

BAB II

TINJAUKAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh (Mubarok et al., 2022) memiliki hasil pengukuran yang diperoleh yaitu nilai rata-rata tahanan pentanahan gedung A sebesar 0,518, dan nilai rata-rata tahanan pentanahan gedung D sebesar 0,804. Dengan demikian, kedua bangunan tersebut telah memiliki nilai tahanan tanah sesuai (PUIL, 2011a). Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan nilai tahanan tanah sebesar 1 dengan jenis tanah rawa 10 meter, diperlukan kedalaman 12 meter.

Penelitian dilakukan (Pulungan et al., 2022) melaporkan bahwa rata-rata resistansi pentanahan pada gedung Teknik Elektro dan Elektronika mencapai 48,3 Ω . Nilai ini secara signifikan melebihi standar yang ditetapkan, yang disebabkan oleh kedalaman penanaman elektroda pentanahan yang kurang memadai. Sebagai kontras, gedung Teknik Mesin dan Teknik Otomotif menunjukkan resistansi pentanahan sebesar 2,34 Ω , sementara teknik sipil mencatat 2,52 Ω . Kedua gedung terakhir ini memenuhi kriteria resistansi pentanahan yang dipersyaratkan. Berdasarkan analisis data, disimpulkan bahwa untuk mencapai resistansi pentanahan serendah atau lebih rendah dari 1 Ω pada kondisi tanah rawa, diperlukan kedalaman penanaman elektroda sebesar 12 meter.

Penelitian yang dilakukan oleh (Andreansyah et al., 2023) bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan teknis sistem pentanahan (*grounding*) pada

instalasi listrik gedung bertingkat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *grounding* yang diterapkan adalah sistem *single grounding rod*, yaitu menggunakan satu batang elektroda. Nilai ketebalan elektroda yang digunakan adalah 1,2 mm, yang masih di bawah standar minimal (PUIL, 2011a) yang mensyaratkan minimal 2 mm. Meskipun demikian, nilai impedansi rata-rata sebesar 0,39 Ω yang diperoleh dari tiga kali pengukuran berada jauh di bawah batas maksimal (PUIL, 2011a) ($\leq 5 \Omega$), menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja protektif yang sangat baik. Selain itu, hasil uji sambungan dari lantai dasar hingga lantai tertinggi.

Penelitian yang dilakukan oleh (Agustin, 2024) membahas evaluasi kinerja sistem *grounding* pada bangunan industri modern dengan fokus pada pengukuran resistansi dan efektivitas perbaikan sistem pentanahan. Hasil awal dari pengukuran menunjukkan bahwa nilai tahanan pentanahan rata-rata berada pada angka 7,5 Ω , yang melebihi ambang batas maksimal yang ditetapkan oleh PUIL ($\leq 5 \Omega$). Kondisi ini menandakan bahwa sistem *grounding* belum layak secara operasional dan berpotensi menimbulkan risiko gangguan kelistrikan maupun keselamatan. Setelah dilakukan tindakan pemeliharaan berupa pembersihan elektroda. Hasilnya, nilai tahanan berhasil ditekan hingga rata-rata 3,35 Ω , yang berarti sudah memenuhi persyaratan PUIL 2000.

Penelitian yang dilakukan oleh (Lorinanto, 2024) bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas dua jenis sistem pentanahan yakni *Grounding Grid System* (GGS) dan *Grounding Independent System* (GIS) dalam mendukung kinerja perlindungan sistem tenaga pada instalasi tegangan tinggi. Hasil

penelitian menunjukkan bahwa *Grounding Grid System* (GGS) terbukti lebih efisien dan andal dalam mengelola arus gangguan. GGS mampu menurunkan nilai resistansi *grounding* hingga $< 1 \Omega$, sesuai dengan standar internasional (IEEE std 142_2007, 1974) IEEE Std 80-2013, hanya dengan menggunakan empat batang elektroda. Hal ini membuat sistem lebih hemat material dan biaya dalam jangka panjang, serta meningkatkan keandalan sistem dan mengurangi risiko *downtime* pada gardu induk.

Pengukuran menunjukkan bahwa tiga batang elektroda dalam sistem GIS hanya mampu mencapai resistansi rata-rata $5,4 \Omega$, sehingga tidak memenuhi standar PLN. Pengujian arus bocor dari kedua sistem berdasarkan standar IEC 60099-4:2014 memperlihatkan bahwa keduanya masih berada dalam batas aman (maksimum 1 mA).

Penelitian yang dilakukan oleh (Syahputra et al., 2025) untuk mengevaluasi kinerja sistem *grounding* berdasarkan hasil pengukuran langsung di lapangan dan perhitungan teoritis, serta membandingkannya dengan standar Puil 2011. Hasil pengukuran resistansi *grounding* di empat titik pengujian (A, B, C, dan D) dengan elektroda batang tunggal dan kedalaman antara 50 cm hingga 130 cm, menunjukkan bahwa nilai resistansi tertinggi mencapai 210Ω dan terendah 32Ω , yang secara keseluruhan tidak memenuhi standar (PUIL, 2011a) ($\leq 5 \Omega$). Sementara itu, hasil perhitungan teoritis berdasarkan rumus teknik elektro menghasilkan rentang nilai antara 57Ω hingga 24Ω , yang juga masih di luar batas yang diizinkan oleh standar nasional.

B. Landasan Teori

1. Sistem Penumbumian (*Grounding*)

Sistem penumbumian (*grounding*) listrik merupakan suatu metode instalasi yang dirancang untuk menghilangkan perbedaan potensial dengan menyalurkan muatan listrik berlebih ke tanah. Proses ini dikenal juga dengan istilah pentanahan atau pengardean dalam percakapan sehari-hari. Perbedaan potensial yang dimaksud umumnya timbul akibat kebocoran arus listrik atau lonjakan energi, terutama yang disebabkan oleh sambaran petir. Sistem pentanahan sangat krusial untuk berbagai fasilitas, mulai dari pabrik, pasar, gedung perkantoran, pusat perbelanjaan, hingga unit permukiman. Fungsinya adalah untuk menjamin keamanan dan perlindungan terhadap perangkat kelistrikan, perangkat elektronik, serta individu yang berada di dalam bangunan tersebut.

