

BAB II

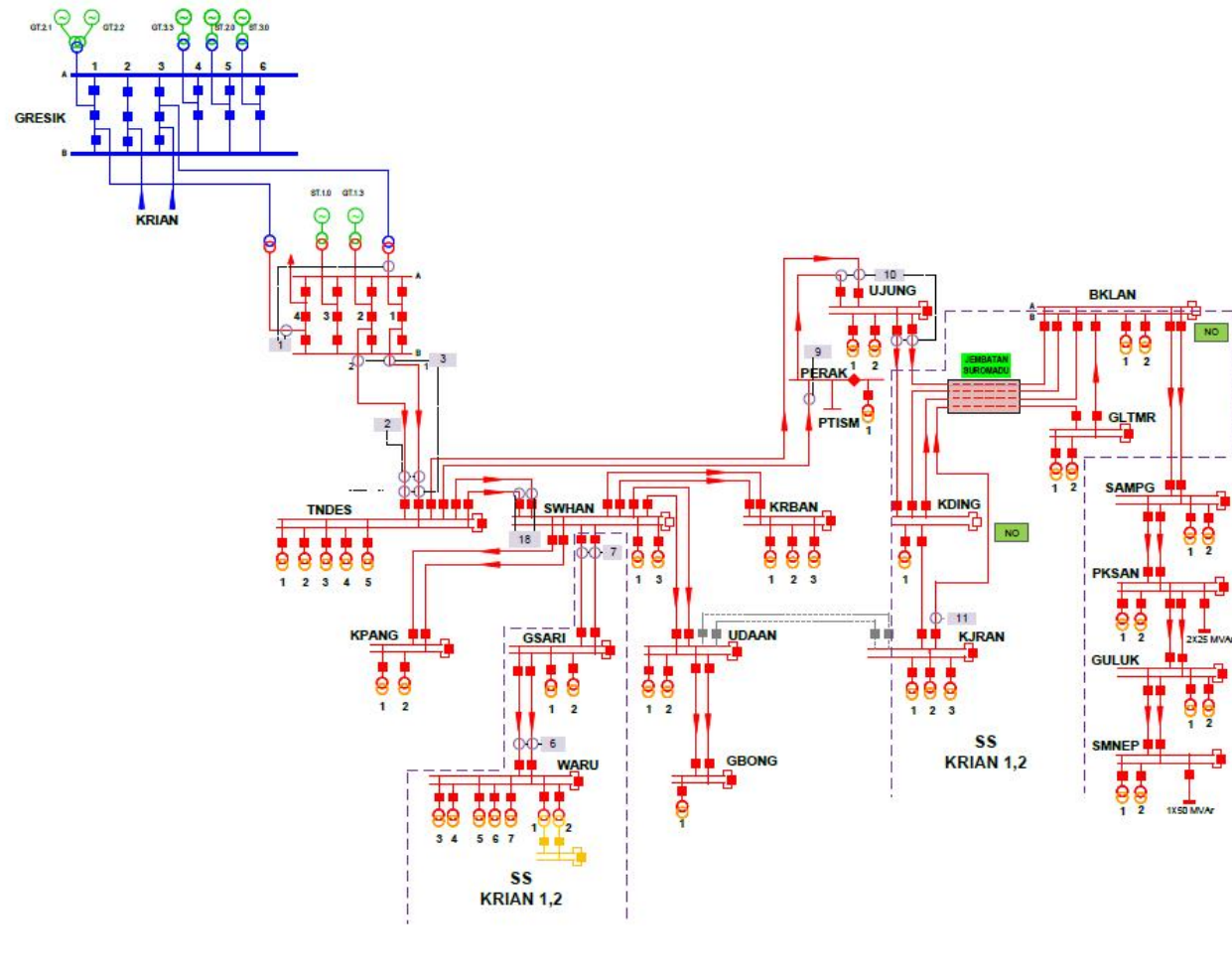
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Penyaluran Transmisi

Sistem Penyaluran Transmisi adalah pendistribusian tegangan extra tinggi dari pembangkitan ke pusat beban (konsumen). Dimana proses yang di salurkan dimulai dengan menaikkan tegangan listrik di gardu induk, kemudian listrik disalurkan melalui saluran transmisi (seperti SUTET atau SUTT) ke gardu lain untuk penurunan tegangan sebelum akhirnya didistribusikan ke masyarakat.

