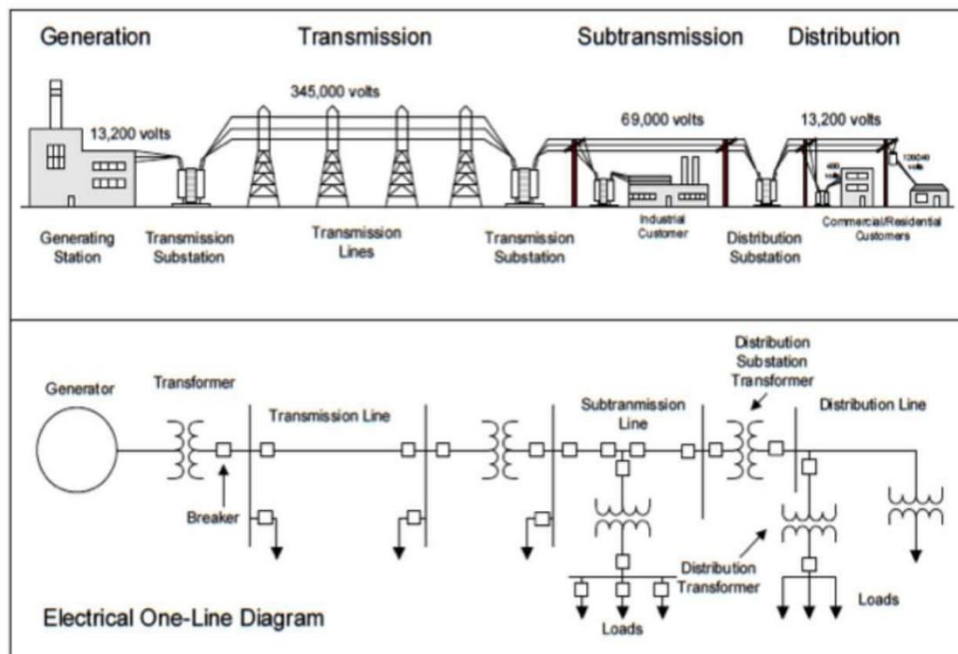
Penelitian ini menjadi penting secara teoretis dan praktis karena:

1. Menguji kesesuaian teori Dwight dengan kondisi lapangan nyata.
2. Menguji efektivitas MRG pada tanah resistivitas tinggi.
3. Memberikan validasi empiris terhadap pendekatan paralel grounding.
4. Mendukung peningkatan reliability index sistem transmisi.

2.7 Sistem Transmisi Tenaga Listrik 150 kV

2.7.1 Pengertian dan Fungsi Sistem Transmisi

Sistem transmisi tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit menuju gardu induk beban dalam kapasitas besar dan jarak jauh. Sistem transmisi dirancang menggunakan tegangan tinggi (70 kV, 150 kV, 275 kV, 500 kV) untuk mengurangi rugi-rugi daya akibat arus yang mengalir pada konduktor.



Gambar 2.1 One Line Diagram Sistem Transmisi

Secara umum, sistem transmisi memiliki fungsi utama:

1. Menyalurkan daya listrik dalam jumlah besar.

2. Menjaga kestabilan sistem interkoneksi.
3. Meminimalkan rugi-rugi daya (I^2R losses).
4. Menjamin kontinuitas suplai energi listrik.

Di Indonesia, sistem transmisi 150 kV merupakan tulang punggung distribusi regional dan dikelola oleh 3

2.7.2 Komponen Utama SUTT 150 kV

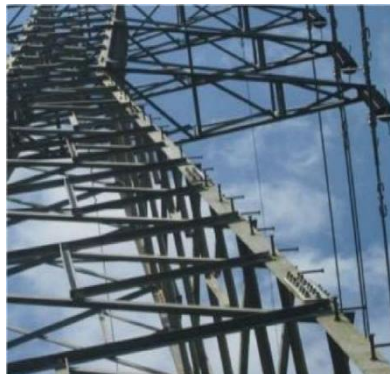
Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:

1. Tower Transmisi

Sebuah struktur tinggi, biasanya menara baja, yang dipakai untuk mendukung jaringan daya tegangan tinggi. Menara tersebut dipakai dalam sistem AC dan DC bertegangan tinggi, dan memiliki ragam bentuk dan ukuran.