Sistem pentanahan ini berguna untuk memperoleh potensial yang merata dalam suatu bagian struktur dan peralatan serta untuk memperoleh resistansi yang rendah sebagai jalan balik arus hubung singkat ke tanah. bila arus hubung singkat ke tanah dipaksakan mengalir melalui tanah dengan tahanan yang tinggi, maka akan menimbulkan perbedaan tegangan yang besar dan berbahaya yang dimaksud beda potensial biasa berupa adanya kebocoran arus listrik dan yang utamanya adalah sambaran petir.

Cara kerja *grounding* adalah bila terjadi gangguan arus bocor maka *grounding* akan mengalirkan arus gangguan ke dalam tanah melalui batang elektroda penumbumian yang telah ditanam dalam tanah, sedangkan nilai

resistansi dari sistem pentanahan harus sesuai dengan syarat yang telah ditetapkan pesyaratan umum instalasi listrik yaitu $\leq 5 \Omega$.

Sistem *grounding* merupakan hubungan penghantar yang akan menghubungkan sistem, *body* peralatan dan instalasi dengan bumi/tanah sehingga bisa mengamankan manusia dari tersengat listrik dan melindungi bagian instalasi dari bahaya tegangan dan arus yang tidak normal, maka dari itu sistem *grounding* merupakan bagian esensial dari sistem tenaga listrik (Prih Sumardjati, 2016).

Petir adalah sebuah fenomena alam yang ditandai dengan kilatan cahaya disertai suara keras. Hal ini sering terjadi karena adanya perbedaan potensial antara dua media, misalnya antara awan dan bumi, atau antara awan itu sendiri (Gunawan & Pandiangan, 2014). Arus listrik dapat menghasilkan sambaran petir secara langsung sehingga dapat diamankan dengan mengarahkan arus petir ke tanah dan dengan cepat dapat menghilangkan arus tersebut. Sambaran petir langsung dapat mengakibatkan kerusakan pada bangunan, peralatan, hingga terdapat korban jiwa yang mengakibatkan kerugian (Budi Sulistiawati et al., 2023).

Petir adalah peristiwa pelepasan muatan listrik di udara, yang terjadi di antara awan, antara pusat muatan di dalam awan dan antara awan dan tanah. Dari ketiga kemungkinan di atas, pelepasan muatan lebih sering terjadi di antara awan dan di dalam awal daripada pelepasan muatan yang terjadi antara awan dan tanah (Saini et al., 2016).

2. Komponen dan alat Sistem *Grounding*

a. Elektroda Bumi (*Ground Electrode*)

Elektroda bumi adalah bagian konduktif yang ditanam langsung di dalam tanah untuk membuat kontak listrik yang baik dengan bumi. Fungsinya adalah untuk menyalurkan arus listrik yang tidak diinginkan (misalnya arus gangguan atau arus petir) ke dalam tanah.

1) Batang Elektroda

Elektroda batang (*grounding Rod*) adalah elektroda pentanahan yang berbentuk bulat maupun pipih dengan diameter antara 5/8– 3/4 inch yang terbuat dari logam atau tembaga dengan daya hantar yang tinggi dan mempunyai tahanan jenis (ρ) yang baik, sehingga pada saat terjadi keadaan tidak normal, sistem pentanahan mampu bekerja menghantarkan tegangan gangguan dengan cepat ke tanah. Proses pemasangannya adalah dengan menancapkan/menanam ke tanah secara vertikal dengan kedalaman antara 1,2 sampai 3 meter ke dasar tanah. Elektroda ini dapat digunakan satu elektroda maupun lebih elektroda sehingga memperoleh tahanan pentanahan yang rendah, bentuk elektroda batang seperti diperlihatkan pada Gambar 2.1



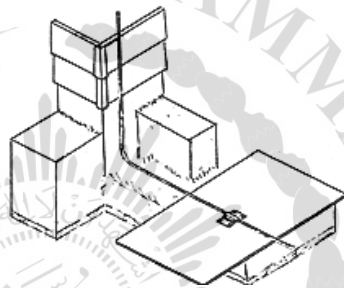
Gambar 2.1 Batang Elektroda

(Fauzi, 2021)

2) Plat Elektroda

Elektroda plat juga bagian dari elektroda pentanahan yang berbentuk persegi panjang/plat yang terbuat dari logam tembaga

dengan daya hantar tinggi dan mempunyai tahanan jenis (ρ) yang baik. Elektroda ini ditanam di dalam tanah dengan kedalaman 1–3 m seluas plat elektroda yang digunakan (Fauzi, 2021). Pada sekitar plat elektroda dibor untuk terminal yang dihubungkan dengan konduktor sebagai penghantar antara terminal peralatan dengan elektroda pentanahan, bentuk elektroda plat seperti diperlihatkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Plat Elektroda
(Fauzi, 2021)

3) Pita Elektroda

Elektroda pita merupakan jenis elektroda yang berbentuk pita dalam pemasangannya. Elektroda ini pada dasarnya elektroda konduktor logam yang terbuat dari tembaga berbentuk bulat berserat atau serabut yang biasa disebut dengan konduktor BBC, dengan ukuran umum 25–50 mm lebar dan tebal 3–6 mm, dipasang horizontal di dalam tanah pada kedalaman $\pm 0,5$ –1 meter, bentuk elektroda pita seperti diperlihatkan pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Pita Elektroda
(Fauzi, 2021)

Untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai perbedaan karakteristik dan efektivitas masing-masing jenis elektroda grounding pada panel MDP, perbandingan elektroda batang, plat, dan pita ditampilkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Elektroda *Grounding* Panel MDP

| No | Batang (ROD) | Plat | Pita |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Bentuk fisik | Silinder | Lempengan | Jalur datar |
| Cara pemasangan | vertikal | Vertikal maupun horizontal | Jalur datar |
| Luas kontak tanah | sedang | Besar | Luas (tergantung panjang pita) |
| Biaya instalasi | Rendah (Murah) | Tinggi (Mahal) | tergantung panjang pita |
| kelebihan utama | Mudah dipasang bisa disambung | Nilai tahanan kecil dan stabil | Distribusi arus merata |
| kekurangan | Kurang efektif ditanah berbatu | Butuh galian besar | Butuh area luas, rentan korosi |

b. Konduktor Bumi (*Grounding Conductor*)

Konduktor bumi adalah kabel atau kawat yang berfungsi sebagai penghubung antara instalasi listrik atau peralatan dengan elektroda bumi. Konduktor ini harus terbuat dari bahan konduktif yang baik (umumnya tembaga) dan memiliki ukuran penampang yang memadai agar mampu mengalirkan arus gangguan maksimum tanpa mengalami kerusakan atau peningkatan resistansi yang signifikan, Sesuai standar PUIL 2011/2020, IEC 62305-3 dan IEEE Std 142, konduktor bumi merupakan komponen kritis dalam sistem proteksi listrik.

1) Konduktor bumi ini akan menghubungkan:

- a) Bagian logam peralatan yang tidak bertegangan (misalnya, casing peralatan, rangka panel listrik).

- b) Titik netral trafo atau generator.
 - c) Sistem proteksi petir (penangkal petir).
- 2) Fungsi Utama Konduktor Bumi:
- a) Menyalurkan arus gangguan ke tanah
Saat terjadi gangguan hubung tanah (*ground fault*), arus akan dialirkan melalui konduktor bumi menuju elektroda.
 - b) Mengurangi tegangan sentuh dan pijak (*touch & step voltage*)
Membuat peralatan berada pada potensial rendah sehingga aman disentuh.
 - c) Menyamakan potensial antar peralatan (*equipotential bonding*)
Penting untuk mencegah beda potensial yang dapat menyebabkan sengatan listrik.
 - d) Menjamin operasi proteksi berjalan cepat
Semakin kecil impedansi *grounding conductor* + elektroda, semakin cepat MCB, MCCB, atau fuse bekerja
- 3) Jenis Konduktor Bumi
- a) *Bare Copper* (BC)
Konduktor tembaga telanjang, umum pada instalasi outdoor dan sistem industri.
Kelebihan: konduktivitas tinggi, tahan korosi, impedansi rendah.
 - b) Kabel Isolasi Hijau-Kuning (NYA/NYM/NYAF)
Digunakan di panel atau instalasi indoor dan dirancang sebagai PE (*Protective Earth*).

c) *Aluminium Conductor*

Sering digunakan pada *grounding* saluran udara tegangan menengah/tinggi.

d) *Copper Braid / Flexible Grounding*

Konduktor lentur untuk bonding pintu panel, genset, UPS, dan *enclosure*.

4) Kriteria Pemilihan Ukuran Konduktor Bumi

Kriteria Pemilihan Konduktor Bumi mengacu pada puil 2011, IEC 62305-3, dan IEEE Std 142 sebagaimana disajikan pada tabel 2.2, sedangkan untuk ukuran minimum konduktor bumi ditunjukkan pada tabel 2.3.

Tabel 2.2 Standar Konduktor Bumi Panel MDP

| Standar yang Mengatur Konduktor Bumi | |
|--------------------------------------|--|
| Standar | Keterangan |
| PUIL 2011 Bab 5.3.6 | Penampang konduktor bumi, bonding, material |
| IEC 62305-3 | Konduktor bumi pada sistem proteksi petir <i>Lightning Protection System</i> (LPS) diatur berdasarkan standar penampang minimum, tata letak jalur pemasangan, pemilihan material, serta keterhubungan yang andal dengan elektroda pbumian dan sistem bonding agar arus petir dapat dialirkan dan dilepaskan ke tanah secara aman dan efisien |
| IEEE Std 142 | <i>Grounding conductor design & sizing</i> |

Tabel 2.3 Ukuran Minimum Konduktor Bumi Panel MDP

| Ukuran Minimum Konduktor Bumi | | |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|
| No | Jenis Konduktor | Ukuran Minimum |
| 1 | Tembaga (Cu) | 16mm ² |
| 2 | Aluminium (Al) | 25mm ² |
| 3 | Baja Berlapis (Cu) | 50mm ² |

5) Penerapan Konduktor Bumi

a) MDP (*Main Distribution Panel*)

Konduktor BC 16-25mm² menuju main *earth terminal* (MET) dan sistem proteksi petir (LPS) 25-50mm².

Bentuk konduktor BC seperti diperlihatkan pada Gambar 2.4 sebagai berikut:



Gambar 2.4 Konduktor BC
(Grounding, 2011)

b) Peralatan (mesin, UPS, motor)

PE conductor NYAF 6–16 mm², bentuk PE Conductor NYAF seperti diperlihatkan pada Gambar 2.5 sebagai berikut:



Gambar 2.5 PE Conductor NYAF

c) Sistem *grounding rod*

Konduktor BC 16-50mm² menghubungkan rod ke pit.

d) Bonding pipa & struktur

Copper braid 16–25 mm², bentuk gambar *Copper Braid* seperti diperlihatkan pada gambar 2.6 sebagai berikut:



Gambar 2.6 Copper Braid

(Alco, n.d.)

