

**EVALUASI SISTEM GROUNDING DAN SIMULASI METODE
PROTEKSI PETIR PADA TOWER BTS PT. TELKOM
INDONESIA WILAYAH MAJAPAHIT**

LAPORAN TUGAS AKHIR

Laporan ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh Gelar S1 pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang



**DISUSUN OLEH:
DIMAS TRI ARDIYANTO
30601900052**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2026**

**EVALUATION OF GROUNDING SYSTEM AND
SIMULATION OF LIGHTNING PROTECTION METHODS
ON BTS TOWER OF PT. TELKOM INDONESIA IN THE
MAJAPAHIT AREA**

FINAL PROJECT

*Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (S1) at
Departement of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Universitas Islam Sultan Agung Semarang*



Arranged By:

DIMAS TRI ARDIYANTO

30601900052

**MAJORING OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2026**

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “EVALUASI SISTEM GROUNDING DAN SIMULASI METODE PROTEKSI PETIR PADA TOWER BTS PT.TELKOM INDONESIA WILAYAH MAJAPAHRIT” ini disusun oleh:

Nama : Dimas Tri Ardiyanto
NIM : 30601900052
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari :
Tanggal :



LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul "EVALUASI SISTEM GROUNDING DAN SIMULASI METODE PROTEKSI PETIR PADA TOWER BTS PT.TELKOM INDONESIA WILAYAH MAJAPAHIT" ini telah dipertahankan didepan dosen penguji tugas akhir pada :


Hari :

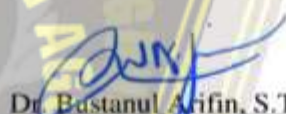
Tanggal :

TIM PENGUJI


Penguji 1

Penguji 2


Ir. Arief Marwanto, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM
NIDN. 0628097501


Dr. Bustanul Arifin, S.T., M.T.
NIDN. 0614117701

Ketua Penguji


Dr. Ir. Sukarno Budi Utomo, M.T.
NIDN. 0619076401

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Dimas Tri Ardiyanto
NIM : 30601900052
Judul Tugas Akhir : EVALUASI SISTEM GROUNDING DAN
SIMULASI METODE PROTEKSI PETIR
PADA TOWER BTS PT.TELKOM
INDONESIA WILAYAH MAJAPAHIT

Dengan bahwa ini saya menyatakan bahwa judul da isi Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro tersebut adalah asli dan belum pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan oleh siapapun baik keseluruhan maupun sebagian, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka, dan apabila dikemudian hari ternyata terbukti bahwa judul Tugas Akhir tersebut pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 26 Februari 2026

Yang Menyatakan



Dimas Tri Ardiyanto

PERSEMBAHAN DAN MOTTO

Persembahan:

Pertama,

Tugas Akhir ini akan saya persembahkan kepada kedua orang tua saya yang saya cintai (Bapak Agus Suwardi (Alm) & Ibu Marinah) yang sudah membesarkan saya, memberikan dukungan dan menjadi motivasi hidup saya dalam menyelesaikan studi saya hingga saat ini. Dan juga kepada saudara saya yang menyemangati saya, untuk dapat menyelesaikan perkuliahan.

Kedua,

Untuk Dosen pembimbing dan seluruh Dosen Teknik Elektro yang selalu memberikan ilmu, saran dan pengarahannya.

Ketiga,

Untuk teman seperjuangan Tugas Akhir dan tidak lupa teman – teman Teknik Elektro angkatan 2019 yang saling memberikan dukungan.

Motto

“Dan bersabarlah. Sesungguhnya Allah beserta orang – orang yang sabar”

(AQ. Al Insyirah : 5)

“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum sebelum mereka mengubah keadaan diri mereka sendiri”

(QS. Ar Ra'd : 11)

“Setiap bicara yang keluar hanya keluhan atas pilihanmu sendiri”- Queen

“Berdoalah seolah segalanya bergantung pada Tuhan” -King

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan segala nikmat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “EVALUASI SISTEM GROUNDING DAN SIMULASI METODE PROTEKSI PETIR PADA TOWER BTS PT.TELKOM INDONESIA WILAYAH MAJAPAHIT”. Shalawat serta salam kita curahkan kepada Nabi Agung Muhammad SAW, semoga kelak kita mendapatkan syafaatnya. Aamiin.

Penyusunan Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri di Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Penulis menyadari untuk mengerjakan tugas akhir ini banyak pihak yang telah memberikan dukungan dan membantu selama menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Oleh karena itu, sudah sepantasnya penulis dengan sangat hormat mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya dan mendoakan semoga Allah SWT memberikan balasan terbaik kepada:

1. Bapak Prof. Dr. H. Gunarto, SH., MH selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Bapak M Qomaruddin, S.T., MSc., Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Bapak Munaf Ismail, S.T., M.T selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan agung Semarang.
4. Bapak Ir. Arief Marwanto, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan serta dukungan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas ilmu, bimbingan dan bantuannya hingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Untuk kedua orangtua dan keluarga yang senantiasa memberikan do'a, semangat, dukungan, dan kasih sayang yang tiada hentinya kepada penulis dalam menyusun Tugas Akhir ini.

7. Kepada sahabat seperjuangan Teknik Elektro angkatan 2019 yang sudah membantu dalam pembuatan laporan Tugas Akhir Ini.

Penulis menyadari dalam menyusun laporan Tugas Akhir ini banyak sekali kekurangan, baik dari segi materi maupun penyajiannya. Penulis meminta maaf dan juga menerima kritik maupun saran yang membangun, sehingga kedepannya Tugas Akhir ini menjadi lebih baik lagi. Peneliti berharap semoga laporan ini memberi manfaat dan dapat dijadikan referensi agar dapat dikembangkan menjadi lebih baik lagi. Semoga Allah Ta'ala, senantiasa melimpahkan rahmat dan ridhanya kepada kita semua.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Semarang, 22 September 2025



Dimas Tri Ardiyanto

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	iv
PERSEMBAHAN DAN MOTTO.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
ABSTRAK.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Pembatasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	6
2.1 Tinjauan Pustaka.....	6
2.2 Landasan Teori.....	8
2.2.1 Sistem Pentanahan (<i>Grounding System</i>).....	8
2.2.2 Fungsi Sistem Pentanahan (<i>Grounding System</i>).....	9
2.2.3 Bentuk Sistem Alat Pentanahan (<i>Grounding System</i>).....	10
2.2.4 Jenis Sistem Pentanahan.....	13
2.2.5 Tahanan Jenis Tanah.....	14
2.2.6 Elektroda Pentanahan.....	16
2.2.7 Elektroda Batang (<i>Rod</i>).....	17
2.2.8 Elektroda Pita.....	20
2.2.9 Elektroda Pelat.....	21
2.2.10 Elektroda Jenis Lain.....	23
2.2.11 Material Pemasangan Sistem Pentanahan.....	24
2.2.12 <i>Earth Tester</i>	30

2.3	Data Lokasi dan Kondisi Tanah di Lokasi BTS	34
2.3.1	Radius Proteksi dan Luas Sambaran Petir	35
2.3.2	Metode Perlindungan	35
2.3.3	Metode Proteksi Petir	36
2.3.4	Tahanan Pembumian	36
2.4	Dasar Sistem Perlindungan Petir	36
2.5	Parameter <i>Grounding System</i>	38
BAB III METODE PENELITIAN DAN PERANCANGAN		45
3.1	Pendahuluan.....	45
3.2	Input Data dan Variabel Penelitian.....	46
3.3	Proses Penelitian	47
3.4	Tahapan Penelitian.....	48
3.5	Objek Penelitian	49
3.6	Alat dan Bahan Penelitian	51
3.7	Alur Penelitian dan Prosedur Pengumpulan Data dan Eksperimen	52
3.8	Teknik Analisi Data	56
3.9	Output yang Diharapkan	57
3.10	Langkah Penelitian.....	58
3.11	Prosedur Audit.....	60
3.12	Radius Proteksi Petir Berdasarkan Ketinggian.....	60
BAB IV DATA DAN ANALISA		61
4.1	Hasil Pengujian	61
4.2.1	Data Penelitian.....	61
4.2.2	Rancangan Proteksi Petir dengan 4 Parameter	64
4.2.3	Hasil Perhitungan Teoritis	64
4.2.3	Hasil Pengukuran Resistansi Grounding	68
4.2.4	Perbandingan Secara Keseluruhan	69
4.2.5	Perbandingan Hasil Perancangan dengan Pengukuran di Lapangan.....	72
4.2.6	Grafik Perbandingan Nilai Resistansi	74
4.2.7	Diameter Kabel Berdasarkan Kebutuhan Arus	76
4.2	Analisis Sistem Grounding	76
4.3.1.	Analisis Nilai Resistansi Grounding	76
4.3.2.	Analisis Dampak Operasional Jika Resistansi Mendekati Batas	78
4.3.3.	Efektivitas Metode <i>Rolling Sphere</i> dalam Proteksi Petir.....	78
4.3.5.	Perhitungan Nilai Tahanan Grounding dan Evaluasi Standar	80

4.3.6.	Perhitungan Diameter Kabel Berdasarkan Arus Petir	81
4.3.7.	Perhitungan Rangkaian Paralel untuk Elektroda Grounding	82
4.3	Hasil dan Perbandingan dengan Standar	82
4.4	Hasil simulasi Rolling Spher dan Faraday Cage terhadap semua Jenis Tanah di Menara 83	
4.5.2.	Distribusi Arus pada Tanah Kering (Dry Soil).....	84
4.5.3.	Distribusi Arus pada Tanah Berbatu (Rocky Soil)	85
4.5.4.	Faraday Cage Grounding Area for Wet Soil	87
4.5.5.	Faraday Cage Grounding Area for Dry Soil.....	87
4.5.6.	Faraday Cage Grounding Area for Rocky Soil.....	88
4.5	Implikasi dan Rekomendasi	92
4.5.2	Implikasi Sistem Grounding terhadap Perlindungan BTS dari Petir	92
4.5.3	Rekomendasi untuk Perbaikan Sistem Grounding.....	93
4.5.4	Studi Kasus dan Pengembangan	94
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	96
5.1	Kesimpulan	96
5.2	Saran	97
DAFTAR	PUSTAKA	98



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Single Grounding Rod [12]	11
Gambar 2.2 Pararel Grounding Rod [12]	12
Gambar 2.3 Multi Grounding System [12]	13
Gambar 2.4 Sistem Pentanahan Netral [8]	13
Gambar 2.5 Sistem Pentanahan Peralatan [8]	14
Gambar 2.6 Elektroda Pit [19]	21
Gambar 2.7 Elektroda Pelat [19]	22
Gambar 2.8 Elektroda Pentanahan	25
Gambar 2.9 Kabel Grounding	28
Gambar 2.10 Kabel BC (Bare Core)	29
Gambar 2.11 Kabel NYY	29
Gambar 2.12 Kabel NYA	30
Gambar 2.13 Earth Tester [9]	31
Gambar 2.14 Bagian-Bagian Earth Tester 4105a	31
Gambar 2.15 Kabel Hijau Earth Tester	33
Gambar 2.16 Kabel Merah Earth Tester	33
Gambar 2.17 Elektroda Bantu	34
Gambar 3.1 Sistem Model	45
Gambar 3.2 Tahapan Penelitian	49
Gambar 3.3 Simulasi Sederhana Tower Jika Menggunakan Perlindungan Rolling Sphere	50
Gambar 3.4 Diagram Alur	54
Gambar 3.5 Cara Memasang Elektroda Bantu	58
Gambar 4.1 Struktur bangunan BTS di Majapahit tampak samping	61
Gambar 4.2 Elektroda Pelat yang Digunakan	62
Gambar 4.3 Hasil Pengukuran Pengukuran Grounding BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang Menggunakan Elektroda Plat Tembaga.	64
Gambar 4.4 Grafik perbandingan Nilai rata-rata Resistansi Grounding Elektroda Plat dan batang.	68
Gambar 4.5 Hasil Simulasi Tegangan Sistem pada Metode Franklin Rod dan Faraday Cage untuk Berbagai jenis tanah.	69
Gambar 4.6 Dashboard Konsolidasi Hasil Analisis Sistem Grounding dan Proteksi petir pada BTS PT. Telkom Majapahit.	73
Gambar 4.7 Perbandingan Nilai Resistansi Grounding.	74

Gambar 4. 8 Perbandingan Nilai Rata-rata Resistansi Grounding Elektroda Plat dan Batang.....	75
Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Performa dan Peningkatan Efektivitas Elektroda batang terhadap elektroda plat.....	78
Gambar 4. 10 Visualisasi Zona Proteksi dengan Metode Rolling Sphere (Radius 45m) pada tower BTS Majapahit.	79
Gambar 4. 11 Simulasi Bentuk Gelombang Arus petir dan Respons Tegangan Sistem Grounding	81
Gambar 4. 12 Distribusi Arus pada Lapisan Mesh dan Area Grounding di Tanah Berbatu	84
Gambar 4. 13 Grafik Faraday Cage Grounding Area terhadap Jenis Tanah dan Resistansi Mesh.....	86
Gambar 4. 14 Grafik Rolling Sphere Grounding Area pada Berbagai Jenis Tanah	89
Gambar 4. 15 Distribusi Arus pada Tanah Berbatu (Rocky Soil) dan Perbandingan Luas Area Grounding: Faraday Cage vs Rolling Sphere.....	91
Gambar 4. 16 Evaluasi Tingkat Efektivitas Sistem Proteksi Petir pada Berbagai jenis tanah.....	93



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai Rata-Rata Tahanan Jenis Tanah [9]	15
Tabel 2. 2 Luas Penampang Minimum Elektroda Pembedaan.....	26
Tabel 3. 1 Alat dan Bahan Penelitian.....	51
Tabel 3. 2 Titik Pengukuran Grounding	59
Tabel 3. 3 Data Teknis Pada BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang Menggunakan Elektroda Plat Tembaga	62
Tabel 4. 1 Hasil perhitungan	69
Tabel 4. 2 Nilai Resistensi Grounding pada Berbagai Jenis Tanah untuk Elektroda Pelat dan Batang.....	75
Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai Resistansi Grounding Berdasarkan Jenis Elektroda dan Kondisi Tanah	75



ABSTRAK

Indonesia memiliki intensitas petir yang tinggi karena letak geografisnya di daerah khatulistiwa, sehingga infrastruktur telekomunikasi seperti Base Transceiver Station (BTS) sangat rentan terhadap kerusakan akibat sambaran petir. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan sistem grounding pada BTS PT. Telkom Indonesia di wilayah Majapahit, Semarang, serta mengevaluasi efektivitasnya dalam mengurangi risiko petir. Metode penelitian meliputi pengukuran resistansi grounding menggunakan Earth Tester dengan konfigurasi elektroda plat dan batang tembaga, serta simulasi proteksi petir menggunakan metode Rolling Sphere dan Faraday Cage pada berbagai jenis tanah (basah, kering, dan berbatu). Hasil pengukuran menunjukkan nilai resistansi grounding 3,53 Ω untuk elektroda plat dan 2,74 Ω untuk elektroda batang, yang keduanya berada di bawah standar PUIL 2000 ($\leq 5 \Omega$). Simulasi proteksi petir menunjukkan bahwa metode Faraday Cage lebih efektif dalam mendistribusikan arus petir secara merata dibandingkan Franklin Rod, terutama pada kondisi tanah berbatu yang memiliki resistivitas tinggi. Hasil penelitian ini menyatakan bahwa sistem grounding BTS Majapahit sudah memenuhi standar teknis nasional dan internasional, namun disarankan adanya evaluasi berkala dan perawatan sistem grounding untuk menjaga keandalan perlindungan terhadap sambaran petir di masa mendatang.

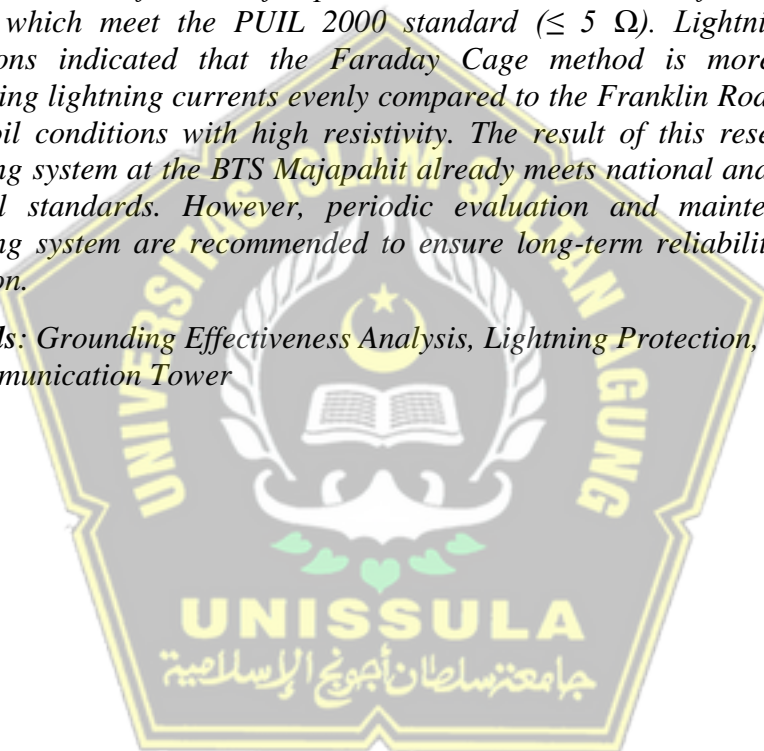
Kata kunci: Analisis Efektivitas *Grounding*, Proteksi Petir, Tower Telekomunikasi



ABSTRACT

Indonesia has a high lightning intensity due to its geographical location on the equator, making telecommunication infrastructure such as Base Transceiver Stations (BTS) highly vulnerable to lightning strikes. This study aims to analyze the feasibility of the grounding system at the BTS of PT. Telkom Indonesia in Majapahit, Semarang, and to evaluate its effectiveness in reducing lightning risks. The research method involved measuring grounding resistance using an Earth Tester with copper plate and rod electrodes, as well as simulating lightning protection using the Rolling Sphere and Faraday Cage methods under various soil conditions (wet, dry, and rocky). The measurement results showed grounding resistance values of 3.53 Ω for plate electrodes and 2.74 Ω for rod electrodes, both of which meet the PUIL 2000 standard ($\leq 5 \Omega$). Lightning protection simulations indicated that the Faraday Cage method is more effective in distributing lightning currents evenly compared to the Franklin Rod, especially in rocky soil conditions with high resistivity. The result of this research that the grounding system at the BTS Majapahit already meets national and international technical standards. However, periodic evaluation and maintenance of the grounding system are recommended to ensure long-term reliability of lightning protection.

Keywords: *Grounding Effectiveness Analysis, Lightning Protection, Telecommunication Tower*



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan teknologi telekomunikasi yang pesat di Indonesia telah menjadi pilar penting dalam pertumbuhan ekonomi dan transformasi digital masyarakat. Infrastruktur kunci yang menopang layanan ini adalah Base Transceiver Station (BTS), yang berfungsi sebagai jembatan penghubung antara pengguna jaringan seluler dengan inti jaringan, sehingga memungkinkan transmisi data dan suara berlangsung lancar dan kontinu [1]. Keandalan operasional BTS yang harus berjalan 24 jam sehari, 7 hari seminggu, menjadikannya aset kritikal yang kelangsungan fungsinya tidak boleh terganggu. Setiap gangguan pada BTS dapat menyebabkan blackout komunikasi, yang berimplikasi luas terhadap aktivitas sosial, ekonomi, dan keselamatan publik [2].

Indonesia, dengan lokasinya di garis khatulistiwa, memiliki iklim tropis yang ditandai dengan intensitas curah hujan dan badai petir yang tinggi. Karakteristik geografis ini menyebabkan negara ini memiliki hari guruh (thunderstorm days) dalam jumlah yang signifikan [3]. Dalam fenomena alam tersebut, struktur tinggi seperti menara BTS sangat rentan menjadi titik sasaran sambaran petir langsung [4]. Oleh karena itu, proteksi yang memadai bukan hanya sebuah kebutuhan teknis, tetapi juga merupakan imperatif keselamatan.

PT. Telekomunikasi Indonesia (Telkom) sebagai Badan Usaha Milik Negara (BUMN) penyelenggara layanan jaringan, memiliki tanggung jawab besar dalam menjaga keandalan infrastrukturnya. Salah satu Tower BTS Telkom yang terletak di Jl. Majapahit, Gemah, Kec. Pedurungan, Kota Semarang, Jawa Tengah, telah beroperasi sejak tahun 1996 dengan dilengkapi sistem penangkal petir dan pentanahan (grounding). Namun, usia pemasangan sistem yang telah mencapai puluhan tahun berpotensi

menyebabkan degradasi performa, terutama pada nilai resistansi pentanahan. Faktor-faktor seperti korosi elektroda, perubahan karakteristik tanah, dan kondisi iklim dapat mengakibatkan peningkatan nilai tahanan tanah dari waktu ke waktu.

Kewajiban pemeliharaan dan pengujian sistem proteksi ini diperkuat oleh landasan regulasi. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 0045 Tahun 2005 Pasal 15 Ayat 3 mewajibkan pengujian ulang instalasi tenaga listrik, termasuk sistem pembumian, setidaknya setiap 5 (lima) tahun sekali untuk instalasi dengan risiko tinggi seperti BTS, atau berdasarkan hasil penilaian inspeksi. Sementara itu, Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2000 pada Pasal 3.13.2.10 menetapkan batas maksimum resistansi pentanahan sebesar 5 ohm untuk sistem proteksi petir. Evaluasi berkala mutlak diperlukan untuk memastikan sistem masih memenuhi standar keamanan dan kinerja ini.

Dampak kegagalan sistem proteksi petir tidak hanya terbatas pada kerusakan perangkat elektronik yang mahal di dalam shelter BTS (seperti rectifier, modem, dan server), tetapi juga dapat menyebabkan kebakaran, kerusakan struktural pada tower, dan yang paling fatal, membahayakan nyawa manusia. Oleh karena itu, sistem grounding yang efektif sebagai jalur aman untuk mengalirkan arus petir ke tanah merupakan komponen yang sangat vital.

Berdasarkan urgensi teknis dan regulasi di atas, penelitian ini dilakukan untuk melakukan evaluasi komprehensif terhadap sistem grounding existing pada Tower BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang. Evaluasi tidak hanya terbatas pada pengukuran resistansi, tetapi juga dilanjutkan dengan analisis komparatif melalui simulasi untuk membandingkan efektivitas dua metode proteksi petir yang umum digunakan. Dengan demikian, penelitian ini disusun dengan judul **“EVALUASI SISTEM GROUNDING DAN SIMULASI METODE PROTEKSI PETIR PADA TOWER BTS PT. TELKOM INDONESIA WILAYAH MAJAPAHIT”**.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kondisi dan tingkat kelayakan sistem grounding existing pada Tower BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit berdasarkan hasil pengukuran di lapangan dan perbandingannya dengan standar teknis yang berlaku?
2. Bagaimana performa efektivitas metode proteksi petir Faraday Cage (Sangkar Faraday) dibandingkan Franklin Rod (Batang Franklin) dalam mendistribusikan arus petir berdasarkan simulasi pada berbagai jenis kondisi tanah (basah, kering, dan berbatu) di lokasi penelitian?

1.3 Pembatasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus dan mencapai tujuan yang jelas, maka ruang lingkup permasalahan dibatasi sebagai berikut:

1. Objek penelitian adalah Tower *Base Transceiver Station* (BTS) PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang beserta perangkat pendukung di dalam shelter (seperti monitor, CCTV, dan sistem power supply).
2. Analisis sistem proteksi difokuskan pada komponen **sistem pentanahan (grounding)**. Penelitian meliputi evaluasi kinerja sistem existing dan simulasi kinerja dua metode penangkal petir eksternal, yaitu Faraday Cage dan Franklin Rod.
3. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan jenis kondisi tanah (**tanah basah, tanah kering, dan tanah berbatu**) untuk melihat pengaruhnya terhadap nilai resistansi dan distribusi arus.
4. Penelitian **tidak membahas** aspek desain dan analisis mendetail untuk komponen proteksi internal seperti surge arrester, shielding kabel, atau perangkat proteksi tegangan lebih (SPD) lainnya.

1.4 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah di atas, tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Mengevaluasi kelayakan dan keandalan sistem grounding pada Tower BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit berdasarkan data pengukuran resistansi pembumian dan kesesuaiannya standar teknis PUIL 2000 dan permen esdm 0045/2005
2. Membandingkan efektivitas metode proteksi petir Faraday Cage dan Franklin Rod dalam hal kemampuan mendistribusikan dan mengalirkan arus petir melalui simulasi pada tiga variasi kondisi tanah (basah, kering, dan berbatu).