Bagian-bagian Tower Transmisi Tenaga Listrik :

- Puncak menara disebut juga god head ,adalah bagian paling atas. Pada bagian ini ditempatkan beberapa peralatan/ perlengkapan
- Extention body tower atau tambahan badan tower / menara hal ini diperlukan untuk mendapatkan / mencapai suatu ketinggian yang diperlukan.



Gambar 2.2 Body Tower

- Leg extention atau tambahan kaki tower tambahan ini dimaksudkan untuk mendapatkan suatu posisi peralatan kaki tower apabila pembangunan tower / menaranya sendiri berada pada kondisi tanah yang merata / sebagian pada posisi tebing
- Diagonal atau disebut rangkaian miring rangkaian ini dipasang pada posisi miring dari setiap bagian menara / tower dimaksud,



Gambar 2.3 Diagonal Tower Transmisi

- Leveler atau rangka datar
- Spidler atau rangka menyudut
- Rangka ini dipasang pada sisi menyudut pada bagian dalam tower / menara yang fungsinya sebagai penyiku dasar
- Baut panjat atau step bolt



Gambar 2.4 Stepbolt Pada Transmisi

- Baut ini sebagai tangga dan dipasang pada bagian luar rangka tower /menara. Tower telekomunikasi mempunyai tangga di bagian dalam dari tower / menara lengkap dengan pelindungnya (cover leader)
- Washer, mur, ring, loch nut dan lain-lain, sebagai alat untuk penggandeng bagian-bagian tower / menar



Gambar 2.5 Tower Transmisi

2. Kontruksi Tower Transmisi Tenaga Listrik menurut Fungsinya

- Tiang penegang (tension tower)

Menahan gaya berat dan menahan gaya tarik dari konduktor SUTT/SUTET

Terdiri dari 2 jenis

- Tiang sudut (angle tower)
- Tiang akhir (dead end tower)



Gambar 2.6 Tiang Sudut (Angle Tower) SUTT 150 kV

- Tiang Penyangga (Suspension tower)

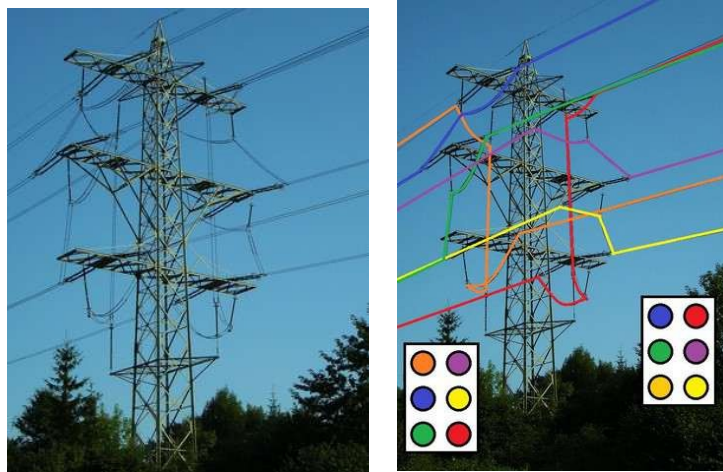
Untuk mendukung / menyangga dan harus kuat terhadap gaya berat dari peralatan listrik yang ada pada tiang tersebut



Gambar 2.7 Tiang penyangga (suspension tower) SUTT 150 kV

- Tiang Transposisi

Tiang penegang yang berfungsi sebagai tempat perpindahan letak susunan phasa konduktor-konduktor SUTT/SUTET.



Gambar 2.8 Tiang Transposisi

- Tiang Portal (Gantry Tower)

Tower berbentuk portal digunakan pada persilangan antara dua saluran transmisi yang membutuhkan ketinggian yang lebih rendah untuk alasan tertentu (bandara, tiang crossing).



Gambar 2.8 Tiang Portal

3. Kontruksi tower transmisi tenaga listrik menurut bentuknya

- Tiang Pole : Konstruksi SUTT dengan tiang beton atau tiang baja, digunakan pada perluasan SUTT dalam kota yang padat penduduk dan memerlukan lahan relatif sempit.

Bagian utama Konstruksi tiang pole :

- Tiang : sebagai penopang dari palang dan insulator. Tiang baja terbuat dari high steel yang berpenampang poligonal atau bulat, sedangkan tiang beton terbuat dari beton pra-tekan berpenampang bulat.
- Palang (travers)



Gambar 2.9 a. Tiang Pole Baja, b. Tiang Pole Beton, c. Tiang Pole Kayu

- Tiang Kisi – kisi (Lattice Tower)

Terbuat dari baja profil, disusun sedemikian rupa sehingga merupakan

suatu menara yang telah diperhitungkan kekuatannya disesuaikan

dengan kebutuhannya.

