

Trainer Kit Tegangan Langkah Berbasis Arus Gangguan Sebagai Media Pembelajaran Sistem Penumian

Anton Firmansyah^{a)}, Muhammad Noer^{b)}, Indah Susanti^{b)}, Andri Suyadi^{a)}, Siti Khofifah^{*b)}, Nabila Shada^{b)}

(Received 27 Januari 2026 || Revised 27 Juni 2026 || Published 9 Juli 2026)

Abstract: Human safety and electrical equipment reliability in power installations are strongly influenced by step voltage generated by fault currents flowing into the ground. The resulting ground potential distribution, which depends on fault current magnitude, grounding system characteristics, soil resistivity, and distance from the fault point, determines the level of electrical hazard to humans. This study aims to design, develop, and evaluate a step voltage trainer kit based on fault current injection as a practical learning media for understanding grounding system behavior and electrical safety principles. The research methodology involved field measurement of grounding electrode resistance, calculation of soil resistivity, design and fabrication of the trainer kit, and experimental testing under various fault current levels and measurement distances, both with and without a grounding system. Experimental results indicate that step voltage reaches its maximum value at locations closest to the fault point and decreases significantly with increasing distance, while the measured fault current remains relatively stable across different distances. The application of a low-resistance grounding system effectively reduces step voltage and flattens the ground potential gradient, thereby mitigating electrical hazard risks. The integration of field-based grounding resistance data into the soil simulator enables the trainer kit to realistically represent actual installation conditions. These findings demonstrate that the developed step voltage trainer kit provides a reliable, empirical, and safe educational platform for visualizing the relationship between fault current, soil resistivity, grounding systems, and step voltage hazards in electrical power installations.

Keywords: Step voltage, trainer kit, grounding system, electrical safety, fault current, educational practicum.

1. Pendahuluan

Keselamatan pada instalasi tenaga listrik menjadi faktor utama dalam menjaga keandalan sistem dan melindungi manusia dari risiko sengatan listrik. Salah satu fenomena kritis adalah tegangan langkah (*step voltage*), yaitu beda potensial antara dua titik pada permukaan tanah akibat aliran arus gangguan ke bumi. Kondisi ini dapat menyebabkan arus mengalir melalui tubuh manusia ketika berada pada zona gradien potensial tinggi. Tingkat risiko dipengaruhi oleh besar arus gangguan, lintasan arus, dan durasi paparan [1], [2], [3], [4], [5]. Studi juga menunjukkan bahwa distribusi potensial tanah akibat ground potential rise menjadi faktor utama dalam kejadian bahaya listrik pada sistem tenaga [4], [6].

Besarnya tegangan langkah dipengaruhi oleh arus gangguan, resistivitas tanah, struktur lapisan tanah, konfigurasi elektroda, serta jarak dari titik injeksi arus [7], [8]. Variasi karakteristik tanah dapat memperkuat atau mereduksi gradien potensial di permukaan tanah [8], [9]. Pada jarak dekat dari sumber gangguan, konsentrasi potensial cenderung tinggi, sedangkan pada jarak yang lebih jauh nilai potensial menurun secara bertahap menuju kondisi referensi tanah. Fenomena ini telah dianalisis dalam berbagai model sistem penumian modern untuk meningkatkan aspek keselamatan instalasi [9], [10].

Dalam Jurusan Teknik Elektro Khususnya Program Studi Teknik Listrik, pemahaman konsep distribusi potensial tanah tidak cukup hanya melalui teori. Pembelajaran berbasis eksperimen dibutuhkan untuk memperkuat pemahaman konseptual mahasiswa. Pendekatan laboratorium dan simulasi terbukti meningkatkan kemampuan analisis sistem tenaga, khususnya pada topik grounding system dan keselamatan listrik [11], [12], [13]. Integrasi pembelajaran berbasis praktik memungkinkan mahasiswa memahami hubungan antara variabel arus, jarak, dan distribusi tegangan secara langsung.

Penelitian terkait sistem penumian telah banyak membahas evaluasi tegangan keselamatan pada gardu induk, pengaruh perubahan sistem terhadap kinerja grounding, serta karakteristik tanah

terhadap resistansi penumian [10], [14], [15]. Studi lain menunjukkan bahwa konfigurasi elektroda dan kondisi tanah berpengaruh signifikan terhadap distribusi potensial dan impedansi sistem penumian [8], [9]. Namun, penelitian yang menggabungkan pengukuran lapangan, injeksi arus gangguan rendah, dan visualisasi distribusi tegangan langkah dalam satu media praktikum masih terbatas [13].

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kebutuhan pengembangan media pembelajaran yang mampu mengintegrasikan injeksi arus gangguan bertegangan rendah, pengukuran parameter penumian, serta visualisasi distribusi tegangan langkah dalam satu sistem yang aman digunakan di laboratorium. Pendekatan ini memungkinkan analisis hubungan antara arus injeksi, kondisi penumian, jarak pengukuran, dan perubahan potensial tanah secara langsung dan terukur.