6) Busbar *Grounding*

Busbar *grounding* menurut standar (PUIL, 2011a) yaitu sebuah lintasan konduktor logam yang berfungsi untuk titik pentanahan (pembumian) bersama untuk menghubungkan semua bagian logam yang terhubung pada sistem kelistrikan, bentuk gambar *grounding* busbar seperti diperlihatkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Grounding Busbar

Busbar merupakan konduktor besar, biasanya terbuat dari tembaga, yang fungsinya serupa dengan kabel yaitu menghantarkan energi listrik. Perbedaan mendasar antara busbar dan kabel terletak

pada elemen pelindungnya, atau isolasi. Busbar umumnya tidak memiliki isolasi, berbeda dengan kabel yang dilapisi isolator. Namun, busbar lebih dipilih untuk pemasangan di dalam panel karena kesulitan dalam instalasi kabel yang rumit di ruang terbatas. Penggunaan busbar secara eksklusif terbatas pada lingkungan internal panel. Hal ini dikarenakan ketiadaan isolasi pada busbar, sehingga kontak langsung dengan komponen bertegangan dapat berakibat fatal. Untuk aplikasi di luar panel, seperti area terbuka atau area yang terekspos, digunakan busbar terisolasi, yang secara fungsional identik dengan kabel (Situmeang, 2023).

c. Tanah (*Earth*)

Meskipun bukan "komponen" dalam arti fisik yang dipasang, tanah adalah bagian yang sangat fundamental dari sistem *grounding*. Efektivitas seluruh sistem *grounding* sangat bergantung pada karakteristik tanah di lokasi pemasangan.

Faktor-faktor yang memengaruhi kinerja tanah dalam *grounding*:

1) Resistivitas Tanah

kemampuan tanah untuk menghantarkan arus listrik. Semakin rendah resistivitasnya, semakin baik tanah dalam menyalurkan arus. Resistivitas tanah sangat bervariasi tergantung pada jenis tanah (misalnya, tanah liat, pasir, bebatuan), kadar air, suhu, dan kandungan mineral.

2) Kelembaban Tanah

Tanah yang lembab memiliki resistivitas yang lebih rendah dibandingkan tanah kering.

3) Kandungan Garam/Mineral

Tanah dengan kandungan garam atau mineral yang tinggi cenderung memiliki resistivitas yang lebih rendah.

d. Tahanan Jenis Tanah

Resistivitas tanah merupakan faktor fundamental yang memengaruhi resistansi elektroda dan kedalaman penanaman pasak yang diperlukan untuk mencapai resistansi yang rendah. Elektroda baja berfungsi sebagai konduktor untuk saluran distribusi dan sistem pentanahan gardu induk. Dalam proses pemilihan konduktor, pertimbangan berikut dapat diambil:

- 1) Untuk kondisi tanah dengan tingkat korosivitas sangat rendah dan resistivitas di atas 100 ohm-m, tidak ada batasan korosi yang diizinkan atau penambahan ketebalan material (*corosi allowance*).
- 2) Untuk kondisi tanah dengan tingkat korosivitas lambat dan resistivitas antara 25-100 ohm-m, batasan korosi yang diizinkan adalah 15%, dengan pemilihan konduktor yang telah memperhitungkan faktor stabilitas termal.
- 3) Untuk kondisi tanah dengan tingkat korosivitas cepat dan resistivitas di bawah 25 ohm-m. Batasan korosi yang diizinkan adalah 30%,

dengan pemilihan konduktor yang telah memperhitungkan faktor stabilitas termal.

- 4) Penghantar dipilih dari ukuran standar berkisar antara 10 x 6 mm hingga 65x78 mm.

Tanah berfungsi sebagai medium pembumian dan berperan sebagai konduktor. Terhadap frekuensi tinggi dan gelombang dengan kemiringan curam, seperti sambaran petir, tanah dapat diasumsikan sebagai konduktor sempurna dengan karakteristik pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Resistansi Jenis Tanah

| No | Jenis Tanah | Resistansi ($\Omega \cdot m$) |
|----|-------------|---------------------------------|
| 1 | Organik | 1-10 |
| 2 | Ladang | 11-100 |
| 3 | Kering | 101-1000 |
| 4 | Berbatu | 1001-10000 |

Dari Tabel 2.4 Resistansi Jenis Tanah, dapat diamati bahwa nilai resistivitas tanah menunjukkan variasi spasial yang dipengaruhi oleh karakteristik spesifik lokasi. Secara umum, tanah dengan tingkat kelembapan yang tinggi cenderung memiliki resistansi yang lebih rendah dibandingkan dengan tanah yang mengandung kadar air minimal. Oleh karena itu, untuk konstruksi bangunan di atas tanah yang cenderung kering, disarankan penggunaan elektroda ganda atau lebih untuk mencapai nilai resistansi tanah yang optimal.

Untuk sistem pentanahan tipe batang (*rod*), terdapat korelasi terbalik antara kedalaman penanaman batang pentanahan dan nilai resistansi tanah; semakin dalam batang ditanam, semakin rendah nilai

resistansinya. Dengan demikian, penurunan nilai resistansi pentanahan menunjukkan peningkatan kualitas pentanahan. Tabel berikut menyajikan pedoman umum mengenai resistivitas tanah di wilayah Indonesia pada tabel 2.5.

Table 2.5 Tahanan Berdasarkan Jenis Tanah

| Jenis Tanah | Resistansi Jenis Tanah $\Omega \cdot m$ |
|-----------------------------|--|
| Tanah Rawah/Basah | 30 |
| Tanah Liat dan Tanah Ladang | 100 |
| Pasir Basah | 200 |
| Krikil Basah | 500 |
| Pasir/Krikil Kering | 1.000 |
| Tanah Berbatu | 3.000 |
| Air Laut dan Air Tawar | 10 sd 100 |

Pada Tabel 2.5 di atas menyajikan klasifikasi tanah berdasarkan nilai tahanan spesifiknya yang sangat rendah, dikategorikan menurut jenis tanah yang umum ditemukan di Indonesia. Resistivitas tanah memiliki pengaruh signifikan terhadap resistansi sistem pentanahan yang dibentuk oleh elektroda-elektroda pentanahan.

