

**ANALISA EFEKTIVITAS PEMASANGAN *MULTIROD GROUNDING*
(MRG) UNTUK MENGATASI GANGGUAN *RECLOSE* KARENA PETIR
PADA SUTET 500 KV MANDIRANCAN-PEMALANG LINE 3&4
WILAYAH ULTG TEGAL DENGAN METODE *PAIRED SAMPLE T TEST***

LAPORAN TUGAS AKHIR

LAPORAN INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT
MEMPEROLEH GELAR S1 PADA PRODI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG



DISUSUN OLEH:

REZA MUHAMMAD GHANI

NIM 30602200237

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

2025

FINAL PROJECT

**ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF MULTIROD GROUNDING
(MRG) INSTALLATION TO OVERCOME RECLOSE DISTURBANCES
DUE TO LIGHTNING ON 500 KV MANDIRANCAN-PEMALANG
TRANSMISSION LINE 3&4 ULTG TEGAL AREA USING THE PAIRED
SAMPLE T TEST METHOD**

*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*



Arranged by :

REZA MUHAMMAD GHANI

NIM 30602200237

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

2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**ANALISA EFEKTIVITAS PEMASANGAN *MULTIROD GROUNDING* (MRG) UNTUK MENGATASI GANGGUAN *RECLOSE* KARENA PETIR PADA SUTET 500KV MANDIRANCAN-PEMALANG LINE 3&4 WILAYAH ULTG TEGAL DENGAN METODE *PAIRED SAMPLE T TEST***” ini disusun oleh:

Nama : REZA MUHAMMAD GHANI
NIM : 30602200237
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Rabu
Tanggal : 12 Februari 2025

Pembimbing I


Jenny Putri Hapsari, ST., MT.
NIDN. 0607018501

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Jenny Putri Hapsari, ST., MT.
NIDN. 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISA EFEKTIVITAS PEMASANGAN MULTIROD GROUNDING (MRG) UNTUK MENGATASI GANGGUAN RECLOSE KARENA PETIR PADA SUTET 500KV MANDIRANCAN-PEMALANG LINE 3&4 WILAYAH ULTG TEGAL DENGAN METODE PAIRED SAMPLE T TEST” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Jumat
Tanggal : 21 Februari 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Dr. Ir. Muhammad Khosyi'in, ST., MT., IPM.
NIDN : 0625077901
Ketua

4 Maret 2025

Dr. Ir. H. Sukarno Budi Utomo, MT.
NIDN : 0619076401
Penguji I

Jenny Putri Hapsari, ST., MT.
NIDN : 0607018501
Penguji II

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Reza Muhammad Ghani
NIM : 30602200237
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“ANALISA EFEKTIVITAS PEMASANGAN *MULTIROD GROUNDING* (MRG) UNTUK MENGATASI GANGGUAN *RECLOSE* KARENA PETIR PADA SUTET 500 KV MANDIRANCAN-PEMALANG LINE 3&4 WILAYAH ULTG TEGAL DENGAN METODE *PAIRED SAMPLE T TEST*”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, Februari 2025

Yang Menyatakan



Reza Muhammad Ghani

HALAMAN PERSEMBAHAN

Persembahan :

Pertama,

Tugas Akhir ini saya persembahkan kepada orang tua saya tercinta, Bapak Rumiyanto & Ibu Untung Wahyuni, yang telah mendidik dan merawat saya dengan sepenuh hati, mendukung, mendoakan dan memotivasi saya untuk menjadi pribadi yang berilmu, berakhlak, dan bermanfaat

Kedua,

Untuk istri saya tercinta, Ardina Trivera Kurniawati, yang selalu mendampingi, memberikan dukungan, doa, masukan, nasihat, serta semangat dalam menuntut ilmu dan dalam menyelesaikan studi

Ketiga,

Untuk Dosen Pembimbing dan seluruh Dosen Teknik Elektro yang selalu memberikan ilmu, pengalaman, dan arahannya

Keempat

Untuk keluarga, kerabat, sahabat, dan teman-teman Teknik Elektro yang saling mendukung satu sama lain

HALAMAN MOTO

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

“Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang”

وَمَنْ يَتَّقِ اللَّهَ يَجْعَلْ لَهُ مَخْرَجًا وَيَرْزُقْهُ مِنْ حَيْثُ لَا يَحْتَسِبُ

“Siapa yang bertakwa kepada Allah, niscaya Dia akan membukakan jalan keluar baginya, dan menganugerahkan kepadanya rezeki dari arah yang tidak dia duga.” (QS. At-Talaq 2-3)

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا إِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

“Maka, sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan.” (QS. Al-Insyirah 5-6)

وَمَنْ سَلَكَ طَرِيقًا يَلْتَمِسُ فِيهِ عِلْمًا سَهَّلَ اللَّهُ لَهُ بِهِ طَرِيقًا إِلَى الْجَنَّةِ

“Siapa yang menempuh jalan untuk mencari ilmu, maka Allah akan mudahkan baginya jalan menuju surga.” (HR. Muslim, no. 2699)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'aalamiin segala puji syukur atas kehadiran Allah *subhaanahu wa ta'aalaa*, yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “Analisa Efektivitas Pemasangan *Multirod Grounding* (MRG) untuk Mengatasi Gangguan *Reclose* karena Petir pada SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 Wilayah ULTG Tegal dengan Metode *Paired Sample T Test*”. Sholawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad *shallallahu 'alaihi wasallam*.

Laporan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat bagi mahasiswa untuk meraih gelar sarjana (S1) di program studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas mendapat bantuan dari berbagai pihak. Dengan hati yang tulus, penulis ingin menyampaikan banyak terimakasih kepada:

1. Allah *subhaanahu wa ta'aalaa* yang telah memberikan limpahan rezeki, kemudahan, ketenangan hati, rahmat serta hidayah Nya dalam menimba ilmu.
2. Bapak, Ibu, dan adik yang selalu memberi support dan mendoakan.
3. Istri tercinta Ardina Trivera Kurniawati yang selalu mendampingi, memberikan dukungan, doa, masukan, nasihat, serta semangat dalam menjalani dan menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
4. Bapak Prof. Dr. H. Gunarto, SH., MH., selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
5. Ibu Dr. Ir Novi Marlyana, ST., MT., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
6. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang dan sekaligus selaku Dosen Pembimbing saya yang telah memberikan bimbingan dan dukungan dalam penyusunan tugas akhir ini.
7. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas ilmu, bimbingan, dan bantuannya dalam penyelesaian tugas akhir ini.

8. Teman-teman seperjuangan, Mahasiswa Teknik Elektro angkatan 2022 yang saling support dalam pembuatan laporan tugas akhir.
9. Rekan-rekan GI Balapulang, ULTG Tegal, dan UPT Purwokerto yang telah membantu dalam pembuatan laporan tugas akhir ini.

Penulis juga menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan, baik dari segi materi maupun penyajiannya. Penulis meminta maaf dan juga membutuhkan kritik maupun saran yang membangun dari berbagai pihak, sehingga kedepan Tugas Akhir ini dapat menjadi lebih baik. Akhirnya penulis berharap, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat dan wawasan bagi para pembaca dan khususnya bagi penulis juga.

