

EVALUASI TEGANGAN PERMUKAAN TANAH PADA SISTEM PENTANAHAN RUMAH TINGGAL BERDASARKAN KEDALAMAN ELEKTRODA DAN KARAKTERISTIK LOKASI

Inaya Retno Putri^{1*}, Ali Nur Fathoni², Hesti Khuzaimah Nurul Yusufiyah³

^{1,2} Program Studi Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

³ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

*Corresponding author: inayaputri@unesa.ac.id

ABSTRACT

Penelitian ini menganalisis pengaruh kedalaman elektroda dan karakteristik lokasi terhadap resistansi pentanahan serta distribusi tegangan permukaan pada sistem pentanahan rumah tinggal. Eksperimen dilakukan di Pantai Marina dan Mangunharjo, Semarang, menggunakan elektroda batang pada kedalaman 1,0 dan 1,5 m. Arus injeksi divariasikan dari 0,2 sampai 1,0 A, sedangkan tegangan permukaan diukur pada tiga pasangan titik dalam rentang jarak 0,5 sampai 2,0 m dari elektroda. Data yang tersedia dalam penelitian ini disajikan sebagai nilai hasil pengukuran untuk setiap kombinasi arus, kedalaman, lokasi, dan posisi pengamatan. Peningkatan kedalaman dari 1,0 menjadi 1,5 m menurunkan resistansi pentanahan dari 1,40 menjadi 0,35 Ω di Pantai Marina, atau 75,0%, dan dari 10,20 menjadi 6,31 Ω di Mangunharjo, atau 38,1%. Pada arus 1,0 A, tegangan tertinggi di pasangan titik terdekat turun dari 0,48 menjadi 0,12 V di Pantai Marina dan dari 4,48 menjadi 1,08 V di Mangunharjo. Seluruh tegangan hasil pengujian berada di bawah acuan operasional 50 V yang digunakan dalam naskah. Hasil menunjukkan bahwa kedalaman elektroda dan kondisi lokasi memengaruhi resistansi pentanahan serta gradien potensial permukaan. Kontribusi penelitian terletak pada evaluasi eksperimental bersamaan terhadap kedalaman, lokasi, arus injeksi, dan posisi pengukuran pada skala pentanahan rumah tinggal. Namun, interpretasi keselamatan hanya berlaku untuk kondisi arus uji 0,2 sampai 1,0 A dan tidak mewakili arus gangguan hubung singkat sebenarnya.

Kata kunci: elektroda batang; kedalaman elektroda; resistansi pentanahan; tegangan langkah; tegangan permukaan

ABSTRACT

This study analyzes the effects of electrode depth and site characteristics on grounding resistance and surface-voltage distribution in residential grounding systems. Field experiments were conducted at Marina Beach and Mangunharjo, Semarang, using rod electrodes installed at depths of 1.0 and 1.5 m. The injected current ranged from 0.2 to 1.0 A, while surface voltage was measured across three point pairs located within 0.5–2.0 m from the electrode. Each measurement was repeated five times, and the mean values are reported. Increasing the electrode depth from 1.0 to 1.5 m reduced the grounding resistance from 1.40 to 0.35 Ω at Marina Beach, corresponding to 75.0%, and from 10.20 to 6.31 Ω at Mangunharjo, corresponding to 38.1%. At 1.0 A, the maximum voltage at the nearest point pair decreased from 0.48 to 0.12 V at Marina Beach and from 4.48 to 1.08 V at Mangunharjo. All measured voltages remained below the 50 V operational reference adopted in this manuscript. The results indicate that electrode depth and site conditions are associated with differences in grounding resistance and surface-potential gradients under the tested conditions. This study contributes a joint experimental evaluation of depth, site, injected

current, and measurement position for residential-scale grounding. The safety interpretation is limited to the tested current range and does not represent actual short-circuit fault currents.

