

ANALISIS KELAYAKAN SISTEM PENTANAHAN PADA INSTALASI LISTRIK GEDUNG MENARA BERDASARKAN PUIL 2011

Muhammad Wildan Salama¹, Priyo Adi Sesotyo², Ari Endang Jayati³

Universitas Semarang^{1,2,3}

psesotyo@usm.ac.id²

Abstract: *This study aims to analyze the feasibility of the grounding system and leakage current in the electrical installation of the Menara Building based on the Indonesian Electrical Installation Standard (PUIL) 2011. The research employed a descriptive quantitative method through direct field measurements using a Kyoritsu 4200 Earth Clamp Tester to measure grounding resistance and a clamp meter to measure leakage current in the distribution panels. The results showed that the grounding resistance value of the transformer grounding system was 11.17 Ω , exceeding the standard limit of $\leq 5 \Omega$ and therefore failing to meet the required standard. Leakage current measurements indicated that several distribution panels were classified as hazardous ($>30 \text{ mA}$), particularly those located on the 2nd, 7th, 8th, and 9th floors. In conclusion, the grounding system and several distribution panels in the Menara Building are not yet feasible according to PUIL 2011 standards and require technical improvements to enhance the safety and reliability of the electrical installation system.*

Keywords: *Electrical Installation; Grounding; Leakage Current; PUIL 2011; Grounding System*

Abstrak: Penelitian ini bertujuan menganalisis kelayakan sistem pentanahan dan kebocoran arus pada instalasi listrik Gedung Menara berdasarkan standar PUIL 2011. Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif deskriptif melalui pengukuran langsung di lapangan dengan menggunakan alat Kyoritsu 4200 Earth Clamp Tester untuk mengukur tahanan pentanahan serta clamp meter untuk mengukur kebocoran arus pada panel distribusi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tahanan pentanahan pada grounding trafo sebesar 11,17 Ω , melebihi batas standar $\leq 5 \Omega$ sehingga belum memenuhi ketentuan. Pengukuran kebocoran arus menunjukkan beberapa panel berada pada kategori berbahaya ($>30 \text{ mA}$), terutama pada lantai 2, 7, 8, dan 9. Simpulannya, sistem pentanahan dan beberapa panel distribusi pada Gedung Menara belum memenuhi kriteria kelayakan berdasarkan PUIL 2011 sehingga diperlukan perbaikan teknis untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan instalasi listrik gedung.

Kata kunci: Grounding; Instalasi Listrik; Kebocoran Arus; PUIL 2011; Sistem Pentanahan.

PENDAHULUAN

Sistem pentanahan (grounding) merupakan elemen fundamental dalam instalasi tenaga listrik yang berfungsi menyediakan jalur impedansi rendah bagi arus gangguan dan transien menuju bumi sehingga arus gangguan dapat didisipasikan secara aman, menurunkan tegangan sentuh (touch voltage), serta melindungi manusia dan peralatan listrik dari risiko sengatan listrik maupun kerusakan sistem. Wilis (2014) mengemukakan bahwa sistem

pentanahan berperan penting dalam menyediakan jalur pembuangan arus gangguan secara aman untuk melindungi manusia dan peralatan listrik.

Selain itu, sistem grounding juga memiliki peran strategis dalam melindungi peralatan listrik dan mendukung kinerja perangkat proteksi seperti Miniature Circuit Breaker, Earth Leakage Circuit Breaker, dan Residual Current Device. Parise (2012) menjelaskan bahwa sistem pentanahan

yang baik dapat meningkatkan efektivitas sistem proteksi dan keandalan instalasi tenaga listrik secara keseluruhan.

Pada instalasi listrik dengan tingkat kompleksitas tinggi seperti bangunan bertingkat, sistem grounding menjadi semakin penting karena berkaitan langsung dengan stabilitas sistem distribusi dan keselamatan operasional. Permal et al. (2020) menyatakan bahwa sistem pentanahan yang dirancang dengan baik mampu menjamin keselamatan personel, melindungi peralatan dari kerusakan akibat gangguan listrik, serta menjaga kontinuitas suplai daya dalam sistem distribusi tenaga listrik.

Efektivitas sistem grounding sangat dipengaruhi oleh nilai resistansi pembumian. Permal et al. (2021) menjelaskan bahwa resistansi pembumian yang rendah memungkinkan arus gangguan dialirkan secara cepat dan efisien ke tanah sehingga perangkat proteksi dapat bekerja secara optimal. Sebaliknya, Mestriner et al. (2021) mengemukakan bahwa kesalahan dalam desain maupun pemodelan sistem grounding dapat meningkatkan risiko gangguan operasional pada instalasi listrik.

Dalam konteks implementasi di Indonesia, Badan Standardisasi Nasional (2011) menetapkan bahwa nilai tahanan pentanahan untuk instalasi bangunan harus memenuhi persyaratan tertentu agar keselamatan instalasi listrik dapat terjamin.