Semarang, Februari 2025

Reza Muhammad Ghani



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
SURAT PERNYATAAN	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
HALAMAN MOTO	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
ABSTRAK.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Pembatasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	2
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	4
2.1. Tinjauan Pustaka	4
2.2. Landasan Teori	5
2.2.1. Sistem Pentanahan Kaki Menara Tower	5
2.2.2. Metode Driven Rod.....	7
2.2.3. Metode Counterpoise	9
2.2.4. Pembumian Pondasi	10
2.2.5. Tahanan Pentanahan.....	10
2.2.6. Tahanan Jenis Tanah.....	11
2.2.7. <i>Multirod Grounding</i> (MRG).....	12
2.2.8. <i>Paired Sample T-Test</i>	16
2.2.9. Petir	18
BAB III METODE PENELITIAN.....	22
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	22

3.2.	Tahapan Penelitian.....	22
3.3.	Metode Pengumpulan Data	23
3.4.	Pengukuran Tahanan Pentanahan Tower	23
3.5.	Alat Pelindung Diri	24
3.6.	Peralatan dan Material.....	25
3.7.	Metode Analisa Data	26
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		28
4.1.	Hasil Penelitian.....	28
4.1.1.	Perhitungan Tahanan Pentanahan	29
4.1.2.	Pemasangan <i>Multirod Grounding</i> (MRG).....	30
4.1.3.	Hasil Pengukuran	33
4.2.	Pembahasan	34
4.2.1.	Analisa Hasil Pengukuran Tahanan Pentanahan.....	35
4.2.2.	Analisa Pengurangan Kerusakan Isolator Tower.....	41
BAB V PENUTUP.....		45
5.1.	Kesimpulan.....	45
5.2.	Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA.....		46
LAMPIRAN.....		48



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai tahanan pembumian pada 5 tower dari gardu induk.....	6
Tabel 2.2 Tahanan jenis beberapa jenis tanah	11
Tabel 4.1 Hasil pengukuran tahanan pentanahan kaki tower sebelum dan sesudah pemasangan MRG.....	33
Tabel 4.2 Hasil analisa pengukuran tahanan pentanahan dengan $\alpha=0,05$	37
Tabel 4.3 Hasil analisa pengukuran tahanan pentanahan dengan $\alpha=0,01$	40



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kondisi-kondisi potensi tersengat [9]	6
Gambar 2.2 Contoh metode driven rod [8]	7
Gambar 2.3 Contoh metode countepoise [8]	9
Gambar 2.4 Contoh pola countepoise [8]	9
Gambar 2.5 Contoh pemasangan plat pada bidang struktur baja pondasi [8].....	10
Gambar 2.6 Desain Multirod Grounding (MRG) [15].....	13
Gambar 2.7 Ground Rod untuk MRG [15].....	14
Gambar 2.8 Earth Wire untuk MRG [15]	14
Gambar 2.9 Sepatu kabel (skun) untuk MRG [15]	15
Gambar 2.10 Mur dan baut galvanis untuk MRG [15]	15
Gambar 2. 11 Mekanisme terjadinya petir [19]	18
Gambar 2. 12 Flashover pada Isolator [20].....	19
Gambar 3. 1 Diagram Alir Proses Penelitian	22
Gambar 3. 2 Earth Resistance Tester dengan Merk Kyoritsu Model 4105A	23
Gambar 3. 3 Metode Pengukuran pada kaki tower / rod /paralel.....	24
Gambar 3. 4Penggunaan APD lengkap untuk pemasangan MRG dan pengukuran tahanan pentanahan	25
Gambar 3.5 Tampilan metode t-Test: Paired Two Sample for Means pada fitur Data Analysis Microsoft Excel.....	27
Gambar 4. 1 Lokasi tower-tower (highlight kuning) yang diambil datanya untuk penelitian.....	28
Gambar 4. 2 Briefing sebelum pekerjaan.....	30
Gambar 4. 3 Menguji tahanan pentanahan tiap kaki tower sebelum pemasangan MRG..	31
Gambar 4. 4 Mengukur jarak kaki tower dengan ground rod yang akan ditanam	31
Gambar 4. 5 Melakukan penggalian tanah sesuai ukuran	32
Gambar 4. 6 Menghubungkan ground rod dan kaki tower dengan earth wire.....	32
Gambar 4. 7 Menguji tahanan pentanahan tiap kaki tower setelah pemasangan MRG....	32
Gambar 4. 8 Mengubah susunan tabel ke dalam 2 kolom untuk analisa data.....	36
Gambar 4. 9 Menampilkan menu t-Test: Paired Two Sample for Means pada Microsoft Excel	36
Gambar 4. 10 Tahapan pemilihan kolom data dan pengisian parameter analisa data.....	37
Gambar 4. 11 Kerusakan isolator (flashover) yang disebabkan sambaran petir pada T.171	41
Gambar 4. 12 Data gangguan petir wilayah ULTG Tegal tahun 2024.....	43
Gambar 4. 13 Kondisi isolator yang baik setelah dilakukan pemasangan MRG pada tower 171	44

ABSTRAK

Pertumbuhan pelanggan PLN terus meningkat setiap tahunnya, dengan kenaikan dari tahun 2014 hingga tahun 2023 rata-rata 5,26%. Kebutuhan listrik yang meningkat ini dibutuhkan keandalan pada sistem transmisi salah satunya SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang line 3&4. SUTET ini menyalurkan tenaga listrik dari 2 pembangkit besar, yaitu PLTU Batang dan PLTU Tanjungjati. Sepanjang tahun 2022 dan 2023 terdapat 5 kali gangguan reclose yang disebabkan petir pada SUTET tersebut di wilayah ULTG Tegal. Tindak lanjut pencegahan gangguan petir adalah dengan memperkecil nilai tahanan pentanahan tower.

Metode yang digunakan adalah dengan menambah beberapa rod grounding (Multirod Grounding/MRG) pada masing-masing leg tower yang terkena sambaran petir dan tower-tower lain di sebelahnya, depan (5 tower) dan belakang (5 tower). Sehingga diharapkan arus petir dapat cepat tersalurkan ke tanah. Metode analisa data yang digunakan adalah paired sample t-test (uji T sampel berpasangan) dengan mengolah data hasil pengukuran tahanan pentanahan pada 53 tower SUTET sebelum dan setelah pemasangan MRG. Pengolahan data dilakukan dengan fitur Data Analysis yang terdapat pada Microsoft Excel Office 2021.

Pemasangan MRG dapat menurunkan tahanan pentanahan pada tower yang terkena gangguan. Nilai rata-rata tahanan pentanahan sebelum dan setelah pemasangan MRG adalah 3,75 Ω dan 1,33 Ω . Berdasarkan analisa data dengan metode Paired Sample T Test, diperoleh $t_{hitung} (t_{stat}) > t_{tabel} (t_{critical \text{ one-tail}})$ dengan nilai 7,29 > 2,34 dan diperoleh P-value ($P_{(T <= t) \text{ one-tail}} < \alpha(\text{alpha})$) dengan nilai $2,97888 \times 10^{-12} < 0,01$. Dari hasil tersebut maka hipotesis nol ditolak dan menerima hipotesis alternatif bahwa ada perbedaan sangat signifikan antara tahanan pentanahan tower sebelum dan setelah pemasangan MRG, sehingga pemasangan MRG efektif secara statistik. Berdasarkan data gangguan 2024, diperoleh data tidak adanya gangguan sistem yang disebabkan sambaran petir sehingga berpengaruh terhadap pengurangan kerusakan isolator pada ruas transmisi SUTET tersebut.

Kata kunci: tahanan pentanahan, multirod grounding (MRG), paired sample t-test

ABSTRACT

PLN's customer growth continues to increase every year, with an average increase from 2014 to 2023 of 5.26%. This increasing need for electricity requires reliability in the transmission system, one of which is the 500kV Mandirancan-Pemalang line 3&4 extra high voltage transmission line. This transmission line (SUTET) distributes electricity from 2 large power plants, namely the Batang Coal Power Plant and the Tanjungjati Coal Power Plant. Throughout 2022 and 2023, there were 5 reclose disturbances caused by lightning on the transmission line in the Tegal ULTG area. The follow-up to preventing lightning disturbances is to reduce the tower grounding resistance value.

The method used is to add several grounding rods (Multirod Grounding/MRG) to each tower leg that is struck by lightning and other towers next to it, front (5 towers) and back (5 towers). So that it is hoped that the lightning current can be quickly channeled to the ground. The data analysis method used is the paired sample t-test by processing the grounding resistance measurement data on 53 SUTET towers before and after the installation of MRG. Data processing is carried out using the Data Analysis feature in Microsoft Excel Office 2021.

MRG installation can reduce the grounding resistance on the tower affected by the disturbance. The average grounding resistance value before and after the installation of MRG is 3.75Ω and 1.33Ω . Based on data analysis using the Paired Sample T Test method, $t_{\text{count}} (t_{\text{stat}}) > t_{\text{table}} (t_{\text{critical one-tail}})$ with a value of $7.29 > 2.34$ and a P-value ($P_{(T \leq t) \text{ one-tail}} < \alpha(\text{alpha})$) with a value of $2.97888 \times 10^{-12} < 0.01$ is obtained. From these results, the null hypothesis is rejected and the alternative hypothesis is accepted that there is a very significant difference between the grounding resistance of the tower before and after the installation of MRG, so that the installation of MRG is statistically effective. Based on the 2024 disturbance data, data was obtained that there was no system disturbance caused by lightning strikes, which had an impact on reducing damage to the insulators on the 500kV Mandirancan-Pemalang line 3&4 transmission line.