Kebutuhan akan media pembelajaran yang interaktif merupakan menjadi dasarnya kesenjangan tersebut, penelitian ini mengembangkan trainer kit tegangan langkah berbasis arus gangguan yang mengintegrasikan data resistansi penumian aktual dengan simulator distribusi potensial tanah. Trainer ini dirancang untuk merepresentasikan pengaruh variasi arus gangguan, konfigurasi sistem penumian, dan jarak pengukuran terhadap distribusi tegangan langkah secara realistis. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai media demonstrasi, tetapi juga sebagai media eksperimen untuk memahami fenomena grounding secara aplikatif.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, merealisasikan, dan mengevaluasi kinerja trainer kit tegangan langkah berbasis arus gangguan sebagai media pembelajaran sistem penumian. Evaluasi dilakukan melalui pengujian distribusi tegangan langkah pada berbagai variasi arus gangguan dan konfigurasi penumian untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merepresentasikan karakteristik potensial tanah serta mendukung pembelajaran pada mata kuliah Sistem Penumian dan Keselamatan Instalasi Listrik.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun berbasis

*Korespondensi: khofifah8siti@gmail.com

a) Prodi DIV Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia

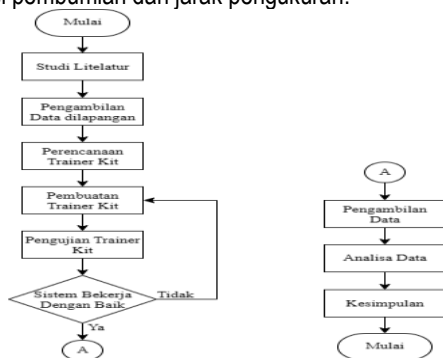
b) Prodi DIII Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia

eksperimen untuk mengembangkan trainer kit tegangan langkah. Tahapan penelitian mencakup pengukuran kondisi pembumian di lapangan, perancangan dan fabrikasi perangkat, pengujian fungsi, serta pengujian tegangan langkah pada kondisi dengan dan tanpa sistem pembumian. Parameter keluaran yang diamati adalah arus gangguan (I_g) dan tegangan langkah (V_{step}) pada setiap zona pengukuran. Pendekatan ini digunakan agar karakteristik distribusi potensial dapat diamati secara aman, terukur, dan dapat direplikasi di laboratorium [1], [3].

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui tahapan yang berurutan, yaitu identifikasi parameter sistem pembumian, pengukuran lapangan, perancangan trainer kit, fabrikasi dan perakitan perangkat, pengujian fungsi, serta analisis data hasil pengukuran. Pengukuran lapangan dilakukan untuk memperoleh nilai resistansi elektroda pembumian yang digunakan sebagai dasar penetapan resistansi ekuivalen pada simulator tanah. Selanjutnya, trainer kit dirancang dengan variasi konfigurasi pembumian dan jarak pengukuran, sedangkan nilai arus gangguan serta titik ukur dijaga tetap agar perubahan tegangan langkah dapat dianalisis secara terukur [1], [3].

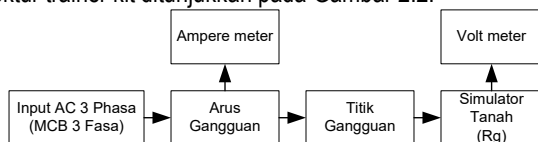
Urutan dan keterkaitan setiap tahapan penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.1. Diagram alir memperlihatkan bahwa data hasil pengukuran lapangan digunakan sebagai masukan pada tahap perancangan simulator tanah, kemudian trainer kit diuji untuk memperoleh karakteristik tegangan langkah pada setiap variasi konfigurasi pembumian dan jarak pengukuran.



GAMBAR 2.1 DIAGRAM ALIR PENGEMBANGAN TRAINER KIT

2.2 Arsitektur dan Prinsip Kerja Trainer Kit

Trainer kit dirancang untuk mensimulasikan distribusi tegangan langkah akibat injeksi arus gangguan. Sistem terdiri atas sumber tegangan, proteksi, pembatas arus, alat ukur, titik gangguan, simulator tanah multizona, dan cabang pembumian. Diagram blok arsitektur trainer kit ditunjukkan pada Gambar 2.2.



GAMBAR 2.2 DIAGRAM BLOK TRAINER KIT

Simulator tanah membentuk lima area pengukuran. Voltmeter dihubungkan pada dua titik berurutan untuk mengukur tegangan langkah setiap area [1], [3].

Pada kondisi dengan pembumian, tahanan pembumian (R_g) dihubungkan dari titik gangguan ke titik referensi simulator. Pada kondisi tanpa pembumian, cabang (R_g) dibuka. Konfigurasi ini memungkinkan perbandingan tegangan langkah pada kedua kondisi

dengan titik ukur dan setelan simulator tanah yang sama [1].

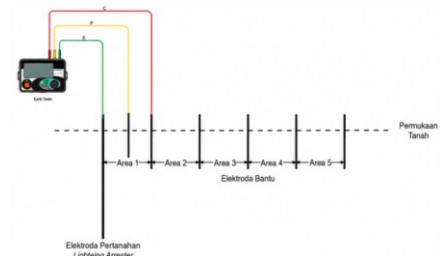
Desain fisik trainer kit yang memuat susunan panel, komponen proteksi, alat ukur, terminal pembumian, dan titik pengukuran ditunjukkan pada Gambar 2.3.



GAMBAR 2.3 DESIGN FISIK TRAINER KIT

2.3 Pengukuran Resistansi Elektroda Pembumian

Pengukuran resistansi elektroda pembumian dilakukan pada 21 Juni 2025 di Gardu Portal Gedung Laboratorium Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya. Objek uji adalah elektroda pembumian yang terhubung dengan *lightning arrester*. Pengukuran menggunakan Earth Tester Digital Kyoritsu KEW 4105A dengan metode tiga kutub [1]. Konfigurasi pengukuran tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.4.



