

TUGASAKHIR
ANALISIS RESISTANSI PENTANAHAN TERHADAP EFEKTIVITAS
PROTEKSI PETIR MENGGUNAKAN MATLAB
PADA GARDU INDUK KOTAPINANG
SESUAI STANDAR IEC 62305-3

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik (S.T) Pada Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh :

BAYU AFANDI NATA
2207220101



UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Bayu Afandi Nata

NPM : 2207220101

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Resistansi Pentanahan Terhadap Efektivitas
Proteksi Petir Menggunakan Matlab Pada Gardu Induk
KotaPinang Sesuai Standar IEC 62305-3

Bidang ilmu : Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 31 Agustus 2026

Mengetahui dan menyetujui:
Dosen Pembimbing

Dr. Rohana, S.T., M.T.

Dosen Pembanding I/Penguji

Dosen Pembanding II/Penguji

Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd Dr. Faisal Irsan Pasaribu, S.T., S.Pd., M.T.

Program Studi Teknik Elektro



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Bayu Afandi Nata

Tempat/Tgl Lahir : RS TORGAMBA, 04 Februari 2003

NPM : 2207220101

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul:

**“ANALISIS RESISTANSI PENTANAHAN TERHADAP EFEKTIVITAS
PROTEKSI PETIR MENGGUNAKAN MATLAB PADA GARDU INDUK
KOTAPINANG SESUAI STANDAR IEC 62305-3”**

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 31 Agustus 2026

Saya yang menyatakan,



Bayu Afandi Nata

ABSTRAK

Sistem pentanahan merupakan komponen penting dalam sistem proteksi petir pada gardu induk karena berfungsi menyalurkan arus petir ke tanah secara aman sehingga meminimalkan risiko kerusakan peralatan dan bahaya terhadap manusia. Kinerja sistem pentanahan yang baik sangat menentukan keandalan operasi gardu induk, terutama saat terjadi sambaran petir dengan arus tinggi. Penelitian ini bertujuan menganalisis nilai resistansi pentanahan, menilai efektivitas sistem proteksi petir berdasarkan parameter *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah, serta mengevaluasi kesesuaiannya dengan standar IEC 62305-3. Penelitian menggunakan metode kuantitatif melalui analisis data teknis lapangan dan simulasi menggunakan MATLAB. Data yang digunakan meliputi resistivitas tanah, konfigurasi sistem pentanahan, serta karakteristik arus petir impuls 10/350 μ s sebesar 17 kA. Hasil penelitian menunjukkan nilai resistansi pentanahan sebesar 0.736 Ω , yang menghasilkan nilai GPR maksimum sekitar 12.517.97V, tegangan sentuh sebesar 1.251.80 V, dan tegangan langkah sebesar 1.877.70 V. Seluruh parameter masih berada dalam batas aman berdasarkan standar IEC 62305-3 sehingga sistem pentanahan mampu mengalirkan arus petir secara efektif, mengurangi kenaikan potensial tanah, serta meminimalkan risiko gangguan terhadap peralatan dan keselamatan personel. Berdasarkan hasil analisis dan simulasi, sistem proteksi petir di Gardu Induk Kotapinang dinyatakan memenuhi ketentuan IEC 62305-3 dan memiliki tingkat efektivitas yang baik dalam melindungi instalasi gardu induk dari dampak sambaran petir.

Kata kunci: resistansi pentanahan, proteksi petir, Ground Potential Rise, tegangan sentuh, tegangan langkah, IEC 62305-3.

ABSTRACT

The grounding system is a critical component of the lightning protection system in a substation, as it safely dissipates lightning current into the ground, thereby minimizing the risk of equipment damage and hazards to personnel. Effective grounding system performance is crucial for substation operational reliability, particularly during high-current lightning strikes. This study aims to analyze the grounding resistance value, assess the effectiveness of the lightning protection system based on Ground Potential Rise (GPR), touch voltage, and step voltage parameters, and evaluate its compliance with the IEC 62305-3 standard. The research employs a quantitative approach involving the analysis of technical field data and simulations using MATLAB. The data utilized includes soil resistivity, grounding system configuration, and the characteristics of a 10/350 μ s impulse lightning current with a peak of 17 kA. The results indicate a grounding resistance of 0.7448 Ω , yielding a maximum GPR of approximately 12.660,76 V, a touch voltage of 1.266 V, and a step voltage of 1.899 V. All parameters remain within safe limits according to the IEC 62305-3 standard; thus, the grounding system effectively dissipates lightning current, mitigates ground potential rise, and minimizes risks to equipment and personnel safety. Based on the analysis and simulation results, the lightning protection system at the Kotapinang Substation complies with IEC 62305-3 requirements and demonstrates a high level of effectiveness in protecting the substation installation from the impacts of lightning strikes.

Keywords: grounding resistance, lightning protection, Ground Potential Rise, touch voltage, step voltage, IEC 62305-3.

KATA PENGANTAR



Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia serta hidayah-Nya kepada umat-Nya. Shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW, yang telah menuntun umatnya beserta keluarga, sahabat dan umat Islam di seluruh dunia ini. Amiin.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat dalam meraih gelar Sarjana Teknik (S.T) pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Adapun judul Tugas Akhir ini adalah “Analisis Resistansi Pentanahan Terhadap Efektivitas Proteksi Petir Menggunakan Matlab Pada Gardu Induk Kotapinang Sesuai Standar IEC 62305-3”

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak akan terwujud tanpa adanya bantuan, bimbingan dan motivasi dari berbagai pihak. Dari itu penulis haturkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua Orang Tua tercinta yang telah memberikan dukungan bagi penulis secara moril maupun materi sehingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Akrim, M.Pd selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Ibu Dr. Ir. Elvy Sahnur, S.T., M.Pd selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Beny Oktarialdi, S.T., M.T selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Ibu Dr. Ir. Rohana, S.T., M.T, selaku Dosen Pembimbing yang telah membantu menyelesaikan serta memberikan ide-ide dan masukan dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.

7. Bapak Juanda Tarigan selaku TL Gardu Induk Kotapinang PT. PLN (Persero)
8. Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat penulis.
9. Bapak dan Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
10. Teman-teman mahasiswa terutama stambuk '22 Teknik Elektro yang selalu memberi dukungan dan motivasi kepada penulis

Penulis telah berusaha untuk menyampaikan yang terbaik dalam tesis ini, namun penulis menyadari masih banyak terdapat kekurangan di dalamnya. Oleh karena itu penulis senantiasa mengharapkan kritik dan saran membangun dari pembaca untuk kesempurnaan tesis ini. Akhir kata, semoga tesis ini bermanfaat bagi kita semua. Amin.

Medan, 31 Agustus 2026

Penulis

Bayu Afandi Nata
NPM : 2207220101

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
10.1 Latar Belakang	1
10.2 Identifikasi Masalah	2
10.3 Rumusan Masalah.....	2
10.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
10.5 Tujuan Penelitian	3
10.6 Manfaat Penelitian.....	3
10.7 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan	6
2.1.1 Ringkasan penelitian terdahulu.....	6
2.1.2 Gap analisis dan kontribusi penelitian	9
2.2 Sistem Proteksi Petir.....	11
2.2.1 Konsep dasar sistem proteksi.....	11
2.2.2 Sistem Proteksi Eksternal	12
2.2.3 Sistem proteksi internal	14
2.3 Standar IEC 62305-3.....	17
2.3.1 Prinsip proteksi struktur.....	17
2.3.2 Sistem pembumian menurut IEC 62305-3.....	17
2.4 Sistem Pembumian (<i>Grounding</i>)	18
2.4.1 Parameter kinerja sistem pembumian	18
2.4.2 Konfigurasi elektroda grounding	19
2.5 Tahanan Pembumian (<i>Ground Resistance</i>).....	20
2.5.1 Elektroda batang vertikal (<i>deep rod</i>)	20
2.5.2 Grounding grid (jaringan horizontal).....	21
2.5.3 Sistem pembumian kombinasi (grid + rod).....	23

2.6 Resistansi Pentanahan	24
2.7 Resistivitas Tanah.....	25
2.7.1 Metode pengukuran resistivitas tanah.....	27
v	
2.7.2 Rentang nilai resistivitas tanah di Indonesia.....	28
2.8 Tegangan Langkah, Tegangan Sentuh, dan <i>Ground Potential Rise</i> (GPR)	29
2.9 Mathlab	32
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	33
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	33
3.2 Data Penelitian	35
3.2.1 Data Resistansi Pentanahan	35
3.2.2 Data Resistivitas Tanah.....	36
3.2.3 Data konfigurasi sistem pentanahan	37
3.2.4 Data arus petir	38
3.2.5 Data parameter keselamatan	39
3.2.6 Data standar dan referensi teknis	40
3.3 Diagram Blok Penelitian	41
3.4 Prosedur Penelitian.....	43
3.5 Diagram Alir Penelitian.....	49
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	54
4.1 Analisis Nilai Resistansi Pentanahan.....	54
4.1.1 Simulasi MATLAB.....	54
4.1.2 Analisis hasil resistivitas tanah semu (ρ)	56
4.1.3 Analisis hasil resistansi pentanahan menggunakan simulasi.....	57
4.2 Analisis Efektivitas Sistem Proteksi Petir.....	61
4.2.1 Analisis <i>Ground Potential Rise</i> (GPR)	63
4.2.2 Analisis Tegangan Sentuh (Touch Voltage).....	65
4.2.3 Analisis Tegangan Langkah (<i>Step Voltage</i>).....	68
4.2.4 Analisis efektivitas sistem proteksi petir secara keseluruhan.....	71
4.3 Evaluasi Sistem Pentanahan Berdasarkan IEC 62305-3.....	73
4.3.1 Evaluasi Nilai Resistansi Pentanahan	75
4.3.2 Evaluasi <i>Ground Potential Rise</i> (GPR)	77
4.3.3 Evaluasi Tegangan Sentuh	78
4.3.4 Evaluasi Tegangan Langkah.....	79
BAB 5 PENUTUP.....	82
5.1 Kesimpulan.....	82
5.2 Saran.....	82
DAFTAR PUSTAKA	84
DAFTAR LAMPIRAN.....	87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Air terminal.....	12
Gambar 2. 2 Down conductor	13
Gambar 2. 3 Grounding sistem.....	13
Gambar 2. 4 <i>Surge Protection Device</i>	14
Gambar 2. 5 <i>Grounding System</i>	15
Gambar 2. 6 <i>Equipotential Bonding</i>	15
Gambar 2. 7 Proteksi terhadap Induksi Elektromagnetik	16
Gambar 2. 8 Elektroda batang	21
Gambar 2. 9 Grounding grid	23
Gambar 2. 10 Grounding kombinasi	24
Gambar 2. 11 Tegangan langkah dan tegangan sentuh.....	30
Gambar 3. 1 Tempat Penelitian (Gardu Induk Kotapinang)	34
Gambar 3. 2 Lokasi Penelitian	35
Gambar 3. 3 Diagram Blok Penelitian.....	42
Gambar 3. 4 Diagram alir penelitian	50
Gambar 4. 1 Hasil simulasi Matlab	55
Gambar 4. 2 Grafik Resistansi pentanahan	58
Gambar 4. 3 Grafik Lightning Current (Arus Petir)	62
Gambar 4. 4 Grafik Ground Potensial Rise (GPR)	63
Gambar 4. 5 Grafik Touch Voltage	66
Gambar 4. 6 Grafik Step Voltage	69

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Gap analisis dan kontribusi penelitian	10
Tabel 2. 2 Rentang Nilai Resistivitas Tanah di Indonesia	28
Tabel 3. 1 Data Resistansi Pentanahan	35
Tabel 3. 2 Data Resistivitas Tanah.....	36
Tabel 3. 3 Data Sistem Pentanahan	37
Tabel 3. 4 Data Arus Petir.....	38
Tabel 3. 5 Data Parameter Keselamatan	39
Tabel 3. 6 Data Standar	40
Tabel 4. 1 Fungsi pada Simulasi MATLAB.....	56
Tabel 4. 2 Hasil Simulasi GPR.....	64
Tabel 4. 3 Perbandingan tegangan sentuh dengan batas aman	67
Tabel 4. 4 Perbandingan Tegangan Langkah dengan Batas Aman	71
Tabel 4. 5 Hasil Analisis Efektivitas Sistem Proteksi Petir	72
Tabel 4. 6 Evaluasi Sistem Pentanahan Berdasarkan IEC 62305-3	74
Tabel 4. 7 Evaluasi Nilai Resistansi Pentanahan	76
Tabel 4. 8 Evaluasi Ground Potential Rise (GPR).....	78
Tabel 4. 9 Evaluasi Tegangan Sentuh	79
Tabel 4. 10 Evaluasi Tegangan Langkah	80

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem proteksi petir merupakan bagian penting dalam menjaga keandalan instalasi tenaga listrik, khususnya pada gardu induk listrik yang memiliki peralatan sensitif. Sambaran petir dapat menimbulkan gangguan operasional, kerusakan peralatan, serta membahayakan keselamatan manusia apabila arus petir tidak dapat disalurkan ke tanah dengan baik melalui sistem pentanahan yang efektif. Efektivitas sistem proteksi petir sangat dipengaruhi oleh nilai resistansi pentanahan. Nilai resistansi yang tinggi menyebabkan arus petir tidak tersebar secara optimal ke tanah sehingga berpotensi menimbulkan kenaikan tegangan tanah (Ground Potential Rise), tegangan sentuh, dan tegangan langkah yang melebihi batas aman. Oleh karena itu, sistem grounding harus dirancang dan dievaluasi sesuai standar internasional agar mampu bekerja secara optimal [1].

Pada masa awal perkembangan sistem tenaga dengan kapasitas kecil, sistem pentanahan belum diterapkan karena arus gangguan ke tanah relatif kecil (≤ 5 A). Namun, seiring meningkatnya kapasitas dan kompleksitas sistem tenaga listrik, arus gangguan menjadi semakin besar dan berpotensi menimbulkan tegangan lebih transien yang berbahaya bagi peralatan dan keselamatan sistem. Oleh karena itu, dikembangkan sistem pentanahan (grounding system) untuk mencegah sistem tenaga berada dalam kondisi mengambang serta meningkatkan keamanan dan keandalan operasi [2].

Meskipun petir adalah gejala alam yang mustahil dihentikan, risiko yang dibawanya terhadap keselamatan jiwa, struktur bangunan, hingga perangkat elektronik sangatlah nyata mulai dari ancaman kebakaran hingga kerusakan fatal pada sirkuit listrik. Keandalan sistem penangkal petir sangat bergantung pada kualitas pembedahan. Oleh sebab itu, studi ini menjadi krusial guna menjamin sistem grounding beroperasi secara prima sesuai regulasi, sehingga perlindungan terhadap aset dan manusia dapat tercapai secara maksimal [3].

Perbedaan yang nyata ini berdampak pada kecepatan pelepasan arus petir, yang membuat efisiensi sistem proteksi pada lokasi gardu induk. Guna menjaga performanya, desain instalasi harus berbasis pada pengukuran tanah yang akurat

serta mempertimbangkan material tambahan seperti karbon konduktif atau bentonit untuk menekan hambatan. Merujuk pada regulasi PUIL 2011 dan IEEE Standard 80-2013, nilai ideal untuk hambatan pembumian di gardu distribusi seharusnya tidak melebihi 5Ω . Meski demikian, fakta di Jawa Barat menunjukkan kondisi berbeda, di mana saat kemarau tiba, sekitar 40% sistem pembumian justru melonjak di atas 10Ω karena tanah yang mengering [4].

Standar IEC 62305-3 memberikan pedoman teknis mengenai desain dan evaluasi sistem proteksi petir, termasuk persyaratan sistem pembumian untuk menjamin keamanan peralatan dan personel. Namun, kondisi tanah yang berbeda pada setiap lokasi instalasi menyebabkan nilai resistansi pentanahan juga bervariasi sehingga perlu dilakukan analisis secara spesifik pada lokasi gardu induk. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh resistansi pentanahan terhadap efektivitas sistem proteksi petir pada gardu induk Kotapinang dengan mengacu pada standar IEC 62305-3, sehingga dapat diketahui tingkat keandalan sistem pembumian yang digunakan serta rekomendasi perbaikan yang diperlukan [5].

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka identifikasi masalah dari penelitian ini adalah

1. Kondisi karakteristik tanah pada area Gardu Induk Kotapinang berpotensi mempengaruhi besar kecilnya nilai resistansi pentanahan.
2. Resistansi pentanahan yang tidak memenuhi standar dapat menyebabkan kenaikan tegangan tanah (Ground Potential Rise), tegangan sentuh, dan tegangan langkah yang berbahaya.
3. Evaluasi sistem pembumian berdasarkan standar IEC 62305-3 belum dilakukan secara komprehensif pada instalasi yang diteliti.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, maka permasalahan penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Bagaimana nilai resistansi pentanahan pada sistem proteksi petir Gardu Induk Kotapinang?

2. Bagaimana tingkat efektivitas sistem proteksi petir berdasarkan parameter keamanan seperti kenaikan tegangan tanah, tegangan sentuh, dan tegangan langkah?
3. Apakah sistem pentanahan yang digunakan telah memenuhi persyaratan standar IEC 62305-3?

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Agar penelitian ini lebih terfokus dan sistematis, ruang lingkup penelitian ditetapkan sebagai berikut.

1. Penelitian dilakukan pada sistem proteksi petir di Gardu Induk Kotapinang.
2. Kajian penelitian mencakup evaluasi kemampuan sistem pembumian dalam menyalurkan arus petir ke tanah secara aman.
3. Parameter yang dianalisis meliputi resistansi pentanahan, Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (touch voltage), dan tegangan langkah (step voltage).
4. Evaluasi sistem proteksi petir mengacu pada standar IEC 62305-3 sebagai pedoman teknis.

1.5 Tujuan Penelitian

Untuk menjawab permasalahan penelitian, maka tujuan penelitian ini dirumuskan sebagai berikut.

1. Menganalisis nilai resistansi pentanahan pada sistem proteksi petir di Gardu Induk Kotapinang melalui pemodelan dan perhitungan menggunakan MATLAB.
2. Menilai tingkat efektivitas sistem proteksi petir melalui simulasi MATLAB berdasarkan parameter keamanan seperti *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah.
3. Mengevaluasi kesesuaian sistem pentanahan yang digunakan berdasarkan standar IEC 62305-3.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagi Perusahaan (Gardu Induk Kotapinang)

Bagi perusahaan, hasil penelitian ini dapat menjadi bahan evaluasi dalam mengetahui kondisi dan kinerja sistem pentanahan pada sistem proteksi petir di Gardu Induk Kotapinang, serta memberikan rekomendasi teknis untuk meningkatkan efektivitas proteksi petir sesuai standar IEC 62305-3 guna menunjang keamanan peralatan dan keselamatan kerja.

2. Bagi Penulis

penelitian ini menjadi sarana untuk meningkatkan pemahaman dan kemampuan analisis di bidang sistem pembumian dan proteksi petir, sekaligus sebagai penerapan ilmu yang diperoleh selama perkuliahan ke dalam permasalahan nyata di lingkungan industri. Selain itu, penelitian ini juga melatih kemampuan dalam melakukan penelitian ilmiah secara sistematis dan terstruktur.

3. Bagi Universitas

Penelitian ini diharapkan dapat menambah referensi akademik khususnya pada bidang teknik elektro terkait sistem grounding dan proteksi petir, serta mendukung pengembangan penelitian terapan dan kerja sama antara institusi pendidikan dengan dunia industri.

1.7 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah pembahasan dan pemahaman maka sistematika penulisan tugas akhir ini di uraikan secara singkat sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian, identifikasi masalah, rumusan masalah, ruang lingkup penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan skripsi.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori yang mendukung penelitian meliputi konsep sistem proteksi petir, sistem pembumian (grounding), resistansi pentanahan dan resistivitas tanah, parameter kinerja sistem proteksi petir, serta standar IEC 62305-3. Selain itu, disajikan penelitian terdahulu dan kerangka pemikiran yang menjadi dasar analisis penelitian.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode yang digunakan dalam penelitian, meliputi jenis dan pendekatan penelitian, lokasi dan waktu penelitian, jenis dan sumber data, variabel penelitian, teknik pengumpulan data, metode analisis data, serta tahapan penelitian yang disajikan dalam bentuk diagram alir penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil pengolahan data, analisis nilai resistansi pentanahan, evaluasi efektivitas sistem proteksi petir berdasarkan standar IEC 62305-3, serta pembahasan hasil penelitian yang diperoleh.

BAB 5 PENUTUP

Bab ini memuat kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya maupun perbaikan sistem proteksi petir di lokasi penelitian.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Kajian literatur yang relevan merupakan penelusuran terhadap kerangka teori, regulasi standar, serta temuan riset sebelumnya yang berkaitan erat dengan variabel yang diteliti. Bagian ini berfungsi untuk mengokohkan fondasi ilmiah, memposisikan letak kebaruan penelitian, serta membedah celah atau *gap* penelitian yang perlu dieksplorasi lebih mendalam.

2.1.1 Ringkasan penelitian terdahulu

Ada beberapa penelitian yang dapat dijadikan sebagai pendukung penelitian:

1. Yuliadi, Hardi, dan Rohana (2021) membahas analisis perbandingan nilai tahanan pentanahan antara elektroda batang dan elektroda plat sebagai upaya perbaikan nilai resistansi pembumian. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh pentingnya sistem pentanahan dalam menjaga keamanan instalasi tenaga listrik dari gangguan tegangan lebih, khususnya akibat fenomena transien seperti sambaran petir. Sistem pembumian yang baik harus memiliki nilai tahanan sekecil mungkin agar arus gangguan dapat dialirkan ke tanah secara efektif. Tujuan penelitian adalah membandingkan performa dua jenis elektroda grounding, yaitu elektroda batang dan elektroda plat, berdasarkan hasil pengukuran langsung dan perhitungan teoritis. Metode penelitian dilakukan melalui pengujian lapangan menggunakan Digital Earth Resistance Tester, dengan variasi kedalaman penanaman elektroda hingga 1,5 meter. Selain pengukuran, dilakukan pula perhitungan analitis menggunakan rumus Dwight untuk memperoleh nilai tahanan pentanahan secara teoritis [6].
2. Laia dkk. (2023) berjudul "Analisis Sistem Pentanahan Gardu Induk Titi Kuning PT. PLN (Persero) Dengan MATLAB" bertujuan mengevaluasi kondisi sistem pentanahan Gardu Induk Titi Kuning menggunakan pendekatan analisis matematis dan simulasi MATLAB. Penelitian ini menggunakan data resistivitas tanah, dimensi grid pentanahan, serta konfigurasi elektroda untuk menghitung nilai resistansi pentanahan yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai resistansi pentanahan sangat dipengaruhi oleh luas area grid,

kedalaman penanaman elektroda, dan karakteristik resistivitas tanah. MATLAB mampu memberikan hasil perhitungan yang mendekati kondisi lapangan sehingga dapat digunakan sebagai alat evaluasi sistem pentanahan secara efektif. Penelitian ini menjadi referensi penting karena menggunakan pendekatan simulasi yang serupa dengan penelitian pada Gardu Induk Kotapinang dalam mengevaluasi performa sistem grounding terhadap efektivitas proteksi petir [7].

3. Nugroho (2025) berjudul *Analisis Proteksi Petir Pada Gardu Induk 150 kV Menggunakan Metal-Oxide Arrester* bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem proteksi petir pada gardu induk 150 kV menggunakan simulasi ATPDraw. Penelitian ini memodelkan gardu induk untuk mensimulasikan gelombang impuls petir dan mengevaluasi performa beberapa tipe *metal-oxide arrester* (MOA) dalam membatasi tegangan lebih pada transformator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arrester tipe Q150NA121A memberikan performa terbaik dengan tegangan lebih sekitar 454 kV, sehingga mampu meningkatkan efektivitas perlindungan terhadap sambaran petir. Penelitian ini menjadi referensi yang relevan karena menunjukkan pemanfaatan ATPDraw dalam mengevaluasi kinerja sistem proteksi petir pada gardu induk [7].
4. Penelitian "Pemodelan Sistem Pembumian pada Gardu Induk 150 kV Tayan Menggunakan Grid Analysis CYMGRD" membahas perencanaan pengembangan sistem grounding menggunakan perangkat lunak CYMGRD. Penelitian mengevaluasi nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh, tegangan langkah, dan distribusi potensial tanah sesuai standar IEEE Std 80. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain grid yang tepat mampu menurunkan resistansi pentanahan sekaligus meningkatkan tingkat keselamatan sistem tenaga listrik. Penelitian ini memberikan gambaran mengenai pentingnya optimasi desain grounding dalam mendukung efektivitas proteksi petir [8].
5. Wati et al. (2025) membandingkan kinerja berbagai konfigurasi grounding pada sistem distribusi listrik dengan karakteristik tanah yang berbeda. Menggunakan pendekatan simulasi dan pengukuran lapangan, penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi grid memberikan distribusi arus yang lebih merata dan menurunkan resistansi pembumian dibandingkan konfigurasi elektroda tunggal.

Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi elektroda memiliki peran strategis dalam mengatasi dampak negatif resistivitas tanah yang tinggi [9].

6. Junaedi (2025), sistem pentanahan pada tower transmisi 150 kV perlu dianalisis tidak hanya dari nilai tahanan, tetapi juga dari potensi tegangan langkah dan tegangan sentuh yang mungkin timbul saat terjadi arus gangguan. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa nilai tahanan pentanahan $< 5 \Omega$ mampu menjaga kestabilan sistem serta meningkatkan keamanan terhadap sambaran petir. Hal ini menunjukkan peran penting resistivitas tanah dalam memastikan efektivitas sistem grounding pada jaringan transmisi [10].
7. D. E. Putra, dkk (2023). Beberapa studi telah membandingkan performa grounding grid, elektroda batang vertikal (atau deep rod), serta penggunaan keduanya secara bersama. Hasil penelitian itu mengungkapkan bahwa grounding grid lebih baik dalam mengurangi tegangan langkah dan tegangan sentuh di wilayah yang luas, sedangkan elektroda batang vertikal lebih unggul untuk menjangkau lapisan tanah dengan resistivitas yang lebih rendah. Penggunaan konfigurasi gabungan ternyata bisa menekan nilai resistansi grounding secara lebih drastis, khususnya di tanah dengan resistivitas tinggi [11].
8. Saputra Wijaya, Rajagukguk, dan Danial (2025) berjudul *Analisa Sistem Pentanahan dengan Kombinasi Grid dan Rod pada Gardu Induk 150 kV Sei Raya* bertujuan untuk menganalisis efektivitas kombinasi elektroda grid dan batang pentanahan dalam menurunkan nilai resistansi grounding. Penelitian ini menggunakan simulasi ETAP untuk mengevaluasi kinerja sistem pentanahan pada gardu induk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi elektroda grid dan rod menghasilkan nilai resistansi yang lebih rendah dibandingkan penggunaan grid saja, serta menegaskan bahwa karakteristik tanah berpengaruh terhadap efektivitas sistem pentanahan. Penelitian ini menjadi referensi yang relevan dalam menentukan konfigurasi sistem grounding yang optimal untuk meningkatkan efektivitas proteksi petir [12].
9. Fitriani, Syafriwel, Hidayat, Panjaitan, dan Syahputra (2023) berjudul *Analisis Pentanahan Gardu Induk Akibat Surja Petir Menggunakan Finite Element Method* bertujuan untuk menganalisis pengaruh sambaran petir terhadap sistem

pentanahan gardu induk menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM). Penelitian ini mengevaluasi parameter *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan sentuh, tegangan langkah, dan distribusi arus petir pada sistem grounding. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai resistansi pentanahan yang rendah dapat mengurangi kenaikan potensial tanah serta meningkatkan keselamatan personel dan perlindungan peralatan listrik dari surja petir. Penelitian ini menjadi referensi yang relevan karena membahas efektivitas sistem pentanahan dalam mendukung proteksi petir [13].