Keywords: grounding resistance, multirod grounding (MRG), paired sample t-test

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pertumbuhan pelanggan PLN terus meningkat setiap tahunnya. Berdasarkan data statistik PLN tahun 2023, kenaikan jumlah pelanggan dari tahun 2014 hingga tahun 2023 rata-rata 5,26%. Kenaikan energi listrik yang terjual dari tahun 2014 hingga tahun 2022 rata-rata 4,31%. Pada tahun 2023 energi listrik yang terjual sebesar 273.761,48 GWh [1]. Untuk mengakomodir permintaan tenaga listrik yang terus meningkat maka dibutuhkan sistem yang andal dari mulai dari sistem pembangkitan hingga sistem distribusi.

Pengembangan sistem saluran transmisi SUTET (Saluran Udara Tegangan Extra Tinggi) 500kV dibutuhkan untuk evakuasi daya dari pembangkit menuju ke pusat beban. Adanya saluran transmisi baru akan meningkatkan keandalan dan memudahkan pengoperasian penyaluran tenaga listrik. Salah satunya adalah SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang line 3 dan line 4 yang beroperasi pada tahun 2022. SUTET ini menghubungkan GITET 500 kV Mandirancan di Kuningan dan GITET 500kV Pemalang di Batang sepanjang 169,71 kms. SUTET ini menyalurkan tenaga listrik dari 2 pembangkit besar, yaitu PLTU Batang dan PLTU Tanjungjati. Menara tower SUTET ini berjenis *Lattice Tower* mempunyai 2 sirkuit [2].

Sepanjang tahun 2022 dan 2023 terdapat 5 kali gangguan *reclose* pada SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 di wilayah Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk (ULTG) Tegal yang disebabkan petir, ditunjukkan pada lampiran 1 [3]. Tindak lanjut yang efektif untuk mencegah gangguan petir adalah dengan memperkecil nilai tahanan pentanahan tower. Metode yang digunakan adalah dengan menambah beberapa rod grounding (*Multirod Grounding/MRG*) pada masing-masing *leg* tower yang terkena sambaran petir dan tower-tower lain disebelahnya, depan (5 tower) dan belakang (5 tower) pada tower yang terkena gangguan. Sehingga diharapkan arus petir dapat cepat tersalurkan ke tanah.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada maka dapat ditentukan perumusan masalah, yaitu:

1. Bagaimana cara menurunkan tahanan pentanahan pada tower SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 yang terkena gangguan petir?
2. Bagaimana efektivitas pemasangan MRG terhadap tahanan pentanahan tower sebelumnya?
3. Bagaimana pemasangan MRG berpengaruh terhadap pengurangan kerusakan isolator akibat sambaran petir pada tower SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4?

1.3. Pembatasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan berdasarkan implementasi desain *Multirod Grounding* (MRG) dari PLN pada ruas SUTET Mandirancan-Pemalang Line 3&4 wilayah ULTG Tegal.
2. Hasil pentanahan tower yang digunakan dalam penelitian ini adalah pada tower yang terpasang MRG.
3. Metode yang digunakan untuk mengukur efektivitas MRG adalah metode *Paired Simple t- test*.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini diantaranya:

1. Mengetahui cara pemasangan *multirod grounding* (MRG) pada tower SUTET untuk memperkecil tahanan pentanahan.
2. Mengetahui efektivitas pemasangan MRG terhadap tahanan pentanahan tower sebelumnya.
3. Mengetahui pengaruh pemasangan MRG terhadap pengurangan kerusakan isolator akibat sambaran petir pada tower SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Menjadi referensi pemasangan *multirod grounding* (MRG) yang benar pada tower.
2. Menambah pengetahuan tentang efektivitas pemasangan MRG terhadap tahanan pentanahan tower dan pengurangan frekuensi gangguan petir.
3. Membantu PLN dalam mengevaluasi efektivitas pemasangan MRG.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian-penelitian yang sudah dilakukan terkait sistem pentanahan dan analisa pemasangan *multirod grounding*, diantaranya:

Penelitian yang dilakukan oleh Dedi Pranatali membahas kelayakan sistem grounding pada tower SUTT 150 kV Jelok-Beringin. Data hasil pengukuran pentanahan dianalisa dengan metode komparasi dengan standar yang berlaku. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi hasil pentanahan yaitu karakteristik tanah, penghantar pentanahan dan ground rod. Hasil pengukuran menunjukkan 95,83% tower mempunyai karakteristik tahanan pentanahan yang baik. Terdapat usulan perbaikan tahanan pentanahan yang belum baik dengan cara penambahan elektroda batang panjang 6 meter. Perlu penambahan elektroda batang tersebut sebanyak 3 buah setiap kaki tower. Hasil analisa perhitungan tahanan pentanahan tiap kaki tower setelah dilakukan perbaikan adalah 1,17 ohm [4].

Penelitian tentang analisa pembumian pada tower SUTT Kapal-Gianyar dilakukan oleh IGP Agung Setya. Pada penelitian ini bertujuan memperbaiki nilai pembumian agar sesuai standar yakni ≤ 10 ohm. Dijelaskan analisa perhitungan spesifikasi batang elektroda berdasarkan jenis tanah. Jenis tanah dalam analisa ini adalah tanah sawah, tanah liat ladang, dan tanah lempung. Terdapat perhitungan biaya yang dibutuhkan untuk setiap kebutuhan perbaikan pembumian [5].

Budi Eko Prasetyo dalam penelitiannya tentang analisa perbaikan pentanahan tower 70 kV Wlingi – Blitar menjelaskan pentingnya untuk mencegah terjadinya Back Flash Over ketika terjadi sambaran petir pada tower 17. Cara yang dilakukan dengan perbaikan pentanahan dengan penambahan 4 buah batang elektroda panjang 2 meter. Diperlukan jarak 0,5 meter antar elektroda dengan diameter 4 mm yang dihubung paralel dengan grounding eksisting. Terdapat perhitungan tegangan induksi dari petir pada saat sebelum dan sesudah perbaikan

pentanahan. *BIL* pada isolator dan trafo dapat melindungi aset tersebut dari simulasi perhitungan sambaran setelah perbaikan [6].

Nurul Maghfiroh dalam penelitiannya tentang analisis pemasangan multirod grounding pada ruas SUTT 70 kV Sunyaragi-Kuningan menjelaskan dengan menambah beberapa rod pada pentanahan tower berpeluang menurunkan nilai tahanan (ohm) pada tower sehingga memperkecil tegangan petir yang melewati tower transmisi. Dengan 3 buah elektroda tambahan yang dihubungkan setiap *leg* kaki tower, akan membuat penurunan nilai pentanahan dengan akurasi lebih dari 95%. Pengukuran pemasangan multirod grounding tersebut diproses dengan metode *Paired Samples t Test* [7].

2.2. Landasan Teori

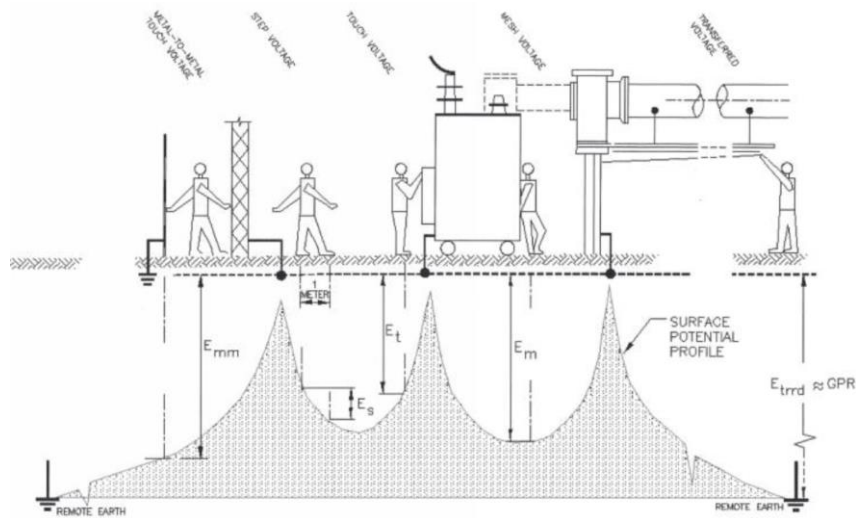
2.2.1. Sistem Pentanahan Kaki Menara Tower

Pentanahan (*Grounding*) adalah menghubungkan sebuah objek atau jaringan kelistrikan ke tanah atau bumi melalui konduktor. Pembumian pada tower transmisi pada Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi (SUTET) bertujuan untuk menjamin keamanan personil dari tegangan sentuh dan tegangan langkah pada tower, dan mengalirkan impuls petir ke bumi.