GAMBAR 2.4 KONFIGURASI PENGUKURAN RESISTANSI PEMBUMIAN DENGAN METODE TIGA KUTUB

Pengukuran dilakukan pada dua skenario jarak, yaitu skenario 1 (S1) dan Skenario 2 (S2). Nilai resistansi hasil pengukuran digunakan sebagai dasar penentuan resistansi ekuivalen pada simulator tanah trainer kit. Data ini menunjukkan resistansi elektroda pembumian, bukan resistivitas tanah. Hasil pengukuran pada setiap area dan skenario disajikan pada Tabel 2.1

TABEL 2.1 HASIL PENGUKURAN NILAI RESISTANSI ELEKTRODA PENTANAHAN

Zona Pengukuran	Jarak S1 (m)	Resistansi S1, Rg (Ω)	Jarak S2 (m)	Resistansi S2, Rg (Ω)
Area 1	0,3	11,12	0,8	4,88
Area 2	0,6	7,243	1,6	3,27
Area 3	0,9	4,663	2,4	2,75
Area 4	1,2	3,753	3,2	2,56
Area 5	1,5	3,303	4	2,51

Nilai pada Tabel 2.1 selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter resistansi simulator tanah. Pengukuran resistivitas tanah tidak dilakukan karena membutuhkan konfigurasi khusus, seperti metode empat titik Wenner [7].

2.4 Dasar Perhitungan dan Penyetelan Simulator

Untuk elektroda batang tunggal yang ditanam secara vertikal pada tanah homogen, tahanan pembumian menggunakan Persamaan (2-1). Persamaan ini digunakan sebagai dasar konseptual hubungan antara resistivitas tanah, dimensi elektroda, dan tahanan pembumian [1], [7].

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

Dengan R_g adalah tahanan pembumian (Ω), ρ adalah resistivitas tanah ($\Omega \text{ m}$), L adalah panjang elektroda (m), dan d adalah diameter elektroda (m). Pada trainer kit, nilai R_g hasil pengukuran lapangan digunakan untuk menyeting resistansi ekuivalen simulator. Persamaan tidak digunakan untuk mengubah data resistansi pembumian menjadi resistivitas tanah tanpa pengukuran resistivitas yang terpisah.

Nilai resistor pembatas arus ditentukan berdasarkan tegangan sumber, tegangan efektif simulator, dan arus gangguan target. Rating daya resistor harus lebih besar atau sama dengan daya disipasi maksimum [3].

$$R_{lim} = \frac{V_s - V_{sim}}{I_g} \quad (2-2)$$

$$PR \geq I_g^2 R_{lim} \quad (2-3)$$

dengan R_{lim} adalah resistor pembatas arus (Ω), V_s adalah tegangan sumber (V), V_{sim} adalah tegangan efektif pada simulator (V), I_g adalah arus gangguan target (A), dan PR adalah daya minimum resistor (W).

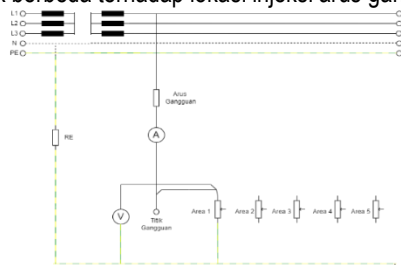
2.5 Prosedur Pengujian Tegangan Langkah

Pengujian dilakukan pada lima zona pengukuran. Pada setiap zona, voltmeter dipasang pada dua titik berurutan. Nilai tegangan langkah dihitung dari selisih mutlak potensial pada kedua titik tersebut. Parameter yang dikendalikan meliputi tegangan sumber, susunan komponen, posisi titik ukur, dan setelan simulator tanah. Variabel bebas adalah konfigurasi pembumian dan jarak titik ukur dari titik gangguan. Variabel terikat adalah arus gangguan dan tegangan langkah [1].

$$V_{step,i} = |V_i - V_{i+1}| \quad (2-4)$$

Pengujian dilakukan pada dua skenario. Skenario pertama menggunakan cabang tahanan pembumian R_g , sedangkan skenario kedua membuka cabang R_g . Pada setiap skenario, arus gangguan dicatat menggunakan amperemeter dan tegangan langkah dicatat pada setiap area. Untuk meningkatkan keterulangan, setiap kondisi pengujian sebaiknya diulang minimal tiga kali dan hasilnya dilaporkan sebagai nilai rata-rata beserta simpangan baku. Konfigurasi rangkaian pengujian yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.5. Rangkaian terdiri atas sumber tegangan, sistem pembumian, simulator tanah, amperemeter untuk mengukur arus gangguan, serta voltmeter untuk mengukur tegangan langkah pada setiap area pengujian.

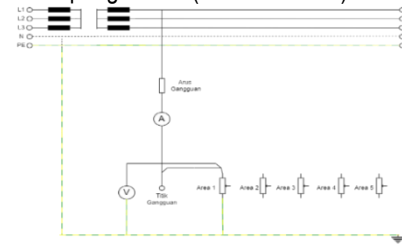
Area 1 hingga Area 5 merepresentasikan titik-titik pengukuran yang memiliki jarak berbeda terhadap lokasi injeksi arus gangguan.