Keywords: *electrode depth; grounding resistance; rod electrode; step voltage; surface voltage*

1. PENDAHULUAN

Sistem pentanahan menyediakan jalur arus gangguan menuju bumi dan membatasi kenaikan potensial bagian konduktif yang dapat disentuh. Kinerja sistem tidak cukup dinilai hanya dari resistansi pentanahan. Keselamatan juga ditentukan oleh distribusi potensial tanah, tegangan sentuh, beda potensial permukaan, besar serta durasi arus gangguan, dan resistivitas lapisan tanah [1]–[4]. IEEE Std 80 menegaskan bahwa resistansi rendah tidak dengan sendirinya membuktikan desain aman karena batas toleransi dipengaruhi oleh arus, waktu pemutusan, resistivitas permukaan, dan geometri sistem [11].

Resistivitas tanah berubah menurut komposisi, porositas, kadar air, suhu, dan struktur lapisan. Model tanah yang tidak tepat dapat menghasilkan kesalahan estimasi impedansi dan tegangan langkah [3], [12], [13]. Studi eksperimental terbaru juga menunjukkan bahwa kadar air dan tahanan kontak tanah-elektroda dapat mengubah performa pentanahan secara nyata [14]. Pada elektroda vertikal, panjang, diameter, resistivitas tanah, serta kedalaman penanaman menentukan resistansi efektif [15]. Karena itu, lokasi pantai dan lokasi berbukit dapat menghasilkan respons yang berbeda meskipun konfigurasi elektrodanya sama.

Penelitian terdahulu banyak membahas grid gardu induk, sistem mesh, menara transmisi, atau pemodelan numerik [1]–[5], [8], [12], [13]. Bukti eksperimental pada skala rumah tinggal yang membandingkan dua karakteristik lokasi, dua kedalaman elektroda, variasi arus injeksi, dan perubahan tegangan terhadap jarak masih terbatas. Penelitian terdahulu tentang metode rod dan mesh juga belum menguji kombinasi faktor tersebut pada dua lokasi rumah tinggal [10]. Celah ini penting karena instalasi rumah tinggal umumnya memakai elektroda batang tunggal dan menghadapi kondisi tanah setempat yang beragam.

Penelitian Giacomelli et al. [3] meninjau metode pengukuran impedansi pentanahan pada instalasi listrik dan menunjukkan pentingnya pemilihan metode pengukuran yang sesuai dengan kondisi lokasi. Jesenik dan Trlep [12] serta Permal et al. [13] menunjukkan bahwa model tanah berlapis dan ketidakhomogenan tanah memengaruhi distribusi potensial dan kinerja sistem pentanahan. Wahba et al. [14] membuktikan secara eksperimental bahwa kondisi kontak elektroda dan material tanah memengaruhi resistansi

pentanahan. Namun, penelitian tersebut lebih banyak berfokus pada pemodelan, grid gardu induk, atau karakterisasi material. Perbandingan eksperimental pada sistem elektroda batang rumah tinggal di dua lokasi dengan variasi kedalaman, arus injeksi, dan jarak pengukuran masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh karakteristik lokasi dan kedalaman elektroda terhadap resistansi pentanahan serta distribusi tegangan permukaan tanah. Kontribusi penelitian meliputi: (1) perbandingan eksperimental dua lokasi dengan karakteristik visual berbeda; (2) kuantifikasi penurunan resistansi dan tegangan akibat peningkatan kedalaman; (3) pemodelan linear hubungan arus injeksi dengan tegangan permukaan; dan (4) evaluasi terbatas terhadap acuan 50 V. Klaim keselamatan dibatasi pada kondisi eksperimen karena arus uji jauh lebih kecil daripada arus gangguan aktual.