Tegangan langkah (*Estep*) adalah tegangan yang timbul diantara dua kaki seseorang yang melangkah dengan jarak 1 (satu) meter tanpa menyentuh objek yang ditanahkan. Pengertian tegangan langkah sesuai gambar 2.1 (*step voltage*).

Ground Potential Rise (GPR) adalah tegangan listrik maksimum yang mungkin timbul pada suatu sistem mesh grounding, relatif terhadap suatu titik pembumian yang diasumsikan sebagai tegangan nol bumi. Pengertian *GPR* mengacu kepada gambar 2.1.

Tegangan sentuh (*Etouch*) adalah beda tegangan antara *GPR* dengan tegangan permukaan pada suatu titik dimana seseorang berdiri dan menyentuh objek yang ditanahkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1 [8].



Gambar 2. 1 Kondisi-kondisi potensi tersengat [9]

Metode pembumian pada tower dilakukan dengan metode driven rod, metode *counterpoise*, metode lainnya, atau kombinasinya sehingga nilai tahanan pembumian pada tower tercapai maksimal 10 Ω . Pada tower yang sering terjadi gangguan *back-flashover* bisa menggunakan nilai tahanan yang lebih rendah [10]. Khusus untuk 5 tower dari gardu induk nilai tahanan pembumian pada tower sesuai Tabel 2.1. Pengukuran tahanan pembumian tower diukur tanpa dihubungkan dengan kaki tower.

Tabel 2.1 Nilai tahanan pembumian pada 5 tower dari gardu induk [8]

Level Tegangan Sistem	Nilai Tahanan Pembumian Tower [ohm]
66 kV	≤ 3
150 kV	≤ 3
275 kV	≤ 3
500 kV	≤ 1

Dalam hal ditentukan lain atau disepakati, dapat ditambahkan dengan metode pembumian pondasi. Kaki tower dihubungkan ke sistem pembumian yang digunakan melalui konduktor pembumian. Jika material yang digunakan berbeda, titik sambung kaki tower ke konduktor pembumian menggunakan *earthing clamp* jenis bimetal.

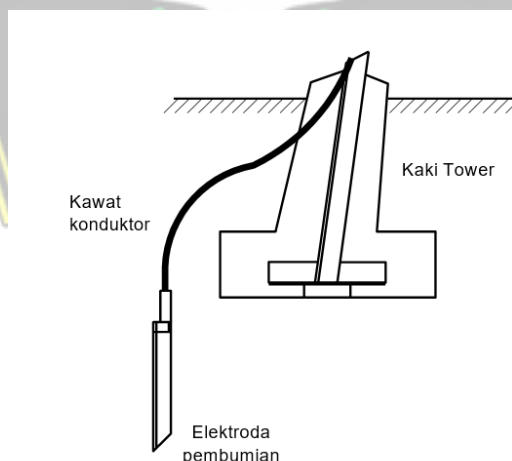
Pada kondisi sering terjadinya gangguan *back-flashover*, dapat dilakukan pengisolasian tower dari arus petir sehingga arus petir akan langsung masuk ke dalam tanah tanpa mengakibatkan naiknya tegangan pada tower.

Pada kondisi permukiman atau peternakan, perlu dipertimbangkan sistem pembumian tower khusus untuk menghindari bahaya tegangan langkah. Untuk hal ini, dapat menggunakan *counterpoise* empat titik yang ditarik *horizontal radial* ke arah luar, pengisolasian *driven rod*, atau metode lainnya; dan dilengkapi dengan *ring grounding* [8].

2.2.2. Metode Driven Rod

Metode driven rod dilakukan dengan menanam kawat konduktor dan elektrode batang pembumian tegak lurus permukaan tanah lalu menghubungkannya ke kaki tower.

Kawat yang digunakan terbuat dari tembaga dengan luas penampang minimal 38 mm² atau baja galvanis dengan luas penampang minimal 55 mm². Pada ujungnya dipasang elektrode pembumian yang terbuat dari tembaga (*copper-clad steel*) dengan panjang minimal 2 m (gambar 2.2). Jumlah driven rod disesuaikan sehingga didapat nilai pembumian yang dibutuhkan [8].



Gambar 2.2 Contoh metode *driven rod* [8]

Tahanan elektrode batang R dalam ohm (Ω) dapat dihitung seperti pada rumus persamaan 2.1 [11]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

dengan:

R = tahanan elektroda batang, dalam ohm (Ω)

ρ = tahanan jenis tanah (resistivity), dalam ohm meter (Ωm)

L = panjang dari elektroda batang, dalam meter (m)

d = diameter elektroda batang, dalam meter (m)

Beberapa elektroda batang yang dipasang paralel menghasilkan resistansi yang lebih rendah terhadap tanah daripada satu elektroda. Beberapa batang biasanya digunakan untuk menyediakan resistansi pentanahan rendah yang dibutuhkan oleh instalasi berkapasitas tinggi [12]. Pada koneksi paralel elektroda batang yang sejajar vertikal, tahanan total dapat dihitung pada rumus persamaan 2.2 sebagai berikut [11]:

$$R_t = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 + \frac{L}{s} \ln \left(\frac{1,78n}{2,718} \right) \right] \quad (2.2)$$

dengan:

R_t = tahanan elektroda batang, dalam ohm (Ω)

n = jumlah elektroda batang yang terpasang

ρ = tahanan jenis tanah (resistivity), dalam ohm meter (Ωm)

L = panjang dari elektroda batang, dalam meter (m)

d = diameter elektroda batang, dalam meter (m)

s = jarak antar elektroda batang, dalam meter (m)

Untuk mendapatkan nilai tahanan total antara tahanan kaki tower dan tahanan penambahan elektroda batang, dapat dicari dengan rumus tahanan hubungan *parallel* yaitu:

$$\frac{1}{R_{\text{paralel}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.3)$$

Dimana:

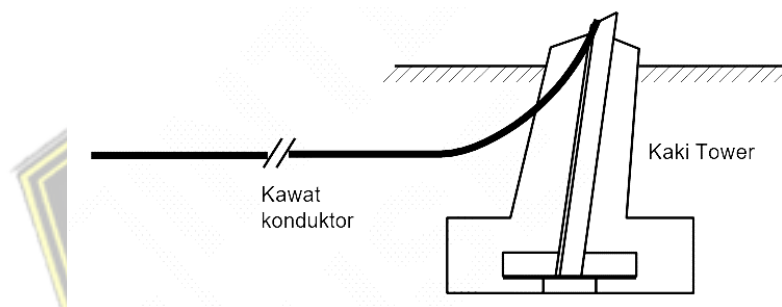
R_{paralel} = Tahanan pembumian total (Ω)

R_1 = Tahanan kaki tower (Ω)

R_2 = Tahanan penambahan elektroda batang (Ω)

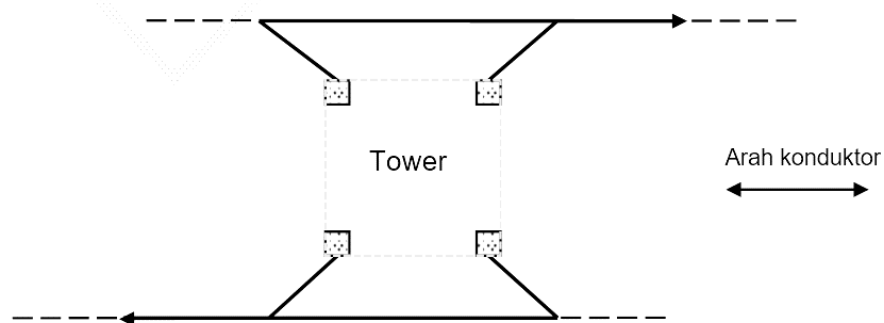
2.2.3. Metode Counterpoise

Metode *counterpoise* dilakukan dengan menanam kawat konduktor horizontal di dalam tanah dengan kedalaman minimal 0,8 m (gambar 2.3). Kawat yang digunakan terbuat dari tembaga dengan luas penampang minimal 38 mm^2 atau baja galvanis dengan luas penampang minimal 55 mm^2 .