Tanah yang mengandung air asin diketahui menghasilkan tahanan yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan jenis tanah lainnya. Hal ini disebabkan oleh tingginya konsentrasi zat adiktif dalam tanah berkadar air asin, yang berkontribusi pada penurunan tahanan tanah untuk suatu sistem *grounding*. Satuan pengukuran resistivitas tanah adalah Ω -meter. Sesuai dengan Puil 2011, nilai resistivitas tanah bervariasi secara substansial tergantung pada jenis tanah tersebut.

Untuk menentukan nilai tahanan pentanahan dari suatu sistem *grounding*, digunakan rumus perhitungan tahanan pentanahan untuk elektroda batang tunggal, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan 2.1:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\log \frac{4L}{d} - 1 \right) \dots\dots\dots 2.1$$

Keterangan:

R= Tahanan pentanahan untuk batang tunggal (Ohm)

ρ (rho) = Tahanan jenis tanah (Ohm-meter)

L= Panjang elektroda (meter)

d = Diameter elektroda (meter)

log = logaritma natural

Persamaan yang tertera pada Persamaan 2.1 adalah formula yang digunakan untuk menentukan nilai resistansi pentanahan. Perhitungan ini didasarkan pada pengukuran resistivitas tanah yang sesuai dengan karakteristik pada Tabel 2.5, serta mempertimbangkan dimensi dari elektroda yang ditanam, yaitu panjang dan diameternya..

Untuk menentukan nilai tahanan total sistem pentanahan dengan menggunakan lebih dari satu batang elektroda (*multi rod*), digunakan pendekatan analitis yang mempertimbangkan efek saling mempengaruhi antar batang elektroda. Rumus *multi rod* berikut digunakan untuk menghitung nilai tahanan total (R_{total}) berdasarkan tahanan satu batang elektroda (R_{single}), jumlah batang elektroda (n), dan faktor koreksi interaksi antar batang (η) (Yulianto, 2024):

$$R_n = \frac{\eta R}{n} \Omega \dots\dots\dots 2.2$$

Keterangan:

R_n : penahan pentanahan total sistem beberapa batang (ohm).

R : tahanan pentanahan satu batang elektroda (ohm).

n : jumlah elektroda/batang pentanahan yang dipasang paralel.

η (*eta*): batang koefisien kombinasi, menunjukkan seberapa efektif beberapa batang elektroda bekerja bersama.

Untuk mengevaluasi performa dan menentukan tingkat keberhasilan sistem *grounding* yang telah terpasang, dilakukan analisis efektivitas kinerja dengan mengacu pada nilai faktor koreksi (η) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.6. Faktor ini digunakan untuk menilai pengaruh jarak antar elektroda terhadap peningkatan kinerja sistem pembedahan, di mana semakin besar nilai η menunjukkan efektivitas sistem *grounding* yang semakin baik.

Tabel 2.6 Efektivitas Kinerja Jumlah Elektroda Berdasarkan Nilai η

| Jarak | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------|------|------|------|------|------|-----|
| η | 1,35 | 1,20 | 1,15 | 1,10 | 1,05 | 1,0 |

Untuk mengevaluasi performa dan menentukan tingkat keberhasilan sistem *grounding* yang telah terpasang, dilakukan analisis efektivitas kinerja. Analisis ini membandingkan antara nilai tahanan pembedahan yang didapatkan dari hasil pengukuran di lapangan (R_{empiris}) dengan nilai tahanan yang diperoleh dari perhitungan secara matematis (R_{teoritis}). Persentase

efektivitas dari perbandingan kedua nilai tersebut dapat dihitung menggunakan rumus 2.3 berikut:

$$\text{Efektivitas perbandingan (\%)} = \left(\frac{R_{\text{teoritis}} - R_{\text{empiris}}}{R_{\text{teoritis}}} \right) \times 100 \dots \dots \dots 2.3$$

Keterangan:

R_{empiris} = nilai resistansi pembumian hasil pengukuran lapangan (Ω)

R_{teoritis} = nilai resistansi pembumian hasil perhitungan teoritis (Ω)

e. Alat pengukuran sistem *grounding*

1) *Earth Tester*

Earth tester merupakan instrumen yang dirancang untuk mengukur resistansi sistem pembumian. Penting untuk menentukan nilai resistansi tanah sebelum melakukan proses pembumian dalam rangka pengamanan instalasi listrik. Terdapat dua jenis *earth tester*, yakni versi analog dan digital. Versi digital merupakan pengembangan terkini yang menawarkan kemudahan serta akurasi yang lebih tinggi dalam memperoleh hasil pengukuran yang praktis.

Instrumen ini dilengkapi dengan tombol *selector* pengukuran yang diawali dengan fungsi *earth voltage*. Fungsi ini berguna untuk memverifikasi kesiapan alat dan mendeteksi adanya arus sisa atau tegangan yang ada di dalam tanah. Terdapat pula pilihan skala pengukuran sebesar 20 Ω , 200 Ω , dan 2000 Ω pada tombol *selector*. Pilihan ini memungkinkan pengguna untuk mengamati hasil pengukuran resistansi tanah pada skala yang diinginkan, guna mendapatkan observasi yang lebih terperinci dan akurat, bentuk

Earth Tester seperti diperlihatkan pada gambar 2.8 dan Spesifikasinya terdapat pada tabel 2.7