Kinerja sistem pentanahan sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan karakteristik tanah. Reffin et al. (2018) menyatakan bahwa resistivitas tanah merupakan parameter dominan dalam menentukan nilai tahanan pembumian. Selanjutnya, Azmi et al. (2019)

menjelaskan bahwa perubahan kelembaban, temperatur, dan struktur lapisan tanah dapat menyebabkan fluktuasi nilai resistansi yang signifikan. Selain itu, Mohamad Nasir et al. (2021) mengemukakan bahwa konfigurasi elektroda, jumlah elektroda, dan kedalaman penanaman elektroda turut memengaruhi distribusi arus dan impedansi sistem grounding.

Perubahan kondisi tanah akibat pengaruh musim juga dapat menyebabkan perubahan nilai resistansi pembumian. Reffin et al. (2019) menyatakan bahwa perubahan resistivitas tanah yang tidak dipantau secara berkala dapat menyebabkan penurunan kinerja sistem grounding dan meningkatkan risiko keselamatan.

Penelitian mengenai sistem pentanahan telah banyak dilakukan sebelumnya. Permal et al. (2021) melakukan penelitian mengenai pengaruh desain grounding grid dan karakteristik tanah terhadap parameter keselamatan sistem pentanahan dan menemukan bahwa konfigurasi elektroda dan kondisi tanah sangat mempengaruhi nilai resistansi pentanahan serta tegangan sentuh. Selanjutnya, Sarker et al. (2025) mengembangkan optimasi performa sistem pentanahan pada instalasi listrik multi-tegangan dan menyimpulkan bahwa modifikasi konfigurasi grounding mampu meningkatkan keandalan sistem proteksi dan menurunkan resistansi pentanahan.

Namun demikian, penelitian-penelitian tersebut masih berfokus pada pemodelan dan simulasi sistem pentanahan serta belum mengevaluasi kondisi aktual sistem pentanahan pada bangunan bertingkat melalui pengukuran langsung di lapangan. Selain itu, sebagian besar penelitian

terdahulu hanya menganalisis nilai tahanan pentanahan tanpa mengkaji hubungan antara tahanan pentanahan, kebocoran arus, dan ketidakseimbangan arus pada panel distribusi.

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada evaluasi terintegrasi sistem pentanahan melalui pengukuran langsung nilai tahanan pentanahan, kebocoran arus, dan ketidakseimbangan arus pada panel distribusi serta analisis keterkaitan ketiga parameter tersebut terhadap kelayakan sistem berdasarkan standar PUIL 2011. Penelitian ini juga memberikan rekomendasi teknis berupa penerapan metode parallel grounding dan foundation grounding sebagai alternatif peningkatan kinerja sistem pentanahan pada bangunan gedung.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kelayakan sistem pentanahan pada instalasi listrik Gedung Menara melalui pengukuran nilai tahanan pentanahan, kebocoran arus, dan ketidakseimbangan arus pada panel distribusi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis guna meningkatkan keselamatan, keandalan, dan efisiensi sistem instalasi listrik pada bangunan gedung.

LANDASAN TEORI

Sistem Pentanahan (Grounding)

Sistem pentanahan (grounding system) merupakan sistem yang menghubungkan bagian tertentu dari instalasi listrik dengan bumi melalui elektroda pentanahan untuk menyediakan jalur impedansi rendah bagi arus gangguan sehingga dapat melindungi manusia dan peralatan listrik dari bahaya sengatan listrik maupun kerusakan peralatan. Parise (2012) mengemukakan bahwa sistem

pentanahan merupakan bagian penting dalam sistem proteksi tenaga listrik karena berfungsi mengalirkan arus gangguan ke bumi dan meningkatkan efektivitas perangkat proteksi.

Badan Standardisasi Nasional (2011) menetapkan bahwa nilai tahanan pentanahan pada instalasi bangunan sebaiknya tidak melebihi 5Ω agar sistem proteksi dapat bekerja secara optimal dan mampu meminimalkan risiko terjadinya tegangan sentuh serta kerusakan peralatan listrik.

Kebocoran Arus (Leakage Current)

Kebocoran arus merupakan arus yang mengalir melalui jalur yang tidak diinginkan akibat penurunan kualitas isolasi, kelembaban, kontaminasi, maupun gangguan pada sistem kelistrikan.

International Electrotechnical Commission (2024) menjelaskan bahwa arus bocor yang melebihi 30 mA dapat menimbulkan risiko sengatan listrik bagi manusia dan mengganggu kinerja sistem proteksi.

Pada penelitian ini, kebocoran arus diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu:

Normal : $\leq 3 \text{ mA}$;

Waspada : $3\text{--}30 \text{ mA}$;

Berbahaya : $> 30 \text{ mA}$.

Ketidakseimbangan Arus Tiga Fasa

Ketidakseimbangan arus (current unbalance) merupakan kondisi ketika besar arus pada masing-masing fasa tidak sama akibat distribusi beban yang tidak merata. Khan dan Ali (2023) mengemukakan bahwa ketidakseimbangan arus dapat meningkatkan rugi-rugi daya (power losses), memperbesar arus netral, serta menurunkan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik.