10. Parameter keselamatan seperti *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah merupakan indikator utama efektivitas sistem pembumian dalam proteksi petir. Abdul-Malek meneliti pengaruh profil tanah terhadap respons transien sistem grounding pada gardu induk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah berlapis dengan resistivitas tinggi menghasilkan nilai GPR dan tegangan langkah yang jauh lebih besar dibandingkan tanah homogen. Temuan ini mengindikasikan bahwa variasi resistivitas tanah secara langsung memengaruhi tingkat keselamatan personel dan peralatan [14].

2.1.2 Gap analisis dan kontribusi penelitian

Gap analisis pada penelitian masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian (research gap). Pertama, sebagian besar penelitian hanya berfokus pada salah satu aspek, yaitu analisis sistem pentanahan atau analisis proteksi petir, sehingga belum mengkaji hubungan secara komprehensif antara nilai resistansi pentanahan dengan efektivitas sistem proteksi petir pada gardu induk. Kedua, penelitian terdahulu umumnya menggunakan standar IEEE Std 80 sebagai acuan evaluasi sistem grounding, sedangkan kajian yang mengacu pada standar IEC 62305-3 masih relatif terbatas. Ketiga, belum banyak penelitian yang mengintegrasikan analisis resistansi pentanahan, simulasi arus petir, serta evaluasi parameter keselamatan seperti *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi baik secara teoritis maupun praktis dalam pengembangan sistem proteksi petir pada gardu induk. Secara teoritis, penelitian ini melengkapi kajian mengenai hubungan antara nilai resistansi pentanahan dengan efektivitas sistem proteksi petir berdasarkan standar IEC 62305-

3, yang masih terbatas pada penelitian sebelumnya. Secara praktis, penelitian ini memberikan evaluasi terhadap kondisi sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang melalui analisis resistansi pentanahan, Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah menggunakan pendekatan simulasi. Adapun gap analisis dan kontribusi penelitian ini dibanding penelitian sebelumnya dapat terlihat pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Gap analisis dan kontribusi penelitian

No	Peneliti & Tahun	Fokus Penelitian	Gap/Kesenjangan Penelitian	Kebaruan Penelitian
1	Yuliadi, Hardi & Rohana (2021)	Perbandingan elektroda batang dan plat terhadap resistansi pentanahan	Tidak membahas efektivitas proteksi petir pada gardu induk dan tidak mengevaluasi parameter keselamatan	Menganalisis pengaruh resistansi pentanahan terhadap efektivitas proteksi petir pada gardu induk
2	Laia dkk. (2023)	Analisis sistem pentanahan GI menggunakan MATLAB	Hanya menghitung resistansi pentanahan tanpa analisis sistem proteksi petir berdasarkan IEC 62305-1	Menghubungkan hasil analisis resistansi pentanahan dengan efektivitas proteksi petir sesuai IEC 62305-1
3	Nugroho (2025)	Simulasi proteksi petir menggunakan ATPDraw	Berfokus pada kinerja arrester, tidak mengevaluasi pengaruh resistansi pentanahan	Mengkaji hubungan resistansi pentanahan terhadap efektivitas proteksi petir
4	Penelitian GI Tayan (2024)	Desain grounding menggunakan CYMGRD	Berorientasi pada optimasi desain grid, belum mengkaji objek Gardu Induk Kotapinang	Analisis pada kondisi aktual Gardu Induk Kotapinang sesuai IEC 62305-1
5	Wati et al. (2025)	Perbandingan konfigurasi grounding	Tidak mengaitkan hasil dengan sistem proteksi petir gardu induk	Evaluasi pengaruh konfigurasi grounding terhadap efektivitas proteksi petir
6	Junaedi (2025)	Sistem pentanahan tower transmisi	Fokus pada tower transmisi, bukan gardu induk	Analisis sistem grounding pada gardu induk
7	D. E. Putra dkk. (2023)	Perbandingan grounding grid dan rod	Fokus pada konfigurasi elektroda tanpa evaluasi standar IEC 62305-1	Analisis berdasarkan IEC 62305-1 pada gardu induk
8	Saputra Wijaya dkk. (2025)	Kombinasi grid dan rod menggunakan ETAP	Belum mengevaluasi parameter proteksi petir secara menyeluruh	Integrasi analisis resistansi, GPR, tegangan sentuh, dan tegangan langkah

No	Peneliti & Tahun	Fokus Penelitian	Gap/Kesenjangan Penelitian	Kebaruan Penelitian
9	Fitriani dkk. (2023)	Analisis grounding akibat surja petir menggunakan FEM	Tidak mengkaji kondisi aktual Gardu Induk Kotapinang dan tidak menggunakan IEC 62305-1 sebagai acuan utama	Analisis pada objek Gardu Induk Kotapinang berdasarkan IEC 62305-1
10	Abdul-Malek	Pengaruh resistivitas tanah terhadap respons transien grounding	Fokus pada karakteristik tanah, belum mengaitkan dengan evaluasi sistem proteksi petir pada gardu induk tertentu	Mengintegrasikan analisis resistansi pentanahan, parameter keselamatan, dan efektivitas proteksi petir pada Gardu Induk Kotapinang

2.2 Sistem Proteksi Petir

Sistem proteksi petir merupakan suatu sistem terpadu yang dirancang untuk melindungi bangunan, peralatan, dan keselamatan manusia dari dampak sambaran petir, baik secara langsung maupun tidak langsung. Sistem ini bekerja dengan menangkap arus petir, menyalurkannya melalui jalur berimpedansi rendah, dan menyebarkannya ke dalam tanah secara aman melalui sistem pembumian. Efektivitas sistem proteksi petir sangat bergantung pada kualitas desain Lightning Protection System (LPS). Oleh karena itu, perancangan sistem proteksi petir harus mengacu pada standar internasional seperti IEC 62305 agar mampu mengendalikan Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah dalam batas aman serta menjamin keandalan dan keselamatan instalasi [15].

2.2.1 Konsep dasar sistem proteksi

Sistem proteksi dirancang untuk mendeteksi kondisi gangguan pada sistem tenaga listrik dan mengamankan peralatan serta keselamatan manusia. Agar dapat bekerja secara efektif, sistem proteksi harus memenuhi beberapa prinsip dasar yang saling mendukung. Prinsip selektivitas menekankan bahwa hanya bagian sistem yang mengalami gangguan yang harus diputus, sementara bagian lain tetap beroperasi normal. Prinsip ini bertujuan menjaga kontinuitas penyaluran tenaga listrik dan mencegah pemadaman yang tidak diperlukan. Prinsip keandalan (reliability) berkaitan dengan kemampuan sistem proteksi untuk bekerja secara

tepat saat terjadi gangguan dan tidak bekerja saat kondisi normal. Sistem proteksi yang andal akan meningkatkan tingkat keamanan dan kepercayaan terhadap operasi sistem.

Prinsip sensitivitas menunjukkan kemampuan sistem proteksi dalam mendeteksi gangguan meskipun nilainya relatif kecil. Sensitivitas yang baik memastikan gangguan dapat terdeteksi sejak awal tanpa menimbulkan operasi proteksi yang keliru. Prinsip kecepatan kerja proteksi berhubungan dengan waktu respon sistem dalam memutus gangguan. Semakin cepat gangguan diatasi, semakin kecil risiko kerusakan pada peralatan dan sistem. Selain itu, prinsip koordinasi dan backup proteksi memastikan bahwa peralatan proteksi bekerja sesuai urutan yang telah ditetapkan. Jika proteksi utama gagal beroperasi, proteksi cadangan akan bekerja untuk menjaga keamanan sistem secara keseluruhan.

2.2.2 Sistem Proteksi Eksternal

Sistem proteksi petir eksternal (sambaran petir langsung) adalah rangkaian perangkat yang dipasang pada bagian luar bangunan untuk melindungi struktur dari bahaya sambaran petir langsung maupun pelepasan energi utama petir yang mengenai bangunan. Komponen sistem proteksi petir eksternal umumnya terdiri dari:

1. Terminasi udara (*Air Terminal*)

Terminasi udara (*air terminal*) merupakan salah satu komponen utama dalam sistem proteksi petir eksternal yang berfungsi sebagai titik penerima sambaran petir. Perangkat ini dipasang pada bagian tertinggi bangunan serta ditempatkan pada posisi yang strategis, umumnya di titik pusat atau area tertentu yang paling berpotensi tersambar, sehingga bangunan yang dilindungi dapat terhindar dari dampak langsung sambaran petir.



Gambar 2. 1 Air terminal

2. Konduktor penyalur (*Down Conductor*)

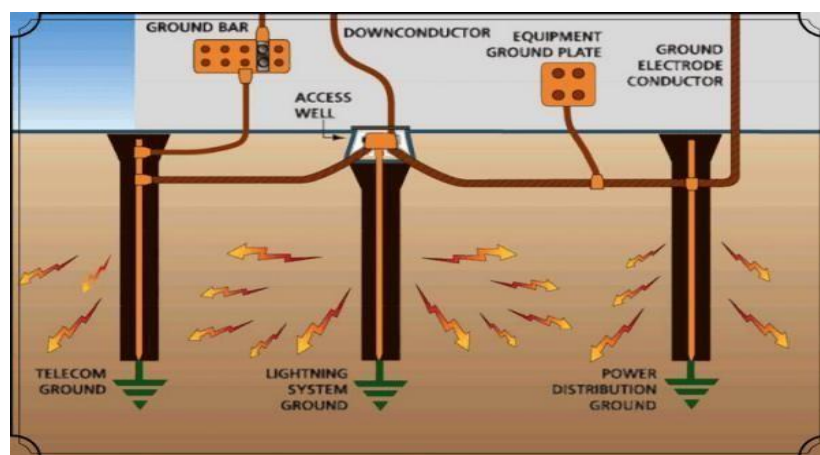
Konduktor penyalur (*down conductor*) merupakan komponen sistem proteksi petir eksternal yang berfungsi menyalurkan arus sambaran petir dari bagian terminasi udara menuju sistem pentanahan.



Gambar 2. 2 Down conductor

3. Sistem Pentanahan (*Grounding System*)

Sistem pentanahan (*grounding*) merupakan bagian dari sistem proteksi petir eksternal yang berfungsi menyediakan jalur penghantar bagi arus sambaran petir untuk dialirkan dengan aman ke dalam tanah. Grounding umumnya menggunakan elektroda yang ditanam di dalam tanah dengan target tahanan pentanahan dibuat serendah mungkin, dan pada banyak referensi praktis nilainya dianjurkan $\leq 5 \Omega$.



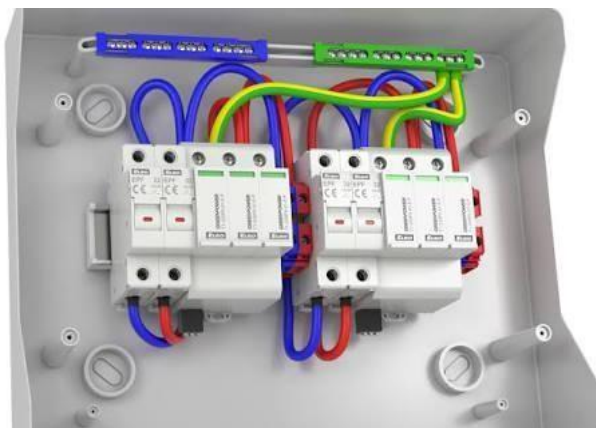
Gambar 2. 3 Grounding sistem

2.2.3 Sistem proteksi internal

Jika sistem eksternal menangani ancaman dari luar, maka sistem internal mengatasi efek tidak langsung dari sambaran petir, seperti lonjakan arus listrik yang dapat merusak perangkat elektronik [16].

a) *Surge Protection Device (SPD)*

Surge Protective Device (SPD) merupakan salah satu elemen penting dalam sistem proteksi petir internal yang berfungsi membatasi kenaikan tegangan transien akibat sambaran petir tidak langsung maupun aktivitas switching pada sistem tenaga listrik. Mekanisme kerja SPD dilakukan dengan menyalurkan tegangan lebih ke sistem pembumian, sehingga tegangan yang diterima oleh peralatan listrik dan elektronik tetap berada pada tingkat yang aman. Di lingkungan gardu induk, SPD umumnya dipasang pada sisi masuk suplai daya, panel distribusi, serta sistem kontrol guna melindungi peralatan sensitif seperti relay proteksi, sistem kendali, dan SCADA dari potensi kerusakan akibat lonjakan tegangan. Adapun komponen *Surge Protective Device (SPD)* dapat terlihat pada Gambar 2.4

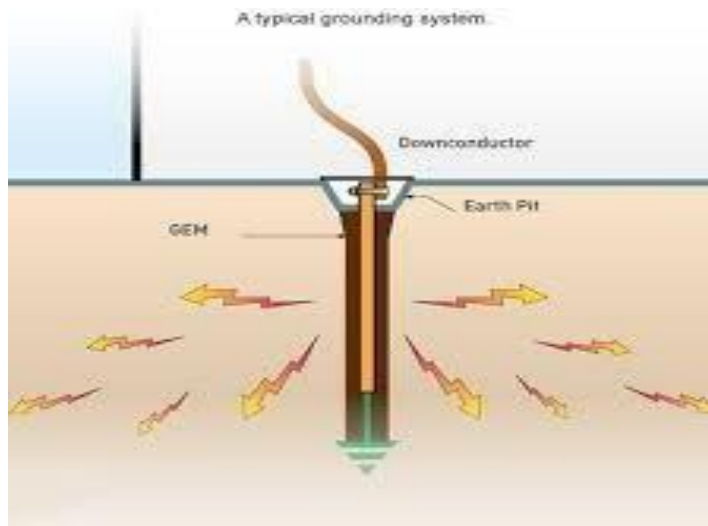


Gambar 2. 4 *Surge Protection Device*

b) Sistem Pembumian Terintegrasi (*Integrated Grounding System*)

Sistem pembumian terintegrasi berfungsi menjaga agar seluruh bagian logam dan peralatan listrik dalam instalasi memiliki tingkat potensial yang sama. Kondisi ini penting untuk mengurangi perbedaan tegangan berbahaya yang dapat timbul akibat induksi petir. Kinerja sistem pembumian sangat dipengaruhi oleh nilai resistivitas tanah di lokasi pembangkit, sehingga perancangan grounding harus mempertimbangkan karakteristik geolistrik setempat agar

mampu menyalurkan arus gangguan secara efektif dan aman. Adapun grounding system dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2. 5 *Grounding System*

c) *Equipotential Bonding* (Penyamaan Potensial)

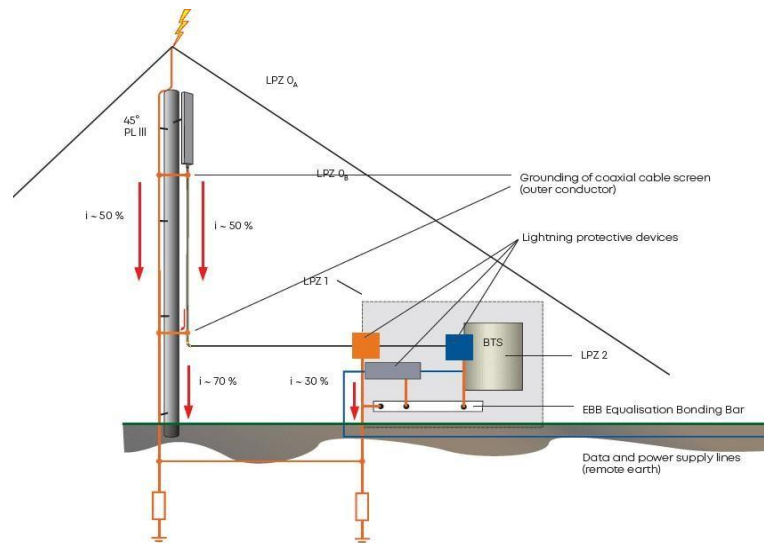
Equipotential bonding atau penyamaan potensial dilakukan dengan cara menghubungkan semua bagian konduktif, seperti rangka peralatan, struktur baja, dan pipa logam, ke dalam satu sistem pembumian terpadu. Tujuan utama dari penerapan bonding adalah mencegah terjadinya perbedaan potensial ketika terjadi lonjakan tegangan akibat petir. Bonding yang dirancang dengan baik berperan signifikan dalam menurunkan risiko tegangan sentuh dan tegangan langkah di area operasional gardu induk, sekaligus meningkatkan keselamatan personel dan meminimalkan kemungkinan kerusakan peralatan akibat arus bocor.



Gambar 2. 6 *Equipotential Bonding*

d) Proteksi terhadap Induksi Elektromagnetik (EMI/LEMP Protection)

Selain dampak langsung, sambaran petir juga dapat menghasilkan medan elektromagnetik yang kuat yang berpotensi menginduksi tegangan pada kabel daya maupun kabel sinyal. Oleh karena itu, perlindungan terhadap induksi elektromagnetik atau Lightning Electromagnetic Pulse (LEMP) menjadi bagian integral dari sistem proteksi internal. Langkah-langkah mitigasi yang diterapkan meliputi penataan jalur kabel yang tepat, penggunaan pelindung atau shielding, serta pemisahan antara kabel daya dan kabel kontrol, sehingga gangguan induksi dapat ditekan dan keandalan sistem kontrol serta instrumentasi pembangkit tetap terjaga. Adapun proteksi petir terhadap induksi elektromagnetik dapat dilihat pada Gambar 2.7



Gambar 2. 7 Proteksi terhadap Induksi Elektromagnetik

e) Koordinasi Proteksi Internal dan Eksternal

Secara menyeluruh, efektivitas sistem proteksi petir internal sangat bergantung pada dukungan sistem proteksi eksternal dan sistem pembumian yang dirancang dengan baik. Koordinasi antara air terminal, down conductor, grounding grid, dan SPD memungkinkan energi petir diredam secara bertahap dan disalurkan ke tanah dengan aman. Pendekatan proteksi yang terintegrasi ini direkomendasikan dalam standar IEC 62305 guna menjamin perlindungan yang komprehensif terhadap bangunan, peralatan, serta keselamatan manusia.

2.3 Standar IEC 62305-3

Standar IEC 62305-3: Protection Against Lightning – Physical Damage to Structures and Life Hazard merupakan acuan internasional dalam perancangan sistem proteksi petir yang berfokus pada perlindungan struktur bangunan, peralatan, dan keselamatan manusia. Standar ini mengatur prinsip proteksi, sistem pembumian, batas keselamatan tegangan, serta kriteria desain grounding agar sistem proteksi petir dapat bekerja secara efektif dan aman.

2.3.1 Prinsip proteksi struktur

Prinsip utama proteksi struktur dalam IEC 62305-3 adalah mengendalikan dan mengalirkan arus petir secara aman ke tanah tanpa menimbulkan kerusakan fisik maupun bahaya bagi manusia. Sistem proteksi dirancang untuk:

1. Menangkap sambaran petir menggunakan air termination system
2. Menyalurkan arus petir melalui down conductor dengan impedansi rendah
3. Menyebarkan arus petir ke tanah melalui sistem pembumian
4. Mencegah percikan (sparking) dengan penerapan equipotential bonding Metode yang digunakan dalam penentuan sistem penangkap meliputi metode *rolling sphere*, sudut proteksi, dan *mesh method*, yang disesuaikan dengan tingkat proteksi (*Lightning Protection Level / LPL*).

2.3.2 Sistem pembumian menurut IEC 62305-3

Sistem pembumian dalam IEC 62305-3 harus dirancang untuk mengalirkan arus petir ke tanah secara efektif dengan mempertimbangkan kondisi tanah dan konfigurasi elektroda. Prinsip utama sistem pembumian menurut IEC adalah:

1. Memiliki impedansi rendah untuk mempercepat pelepasan arus petir
2. Menggunakan elektroda yang terintegrasi (ring, rod, atau grid)
3. Menyediakan distribusi arus yang merata di dalam tanah
4. Terhubung dengan sistem bonding untuk menyamakan potensial

IEC merekomendasikan penggunaan sistem pembumian tipe *ring electrode* yang mengelilingi bangunan atau kombinasi dengan elektroda vertikal untuk meningkatkan efektivitas.

2.4 Sistem Penumbumian (*Grounding*)

Sistem penumbumian (*grounding system*) adalah suatu perangkat instalasi yang berfungsi untuk melepaskan arus listrik atau petir ke dalam bumi, salah satu kegunaannya untuk melepas muatan arus petir. Tingkat kehandalan sebuah *grounding* di nilai dari konduktivitas logam terhadap tanah yang ditancapinya. Semakin konduktif tanah terhadap benda logam, maka semakin baik. Nilai *grounding* adalah ukuran resistansi antara elektroda *grounding* dan tanah. Resistansi ini memengaruhi kemampuan sistem untuk mengalirkan arus listrik berlebih ke tanah dengan aman. Idealnya, resistansi ini harus serendah mungkin agar arus listrik dapat mengalir tanpa hambatan yang signifikan. Nilai resistansi *grounding* diukur dalam satuan ohm (Ω), dan semakin rendah nilainya, semakin baik kualitas sistem *grounding* tersebut [17].

2.4.1 Parameter kinerja sistem penumbumian

Kinerja sistem penumbumian (*grounding*) dinilai melalui beberapa parameter utama yang berkaitan langsung dengan efektivitas proteksi petir dan keselamatan manusia.

1. Tahanan penumbumian, yang menunjukkan seberapa baik sistem *grounding* mengalirkan arus listrik ke tanah. Nilai tahanan penumbumian yang rendah menandakan bahwa sistem penumbumian bekerja secara efektif.

2. *Ground Potential Rise (GPR)*

Menyatakan kenaikan potensial tanah saat arus petir atau arus gangguan mengalir ke sistem penumbumian. Nilai GPR yang tinggi berpotensi menimbulkan bahaya keselamatan.

3. Resistivitas Tanah (*Soil Resistivity*)

Merupakan karakteristik fisik tanah yang sangat memengaruhi kinerja sistem penumbumian. Semakin tinggi resistivitas tanah, semakin besar tantangan dalam menurunkan tahanan penumbumian.

4. Tegangan Sentuh (*Touch Voltage*)

Tegangan yang muncul antara bagian konduktif yang disentuh manusia dan permukaan tanah di sekitarnya saat terjadi gangguan atau sambaran petir.

5. Tegangan Langkah (*Step Voltage*)

Tegangan yang timbul antara dua titik di permukaan tanah dengan jarak satu langkah manusia akibat distribusi potensial tanah yang tidak merata.

6. Konfigurasi Elektroda Grounding

Bentuk dan susunan elektroda (grid, batang vertikal, atau kombinasi) yang memengaruhi efektivitas penyaluran arus dan nilai tahanan pembumian.

7. Kepatuhan terhadap Standar (IEC 62305-3)

Menunjukkan sejauh mana kinerja sistem pembumian memenuhi kriteria keselamatan dan teknis yang ditetapkan dalam standar internasional.

2.4.2 Konfigurasi elektroda grounding

Konfigurasi elektroda grounding sangat menentukan kemampuan sistem pembumian dalam menyebarkan arus petir ke dalam tanah. Pemilihan konfigurasi elektroda harus disesuaikan dengan kondisi resistivitas tanah dan karakteristik lokasi instalasi. Beberapa konfigurasi yang umum digunakan pada pembangkit listrik antara lain elektroda grid, elektroda batang vertikal (*deep rod*), serta kombinasi keduanya.

Grounding grid terdiri dari konduktor horizontal yang ditanam di dalam tanah dan disusun membentuk jaringan. Konfigurasi ini efektif untuk menyebarkan arus petir secara merata di permukaan tanah, sehingga mampu menurunkan nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah di area operasional. Oleh karena itu, grounding grid banyak diterapkan pada area pembangkit yang luas seperti PLTGU.

Elektroda batang vertikal atau *deep rod* digunakan untuk menjangkau lapisan tanah yang lebih dalam dan memiliki resistivitas lebih rendah. Konfigurasi ini sangat bermanfaat pada lokasi dengan tanah permukaan beresistivitas tinggi. Dalam praktiknya, sistem grounding pada gardu induk sering menggunakan kombinasi antara grounding grid dan elektroda batang agar diperoleh nilai tahanan pembumian yang lebih rendah dan distribusi arus petir yang lebih efektif, terutama pada kondisi tanah yang tidak homogen.

2.5 Tahanan Pbumian (*Ground Resistance*)

Tahanan pbumian merupakan salah satu parameter utama dalam sistem pbumian yang berperan penting terhadap efektivitas proteksi petir dan keselamatan instalasi tenaga listrik. Tahanan pbumian menunjukkan kemampuan suatu sistem grounding dalam menyalurkan dan menyebarkan arus gangguan, khususnya arus petir, ke dalam tanah secara cepat dan aman. Nilai tahanan pbumian yang rendah sangat diperlukan untuk membatasi kenaikan potensial tanah (*Ground Potential Rise*), serta untuk mengurangi risiko terjadinya tegangan sentuh dan tegangan langkah yang membahayakan manusia maupun peralatan [18].

Besarnya tahanan pbumian dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain resistivitas tanah, jenis dan konfigurasi elektroda pbumian, dimensi fisik elektroda, serta kondisi lingkungan sekitar. Oleh karena itu, pemilihan jenis sistem pbumian harus disesuaikan dengan karakteristik tanah pada lokasi pemasangan agar diperoleh kinerja sistem yang optimal.

2.5.1 Elektroda batang vertikal (*deep rod*)

Elektroda batang vertikal atau *deep rod* merupakan jenis elektroda pbumian yang paling umum digunakan dalam sistem pbumian. Elektroda ini berupa batang logam konduktif yang ditanam secara vertikal ke dalam tanah hingga kedalaman tertentu dengan tujuan mencapai lapisan tanah yang memiliki resistivitas lebih rendah.

Menurut pendekatan teoritis yang dikemukakan oleh Dwight dan dalam standar IEEE, tahanan pbumian elektroda batang vertikal dipengaruhi oleh resistivitas tanah (ρ), panjang elektroda (L), dan diameter elektroda (d). Secara matematis, persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai tahanan pbumian berbanding lurus dengan resistivitas tanah dan berbanding terbalik dengan panjang elektroda.

Secara fisik, semakin panjang elektroda yang ditanam ke dalam tanah, maka luas kontak antara elektroda dan media tanah akan semakin besar, sehingga kemampuan elektroda dalam menyebarkan arus ke tanah menjadi lebih efektif. Sebaliknya, pengaruh diameter elektroda terhadap penurunan tahanan pbumian

relatif kecil dibandingkan dengan panjang elektroda, sehingga peningkatan kedalaman penanaman lebih efektif dibandingkan memperbesar diameter batang.

Implikasi teoritis dari persamaan ini menunjukkan bahwa pada tanah dengan nilai resistivitas tinggi, seperti tanah berpasir, berbatu, atau tanah kering, nilai tahanan pbumian elektroda batang vertikal akan cenderung meningkat secara linier. Oleh karena itu, penggunaan satu elektroda batang sering kali tidak cukup untuk memenuhi nilai tahanan pbumian yang disyaratkan, sehingga diperlukan penambahan kedalaman atau jumlah elektroda.