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. **Bagi Penulis**, Sebagai penerapan ilmu pengetahuan teoritis yang diperoleh di bangku kuliah ke dalam pemecahan masalah teknik di dunia nyata, khususnya dalam bidang sistem proteksi dan pentanahan.
2. **Bagi Dunia Akademik**, dapat menjadi bahan referensi dan studi kasus tambahan bagi civitas akademika, khususnya dalam bidang teknik elektro, telekomunikasi, dan proteksi sistem, serta sebagai bahan perbandingan untuk penelitian sejenis di masa mendatang.
3. **Bagi Operator Telekomunikasi (PT.Telkom)**, memberikan rekomendasi teknis berdasarkan evaluasi data dan simulasi mengenai kondisi sistem grounding existing serta insight perbandingan metode proteksi, yang dapat dijadikan pertimbangan untuk kegiatan pemeliharaan, perbaikan, atau pengembangan sistem di masa depan.
4. **Bagi Masyarakat umum**, dapat menambah wawasan dan pemahaman mengenai pentingnya sistem pentanahan (grounding) yang tepat sebagai salah satu upaya mitigasi risiko bahaya sambaran petir, khususnya bagi struktur tinggi di sekitarnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan tugas akhir ini, sistematika penulisanya sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

berisi latar belakang, Rumusan permasalahan, Batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, keaslian penelitian, serta sistematika penulisan juga dijelaskan.

BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

memaparkan teori sistem pentanahan (grounding), jenis metode proteksi petir (Faraday Cage, Rolling Sphere, Franklin Rod). Hasil penelitian terdahulu dari jurnal dan laporan teknis diadaptasi sebagai referensi, termasuk kelebihan dan kekurangan masing-masing metode.

BAB III METODE PENELITIAN

Berisi tentang model penelitian, alat bahan yang digunakan bisa menggunakan software/hardware sebagai media pendukung, memberikan prosedur penelitian di lapangan, melakukan simulasi serta mendapatkan hasil dari suatu penelitian yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Bab ini menyajikan data hasil pengukuran resistansi grounding di BTS Majapahit: elektroda plat dan elektroda batang. Perhitungan teoritis, simulasi distribusi arus, dan Ground Potential Rise (GPR) dari metode Faraday Cage dan Franklin Rod pada berbagai kondisi tanah dianalisis. Perbandingan efektivitas dan kesesuaian dengan standar PUIL 2000 ($\leq 5 \Omega$) juga dibahas.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil pembahasan maupun perhitungan yang di peroleh kesimpulan dan saran yang akan mendukung laporan tugas akhir.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada penelitian yang dilakukan oleh [4], meneliti tentang sistem proteksi sambaran petir pada base transceiver station telkomsel karawang ada 2 macam proteksi, yang pertama adalah proteksi eksternal yang terdiri dari air terminal, down konduktor dan terminasi bumi. yang kedua adalah proteksi internal meliputi ekuipotensial bonding, shielding dan arrester sebagai proteksi dari tegangan lebih pada modul BTS. Maka didapatkan indeks perkiraan bahaya sambaran petir (R) adalah : R= Jumlah semua Indeks A s/d E hasil yang didapatkan adalah 15. Selanjutnya bandingkan hasil penjumlahan dengan Tabel VI Karena hasil yang didapat adalah 15 dan masuk kategori $R > 14$, itu berarti BTS telkomsel sangat memerlukan proteksi petir.

Penelitian yang dilakukan oleh [5] meneliti tentang Sistem Proteksi Petir Tower Telekomunikasi di Kantor MSC PT. Smartfren. dengan metode bounding bar, Ada 3 sistem proteksi yang dipasang pada tower BTS yaitu Terminasi Udara (Air Terminal), Kabel Penyalur (Down Conductor) dan Batang Elektroda (Grounding Rod). Dengan adanya sistem proteksi petir yang dipasang pada tower, perangkat akan terhindar dari sambaran petir secara langsung. hasil Berdasarkan analisis resiko, menara BTS yang memiliki ketinggian 72 meter yang terletak di MSC Mabar memiliki peluang tersambar petir $N_d = 3,814921$ /tahun. Dengan nilai efisiensi SPP sebesar = 0.84 atau 84 %, sehingga menara BTS memerlukan tingkat SPP minimum berada pada Level Proteksi Petir IV dengan nilai arus petir maksimum 100 kA. Adapun jarak sambar arus petir mencapai 223,124 meter dengan luas perlindungan sebesar 86.525,84 m². Adapun radius proteksi bola bergulir $R_1 = 166$ meter yang diukur dari titik nol menara BTS

dan $R_2 = 93,83$ meter yang diukur dari batas akhir R_1 . Adapun sudut perlindungan dari Air terminal adalah $\alpha = 71,26^\circ$

Pada penelitian yang dilakukan oleh [6] meneliti tentang Evaluasi Sistem Penggrounding Tower Base Transceiver Station Pada Pt. X dengan menggunakan pendekatan metode eksperimen dan metode kuantitatif. Kedua metode tersebut dipilih karena pada penelitian ini memerlukan data pengukuran berupa tahanan pentanahan Base Transceiver Station (BTS). hasil analisis data pengukuran dan perhitungan pentanahan penangkal petir berbentuk plat, pentanahan kaki tower dan shelter berbentuk batang dengan masing masing nilai tahanan pentanahan hasil pengukuran adalah $0,34\Omega$, $0,55\Omega$ dan $0,51\Omega$.

Penelitian yang dilakukan oleh [7], bertujuan untuk merancang sistem pentanahan di Gedung Pusat Komputer serta menganalisis kelayakan gedung dalam penggunaan sistem penangkal petir. Penelitian ini dilaksanakan di Gedung Pusat Komputer Universitas Negeri Manado dengan melakukan studi kasus dimana data akan dikumpulkan, diolah, dan dianalisa. Hasil penelitian menunjukkan tahanan tanah pada panel sebesar $4,71$ Ohm, tahanan tanah pada penangkal petir sebesar $3,10$ Ohm. Setelah dilakukan perancangan kembali dengan menggunakan 6 batang elektroda, baik untuk pentanahan penangkal petir dan peralatan didapatkan nilai $2,97$ Ohm. Hasil analisis mengenai seberapa pentingnya penggunaan penangkal petir di Gedung Pusat Komputer didapatkan nilai 14. Dari hasil tersebut disimpulkan bahwa sangat diperlukan sistem penangkal petir di Gedung Pusat Komputer.

Penelitian yang dilakukan oleh [8], Berdasarkan penelitian yang dilakukan diperoleh nilai tahanan grounding di Gedung Fakultas Ilmu Keolahragaan Universitas Negeri Padang menggunakan elektroda batang dengan diameter $5/8$ inch atau $0,0158$ m sebesar $27,5$ ohm dengan kedalaman elektroda $0,5$ meter dan pada kedalaman 1 meter didapatkan nilai pentanahan sebesar $16,21$ ohm. Rekomendasi pemasangan sistem grounding dengan metode multirod dapat digunakan pada Gedung Fakultas Ilmu

Keolahragaan Universitas Negeri Padang, yaitu memparalel tiga buah elektroda pada kedalaman 8 meter diperoleh nilai tahanan pentanahan.

2.2 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Pentanahan (*Grounding System*)

Sistem pentanahan (*grounding system*) adalah suatu rangkaian/jaringan mulai dari kutub pentanahan/elektroda, hantaran penghubung sampai terminal pentanahan yang berfungsi untuk menyalurkan arus lebih ke bumi, agar perangkat peralatan dapat terhindar dari pengaruh petir dan tegangan asing lainnya [9]. Tujuan utama pentanahan adalah menciptakan jalur yang tahanan rendah low impedance terhadap permukaan bumi untuk gelombang listrik dan transient voltage. Penerangan, arus listrik, circuit switching dan electrostatic discharge adalah penyebab umum dari adanya sentakan listrik atau transient voltage. Sistem pentanahan yang efektif akan meminimalkan efek tersebut. Tujuan sistem pentanahan [7]:

1. Membatasi besarnya tegangan terhadap bumi agar berada dalam batasan yang diperbolehkan.
2. Menyediakan jalur bagi aliran arus yang dapat memberikan deteksi terjadinya hubungan yang tidak dikehendaki antara konduktor sistem dan bumi. Deteksi ini akan mengakibatkan beroperasinya peralatan otomatis yang memutuskan suplai tegangan dari konduktor tersebut.
3. Mengamankan manusia terhadap bahaya arus bocor pada peralatan listrik.

Karakteristik sistem pentanahan yang efektif, yaitu:

1. Terencana dengan baik, semua koneksi yang terdapat pada sistem harus merupakan koneksi yang sudah direncanakan sebelumnya dengan kaidah tertentu.

2. Verifikasi secara visual dapat dilakukan.
3. Menghindarkan gangguan yang terjadi pada arus listrik dari perangkat.
4. Semua komponen metal harus ditahan oleh sistem pentanahan, dengan tujuan untuk meminimalkan arus listrik melalui material yang bersifat konduktif pada potensial listrik yang sama.

Sistem grounding yang paling baik untuk peralatan telekomunikasi adalah sistem grounding dengan elektroda tembaga karena konduktivitas tembaga yang tinggi. Tembaga memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, sehingga dapat digunakan dalam jangka panjang, terutama untuk menyalurkan arus petir dengan efektif.

1. Sistem Grounding Plat Tembaga
 - a. Sangat cocok untuk peralatan telekomunikasi yang sensitif terhadap gangguan listrik.
 - b. Elektroda tembaga digunakan karena memiliki konduktivitas yang sangat baik dan dapat menahan arus besar seperti petir.
2. Sistem Grounding Batang Tembaga

Digunakan pada area dengan tanah yang memiliki resistansi tinggi, seperti tanah berair dan berlumpur. Sistem ini juga efektif untuk menyalurkan arus dari sambaran petir secara vertikal ke dalam tanah.

2.1.2 Fungsi Sistem Pentanahan (*Grounding System*)

Pentanahan atau grounding adalah suatu sistem yang dirancang untuk menyediakan jalur konduktif untuk mengalirkan arus listrik berlebih ke tanah dengan tujuan melindungi manusia, peralatan, dan properti dari bahaya listrik. Fungsi utama pentanahan melibatkan pembuangan arus berlebih ke tanah untuk mencegah terjadinya tegangan berbahaya yang dapat menyebabkan kerusakan atau

bahkan membahayakan nyawa.[10] Tujuan dari sistem Pentanahan adalah sebagai berikut :

1. Pada sistem yang besar yang tidak ditanahkan, arus gangguan relatif besar sehingga busur listrik yang timbul tidak dapat padam dengan sendirinya, hal ini akan menimbulkan busur tanah, pada sistem yang ditanahkan gejala tersebut hampir tidak ada. Tegangan lebih surja hubung (switching over voltage) baik akibat operasi penutupan maupun operasi pembukaan saklar.
2. Untuk membatasi tegangan – tegangan pada fase – fase yang tidak terganggu (sehat).

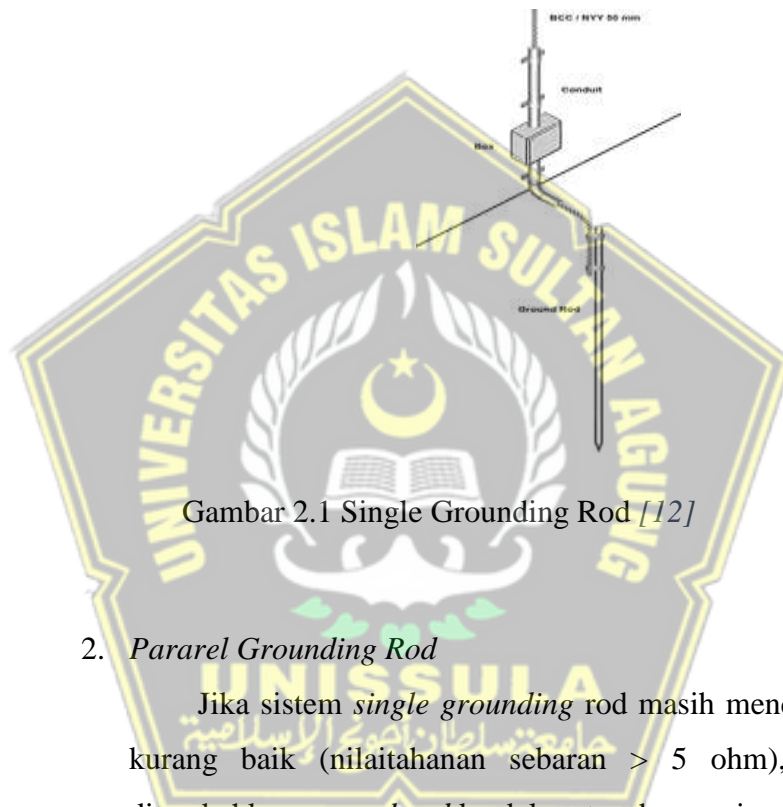
Sistem proteksi yang bertujuan untuk keselamatan antara lain pengamanan kejut dari listrik; pengaman dari efek termal; pengaman arus lebih; pengaman terhadap penggunaan tegangan lebih; gangguan sambaran petir; pengaman terhadap penggunaan tegangan kurang; pemisahan instalasi dan penggunaan sakelar dalam instalasi (BSN, 2000). Tujuan dari pengaplikasian sistem pembumian berdasarkan standard IEEE std 142-2007 yaitu berfungsi membatasi nilai dari besarnya tegangan terhadap tanah agar tetap berada dalam batasan standar yang digunakan serta dapat memberikan indikasi atau deteksi pada saat terjadinya hubung singkat antara isolator dan konduktor sehingga perlu disediakan jalur instalasi dengan baik.[11]

2.1.3 Bentuk Sistem Alat Pentanahan (*Grounding System*)

Ada beberapa macam sistem pembumian dapat dibuat dalam 3 bentuk yang sering di gunakan pada pemasangan sistem pentanahan (*grounding system*). Sistem pemasangan ini di gunakan sebagai alternatif untuk memperkecil nilai tahanan pentanahan seperti di bawah ini [12]:

1. *Single Grounding Rod*

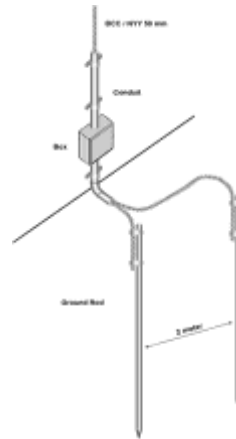
Grounding system yang hanya terdiri atas satu buah titik penancapan batang (*rod*) pelepas arus atau *ground rod* di dalam tanah dengan kedalaman tertentu (misalnya 6 meter). Untuk daerah yang memiliki karakteristik tanah yang konduktif, biasanya mudah untuk didapatkan tahanan sebaran tanah di bawah 5 ohm dengan satu buah *ground rod*.



Gambar 2.1 Single Grounding Rod [12]

2. *Pararel Grounding Rod*

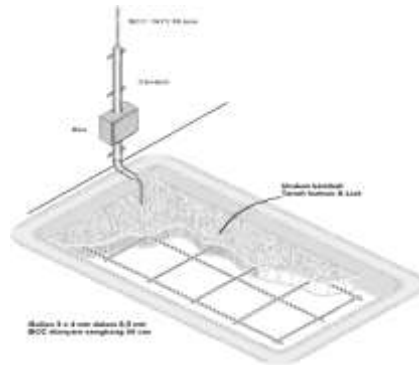
Jika sistem *single grounding rod* masih mendapatkan hasil kurang baik (nilaitahanan sebaran > 5 ohm), maka perlu ditambahkan *ground rod* ke dalam tanah yang jarak antar batang minimal 2 meter dan dihubungkan dengan kabel BC/BCC. Penambahan *ground rod* dapat juga ditanam mendatar dengan kedalaman tertentu, bisa mengelilingi bangunan membentuk cincin atau cakar ayam. Kedua teknik ini bisa diterapkan secara bersamaan dengan acuan tahanan sebaran/resistansi kurang dari 5 ohm setelah pengukuran dengan *earth ground tester*.



Gambar 2.2 Pararel Grounding Rod [12]

3. Multi Grounding System

Bila didapati kondisi tanah yang memiliki ciri yang jauh dari harapan maka cara yang digunakan adalah dengan penggantian tanah dengan tanah yang mempunyai sifat menyimpan air atau tanah yang kandungan mineral garam dapat menghantar listrik dengan baik, contoh gunakan tanah humus, tanah kotoran ternak atau tanah liat sawah, caranya: buatlah titik *rod* lebar kira-kira 2 inci, kemudian di isi penuh dengan tanah pengganti tadi lalu kemudian isi dengan air setelah itu *rod ground* dapat anda tancapkan. Untuk lebih baik lagi pada parit penghubung antar *rod ground* yang sudah terpasang kabel penghubung (BC) di uruk kembali dengan memakai tanah tadi. Hal ini dapat membantu memperkecil nilai tahanan pentanahan di karenakan tanah yang di gunakan sudah basah dan mengandung air dan dapat membuat tanah menjadi lembab.

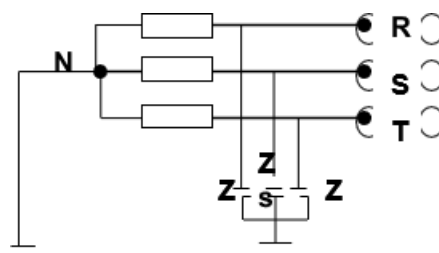


Gambar 2.3 Multi Grounding System [12]

2.1.4 Jenis Sistem Pentanahan

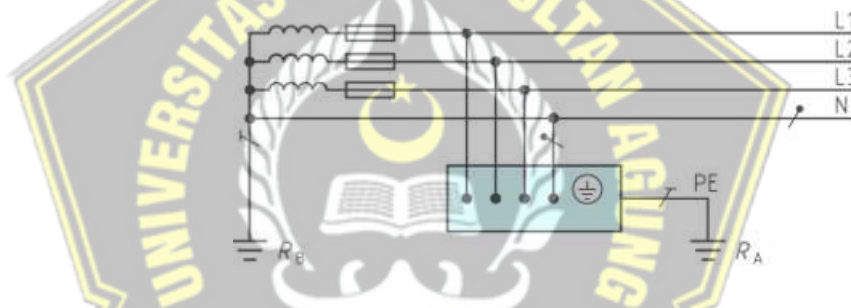
Sistem pentanahan yang sering di gunakan ada 2 jenis yaitu [8]:

1. Sistem TN atau sistem Pembumian Netral Pengaman (PNP)
Sistem TN dilakukan dengan cara menghubungkan semua perlengkapan/instalasi melalui penghantar proteksi ke titik sistem tenaga listrik yang dibumikan sedemikian rupa sehingga bila terjadi kegagalan isolasi tercegahlah bertahannya tegangan sentuh yang terlalu tinggi karena terjadinya pemutusan suplai secara otomatis dengan bekerjanya gawai proteksi. Umumnya titik sistem tenaga listrik yang dibumikan adalah titik netral. Pentanahan titik netral dari sistem tenaga merupakan suatu keharusan pada saat ini, karena sistem sudah demikian besar dengan jangkauan yang luas dan tegangan yang tinggi. Pentanahan titik netral ini dilakukan pada alternator pembangkit listrik dan transformator daya pada gardu-gardu induk dan gardu-gardu distribusi.



Gambar 2 4 Sistem Pentanahan Netral [8]

2. Sistem TT atau Sistem Pembumian Pengaman (sistem PP)
Sistem TT dilakukan dengan cara membumikan perlengkapan sehingga apabila terjadi kegagalan isolasi tercegahlah bertahannya tegangan sentuh yang terlalutinggi pada perlengkapan tersebut karena terjadinya pemutusan suplai secara otomatis dengan bekerjanya gawai proteksi. Pentanahan peralatan adalah pentanahan yang menghubungkan body/kerangka/bagian dari peralatan listrik terhadap ground (tanah). Sistem yang titik netralnya disambung langsung ke tanah, namun bagian-bagian instalasi yang konduktif disambungkan ke elektroda pentanahan yang berbeda (berdiri sendiri).



Gambar 2. 5 Sistem Pentanahan Peralatan [8]

2.1.5 Tahanan Jenis Tanah

Tahanan jenis tanah sangat menentukan tahanan pentanahan dari elektroda elektroda pentanahan. Tahanan jenis tanah diberikan dalam satuan Ohm-meter. Dalam bahasan di sini menggunakan satuan Ohm-meter, yang mempresentasikan tahanan tanah yang diukur dari tanah yang berbentuk kubus yang bersisi 1 meter. Yang menentukan tahanan jenis tanah ini tidak hanya tergantung pada jenis tanah saja melainkan dipengaruhi oleh kandungan moister, kandungan mineral yang dimiliki dan suhu (suhu tidak berpengaruh bila di atas titik beku air). Oleh karena itu, tahanan jenis tanah bisa berbeda-beda dari satu tempat dengan tempat yang lain tergantung

dari sifat-sifat yang dimilikinya. Sebagai pedoman kasar, tabel berikut ini berisikan tahanan jenis tanah yang ada di Indonesia.

Tabel 2. 1 Nilai Rata-Rata Tahanan Jenis Tanah [9]

Jenis Tanah	Resistansi jenis tanah ρ_t dalam ohm-m
Tanah rawa	10 ... 40
Tanah liat dan tanah ladang	20 ... 100
Pasir basah	50 ... 200
Kerikil basah	200 ... 3000
Pasir/kerikil kering	< 10000
Tanah berbatu	2000 ... 3000
Air laut dan air tawar	10 100

Nilai-nilai tersebut pada Tabel 2.1 seluruhnya berlaku untuk tanah lembab sampai basah. Pasir kering mutlak atau batu adalah suatu bahan isolasi yang bagus, sama seperti air destilasi. Maka elektrode bumi selalu harus ditanam sedalam mungkin dalam tanah, sehingga dalam musim kering selalu terletak dalam lapisan tanah yang basah. Untuk mencapai nilai tahanan sebaran tersebut, tidak semua area bisa terpenuhi karena ada beberapa aspek yang mempengaruhinya yaitu :

1. Jenis dan Kelembaban Tanah, Tanah lempung memiliki resistivitas lebih rendah dibandingkan pasir atau berbatu. Selain itu, kondisi tanah basah dapat menurunkan resistansi pentanahan hingga lebih dari 30% dibanding tanah kering [13]
2. Konfigurasi dan Kedalaman Elektroda, Semakin dalam elektroda ditanam dan semakin luas permukaannya (misalnya dengan menambah jumlah batang atau membuat konfigurasi grid), maka tahanan sebaran cenderung menurun [14].

3. Kondisi Lingkungan / Adiktif, Penambahan bahan seperti arang + garam (NaCl) atau gypsum terbukti efektif mengurangi resistansi pentanahan hingga memenuhi standar $\leq 5 \Omega$. Persentase penurunan mencapai 69–74% tergantung bahan dan kedalaman pemasangan [15].

Tahanan jenis tanah bervariasi dari 500 sampai 50.000 Ohm per cm³. Kadang-kadang harga ini dinyatakan dengan harga Ohm per cm. Untuk mengubah komposisi kimia tanah dapat dilakukan dengan memberikan garam pada tanah dekat elektroda pembedaan dengan maksud mendapatkan tahanan jenis tanah yang rendah. Cara ini hanya baik untuk sementara sebab penggaraman harus dilakukan secara periodik, sedikitnya 6 (enam) bulan sekali. Dengan memberi air atau membasahi tanah juga mengubah tahanan jenis tanah. Harga tahanan jenis tanah pada kedalaman yang terbatas sangatlah tergantung dengan keadaan cuaca. Untuk mendapatkan tahanan jenis tanah rata-rata, maka diperlukan suatu perencanaan maka diperlukan penyelidikan atau pengukuran dalam jangka waktu yang tertentu misalnya selama 1 (satu) tahun.

Biasanya tahanan jenis tanah juga tergantung dari tingginya permukaan air yang konstan. Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim, pembedaan dapat dilakukan dengan menanamkan elektroda pembedaan mencapai kedalaman dimana terdapat air yang konstan. Penanaman memungkinkan kelembaban dan temperatur bervariasi, harga tahanan jenis tanah harus diambil pada keadaan yang paling buruk, yaitu tanah kering dan dingin. Hal ini dikarenakan nilai tahanan pada tanah kering cukup tinggi.

2.1.6 Elektroda Pentanahan

Suatu sistem pentanahan menjadi bagian esensial dari sistem tenaga listrik untuk mencegah potensi bahaya listrik terhadap

manusia dan peralatan maupun. Elektroda ditanam di dalam tanah dengan tujuan untuk mempercepat penyerapan muatan listrik akibat sambaran petir, arus bocor, hubung singkat ataupun tegangan lebih ke dalam tanah. Pada prinsipnya jenis elektroda dipilih yang mempunyai kontak sangat baik terhadap tanah Terdapat 3 macam elektroda pentanahan yaitu bentuk batang (*rod*), bentuk pita (kisi-kisi), dan bentuk pelat.