(PUIL) 2011 yang mensyaratkan nilai tahanan pentanahan tidak melebihi 5 Ω .

Nilai kebocoran arus diklasifikasikan menjadi kategori normal (≤ 3 mA), waspada (3–30 mA), dan berbahaya (> 30 mA) berdasarkan pertimbangan keselamatan listrik dan ambang kerja perangkat proteksi arus bocor.

Selain itu, dilakukan analisis ketidakseimbangan arus (current unbalance) pada sistem tiga fasa untuk mengevaluasi distribusi beban pada panel distribusi. Persentase ketidakseimbangan arus dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\%Unbalance = \frac{I_{max} - I_{avg}}{I_{avg}} \times 100\%$$

Dengan I_{max} merupakan arus terbesar pada salah satu fasa dan I_{avg} merupakan Hasil analisis

digunakan untuk mengevaluasi kelayakan sistem pentanahan, mengidentifikasi titik-titik kritis yang memerlukan perbaikan, serta menyusun rekomendasi teknis guna meningkatkan keselamatan, keandalan, dan efisiensi sistem instalasi listrik Gedung Menara.

HASIL PENELITIAN

Tahanan Pentanahan dan Kebocoran Arus

Pengukuran sistem pentanahan dan kebocoran arus dilakukan pada *grounding* trafo serta panel distribusi yang terdiri atas panel PP, PPAC, dan SDP pada setiap lantai Gedung Menara. Pengukuran tahanan pentanahan dilakukan menggunakan Kyoritsu 4200 Earth Clamp Tester, sedangkan pengukuran kebocoran arus dilakukan menggunakan *clamp meter*. Hasil ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1.
Hasil Pengukuran Tahanan Pentanahan dan Kebocoran Arus

No	Objek Pengukuran	Resistansi (Ω)	Kebocoran Arus (mA)	Jenis Kabel	Luas (mm^2)	Kondisi Sambungan	Keterangan
1	Grounding Trafo	11,17	9090	AAAC	8,5	Tersambung	Berbahaya
	P.P - P1	0	1,7	BC	5	Tersambung	Normal
2	PPAC - LT.1	OL	0	BC	5	Tersambung	Abnormal
	P.P - LT.1	OL	0	BC	5	Tersambung	Abnormal
	SDP LT.1	OL	1,5	BC	8	Tersambung	Abnormal
3	P.P - LT.2	5	15,9	BC	5	Tersambung	Waspada
	PPAC - LT.2	11	116	BC	5	Tersambung	Berbahaya
4	P.P - LT.3	OL	0,9	BC	8	Tersambung	Abnormal
	PPAC - LT.3	2,38	2,4	BC	5	Tersambung	Normal
5	P.P - LT.4	OL	3,9	BC	5	Tersambung	Abnormal
	PPAC - LT.4	OL	1,6	BC	5	Tersambung	Abnormal
6	P.P - LT.5	13,5	40,6	BC	5	Tersambung	Berbahaya
	PPAC - LT.5	3,51	2,8	BC	5	Tersambung	Normal
7	P.P - LT.6	0,06	2,57	BC	5	Tersambung	Normal

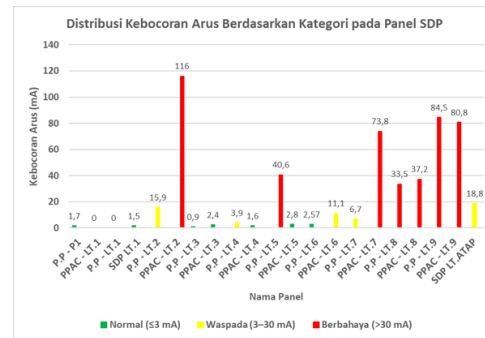
No	Objek Pengukuran	Resistansi (Ω)	Kebocoran Arus (mA)	Jenis Kabel	Luas (mm ²)	Kondisi Sambungan	Keterangan
8	PPAC - LT.6	4,96	11,1	BC	5	Tersambung	Waspada
	P.P - LT.7	5,7	6,7	BC	5	Tersambung	Waspada
	PPAC - LT.7	14,5	73,8	BC	5	Tersambung	Berbahaya
9	P.P - LT.8	13,2	33,5	BC	5	Tersambung	Berbahaya
	PPAC - LT.8	13,4	37,2	BC	5	Tersambung	Berbahaya
10	P.P - LT.9	15	84,5	BC	5	Tersambung	Berbahaya
	PPAC - LT.9	14,8	80,8	BC	5	Tersambung	Berbahaya
11	SDP LT.ATAP	12,8	18,8	BC	5	Tersambung	Waspada

Berdasarkan hasil pengukuran, nilai tahanan pentanahan pada grounding trafo sebesar 11,17 Ω dengan nilai kebocoran arus sebesar 9.090 mA (9,09 A). Selain itu, beberapa panel distribusi menunjukkan kondisi Over Limit (OL), yaitu pada panel PPAC-LT.1, P.P-LT.1, SDP-LT.1, P.P-LT.3, P.P-LT.4, dan PPAC-LT.4.

