

TUGAS AKHIR

PEMILIHAN ELEKTRODA PENTANAHAN DENGAN RESISTANSI TERENDAH BERDASARKAN ANALISIS TEKNIS DAN EKONOMIS MENGUNAKAN MATLAB GUI

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

Disusun Oleh:

ABDUR RAHMAN HIDAYAT TARIGAN
2107220047



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh:

Nama : Abdur Rahman Hidayat Tarigan

NPM : 2107220047

Program Studi : Teknik Elektro

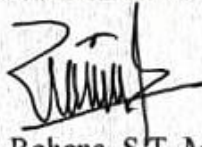
Judul Skripsi : Pemilihan Elektroda Pentanahan Dengan Resistansi Terendah Berdasarkan Analisis Teknis Dan Ekonomis Menggunakan Matlab GUI

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.

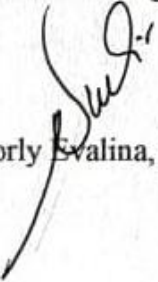
Mengetahui dan menyetujui

Dosen Pembimbing



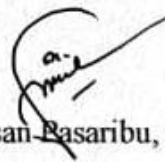
Dr. Rohana, S.T, M.T

Dosen Penguji I



Noorly Svalina, S.T., M.T

Dosen Penguji II



Faisal Irsan Basaribu, S.T, S.Pd., M.T

Program Studi Teknik Elektro

Ketua



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

SURAT PENYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Abdur Rahman Hidayat Tarigan
Tempat /Tanggal Lahir : Kabanjahe, 28 Agustus 2003
NPM : 2107220047
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

“Pemilihan Elektroda Pentanahan Dengan Resistansi Terendah Berdasarkan Analisis Teknis Dan Ekonomis Menggunakan Matlab GUI”

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 orisinil 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, 1 September 2025

Saya yang menyatakan,



Abdur Rahman Hidayat Tarigan

ABSTRAK

Sistem pentanahan penting untuk keselamatan, proteksi peralatan, dan stabilitas sistem kelistrikan. Pemilihan antara elektroda batang dan pelat kerap menjadi tantangan karena melibatkan pertimbangan teknis dan ekonomis. Penelitian ini bertujuan untuk membuat aplikasi perhitungan sistem pentanahan berbasis GUI di MATLAB untuk membantu dan memudahkan dalam analisis dan perbandingan kedua jenis elektroda. Metode penelitian yang digunakan adalah metode observasi yaitu dengan melakukan pengukuran langsung pada sistem pentanahan tiang transmisi xxx kV GI Namorambe menggunakan alat ukur Earht Tester dan juga menggunakan metode simulasi sebagai alat perhitungan nilai resistansi pentanahan yang parameternya dapat dikonfigurasikan agar mendapatkan nilai yang diinginkan. Aplikasi ini dapat menghitung resistansi tanah dan estimasi biaya secara akurat, dilengkapi fitur validasi input dan umpan balik visual. Simulasi menunjukkan kedua sistem mampu mencapai target resistansi $< x, xx \, \Omega$ sesuai hasil pengukuran langsung dan $< 5 \, \Omega$ sesuai standar PUIL pada tanah sangat konduktif ($\rho = xx \, \Omega.m$): elektroda batang xx m menghasilkan x.xxxx Ω , dan elektroda pelat $x \times x$ m pada kedalaman x.x m menghasilkan x.xxxx Ω . Namun, biaya total sistem batang hanya sekitar Rp x.xxx.xxx, jauh lebih rendah dibanding pelat yang mencapai Rp xx.xxx.xxx. Terdapat biaya yang signifikan antara kedua sistem untuk mencapai performa teknis yang sebanding. Analisis menunjukkan bahwa meskipun elektroda pelat memberikan resistansi x,xx % lebih rendah dari elektroda batang, peningkatan ini tidak sebanding dengan lonjakan biaya. Dari perhitungan Matlab GUI dihasilkan bahwa elektroda batang merupakan sistem pentanahan yang paling optimal. Sistem pelat hanya disarankan untuk kondisi khusus dengan batas ruang ekstrem atau kebutuhan resistansi sangat rendah tanpa batasan biaya.

Kata Kunci : Pentanahan, MATLAB GUI, Resistansi Tanah, Analisis Biaya, Tekno-Ekonomi.

ABSTRACT

Grounding systems are important for safety, equipment protection, and stability of electrical systems. The choice between rod and plate electrodes is often challenging because it involves technical and economic considerations. This study aims to create a GUI-based grounding system calculation application in MATLAB to assist and facilitate the analysis and comparison of the two types of electrodes. The research method used is the observation method, namely by conducting direct measurements on the grounding system of the xxx kV transmission pole of the Namorambe Substation using an Earth Tester measuring instrument and also using a simulation method as a tool for calculating grounding resistance values whose parameters can be configured to obtain the desired value. This application can calculate soil resistance and cost estimates accurately, equipped with input validation features and visual feedback. Simulations show that both systems are able to achieve the target resistance of $< x.xx \, \Omega$ according to direct measurement results and $< 5 \, \Omega$ according to PUIL standards in highly conductive soil ($\rho = xx \, \Omega.m$): a $xx \, m$ rod electrode produces $x.xxxx \, \Omega$, and a $x \times x \, m$ plate electrode at a depth of $x.x \, m$ produces $x.xxxx \, \Omega$. However, the total cost of the rod system is only around Rp $x.xxx.xxx$, much lower than the plate which reaches Rp $xx.xxx.xxx$. There is a significant cost difference between the two systems to achieve comparable technical performance. The analysis shows that although the plate electrode provides $x.xx\%$ lower resistance than the rod electrode, this increase is not commensurate with the increase in cost. From the Matlab GUI calculation, it is shown that the rod electrode is the most optimal grounding system. The plate system is only recommended for special conditions with extreme space limitations or very low resistance requirements without cost constraints.

Keywords: *Grounding, MATLAB GUI, Ground Resistance, Cost Analysis, Techno-Economics.*

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT. yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “Pemilihan Elektroda Pentanahan Dengan Resistansi Terendah Berdasarkan Analisis Teknis Dan Ekonomis Menggunakan Matlab GUI” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

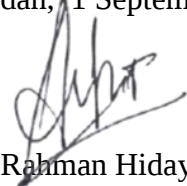
1. Orang tua saya, Bapak alm. Mahmud tarigan, Mamak tercinta Agustina Br Ginting, abang kandung Ilham Nabawi tarigan yang telah banyak memberi dukungan, doa, dan kasih sayang tiada henti.
2. Bapak Dr. Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Ibu Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T, M.Pd., selaku Kepala Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Benny Oktorialdi, S.T, M.T., selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Affandi, S.T., M.T., selaku Wakil Dekan III Bidang Kemahasiswaan Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Ibu Dr. Rohana, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Ibu Noorly Evalina, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan ide dan masukan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan ide-ide dan masukan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
9. Kepada diri saya sendiri Abdur Rahman Hidayat Tarigan. Terima kasih sudah berani bertahan saat merasa sendirian. Terima kasih sudah kuat menghadapi cermin yang terkadang terasa seperti musuh, membisikkan segala kurang.

Terima kasih sudah mau belajar dari setiap salah langkah, dari setiap air mata yang jatuh karena kecewa atau patah hati. Terima kasih untuk semua malam yang kau habiskan untuk begadang, ditemani tumpukan buku dan layar laptop yang menyala. Terima kasih untuk disiplinmu menolak ajakan bermain demi menyelesaikan tugas dan revisi yang seolah tak ada habisnya. Terima kasih telah mengorbankan waktu, tenaga, dan terkadang kesehatan mentalmu. Semua lelahmu terbayar. Setiap tetes keringat dan rasa ragu yang berhasil kau lawan adalah bukti betapa kuatnya dirimu. Gelar ini bukan hanya selembar kertas, tapi monumen dari kerja kerasmu. Aku sangat bangga padamu.

10. Kawan-kawan seperjuangan khususnya Aldi, Dai, Fitri, dan Rian. Terima kasih karena telah menemani masa perkuliahan yang luar biasa. Terima kasih karena bisa tumbuh bersama dalam masa perkuliahan ini.
11. Untukmu, yang kelak akan kupanggil “rumah”. Mungkin saat ini kamu sedang berjuang dengan masalahmu sendiri, mungkin kamu sedang sedang menikmati puncak kebahagiaanmu. Apapun yang sedang kamu lalui, ketahuilah bahwa perjalananmu itu berharga. Aku pun di sini sedang menjalani perjalananku. Belajar berkompromi, belajar mengelola ego, dan belajar mencintai dengan lebih dewasa. Semua ini kulakukan agar saat kita bersama nanti, cinta kita bukan hanya tentang perasaan, tapi juga tentang pemahaman dan kebijaksanaan. Kita tidak akan menjadi dua separuh yang saling melengkapi, tapi dua manusia utuh yang memilih untuk berjalan beriringan. Jaga hatimu, sampai aku datang untuk ikut menjaganya.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang sistem pentanahan dan analisis teknik elektro.

Medan, 1 September 2025



Abdur Rahman Hidayat Tarigan

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
SURAT PENYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah	2
1.3 Rumusan Masalah	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	3
1.5 Tujuan Penelitian.....	4
1.6 Manfaat Penelitian.....	4
1.7 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Relevan	6
2.2 Sistem Pentanahan.....	9
2.2.1 Jenis-jenis sistem pentanahan	10
2.2.2 Komponen utama sistem pentanahan.....	12
2.2.3 Kinerja sistem pentanahan	15
2.2 Elektroda Pentanahan	16
2.3.1 Jenis-jenis elektroda pentanahan.....	17
2.3.2 Faktor dalam pemilihan elektroda pentanahan	19
2.4 Analisis Teknis Sistem Pentanahan	22
2.4.1 Parameter penting dalam sistem pentanahan	23
2.5 Analisis Ekonomis Dalam Sistem Pentanahan.....	27
2.5.1 Perhitungan analisis ekonomis sistem pentanahan	27
2.7 Pemanfaatan Matlab Untuk Analisis Sistem Pentanahan.....	29

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	31
3.2 Data dan Parameter Penelitian	32
3.2.1 Data dan Parameter Teknis	32
3.2.2 Data dan Parameter Ekonomis	34
3.3 Prosedur Penelitian	36
3.4 Teknik Analisis Data	37
3.5 Diagram Alir Penelitian	40
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	Error! Bookmark not defined.
4.1 Deskripsi Umum Program Matlab GUI	Error! Bookmark not defined.
4.1.1 Tampilan Antarmuka Pengguna (<i>User Interface</i>)	Error! Bookmark not defined.
4.1.2 Fitur dan Fungsi Utama Aplikasi	Error! Bookmark not defined.
4.1.3 Desain Grafic User Interface untuk Pentanahan Elektroda Batang	Error! Bookmark not defined.
4.1.4 Desain Grafic User Interface untuk Pentanahan Elektroda Pelat	Error! Bookmark not defined.
4.1.5 Desain Grafic User Interface perhitungan LCC untuk estimasi biaya .	Error! Bookmark not defined.
4.2 Analisis Kinerja Teknis Elektroda Batang dan Pelat	Error! Bookmark not defined.
4.2.1 Kinerja Elektroda Batang Terhadap Resistansi Pentananahan .	Error! Bookmark not defined.
4.2.2 Kinerja Elektroda Pelat Terhadap Resistansi Pentanahan	Error! Bookmark not defined.
4.2.3 Analisis Perbandingan Resistansi Tanah	Error! Bookmark not defined.
4.2.4 Evaluasi Hasil Berdasarkan Standar PUIL	Error! Bookmark not defined.
4.3 Analisis Ekonomis Biaya Pengadaan, Pemasangan, dan Perawatan	Error! Bookmark not defined.
4.3.1 Analisis Perbandingan Total Biaya ...	Error! Bookmark not defined.
4.4 Korelasi antara Resistansi dan Biaya	Error! Bookmark not defined.
4.5 Pertimbangan Efisiensi Tekno-Ekonomis	Error! Bookmark not defined.
4.6 Rekomendasi Pemilihan Elektroda Pentanahan Optimal	Error! Bookmark not defined.

BAB 5 PENUTUP	Error! Bookmark not defined.
5.1 Kesimpulan.....	Error! Bookmark not defined.
5.2 Saran	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR PUSTAKA	42
LAMPIRAN	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Elektroda Batang Pentanahan	17
Gambar 2. 2 Elektroda Pelat Pentanahan	18
Gambar 3. 1 Hasil pengukuran nilai resistansi pentanahan Gardu Induk PLN Namorambe.....	32
Gambar 3. 2 Gambar Earth Tester	36
Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian	40
Gambar 4. 1 Susunan komponen pentanahan elektroda batang..	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 2 Susunan komponen pentanahan elektroda pelat.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 3 Tampilan GUI untuk perhitungan LCC	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 4 Hasil perhitungan pentanahan menggunakan elektroda batang menggunakan GUI.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 5 Hasil perhitungan pentanahan menggunakan elektroda pelat menggunakan GUI.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 6 Biaya sistem pentanahan elektroda batang.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 7 Biaya sistem pentanahan elektroda pelat	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tahanan jenis tanah.....	24
Tabel 2. 2 Tahanan jenis tanah menurut IEEE.....	25
Tabel 2. 3 Nilai resistivitas material-material bumi.....	26
Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian.....	31
Tabel 3. 2 Data input parameter elektroda pelat	33
Tabel 3. 3 Estimasi biaya sistem pentanahan elektroda batang	34
Tabel 3. 4 Estimasi biaya sistem pentanahan elektroda pelat	35
Tabel 4. 1 Komponen-komponen untuk pentanahan elektroda pelat.....	Error!
Bookmark not defined.	
Tabel 4. 2 Komponen elektroda pelat yang diubah pada Property Inspector	Error!
Bookmark not defined.	
Tabel 4. 3 Komponen-komponen untuk perhitungan LCC	Error! Bookmark not defined.
defined.	
Tabel 4. 4 Komponen Perhitungan LCC yang diubah pada Property Inspector	
.....	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Surat Pengajuan Izin Pengambilan Data	46
Lampiran 2. Dokumentasi Pengukuran Langsung pada Tower SUTT 150kV GI Namorambe.....	48
Lampiran 3. Lembar Asistensi	49

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara umum sistem proteksi yaitu cara untuk mencegah atau membatasi kerusakan peralatan terhadap gangguan, sehingga kelangsungan penyaluran tenaga listrik dapat dipertahankan, salah satunya adalah menggunakan sistem pentanahan[1]. Sistem pentanahan merupakan salah satu komponen penting dalam sistem kelistrikan untuk memastikan keamanan, stabilitas, dan keandalan operasi jaringan listrik. Elektroda pentanahan merupakan penghantar yang ditanam dalam tanah dan membuat kontak langsung dengan tanah. Adanya kontak langsung tersebut bertujuan untuk melewatkan arus apabila terjadi gangguan sehingga arus tersebut disalurkan ke tanah. Besaran tahanan tanah disekitar elektroda pentanahan tergantung pada tahanan jenis tanah[2]. Elektroda pentanahan yang tidak sesuai dapat menyebabkan resistansi yang tinggi, mengurangi efektivitas proteksi, serta meningkatkan risiko terhadap peralatan dan keselamatan manusia. Tanpa pentanahan yang efektif, arus gangguan dapat menimbulkan bahaya yang signifikan bagi individu dan infrastruktur[3].

