Kinerja Sistem Pembumian Tower Telekomunikasi di Manokwari Berdasarkan Resistansi Pembumian dan Resistivitas Tanah

(Grounding System Performance of a Telecommunication Tower in Manokwari Based on Earth Resistance and Soil Resistivity)

Syamsul Andi Kariun[1], Yulianus Rombe Pasalli[2], Fervin Mayos Likumahwa[3]
[1,2,3]Program Studi S1 Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Papua, Manokwari, Papua Barat, Indonesia
[1]Syamsulandi40@gmail.com, [2]y.pasalli@unipa.ac.id, [3]f.likumahwa@unipa.ac.id

Info Artikel

Riwayat Artikel:

Diterima 29 Oktober 2026
Direvisi 30 Oktober 2026
Disetujui 31 Oktober 2026

Key Words:

Earth resistance
Fall of Potential
Wenner four-point
Two-layer soil model
Telecommunication tower

Kata Kunci:

Resistansi pembumian
Fall of Potential
Wenner Four Point
Model tanah dua lapisan
Tower telekomunikasi

ABSTRACT

Grounding systems on telecommunication towers discharge fault and lightning currents safely to earth and protect sensitive equipment. This study evaluated the grounding system of a tower owned by PT. Dayamitra Telekomunikasi in Amban, Manokwari, West Papua. Earth resistance was measured using the Fall of Potential method with a 20 m distance between the tested electrode and the current electrode, and the potential electrode was placed at 52% (10.4 m), 62% (12.4 m), and 72% (14.4 m) following IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Std 81-2012. Soil resistivity was measured using the Wenner four-point method at electrode spacings of 2 m and 3.1 m along five spans and interpreted with a two-layer soil model. The earth resistance at the 62% reference point was 19.62 Ω in the first measurement and 15.98 Ω in the second, so the system met neither the 5 Ω limit nor the stricter criterion of less than 1 Ω. Soil resistivity ranged from 17.2 to 91.8 Ωm, indicating non-homogeneous soil, and the reflection factor was −0.100. Improvements, such as adding parallel ground rods, are required to lower the resistance and improve the reliability of lightning protection.

ABSTRAK

Sistem pembumian pada tower telekomunikasi berfungsi mengalirkan arus gangguan dan sambaran petir ke bumi secara aman serta melindungi peralatan yang sensitif. Penelitian ini mengevaluasi sistem pembumian pada tower milik PT. Dayamitra Telekomunikasi di Amban, Manokwari, Papua Barat. Resistansi pembumian diukur dengan metode *Fall of Potential* pada jarak elektroda uji dan elektroda arus 20 m, dengan elektroda potensial pada 52% (10,4 m), 62% (12,4 m), dan 72% (14,4 m) sesuai IEEE Std 81-2012. Resistivitas tanah diukur dengan metode *Wenner Four Point* pada jarak pasak 2 m dan 3,1 m di lima bentangan, kemudian dianalisis dengan model tanah dua lapisan. Resistansi pembumian pada titik referensi 62% sebesar 19,62 Ω pada pengukuran pertama dan 15,98 Ω pada pengukuran kedua, sehingga belum memenuhi batas 5 Ω maupun kriteria yang lebih ketat, yaitu kurang dari 1 Ω. Resistivitas tanah berkisar antara 17,2 Ωm dan 91,8 Ωm yang menunjukkan tanah tidak homogen, dengan faktor refleksi sebesar −0,100. Perbaikan, misalnya penambahan elektroda batang secara paralel, diperlukan untuk menurunkan resistansi dan meningkatkan keandalan proteksi petir.

Koresponden:

Fervin Mayos Likumahwa
Program Studi S1 Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Papua
Amban, Manokwari, Papua Barat, Indonesia
Email: f.likumahwa@unipa.ac.id

1. PENDAHULUAN

Menara *Base Transceiver Station* (BTS) merupakan infrastruktur utama sistem telekomunikasi seluler yang berfungsi sebagai media transmisi sinyal komunikasi, sehingga operasionalnya sangat bergantung pada sistem kelistrikan yang stabil dan terlindungi dari gangguan. Sambaran petir dan tegangan lebih (*overvoltage*) dapat merusak peralatan telekomunikasi yang peka terhadap lonjakan tegangan dan menimbulkan kerugian yang besar akibat terputusnya layanan [1]. Karena itu, diperlukan sistem proteksi yang mampu mengalirkan arus gangguan dan arus petir secara aman ke tanah [1], [2].

Sistem pembumian berfungsi sebagai jalur pelepasan arus gangguan menuju bumi sehingga dapat mengurangi risiko kerusakan peralatan, menjaga keselamatan manusia di sekitar instalasi, dan meningkatkan keandalan sistem kelistrikan [2], [3]. Ketika arus gangguan mengalir ke tanah, tahanan tanah menimbulkan perbedaan tegangan pada permukaan tanah, sehingga resistansi pembumian yang tinggi meningkatkan potensi bahaya bagi manusia dan peralatan [1]. Evaluasi sistem pembumian pada BTS karenanya penting untuk memastikan kelayakannya terhadap standar yang berlaku [4].

Evaluasi sistem pembumian memerlukan dua jenis pengukuran, yaitu resistansi pembumian dan resistivitas tanah. Resistansi pembumian umumnya diukur dengan metode *Fall of Potential* (FoP) tiga elektroda sebagaimana diatur dalam IEEE Std 81-2012 [5], [6]. Resistivitas tanah diukur dengan metode *Wenner Four Point* yang memakai empat elektroda segaris [5], [7]. Karena tanah pada umumnya tidak homogen meskipun sering diasumsikan homogen untuk menyederhanakan analisis [8], data resistivitas dapat diinterpretasikan dengan model *Two Layer Soil* yang lebih mendekati kondisi sebenarnya [9], [10].