Berdasarkan hasil pengukuran pada panel distribusi, diperoleh enam titik pengukuran (28,57%) berada pada kategori normal, lima titik (23,81%) berada pada kategori waspada, dan empat titik (19,05%) berada pada kategori berbahaya. Selain itu, terdapat enam titik pengukuran (28,57%) yang menunjukkan kondisi Over Limit (OL). Distribusi kategori kebocoran arus pada panel distribusi ditunjukkan pada Gambar 3. Disamping.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kategori berbahaya ditemukan pada beberapa panel, terutama pada lantai 2, 7, 8, dan 9. Nilai kebocoran arus tertinggi diperoleh pada panel PPAC-LT.2 sebesar 116 mA, sedangkan

nilai kebocoran arus terendah diperoleh pada panel P.P-LT.3 sebesar 0,9 mA.



Gambar 3.
Distribusi Kebocoran Arus Berdasarkan Kategori pada Panel Distribusi

Ketidakseimbangan Arus pada Panel Distribusi

Pengukuran arus tiga fasa dilakukan pada panel distribusi untuk mengetahui tingkat ketidakseimbangan arus pada sistem instalasi listrik Gedung Menara. Hasil pengukuran arus pada masing-masing fasa dan nilai ketidakseimbangan arus ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2.

Hasil Pengukuran Ketidakseimbangan Arus Tiga Fasa pada Panel Distribusi

Nama Panel	Nilai	Fasa			Nilai Ketidak Seimbangan Arus	Standart Ketidakseimbangan Arus (%)	Keterangan
		R	S	T			
P.P - P1	Max	10,20	9,78	0,00	100,00%	≤ 20	kurang baik, tidak sesuai standar
	Average	10,14	9,74	0,00	100,00%		
	Min	10,07	9,70	0,00	100,00%		
P.P - P2	Max	32,56	19,27	21,35	54,45%	≤ 20	kurang baik, tidak sesuai standar
	Average	31,75	16,93	17,92	43,29%		
	Min	31,21	15,83	13,26	33,88%		
P.P - P3	Max	18,49	20,66	25,02	23,29%	≤ 20	kurang baik, tidak sesuai standar
	Average	17,40	18,58	22,94	16,79%		
	Min	17,01	18,17	22,13	13,04%		
P.P - P4	Max	41,04	39,66	27,83	30,82%	≤ 20	kurang baik, tidak sesuai standar
	Average	31,55	32,49	26,86	16,88%		
	Min	21,41	25,09	26,19	3,76%		
P.P - P5	Max	14,80	13,70	21,02	30,86%	≤ 20	kurang baik, tidak sesuai standar
	Average	14,61	12,75	16,63	21,45%		
	Min	13,87	11,92	10,47	12,75%		
P.P - P6	Max	20,20	3,61	14,12	72,57%	≤ 20	kurang baik, tidak sesuai standar
	Average	17,47	3,38	12,54	69,47%		
	Min	13,68	3,28	11,56	64,60%		
P.P - P7	Max	37,49	35,76	37,68	9,05%	≤ 20	baik, sesuai standar
	Average	34,99	34,66	32,09	5,66%		
	Min	33,96	33,94	30,25	0,57%		
P.P - P8	Max	35,26	29,36	47,36	34,70%	≤ 20	kurang baik, tidak sesuai standar
	Average	29,59	24,92	43,05	32,49%		
	Min	28,41	23,65	42,12	26,49%		
P.P - P9	Max	40,03	35,00	23,24	33,98%	≤ 20	kurang baik, tidak sesuai standar
	Average	38,07	32,21	21,48	29,63%		
	Min	34,27	29,37	20,92	22,31%		
P.P - P10	Max	64,85	59,57	65,39	49,30%	≤ 20	kurang baik, tidak sesuai standar
	Average	19,52	17,72	22,96	21,78%		
	Min	8,01	7,55	12,93	4,50%		

Berdasarkan hasil pengukuran, sebagian besar panel distribusi menunjukkan nilai ketidakseimbangan arus yang melebihi batas standar sebesar 20%. Nilai ketidakseimbangan arus tertinggi ditemukan pada panel P.P-P1 sebesar 100%, sedangkan nilai ketidakseimbangan arus terendah

ditemukan pada panel P.P-P7 sebesar 0,57%.

Panel P.P-P6 menunjukkan nilai ketidakseimbangan arus berkisar antara 64,60% hingga 72,57%, sedangkan panel P.P-P8 dan P.P-P9 menunjukkan nilai ketidakseimbangan arus di atas 20%. Dari seluruh panel yang diukur, hanya panel P.P-P7 yang menunjukkan

kondisi ketidakseimbangan arus sesuai dengan batas standar yang ditetapkan.