Pentanahan merupakan penghubungan titik netral suatu sistem tenaga listrik atau bagian konduktif terbuka dari peralatan dengan tanah. Kontak dengan tanah dilakukan dengan menanam elektroda ke dalam tanah[4]. Elektroda pentanahan tersedia dalam berbagai jenis, seperti batang tembaga, batang galvanis, dan batang berbahan logam campuran. Setiap jenis elektroda memiliki karakteristik teknis dan ekonomis yang berbeda, seperti nilai resistansi tanah, daya tahan terhadap korosi, dan biaya pemasangan. Untuk nilai pentanahan yang ideal harus memenuhi syarat dengan nilai R mendekati nilai 0 atau $\leq 1 \text{ Ohm}$ [5]. Dalam praktiknya, tantangan yang sering dihadapi adalah menentukan elektroda dengan resistansi terendah yang tetap memenuhi aspek teknis sekaligus ekonomis. Oleh karena itu, diperlukan analisis mendalam untuk membandingkan berbagai jenis elektroda pentanahan guna menentukan solusi optimal.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan berbagai jenis elektroda pentanahan berdasarkan resistansi yang dihasilkan serta aspek biaya

pemasangan dan pemeliharaannya. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang bermanfaat bagi praktisi dan industri untuk memilih elektroda pentanahan yang optimal. Seiring perkembangan teknologi, analisis pemilihan elektroda pentanahan dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti MATLAB. MATLAB memungkinkan simulasi untuk mengevaluasi berbagai konfigurasi elektroda dengan mempertimbangkan parameter teknis dan ekonomis. Dengan pendekatan ini, dapat diperoleh rekomendasi pemilihan elektroda pentanahan yang optimal sesuai kebutuhan spesifik.

Penelitian ini berfokus pada perbandingan beberapa jenis elektroda pentanahan berdasarkan resistansi yang dihasilkan dan biaya yang diperlukan untuk instalasi dan pemeliharaannya. Melalui analisis ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem pentanahan yang lebih efisien dan ekonomis.

1.2 Identifikasi Masalah

Adapun identifikasi masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kebutuhan sistem pentanahan yang efektif

Sistem pentanahan yang tidak dirancang dengan tepat dapat menyebabkan resistansi yang tinggi, mengurangi efektivitas proteksi, serta meningkatkan risiko terhadap keselamatan manusia dan peralatan listrik.

2. Beragam jenis elektroda pentanahan

Tersedia berbagai jenis elektroda pentanahan, seperti batang tembaga, batang galvanis, dan batang berbahan logam campuran, yang masing-masing memiliki karakteristik teknis dan ekonomis yang berbeda, sehingga menyulitkan dalam pemilihan jenis yang paling optimal.

3. Tantangan dalam pemilihan elektroda

Menentukan elektroda pentanahan dengan resistansi terendah sekaligus memenuhi aspek teknis dan ekonomis menjadi tantangan utama dalam desain sistem pentanahan.

4. Keterbatasan dalam analisis manual

Analisis manual sering kali tidak memadai untuk mengevaluasi berbagai konfigurasi elektroda secara luas dan mendalam, pemodelan perhitungan Matlab

Graphical User Interface (GUI) yang meliputi berbagai faktor dan variabel sehingga hasilnya akan lebih akurat dan dapat diandalkan untuk pengambilan keputusan, terutama dalam mempertimbangkan parameter teknis dan ekonomis secara bersamaan.

5. Peluang pemanfaatan teknologi

Perangkat lunak seperti MATLAB menawarkan kemampuan untuk melakukan simulasi dan analisis mendalam terhadap berbagai jenis elektroda pentanahan, namun penggunaannya masih memerlukan pendekatan yang sistematis dan terfokus.

6. Kurangnya rekomendasi optimal

Belum adanya rekomendasi spesifik terkait pemilihan elektroda pentanahan berdasarkan analisis teknis dan ekonomis yang mendalam, sehingga dibutuhkan penelitian untuk memberikan panduan yang aplikatif bagi praktisi dan industri.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja secara teknis dari elektroda batang dan elektroda pelat dalam menghasilkan resistansi tanah terendah yang lebih baik dari hasil nilai pengukuran langsung pada pentanahan tiang SUTT 150 kV dan sesuai standar PUIL menggunakan MATLAB *Graphical User Interface* (GUI)?
1. Bagaimana perbandingan nilai secara ekonomis biaya pengadaan, pemasangan, dan perawatan elektroda batang dan elektroda plat untuk menentukan solusi yang optimal dari sisi ekonomis?
2. Apa rekomendasi yang diberikan untuk elektroda pentanahan yang optimal berdasarkan analisis teknis dan ekonomis?

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Agar penelitian tugas akhir ini lebih terarah, maka ditetapkan ruang lingkup penelitian sebagai berikut:

1. Penelitian hanya membahas dua jenis elektroda pentanahan utama, yaitu elektroda batang dan elektroda pelat.

2. Analisis teknis berfokus pada resistansi pentanahan yang dihasilkan oleh masing-masing elektroda pentanahan.
3. Analisis ekonomis mencakup biaya pengadaan material, pemasangan instalasi, dan pemeliharaan pentanahan berkala.
4. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab *Graphical User Interface* (GUI).
5. Lokasi penelitian diadaptasi dari lingkungan Gardu Induk Namorambe tepatnya pada tiang transmisi SUTT 150 kV.

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kinerja secara teknis dari elektroda batang dan elektroda pelat dalam menghasilkan resistansi tanah terendah yang lebih baik dari hasil nilai pengukuran langsung pada pentanahan tiang SUTT 150 kV dan sesuai dengan Standar PUIL menggunakan MATLAB *Graphical User Interface* (GUI).
2. Menganalisis secara ekonomis biaya pengadaan, pemasangan, dan perawatan elektroda batang dan elektroda plat untuk menentukan solusi yang optimal dari sisi ekonomi.
3. Memberikan rekomendasi elektroda pentanahan yang optimal antara kinerja elektroda dengan nilai resistansi terendah dan biaya pentanahan yang paling ekonomis.

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini meliputi:

1. Bagi Penulis
Menambah wawasan mengenai analisis teknis dan ekonomis pada sistem pentanahan menggunakan metode simulasi berbasis MATLAB GUI.
2. Bagi akademisi/Universitas
Penelitian ini dapat menjadi referensi sebagai penelitian lanjutan dalam pengembangan studi tentang sistem pentanahan.
3. Bagi praktisi

Hasil penelitian ini dapat membantu dalam memilih jenis elektroda pentanahan yang efisien dan ekonomis sesuai kebutuhan.

4. Bagi industri

Penelitian ini dapat berkontribusi pada peningkatan keandalan dan efisiensi sistem kelistrikan.

1.7 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah pembahasan dan pemahaman, maka sistematik penulisan tugas akhir ini diuraikan secara singkat sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan

Bab ini menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini mengulas teori-teori yang relevan dengan penelitian, termasuk konsep dasar pentanahan, jenis-jenis elektroda pentanahan, dan perangkat lunak MATLAB.

Bab 3 Metodologi Penelitian

Bab ini membahas metode penelitian yang digunakan, meliputi desain penelitian, pengumpulan data, dan teknik analisis data.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini menyajikan hasil penelitian dan analisis yang dilakukan, termasuk perbandingan teknis dan ekonomis elektroda pentanahan.

Bab 5 Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian yang dilakukan serta saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Tinjauan pustaka atau disebut juga kajian pustaka (literature review) merupakan sebuah aktivitas untuk meninjau atau mengkaji kembali berbagai literatur yang telah dipublikasikan oleh akademisi atau peneliti lain sebelumnya terkait topik yang akan kita teliti. Dalam rangkaian proses penelitian, baik sebelum, ketika atau setelah melakukan penelitian, peneliti biasanya diminta untuk menyusun tinjauan pustaka umumnya sebagai bagian pendahuluan dari usulan penelitian ataupun laporan hasil penelitian. Menyusun sebuah tinjauan pustaka sama halnya dengan mencari berbagai hasil penelitian terdahulu untuk mendapat gambaran tentang topik atau permasalahan yang akan diteliti sekaligus untuk menjawab berbagai tantangan yang muncul ketika memulai sebuah penelitian[6].

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Indra Roza dan kawan-kawan pada tahun 2025 dengan judul “Modeling of Glugur Substation Grounding Systems Using MATLAB *Graphical User Interface*” yang memiliki tujuan utama mengevaluasi sistem pentanahan gardu induk secara komprehensif dengan memodelkan sistem pentanahan di Gardu Induk Glugur menggunakan *Graphical User Interface* (GUI) MATLAB. Metode yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan pemodelan MATLAB GUI. Langkah-langkah pemodelan Sistem pentanahan GI Glugur adalah mengambil data GI dan pentanahan yang tersedia dari GI Glugur yaitu jenis pentanahan grid dengan panjang grid 20 m dan lebar 15 m sehingga luas pentanahan grid adalah $20 \times 15 = 300 \text{ m}^2$ maka data selanjutnya yang dibutuhkan untuk analisis GI ini adalah jenis tanah liat. Dari data yang ada dalam bentuk graphical user interface dengan MATLAB. Dari hasil pemodelan simulasi tahanan pentanahan menggunakan GUI MATLAB, peneliti mendapatkan nilai tahanan tertentu, yaitu jumlah elektroda untuk 100 Ωm adalah 3,55 Ω , untuk tahanan pentanahan dengan kedalaman konstan dan jumlah elektroda 100 yang bervariasi adalah 3,45 Ω , dan untuk tahanan pentanahan dengan jumlah batang 1.000 yang konstan dan bervariasi diperoleh sebesar 2,65 Ω . Dari hasil tersebut,

pemodelan yang dilakukan telah sesuai dengan standar ketentuan ketenagalistrikan di Indonesia[3].

Penelitian selanjutnya oleh Hefri Yuliadi, Surya Hardi dan Rohana pada tahun 2021 yang berjudul “Analisis Perbandingan Tahanan Pentanahan Pada Elektroda Batang Dan Plat Untuk Perbaikan Nilai Resistansi Pembumian”. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan hasil perhitungan yang sesuai standar PUIL dari pemilihan elektroda batang dan plat untuk sistem pentanahan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode perhitungan *Dwight*. Dari penelitian ini, sudah didapatkan hasil pengukuran yang menunjukkan kedalaman elektrode pentanahan adalah sedalam 1.5 m, pada kedalaman ini nilai tahanan pentanahan adalah 0.98Ω Pada Elektroda Batang sedangkan pada elektroda Plat sebesar $1,6 \Omega$. Pada hasil perhitungan tahanan pentanahan dengan mempergunakan Rumus *Dwight*, pada elektroda batang nilai rata-rata sebesar 0.9Ω dan Plat, nilai rata-rata sebesar 0.5Ω . Terdapat perbedaan antara hasil perhitungan dan pengukuran hal ini dikarenakan perbedaan persepsi jenis elektroda yang digunakan. Hasil pengukuran di lapangan, maupun hasil perhitungan menunjukkan nilai resistansinya sudah $< 1 \Omega$ Hal ini sudah sesuai dengan syarat nilai tahanan pentanahan untuk bangunan, bahkan jikalau dipasang perangkat elektronika pun tidak masalah dikarenakan tahanan pentanahannya memiliki nilai $< 1 \Omega$ [7].

Penelitian selanjutnya adalah dari Ayu Fitriani dan kawan-kawan pada tahun 2023 yang berjudul “Pemodelan Sistem Pentanahan Netral Generator Melalui Transformator Distribusi Menggunakan Metode GUI (*Grafical User Interface*)”. Tujuan penelitian ini adalah untuk dapat menentukan besar nilai sistem pentanahan netral generator melalui transformator distribusi. Metode yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah aplikasi berbasis grafis pada *main Interface* Labview-2017 yang merupakan sebuah pengembangan aplikasi perhitungan banyak parameter. Penelitian ini dirancang mengikuti langkah-langkah diantaranya mengidentifikasi dan menyiapkan semua data yang diperlukan, formula, konstanta dan data table yang digunakan. Menguji setiap formula dan opsi yang digunakan dengan data dan standard yang tersedia. Melakukan perbandingan dengan data sebelumnya dan dilakukan analisa. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil dari kedua perhitungan menunjukkan hasil hampir serupa dan memiliki

perbedaan dibawah 1%. Perhitungan melalui aplikasi labview GUI memiliki kesalahan yang sangat kecil. Hal ini membuktikan bahwa aplikasi labview cocok dan akurat digunakan dalam melakukan perhitungan yang rumit tanpa adanya error. Hasil dari perhitungan aktual dan desigh terdapat sedikit perbedaan angka, hal ini disebabkan karna ada pembulatan angka pada aplikasi hingga 6 digit angka. Desain pentanahan netral generator melalui transformator distribusi menggunakan aplikasi lebih mudah, lebih cepat dan lebih akurat dengan menghitung data yang dibutuhkan. Perhitungan menggunakan aplikasi lebih mudah dalam mengeksekusi dan mengubah data meskipun mode eksekusi sedang dijalankan. Aplikasi ini bisa digunakan sebagai instrument penelitian untuk sistem analisis pentanahan neutral peralatan yang lebih luas lagi[8].

Penelitian lainnya berjudul “Analisa Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling Dengan Konstruksi Grid (Kisi-kisi)” yang dilakukan oleh Agus Pranoto pada tahun 2018. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan analisis sistem pentanahan gardu induk teling yang masih memenuhi standar yang menguntungkan. Analisis sistem secara khusus gardu induk Teling menggunakan metode konstruksi grid dengan mempertimbangkan tegangan mesh, tegangan, grid maksimum, GPR, dan resistivitas tanah. Dari hasil penelitian yang diperoleh adalah sistem pentanahan nilai resistansi sistem pentanahan peralatan gardu induk yang memenuhi standar yaitu $0,10\ \Omega$ sampai $0,8\ \Omega$, dibandingkan dengan hasil perhitungan yaitu grid pentanahan tanpa batang pentanahan grid resistansi ($R_g = 0,47\ \Omega$) dan pentanahan grid dengan batang pentanahan ($R_g = 0,18\Omega$). Arus grid maksimum pentanahan gardu induk teling yang mampu mengalirkan tenaga ke tanah hingga 9307,8 A, dengan ukuran grid konduktor $38,72\ mm^2$ [5].