2.1.7 Elektroda Batang (*Rod*)

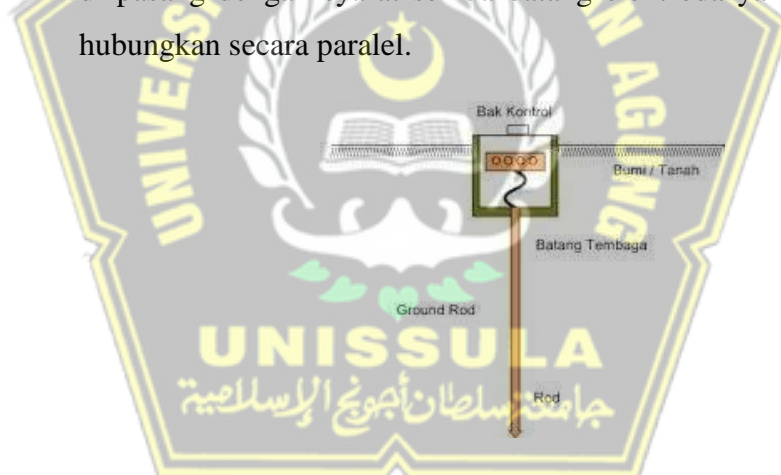
Elektroda batang ialah elektroda dari pipa atau besi baja profil yang dipancangkan ke dalam tanah. Elektroda ini merupakan elektroda yang pertama kali digunakan dan teori-teori berawal dari elektroda jenis ini. Elektroda ini banyak digunakan di gardu induk-gardu induk. Elektroda batang ini pada umumnya juga dipasang pada instalasi rumah tinggal. Elektroda ini berupa pipa besi, baja profil, atau batang logam lainnya yang dipancangkan ke tanah. Biasanya pada bahan logam tersebut dilapisi dengan lapisan tembaga. Secara teknis, elektroda batang ini mudah pemasangannya, yaitu tinggal memancangkannya ke dalam tanah. Di samping itu, elektroda ini tidak memerlukan lahan yang luas. Panjang elektroda batang ini yang disyaratkan dalam PUIL 2000 adalah 1,75 m.

Dalam pemasangan elektroda batang di usahakan setegak lurus mungkin, dengan tujuan agar dicapai kedalaman yang maksimum, dimana diharapkan terdapat lapisan tanah dengan tahanan jenis yang cukup rendah. Dalam perhitungan diasumsikan batang tertanam tegak lurus, sehingga kedalaman elektroda tertanam sama dengan panjangnya batang yang ditanam. Besarnya tahanan pentanahan elektroda batang tergantung pada kedalaman batang yang tertanam, tetapi ada kalanya dengan menggunakan sebuah elektroda batang saja tidak tercapai nilai tahanan pentanahan yang diinginkan, sehingga dalam pemasangannya sering digunakan beberapa elektroda batang yang dihubungkan satu dengan yang lainnya. Elektroda

batang ini ditanam dengan kedalaman antara 1 – 10 meter. Jika susunan batang-batang elektroda yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah dalam jumlah yang lebih banyak, maka tahanan pentanahan akan semakin kecil dan distribusi tegangan pada permukaan tanah akan lebih merata. Ada beberapa macam penanaman elektroda batang yaitu [16]:

1. Satu batang elektroda di tanam tegak lurus ke dalam tanah.
2. Dua batang elektroda di tanam tegak lurus ke dalam tanah.
3. Beberapa batang elektroda di tanam tegak lurus ke dalam tanah dan di hubungkan secara paralel.

Semakin banyak elektroda batang yang ditanam semakin kecil pula nilai tahanan yang akan di peroleh pada sistem pentanahan yang di pasang dengan syarat semua batang elektroda yang di tanam di hubungkan secara paralel.



Berdasarkan penelitian oleh [17], terdapat beberapa metode yang digunakan untuk menurunkan nilai tahanan pentanahan pada elektroda batang tunggal, antara lain:

1. Penggunaan campuran Arang dan Garam (SIGARANG)
 - a. Campuran ini ditempatkan di sekitar elektroda batang tunggal untuk meningkatkan konduktivitas tanah.
 - entonit adalah material berbasis tanah liat yang memiliki
 - b. Arang berfungsi sebagai bahan penyimpan kelembaban, sedangkan garam menurunkan resistivitas tanah.

- c. Metode ini mampu menurunkan tahanan secara signifikan pada tanah dengan resistivitas tinggi.
2. Penggunaan Bentonit Teraktivasi
 - a. Bentonit adalah jenis lempung yang memiliki daya serap air tinggi. Dalam bentuk teraktivasi, daya serap dan konduktivitasnya meningkat
 - b. Dituangkan di sekitar batang tanah untuk mempertahankan kelembaban dan memperbaiki kontak batang-tanah.
3. Penambahan Kedalaman Penanaman Batang
 - a. Meningkatkan kedalaman batang elektroda memperluas area kontak dengan tanah yang lebih lembab dan konduktif.
 - b. Tanah pada kedalaman lebih rendah umumnya memiliki resistivitas yang lebih kecil.tahanan.
4. Meningkatkan luas permukaan kontak (misalnya lubang lebar + media tambahan)
 - a. selain menambah panjang batang, pelebaran lubang penanaman dan pengisian dengan media konduktif (misalnya pasir basah + garam, bentonit cair) dapat meningkatkan efektivitas batang tunggal.
5. Perawatan sekitar batang
Menjaga kelembaban tanah di sekitar batang, misalnya dengan pengairan berkala atau sistem penampung air hujan.
6. Metode kombinasi.

Metode di atas sering di lakukan untuk memperoleh nilai pentanahan yang baik dan nilai tahanan yang kecil sehingga dapat mengamankan peralatan listrik jika terjadi gangguan seperti arus bocor dan sambaran petir. Rumus tahanan pentanahan untuk elektroda batang tunggal [9]:

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \ln\left(\frac{4L}{d}\right) \dots\dots\dots(2.1)$$

R_g = Tahanan pentanahan untuk batang tunggal (Ohm)

ρ = Tahanan jenis tanah (Ohm-meter)

L = Panjang elektroda (meter)

d = Diameter elektroda (meter)

ln = Logaritma natural

Untuk memperkecil tahanan pembedaan maka digunakan persamaan hubung paralel dengan jarak antara elektroda tersebut minimum harus dua kali panjangnya dapat di hitung dengan rumus berikut [18]:

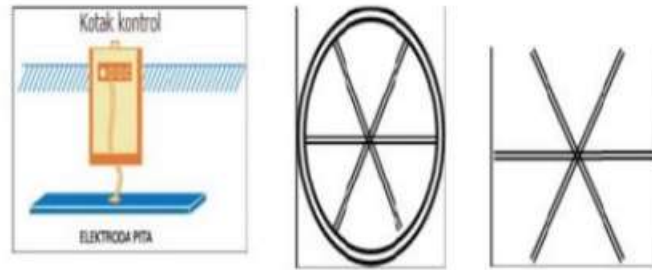
$$R_{total} = \frac{R_{rod}}{n} \text{ (jika jarak antar elektroda } \geq 2 \times \text{ panjang elektroda) } \dots\dots\dots(2.2)$$

R_{total} = Tahanan satu elektroda

n = jumlah elektroda paralel

2.1.8 Elektroda Pita

Elektroda pita ialah elektroda yang terbuat dari hantaran berbentuk pita atau berpenampang bulat atau hantaran pilin yang pada umumnya ditanam secara dangkal. Kalau pada elektroda jenis batang, pada umumnya ditanam secara dalam. Pemancangan ini akan bermasalah apabila mendapati lapisan-lapisan tanah yang berbatu, disamping sulit pemancangannya, untuk mendapatkan nilai tahanan yang rendah juga bermasalah. Ternyata sebagai pengganti pemancangan secara vertikal ke dalam tanah, dapat dilakukan dengan menanam batang hantaran secara mendatar (horizontal) dan dangkal. Elektroda pita dibuat dari penghantar berbentuk pita atau penampang bulat, atau penghantar pilin yang pada umumnya ditanam secara dangkal. Tahanan pentanahan yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh bentuk konfigurasi elektrodanya, seperti dalam bentuk melingkar, radial atau kombinasi antar keduanya.



Gambar 2. 6 Elektroda Pit [19]

Contoh rumus perhitungan tahanan pentanahan[20]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{a} \right) + \frac{1.4Lw}{\sqrt{Aw}} - 1 \right] \dots\dots\dots(2.3)$$

R = Tahanan pentanahan (Ohm)

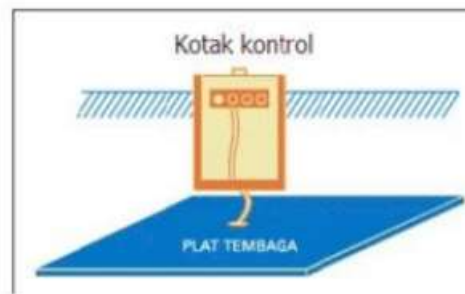
ρ = Resistivitas tanah (Ohm-meter)

L = Panjang elektroda yang tertanam (meter)

a = Diameter elektroda (meter)

2.1.9 Elektroda Pelat

Elektroda pelat adalah elektroda dari bahan pelat. Elektroda ini digunakan bila diinginkan tahanan pentanahan yang kecil dan sulit diperoleh dengan menggunakan jenis – jenis elektroda yang lain. Pada umumnya elektroda ini ditanam cukup lumayan dalam di dalam tanah. Bentuk elektroda plat biasanya empat persegi atau empat persegi panjang. Cara penanaman biasanya secara vertical, sebab dengan menanam secara horizontal hasilnya tidak berbeda jauh dengan vertical. Penanaman secara vertical adalah lebih praktis dan ekonomis.



Gambar 2. 7 Elektroda Pelat [19]

Contoh Rumus tahanan pentanahan (ground resistance) untuk elektroda plat horizontal yang tertanam dalam tanah: [20]:

$$R_g = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \text{ (Formula Dwight) } \dots\dots\dots(2.4)$$

Atau untuk plat persegi :

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi\sqrt{A}} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \ln \frac{4\sqrt{A}}{t} \right)$$

R = Tahanan pentanahan pelat (Ohm)

ρ = Tahanan jenis tanah (Ohm-meter)

t = Ketebalan pelat (m)

a = Panjang sisi plat bujur sangkar (m), jika plat berbentuk persegi (jika plat tidak persegi, gunakan $a = \sqrt{A}$, dimana A adalah luas plat)

2.10. Rumus Resistansi Grounding

1. Resistansi Rata-rata

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$$

2. Standar Deviasi Resistansi

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}$$

3. Koefisien Variasi

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{R}} \times 100\%$$

2.1.10 Elektroda Jenis Lain

Selain ketiga elektroda pentanahan diatas yaitu elektroda batang, elektroda pita, dan elektroda plat, ada juga jenis elektroda lain yang biasa digunakan sebagai elektroda pentanahan pada peralatan listrik seperti jaringan pipa air minum dan selubung logam kabel.

1. Jaringan Pipa Air Minum

Jika jaringan pipa air minum dari logam dipakai sebagai electrode bumi, maka harus diperhatikan bahwa resistans pembumiannya dapat menjadi besar akibat digunakannya pipa sambungan atau flens dari bahan isolasi. Resistans pembumian yang terlalu besar harus diturunkan dengan menghubungkan jaringan tersebut dengan elektrode tambahan (misalnya selubung logam kabel). Jika pipa air minum dari logam dalam rumah atau gedung dipakai sebagai penghantar bumi, ujung pipa kedua sisi meteran air harus dihubungkan dengan pipa tembaga yang berlapis timah dengan ukuran minimum 16 mm², atau dengan pita baja digalvanisasi dengan ukuran minimum 25 mm² (tebal pita minimum 3 mm).

2. Selubung Logam Kabel

Selubung logam kabel yang tidak dibungkus dengan bahan isolasi yang langsung ditanam dalam tanah boleh dipakai sebagai

elektroda bumi. Jika selubung logam tersebut kedua sisi sambungan yang dihubungkan dengan selubung logam tersebut dan luas penampang penghantar itu minimal sebagai berikut:

- a. 4 mm^2 tembaga untuk kabel dengan penampang inti sampai 6 mm^2 .
- b. 10 mm^2 tembaga untuk kabel dengan penampang inti 10 mm^2 atau lebih.

2.1.11 Material Pemasangan Sistem Pentanahan

Pada saat akan merencanakan pemasangan sebuah sistem pentanahan ada beberapa peralatan dan komponen yang harus di persiapkan diantaranya elektroda pentanahan, kabel *grounding*, clamp kabel, panel busbar, dan skun kabel. Perlengkapan peralatan yang di gunakan pada saat pemasangan instalasi hampir sama dengan peralatan yang di gunakan pada pemasangan instalasi listrik penerangan. Adapun alat kerja yang akan di gunakan pada saat memasang instalasi sistem grounding yaitu tang kombinasi, tang potong, gergaji besi, bor tangan, martil, skun press, dan lainnya. Pada saat pemasangan instalasi gunakan bahan dan peralatan sesuai dengan fungsi nya masing masing.

1. Elektroda (*Rod*)

Jenis elektroda pembumian berkaitan dengan tahanan jenis elektroda tersebut. Misalkan elektroda berbahan dasar aluminium dibandingkan dengan elektroda berbahan dasar tembaga yang memiliki luas penampang dan panjang yang sama. Nilai tahanan elektroda aluminium makan lebih besar dibandingkan dengan elektroda berbahan dasar tembaga. Karena tahanan jenis aluminium lebih besar banding tahanan jenis tembaga. Kedalaman kedalaman elektroda dan luas penampang elektroda semakin dalam elektroda tertanam dan semakin besar luas penampang elektroda yang bersentuhan dengan tanah sehingga

nilai tahanan pembumian akan semakin kecil karena semakin besar permukaan yang bersentuhan dengan tanah.



Gambar 2. 8 Elektroda Pentanahan

Tingkat kehandalan sebuah *grounding* ada di nilai konduktivitas logam terhadap tanah yang ditancapinya. Semakin konduktif tanah terhadap benda logam, maka semakin baik. Kelayakan *grounding* harus bisa mendapatkan nilai tahanan sebaran maksimal 5 ohm (PUIL 2000 : 68) dengan menggunakan *earth ground tester*. Ada beberapa variabel yang dapat memengaruhi performa *grounding* sistem pada jaringan listrik. Salah satu yang menjadi acuan, yaitu panjang elektroda *grounding* sistem minimum 2,5 meter (8 kaki) dihubungkan dengan tanah. Ada empat variabel yang memengaruhi tahanan *grounding* sistem. Adapun empat variabel tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Panjang/Kedalaman Elektroda, satu cara yang sangat efektif untuk menurunkan tahanan tanah adalah memperdalam elektroda. Tanah tidak tetap tahanannya dan tidak dapat diprediksi. Maka dari itu, ketika memasang elektroda, elektroda berada di bawah garisbeku (*frosting line*). Ini dilakukan sehingga tahanan tanah tidak akan dipengaruhi oleh pembekuan tanah di sekitarnya. Secara umum,

menggandakan panjang elektroda bisa mengurangi tingkat tahanan 40%.

- b. Diameter Elektroda, menambah diameter elektroda berpengaruh sangat kecil dalam menurun kantahanan. Misalnya, bila diameter elektroda digandakan, maka tahanan *grounding system* hanya menurun sebesar 10%.
- c. Cara lain menurunkan tahanan tanah adalah dengan menggunakan banyak elektroda. Dalam desain ini, lebih dari satu elektroda yang dimasukkan ke dalam tanah dan dihubungkan secara paralel untuk mendapatkan tahanan yang lebih rendah. Beberapa zat aditif yang ditambahkan di dalam tanah terbukti mampu menurunkan tahanan jenis tanah dan secara langsung akan menurunkan tegangan permukaan tanah. Beberapa jenis garam yang secara alamiah terkandung di dalam tanah cenderung bersifat konduktif dan menurunkan tahanan jenis tanahnya. Penambahan aditif harus diperhitungkan cermat karena beberapa aditif pada dosis tertentu cenderung bersifat korosif yang sangat dihindari dalam sistem pentanahan. Berikut ini adalah tabel yang memuat ukuran elektroda yang umum di gunakan pada sistem pbumian. Tabel 2.2 dapat di gunakan sebagai petunjuk tentang pemilihan jenis, bahan, dan luas penampang elektroda pbumian.

Tabel 2. 2 Luas Penampang Minimum Elektroda Pbumian

Jenis Elektroda	Bahan		
	Baja Berlapis Seng	Baja Berlapis Tembaga	Tembaga
Elektroda	Pipa baja 1 “	Baja Ø15 mm	

Batang	Profil L 65X65X7, U 6 ½ T6 X 5 x 30	di lapsi tembaga 25 mm	
Elektroda Pita	Pita baja di lapsi 100 mm, tebal 3 mm, hantaran pilin 59 mm ²	50 mm ²	Pita tembaga 50 mm ² , tebal 2 mm.hantaran pilin 35 mm
Elektroda Pelat	Pelat besi 3 mm, Luas 0,5 – 1 mm ²		Pelat tembaga 2 mm, Luas 0,5 – 1 mm ²

Untuk mendapatkan tahanan pembumian yang di inginkan dan apabila tidak memenuhi standart bisa di gunakan metode paralel dengan cara menambah lebih banyak elektroda di dalam tanah. Apabila hasil pengukuran belum mencapai 5 Ω , maka elektroda batang di tambah dengan jarak antar elektroda dua kali panjang elektroda. Untuk kedalaman pemancangan elektroda pembumian ini tergantung jenis dan sifat tanah. Ada dua kondisi yaitu ada yang efektif di tanam secara dalam untuk jenis tanah kering dan berbatu, namun ada pula secara dangkal untuk jenis tanah seperti tanah rawa dan tanah liat.

2. Kabel Grounding

Pada kabel grounding memiliki ciri khas yaitu kabel warna hijau atau kuning strip hijau. Ketentuan warna kabel grounding ini diatur dalam PUIL 2011 yaitu Konduktor pembumian harus diberi warna hijau-kuning sesuai dengan 5210.2 Warna loreng hijau-kuning hanya boleh digunakan untuk menandai konduktor

pembumian, konduktor proteksi, dan konduktor yang menghubungkan ikatan ekuipotensial ke bumi. Kabel grounding merupakan kawat penghantar yang di gunakan untuk menyalurkan arus gangguan langsung ketanah pada saat terjadinya gangguan arus bocor. Berikut ini adalah contoh warna kabel yang di gunakan untuk grounding.



Gambar 2. 9 Kabel Grounding

Kabel merupakan komponen utama dari instalasi penangkal petir yang memiliki fungsi sebagai media penghantar arus petir yang menyambar air terminal penangkal petir yang berada di atas menuju sistem grounding yang telah tersedia. Sehingga arus petir dapat mengalir dan cepat ternetralkan oleh tanah yang sebagaimana diketahui sebagai media netral alam. Macan macam kabel penghantar penangkal petir pada umumnya, yaitu (Fathudin et al., 2017):

a. Kabel BC (*Bare Core*)

Kabel BC ialah tidak memiliki isolator. Jadi jenis kabel ini hanya terdiri dari inti kabel saja yang disebut *bare core*. Kabel BC tidak memiliki isolator pelindung, sehingga dikhawatirkan terjadi induksi sambaran petir dan loncatan

arus pada material konduktor. Jadi agar aman, maka kabel BC sebaiknya dibungkus dengan pipa (PVC).



Gambar 2. 10 Kabel BC (Bare Core)

b. Kabel NYY

Kabel NYY ialah memiliki dua buah isolator. Isolator pada kabel berfungsi melindungi dari induksi dan loncatan arus antara inti kabel dengan material lain dengan sifat konduktor penangkal petir (penghantar). Untuk ukuran yang sering dipergunakan dalam suatu sistem pemasangan instalasi penangkal petir yaitu ukuran penampang 25 mm^2 .



Gambar 2. 11 Kabel NYY

c. Kabel NYA

Kabel NYA ialah memiliki satu buah isolator (hal ini bisa dilihat dari kode YA yang ada pada kabel). Isolator pada kabel berfungsi melindungi dari induksi dan loncatan arus

antara inti kabel dengan material lain dengan sifat konduktor (penghantar).



Gambar 2. 12 Kabel NYA

d. Kabel Coaxial

Kabel coaxial ialah memiliki banyak isolator, konduktor inti kabel coaxial terdapat dua buah yang masing-masing memiliki luas penampang 35 mm. Karakter kabel coaxial sama seperti kabel NYFGbY. Isolator pada kabel berfungsi melindungi dari induksi dan loncatan arus antara inti kabel dengan material lain dengan sifat konduktor (penghantar).

2.1.12 Earth Tester

Earth Tester adalah alat untuk mengukur nilai resistansi dari grounding, Besarnya tahanan tanah sangat penting untuk diketahui sebelum dilakukan pentanahan dalam sistem pengamanan dalam instalasi listrik Ground resistance adalah nilai tahanan yang dimiliki tanah untuk menerima loncatan listrik dari suatu perangkat atau petir, ground resistance yang baik adalah di bawah 5 Ohm. Dan salah satu alat yang dapat kita gunakan untuk mengukur nilai ground resistance ialah *earth tester*, earth tester merupakan *measurement equipment* yang terdiri dari beberapa display dan socket untuk pengukuran, pada umumnya terdiri dari tiga socket terminal : E = Earth Plate P = Potential Spike C = Current Spike [21].



Gambar 2. 13 Earth Tester [9]

Jadi terminal E dihubungkan dengan terminal *ground* yang akan kita ukur, lalu terminal P ditanam membentuk garis lurus dari terminal earth plate (E) sejauh 5 meter dan terminal C segaris lurus dengan terminal E dan P, jaraknya 5 meter dari terminal P. Konfigurasi telah selesai, lalu tekan tombol hunting (*push on*) maka akan tertera nilai hasil pengukuran pada display itulah yang merupakan nilai tahanan ground yang ada.

1. Bagian-Bagian *Earth Tester* 4105a

Earth tester memiliki dua jenis yaitu analog dan digital. Untuk memudahkan pembacaan hasil pengukuran lebih praktis menggunakan alat ukur yang digital karena memiliki hasil pengukuran dan hasil pembacaan yang lebih akurat. *Earth Tester* 4105a memiliki bagian bagian dan fungsi sebagai berikut:



Gambar 2. 14 Bagian-Bagian *Earth Tester* 4105a

- a. LCD (Display), Pada display ini akan muncul hasil pengukuran berupa angka digital. Hasil pengukuran yang di

proleh akan tercatat nilai dan di belakang nilai akan tertera simbol Ω (Ohm).

- b. Lampu LED Hijau (Lampu Indikator), lampu ini berfungsi sebagai lampu tanda. Pada saat tombol “test” ditekan lampu ini akan menyala yang menandakan alat ukur sedang bekerja melakukan pengukuran nilai pentanahan.
- c. Tombol Test, tombol ini berfungsi sebagai tombol yang harus di tekan pada saat akan melakukan pengukuran nilai pentanahan. Ketika tombol ini di tekan maka akan muncul angka hasil pengukuran pada display dan ketika tombol di lepas maka nilai yang tertera pada display akan jadi 0. Untuk mengunci hasil pengukuran maka tombol di tekan lalu memutar searah jarum jam hingga 90 derajat.
- d. Skala Pengukuran, skala pengukuran yang terdapat pada alat ukur adalah 20 Ω , 200 Ω , 2000 Ω . Pada saat akan melakukan pengukuran arahkan selector switch ke nilai 20 Ω jika nilai pentanahan yang akan di ukur dibawah 20 Ω . Skala pengukuran harus lebih besar dari nilai yang akan di ukur hal ini bertujuan untuk keakuratan hasil pengukuran.
- e. *Selector Switch, selector switch* ini berfungsi untuk memilih skala pengukuran yang akan di gunakan pada saat akan melakukan pengukuran nilai pentanahan.
- f. Kabel Hijau merupakan kabel bantu yang digunakan pada saat pengukuran. Kabel ini terhubung langsung ke kabel grounding yang di ukur nilai pentanahan nya dan ujung satunya tersambung ke alat ukur.



Gambar 2. 15 Kabel Hijau Earth Tester

- g. Kabel Kuning berfungsi sebagai kabel yang terhubung ke elektroda bantu yang jarak nya 5 – 10 meter dari titik elektoda bantu yang menggunakan kabel kuning dan ujung kabel ini tersambung ke alat ukur.



Gambar 2. 16 Kabel Merah Earth Tester

- h. Elektroda Bantu, digunakan sebagai elektroda bantu pada akan di lakukan pengukuran nilai pentanahan. Elektoda bantu yang pertama di tancapkan dengan jarak 5 – 10 meter dari titik penanaman elektoda utama . Elektoda bantu yang kedua di tancapkan dengan jarak 5 – 10 meter dari titipenanaman elektoda bantu yang pertama.



Gambar 2. 17 Elektroda Bantu

2.3 Data Lokasi dan Kondisi Tanah di Lokasi BTS

Penelitian ini dilakukan di lokasi Base Transceiver Station (BTS) STO Majapahit milik PT. Telekomunikasi Indonesia Tbk, yang berlokasi di wilayah Majapahit, Semarang. Sistem grounding pada lokasi ini dirancang untuk mengatasi frekuensi petir yang tinggi guna melindungi perangkat dari lonjakan arus listrik atau kerusakan akibat petir. Penelitian mencakup pengukuran pada tanah berair, kering, dan berbatu untuk menilai pengaruh kondisi tanah terhadap resistansi grounding.

Kondisi tanah di area ini beragam. Penelitian dilakukan pada tanah berair, kering, dan berbatu untuk memeriksa seberapa besar pengaruh kondisi tanah terhadap nilai resistansi grounding. Tanah basah umumnya memberikan nilai resistansi yang lebih rendah, sedangkan tanah kering atau berbatu memiliki nilai resistansi lebih tinggi karena sifatnya yang kurang konduktif. Faktor-faktor ini diperhatikan untuk memastikan bahwa sistem grounding dapat bekerja optimal dalam berbagai kondisi tanah.