Gambar 2.3 Contoh metode *counterpoise* [8]

Penggelaran kawat di dalam tanah dilakukan menjauhi kaki tower dengan arah sejajar konduktor (gambar 2.4).

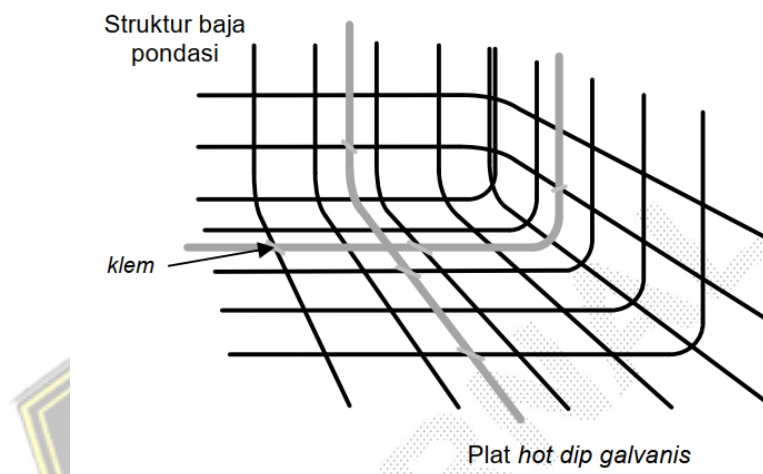


Gambar 2.4 Contoh pola *counterpoise* [8]

Pola penggelaran *counterpoise* dan panjang konduktor disesuaikan sehingga didapat nilai pembumian yang dibutuhkan [8].

2.2.4. Penumbumian Pondasi

Penumbumian pondasi dilakukan dengan memanfaatkan struktur baja pondasi sebagai elektrode penumbumian. Struktur baja pondasi ditambahkan plat *hot dip galvanis* sehingga terhubung elektris dengan baik (gambar 2.5). Plat ini menuju ke terminal penumbumian pondasi lalu dihubungkan ke kaki atau struktur tower [8].



Gambar 2.5 Contoh pemasangan plat pada bidang struktur baja pondasi [8]

2.2.5. Tahanan Pentanahan

Tahanan pentanahan adalah salah satu faktor kunci dalam usaha pengamanan, perlindungan instalasi listrik. Tahanan tanah (*soil resistance*) adalah nilai resistansi tanah dalam ohm (Ω) yang didapat melalui pengukuran menggunakan *earth tester* [8].

Agar sistem pentanahan dapat bekerja dengan efektif, sistem pentanahan harus memenuhi persyaratan sebagai berikut [13]:

- Membuat jalur impedansi rendah ke tanah untuk pengamanan personil dan peralatan menggunakan rangkaian yang efektif.
- Dapat melawan dan menyebarkan gangguan berulang dan arus akibat sambaran petir.
- Bahan tahan korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi tanah, untuk bisa dipakai dalam jangka waktu yang panjang.

- d. Menggunakan sistem mekanik yang kuat namun mudah dalam pelayanan. Sistem pentanahan yang baik akan memberikan keandalan pada sistem tenaga listrik, disamping keamanan yang terjaga pada sistem tenaga listrik juga peralatan lain yang mendukungnya.

2.2.6. Tahanan Jenis Tanah

Tahanan jenis tanah (*soil resistivity*) adalah nilai yang menunjukkan resistansi spesifik tanah, dinyatakan dalam satuan ohm.meter ($\Omega.m$). Tahanan jenis tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain: tipe tanah, kelembaban tanah, komposisi kimia dan konsentrasi garam terkandung dalam air pada tanah, dan juga dipengaruhi oleh temperatur, ukuran butiran, dan kepadatan tanah.

Tanah dengan kelembaban tinggi akan memiliki tahanan jenis tanah yang rendah. Dengan memberi air atau membasahi tanah adalah metode konvensional untuk menurunkan tahanan jenis tanah dengan meningkatkan kelembaban tanah. Harga tahanan jenis tanah pada kedalaman yang terbatas sangat bergantung dengan keadaan cuaca. Untuk mendapatkan tahanan jenis rata-rata untuk perencanaan maka diperlukan penyelidikan atau pengukuran dalam jangka waktu tertentu. [14]

Berdasarkan Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011 mengenai tahanan jenis tanah dari berbagai jenis tanah dapat dilihat pada tabel 2.2 [13].

Tabel 2.2 Tahanan jenis beberapa jenis tanah [13]

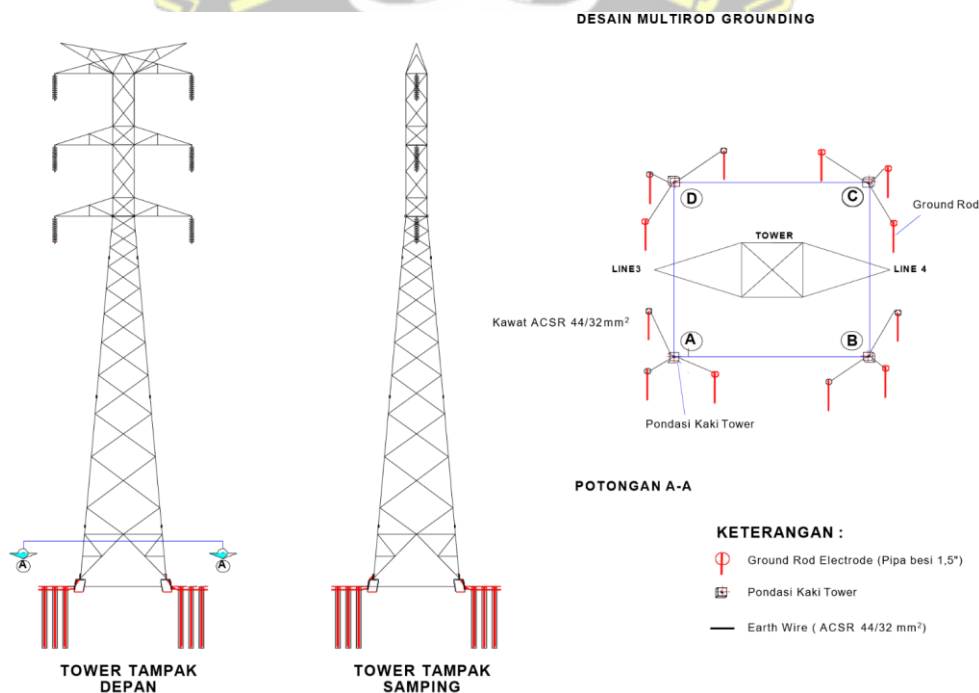
No	Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah ($\Omega.m$)
1	Tanah rawa	30
2	Tanah liat dan tanah ladang	100
3	Pasir basah	200
4	Kerikil basah	500
5	Pasir dan kerikil batu	1000
6	Tanah berbatu	3000