GAMBAR 2.5 RANGKAIAN PENGUJIAN TEGANGAN LANGKAH DENGAN SISTEM PEMBUMIAN

Pengujian ini dilakukan untuk menganalisis distribusi tegangan langkah akibat arus gangguan pada kondisi tanpa sistem pembumian. Parameter yang diamati meliputi arus total dan tegangan langkah pada setiap zona pengukuran sebagai pembandingan terhadap kondisi dengan sistem pembumian. Konfigurasi rangkaian pengujian ditunjukkan pada Gambar 2.6,

yang terdiri atas transformator sebagai sumber tegangan, current transformer (CT), relai arus bocor (RE), amperemeter (A), voltmeter (V), serta lima area pengukuran (Area 1–Area 5).



GAMBAR 2.6 RANGKAIAN PENGUJIAN TEGANGAN LANGKAH TANPA PEMBUMIAN

2.6 Pengolahan dan Analisis Data

Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai V_{step} pada Area 1 sampai Area 5 untuk dua konfigurasi pembumian. Efektivitas sistem pembumian dapat dinyatakan sebagai persentase penurunan tegangan langkah sebagaimana Persamaan (2-5). Nilai positif menunjukkan bahwa pemasangan sistem pembumian menurunkan tegangan langkah dibandingkan kondisi tanpa sistem pembumian [1].

$$\eta_{red} = \frac{V_{step,tanpa} - V_{step,dengan}}{V_{step,tanpa}} \times 100\% \quad (2-5)$$

Hasil pengukuran disajikan dalam tabel atau grafik hubungan antara jarak pengukuran dan V_{step} . Setiap pembacaan juga dievaluasi terhadap kestabilan arus gangguan agar perbedaan tegangan langkah tidak berasal dari perubahan arus injeksi. Tata cara pengukuran, penempatan elektroda, dan evaluasi parameter pembumian mengacu pada prinsip keselamatan pembumian dan pengukuran tahanan bumi [1], [3], [7].

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi respons trainer kit tegangan langkah terhadap variasi arus injeksi dan jarak pengukuran. Data resistansi elektroda pembumian pada Bagian Metode digunakan sebagai acuan penetapan resistansi ekuivalen simulator tanah. Data tersebut tidak diinterpretasikan sebagai resistivitas tanah karena pengukurannya menggunakan metode tiga kutub, bukan konfigurasi empat titik Wenner [4].

3.1 Hasil Pengujian dengan Sistem Pembumian

Pada kondisi ini, cabang sistem pembumian dengan resistansi pembumian sebesar $2,2 \Omega$ dihubungkan pada rangkaian simulator. Pengujian dilakukan pada arus setel $0,50 \text{ A}$ dan $0,60 \text{ A}$, dengan S1 pada jarak $0,3\text{--}1,5 \text{ m}$ serta S2 pada jarak $0,8\text{--}4,0 \text{ m}$.

Untuk menunjukkan hasil pengukuran secara rinci, Tabel 3.1 menyajikan nilai jarak, arus total, dan tegangan langkah pada kondisi dengan sistem pembumian. Tabel ini memuat dua skenario pengukuran, yaitu S1 dan S2, pada masing-masing arus setel. Penyajian data tersebut bertujuan untuk memperlihatkan perubahan tegangan langkah terhadap jarak sekaligus menunjukkan kestabilan arus total selama pengujian.

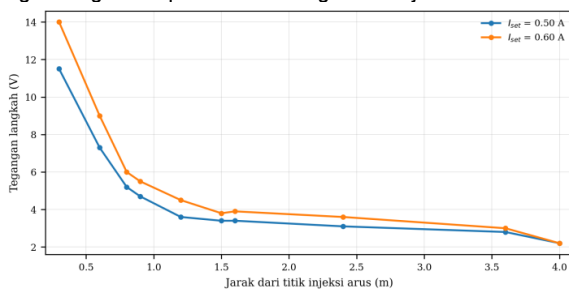
TABEL 3.1 HASIL PENGUJIAN TEGANGAN LANGKAH DENGAN SISTEM PEMBUMIAN

Kondisi Pengujian	Zona	Jarak (m)	Arus Total (A)	Tegangan (V)
$I = 0,50 \text{ A}$; jarak awal $0,3 \text{ m}$	Area 1	0,3	0,45	11,5
	Area 2	0,6	0,46	7,3
	Area 3	0,9	0,47	4,7
	Area 4	1,2	0,47	3,6
	Area 5	1,5	0,48	3,4
$I = 0,50 \text{ A}$; jarak awal $0,8 \text{ m}$	Area 1	0,8	0,476	5,2
	Area 2	1,6	0,48	3,4
	Area 3	2,4	0,485	3,1

	Area 4	3,6	0,485	2,8
	Area 5	4	0,486	2,2
$I = 0,60 \text{ A}$; jarak awal 0,3 m	Area 1	0,3	0,55	14
	Area 2	0,6	0,56	9
	Area 3	0,9	0,57	5,5
	Area 4	1,2	0,57	4,5
	Area 5	1,5	0,58	3,8
$I = 0,60 \text{ A}$; jarak awal 0,8 m	Area 1	0,8	0,571	6
	Area 2	1,6	0,577	3,9
	Area 3	2,4	0,577	3,6
	Area 4	3,6	0,579	3
	Area 5	4	0,583	2,2

Berdasarkan Tabel 3.1, pada arus setel 0,50 A tegangan langkah tertinggi sebesar 11,5 V tercatat pada jarak 0,3 m, kemudian menurun menjadi 3,4 V pada 1,5 m dan 2,2 V pada 4,0 m. Pada arus setel 0,60 A, tegangan langkah tertinggi sebesar 14,0 V juga terjadi pada jarak 0,3 m, lalu menurun menjadi 3,8 V pada 1,5 m dan 2,2 V pada 4,0 m. Arus total berada pada rentang 0,450–0,486 A untuk arus setel 0,50 A dan 0,550–0,583 A untuk arus setel 0,60 A.