Berdasarkan susunan / konfigurasi penghantarnya :

- Tiang Delta (Delta Tower)
- Tiang Zig-zag (zig-zag tower)
- Tiang piramida (pyramid tower)



Gambar 2.10 a. Zig-zag Tower & b. Tiang Delta (Delta Tower)

4. Konduktor Fasa

Umumnya menggunakan ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) yang memiliki kekuatan mekanik dan konduktivitas baik.

5. Isolator

Berfungsi sebagai komponen penting pada jaringan listrik tegangan tinggi yang berfungsi memisahkan konduktor (kabel berarus) dari menara transmisi (tiang) agar arus listrik tidak bocor ke tanah. Alat ini menopang beban kabel sekaligus menjaga keamanan dengan mencegah arus listrik mengalir ke daerah yang tidak diinginkan.



Gambar 2.11 Isolator pada system transmisi

6. Kawat Tanah (Shield Wire/OPGW)

Berfungsi menangkap sambaran petir dan mengalirkannya ke tower.

7. Sistem Pentanahan

Sistem yang menghubungkan tower ke tanah untuk mengalirkan arus gangguan.

Keandalan sistem transmisi sangat dipengaruhi oleh kualitas sistem pentanahan tower.

2.8 Sistem Pentanahan (Grounding System)

2.8.1 Definisi dan Tujuan Pentanahan

Sistem pentanahan adalah sistem yang menghubungkan bagian konduktif peralatan atau struktur ke tanah dengan tujuan:

1. Mengalirkan arus gangguan dengan aman.
2. Mengurangi tegangan sentuh dan langkah.
3. Menstabilkan tegangan sistem.
4. Melindungi peralatan dari kerusakan akibat surja petir.

Menurut standar teknis seperti IEEE Std 80-2000, sistem pentanahan harus dirancang agar mampu menyalurkan arus gangguan tanpa menimbulkan bahaya bagi manusia maupun peralatan.

2.8.2 Parameter Penting dalam Sistem Pentanahan

Beberapa parameter utama dalam sistem pentanahan meliputi:

1. Resistansi Pentanahan (Ground Resistance)
Nilai hambatan total antara elektroda dan tanah.
2. Resistivitas Tanah (Soil Resistivity, ρ)
Karakteristik tanah dalam menghambat arus listrik.
3. Ground Potential Rise (GPR)
Kenaikan potensial tower saat dialiri arus gangguan.
4. Tegangan Sentuh (Touch Voltage)
Tegangan antara struktur dan tanah yang disentuh manusia.
5. Tegangan Langkah (Step Voltage)
Tegangan antara dua titik tanah yang terpisah jarak satu langkah.

Tegangan antara dua titik tanah yang terpisah jarak satu langkah.

Standar operasional PLN mengacu pada SPLN No. 64-1:1986 yang mensyaratkan nilai resistansi pentanahan tower $\leq 10 \Omega$.

2.9 Teori Resistivitas Tanah

2.9.1 Faktor yang Mempengaruhi Resistivitas Tanah

Nilai resistivitas tanah sangat dipengaruhi oleh:

1. Kandungan air
2. Komposisi mineral
3. Struktur tanah
4. Temperatur
5. Kandungan garam

Tanah basah memiliki resistivitas lebih rendah dibandingkan tanah kering atau berbatu.

2.9.2 Metode Pengukuran Resistivitas Tanah

Metode yang umum digunakan adalah Wenner Four-Point Method, dengan persamaan:

$$\rho = 2 \pi a R$$

di mana:

ρ = resistivitas tanah (Ωm)

a = jarak antar elektroda (m)

R = resistansi terukur (Ohm)

Metode ini digunakan untuk menentukan desain sistem pentanahan yang optimal.

2.10 Gangguan Petir pada Sistem Transmisi

2.10.1 Karakteristik Petir

Petir menghasilkan arus impuls besar (5–200 kA). Gelombang standar yang digunakan dalam analisis proteksi adalah 8/20 μs dan 10/350 μs .

Tegangan pada tower akibat sambaran petir:

$$V = I \times R$$

Jika R tinggi, maka V akan sangat besar dan memicu back flashover.