Sistem transmisi dirancang untuk menyalurkan energi listrik dari satu titik ke titik lainnya dengan efisien dan aman, memungkinkan listrik dari pembangkit listrik menjangkau wilayah yang jauh sebelum sampai ke konsumen akhir. Oleh karena itu, apabila transmisi listrik mengalami gangguan maka akan mengakibatkan proses penyaluran energi listrik terganggu sehingga menyebabkan pemadaman listrik di daerah-daerah tersebut. Gangguan yang sering ditemui pada saluran transmisi khususnya saluran udara adalah gangguan eksternal yang berasal dari sambaran petir yang mengenai kawat fasa akibat terjadinya kegagalan perisai (shielding failure). shielding failure terjadi karena kawat tanah tidak mampu untuk melindungi kawat fasa terhadap sambaran petir. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui keandalan perisai terhadap sambaran petir. Metode yang digunakan adalah metode perbaikan grounding MDG (MULTI DIRECT GROUNDING). Pada besar arus maksimum kegagalan perisai dan daerah tak terlindungi (Xs) dipengaruhi oleh kemampuan sudut perisai. Pada gagal perisai dapat mengakibatkan petir yang menyambar pada suatu titik saluran udara transmisi yang dapat menyebabkan terjadinya Flashover pada isolator saluran udara tegangan tinggi tersebut. Faktor yang menyebabkan kegagalan perisai adalah sudut lindung, besar arus puncak petir dan desain menara transmisi.