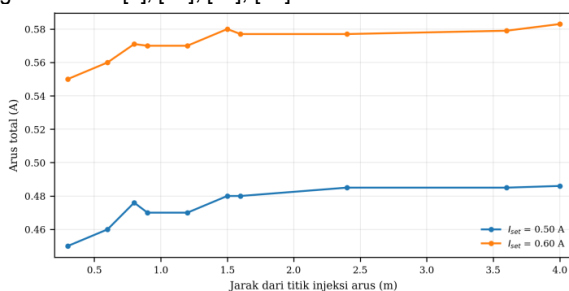
Untuk mempermudah pembacaan pola perubahan tegangan langkah terhadap jarak, hasil pada Tabel 3.1 kemudian divisualisasikan dalam Gambar 3.1. Gambar ini memperlihatkan hubungan antara tegangan langkah dan jarak pengukuran pada dua arus setel yang diuji. Dengan grafik ini, kecenderungan penurunan tegangan langkah dapat diamati dengan lebih jelas.



GAMBAR 3.1 HUBUNGAN TEGANGAN LANGKAH TERHADAP JARAK DENGAN SISTEM PEMBUMIAN

Selain tegangan langkah, kestabilan arus total juga perlu ditunjukkan agar dapat dipastikan bahwa perubahan tegangan terutama dipengaruhi oleh distribusi potensial, bukan oleh fluktuasi arus injeksi. Oleh karena itu, Gambar 3.2 menyajikan hubungan antara arus total dan jarak pada kondisi dengan sistem pembumian. Grafik ini digunakan untuk menunjukkan bahwa arus total selama pengujian tetap relatif stabil pada setiap titik pengukuran.

Berdasarkan Tabel 3.1, Gambar 3.1, dan Gambar 3.2, dapat dilihat bahwa tegangan langkah menurun seiring bertambahnya jarak dari titik injeksi arus. Peningkatan arus setel dari 0,50 A menjadi 0,60 A juga meningkatkan tegangan langkah pada seluruh titik pengukuran. Secara teoritis, pola tersebut terjadi karena kenaikan arus injeksi meningkatkan kenaikan potensial tanah, sedangkan gradien potensial terbesar terkonsentrasi di sekitar elektroda dan berkurang ketika arus menyebar ke volume tanah yang lebih luas. [1], [10], [11], [16].



GAMBAR 3.2 HUBUNGAN ARUS TOTAL TERHADAP JARAK DENGAN SISTEM PEMBUMIAN

3.2 Hasil Pengujian tanpa Sistem Pembumian

Pengujian tanpa sistem pembumian dilakukan menggunakan konfigurasi rangkaian yang sama, tetapi tanpa cabang pembumian beresistansi rendah. Variasi arus setel dan jarak pengukuran dipertahankan sama dengan kondisi pada Subbab 3.1 agar hasil kedua konfigurasi dapat dibandingkan secara langsung.

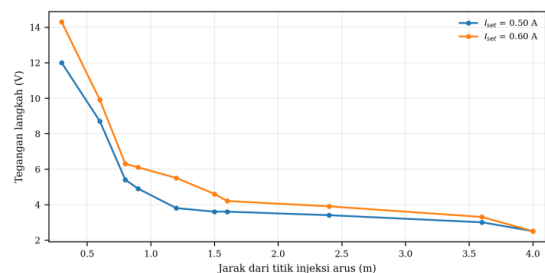
Untuk menunjukkan respons tegangan langkah pada kondisi tanpa sistem pembumian, Tabel 3.2 menyajikan nilai jarak pengukuran, arus total, dan tegangan langkah pada dua skenario, yaitu S1 dan S2. Data tersebut digunakan untuk melihat perubahan tegangan langkah terhadap jarak ketika jalur pembumian beresistansi rendah tidak digunakan.

TABEL 3.2 HASIL PENGUJIAN TEGANGAN LANGKAH TANPA SISTEM PEMBUMIAN

Kondisi Pengujian	Zona	Jarak (m)	Arus Total (A)	Tegangan (V)
$I = 0,50 \text{ A}$; jarak awal 0,3 m	Area 1	0,3	0,472	12
	Area 2	0,6	0,478	8,7
	Area 3	0,9	0,48	4,9
	Area 4	1,2	0,487	3,8
	Area 5	1,5	0,487	3,6
$I = 0,50 \text{ A}$; jarak awal 0,8 m	Area 1	0,8	0,479	5,4
	Area 2	1,6	0,483	3,6
	Area 3	2,4	0,486	3,4
	Area 4	3,6	0,489	3
	Area 5	4	0,49	2,5
$I = 0,60 \text{ A}$; jarak awal 0,3 m	Area 1	0,3	0,552	14,3
	Area 2	0,6	0,564	9,9
	Area 3	0,9	0,571	6,1
	Area 4	1,2	0,576	5,5
	Area 5	1,5	0,58	4,6
$I = 0,60 \text{ A}$; jarak awal 0,8 m	Area 1	0,8	0,577	6,3
	Area 2	1,6	0,581	4,2
	Area 3	2,4	0,581	3,9
	Area 4	3,6	0,583	3,3
	Area 5	4	0,586	2,5