Kebaruan praktis penelitian ini terletak pada evaluasi eksperimental terintegrasi terhadap pengaruh lokasi, kedalaman elektroda, arus injeksi, dan jarak pengukuran pada sistem pentanahan rumah tinggal. Penelitian tidak mengusulkan model pentanahan baru, tetapi menyediakan bukti kuantitatif mengenai perbedaan respons dua lokasi pada konfigurasi pengujian yang sama.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan eksperimen lapangan komparatif dengan dua lokasi, dua kedalaman elektroda, sembilan tingkat arus, dan tiga pasangan titik pengukuran. Lokasi pertama berada di Pantai Marina, Semarang Utara, dengan tanah rawa pantai. Lokasi kedua berada di Mangunharjo, Tembalang, Semarang Selatan, dengan tanah pegunungan yang secara visual mengandung pasir dan padas.

Elektroda yang digunakan ialah elektroda batang komersial untuk pentanahan rumah tinggal. Elektroda dipasang pada kedalaman 1,0 dan 1,5 m. Resistansi pentanahan diukur menggunakan earth tester sebelum pengujian tegangan permukaan. Arus 0,2–1,0 A dialirkan dari autotransformator melalui rheostat menuju elektroda.

Tabel 1. Spesifikasi Elektroda

Parameter	Hasil
Jenis elektroda	Batang
Material	Tembaga, baja berlapis tembaga, atau lainnya
Diameter	14 – 16 mm
Panjang total	1,5 – 3 m
Kedalaman efektif	1,0 dan 1,5 m

Parameter	Hasil
Kondisi permukaan	Berlapis
Konduktor penghubung	Tembaga murni, dengan luas penampang minimal 2,52 mm ² hingga 16 mm ²

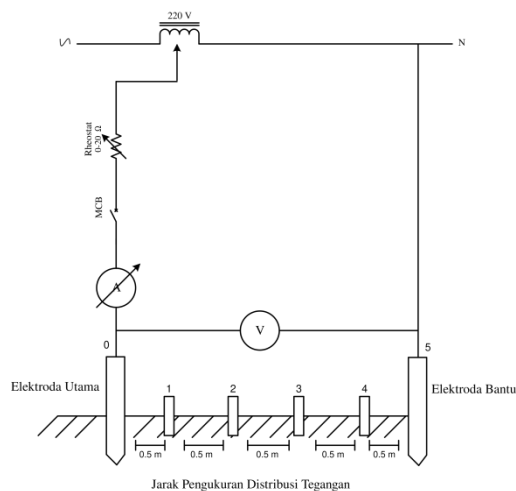
Tabel 2. Spesifikasi Alat dan Peralatan Pengujian

Alat	Merek dan tipe	Rentang	Resolusi	Akurasi
Earth tester	Kyoritsu KEW 4105 A	0.00 - 1200 Ω	0,01 Ω	$\pm 1..%$
Voltmeter	Fluke 117 True RMS	0.1 - 600 V AC/DC	0,1 V	$\pm 1..%$
Amperemeter	Sanwa DCL-3100	0 - 5 A	0,1 A	$\pm 1,5 \%$
Autotransformator	Matsunaga ST-2000	0 - 250 V AC	1 V	$\pm 3 \%$
Rheostat	Kikusui RH-300	0 - 1000 Ω	0,1 Ω	$\pm 1..%$

Tabel 3. Karakteristik Tanah Terukur

Parameter	Hasil
Esistivitas Tanah	85 $\Omega.m$
Kadar Air	28 %
Suhu Tanah	29 $^{\circ}C$
pH	6.8
Struktur Lapisan	0 - 2m : Lempung, 2 - 5m : Pasir Lempung
Kondisi Cuaca Saat Pengujian	Cerah, tidak hujan 3 hari terakhir

Empat posisi pengukuran ditempatkan berurutan pada jarak 0,5; 1,0; 1,5; dan 2,0 m dari elektroda utama. Beda potensial diukur pada pasangan titik 1–2, 2–3, dan 3–4, sehingga setiap pasangan mewakili interval 0,5 m. Setiap kombinasi kondisi diukur lima kali. Tabel hasil menyajikan rata-rata.