Secara matematis, tahanan pbumian elektroda batang vertikal dapat dihitung menggunakan persamaan Dwight yang terlihat pada Persamaan 2.1

$$R_{rod} = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{d} \right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

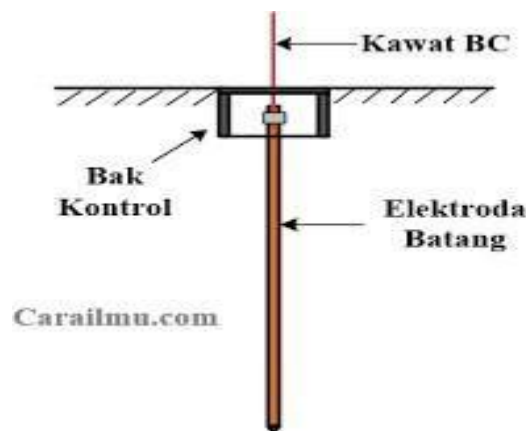
Maka:

R_{rod} = tahanan pbumian elektroda batang (Ω)

ρ = resistivitas tanah ($\Omega \cdot m$)

L = panjang elektroda batang yang tertanam (m)

d = diameter elektroda batang (m)



Gambar 2. 8 Elektroda batang

2.5.2 Grounding grid (jaringan horizontal)

Grounding grid merupakan sistem pbumian yang terdiri dari jaringan konduktor horizontal yang ditanam di dalam tanah dengan pola tertentu dan saling terhubung. Sistem ini umumnya diterapkan pada instalasi dengan area luas, seperti

gardu induk dan fasilitas industri, karena mampu mendistribusikan arus gangguan secara merata ke seluruh area.

Berdasarkan IEEE Std 80, tahanan pembumian grounding grid dipengaruhi oleh resistivitas tanah dan total panjang konduktor grid yang digunakan. Semakin besar total panjang konduktor, maka semakin kecil nilai tahanan pembumian yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya luas permukaan konduktor yang bersentuhan langsung dengan tanah.

Untuk sistem grounding grid dengan area yang relatif luas, nilai tahanan pembumian dapat didekati sebagai fungsi resistivitas tanah dan luas area grid. Pendekatan ini menunjukkan bahwa semakin besar luas area pembumian, maka arus gangguan dapat menyebar ke volume tanah yang lebih besar, sehingga gradien tegangan tanah dapat ditekan.

Keunggulan utama grounding grid terletak pada kemampuannya dalam mengendalikan distribusi tegangan di permukaan tanah. Dengan distribusi tegangan yang lebih merata, sistem ini efektif dalam menurunkan nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah. Namun demikian, pada lokasi dengan resistivitas tanah yang tinggi, efektivitas grounding grid horizontal saja sering kali terbatas karena lapisan tanah bagian atas umumnya memiliki resistivitas yang lebih besar dibandingkan lapisan tanah yang lebih dalam.

Untuk sistem grounding grid, tahanan pembumian dipengaruhi oleh luas area dan panjang total konduktor, yang secara sederhana dapat didekati dengan Persamaan 2.2

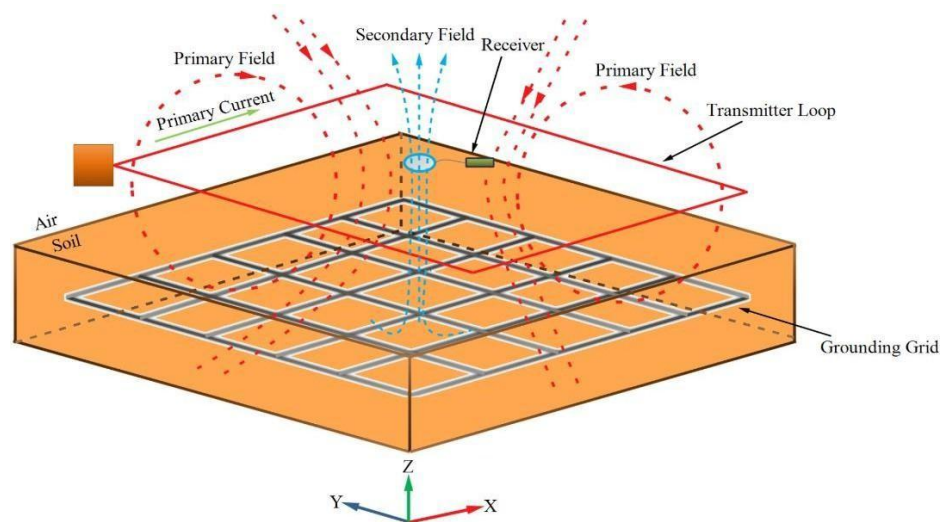
$$R_g \approx \frac{\rho}{4 L_{total}} \quad (2.2)$$

Dimana :

R_g = tahanan pembumian grounding grid (Ω)

ρ = resistivitas tanah ($\Omega \cdot m$)

L_{total} = total panjang konduktor grid yang tertanam (m)



Gambar 2. 9 Grounding grid

2.5.3 Sistem pembumian kombinasi (grid + rod)

Sistem pembumian kombinasi merupakan penggabungan antara grounding grid horizontal dengan elektroda batang vertikal. Konfigurasi ini dirancang untuk mengoptimalkan kinerja sistem pembumian dengan memanfaatkan keunggulan masing-masing metode, yaitu kemampuan grid dalam menyebarkan arus secara merata di permukaan tanah dan kemampuan elektroda batang dalam menjangkau lapisan tanah yang lebih konduktif.

Secara teoritis, tahanan pembumian total pada sistem kombinasi dapat dianalisis menggunakan pendekatan rangkaian paralel, di mana tahanan grounding grid dan tahanan masing-masing elektroda batang bekerja secara bersamaan dalam menyalurkan arus ke tanah. Dengan bertambahnya jumlah elektroda batang yang terhubung ke grounding grid, nilai tahanan pembumian total akan semakin menurun.

Sistem pembumian kombinasi sangat efektif diterapkan pada daerah dengan variasi resistivitas tanah yang signifikan, seperti wilayah tropis yang memiliki perbedaan karakteristik tanah antara lapisan atas dan lapisan bawah. Selain mampu menurunkan tahanan pembumian, sistem ini juga lebih andal dalam mengendalikan *Ground Potential Rise*, serta mengurangi risiko terjadinya tegangan sentuh dan tegangan langkah saat terjadi sambaran petir atau gangguan hubung singkat ke tanah.

Pada sistem pembumian kombinasi, tahanan total dapat dianalisis sebagai rangkaian paralel antara grid dan elektroda batang pada Persamaan 2.3

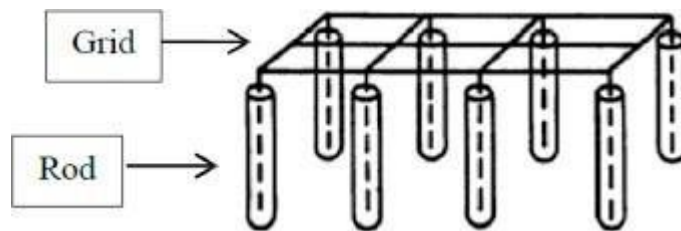
$$\frac{1}{R_{Total}} = \frac{1}{R_{grid}} + \sum \frac{1}{R_{rod}} \quad (2.3)$$

Dimana :

R_{Total} = tahanan pembumian total sistem kombinasi (Ω)

R_{grid} = tahanan grounding grid (Ω)

R_{rod} = tahanan masing-masing elektroda batang (Ω)



Gambar 2. 10 Grounding kombinasi

2.6 Resistansi Pentanahan

Resistansi pentanahan merupakan besarnya hambatan listrik yang dimiliki oleh sistem pembumian terhadap aliran arus listrik menuju tanah. Sistem pentanahan berfungsi sebagai jalur pelepasan arus gangguan, termasuk arus petir, agar dapat disalurkan dan disebarkan ke dalam tanah secara aman sehingga tidak membahayakan manusia maupun merusak peralatan listrik.

Secara prinsip, resistansi pentanahan menunjukkan kemampuan elektroda grounding dalam mengalirkan arus listrik ke bumi. Semakin kecil nilai resistansi pentanahan, maka semakin baik sistem pembumian dalam meredam energi gangguan listrik. Nilai resistansi yang tinggi menyebabkan arus petir tidak dapat tersebar secara efektif sehingga berpotensi menimbulkan kenaikan tegangan tanah (Ground Potential Rise), tegangan sentuh, dan tegangan langkah yang dapat melampaui batas keselamatan.

Besarnya resistansi pentanahan dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu resistivitas tanah, jenis dan ukuran elektroda, kedalaman penanaman elektroda, jumlah elektroda yang digunakan, serta kondisi lingkungan seperti kadar air dan

temperatur tanah. Tanah dengan resistivitas rendah, seperti tanah lembab atau berair, umumnya menghasilkan nilai resistansi pentanahan yang lebih kecil dibandingkan tanah berbatu atau kering.

Rumus pendekatan untuk menghitung resistansi pentanahan (grounding grid resistance) dari suatu sistem grounding grid pada Persamaan 2.4

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (2.4)$$

dengan:

R = resistansi pentanahan (Ω)

ρ = resistivitas tanah ($\Omega \cdot m$)

L = panjang elektroda (m)

d = diameter elektroda (m)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai resistansi pentanahan berbanding lurus dengan resistivitas tanah dan berbanding terbalik dengan panjang elektroda yang ditanam. Oleh karena itu, peningkatan kedalaman atau penambahan elektroda grounding sering digunakan untuk menurunkan nilai resistansi pentanahan.

Dalam standar proteksi petir IEC 62305-3, sistem pentanahan harus dirancang sedemikian rupa sehingga mampu menyalurkan arus petir ke tanah dengan impedansi serendah mungkin guna mengurangi risiko bahaya listrik serta kerusakan peralatan. Evaluasi resistansi pentanahan menjadi parameter penting dalam menilai efektivitas sistem proteksi petir pada suatu instalasi tenaga listrik.

2.7 Resistivitas Tanah

Resistivitas tanah merupakan salah satu parameter utama dalam perancangan dan evaluasi sistem pembumian pada sistem proteksi petir. Dalam merancang sistem proteksi petir, resistivitas tanah (ohm-meter) menjadi parameter krusial karena menentukan seberapa efektif tanah dalam meredam arus listrik. Di area gardu induk, kemampuan tanah untuk menyerap energi petir sangat bergantung pada nilai ini. Jika resistivitasnya tinggi, hambatan pembumian pun meningkat, yang berisiko memicu lonjakan tegangan berbahaya seperti *Ground Potential Rise*

(GPR), serta tegangan sentuh dan tegangan langkah yang mengancam keselamatan instalasi [18].

Secara matematis, resistivitas tanah (ρ) didefinisikan sebagai hambatan listrik suatu medium homogen dengan panjang satu meter dan luas penampang satu meter persegi, yang dinyatakan dalam satuan ohm-meter ($\Omega \cdot m$). Nilai resistivitas tanah yang rendah menunjukkan kemampuan tanah yang baik dalam menghantarkan arus listrik, sehingga lebih efektif dalam mereduksi tegangan sentuh, tegangan langkah, serta Ground Potential Rise (GPR) pada saat terjadi gangguan atau sambaran petir. Sebaliknya, tanah dengan resistivitas tinggi cenderung menghasilkan nilai tahanan pembumian yang besar dan berpotensi meningkatkan risiko keselamatan peralatan maupun manusia.

Karakteristik resistivitas ini tidak sama dan sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Kadar air adalah faktor kunci; tanah yang lembap mempermudah pergerakan ion sehingga hambatannya rendah, sementara tanah kering cenderung menghambat arus. Selain itu, temperatur turut berpengaruh, di mana suhu yang lebih tinggi meningkatkan mobilitas ion dan menurunkan hambatan.

Faktor fisik seperti jenis dan kepadatan tanah juga menentukan kualitas pembumian. Tanah liat yang kaya mineral biasanya lebih konduktif dibandingkan tanah berpasir atau berbatu. Tanah yang padat juga lebih baik dalam mengalirkan listrik karena kontak antarpartikelnya lebih rapat. Mengingat variasi ini bisa berbeda drastis antar lokasi maupun antar lapisan tanah, analisis mendalam pada area pembangkit menjadi hal yang wajib dilakukan untuk menjamin keamanan sistem.

Rumus resistivitas tanah dapat dilihat pada Persamaan 2.5

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (2.5)$$

dengan:

ρ = resistivitas tanah ($\Omega \cdot m$)

R = resistansi (Ω)

A = luas penampang (m^2)

L = panjang lintasan arus (m)

Kondisi tanah tidak pernah sama karena dipengaruhi oleh beberapa elemen alami, beberapa faktor yang mempengaruhi karakteristik tanah yaitu :

1. Kadar Air dan kelembapan

Ini adalah faktor paling dominan. Air berfungsi sebagai media pergerakan ion listrik; semakin lembap tanahnya, semakin rendah hambatannya.

2. Suhu tanah

Saat suhu naik, mobilitas ion meningkat sehingga resistivitas turun. Sebaliknya, suhu yang dingin cenderung membuat tanah lebih sulit menghantarkan arus.

3. Komposisi dan mineralogi

Tanah liat yang kaya mineral biasanya bersifat konduktif (resistivitas rendah), berbeda dengan tanah berpasir atau berbatu yang memiliki hambatan tinggi.

4. Kepadatan tanah

Tanah yang padat memungkinkan partikel saling bersentuhan dengan lebih rapat, sehingga mempermudah aliran listrik [17].

2.7.1 Metode pengukuran resistivitas tanah

Dalam perencanaan dan evaluasi sistem pbumian (*grounding*), langkah awal yang paling krusial adalah mengukur resistivitas tanah. Untuk kebutuhan studi sistem proteksi petir, metode Wenner dan Schlumberger menjadi dua teknik yang paling sering diandalkan karena keduanya mampu menyajikan data karakteristik geolistrik tanah secara akurat dan tepat.

Wenner bekerja dengan menanam empat elektroda secara sejajar dengan jarak antar elektroda yang dibuat sama besar. Arus listrik dialirkan melalui dua elektroda di sisi luar, sementara beda potensialnya diukur melalui dua elektroda di bagian tengah. Metode ini menjadi pilihan utama dalam merancang *grounding grid* karena efektif dalam memberikan nilai rata-rata resistivitas tanah hingga kedalaman tertentu. Dengan mengubah-ubah jarak antar elektroda, teknisi dapat menganalisis bagaimana perubahan resistivitas tanah terhadap kedalamannya. Nilai resistivitas tanah semu (ρ) dihitung menggunakan Persamaan 2.6

$$\rho = 2\pi aR \quad (2.6)$$

dimana:

ρ = resistivitas tanah ($\Omega \cdot m$)

a = jarak antar elektroda (m)

R = tahanan hasil pengukuran (Ω)

Di sisi lain, Metode Schlumberger memiliki prinsip yang serupa namun dengan konfigurasi jarak yang berbeda, di mana jarak antara elektroda arus dibuat jauh lebih lebar dibandingkan elektroda potensialnya. Keunggulan metode ini terletak pada sensitivitasnya dalam mendeteksi variasi lapisan tanah yang lebih dalam serta kemampuannya mengidentifikasi struktur tanah berlapis. Dalam proyek skala besar seperti gardu induk, metode Schlumberger sangat berguna untuk mengevaluasi penggunaan *deep rod* (elektroda batang dalam), guna memastikan pembumian mencapai lapisan tanah dengan hambatan paling rendah [19].

2.7.2 Rentang nilai resistivitas tanah di Indonesia

Kondisi geologis dan iklim tropis Indonesia menyebabkan nilai resistivitas tanah bervariasi secara signifikan. Tanah liat basah yang umumnya ditemukan di daerah dataran rendah memiliki resistivitas relatif rendah, berkisar antara 10–100 $\Omega \cdot m$, sehingga mendukung efektivitas sistem pembumian. Sebaliknya, tanah berpasir, tanah laterit, dan tanah berbatu yang banyak dijumpai di wilayah gardu induk dan kawasan industri memiliki resistivitas yang lebih tinggi, dengan nilai yang dapat mencapai 1.000–3.000 $\Omega \cdot m$ [20]. Adapun rentang nilai resistivitas tanah di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2. 2 Rentang Nilai Resistivitas Tanah di Indonesia

Jenis Tanah	Karakteristik Umum	Rentang Resistivitas ($\Omega \cdot m$)	Implikasi terhadap Sistem Pembumian
Tanah liat basah	Kadar air tinggi, butiran halus, konduktivitas ion baik	10 – 100	Implikasi terhadap Sistem Pembumian
Tanah lempung lembap	Campuran liat dan pasir, kelembapan sedang	50 – 200	Cukup baik; grounding grid standar umumnya efektif
Tanah aluvial/ rawa	Jenuh air, dekat muka air tanah	5 – 50	Sangat mendukung pembumian; GPR relatif kecil
Tanah pasir basah	Porositas tinggi, kadar air fluktuatif	200 – 500	Membutuhkan perluasan elektroda atau penambahan rod
Tanah pasir kering	Kandungan air rendah, konduktivitas rendah	500 – 1.000	Kurang baik; perlu rekayasa grounding khusus

Jenis Tanah	Karakteristik Umum	Rentang Resistivitas ($\Omega \cdot m$)	Implikasi terhadap Sistem Penumian
Tanah laterit	Kaya besi, keras, umum di wilayah tropis	800 – 2.000	Tantangan signifikan; perlu deep grounding atau soil treatment
Tanah berbatu / kerikil	Kontak antarpartikel buruk	1.000 – 3.000	Sangat sulit; wajib desain khusus (deep rod, chemical grounding)
Tanah pesisir berpasir	Dipengaruhi air laut, non-homogen	500 – 3.000	Perlu analisis resistivitas berlapis dan kombinasi elektroda
Tanah industri teruruk (fill soil)	Campuran material, tidak homogen	300 – 2.000	Perlu pengukuran detail sebelum desain penumian

2.8 Tegangan Langkah, Tegangan Sentuh, dan *Ground Potential Rise* (GPR)

Tegangan langkah, tegangan sentuh, dan *Ground Potential Rise* (GPR) merupakan parameter keselamatan yang sangat penting dalam sistem proteksi petir, pada Gardu Induk Kotapinang. Ketiga parameter ini menggambarkan kondisi tegangan yang dapat muncul di permukaan tanah maupun pada bagian logam peralatan saat terjadi aliran arus petir ke sistem penumian. Nilai-nilai tersebut sangat dipengaruhi oleh besarnya arus petir dan karakteristik resistivitas tanah, sehingga menjadi indikator utama dalam menilai efektivitas sistem grounding sesuai standar IEC 62305-3 [13].

Tegangan langkah adalah beda potensial yang terjadi antara dua titik di permukaan tanah yang berjarak satu langkah manusia ketika arus petir mengalir ke dalam tanah. Kondisi ini dapat terjadi ketika seseorang berjalan di sekitar area sistem penumian saat terjadi gangguan petir. Tegangan langkah yang melebihi batas aman dapat menyebabkan aliran arus melalui tubuh manusia, sehingga menimbulkan risiko kejutan listrik.

Secara matematis dapat dinyatakan pada Persamaan 2.7

$$E_{Step} = \frac{(1000 + 1.5 C_s \rho_s) \times 0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.7)$$

Dimana :

E_{step} = tegangan langkah (V)

C_s = faktor permukaan tanah

ρ = resistivitas tanah ($\Omega \cdot m$)

I_g = arus gangguan (A)

d = jarak langkah manusia (m)

Tegangan sentuh merupakan beda potensial antara bagian logam yang tersambung ke sistem pembumian dengan permukaan tanah di sekitar titik pijakan seseorang. Tegangan ini muncul ketika seseorang menyentuh peralatan atau struktur logam pada saat terjadi kenaikan potensial tanah akibat arus petir. Tegangan sentuh umumnya lebih berbahaya dibandingkan tegangan langkah karena jalur arus yang melalui tubuh manusia lebih langsung dan memiliki impedansi yang lebih rendah. Besarnya tegangan sentuh dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.8

$$E_{Touch} = \frac{(1000 + 6 C_s \rho_s) \times 0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.8)$$

dimana :

E_{touch} = tegangan sentuh (V)

C_s = faktor koreksi permukaan tanah (kerikil, beton, tanah alami)

ρ = resistivitas tanah ($\Omega \cdot m$)

I_g = arus gangguan ke tanah (A)



Gambar 2. 11 Tegangan langkah dan tegangan sentuh

Ground Potential Rise (GPR) adalah kenaikan potensial tanah di sekitar sistem pembumian terhadap titik tanah referensi yang jauh, akibat aliran arus petir atau arus gangguan. GPR yang tinggi dapat menyebabkan perbedaan potensial yang signifikan pada area gardu induk, sehingga meningkatkan risiko terjadinya

tegangan sentuh dan tegangan langkah. Oleh karena itu, standar IEC 62305-3 menetapkan bahwa nilai GPR serta tegangan sentuh dan langkah harus dikendalikan agar berada di bawah batas aman untuk menjamin keselamatan personel dan keandalan peralatan. Dapat dinyatakan melalui persamaan Ground Potential Rise (GPR) pada Persamaan 2.8

$$\text{GPR} = I_g \times R_g \quad (2.9)$$

Dimana :

I_g = arus gangguan atau arus petir yang mengalir ke sistem pembumian (A)

R_g = tahanan pembumian total sistem grounding (Ω)

Besarnya tegangan langkah, tegangan sentuh, dan GPR sangat dipengaruhi oleh magnitudo arus petir yang mengalir ke sistem pembumian. Arus petir yang besar akan menghasilkan distribusi potensial tanah yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan nilai GPR di sekitar elektroda grounding. Kondisi ini dapat memperbesar perbedaan potensial antara dua titik di permukaan tanah maupun antara peralatan logam dan tanah, yang pada akhirnya meningkatkan risiko tegangan berbahaya.

Selain arus petir, resistivitas tanah memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap ketiga parameter tersebut. Pada tanah dengan resistivitas tinggi, arus petir cenderung sulit menyebar secara merata, sehingga menyebabkan konsentrasi arus di sekitar elektroda pembumian. Akibatnya, nilai GPR menjadi lebih besar dan gradien tegangan di permukaan tanah meningkat. Hal ini menyebabkan tegangan langkah dan tegangan sentuh menjadi lebih tinggi dibandingkan pada tanah dengan resistivitas rendah.

Pada lokasi dengan karakteristik tanah yang tidak homogen, variasi resistivitas tanah menjadi faktor krusial yang memengaruhi distribusi potensial tanah saat terjadi sambaran petir. Oleh karena itu, sistem pembumian harus dirancang dengan mempertimbangkan kondisi resistivitas tanah lokal serta konfigurasi elektroda yang tepat agar nilai GPR, tegangan langkah, dan tegangan sentuh dapat ditekan hingga memenuhi batas keselamatan sesuai IEC 62305-3.

2.9 Matlab

MATLAB (Matrix Laboratory) merupakan perangkat lunak komputasi numerik tingkat lanjut yang dikembangkan oleh MathWorks dan banyak digunakan dalam bidang teknik, sains, serta penelitian terapan. MATLAB dirancang berbasis matriks sehingga sangat efisien dalam menangani operasi matematis kompleks, analisis data numerik, pemodelan sistem, serta simulasi fenomena teknik yang melibatkan persamaan matematis dalam jumlah besar.

Keunggulan utama MATLAB terletak pada kemampuannya dalam mengintegrasikan perhitungan numerik, visualisasi data, dan pemrograman dalam satu lingkungan kerja terpadu. Dengan sintaks yang relatif sederhana dan mendekati notasi matematika, MATLAB memungkinkan peneliti untuk memodelkan sistem fisik secara akurat tanpa harus berfokus pada kompleksitas pemrograman tingkat rendah. Oleh karena itu, MATLAB banyak digunakan sebagai alat bantu analisis dalam penelitian sistem tenaga listrik, termasuk kajian sistem pembumian dan proteksi petir.

MATLAB berfungsi sebagai alat analisis numerik untuk memecahkan persamaan matematis yang berkaitan dengan fenomena kelistrikan. MATLAB mampu menyelesaikan persamaan aljabar, diferensial, serta integral yang digunakan dalam perhitungan arus, tegangan, impedansi, dan distribusi medan listrik. Kemampuan ini sangat penting dalam menganalisis perilaku sistem pembumian ketika dialiri arus petir dengan magnitudo tinggi. Selain itu, MATLAB mendukung pemrosesan data hasil pengukuran lapangan, seperti nilai resistivitas tanah, arus petir, dan tegangan permukaan tanah. Data tersebut dapat dianalisis secara statistik maupun divisualisasikan dalam bentuk grafik dua dimensi atau tiga dimensi, sehingga memudahkan interpretasi hasil penelitian. Dengan demikian, MATLAB berperan sebagai alat pendukung yang meningkatkan akurasi, efisiensi, dan keandalan analisis penelitian.

MATLAB banyak digunakan dalam simulasi sistem pembumian karena kemampuannya memodelkan hubungan antara resistivitas tanah, konfigurasi elektroda, dan respons sistem terhadap arus impuls petir. Melalui pemodelan matematis, peneliti dapat mensimulasikan berbagai kondisi resistivitas tanah tanpa harus melakukan pengujian fisik berulang di lapangan.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif berbasis pemodelan dan simulasi numerik yang bertujuan menganalisis pengaruh variasi resistivitas tanah terhadap kinerja sistem pembumian pada kondisi gangguan arus petir. Pendekatan kuantitatif digunakan karena seluruh parameter yang dianalisis, seperti tahanan pembumian, distribusi arus petir, Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah, dapat dinyatakan dalam besaran terukur dan dianalisis secara objektif. Metode pemodelan dan simulasi dipilih sebagai alternatif pengujian eksperimental karena fenomena sambaran petir bersifat ekstrem dan berisiko tinggi jika diuji secara langsung. Melalui simulasi numerik, berbagai kondisi resistivitas tanah dan konfigurasi elektroda grounding dapat dianalisis secara aman, efisien, dan terkontrol.