Secara umum, hasil pengukuran menunjukkan bahwa sebagian besar panel distribusi berada dalam kondisi ketidakseimbangan arus yang cukup tinggi dan memerlukan evaluasi lebih lanjut terhadap kondisi pembebanan sistem.

PEMBAHASAN

Tahanan Pentanahan dan Kebocoran Arus

Berdasarkan **Tabel 1**, nilai tahanan pentanahan pada *grounding* trafo sebesar 11,17 Ω melebihi batas standar PUIL 2011 yaitu $\leq 5 \Omega$. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pentanahan belum mampu menyediakan jalur impedansi rendah untuk menyalurkan *fault current* ke tanah secara efektif. Pada beberapa panel distribusi juga ditemukan kondisi *Over Limit* (OL), yaitu pada panel PPAC-LT.1, P.P-LT.1, SDP-LT.1, P.P-LT.4, dan PPAC-LT.4 yang mengindikasikan adanya gangguan pada jalur *grounding* atau nilai resistansi di luar rentang pengukuran alat.

Tingginya resistansi pentanahan dapat menyebabkan arus gangguan tetap bersirkulasi dalam sistem sehingga meningkatkan *I²R losses* dan beban pada peralatan listrik (Luqmanoro & Mucharam, 2022; Fretes, 2022). Selain itu, fluktuasi pembebanan dan *three-phase load unbalance* juga dapat meningkatkan arus bocor dan mempengaruhi kinerja sistem distribusi (Syukri et al., 2022).

Kondisi *over limit* dapat disebabkan oleh kenaikan temperatur akibat arus berlebih, sambungan yang longgar atau teroksidasi, distribusi beban yang tidak seimbang, serta

degradasi material penghantar (Hendrawan et al., 2022). Hasil penelitian ini sejalan dengan Sarker et al. (2025) yang menyatakan bahwa sistem *grounding* berperan penting dalam menjaga stabilitas dan keselamatan sistem tenaga listrik, serta didukung oleh Moselhy et al. (2020) yang menjelaskan bahwa resistansi *grounding* yang tinggi dapat menurunkan efektivitas sistem proteksi dan meningkatkan risiko tegangan lebih.

Nilai kebocoran arus pada sisi sumber sebesar 9.090 mA (9,09 A) termasuk dalam kategori berbahaya. Semakin tinggi nilai tahanan pentanahan maka *grounding path impedance* semakin besar sehingga *fault current* tidak dapat dialirkan secara efektif ke bumi dan meningkatkan risiko *touch voltage* serta *ground potential rise* (Hsu et al., 2024).

Secara teoritis, nilai tahanan pentanahan dipengaruhi oleh resistivitas tanah, kelembaban, temperatur, dan komposisi tanah di sekitar elektroda *grounding* (Yinfan, 2013; Bastian et al., 2015). Namun, penelitian ini difokuskan pada evaluasi sistem *grounding* di dalam bangunan berdasarkan pengukuran tahanan pentanahan dan kebocoran arus pada panel distribusi.

Berdasarkan klasifikasi IEC, yaitu normal (≤ 3 mA), waspada (3–30 mA), dan berbahaya (> 30 mA) (International Electrotechnical Commission, 2005; International Electrotechnical Commission, 2024), kategori berbahaya ditemukan pada beberapa panel, terutama pada lantai 2, 7, 8, dan 9. Sebaliknya, lantai 1 dan lantai 3 menunjukkan nilai kebocoran arus yang rendah, yang mengindikasikan bahwa kualitas isolasi masih baik dan *leakage*

current path relatif kecil (Wibowo et al., 2015; Taryana et al., 2023).

Nilai kebocoran arus yang tinggi pada beberapa lantai mengindikasikan adanya gangguan seperti degradasi isolasi, arus bocor kapasitif, dan ketidakseimbangan beban. Kondisi ini menunjukkan bahwa permasalahan kebocoran arus tidak bersifat lokal, melainkan merupakan *system-wide issue* pada sistem distribusi listrik.

Peningkatan kebocoran arus dapat dipicu oleh gangguan transien akibat *switching transient* dan sambaran petir (Ndungu et al., 2017; Sestasombut & Ngaopitakkul, 2019), degradasi isolasi akibat kelembaban dan kontaminasi (Sulistyanto et al., 2012), serta karakteristik beban nonlinier yang menghasilkan *harmonic currents* (Do Nhu et al., 2025). Selain itu, panel PPAC cenderung memiliki nilai kebocoran arus lebih tinggi karena menggunakan beban motor listrik dan komponen elektronik yang menghasilkan *capacitive leakage current*.

Meskipun seluruh sambungan masih dalam kondisi tersambung, kualitas sambungan yang kurang baik dapat meningkatkan resistansi kontak dan mempercepat degradasi isolasi (Azwar Amat et al., 2024). Hal ini juga didukung oleh Nti et al. (2020) yang menyatakan bahwa kualitas sambungan *grounding* sangat mempengaruhi efektivitas sistem dalam menyalurkan arus gangguan.