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji aspek ini. Boonram dkk. mengukur resistansi pembumian dengan metode FoP dan Wenner pada berbagai konfigurasi elektroda dan menunjukkan bahwa penambahan elektroda menurunkan resistansi total secara tidak linear akibat kopling antar elektroda [7]. Hücker dan Sinai mengkaji secara eksperimental berbagai metode pengukuran resistansi pembumian pada menara saluran udara [11], sedangkan Dan dkk. menganalisis kinerja elektroda pembumian menara pada medan yang berbukit [12]. Pada instalasi gedung, Seftiani dan Novizon melaporkan bahwa pemasangan elektroda paralel menurunkan resistansi lebih signifikan dibandingkan penambahan kedalaman saja [2], dan Andreansyah dkk. menilai kelayakan pembumian elektroda batang tunggal dengan metode tiga titik [13]. Pada BTS, Triyanto dkk. mengukur resistansi pembumian dengan metode *soil test* menggunakan kabel BC (*Bare Copper*) spiral dan memperoleh nilai di bawah 1 Ω [4], Umar dkk. menurunkan resistansi kaki tower dari 3,87 Ω menjadi 1,24 Ω melalui perbaikan sistem pentanahan [1], dan Fauzi dkk. menganalisis proteksi petir dan luas area terproteksi pada BTS [14].

Penelitian-penelitian tersebut umumnya berfokus pada pengukuran resistansi pembumian, sedangkan karakteristik resistivitas tanah di lokasi tower dan model tanah dua lapisan jarang dikaji bersamaan. Sepengetahuan penulis, kajian yang memadukan ketiganya pada tower telekomunikasi di Papua Barat masih sangat terbatas.

Penelitian ini dilakukan pada tower milik PT. Dayamitra Telekomunikasi di kawasan Amban, Manokwari, dengan luas area pembumian 9,5 m × 9,5 m. Observasi awal menemukan ketidakstabilan sistem pembumian yang berpotensi memengaruhi jaringan komunikasi dan keselamatan perangkat, sementara kondisi geografis Amban yang beragam dapat menimbulkan variasi resistansi yang signifikan. Tujuan penelitian ini adalah (i) menentukan nilai resistansi pembumian dengan metode *Fall of Potential*, (ii) menganalisis karakteristik resistivitas tanah dengan metode *Wenner Four Point*, dan (iii) mengevaluasi sistem pembumian berdasarkan kedua hasil tersebut dengan mengacu pada IEEE Std 81-2012. Nilai baru penelitian ini adalah pengintegrasian pengukuran resistansi, pengukuran resistivitas, dan analisis *Two Layer Soil* pada tower telekomunikasi di Papua Barat. Evaluasi dilakukan tanpa merancang atau memodifikasi sistem pembumian yang telah terpasang.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Sistem dan Resistansi Pembumian

Sistem pembumian adalah sistem pengaman instalasi listrik yang menghubungkan bagian peralatan dan instalasi dengan bumi melalui elektroda, sehingga manusia terhindar dari sengatan listrik dan komponen instalasi terlindung dari tegangan atau arus abnormal [3], [15]. Tujuan utamanya adalah menyediakan jalur aman bagi arus gangguan dan arus sambaran petir. Pada tower BTS, perangkat pemancar dan penerima sangat peka terhadap lonjakan tegangan sehingga sistem pembumian yang baik mutlak diperlukan [1].

Kinerja pembumian dinyatakan oleh resistansi pembumian. Semakin rendah nilainya, semakin besar kemampuan sistem mengalirkan arus ke dalam tanah [3]. Nilai tersebut dipengaruhi oleh kedalaman elektroda, diameter elektroda, jenis tanah, dan jumlah elektroda [3]. Penambahan kedalaman dan pemasangan elektroda secara paralel menurunkan resistansi, dengan metode paralel memberikan penurunan yang lebih besar [2]. Efektivitas penambahan elektroda bersifat tidak linear karena adanya kopling antar elektroda yang berdekatan [7], sehingga jarak antar elektroda perlu diperhatikan.

2.2. Resistivitas Tanah dan Metode Wenner

Resistivitas tanah berbeda pada setiap lokasi bergantung pada jenis tanah dan kondisinya. Tabel 1 menyajikan nilai resistivitas beberapa jenis tanah berdasarkan PUIL 2011 sebagaimana dikutip pada [3].

Tabel 1. Resistivitas Jenis Tanah

No	Jenis tanah	Resistivitas tanah (Ωm)
1	Tanah rawa	10–30
2	Tanah liat dan tanah ladang	100
3	Pasir basah	200
4	Kerikil basah	500
5	Pasir atau kerikil kering	1.000
6	Tanah berbatu	3.000

Sumber: [16], dikutip dalam [3]

Pada metode Wenner, empat elektroda dipasang pada satu garis lurus dengan jarak antar elektroda yang sama (a). Arus diinjeksikan melalui dua elektroda luar dan beda potensial diukur pada dua elektroda dalam [5]. Resistivitas semu dihitung dari resistansi terukur R dengan Persamaan (1), dengan ρ adalah resistivitas (Ωm), a adalah jarak antar elektroda (m), dan R adalah resistansi terukur (Ω). Semakin besar jarak a, semakin dalam lapisan tanah yang terinvestigasi.