Berdasarkan Tabel 3.2, pada arus setel 0,50 A, tegangan langkah tertinggi sebesar 12,0 V diperoleh pada jarak 0,3 m. Nilai tersebut kemudian menurun menjadi 3,6 V pada jarak 1,5 m dan 2,5 V pada jarak 4,0 m. Pada arus setel 0,60 A, tegangan langkah tertinggi sebesar 14,3 V juga terjadi pada jarak 0,3 m, lalu menurun menjadi 4,6 V pada jarak 1,5 m dan 2,5 V pada jarak 4,0 m. Arus total berada pada rentang 0,472 sampai 0,490 A untuk arus setel 0,50 A serta 0,552 sampai 0,586 A untuk arus setel 0,60 A.

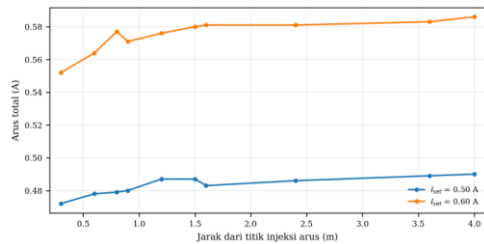
Untuk memperjelas pola perubahan tegangan langkah terhadap jarak, data pada Tabel 3.2 divisualisasikan pada Gambar 3.3. Gambar ini membandingkan nilai tegangan langkah pada arus setel 0,50 A dan 0,60 A. Grafik tersebut memudahkan pengamatan terhadap distribusi tegangan langkah pada kondisi tanpa sistem pembumian.



GAMBAR 3.3 HUBUNGAN TEGANGAN LANGKAH TERHADAP JARAK TANPA SISTEM PEMBUMIAN

Selain tegangan langkah, arus total juga perlu ditampilkan untuk

menunjukkan bahwa perubahan nilai tegangan tidak terutama disebabkan oleh perubahan arus injeksi. Oleh sebab itu, Gambar 3.4 menyajikan hubungan antara arus total dan jarak pengukuran pada kondisi tanpa sistem pembumian. Grafik ini digunakan untuk memeriksa kestabilan arus total selama pengujian.



GAMBAR 3.4 HUBUNGAN ARUS TOTAL TERHADAP JARAK TANPA SISTEM PEMBUMIAN

Berdasarkan Tabel 3.2, Gambar 3.3, dan Gambar 3.4, tegangan langkah tanpa sistem pembumian cenderung menurun ketika jarak dari titik injeksi arus bertambah. Arus total tetap relatif mendekati nilai arus setel pada setiap titik pengukuran. Hasil ini menunjukkan bahwa pola penurunan tegangan terutama berkaitan dengan perubahan distribusi potensial terhadap jarak dari titik injeksi arus.

3.3 Perbandingan Hasil Pengujian

Perbandingan hasil pengujian dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh sistem pembumian terhadap nilai tegangan langkah pada titik jarak yang sama. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran pada kondisi dengan dan tanpa sistem pembumian untuk setiap arus setel.

Untuk menentukan besarnya penurunan tegangan langkah akibat penggunaan sistem pembumian, persentase reduksi dihitung menggunakan Persamaan (2-5). Dalam persamaan tersebut, $V_{step, tanpa}$ merupakan tegangan langkah pada kondisi tanpa sistem pembumian, sedangkan $V_{step, dengan}$ merupakan tegangan langkah pada kondisi dengan sistem pembumian.

Hasil perbandingan kedua konfigurasi dirangkum dalam Tabel 3.3. Tabel ini menyajikan nilai rata-rata tegangan langkah, nilai tegangan langkah maksimum, persentase reduksi rata-rata, serta arus total rata-rata pada arus setel 0,50 A dan 0,60 A. Ringkasan tersebut digunakan untuk menunjukkan perubahan kinerja trainer kit setelah sistem pembumian dihubungkan.

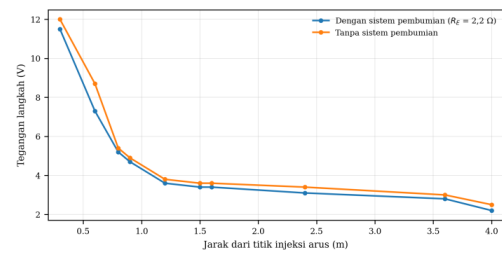
Berdasarkan Tabel 3.3, sistem pembumian menurunkan tegangan langkah rata-rata sebesar 7,19% pada arus setel 0,50 A dan 9,73% pada arus setel 0,60 A. Tegangan langkah maksimum juga lebih rendah pada kondisi dengan sistem pembumian. Pada arus setel 0,50 A, nilai maksimum menurun dari 12,0 V menjadi 11,5 V. Pada arus setel 0,60 A, nilai maksimum menurun dari 14,3 V menjadi 14,0 V.