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Nita Nurdiana dan kawan-kawan pada tahun 2018 yang berjudul “Pengaruh Kedalaman Terhadap Tahanan Pentanahan Di Area Rusunawa Kampus Universitas Pgri Palembang”. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya nilai pentanahan yang ada di daerah Rusunawa tersebut. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Metode *three point method* (metode pengukuran 3 titik). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa hasil pengukuran dan perhitungan menunjukkan semakin dalam elektroda

ditanamkan maka akan semakin kecil nilai tahanan jenis tanahnya sehingga nilai tahanan pentanahannya juga semakin kecil[9].

Penelitian selanjutnya berjudul “Perubahan Konfigurasi Elektrode Pentanahan Batang Tunggal Untuk Mereduksi Tahanan Pentanahan” yang dilakukan oleh Wiwik Purwati Widyaningsih dan kawan-kawan. Penelitian ini bertujuan untuk mencegah terjadinya tegangan sentuh, tegangan langkah dan tegangan gerak yang dapat membahayakan manusia dan peralatan akibat isolasi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan memasang elektroda pentanahan secara vertikal pada tanah lempung dan pasir. Hasil yang diperoleh dengan kedalaman satu meter secara horizontal 59,59 Ω pada tanah lempung dan pasir sebesar 28,45 Ω , secara vertikal 28,46 Ω pada tanah lempung dan pasir sebesar 7,26 Ω [2].

2.2 Sistem Pentanahan

Sistem pentanahan adalah salah satu komponen penting dalam sistem kelistrikan yang bertujuan untuk mengalirkan arus gangguan ke tanah dengan aman. Pentanahan digunakan untuk melindungi peralatan listrik, mencegah kerusakan pada sistem, dan melindungi keselamatan manusia dari bahaya sengatan listrik. Resistans pembumian total seluruh sistem tidak boleh lebih dari 5 Ω . Untuk daerah yang resistans jenis tanahnya sangat tinggi, resistans pembumian total seluruh sistem boleh mencapai 10 Ω [10]. Resistansi pentanahan yang baik harus memiliki nilai serendah mungkin untuk meminimalkan tegangan sentuh dan tegangan langkah.

Pentanahan digunakan untuk menghubungkan titik netral atau salah satu bagian dari sistem kelistrikan (misalnya generator atau transformator) ke tanah. Tujuannya adalah untuk menyediakan jalur bagi arus listrik untuk kembali ke sumbernya dalam situasi gangguan, seperti korsleting atau petir [11]. Sistem ini berfungsi untuk memberikan jalur bagi arus gangguan agar dapat mengalir ke tanah dengan resistansi yang serendah mungkin, sehingga menghindari potensi tegangan lebih yang berbahaya bagi peralatan dan manusia.

Pentanahan memiliki beberapa fungsi utama, di antaranya[12]:

1. Keselamatan

Mencegah bahaya bagi manusia akibat sengatan listrik dengan memastikan bahwa arus gangguan dialirkan ke tanah dengan aman.

2. Perlindungan peralatan

Mencegah kerusakan peralatan akibat lonjakan tegangan atau arus gangguan.

3. Stabilitas sistem

Menstabilkan tegangan dalam sistem kelistrikan dengan menyediakan jalur arus balik.

Pada penggunaannya di lapangan, fungsi sistem pertanahan dibedakan menjadi dua yaitu pertanahan titik netral sistem tenaga dan pertanahan peralatan titik netral berfungsi sebagai pengaman sistem atau jaringan, sedangkan pertanahan peralatan berfungsi sebagai pengaman terhadap tegangan sentuh dari sengatan listrik[13]. Tujuan utama dari sistem pentanahan adalah untuk memastikan bahwa sistem kelistrikan tetap aman, andal, dan efisien dalam berbagai kondisi operasi.

Terdapat beberapa teknik dalam sistem pentanahan, yaitu *Solidly grounded* (Langsung ditanahkan), *Resistor grounded* (Melalui resistor).

- a. *Solidly grounded* (Langsung ditanahkan)

Titik netral sistem langsung dihubungkan ke tanah tanpa resistor atau reaktor. Kelebihannya adalah sederhana, murah, dan efektif untuk sistem tegangan rendah. Sementara kekurangannya adalah arus gangguan tinggi, sehingga dapat menyebabkan kerusakan besar.

- b. *Resistor grounded* (Melalui resistor)

Menggunakan resistor antara titik netral dan tanah untuk membatasi arus gangguan. Kelebihan dari sistem ini adalah dapat mengurangi arus gangguan dan tegangan lebih. Sementara kekurangannya yaitu biaya yang lebih tinggi.

2.2.1 Jenis-jenis sistem pentanahan

Sistem pentanahan adalah metode yang digunakan untuk menghubungkan instalasi listrik dengan tanah, Pentanahan dilakukan dengan cara menghubungkan bagian-bagian yang pada kondisi normal tidak dialiri arus listrik (seperti casing peralatan) ke tanah. Hal ini bertujuan untuk membatasi beda tegangan antara bagian

tersebut dengan tanah pada nilai yang aman, baik dalam kondisi operasi normal maupun saat terjadi gangguan. Dengan demikian, jika terjadi arus gangguan, arus tersebut dapat dialirkan ke tanah sehingga mengurangi risiko bahaya bagi manusia dan peralatan[12]. Terdapat beberapa jenis pentanahan sistem yaitu Pentanahan Peralatan (*Equipment Grounding*), Pentanahan Protektif (*Protective Grounding*), Pentanahan Fungsi (*Functional Grounding*), Pentanahan Sirkuit Elektronik (*Signal Grounding*), Pentanahan Sistem Arrester (*Surge Grounding*), Dan Pentanahan Kombinasi[14].

1. Pentanahan peralatan (*Equipment Grounding*)

Menghubungkan bagian logam dari peralatan listrik (yang tidak membawa arus) ke tanah. Tujuannya untuk melindungi manusia dari sengatan listrik akibat kebocoran arus dan menyediakan jalur arus gangguan ke tanah. Dalam aplikasinya, sistem ini menghubungkan casing logam dari motor listrik, panel listrik, atau alat elektronik ke tanah.

2. Pentanahan protektif (*Protective Grounding*)

Digunakan untuk melindungi manusia dan peralatan dari lonjakan tegangan atau arus yang disebabkan oleh gangguan seperti petir atau hubung singkat. Sistem ini dapat dijumpai pada sistem proteksi petir (*lightning protection system*) dan sistem proteksi relai dan pemutus sirkuit.

3. Pentanahan fungsi (*Functional Grounding*)

Bertujuan untuk memastikan berfungsinya sistem secara normal dan stabil. Dalam aplikasinya, sistem pentanahan ini cocok untuk komunikasi atau sistem data (kabel serat optik atau sistem telekomunikasi) guna mengurangi noise atau interferensi elektromagnetik.

4. Pentanahan sirkuit elektronik (*Signal Grounding*)

Digunakan dalam sirkuit elektronik untuk mengurangi noise dan memastikan referensi tegangan yang stabil. Sistem pentanahan ini sering dijumpai pada sistem elektronik sensitif seperti komputer, alat ukur, dan sensor.

5. Sistem pentanahan arrester (*Surge Grounding*)

Digunakan untuk mengalirkan lonjakan tegangan akibat petir atau gangguan lainnya ke tanah melalui alat pelindung seperti arrester. Dalam aplikasinya,

sistem ini melindungi instalasi listrik tegangan menengah dan tinggi dari tegangan lebih sementara.

6. Pentanahan kombinasi

Kombinasi dari pentanahan sistem, peralatan, dan protektif yang sering diterapkan pada instalasi kelistrikan kompleks. Tujuannya untuk menjamin keselamatan dan keandalan sistem secara menyeluruh.

2.2.2 Komponen utama sistem pentanahan

Sistem pentanahan memiliki penghantar yang menghubungkan bagian-bagian sistem listrik, seperti badan atau kerangka peralatan, dengan elektroda pentanahan yang tertanam di tanah. Fungsinya adalah menyalurkan arus gangguan dari peralatan ke tanah melalui elektroda pentanahan. Sambungan antara hantaran penghubung dan elektroda harus kuat secara mekanis, memiliki koneksi listrik yang baik, dan dilindungi dari korosi agar keandalan sistem terjaga[2].

Sistem pentanahan terdiri dari beberapa komponen yang bekerja bersama untuk menyediakan jalur yang aman dan efektif bagi arus gangguan. Komponen-komponen tersebut adalah Elektroda Pentanahan (*Grounding Electrode*), Konduktor Pentanahan (*Grounding Conductor*), Titik Pentanahan Utama (*Main Grounding Terminal/Grounding Busbar*), Sistem Ikatan (*Bounding System*), Konektor dan Klem (*Connectors and Clamps*), Enklosur dan Pelindung (*Enclosures and Shields*)[7].

1. Elektroda pentanahan (*Grounding Electrode*)

Fungsi utamanya adalah menyediakan kontak fisik dengan bumi dan menyalurkan arus gangguan ke tanah. Elektroda pentanahan adalah titik referensi potensial nol untuk sistem listrik. Pemilihan jenis elektroda tergantung pada jenis tanah, resistivitas tanah, area yang tersedia, dan persyaratan standar setempat.

2. Konduktor pentanahan (*Grounding conductor*)

Fungsi utamanya adalah menghubungkan bagian-bagian konduktif dari peralatan atau sistem listrik ke elektroda pentanahan. Konduktor pentanahan menyediakan jalur dengan impedansi rendah bagi arus gangguan.

Jenis-Jenis Konduktor Pentanahan:

- a. Konduktor pentanahan peralatan (*Equipment grounding conductor/EGC*)
Menghubungkan rangka logam peralatan listrik ke sistem pentanahan.
- b. Konduktor ikatan (*Bonding jumper*)
Menghubungkan bagian-bagian konduktif yang berbeda untuk menciptakan ekuipotensialitas.
- c. Konduktor utama pentanahan (*Main grounding conductor*)
Menghubungkan elektroda pentanahan ke titik pentanahan utama di panel listrik atau gardu induk.

Konduktor pentanahan harus terbuat dari material konduktif, memiliki ukuran yang cukup untuk menghantarkan arus gangguan maksimum yang diharapkan, dan dilindungi dari kerusakan mekanis. Ukuran konduktor pentanahan ditentukan oleh standar dan kode listrik.

3. Titik pentanahan utama (*Main grounding terminal/Grounding busbar*)

Titik pentanahan utama merupakan titik pusat di mana semua konduktor pentanahan bertemu dan terhubung ke elektroda pentanahan. Berfungsi untuk menyediakan titik koneksi yang aman dan mudah diakses untuk sistem pentanahan. Biasanya terletak di panel listrik utama, gardu induk, atau dekat dengan peralatan yang membutuhkan pentanahan dan harus memiliki kapasitas yang cukup untuk menampung semua konduktor pentanahan dan terbuat dari material konduktif yang tahan korosi.

4. Sistem ikatan (*Bonding System*)

Fungsi utama dari sistem ikatan adalah menghubungkan semua bagian konduktif yang berbeda (baik yang membawa arus maupun yang tidak) untuk menciptakan ekuipotensialitas dan mengurangi risiko perbedaan tegangan. Beberapa komponen utamanya adalah:

- a. Ikatan peralatan (*Equipment Bonding*)
Menghubungkan rangka logam peralatan listrik ke sistem pentanahan.
- b. Ikatan struktural (*Structural Bonding*)
Menghubungkan bagian-bagian logam dari struktur bangunan ke sistem pentanahan.

c. Ikatan peralatan sensitif (*Sensitive Equipment Bonding*)

Ikatan khusus untuk peralatan elektronik sensitif untuk mengurangi noise dan gangguan elektromagnetik.

Manfaat ikatan ini adalah mengurangi risiko sengatan listrik, meminimalkan gangguan elektromagnetik, dan meningkatkan kinerja sistem proteksi.

5. Konektor dan klem (*Connectors and Clamps*)

Fungsi utama dari konektor dan klem adalah untuk menyediakan koneksi yang aman dan andal antara berbagai komponen sistem pentanahan. Beberapa jenis-jenis konektor adalah:

a. Konektor mekanis

Menggunakan sekrup atau baut untuk mengamankan koneksi.

b. Konektor kompresi

Menggunakan alat khusus untuk menekan konektor ke konduktor, menciptakan koneksi yang kuat dan tahan lama.

c. Konektor eksotermik (*Cadweld*)

Menggunakan reaksi kimia untuk melelehkan dan menggabungkan konduktor, menciptakan koneksi permanen.

Konektor harus terbuat dari material yang kompatibel dengan konduktor yang digunakan, tahan terhadap korosi, dan mampu menahan arus gangguan maksimum yang diharapkan.

6. Enklosur dan pelindung (*Enclosures and shields*)

Fungsi utamanya adalah untuk menyediakan perlindungan mekanis dan lingkungan untuk komponen sistem pentanahan. Enklosur harus terbuat dari material yang tahan korosi dan memenuhi persyaratan standar.

Adapun jenis-jenis enklosur adalah:

a. Kotak sambungan (*Junction boxes*)

Melindungi koneksi antara konduktor pentanahan.

b. Saluran (*Conduits*)

Melindungi konduktor pentanahan dari kerusakan fisik.

c. Pelindung (*Shields*)

Mengurangi gangguan elektromagnetik.

2.2.3 Kinerja sistem pentanahan

Sistem pentanahan melindungi peralatan dari gangguan arus lebih dengan menyediakan jalur impedansi rendah ke tanah yang memungkinkan arus gangguan, seperti arus lebih akibat hubung singkat atau tegangan lebih akibat petir, dapat dialirkan langsung ke bumi. Dengan demikian, arus gangguan tidak mengalir melalui peralatan, sehingga mencegah kerusakan dan menjaga kestabilan sistem listrik. Mekanisme kinerja perlindungan sistem pentanahan adalah sebagai berikut[15]:

1. Pengaliran arus gangguan ke tanah.

Saat terjadi gangguan, misalnya kegagalan isolasi atau sambaran petir, arus lebih yang timbul diarahkan ke tanah melalui sistem pentanahan. Jalur ini harus memiliki tahanan rendah agar arus gangguan dapat mengalir dengan mudah dan cepat ke bumi tanpa menaikkan tegangan pada peralatan.