Gambar 2.1 Flow Diagram Sistem Transmisi

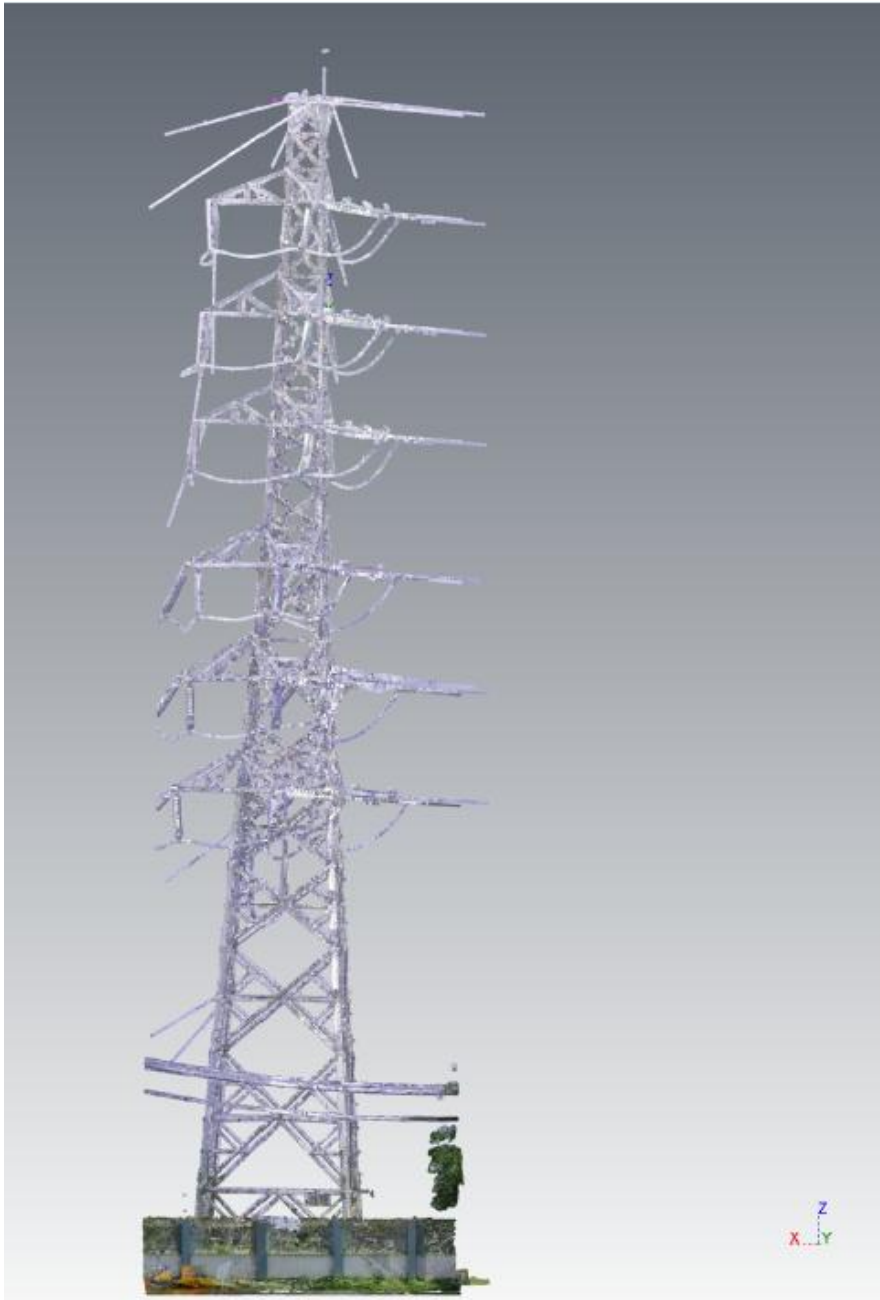
2.1.2 Tower Transmisi

Tower transmisi adalah struktur tinggi, umumnya menara kisi baja, yang berfungsi untuk menyangga kawat-kawat penghantar listrik pada saluran transmisi tegangan tinggi dari pembangkit ke pusat beban. Menara ini berfungsi menopang kabel listrik yang ditenangkan melalui isolator agar orang dan peralatan lain tidak tersengat listrik.

Konstruksi tower besi baja merupakan jenis konstruksi saluran transmisi tegangan tinggi (SUTT) ataupun saluran transmisi tegangan ekstra tinggi (SUTET) yang paling banyak digunakan di jaringan PLN, karena mudah dirakit terutama untuk pemasangan di daerah pegunungan dan jauh dari jalan raya, harganya yang relatif lebih murah dibandingkan dengan penggunaan saluran bawah tanah serta pemeliharaannya yang mudah. Namun demikian perlu pengawasan yang intensif, karena besi-besinya rawan terhadap pencurian. Seperti yang telah terjadi di beberapa daerah di Indonesia, dimana pencurian besi-besi baja pada menara/ tower listrik mengakibatkan menara/ tower listrik tersebut roboh dan penyaluran energi listrik ke konsumen pun menjadi terganggu.

Suatu menara atau tower listrik harus kuat terhadap beban yang bekerja padanya, antara lain yaitu:

1. Gaya berat tower dan kawat penghantar (gaya tekan).
2. Gaya tarik akibat rentangan kawat.
3. Gaya angin akibat terpaan angin pada kawat maupun badan tower.