**Gambar 1.** Konfigurasi pengukuran resistansi pentanahan dan tegangan permukaan.

Untuk elektroda batang vertikal pada tanah homogen, hubungan teoritis pendekatan resistansi dapat ditulis sebagai [15]:

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

dengan R_g adalah resistansi pentanahan (Ω), ρ resistivitas tanah (Ωm), L panjang efektif elektroda (m), dan d diameter elektroda (m). Persamaan (1) menunjukkan bahwa penambahan L cenderung menurunkan resistansi, sedangkan besar penurunannya bergantung pada resistivitas dan geometri. Tegangan antara dua titik permukaan dihitung dari:

$$V_s = |V(r_1) - V(r_2)| \quad (2)$$

Untuk perhitungan beda potensial antara 2 titik dihitung dari:

$$V_{ij} = V_i - V_j \quad (3)$$

untuk kondisi linear:

$$V_s = aI + b \quad (4)$$

Koefisien a menyatakan sensitivitas tegangan terhadap arus pada pasangan titik tertentu. Analisis meliputi persentase penurunan resistansi, perbandingan tegangan maksimum antarlokasi, serta regresi linear dan koefisien determinasi R^2 . Evaluasi acuan dilakukan dengan membandingkan nilai hasil uji terhadap 50 V. IEEE Std 80 digunakan sebagai kerangka konseptual keselamatan, bukan sebagai bukti kepatuhan penuh, karena durasi gangguan, resistivitas permukaan, berat badan, dan arus gangguan prospektif tidak tersedia [11].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Resistansi pentanahan

Tabel 2. Resistansi pentanahan dan perubahan akibat kedalaman elektroda

Lokasi	R 1,0 m (Ω)	R 1,5 m (Ω)	Penurunan (%)	Status terhadap 5 Ω
Pantai Marina	1,40	0,35	75,0	Memenuhi
Mangunharjo	10,20	6,31	38,1	Belum memenuhi

Penambahan kedalaman 0,5 m menurunkan resistansi sebesar 75,0% di Pantai Marina dan 38,1% di Mangunharjo. Hasil ini sesuai dengan Persamaan (1) dan penelitian Kwon et al. [15], yang menunjukkan bahwa peningkatan panjang efektif serta kedalaman elektroda

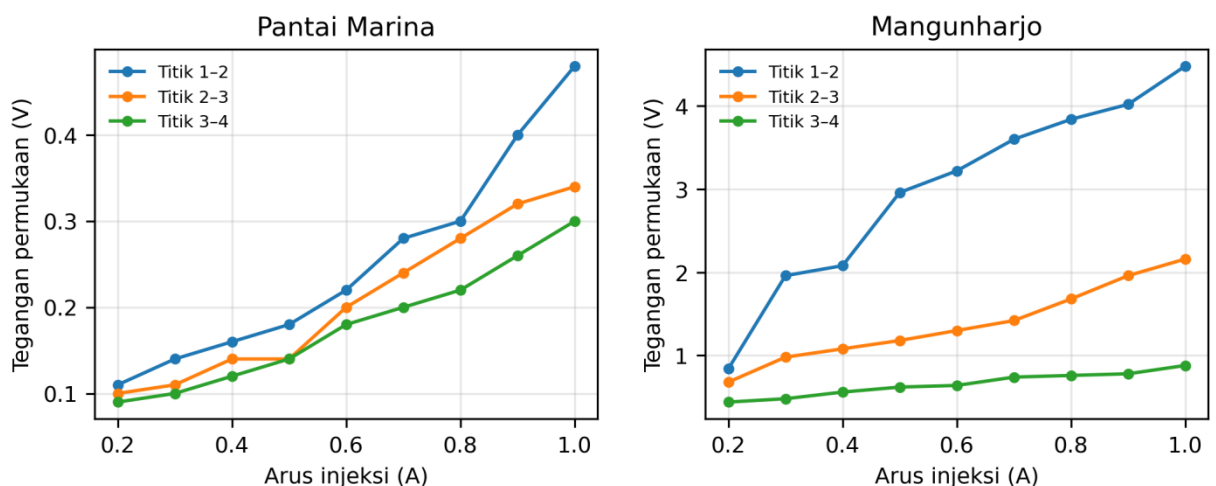
memperluas kontak listrik dengan tanah. Nilai Mangunharjo tetap di atas kriteria instalasi 5 Ω yang digunakan dalam penelitian. Dengan demikian, kedalaman 1,5 m belum cukup untuk mencapai target resistansi di lokasi tersebut. Solusi praktis dapat berupa elektroda lebih panjang, elektroda paralel dengan jarak memadai, atau perbaikan tanah yang terlebih dahulu diuji secara teknis dan lingkungan.