2. Mencegah tegangan berbahaya.

Dengan mengalirkan arus gangguan ke tanah, sistem pentanahan mencegah terjadinya tegangan sentuh dan tegangan langkah yang berbahaya bagi manusia dan peralatan. Untuk mencegah terjadinya tegangan sentuh dan tegangan langkah dalam beberapa sistem pentanahan, maka dilakukan sistem bonding yang dimana menyatukan setiap sistem pentanahan menjadi satu. Tegangan ini dapat muncul jika arus gangguan tidak dapat dibuang dengan baik, sehingga berpotensi merusak peralatan dan membahayakan keselamatan.

3. Menstabilkan tegangan sistem. Pentanahan netral pada transformator atau generator menghubungkan titik netral ke tanah, sehingga saat terjadi gangguan, tegangan sistem tidak melonjak secara berlebihan. Ini membantu mencegah kerusakan pada peralatan akibat tegangan lebih.

Sistem pentanahan bekerja berdasarkan prinsip aliran arus melalui jalur resistansi terendah. Ketika terjadi gangguan (seperti kebocoran arus atau lonjakan tegangan), sistem pentanahan akan[2]:

- a. Mengalirkan arus gangguan ke tanah, sehingga tegangan tinggi yang berbahaya dapat diminimalkan.
- b. Mengamankan peralatan dan manusia dengan mempertahankan potensi nol pada permukaan logam yang terhubung.

- c. Memastikan bahwa proteksi, seperti relai dan pemutus sirkuit, bekerja dengan baik.

Tujuan utama sistem pentanahan adalah menyediakan jalur dengan impedansi serendah mungkin bagi arus gangguan untuk mengalir kembali ke sumber (transformator atau generator) atau ke bumi[7]. Impedansi yang rendah memastikan bahwa arus gangguan yang besar dapat mengalir dengan mudah, sehingga[2]:

1. Memungkinkan perangkat proteksi (seperti pemutus sirkuit atau sekering) untuk mendeteksi gangguan dan memutuskan aliran listrik dengan cepat.
2. Membatasi tegangan pada bagian-bagian konduktif yang terbuka (misalnya, rangka peralatan) selama terjadi gangguan, sehingga mengurangi risiko sengatan listrik.
3. Mengarahkan arus gangguan ke bumi dengan aman, mencegah penumpukan tegangan berbahaya.

2.2 Elektroda Pentanahan

Elektroda pentanahan merupakan penghantar yang ditanam dalam bumi dan sebagai kontak langsung dengan tanah yang diusahakan hingga mencapai titik air tanah. Instalasi elektroda pentanahan untuk peralatan listrik dan sistem diperlukan untuk memproteksi orang dan peralatan, dan untuk menstabilkan sistem. Peran dari elektroda pentanahan adalah untuk mengalirkan kegagalan arus dan petir secara efektif ke dalam tanah dan dengan ini untuk mengurangi bahaya dari instalasi sistem telekomunikasi dan sistem tenaga listrik. Arus pada elektroda dapat menuju ke bumi tanpa kerusakan padatanah yang ditentukan dari hubungan kompleks antara kepadatan arus di sekitar elektroda, suhu yang diijinkan, waktu, dan karakteristik tanah. Nilai tahanan elektroda pentanahan dipengaruhi oleh kedalaman elektroda, besar penampang elektroda dan jenis tanah. Kinerja elektroda pentanahan sangat dipengaruhi oleh parameter tanah sebagai resistivitas listrik, panas, konduktivitas thermal dan permeabilitas tanah[15]. Dalam penelitian ini akan berfokus pada sistem pentanahan yang menggunakan bahan elektroda plat dan elektroda batang karena bisa menghasilkan suatu sistem pentanahan dengan berbagai bentuk elektroda yang kemudian dirancang menjadi sistem pentanahan internal[7].

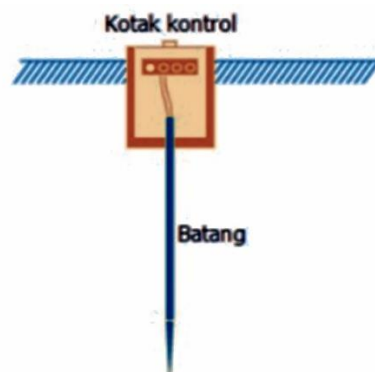
2.3.1 Jenis-jenis elektroda pentanahan

Elektroda pentanahan adalah komponen utama dalam sistem pentanahan.

Adapun jenis elektroda yang umum digunakan adalah:

1. Elektroda batang

Elektroda batang adalah salah satu jenis elektroda pentanahan yang paling umum digunakan dalam sistem pentanahan listrik. Elektroda ini biasanya berbentuk batang logam yang ditanam secara vertikal ke dalam tanah untuk menyediakan jalur pelepasan arus gangguan, seperti petir atau arus bocor ke bumi dengan resistansi serendah mungkin[16]. Elektroda batang biasanya terbuat dari pipa besi baja profil atau batangan logam lainnya yang dipancangkan ke dalam tanah secara dalam[17].



Gambar 2. 1 Elektroda Batang Pentanahan

Resistansi (R) elektroda batang tunggal dalam tanah dihitung dengan rumus yang dikembangkan oleh Professor H.B. Dwight dari Institut Teknologi Massachusetts[7]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \left(\frac{4l}{a} \right) - 1 \right] \dots\dots\dots(2.1)$$

Di mana:

R : Resistansi elektroda batang pentanahan (Ω)

ρ : Resistivitas tanah ($\Omega \cdot m$)

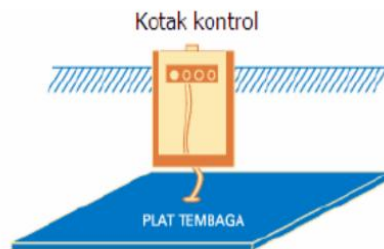
l : Panjang elektroda (m)

a : Jari-jari elektroda (m)

2. Elektroda pelat

Elektroda pelat adalah salah satu jenis elektroda pentanahan yang digunakan untuk menurunkan resistansi pentanahan dengan cara memperbesar luas kontak

antara elektroda dan tanah. Bentuk elektroda pelat biasanya empat persegi atau empat persegi panjang yang terbuat dari tembaga, timah atau pelat baja yang ditanam didalam tanah pada kedalaman tertentu. Cara penanaman biasanya secara vertical, sebab dengan menanam secara horizontal hasilnya tidak berbeda jauh dengan vertical. Penanaman secara vertical adalah lebih praktis dan ekonomis[18].



Gambar 2. 2 Elektroda Pelat Pentanahan

Resistansi (R) elektroda pelat dapat dihitung dengan rumus berikut[7]:

$$R = \frac{\rho}{4,2} \left(\frac{1}{WL} + \frac{0,16}{S} \right) \dots\dots\dots(2.2)$$

Di mana:

R : Resistansi elektroda pelat pentanahan (Ω)

W : Lebar pelat (m)

L : Panjang pelat (m)

S : Kedalaman plat tertanam dari permukaan tanah (m)

3. Jaringan kawat

Jaringan kawat biasanya digunakan untuk pentanahan luas, seperti di pembangkit listrik atau gardu induk.

4. Elektroda pita (*ground strips/grounding conductor*)

Pita logam (biasanya terbuat dari tembaga atau baja galvanis) yang ditanam di dalam tanah, seringkali di sekeliling bangunan.

5. Grid pentanahan (*grounding grids*)

Jaringan konduktor yang saling terhubung yang ditanam di dalam tanah. Digunakan untuk area yang luas, seperti gardu induk atau pembangkit listrik.

6. Elektroda beton (*concrete-encased electrodes/ufcr grounds*)

Konduktor yang ditanam di dalam fondasi beton bangunan. Beton meningkatkan kontak dengan bumi dan mengurangi resistansi.

7. Pipa logam bawah tanah (*underground metallic water pipes*)

Dalam beberapa kasus, pipa air logam bawah tanah dapat digunakan sebagai elektroda pentanahan (dengan izin dari perusahaan air). Namun, ini semakin jarang karena penggunaan pipa PVC.

2.3.2 Faktor dalam pemilihan elektroda pentanahan

Faktor dalam pemilihan elektroda pentanahan adalah proses evaluasi dan pertimbangan berbagai faktor teknis dan ekonomis untuk menentukan jenis, ukuran, jumlah, dan konfigurasi elektroda pentanahan yang paling tepat dan efektif untuk suatu sistem pentanahan. Tujuan utama dari pemilihan ini adalah untuk memastikan bahwa sistem pentanahan yang dipilih dapat memberikan resistansi pentanahan yang rendah dan memenuhi persyaratan keselamatan serta standar yang berlaku. Adapun faktor-faktor dalam pemilihan elektroda pentanahan adalah[18]:

1. Kedalaman elektroda

Kedalaman elektroda merupakan salah satu faktor utama dalam menentukan efektivitas sistem pentanahan. Semakin dalam elektroda ditanam, semakin besar kemungkinan elektroda mencapai lapisan tanah dengan resistivitas lebih rendah, sehingga meningkatkan efisiensi pelepasan arus gangguan ke bumi. Kedalaman elektroda juga berpengaruh terhadap distribusi potensial di sekitar elektroda serta kemampuan dalam menangani arus gangguan. Berdasarkan standar IEEE, elektroda dengan kedalaman yang lebih besar cenderung lebih stabil dalam berbagai kondisi lingkungan dibandingkan elektroda yang lebih dangkal[19]. Hal tersebut disebabkan oleh beberapa faktor:

a. Lapisan tanah yang lebih stabil

Pada kedalaman tertentu, tanah cenderung memiliki kandungan air dan komposisi yang lebih stabil sepanjang tahun. Perubahan kelembaban tanah dapat sangat mempengaruhi resistivitasnya. Kedalaman yang lebih dalam mengurangi dampak variasi musiman ini.

b. Area kontak yang lebih besar

Elektroda yang lebih panjang memiliki area kontak yang lebih besar dengan tanah, memungkinkan penyebaran arus yang lebih baik dan mengurangi resistansi.

c. Pengurangan pengaruh resistivitas permukaan

Lapisan permukaan tanah sering kali memiliki resistivitas yang lebih tinggi karena lebih kering dan kurang padat. Dengan menanam elektroda lebih dalam, Anda melewati lapisan ini dan mencapai tanah dengan resistivitas yang lebih rendah.

2. Diameter elektroda

Diameter elektroda merupakan salah satu faktor penting dalam sistem pentanahan. Diameter elektroda, terutama untuk elektroda batang (rod), adalah faktor penting yang memengaruhi kinerja sistem pentanahan. Pemilihan diameter elektroda yang tepat akan memastikan bahwa sistem pentanahan berfungsi dengan baik dan mampu melindungi peralatan listrik serta manusia dari bahaya tegangan sentuh. Sama seperti kedalaman, diameter elektroda juga berperan dalam menentukan resistansi tanah sistem pentanahan. Resistansi tanah yang rendah sangat penting untuk menyalurkan arus gangguan ke bumi dengan aman dan efektif. Secara umum, semakin besar diameter elektroda, semakin rendah resistansi tanah yang dicapai. Elektroda dengan diameter yang lebih besar memiliki area kontak yang lebih besar dengan tanah di sekitarnya. Ini memungkinkan arus listrik untuk lebih mudah menyebar dari elektroda ke tanah, mengurangi resistansi di antarmuka elektroda-tanah. Diameter yang lebih besar mengurangi kerapatan arus (arus per unit area) di permukaan elektroda. Kerapatan arus yang tinggi dapat menyebabkan polarisasi tanah, yang meningkatkan resistansi. Dengan memperluas area kontak, kerapatan arus berkurang, dan resistansi total berkurang.

3. Luas penampang elektroda

Luas penampang elektroda berkaitan langsung dengan kapasitas elektroda dalam menghantarkan arus dan menentukan seberapa baik elektroda dapat mempertahankan kontak dengan tanah. Elektroda dengan luas penampang yang lebih besar cenderung memiliki resistansi pentanahan yang lebih rendah karena arus dapat menyebar dengan lebih efektif ke dalam tanah.

Dalam penelitian ini, luas penampang elektroda dianalisis menggunakan Matlab GUI untuk mengevaluasi seberapa signifikan perubahan luas penampang terhadap pengurangan resistansi pentanahan. Simulasi ini juga membantu dalam

menentukan batas optimal luas penampang dengan mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomis.

4. Jarak antar elektroda

Ketika lebih dari satu elektroda digunakan dalam sistem pentanahan, jarak antar elektroda memainkan peran penting dalam menentukan efisiensi sistem. Jika elektroda ditempatkan terlalu dekat, ada kemungkinan efek interferensi medan listrik yang dapat meningkatkan resistansi efektif sistem. Sebaliknya, jika elektroda ditempatkan terlalu jauh, efektivitas konektivitas antar elektroda dapat berkurang. Dalam penelitian ini, Matlab GUI digunakan untuk menganalisis pengaruh variasi jarak antar elektroda terhadap resistansi total sistem pentanahan. Melalui simulasi ini, dapat ditentukan konfigurasi optimal yang memberikan resistansi terendah tanpa menimbulkan biaya pemasangan yang berlebihan.

5. Tahanan jenis tanah

Tahanan jenis tanah merupakan salah satu parameter utama dalam desain sistem grounding. Nilai tahanan tanah yang ideal umumnya berada di bawah 5 ohm sesuai dengan standar IEEE dan IEC, tergantung pada aplikasi sistem.

Dalam penelitian ini, analisis dilakukan untuk mengevaluasi bagaimana kombinasi berbagai faktor seperti jenis elektroda, jumlah elektroda, dan tata letaknya dapat mempengaruhi nilai tahanan pentanahan. Simulasi dalam Matlab GUI akan membantu dalam menentukan konfigurasi terbaik untuk mencapai tahanan pentanahan yang optimal.

6. Jumlah elektroda

Jumlah elektroda dalam suatu sistem pentanahan mempengaruhi distribusi arus gangguan dan nilai tahanan total sistem. Semakin banyak elektroda yang digunakan, semakin rendah nilai tahanan pentanahan yang dapat dicapai. Namun, penambahan jumlah elektroda juga berarti peningkatan biaya material dan instalasi. Dalam penelitian ini, variasi jumlah elektroda dianalisis menggunakan Matlab GUI untuk menentukan titik optimal di mana penambahan elektroda memberikan manfaat maksimal terhadap penurunan resistansi tanpa meningkatkan biaya secara berlebihan.