2.3.1 Radius Proteksi dan Luas Sambaran Petir

Dalam penelitian ini, metode *Rolling Sphere* digunakan untuk menghitung radius proteksi petir. Metode ini menghitung perlindungan dengan cara memodelkan petir sebagai bola besar yang menggelinding di permukaan tanah, sehingga area yang tidak tersentuh bola ini dianggap aman dari sambaran petir. Berdasarkan ketinggian tower sekitar 50 meter, radius proteksi yang dihasilkan adalah 45 meter, yang berarti bahwa area sejauh 45 meter dari menara BTS berada dalam zona perlindungan dari sambaran petir. Luas sambaran petir ini diperoleh dengan rumus dasar luas lingkaran, pada persamaan 2.11, maka luas perlindungan sambaran petir diperoleh:

$$A = \pi \cdot R^2$$

$$A = \pi \cdot (45)^2$$

$$A = 3.1416 \cdot 2025$$

$$A = 6361.725 \text{ m}^2$$

Hasil perhitungan luas sambaran petir yang mencapai sekitar 6,362 m² memastikan bahwa seluruh area di sekitar menara terlindungi dengan baik. Metode ini ideal untuk menara BTS yang tinggi dan memerlukan radius proteksi yang luas, sehingga dapat diandalkan untuk melindungi perangkat dari risiko sambaran petir.

2.3.2 Metode Perlindungan

Metode perlindungan petir yang digunakan pada tower BTS bisa dipilih berdasarkan beberapa faktor, seperti ketinggian tower, luas area yang harus dilindungi, serta kondisi lingkungan sekitar. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah Metode *Rolling Sphere*. Metode ini cocok untuk melindungi struktur seperti tower BTS yang memiliki ketinggian lebih dari 50 meter, karena mampu menentukan radius perlindungan yang realistis. Metode *Rolling Sphere* menggunakan model geometri untuk memperkirakan zona perlindungan berdasarkan ketinggian tower dan

radius proteksi. Radius proteksi yang dihitung sebelumnya untuk tower setinggi 50 meter adalah 45 meter.

2.3.3 Metode Proteksi Petir

Dalam penelitian ini, metode proteksi petir yang digunakan adalah Metode *Rolling Sphere*. Metode ini dipilih karena cocok untuk tower yang tinggi dan area perlindungan yang luas. Metode ini dapat memberikan gambaran yang akurat mengenai zona proteksi di sekitar BTS.

2.3.4 Tahanan Pembumian

Berdasarkan pengukuran di lapangan, nilai tahanan pembumian yang diukur pada BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang adalah 0,5 - 0,6 Ohm. Nilai ini sudah berada di bawah standar 5 Ohm yang ditetapkan oleh PUIL 2000, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem grounding sudah memenuhi standar untuk melindungi BTS dari sambaran petir.

2.4 Dasar Sistem Perlindungan Petir

Dalam sistem proteksi petir, dikenal dua metode utama yang banyak digunakan, yaitu sistem Franklin Rod dan Faraday Cage. Keduanya memiliki prinsip kerja yang berbeda serta tingkat perlindungan yang juga berbeda. Oleh karena itu, untuk menentukan sistem mana yang lebih baik digunakan, kita perlu membandingkan beberapa aspek teknis dari masing-masing sistem, termasuk nilai resistansi konduktor, jenis bahan yang digunakan (tembaga atau aluminium), serta kondisi tanah di mana sistem tersebut dipasang.

Franklin Rod adalah sistem proteksi petir yang bekerja dengan cara menarik sambaran petir ke satu titik tertentu, biasanya pada ujung batang logam yang dipasang di atap bangunan. Dari titik ini, arus petir dialirkan ke tanah melalui kabel konduktor. Namun, sistem ini hanya memberikan perlindungan pada area tertentu saja, yang dibatasi oleh sudut perlindungan dari batang

tersebut, sudut perlindungan dari sistem Franklin adalah 2,32 derajat, yang berarti area perlindungannya cukup terbatas dan sangat tergantung pada ketinggian batang dan lokasi pemasangannya.

Sementara itu, Faraday Cage bekerja dengan cara menyelimuti seluruh struktur bangunan dengan jaringan konduktor. Jaringan ini dapat berupa kawat atau batang logam yang disusun membentuk kerangka di sekitar bangunan. Ketika terjadi sambaran petir, arus listrik akan tersebar secara merata ke seluruh bagian jaringan, kemudian dialirkan ke tanah melalui beberapa jalur. Karena arus tidak terkonsentrasi pada satu titik saja, sistem ini memberikan perlindungan yang lebih merata dan menyeluruh kepada seluruh bangunan, termasuk bagian dalamnya yang mengandung perangkat elektronik sensitive. Selain metode Faraday Cage, pendekatan fundamental lainnya dalam proteksi petir adalah Metode Bola Bergulir (Rolling Sphere Method)

Rolling Sphere (Bola Bergulir) Method adalah sebuah pendekatan geometris untuk menentukan zona proteksi pada struktur yang kompleks, terutama yang memiliki bentuk atap tidak beraturan atau ketinggian yang bervariasi. Metode ini didasarkan pada Electrogeometric Model (EGM). Teori EGM menyatakan bahwa titik sambaran petir ditentukan oleh jarak sambar (striking distance), yaitu jarak antara ujung leader yang bergerak ke bawah dari awan dengan objek di tanah pada saat sambaran akhir terjadi.

Dalam praktiknya, metode ini dibayangkan dengan menggulingkan sebuah bola imajiner dengan radius tertentu di atas dan di sekeliling struktur. Radius bola ini tidak sembarangan; ia ditentukan oleh besarnya arus puncak petir yang diantisipasi. Semakin besar arus petir, semakin besar radius bola tersebut. Aturan dasarnya adalah: semua titik pada struktur yang tersentuh

$$Q = I_{peak} \times t = 100 \text{ kA} \times 100 \text{ } \mu\text{s} = 10 \text{ Coulomb} \dots \dots \dots (2.6)$$

Jadi, muatan arus petir yang dihitung adalah 10 Coulomb.

3. Kecuraman Arus Petir

Kecuraman arus petir adalah laju perubahan arus dalam waktu singkat.

Dengan waktu naik t_r sebesar 10 μs , kecuraman arus dihitung sebagai:

$$\frac{di}{dt} = \frac{I_{peak}}{t_r} = \frac{100 \text{ kA}}{10 \text{ } \mu\text{s}} = 10^7 \text{ A/s} \dots \dots \dots (2.7)$$

Kecuraman arus yang dihitung adalah 10^7 A/s .

4. Luas Sambaran Petir

Luas sambaran petir dapat dihitung menggunakan metode Rolling Sphere, dengan radius perlindungan yang dihitung berdasarkan ketinggian tower. Untuk tower setinggi 50 meter, radius perlindungan sekitar 45 meter.

$$A = \pi \times R^2 = \pi \times (45)^2 = 6,362 \text{ m}^2 \dots \dots \dots (2.8)$$

Luas sambaran petir yang dihitung adalah 6,362 m^2 .

5. Luas Penampang Kabel

A adalah luas penampang kabel (mm^2)

I adalah arus maksimum (A)

k adalah konduktivitas arus kabel tembaga (A/mm^2).

$$A = \frac{100,000}{8} = 12,500 \text{ mm}^2 \dots \dots \dots (2.10)$$

4.6. Rumus Metode Proteksi Petir

1. Rolling Sphere Method

$$R = h \cdot k$$

Keterangan:

R = Radius zona proteksi (m)

h = Tinggi struktur (m)

k = Faktor proteksi (0.9 sesuai IEC 62305)

2. Ground Potential Rise (GPR)

Metode Franklin Rod:

$$GPR_F = I_p \cdot \left(R_g + \frac{\rho}{\sqrt{\pi}} \right)$$

Metode Faraday Cage:

$$GPR_{FC} = I_p \cdot \left(\frac{R_g}{2} + \frac{\rho}{2\sqrt{\pi}} \right)$$

Keterangan:

GPR = Ground Potential Rise (V)

I_p = Arus puncak petir (A)

R_g = Resistensi Grounding (Ω)

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

3. Efektivitas Faraday Cage vs Franklin Rod

$$Efektivitas = \frac{GPR_F - GPR_{FC}}{GPR_F} \times 100\%$$

4.7. Rumus Tegangan Bahaya

1. Tegangan Step (Step Voltage)

$$V_{step} = I_p \cdot K_s \cdot \rho$$

Dengan:

$$K_s = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r + \Delta x} \right)$$

Atau untuk pendekatan praktis:

$$V_{step} = \frac{I_p \cdot \rho}{2\pi r}$$

2. Tegangan Touch (Touch Voltage)

$$V_{touch} = I_p \cdot (R_g + K_t \cdot \rho)$$

Dengan:

$$K_t = \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{2L}{d} \right)$$

Keterangan :

r = Jarak dari titik grounding (m)

Δx = Panjang langkah (biasanya 1 m)

L = Panjang elektroda (m)

4.8. Rumus Arus Petir

1. Bentuk Gelombang Arus Petir (Double Exponential)

$$I(t) = I_0 \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

Dengan:

$$\alpha = \frac{1}{\tau_1}, \beta = \frac{1}{\tau_2}$$

Keterangan:

I_0 = Arus puncak (A)

τ_1 = Konstanta waktu naik (10 μ s)

τ_2 = Konstanta waktu turun (350 μ s)

t = Waktu (s)

2. Tegangan Respons Sistem

$$V(t) = I(t) \cdot R_g + L \cdot \frac{dI(t)}{dt}$$

Keterangan:

L = Induktansi sistem (H)

$\frac{dI(t)}{dt}$ = Turunan arus terhadap waktu

4.9. Rumus Perhitungan Konduktor

1. Luas Penampang Minimum Konduktor

$$A_{min} = \frac{I_p}{k}$$

Keterangan:

1. A{min} = Luas penampang minimum (mm²)
2. k = Konduktivitas tembaga (8 A/mm² untuk grounding)

2. Diameter Konduktor

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

4.10. Rumus Statistik

1. Korelasi Pearson

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

2. Signifikasi Korelasi (P-value)

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, \text{ dengan } df = n - 2$$

4.11. Rumus Geometri Zona Proteksi

1. Persamaan Lingkaran Rolling Sphere

$$x^2 + y^2 = R^2$$

Atau dalam koordinat parametrik:

$$\begin{cases} x = R \cdot \cos \theta \\ y = R \cdot \sin \theta \end{cases} \text{ dimana } 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

2. Tinggi Proteksi Efektif

$$h_p = R - \sqrt{R^2 - d^2}$$

Keterangan:

- h_p = Tinggi proteksi efektif (m)
- d = Jarak horizontal dari struktur (m)

4.12. Rumus Daya Terdissipasi

1. Energi Petir

$$E = \int_0^T V(t) \cdot I(t) dt$$

2. Daya Puncak

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max}$$

4.13. Rumus Resistansi Tanah

1. Konversi Resistivitas-Konduktivitas

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

2. Resistivitas Equivalent untuk Lapisan

$$\rho_{eq} = \frac{\sum h_i}{\sum \frac{h_i}{\rho_i}}$$

4.14. Rumus Faktor Koreksi

1. Faktor Musim (Seasonal Factor)

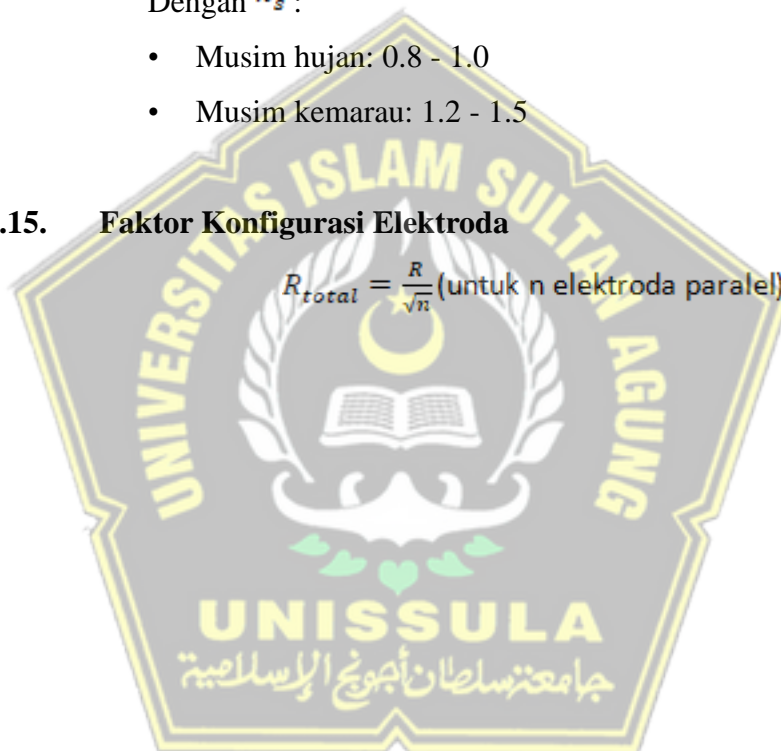
$$R_{norm} = R_{ukur} \cdot k_s$$

Dengan k_s :

- Musim hujan: 0.8 - 1.0
- Musim kemarau: 1.2 - 1.5

4.15. Faktor Konfigurasi Elektroda

$$R_{total} = \frac{R}{\sqrt{n}} \text{ (untuk n elektroda paralel)}$$

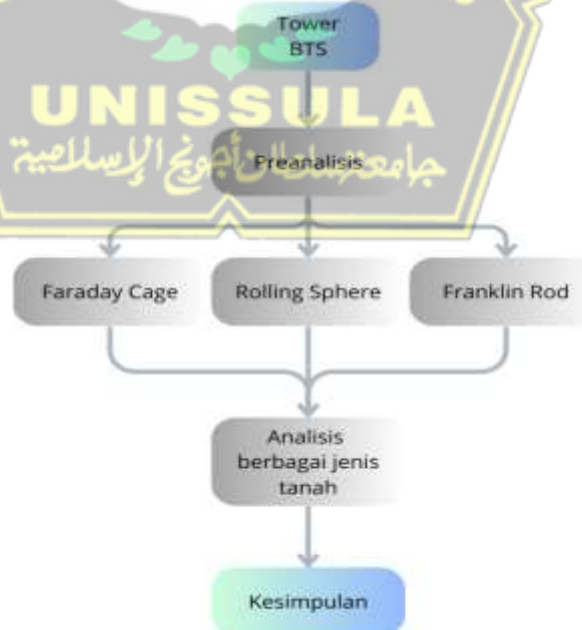


BAB III

METODE PENELITIAN DAN PERANCANGAN

3.1 Pendahuluan

Dalam penelitian ini, metodologi yang digunakan adalah pendekatan **campuran** (*mixed method*) yang menggabungkan metode **eksperimental lapangan** (*field experiment*) dan **simulasi numerik** (*numerical simulation*). Metode eksperimental digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem grounding existing, sedangkan simulasi numerik diterapkan untuk menganalisis efektivitas komparatif metode proteksi petir Faraday Cage dan Franklin Rod. Pendekatan ini dipilih untuk memastikan data yang diperoleh bersifat empiris sekaligus didukung oleh analisis teoretis berbasis model. Metodologi ini dirancang untuk menghasilkan data primer yang akurat dari pengukuran langsung dan analisis berbasis model guna memberikan rekomendasi teknis yang berbasis bukti (evidence-based) dan sesuai dengan standar yang berlaku.



Gambar 3. 1 Sistem Model

3.2 Input Data dan Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini, data dan variabel yang digunakan meliputi:

1. Data Input Utama:

- a. Lokasi tower BTS: Titik-titik tower yang dijadikan objek pengukuran sistem grounding.
- b. Ketinggian tower: Tinggi tower BTS dari permukaan tanah yang berpengaruh terhadap risiko sambaran petir.
- c. Nilai resistansi grounding: Hasil pengukuran resistansi grounding pada masing-masing tower menggunakan alat Earth Tester atau Ground Resistance Tester.
- d. Resistansi tanah: Nilai resistivitas tanah di sekitar tower yang diukur atau diestimasi berdasarkan kondisi lapangan.
- e. Curah hujan: Data curah hujan di lokasi penelitian yang mempengaruhi kadar kelembaban tanah dan resistansi grounding.
- f. Kondisi fisik grounding: Data mengenai jenis dan kedalaman elektroda grounding, material grounding, serta kondisi sambungan dan instalasi grounding.
- g. Karakteristik lingkungan: Jenis tanah, kondisi kelembaban, dan faktor lingkungan lain yang dapat memengaruhi resistansi tanah.
- h. Standar teknis acuan: Nilai batas aman resistansi grounding dan prosedur pengukuran sesuai SNI, IEEE, dan IEC.

2. Variabel Penelitian

a. Variabel Bebas (independent Variables):

- Jenis konfigurasi Elektroda (Pelat dan batang)
- Kondisi Tanah: Dimanipulasi dalam simulasi menjadi tiga skenario: basah (wet), kering (dry), dan berbatu (rocky) dengan nilai resistivitas tanah (ρ) yang berbeda.

- Jenis Metode Proteksi Petir Eksternal: Faraday Cage vs. Franklin Rod (untuk simulasi).
- b. Variabel Terikat (Dependent Variables):
- Nilai Resistansi Pentanahan (R_g): Hasil pengukuran langsung di lapangan (dalam Ohm).
 - Efektivitas Sistem Proteksi: Ditentukan berdasarkan kesesuaian R_g dengan standar PUIL ($<5 \Omega$) dan hasil simulasi distribusi arus/potensialtingkat efektivitas perlindungan petir pada tower BTS.
- c. Variabel Kontrol (Control Variables):
- Metode pengukuran (3-point Fall of Potential).
 - Alat ukur yang digunakan (Earth Tester Kyoritsu 4105A).
 - Jarak antar elektroda bantu saat pengukuran.
 - Parameter arus petir standar yang digunakan dalam simulasi (misal: 100 kA, 10/350 μ s atau 8/20 μ s).

3.3 Proses Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut

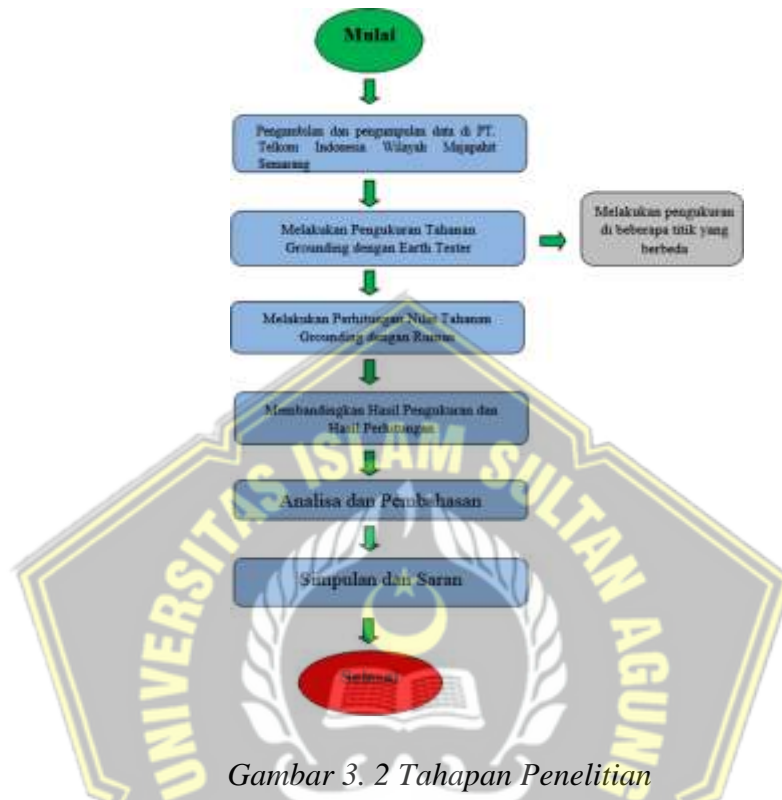
1. Studi Literatur dan Standar Teknis
Melakukan kajian pustaka terkait sistem grounding, proteksi petir, metode Rolling Sphere, Model Faraday Cage, serta standar teknis yang berlaku seperti SNI, IEEE, dan IEC. Kajian ini bertujuan untuk menentukan parameter perlindungan petir dan prosedur evaluasi sistem grounding yang tepat.
2. Penentuan Lokasi dan Persiapan Alat
Menentukan lokasi tower BTS yang akan menjadi objek penelitian dan mempersiapkan alat ukur resistansi grounding (Earth Tester) serta peralatan pendukung lainnya.

3. Pengumpulan Data Lapangan
 - a. Melakukan pengukuran nilai resistansi grounding pada setiap tower BTS menggunakan Earth Tester sesuai prosedur standar.
 - b. Mengukur resistivitas tanah di sekitar tower menggunakan metode yang sesuai.
 - c. Mencatat data ketinggian tower, kondisi elektroda grounding (jenis, kedalaman, material), kondisi lingkungan seperti curah hujan terbaru dan jenis tanah.
 - d. Melakukan inspeksi visual terhadap instalasi grounding untuk mengetahui kondisi sambungan dan potensi kerusakan.
4. Evaluasi Sistem Proteksi Petir dengan Metode Rolling Sphere dan Model Faraday Cage
 - a. Menerapkan metode Rolling Sphere untuk menentukan zona perlindungan terhadap sambaran petir pada tower BTS, dengan memodelkan radius bola yang menggulung untuk menilai titik rawan sambaran petir.
 - b. Menganalisis sistem grounding dan struktur tower menggunakan konsep Model Faraday Cage untuk memastikan bahwa sistem grounding dapat membentuk perisai listrik yang efektif, sehingga arus petir dapat mengalir dengan aman ke tanah tanpa merusak peralatan telekomunikasi.

3.4 Tahapan Penelitian

Berikut metode penelitian yang dilakukan pada penelitian ini. Kegiatan penelitian ini dilakukan dari mulai menyiapkan alat ukur (*earth tester*), membuat rancangan skema pengukuran, mengatur jarak pengukuran dan kedalaman elektroda yang tertanam, mencatat hasil pengukuran dan menganalisa hasil pengukuran. Penelitian ini bersifat eksperimental, pengukuran dilakukan pada BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang untuk jenis tanah berair, tanah kering dan

tanah berbatu. Sebagai langkah untuk memudahkan melakukan penelitian dan pengambilan data, maka di bawah ini adalah alur untuk pengambilan data yang akan dilakukan.



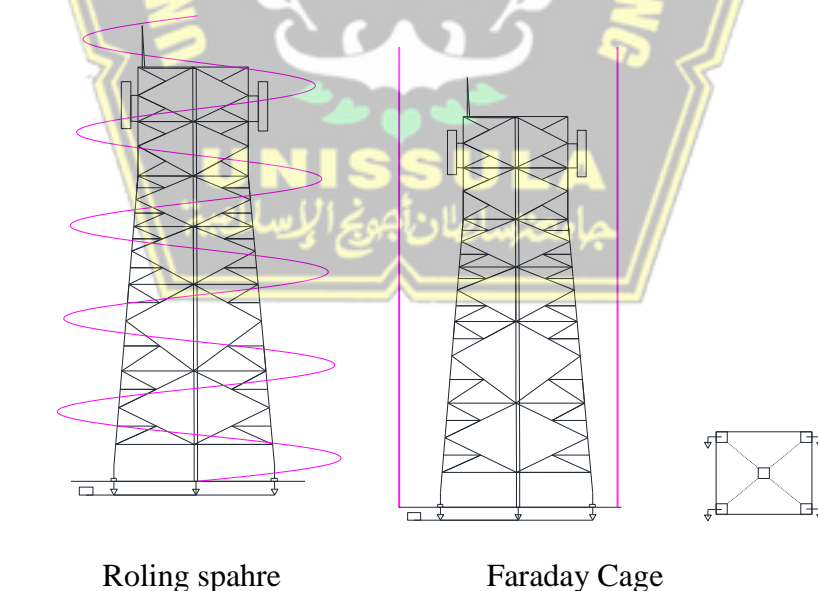
Gambar 3. 2 Tahapan Penelitian

3.5 Objek Penelitian

Objek penelitian adalah Tower Base Transceiver Station (BTS) PT. Telkom Indonesia yang terletak di Jl. Majapahit, Gemah, Kec. Pedurungan, Kota Semarang. Fokus penelitian adalah pada **sistem pentanahan (grounding)** yang terpasang. Di lokasi ini terdapat dua jenis konfigurasi elektroda grounding yang dipasang pada area dengan karakteristik tanah berbeda:

1. Sistem Grounding dengan Elektroda Pelat Tembaga
 - Spesifikasi: Pelat tembaga berukuran 1 m x 1 m x 1 cm.
 - Kedalaman Penanaman: 2 meter.
 - Jumlah dan Konfigurasi: 5 titik elektroda dengan jarak antar titik 5-10 meter.