Pada kedalaman 1,5 m, resistansi pentanahan Mangunharjo sekitar 18,03 kali resistansi Pantai Marina. Perbedaan tersebut konsisten dengan pengaruh komposisi dan kelembapan terhadap resistivitas tanah [12]–[14]. Namun, penelitian ini tidak mengukur ρ dan kadar air. Karena itu, hasil tidak membuktikan bahwa satu jenis tanah menjadi satu-satunya penyebab. Kondisi kontak elektroda, heterogenitas lapisan, suhu, dan cuaca saat pengukuran juga dapat berkontribusi.

3.2. Tegangan permukaan dan hubungan dengan arus

Tabel 3. Tegangan permukaan rata-rata pada kedalaman 1,0 m

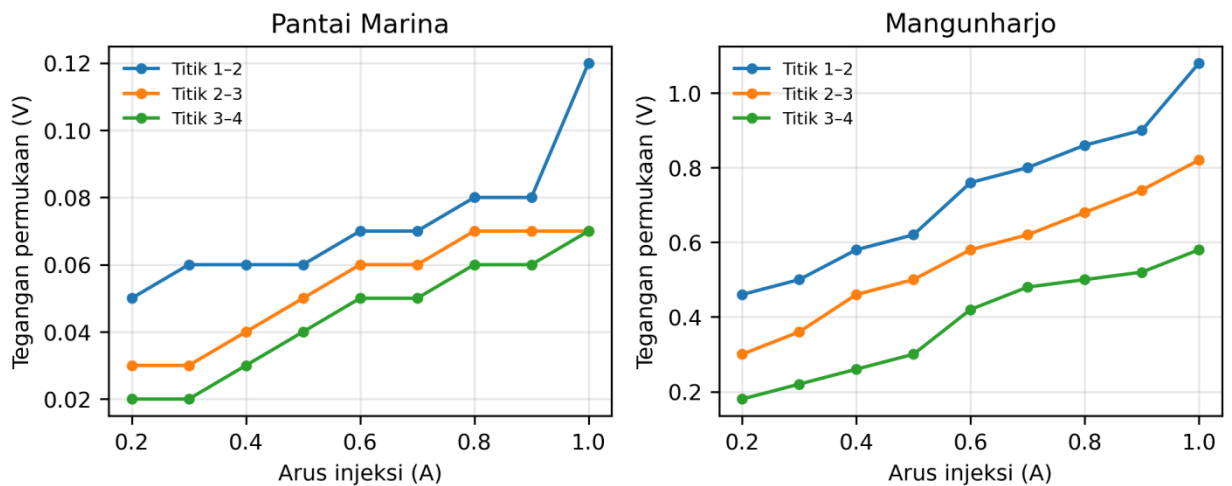
I (A)	PM 1–2	PM 2–3	PM 3–4	MH 1–2	MH 2–3	MH 3–4
0,2	0,11	0,10	0,09	0,84	0,68	0,44
0,3	0,14	0,11	0,10	1,96	0,98	0,48
0,4	0,16	0,14	0,12	2,08	1,08	0,56
0,5	0,18	0,14	0,14	2,96	1,18	0,62
0,6	0,22	0,20	0,18	3,22	1,30	0,64
0,7	0,28	0,24	0,20	3,60	1,42	0,74
0,8	0,30	0,28	0,22	3,84	1,68	0,76
0,9	0,40	0,32	0,26	4,02	1,96	0,78
1,0	0,48	0,34	0,30	4,48	2,16	0,88