7. Daya hantar arus

Material elektroda harus mampu menghantarkan arus gangguan tanpa mengalami kerusakan. Daya hantar arus dari elektroda pentanahan ditentukan oleh material elektroda, luas penampang, dan resistivitas tanah. Elektroda dengan daya hantar arus yang baik mampu menangani lonjakan arus akibat gangguan petir atau hubung singkat tanpa mengalami degradasi signifikan.

Dalam penelitian ini, daya hantar arus dihitung berdasarkan berbagai konfigurasi elektroda dengan menggunakan Matlab GUI. Hasil analisis ini akan membantu dalam menentukan elektroda yang tidak hanya memiliki resistansi terendah, tetapi juga mampu menghantarkan arus gangguan dengan aman dan efisien.

Melalui analisis teknis ini, penelitian bertujuan untuk menemukan konfigurasi elektroda pentanahan yang optimal dengan mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomis sehingga dapat diterapkan secara efektif dalam berbagai sistem kelistrikan.

8. Daya tahan terhadap korosi

Daya tahan terhadap korosi merupakan faktor penting dalam pemilihan elektroda pentanahan karena elektroda yang mengalami korosi akan mengalami peningkatan resistansi dan penurunan efektivitas sistem grounding. Korosi dapat terjadi akibat reaksi elektroda dengan unsur-unsur dalam tanah seperti kelembaban, kadar garam, dan bahan kimia lainnya.

2.4 Analisis Teknis Sistem Pentanahan

Analisis teknis sistem pentanahan adalah proses komprehensif yang melibatkan evaluasi, perhitungan, dan simulasi untuk memastikan bahwa sistem pentanahan (*grounding system*) memenuhi persyaratan keselamatan dan kinerja yang ditetapkan. Tujuannya adalah untuk merancang dan memelihara sistem pentanahan yang efektif dalam mengalirkan arus gangguan (*fault current*) ke tanah dengan cepat dan aman, sehingga melindungi personel, peralatan, dan meminimalkan risiko kebakaran[2].

Dalam resistansi jenis tanah, atau lebih dikenal sebagai resistivitas tanah (ρ), dinyatakan dalam satuan ohm-meter ($\Omega.m$). Nilai ini menunjukkan hambatan listrik yang dihadapi oleh arus listrik saat mengalir melalui tanah. Resistivitas tanah

dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kandungan air, mineral, suhu, dan kepadatan tanah.

Resistivitas tanah merupakan parameter penting dalam perancangan sistem pentanahan. Semakin tinggi resistivitas tanah, semakin besar hambatan yang diberikan terhadap aliran listrik, sehingga membuat sistem pentanahan menjadi kurang efektif[15]. Oleh karena itu, pemilihan elektroda pentanahan harus mempertimbangkan kondisi resistansi tanah untuk mencapai performa optimal.

2.4.1 Parameter penting dalam sistem pentanahan

Parameter dalam sistem pentanahan adalah karakteristik atau nilai terukur yang digunakan untuk mengevaluasi dan mendesain sistem pentanahan yang aman dan efektif. Parameter ini membantu memastikan bahwa sistem pentanahan dapat berfungsi dengan baik dalam melindungi peralatan dan manusia dari bahaya listrik, seperti sengatan listrik atau kerusakan akibat arus gangguan.

Parameter utamanya yaitu[20]:

1. Resistansi Pentanahan (*Grounding Resistance*)

Resistansi pentanahan (*Grounding resistance*), atau sering disebut juga resistansi tana adalah ukuran seberapa besar hambatan yang diberikan oleh sistem pentanahan terhadap aliran arus listrik ke tanah. Resistansi total dari elektroda dan jalur pentanahan harus rendah agar arus gangguan dapat mengalir dengan efektif[21]. Nilai resistansi pentanahan ideal yaitu ≤ 5 ohm untuk instalasi listrik umum dan ≤ 1 ohm untuk sistem proteksi petir[10].

Parameter dalam resistansi pentanahan meliputi[20]:

1. Jenis Elektroda
2. Dimensi Elektroda
3. Konfigurasi Elektroda (tunggal, multiple, grid)
4. Resistivitas tanah ($\Omega.m$)
5. Kedalaman pemasangan elektroda
6. Kelembaban dan komposisi tanah
7. Penggunaan bahan peningkat konduktivitas (*ground enhancement material*, seperti bentonit atau garam)

Resistansi tanah adalah salah satu parameter utama dalam kinerja sistem pentanahan. Resistansi ini dipengaruhi oleh jenis elektroda, konfigurasi elektroda, dan resistivitas tanah. Elektroda dengan resistansi rendah memberikan jalur yang lebih efektif untuk pelepasan arus gangguan ke tanah. Resistansi elektroda harus memenuhi standar PUIL untuk memastikan efisiensi dan keselamatan. Banyak hal yang mempengaruhi nilai tahanan pentanahan. Tahanan jenis tanah, batang pentanahan serta tahanan kontak antara batang pentanahan dengan tanah mempengaruhi nilai pentanahan. Semakin kecil nilai tahanan pembumian maka semakin baik sistem pembumiannya. Pada kondisi tanah tertentu, nilai tahanan pembumian juga dipengaruhi oleh kedalaman penanaman elektroda. Nilai resistivitas tanah dapat bervariasi dari satu tempat ke tempat lain, tergantung pada sifat-sifatnya. Sistem pentanahan jenis batang (rod), semakin dalam batang pentanahan ditanam kedalam tanah semakin kecil nilai tahanan tanahnya. Sehingga semakin kecil nilai tahanan pentanahan, maka pentanahan tersebut semakin baik[9]. Adapun beberapa tahanan jenis tanah menurut PUIL dapat dilihat pada Tabel 2.1 [22].

Tabel 2. 1 Tahanan jenis tanah

No	Jenis tanah	Tahanan jenis tanah (ohm.meter)
1	Tanah yang mengandung air garam	5-6
2	Rawa	30
3	Tanah liat	100
4	Pasir basah	200
5	Batu-batu kerikil basah	500
6	Batu-batu kerikil basah	1000
7	Batu	3000

Tabel 2.1 menunjukkan bahwa tahanan jenis tanah sangat dipengaruhi oleh nilai kadar air yang terkandung di dalam setiap jenis tanah. Nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada PUIL.

Untuk tahanan jenis tanah yang dikeluarkan oleh IEEE dapat dilihat dari Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Tahanan jenis tanah menurut IEEE

Resistivitas (ohmmeter)	Keterangan	Kuarter	Kapur Tersier	Karbon Trias	Kambrium Ordovisium Devon	Pra-Kambium dan Kombinasi dengan Kambrium
1	Air Laut					
10	Luar biasa rendah	Lempung				
30	Sangat rendah	Tanah liat	Kapur			
100	Rendah			Kapur		
300	Sedang		Trap/ Diabas/ Serpilh		Serpilh	
1000	Tinggi			Batu Gamping	Batu Gamping	
3000	Sangat tinggi	Pasir kasar dan Kerikil pada lapisan permukaan		Batu pasir	Batu pasir	Batu pasir
10000	Luar biasa tinggi				Dolomit	Kuarsit/ Batu Sabak/ Granit/Gneis

Dari pernyataan Tabel 2.2 menurut IEEE menunjukkan bahwa nilai resistivitas tanah untuk jenis tanah lempung adalah sekitar 10-30 ohmmeter. Maka nilai tersebut bisa menjadi acuan untuk kondisi tanah pada area sistem pentanahan tower transmisi 150 kV GI Namorambe yang dimana nilai resistivitas tanahnya adalah 20 ohmmeter.

2. Resistivitas tanah (*Soil Resistivity*)

Resistivitas tanah memengaruhi kinerja sistem pentanahan. Tanah dengan resistivitas rendah, seperti tanah lempung basah, lebih ideal dibandingkan tanah berbatu.

Parameter dalam resistivitas pentanahan yaitu[13]:

1. Komposisi tanah (pasir, lempung, batuan)
2. Kelembaban tanah
3. Temperatur tanah

4. Kedalaman pengukuran resistivitas

Nilai resistivitas material-material bumi dapat dilihat pada Tabel 2.2 [23].

Tabel 2. 3 Nilai resistivitas material-material bumi

Material	Resistivity (Ohm-meter)
Air (Udara)	0
Pyrite (Pirit)	0,01 – 100
Quartz (Kwarsa)	500 – 800.000
Calcite (Kalsit)	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Rock Salt (Garam Batu)	$30 - 1 \times 10^{13}$
Granite (Granit)	200 – 100.000
Andesite (Andesit)	$1,7 \times 10^2 - 45 \times 10^4$
Basalt (Basal)	200- 100.000
Limestones (Gamping)	500 – 10.000
Sandstones (Batu Pasir)	200 – 8.000
Shales (Batu Tulis)	20 – 2.000
Sand (Pasir)	1 – 1.000
Clay (Lempung)	1 – 100
Ground Water (Air Tanah)	0.5 – 300
Sea Water (Air Asin)	0.2
Magnetite (Magnetit)	0.01 – 1.000
Dry Gravel (Kerikil Kering)	600 – 10.000
Alluvium (Aluvium)	10 – 800
Gravel (Kerikil)	100 – 600

Tabel 2.3 menunjukkan nilai resistivitas (tahanan jenis listrik) dari berbagai material alami yang ada di bumi. Resistivitas ini merupakan ukuran seberapa kuat suatu material menahan aliran arus listrik, dan diukur dalam satuan Ohm-meter ($\Omega.m$).

Dalam upaya perbaikan nilai tahanan pentanahan ada suatu metode yaitu dengan penimbunan zat kimia di dalam tanah. Zat kimia yang digunakan harus memiliki beberapa persyaratan antara lain mampu menjaga nilai tahanan pentanahan yang rendah dalam jangka waktu yang panjang, tidak larut atau hancur dalam waktu yang lama, dan memiliki harga yang ekonomis. Zat kimia yang sudah banyak digunakan antara lain seperti garam, serbuk arang, zeolit, gypsum, dan bentonit[1].

3. Ukuran dan material elektroda

Material elektroda (misalnya tembaga atau baja galvanis) dipilih berdasarkan daya hantar listrik dan ketahanan terhadap korosi.

Parameter pada ukuran elektroda meliputi[18]:

1. Panjang elektroda (meter)
2. Diameter elektroda (mm atau inci)
3. Bentuk elektroda (batang, pelat, pita, grid)

Parameter pada material elektroda meliputi[24]:

1. Tembaga (*Copper Rod, Copper-Bonded Steel*)
2. Baja galvanis (*Galvanized Steel Rod*)
3. Stainless Steel
4. Aluminium (jarang digunakan untuk pentanahan permanen karena korosi)
5. Baja berlapis tembaga (*Copper-Clad Steel*)
6. Grafit (untuk kondisi tertentu)

2.5 Analisis Ekonomis Dalam Sistem Pentanahan

Analisis ekonomis sistem pentanahan adalah proses evaluasi biaya dan manfaat dari berbagai pilihan sistem pentanahan untuk menentukan solusi yang paling hemat biaya dan memenuhi persyaratan teknis dan keselamatan. Analisis ini mempertimbangkan semua biaya yang terkait dengan instalasi, pemeliharaan, dan potensi kerugian akibat kegagalan sistem pentanahan[25]. Tujuannya adalah untuk memilih sistem yang memberikan nilai terbaik dalam jangka panjang.

Analisis ekonomi dalam pemilihan elektroda pentanahan sangat penting untuk menentukan solusi yang tidak hanya efektif secara teknis tetapi juga efisien dalam hal biaya. Beberapa faktor utama yang mempengaruhi aspek ekonomi dalam pemilihan elektroda meliputi biaya pengadaan material, biaya pemasangan instalasi, biaya pemeliharaan, dan umur pakai elektroda. Dalam penelitian ini akan menggunakan standar yang dikeluarkan oleh pabrik Sinarmas Land dalam memperoleh harga setiap biaya instalasi pentanahan.

2.5.1 Perhitungan analisis ekonomis sistem pentanahan

Perhitungan analisis ekonomis sistem pentanahan adalah proses sistematis untuk mengevaluasi kelayakan finansial dari investasi dalam sistem pentanahan (*grounding system*). Proses ini melibatkan identifikasi, pengukuran, dan perbandingan biaya dan manfaat yang terkait dengan sistem pentanahan selama

umur pakainya. Tujuannya adalah untuk menentukan apakah investasi dalam sistem pentanahan tersebut masuk akal secara ekonomi dan memberikan nilai yang optimal.

Life Cycle Cost (LCC) adalah metode ekonomi untuk menghitung total biaya proyek atau sistem, termasuk biaya instalasi, operasi, pemeliharaan, dan penggantian komponen. LCC mencakup biaya investasi awal, operasi, pemeliharaan, penggantian peralatan, keamanan, asuransi, dan nilai jual kembali. Jadi, biaya siklus hidup merujuk pada semua biaya terkait produk, struktur, sistem, atau jasa selama masa hidupnya. Untuk melakukan analisis ekonomis dapat dilihat pada Persamaan 2.3[25].

$$LCC = IC + SV + NFOMC \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

LCC : nilai biaya keseluruhan sistem (Rupiah)

IC : nilai biaya awal sistem (Rupiah)

SV : biaya pemasangan sistem (Rupiah)

NFOMC : biaya perawatan sistem (Rupiah)

1. Biaya

Dalam perhitungan biaya keseluruhan terdapat beberapa aspek yang termasuk di dalamnya, yaitu[26]:

a. Biaya pengadaan material

Biaya material merupakan faktor utama dalam pemilihan elektroda pentanahan. Material elektroda yang umum digunakan adalah tembaga, baja galvanis, dan baja berlapis tembaga. Setiap material memiliki harga yang berbeda berdasarkan ketersediaan, konduktivitas, dan ketahanannya terhadap korosi. Elektroda tembaga murni biasanya lebih mahal dibandingkan elektroda baja galvanis, tetapi memiliki daya tahan lebih tinggi. Pemilihan material harus mempertimbangkan keseimbangan antara biaya awal dan keandalan jangka panjang. Biaya pengadaan material sistem pentanahan mencakup semua pengeluaran yang diperlukan untuk memperoleh material dan komponen yang dibutuhkan untuk membangun atau meningkatkan sistem pentanahan.

b. Biaya pemasangan instalasi

Biaya pemasangan instalasi sistem pentanahan mencakup semua pengeluaran yang terkait dengan proses fisik pemasangan sistem pentanahan setelah material dan komponen telah diperoleh. Biaya instalasi meliputi tenaga kerja, peralatan, dan metode pemasangan elektroda. Elektroda yang lebih panjang atau lebih tebal mungkin memerlukan alat khusus untuk pemasangannya, yang dapat meningkatkan biaya. Selain itu, kondisi tanah juga mempengaruhi biaya instalasi. Tanah dengan resistivitas tinggi mungkin memerlukan teknik khusus seperti penggunaan bahan peningkat konduktivitas (*grounding enhancement materials*), yang menambah biaya. Untuk biaya instalasi diasumsikan sebesar 5% dari total biaya jasa pada tahap awal pembangunan[26].

c. Biaya pemeliharaan

Biaya pemeliharaan sistem pentanahan mencakup semua pengeluaran yang terkait dengan menjaga sistem pentanahan tetap berfungsi optimal dan aman selama masa pakainya. Pemeliharaan elektroda penting untuk memastikan sistem pentanahan tetap berfungsi dengan baik dalam jangka panjang. Biaya pemeliharaan mencakup inspeksi berkala, pembersihan elektroda dari oksidasi atau korosi, serta penggantian material pendukung jika diperlukan. Elektroda dengan daya tahan tinggi, seperti tembaga, cenderung memiliki biaya pemeliharaan yang lebih rendah dibandingkan dengan elektroda baja galvanis, yang lebih rentan terhadap korosi[27].