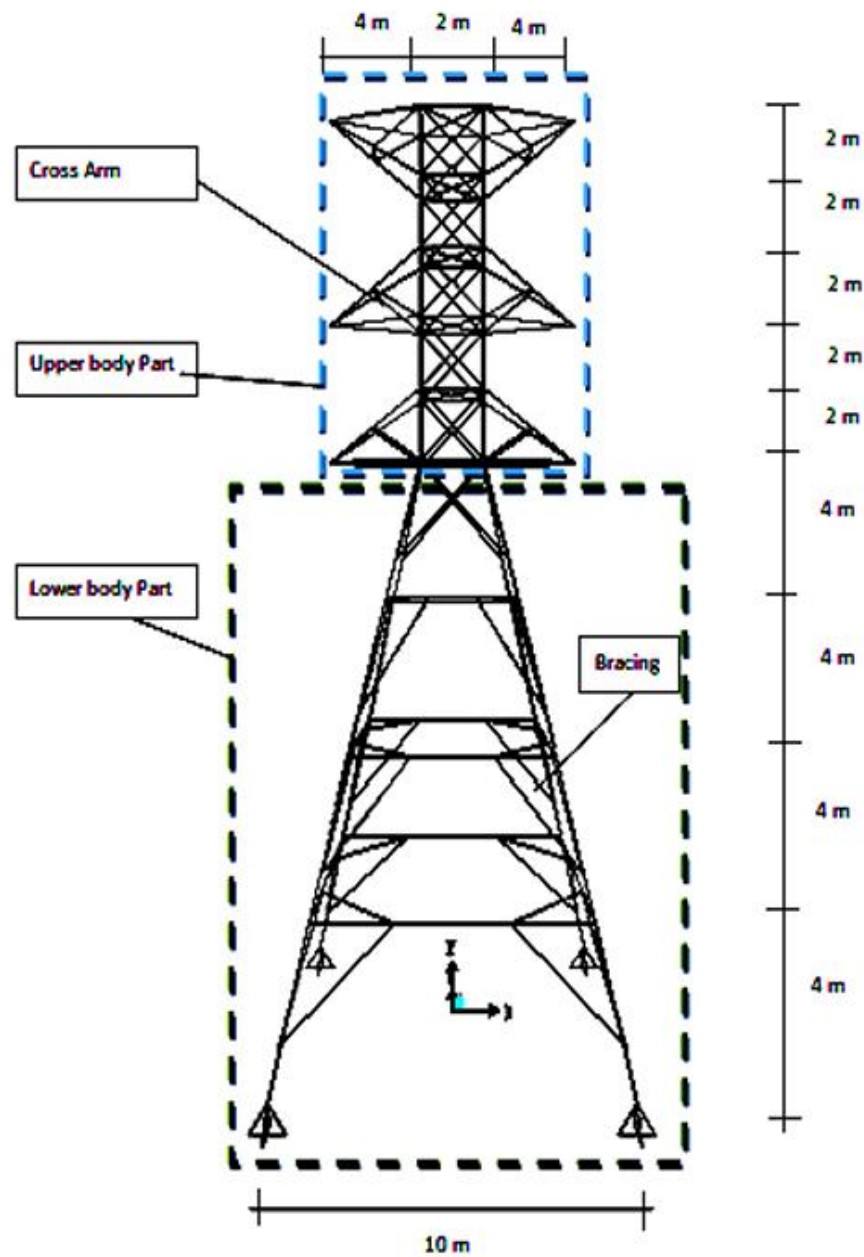
Gambar 2.2 Tower

(Dokumentasi Pribadi, September 2025)

Keandalan menara dalam menahan beban mekanis tersebut merupakan fondasi utama bagi kestabilan penyaluran energi listrik. Namun, integritas struktur fisik menara transmisi sebagai infrastruktur hulu juga memiliki implikasi sistemik yang luas hingga ke jaringan distribusi di sisi hilir. Sebagaimana hasil penelitian Pahiyanti et al. (2018), stabilitas parameter teknis pada jaringan distribusi sangat bergantung pada kondisi performa infrastruktur penyaluran yang menyuplainya. Oleh sebab itu, koordinasi proteksi yang andal sangat diperlukan untuk memitigasi gangguan sistem, selaras dengan penekanan Pahiyanti & Pasra (2019) mengenai vitalnya menjaga keandalan gardu dari faktor eksternal.

Guna mewujudkan keandalan tersebut, tower transmisi memerlukan sistem grounding untuk menyalurkan arus listrik berlebih atau sambaran petir ke tanah dengan aman, guna mencegah kerusakan peralatan dan bahaya bagi manusia. Pemasangan grounding tower dilakukan melalui kabel tanah atau kawat pelindung (shield wire) yang menghubungkan bagian atas tower ke kaki-kaki tower untuk kemudian ditanam ke dalam tanah sebagai elektroda.

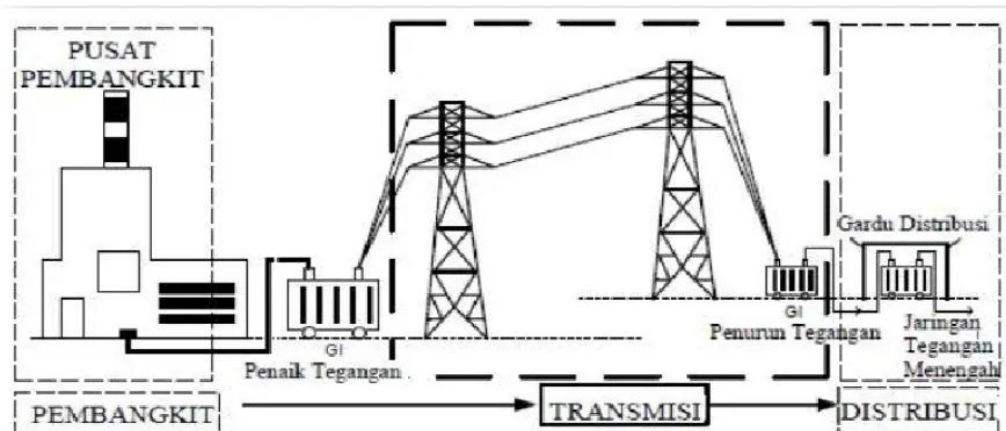
Tujuan utama pemasangan grounding tower adalah sebagai perlindungan dari petir, di mana kawat pelindung di puncak tower berfungsi menangkap sambaran petir langsung agar arus yang besar dapat dialirkan ke tanah melalui sistem grounding. Pentanahan yang efektif juga berfungsi sebagai pencegahan back flashover, yaitu loncatan arus dari kawat ke tower akibat tegangan petir yang terlalu besar karena resistansi tanah yang tinggi. Selain itu, sistem grounding yang baik akan menjamin keamanan manusia, meminimalkan kerusakan peralatan, serta menjaga keselamatan petugas atau masyarakat yang beraktivitas di sekitar lokasi tower.