Gambar 2.8 Earth Tester

Tabel 2.7 Spesifikasi Alat Earth Tester Kyoritsu 4105A

| No | Kategori | Spesifikasi |
|----|--------------------------|---|
| 1 | Rentang Pengukuran | Resistansi Bumi: 0 – 2000Ω Tegangan Bumi [50,60Hz]: 0 – 200V AC |
| 2 | Akurasi | Resistansi Bumi: $\pm 2\% \text{rdg} 0,1\Omega (20\Omega) / \pm 2\% \text{rdg} \pm 3 \text{dgt} (200/2000\Omega)$ Tegangan Bumi: $\pm 1\% \text{rdg} \pm 4 \text{dgt}$ |
| 3 | Perlindungan Beban Lebih | Resistansi Bumi: 280V AC selama 10 detik, Tegangan Bumi: 300V AC selama 1 menit |
| 4 | Standar Yang Berlaku | IEC 60529 IP54 |
| 5 | Standar Keselamatan | IEC 61010-1 CAT III 300V Tingkat Polusi 2, IEC 61557 IEC 60529 IP54 |
| 6 | Sumber Tegangan | R6 (AA) (1,5V) × 6 |
| 7 | Dimensi | 105(P) × 158(L) × 70(D)mm |
| 8 | Berat | Sekitar 550g. |
| 9 | Aksesoris pilihan | 7100A (Set kabel pengukuran presisi) |

2) Elektroda Bantu

Elektroda bantu digunakan untuk membantu. Kedua elektroda bantu ditanam dengan jarak 5 hingga 10 meter satu sama lain, untuk mendapatkan hasil pengukuran yang akurat. Kedua elektroda ini dihubungkan dengan kabel merah sebagai elektroda arus dan kabel kuning sebagai elektroda potensial, bentuk Elektroda bantu seperti diperlihatkan pada Gambar 2.9



Gambar 2.9 Elektroda Bantu

3) Kabel Pengukuran

Kabel yang digunakan pada proses pengukuran berperan sebagai penghubung antara *Earth Tester* dan elektroda bantu yang ditanam di tanah. Kabel yang terhubung langsung ke sistem *grounding* kemudian disambungkan ke *Earth Tester* merupakan kabel berwarna hijau, yang umum dikenal sebagai kabel pembumian (*earthing*), seperti diperlihatkan pada 2.10. beserta fungsinya.



Gambar 2.10 Kabel Pengukuran

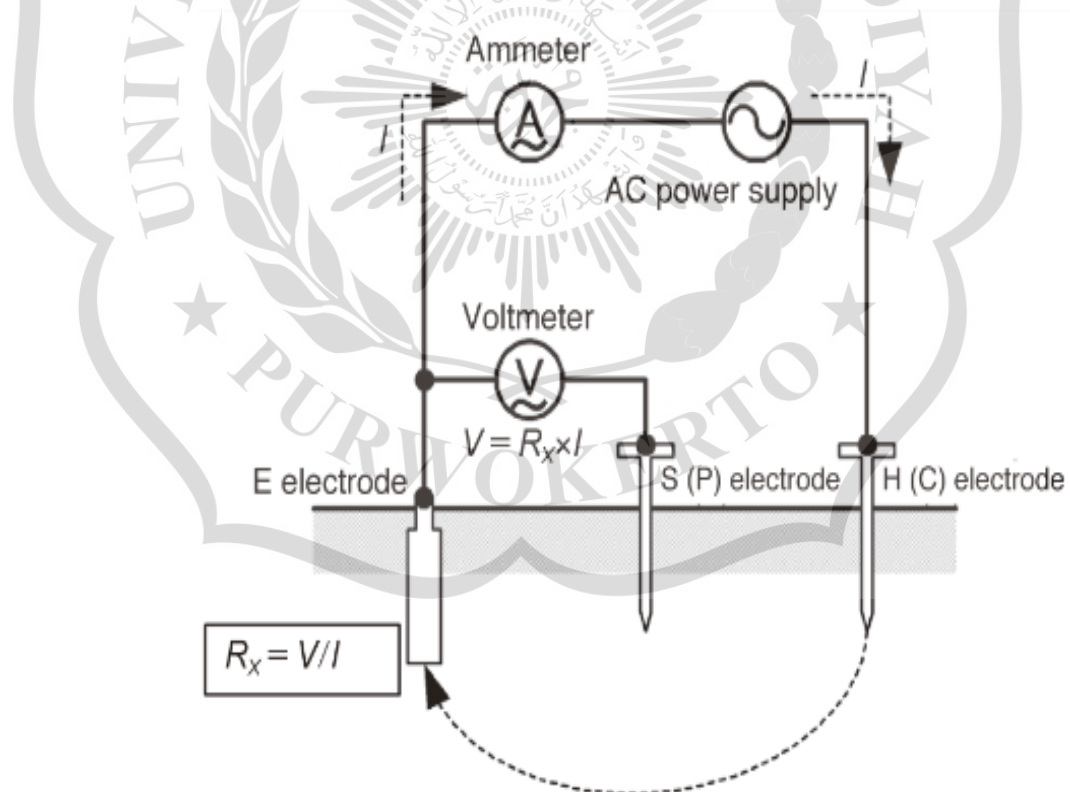
Kabel hijau pada Gambar 2.10 berfungsi sebagai penghantar utama yang terhubung langsung ke elektroda tanah dan dikoneksikan ke terminal *earthing* pada *Earth Tester*. Kabel kuning berfungsi sebagai penghubung ke elektroda potensial (elektroda tegangan) yang ditempatkan pada terminal kuning, kemudian disambungkan ke elektroda bantu yang ditanam di tanah pada jarak 62% antara elektroda E dan C. Sementara itu, kabel merah berperan sebagai penghantar menuju elektroda arus (*current electrode*) yang terhubung ke terminal merah pada *Earth Tester* dan disambungkan ke elektroda bantu di dalam tanah..