2.7 Pemanfaatan Matlab Untuk Analisis Sistem Pentanahan

Matlab adalah perangkat lunak yang sering digunakan untuk analisis teknis, termasuk simulasi sistem pentanahan. Keunggulan Matlab meliputi[28]:

1. Simulasi Resistansi Tanah

Menghitung resistansi elektroda berdasarkan berbagai parameter seperti resistivitas tanah dan konfigurasi elektroda.

2. Analisis Visual

Menyediakan grafik dan visualisasi untuk membandingkan kinerja dan biaya elektroda.

3. Otomasi Analisis

Matlab GUI memungkinkan pengguna untuk dengan mudah mengubah parameter dan melihat hasil secara *real-time*. Dengan menggunakan MATLAB, analisis teknis dan ekonomis elektroda pentanahan dapat dilakukan secara efisien, menghasilkan rekomendasi yang optimal untuk kebutuhan spesifik.

Untuk melakukan analisis pentanahan menggunakan *Matrix Laboratory Graphical User Interface* (Matlab GUI), maka digunakan langkah-langkah berikut:

1. Pengumpulan Data

- a. Jenis tanah dan resistivitasnya
- b. Konfigurasi elektroda pentanahan (jumlah, kedalaman, jarak)
- c. Arus gangguan yang diharapkan

2. Pembuatan Model GUI

- a. Membuka a MATLAB dan buat GUI baru dengan GUIDE.
- b. Menambahkan komponen GUI yang diperlukan seperti edit text untuk input data, push button untuk memulai perhitungan, dan axes untuk menampilkan hasil.

3. Pemrograman Logika

- a. Membuat fungsi callback untuk setiap komponen GUI yang berinteraksi.
- b. Pada callback tombol hitung, lalu memasukkan logika perhitungan pentanahan. Setelah itu memasukkan metode Persamaan 2.1 atau metode Persamaan 2.2 untuk menghitung resistansi pentanahan serta Persamaan 2.3 untuk menghitung biaya ekonomis keseluruhan instalasi pentanahan.
- c. Menampilkan hasil perhitungan pada komponen GUI yang sesuai (misalnya edit text atau grafik pada axes).

4. Simulasi dan Analisis

- a. Menjalankan GUI dan masukkan data yang diperlukan.
- b. Menekan tombol hitung untuk menjalankan perhitungan.
- c. MATLAB akan menghitung resistansi dan menampilkan hasilnya.
- d. Memvariasikan parameter input untuk melihat bagaimana perubahan tersebut mempengaruhi resistansi pentanahan.

5. Visualisasi Hasil

Hasil resistansi dapat dilihat dan divisualisasikan dalam bentuk grafik atau plot.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Gardu Induk Namorambe tepatnya pada sistem pentanahan tiang transmisi SUTT 150 kV untuk mendapatkan hasil pengukuran yang bisa dijadikan acuan hasil penelitian. Pemilihan lokasi tersebut didasarkan pada fasilitas yang mendukung. Adapun waktu pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan Maret hingga Agustus, yang mencakup tahapan penyusunan proposal penelitian, pengurusan izin penelitian, pengumpulan data, analisis data, serta penyusunan laporan akhir.

1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Gardu Induk Namorambe dan melakukan simulasi pemodelan menggunakan perangkat lunak Matlab *Graphical User Interface*.

2. Waktu Penelitian

Waktu pelaksanaan penelitian dimulai dari bulan Maret hingga Agustus tahun 2025.

Adapun jadwal penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian

Tahap Penelitian	Bulan ke-1	Bulan ke-2	Bulan ke-3	Bulan ke-4	Bulan ke-5	Bulan ke- 6
Penyusunan Proposal	✓	✓	✓			
Pengurusan Izin Penelitian			✓			
Pengumpulan Data			✓			
Pengolahan dan Analisis Data				✓	✓	
Penyusunan Laporan Akhir Penelitian						✓

Tabel 3.1 menunjukkan jadwal penelitian yang merinci rencana kegiatan selama enam bulan. Penyusunan Proposa dilakukan selama tiga bulan pertama (Bulan ke-1, ke-2, dan ke-3). Pengurusan Izin Penelitian dilakukan pada Bulan ke-3. Pengumpulan Data dilakukan pada Bulan ke-3. Pengolahan dan Analisis Data dilakukan selama dua bulan (Bulan ke-4 dan ke-5). Penyusunan Laporan Akhir dilakukan pada bulan terakhir (Bulan ke-6).

3.2 Data dan Parameter Penelitian

Pada penelitian ini, data yang digunakan terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu data teknis dan data ekonomis. Data-data ini dikumpulkan dari berbagai sumber, termasuk jurnal ilmiah, buku referensi, serta spesifikasi produk dari produsen elektroda pentanahan. Data yang diperoleh akan digunakan sebagai acuan dalam hasil analisis perbandingan pemilihan elektroda pentanahan dengan resistansi terendah menggunakan *MATLAB Graphical User Interface (GUI)*.

3.2.1 Data dan Parameter Teknis

Pengukuran menggunakan Earth Tester pada pentanahan tiang transmisi SUTT 150 kV Gardu Induk PLN Namorambe bertujuan untuk mendapatkan nilai resistansi pentanahan yang nantinya akan berguna sebagai acuan tambahan dalam hasil menggunakan Matlab GUI. Hasil dari pengukuran sistem pentanahan pada tiang transmisi SUTT 150 kV Gardu Induk PLN Namorambe menggunakan Earth Tester analog mendapatkan nilai resistansi pentanahan sebesar $1,46 \Omega$ yang dimana ini sesuai standar PUIL[16] dan nilai resistivitas tanah di daerah tersebut adalah $20 \Omega.m$ karena memiliki jenis tanah liat lempung pada area pentanahan tersebut sesuai IEEE Std 81-1983[29].



Gambar 3. 1 Hasil pengukuran nilai resistansi pentanahan Gardu Induk PLN Namorambe

Gambar 3.1 menunjukkan bahwa jenis alat ukur yang digunakan untuk mendapatkan nilai resistansi pentanahan pada sistem pentanahan tower transmisi SUTT 150 kV GI Namorambe adalah Earth Tester model analog dengan merek Kyoritsu.

Selanjutnya, data teknis yang digunakan dalam penelitian menggunakan Matlab GUI ini menggunakan data asumsi yang mencakup parameter-parameter teknis yang mempengaruhi resistansi pentanahan, antara lain:

1. Jenis elektroda pentanahan (elektroda batang dan elektroda pelat)
2. Material elektroda (tembaga, baja galvanis, atau campuran)
3. Jari-jari elektroda dan panjang elektroda untuk elektroda batang (meter)
4. Panjang elektroda dan lebar elektroda untuk jenis pelat (meter)
5. Resistivitas tanah (ohm.meter)
6. Kedalaman pemasangan elektroda untuk elektroda pelat (meter)

Untuk mencapai nilai resistansi yang tidak jauh dari nilai 1, 46 Ω , maka akan digunakan konfigurasi data input seperti Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 berikut:

Tabel 3. 1 Data input parameter eletroda batang

PARAMETER	ELEKTRODA BATANG
Resistivitas Tanah (ρ)	20 Ω .m
Panjang Elektroda (l)	15 m
Jari-jari Elektroda (a)	0.008 m

Tabel 3.1 menunjukkan bahwa parameter input yang digunakan untuk analisis sistem pentanahan jenis elektroda batang memiliki nilai resistivitas tanah 20 Ω . m dengan asumsi panjang elektroda batang sebesar 15 m dan jari-jari elektroda batang sebesar 0,008 m. Diameter untuk elektroda batang sistem pentanahan adalah 16 mm[30].

Tabel 3. 2 Data input parameter elektroda pelat

PARAMETER	ELEKTRODA PELAT
Resistivitas Tanah (ρ)	20 Ω .m
Lebar Pelat (W)	2 m
Panjang Pelat (L)	2 m
Kedalaman Tanam (S)	3.5 m

Tabel 3.2 menunjukkan bahwa parameter input yang digunakan untuk analisis sistem pentanahan jenis elektroda pelat memiliki nilai resistivitas tanah 20 Ω . m

dengan asumsi lebar elektroda pelat sebesar 2 m, panjang elektroda pelat sebesar 2 m, dan kedalaman tanam elektroda pelat diasumsikan 3,5 m yang dimana pilihan ini didasarkan pada prinsip rekayasa fundamental yaitu semakin dalam elektroda ditanam, semakin baik dan stabil kinerjanya.

Sisi atas pelat harus terletak minimum 1 m di bawah permukaan tanah. Jika diperlukan beberapa pelat logam untuk memperoleh resistans pembumian yang lebih rendah, maka jarak antara pelat logam, jika dipasang paralel, dianjurkan minimum 3 meter[16].

3.2.2 Data dan Parameter Ekonomis

Selain faktor teknis, penelitian ini juga mempertimbangkan aspek ekonomis dalam pemilihan elektroda pentanahan. Data ekonomis yang digunakan mencakup:

1. Harga material elektroda pentanahan mencakup:
 - a. Harga elektroda batang dan atau pelat berjenis tembaga murni
 - b. Harga konduktor (menggunakan kabel BC karena mempunyai karakteristik yang tidak mempunyai isolator[31])
 - c. Harga konektor atau klem dengan jenis tembaga murni
2. Biaya pemasangan satu set instalasi pentanahan
3. Biaya inspeksi dan perawatan berkala (pembersihan area pentanahan, pengujian nilai resistansi pentanahan)

Analisis ekonomis bertujuan untuk menentukan pilihan elektroda yang tidak hanya memiliki resistansi terendah tetapi juga memiliki biaya investasi yang paling efisien dalam jangka panjang. Harga-harga tersebut didapatkan dari ketetapan yang dikeluarkan oleh pemerintahan kota, rancangan anggaran biaya dari perusahaan yang telah ada, dan atau ketetapan yang dikeluarkan oleh pabrik-pabrik besar. Data harga diambil dari PT.SEMPURNA KARYA ESA dan juga toko penyedia bahan pentanahan yaitu Grounding Shop dan juga Visiotek Indonesia.

Estimasi biaya sistem pentanahan dapat dilihat pada Tabel 3.3 dan juga Tabel 3.4 berikut:

Tabel 3. 3 Estimasi biaya sistem pentanahan elektroda batang

Komponen	Detail	Estimasi Biaya (Rp)
Biaya Material	18 m batang tembaga 5/8" =Menggunakan 6 batang ukuran 3 m Asumsi: Rp 900.000 /batang	5.400.000

Komponen	Detail	Estimasi Biaya (Rp)
Biaya Pemasangan	Jasa pengeboran/pemancangan dalam & penyambungan	2.500.000
Biaya Aksesoris	Kabel BC, klem, konektor	750.000
Biaya Perawatan	pembersihan area pentanahan, pengujian nilai resistansi pentanahan	200.000

Tabel 3.3 menyajikan rincian estimasi biaya untuk sistem pentanahan yang menggunakan elektroda batang. Biaya Material diestimasi sebesar Rp 5.400.000, yang didasarkan pada asumsi penggunaan enam batang tembaga berukuran 3 meter dengan harga Rp 900.000 per batang untuk mencapai total panjang 18 meter. Selanjutnya, Biaya Pemasangan, yang mencakup jasa pengeboran atau pemancangan dalam serta penyambungan, diperkirakan sebesar Rp 2.500.000. Komponen tambahan seperti kabel BC, klem, dan konektor masuk ke dalam Biaya Aksesori dengan total Rp 750.000. Terakhir, Biaya Perawatan tahunan untuk aktivitas seperti pembersihan area dan pengujian nilai resistansi dianggarkan sebesar Rp 200.000.

Tabel 3. 4 Estimasi biaya sistem pentanahan elektroda pelat

Komponen	Detail	Estimasi Biaya (Rp)
Biaya Material	1 lembar pelat tembaga murni 2m x 2m (4 m ²) Asumsi: Rp 4.000.000 / m ²	16.000.000
Biaya Pemasangan	Jasa galian tanah (3.5m), penempatan, dan pemadatan	3.500.000
Biaya Aksesoris	Kabel BC, klem, konektor	750.000
Biaya Perawatan	pembersihan area pentanahan, pengujian nilai resistansi pentanahan	300.000

Tabel 3.4 merinci estimasi biaya untuk sistem pentanahan yang menggunakan elektroda pelat. Biaya Material diperkirakan sebesar Rp 16.000.000, yang didasarkan pada asumsi harga Rp 4.000.000 per meter persegi untuk satu lembar pelat tembaga murni berukuran 2x2 meter. Selanjutnya, Biaya Pemasangan untuk pekerjaan galian tanah sedalam 3,5 meter, penempatan pelat, dan pemadatan diestimasi sebesar Rp 3.500.000. Biaya Aksesori seperti kabel BC, klem, dan konektor diperkirakan mencapai Rp 750.000.

Terakhir, Biaya Perawatan tahunan yang mencakup pembersihan area dan pengujian resistansi dianggarkan sebesar Rp 300.000.

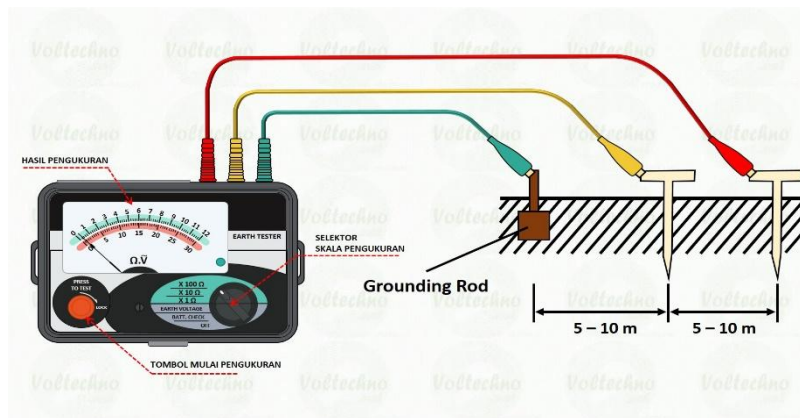
3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data

Mengumpulkan data teknis dan ekonomis elektroda pentanahan dari berbagai sumber.