2.10.2 Back Flashover

Back flashover terjadi ketika tegangan tower melebihi tegangan tembus isolator. Faktor yang mempengaruhi:

1. Tinggi tower
2. Nilai resistansi pentanahan
3. Arus petir
4. Panjang isolator

Semakin rendah resistansi pentanahan, semakin kecil kemungkinan terjadinya back flashover.

2.11 Metode Direct Grounding

2.11.1 Prinsip Kerja

Metode Direct Grounding dilakukan dengan menambahkan satu elektroda batang yang dihubungkan langsung ke sistem pentanahan eksisting.

1. Perhitungan Resistansi Elektroda Tunggal (Rumus Dwight)

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

di mana:

R = resistansi elektroda

ρ = resistivitas tanah

L = panjang elektroda

d = diameter elektroda

Semakin panjang elektroda, semakin kecil resistansi.

2. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan:

- Mudah dipasang
- Biaya relatif rendah

Kekurangan:

- Kurang efektif pada tanah resistivitas tinggi
- Penurunan resistansi terbatas

2.12 Metode Multi Rod Grounding (MRG)

1. Prinsip Kerja

Metode MRG menggunakan beberapa elektroda batang yang dipasang paralel dan tersebar.

Jika jarak antar batang $\geq 2L$, maka secara teoritis:

$$R_{total} = \frac{R}{n}$$

Namun dalam praktik:

$$R_{total} = \frac{R}{n}$$

karena adanya interferensi medan arus.

Faktor yang Mempengaruhi Efektivitas MRG

1. Jarak antar batang
2. Kedalaman penanaman
3. Resistivitas tanah
4. Jumlah batang

MRG lebih efektif pada tanah dengan resistivitas tinggi.

2.12.1 Perbandingan Teoretis DG vs MRG

Parameter	Direct Grounding	Multi Rod Grounding
Jumlah Elektroda	1	>1
Distribusi Arus	Terpusat	Lebih Merata
Efektivitas Tanah Tinggi	Rendah	Tinggi
Biaya	Lebih Murah	Lebih Mahal

2.13 Kajian Pustaka

Berdasarkan masalah yang diangkat peneliti, Bab ini akan membahas teori-teori dasar yang melandasi penelitian, termasuk:

1. Sistem Transmisi SUTT 150 kV: Fungsi, komponen utama (tower, isolator, kabel tanah), dan pentingnya keandalan
2. Ide Pentanahan (Grounding) Tabung Transmisi Tujuannya adalah untuk mengetahui resistansi pentanahan standar (misalnya kurang dari 5Ω), serta komponen tanah yang mempengaruhi resistansi (jenis tanah, kelembapan, suhu, dan tahanan jenis tanah).
3. Gangguan Petir dan Back Flashover: Ini adalah penyebab back flashover karena resistansi pentanahan yang tinggi.
4. Metode Multi Rod Grounding (MRG)—Prinsip kerja, implementasi, dan keunggulan metode grounding langsung dalam mengalirkan arus petir tanpa melalui struktur utama tower.

Prinsip kerja, perhitungan penambahan elektroda batang secara paralel (misalnya rumus Dwight), dan efektivitasnya dalam menurunkan resistansi total.

2.14 Kerangka Pemikiran

1. Kondisi Awal dan Pemicu Masalah :

- a. Gangguan Petir: Sambaran petir pada jalur transmisi SUTT 150 kV Poso Sidera menyebabkan gangguan trip pada PMT GI Poso/Sidera, terutama di wilayah pegunungan.
- b. Ketahanan Terhadap Pentanahan Tinggi Nilai resistansi pentanahan (Rawal) beberapa menara di jalur Poso-Sidera melebihi standar. Nilai ini dapat lebih dari 5Ω atau 10Ω , tergantung spesifikasinya.

- c. Efek resistensi tinggi menyebabkan tegangan tower meningkat saat terjadi petir. Ini dapat menyebabkan flashover balik pada isolator, yang mengurangi kepercayaan sistem transmisi.

2. Tujuan dan Standar Pentanahan :

- a. Fungsi pentanahan sebagai jalur aman arus gangguan (terutama surja petir) ke tanah.
- b. Kajian standar resistansi pentanahan tower SUTT 150 kV (misalnya SPLN/IEEE) yang harus dipenuhi (misalnya $\leq 5 \Omega$).
- c. Teori *Back Flashover* dan kaitannya dengan resistansi pentanahan tower.