Gambar 2. Hubungan arus injeksi dan tegangan permukaan pada kedalaman 1,0 m

Tabel 4. Tegangan permukaan rata-rata pada kedalaman 1,5 m

I (A)	PM 1-2	PM 2-3	PM 3-4	MH 1-2	MH 2-3	MH 3-4
0,2	0,05	0,03	0,02	0,46	0,30	0,18
0,3	0,06	0,03	0,02	0,50	0,36	0,22
0,4	0,06	0,04	0,03	0,58	0,46	0,26
0,5	0,06	0,05	0,04	0,62	0,50	0,30
0,6	0,07	0,06	0,05	0,76	0,58	0,42
0,7	0,07	0,06	0,05	0,80	0,62	0,48
0,8	0,08	0,07	0,06	0,86	0,68	0,50
0,9	0,08	0,07	0,06	0,90	0,74	0,52
1,0	0,12	0,07	0,07	1,08	0,82	0,58

**Gambar 3.** Hubungan arus injeksi dan tegangan permukaan pada kedalaman 1,5 m**Tabel 5.** Regresi linear tegangan terhadap arus pada pasangan titik 1-2

Lokasi	Kedalaman (m)	a (V/A)	b (V)	R ²
Pantai Marina	1,0	0,440	-0,012	0,934
Mangunharjo	1,0	4,150	0,510	0,945
Pantai Marina	1,5	0,065	0,033	0,755
Mangunharjo	1,5	0,737	0,287	0,973

Tegangan meningkat seiring arus pada seluruh konfigurasi. Kemiringan regresi titik 1-2 paling besar terjadi di Mangunharjo pada kedalaman 1,0 m. Hal ini menunjukkan gradien potensial permukaan yang lebih sensitif terhadap kenaikan arus pada konfigurasi tersebut. Nilai R² digunakan untuk menilai kedekatan hubungan linear dalam rentang arus uji.

Hubungan linear terlemah ditemukan di Pantai Marina pada kedalaman 1,5 m dengan $R^2 = 0,755$. Hal ini menunjukkan bahwa sekitar 75,5% variasi tegangan dapat dijelaskan oleh perubahan arus dalam model linear. Nilai tersebut lebih rendah daripada konfigurasi lain, kemungkinan karena nilai tegangan yang sangat kecil mendekati resolusi alat ukur. Penyimpangan lokal dapat berasal dari perubahan kontak, heterogenitas tanah, dan resolusi alat.

Pada arus 1,0 A, kenaikan kedalaman dari 1,0 menjadi 1,5 m menurunkan tegangan titik 1–2 dari 0,48 menjadi 0,12 V di Pantai Marina, atau 75,0%, dan dari 4,48 menjadi 1,08 V di Mangunharjo, atau 75,9%. Tegangan juga turun pada pasangan titik yang lebih jauh. Pola tersebut mengikuti penyebaran arus secara radial, sehingga beda potensial antartitik mengecil ketika jarak dari elektroda bertambah. Temuan ini sejalan dengan teori distribusi potensial dan studi yang menunjukkan pengaruh kuat resistivitas serta model lapisan tanah terhadap tegangan permukaan [2], [12], [13].