2. Melakukan pengukuran resistansi pentanahan pada Gardu Induk Namorambe tepatnya pada tiang transmisi SUTT 150 kV menggunakan Earth Tester dengan dua buah elektroda bantu.



Gambar 3. 2 Gambar Earth Tester

Gambar 3.2 menunjukkan cara penggunaan Earth Tester, yaitu alat untuk mengukur nilai resistansi atau tahanan dari sistem pentanahan. Pengukuran dilakukan dengan metode tiga titik, di mana satu kabel (hijau) dihubungkan ke elektroda pentanahan (*Grounding Rod*) yang akan diuji. Dua kabel lainnya (kuning dan merah) dihubungkan ke elektroda bantu berupa batang logam yang ditancapkan ke tanah pada jarak 5 hingga 10 meter satu sama lain. Setelah tombol pengukuran ditekan, alat akan mengalirkan arus dan mengukur tegangan untuk menghitung, lalu menampilkan hasil resistansi tanah pada layar analognya.

Langkah untuk melakukan pengukuran resistansi pentanahan menggunakan Earth Tester yaitu[32]:

- a. Menghubungkan terminal E (warna hijau) ke elektroda utama.

- b. Menghubungkan terminal P (warna kuning) ke elektroda pembantu yang pertama.
 - c. Menghubungkan terminal C (warna merah) ke elektroda bantu yang ke dua.
 - d. Pastikan jarak antar elektroda utama dan elektroda bantu sekitar 5 meter atau lebih.
 - e. Posisikan sektor skala pengukuran pada $\times 1\Omega$.
 - f. Lalu tekan tombol merah untuk mendapatkan hasil pengukuran
3. Pemodelan MATLAB GUI
- Membuat model perhitungan resistansi elektroda menggunakan MATLAB GUI. Lalu, memasukkan berbagai konfigurasi pemasangan elektroda.
4. Analisis Hasil
- Mengevaluasi resistansi pentanahan dari berbagai konfigurasi elektroda. Selanjutnya, melakukan analisis ekonomis terhadap setiap konfigurasi.
5. Kesimpulan dan Rekomendasi
- Menyimpulkan jenis dan konfigurasi elektroda terbaik berdasarkan analisis teknis dan ekonomis dan memberikan rekomendasi untuk aplikasi di lapangan.

3.4 Teknik Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif dan simulasi berbasis MATLAB GUI. Analisis yang digunakan meliputi analisis teknis dan analisis ekonomis.

1. Analisis teknis

Dalam analisis teknis, langkah yang dilakukan adalah:

- a. Melakukan perhitungan resistansi tanah menggunakan metode yang terdapat pada Persamaan 2.1 dan Persamaan 2.2
- b. Membuat simulasi perhitungan MATLAB GUI untuk mengevaluasi pengaruh variasi parameter teknis terhadap resistansi elektroda pentanahan menggunakan logika Persamaan 2.1 dan Persamaan 2.2.
- c. Mendapatkan hasil resistansi pentanahan dari perbandingan antara elektroda batang dan pelat.

2. Analisis ekonomis

Dalam analisis ekonomis, langkah yang dilakukan adalah:

- a. Melakukan perhitungan ekonomis sistem pentanahan pada MATLAB GUI menggunakan metode Perhitungan *Life Cycle Cost* (LCC) menggunakan persamaan 2.3 yang mencakup biaya awal, biaya pemasangan, dan biaya pemeliharaan.
- b. Membuat simulasi perhitungan menggunakan MATLAB GUI dengan menggunakan logika persamaan 2.3
- c. Optimasi biaya dengan capaian mendapatkan tahanan pentanahan yang memenuhi standar PUIL dan atau bahkan kurang dari 5Ω dengan biaya yang paling rendah.

3. Aplikasi MATLAB GUI dalam analisis sistem kelistrikan

MATLAB GUI banyak digunakan dalam analisis sistem kelistrikan untuk mempermudah visualisasi dan interaksi dengan data serta hasil perhitungan. Contohnya, dalam analisis aliran daya, GUI dapat menampilkan input dan output data bus serta lini transmisi, memungkinkan pengguna untuk memantau dan menganalisis distribusi daya secara interaktif. Selain itu, GUI juga digunakan dalam analisis stabilitas sistem tenaga listrik, seperti menentukan sudut pemutus kritis dan waktu pemutus kritis pada generator. Dengan bantuan GUI, proses perhitungan menjadi lebih efisien dan akurat, serta memudahkan pengguna dalam memahami dinamika sistem tenaga listrik.

4. Rekomendasi Optimal dalam Sistem Pentanahan

Rekomendasi optimal dalam sistem pentanahan adalah Rekomendasi optimal dalam sistem pentanahan adalah merancang sistem dengan tahanan pentanahan serendah mungkin menggunakan konfigurasi dan material elektroda yang tepat berdasarkan karakteristik tanah, perawatan dan pengujian berkala agar selalu memenuhi standar keamanan dan keandalan sistem tenaga listrik, serta biaya dalam sistem pentanahan tersebut.

Rekomendasi optimal dalam sistem pentanahan mencakup aspek teknis dan ekonomis.

1. Rekomendasi optimal sistem pentanahan dari aspek teknis

a. Memenuhi standar dan regulasi.

Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL) yang berlaku di Indonesia menetapkan tahanan pentanahan untuk instalasi umum adalah dibawah 5Ω .

b. Pemilihan material dan konfigurasi elektroda yang tepat.

Gunakan material yang tahan terhadap korosi, seperti tembaga (Cu) atau besi yang dilapisi tembaga. Pemilihan konfigurasi bergantung pada nilai tahanan tanah dan area yang tersedia.

c. Koneksi yang andal dan tahan lama.

Semua sambungan dalam sistem pentanahan harus kuat secara mekanis dan elektrik serta dilindungi dari korosi.

2. Rekomendasi optimal sistem pentanahan dari aspek ekonomis

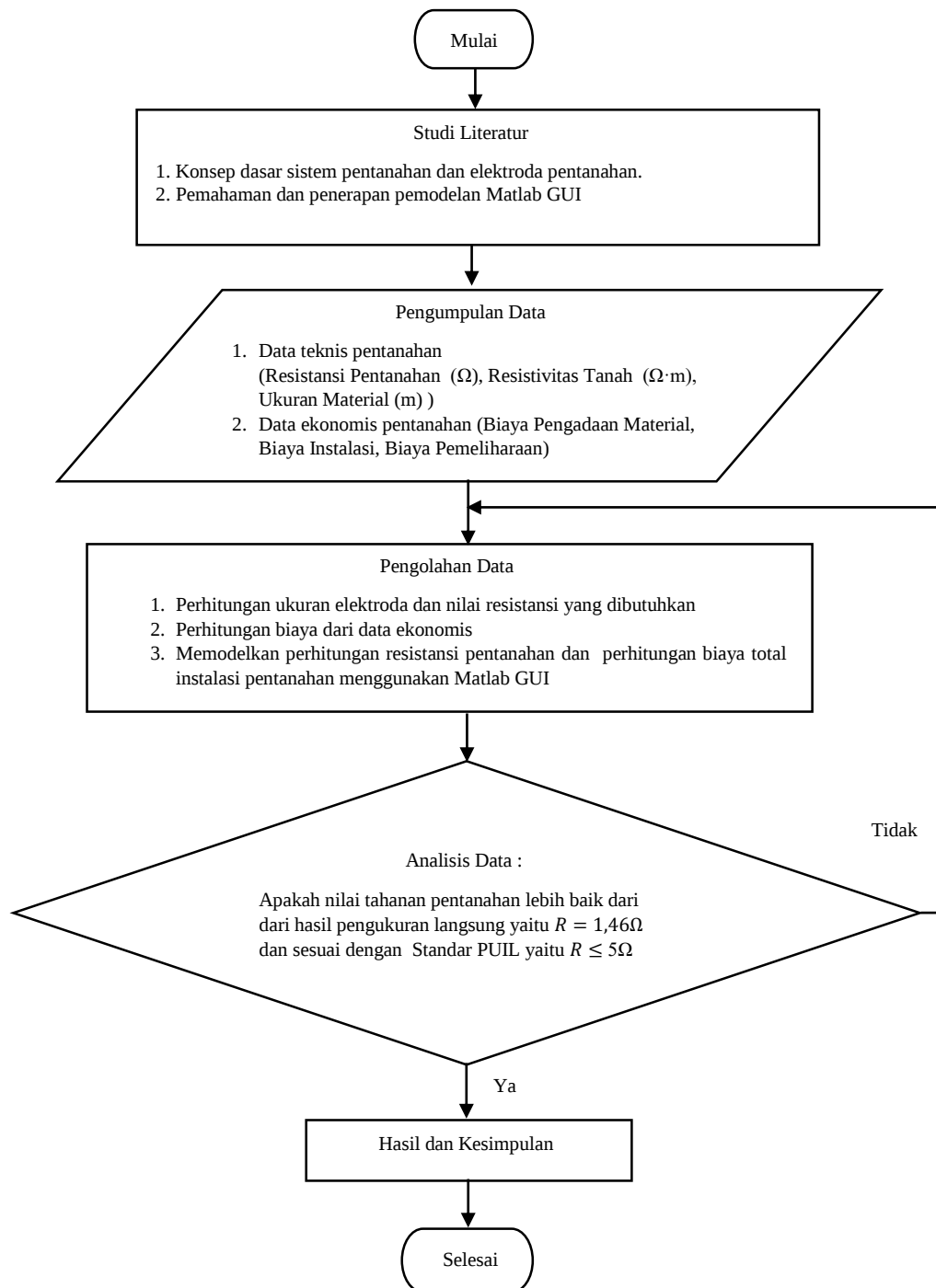
a. Memilih material elektroda dengan rasio biaya kinerja terbaik

Menggunakan jenis material elektroda yang lebih murah namun tidak mengesampingkan nilai tahanan pentanahan sesuai standar yang ditetapkan oleh Direktorat Jendral Ketenagalistrikan[33].

b. Minimalkan jumlah elektroda dengan optimasi penanaman

Jumlah elektroda yang lebih sedikit akan mengurangi biaya dalam instalasi sistem pentanahan. Namun, hal ini harus sebanding dengan nilai tahanan pentanahan yang sesuai dengan standar PUIL (Peraturan Umum Instalasi Listrik).

3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian

Penjelasan diagram alir penelitian

1. Mulai

Membuat proposal dan melakukan tahap awal penelitian Perbandingan pemilihan elektroda pentanahan dengan resistansi terendah berdasarkan analisis teknis dan ekonomis menggunakan Matlab *Graphical User Interface*.

2. Studi literatur

Mencari, mengidentifikasi, menganalisis, dan mengevaluasi sumber-sumber tertulis yang relevan dengan topik penelitian untuk memahami perkembangan pengetahuan, dan membangun dasar teoritis untuk penelitian ini.

3. Pengumpulan data

Pengumpulan data teknis mencakup pengukuran nilai resistansi pentanahan, ukuran elektroda, kedalaman elektroda, dan arus operasi pada lokasi penelitian. Sementara pengumpulan data ekonomis mencakup biaya material, biaya pemeliharaan dan umur pakai.

4. Pengolahan data

Setelah data teknis dan ekonomis didapatkan, maka dilakukan pembuatan pemodelan simulasi perhitungan teknis dan ekonomis menggunakan MATLAB GUI. Lalu, memasukkan setiap data pada pemodelannya masing-masing dan menjalankan simulasi pemodelan. Hasil pemodelan setiap konfigurasi elektroda akan diberikan rekomendasi yang paling efektif dari analisis teknis dan ekonomisnya.

5. Analisis data

Sesuai standar PUIL (Peraturan Umum Instalasi Listrik) resistansi sistem pentanahan harus di bawah 5Ω . Jika dari hasil simulasi pemodelan teknis mendapatkan resistansi pentanahan $\leq 5\Omega$, maka penelitian telah mencapai hasil yang diinginkan. Namun, apabila resistansi pentanahan dari pemodelan tersebut $> 5\Omega$, maka pemodelan dianggap tidak memenuhi syarat dan harus melakukan pengolahan data kembali sampai mendapatkan hasil resistansi pentanahan $\leq 5\Omega$.

6. Hasil dan kesimpulan

Menampilkan hasil dan kesimpulan dari seluruh proses penelitian.