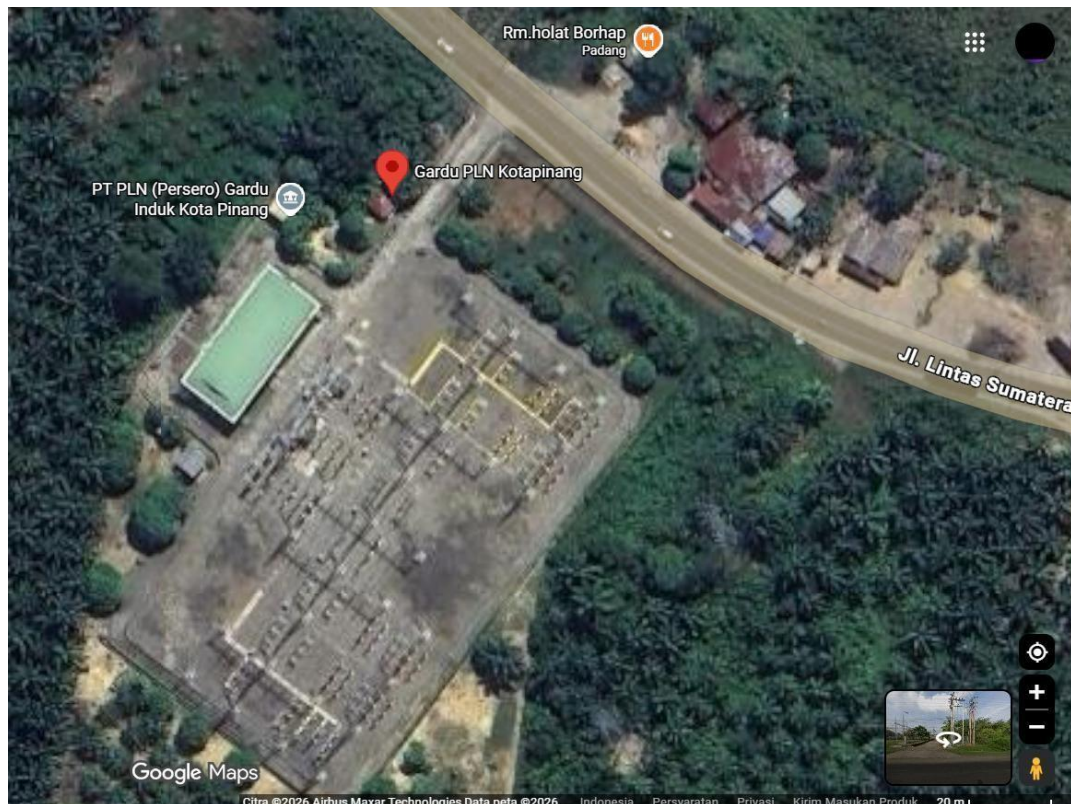
Pendekatan analisis yang digunakan adalah analisis komparatif dan evaluatif, dengan membandingkan kinerja konfigurasi elektroda grounding berupa grid, deep rod, dan kombinasi pada berbagai nilai resistivitas tanah. Evaluasi dilakukan untuk menilai efektivitas dan tingkat keselamatan sistem pembumian berdasarkan parameter teknis yang dihasilkan. Seluruh simulasi dilakukan menggunakan MATLAB sebagai alat analisis utama, dengan kriteria dan batas evaluasi yang mengacu pada standar IEC 62305-3, sehingga hasil penelitian memiliki relevansi teknis dan dapat dijadikan acuan dalam perancangan sistem pembumian yang aman terhadap gangguan petir.

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

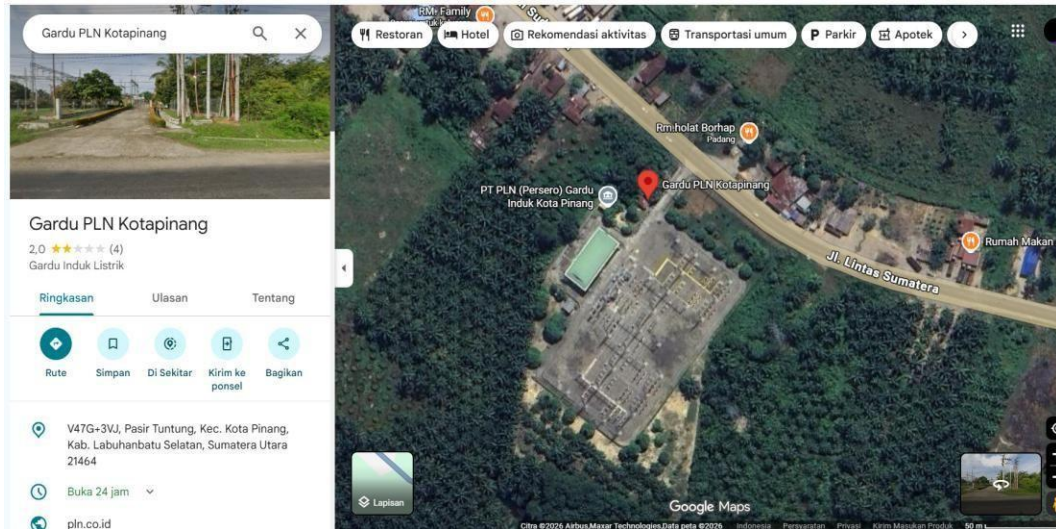
Penelitian ini dilaksanakan di Gardu Induk (GI) Kotapinang yang berlokasi di Kabupaten Labuhanbatu Selatan, Provinsi Sumatera Utara. Gardu induk ini merupakan salah satu fasilitas penting dalam sistem transmisi tenaga listrik yang berfungsi sebagai pusat penyaluran dan distribusi energi listrik ke wilayah sekitarnya. Sebagai instalasi dengan tingkat keandalan yang tinggi, Gardu Induk Kotapinang dilengkapi dengan sistem proteksi petir dan sistem pentanahan (*grounding system*) untuk melindungi peralatan listrik serta menjamin keselamatan personel dari dampak sambaran petir.

Pemilihan Gardu Induk Kotapinang sebagai lokasi penelitian didasarkan pada keberadaan sistem pentanahan yang telah diterapkan dan tersedianya data teknis yang diperlukan untuk mendukung proses analisis. Penelitian difokuskan pada evaluasi nilai resistansi pentanahan serta pengaruhnya terhadap efektivitas sistem proteksi petir melalui analisis *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan sentuh (*Touch Voltage*), dan tegangan langkah (*Step Voltage*) berdasarkan ketentuan IEC 62305-3.

Pelaksanaan penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu pengumpulan data teknis sistem pentanahan, pengolahan data, perhitungan manual, pemodelan dan simulasi menggunakan MATLAB, analisis hasil simulasi, serta evaluasi kesesuaian sistem pentanahan berdasarkan standar IEC 62305-3. Untuk tempat dan lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan 3.2



Gambar 3. 1 Tempat Penelitian (Gardu Induk Kotapinang)



Gambar 3. 2 Lokasi Penelitian

3.2 Data Penelitian

Data penelitian yang digunakan dalam penelitian ini disusun secara sistematis untuk mendukung analisis pengaruh variasi resistivitas tanah terhadap kinerja sistem pembumian dan efektivitas proteksi petir pada Gardu Induk Kotapinang. Data yang digunakan meliputi data primer dan data sekunder yang relevan dengan parameter teknis sistem pembumian, karakteristik tanah, serta standar keselamatan yang berlaku.

3.2.1 Data Resistansi Pentanahan

Data resistansi pentanahan merupakan parameter utama dalam penelitian karena menentukan kemampuan sistem pembumian dalam menyalurkan arus petir secara aman ke tanah. Data hasil pengukuran lapangan menggunakan digital earth tester pada area penelitian, sebagaimana ditunjukkan pada Table 3.1

Tabel 3. 1 Data Resistansi Pentanahan

Parameter	Nilai	Keterangan	Keterangan
Hasil pengukuran lapangan	0,84	Ω	Diukur pada lokasi penelitian
Batas Standar (IEC)	$\leq 10 \Omega$	Ω	Batas aman dibawah $\leq 10 \Omega$
Metode Pengukuran	-	Ω	Sesuai prosedur SPLN

Berdasarkan Tabel 3.1 Data Resistansi Pentanahan, diperoleh hasil pengukuran resistansi pentanahan sebesar $0,84 \Omega$. Pengukuran dilakukan pada beberapa titik menggunakan KYORITSU Digital Earth Tester sesuai dengan prosedur SPLN untuk memastikan hasil yang akurat dan representatif terhadap kondisi sistem pentanahan di lokasi penelitian.

Nilai resistansi pentanahan sebesar $0,84 \Omega$ berada di bawah batas yang dipersyaratkan dalam IEC 62305-3, yaitu $\leq 10 \Omega$. Dengan demikian, sistem pentanahan yang diteliti telah memenuhi standar yang berlaku, sehingga mampu menyediakan jalur pelepasan arus petir ke tanah dengan baik dan mendukung efektivitas sistem proteksi petir secara keseluruhan.

3.2.2 Data Resistivitas Tanah

Data resistivitas tanah merupakan data utama dalam penelitian ini karena resistivitas tanah sangat menentukan kemampuan sistem pembumian dalam menyalurkan dan menyebarkan arus petir ke dalam tanah. Data resistivitas tanah diperoleh melalui pengukuran langsung di lokasi penelitian menggunakan metode Wenner empat elektroda. Pengukuran dilakukan dengan variasi jarak antar elektroda untuk merepresentasikan kondisi tanah pada kedalaman yang berbeda, sehingga dapat menggambarkan karakteristik tanah berlapis (*soil stratification*). Nilai resistivitas tanah yang diperoleh selanjutnya diklasifikasikan ke dalam beberapa tingkat resistivitas, yaitu resistivitas rendah, sedang, dan tinggi, yang digunakan sebagai skenario input dalam analisis dan simulasi sistem pembumian. Data resistivitas tanah digunakan sebagai dasar utama dalam analisis kinerja sistem pembumian. Dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3. 2 Data Resistivitas Tanah

Parameter	Nilai	Satuan
Jenis sistem pentanahan	Ground Grid + Ground Rod	-
Material konduktor	Tembaga (Copper)	-
Diameter konduktor	1,78	mm
Luas mesh grounding	2500	m ²
Jarak antar konduktor	5	m
Kedalaman penanaman	3	m
Jumlah ground mesh	4	-
Resistivitas batu kerikil	3000	Ω

Berdasarkan Tabel 3.2, sistem pentanahan yang digunakan pada Gardu Induk Kotapinang merupakan kombinasi Ground Grid dan Ground Rod dengan material konduktor berupa tembaga (copper). Sistem ini memiliki diameter konduktor 1,78 mm, luas mesh grounding 2.500 m², jarak antar konduktor 5 m, serta kedalaman penanaman 3 m. Selain itu, sistem menggunakan 4 buah ground mesh dan nilai resistivitas batu kerikil sebesar 3000 Ω .

Spesifikasi tersebut dirancang untuk menghasilkan nilai resistansi pentanahan yang rendah sehingga mampu mempercepat pelepasan arus petir maupun arus gangguan ke bumi. Dengan konfigurasi tersebut, sistem pentanahan diharapkan dapat meningkatkan efektivitas sistem proteksi petir dan memenuhi persyaratan keselamatan berdasarkan standar IEC 62305-3.

3.2.3 Data konfigurasi sistem pentanahan

Data konfigurasi sistem pentanahan mencakup informasi teknis mengenai jenis dan susunan elektroda grounding yang digunakan pada objek penelitian. Konfigurasi sistem pentanahan yang dianalisis meliputi sistem grid grounding, sistem deep rod grounding, serta kombinasi keduanya. Parameter yang dikaji meliputi jumlah elektroda, panjang dan kedalaman penanaman elektroda, luas area pembumian, serta material konduktor yang digunakan. Data ini digunakan untuk memodelkan sistem pembumian dan mengevaluasi pengaruh variasi konfigurasi elektroda terhadap nilai tahanan pembumian dan Ground Potential Rise (GPR). Data konfigurasi sistem pembumian digunakan untuk memodelkan struktur fisik sistem grounding. Dapat dilihat pada Tabel 3.3

Tabel 3. 3 Data Sistem Pentanahan

Parameter	Nilai
Jenis elektroda	Grounding Grid
Material konduktor	Tembaga
Resistansi pentanahan (R_g)	0,84 Ω
Resistivitas tanah (ρ)	26,3 Ωm
Konsisi tanah batu kerikil	3000 Ωm
Standar acuan	IEC 62305-3

Data konfigurasi sistem pentanahan digunakan sebagai parameter utama dalam penelitian untuk menganalisis efektivitas sistem proteksi petir di Gardu Induk Kotapinang. Sistem pentanahan yang digunakan adalah grounding mesh

dengan material konduktor tembaga, yang dipilih karena memiliki konduktivitas listrik tinggi, tahan terhadap korosi, dan mampu menyalurkan arus petir ke dalam tanah secara efektif.

Berdasarkan data yang diperoleh, nilai resistansi pentanahan (R_g) adalah $0,84 \, \Omega$, sedangkan resistivitas tanah (ρ) sebesar $26,3 \, \Omega \cdot m$ dengan kondisi tanah kerikil. Nilai resistansi yang rendah menunjukkan bahwa sistem pentanahan mampu mengalirkan arus petir dengan baik sehingga dapat menekan kenaikan potensial tanah (*Ground Potential Rise/GPR*) serta mengurangi risiko tegangan sentuh dan tegangan langkah.

Seluruh analisis dalam penelitian ini mengacu pada IEC 62305-3 sebagai standar evaluasi sistem proteksi petir. Data konfigurasi sistem pentanahan tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter masukan dalam simulasi MATLAB untuk memperoleh nilai *Ground Potential Rise (GPR)*, tegangan sentuh (*touch voltage*), dan tegangan langkah (*step voltage*) sebagai indikator efektivitas sistem proteksi petir.

3.2.4 Data arus petir

Data arus petir digunakan sebagai parameter eksitasi dalam analisis sistem pembumian. Besaran arus petir yang digunakan mengacu pada *Level of Protection (LPL)* berdasarkan standar IEC 62305. Variasi nilai arus petir digunakan untuk merepresentasikan kondisi sambaran petir dengan tingkat keparahan yang berbeda. Data ini berperan penting dalam menentukan besarnya arus yang mengalir ke sistem pembumian dan secara langsung memengaruhi nilai *GPR*, tegangan sentuh, dan tegangan langkah yang timbul pada permukaan tanah. Data arus petir digunakan sebagai sumber eksitasi dalam analisis sistem pembumian. Dapat dilihat pada Tabel 3.4

Tabel 3. 4 Data Arus Petir

Parameter	Nilai	Keterangan
Arus puncak petir (Peak Current)	-17 kA	Polaritas arus petir negatif (negative cloud-to-ground)
Frekuensi	3 sensor	Jumlah sensor yang mendeteksi sambaran
Presisi data	120	Digunakan untuk mengetahui tingkat ketelitian lokasi deteksi sambaran

Parameter	Nilai	Keterangan
Sistem akuisisi data	Vaisala Thunderstorm Manager	Perangkat lunak pemantauan petir

Data arus petir pada penelitian ini diperoleh dari perangkat lunak Vaisala Thunderstorm Manager, yang digunakan untuk memantau aktivitas sambaran petir di sekitar Gardu Induk Kotapinang. Nilai -17 kA menunjukkan bahwa sambaran yang terdeteksi memiliki polaritas negatif dengan magnitudo arus puncak sebesar 17 kA. Tanda negatif merupakan informasi polaritas, sedangkan untuk menghitung besarnya kenaikan potensial tanah, yang digunakan adalah magnitudo arusnya, yaitu 17 kA. Data yang digunakan meliputi waktu kejadian, koordinat lokasi sambaran, arus puncak petir, polaritas, serta parameter presisi data untuk mengetahui tingkat ketelitian lokasi deteksi sambaran. Berdasarkan data yang diperoleh, arus petir yang digunakan sebagai dasar simulasi memiliki nilai puncak sekitar 17 kA dengan polaritas negatif. Nilai tersebut kemudian digunakan sebagai parameter masukan (input) pada simulasi MATLAB untuk menganalisis *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan sentuh (touch voltage), dan tegangan langkah (step voltage) sesuai dengan standar IEC 62305-3.

3.2.5 Data parameter keselamatan

Data parameter keselamatan merupakan data keluaran (output) hasil analisis dan simulasi sistem pembumian. Parameter keselamatan yang dianalisis meliputi *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah. Nilai-nilai parameter ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat keselamatan sistem pembumian terhadap personel dan peralatan, serta untuk menilai kesesuaian kinerja sistem pembumian dengan batas aman yang ditetapkan dalam standar IEC 62305-3. Dapat dilihat pada Tabel 3.5

Tabel 3. 5 Data Parameter Keselamatan

Parameter	Simbol	Nilai	Keterangan
Ground potential rise	GPR	Hasil Simulasi	Kenaikan potensial tanah akibat arus petir
Tegangan sentuh	V_{touch}	Hasil Simulasi	Beda potensial antara peralatan dan permukaan tanah
Tegangan langkah	V_{step}	Hasil Simulasi	Beda potensial antara dua titik pada permukaan tanah

Berdasarkan Tabel 3.5, parameter keselamatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (V_{touch}), dan tegangan langkah (V_{step}). Ketiga parameter tersebut diperoleh melalui hasil simulasi MATLAB untuk mengevaluasi tingkat keamanan sistem pentanahan saat terjadi aliran arus petir pada Gardu Induk Kotapinang.

Ground Potential Rise (GPR) menunjukkan kenaikan potensial tanah akibat injeksi arus petir ke sistem pentanahan, sedangkan tegangan sentuh (V_{touch}) merupakan beda potensial antara peralatan yang terhubung ke sistem pentanahan dengan permukaan tanah. Sementara itu, tegangan langkah (V_{step}) menggambarkan beda potensial antara dua titik pada permukaan tanah yang berjarak satu langkah manusia. Nilai ketiga parameter tersebut selanjutnya dibandingkan dengan batas aman berdasarkan IEC 62305-3 untuk menentukan tingkat efektivitas dan keamanan sistem proteksi petir yang diterapkan pada gardu induk.

3.2.6 Data standar dan referensi teknis

Data pendukung dalam penelitian ini berupa standar internasional dan referensi teknis yang digunakan sebagai acuan evaluasi. Standar utama yang digunakan adalah IEC 62305-3 tentang sistem proteksi petir dan pembumian, yang menetapkan kriteria desain, batas keselamatan, serta metode evaluasi sistem pembumian. Dapat dilihat pada Tabel 3.6

Tabel 3. 6 Data Standar

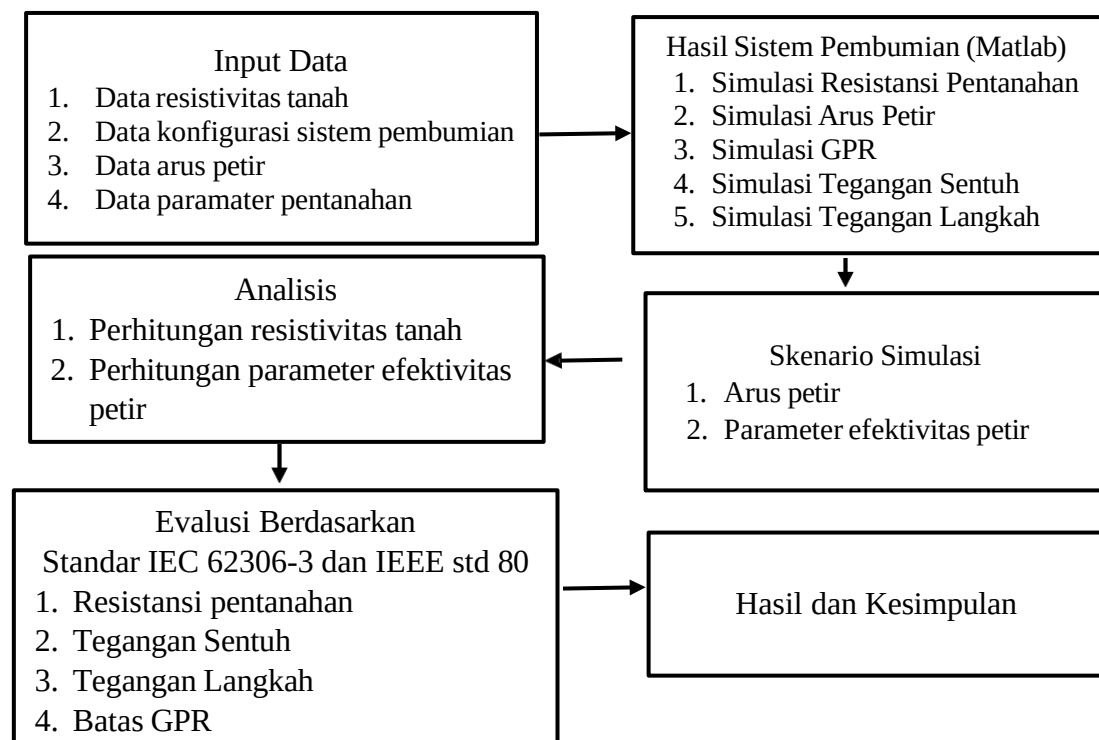
Standar/Referensi	Kode/Versi	Fungsi dalam penelitian
Protection Against Lightning- Part 3: Physical Damage to Structures and Life Hazard	IEC 62305-3:2010	Acuan utama dalam evaluasi efektivitas sistem proteksi petir dan sistem pentanahan.
Guide for safety in AC substation grounding	IEEE Std 80-2013	Acuan analisis Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah pada gardu induk.
MATLAB	R2023b	Perangkat lunak untuk pemodelan dan simulasi sistem pentanahan serta arus petir.
Data Sambaran Petir Vaisala	Thunderstorm Manager	Sumber data arus petir dan lokasi sambaran yang digunakan sebagai input simulasi.

Data Teknis Gardu Induk Kotapinang	PT PLN (Persero)	Data konfigurasi sistem pentanahan, resistansi pentanahan, dan karakteristik lokasi penelitian.
------------------------------------	------------------	---

Berdasarkan Tabel 3.6, penelitian ini mengacu pada beberapa standar, perangkat lunak, dan sumber data yang digunakan sebagai dasar dalam proses analisis dan simulasi. IEC 62305-3:2010 dijadikan sebagai acuan utama untuk mengevaluasi efektivitas sistem proteksi petir dan sistem pentanahan, sedangkan IEEE Std 80-2013 digunakan sebagai pedoman dalam analisis parameter keselamatan, yaitu Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (touch voltage), dan tegangan langkah (step voltage) pada gardu induk.

Proses pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan MATLAB R2023b, sementara data sambaran petir diperoleh dari Vaisala Thunderstorm Manager sebagai sumber informasi karakteristik arus petir yang digunakan sebagai masukan simulasi. Selain itu, data konfigurasi sistem pentanahan, nilai resistansi pentanahan, serta karakteristik lokasi penelitian diperoleh dari PT PLN (Persero) Gardu Induk Kotapinang. Kombinasi standar, perangkat lunak, dan data teknis tersebut menjadi dasar dalam memperoleh hasil analisis yang sesuai dengan kondisi aktual serta memenuhi ketentuan standar internasional.

3.3 Diagram Blok Penelitian



Gambar 3. 3 Diagram Blok Penelitian

Pada Gambar 3.3 terlihat diagram blok penelitian menggambarkan tahapan umum penelitian yang dilakukan dalam menganalisis kinerja sistem pembumian terhadap arus petir dengan mempertimbangkan variasi resistivitas tanah serta konfigurasi elektroda grounding.

Tahap pertama adalah input data, yang meliputi:

1. Data resistansi pentanahan
2. Data resistivitas tanah,
2. Data konfigurasi sistem pembumian,
3. Data arus petir,
4. Data parameter pentanahan.

Data tersebut menjadi dasar dalam proses pemodelan sistem pembumian menggunakan Matlab. Pada tahap ini dibuat model matematis yang terdiri dari:

1. Model tanah,
2. Model elektroda
3. Model arus petir

Selanjutnya dilakukan skenario simulasi dengan memvariasikan nilai resistivitas tanah serta konfigurasi elektroda grounding. Variasi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan kondisi tanah dan desain elektroda terhadap performa sistem pembumian. Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk melihat:

1. Pengaruh resistivitas tanah terhadap sistem pembumian,
2. Perbandingan antar konfigurasi elektroda.

Tahap berikutnya adalah evaluasi berdasarkan standar IEC 62305-3, dengan parameter utama:

1. Tegangan sentuh,
2. Tegangan Langkah
3. Ground potential rise

Evaluasi ini bertujuan untuk menentukan apakah sistem pembumian yang dirancang telah memenuhi kriteria keselamatan. Seluruh hasil analisis kemudian dirangkum dalam bagian hasil dan kesimpulan, yang menjadi dasar dalam penarikan kesimpulan akhir penelitian.

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini disusun secara sistematis untuk memastikan bahwa setiap tahapan penelitian dilaksanakan secara terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Penelitian diawali dengan studi literatur terhadap standar dan referensi ilmiah yang relevan sebagai dasar teoritis, kemudian dilanjutkan dengan pengumpulan data yang diperlukan, baik melalui pengukuran maupun data pendukung lainnya. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan metode dan perangkat yang telah ditentukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pembumian dan proteksi petir. Hasil analisis tersebut digunakan sebagai dasar dalam penarikan kesimpulan dan penyusunan rekomendasi yang sesuai dengan standar dan kondisi lapangan.

Prosedur penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan untuk mencapai tujuan penelitian yaitu:

A. Menganalisis nilai resistansi pentanahan pada sistem proteksi petir di Gardu Induk Kotapinang.

1. Pengumpulan Data

Tahap pertama dalam prosedur penelitian adalah pengumpulan data. Data yang dikumpulkan meliputi data teknis sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang, yaitu jenis elektroda yang digunakan, material konduktor, nilai resistansi pentanahan, resistivitas tanah, serta data arus petir yang diperoleh dari perangkat lunak Vaisala Thunderstorm Manager. Selain itu, dilakukan studi literatur terhadap standar IEC 62305-3, IEEE Std 80-2013, dan berbagai referensi ilmiah yang berkaitan dengan sistem pentanahan dan proteksi petir. Data-data tersebut menjadi dasar dalam penyusunan model simulasi dan analisis hasil penelitian.

2. Pemodelan sistem pentanahan menggunakan MATLAB.

Pada tahap ini dibuat model simulasi yang menggambarkan aliran arus petir dari sumber menuju sistem pentanahan. Model terdiri atas blok sumber arus petir (From Workspace), blok perhitungan resistansi pentanahan, blok Ground Potential Rise (GPR), serta blok perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah. Seluruh parameter yang telah diperoleh dari data lapangan

dimasukkan sebagai input ke dalam model simulasi sehingga hasil yang diperoleh sesuai dengan karakteristik sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang.

3. Simulasi sistem pentanahan

Simulasi dijalankan dengan memberikan masukan berupa arus petir impuls sebesar 17 kA. Selama proses simulasi, sistem menghitung respons sistem pentanahan terhadap arus petir yang mengalir ke dalam tanah. Salah satu parameter utama yang diamati adalah nilai resistansi pentanahan sebagai dasar perhitungan Ground Potential Rise (GPR). Nilai resistansi tersebut kemudian digunakan dalam Persamaan 2.8

$$GPR = I_g \times R_g \quad (2.8)$$

dengan:

GPR = Ground Potential Rise (V)

I_g = Arus petir (A)

R_g = Resistansi pentanahan (Ω)

4. Validasi data

Hasil simulasi kemudian divalidasi dengan membandingkan nilai resistansi pentanahan yang digunakan pada model simulasi dengan data teknis yang diperoleh dari Gardu Induk Kotapinang. Validasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa parameter yang digunakan pada model telah sesuai dengan kondisi aktual sehingga hasil simulasi dapat dipercaya sebagai representasi kondisi di lapangan. Apabila terdapat perbedaan yang signifikan antara data simulasi dan data aktual, maka dilakukan penyesuaian parameter hingga diperoleh hasil yang konsisten.

5. Analisis hasil simulasi

Analisis dilakukan dengan mengevaluasi hubungan antara nilai resistansi pentanahan terhadap kemampuan sistem dalam menyalurkan arus petir ke bumi. Nilai resistansi pentanahan yang rendah menunjukkan bahwa impedansi sistem pembumian juga rendah, sehingga arus petir dapat mengalir lebih cepat menuju tanah tanpa menimbulkan kenaikan potensial yang besar. Sebaliknya, apabila nilai resistansi pentanahan tinggi, maka Ground Potential Rise akan meningkat dan berpotensi menimbulkan tegangan sentuh serta

tegangan langkah yang membahayakan keselamatan manusia maupun peralatan listrik.