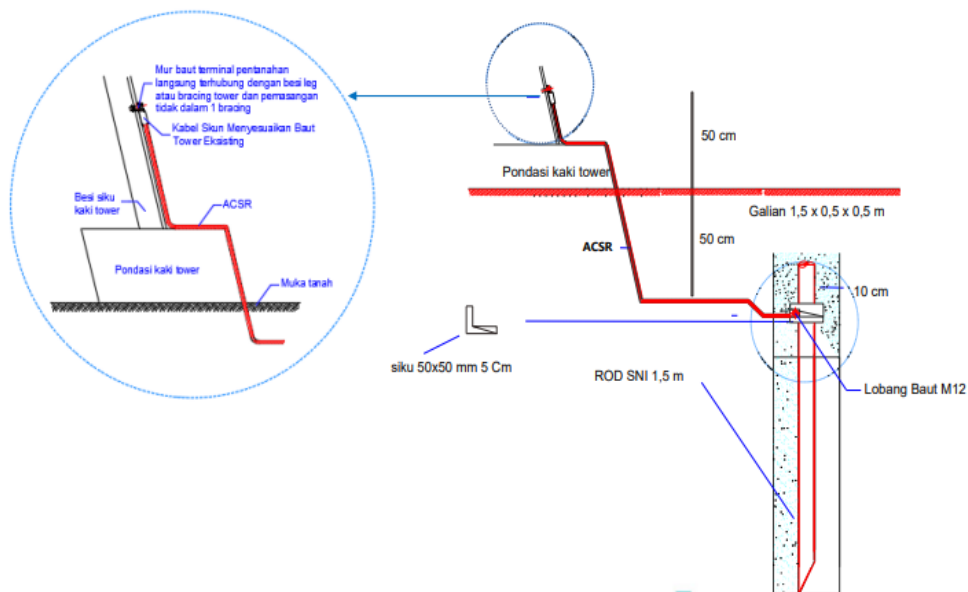
2.2.7. Multirod Grounding (MRG)

Multirod Grounding pada tower transmisi adalah sebuah metode menurunkan tahanan pentanahan tower dengan pemasangan 3 buah *ground rod* (elektroda batang) yang tertanam secara vertikal dalam tanah yang dihubungkan paralel dan terhubung pada kaki tower. Pemasangan MRG dipilih karena sudah terbukti menurunkan tahanan pentanahan tower dan menurunkan angka gangguan yang disebabkan petir pada ruas-ruas penghantar lain seperti pada ruas penghantar SUTT 70 kV Sunyaragi-Kuningan, SUTT 150 kV CEP-Brebes, SUTT 150 kV PLTU Indramayu-Sukamandi-Kosambi baru, dan lain sebagainya [15].

1. Desain *Multirod Grounding* (MRG)

Perancangan desain MRG ini merupakan *improvement* dari PLN untuk menurunkan nilai tahanan pentanahan pada kaki tower yang diharapkan akan menekan frekuensi gangguan karena petir. Pemasangan MRG ini menggunakan tiga buah elektroda batang yang tertanam dalam tanah secara vertikal dengan jarak 1,5 meter dengan tower. Elektroda batang ditanam pada tanah yang sebelumnya sudah digali 0,5 meter seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 [15].





Gambar 2.6 Desain *Multirod Grounding* (MRG) [15]

2. Spesifikasi *Multirod Grounding* (MRG)

Spesifikasi komponen-komponen desain MRG yang telah dibuat PLN diantaranya [15]:

a. *Ground Rod* (Elektroda Batang)

Ground rod digunakan sebagai elektroda batang yang ditanam dalam tanah dengan spesifikasi material sebagai berikut:

- Bahan : pipa galvanis medium
- Panjang : 1,5 meter
- Diameter : 1,5 inch
- Tebal : 3,2 mm

Pada bagian atas *ground rod* dilas dengan besi siku ukuran 5x5cm sepanjang 7-10 cm untuk lubang baut yang menghubungkan *ground rod* dengan sepatu kabel *earth wire* seperti yang ditunjukkan gambar 2.7.



Gambar 2.7 *Ground Rod* untuk MRG [15]

b. Earth Wire

Fungsi dari *earth wire* adalah menghubungkan *ground rod* dengan kaki tower. Spesifikasi material nya adalah ACSR (*Aluminum Conductor Steel Reinforced*) ukuran $44/32\text{mm}^2$ seperti yang ditunjukkan gambar 2.8. Ukuran *earth wire* yang dibutuhkan tiap potong adalah 3,5 meter, setiap kaki tower butuh 3 potong.



Gambar 2.8 *Earth Wire* untuk MRG [15]

c. Sepatu Kabel

Sepatu kabel digunakan untuk menyambung ujung ACSR agar bisa dipasang dengan baut ke kaki tower dan ke *ground rod*. Spesifikasinya berbahan

aluminium ukuran lubang 70mm² dan lubang baut 12mm seperti pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Sepatu kabel (*skun*) untuk MRG [15]

d. Mur dan Baut

Mur dan baut digunakan untuk menghubungkan sepatu kabel dengan kaki tower dan *ground rod* dengan spesifikasi lapisan galvanis, full drat, diameter baut 12mm, dan panjang 70 mm seperti pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Mur dan baut galvanis untuk MRG [15]

2.2.8. Paired Sample T-Test

Paired sample t-test (uji t sampel berpasangan) adalah suatu metode statistik yang digunakan untuk membandingkan rata-rata dua sampel terkait yang diambil dari subjek yang sama. Pengujian ini digunakan ketika terdapat dua set data yang diukur pada subjek yang sama sebelum dan sesudah perlakuan atau dalam situasi di mana pasangan data yang dianalisis memiliki hubungan atau ketergantungan, misalnya sebelum dan sesudah intervensi pada kelompok yang sama.

Paired sample t-test adalah analisis dengan melibatkan dua pengukuran pada subjek yang sama terhadap suatu pengaruh atau perlakuan tertentu. Apabila suatu perlakuan tidak memberi pengaruh, maka perbedaan rata-rata adalah nol. Ciri-ciri yang paling sering ditemui pada kasus yang berpasangan adalah satu individu (objek penelitian) dikenai 2 buah perlakuan yang berbeda [16].

Persamaan penentuan nilai *paired sample t-test* sebagai berikut:

- a. Menentukan nilai t hitung

$$t_{hit} = \frac{\bar{D}}{\left(\frac{SD}{\sqrt{n}}\right)} \quad (2.4)$$

Ingat:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.5)$$

Dimana:

t_{hit} = nilai t hitung

D = selisih pengukuran 1 dan 2 (pengukuran 1 – pengukuran 2)

$\bar{D}$ = rata-rata selisih pengukuran 1 dan 2

SD = standar deviasi selisih pengukuran 1 dan 2

n = jumlah sampel

- b. Menentukan nilai signifikansi α

Nilai signifikansi dinotasikan dengan 100 (1- α)%. Standar untuk menentukan tingkat signifikansi adalah 5% (tingkat kepercayaan 95%) atau 10% (tingkat kepercayaan 90%), yang berarti nilai α yang digunakan adalah 0,05 atau 0,10 [16]. Nilai α yang $P = 0,05$, atau 1 dalam 20, adalah 1,96 atau hampir 2; mudah

untuk mengambil titik ini sebagai batas dalam menilai apakah penyimpangan dianggap signifikan atau tidak. Penyimpangan yang melebihi dua kali deviasi standar dengan demikian secara formal dianggap signifikan. Dengan menggunakan kriteria ini kita harus dituntun untuk menindaklanjuti hasil negatif hanya sekali dalam 22 percobaan, bahkan jika statistik adalah satu-satunya panduan yang tersedia. Efek kecil masih akan luput dari perhatian jika datanya tidak cukup banyak untuk mengungkapkannya, tetapi tidak ada penurunan standar signifikansi yang akan memenuhi kesulitan ini. Selain itu, segera jelas mengapa 0,05 nyaman: itu kira-kira setara dengan probabilitas lebih dari dua standar deviasi dari rata-rata variabel acak yang didistribusikan secara normal. Dengan cara ini, 0,05 dapat dilihat bukan sebagai angka dari langit, tetapi sebagai nilai yang dihasilkan dari kebutuhan untuk kemudahan perhitungan pada saat komputer belum membuat tabel dan perkiraan sebagian besar usang. Di antara tingkat yang disajikan, seseorang hampir selalu menemukan 0,05 dan 0,01, dengan cara ini ia menghasilkan tabulasi yang ringkas dan nyaman dari kuantitas yang diinginkan dan menyajikan nilai-nilai yang langsung menarik bagi eksperimen [17].