3. Pengukuran Resistansi Pembumian

Pengukuran resistansi pembumian adalah langkah krusial untuk memastikan bahwa sistem *grounding* berfungsi dengan baik dan memenuhi standar keamanan yang ditetapkan. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk mendapatkan nilai resistansi antara elektroda bumi yang terpasang dengan bumi secara keseluruhan, Metode yang paling umum dan direkomendasikan untuk mengukur resistansi pembumian adalah Metode Jatuh Potensial (*Fall of Potential Method*), sering juga disebut metode tiga titik, antara lain sebagai berikut.

a. Prinsip Dasar Metode Jatuh Potensial

Metode jatuh potensial (*fall of potential method*) adalah teknik pengukuran tahanan pentanahan yang memanfaatkan penurunan tegangan tanah akibat aliran arus listrik. Pengukuran dilakukan dengan menginjeksikan arus ke elektroda bantu dan mengukur beda potensial pada jarak tertentu, kemudian nilai tahanan ditentukan berdasarkan perbandingan tegangan dan arus sesuai hukum Ohm. Metode ini umum digunakan karena akurasinya tinggi dalam menilai kinerja sistem grounding pada bangunan dan instalasi listrik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.11..



Gambar 2.11 Prinsip Dasar Metode Jatuh Potensial

(Azizy, 2020)

$$R = \frac{V}{I}$$

Keterangan:

R = resistansi pembumian yang diukur (dalam Ohm, Ω).

V = tegangan yang terukur antara elektroda bumi uji (E) dan elektroda potensial (P) (dalam Volt, V).

I = arus yang diinjeksikan oleh earth tester antara elektroda bumi uji (E) dan elektroda arus (C) (dalam Ampere, A).

b. Prosedur Pengukuran:

1) Injeksi Arus (I)

Alat *earth tester* menginjeksikan arus bolak-balik (AC) dengan frekuensi tertentu ke dalam tanah. Arus ini mengalir dari terminal arus (C) alat, melewati elektroda arus (C), menembus tanah, melalui elektroda bumi yang diuji (E), dan kembali ke alat.

2) Pengukuran Tegangan (V)

Pada tahap bersamaan, *earth tester* akan mengukur perbedaan potensial antara elektroda pembumian yang diuji (E) dan elektroda potensial (P). Elektroda P ditempatkan di luar zona pengaruh resistansi elektroda E dan elektroda arus (C) agar hasil pengukuran merepresentasikan potensial bumi yang sebenarnya..

3) Perhitungan Otomatis

Earth tester modern secara otomatis melakukan perhitungan berdasarkan nilai arus yang diinjeksikan dan tegangan yang terukur, dan menampilkan hasilnya sebagai nilai resistansi pembumian.

c. Penentuan Jarak Elektroda (Penting untuk Akurasi)

Jarak antara Elektroda E, P, dan C sangat krusial untuk mendapatkan hasil yang valid.

1) Jarak Optimal

Jarak yang direkomendasikan adalah menempatkan Elektroda P pada jarak sekitar 62% dari total jarak antara E dan C. Misalnya, jika jarak E-C adalah 40 meter, maka P harus diletakkan sekitar 25 meter dari E.

Untuk memastikan akurasi, sering kali dilakukan beberapa pengukuran dengan menggeser posisi Elektroda P sedikit demi sedikit. Hasil pengukuran kemudian diplot dalam grafik resistansi terhadap jarak P dari E. Jika kurva resistansi menunjukkan bagian yang datar (*plateau*), maka nilai resistansi pada bagian datar tersebut adalah nilai resistansi pembumian yang akurat. Jika tidak ada bagian datar, berarti jarak C mungkin belum cukup jauh, atau ada gangguan lain.

d. Faktor yang Memengaruhi Akurasi Pengukuran

1) Kondisi Tanah

Tanah yang terlalu kering atau terlalu basah dapat memengaruhi hasil. Idealnya, pengukuran dilakukan saat kondisi tanah cukup lembab.

2) Interferensi Listrik

Adanya arus liar atau medan listrik dari instalasi lain di sekitar lokasi pengukuran dapat mengganggu akurasi. Beberapa *Earth Tester* modern memiliki fitur untuk meminimalkan efek ini.

3) Kualitas Sambungan

Pastikan semua sambungan kabel ke elektroda dan ke alat pengukur bersih dan kencang.

4) Kalibrasi Alat

Pastikan *Earth Tester* yang digunakan sudah terkalibrasi dengan baik.

4. Sistem *Grounding* petir (*lightning grounding system*)

Sistem *grounding* petir merupakan sub sistem krusial dalam *Lightning Protection System* (LPS) yang berfungsi memastikan arus sambaran petir dialirkan secara terkendali ke dalam tanah sehingga tidak menimbulkan tegangan lebih yang dapat merusak struktur bangunan, peralatan listrik, maupun membahayakan keselamatan manusia. Sistem ini umumnya terdiri atas elektroda tanah, baik berupa batang, pelat, maupun *grid* yang ditanam pada kedalaman tertentu sesuai persyaratan standar seperti IEC 62305, dengan material konduktivitas korosi tinggi seperti tembaga atau baja berlapis tembaga. Jalur konduksi dari *down conductor* menuju elektroda harus memiliki impedansi serendah mungkin untuk meminimalkan risiko loncatan listrik (*flashover*) saat terjadi aliran arus petir. Dalam perancangannya, aspek-aspek teknis seperti karakteristik tanah, nilai resistivitas, konfigurasi dan jarak antar elektroda pada sistem *multi rod*, serta kebutuhan pengikatan (*bonding*) dengan sistem pentanahan lain di bangunan harus diperhitungkan guna menghindari perbedaan potensial berbahaya. Secara keseluruhan, kualitas sistem *grounding* sangat

menentukan efektivitas LPS dalam memberikan perlindungan terhadap bahaya sambaran petir, sehingga implementasinya harus dilakukan sesuai ketentuan standar dan prinsip keselamatan tenaga kelistrikan. Sistem ini merupakan bagian dari *Lightning Protection System (LPS)*, beserta:

a. Air Terminal (penangkal petir/finial/kepala ESE)

Air terminal merupakan elemen penangkap pada sistem proteksi petir yang dipasang pada titik tertinggi bangunan dan berfungsi sebagai media awal penerimaan sambaran petir, baik berupa batang penangkal, finial, maupun kepala penangkal petir tipe *Early Streamer Emission (ESE)*

b. kabel penghantar arus petir (*Down Conductor*)

Down Conductor berperan sebagai jalur penghantar yang menyalurkan arus petir dari air terminal menuju sistem pentanahan secara aman, sehingga diperlukan konduktor impedansi rendah serta rute pemasangan yang meminimalkan kemungkinan terjadinya percikan atau loncatan listrik.

c. Sistem Pentanahan (*Grounding*)

Sistem Pentanahan berfungsi sebagai sistem pembuangan akhir arus petir ke dalam tanah melalui elektroda pentanahan yang dirancang untuk memiliki resistansi rendah, sehingga energi petir dapat disebarkan secara efektif tanpa menimbulkan tegangan lebih yang berbahaya bagi struktur maupun instalasi listrik bangunan.