TABEL 3.3 RINGKASAN PERBANDINGAN HASIL PENGUJIAN DENGAN DAN TANPA SISTEM PEMBUMIAN

Arus setel (A)	Vstep rata-rata dengan (V)	Vstep rata-rata tanpa (V)	Reduksi rata-rata (%)	Vstep maks. dengan (V)	Vstep maks. tanpa (V)	Arus total rata-rata dengan/tanpa (A)
0.50	4.72	5.09	7.19	11.5	12.0	0.474/0.483
0.60	5.55	6.06	9.73	14.0	14.3	0.572/0.575

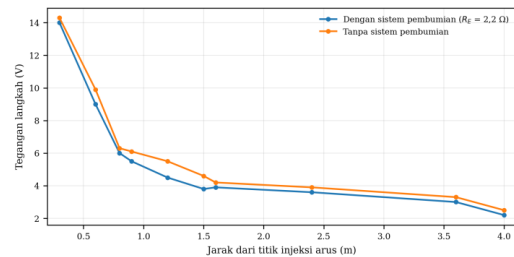
Keterangan: Nilai rata-rata dihitung dari sepuluh titik pengukuran pada masing-masing arus setel.

Untuk melihat perbedaan tegangan langkah pada setiap titik pengukuran saat arus setel 0,50 A, Gambar 3.5 menyajikan perbandingan antara kondisi dengan dan tanpa sistem pembumian. Grafik ini digunakan untuk menunjukkan perubahan tegangan langkah pada seluruh titik jarak pengukuran.



GAMBAR 3.5 PERBANDINGAN TEGANGAN LANGKAH DENGAN DAN TANPA SISTEM PEMBUMIAN PADA ARUS SETEL 0,50 A

Selanjutnya, untuk mengevaluasi konsistensi pengaruh sistem pembumian pada arus yang lebih tinggi, Gambar 3.6 menyajikan perbandingan tegangan langkah pada arus setel 0,60 A. Grafik ini menunjukkan apakah penurunan tegangan langkah tetap terjadi ketika arus injeksi dinaikkan.



GAMBAR 3.6 PERBANDINGAN TEGANGAN LANGKAH DENGAN DAN TANPA SISTEM PEMBUMIAN PADA ARUS SETEL 0,60 A

Berdasarkan Tabel 3.3, Gambar 3.5, dan Gambar 3.6, tegangan langkah pada kondisi tanpa sistem pembumian lebih tinggi daripada kondisi dengan sistem pembumian pada seluruh titik yang dibandingkan. Selisih arus total rata-rata pada kedua konfigurasi juga relatif kecil. Oleh karena itu, penurunan tegangan langkah dapat dikaitkan dengan perubahan konfigurasi pembumian pada trainer kit.

Secara kualitatif, hasil tersebut mendukung fungsi pembumian sebagai jalur pelepasan arus gangguan dan pengendali gradien potensial di sekitar titik injeksi [1], [3], [17] [18]. Namun, hasil pengujian trainer kit tidak dapat digunakan secara langsung untuk menyatakan bahwa suatu instalasi lapangan telah memenuhi batas keselamatan tegangan langkah. Evaluasi pada instalasi nyata tetap perlu mempertimbangkan arus gangguan aktual, durasi gangguan, resistivitas lapisan permukaan, serta parameter tubuh manusia sesuai ketentuan IEEE Std 80 dan IEC 60479-1 [1], [2].

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan menguji trainer kit tegangan langkah berbasis arus gangguan sebagai media praktikum sistem pembumian. Nilai resistansi elektroda pembumian hasil pengukuran lapangan digunakan sebagai acuan untuk menetapkan resistansi ekuivalen pada simulator tanah. Nilai tersebut tidak digunakan sebagai nilai resistivitas tanah karena pengukurannya dilakukan menggunakan metode tiga kutub. Pengujian pada arus setel 0,50 A dan 0,60 A menunjukkan bahwa tegangan langkah tertinggi selalu terjadi pada titik yang paling dekat dengan lokasi injeksi arus, kemudian menurun seiring bertambahnya jarak pengukuran. Arus total pada setiap pengujian juga relatif stabil, sehingga perubahan tegangan langkah terutama menunjukkan pengaruh jarak dan konfigurasi pembumian.

Pemasangan cabang sistem pembumian dengan resistansi 2,2 Ω menghasilkan tegangan langkah yang lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa sistem pembumian pada seluruh titik pengukuran.

Pada arus setel 0,50 A, sistem pembumian menurunkan tegangan langkah rata-rata dari 5,09 V menjadi 4,72 V atau sebesar 7,19%. Pada arus setel 0,60 A, tegangan langkah rata-rata turun dari 6,06 V menjadi 5,55 V atau sebesar 9,73%. Tegangan langkah maksimum juga menurun, yaitu dari 12,0 V menjadi 11,5 V pada arus setel 0,50 A dan dari 14,3 V menjadi 14,0 V pada arus setel 0,60 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa trainer kit mampu memperagakan hubungan antara arus injeksi, jarak pengukuran, sistem pembumian, dan perubahan tegangan langkah secara aman dalam kegiatan laboratorium.

Trainer kit ini dapat digunakan sebagai media pembelajaran untuk membantu mahasiswa memahami distribusi potensial dan fungsi sistem pembumian terhadap tegangan langkah. Namun, hasil pengujian pada trainer kit tidak dapat digunakan secara langsung untuk menyatakan tingkat keselamatan suatu instalasi pembumian di lapangan karena belum memasukkan parameter arus gangguan aktual, waktu pemutusan gangguan, karakteristik tanah berlapis, resistivitas lapisan permukaan, dan parameter fisiologis manusia.