- Jenis Tanah Lokal (Estimasi Awal): Tanah liat dengan resistivitas jenis (ρ) estimasi 100 Ωm .
 - Fungsi: Sistem grounding utama untuk shelter dan perangkat BTS.
2. Sistem Grounding dengan Elektroda Batang Tembaga (Ground Rod):
- Spesifikasi: Batang tembaga diameter 5/8 inchi (16 mm), panjang 4 meter.
 - Kedalaman Penanaman: 4 meter.
 - Jumlah dan Konfigurasi: 2 titik elektroda dengan jarak 5 meter.
 - Jenis Tanah Lokal (Estimasi Awal): Area lebih lembab (mendekati rawa) dengan resistivitas jenis (ρ) estimasi 30 Ωm .
 - Fungsi: Sistem grounding tambahan atau untuk perangkat tertentu.



Gambar 3. 3 Simulasi Sederhana Tower Jika Menggunakan Perlindungan Rolling Sphere

3.6 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan untuk melakukan pengukuran pada obyek penelitian, yaitu:

Tabel 3. 1 Alat dan Bahan Penelitian

No	Nama Alat/Bahan	Spesifikasi	Jumlah	Keterangan
1.	Earth Tester (Megger)	Model 4105a	1	Untuk mengukur resistansi pembumian
2.	Elektroda bantu (Auxiliary Rods)	Besi/Baja	2	Elektroda arus(C2) Dan Potensial (P2)
3.	Kabel pengukuran	1.5 mm, panjang 15m (merah), 10m (kuning). 5m (hijau)	15	Penghubung antar elektroda
4.	Software simulasi	ETAP, CDEGS, ATAU MATLAB /Simulink	1 Lisensi	Untuk simusalsi metoday faraday cage dan franklin Rod
5.	Multimeter Digital	-	1	Pemeriksaan awal kontiunitas
6.	Palu /Martil	1kg	1	Memasang elektroda batu
7.	Meteran	25m / 82 ft	1	Mengatur jarak atar elektroda
8.	Laptop	-	1	Pengelohan data simulasi
9.	Alat tulis	-	1 set	Dokumentasi data lapangan
10.	Kamera Digital	-	1	Dokumentasi visual kondisi instalasi

3.7 Alur Penelitian dan Prosedur Pengumpulan Data dan Eksperimen

Penelitian ini bertujuan untuk mengukur dan mengevaluasi sistem grounding di BTS PT. Telkom Indonesia dengan berbagai jenis elektroda dan kondisi tanah (tanah berair, kering, dan berbatu). Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan alat ukur resistansi grounding dan perbandingan hasilnya dengan standar yang berlaku.

a. Tahap Awal Penelitian

Penelitian diawali dengan tahap mulai, kemudian dilanjutkan dengan studi literatur dan perencanaan. Pada tahap ini peneliti mengumpulkan referensi teori, standar yang digunakan (seperti PUIL), serta merancang metode penelitian yang akan dilakukan.

b. Pengukuran Lapangan (Tujuan 1)

Tahap ini bertujuan untuk mengetahui kondisi sistem grounding yang sudah ada di lapangan, meliputi:

- Pengukuran resistansi grounding existing
Dilakukan pengukuran nilai tahanan pentanahan menggunakan alat ukur grounding resistance tester.
- Inspeksi visual dan dokumentasi
Mengamati kondisi fisik sistem grounding serta mendokumentasikan instalasi yang ada.
- Analisis data lapangan dan standar PUIL
Data hasil pengukuran dibandingkan dengan standar yang berlaku untuk menilai kesesuaian sistem.
- Evaluasi kelayakan sistem existing
Jika layak, maka sistem dinyatakan memenuhi standar, Jika tidak layak, dilakukan identifikasi penyebab serta diberikan rekomendasi perbaikan.

c. Simulasi Numerik (Tujuan 2)

Pada tahap ini dilakukan pemodelan dan analisis menggunakan software simulasi, dengan langkah:

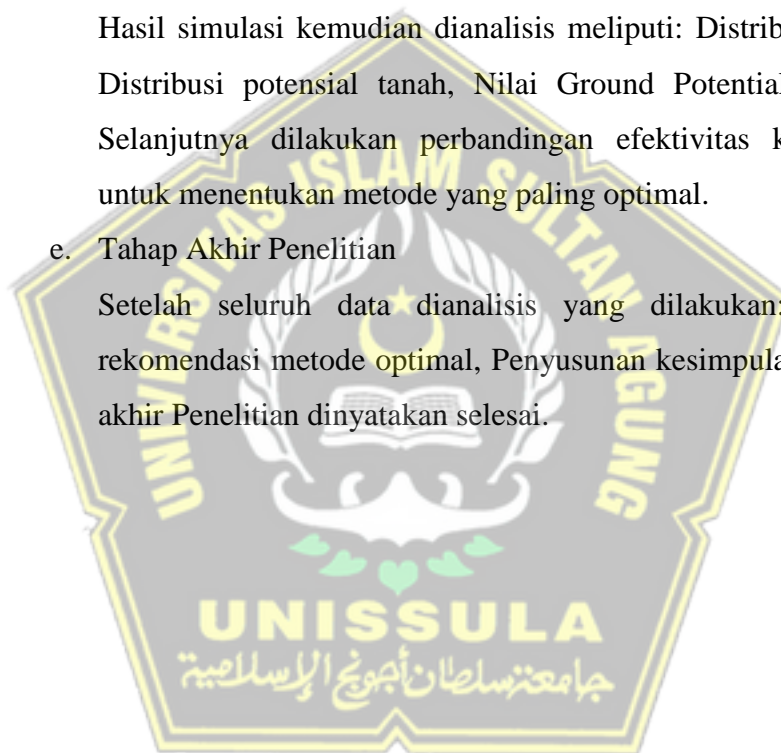
- Pemodelan sistem dalam software
Sistem pentanahan dimodelkan sesuai kondisi nyata.
- Definisi skenario kondisi tanah
Simulasi dilakukan pada beberapa kondisi tanah: Tanah basah, Tanah kering, Tanah berbatu.
- Simulasi metode proteksi petir Dilakukan dua metode, yaitu: Metode Franklin Rod, Metode Faraday Cage.

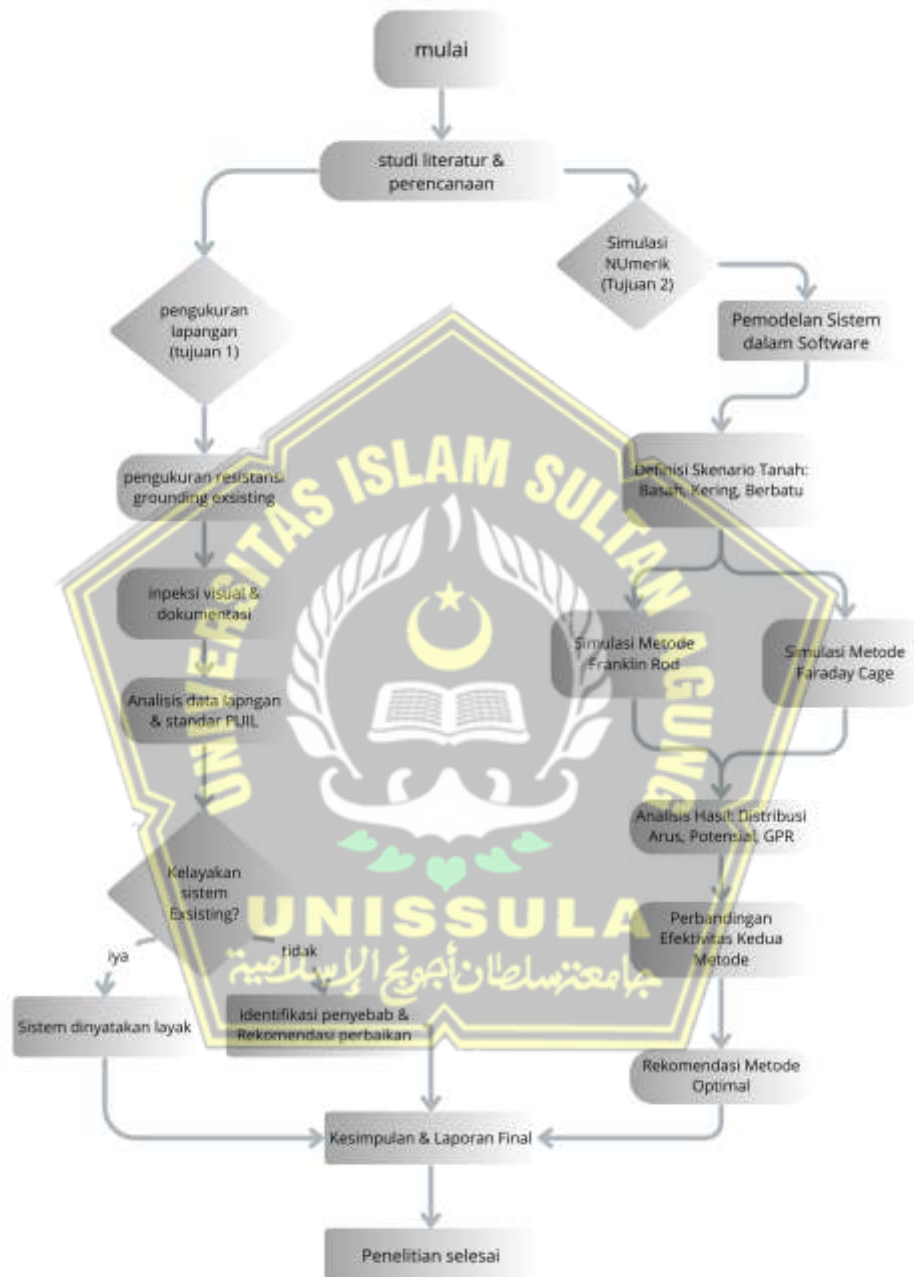
d. Analisis Hasil Simulasi

Hasil simulasi kemudian dianalisis meliputi: Distribusi arus petir, Distribusi potensial tanah, Nilai Ground Potential Rise (GPR) Selanjutnya dilakukan perbandingan efektivitas kedua metode untuk menentukan metode yang paling optimal.

e. Tahap Akhir Penelitian

Setelah seluruh data dianalisis yang dilakukan: Penyusunan rekomendasi metode optimal, Penyusunan kesimpulan dan laporan akhir Penelitian dinyatakan selesai.





Gambar 3. 4 Diagram Alur

A. Evaluasi Sistem Grounding Existing (Tujuan 1)

1. Persiapan:

- Kalibrasi dan pengecekan alat Earth Tester.
- Identifikasi semua titik pengukuran (Test Point) pada kedua sistem (pelat dan batang).

2. Pengukuran Resistansi Penumbumian (Metode 3-Point/ Fall of Potential):

- Lepaskan sambungan sistem grounding dari perangkat (jika memungkinkan dan aman).
- Tancapkan elektroda bantu C2 (arus) dan P2 (potensial) pada jarak yang sesuai (biasanya 62% dari panjang elektroda utama) dari elektroda under test (E).
- Hubungkan kabel dari Earth Tester: Hijau ke E, Kuning ke P2, Merah ke C2.
- Lakukan pengukuran dan catat nilai resistansi (R_g).
- Ulangi pengukuran pada semua titik yang telah ditentukan.

3. Pengukuran Resistivitas Tanah (Metode Wenner):

Dilakukan di sekitar lokasi BTS untuk mendapatkan data aktual ρ tanah sebagai input simulasi.

4. Inspeksi Visual dan Dokumentasi:

- Kondisi fisik elektroda, konduktor, dan sambungan (konektor, las exothermic).
- Ada/tidaknya korosi, kerusakan mekanis, atau longgarnya sambungan.
- Dokumentasi foto seluruh sistem.

B. Simulasi Metode Proteksi Petir (Tujuan 2)

1. Pemodelan Awal:

Membuat model geometri tower BTS, struktur shelter, dan jaringan grounding existing di dalam software simulasi (misal, ETAP).

2. Definisi Parameter Simulasi:

- Sumber Arus Petir: Digunakan bentuk gelombang standar (misal, 8/20 μ s atau 10/350 μ s) dengan level arus puncak sesuai kajian risiko lokasi (misal, 100 kA).
- Skenario Tanah: Tiga nilai resistivitas tanah (ρ) ditetapkan untuk mewakili kondisi:
 - **Basah:** ρ rendah (contoh: 10-50 Ω m).
 - **Kering:** ρ sedang-tinggi (contoh: 100-300 Ω m).
 - **Berbatu:** ρ sangat tinggi (contoh: >1000 Ω m).

3. Simulasi dan Analisis:

- **Model Franklin Rod:** Simulasi sambaran petir langsung pada titik tunggal (air terminal) dan distribusi arus melalui down conductor ke sistem grounding.
- **Model Faraday Cage:** Simulasi dengan multiple air terminal yang dihubungkan membentuk sangkar, distribusi arus melalui multiple down conductor, dan analisis kerapatan proteksi.
- **Parameter Output yang Dianalisis:** Nilai Ground Potential Rise (GPR), distribusi tegangan step & touch, kerapatan arus pada elektroda, dan waktu respons sistem.

3.8 Teknik Analisa Data

1. **Analisis Deskriptif Kuantitatif:** Untuk data hasil pengukuran Rg. Nilai rata-rata, minimum, dan maksimum akan dihitung dan disajikan dalam tabel/grafik.

2. Analisis Komparatif:

Tujuan 1: Membandingkan nilai Rg hasil pengukuran dengan batas maksimal standar PUIL 2000 (5ohm). Konklusi kelayakan (Layak/ Tidak Layak) diambil berdasarkan perbandingan ini.

Tujuan 2: Membandingkan hasil simulasi antara metode Faraday Cage dan Franklin Rod pada setiap skenario tanah. Parameter perbandingan utama adalah GPR dan distribusi tegangan step/touch. Metode dengan nilai GPR lebih rendah dan distribusi tegangan lebih merata dianggap lebih efektif.

3. Analisis Kualitatif:

Digunakan untuk menginterpretasi hasil inspeksi visual (kondisi korosi, koneksi) dan menghubungkannya dengan hasil pengukuran Rg jika di temukan ketidaksesuaian.

3.9 Output yang Diharapkan

1. Laporan Evaluasi Sistem Existing: *Berisi nilai aktual Rg, status kelayakan berdasarkan PUIL, dan dokumentasi foto kondisi fisik.*

2. Data Karakteristik Tanah Aktual: Nilai resistivitas tanah (ρ) dari pengukuran di lokasi.

3. Hasil Simulasi Numerik: Grafik dan tabel yang menunjukkan performa (GPR, distribusi tegangan) dari metode Faraday Cage dan Franklin Rod pada tiga jenis tanah.

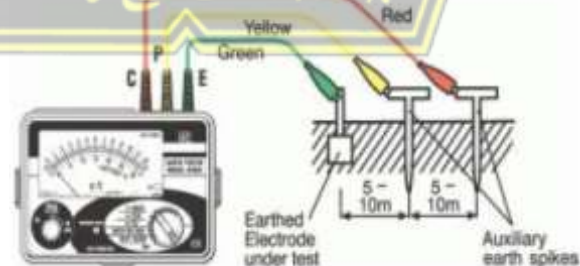
4. Rekomendasi Teknis: Berdasarkan temuan di atas rekomendasi dapat berupa: Jika sistem existing layak: Rekomendasi pemeliharaan rutin. Jika sistem existing tidak layak: Rekomendasi perbaikan spesifik (misal, penambahan elektroda, chemical grounding). Rekomendasi metode proteksi optimal: Berdasarkan

simulasi, metode mana (Faraday Cage atau Franklin Rod) yang lebih disarankan untuk kondisi tanah di lokasi penelitian beserta alasannya secara teknis.

3.10 Langkah Penelitian

Untuk mendapatkan data-data hasil pengukuran dilakukan beberapa langkah langkah berikut:

1. Tahap awal pengukuran diawali dengan persiapan seluruh peralatan dan bahanyang diperlukan
2. Kondisi baterai alat ukur dinyatakan baik apabila pada tampilan layar Digital Earth Tester Kyoritsu 4105A tidak muncul indicator baterai lemah.
3. Kondisi kabel grounding BC yang akan diukur. Bila kotor bersihkan dahulu permukaan kabel tersebut dengan lap bersih / kertas amplas, agar jepitan kabel probe dapat menyentuh langsung bagian permukaan tembaga yang sudah bersih dan untuk mencegah terjadinya kesalahan pembacaan pada alat ukur.
4. Alat ukur *Earth Tester* mempunyai tiga kabel diantaranya adalah kebel berwarna merah, kuning dan hijau.
5. Jarak antar elektroda bantu minimal 5 meter dan maksimal 10 meter.



Gambar 3. 5 Cara Memasang Elektroda Bantu

6. Kabel hijau dihubungkan pada sistem grounding yang telah terpasang

7. Pengukuran grounding (tahanan pembumian) dengan memutar Selector Switch alat ukur pada posisi 200 Ohm atau 2000 Ohm tergantung dari kondisi tanah pada area setempat yang akan diukur.
8. Nilai Resistansi grounding diperoleh dengan menekan tombol “PRESS TO TEST” pada Earth Tester untuk mengetahui resistansi grounding pada displai alat ukur akan muncul nilai tahanan pembumian
9. Nilai tahanan pembumian yang dtampilkan pada layar alat ukur dicatat sebagai data hasil pengukuran.
10. Setelah proses pengukuran selesai, tombol “PRESS TO TEST” dikembalikan ke posisi awal.
11. Dengan demikian, nilai resistansi grounding pada titik pengukuran yang diuji telah diperoleh.

Berikut adalah tabel titik pengukuran grounding yang perlu dilakukan untuk mengukur resistansi tanah di sekitar BTS:

Tabel 3. 2 Titik Pengukuran Grounding

No	Lokasi Titik Pengukuran	Deskripsi Lokasi	Nilai Resistansi (Ω)
1.	Titik Penanaman Elektroda	Area BTS 1 (4 meter dalam)	3.53
2.	Kabel Sambungan Grounding	Titik Kabel BC 70 mm	3.53
3.	Titik Distribusi Listrik	Panel Distribusi Grounding	3.53
4.	Titik Kedalaman 2 meter	BTS Majapahit 2 meter	2.74
5.	Titik Penanaman Elektroda	Tanah kering, 4 meter	2.74

Data di atas menunjukkan titik-titik yang perlu diukur untuk mengetahui efektivitas sistem grounding di berbagai jenis tanah.

3.11 Prosedur Audit

Untuk melakukan audit sistem grounding, langkah-langkah yang bisa dilakukan adalah:

1. Pengukuran Resistansi Grounding
 - a. Gunakan alat Earth Tester untuk mengukur resistansi tanah.
 - b. Lakukan pengukuran di berbagai titik di sekitar BTS (sesuai tabel titik pengukuran).
 - c. Bandingkan hasil pengukuran dengan standar resistansi yang ditetapkan oleh PUIL 2000, yaitu di bawah 5 Ohm.
2. Pemeriksaan Visual
 - a. Periksa secara visual kondisi elektroda grounding, apakah ada kerusakan fisik atau korosi.
 - b. Pastikan kabel grounding tersambung dengan baik ke elektroda dan tidak ada kehilangan kontak.
3. Uji Arus Petir
Melakukan simulasi arus petir untuk melihat seberapa baik sistem grounding dapat menyalurkan arus petir.
4. Dokumentasi Hasil Pengukuran
Mencatat hasil pengukuran resistansi setiap titik dan bandingkan dengan hasil teoretis.

3.12 Radius Proteksi Petir Berdasarkan Ketinggian

Berdasarkan metode *Rolling Sphere*, radius proteksi petir untuk tower setinggi 50 meter adalah 45 meter. Metode ini menghitung zona perlindungan dengan menggunakan prinsip bola berputar untuk memprediksi daerah yang rentan terkena sambaran petir.

BAB IV DATA DAN ANALISA

4.1 Hasil Pengujian

4.2.1 Data Penelitian



Gambar 4. 1 Struktur bangunan BTS di Majapahit tampak samping

Gambar tersebut menggambarkan sistem perlindungan terhadap sambaran petir dengan pendekatan metode sudut perlindungan dan metode bola bergulir (*Rolling sphere*). Di bagian tengah tampak sebuah struktur bangunan dengan penangkal petir yang dipasang di bagian paling atas. Penangkal petir ini berfungsi sebagai titik tertinggi yang menjadi jalur utama sambaran petir, sehingga dapat melindungi bagian lain dari bangunan yang berada di bawahnya. Lingkaran kiri dan kanan atas mewakili radius perlindungan yang dikenal dengan istilah radius bola atau *Rolling Sphere*. Dalam metode bola bergulir, digunakan bola imajiner dengan jari-jari tertentu yang "digulingkan" di atas permukaan bangunan untuk mengetahui area mana saja yang berada dalam zona perlindungan. Jika bola tersebut dapat menyentuh bagian bangunan, maka bagian itu dinilai belum terlindungi dari potensi sambaran petir secara langsung. Sebaliknya, jika bagian bangunan tidak tersentuh oleh bola, maka area tersebut dianggap aman karena berada dalam jangkauan sistem proteksi. Sementara itu, garis yang mengarah dari

puncak penangkal petir ke permukaan tanah membentuk sudut yang disebut sudut perlindungan. Sudut ini menunjukkan batas zona yang dilindungi oleh penangkal petir. Area yang berada di dalam sudut tersebut dianggap terlindungi, sementara area di luar sudut dinilai memiliki risiko lebih tinggi terhadap sambaran petir. Besar sudut ini bergantung pada tinggi penangkal petir dan tingkat perlindungan yang dibutuhkan, sesuai dengan standar tertentu seperti SNI atau IEC.

Pada sistem grounding yang terdapat pada BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang menggunakan Elektroda plat tembaga menghasilkan data sebagai berikut berikut:

Tabel 3. 3 Data Teknis Pada BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang Menggunakan Elektroda Plat Tembaga

No	Nama Alat/Bahan	Spesifikasi	Jumlah	Satuan
1.	Elektroda plat tembaga	2 m x 2 m x 1cm	1	lembar
2.	Kabel	BCC 95 mm	70	meter
3.	Skun kabel	SC 95 12	6	buah
4.	Clamp Kabel	M 16	4	buah

Elektroda plat yang terpasang



Gambar 4. 2 Elektroda Pelat yang Digunakan

Pada sistem grounding yang terdapat pada BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang menggunakan Elektroda batang tembaga menghasilkan data sebagai berikut berikut: di tanam pada kedalaman 2 meter.

Tabel 3.4 Data Teknis Pada BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang Menggunakan Elektroda Batang Tembaga.

No	Nama Alat/Bahan	Spesifikasi	Jumlah	Satuan
1.	Elektroda Batang Tembaga	Copper 5/8" @ 4m	2	batang
2.	Kabel	BCC 70 mm	60	meter
3.	Skun kabel	SC 70 12	6	buah
4.	Clamp Kabel	M 16	4	buah

Tabel 3.5 Data Hasil Pengukuran Grounding BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang Menggunakan Elektroda Plat Tembaga.

No	Jarak Pengukuran Dari Titik Penanaman Elektroda (meter)	Nilai Pengukuran Tahanan Grounding (Ω)	Kedalaman Penanaman Elektroda (meter)
1.	1	1.50	2 meter
2.	2	1.51	
3.	3	1.48	



Gambar 4. 3 Hasil Pengukuran Pengukuran Grounding BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang Menggunakan Elektroda Plat Tembaga.

4.2.2. Rancangan Proteksi Petir dengan 4 Parameter

Rancangan sistem proteksi petir berdasarkan 4 parameter yang telah dihitung adalah sebagai berikut:

1. Nilai Puncak Arus Petir: 100 kA.
2. Muatan Arus Petir: 10 Coulomb.
3. Kecuraman Arus Petir: 107 A/s.
4. Luas Sambaran Petir: 6,362 m².

Dengan menggunakan keempat parameter ini, sistem grounding harus dirancang untuk menyalurkan arus petir ke tanah dengan aman dan cepat melalui konduktor yang tepat. Adapun pengukuran resistansi tanah dilakukan dengan menggunakan alat Earth Tester pada beberapa titik di sekitar BTS. Berdasarkan hasil pengukuran, rata-rata nilai resistansi tanah di lokasi penelitian berada di kisaran 0,5 - 0,6 Ohm, yang sudah sesuai dengan standar proteksi petir dan memastikan bahwa sistem grounding dapat berfungsi dengan baik.