Gambar 2.3 Deskripsi Geometri Tower.

2.1.3 Bagian Transmisi

Bagian utama dari sistem transmisi tenaga listrik yang ditopang oleh tower terdiri atas beberapa komponen penting yang berfungsi mendukung keandalan dan keselamatan penyaluran energi listrik. Pondasi menjadi elemen dasar yang ditanamkan ke dalam tanah untuk memberikan stabilitas serta mengikat seluruh struktur tower, biasanya terbuat dari beton bertulang. Di atas pondasi, terdapat kaki tower (leg) yang berfungsi menghubungkan stub pada bagian paling bawah dengan badan tower. Badan tower sendiri merupakan rangka utama yang terbagi menjadi common body (bagian bawah) dan super structure (bagian atas dengan ukuran lebih kecil). Selain itu, terdapat lengan silang (cross arm) yang berfungsi sebagai tempat menggantung isolator dan kawat penghantar (konduktor). Isolator, yang umumnya terbuat dari bahan keramik atau polimer, berperan penting dalam memisahkan konduktor dari struktur baja agar arus listrik tidak mengalir ke menara. Pada bagian puncak tower dipasang kawat petir (ground wire) untuk melindungi sistem transmisi dari sambaran petir. Tidak hanya itu, terdapat pula peralatan pendukung seperti rambu tanda bahaya, anti climbing device (ACD), step bolt, dan rambu identifikasi yang masing-masing berfungsi sebagai pengaman, pijakan teknisi, serta informasi identitas tower. Keseluruhan komponen tersebut membentuk sistem transmisi yang kokoh, aman, dan andal dalam penyaluran tenaga listrik jarak jauh..



Gambar 2.4 Bagian Transmisi.

1. Komponen Utama Tower dan Fungsinya

a. Pondasi Tower

Pondasi tower adalah struktur dasar yang bertanggung jawab menyalurkan seluruh beban tower (berat struktur, konduktor, dan gaya lingkungan seperti angin serta gempa) ke tanah, sehingga memastikan stabilitas dan keamanan struktur secara keseluruhan. Komponen utama pondasi adalah beton bertulang dan bagian stub (kaki tower) yang ditanam ke dalam pondasi.

Komponen Pondasi Tower

1. Pondasi (Beton Bertulang): Bagian dasar yang menopang langsung seluruh beban tower, memastikan distribusi beban merata ke tanah.
2. Stub (Kaki Tower): Bagian baja yang dipasang menyatu dengan pondasi, berfungsi sebagai titik pengikat antara pondasi dan struktur rangka tower.

Fungsi Pondasi Tower

1. Menyalurkan Beban: Pondasi mengalirkan semua beban tower, termasuk berat sendiri tower, beban angin, gaya tarik konduktor, serta gaya akibat gempa.
2. Memberi Stabilitas: Pondasi menjaga agar tower tidak mengalami pergeseran atau kemiringan akibat beban lateral maupun gaya tarik dari konduktor.
3. Mengikat Struktur Tower: Stub berfungsi sebagai jangkar yang menghubungkan pondasi dengan badan tower, memastikan integritas struktural keseluruhan.
4. Menahan Gaya Tarik dan Tekan: Pondasi didesain untuk menahan gaya tarik konduktor serta gaya tekan vertikal dari berat tower.

b. Kaki Tower (Leg)

Kaki tower adalah bagian vertikal yang menghubungkan stub dengan badan tower. Fungsinya adalah sebagai penopang utama yang menyalurkan beban dari badan tower menuju pondasi.

c. Badan Tower

Merupakan rangka utama tower yang terdiri dari:

1. Common Body: Bagian bawah dengan dimensi lebih besar untuk menopang beban utama.
2. Super Structure: Bagian atas dengan dimensi lebih kecil untuk menopang cross arm dan kawat petir.