6. Evaluasi berdasarkan standar IEC 62305-3

Hasil analisis dibandingkan dengan ketentuan yang terdapat dalam standar tersebut untuk menilai apakah sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang telah memenuhi persyaratan sistem proteksi petir. Evaluasi tidak hanya memperhatikan besarnya nilai resistansi pentanahan, tetapi juga mempertimbangkan pengaruhnya terhadap parameter keselamatan lainnya seperti Ground Potential Rise, tegangan sentuh, dan tegangan langkah. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, dapat disimpulkan tingkat efektivitas sistem pentanahan dalam mendukung kinerja sistem proteksi petir di Gardu Induk Kotapinang.

B. Menilai tingkat efektivitas sistem proteksi petir berdasarkan parameter keamanan seperti Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah.

1. Persiapan data simulasi

Persiapan data simulasi merupakan tahap awal sebelum pemodelan menggunakan MATLAB yang bertujuan memastikan seluruh parameter masukan sesuai dengan kondisi aktual sistem proteksi petir di Gardu Induk Kotapinang. Parameter yang digunakan meliputi arus petir impuls 17 kA dengan gelombang 10/350 μ s, nilai resistansi pentanahan 0,84 Ω , resistivitas tanah 26,3 $\Omega \cdot m$, jenis sistem pentanahan grounding grid, serta faktor perhitungan Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah. Seluruh parameter tersebut kemudian dimasukkan ke dalam model untuk menghasilkan nilai GPR, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebagai dasar evaluasi efektivitas sistem proteksi petir berdasarkan IEC 62305-3.

2. Pemodelan sistem proteksi petir pada MATLAB

Pada tahap ini dibuat model simulasi yang menggambarkan aliran arus petir dari sumber menuju sistem pentanahan. Model terdiri atas blok sumber arus petir (From Workspace), blok perhitungan resistansi pentanahan, blok

Ground Potential Rise (GPR), serta blok perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah. Seluruh parameter yang telah diperoleh dari data lapangan dimasukkan sebagai input ke dalam model simulasi sehingga hasil yang diperoleh sesuai dengan karakteristik sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang.

3. Menentukan parameter masukan simulasi

Berdasarkan data yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya. Parameter yang digunakan meliputi arus petir impuls sebesar 17 kA dengan bentuk gelombang 10/350 μ s, nilai resistansi pentanahan (R_g) sebesar 0,7448 Ω , resistivitas tanah (ρ) sebesar 26,6 $\Omega \cdot m$, serta faktor tegangan sentuh ($K_t = 0,10$) dan faktor tegangan langkah ($K_s = 0,15$). Seluruh parameter tersebut dimasukkan ke dalam model simulasi MATLAB sehingga kondisi simulasi mendekati kondisi aktual sistem pentanahan di Gardu Induk Kotapinang.

4. Simulasi aliran arus petir

Pada proses ini, arus petir impuls dialirkan menuju sistem grounding sehingga diperoleh respons sistem terhadap gangguan petir. Hasil simulasi berupa grafik perubahan arus petir, Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah terhadap waktu.

5. Perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah

Parameter pertama yang dianalisis adalah Ground Potential Rise (GPR). GPR merupakan kenaikan potensial listrik pada sistem pentanahan akibat masuknya arus petir ke dalam tanah. Besarnya GPR dihitung menggunakan persamaan 2.8

$$GPR = I_g \times R_g \quad (2.8)$$

Dengan :

GPR = Ground Potential Rise (V)

I_g = Arus petir (A)

R_g = Resistansi pentanahan (Ω)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai GPR berbanding lurus dengan arus petir dan resistansi pentanahan. Semakin besar arus petir atau semakin tinggi resistansi pentanahan, maka semakin besar pula kenaikan potensial tanah yang terjadi. Setelah nilai GPR diperoleh, dilakukan perhitungan

tegangan sentuh (Touch Voltage). Tegangan sentuh merupakan beda potensial antara bagian logam yang terhubung ke sistem pentanahan dengan permukaan tanah saat seseorang menyentuh peralatan tersebut. Dalam penelitian ini, tegangan sentuh dihitung menggunakan persamaan

$$V_{touch} = K_t \times GPR$$

dengan:

V_{touch} = Tegangan sentuh (V)

K_t = Faktor tegangan sentuh

GPR = Ground Potential Rise (V)

Nilai tegangan sentuh kemudian dianalisis untuk mengetahui apakah masih berada pada batas aman sehingga tidak membahayakan keselamatan manusia. Tahap berikutnya adalah perhitungan tegangan langkah (Step Voltage). Tegangan langkah merupakan beda potensial antara dua titik pada permukaan tanah yang berjarak sekitar satu langkah manusia akibat penyebaran arus petir di dalam tanah. Persamaan yang digunakan adalah:

$$V_{step} = K_s \times GPR$$

dengan:

V_{step} = Tegangan langkah (V)

K_s = Faktor tegangan langkah

GPR = Ground Potential Rise (V)

Hasil perhitungan menunjukkan besarnya tegangan yang mungkin dialami seseorang ketika berada di sekitar sistem pentanahan saat terjadi sambaran petir.

6. Analisis hasil simulasi

Analisis dilakukan untuk mengetahui hubungan antara nilai resistansi pentanahan dengan tingkat keamanan sistem proteksi petir. Apabila nilai resistansi pentanahan rendah, maka Ground Potential Rise juga akan lebih kecil sehingga tegangan sentuh dan tegangan langkah yang dihasilkan menjadi lebih rendah.

7. Evaluasi efektivitas sistem proteksi petir berdasarkan standar IEC 62305-3 serta pedoman keselamatan pada IEEE Std 80-2013

Hasil simulasi dibandingkan dengan kriteria keselamatan yang berlaku untuk menentukan apakah sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang mampu memberikan perlindungan yang memadai terhadap peralatan dan personel. Sistem proteksi petir dinyatakan efektif apabila nilai Ground Potential Rise, tegangan sentuh, dan tegangan langkah berada dalam batas yang dapat diterima sehingga risiko bahaya akibat sambaran petir dapat diminimalkan.

C. Menganalisis tingkat kesesuaian dan efektivitas sistem pentanahan dalam mendukung sistem proteksi petir pada Gardu Induk Kotapinang berdasarkan kriteria keselamatan IEC 62305-3.

1. Mengumpulkan hasil simulasi

Meliputi nilai resistansi pentanahan, Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah. Hasil tersebut kemudian disusun dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan proses analisis.

2. Perbandingan hasil simulasi dengan standar IEC 62305-3

Nilai resistansi pentanahan dianalisis untuk mengetahui kemampuannya dalam menyalurkan arus petir, sedangkan nilai GPR, tegangan sentuh, dan tegangan langkah dianalisis tingkat kesesuaiannya untuk memastikan bahwa sistem pentanahan mampu memberikan tingkat keselamatan yang memadai terhadap peralatan dan personel di sekitar gardu induk. Selain mengacu pada IEC 62305-3, interpretasi parameter keselamatan juga didukung oleh pedoman IEEE Std 80-2013 untuk analisis tegangan sentuh dan tegangan langkah.

3. Menganalisis tingkat kesesuaian sistem pentanahan

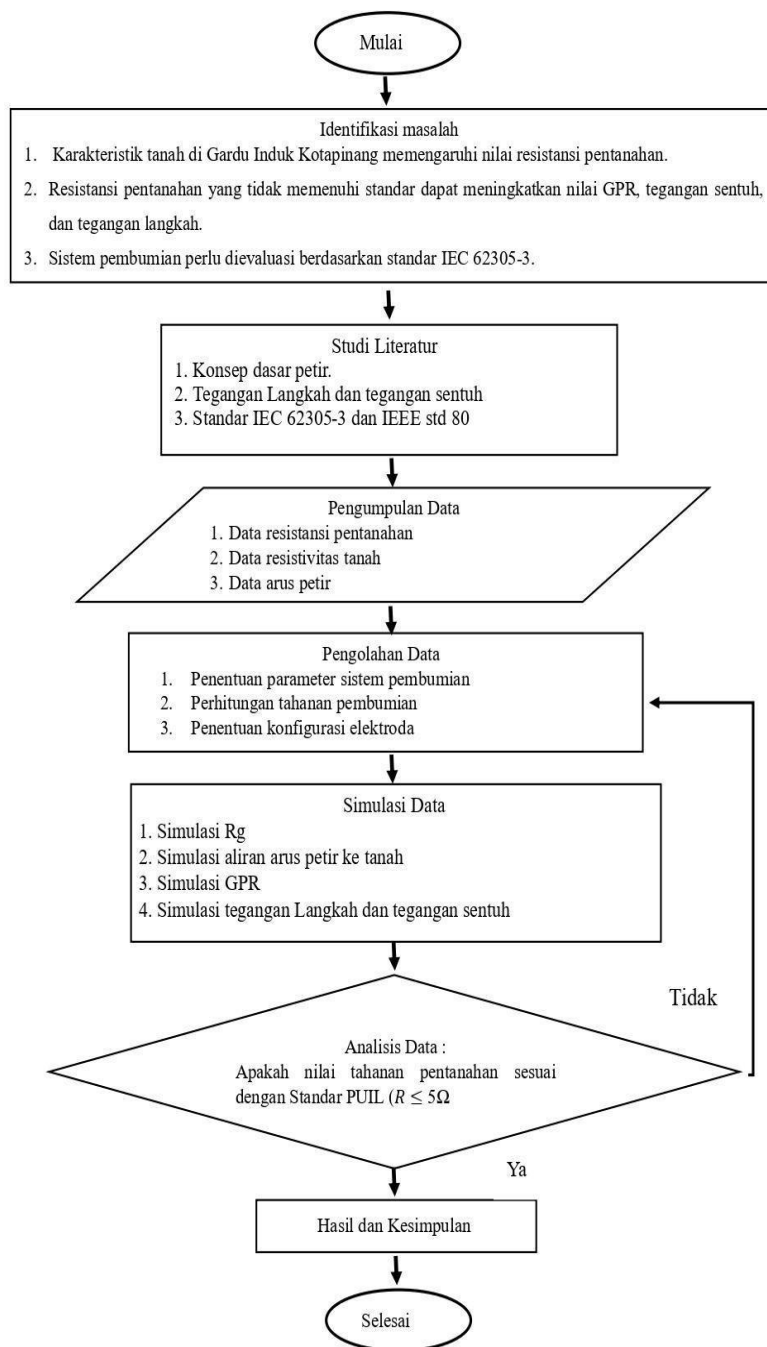
Sistem pentanahan dinyatakan memenuhi persyaratan apabila nilai resistansi pentanahan rendah sehingga mampu menghasilkan nilai GPR, tegangan sentuh, dan tegangan langkah yang berada pada batas aman. Sebaliknya, apabila hasil simulasi menunjukkan nilai yang melebihi batas keselamatan, maka sistem pentanahan dinilai perlu dilakukan perbaikan atau pengembangan.

4. Menarik Kesimpulan

Kesimpulan ini digunakan untuk menentukan apakah sistem proteksi petir yang diterapkan telah bekerja secara efektif dalam mengurangi risiko bahaya akibat sambaran petir serta memberikan rekomendasi apabila diperlukan peningkatan kinerja sistem pentanahan.

3.5 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian menggambarkan tahapan sistematis dalam menganalisis pengaruh variasi resistivitas tanah terhadap efektivitas sistem proteksi petir pada gardu induk Kotapinang. Proses dimulai dari identifikasi masalah hingga evaluasi hasil simulasi berbasis standar IEC 62305-3. Pendekatan yang digunakan adalah simulasi numerik menggunakan MATLAB dengan mempertimbangkan parameter resistivitas tanah, konfigurasi elektroda grounding, serta parameter keselamatan seperti Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah.



Gambar 3. 4 Diagram alir penelitian

Adapun penjelasan dari Gambar 3.4 adalah sebagai berikut :

1. Mulai (Start)

Tahap awal penelitian yang menandai dimulainya seluruh proses penelitian. Pada tahap ini dilakukan penetapan topik penelitian, tujuan penelitian, dan ruang lingkup/batasan penelitian.

2. Identifikasi Permasalahan

Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan yang berfokus pada pengaruh variasi resistivitas tanah terhadap efektivitas sistem pembumian dalam menyalurkan arus petir ke tanah. Permasalahan diformulasikan dengan menitikberatkan pada parameter keselamatan berupa Ground Potential Rise (GPR) yang tinggi, resiko tegangan sentuh dan tegangan langkah, variasi kondisi tanah sebagai indikator utama kinerja sistem proteksi. Evaluasi teknis dalam penelitian ini mengacu pada ketentuan yang ditetapkan oleh International Electrotechnical Commission melalui dokumen IEC 62305-3 sehingga analisis yang dilakukan memiliki landasan normatif yang jelas.

3. Studi Literatur

Bertujuan membangun kerangka teoritis dan konseptual penelitian. Pada tahap ini dikaji teori mengenai sistem proteksi petir dan sistem pembumian, metode perhitungan tahanan pembumian untuk konfigurasi grid, deep rod, dan kombinasi, serta konsep resistivitas tanah dan hubungannya dengan GPR, tegangan sentuh, dan tegangan langkah. Selain itu, penelitian terdahulu dianalisis secara kritis untuk mengidentifikasi kesenjangan penelitian sehingga diperoleh kontribusi ilmiah yang lebih spesifik dan terarah.

4. Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang meliputi pengukuran resistivitas tanah di lokasi penelitian menggunakan metode Wenner atau Schlumberger, pengumpulan data konfigurasi sistem grounding yang diterapkan, serta penentuan parameter arus petir dan batas keselamatan sesuai standar. Data yang terkumpul kemudian diolah dengan menghitung nilai resistivitas tanah berdasarkan hasil pengukuran, menganalisis variasinya terhadap kedalaman, serta mengelompokkan kondisi tanah ke dalam kategori resistivitas tertentu sebagai dasar skenario analisis.

5. Pengolahan Data Resistivitas Tanah

Pengolahan data resistivitas tanah dilakukan dengan menghitung nilai resistivitas berdasarkan hasil pengukuran lapangan menggunakan metode empat elektroda. Nilai tahanan yang terukur dikonversi ke dalam satuan $\Omega \cdot m$ sesuai persamaan yang digunakan, sehingga diperoleh karakteristik kemampuan tanah dalam menghantarkan arus listrik. Selanjutnya dianalisis variasi resistivitas terhadap kedalaman dengan membandingkan hasil pengukuran pada jarak elektroda yang berbeda untuk mengetahui kemungkinan adanya lapisan tanah yang tidak homogen. Tahap akhir adalah mengelompokkan nilai resistivitas ke dalam kategori rendah, sedang, atau tinggi sebagai dasar penyusunan skenario analisis dan simulasi sistem pembumian.

6. Perhitungan Tahanan Pembumian

Perhitungan tahanan pembumian untuk masing-masing konfigurasi elektroda, yaitu elektroda batang vertikal (deep rod), grounding grid, dan sistem kombinasi. Hasil perhitungan dibandingkan pada berbagai variasi resistivitas tanah untuk mengetahui konfigurasi yang memberikan nilai tahanan paling efektif. Selanjutnya dilakukan pemodelan dan simulasi menggunakan MATLAB dengan memasukkan parameter resistivitas tanah, konfigurasi elektroda, dan arus petir sebagai variabel input. Melalui simulasi ini diperoleh nilai GPR, tegangan sentuh, dan tegangan langkah sebagai parameter keluaran.

7. Pemodelan dan Simulasi Menggunakan MATLAB

Tahap pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan MATLAB dengan membangun model sistem pembumian berdasarkan data aktual yang diperoleh dari lapangan. Model tersebut merepresentasikan karakteristik tanah dan konfigurasi elektroda grounding yang digunakan, baik dalam bentuk grid, deep rod, maupun kombinasi keduanya. Parameter resistivitas tanah dan dimensi elektroda dimasukkan sebagai variabel input agar model mampu menggambarkan kondisi nyata sistem.

8. Analisis Hasil Simulasi

Hasil simulasi kemudian dianalisis dengan membandingkan respons sistem pada setiap variasi resistivitas tanah dan konfigurasi elektroda. Evaluasi dilakukan untuk menilai tingkat keamanan sistem berdasarkan batas yang ditetapkan dalam

IEC 62305-3. Pada tahap evaluasi dan pembahasan, ditentukan konfigurasi elektroda yang paling efektif untuk masing-masing kondisi tanah serta dianalisis potensi risiko apabila parameter keselamatan melebihi ambang batas yang diperkenankan.

9. Penarikan Kesimpulan dan Rekomendasi

Tahap akhir penelitian adalah penarikan kesimpulan yang merangkum pengaruh variasi resistivitas tanah terhadap efektivitas proteksi petir melalui sistem pembumian. Berdasarkan hasil tersebut disusun rekomendasi teknis untuk optimalisasi desain grounding serta saran pengembangan penelitian lanjutan guna meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem proteksi petir pada gardu induk.

10. Selesai

Penelitian dinyatakan selesai setelah sistem memenuhi standar IEC 62305-3 dan seluruh tujuan penelitian tercapai.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gardu Induk Kotapinang merupakan salah satu fasilitas penting dalam sistem penyaluran tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik penghubung antara sistem transmisi dan distribusi. Mengingat perannya yang sangat penting, gardu induk harus memiliki sistem proteksi yang mampu menjaga keandalan peralatan serta keselamatan personel terhadap gangguan yang berasal dari sambaran petir. Salah satu komponen utama dalam sistem proteksi petir adalah sistem pentanahan (grounding system) yang berfungsi sebagai jalur pelepasan arus petir menuju tanah.

Sistem pentanahan yang digunakan pada Gardu Induk Kotapinang berupa grounding mesh yang terdiri dari jaringan konduktor yang ditanam di bawah permukaan tanah dan saling terhubung dengan seluruh peralatan gardu induk. Sistem ini dirancang untuk menurunkan nilai resistansi pentanahan, memperkecil kenaikan potensial tanah, serta mengurangi tegangan sentuh dan tegangan langkah yang dapat membahayakan manusia maupun peralatan listrik.

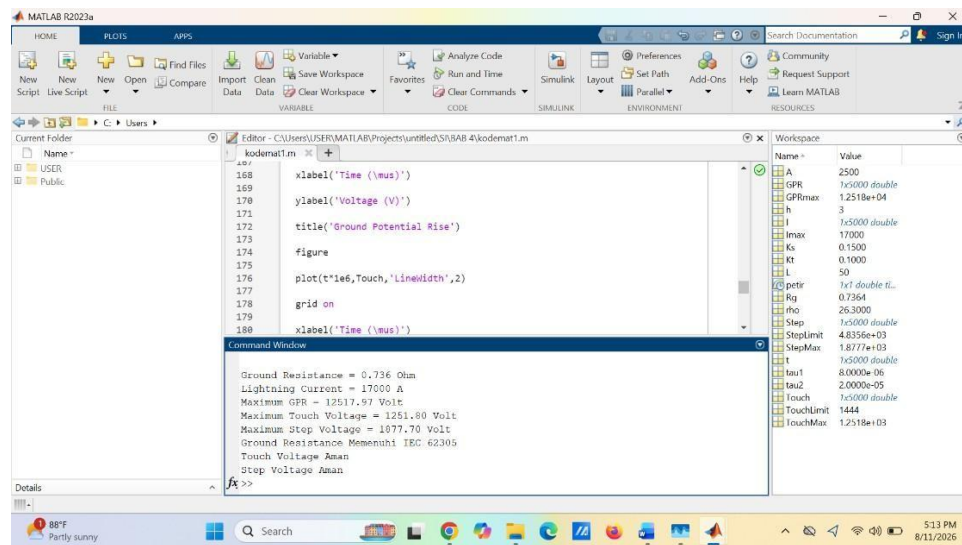
4.1 Analisis Nilai Resistansi Pentanahan

Pada penelitian ini, analisis dilakukan melalui pendekatan berdasarkan parameter sistem pentanahan dengan menggunakan simulasi MATLAB untuk memverifikasi hasil perhitungan. Parameter yang digunakan meliputi resistivitas tanah (ρ), dimensi sistem pentanahan, serta karakteristik elektroda grounding. Hasil dari kedua metode tersebut kemudian dibandingkan untuk mengetahui tingkat kesesuaian nilai resistansi pentanahan serta menjadi dasar dalam analisis efektivitas sistem proteksi petir pada Gardu Induk Kotapinang. Hasil analisis ini selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam perhitungan *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah, serta untuk mengevaluasi kesesuaian sistem pentanahan terhadap persyaratan IEC 62305-3.

4.1.1 Simulasi MATLAB

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2023b untuk memverifikasi hasil perhitungan resistansi pentanahan. Model simulasi disusun

berdasarkan parameter sistem pentanahan yang digunakan pada Gardu Induk Kotapinang, yaitu resistivitas tanah, dimensi elektroda, serta arus petir maksimum. Selain menghitung nilai resistansi pentanahan (*Ground Resistance*), model ini juga menghasilkan nilai *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan sentuh (*Touch Voltage*), dan tegangan langkah (*Step Voltage*) sebagai parameter dalam menilai efektivitas sistem proteksi petir.



Gambar 4. 1 Hasil simulasi Matlab

Gambar menunjukkan hasil perhitungan sistem pentanahan menggunakan MATLAB R2023a. Berdasarkan hasil pada Command Window, diperoleh nilai resistansi pentanahan sebesar 0.736Ω dengan arus petir maksimum sebesar 17.000 A (17 kA). Dari kedua parameter tersebut diperoleh Ground Potential Rise (GPR) maksimum sebesar 12.517.97 V. Nilai GPR menunjukkan kenaikan potensial pada sistem pentanahan ketika arus petir dialirkan ke tanah. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pentanahan memiliki resistansi yang relatif rendah sehingga mampu menyalurkan arus petir ke tanah dengan baik.

Selanjutnya, hasil perhitungan menunjukkan tegangan sentuh maksimum sebesar 1.251.80 V dan tegangan langkah maksimum sebesar 1.877.70 V. Berdasarkan program MATLAB, sistem memberikan status “Ground Resistance Memenuhi IEC 62305”, “Touch Voltage Aman”, dan “Step Voltage Aman”. Dengan demikian, berdasarkan parameter yang digunakan dalam simulasi, sistem pentanahan dinilai mampu memberikan tingkat keamanan yang memadai terhadap risiko tegangan sentuh dan tegangan langkah akibat sambaran petir. Hasil

perhitungan ini selanjutnya dapat digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi efektivitas sistem proteksi petir pada Gardu Induk Kotapinang. Fungsi setiap blok yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Fungsi pada Simulasi MATLAB

Bagian Program	Fungsi
$R_g = \dots$	Menghitung resistansi grounding grid
$I = \dots$	Membentuk gelombang arus petir
$GPR = I * R_g$	Menghitung GPR akibat arus petir
$Touch = K_t * GPR$	Menghitung tegangan sentuh
$Step = K_s * GPR$	Menghitung tegangan langkah
$\max(GPR)$	Menentukan GPR maksimum
$\max(Touch)$	Menentukan tegangan sentuh maksimum
$\max(Step)$	Menentukan tegangan langkah maksimum
$if R_g < 10$	Mengevaluasi resistansi grounding
$if TouchMax < TouchLimit$	Mengevaluasi keamanan tegangan sentuh

4.1.2 Analisis hasil resistivitas tanah semu (ρ)

Resistivitas tanah semu (ρ) merupakan salah satu parameter utama dalam perancangan dan evaluasi sistem pentanahan karena menunjukkan kemampuan tanah dalam menghantarkan arus listrik. Semakin kecil nilai resistivitas tanah, semakin mudah arus petir dialirkan ke dalam bumi sehingga nilai resistansi pentanahan yang dihasilkan akan semakin rendah. Oleh karena itu, analisis resistivitas tanah semu dilakukan untuk mengetahui karakteristik tanah di lokasi penelitian serta pengaruhnya terhadap kinerja sistem pentanahan di Gardu Induk Kotapinang.

Berdasarkan hasil pengukuran dan pengolahan data, nilai resistivitas tanah semu yang diperoleh menunjukkan bahwa kondisi tanah di lokasi penelitian

memiliki karakteristik yang cukup baik untuk penerapan sistem pentanahan Ground Mesh. Nilai resistivitas tersebut menjadi parameter masukan dalam proses simulasi menggunakan MATLAB untuk menghitung nilai resistansi pentanahan (R_g), Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah. Dengan karakteristik tanah yang mendukung, sistem pentanahan diharapkan mampu mendisipasikan arus petir secara efektif sehingga dapat meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem proteksi petir sesuai dengan ketentuan IEC 62305-3. Diketahui nilai jarak antaara konduktor 5 m dan nilai resistansi hasil pengukuran sebesar 84Ω untuk mendapatkan nilai resistivitas tanah semu (ρ) dihitung menggunakan Persamaan 2.5

$$\rho = 2\pi aR$$

$$\rho = 2 \times 3.14 \times 5 \text{ m} \times 0.84 \Omega$$

$$\rho = 26.3 \Omega \cdot \text{m}$$

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode Wenner, nilai resistivitas tanah semu dihitung dengan persamaan $\rho = 2\pi aR$. Dengan jarak antar elektroda (a) sebesar 5 m dan nilai resistansi hasil pengukuran (R) sebesar 0.84Ω , diperoleh nilai resistivitas tanah semu sebesar $26.3 \Omega \cdot \text{m}$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi tanah di lokasi Gardu Induk Kotapinang memiliki kemampuan yang cukup baik dalam menghantarkan arus listrik.

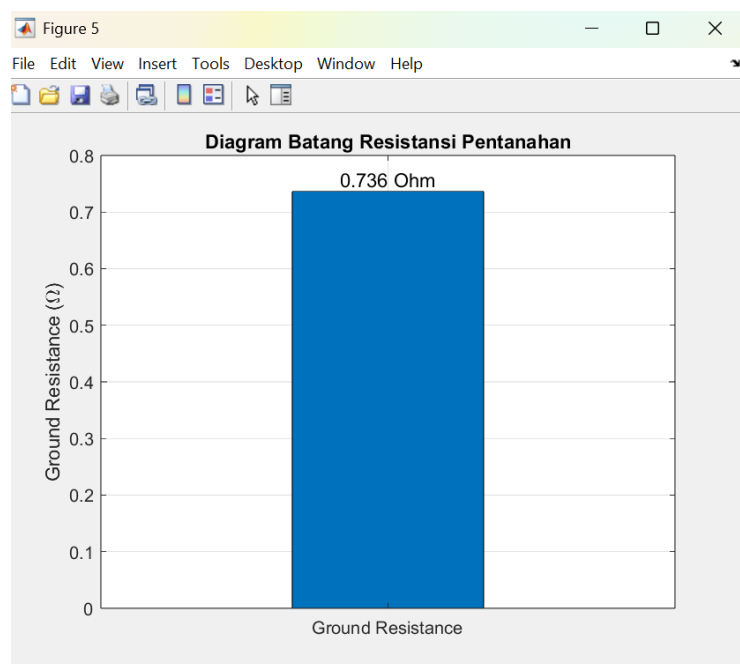
Nilai resistivitas tanah sebesar $26.3 \Omega \cdot \text{m}$ termasuk dalam kategori tanah dengan resistivitas relatif rendah dikarenakan mendukung terbentuknya sistem pentanahan yang efektif. Kondisi ini berkontribusi terhadap diperolehnya nilai resistansi pentanahan yang rendah, yaitu 0.84Ω , sehingga arus sambaran petir dapat didisipasikan ke dalam tanah dengan lebih baik. Dengan demikian, karakteristik tanah di lokasi penelitian telah mendukung kinerja sistem pentanahan dan sesuai dengan tujuan penerapan sistem proteksi petir berdasarkan IEC 62305-3.