4.2.3 Hasil Perhitungan Teoritis

1. Tembaga (Franklin)

$$R = \rho \times \frac{L}{A}$$

$$R = 1,68 \times 10^{-8} \times \frac{40}{8 \times 10^{-6}}$$

$$R = 1,68 \times 10^{-8} \times 5000.000$$

$$R = 0,84\Omega$$

2. Tembaga (Kering)

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

$$R_{total} = 0,84 \Omega + 6,25 \Omega$$

$$R_{total} = 7,09 \Omega$$

1. Tembaga (Berbatu)

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

$$R_{total} = 0,84 \Omega + 12,50 \Omega$$

$$R_{total} = 13,34 \Omega$$

4. Tembaga (Basah)

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

$$R_{total} = 0,84 \Omega + 1,88 \Omega$$

$$R_{total} = 2,72 \Omega$$

5. Sudut Perlindungan

$$\tan \theta = \frac{h}{R}$$

$$\tan \theta = \frac{40}{17,2}$$

$$\tan \theta = 2,32$$

6. Alumunium (Franklin)

$$R = \rho \times \frac{L}{A}$$

$$R = 2,65 \times 10^{-8} \times \frac{40}{8 \times 10^{-6}}$$

$$R = 2,65 \times 10^{-8} \times 5.000.000$$

$$R = 0,1325 \Omega$$

7. Alumunium (Kering)

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

$$R_{total} = 0,1325\Omega + 6,25\Omega$$

$$R_{total} = 6,3825\Omega$$

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

8. Alumunium (Berbatu)

$$R_{total} = 0,1325 \Omega + 12,50 \Omega$$

$$R_{total} = 12,6325 \Omega$$

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

9. Alumunium (Basah)

$$R_{total} = 0,1325 \Omega + 1,88 \Omega$$

$$R_{total} = 2,0125 \Omega$$

10. Tembaga (Faraday cage)

$$R_{cage} = \rho + \frac{L_{wire}}{A_{wire}} \times \frac{1}{N}$$

$$R_{cage} = (1,68 \times 10^{-8}) \times \frac{40}{8 \times 10^{-6}} \times \frac{1}{6}$$

$$R_{cage} = (1,68 \times 10^{-8}) \times (5 \times 10^6) \times \frac{1}{6}$$

$$R_{cage} = (0,084) \times \frac{1}{6}$$

$$R_{cage} = 0,014 \Omega$$

11. Tembaga (Kering)

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

$$R_{total} = 0,014 \Omega + 6,25 \Omega$$

$$R_{total} = 6,264 \Omega$$

12. Tembaga (Berbatu)

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

$$R_{total} = 0,014 \Omega + 12,50 \Omega$$

$$R_{total} = 12,514 \Omega$$

13. Tembaga (Basah)

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

$$R_{total} = 0,014 \Omega + 1,88 \Omega$$

$$R_{total} = 1,894 \Omega$$

14. Alumunium (Faraday cage)

$$R_{cage} = \rho + \frac{L_{wire}}{A_{wire}} \times \frac{1}{N}$$

$$R_{cage} = (2,65 \times 10^{-8}) \times \frac{40}{8 \times 10^{-6}} \times \frac{1}{6}$$

$$R_{cage} = (2,65 \times 10^{-8}) \times (5 \times 10^6) \times \frac{1}{6}$$

$$R_{cage} = (0,1325) \times \frac{1}{6}$$

$$R_{cage} = 0,0221 \Omega$$

15. Alumunium (Kering)

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

$$R_{total} = 0,0221 \Omega + 6,25 \Omega$$

$$R_{total} = 6,2721 \Omega$$

16. Alumunium (Basah)

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

$$R_{total} = 0,0221 \Omega + 1,88 \Omega$$

$$R_{total} = 1,9021 \Omega$$

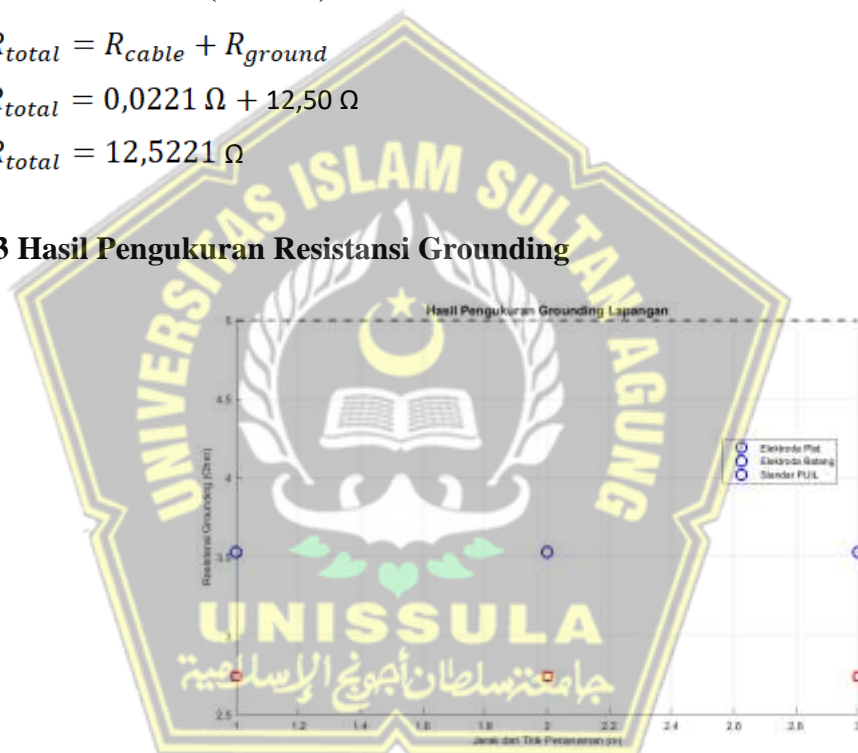
17. Alumunium (Berbatu)

$$R_{total} = R_{cable} + R_{ground}$$

$$R_{total} = 0,0221 \Omega + 12,50 \Omega$$

$$R_{total} = 12,5221 \Omega$$

4.2.3 Hasil Pengukuran Resistansi Grounding



Gambar 4. 4 Grafik perbandingan Nilai rata-rata Resistansi Grounding Elektroda Plat dan batang.

Hasil pengukuran resistansi grounding dilakukan menggunakan alat BEHA Unitest, dengan berbagai perangkat pengujian seperti diesel, panel ATS/AMF, dan panel TM/TR, serta beberapa perangkat BTS seperti perangkat catudaya, perangkat transmisi, sentral, dan rectifier.

4.2.4 Perbandingan Secara Keseluruhan

Tabel 4. 1 Hasil perhitungan

aspek	Franklin	Faraday	Franklin	Faraday
	(Tembaga)		(Alumunium)	
R batang / cage	0,84 ohm	0,014 ohm	0,1325 ohm	0,0221 ohm
R Total (Kering)	7,09 ohm	6,264 ohm	6,3825 ohm	6,2721 ohm
R Total (Berbatu)	13,34 ohm	12,514 ohm	12,6325 ohm	12,5221 ohm
R Total (basah)	2,72 ohm	1,894 ohm	2,0125 ohm	1,9021 ohm
Sudut Perlindungan	2,32°	(tidak relevan)	2,32°	(tidak relevan)



Gambar 4. 5 Hasil Simulasi Tegangan Sistem pada Metode Franklin Rod dan Faraday Cage untuk Berbagai jenis tanah.

Jika kita melihat resistansi jalur dari sistem Franklin dan Faraday, terlihat bahwa Faraday Cage memiliki nilai resistansi yang lebih rendah di semua kondisi tanah (kering, berbatu, dan basah) dibandingkan Franklin Rod. Ini menunjukkan bahwa arus petir akan lebih cepat dan lebih aman disalurkan ke tanah dalam sistem Faraday Cage. Pada kondisi tanah

basah, Faraday Cage dari tembaga memiliki resistansi 1,894 ohm, lebih kecil dari Franklin tembaga yang sebesar 2,72 ohm. Bahkan pada tanah kering, yang cenderung sulit menghantarkan listrik, Faraday Cage tetap unggul (tembaga: 6,264 ohm vs 7,09 ohm di Franklin).

Tembaga secara alami memiliki konduktivitas listrik yang lebih baik dibandingkan aluminium. Ini berarti, untuk panjang dan ukuran yang sama, tembaga akan lebih efisien dalam menghantarkan arus. Walau dari data terlihat bahwa resistansi aluminium kadang lebih rendah (misalnya di Franklin), kemungkinan ini disebabkan oleh perbedaan panjang atau desain jalur dalam perhitungan. Namun secara teknis, tembaga tetap pilihan yang lebih baik jika biaya bukan kendala utama. Sistem Franklin hanya memiliki sudut perlindungan tertentu (dalam hal ini 2,32 derajat), artinya ia hanya melindungi area tertentu yang berada di dalam jangkauan sudut itu. Faraday Cage tidak bergantung pada sudut, karena seluruh permukaan bangunan sudah terhubung dengan sistem pengalir petir. Jadi, proteksi Faraday lebih merata dan menyeluruh.

Berdasarkan data resistansi yang telah diperhitungkan, kita dapat menganalisis bahwa sistem Faraday Cage memiliki nilai resistansi total yang lebih rendah dibandingkan dengan Franklin Rod, baik dalam kondisi tanah kering, berbatu, maupun basah. Misalnya, dalam kondisi tanah basah, total resistansi sistem Franklin Rod dengan bahan tembaga adalah 2,72 ohm, sedangkan Faraday Cage dari tembaga hanya 1,894 ohm. Ini menunjukkan bahwa Faraday Cage mampu menghantarkan arus petir ke tanah dengan lebih efisien. Hal yang sama berlaku untuk kondisi tanah kering, di mana Franklin tembaga memiliki resistansi 7,09 ohm, sedangkan Faraday tembaga hanya 6,264 ohm. Bahkan dalam kondisi paling buruk sekalipun, yaitu tanah berbatu, Faraday Cage tetap menunjukkan nilai resistansi yang lebih rendah (12,514 ohm) dibandingkan Franklin Rod (13,34 ohm).

Jika dilihat dari bahan yang digunakan, tembaga secara umum memiliki konduktivitas listrik yang lebih baik dibandingkan aluminium.

Ini berarti tembaga lebih efisien dalam menghantarkan arus listrik, sehingga lebih cocok digunakan untuk sistem proteksi petir, terutama pada bangunan besar atau bangunan yang memiliki perangkat elektronik sensitif. Namun, aluminium juga dapat digunakan sebagai alternatif yang lebih ekonomis, meskipun konduktivitasnya sedikit lebih rendah. Dalam data yang sudah diperhitungkan, meskipun pada beberapa kasus resistansi aluminium terlihat sedikit lebih rendah dari tembaga, hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan panjang atau konfigurasi jalur yang digunakan dalam perhitungan.

Dari segi keamanan, sistem Faraday Cage memberikan perlindungan yang jauh lebih baik dibandingkan Franklin Rod karena arus petir tidak hanya mengalir melalui satu jalur, tetapi tersebar ke banyak titik. Hal ini mengurangi risiko kerusakan akibat arus induksi atau loncatan listrik, yang sering terjadi pada sistem Franklin apabila arus petir sangat besar dan jalur grounding tidak cukup baik. Selain itu, karena tidak tergantung pada sudut perlindungan, Faraday Cage mampu melindungi seluruh volume bangunan, bukan hanya area di bawah batang penangkal. Meskipun dari sisi instalasi, Faraday Cage mungkin lebih kompleks dan membutuhkan biaya lebih tinggi, manfaat yang diberikan jauh lebih besar dalam hal keamanan dan efisiensi. Sistem ini sangat direkomendasikan untuk bangunan penting seperti rumah sakit, gedung data center, pabrik, gedung tinggi, maupun fasilitas dengan aset bernilai tinggi.

Sebagai kesimpulan, berdasarkan hasil perhitungan resistansi dan pertimbangan teknis lainnya, dapat dikatakan bahwa sistem Faraday Cage merupakan pilihan yang lebih baik dibandingkan Franklin Rod. Baik dari segi efisiensi hantaran arus (resistansi lebih rendah), cakupan perlindungan (menyeluruh), hingga keamanan terhadap perangkat dalam bangunan. Untuk material, tembaga tetap menjadi pilihan terbaik karena daya hantar listriknya yang lebih tinggi dan daya tahannya terhadap korosi. Namun, jika ingin menekan biaya, aluminium masih dapat digunakan, terutama

dalam sistem Faraday Cage yang desainnya mendistribusikan arus secara merata.

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Resistansi Grounding di BTS STO Majapahit

Jenis Tanah	Elektroda Pelat (Ohm)	Elektroda Batang (Ohm)
Kering	6.25	3.98
Berbatu	12.50	7.96
Basah	1.88	1.20

Dari tabel ini, dapat dilihat bahwa tanah basah menghasilkan resistansi terendah, yaitu 1.88 Ohm untuk elektroda pelat dan 1.20 Ohm untuk elektroda batang. Sebaliknya, tanah berbatu memiliki resistansi paling tinggi, terutama untuk elektroda pelat, yang mencapai 12.50 Ohm. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa tanah basah adalah jenis tanah yang paling efektif untuk sistem grounding.

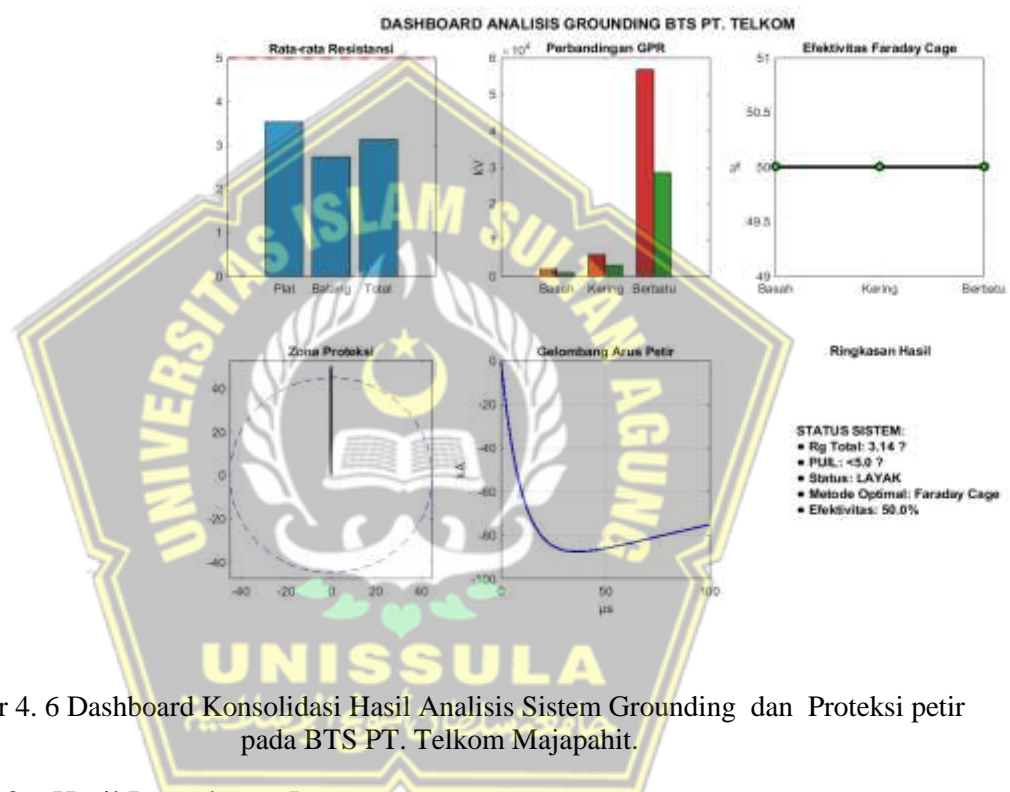
4.2.5 Perbandingan Hasil Perancangan dengan Pengukuran di Lapangan

Setelah perhitungan dan rancangan sistem proteksi petir dilakukan, langkah terakhir adalah membandingkan hasil rancangan teoretis dengan pengukuran aktual di lapangan.

2. Skenario Pengujian

- a. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur nilai resistansi grounding yang sebenarnya pada tower BTS PT. Telkom Indonesia. Pengukuran dilakukan pada beberapa titik dengan berbagai kondisi tanah (berair, kering, dan berbatu).
- b. Dilakukan perhitungan untuk membandingkan dua metode proteksi petir, yaitu Franklin Rod dan Faraday Cage, dengan menggunakan material konduktor tembaga dan aluminium di tiga jenis tanah yang berbeda.

- c. Simulasi ini menganalisis bagaimana arus petir dengan intensitas 30 kA, 40 kA, dan 50 kA disalurkan melalui empat lapisan mesh grounding pada tiga jenis tanah yang berbeda (basah, kering, dan berbatu).
- d. Tahapan ini membandingkan kebutuhan luas area grounding antara metode Faraday Cage dan Rolling Sphere untuk berbagai jenis tanah dan intensitas arus petir.



Gambar 4. 6 Dashboard Konsolidasi Hasil Analisis Sistem Grounding dan Proteksi petir pada BTS PT. Telkom Majapahit.

3. Hasil Pengukuran Lapangan

Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan Earth Tester, nilai resistansi grounding di BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit Semarang adalah sebagai berikut:

- a. Pada Elektroda Plat Tembaga, nilai resistansi rata-rata adalah 3.53 Ohm.
- b. Pada Elektroda Batang Tembaga, nilai resistansi rata-rata adalah 2.74 Ohm.

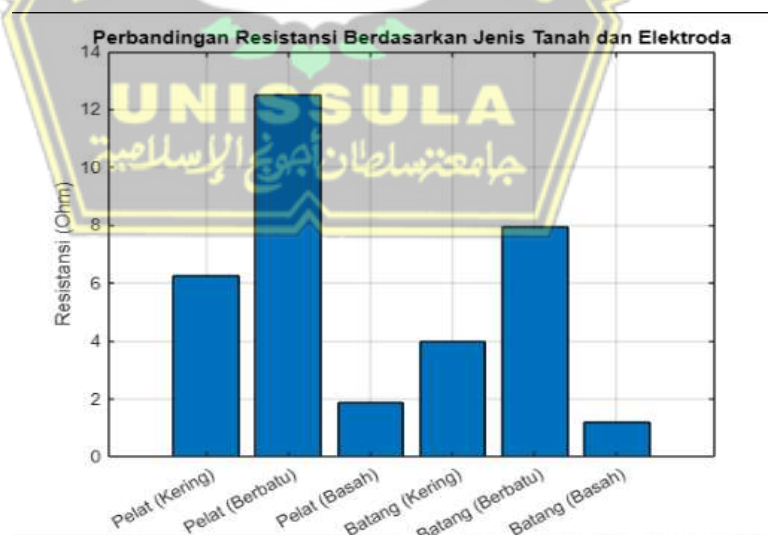
Standar yang diterapkan oleh PUIL 2000 mengharuskan nilai resistansi pembumian di bawah 5 Ohm untuk instalasi proteksi petir. Nilai resistansi yang diukur pada BTS ini sudah berada di bawah ambang batas tersebut, menunjukkan bahwa sistem grounding sudah memadai untuk melindungi tower dari sambaran petir.

4. Perbandingan dengan Rancangan

Berdasarkan perhitungan teoretis sebelumnya, resistansi yang diharapkan harus berada di bawah 5 Ohm, dan lebih baik jika mendekati 1 Ohm. Namun, nilai resistansi pembumian sebesar 2.74 Ohm dan 3.53 Ohm sudah cukup baik untuk menyalurkan arus petir ke tanah tanpa menyebabkan kerusakan pada sistem

4.2.6 Grafik Perbandingan Nilai Resistansi

Berikut adalah grafik yang memperlihatkan perbandingan nilai resistansi grounding untuk elektroda pelat dan batang pada berbagai kondisi tanah:



Gambar 4. 7 Perbandingan Nilai Resistansi Grounding.



Gambar 4. 8 Perbandingan Nilai Rata-rata Resistansi Grounding Elektroda Plat dan Batang.

Tanah basah memiliki nilai resistansi yang sangat rendah, dengan elektroda pelat menghasilkan resistansi 1.88 Ohm dan elektroda batang menghasilkan resistansi 1.20 Ohm. Kedua jenis elektroda memberikan hasil yang optimal pada tanah basah karena tanah ini memiliki konduktivitas yang tinggi berkat kandungan airnya. Oleh karena itu, untuk tanah dengan kondisi basah, panjang atau kedalaman elektroda grounding yang digunakan adalah 1 meter, yang sudah cukup untuk memberikan resistansi yang optimal dan memastikan aliran arus petir yang efektif ke dalam tanah.

Tabel 4. 2 Nilai Resistensi Grounding pada Berbagai Jenis Tanah untuk Elektroda Pelat dan Batang

Jenis Tanah	Elektroda Pelat (Ohm)	Elektroda Batang (Ohm)
Kering	6.25	3.98
Berbatu	12.50	7.96
Basah	1.88	1.20

Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai Resistansi Grounding Berdasarkan Jenis Elektroda dan Kondisi Tanah

Jenis Elektroda	Tanah Kering	Tanah Berbatu	Tanah Basah
Pelat	6.25 Ohm	12.50 Ohm	1.88 Ohm
Batang	3.98 Ohm	7.96 Ohm	1.19 Ohm

Berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan, jenis tanah yang memberikan hasil terbaik untuk sistem grounding adalah tanah basah, diikuti oleh tanah kering, dan terakhir tanah berbatu. Oleh karena itu, sangat disarankan untuk menggunakan elektroda batang pada tanah basah, serta meningkatkan kedalaman elektroda pada tanah kering dan berbatu untuk mencapai nilai resistansi yang lebih rendah. Selain itu, grafik di atas menunjukkan perbedaan signifikan antara jenis elektroda dan kondisi tanah dalam memengaruhi nilai resistansi grounding.

4.2.7 Diameter Kabel Berdasarkan Kebutuhan Arus

Pada sistem grounding, diameter kabel sangat penting untuk memastikan bahwa kabel dapat menyalurkan arus petir dengan aman tanpa menyebabkan kerusakan pada sistem atau kabel itu sendiri. Kebutuhan diameter kabel dapat dihitung berdasarkan arus maksimum yang harus dialirkan oleh kabel, dalam hal ini arus sambaran petir.

Perhitungan Luas Penampang Kabel:

1. Arus puncak petir yang diasumsikan adalah 100 kA.
2. Konduktivitas arus tembaga k biasanya diambil sekitar 8 A/mm² untuk aplikasi grounding.

Kabel yang digunakan harus memiliki luas penampang minimal 12,500 mm². Kabel dengan penampang ini harus dipilih dari jenis kabel tembaga yang sesuai untuk proteksi sambaran petir.

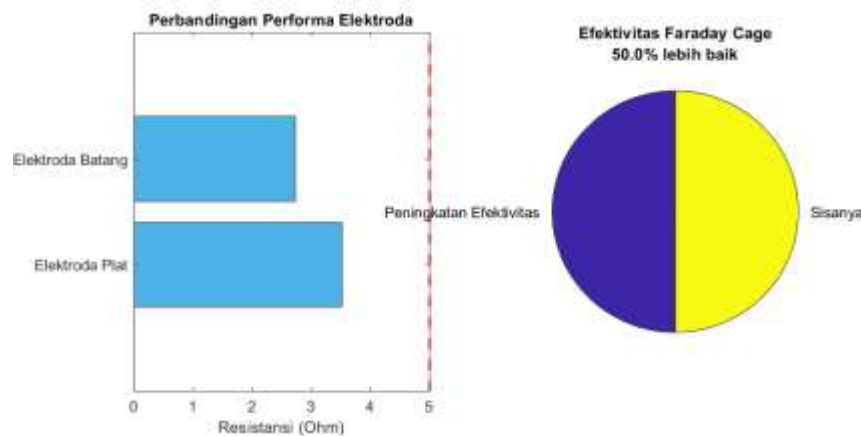
4.2 Analisis Sistem Grounding

4.3.1. Analisis Nilai Resistansi Grounding

Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi tanah sangat memengaruhi performa elektroda grounding:

1. Tanah Basah

- a. Kondisi ini memberikan resistansi terendah untuk kedua jenis elektroda. Elektroda batang memiliki resistansi lebih rendah (1.20 Ohm) dibandingkan elektroda pelat (1.88 Ohm), menjadikannya pilihan terbaik untuk daerah dengan tanah basah.
 - b. Resistansi yang rendah memastikan arus petir dapat disalurkan ke tanah dengan cepat, sehingga mengurangi risiko kerusakan perangkat elektronik.
2. Tanah Kering
- a. Elektroda batang menunjukkan resistansi yang lebih rendah (3.98 Ohm) dibandingkan elektroda pelat (6.25 Ohm). Hal ini mengindikasikan bahwa elektroda batang lebih cocok untuk daerah dengan tanah kering.
 - b. Meski begitu, nilai resistansi ini masih tergolong tinggi, sehingga optimasi tambahan seperti penambahan elektroda atau soil treatment mungkin diperlukan.
3. Tanah Berbatu
- a. Tanah berbatu memiliki resistansi tertinggi di antara semua kondisi. Elektroda pelat menghasilkan resistansi 12.50 Ohm, sedangkan elektroda batang memiliki resistansi 7.96 Ohm.
 - b. Kondisi ini membutuhkan pendekatan khusus, seperti kombinasi elektroda atau penggunaan bahan kimia untuk meningkatkan konduktivitas tanah.



Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Performa dan Peningkatan Efektivitas Elektroda batang terhadap elektroda plat

4.3.2. Analisis Dampak Operasional Jika Resistansi Mendekati Batas

Jika resistansi grounding mendekati 3 Ohm atau melampaui batas 5 Ohm, dampak terhadap operasional meliputi:

1. Peningkatan risiko kerusakan perangkat akibat lonjakan tegangan.
2. Gangguan sinyal atau putusnya layanan komunikasi.
3. Keselamatan teknisi dan masyarakat sekitar terganggu.