3.3. Evaluasi acuan keselamatan dan implikasi praktis

Tabel 6. Evaluasi hasil maksimum terhadap acuan yang digunakan dalam penelitian

Parameter	Hasil maksimum	Acuan	Evaluasi
Tegangan permukaan, 1,0 m	4,48 V	50 V	Di bawah acuan pada kondisi uji
Tegangan permukaan, 1,5 m	1,08 V	50 V	Di bawah acuan pada kondisi uji
Resistansi Pantai Marina, 1,5 m	0,35 Ω	5 Ω	Memenuhi
Resistansi Mangunharjo, 1,5 m	6,31 Ω	5 Ω	Belum memenuhi

Seluruh tegangan terukur berada di bawah 50 V. Namun, hasil tersebut tidak boleh digeneralisasi menjadi aman untuk semua gangguan. Arus injeksi maksimum hanya 1 A, sedangkan arus gangguan aktual dapat jauh lebih besar. IEEE Std 80 menilai tegangan yang dapat ditoleransi berdasarkan durasi gangguan, resistivitas lapisan permukaan, dan parameter tubuh [11]. Karena parameter itu tidak diukur, tabel hanya menunjukkan kesesuaian terhadap acuan sederhana pada kondisi eksperimen, bukan sertifikasi keselamatan instalasi.

Untuk penerapan praktis, kedalaman 1,5 m efektif memperbaiki kedua indikator, tetapi rekomendasi berbeda menurut lokasi. Konfigurasi Pantai Marina telah memenuhi target 5 Ω . Konfigurasi Mangunharjo masih memerlukan modifikasi desain dan pengukuran ulang. Pengguna juga harus memastikan kontinuitas konduktor proteksi, perangkat pemutus bekerja dalam waktu yang ditentukan, dan pengujian berkala dilakukan sesuai ketentuan instalasi.

3.4. Keterbatasan penelitian

Penelitian belum mencatat spesifikasi lengkap elektroda dan alat, belum mengukur resistivitas, kadar air, suhu, dan struktur lapisan tanah, serta belum menyajikan data individual dari lima pengulangan. Error bar dan uji beda inferensial tidak dapat dihitung dari nilai rata-rata saja. Arus uji juga tidak merepresentasikan gangguan hubung singkat aktual. Penelitian lanjutan perlu memakai metode Wenner empat titik untuk resistivitas, mencatat kondisi lingkungan, menyimpan seluruh data ulangan, melaporkan simpangan baku dan interval kepercayaan, serta memvalidasi tegangan sentuh dan langkah menggunakan parameter IEEE Std 80 yang lengkap.