$$\rho = 2\pi aR \tag{1}$$

2.3. Standar Acuan

Di Indonesia, nilai pembumian yang sesuai dengan PUIL 2011 adalah 0 hingga 5 Ω untuk instalasi umum, sedangkan untuk peralatan elektronik dipersyaratkan nilai yang lebih rendah, yaitu kurang dari 3 Ω dan pada beberapa perangkat kurang dari 1 Ω [3]. PUIL 2020 (SNI 0225:2020) merupakan pemutakhiran PUIL yang diadopsi dari seri IEC 60364, termasuk ketentuan susunan pembumian dan konduktor proteksi [17], [18]. Metode pengukuran resistansi dan resistivitas mengacu pada IEEE Std 81-2012 [5]. Pada studi lapangan, resistansi pembumian BTS dilaporkan sebesar 0,19–0,53 Ω pada kondisi yang dinilai sangat baik [4] dan 1,21–1,25 Ω setelah perbaikan [1]. Nilai acuan yang digunakan untuk evaluasi dalam penelitian ini dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Acuan Resistansi Pembumian untuk Evaluasi

Kategori	Nilai acuan	Sumber
Instalasi umum	≤ 5 Ω	PUIL 2011 [2], [3]
Peralatan elektronik	< 3 Ω; beberapa perangkat < 1 Ω	PUIL 2011 [3]
Kaki tower BTS (kondisi sangat baik)	0,19–0,53 Ω (studi lapangan)	[4]
Kaki tower BTS (setelah perbaikan)	1,21–1,25 Ω (studi lapangan)	[1]
Kriteria ketat penelitian ini	< 1 Ω	Sejalan dengan [1], [4]

2.4. Metode *Fall of Potential*

Metode *Fall of Potential* mengukur resistansi elektroda pembumian yang diuji (E) menggunakan satu elektroda arus (C) dan satu elektroda potensial (P) yang dipasang pada jarak tertentu. Resistansi diperoleh dari hubungan antara tegangan terukur dan arus yang dialirkan ke tanah [5]. Posisi P ditentukan sebagai persentase jarak E–C, dan posisi 62% (rasio 0,618) lazim digunakan sebagai titik referensi pada tanah yang relatif homogen [5]. Hasil pengukuran yang baik ditandai oleh terbentuknya *flat region*, yaitu kondisi ketika pergeseran posisi P hanya mengubah resistansi dalam jumlah sangat kecil. Jarak E–C disesuaikan dengan ukuran sistem pembumian, kriteria yang digunakan dalam penelitian ini adalah jarak E–C minimal lima kali dimensi diagonal sistem. Diagonal sistem pembumian D dihitung dengan Persamaan (2) dan jarak E–C ditentukan dengan Persamaan (3), dengan L adalah panjang, W adalah lebar sistem pembumian, dan dE–C yaitu jarak antara elektroda uji dan elektroda arus (semuanya dalam satuan meter). Jika elektroda bantu tidak dapat ditempatkan cukup jauh, pengukuran FoP konvensional dapat menyimpang, dan prosedur modifikasi telah dikembangkan untuk kondisi tersebut [19].

$$D = \sqrt{L^2 + W^2} \tag{2}$$

$$d_{E-C} \geq 5D \tag{3}$$

2.5. Model Tanah Dua Lapisan dan Faktor Refleksi

Model tanah dua lapisan merepresentasikan tanah tidak homogen dengan resistivitas lapisan atas (ρ_1) dan lapisan bawah (ρ_2), serta analisis kinerja pembumian pada tanah dua lapisan telah dibahas secara luas [8], [9], [20]. Perbedaan resistivitas kedua lapisan dinyatakan dengan faktor refleksi K pada Persamaan (4), yang bernilai −1 hingga 1 [21]. Nilai K mendekati 0 menunjukkan perbedaan resistivitas yang kecil antar lapisan,

sedangkan nilai mendekati 1 atau −1 menunjukkan perbedaan yang besar sehingga faktor refleksi berpengaruh signifikan terhadap resistivitas semu dan resistansi pembumian [10].

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \tag{4}$$

Pada penelitian ini, kualitas data *Fall of Potential* dinilai dengan persentase *error* terhadap nilai referensi pada posisi 62% (Persamaan 5) dan akurasi (Persamaan 6), dengan R_i resistansi pada posisi yang dibandingkan dan *R*ref resistansi pada titik referensi (Ω).

$$Error = \frac{|R_i - R_{\text{ref}}|}{R_{\text{ref}}} \times 100\% \tag{5}$$

$$\text{Akurasi} = 100\% - \text{Error} \tag{6}$$

2.6. Elektroda dan Konfigurasi Pembumian

Elektroda pembumian dapat berupa batang (*rod*), pita (*strip*), atau plat, yang masing-masing dapat dipasang tunggal maupun dalam konfigurasi paralel, *grid*, atau *mesh* [22]. Pada BTS, perbaikan pembumian lazim dilakukan dengan menambah elektroda atau sumur pembumian [1]. Konfigurasi *grid* dengan elektroda batang digunakan pada gardu induk untuk meratakan distribusi potensial [9], [23]. Pada lokasi bertanah resistivitas tinggi, *soil treatment* menggunakan bentonit, arang, dan garam telah dilaporkan menurunkan resistansi dari 35 Ω menjadi 2,85 Ω [24]. Upaya perbaikan resistansi pembumian pada lahan tropis juga telah dikaji [25]. Berdasarkan hubungan netral sumber dengan bumi, sistem pembumian instalasi tegangan rendah dibedakan menjadi sistem TN (*Terra-Neutral*), TT (*Terra-Terra*), dan IT (*Isolated-Terra*) [18].