Untuk pengembangan selanjutnya, pengujian perlu dilakukan dengan pengulangan minimal tiga kali pada setiap kondisi agar nilai rata-rata dan simpangan baku dapat dilaporkan. Pengembangan juga dapat mencakup variasi nilai resistansi pembumian, konfigurasi elektroda yang berbeda, simulator tanah berlapis, serta penambahan sistem akuisisi data digital. Selain itu, efektivitas trainer kit sebagai media pembelajaran perlu diuji melalui validasi ahli dan pengukuran peningkatan pemahaman mahasiswa sebelum dan sesudah praktikum.

Referensi

- [1] IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000), Incorporating IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, May 2015.
- [2] IEC 60479-1:2018, *Effects of Current on Human Beings and Livestock—Part 1: General Aspects*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2018.
- [3] Badan Standardisasi Nasional, *Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020—Bagian 5-54: Pemilihan dan Pemasangan Peralatan Listrik—Susunan Pembumian dan Konduktor Proteksi*, SNI 0225-5-54:2020.
- [4] M. Nassereddine, A. Hellany, J. Risk, T. Famakinwa, and M. Nagria, "Advanced earth grid monitoring for HV network safety compliance," *Aust. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 22, no. 3, pp. 504–517, Jul. 2025, doi: 10.1080/1448837X.2024.2414476.
- [5] M. Alexandru, L. Czumbil, A. Polycarpou, H. Nouri, R. Andolfato, and D. D. Micu, "Mitigation of transient ground potential rise in gas insulated substations during very fast transient overvoltage," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 207, p. 107824, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.107824.
- [6] M. Nazari, R. Moini, S. Fortin, F. P. Dawalibi, and F. Rachidi, "Impact of Frequency-Dependent Soil Models on Grounding System Performance for Direct and Indirect Lightning Strikes," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, no. 1, pp. 134–144, Feb. 2021, doi: 10.1109/TEMC.2020.2986646.
- [7] 81-2025 - *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. IEEE, 2025.
- [8] O. E. Gouda, A. Z. El Dein, S. Yassin, M. Lehtonen, and M. M. F. Darwish, "Investigation of soil resistivity impacts on the electrodes of grounding system subjected to lightning strikes," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 18, no. 21, pp. 3392–3406, Nov. 2024, doi: 10.1049/gtd2.13287.
- [9] H. Farooq, W. Ali, H. Iqbal, A. Rasool, I. A. Sajjad, and A. A. Noon, "Evaluation of the Safety Performance of a 500-kV AC Substation Grounding Using IEEE Standard 80-2013," *ELECTRICA*, vol. 21, no. 2, pp. 225–234, May 2021, doi: 10.5152/electrica.2021.20086.
- [10] X.-B. Nguyen, N.-N. Nguyen, and P.-T. Vu, "Numerical Simulation of Potential Distribution in Grounding Systems Using the Finite Difference Matrix Operators Approach with Non-Uniform Mesh," *Energies*, vol. 18, no. 21, p. 5780, Nov. 2025, doi: 10.3390/en18215780.
- [11] F. Qiu, J. Cao, Y. Ding, Y. Du, and Z. Du, "Simulation of Ground Potential Distribution around Grounding Grids using a PEEC Method," in *2022 IEEE/IAS 58th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, Las Vegas, NV, USA: IEEE, May 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICPS54075.2022.9773799.
- [12] M. Parhamfar, A. F. Güven, M. Bajaj, and M. S. Geremew, "Optimized grounding design for 220/110 kV substations using CYMGRD: A simulation-based approach for safe and cost-efficient energy infrastructure," *Energy Explor. Exploit.*, vol. 44, no. 4, pp. 2072–2096, Jul. 2026, doi: 10.1177/01445987261417706.
- [13] S. Alsaleh, A. Tepljakov, A. Kose, J. Belikov, and E. Petlenkov, "ReImagined Lab: Bridging the Gap Between Hands-On, Virtual and Remote Control Engineering Laboratories Using Digital Twins and Extended Reality," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 89924–89943, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3199371.
- [14] Y. Dan, J. Yin, J. Yang, and H. Yang, "Influence analysis of calculated horizontally layered soil parameters on grounding parameters," *High Volt.*, vol. 8, no. 2, pp. 421–430, Apr. 2023, doi: 10.1049/hve2.12257.
- [15] N. Permal, M. Osman, A. M. Ariffin, and M. Z. Abidin Ab Kadir, "Effect of Non-Homogeneous Soil Characteristics on Substation Grounding-Grid Performances: A Review," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 16, p. 7468, Aug. 2021, doi: 10.3390/app11167468.
- [16] J. Liu, "Analysis of Current Density in Soil for Resistivity Measurements and Electrical Grounding Designs," *J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 5, p. 198, 2017, doi: 10.11648/j.jee.20170505.17.
- [17] H. Budiman and B. Sirait, "Evaluasi Tegangan Sentuh Tegangan Langkah Dan Tegangan Pindah Gigit 275 Kvbengkayang," <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/j3eituntan/issue/view/1371>, <https://doi.org/10.26418/j3eit.v8i2>.
- [18] Eva Kurnia Yulyawan and Mas Ahmad Baihaqi, "Studi Evaluasi Pengetanahan Gardu Induk Dengan Adanya Perubahan Tegangan Sistem Dari 70 kV Menjadi 150 kV," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 9, no. 1, pp. 18–23, Feb. 2023, doi: 10.33795/elposys.v9i1.607.