d. Lengan Silang (Cross Arm)

Berfungsi menopang isolator dan konduktor, serta mendistribusikan gaya tarik dari kawat penghantar ke struktur tower.

e. Isolator

Komponen yang memisahkan konduktor dengan struktur baja. Terbuat dari keramik atau polimer, fungsinya mencegah arus mengalir ke tower.

f. Kawat Petir (Ground Wire)

Diposisikan di puncak tower untuk melindungi konduktor dari sambaran petir dengan menyalurkan arus petir ke sistem grounding.

g. Peralatan Pendukung

1. Rambu Tanda Bahaya: Memberikan peringatan di sekitar tower.
2. Anti Climbing Device (ACD): Alat pengaman di kaki tower agar tidak mudah dipanjat.
3. Step Bolt: Baut pijakan untuk teknisi dalam proses pemeliharaan.

2.1.4 Sistem Grounding Tower

Sistem grounding pada tower transmisi merupakan salah satu komponen penting dalam menjamin keselamatan dan keandalan sistem tenaga listrik. Grounding berfungsi untuk menyalurkan arus gangguan, baik yang disebabkan oleh **sambaran petir, hubungan singkat**, maupun gangguan tegangan lebih lainnya, langsung ke dalam tanah dengan aman. Melalui sistem grounding yang baik, energi listrik berlebih dapat diredam sehingga tidak merusak peralatan maupun membahayakan keselamatan manusia yang berada di sekitar tower.

Menurut **Hajar (2017)** dalam penelitiannya tentang desain pentanahan proteksi petir dengan sistem multiple vertical electrodes, resistansi grounding yang tinggi dapat meningkatkan risiko terjadinya **back-flashover** pada saluran transmisi. Back-flashover adalah loncatan balik dari kawat tanah menuju konduktor fase akibat tegangan lebih dari sambaran petir. Oleh karena itu, nilai resistansi pentanahan yang rendah menjadi syarat utama agar sistem transmisi dapat bekerja dengan aman dan andal.

Penelitian yang dilakukan oleh **Adiwibowo (2018)** mengenai evaluasi lightning performance pada SUTET 500 kV juga menegaskan bahwa kualitas grounding tower berpengaruh langsung terhadap performa proteksi petir. Sistem grounding dengan resistansi rendah mampu menyalurkan arus petir ke tanah lebih cepat, sehingga mengurangi kemungkinan gangguan listrik yang dapat merugikan pelanggan maupun merusak peralatan transmisi.

Lebih lanjut, **Purwono (2022)** dalam evaluasi kelayakan instalasi sistem tenaga listrik pada gedung menekankan pentingnya pemeliharaan berkala terhadap elektroda pentanahan. Seiring waktu, kualitas tanah dan kondisi elektroda dapat berubah akibat korosi atau berkurangnya kelembaban tanah, sehingga nilai resistansi dapat meningkat. Hal ini

menunjukkan perlunya inspeksi berkala serta perbaikan sistem grounding untuk memastikan tetap berada dalam standar yang berlaku.

Hajar dan Romadani (2023) melakukan analisis pengukuran tahanan pentanahan di Gardu Induk Angke PT PLN (Persero) UIT JBB dan menemukan bahwa nilai resistansi sangat dipengaruhi oleh kondisi sambungan serta kualitas instalasi elektroda. Dalam beberapa kasus, sambungan yang tidak sempurna menyebabkan kenaikan resistansi yang signifikan meskipun elektroda sudah dipasang sesuai standar. Hal ini membuktikan bahwa tidak hanya desain, tetapi juga kualitas instalasi menjadi faktor yang menentukan keberhasilan sistem grounding.

Sementara itu, penelitian oleh **Damiri (2024)** mengenai pemodelan sistem pembumian pada Gardu Induk 150 kV Tayan menggunakan perangkat lunak CYMGRD menunjukkan bahwa penggunaan **multi electrode grounding system** mampu menurunkan resistansi pentanahan secara signifikan. Selain itu, metode tersebut juga efektif dalam menurunkan tegangan sentuh (touch voltage) dan tegangan langkah (step voltage), sehingga lebih aman bagi manusia yang beraktivitas di sekitar tower.