1) Fungsi *Grounding* Petir

- a) Menyalurkan arus petir (ratusan kilo ampere) langsung ke tanah
- b) Menjaga agar tidak terjadi loncatan tegangan (*flasover*)

- c) Melindungi instalasi listrik, peralatan elektronik, dan manusia.
- d) Menstabilkan tegangan sistem listrik terhadap bumi.

d. Penangkal Petir elektrostatis / *Early Streamer Emissio (ESE)*

Penangkal petir elektrostatis atau *Early Streamer Emission (ESE)* berfungsi mempercepat pembentukan *streamer* awal sebelum terjadi sambaran balik (*return stroke*). Perangkat ini mengandung sistem elektronik atau mekanis yang meningkatkan potensi ionisasi udara, sehingga dapat menarik sambaran dari jarak lebih jauh daripada terminal konvensional. ESE biasanya dirancang berdasarkan parameter teknis seperti:

1) Radius Proteksi (R_p)

Jarak maksimum area yang di lindungi oleh satu terminal udara ESE, di hitung berdasarkan nilai ΔT , ketinggian terminal, dan tingkat proteksi yang di inginkan.

2) Tingkat Proteksi (*Protection Level*)

Tingkat proteksi di klasifikasikan ke dalam level I, II, III atau IV sesuai standar (misalnya IEC 62305, mencerminkan probabilitas keberhasilan penangkapan sambaran petir.

3) Ketinggian Pemasangan Terminal Udara (h)

Selisih ketinggian antara ujung *ESE* dan objek yang dilindungi, yang berpengaruh langsung terhadap luas area proteksi.

4) Kondisi *Lingkungan* dan Topografi

Resistivitas tanah, ketinggian bangunan, dan tingkat aktivitas petir memengaruhi desain serta efektivitas sistem ESE, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. penangkal petir kurz 120M

Prinsip kerja penangkal petir elektrostatik (*Early Streamer Emission/ESE*) didasarkan pada kemampuan terminal menghasilkan *streamer* awal lebih cepat dibandingkan penangkal petir konvensional, sehingga peluang intersepsi sambaran petir meningkat sebelum mencapai struktur yang dilindungi. Saat medan listrik atmosfer meningkat, kepala ESE memperkuat medan tersebut melalui proses ionisasi yang membentuk jalur utama bagi *leader* petir untuk terhubung ke terminal. Sambaran petir kemudian dialirkan secara aman melalui konduktor turun menuju sistem pembumian. Mekanisme ini memungkinkan terbentuknya area perlindungan yang lebih luas dan meningkatkan efektivitas perlindungan bangunan atau infrastruktur di dalam zona proteksi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Radius Penangkal Petir Kurz 120m

Untuk menentukan batas cakupan perlindungan secara horizontal pada sistem penangkal petir, diperlukan pendekatan geometris yang menggambarkan hubungan antara tinggi batang penangkal dan radius bola proteksi. Menggunakan pendekatan dengan metode bola bergulir (*Rolling Sphere Method*), jangkauan perlindungan dapat dihitung melalui formulasi matematis yang menghubungkan radius bola dengan selisih ketinggian titik yang dianalisis. Oleh karena itu, digunakan persamaan berikut untuk memperoleh nilai radius perlindungan pada ketinggian tertentu seperti persamaan 2.4 dan menggunakan level proteksi sesuai pada tabel 2.8.

$$R_p = \sqrt{2rh - h^2} \dots\dots\dots 2.4$$

Keterangan:

R_p = radius proteksi (m)

h = tinggi ujung penangkal dari permukaan yang dilindungi (m)

r = Jari-jari bola bergulir (*rolling sphere radius*) sesuai level

Dalam menentukan nilai jari-jari bola bergulir (r) pada perhitungan radius proteksi, digunakan level proteksi sistem penangkal petir yang mengacu pada standar terkait, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.8.”

Tabel 2.8 Level Proteksi

| Level Proteksi | R |
|----------------|----|
| I. | 20 |
| II. | 30 |
| III. | 45 |
| IV. | 60 |

5. Standar Nilai *Grounding* Berdasarkan Regulasi Dan Panduan
- a. Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011:

Standar *grounding* diatur dalam beberapa regulasi dan peraturan teknis. Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL) menjadi acuan utama untuk instalasi listrik di Indonesia, termasuk sistem *grounding* Menurut (PUIL, 2011a), nilai resistansi pembumian maksimum yang direkomendasikan adalah:

- 1) Bangunan perumahan: ≤ 5 ohm
- 2) Bangunan komersial: ≤ 2 ohm
- 3) Sedangkan untuk instalasi khusus (rumah sakit, pusat data, dan penangkal): ≤ 1 ohm.

- b. Standar IEC 62305 (*International Electrotechnical Commission*):

Berdasarkan IEC 62305, nilai resistansi *grounding* yang direkomendasikan adalah di bawah 10 ohm, dengan penerapan *equipotential bonding* untuk memastikan semua bagian terhubung dengan baik.



c. Standar Lainnya:

Beberapa standar internasional, seperti (IEEE std 142, 2007) merekomendasikan nilai resistansi tanah $<5\text{ohm}$ untuk memastikan distribusi arus listrik yang efektif ke dalam tanah.