4. KESIMPULAN

Kedalaman elektroda dan karakteristik lokasi memengaruhi resistansi pentanahan dan distribusi tegangan permukaan. Peningkatan kedalaman dari 1,0 menjadi 1,5 m menurunkan resistansi sebesar 75,0% di Pantai Marina dan 38,1% di Mangunharjo. Pada arus 1,0 A, tegangan titik 1–2 turun sebesar 75,0% dan 75,9% pada masing-masing lokasi. Pantai Marina memenuhi target resistansi 5 Ω pada kedua kedalaman, sedangkan Mangunharjo belum memenuhi target meskipun menggunakan kedalaman 1,5 m. Seluruh tegangan terukur berada di bawah 50 V dalam rentang uji 0,2–1,0 A. Hasil ini mendukung penggunaan elektroda lebih dalam untuk menurunkan resistansi dan gradien potensial, tetapi kedalaman yang lebih efektif harus ditentukan berdasarkan pengukuran setempat. Temuan ini menunjukkan bahwa rekomendasi kedalaman elektroda rumah tinggal tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan kedalaman pemasangan, tetapi harus mempertimbangkan hasil pengukuran listrik pada setiap lokasi. Pada lokasi dengan resistansi tinggi, elektroda 1,5 m harus dikombinasikan dengan perbaikan desain dan verifikasi ulang. Kesimpulan keselamatan tidak berlaku untuk arus gangguan aktual sebelum parameter IEEE Std 80 diuji secara lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Ghoneim, H. Hirsch, A. Elmorshedy, and R. Amer, “Surface potential calculation for grounding grids,” in *Proc. IEEE International Power and Energy Conference (PECon 2006)*, Putrajaya, Malaysia, Nov. 2006, pp. 501–505, doi: 10.1109/PECON.2006.346703.
- [2] S. Ghoneim, H. Hirsch, A. Elmorshedy, and R. Amer, “Effect of profile location on step and touch voltages of grounding grids,” in *Proc. 11th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON 2006)*, El-Minia, Egypt, Dec. 2006, pp. 228–233.
- [3] A. G. Leal, A. E. Lazzaretti, and H. L. López-Salamanca, “A systematic review on grounding impedance measurement in electrical installations,” *Electric Power Systems Research*, vol. 214, Part B, Art. no. 108953, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108953.
- [4] D. S. Gazzana, A. S. Bretas, G. A. D. Dias, M. Telló, and C. Christopoulos, “Contribution to the study of human safety against lightning considering the grounding system influence and the variations of the associated parameters,” in *Proc. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Vienna, Austria, 2012, doi: 10.1109/ICLP.2012.6344290.
- [5] J. A. Güemes-Alonso, F. E. Hernando-Fernández, F. Rodríguez-Bona, and J. M. Ruiz-Moll, “A practical approach for determining the ground resistance of grounding grids,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1261–1266, Jul. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2006.874121.
- [6] T. Ta’ali, H. Hambali, A. B. Pulungan, and C. D. Piliya Reza, “Evaluasi sistem grounding di Gedung Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang,” *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 2, no. 2, pp. 289–293, 2021, doi: 10.24036/jtein.v2i2.188.
- [7] S. B. Kurniawan, C. Widyastuti, and S. Purwanto, “Analisis efektivitas sistem grounding bangunan pada kawasan perguruan tinggi IT PLN untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan instalasi listrik,” *Inovasi Pembangunan – Jurnal Kelitbangan*, vol. 14, no. 1, pp. 1–10, 2026.
- [8] A. Raizer et al., “A comparative analysis of grounding in different structures: Operational vs. finite element method models,” *Electric Power Systems Research*, vol. 230, 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2024.110243.

- [9] A. O. Ganongo, R. Gomba, Nianga-Apila, L. L. A. Obita, B. J. L. Makanga, M. Gogom, and G. Ganga, "Influence of electrode spacing on grounding resistances in electrical networks for effective lightning protection," *Advances in Technology Innovation*, vol. 11, no. 2, pp. 140–149, 2026, doi: 10.46604/aiti.2026.15895.
- [10] I. Ismujianto, I. Isdawimah, S. Wardono, and W. Wartiyati, "Rancang bangun model pengujian tegangan langkah pada titik pentanahan metode rod dan metode mesh," *Jurnal Poli-Teknologi*, vol. 10, no. 2, pp. 199–207, 2011, doi: 10.32722/pt.v10i2.11.
- [11] IEEE, IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York, NY, USA: IEEE, 2013.
- [12] M. Jesenik and M. Trlep, "Testing of multi layered soil models based on data obtained from finite element models with known soil structures using metaheuristics for parameters' determination," *Applied Soft Computing*, vol. 95, 106541, 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106541.
- [13] N. Permal et al., "Effect of non-homogeneous soil characteristics on substation grounding-grid performances: A review," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 16, 7468, 2021, doi: 10.3390/app11167468.
- [14] M. Wahba, M. Abdel-Salam, M. Nayel, and H. A. Ziedan, "Experimental characterization of contact resistance of desert soil with waste-enhancement materials in grounding systems," *Results in Engineering*, vol. 23, 102707, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102707.
- [15] H. Kwon, Y. Kil, and S. Kim, "A method for grounding resistance calculation of vertical electrode," *Electric Power Systems Research*, vol. 224, Art. no. 109718, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109718.