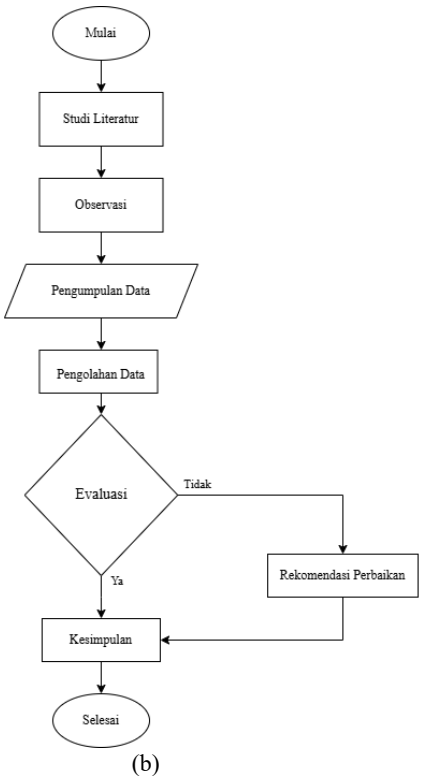
3. METODE

3.1. Waktu, Lokasi, dan Objek Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan April hingga Juli 2026 pada tower jaringan PT. Dayamitra Telekomunikasi di area *sport center* Universitas Papua, kawasan Amban, Manokwari, Papua Barat (Gambar 1(a)). Lokasi dipilih karena tower ini merupakan infrastruktur penting bagi komunikasi di wilayah Manokwari dan sistem pembumiannya perlu dievaluasi tingkat keandalannya terhadap gangguan listrik dan sambaran petir. Objek penelitian adalah sistem pembumian tower tersebut, dengan fokus pada pengukuran resistansi pembumian (*Fall of Potential*), pengukuran resistivitas tanah (*Wenner Four Point*), dan analisis karakteristik tanah (*Two Layer Soil*). Pendekatan kuantitatif digunakan karena penelitian menghasilkan data numerik, dan pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi aktual sistem pembumian. Seluruh data merupakan data primer hasil pengukuran langsung.



(a)



(b)

Gambar 1. (a) Tower Lokasi Penelitian dan (b) Diagram Alir Penelitian

3.2. Alat Penelitian

Alat ukur utama adalah *Standard Electric Works Co., Ltd.* (*SEW*) *4-Wire Earth Resistance and Resistivity Tester* (1 unit) yang digunakan untuk kedua metode pengukuran. Alat ini memiliki terminal arus (C1, C2) dan terminal potensial (P1, P2) yang terpisah. Peralatan pendukung terdiri atas kabel penghubung hitam 10 m, hijau 5 m, kuning 10 m, dan merah 15 m (masing-masing 1 unit), rol meter 100 m, empat elektroda bantu berupa pasak 18 cm, *smartphone*, serta laptop dengan perangkat lunak Microsoft Excel dan Microsoft Visio. Seluruh peralatan diperiksa sebelum digunakan, meliputi kondisi alat, baterai, kabel penghubung, dan terminal pengukuran.

3.3. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1(b). Penelitian diawali studi literatur tentang sistem pembumian, metode *Fall of Potential*, metode *Wenner Four Point*, *Two Layer Soil*, dan IEEE Std 81-2012, dilanjutkan observasi kondisi lingkungan lokasi, persiapan alat, dan pengumpulan data. Data kemudian diolah melalui rekapitulasi, perhitungan persentase *error* dan akurasi, serta analisis *Two Layer Soil* untuk memperoleh resistivitas lapisan dan faktor refleksi. Pada tahap evaluasi, resistansi pembumian dibandingkan dengan standar. Sistem dinyatakan layak apabila memenuhi standar, dan apabila belum memenuhi maka diberikan rekomendasi perbaikan sebelum penyusunan kesimpulan.

3.4. Penentuan Jarak Elektroda

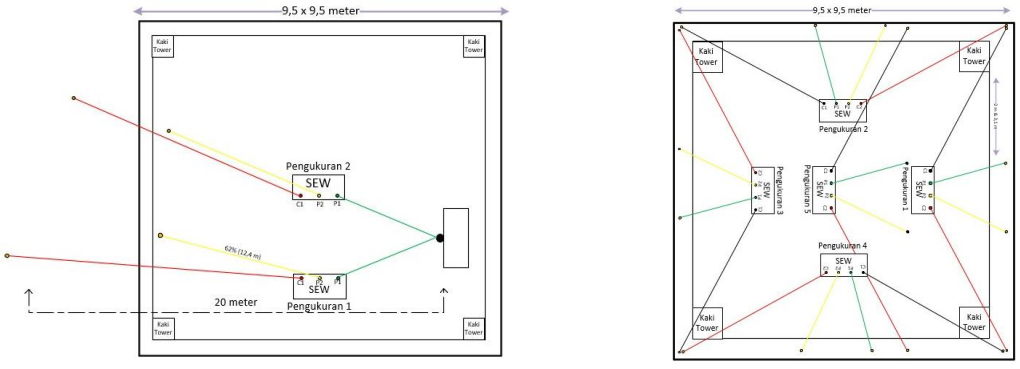
Sistem pembumian tower berada pada area sekitar 9,5 m × 9,5 m. Diagonal sistem dihitung dengan Persamaan (2): $D = \sqrt{(9{,}5^2 + 9{,}5^2)} = \sqrt{180{,}5} = 13{,}44$ m. Dengan jarak minimal lima kali dimensi maksimum (Persamaan 3), diperoleh dE–C ≥ 5 × 13,44 = 67,2 m. Namun, pemasangan elektroda arus pada jarak 67,2 m tidak dapat dilakukan karena keterbatasan luas area di sekitar tower untuk memasang elektroda bantu dan menarik kabel. Jarak E–C yang digunakan karenanya sebesar 20 m. Elektroda potensial ditempatkan pada tiga posisi, yaitu 52% (10,4 m), 62% (12,4 m), dan 72% (14,4 m) dari elektroda uji, untuk mengamati perubahan resistansi dan mengevaluasi kestabilan hasil. Jarak 20 m yang lebih pendek daripada hasil pendekatan 67,2 m menjadi salah satu keterbatasan penelitian ini.