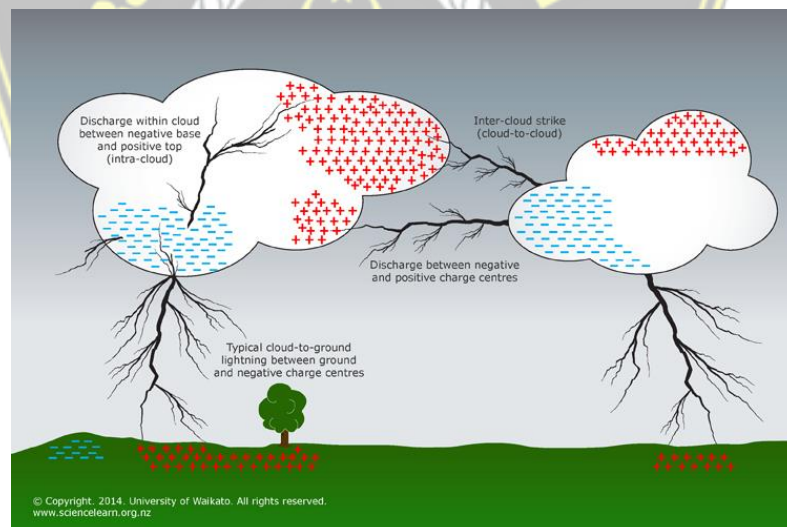
c. Interpretasi

- Untuk menginterpretasikan uji *t-test* terlebih dahulu harus ditentukan:
 - Nilai signifikansi α (*alpha*)
 - Df (degree of freedom) = $N-k$, khusus untuk *paired sample t-test* $df=N-1$
- Bandingkan nilai t_{hitung} dengan $t_{tabel} = \alpha; n-1$
- Apabila:
 - $t_{hitung} > t_{tabel} \rightarrow$ berbeda secara signifikansi (H_0 ditolak)
 - $t_{hitung} < t_{tabel} \rightarrow$ tidak berbeda secara signifikansi (H_0 diterima)
 - $P\text{-value} < \alpha$ (*alpha*) $\rightarrow$ berbeda secara signifikansi (H_0 ditolak)
 - $P\text{-value} > \alpha$ (*alpha*) $\rightarrow$ tidak berbeda secara signifikansi (H_0 ditolak)

2.2.9. Petir

1. Pengertian Petir

Pada keadaan tertentu, di dalam lapisan atmosfer bumi dapat terjadi gerakan angin ke atas membawa udara lembap. Semakin tinggi udara lembap dari permukaan bumi, semakin rendah tekanan dan suhunya. Uap air terkondensasi menjadi titik-titik air dan kemudian membentuk awan. Pada ketinggian ± 5 km, awan tersebut membeku menjadi kristal es yang turun lagi karena adanya gravitasi bumi. Adanya pergeseran *horizontal* maupun *vertical* pada titik air menyebabkan terjadinya pemisahan muatan. Dengan adanya awan yang bermuatan maka timbul muatan induksi pada muka hingga timbul medan listrik. Jika medan listrik awan-bumi atau sebaliknya melebihi medan tembus udara, akan terjadi pelepasan muatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11. Pelepasan muatan inilah yang disebut petir [18].



Gambar 2. 11 Mekanisme terjadinya petir [19]

2. Sambaran Langsung

Sambaran langsung adalah apabila kilat/petir menyambar langsung pada kawat fasa (untuk saluran tanpa kawat tanah) atau pada kawat tanah (untuk saluran dengan kawat tanah). Apabila sambaran petir menyambar pada tiang tower, terjadilah gelombang tegangan balik dan kemudian berjalan sepanjang tiang dan terkumpul di puncak maupun di dasar tiang sehingga

meningkatkan nilai tegangan yang terdapat di lengan-lengan menara dan kemudian mengganggu isolasi. Isolasi ini akan menyambar balik (*backflash*) jika tegangan transien yang melebihi batas kemampuan isolasi [18].

3. *Flashover*

Flashover adalah fenomena pelepasan muatan bersifat merusak yang melintasi seluruh bagian permukaan isolator. Pelepasan muatan ini disebabkan pembebanan medan listrik pada permukaan isolator yang melebihi harga ketahanan elektriknya. Penyebab terjadinya *flashover* adalah pengotoran permukaan isolator, hujan asam, surja hubung dan surja petir. Tegangan lewat denyar atau *flashover* ini berupa fenomena loncatan api yang terjadi antara isolator atau komponen listrik tegangan tinggi. Hal ini dapat terjadi akibat gagalnya isolasi sistem tegangan tinggi tersebut.

Kegagalan lewat denyar (*flashover*) berawal dari terbentuknya pita kering (*dry band*). Terbentuknya lapisan konduktif di permukaan isolator diakibatkan oleh adanya polutan yang menempel. Lapisan yang terbentuk di permukaan isolator ini menyebabkan mengalirnya arus bocor (*leakage current*). Dengan mengalirnya arus bocor, terjadi pemanasan di lapisan tersebut. Lapisan ini dapat membentuk pita kering (*dry band*) akibat dialiri arus bocor secara terus menerus. Pada tegangan tertentu, kondisi ini dapat menyebabkan pelepasan muatan melintasi pita kering. Pelepasan muatan dapat memanjang sehingga terbentuk busur listrik (*arc*) dan terjadi lewat denyar (*flashover*) yang melalui seluruh permukaan isolator seperti yang ditunjukkan gambar 2.12 [20].



Gambar 2. 12 Flashover pada Isolator [20]

4. Ayat-ayat Al-Qur'an tentang Petir

Al Qur'an merupakan pedoman dan petunjuk bagi umat manusia, maka setiap umat yang beriman dan memegang teguh terhadap Al Qur'an maka akan senantiasa berada dalam keselamatan baik di dunia maupun di akhirat. Allah subhanahu wata'ala telah berfirman di dalam Al-Qur'an tentang beberapa ayat-ayat mengenai Ar-Ra'd (guruh atau suara yang terdengar dari awan mendung) dan Al-Barq (sinar atau cahaya) yang telah tersebar di beberapa surat yaitu [21]:

A. Surat Al Baqarah ayat 19

أَوْ كَصَيْبٍ مِّنَ السَّمَاءِ فِيهِ ظُلُمَاتٌ وَرَعْدٌ وَبَرْقٌ يَّجْعَلُونَ أَصَابِعَهُمْ فِي آذَانِهِمْ
مِّنَ الصَّوَاعِقِ حَذَرَ الْمَوْتِ وَاللَّهُ مُحِيطٌ بِالْكَافِرِينَ ﴿١٩﴾

Artinya: Atau, seperti (orang yang ditimpa) hujan lebat dari langit yang disertai berbagai kegelapan, petir, dan kilat. Mereka menyumbat telinga dengan jari-jarinya (untuk menghindari) suara petir itu karena takut mati. Allah meliputi orang-orang yang kafir.

B. Surat Al Baqarah ayat 20

يَكَادُ الْبَرْقُ يَخْطِفُ أَبْصَارَهُمْ كُلَّمَا أَضَاءَ لَهُمْ مَّشَوْا فِيهِ وَإِذَا أَظْلَمَ عَلَيْهِمْ
قَامُوا وَلَوْ شَاءَ اللَّهُ لَذَهَبَ بِسَمْعِهِمْ وَأَبْصَارِهِمْ إِنَّ اللَّهَ عَلَى كُلِّ شَيْءٍ قَدِيرٌ ﴿٢٠﴾

Artinya: Hampir saja kilat itu menyambar penglihatan mereka. Setiap kali (kilat itu) menyinari, mereka berjalan di bawah (sinar) itu. Apabila gelap menerpa mereka, mereka berdiri (tidak bergerak). Sekiranya Allah menghendaki, niscaya Dia menghilangkan pendengaran dan penglihatan mereka. Sesungguhnya Allah Maha Kuasa atas segala sesuatu.

C. Surat An Nur ayat 43

أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ يُزْجِي سَحَابًا ثُمَّ يُؤَلِّفُ بَيْنَهُ ثُمَّ يَجْعَلُهُ رُكَّامًا فَتَرَى الْوَدَقَ

يَخْرُجُ مِنْ خِلَالِهِ وَيُنَزِّلُ مِنَ السَّمَاءِ مِنْ جِبَالٍ فِيهَا مِنْ بَرَدٍ فَيُصِيبُ بِهِ

مَنْ يَشَاءُ وَيَصْرِفُهُ عَنِ مَنْ يَشَاءُ يَكَادُ سَنَا بَرْقِهِ يَذْهَبُ بِالْأَبْصَارِ ﴿٤٣﴾

Artinya: Tidakkah engkau melihat bahwa sesungguhnya Allah mengarahkan awan secara perlahan, kemudian mengumpulkannya, lalu menjadikannya bertumpuk-tumpuk. Maka, engkau melihat hujan keluar dari celah-celahnya. Dia (juga) menurunkan (butiran-butiran) es dari langit, (yaitu) dari (gumpalan-gumpalan awan seperti) gunung-gunung. Maka, Dia menimpakannya (butiran-butiran es itu) kepada siapa yang Dia kehendaki dan memalingkannya dari siapa yang Dia kehendaki. Kilauan kilatnya hampir-hampir menghilangkan penglihatan.