4.1.3 Analisis hasil resistansi pentanahan menggunakan simulasi MATLAB

Berdasarkan hasil perhitungan simulasi MATLAB diperoleh nilai resistansi pentanahan (Ground Resistance/ R_g) sebesar 0.736Ω pada gambar 4.2 di bawah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem pentanahan pada Gardu Induk Kotapinang memiliki kemampuan yang sangat baik dalam mengalirkan arus petir

maupun arus gangguan ke dalam tanah. Nilai resistansi yang rendah menyebabkan jalur pelepasan arus memiliki impedansi kecil, sehingga energi dari sambaran petir dapat disalurkan dengan cepat dan aman tanpa menimbulkan kenaikan potensial tanah yang berlebihan.

Semakin kecil nilai resistansi pentanahan maka semakin efektif sistem pentanahan dalam mengurangi risiko terjadinya Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (*touch voltage*), dan tegangan langkah (*step voltage*). Kondisi ini berkontribusi terhadap peningkatan keselamatan personel yang bekerja di area gardu induk serta mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan pada peralatan akibat tegangan lebih yang ditimbulkan oleh sambaran petir. Dengan demikian, sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang dapat dikatakan memiliki kinerja yang sangat baik dalam mendukung efektivitas sistem proteksi petir. Hasil simulasi resistansi pentanahan disajikan pada Gambar 4.2



Gambar 4. 2 Grafik Resistansi pentanahan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai resistansi pentanahan sebesar 0.736Ω berada jauh di bawah nilai maksimum yang umum direkomendasikan untuk sistem proteksi petir dan sistem pentanahan gardu induk, yaitu kurang dari 1Ω untuk gardu induk berdasarkan praktik ketenagalistrikan, serta memenuhi prinsip dalam IEC 62305-3 yang mengharuskan sistem terminasi bumi memiliki impedansi serendah mungkin agar arus petir dapat efektif.

4.1.4 Analisis Perbedaan Resistansi Elektroda dan Resistansi Sistem Pentanahan

Berdasarkan persamaan resistansi elektroda batang pada Persamaan 2.1, dengan nilai resistivitas tanah $\rho = 26.3$, panjang elektroda $L = 5\text{ m}$, dan diameter elektroda $d = 1.78\text{ mm} = 0.00178\text{ m}$, maka substitusi nilai ke dalam persamaan diperoleh :

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

$$R_{rod} = \frac{26.3}{2\pi(5)} \left[\ln \left(\frac{4(5)}{0.00178} \right) - 1 \right]$$

$$R_{rod} = \frac{26.3}{314.59} [\ln(112359.55) - 1]$$

$$R_{rod} = 0.08372 [\ln(11.629) - 1]$$

$$R_{rod} = 0.890 \Omega$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai resistansi elektroda batang sebesar 0.890Ω , sedangkan nilai resistansi sistem pentanahan yang digunakan dalam analisis diperoleh sebesar 0.736Ω . Perbedaan kedua nilai tersebut terjadi karena parameter yang dihitung memiliki cakupan yang berbeda. Nilai 0.890Ω merupakan resistansi elektroda berdasarkan persamaan resistansi elektroda batang, sedangkan nilai 0.736Ω merupakan resistansi sistem pentanahan secara keseluruhan yang dipengaruhi oleh konfigurasi sistem pentanahan, luas area grounding grid, panjang konduktor, kedalaman grid, serta kondisi resistivitas tanah. Dengan demikian, kedua nilai tersebut tidak dapat dianggap sebagai nilai yang sama karena masing-masing merepresentasikan bagian yang berbeda dari sistem pentanahan.

Perbedaan nilai resistansi tersebut berpengaruh terhadap hasil analisis tegangan yang dihasilkan oleh sistem proteksi petir. Dalam penelitian ini, nilai resistansi sistem pentanahan digunakan sebagai parameter utama dalam simulasi MATLAB untuk memperoleh nilai Ground Potential Rise (GPR). Berdasarkan hubungan, dengan arus petir maksimum sebesar 17 kA , diperoleh GPR sebesar 12.512 V . Nilai GPR tersebut selanjutnya digunakan dalam perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah. Apabila nilai 0.890Ω digunakan sebagai resistansi sistem

pentanahan, maka nilai GPR akan menjadi lebih besar, yaitu sekitar 15.130 V. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar resistansi pentanahan, semakin besar pula kenaikan potensial tanah yang dapat terjadi ketika arus petir dialirkan ke sistem pentanahan.

Dalam penelitian ini, perbedaan antara nilai resistansi elektroda sebesar 0.890 Ω dan resistansi sistem pentanahan sebesar 0.736 Ω tidak menunjukkan adanya kesalahan perhitungan, selama kedua nilai tersebut digunakan sesuai dengan fungsi dan definisinya. Nilai 0.890 Ω digunakan sebagai parameter resistansi elektroda, sedangkan nilai 0.736 Ω digunakan sebagai nilai resistansi sistem pentanahan atau grounding grid dalam pemodelan MATLAB. Pemisahan kedua parameter tersebut diperlukan agar hasil perhitungan manual, pemodelan MATLAB, dan analisis keselamatan sistem proteksi petir dapat dilakukan secara konsisten. Dengan pendekatan tersebut, hasil simulasi GPR, tegangan sentuh, dan tegangan langkah dapat digunakan untuk menilai efektivitas sistem pentanahan terhadap kriteria keselamatan yang digunakan dalam penelitian.

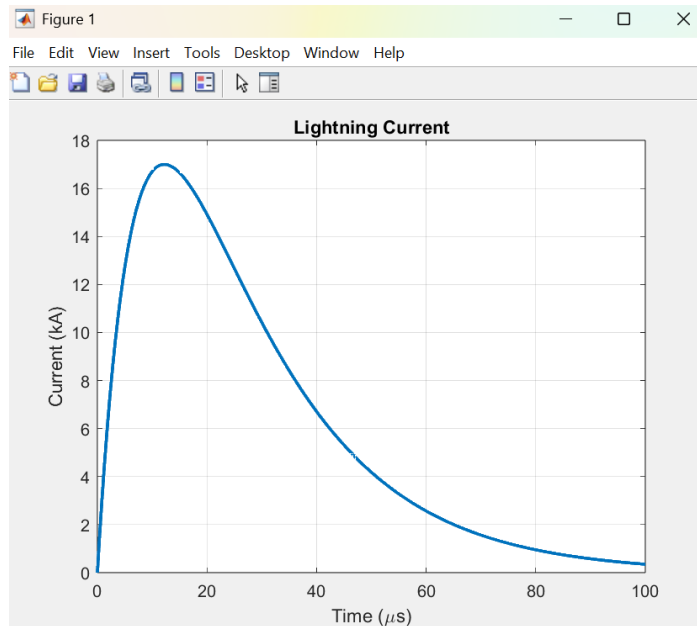
Parameter	Resistansi Elektroda Batang	Resistansi Sistem Pentanahan
Simbol	Rrod	Rg
Nilai resistansi	0.890	0.736
Objek yang dihitung	Elektroda batang	Sistem pentanahan secara keseluruhan
Dasar perhitungan	Persamaan resistansi elektroda	Perhitungan/model sistem grounding grid
Resistivitas tanah	26.3	26.3
Parameter utama	Panjang dan diameter elektroda	Luas grid, panjang konduktor, kedalaman grid, dan konfigurasi grounding
Fungsi dalam penelitian	Mengetahui resistansi elektroda	Menentukan resistansi sistem pentanahan yang digunakan dalam simulasi
Digunakan perhitungan GPR	Tidak secara langsung	Ya

Parameter	Resistansi Elektroda Batang	Resistansi Sistem Pentanahan
Digunakan dalam Matlab	Sebagai parameter pendukung	Sebagai parameter utama
Hubungan dengan arus petir	Tidak langsung	$GPR = I_g \times R_g$
Keterangan	Resistansi elemen elektroda	Resistansi total/ekuivalen sistem pentanahan

4.2 Analisis Efektivitas Sistem Proteksi Petir

Analisis efektivitas sistem proteksi petir dilakukan untuk menilai kemampuan sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang dalam mengurangi dampak sambaran petir terhadap peralatan dan keselamatan personel. Efektivitas sistem proteksi petir pada penelitian ini dievaluasi berdasarkan tiga parameter utama, yaitu Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (*touch voltage*), dan tegangan langkah (*step voltage*). Ketiga parameter tersebut dipilih karena merupakan indikator penting dalam menentukan tingkat keamanan sistem pentanahan saat terjadi aliran arus petir menuju tanah.

Perhitungan dilakukan menggunakan model simulasi yang telah dikembangkan pada MATLAB dengan memanfaatkan nilai resistansi pentanahan yang diperoleh pada subbab sebelumnya. Simulasi menggunakan arus petir maksimum sebesar 17 kA sebagai masukan, kemudian dihitung nilai Ground Potential Rise (GPR) sebagai kenaikan potensial tanah akibat injeksi arus petir. Nilai GPR selanjutnya digunakan untuk menentukan besarnya tegangan sentuh dan tegangan langkah melalui faktor koreksi yang telah ditetapkan pada model simulasi. Gelombang petir dapat dilihat pada Gambar 4.3



Gambar 4. 3 Grafik Lightning Current (Arus Petir)

Berdasarkan Gambar 4.3, hasil simulasi bentuk gelombang arus petir yang digunakan sebagai masukan (*input*) pada model sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB dengan parameter arus petir maksimum sebesar 17 kA yang mengikuti karakteristik gelombang impuls petir standar 10/350 μ s sesuai rekomendasi IEC 62305-3.

Berdasarkan hasil simulasi, terlihat bahwa arus petir mengalami kenaikan yang sangat cepat dari kondisi awal hingga mencapai nilai puncak 17 kA pada waktu sekitar $0,1 \times 10^{-4}$ s (10 μ s). Kondisi ini menunjukkan fase muka gelombang (*front time*) yang menggambarkan karakteristik sambaran petir langsung, yaitu pelepasan energi listrik dalam waktu yang sangat singkat dengan amplitudo arus yang sangat besar. Dengan demikian, grafik hasil simulasi arus petir ini dapat digunakan sebagai sumber arus gangguan utama dalam analisis selanjutnya. Nilai arus maksimum yang diperoleh akan digunakan untuk menghitung resistansi pentanahan, *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan sentuh, serta tegangan langkah guna mengevaluasi kesesuaian sistem proteksi petir Gardu Induk Kotapinang berdasarkan ketentuan IEC 62305-3 dan perbandingan terhadap batas keselamatan yang direkomendasikan IEEE Std 80.

4.2.1 Analisis *Ground Potential Rise* (GPR)

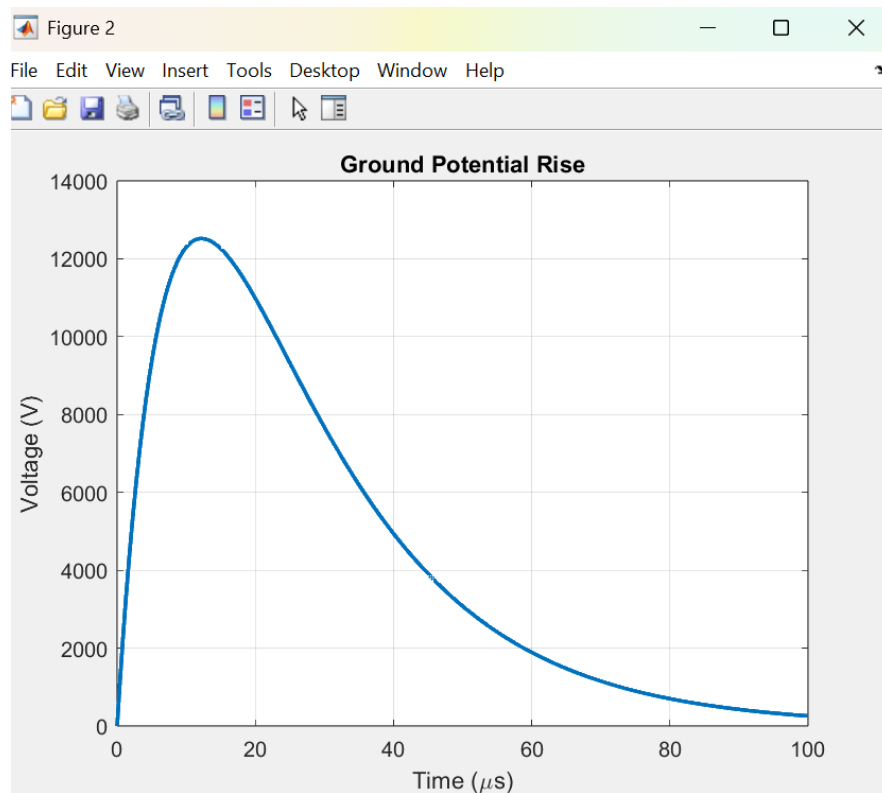
Ground Potential Rise (GPR) merupakan kenaikan potensial listrik pada sistem pentanahan akibat masuknya arus petir ke dalam tanah. Besarnya nilai GPR dipengaruhi oleh arus petir yang mengalir dan nilai resistansi pentanahan. Semakin besar arus petir atau resistansi pentanahan, maka semakin tinggi nilai GPR yang dihasilkan. Oleh karena itu, analisis GPR sangat penting untuk mengetahui kemampuan sistem pentanahan dalam meredam kenaikan potensial tanah sehingga keselamatan peralatan maupun personel tetap terjaga. Selanjutnya digunakan data penelitian yang didapat dari hasil pengukuran langsung untuk perhitungan secara matematis, nilai arus petir sebesar 17 kA dan nilai resistansi pentanahan 0.84Ω menggunakan Persamaan 2.8

$$\text{GPR} = I_g \times R_g$$

$$\text{GPR} = 17000 \times 0.84 \Omega$$

$$\text{GPR} = 14.280 \Omega$$

Pada penelitian ini, nilai GPR dihitung menggunakan hasil resistansi pentanahan yang diperoleh yaitu sebesar 0.736Ω , dengan arus petir maksimum sebesar 17 kA. Hasil perhitungan GPR dapat dilihat gambar 4.4



Gambar 4. 4 Grafik Ground Potensial Rise (GPR)

Berdasarkan Gambar 4.4 menunjukkan hasil simulasi Ground Potential Rise (GPR) menggunakan MATLAB. Grafik memperlihatkan hubungan antara waktu (μs) pada sumbu horizontal dan tegangan GPR (V) pada sumbu vertikal selama proses simulasi hingga 100 μs . Berdasarkan grafik, GPR mengalami kenaikan yang sangat cepat pada awal terjadinya impuls petir, kemudian mencapai nilai puncak sekitar 12.500 V pada waktu sekitar 12–13 μs . Kondisi tersebut menunjukkan bahwa masuknya arus petir ke dalam sistem pentanahan menyebabkan kenaikan potensial tanah secara signifikan.

Setelah mencapai nilai maksimum, GPR mengalami penurunan secara bertahap seiring dengan berkurangnya arus impuls petir. Pada sekitar 40 μs , nilai GPR berada di kisaran 5.000 V, kemudian terus menurun hingga mendekati 2.000 V pada 60 μs dan sekitar 700–800 V pada 80 μs . Pada akhir simulasi 100 μs , nilai GPR turun hingga sekitar 300 V. Bentuk kurva yang naik dengan cepat dan kemudian meluruh menunjukkan karakteristik respons transien sistem pentanahan terhadap arus petir. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pentanahan mampu mengalirkan dan mendisipasikan arus petir ke tanah, sehingga kenaikan potensial tanah berangsur-angsur menurun setelah mencapai kondisi puncaknya. Hasil simulasi GPR dapat dilihat pada Tabel 4.2

Tabel 4. 2 Hasil Simulasi GPR

Parameter	Nilai
Arus Petir (I)	17.000 A
Resistansi Pentanahan (R_g)	0.736 Ω
<i>Ground Potential Rise</i> (GPR)	12.517 V

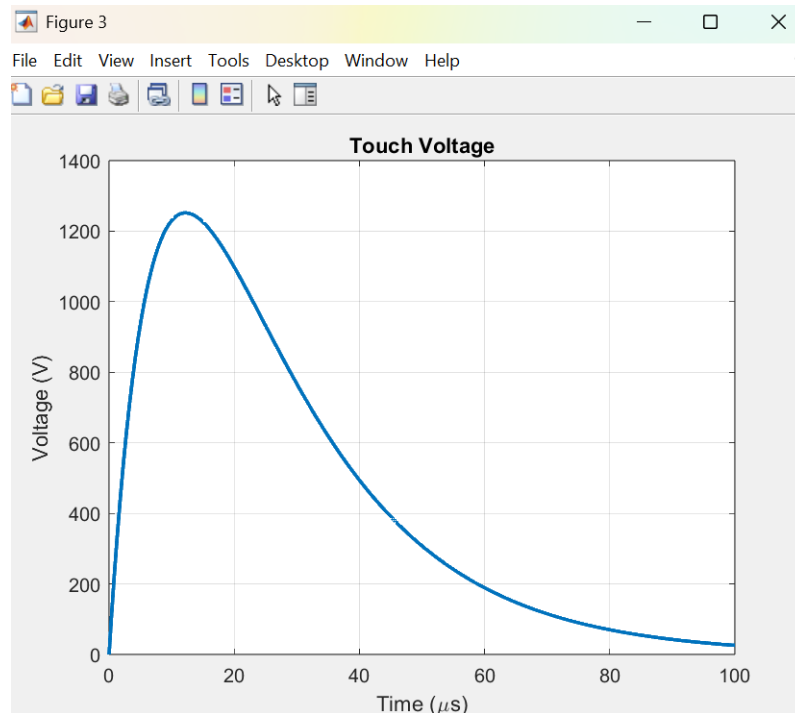
Berdasarkan Tabel 4.2, hasil simulasi menggunakan MATLAB menunjukkan bahwa sistem proteksi petir menggunakan arus petir sebesar 17.000 A dan memiliki nilai resistansi pentanahan sebesar 0.736 Ω . Dari kedua parameter tersebut diperoleh nilai Ground Potential Rise (GPR) maksimum sebesar 12.517 V. Nilai GPR menunjukkan besarnya kenaikan potensial pada sistem pentanahan ketika arus petir dialirkan ke tanah.

Nilai GPR sebesar 12.517 V menunjukkan bahwa saat terjadi sambaran petir dengan arus 17 kA, sistem pentanahan mengalami kenaikan potensial yang cukup besar. Nilai tersebut merupakan hasil perkalian antara arus petir dan resistansi pentanahan, yaitu $I_g \times R_g$. Dengan demikian, hasil simulasi ini menjadi parameter dasar untuk menentukan tegangan sentuh dan tegangan langkah, serta selanjutnya digunakan dalam mengevaluasi tingkat keamanan dan efektivitas sistem proteksi petir pada Gardu Induk Kotapinang.

4.2.2 Analisis Tegangan Sentuh (Touch Voltage)

Tegangan sentuh (*Touch Voltage*) merupakan beda potensial yang timbul antara bagian logam peralatan yang terhubung dengan sistem pentanahan dan permukaan tanah ketika terjadi aliran arus petir atau arus gangguan. Tegangan sentuh menjadi salah satu parameter keselamatan yang sangat penting karena secara langsung berkaitan dengan risiko sengatan listrik terhadap personel yang berada di area gardu induk.

Pada penelitian ini, analisis tegangan sentuh dilakukan menggunakan metode perhitungan simulasi MATLAB. Hasil simulasi selanjutnya dievaluasi terhadap batas aman sebagai dasar penilaian efektivitas sistem proteksi petir. Simulasi tegangan sentuh dilakukan menggunakan blok Gain (Kt) pada model MATLAB. Blok ini mengalikan nilai Ground Potential Rise (GPR) dengan faktor tegangan sentuh sehingga menghasilkan nilai tegangan sentuh secara otomatis. Hasil simulasi ditampilkan pada Gambar 4.5



Gambar 4. 5 Grafik *Touch Voltage*

Gambar 4.3 menunjukkan hasil simulasi tegangan sentuh (*Touch Voltage*) menggunakan MATLAB terhadap waktu simulasi hingga 100 μs . Berdasarkan grafik, tegangan sentuh meningkat dengan cepat pada awal terjadinya impuls petir dan mencapai nilai maksimum sekitar 1.250 V pada waktu sekitar 12–13 μs . Puncak tersebut menunjukkan kondisi ketika pengaruh arus petir terhadap kenaikan potensial sistem pentanahan berada pada nilai tertinggi, sehingga beda potensial yang dapat terjadi antara bagian yang terhubung dengan sistem pentanahan dan permukaan tanah juga mencapai nilai maksimum.

Setelah mencapai nilai puncak, tegangan sentuh mengalami penurunan secara bertahap mengikuti karakteristik peluruhan arus impuls petir. Pada sekitar 40 μs , tegangan sentuh berada pada kisaran 500 V, kemudian menurun menjadi sekitar 200 V pada 60 μs dan terus berkurang hingga mendekati 0 V pada akhir simulasi 100 μs . Berdasarkan hasil tersebut, nilai maksimum tegangan sentuh berada di sekitar 1.251 V, yang selanjutnya digunakan sebagai parameter untuk dibandingkan dengan batas tegangan sentuh yang diizinkan dalam evaluasi keselamatan sistem pentanahan. Hasil perbandingan tersebut menjadi dasar untuk menentukan apakah sistem proteksi petir di Gardu Induk Kotapinang berada dalam kondisi aman terhadap risiko tegangan sentuh.

Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik tegangan sentuh sangat dipengaruhi oleh besarnya arus petir dan kualitas sistem pentanahan. Semakin rendah nilai resistansi pentanahan, maka kenaikan Ground Potential Rise (GPR) dapat ditekan sehingga nilai tegangan sentuh yang dihasilkan juga akan semakin kecil. Oleh karena itu, sistem pentanahan yang memiliki resistansi rendah sangat penting untuk menjaga keselamatan personel dan meningkatkan efektivitas sistem proteksi petir sesuai dengan prinsip IEC 62305-3. Diketahui resistivitas lapisan permukaan tanah = 3000, faktor reduksi permukaan $C_s = 0.8$, dan waktu gangguan 5 detik. Data tersebut digunakan untuk menentukan tegangan sentuh yang diizinkan (E_{touch}), sehingga diperoleh nilai sebesar 1.444 V atau 1,4 kV. Nilai tegangan sentuh yang diizinkan dengan persamaan 2.5

$$E_{touch} = \frac{(1000 + 1.5 C_s \rho_s) \times 0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{touch} = \frac{(1000 + 1.5 \times 0.8 \times 3000) \times 0.157}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{touch} = 1444 \text{ V}$$

$$= 1,4 \text{ KV}$$

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan batas aman tegangan sentuh (touch voltage) sesuai IEEE Std 80-2013. Nilai batas aman sebesar 1.444 V kemudian digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi hasil simulasi tegangan sentuh pada sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan sentuh maksimum mencapai 1.251.80 V, sehingga melebihi batas aman yang diizinkan. Dengan demikian, berdasarkan parameter tegangan sentuh, sistem pentanahan sudah memenuhi persyaratan keselamatan menurut IEEE Std 80-2013. Maka perbandingannya dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Perbandingan tegangan sentuh dengan batas aman

Parameter	Nilai
Tegangan Sentuh Hasil Simulasi	1.251.80 V
Batas Aman Tegangan Sentuh	1.444 V
Status	Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.3, hasil simulasi menggunakan MATLAB menunjukkan bahwa nilai tegangan sentuh (Touch Voltage) sebesar 1.251.80 Volt, sedangkan

batas aman tegangan sentuh berdasarkan IEEE Std 80 adalah 1.444 Volt. Dengan demikian, nilai tegangan sentuh hasil simulasi berada dibawah batas aman sebesar 193 Volt, sehingga sistem pentanahan pada kondisi tersebut dinyatakan tidak memenuhi kriteria keselamatan. Kondisi ini menunjukkan bahwa apabila terjadi sambaran petir dengan arus sebesar 17 kA, beda potensial antara bagian logam yang terhubung ke sistem pentanahan dan permukaan tanah berpotensi menimbulkan sengatan listrik yang membahayakan personel yang sedang melakukan pengoperasian atau pemeliharaan peralatan di Gardu Induk Kotapinang. Tingginya nilai tegangan sentuh dipengaruhi oleh nilai resistansi pentanahan sebesar 0.736Ω , yang menghasilkan Ground Potential Rise (GPR) sebesar 12.517 Volt, sehingga distribusi potensial tanah menjadi lebih tinggi.

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang dapat dinyatakan memenuhi persyaratan keselamatan terhadap tegangan sentuh. Dengan demikian, sistem proteksi petir yang diterapkan telah mampu memberikan perlindungan yang memadai bagi personel maupun peralatan saat terjadi sambaran petir. Hasil ini juga menunjukkan bahwa sistem pentanahan yang digunakan telah mendukung efektivitas proteksi petir sesuai dengan prinsip yang diterapkan dalam batas aman IEEE Std 80, yaitu menyediakan jalur pelepasan arus petir dengan impedansi serendah mungkin untuk mengurangi risiko bahaya akibat kenaikan potensial tanah.

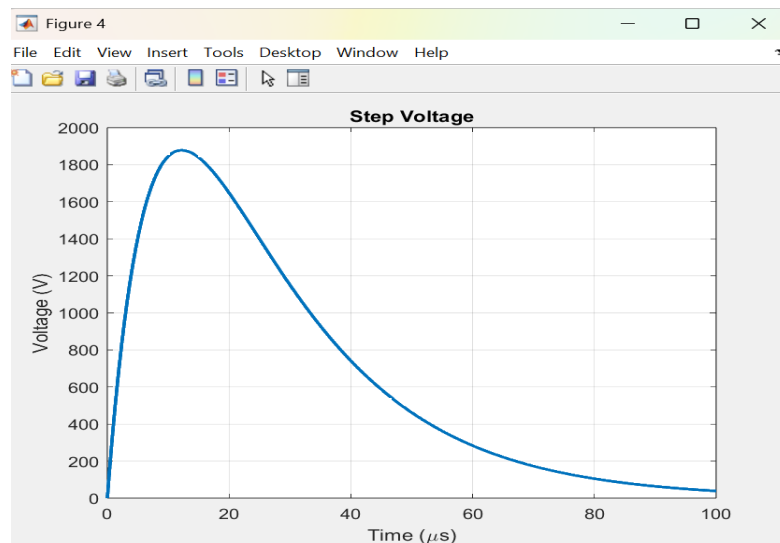
4.2.3 Analisis Tegangan Langkah (*Step Voltage*)

Tegangan langkah (*Step Voltage*) merupakan beda potensial yang terjadi antara dua titik pada permukaan tanah yang berjarak sekitar satu langkah kaki (± 1 meter) ketika arus petir atau arus gangguan mengalir melalui sistem pentanahan. Besarnya tegangan langkah dipengaruhi oleh nilai Ground Potential Rise (GPR), karakteristik tanah, serta konfigurasi sistem pentanahan. Apabila nilai tegangan langkah melebihi batas aman, maka dapat menimbulkan risiko sengatan listrik terhadap personel yang berada di sekitar gardu induk.

Pada penelitian ini, analisis tegangan langkah dilakukan melalui simulasi menggunakan MATLAB. Hasilnya kemudian digunakan untuk memverifikasi keakuratan model simulasi. Selanjutnya, nilai tegangan langkah dievaluasi terhadap

batas aman berdasarkan IEEE Std 80 untuk mengetahui tingkat keamanan sistem pentanahan.