3. Metode Perbaikan Pentanahan (Variabel Bebas) :

- a. Metode Grounding Terus: Prinsipnya, cara kerjanya, dan jalur hubungannya (langsung ke kawat tanah atau kawat tanah).
- b. Metode Grounding Multi Rod (MRG): Prinsipnya, cara kerjanya, dan cara menghitung penurunan resistansi (misalnya menggunakan rumus Dwight).

4. Variabel yang Mempengaruhi : Tahanan Jenis Tanah (Resistivitas) lokasi Poso-Sidera.

1. Tahap Pengambilan Data Awal :

Survei dan Sampel: Menemukan dan memilih menara sampel dengan resistansi tinggi. b. Pengukuran Rawal: menggunakan Earth Tester dengan metode Fall of Potential (FoP), mengukur resistansi pentanahan awal (Rawal) pada menara sampel.

2. Tahap Implementasi Perbaikan (Eksperimen) :

- a. Kelompok A: Implementasi metode Direct Grounding.
- b. Kelompok B: Implementasi metode Multi Rod Grounding (MRG) (penambahan *ground rod* paralel).

3. Tahap Pengambilan Data Akhir :

Pengukuran Rakhir : Mengukur nilai resistansi pentanahan akhir (Rakhir) pada semua *tower* sampel setelah perbaikan menggunakan metode FoP yang sama.

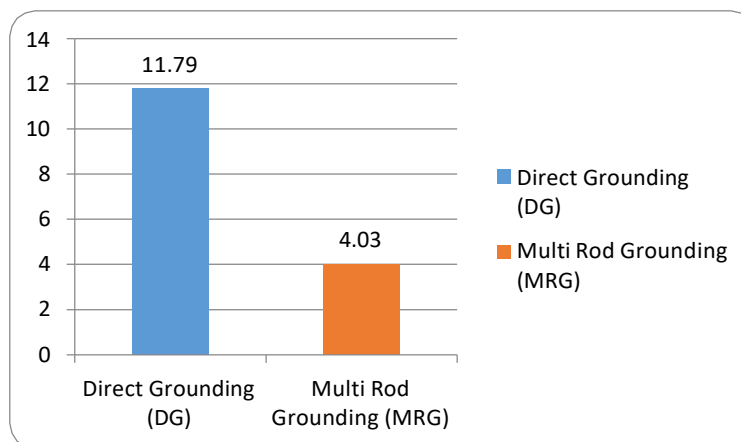
a. Analisis Kuantitatif Data :

a. Analisis Deskriptif: Hitung nilai rata-rata Rawal dan Rakhir.

b. Perhitungan Persentase Penurunan

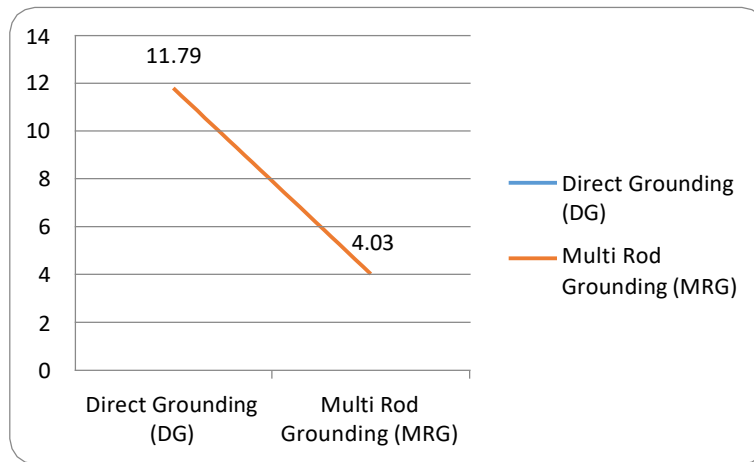
c. Analisis Komparatif: Membandingkan R akhir dan persentase penurunan antara metode Direct Grounding dan MRG.

b. Perbandingan Resistansi DG vs MRG



Grafik 2.14

c. Grafik Sebelum Sesudah



Grafik 2.14

- d. Hasil dan Kesimpulan (Luaran):
- Evaluasi Kelayakan: Menentukan apakah Rakhir kedua metode telah memenuhi standar ($R_{akhir} \leq 5 \Omega$).
 - Rekomendasi Optimal: Menemukan metode perbaikan (Direct Grounding atau MRG) yang paling efektif, efisien, dan ideal untuk kondisi tanah di jalur Poso-Sidera.
 - Dukungan: Saran teknis PLN untuk meningkatkan keandalan sistem.