Nilai resistansi *grounding* yang tinggi juga menunjukkan adanya keterkaitan antara kinerja sistem pentanahan dan besarnya arus bocor (Azmi et al., 2019). Oleh karena itu, evaluasi dan pengujian sistem *grounding* secara berkala perlu dilakukan untuk menjaga kinerjanya tetap optimal (Parise et al., 2015).

Sebagai upaya perbaikan, dapat diterapkan sistem *parallel grounding* atau *foundation grounding* (*Ufer grounding*) untuk memperluas area kontak dengan tanah sehingga nilai resistansi pentanahan dapat diturunkan secara signifikan (Fagan & Lee, 1970; Pillay & Manyage, 2001).

Secara keseluruhan, tingginya kebocoran arus berpotensi menyebabkan bahaya sengatan listrik serta menurunkan kinerja sistem proteksi (International Electrotechnical Commission, 2005; International Electrotechnical Commission, 2024). Selain itu, kondisi tersebut dapat mempercepat kerusakan peralatan dan meningkatkan *I²R losses* pada sistem distribusi listrik (Moselhy et al., 2020; Azwar Amat et al., 2024; Rahmani, 2026).

Ketidakseimbangan Arus pada Panel Distribusi

Ketidakseimbangan arus pada sistem tiga fasa terjadi akibat *unbalanced phase loading* dan merupakan parameter penting dalam evaluasi kinerja sistem distribusi tenaga listrik. Kondisi ini dapat meningkatkan rugi-rugi daya, menurunkan efisiensi sistem, serta meningkatkan stres termal pada peralatan listrik (Pillay & Manyage, 2001).

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sebagian besar panel distribusi memiliki nilai ketidakseimbangan arus yang melebihi batas standar $\leq 20\%$. Kondisi paling ekstrem terjadi pada panel P.P-P1 dengan nilai ketidakseimbangan sebesar 100% akibat tidak adanya pembebanan pada salah satu fasa. Selain itu, panel P.P-P6 menunjukkan ketidakseimbangan arus di atas 60%, yang mengindikasikan

bahwa distribusi beban antar fasa belum dilakukan secara optimal.

Ketidakseimbangan arus menyebabkan peningkatan arus netral dan rugi-rugi daya sehingga dapat mempercepat degradasi isolasi kabel dan meningkatkan risiko kerusakan sistem (Rau & New, 2001). Selain itu, kondisi *unbalance* juga dapat menurunkan efisiensi operasi dan mempengaruhi performa peralatan, terutama motor listrik (Kersting, 2000).

Jika dikaitkan dengan hasil analisis sebelumnya, ketidakseimbangan arus juga berkontribusi terhadap meningkatnya kebocoran arus pada sistem instalasi listrik karena distribusi arus yang tidak merata menyebabkan sebagian arus mengalir melalui jalur nonideal (Do Nhu et al., 2025).

Dalam konteks sistem pentanahan, distribusi arus yang tidak seimbang dapat menurunkan efektivitas sistem *grounding* dalam menyalurkan arus gangguan ke tanah (Permal et al., 2020). Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan berupa *load balancing*, evaluasi distribusi beban secara berkala, dan optimalisasi sistem instalasi listrik untuk meningkatkan keandalan, efisiensi, dan keselamatan sistem secara keseluruhan. Upaya ini sejalan dengan penelitian Khan dan Ali (2023) yang menyatakan bahwa redistribusi beban antar fasa merupakan metode efektif untuk mengurangi ketidakseimbangan arus dan meningkatkan performa sistem distribusi listrik.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pentanahan pada instalasi listrik Gedung Menara belum memenuhi standar PUIL 2011 karena nilai tahanan pentanahan pada

grounding trafo sebesar 11,17 Ω melebihi batas yang dipersyaratkan ($\leq 5 \Omega$). Kondisi tersebut diikuti oleh tingginya kebocoran arus pada beberapa panel distribusi, terutama pada lantai 2, 7, 8, dan 9, yang mengindikasikan adanya degradasi sistem instalasi listrik, khususnya pada aspek isolasi, pembebanan, dan sistem pentanahan. Selain itu, sebagian besar panel distribusi menunjukkan kondisi ketidakseimbangan arus yang melebihi batas standar sehingga berpotensi menurunkan keandalan sistem, meningkatkan rugi-rugi daya, dan memperbesar risiko gangguan serta bahaya keselamatan. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan melalui optimasi sistem *grounding*, perbaikan kualitas sambungan dan isolasi, penerapan *load balancing*, serta inspeksi dan pengujian berkala guna meningkatkan keandalan, efisiensi, dan keselamatan sistem instalasi listrik gedung.