Berdasarkan kelima penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem grounding tower memiliki peran vital dalam operasi transmisi tenaga listrik. Nilai resistansi grounding yang rendah, instalasi yang baik, serta pemeliharaan yang berkesinambungan merupakan kunci utama untuk mencapai keandalan sistem. Inovasi terbaru seperti **Multi Direct Grounding (MDG)** juga menjadi solusi menjanjikan untuk menurunkan resistansi pentanahan, khususnya di daerah dengan resistivitas tanah tinggi.

2.1.5 Metode Multi Direct Grounding (MDG)

Metode **Multi Direct Grounding (MDG)** merupakan salah satu inovasi dalam teknik pentanahan (grounding) yang bertujuan untuk menurunkan resistansi tanah secara signifikan dengan cara menambahkan beberapa elektroda pentanahan (ground rod) yang

dipasang secara paralel dan dihubungkan langsung ke sistem grounding tower. Konsep utama dari metode ini adalah memperbesar luas bidang pelepasan arus ke tanah, sehingga arus gangguan seperti sambaran petir maupun arus hubung singkat dapat disalurkan lebih cepat dan lebih aman.

Secara prinsip, resistansi tanah dipengaruhi oleh **resistivitas tanah (ρ)**, **panjang elektroda (L)**, **diameter elektroda (d)**, serta **jumlah elektroda yang dipasang**. Jika hanya menggunakan satu elektroda (single rod), maka kemampuan pelepasan arus terbatas. Namun, ketika digunakan beberapa elektroda yang ditanam pada jarak tertentu dan dihubungkan secara paralel, maka resistansi total dapat diturunkan sesuai dengan hukum paralel listrik. Hal ini berarti semakin banyak elektroda yang ditanam, semakin rendah resistansi sistem pentanahan yang dihasilkan.

Menurut **Hajar (2017)**, penggunaan metode multiple electrode mampu menurunkan resistansi tanah hingga di bawah $5\ \Omega$ meskipun pada daerah dengan resistivitas tinggi. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian **Damiri (2024)**, yang menunjukkan bahwa sistem grounding dengan banyak elektroda tidak hanya efektif menurunkan resistansi, tetapi juga mengurangi **tegangan sentuh (touch voltage)** dan **tegangan langkah (step voltage)** yang berbahaya bagi keselamatan manusia.

Implementasi metode MDG umumnya dilakukan dengan cara memasang ground rod berbahan **tembaga berlapis baja (copper bonded steel)** atau **tembaga murni** dengan panjang 3–6 meter pada beberapa titik di sekitar pondasi tower. Jarak antar elektroda biasanya diatur 2–3 kali panjang elektroda agar bidang penyebaran arus tidak saling menumpuk. Setiap ground rod kemudian dihubungkan ke grounding bar atau titik netral tower menggunakan kabel tembaga berpenampang besar.

Penelitian **Adiwibowo (2018)** menegaskan bahwa semakin banyak jalur pelepasan arus yang tersedia, semakin kecil kemungkinan terjadinya loncatan balik (back-flashover) akibat resistansi tinggi. Hal ini penting terutama pada saluran udara tegangan ekstra tinggi

(SUTET), di mana gangguan petir merupakan salah satu penyebab utama terjadinya pemadaman luas (blackout).

Selain itu, **Purwono (2022)** menekankan pentingnya pemeliharaan berkala pada sistem grounding. Meskipun metode MDG mampu memberikan hasil yang signifikan pada awal pemasangan, faktor lingkungan seperti kelembaban tanah, korosi pada elektroda, dan kualitas sambungan tetap dapat memengaruhi kinerja sistem dalam jangka panjang. Oleh karena itu, metode MDG akan optimal apabila disertai dengan **inspeksi berkala, pengukuran periodik resistansi tanah, dan perawatan sambungan elektroda**.

Lebih lanjut, penelitian **Hajar & Romadani (2023)** menemukan bahwa resistansi pentanahan tidak hanya bergantung pada jumlah elektroda, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kualitas instalasi dan material yang digunakan. Pemasangan yang kurang baik dapat menyebabkan nilai resistansi tetap tinggi meskipun jumlah elektroda sudah diperbanyak. Dengan demikian, keberhasilan penerapan metode MDG tidak hanya terletak pada desain, tetapi juga pada kualitas instalasi di lapangan.

Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa metode MDG merupakan solusi efektif untuk memperbaiki sistem pentanahan tower transmisi, terutama di wilayah dengan resistivitas tanah tinggi. Dengan penerapan yang tepat, resistansi tanah dapat diturunkan hingga sesuai standar **IEEE Std 80-2013** maupun standar internal **PT PLN ($\leq 3 \Omega$)**. Penerapan metode ini di **UPT Surabaya pada tahun 2025** menjadi langkah inovatif yang penting sebagai rujukan teknis bagi pengembangan sistem grounding di wilayah lain.

2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur dari beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan sistem grounding dan penerapan metode pentanahan berlapis (multi electrode/MDG). Referensi diperoleh dari jurnal, artikel, dan penelitian terdahulu. Beberapa di antaranya adalah sebagai berikut:

1. Ibnu Hajar (2017) dalam jurnal berjudul “Disain Sistem Pentanahan Proteksi Petir Sistem Multiple Vertical Electrodes pada Terminal Lawe-Lawe – Pertamina DHP” menyatakan bahwa penggunaan beberapa elektroda vertikal secara paralel mampu menurunkan nilai resistansi tanah hingga di bawah 5Ω meskipun pada tanah dengan resistivitas tinggi. Hasil ini menunjukkan keefektifan metode multi electrode sebagai dasar penerapan MDG.
2. Dj. Damiri (2024) dalam penelitian “Pemodelan Sistem Pembumian Pada Gardu Induk 150 kV Tayan, Kalimantan Barat Menggunakan Grid Analysis CYMGRD” menjelaskan bahwa sistem grid grounding yang menggunakan banyak elektroda terdistribusi dapat memperbaiki penyebaran arus ke tanah dan menurunkan tegangan sentuh serta tegangan langkah. Hal ini sejalan dengan prinsip dasar MDG.
3. Hajar & D. Romadani (2023) dalam artikel “Analisa Hasil Pengukuran Tahanan Pentanahan Pada Peralatan di Switchyard Gardu Induk Angke PT. PLN (Persero) UIT – JBB Duri Kosambi” menunjukkan bahwa nilai tahanan pentanahan sangat dipengaruhi oleh kondisi sambungan dan kontaminasi tanah. Oleh karena itu, metode MDG yang menggunakan banyak jalur pentanahan dianggap lebih handal dalam menjaga keandalan sistem.
4. T.S. Adiwibowo (2018) dalam penelitian “Perancangan Proteksi Petir SUTET 500 kV: Evaluasi Lightning Performance” menegaskan bahwa performa proteksi petir sangat bergantung pada kualitas sistem grounding tower. Semakin rendah resistansi pentanahan, semakin kecil kemungkinan terjadinya back-flashover. Penelitian ini relevan untuk mendukung penerapan MDG pada tower transmisi.
5. E.Y. Purwono (2022) dalam jurnal “Evaluasi Kelayakan Instalasi Gedung TTSK 3 Lantai PT...” juga menekankan pentingnya inspeksi berkala dan peningkatan kualitas sistem pentanahan agar tetap sesuai standar IEEE dan PLN. Penelitian ini menjadi acuan dalam hal pemeliharaan grounding setelah penerapan MDG.
6. Dari tinjauan literatur tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode Multi Direct Grounding (MDG) yang melibatkan pemasangan beberapa elektroda paralel sangat efektif untuk menurunkan resistansi pentanahan dan meningkatkan keandalan

proteksi sistem transmisi. Namun, penerapan metode ini di UPT Surabaya tahun 2025 merupakan yang pertama kali dilakukan, sehingga penelitian ini diharapkan dapat memberikan data lapangan sebagai rujukan implementasi ke depan.

Tabel 2.1 Penelitian yang Relevan

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Hasil / Temuan Utama	Keterkaitan dengan MDG
1	Ibnu Hajar (2017)	Desain Sistem Pentanahan Proteksi Petir Sistem Multiple Vertical Electrodes	Beberapa elektroda paralel menurunkan resistansi $< 5 \Omega$	Dasar konsep MDG
2	Dj. Damiri (2024)	Pemodelan Sistem Pembumian pada Gardu Induk 150 kV Tayan	Grid grounding memperbaiki distribusi arus & menurunkan tegangan sentuh/langkah	Sejalan dengan prinsip MDG
3	I. Hajar & D. Romadani (2023)	Analisa Hasil Pengukuran Tahanan Pentanahan pada Switchyard GI Angke	Nilai tahanan dipengaruhi kondisi sambungan & tanah	MDG menjaga keandalan meski kondisi tanah kurang baik