3.5. Pengukuran Resistansi Pembumian

Elektroda pembumian utama dihubungkan ke terminal E, elektroda potensial ke terminal P, dan elektroda arus ke terminal C. Elektroda arus ditempatkan 20 m dari elektroda pembumian, sedangkan elektroda potensial diposisikan pada 52%, 62%, dan 72% dari jarak tersebut (Gambar 2(a)). Tombol TEST ditekan hingga nilai resistansi tampil di layar, dan pengukuran diulang tiga kali pada setiap posisi untuk memperoleh hasil yang konsisten. Pengukuran dilakukan dua kali (Pengukuran 1 dan Pengukuran 2) sesuai prosedur IEEE Std 81 dengan memindahkan posisi elektroda potensial hingga diperoleh nilai pada titik referensi sekitar 62% [5].

3.6. Pengukuran Resistivitas Tanah

Empat elektroda ditanam pada satu garis lurus dengan jarak antar elektroda sama dan dihubungkan ke terminal C1, P1, P2, dan C2 (Gambar 2(b)). Jarak antar pasak (a) divariasikan menjadi 2 m dan 3,1 m pada lima bentangan di sekitar area tower, yaitu dua bentangan horizontal, dua bentangan vertikal, dan satu bentangan vertikal pada garis tengah. Pola ini dipilih agar resistivitas tanah diperoleh dari berbagai arah. Setelah tombol TEST ditekan dan nilai resistansi tanah dicatat, resistivitas dihitung dengan Persamaan (1). Seluruh hasil dicatat pada lembar pengamatan dan pengukuran diulang apabila ditemukan hasil yang berbeda signifikan.



(a) (b)

Gambar 2. Tata Letak Pengukuran (a) Resistansi Pembumian Metode *Fall of Potential* dan (b) Resistivitas Tanah Metode *Wenner Four Point*

3.7. Analisis Data

Analisis dilakukan secara kuantitatif. Resistansi pada posisi 62% digunakan sebagai nilai acuan, dan penyimpangan pada posisi 52% dan 72% dinilai dengan persentase *error* dan akurasi (Persamaan 5 dan 6). Data resistivitas hasil pengukuran Wenner digunakan untuk memperoleh resistivitas lapisan atas (ρ_1) sebagai rata-rata kelima bentangan pada a = 2 m dan resistivitas lapisan bawah (ρ_2) sebagai rata-rata kelima bentangan pada a = 3,1 m, kemudian faktor refleksi dihitung dengan Persamaan (4). Model dua lapisan yang diperoleh merupakan model ekuivalen rata-rata spasial untuk menyederhanakan karakteristik resistivitas di area penelitian, bukan pemodelan vertikal dua lapisan pada satu titik pembumian. Evaluasi akhir membandingkan resistansi pembumian dengan nilai acuan pada Tabel 2.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

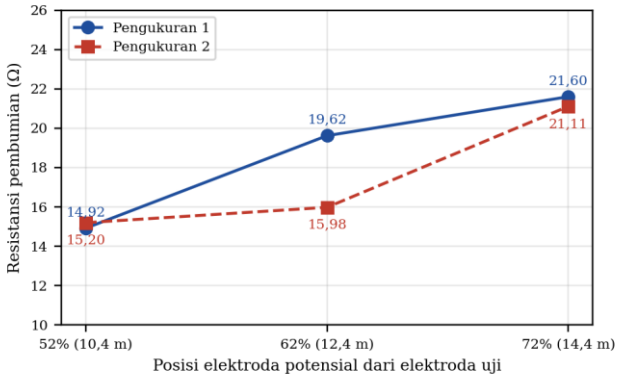
4.1. Resistansi Pembumian Metode *Fall of Potential*

Hasil pengukuran resistansi pembumian pada tiga posisi elektroda potensial disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 3. Pada Pengukuran 1, resistansi meningkat dari 14,92 Ω (52%) menjadi 19,62 Ω (62%) dan 21,60 Ω (72%). Pada Pengukuran 2, resistansi meningkat dari 15,20 Ω (52%) menjadi 15,98 Ω (62%) dan 21,11 Ω (72%). Sesuai praktik metode FoP, nilai pada posisi 62% digunakan sebagai nilai acuan, yaitu 19,62 Ω untuk Pengukuran 1 dan 15,98 Ω untuk Pengukuran 2 [5].

Tabel 3. Hasil Pengukuran Resistansi Pembumian

Pengukuran	Posisi elektroda potensial (%)	Jarak dari elektroda uji (m)	Resistansi (Ω)
1	52	10,4	14,92
1	62	12,4	19,62
1	72	14,4	21,60
2	52	10,4	15,20
2	62	12,4	15,98
2	72	14,4	21,11

Perubahan posisi elektroda potensial menghasilkan perubahan resistansi yang cukup besar, terutama pada posisi 72%. Dengan demikian, ketiga posisi belum membentuk *flat region* yang benar-benar datar. Posisi 62% tetap digunakan sebagai titik referensi karena merupakan posisi acuan metode *Fall of Potential*, bukan karena ketiga titik dianggap membentuk *flat region* yang sempurna.