DAFTAR PUSTAKA

- Azmi, A., Ahmad, N. A., Yiew, L. K., & Abdul-Malek, Z. (2019). The Use of Enhancement Material In Grounding System: A review. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 13(2), 453–460. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v13.i2.pp453-460>
- Azwar Amat, M., Sifa, A., Dionisius, F., Endramawan, T., Apriyandi, D. D., & Rudiana. (2024). Effect of Insulation on The Resistance Spot Welds with An Electrode Parallel Gap Single-Sided Double Spot. *Journal of Applied Mechanical Technology*, 3(1), 1–9. <https://doi.org/10.31884/journalo>

- [fappliedmechanicaltechnology.v3i1.59](#)
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011*. Badan Standardisasi Nasional. <https://puil.bsn.go.id/>
- Bastian, M. B., Carman, W. D., & Woodhouse, D. J. (2015). Real-Time Monitoring of Substation Ground Potential Rise and Grounding System Impedance Using Power System Faults. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 5298–5304. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2425361>
- Do Nhu, Y., Giang, N. T., Cuong, N. X., Khanh, N. T., & Tuan, L. A. (2025). Impact of Power Electronics Devices on Leakage Current in Mine Electrical Systems: A case study in Vietnam. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 55–62. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-1/055>
- Fagan, E. J., & Lee, R. H. (1970). The Use of Concrete-Enclosed Reinforcing Rods as Grounding Electrodes. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, IGA-6(4), 337–348. <https://doi.org/10.1109/TIGA.1970.6818036>
- Frete, R. de. (2022). Analisis Penyebab Kerusakan Transformator Menggunakan Metode RCA (*Fishbone Diagram and 5-Why Analysis*) di PT PLN (Persero) Kantor Pelayanan Kiandarat. *ARIKA*, 16(2), 117–128. <https://doi.org/10.30598/arika.2022.16.2.117>
- Hendrawan, A., D, A. S., & Nasution, H. (2022). Beban Lebih Elektro Motor Pompa Ejektor pada Fresh Water Generator di Atas Kapal Motor Penumpang Mutiara Ferindo II. *Jurnal Maritim Polimarin*, 8(1), 71–77. <https://ejournal.polimarin.ac.id/index.php/jurnalmaritim>
- Hsu, S.-H., Tzu, F.-M., Chang, W.-H., & Chen, Y.-D. (2024). Assessing High-Voltage Shore Connection Safety: an in-Depth Study of Grounding Practices In Shore Power Systems. *Energies*, 17(6), Article 1373. <https://doi.org/10.3390/en17061373>
- International Electrotechnical Commission. (2005). *IEC 60364-4-41: Low-voltage electrical installations—Part 4-41: Protection for safety—Protection against electric shock*. International Electrotechnical Commission. <https://webstore.iec.ch/publication/6038>
- International Electrotechnical Commission. (2024). *IEC 61008-1: Residual Current Operated Circuit-Breakers Without Integral Overcurrent Protection for Household and Similar Uses (RCCBs)—Part 1: General rules*. International Electrotechnical Commission. <https://webstore.iec.ch/publication/97063>
- Kersting, W. H. (2000). Causes and Effects of Unbalanced Voltages Serving an Induction Motor. *2000 Rural Electric Power Conference. Papers Presented at the 44th Annual Conference*, B3/1–B3/8.

- <https://doi.org/10.1109/REPCON.2000.848042>
- Khan, A., & Ali, M. (2023). Three-Phase Load Balancing In Distribution Systems Using Load Sharing Technique. *Engineering Proceedings*, 46(1), Article 18. <https://doi.org/10.3390/engproc2023046018>
- Luqmanoro, S. D., & Mucharam, R. (2022). Mutasi Transformator Distribusi di Blimbing Kota Malang penyulang Ampeldento N1314 dari 160 kVA ke 250 kVA untuk menghindari kerusakan akibat beban lebih. *PoliGrid*, 3(2), 57–62. <https://ejournal.polinema.ac.id/index.php/poligrid>
- Mestriner, D., de Moura, R. A., Procopio, R., & de Oliveira Schroeder, M. A. (2021). Impact of Grounding Modeling on Lightning-Induced Voltages Evaluation In Distribution Lines. *Applied Sciences*, 11(7), Article 2931. <https://doi.org/10.3390/app11072931>
- Mohamad Nasir, N. A. F., Ab Kadir, M. Z. A., Osman, M., Abd Rahman, M. S., Ungku Amirulddin, U. A., Mohd Nasir, M. S., Zaini, N. H., & Nik Ali, N. H. (2021). Impact of Earthing System Designs and Soil Characteristics on Tower Footing Impedance and Ground Potential Rise: A Modelling Approach for Sustainable Power Operation. *Sustainability*, 13(15), Article 8370. <https://doi.org/10.3390/su13158370>
- Moselhy, A. H., Abdel-Aziz, A. M., Gilany, M., & Emam, A. (2020). Impact of First Tower Earthing Resistance on Fast Front Back-Flashover in A 66 Kv Transmission System. *Energies*, 13(18), Article 4663. <https://doi.org/10.3390/en13184663>
- Ndungu, C., Nderu, J., Ngoo, L., & Hinga, P. (2017). A Study of The Root Causes of High Failure Rate of Distribution Transformer: A Case Study. *The International Journal of Engineering and Science*, 6(2), 14–18. <https://doi.org/10.9790/1813-0602021418>
- Nti, I. K., Appiah, A. Y., & Nyarko-Boateng, O. (2020). Assessment and Prediction of Earthing Resistance in Domestic Installation. *Engineering Reports*, 2(1), e12090. <https://doi.org/10.1002/eng2.12090>
- Parise, G. (2012). A New Summary on The IEC Protection Against Electric Shock. *48th IEEE Industrial & Commercial Power Systems Conference*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICPS.2012.6229610>
- Parise, G., Parise, L., Martirano, L., Farber, A., & Katz, B. (2015). Grounding System Adequacy of HV/MV Substations in Areas With Reduced Accessibility. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(3), 2038–2044. <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2379952>
- Permal, N., Osman, M., Ariffin, A. M., & Kadir, M. Z. A. A. (2021). The Impact of Substation Grounding Grid Design Parameters in Non-Homogenous Soil to The Grid Safety Threshold Parameters. *IEEE Access*, 9, 37497–37509.