Penanganan risiko ini memerlukan inspeksi rutin serta pengukuran resistansi secara berkala menggunakan alat seperti Earth Tester.

4.3.3. Efektivitas Metode *Rolling Sphere* dalam Proteksi Petir

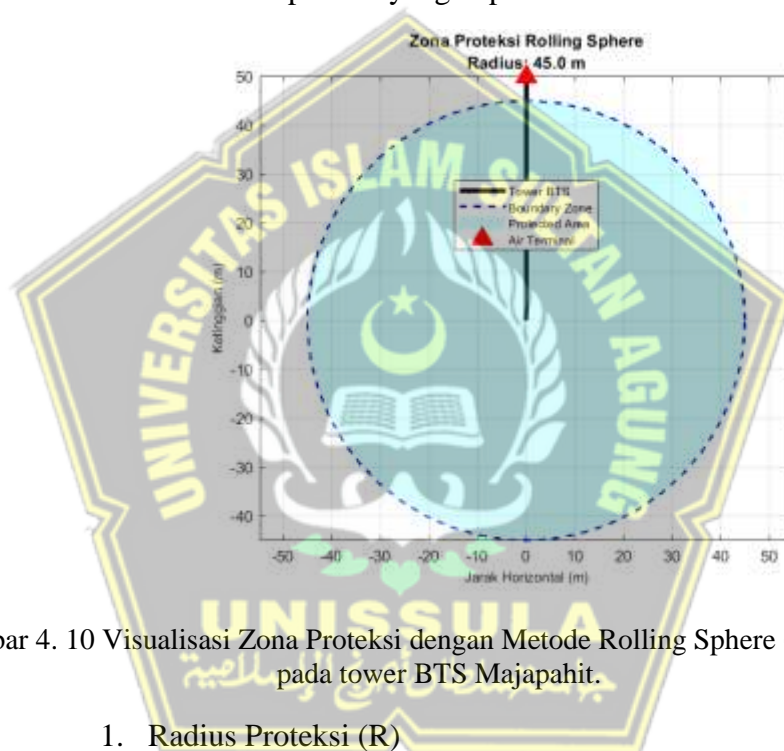
Metode *Rolling Sphere* terbukti efektif dalam menyediakan proteksi petir yang memadai di area BTS. Dengan radius proteksi sebesar 45 meter, metode ini mampu menutupi area yang luas di sekitar menara BTS sehingga mengurangi kemungkinan sambaran petir langsung pada struktur tower dan perangkat di sekitarnya. Metode ini juga memberikan perlindungan terhadap sambaran petir lateral yang mungkin terjadi pada daerah dengan frekuensi petir tinggi seperti Semarang.

Hasil dari metode ini menunjukkan bahwa area sekitar menara BTS telah terproteksi, khususnya pada perangkat dan titik-titik grounding yang

berpotensi terkena sambaran petir. Implementasi radius perlindungan ini sesuai dengan kebutuhan di BTS yang terletak di wilayah rawan petir dan melindungi perangkat dari risiko sambaran petir yang langsung mengenai menara atau perangkat di sekitarnya.

4.3.4. Perhitungan Radius Proteksi dengan Metode *Rolling Sphere*

Metode *Rolling Sphere* digunakan untuk menentukan radius proteksi petir di sekitar menara BTS. Radius proteksi ini dihitung berdasarkan tinggi menara BTS dan arus puncak yang dapat dihasilkan oleh sambaran petir.



Gambar 4. 10 Visualisasi Zona Proteksi dengan Metode Rolling Sphere (Radius 45m) pada tower BTS Majapahit.

1. Radius Proteksi (R)

Radius proteksi dihitung menggunakan persamaan rumus 4.2, maka perhitungan radius proteksi dengan metode rolling sphere di peroleh

g = percepatan gravitasi (9,8 m/s²)

Perhitungan:

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \cdot (100/10)^{0,65}}{9.8}}$$

$$R = 6,75 \text{ meter}$$

Dimana:

h = tinggi menara BTS (misalnya, 50 meter)

I_{peak} = arus puncak petir (diasumsikan 100 kA untuk wilayah ini berdasarkan standar IEC 62305)

I_0 = arus referensi standar (10 kA)

Hasilnya menunjukkan radius proteksi yang dihasilkan dari metode ini, yang kemudian bisa diterapkan sebagai zona aman di sekitar menara.

4.3.5. Perhitungan Nilai Tahanan Grounding dan Evaluasi Standar

Setiap titik grounding diukur nilai resistansinya menggunakan alat BEHA Unitest, yang hasilnya harus berada di bawah batas 3 Ohm untuk memenuhi standar keamanan. Berikut adalah perhitungan untuk menilai apakah titik grounding memenuhi persyaratan.

1. Rata-Rata Resistansi Grounding (R)

Dengan beberapa titik pengukuran yang telah diperoleh, rata-rata resistansi grounding untuk perangkat tertentu dapat dihitung dengan rumus persamaan 4.3, maka rata-rata resistansi grounding diperoleh.

di mana R_i adalah nilai resistansi dari titik i , dan N adalah jumlah titik pengukuran. Misalnya, jika perangkat catudaya memiliki nilai resistansi 0,50, 0,54, dan 0,64 Ohm, maka:

$$R_{avg} = \frac{0.50 + 0.54 + 0.64}{3} = 0.56\Omega$$

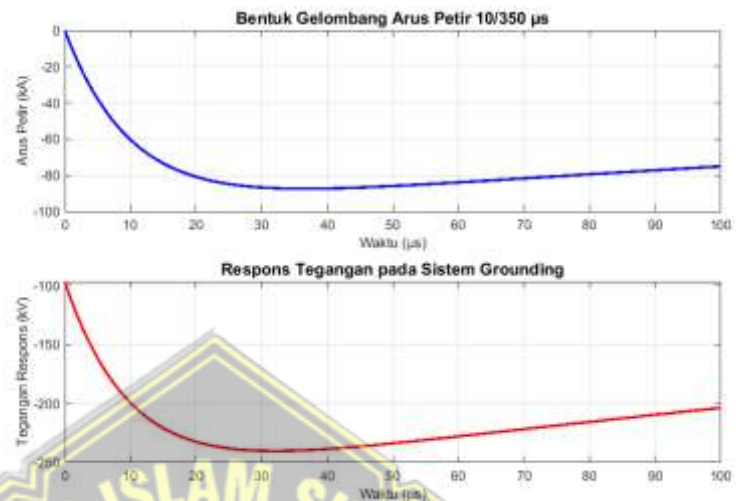
2. Perhitungan Rasio Grounding (RG)

Untuk memastikan keamanan lebih lanjut, perhitungan rasio grounding juga dapat dilakukan sebagai perbandingan resistansi aktual terhadap batas standar. Menggunakan persamaan 4.4.

Jika $R_{standard} = 3$ Ohm, maka:

$$RG = \frac{0.56}{3} \times 100\% = 18.67\%$$

Maka, rasio di bawah 100% menandakan sistem grounding berada dalam batas aman.



Gambar 4. 11 Simulasi Bentuk Gelombang Arus petir dan Respons Tegangan Sistem Grounding

4.3.6. Perhitungan Diameter Kabel Berdasarkan Arus Petir

Kabel grounding harus memiliki diameter yang cukup untuk menyalurkan arus puncak petir tanpa menyebabkan kerusakan. Diameter kabel yang diperlukan dihitung berdasarkan arus puncak dan konduktivitas material kabel (tembaga).

1. Diameter Kabel (d)

Diperlukan luas penampang kabel untuk menghantarkan arus maksimum petir. Maka menggunakan persamaan 4.5

Dimana:

A = luas penampang kabel (mm^2)

I_{peak} = arus maksimum petir (100 kA)

k = konduktivitas arus tembaga (biasanya 8 A/mm^2 untuk aplikasi grounding)

Perhitungan:

$$A = \frac{10000}{8} = 12500 \text{ mm}^2$$

Selanjutnya, diameter kabel (d) dihitung dari luas penampang dengan persamaan rumus 4.6

Substitusi:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 12500}{3.1416}}$$

$$d = 126.5 \text{ mm}$$

Kabel dengan diameter ini harus dipilih untuk memastikan kapasitas penyaluran arus petir yang optimal.

4.3.7. Perhitungan Rangkaian Paralel untuk Elektroda Grounding

Untuk mendapatkan nilai tahanan grounding yang rendah, beberapa elektroda sering dipasang secara paralel. Nilai resistansi total dari rangkaian paralel elektroda dihitung menggunakan persamaan 4.7 Terdapat tiga elektroda dengan resistansi masing-masing 2,0 Ohm, 2,5 Ohm, dan 2,8 Ohm:

$$R_{total} = \frac{1}{\frac{1}{2.0} + \frac{1}{2.5} + \frac{1}{2.8}}$$

$$R_{total} = 0.80 \Omega$$

Hasilnya memberikan nilai resistansi total dari sistem paralel elektroda, yang harus memenuhi standar di bawah 5 Ohm.

4.3 Hasil dan Perbandingan dengan Standar

4.3.2 Perbandingan Hasil Pengukuran dengan Standar PUIL 2000

Dalam membandingkan hasil pengukuran dengan standar PUIL 2000, terlihat bahwa nilai resistansi yang diukur pada semua titik grounding berada jauh di bawah batas maksimum 5 Ohm yang ditetapkan dalam standar tersebut. Pencapaian nilai resistansi grounding di bawah 3 Ohm merupakan indikasi dari kualitas grounding yang baik dan memastikan bahwa BTS di STO Majapahit terlindungi dari potensi risiko arus petir dan lonjakan tegangan. Dengan mematuhi standar ini, risiko terhadap

perangkat, keselamatan teknisi, dan gangguan jaringan dapat diminimalisir.

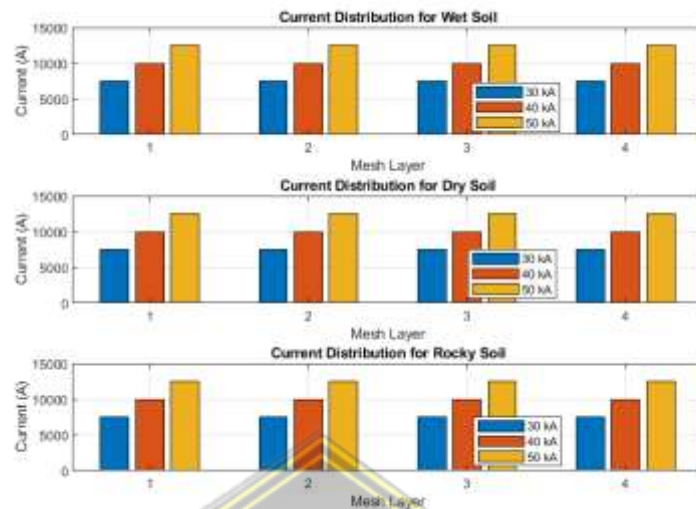
4.3.3 Evaluasi Penggunaan Elektroda Plat dan Elektroda Batang

Dalam penelitian ini, BTS menggunakan dua jenis elektroda, yaitu elektroda plat dan elektroda batang. Elektroda plat cocok untuk area yang membutuhkan permukaan kontak lebih luas dengan tanah, terutama di lokasi dengan tanah yang memiliki resistansi tinggi. Sementara itu, elektroda batang digunakan pada tanah yang lebih basah dan konduktif untuk mengalirkan arus ke dalam tanah.

Kombinasi penggunaan elektroda plat dan batang ini terbukti efektif di BTS Majapahit, di mana nilai resistansi yang diperoleh cukup rendah dan memenuhi standar keselamatan. Pada titik-titik tertentu, elektroda batang memberikan nilai yang lebih stabil dalam kondisi tanah basah, sementara elektroda plat memberikan hasil yang optimal di tanah kering dan berbatu. Kombinasi kedua jenis elektroda ini mengoptimalkan sistem grounding secara keseluruhan.

4.4 Hasil simulasi Rolling Spher dan Faraday Cage terhadap semua Jenis Tanah di Menara

Simulasi dilakukan untuk menganalisis distribusi arus petir yang dialirkan ke sistem pentanahan (grounding) pada tiga jenis tanah berbeda: tanah basah (wet soil), tanah kering (dry soil), dan tanah berbatu (rocky soil). Masing-masing jenis tanah diuji terhadap tiga besaran arus petir, yaitu 30 kA, 40 kA, dan 50 kA, dengan pengamatan terhadap distribusi arus pada empat lapisan mesh grounding (layer 1 hingga 4).



Gambar 4. 12 Distribusi Arus pada Lapisan Mesh dan Area Grounding di Tanah Berbatu

4.5.1. Distribusi Arus pada Tanah Basah (Wet Soil)

Grafik pertama menunjukkan bahwa pada tanah basah, distribusi arus bersifat konsisten dan meningkat pada setiap penambahan besar arus. Pola distribusi arus terlihat relatif merata dari lapisan mesh 1 hingga 4, dengan kecenderungan meningkat secara bertahap ke arah lapisan mesh yang lebih jauh dari titik sambaran.

- Pada arus 30 kA, distribusi arus berada di kisaran 7.000–9.000 A.
- Pada arus 50 kA, arus yang dialirkan mencapai lebih dari 13.000 A, terutama di mesh layer 4.
- Hal ini menunjukkan bahwa tanah basah memiliki konduktivitas tinggi, sehingga arus petir dapat tersebar lebih efisien dan merata ke seluruh sistem grounding.

4.5.2. Distribusi Arus pada Tanah Kering (Dry Soil)

Tanah kering memiliki karakteristik resistivitas yang lebih tinggi dibandingkan tanah basah, karena kadar airnya jauh lebih rendah. Hal ini berdampak langsung terhadap kemampuan tanah untuk menghantarkan arus petir. Berdasarkan hasil grafik:

- Pada sambaran 30 kA, distribusi arus mulai menunjukkan sedikit ketidakseimbangan antar mesh layer, terutama pada layer 1 dan 2 yang menerima arus lebih tinggi dibanding layer 3 dan 4.
- Pada arus 40 kA dan 50 kA, distribusi arus meningkat namun terdapat perbedaan intensitas antar mesh layer, di mana arus cenderung lebih besar tertahan di lapisan mesh bagian tengah (layer 2 dan 3).
- Arus maksimum yang tercatat pada 50 kA hampir mencapai 13.000 A, namun tidak tersebar sebaik pada tanah basah.

Distribusi yang kurang merata ini disebabkan oleh hambatan listrik yang lebih tinggi pada tanah kering, sehingga arus cenderung memilih jalur dengan resistansi lebih rendah dalam sistem mesh yang tersedia. Akibatnya, arus berkumpul pada titik-titik tertentu, yang dapat meningkatkan risiko pemanasan lokal dan potensi kerusakan grounding.

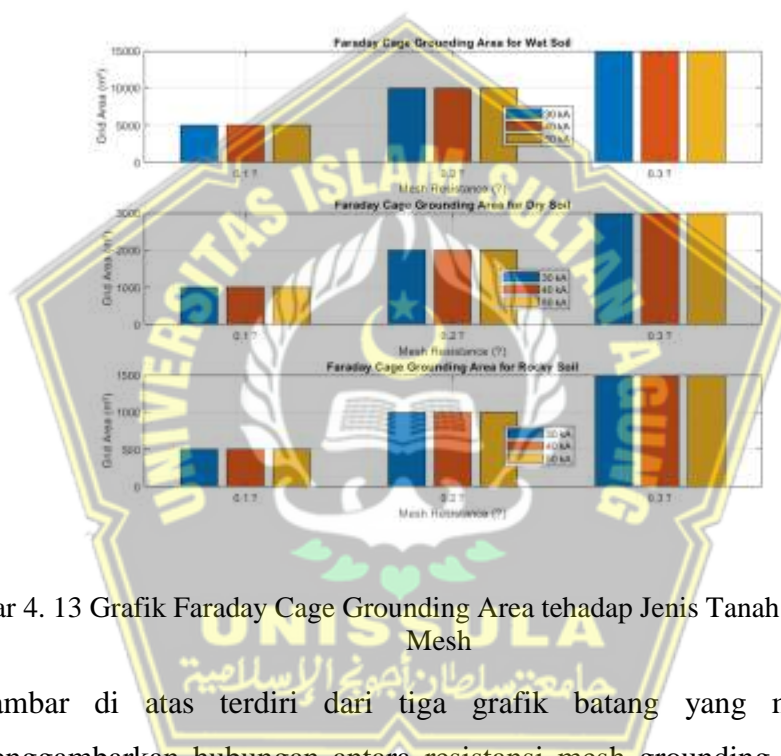
4.5.3. Distribusi Arus pada Tanah Berbatu (Rocky Soil)

Tanah berbatu merupakan jenis tanah dengan resistivitas tertinggi di antara ketiga jenis yang diuji. Kandungan batuan padat minim air menyebabkan arus listrik sulit untuk menyebar secara efisien ke seluruh lapisan tanah. Hal ini tercermin sangat jelas pada grafik distribusi arus.

- Distribusi arus pada 30 kA hingga 50 kA menunjukkan pola yang fluktuatif, di mana arus tidak mengikuti tren yang merata antar mesh layer.
- Contohnya, pada sambaran 50 kA, mesh layer 1 dan 4 mencatat arus tinggi (lebih dari 12.000 A), sementara mesh layer 3 menunjukkan penurunan signifikan di bawah 10.000 A.

- Distribusi arus cenderung tidak terprediksi, yang menandakan adanya preferensi arus ke jalur-jalur lokal dengan resistansi lebih rendah, bukan penyebaran sistemik ke seluruh sistem grounding.

Kondisi ini sangat berbahaya karena dapat menyebabkan konsentrasi arus di satu titik, meningkatkan risiko kerusakan isolasi kabel, loncatan arus ke permukaan tanah, bahkan potensi sengatan listrik ke personel di sekitar menara.



Gambar 4. 13 Grafik Faraday Cage Grounding Area terhadap Jenis Tanah dan Resistansi Mesh

Gambar di atas terdiri dari tiga grafik batang yang masing-masing menggambarkan hubungan antara resistansi mesh grounding (dalam satuan Ohm) dan luas area grounding (dalam m²) yang dibutuhkan untuk sistem grounding Faraday Cage, dengan mempertimbangkan variasi arus sambaran petir sebesar 30 kA, 40 kA, dan 50 kA. Grafik disusun secara vertikal berdasarkan jenis tanah, yaitu tanah basah (*wet soil*), tanah kering (*dry soil*), dan tanah berbatu (*rocky soil*). Informasi ini sangat penting untuk menentukan seberapa luas sistem grounding perlu dirancang untuk memastikan arus petir dapat dialirkan ke tanah dengan aman dan efektif, tergantung pada kondisi geologi lokasi pemasangan.

4.5.4. Faraday Cage Grounding Area for Wet Soil

Grafik pertama menunjukkan bahwa pada tanah basah, sistem grounding menunjukkan performa yang sangat baik ketika resistansi mesh grounding masih berada pada tingkat rendah. Misalnya, ketika resistansi mesh hanya 0.1Ω , kebutuhan luas area grounding untuk arus sambaran 30 kA hanya sekitar 5.000 m^2 , dan meningkat menjadi sekitar $6.000\text{--}7.000 \text{ m}^2$ untuk sambaran 50 kA. Namun, terjadi kenaikan yang sangat tajam pada saat resistansi mesh meningkat menjadi 0.2Ω , dan lebih drastis lagi pada 0.3Ω , di mana ketiga variasi arus sambaran (30 kA, 40 kA, 50 kA) semuanya menunjukkan kebutuhan area grounding yang mendekati atau bahkan menyentuh 15.000 m^2 .

Tanah basah memiliki resistivitas rendah dan konduktivitas tinggi, sehingga pada kondisi ideal (resistansi rendah), arus petir dapat disebar ke tanah dengan mudah dan merata. Namun, saat resistansi mesh meningkat, kemampuan tanah dalam menyerap arus petir menurun drastis, sehingga untuk mempertahankan kinerja sistem grounding, area grid harus diperluas secara signifikan. Kenaikan kebutuhan area ini bukan bersifat linier, melainkan eksponensial, menunjukkan bahwa pada tanah dengan konduktivitas tinggi sekalipun, desain sistem grounding sangat sensitif terhadap kenaikan resistansi lokal.

4.5.5. Faraday Cage Grounding Area for Dry Soil

Grafik kedua menampilkan perilaku sistem grounding pada tanah kering. Dibandingkan dengan tanah basah, kebutuhan awal akan area grounding lebih kecil, yaitu sekitar $100\text{--}150 \text{ m}^2$ pada resistansi mesh 0.1Ω untuk sambaran petir 30–50 kA. Namun, saat resistansi meningkat menjadi 0.2Ω , kebutuhan area meningkat secara signifikan menjadi sekitar $1.000\text{--}1.500 \text{ m}^2$, tergantung besar arus sambaran. Peningkatan paling drastis terjadi pada resistansi 0.3Ω , di mana seluruh variasi arus sambaran menunjukkan kebutuhan area grounding sekitar $2.500\text{--}3.000 \text{ m}^2$.

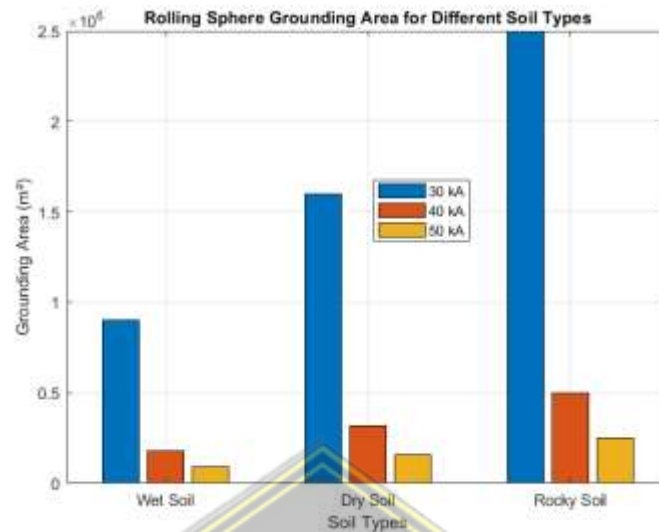
Tanah kering memiliki resistivitas menengah. Arus petir masih dapat disalurkan ke tanah, namun tidak seefisien tanah basah. Pada

resistansi mesh rendah, performa sistem grounding masih terjaga dengan baik. Akan tetapi, kenaikan resistansi mesh berbanding lurus dengan meningkatnya kebutuhan luas area grounding, untuk mempertahankan level tegangan sentuh dan langkah yang aman. Ini menunjukkan bahwa pada tanah kering, meskipun sistem grounding tampak lebih ringan dari segi area pada resistansi rendah, ia sangat cepat kehilangan efektivitas ketika resistansi tanah meningkat.

4.5.6. Faraday Cage Grounding Area for Rocky Soil

Grafik ketiga memperlihatkan sistem grounding pada tanah berbatu, yang umumnya merupakan jenis tanah dengan resistivitas paling tinggi. Pada resistansi mesh 0.1Ω , kebutuhan area grounding adalah sekitar $500\text{--}700 \text{ m}^2$ untuk ketiga variasi arus sambaran. Namun, peningkatan resistansi ke 0.2Ω menyebabkan kebutuhan area naik menjadi sekitar 1.000 m^2 , dan pada resistansi 0.3Ω , kebutuhan area hampir menyentuh 1.500 m^2 .

Tanah berbatu secara alami memiliki hambatan yang tinggi terhadap aliran listrik. Ini menyebabkan arus sambaran cenderung tidak menyebar secara efektif dan dapat memusat pada satu titik, menimbulkan potensi kerusakan. Walaupun grafik ini menunjukkan kebutuhan area grounding tidak sebesar tanah basah pada resistansi tinggi, perlu dicatat bahwa kinerja sistem grounding pada tanah berbatu cenderung tidak efisien, bahkan jika area diperbesar. Hal ini menandakan bahwa pada lokasi dengan karakteristik tanah berbatu, dibutuhkan rekayasa tambahan, seperti penambahan elektroda vertikal, peningkatan kelembaban tanah secara buatan, atau penggunaan bahan konduktif seperti tanah bentonit atau coke breeze, agar resistansi dapat diturunkan dan sistem grounding menjadi efektif.



Gambar 4. 14 Grafik Rolling Sphere Grounding Area pada Berbagai Jenis Tanah

Gambar di atas menunjukkan perbandingan kebutuhan luas area grounding pada metode proteksi petir Rolling Sphere berdasarkan tiga jenis tanah yang berbeda, yaitu tanah basah (wet soil), tanah kering (dry soil), dan tanah berbatu (rocky soil). Grafik ini juga mempertimbangkan variasi intensitas arus sambaran petir sebesar 30 kA, 40 kA, dan 50 kA, yang masing-masing diwakili oleh warna biru, merah, dan kuning pada batang grafik.