Gambar 3. Kurva Hasil Pengukuran Resistansi Pembumian (Jarak Elektroda Arus 20 m)

4.2. Persentase *Error* dan Akurasi

Persentase *error* dan akurasi dihitung terhadap nilai acuan pada posisi 62% dengan Persamaan (5) dan (6). Sebagai contoh, pada Pengukuran 1 posisi 52%: *error* = |14,92 − 19,62| / 19,62 × 100% = 23,96%, sehingga akurasi = 100% − 23,96% = 76,04%. Hasil seluruh perhitungan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Persentase *Error* dan Akurasi Terhadap Titik Referensi 62%

Pengukuran	Posisi (%)	R acuan 62% (Ω)	R terukur (Ω)	Error (%)	Akurasi (%)
1	52	19,62	14,92	23,96	76,04
1	72	19,62	21,60	10,09	89,91
2	52	15,98	15,20	4,88	95,12
2	72	15,98	21,11	32,10	67,90

Pada Pengukuran 1, *error* sebesar 23,96% pada posisi 52% dan 10,09% pada posisi 72% menunjukkan bahwa sisi 72% lebih dekat dengan nilai acuan. Sebaliknya, pada Pengukuran 2, *error* sebesar 4,88% pada posisi 52% dan 32,10% pada posisi 72% menunjukkan bahwa sisi 52% lebih dekat. Pola yang berlawanan ini menunjukkan bahwa kestabilan daerah pengukuran perlu dinilai dari pola keseluruhan data dan tidak hanya dari satu titik. Rentang *error* 4,88–32,10% dan akurasi 67,90–95,12% menunjukkan bahwa nilai antar posisi belum sepenuhnya konsisten, sejalan dengan tidak terbentuknya *flat region*. Salah satu faktor yang mungkin berperan adalah jarak E–C sebesar 20 m yang jauh lebih pendek dari jarak 67,2 m hasil pendekatan, karena penempatan elektroda bantu yang terlalu dekat dengan elektroda yang diuji dapat menyebabkan hasil FoP konvensional menyimpang [19]. Penyimpangan metode tiga elektroda pada kondisi lapangan tertentu juga telah dilaporkan [26]. Meskipun demikian, seluruh nilai terukur (14,92–21,60 Ω) berada pada orde yang sama dan jauh di atas nilai acuan pada Tabel 2, sehingga kesimpulan evaluasi tidak berubah.

4.3. Resistivitas Tanah

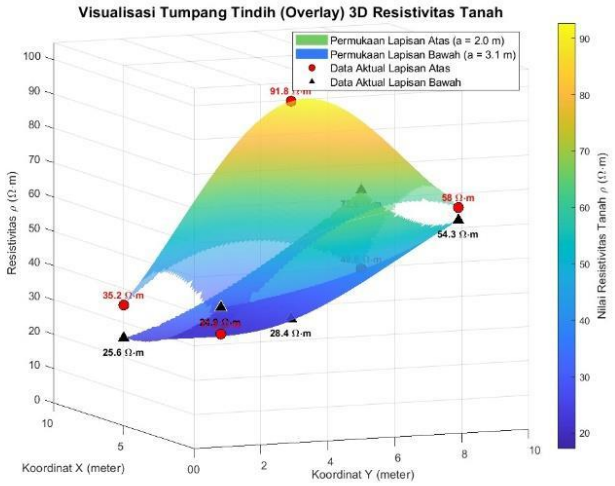
Hasil pengukuran resistivitas dengan metode *Wenner Four Point* pada lima bentangan dan dua jarak pasak disajikan pada Tabel 5. Pada a = 2 m, resistivitas berada pada rentang 17,2–91,8 Ωm, sedangkan pada a = 3,1 m berada pada rentang 24,9–72,6 Ωm.

Tabel 5. Hasil Pengukuran Resistivitas Tanah

No. bentangan	Arah bentangan	ρ pada a = 2,0 m (Ωm)	ρ pada a = 3,1 m (Ωm)
1	Horizontal	58	54,3
2	Vertikal	49,6	72,6
3	Horizontal	35,2	25,6
4	Vertikal	17,2	24,9
5	Vertikal (garis tengah)	91,8	28,4

Perubahan resistivitas dari a = 2 m ke a = 3,1 m tidak seragam: turun pada bentangan 1 (58 menjadi 54,3 Ωm), naik pada bentangan 2 (49,6 menjadi 72,6 Ωm), turun pada bentangan 3 (35,2 menjadi 25,6 Ωm), naik pada bentangan 4 (17,2 menjadi 24,9 Ωm), dan turun paling besar pada bentangan 5 (91,8 menjadi 28,4 Ωm). Karena semakin besar jarak elektroda semakin dalam lapisan yang terinvestigasi [5], pola yang tidak seragam ini mengindikasikan bahwa tanah di sekitar tower tidak homogen [8]. Seluruh nilai resistivitas tidak melebihi 100 Ωm, yaitu sebanding dengan nilai tanah liat dan tanah ladang pada Tabel 1 dan jauh lebih rendah daripada kerikil kering atau tanah berbatu.

Visualisasi kontur tiga dimensi pada Gambar 4 memperlihatkan variasi resistivitas pada setiap titik pengukuran. Warna biru hingga ungu menunjukkan resistivitas yang relatif lebih rendah, sedangkan warna hijau hingga kuning menunjukkan resistivitas yang relatif lebih tinggi. Permukaan kontur lebih tinggi di bagian kanan dan lebih rendah serta landai di bagian kiri dan tengah, sehingga resistivitas berubah secara bertahap dan bukan secara tiba-tiba pada seluruh area. Pola ini sesuai dengan hasil pengukuran sebesar 17,2–91,8 Ωm dan menunjukkan bahwa tanah di lokasi penelitian tidak dapat dianggap sepenuhnya homogen.