- <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3063018>
- Permal, N., Osman, M., Kadir, M. Z. A. A., & Ariffin, A. M. (2020). Review of Substation Grounding System Behavior Under High Frequency and Transient Faults in Uniform Soil. *IEEE Access*, 8, 142468–142482. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013657>
- Pillay, P., & Manyage, M. (2001). Definitions of Voltage Unbalance. *IEEE Power Engineering Review*, 21(5), 50–51. <https://doi.org/10.1109/MPER.2001.4311391>
- Rahmani, I. N. (2026). Studi Perhitungan dan Pemilihan Rekomendasi Penurunan Susut Teknis pada Jaringan Tegangan Menengah PT PLN (Persero) UP3 Semarang. *Journal of Authentic Research*, 5(1), 53–65. <https://doi.org/10.36312/2t56g702>
- Rau, N., & New, I. S. O. (2001). Power Engineering Letters. *IEEE Power Engineering Review*, 21(5), 49–51. <https://doi.org/10.1109/39.919434>
- Reffin, M. S., Abdul Ali, A. W., Mohamad Nor, N., Ahmad, N. N., Abdullah, S. A. S., Mahmud, A., & Hanaffi, F. (2019). Seasonal Influences on The Impulse Characteristics of Grounding Systems for Tropical Countries. *Energies*, 12(7), Article 1334. <https://doi.org/10.3390/en12071334>
- Reffin, M. S., Nor, N. M., Ahmad, N. N., & Abdullah, S. (2018). Performance of Practical Grounding Systems Under High Impulse Conditions. *Energies*, 11(11), Article 3187. <https://doi.org/10.3390/en11113187>
- Sarker, M. T., Al Qwaid, M., Hossen, M. S., & Ramasamy, G. (2025). Performance Optimization of Grounding System for Multi-Voltage Electrical Installation. *Applied Sciences*, 15(15), Article 8600. <https://doi.org/10.3390/app15158600>
- Sestasombut, P., & Ngaopitakkul, A. (2019). Evaluation of a Direct Lightning Strike to The 24 Kv Distribution Lines in Thailand. *Energies*, 12(16), Article 3193. <https://doi.org/10.3390/en12163193>
- Sulistiyanto, D. A., Hermawan, H., & Syakur, A. (2012). Analisis Arus Bocor dan Tegangan Flashover Pada Isolator Suspensi 20 Kv 3 Sirip dengan 4 Tipe Sirip Berbahan Polimer Resin Epoksi Silane Silika. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 1(4), 226–232. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient/article/view/1263>
- Syukri, S., Murisal Asyadi, T., Muliadi, M., & Moesnadi, F. (2022). Analisa Pembebanan Transformator Distribusi 20 Kv pada Penyulang LS5 Gardu LSA 249. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4, 202–206. <https://doi.org/10.37905/jjee.v4i2.15467>
- Taryana, T., Kuntadi, C., Suprihartini, Y., & Sadiatmi, R. (2023). Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Keandalan Instalasi Listrik. *Jurnal Manajemen Pendidikan*

dan Ilmu Sosial, 4(1), 531–537.
<https://doi.org/10.38035/jmpis.v4i1.1457>

- Wibowo, A., Hermawan, H., & Syakur, A. (2015). Analisis Distorsi Harmonik Total Arus Bocor Permukaan Isolator Resin Epoksi Pengisi Silika Kondisi Kering dan Basah. *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 17(2), 98–107.
<https://ejournal.undip.ac.id/index.php/transmisi/article/view/8592>
- Wilis, G. R. (2014). Konduktor Aluminium pada Sistem Grounding. *Jurnal Teknik Elektro*, 9(2), 12–17.
- Yinfan, J. (2013). Analysis of Factors Influencing Grounding Resistance. *Industrial Safety and Environmental Protection*.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113169311>