Simulasi tegangan langkah dilakukan menggunakan input (Ks) pada model MATLAB. Input tersebut berfungsi mengalikan nilai Ground Potential Rise (GPR) dengan faktor tegangan langkah (Ks) sehingga menghasilkan nilai tegangan langkah secara otomatis. Hasil simulasi ditampilkan pada grafik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.6



Gambar 4. 6 Grafik *Step Voltage*

Gambar 4.6 menunjukkan hasil simulasi tegangan langkah (Step Voltage) menggunakan MATLAB selama waktu simulasi 100 μ s. Berdasarkan grafik, tegangan langkah mengalami kenaikan yang sangat cepat pada awal terjadinya impuls petir hingga mencapai nilai maksimum sekitar 1.877.70 V pada waktu sekitar 12–13 μ s. Nilai maksimum tersebut menunjukkan kondisi ketika pengaruh arus petir terhadap sistem pentanahan mencapai puncaknya, sehingga terjadi beda potensial terbesar pada permukaan tanah yang dapat memengaruhi keselamatan seseorang yang berada di sekitar sistem pentanahan.

Setelah mencapai nilai puncak, tegangan langkah mengalami penurunan secara bertahap mengikuti karakteristik peluruhan impuls petir. Pada sekitar 40 μ s, nilai tegangan langkah berada pada kisaran 750–800 V, kemudian turun menjadi sekitar 300 V pada 60 μ s dan terus berkurang hingga mendekati 50 V pada akhir simulasi 100 μ s. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai maksimum tegangan langkah adalah sekitar 1.877.70 V. Nilai tersebut selanjutnya digunakan untuk

mengevaluasi tingkat keamanan sistem pentanahan dengan membandingkannya terhadap batas tegangan langkah yang digunakan dalam penelitian, sehingga dapat diketahui apakah sistem proteksi petir di Gardu Induk Kotapinang mampu memberikan perlindungan yang memadai terhadap risiko tegangan langkah.

Hasil simulasi ini selanjutnya dibandingkan dengan batas aman tegangan langkah berdasarkan IEC 62305-3 dan IEEE Std 80-2013 untuk mengevaluasi tingkat keselamatan sistem pentanahan. Dengan nilai puncak sebesar 1.899 V, parameter tegangan langkah menjadi salah satu indikator penting dalam menentukan efektivitas sistem proteksi petir serta tingkat keamanan bagi personel yang berada di sekitar Gardu Induk Kotapinang saat terjadi sambaran petir. Diketahui resistivitas lapisan permukaan tanah $\rho_s = 3000$, faktor reduksi permukaan $C_s = 0.8$, dan waktu gangguan 5 detik. Data tersebut digunakan untuk menentukan tegangan sentuh yang diizinkan (E_{step}), sehingga diperoleh nilai sebesar 4.835.6 V atau 4.8 kV. Nilai tegangan langkah yang diizinkan dengan persamaan 2.6

$$\begin{aligned}
 E_{step} &= \frac{(1000 + 6 \cdot C_s \rho_s) \times 0.157}{\sqrt{t_s}} \\
 &= \frac{(1000 + 6 \times 0.8 \times 3000)0.157}{\sqrt{0.5}} \\
 E_{step} &= 4835.6 \text{ V} \\
 &= 4,8 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan batas aman tegangan langkah (step voltage) sesuai pendekatan IEEE Std 80-2013, diperoleh nilai tegangan langkah yang diizinkan (E_{step}) sebesar 4.835,6 V atau sekitar 4,8 kV. Perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan faktor lapisan permukaan tanah ($C_s = 0,8$), resistivitas lapisan permukaan ($\rho_s = 3000 \Omega \cdot m$), dan waktu gangguan ($t_s = 0,5$ s). Nilai ini merupakan batas maksimum tegangan langkah yang masih dapat ditoleransi oleh tubuh manusia tanpa menimbulkan bahaya yang signifikan.

Nilai batas aman sebesar 4,8 kV kemudian digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi hasil simulasi tegangan langkah pada sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang. Hasil simulasi menunjukkan tegangan langkah maksimum sebesar 1.877.70 V, yang masih berada di bawah batas aman 4.835.6 V. Dengan demikian, berdasarkan parameter tegangan langkah, sistem pentanahan dinyatakan memenuhi

persyaratan keselamatan sesuai IEEE Std 80-2013 dan mendukung efektivitas sistem proteksi petir. Perbandingan kedua nilai tersebut disajikan pada Tabel 4.4

Tabel 4. 4 Perbandingan Tegangan Langkah dengan Batas Aman

Parameter	Nilai
Tegangan Sentuh Hasil Simulasi	1.877.70 V
Batas Aman Tegangan Sentuh	4.835.6 V
Status	Memenuhi

Pada Tabel 4.4 Perbandingan Tegangan Langkah dengan Batas Aman, hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan langkah maksimum yang terjadi pada sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang adalah sebesar 1.877.70 V. Nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan batas aman tegangan langkah berdasarkan standar yang digunakan, yaitu sebesar 4.835.6 V. Perbandingan ini dilakukan untuk mengevaluasi tingkat keselamatan sistem pentanahan terhadap pengaruh sambaran petir.

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai tegangan langkah hasil simulasi masih berada di bawah batas aman yang diizinkan, sehingga sistem pentanahan memenuhi persyaratan keselamatan. Kondisi ini menunjukkan bahwa beda potensial pada permukaan tanah akibat aliran arus petir masih berada dalam rentang yang dapat diterima, sehingga risiko terjadinya sengatan listrik pada seseorang yang berjalan di sekitar gardu induk dapat diminimalkan. Dengan demikian, berdasarkan parameter tegangan langkah, sistem pentanahan di Gardu Induk Kotapinang dinilai telah memenuhi kriteria keselamatan sesuai standar IEC 62305-3 dan IEEE Std 80-2013.

4.2.4 Analisis efektivitas sistem proteksi petir secara keseluruhan

Efektivitas sistem proteksi petir pada Gardu Induk Kotapinang dianalisis berdasarkan hasil pengukuran resistansi pentanahan dan hasil simulasi menggunakan MATLAB. Parameter utama yang digunakan dalam evaluasi meliputi nilai resistansi pentanahan (R_g), Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (Touch Voltage), dan tegangan langkah (Step Voltage). Keempat parameter tersebut merupakan indikator penting dalam menentukan kemampuan sistem pentanahan dalam menyalurkan arus petir ke bumi sekaligus menjaga keselamatan

peralatan dan personel di lingkungan gardu induk. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan ketentuan yang tercantum pada IEC 62305-3 dan IEEE Std 80-2013 sebagai acuan evaluasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai resistansi pentanahan sebesar 0.736Ω berada jauh di bawah batas maksimum yang direkomendasikan oleh IEC 62305-3, yaitu $\leq 10 \Omega$. Nilai resistansi yang rendah menunjukkan bahwa sistem pentanahan memiliki kemampuan yang baik dalam mengalirkan arus sambaran petir menuju tanah dengan hambatan yang kecil. Kondisi tersebut berpengaruh terhadap peningkatan kinerja sistem proteksi petir karena energi sambaran dapat segera didisipasikan ke dalam tanah sehingga mengurangi risiko kerusakan pada transformator, peralatan hubung, sistem kontrol, serta perangkat kelistrikan lainnya yang terdapat di Gardu Induk Kotapinang.

Nilai GPR selanjutnya digunakan untuk menghitung tegangan sentuh dan tegangan langkah sebagai parameter keselamatan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan sentuh sebesar 1.251.80 Volt, sedangkan tegangan langkah sebesar 1.877.70 Volt. Kedua nilai tersebut berada di bawah batas aman yang dihitung berdasarkan IEEE Std 80, sehingga menunjukkan bahwa sistem pentanahan mampu menjaga kondisi keselamatan bagi personel yang berada di area Gardu Induk Kotapinang pada saat terjadi sambaran petir. Dapat dilihat pada Tabel 4.5

Tabel 4. 5 Hasil Analisis Efektivitas Sistem Proteksi Petir

Parameter	Hasil Penelitian	Kriteria Evaluasi	Status
Resistansi Pentanahan (R_g)	0.736Ω	Impedansi serendah mungkin	Memenuhi
Ground Potential Rise (GPR)	12.517.97 V	dikendalikan melalui sistem pentanahan	Parameter evaluasi
Tegangan Sentuh	1.251.80 V	< 1444	Memenuhi
Tegangan Langkah	1.877.70 V	< 4838 V	Memenuhi
Efektivitas Sistem Proteksi Petir	Sangat Baik	Sesuai tujuan penelitian	Memenuhi
Efektivitas Penyaluran Arus Petir	Baik	IEC 62305-3	Memenuhi
Tingkat Keselamatan Personel	Sudah optimal	IEC 62305-3 & IEEE Std 80-2013	Memenuhi
Kesimpulan Sistem Proteksi Petir	Sistem mampu menyalurkan arus petir	IEC 62305-3	Cukup efektif

Parameter	Hasil Penelitian	Kriteria Evaluasi	Status
	dengan baik, namun masih memerlukan perbaikan untuk menurunkan tegangan sentuh		

Dari Tabel 4.5 Dapat diketahui bahwa seluruh parameter yang dianalisis menunjukkan hasil yang memenuhi kriteria keselamatan. Nilai resistansi pentanahan yang rendah menghasilkan nilai Ground Potential Rise (GPR) yang dapat dikendalikan, sehingga tegangan sentuh dan tegangan langkah tetap berada di bawah batas aman. Hal ini menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara kualitas sistem pentanahan dengan efektivitas sistem proteksi petir.

Hubungan antarparameter tersebut dapat dijelaskan bahwa semakin kecil nilai resistansi pentanahan, maka semakin kecil hambatan yang dilalui arus petir untuk mengalir ke bumi. Kondisi tersebut menyebabkan kenaikan potensial tanah (*Ground Potential Rise*) menjadi lebih rendah. Penurunan nilai GPR kemudian berdampak langsung terhadap berkurangnya nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah yang muncul pada permukaan tanah. Dengan demikian, kualitas sistem pentanahan menjadi faktor yang sangat menentukan dalam meningkatkan keselamatan personel dan melindungi peralatan gardu induk dari dampak sambaran petir.

Hasil analisis efektivitas ini menjadi dasar untuk melakukan evaluasi kesesuaian sistem pentanahan terhadap persyaratan IEC 62305-3. Evaluasi tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa sistem pentanahan tidak hanya memberikan hasil yang baik secara teknis, tetapi juga memenuhi prinsip-prinsip desain dan kinerja yang direkomendasikan oleh standar internasional.

4.3 Evaluasi Sistem Pentanahan Berdasarkan IEC 62305-3

Evaluasi sistem pentanahan dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang terhadap persyaratan yang ditetapkan dalam IEC 62305-3, yaitu standar internasional yang mengatur sistem proteksi petir eksternal (*Lightning Protection System/LPS*). Standar ini menekankan bahwa sistem pentanahan harus mampu menyediakan jalur pelepasan arus petir ke bumi

dengan impedansi serendah mungkin sehingga energi sambaran petir dapat didisipasikan secara efektif tanpa menimbulkan bahaya bagi manusia maupun peralatan.

Pada penelitian ini, evaluasi dilakukan berdasarkan hasil analisis yang telah diperoleh melalui perhitungan manual dan simulasi MATLAB, meliputi nilai resistansi pentanahan (*Ground Resistance*), Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (*Touch Voltage*), dan tegangan langkah (*Step Voltage*). Hasil tersebut selanjutnya dibandingkan dengan prinsip-prinsip yang direkomendasikan dalam IEC 62305-3, serta didukung oleh evaluasi batas keselamatan tegangan sentuh dan tegangan langkah berdasarkan IEEE Std 80.

Secara umum, IEC 62305-3 tidak menetapkan nilai maksimum resistansi pentanahan dalam bentuk angka tertentu. Standar ini lebih menekankan bahwa sistem terminasi bumi harus dirancang sehingga memiliki impedansi yang rendah, terhubung secara baik (*equipotential bonding*), dan mampu mendistribusikan arus petir secara efektif ke dalam tanah. Oleh karena itu, evaluasi pada penelitian ini dilakukan berdasarkan kesesuaian karakteristik sistem pentanahan terhadap prinsip-prinsip tersebut. Dapat dilihat pada Tabel 4.6

Tabel 4. 6 Evaluasi Sistem Pentanahan Berdasarkan IEC 62305-3

Parameter Evaluasi	Hasil Penelitian	Persyaratan IEC 62305-3	Status
Jenis sistem pentanahan	Ground Mesh	Menggunakan sistem terminasi bumi yang efektif	Memenuhi
Resistansi pentanahan (R_g)	0.736 Ω	Impedansi dibuat serendah mungkin	Memenuhi
Ground Potential Rise (GPR)	12.517.97V	Dikendalikan melalui sistem pentanahan yang baik	Memenuhi
Tegangan sentuh	1.251.80 V	Risiko terhadap manusia harus diminimalkan	Memenuhi
Tegangan langkah	1.877.70 V	Risiko terhadap manusia harus diminimalkan	Memenuhi
Distribusi arus petir	Merata melalui Ground Mesh	Arus petir harus tersebar secara efektif ke tanah	Memenuhi

Pada Tabel 4.6 Evaluasi Sistem Pentanahan Berdasarkan IEC 62305-3, sebagian besar parameter sistem pentanahan di Gardu Induk Kotapinang telah memenuhi persyaratan standar. Sistem pentanahan yang digunakan berupa Ground Mesh, yang berfungsi sebagai media untuk menyalurkan arus sambaran petir secara efektif ke dalam tanah. Selain itu, nilai resistansi pentanahan (R_g) yang diperoleh

sebesar 0.736Ω menunjukkan bahwa impedansi sistem pentanahan telah dibuat serendah mungkin, sehingga memenuhi ketentuan IEC 62305-3. Nilai resistansi yang rendah ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan yang baik dalam mengalirkan arus petir menuju bumi dan mengurangi risiko kerusakan pada peralatan gardu induk.

Selain itu, hasil simulasi memperlihatkan nilai Ground Potential Rise (GPR) sebesar 12.517.97 Volt. Besarnya GPR merupakan konsekuensi dari mengalirnya arus petir sebesar 17 kA ke sistem pentanahan. Dengan nilai resistansi pentanahan yang rendah, kenaikan potensial tanah dapat dikendalikan sehingga tidak menimbulkan peningkatan tegangan yang berlebihan pada area gardu induk.

Evaluasi terhadap aspek keselamatan juga menunjukkan hasil yang baik. Nilai tegangan sentuh sebesar 1.251.80 Volt masih berada di bawah batas aman hasil perhitungan berdasarkan IEEE Std 80, yaitu 1.444 Volt. Demikian pula, tegangan langkah sebesar 1.877.70 Volt masih berada di bawah batas aman sebesar 4.838 Volt. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem pentanahan mampu membatasi beda potensial pada permukaan tanah sehingga risiko sengatan listrik terhadap personel dapat diminimalkan.

Dengan demikian, berdasarkan hasil evaluasi terhadap prinsip-prinsip yang ditetapkan dalam IEC 62305-3, dapat disimpulkan bahwa sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang telah memenuhi persyaratan teknis sistem proteksi petir eksternal. Konfigurasi ground grid yang digunakan, didukung oleh nilai resistansi pentanahan yang sangat rendah serta parameter keselamatan yang berada dalam batas aman, menunjukkan bahwa sistem mampu mendisipasikan arus petir secara efektif dan memberikan perlindungan yang memadai terhadap manusia maupun peralatan. Oleh karena itu, tujuan penelitian ketiga, yaitu mengevaluasi kesesuaian sistem pentanahan berdasarkan IEC 62305-3, dapat dinyatakan telah tercapai.

4.3.1 Evaluasi Nilai Resistansi Pentanahan

Evaluasi nilai resistansi pentanahan dilakukan untuk mengetahui apakah sistem pentanahan yang diterapkan pada Gardu Induk Kotapinang telah memenuhi prinsip-prinsip yang direkomendasikan dalam IEC 62305-3. Dalam sistem proteksi petir, resistansi pentanahan merupakan salah satu parameter penting karena

memengaruhi kemampuan sistem dalam menyalurkan arus petir ke bumi secara efektif. Nilai resistansi yang rendah akan memperkecil hambatan aliran arus petir sehingga energi sambaran dapat didisipasikan dengan cepat dan aman.

Berdasarkan hasil perhitungan manual dan simulasi menggunakan MATLAB diperoleh nilai resistansi pentanahan (Ground Resistance/Rg) sebesar 0.736Ω . Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang memiliki impedansi yang sangat rendah sehingga mampu menyediakan jalur pelepasan arus petir dengan baik.

Berbeda dengan beberapa standar nasional yang menetapkan batas nilai resistansi tertentu, IEC 62305-3 tidak menentukan nilai maksimum resistansi pentanahan dalam bentuk angka. Standar ini menekankan bahwa sistem terminasi bumi harus dirancang dengan impedansi serendah mungkin, agar arus petir dapat dialirkan ke tanah secara efektif serta mampu mengurangi kenaikan potensial tanah (*Ground Potential Rise*). Oleh karena itu, evaluasi dalam penelitian ini dilakukan dengan membandingkan karakteristik sistem pentanahan terhadap prinsip-prinsip yang diatur dalam IEC 62305-3. Evaluasi nilai resistansi pentanahan dapat dilihat pada Tabel 4.7

Tabel 4. 7 Evaluasi Nilai Resistansi Pentanahan

Parameter	Hasil Penelitian	Kriteria IEC 62305-3	Status
Jenis Sistem Pentanahan	Ground Mesh	Sistem terminasi bumi harus mampu mendisipasikan arus petir secara efektif	Memenuhi
Resistansi Pentanahan (Rg)	0.736Ω	Impedansi sistem pentanahan dibuat serendah mungkin	Memenuhi
Kemampuan Penyaluran Arus Petir	Sangat Baik	Arus petir harus dapat mengalir ke bumi melalui jalur berimpedansi rendah	Memenuhi

Pada Tabel 4.7 Evaluasi Nilai Resistansi Pentanahan, sistem pentanahan yang diterapkan di Gardu Induk Kotapinang menggunakan Ground Mesh sebagai media utama untuk menyalurkan arus sambaran petir ke dalam tanah. Berdasarkan kriteria IEC 62305-3, sistem terminasi bumi harus mampu mendisipasikan arus petir secara efektif agar tidak menimbulkan kerusakan pada peralatan maupun membahayakan keselamatan personel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis sistem

pentanahan yang digunakan telah memenuhi persyaratan tersebut karena mampu menyediakan jalur pelepasan arus petir dengan baik.

Nilai resistansi pentanahan (R_g) yang diperoleh dari hasil pengukuran dan simulasi adalah sebesar 0.736Ω . Nilai ini berada jauh di bawah batas maksimum yang direkomendasikan oleh IEC 62305-3, sehingga menunjukkan bahwa impedansi sistem pentanahan telah dibuat serendah mungkin. Resistansi yang rendah memungkinkan arus petir mengalir menuju bumi dengan hambatan yang kecil, sehingga kenaikan potensial pada sistem dapat dikurangi dan risiko kerusakan terhadap peralatan listrik maupun elektronik di gardu induk menjadi lebih rendah.

Selain memiliki nilai resistansi yang rendah, hasil evaluasi juga menunjukkan bahwa kemampuan penyaluran arus petir berada pada kategori sangat baik. Hal ini menunjukkan bahwa arus sambaran petir dapat dialirkan ke bumi melalui jalur pentanahan yang berimpedansi rendah sesuai dengan ketentuan IEC 62305-3. Dengan demikian, berdasarkan evaluasi jenis sistem pentanahan, nilai resistansi pentanahan, dan kemampuan penyaluran arus petir, dapat disimpulkan bahwa sistem pentanahan di Gardu Induk Kotapinang telah memenuhi persyaratan standar serta mampu mendukung efektivitas sistem proteksi petir.

4.3.2 Evaluasi *Ground Potential Rise* (GPR)

Evaluasi *Ground Potential Rise* (GPR) dilakukan untuk menilai kemampuan sistem pentanahan dalam mengendalikan kenaikan potensial tanah saat terjadi aliran arus petir. Berdasarkan hasil perhitungan manual dan simulasi MATLAB, diperoleh nilai *Ground Potential Rise* (GPR) sebesar 12.517.97 Volt pada arus petir sebesar 17 kA dengan nilai resistansi pentanahan 0.736Ω . Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem pentanahan mampu menyalurkan arus petir ke dalam tanah melalui jalur berimpedansi rendah sehingga kenaikan potensial tanah dapat dikendalikan. Sesuai dengan prinsip IEC 62305-3, sistem terminasi bumi harus mampu mendisipasikan arus petir secara efektif untuk meminimalkan risiko terhadap manusia dan peralatan. Dengan demikian, hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang telah memenuhi prinsip pengendalian *Ground Potential Rise* (GPR) sebagaimana direkomendasikan dalam IEC 62305-3. Hasil evaluasi *Ground Potential Rise* disajikan pada Tabel 4.8

Tabel 4. 8 Evaluasi Ground Potential Rise (GPR)

Parameter	Hasil Penelitian	Kriteria IEC 62305-3	Status
Arus Petir	17.000 A	Disesuaikan dengan tingkat proteksi yang dirancang	Sesuai
Resistansi Pentanahan	0.736 Ω	Impedansi sistem pentanahan dibuat serendah mungkin	Memenuhi
Ground Potential Rise (GPR)	12.517.97 V	Kenaikan potensial tanah harus diminimalkan melalui desain sistem pentanahan	Memenuhi

Pada Tabel 4.8, menyajikan evaluasi Ground Potential Rise (GPR) berdasarkan standar IEC 62305-3, membandingkan parameter Arus Petir, Resistansi Pentanahan, dan nilai GPR itu sendiri dengan kriteria standar. Untuk Arus Petir, nilai penelitian tercatat 17.000 A yang dinyatakan "Sesuai" dengan kriteria penyesuaian tingkat proteksi. Resistansi Pentanahan yang terukur adalah 0.736 Ω , memenuhi kriteria untuk nilai impedansi serendah mungkin dengan status "Memenuhi".

Berdasarkan parameter tersebut, nilai GPR hasil perhitungan adalah 12.517.97 V, yang juga berstatus "Memenuhi" kriteria untuk meminimalkan kenaikan potensial tanah melalui desain sistem pentanahan. Secara keseluruhan, data menunjukkan sistem proteksi dan pentanahan yang dievaluasi memenuhi persyaratan keselamatan standar IEC yang berlaku, yang bertujuan mencegah kerusakan peralatan dan bahaya bagi personel akibat sambaran petir.

4.3.3 Evaluasi Tegangan Sentuh

Evaluasi tegangan sentuh (*Touch Voltage*) dilakukan untuk menilai tingkat keselamatan sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang terhadap risiko sengatan listrik saat terjadi sambaran petir. Berdasarkan hasil perhitungan manual dan simulasi MATLAB, diperoleh nilai tegangan sentuh sebesar 1.251.80 Volt, yang berasal dari nilai *Ground Potential Rise* (GPR) sebesar 12.517.97 Volt dengan faktor tegangan sentuh (K_t) sebesar 0,10. Nilai tersebut lebih kecil dibandingkan batas aman berdasarkan IEEE Std 80, yaitu 1.444 Volt, sehingga menunjukkan bahwa sistem pentanahan mampu memberikan perlindungan yang memadai bagi

personel. Meskipun IEC 62305-3 tidak menetapkan batas numerik tegangan sentuh, standar ini menekankan pentingnya sistem pentanahan yang efektif dan penyamaan potensial (*equipotential bonding*) untuk meminimalkan risiko terhadap manusia. Dengan demikian, hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang telah memenuhi prinsip keselamatan yang direkomendasikan dalam IEC 62305-3. Hasil evaluasi tegangan sentuh disajikan pada Tabel 4.9

Tabel 4. 9 Evaluasi Tegangan Sentuh

Parameter	Hasil Penelitian	Kriteria Evaluasi	Status
Ground Potential Rise (GPR)	12.517.97	Dikendalikan melalui sistem pentanahan yang efektif	Memenuhi
Tegangan Sentuh	1.251.80 V	Lebih kecil dari batas aman	Memenuhi
Tingkat Keselamatan Personel	Aman	Risiko sengatan listrik diminimalkan	Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.9 terlihat hasil evaluasi, nilai tegangan sentuh yang diperoleh sebesar 1.251.80 Volt lebih rendah dibandingkan batas aman menurut IEEE Std 80, yaitu 1.444 Volt. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang mampu menjaga beda potensial antara peralatan dan permukaan tanah pada tingkat yang aman sehingga risiko sengatan listrik terhadap personel saat terjadi sambaran petir dapat diminimalkan.

Nilai tegangan sentuh yang rendah dipengaruhi oleh resistansi pentanahan sebesar 0.736Ω serta penggunaan sistem ground mesh yang mampu mendistribusikan arus petir secara merata ke dalam tanah. Kondisi ini sejalan dengan prinsip IEC 62305-3 yang menekankan pentingnya sistem pentanahan berimpedansi rendah dan penyamaan potensial (*equipotential bonding*) untuk mengurangi risiko akibat sambaran petir. Dengan demikian, sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang dinilai telah memenuhi aspek keselamatan terhadap tegangan sentuh dan mendukung efektivitas sistem proteksi petir.

4.3.4 Evaluasi Tegangan Langkah

Evaluasi tegangan langkah (*Step Voltage*) dilakukan untuk menilai tingkat keselamatan sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang terhadap risiko sengatan

listrik akibat perbedaan potensial pada permukaan tanah saat terjadi sambaran petir. Berdasarkan hasil perhitungan manual dan simulasi MATLAB, diperoleh nilai tegangan langkah sebesar 1.877.70 Volt, yang berasal dari Ground Potential Rise (GPR) sebesar 12.517.97 Volt dengan faktor tegangan langkah (K_s) sebesar 0,15. Nilai tersebut masih berada di bawah batas aman berdasarkan IEEE Std 80, yaitu 4.835 Volt, sehingga menunjukkan bahwa sistem pentanahan mampu memberikan tingkat keselamatan yang memadai. Meskipun IEC 62305-3 tidak menetapkan batas numerik tegangan langkah, standar ini menekankan pentingnya sistem pentanahan yang efektif untuk mengendalikan kenaikan potensial tanah dan meminimalkan risiko terhadap manusia. Dengan demikian, sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang telah memenuhi prinsip keselamatan yang direkomendasikan dalam IEC 62305-3. Hasil evaluasi tegangan langkah disajikan pada Tabel 4.10

Tabel 4. 10 Evaluasi Tegangan Langkah

Parameter	Hasil Penelitian	Kriteria Evaluasi	Status
Ground Potential Rise (GPR)	12.517.97 V	Dikendalikan melalui sistem pentanahan yang efektif	Memenuhi
Tegangan Langkah	1.877.70 V	Lebih kecil dari batas aman (4.438)	Memenuhi
Tingkat Keselamatan Personel	Aman	Risiko sengatan listrik diminimalkan	Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.10 terlihat hasil evaluasi nilai tegangan langkah sebesar 1.877.70 Volt masih berada di bawah batas aman menurut IEEE Std 80, yaitu 4.438 Volt. Hasil ini menunjukkan bahwa beda potensial pada permukaan tanah saat terjadi aliran arus petir masih berada dalam batas yang aman, sehingga risiko sengatan listrik terhadap personel di sekitar Gardu Induk Kotapinang dapat diminimalkan.