Gambar 4. Visualisasi Kontur 3D Resistivitas Tanah

4.4. Model Tanah Dua Lapisan dan Faktor Refleksi

Data resistivitas disederhanakan menjadi dua lapisan ekuivalen. Resistivitas lapisan atas dihitung dari rata-rata data pada a = 2 m: ρ_1 = (58 + 49,6 + 35,2 + 17,2 + 91,8)/5 = 50,36 Ωm. Resistivitas lapisan bawah dihitung dari rata-rata data pada a = 3,1 m: ρ_2 = (54,3 + 72,6 + 25,6 + 24,9 + 28,4)/5 = 41,16 Ωm. Faktor refleksi dari Persamaan (4) adalah K = (41,16 − 50,36)/(41,16 + 50,36) = −0,100.

Nilai K yang negatif menunjukkan bahwa resistivitas rata-rata lapisan bawah lebih rendah daripada lapisan atas. Nilai $|K|$ yang kecil menunjukkan bahwa selisih rata-rata kedua kelompok data tidak besar, sehingga ketidakhomogenan tanah tampak terutama sebagai variasi antar bentangan seperti pada Tabel 5. Perlu ditegaskan bahwa model ini merupakan model ekuivalen rata-rata spasial dari lima bentangan di sekitar kaki tower, bukan menunjukkan bahwa lokasi secara fisik hanya terdiri atas dua lapisan tanah dengan batas kedalaman tertentu.

4.5. Evaluasi Sistem Pembumian

Resistansi pembumian pada titik referensi 62% sebesar 19,62 Ω dan 15,98 Ω melampaui batas 5 Ω untuk instalasi umum menurut PUIL 2011 [3], yaitu sekitar 3,2 hingga 3,9 kali batas tersebut. Nilai tersebut juga jauh di atas kriteria yang lebih ketat untuk tower telekomunikasi (< 1 Ω), yang sejalan dengan nilai 0,19–1,25 Ω pada studi BTS lainnya [1], [4]. Dengan demikian, sistem pembumian tower di lokasi penelitian belum memenuhi kedua acuan pada Tabel 2. Di sisi lain, resistivitas tanah sebesar 17,2–91,8 Ωm relatif rendah (Tabel 1), sehingga tingginya resistansi kemungkinan lebih berkaitan dengan konfigurasi dan kedalaman elektroda terpasang dibandingkan dengan sifat tanahnya, meskipun data konfigurasi elektroda terpasang tidak dikaji dalam penelitian ini.

Upaya perbaikan yang dapat dilakukan adalah menambah jumlah elektroda pembumian secara paralel, memperdalam penanaman elektroda, atau menggunakan bahan perbaikan tanah (*soil treatment*) [1], [2], [24], [25]. Elektroda paralel perlu dipasang dengan jarak yang memadai karena efek kopling antar elektroda membuat penurunan resistansi tidak linear [7]. Hasil penelitian ini dibatasi oleh jarak E–C 20 m yang lebih pendek dari jarak ideal 67,2 m, jumlah pengukuran resistansi yang hanya dua kali, serta variasi jarak pasak yang hanya dua nilai sehingga pemodelan dua lapisan masih bersifat pendekatan.

5. KESIMPULAN

Resistansi pembumian tower PT. Dayamitra Telekomunikasi Amban yang diukur dengan metode *Fall of Potential* pada titik referensi 62% sebesar 19,62 Ω (Pengukuran 1) dan 15,98 Ω (Pengukuran 2), sehingga belum memenuhi batas 5 Ω maupun kriteria yang lebih ketat (< 1 Ω) untuk sistem pembumian tower telekomunikasi. Resistivitas tanah hasil pengukuran Wenner *Four Point* berkisar antara 17,2 Ωm dan 91,8 Ωm, yang menunjukkan tanah tidak homogen, dengan faktor refleksi *Two Layer Soil* sebesar −0,100. Berdasarkan kedua hasil tersebut, sistem pembumian tower belum memenuhi standar sehingga memerlukan perbaikan.

Perbaikan sistem pembumian dapat dilakukan dengan menambah jumlah elektroda atau memperdalam pemasangannya. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan variasi jarak pasak yang lebih banyak dan jarak elektroda arus yang memenuhi kriteria agar parameter lapisan tanah dan resistansi lebih representatif, serta memanfaatkan perangkat lunak analisis pembumian seperti CDEGS (*Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis*) untuk membandingkan hasil pengukuran lapangan dengan hasil simulasi [27].

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Papua atas dukungan selama penelitian, kepada dosen pembimbing atas bimbingan dan masukannya, serta kepada semua pihak yang membantu pengambilan data di lapangan.

REFERENSI

[1] Umar, B. T. Nugraha, and A. Supardi, “Analisis perbaikan sistem pentanahan telekomunikasi,” *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 15, no. 1, pp. 42–46, 2015.

[2] Y. M. Seftiani and N. Novizon, “Studi kelayakan sistem pentanahan pada gedung Teknik Elektro Universitas Andalas,” *Elektron: Jurnal Ilmiah*, vol. 14, no. 2, pp. 45–49, Dec. 2022, doi: 10.30630/eji.14.2.297.

[3] R. Mubarok, R. N. Prasetyono, and Z. Alfarikhi, “Analisis sistem grounding menggunakan elektroda ground rod jenis tembaga pada gedung A dan D di Universitas Peradaban,” *J. Telecommun. Electron. Control Eng. (JTECE)*, vol. 4, no. 2, pp. 100–107, Jul. 2022, doi: 10.20895/JTECE.V4I2.708.