7. Selesai

Seluruh alur dan prosedur selesai dilaksanakan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Andini, Y. Martin, and H. Gusmedi, “Perbaikan Tahanan Pentanahan dengan Menggunakan Bentonit Teraktivasi,” *Electr. – J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 44–53, 2016.
- [2] P. Widyaningsih, “Perubahan Konfigurasi Elektrode Pentanahan Batang Tunggal Untuk Mereduksi Tahanan Pentanahan,” *J. Tek. Energi*, vol. 9, no. 2, pp. 47–51, 2013.
- [3] I. Roza, Y. T. Nugraha, R. Rida, M. Irwanto, and M. A. Othman, “Modeling of Glugur Substation grounding systems using MATLAB graphical user interface,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 15–23, 2025, doi: 10.11591/ijece.v15i1.pp15-23.
- [4] W. Sudiartha, I. K. T. A., and I. G. N. Sangka, “Analisis Pengaruh Jenis Tanah terhadap Besarnya Nilai Tahanan Pentanahan,” *J. Log.*, vol. 16, no. 1, pp. 35–39, 2016, [Online]. Available: <https://ojs.pnb.ac.id/index.php/LOGIC/article/view/139>
- [5] A. Pranoto, H. Tumaliang, and G. M. C. Mangindaan, “Analisa Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling Dengan Konstruksi Grid (Kisi-kisi),” *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 7, no. 3, pp. 189–198, 2018.
- [6] T. D. Soelistyarini, “Soelistyarini, T. D. (2013). Pedoman Penyusunan Tinjauan Pustaka dalam Penelitian dan Penulisan Ilmiah. Universitas Airlangga, 1-6.” pp. 1–6.
- [7] H. Yuliadi, S. Hardi, and R. Rohana, “Analisis Perbandingan Tahanan Pentanahan Pada Elektroda Batang Dan Plat Untuk Perbaikan Nilai Resistansi Pembedaan,” *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 68–74, 2021.
- [8] A. Fitriani *et al.*, “Pemodelan Sistem Pentanahan Netral Generator Melalui Transformator Distribusi Menggunakan Metode GUI (Grafical User Interface),” *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 7, no. 1, pp. 82–88, 2023, doi: 10.33379/gtech.v7i1.1878.
- [9] N. Nurdiana *et al.*, “Pengaruh Kedalaman Terhadap Tahanan Pentanahan Di

- Area Rusunawa Kampus,” vol. 4, no. 2, pp. 327–332, 2019.
- [10] PUIL, “PerPUIL. (2000). Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000). Standar Nasional Indonesia DirJen Ketenagalistrikan, 2000(Puil), 562.syaratn Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000),” *Standar Nas. Indones. DirJen Ketenagalistrikan*, vol. 2000, no. Puil, p. 562, 2000.
- [11] V. Salamena, “Pengaruh Kedalaman Elektroda Terhadap Pengukuran Tahanan Jenis: Tanah, Pasir Dan Air Laut Di Pulau Ambon Dengan Konfigurasi Wenner Alfa,” *J. Simetrik*, vol. 8, no. 1, pp. 93–100, 2018, doi: 10.31959/js.v8i1.75.
- [12] S. Ramadhani, R. Harahap, Z. Pelawi, K. Kunci, and E. Batang, “Analisis Perbandingan Nilai Tahanan Pentanahan di Gedung dan di Gardu induk pada Rumah Sakit Grand Mitra Medika Medan,” *J. Electr. Technol.*, vol. 6, no. 3, 2021.
- [13] D. E. Putra, Sunawiri, Y.Daeny Septi, Mutiar, and E. Sukarta, “Evaluasi Resistivitas Tanah dan Resistensi Pentanhan Pada Lahan Tanah Pasir,” *J. Ampere*, vol. 7, no. 1, pp. 9–14, 2022.
- [14] J. T. Elektro and P. N. Lhokseumawe, “2151-5370-1-Pb,” vol. 18, no. 1, pp. 28–33, 2021.
- [15] Subkhi Mahmasani, “View metadata, citation and similar papers at core.ac.uk,” pp. 274–282, 2020.
- [16] Badan Standarisasi Indonesia, “Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000),” *DirJen Ketenagalistrikan*, vol. 2000, no. Puil, p. 562, 2000.
- [17] M. Mukmin, K. Agustinus, and M. Baso, “PERBANDINGAN NILAI TAHANAN PENTANAHAN PADA AREA REKLAMASI PANTAI (CITRALAND) Sistem pentanahan adalah sistem hubungan penghantar yang mengamankan manusia discharge penyebab umum dari adanya sentakan Sejalan berkembangnya jaman dan digunakan untuk pembn,” *J. MEKTRIK*, vol. 1, no. 1, pp. 29–39, 2014.
- [18] I. K. Febrianti, “Analisa Sistem Pentanahan Transformator,” *J. Ampere*, vol. 3, no. 1, p. 185, 2018, doi: 10.31851/ampere.v3i1.2146.
- [19] I. 80-2013, *Guide for Safety In AC Substation Grounding Based on Institue of Electrical and Electronic Engineers (IEEE std 80:2000)*. 2013.

- [20] Ign Janadarna, “Perbedaan Penambahan Garam dengan ... IGN Janardana,” vol. 4, no. 1, pp. 24–28, 2005.
- [21] Jamaaluddin, I. Anshory, and E. suprayitno Agus, “Penentuan Kedalaman Elektroda pada Tanah Pasir dan Kerikil Kering Untuk Memperoleh Nilai Tahanan Pentanahan yang Baik (Depth Determination of Electrode at Sand and Gravel Dry for Get The Good Of Earth Resistance),” *J. jTE-U*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2015.
- [22] Anon, *Ieee Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. 1974.
- [23] B. Kanata and T. Zubaidah, “Revisi, 18012017,” *Apl. Metod. Geolistrik*, vol. 7, no. 2, pp. 84–91, 2008.
- [24] A. Sunawar, “Analisis Pengaruh Temperatur dan Kadar Garam Terhadap Hambatan Jenis Tanah,” *Setrum Sist. Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol. 2, no. 1, p. 16, 2013, doi: 10.36055/setrum.v2i1.233.
- [25] P. K. Dipayana, *Skripsi analisis teknis dan ekonomis perencanaan plts rooftop on-grid di pt intan pratama teknik*. 2024.
- [26] R. Rafli, J. Ilham, and S. Salim, “Perencanaan dan Studi Kelayakan PLTS Rooftop pada Gedung Fakultas Teknik UNG,” *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 8–15, 2022, doi: 10.37905/jjee.v4i1.10790.
- [27] B. Winardi, A. Nugroho, and E. Dolphina, “Perencanaan Dan Analisis Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat Untuk Desa Mandiri,” *J. Tekno*, vol. 16, no. 2, pp. 1–11, 2019, doi: 10.33557/jtekno.v16i1.603.
- [28] R. Kumar, K. Bansal, D. K. Saini, and I. P. S. Paul, “Development of Empirical Formulas and Computer Program with MATLAB GUI for Designing of Grounding System in Two Layer Soil Resistivity Model for High Voltage Air Insulated and Gas Insulated Substations,” *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 28, 2016, doi: 10.17485/ijst/2016/v9i28/96515.
- [29] IEEE Std 81, “An American National Standard IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity , Ground Impedance , and Earth Surface Potentials of a Ground System,” *Inst. Electr. Electron. Eng. Inc*, vol. 1983, 1983, [Online].

Available: https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.unal.edu.co/browse/standards/collection/ieee/power-and-energy?ranges=1983_1984_Year&pageNumber=1

- [30] SNI, “Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011),” *DirJen Ketenagalistrikan*, vol. 2011, no. PUIL, pp. 1–133, 2011.
- [31] R. R. Fazrin, T. Trisnawiyana, and T. Tohir, “Pengujian Nilai Resistansi Pentanahan Elektroda Batang dengan Zat Aditif Bentonit dan Tanpa Bentonit,” *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 14, no. 1, pp. 103–108, 2023, doi: 10.35313/irwns.v14i1.5369.
- [32] M. Kamal Hamid, S. Abubakar, S. Pentanahan, M. Kamal Hamid, S. Abubakar Staf Pengajar Politeknik Negeri Lhokseumawe, and A. Utara, “Sistem Pentanahan Pada Transformator Distribusi 20 kV di PT.PLN (Persero) Area Lhokseumawe Rayon Lhoksukon,” *J. Electr. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 13–16, 2016.
- [33] N. Standar *et al.*, “STANDAR NASIONAL INDONESIA KOMITE TEKNIS PERSYARATAN UMUM INSTALASI LISTRIK,” pp. 5–9, 2020.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Surat Pengajuan Izin Pengambilan Data


PLN
UIP3B SUMATERA
UPT MEDAN

Nomor : 1288/SDM.02.04/F22060000/2025
Lampiran : 1 Lembar
Sifat : Segera - Terbatas
Hal : Ijin Pengambilan Data

23 Juli 2025

Kepada

Yth. Dekan
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah
Sumatera Utara
Jl.Mukhtar Basri No.3 Medan
20238 Medan

Menunjuk surat dari Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro beralamat Jl.Mukhtar Basri No.3 Medan 20238 dengan nomor surat : 1078/II.AU/UMSU-07/B/2025 pada tanggal 04 Juli 2025 perihal Pengambilan Data atas nama :

No	Nama Mahasiswa	Npm	Jurusan
1	Abdur Rahman Hidayat Tarigan	2107220047	Teknik Elektro

Bersama ini di informasikan bahwa untuk pelaksanaan pengambilan data tersebut dapat dilaksanakan di lingkungan kantor PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan Gardu Induk Namorambe di mulai tanggal 21 Juli 2025 sampai dengan tanggal 31 Juli 2025, adapun dalam pelaksanaan pengambilan data tersebut hal-hal yang perlu diperhatikan mahasiswa sebagai berikut :

1. Mengisi daftar hadir.
2. Menjaga etika sopan santun dan melaksanakan tata tertib di perusahaan PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan Gardu Induk Namorambe.
3. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak menyediakan transportasi dan akomodasi.
4. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak memberikan honorarium dan konsumsi.
5. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak menanggung biaya pemeliharaan kesehatan dan resiko kecelakaan.
6. Mengikuti protokol kesehatan dan keselamatan (K3) yang berlaku.
7. Peserta pengambilan data tidak akan mengekspose data/informasi perusahaan kepada pihak lain.
8. Hasil laporan pengambilan data harus di presentasikan ke ASMAN KONS dan LUR.
9. Menyerahkan copy laporan pengambilan data setelah selesai dilaksanakan ke Gardu Induk Namorambe.
10. Untuk laporan pengambilan data ijin dan mekanisme dapat menghubungi Manager ULTG Binjai.

Demikian disampaikan untuk dapat dipergunakan seperlunya terima kasih.

JL. LISTRIK NO. 12 KEL. PETISAH TENGAH KEC. MEDAN PETISAH, MEDAN 20112

T -

F - W -

DALIN SITI WAHYUNI/24 Juli 2025 11:29:01/cetakan ke - 2

1 dari 2



UIP3B SUMATERA
UPT MEDAN

MANAGER UNIT PELAKSANA
TRANSMISI MEDAN,



DONI ADREAN

Tembusan:

1. ASMAN KONS DAN LUR UPT MEDAN PLN
2. MUL ULTG (GLUGUR) ULTG GLUGUR PLN
3. TL JAR TRANS GI (NAMORAMBE) ULTG GLUGUR PLN

SALINAN

JL. LISTRIK NO. 12 KEL. PETISAH TENGAH KEC. MEDAN PETISAH, MEDAN 20112

T -
F - W -

DALIN SITI WAHYUNI/24 Juli 2025 11:29:01/cetakan ke - 2

2 dari 2

Lampiran 2. Dokumentasi Pengukuran Langsung pada Tower SUTT 150kV GI Namorambe



Lampiran 3. Lembar Asistensi



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jl. Kapten Muchtar Basri No.3 Medan Telp. (061)6622400

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN

NAMA : Abdur Rahman Hidayat Tarigan
NPM : 2107220047
JUDUL : Perbandingan Pemilihan Elektroda Pentanahan Dengan Resistansi Terendah Berdasarkan Analisis Teknis Dan Ekonomi Menggunakan Matlab Graphical User Interface.

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
1	11 Jan 2025	- Perbaiki judul TA. - Sesuaikan judul TA dengan bab 1. - Cari referensi jurnal yg sesuai.	
2	15 Jan 2025	- Perbaiki bab I : - Sesuaikan latar belakang masalah dengan judul TA. - Sinkronkan Latar Belakang dengan Rumusan Masalah dan Tujuan Penelitian. - Perbaiki dan tambahkan penelitian relevan.	
3	19 Jan 2025	- Perbaiki bab II. - Penelitian relevan harus terkait dengan judul TA. - Perbaiki konsep Dasar Sistem Pentanahan. - Apa saja yg menjadi parameter sistem Pentanahan.	
4	28 Jan 2025	- Perjelas dan lengkapi parameter sistem Pentanahan	



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jl. Kapten Muchtar Basri No.3 Medan Telp. (061)6622400

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN

NAMA : Abdur Rahman Hidayat Tarigan
NPM : 2107220047
JUDUL : Perbandingan Pemilihan Elektroda Pentanahan Dengan Resistansi Terendah Berdasarkan Analisis Teknis Dan Ekonomi Menggunakan Matlab Graphical User Interface.

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
5	25 jan 2015	- Pergelas analisis secara teknis dan ekonomis - Harus ada standar yg gelas untuk sistem pentanahan (Nasional & Internasional) - Analisis teknis dan ekonomis harus lebih dijabarkan beserta rumus untuk menganalisisnya. - Tambahkan Aplikasi MATLAB GUI	 
6.	17 jan 2015	- Buat Desain penelitian - Buat Rancangan Matlab Gui - Buat parameter yang dianalisa, bagaimana teknik analisis Data, - Perbaiki Diagram Alir Penelitian	
7.	20 jan 2015	Ace seminar proposal	

Dosen Pembimbing



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



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jl. Kapten Muchtar Basri No.3 Medan Telp. (061)6622400

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN

NAMA : Abdur Rahman Hidayat Tarigan
NPM : 2107220047
JUDUL : Perbandingan Pemilihan Elektroda Pentanahan Dengan Resistansi Terendah Berdasarkan Analisis Teknis Dan Ekonomi Menggunakan Matlab GUI.

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
1.	7 Juli 2025	- Tambahkan batasan masalah - Perbaiki lokasi Penelitan pada skripsi. - Tambahkan prosedur dan langkah - langkah penelitian.	
2.	19 Juli 2025	- Perbaiki tahapan penelitian sesuai dengan tujuan penelitian - Perbaiki tulisan sesuai format panduan penelitian - Bedakan pengukuran langsung dan menggunakan Aplikasi Matlab.	
3	22 Juli 2025	- Aplikasikan tahapan penelitian ke bab-4 (Hasil penelitian) - Perjelas parameter dalam setiap tujuan penelitian	



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jl. Kapten Muchtar Basri No.3 Medan Telp. (061)6622400

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN

NAMA : Abdur Rahman Hidayat Tarigan
NPM : 2107220047
JUDUL : Perbandingan Pemilihan Elektroda Pentanahan Dengan Resistansi Terendah
Berdasarkan Analisis Teknis Dan Ekonomi Menggunakan Matlab GUI.

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
4.	28 Juli 2025	- Perbaiki rancangan hasil di bab 4. - Buat kesimpulan masing-masing jawaban untuk mencapai tujuan penelitian (di bab 4). - Serikan kesimpulan di bab-5 dengan tujuan penelitian	
5.	8 - Agustus '25	Ace Seminar Hari	

Dosen Pembimbing

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



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jl. Kapten Muchtar Basri No.3 Medan Telp. (061)6622400

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN

NAMA : Abdur Rahman Hidayat Tarigan
NPM : 2107220047
JUDUL : Pemilihan Elektroda Pentanahan Dengan Resistansi Terendah Berdasarkan Analisis Perhitungan Dan Ekonomis Menggunakan Matlab GUI.

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
1	15 Agustus 2025	- Perbaiki Judul - Sesuaikan isi Abstrak	24/8
2	17 Agustus 2025	- Perbesar tampilan GUI Matlab - Tambahkan sumber standar pematangan elektroda pentanahan	24/8
3	18 Agustus 2025	- Perbaiki kesimpulan sesuai hasil	24/8
4	19 Agustus 2025	- ACC Sidang T. A	24/8

Dosen Pembimbing

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