Nilai tegangan langkah yang rendah dipengaruhi oleh resistansi pentanahan sebesar $0,736 \Omega$ serta penggunaan sistem ground grid yang mampu mendistribusikan arus petir secara merata dan mengendalikan Ground Potential Rise (GPR). Kondisi tersebut menyebabkan gradien potensial tanah menjadi lebih kecil sehingga tegangan langkah tetap berada di bawah batas aman. Dengan

demikian, sistem pentanahan Gardu Induk Kotapinang telah memenuhi aspek keselamatan terhadap tegangan langkah dan sejalan dengan prinsip IEC 62305-3, yaitu menyediakan sistem terminasi bumi yang efektif untuk meminimalkan risiko terhadap manusia dan peralatan listrik.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian Analisis Resistansi Pentanahan terhadap Efektivitas Proteksi Petir pada Gardu Induk Kotapinang Sesuai Standar IEC 62305-3, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Nilai resistansi pentanahan pada Gardu Induk Kotapinang sebesar $0,736 \Omega$, yang menunjukkan sistem pentanahan memiliki kemampuan yang sangat baik dalam mengalirkan arus petir ke tanah. Nilai tersebut jauh di bawah batas maksimum yang direkomendasikan sehingga dapat mendukung keandalan sistem proteksi petir.
2. Efektivitas sistem proteksi petir berdasarkan hasil simulasi menggunakan MATLAB menunjukkan nilai Ground Potential Rise (GPR) maksimum sebesar 12.517.97 V, tegangan sentuh sebesar 1.251.80 V, dan tegangan langkah sebesar 1.877.70 V. Nilai-nilai tersebut masih berada dalam batas aman sehingga sistem pentanahan mampu mengurangi kenaikan potensial tanah serta meminimalkan risiko terhadap peralatan listrik maupun keselamatan personel di area gardu induk.
3. Evaluasi berdasarkan standar IEC 62305-3 menunjukkan bahwa sistem pentanahan pada Gardu Induk Kotapinang telah memenuhi persyaratan teknis sebagai sistem proteksi petir yang efektif. Dengan nilai resistansi pentanahan yang rendah dan parameter keamanan yang berada dalam batas yang diizinkan, sistem mampu memberikan perlindungan yang memadai terhadap dampak sambaran petir.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut.

1. PT PLN (Persero) disarankan untuk melakukan pengukuran resistansi pentanahan secara berkala agar kualitas sistem pentanahan tetap terjaga dan mampu mempertahankan efektivitas proteksi petir sesuai standar IEC 62305-3.
2. Perawatan sistem pentanahan perlu dilakukan secara rutin, seperti pemeriksaan sambungan konduktor, kondisi elektroda pentanahan, serta perubahan karakteristik tanah yang dapat memengaruhi nilai resistansi pentanahan.

3. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data arus petir hasil pengukuran aktual (real-time) dan mempertimbangkan variasi kondisi tanah akibat perubahan musim sehingga hasil analisis dapat menggambarkan kondisi lapangan secara lebih akurat.
4. Pengembangan penelitian berikutnya dapat dilakukan dengan membandingkan beberapa model sistem pentanahan, seperti *ground rod*, *ground grid*, dan sistem kombinasi, untuk memperoleh desain yang paling efektif dalam menurunkan resistansi pentanahan dan meningkatkan kinerja proteksi petir.
5. Simulasi selanjutnya dapat dikembangkan dengan mengintegrasikan perangkat lunak lain, seperti ETAP atau CDEGS, sebagai pembanding terhadap hasil MATLAB sehingga validitas hasil analisis semakin tinggi dan dapat menjadi dasar yang lebih kuat dalam evaluasi sistem proteksi petir pada gardu induk.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Studi *et al.*, “STUDI TENTANG EFEKTIVITAS BEBERAPA MACAM ZAT TERHADAP NILAI RESISTANSI SISTEM PENTANAHAN (GROUNDING) Verry Dwi Andhika Achmad Imam Agung,” pp. 501–510.
- [2] W. Makassar, “Arus Jurnal Sains dan Teknologi (AJST) Pengukuran Nilai Resistivitas Tanah pada Transformator Distribusi,” vol. 2, no. 2, 2024.
- [3] P. Code, *INTERNATIONAL*. 2010.
- [4] M. M. Rahman, “Evaluasi Nilai Tahanan Pentanahan pada Penyulang Parangtritis PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Indralaya,” Politeknik Negeri Sriwijaya, 2021. [Online]. Available: <http://eprints.polsri.ac.id/11543/>
- [5] D. Lovri and I. Krolo, “applied sciences Estimation of Effective Length of Type-A Grounding System According to IEC 62305-3 Using a Machine Learning Regression Model,” 2024.
- [6] H. Yuliadi and S. Hardi, “Analisis Perbandingan Tahanan Pentanahan Pada Elektroda Batang Dan Plat Untuk Perbaikan Nilai Resistansi Pembumian,” vol. 4, no. 1, pp. 68–74, 2021.
- [7] P. D. Matlab, “Impression : Jurnal Teknologi dan Informasi,” vol. 2, no. 3, 2023.
- [8] A. Sofwan, D. Kosambi, and J. Barat, “Pemodelan Sistem Pembumian Pada Gardu Induk 150 KV Tayan , Kalimantan Barat Menggunakan Grid Analysis Cymgrd,” vol. 14, no. 1, pp. 76–87, 2024.
- [9] T. Wati, R. Ramadhan, M. Aji, and A. Ramdhan, “Grounding Analysis Based on Different Soil Characteristics in The Distribution System,” vol. 16, no. 1, pp. 1–7, 2024.
- [10] J. T. A. Gangguan, J. Junaedi, A. Triwiyatno, and S. Sumardi, “Peninjauan Keandalan Sistem Pentanahan Tower SUTT 150 kV,” vol. 2, no. 5, pp. 327–333, 2024.
- [11] D. E. Putra, G. P. V Pardede, F. Kurniawan, and M. W. Saputra, “Comparison of Grounding Resistance Using Grounding Rod Electrodes

- with Different Fault Current Types in Podzolic Soil at Prabumulih Substation,” pp. 19–25, 2023.
- [12] C. S. Wijaya, M. Rajagukguk, and U. Tanjungpura, “ANALISA SISTEM PENTANAHAN DENGAN KOMBINASI GRID & ROD PADA GARDU INDUK 150 KV SEI RAYA,” vol. 9, no. 12, pp. 362–376, 2025.
 - [13] A. Fitriani and J. Panjaitan, “Analisis Pentanahan Gardu Induk Akibat Surja Petir Menggunakan Finite Elemen Method,” vol. 5, pp. 210–215, 2023.
 - [14] Z. Abdul-malek, M. Shahrin, A. Yaman, and M. Adnan, “Effects of soil profile on the transient performance of substation grounding system,” vol. 20, no. 2, pp. 870–877, 2020, doi: 10.11591/ijeecs.v20.i2.pp870-877.
 - [15] S. Setya, R. Duanaputri, S. Syah, and A. Prasetyo, “Evaluasi Pentanahan Terhadap Sambaran Petir Pada SUTT 70 kV Menggunakan Electro Magnetic Transient Program (EMTP),” vol. 8, no. 3, 2021.
 - [16] and S. E. Complete Guide to Lightning and Surge Protection for Buildings, Industrial, “Complete Guide to Lightning and Surge Protection for Buildings, Industrial, and Sensitive Electronics,” 2025. Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: https://lsp.global/difference-between-lightning-protection-and-surge-protection/?utm_source=chatgpt.com
 - [17] M. PETIR and S. P. Petir, “STANDAR NILAI GROUNDING SESUAI REGULASI,” 2025. [Online]. Available: <https://www.masterpetir.com/p/standar-nilai-grounding-yang-aman-dan.html?>
 - [18] D. Wijayanto, A. Trihasto, and A. A. Kurniawan, “UJI RESISTIVITAS TANAH UNTUK PEMASANGAN GROUNDING DAN LIGHTNING PROTECTION PROYEK PLTGU TAMBAK LOROK CCPP 600-850 MW BLOK 3 SEMARANG,” vol. 2, no. 2, pp. 462–471, 2023.
 - [19] “Soil Resistivity Information and Field Testing,” 2025. [Online]. Available: <https://www.easypower.com/resources/article/soil-resistivity-information-and-field-testing>
 - [20] B. P. Pandapotan, A. C. Kumoro, and W. Widayat, “Sistem Pembumian Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS),” vol. 3, no. April 2020, pp. 34–38, 2025.

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran Data Pendukung Penelitian

 PT PLN (PERSERO) UIPSB SUMATERA	FORMULIR BERITA ACARA PEKERJAAN SELESAI	 Sistem Manajemen Terintegrasi	
No.Dokumen	FR-SMT-012	Tanggal	10 Mei 2022
Revisi	1	Halaman	1dari 1

Data Teknis Sistem Pentanahan

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Nama Gardu Induk	GI Kota Pinang	-
2	Level Tegangan	150	kV
3	Sistem Proteksi	Lightning Protection System (LPS)	-
4	Jenis Conductor	Bare Copper (BC)	-
5	Luas Penampang	150	mm ²
6	Material	Tembaga	-
7	Jumlah Conductor	4	Buah
8	Panjang Conductor	± 50	m
9	Sistem Pentanahan	Grid Grounding	-
10	Standar Acuan	IEC 62305-3, SPLN	-
11	Resistivitas batu kerikil	3000	Ω m
12	Faktor permukaan	0,8	-
13	Luas grid	2500	m ²
14	Jarak antar elektroda	5	m

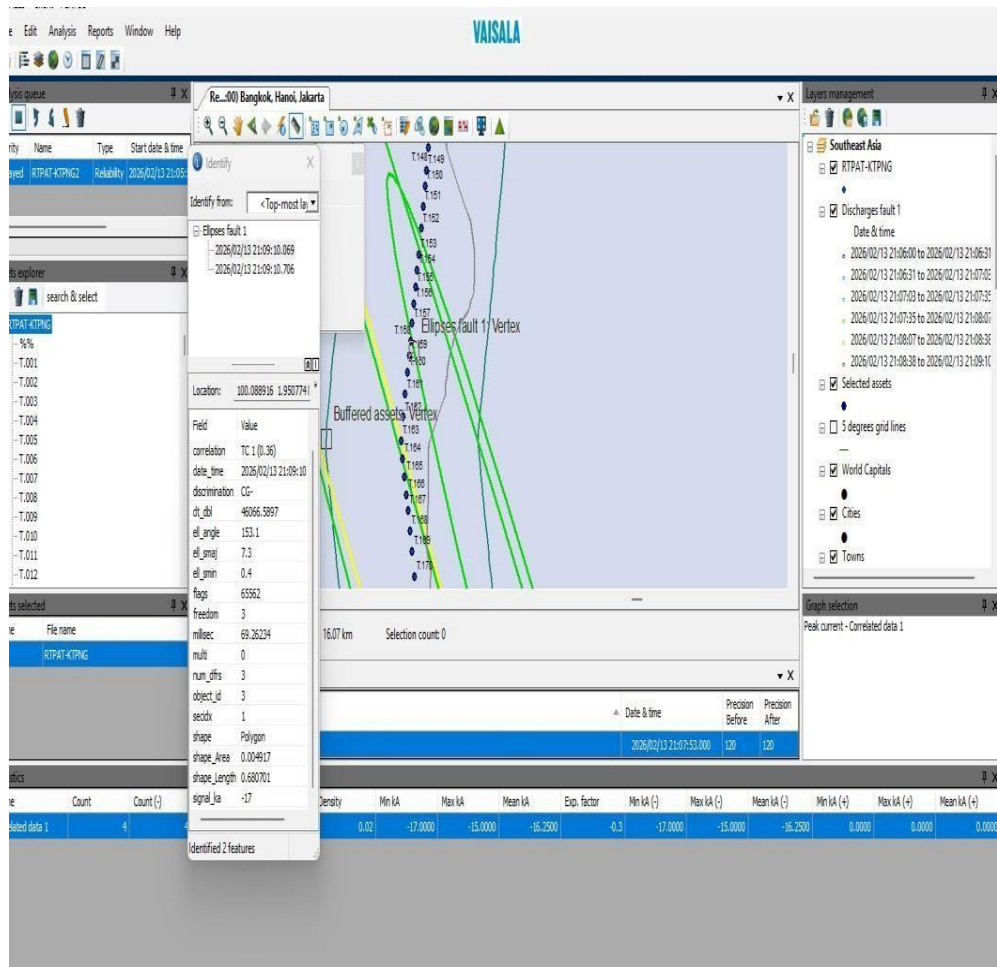
Kota Pinang, 13 MEI 2026

TL GARDU INDUK KOTA PINANG

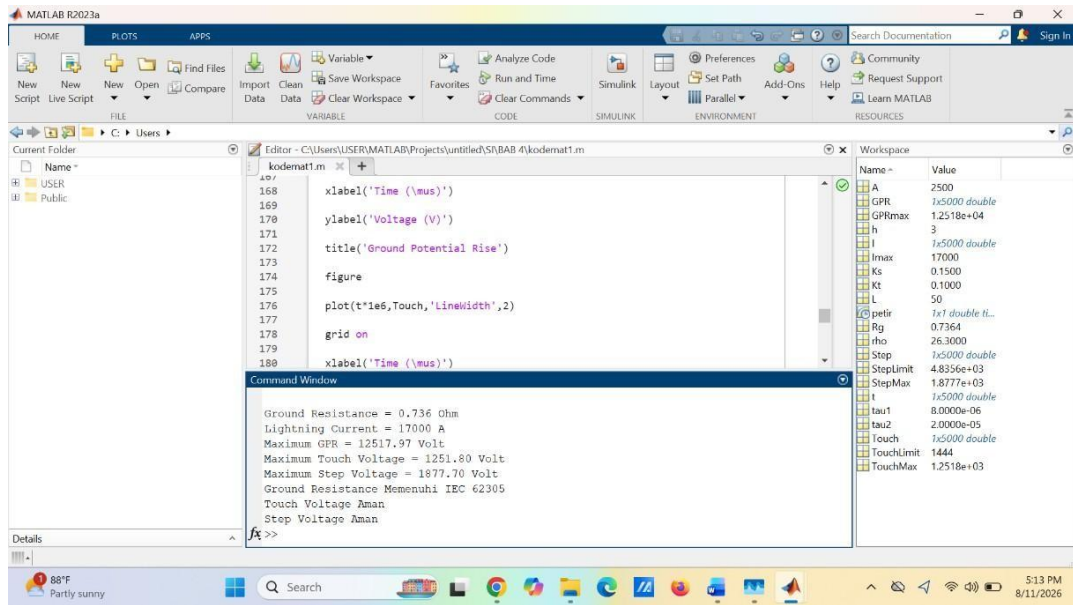
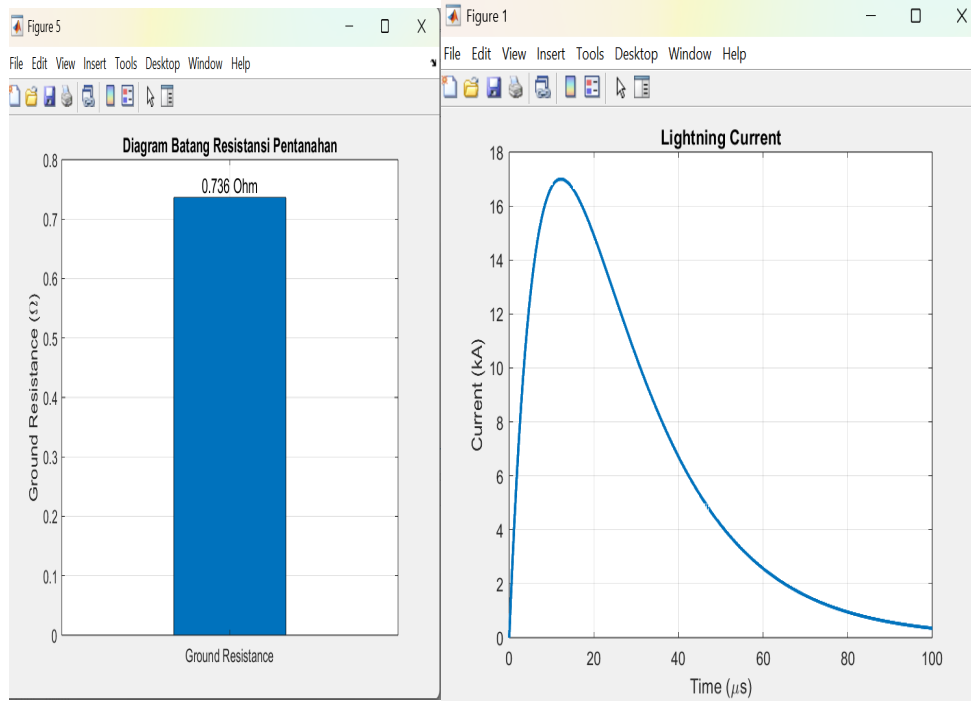


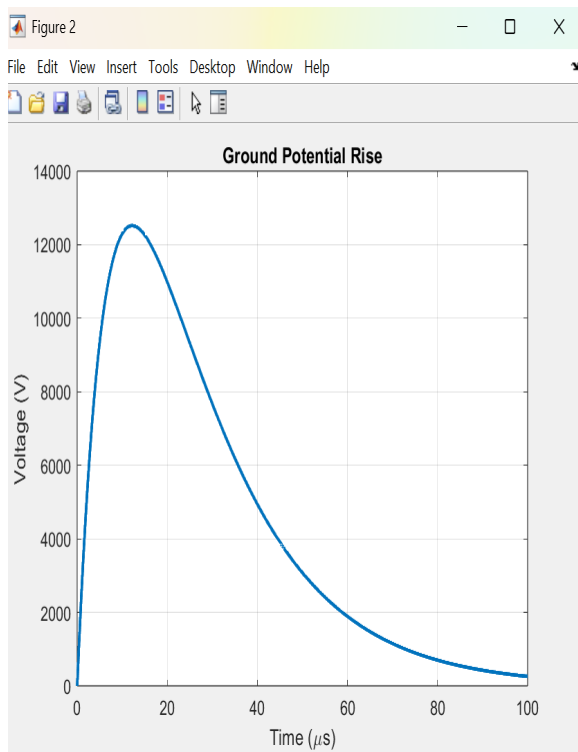
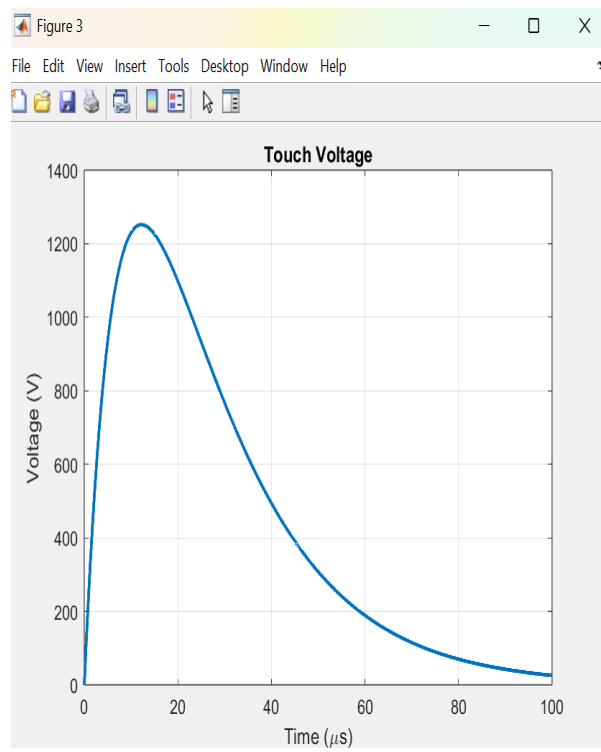
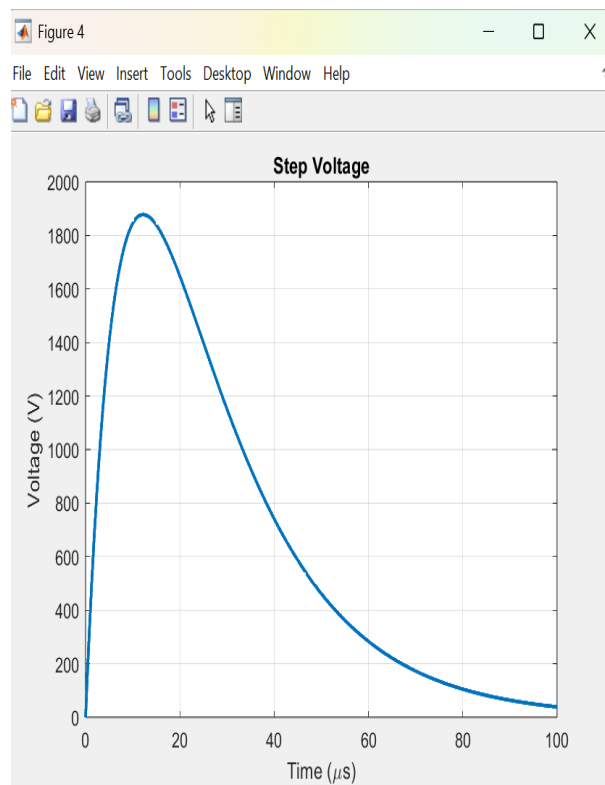
Juanda Tarigan

Lampiran Data Arus Petir



Lampiran Data Pendukung Pada Matlab





Lampiran Pengambilan Data Umsu



Nomor : 835/IL3.AU/UMSU-07/B/2026 Medan, 04 Dzulqaidah 1447 H
 Lamp : - 21 April 2026 M
 Hal : Pengambilan Data

Kepada Yth. : Bapak / Ibu Pimpinan
 PT. PLN (Persero) Gardu Induk PLN Kota Pinang
 Di - Tempat

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Dengan hormat,

Kami memohon kesediaan Bapak/Ibu Pimpinan untuk menerima dan memberikan izin bagi Mahasiswa kami yang akan melakukan Pengambilan Data di **PT. PLN (Persero) Gardu Induk PLN Kota Pinang**, untuk penulisan Tugas Akhir, guna menyelesaikan program pendidikan Strata Satu (S-1) di Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Adapun nama mahasiswa kami tersebut adalah :

Nama : Bayu Afandi Nata
 NPM : 2207220101
 Program Studi : Teknik Elektro
 Judul Kerja Praktek : Pengaruh Variasi Resistivitas Tanah Terhadap Efektivitas Proteksi Petir Pada Gardu Induk Kota Pinang Sesuai Standar IEC 62305 - 3
 Dosen Pembimbing : Dr. Rohana, ST., MT.

Data yang diperlukan adalah:

1. Data resistensi pentanahan
2. Data resistivitas tanah
3. Data konfigurasi sistem pentanahan
4. Data arus petir
5. Data parameter keselamatan

Demikianlah harapan kami atas bantuan dan kerjasama Bapak/Ibu kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.



Dr. Ade Fandi ST., M.Sc., Ph.D.
 NIDN 50120197203

Cc. File



Lampiran Lembar Asistensi Seminar Proposal



PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400-66224567

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : BAYU AFANDI NATA
NPM : 2207220101
Judul : PENGARUH VARIASI RESISTIVITAS TANAH
TERHADAP EFEKTIVITAS PROTEKSI PETIR
PADA PLTGU BELAWAN PULAU SICANANG
SESUAI STANDAR IEC 62305-3

Dosen Pembimbing : Dr. Rohana, S.T., M.T

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
1	Rabu / 17-12-2025	1. Perubahan Judul, 2. Tujuan penelitian, Latar Belakang.	
2	Senin / 22-12-2025	1. Batasan Masalah. 2. Sintakronan judul TA dengan Tujuan, rumusan.	
3	Senin / 5-1-2026	1. Tambahkan Teori 2. Tinjauan Pustaka. 3. Gap Penelitian.	
4	Senin / 19-1-2026	1. Prosedur Penelitian 2. Data penelitian 3. Tambahkan Teori	
5	Senin / 9-2-2026	1. Diagram Alir penelitian 2. Flowchart Penelitian 3. Metode Penelitian.	
6	Selasa / 24-2-2026	Ace Sampah	

Dosen Pembimbing

Dr. Rohana, S.T., M.T

Lampiran Lembar Asistensi Seminar Hasil



PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400-66224567

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : BAYU AFANDI NATA
NPM : 2207220101
Judul : ANALISIS RESISTANSI PENTANAHAN
TERHADAP EFEKTIFITAS PROTEKSI PETIR
MENGUNAKAN MATLAB/SIMULINK PADA
GARDU INDUK KOTAPINANG SESUAI
STANDAR IEC 62305-3
Dosen Pembimbing : Dr. Rohana, S.T., M.T

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
1	Jumat 29/5 26	Perbaikan dan penambahan research GAP	
2	Jumat 12/6 26	Perbaiki dan tambahkan penelitian pada BAB 3	
3	Selasa 23/6 26	Kerjakan tambahan tujuan 1 dan 2 dan 3	
4	Jumat 10/7 26	Perbaiki dan tambahkan Bab 4	
5	Selasa 21/7 26	Perbaiki dan tambahkan Bab 5 Serta tambahkan lampiran	
6	29 Juli 2026	Ace Semhs	

Dosen Pembimbing

Dr. Rohana, S.T., M.T

Lampiran Pengambilan Data Kepada ULTG Kisaran



UIP3B SUMATERA
UPT PADANG SIDEMPUAN
ULTG KISARAN

Nomor : 0090/STH.01.04/F22150100/2026 22 Juli 2026
Lampiran : 1 Lembar
Sifat : Segera - Biasa
Hal : Permohonan Izin Pengambilan Data Kepada
Mahasiswa UMSU

Yth. MANAGER UNIT PELAKSANA
TRANSMISI PADANG
SIDEMPUAN UPT PADANG
SIDEMPUAN

Sehubungan dengan surat dari Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Fakultas Teknik No. 835/H.3.AU/UMSU-07/B/2026 perihal permohonan pengambilan data, dengan ini kami memohon memberi izin kepada mahasiswa untuk melaksanakan pengambilan data di Gardu Induk Kota Pinang pada tanggal 20 Juli 2026 dengan nama sebagai berikut:

Nama Siswa	NPM	Program Study
Bayu Afandi Nata	2207220101	Teknik Elektro

Berikut kami lampirkan data yang dibutuhkan oleh mahasiswa tersebut.

Demikian kami sampaikan, atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan terima kasih.

MANAGER UNIT LAYANAN TRANSMISI
DAN GARDU INDUK KISARAN,



ERNEST GOHANKU MALAU

Tembusan:

1. ASMAN KEU DAN MUM UPT PADANG SIDEMPUAN PLN
2. TL ADM DAN MUM UPT PADANG SIDEMPUAN PLN

-
T -
F - W -

Lampiran Persetujuan Pengambilan Data Di UPT Padang Sidempuan



UIP3B SUMATERA
UPT PADANG SIDEMPUAN

Nomor : [...] /STH.01.04/F22150000/2026 22 Juli 2026
 Lampiran : -
 Sifat : Segera - Biasa
 Hal : Persetujuan Permohonan Izin Pengambilan Data di Wilayah Kerja UPT Padang Sidempuan Kepada
 Yth. Dekan Fakultas Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
 Fakultas Teknik

Sehubungan dengan surat dari Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Fakultas Teknik No. 835/H.3.AU/UMSU-07/B/2026 perihal permohonan pengambilan data, maka dengan ini kami **menyetujui** dan **memberi izin** kepada mahasiswa yang namanya tertera dibawah ini untuk melaksanakan pengambilan data di Gardu Induk Kota Pinang pada tanggal 20 Juli 2026 dengan nama sebagai berikut :

Nama Siswa	NPM	Program Studi
Bayu Afandi Nata	2207220101	Teknik Elektro

Demikian kami sampaikan, atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan terima kasih.

MANAGER UNIT PELAKSANA
TRANSMISI PADANG SIDEMPUAN,

LUHUR PRABHAWA