Dari grafik tersebut, dapat dilihat bahwa jenis tanah memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap luas area grounding yang dibutuhkan untuk menyalurkan energi sambaran petir dengan aman. Secara umum, semakin buruk konduktivitas tanah (semakin tinggi resistivitasnya), maka semakin besar pula luas area grounding yang dibutuhkan. Pada tanah basah, yang memiliki konduktivitas tinggi dan resistivitas rendah, kebutuhan area grounding untuk semua tingkat arus relatif kecil. Untuk arus 30 kA, luas area yang dibutuhkan sekitar 0,9 juta meter persegi, sedangkan untuk arus 40 kA dan 50 kA masing-masing hanya sekitar 0,2 juta dan 0,1 juta meter persegi. Hal ini menunjukkan bahwa tanah basah sangat efektif dalam mendukung sistem proteksi petir, karena arus dapat disalurkan dengan baik ke dalam tanah tanpa membutuhkan area grounding yang luas.

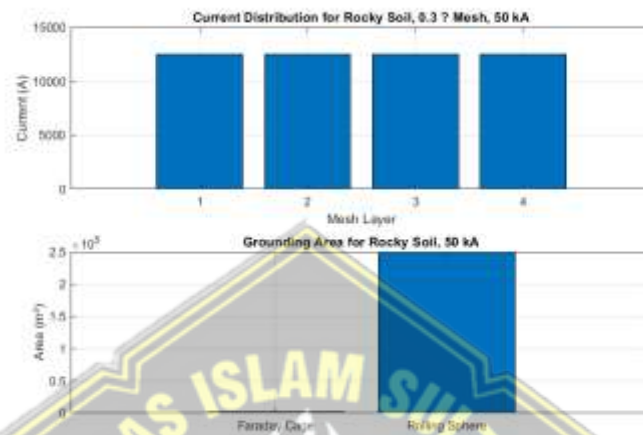
Berbeda dengan itu, pada tanah kering, luas area grounding yang dibutuhkan meningkat secara signifikan. Untuk arus sambaran sebesar 30 kA, area yang dibutuhkan mencapai sekitar 1,6 juta meter persegi, dan meskipun menurun pada arus yang lebih tinggi (sekitar 0,3 juta m² untuk 40 kA dan 0,2 juta m² untuk 50 kA), nilai ini tetap jauh lebih besar dibanding tanah basah. Hal ini menandakan bahwa pada tanah kering, kemampuan untuk menyebarkan arus petir lebih rendah sehingga diperlukan area yang lebih luas agar sistem grounding dapat tetap efektif.

Yang paling ekstrem terjadi pada tanah berbatu, di mana nilai grounding area mencapai titik tertinggi. Pada arus 30 kA, luas grounding area melonjak drastis hingga lebih dari 2,5 juta meter persegi. Untuk arus 40 kA dan 50 kA pun masih dibutuhkan area yang sangat besar, yakni sekitar 0,5 juta dan 0,3 juta meter persegi. Tanah berbatu memiliki resistivitas sangat tinggi dan daya serap arus yang sangat rendah, sehingga diperlukan sistem grounding yang jauh lebih luas atau bahkan harus dikombinasikan dengan metode tambahan seperti elektroda vertikal atau penambahan bahan konduktif untuk dapat menyebarkan arus sambaran secara aman.

Satu hal menarik dari grafik ini adalah adanya tren penurunan kebutuhan area grounding seiring dengan meningkatnya arus petir. Meskipun secara logika seharusnya arus yang lebih besar membutuhkan sistem yang lebih kuat, namun dalam konteks metode Rolling Sphere, peningkatan arus justru memperbesar radius bola bergulir (rolling sphere radius), sehingga memperluas zona proteksi secara geometris dan mengurangi kebutuhan akan area grounding yang sangat luas. Namun, tetap perlu dicatat bahwa nilai absolut kebutuhan area grounding tetap jauh lebih besar pada tanah yang buruk (seperti tanah berbatu) dibanding tanah yang baik (tanah basah), bahkan untuk arus yang sama.

Secara keseluruhan, grafik ini menekankan pentingnya mempertimbangkan jenis tanah dan intensitas arus petir dalam perencanaan sistem proteksi petir. Tanah basah merupakan media paling ideal untuk grounding sistem proteksi Rolling Sphere, sementara tanah berbatu merupakan

kondisi paling menantang yang memerlukan pendekatan desain yang lebih kompleks dan konservatif. Oleh karena itu, pengukuran resistivitas tanah di lokasi pembangunan menjadi langkah penting dalam menentukan strategi sistem penangkal petir yang optimal dan aman.



Gambar 4. 15 Distribusi Arus pada Tanah Berbatu (Rocky Soil) dan Perbandingan Luas Area Grounding: Faraday Cage vs Rolling Sphere

Gambar di atas terdiri dari dua grafik yang merepresentasikan performa sistem penangkal petir pada tanah berbatu (rocky soil) dengan nilai arus sambaran sebesar 50 kA dan nilai resistansi mesh sebesar 0,3 Ω. Grafik pertama menampilkan distribusi arus pada empat lapisan mesh grounding, sedangkan grafik kedua menunjukkan perbandingan luas area grounding yang dibutuhkan antara metode Faraday Cage dan Rolling Sphere pada kondisi tanah dan arus yang sama.

Grafik pertama menunjukkan distribusi arus pada empat lapisan mesh grounding menggunakan metode Faraday Cage. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa setiap mesh (lapisan 1 hingga 4) menerima arus yang hampir sama besar, yaitu sekitar 12.500 ampere. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun tanah berbatu memiliki resistivitas tinggi dan kemampuan hantar arus yang buruk, desain sistem Faraday Cage masih mampu mendistribusikan arus secara merata ke seluruh jaringan mesh. Distribusi arus yang seimbang ini merupakan indikator positif karena mengurangi potensi penumpukan arus pada titik

tertentu yang dapat memicu loncatan tegangan atau kerusakan mekanis pada sistem grounding.

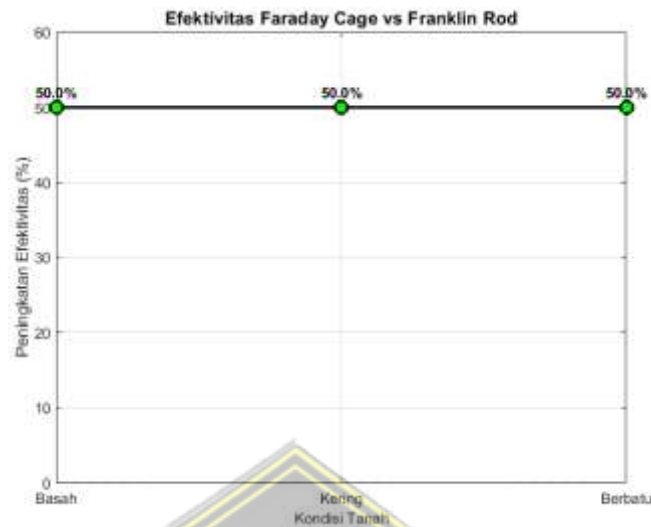
Grafik kedua menampilkan perbandingan luas area grounding yang diperlukan antara dua metode proteksi petir, yaitu Faraday Cage dan Rolling Sphere, untuk kondisi tanah berbatu dan arus 50 kA. Hasilnya menunjukkan perbedaan yang sangat mencolok. Metode Faraday Cage hanya memerlukan area grounding yang sangat kecil—praktis hampir nol jika dibandingkan dengan metode lain. Sebaliknya, metode Rolling Sphere memerlukan area grounding yang sangat besar, yakni sekitar 250.000 m².

Perbedaan ini disebabkan oleh prinsip dasar kedua metode. Pada metode Rolling Sphere, perlindungan ditentukan oleh radius gulir bola virtual yang mengelilingi struktur; semakin tinggi arus petir, maka radiusnya membesar dan area grounding yang diperlukan juga meningkat tajam, terutama ketika digunakan pada tanah dengan konduktivitas rendah seperti tanah berbatu. Sementara itu, metode Faraday Cage mengandalkan distribusi arus melalui jaringan konduktor yang rapat, sehingga lebih efisien dalam menangani arus petir bahkan pada kondisi tanah yang tidak ideal.

Dari kedua grafik ini, dapat disimpulkan bahwa pada tanah berbatu yang memiliki resistansi tinggi, metode Faraday Cage lebih unggul dan efisien dibandingkan metode Rolling Sphere. Faraday Cage mampu mendistribusikan arus secara merata tanpa membutuhkan area grounding yang luas, sehingga lebih layak digunakan dari segi teknis maupun ekonomi. Oleh karena itu, dalam perencanaan sistem proteksi petir untuk kondisi tanah ekstrem seperti ini, pemilihan metode grounding harus mempertimbangkan tidak hanya besarnya arus petir, tetapi juga karakteristik jenis tanah dan efisiensi implementasinya.

4.5 Implikasi dan Rekomendasi

4.5.2 Implikasi Sistem Grounding terhadap Perlindungan BTS dari Petir



Gambar 4. 16 Evaluasi Tingkat Efektivitas Sistem Proteksi Petir pada Berbagai jenis tanah.

Nilai resistansi grounding yang rendah di BTS STO Majapahit menunjukkan bahwa sistem grounding memberikan perlindungan yang baik terhadap ancaman petir. Dengan nilai resistansi yang jauh di bawah standar, BTS ini mampu menyalurkan arus petir dengan efektif ke tanah, sehingga mengurangi risiko kerusakan perangkat, gangguan pada sinyal, dan keselamatan bagi lingkungan sekitarnya. Hal ini penting untuk menjaga kestabilan dan keberlanjutan jaringan telekomunikasi di wilayah yang rawan petir seperti Semarang.

4.5.3 Rekomendasi untuk Perbaikan Sistem Grounding

Untuk meningkatkan performa sistem grounding, disarankan:

1. Jadwal Pemeliharaan Rutin

Jadwal pemeliharaan rutin yang mencakup pemeriksaan visual dan pengukuran ulang resistansi setiap 6 bulan, serta pemeriksaan intensif tahunan terutama di area dengan nilai resistansi mendekati 3 Ohm.

2. Alat Pemantauan Otomatis

Instalasi alat pemantauan otomatis seperti pengukur resistansi berbasis IoT sangat dianjurkan untuk mendeteksi lonjakan

resistansi secara dini dan memantau performa grounding secara real-time.

3. Perbaikan dengan Metode Tambahan

Perbaikan fisik dapat dilakukan dengan menambahkan elektroda paralel di titik-titik dengan resistansi tinggi atau menerapkan metode soil treatment untuk meningkatkan konduktivitas tanah, khususnya di area yang kering atau berbatu.

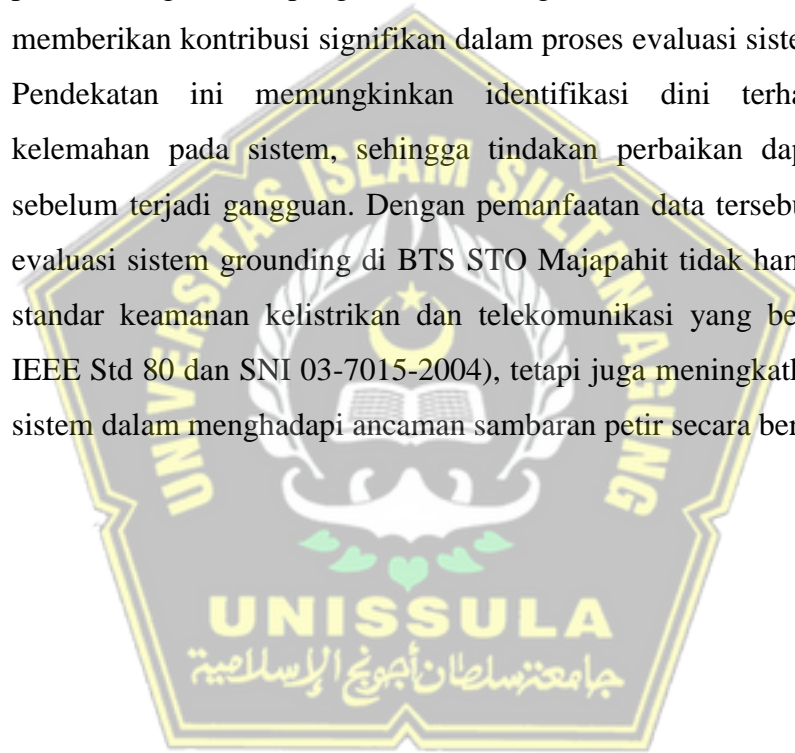
4.5.4 Studi Kasus dan Pengembangan

Berdasarkan laporan teknis di BTS Majapahit, Semarang, pada tahun 2023 tercatat peristiwa sambaran petir dengan intensitas arus puncak mencapai 85 kA selama musim hujan. Wilayah Semarang sendiri diketahui memiliki frekuensi aktivitas petir yang tinggi berdasarkan data BMKG. Meskipun intensitas arus petir tergolong besar, tidak ditemukan kerusakan atau gangguan operasional pada perangkat di lokasi tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa sistem grounding pada BTS tersebut telah dirancang dan diimplementasikan dengan baik, sehingga mampu menyalurkan arus petir ke tanah dengan efektif dan mencegah lonjakan tegangan berlebih pada perangkat. Kejadian ini memperkuat pentingnya penerapan sistem pembumian dengan impedansi rendah, sesuai dengan standar proteksi petir dan grounding seperti IEEE Std 80 atau SNI 03-7015-2004.

Keberhasilan sistem grounding di BTS Majapahit dalam melindungi perangkat dari dampak sambaran petir dicapai melalui penerapan beberapa elemen penting dalam desainnya. Pertama, penggunaan kombinasi elektroda grounding jenis plat dan batang terbukti meningkatkan efektivitas penyaluran arus ke tanah, khususnya saat terjadi lonjakan arus besar. Kombinasi ini memberikan luasan kontak tanah yang lebih besar dan jalur aliran arus yang lebih andal. Kedua, pada area dengan resistivitas tanah tinggi, dilakukan perbaikan kondisi tanah (soil treatment) dengan menambahkan material seperti bentonit atau karbon aktif, sehingga menurunkan nilai resistansi grounding hingga mendekati atau di bawah 5

ohm sesuai dengan rekomendasi standar IEEE Std 80. Ketiga, sistem pemantauan resistansi tanah dilakukan secara berkala, khususnya pada titik-titik kritis seperti kaki menara dan lokasi perangkat transmisi. Pemantauan ini penting untuk memastikan bahwa sistem grounding tetap berada dalam kondisi optimal dan siap menghadapi kondisi ekstrem seperti sambaran petir.

Selain itu, penggunaan data kuantitatif seperti tabel nilai resistansi pada berbagai titik pengukuran serta grafik distribusi resistansi tanah memberikan kontribusi signifikan dalam proses evaluasi sistem grounding. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi dini terhadap potensi kelemahan pada sistem, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan sebelum terjadi gangguan. Dengan pemanfaatan data tersebut, desain dan evaluasi sistem grounding di BTS STO Majapahit tidak hanya memenuhi standar keamanan kelistrikan dan telekomunikasi yang berlaku (seperti IEEE Std 80 dan SNI 03-7015-2004), tetapi juga meningkatkan keandalan sistem dalam menghadapi ancaman sambaran petir secara berkelanjutan.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

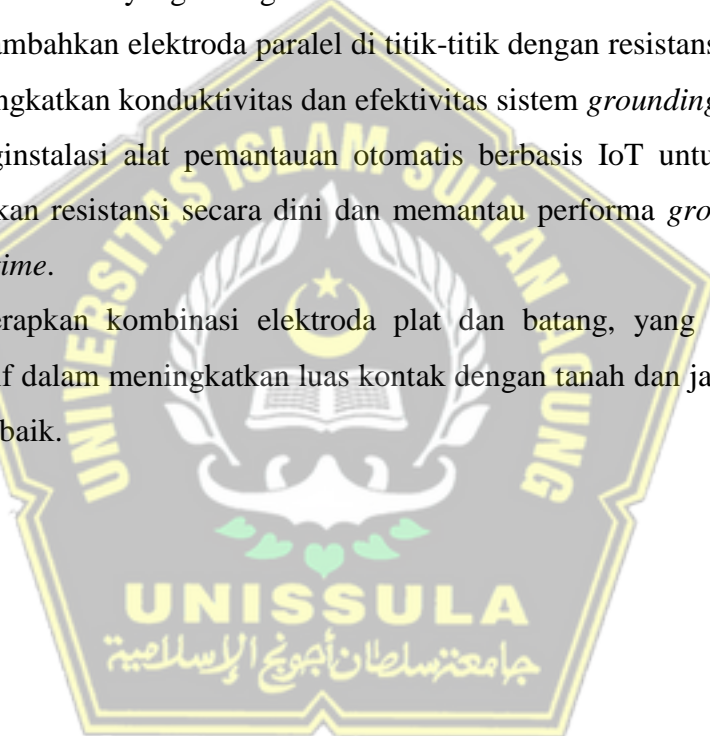
Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Evaluasi terhadap sistem pentanahan (grounding) yang saat ini terpasang di Tower BTS PT. Telkom Indonesia Wilayah Majapahit menunjukkan bahwa sistem tersebut dalam kondisi layak operasi dan aman. Berdasarkan pengambilan data aktual di lokasi, sistem elektroda pelat mencatatkan nilai resistansi rata-rata sebesar 3,53 ohm, sedangkan sistem elektroda batang (rod) menunjukkan hasil yang lebih rendah, yaitu 2,74 ohm. Kedua angka ini berada di bawah batas maksimal 5 ohm yang ditetapkan dalam standar PUIL 2000 maupun standar internasional terkait, yang berarti sistem eksisting mampu menyalurkan arus gangguan ke tanah secara efektif.
2. Melalui simulasi numerik pada berbagai karakteristik tanah, metode proteksi Faraday Cage terbukti memiliki efektivitas yang lebih tinggi jika disandingkan dengan metode Franklin Rod. Keunggulan ini terlihat dari nilai resistansi total sistem Faraday Cage yang secara konsisten lebih rendah di semua kondisi pengujian. Sebagai perbandingan, pada kondisi tanah basah, metode Faraday Cage mampu mencapai resistansi 1,894 ohm, lebih baik daripada Franklin Rod yang berada di angka 2,72 ohm. Tren serupa juga terjadi pada kondisi tanah kering dan berbatu, di mana Faraday Cage masing-masing mencatatkan nilai 6,264 ohm dan 12,514 ohm, mengungguli Franklin Rod yang memiliki resistansi lebih tinggi (7,09 ohm dan 13,34 ohm). Selain unggul dari segi resistansi, metode Faraday Cage juga dinilai lebih aman karena mampu membagi distribusi arus petir secara merata ke seluruh struktur bangunan, sehingga meminimalkan risiko penumpukan arus pada satu titik yang kerap terjadi pada sistem Franklin Rod.

5.2 Saran

Adapun saran dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pemeriksaan visual dan pengukuran ulang resistansi secara rutin setiap 6 bulan, terutama di area yang nilai resistansinya mendekati 3 Ohm.
2. Menggunakan metode *soil treatment* dengan menambahkan material konduktif seperti bentonit atau karbon aktif untuk menurunkan resistansi tanah di lokasi yang kering atau berbatu.
3. Menambahkan elektroda paralel di titik-titik dengan resistansi tinggi untuk meningkatkan konduktivitas dan efektivitas sistem *grounding*.
4. Menginstalasi alat pemantauan otomatis berbasis IoT untuk mendeteksi lonjakan resistansi secara dini dan memantau performa *grounding* secara *real-time*.
5. Menerapkan kombinasi elektroda plat dan batang, yang telah terbukti efektif dalam meningkatkan luas kontak dengan tanah dan jalur aliran arus yang baik.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. H. Rasyid, I. Puspita, and M. I. Haz, "Simulasi Tower Bts (Base Transceiver Station) Menggunakan Metode Augmented Reality Simulation of Tower Bts (Base Transceiver Station) Using the Augmented Reality Method," *J. Inform. dan Komputer) Akreditasi KEMENRISTEKDIKTI*, vol. 5, no. 3, pp. 238–242, 2022, doi: 10.33387/jiko.
- [2] S. Benyamin, Y. Surya Akbar Gumilang, and W. Dirgantara, "Prototype Monitoring Kelayakan Tower Base Transceiver Station (BTS) Berbasis Android," *JEECAE J. Electr. Electron. Control Automot. Eng.*, vol. 08, no. 01, pp. 2541–0288, 2023, [Online]. Available: <http://journal.pnm.ac.id/>
- [3] O. A. Mahendra, *Analisa Sistem Penangkal Petir Dengan Metode Konvensional Dan Elektrostatis Pada Gedung SMK Bhakti Praja Jepara*. 2022.
- [4] F. Gemilang, "Sistem Proteksi Sambaran Petir Pada Base Transceiver Station Telkomsel Karawang," *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 11, no. 1, p. 51, 2022, doi: 10.30591/polektro.v11i1.2730.
- [5] R. R. Wirasari, A. I. Makdunia, S. T. Elektro, F. Teknik, and U. A. Medan, "Sistem Proteksi Petir Tower Telekomunikasi di Kantor MSC PT . Smartfren," vol. 8, pp. 50992–50999, 2024.
- [6] P. Mahadi, E. Vonica, S. I. Rezkika, and S. Novalianda, "Evaluasi sistem penggrounding tower base transceiver station pada PT. X," *J. Vor.*, vol. 3, no. 1, pp. 209–215, 2022, doi: 10.54123/vorteks.v3i1.160.
- [7] J. Yalindua, B. Kilis, and H. Sumual, "Perancangan Sistem Pentanahan Gedung Pusat Komputer Universitas Negeri Manado," *J. EDUNITRO J. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 71–80, 2022, doi: 10.53682/edunitro.v2i2.4019.
- [8] A. B. Pulungan, H. Hambali, T. Taali, and H. Habibullah, "Perancangan

Sistem Grounding Pada Gedung Fakultas Ilmu Keolahragaan Universitas Negeri Padang,” *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 3, no. 1, pp. 111–119, 2022, doi: 10.24036/jtein.v3i1.213.

- [9] A. P. Suwarna, “Analisis Sistem Pentanahan pada Jaringan Tegangan Rendah di Gedung Mal Jayapura,” *J. Impresi Indones.*, vol. 1, no. 12, pp. 1273–1281, 2022, doi: 10.58344/jii.v1i12.742.
- [10] W. P. Rarun *et al.*, “Analisis Grounding Pada Tower Transmisi 150 kV Untuk Mencegahnya Terjadinya Back Flashover di Jalur Lopana – GIS Teling”.
- [11] A. Triyanto and A. Haryanto, “Analisa Sistem Pentanahan Di Universitas Pamulang,” *Epic J. Electr. Power Instrum. Control*, vol. 5, no. 1, p. 30, 2022, doi: 10.32493/epic.v5i1.18443.
- [12] J. Arifin, “Pengukuran Nilai Grounding Terbaik Pada Kondisi Tanah Berbeda,” *J. ELTIKOM*, vol. 5, no. 1, pp. 40–47, 2021, doi: 10.31961/eltikom.v5i1.251.
- [13] Rahmawati Fajri Latiefa, Irzan Zakir, and Massus Subekti, “Pengaruh Kelembaban Tanah Terhadap Tahanan Pentanahan Studi Kasus Pada Gardu Induk Kemayoran 150 Kv,” *J. Electr. Vocat. Educ. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 44–49, 2021, doi: 10.21009/jevet.0061.09.
- [14] G. U. Hardi, T. Taufiq, Raihan Putri, and F. A. Nasution, “Pengaruh Tahanan Jenis Tanah Terhadap Sistem Pentanahan Menggunakan Elektroda Batang Dilokasi Gedung Teknik Elektro Unimal,” *INSOLOGI J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 2, pp. 314–326, 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i2.1818.
- [15] H. Yuliadi and S. Hardi, “Perbandingan Penambahan Material Asbes Dan Gypsum Dengan Campuran NaCl Dan Arang Untuk Mereduksi Resistansi Pentanahan (Aplikasi: Balai Besar Pengembangan Penjaminan Mutu Pendidikan Vokasi Bidang Bangunan Listrik Medan),” *RELE (Rekayasa*

- Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 1, 2022, doi: 10.30596/rele.v5i1.10785.
- [16] Riyanto, “Analisis Perancangan Sistem Pentanahan Grid Secara Optimal pada Sistem Tenaga Listrik,” *J. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 55–64, 2021.
- [17] I. M. Nur, I. H. Kurniawan, and W. Winarso, “Perbandingan Perbaikan Sistem Pentanahan Instalasi Listrik Dengan Menggunakan Bentonit Teraktivasi Dan Sistem Pentanahan Arang-Garam (Sigarang),” *J. Ris. Rekayasa Elektro*, vol. 3, no. 1, 2021, doi: 10.30595/jrre.v3i1.9667.
- [18] IEEE, *Ieee Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.*, vol. 2007. 2007.
- [19] Zulhajji, A. Imran, and Haripuddin, “Analisis Resistansi Sistem Pembumian Elektroda Batang Berdasarkan Jenis Tanah,” *Univ. Negeri Makassar*, vol. 2, pp. 1092–1103, 2022.
- [20] H. Yuliadi, S. Hardi, and Rohana, “Analisis Perbandingan Tahanan Pentanahan Pada Elektroda Batang Dan Plat Untuk Perbaikan Nilai Resistansi Pembumian,” *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 68–74, 2021.
- [21] C. T. S. Manik, “Measurement of Earth Value Using Earth Tester Measurement at Efarina University,” *J. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 42–47, 2020, doi: 10.55299/jostec.v2i1.51.