[4] A. Triyanto, E. Sumarno, and A. A. Putra, “Analisis sistem pentanahan Base Transceiver Station menggunakan metode soil test,” *EPIC (J. Electr. Power, Instrum. Control)*, vol. 4, no. 2, pp. 177–184, Dec. 2021, doi: 10.32493/epic.v4i2.17163.

[5] *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*, IEEE Std 81-2012, 2012.

[6] N. M. Nor, R. Rajab, and K. Ramar, “Validation of the calculation and measurement techniques of earth resistance values,” *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 5, no. 10, pp. 1313–1317, 2008, doi: 10.3844/ajassp.2008.1313.1317.

[7] A. Boonram, S. Phonthong, R. Khongpum, S. Blanchard, and D. A. Wallace, "Comparative evaluation of ground resistance measurement techniques and FEM-based modeling under grounding electrode configurations," *ASEAN J. Sci. Technol. Rep.*, vol. 29, no. 9, Art. no. e262305, 2026, doi: 10.55164/ajstr.v29i9.262305.

[8] N. Permal, M. Osman, A. M. Ariffin, and M. Z. A. Ab Kadir, "Effect of non-homogeneous soil characteristics on substation grounding-grid performances: A review," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 16, Art. no. 7468, 2021, doi: 10.3390/app11167468.

[9] N. Permal, M. Osman, A. M. Ariffin, and M. Z. A. Ab Kadir, "The impact of substation grounding grid design parameters in non-homogenous soil to the grid safety threshold parameters," *IEEE Access*, vol. 9, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063018.

[10] O. E. Gouda, T. El-Saied, W. A. A. Salem, and A. M. A. Khater, "Evaluations of the apparent soil resistivity and the reflection factor effects on the grounding grid performance in three-layer soils," *IET Sci. Meas. Technol.*, 2019, doi: 10.1049/iet-smt.2018.5336.

[11] T. Hücker and A. Sinai, "An experimental review of different methods for measuring the grounding resistance of OHTL towers," in *Proc. 2024 IEEE Int. Conf. High Voltage Eng. Appl. (ICHVE)*, 2024, pp. 101–106, doi: 10.1109/ICHVE61955.2024.10676280.

[12] Y. Dan, Z. Zhang, S. Bu, C.-N. Wong, and P. Lin, "Analysis of grounding performance of tower grounding electrodes in elevated terrain," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 39, no. 6, pp. 3305–3315, 2024, doi: 10.1109/TPWRD.2024.3463174.

[13] C. Andreansyah, Y. Shalahuddin, and D. A. Widhining K, "Studi kelayakan sistem grounding instalasi listrik pada Gedung Ulil Albab Uniska Kediri," *J. Zetroem*, vol. 5, no. 1, pp. 55–61, 2023, doi: 10.36526/ztr.v5i1.2629.

[14] M. Fauzi, M. R. Azmi, and T. Multazam, "Analisis penangkal petir dan luas area yang terproteksi pada BTS," *Aceh J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 23–28, 2021.

[15] T. S. Hutauruk, *Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*. Jakarta, Indonesia: Erlangga, 1991.

[16] Badan Standardisasi Nasional, *Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011)*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2011.

[17] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 0225:2020 Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2020 (PUIL 2020)*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2020.

[18] *Low-Voltage Electrical Installations – Part 5-54: Selection and Erection of Electrical Equipment – Earthing Arrangements and Protective Conductors*, IEC 60364-5-54, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.

[19] J. Moreno, P. Simón, E. Faleiro, D. García, G. Denche, and G. Asensio, "A simple procedure to obtain the grounding resistance measurement of very large and urban electrodes by a modified fall-of-potential method," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 17, Art. no. 8040, 2024, doi: 10.3390/app14178040.

[20] E. D. Sunde, *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*, 2nd ed. New York, NY, USA: Dover, 1968.

[21] *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Std 80-2013, 2013.

[22] M. A. Salam and Q. M. Rahman, *Power Systems Grounding*. Singapore: Springer, 2016, doi: 10.1007/978-981-10-0446-9.

[23] A. Pranoto, H. Tumaliang, and G. M. C. Mangindaan, "Analisa sistem pentanahan gardu induk Teling dengan konstruksi grid (kisi-kisi)," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 7, no. 3, 2018, doi: 10.35793/jtek.v7i3.20765.

[24] P. S. Harijanto, B. S. Gumilang, B. E. Prasetyo, and T. U. Syamsuri, "Rancang bangun grounding box soil treatment sebagai media pengukuran resistansi pentanahan untuk proteksi pembangkit hybrid PV–angin Politeknik Negeri Malang," *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 11, no. 3, pp. 231–236, 2024, doi: 10.33795/elposys.v11i3.6419.

[25] M. Gogom, R. Gomba, and D. Lilonga-Boyenga, "Contribution to the improvement of the earthing resistance of electrical installations: Case of tropical zones lands," *Sci. J. Energy Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–11, 2020, doi: 10.11648/j.sjee.20200801.11.

[26] Y. Zhang, L. W. Wang, and Z. Hu, "Comparative study on two kinds of electrode grounding resistance measurement methods in geo-resistivity observation," *Acta Seismol. Sin.*, vol. 44, no. 6, pp. 1049–1060, 2022, doi: 10.11939/jass.20210151.

[27] U. Muhammad, H. Zaid, N. N. Ahmad, N. Mohamad Nor, and F. Aman, "Evaluation of steady-state ground resistance by field measurement and CDEGS computation," *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 13, no. 5, pp. 3033–3042, 2024, doi: 10.11591/eei.v13i5.7603.