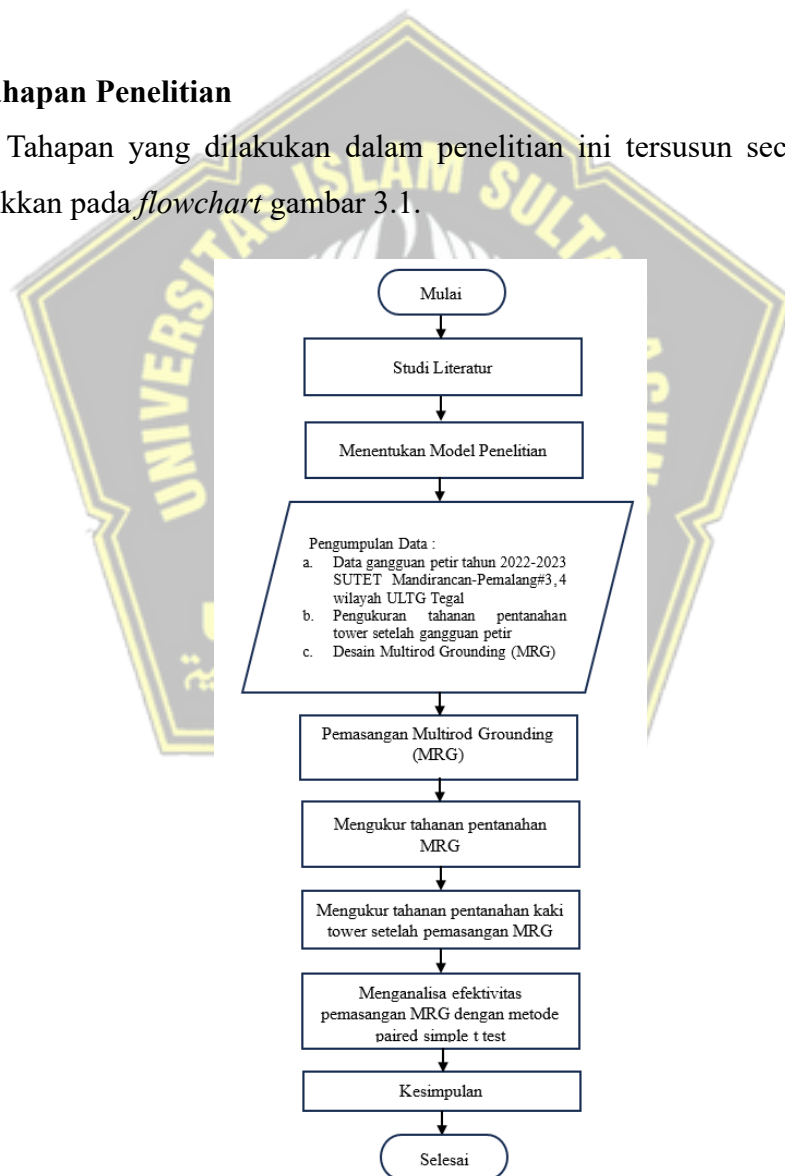
BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dikerjakan pada kurun waktu tahun 2023 hingga 2024 dan bertempat di PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Transmisi Purwokerto (UPT Purwokerto), pada tower-tower SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 aset wilayah Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk Tegal (ULTG Tegal).

3.2. Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini tersusun secara urut yang ditunjukkan pada *flowchart* gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Proses Penelitian

3.3. Metode Pengumpulan Data

Pada penelitian ini metode pengumpulan data dibagi menjadi dua:

1. Pengumpulan data gangguan petir dan pengukuran pentanahan tower setelah gangguan petir pada SUTET Mandirancan-Pemalang Line 3&4 melalui wawancara dengan bagian perencanaan dan evaluasi UPT Purwokerto.
2. Pengumpulan data pengukuran tahanan pentanahan tower yang telah dipasang MRG dengan cara observasi langsung di lapangan.

3.4. Pengukuran Tahanan Pentanahan Tower

Peralatan yang digunakan untuk pengukuran tahanan pentanahan tower yaitu *Earth Resistance Tester* dengan merk Kyoritsu model 4105A seperti pada gambar 3.2.



Gambar 3. 2 *Earth Resistance Tester* dengan Merk Kyoritsu Model 4105A

Bagian-bagian pada alat ukur:

1. Terminal E untuk kaki tower atau ground rod yang akan diukur
2. Terminal P untuk elektroda bantu 1
3. Terminal C untuk elektroda bantu 2
4. *LCD Display*
5. *Press to Test Button*
6. *Range Selector Switch*, batasan hambatan pentanahan dan off

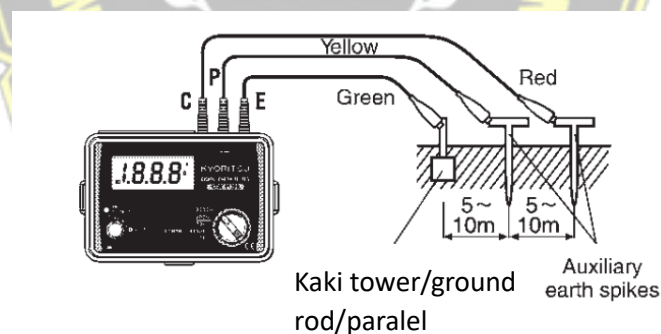
Terdapat beberapa metode pengukuran tahanan pentanahan tower sebelum dan sesudah pemasangan MRG yaitu pengukuran pada kaki tower, pengukuran

pada masing-masing *ground rod* MRG yang telah terpasang, dan pengukuran secara paralel antara kaki tower dan *ground rod* MRG.

Pengukuran pada kaki tower, bagian yang diukur adalah murni kaki tower tanpa adanya arde tambahan pada kaki tower tersebut (murni sistem pentanahan yang tergabung / tertanam dengan kaki tower). Probe E dihubungkan pada kaki tower, probe P dan C ditanamkan kedalam tanah dengan jarak antara 5 – 10 meter dari titik kaki tower.

Pengukuran pada masing-masing *ground rod* (elektroda batang) MRG, bagian yang di ukur adalah pada masing masing *ground rod* sejumlah 3 buah pada masing-masing kaki tower. Probe E dihubungkan pada *ground rod*, probe P dan C ditanamkan kedalam tanah dengan jarak antara 5 – 10 meter dari titik *ground rod*, sesuai diagram pada gambar 3.3.

Pengukuran secara paralel antara kaki tower dan *ground rod* MRG dilakukan dengan terlebih dahulu menghubungkan 3 *ground rod* ke kaki tower, kemudian dilakukan pengukuran seperti dua tahap sebelumnya.



Gambar 3. 3 Metode Pengukuran pada kaki tower / rod /paralel

3.5. Alat Pelindung Diri

Diperlukan Alat Pelindung Diri (APD) untuk melakukan pemasangan MRG dan pengukuran tahanan pentanahan tower seperti pada gambar 3.4, diantaranya:

1. Helm Safety
2. Sepatu Safety
3. Sarung tangan
4. Kaca Mata anti silau



Gambar 3. 4Penggunaan APD lengkap untuk pemasangan MRG dan pengukuran tahanan pentanahan

3.6. Peralatan dan Material

Peralatan yang digunakan untuk pemasangan MRG dan pengukuran tahanan pentanahan sebagai berikut:

1. Kunci ring pas ukuran 19 (2 buah)
2. Kunci shock (1 set)
3. Gergaji besi (1 buah)
4. Alat press sepatu kabel (1 set)
5. Palu besar (2 buah)
6. Ember/botol (1 buah)
7. Alat penggali tanah manual (2 buah)
8. Cangkul (2 buah)
9. Cetok (1 buah)
10. Obeng (1 buah)
11. *Tool bag* (1 buah)
12. Sikat baja dan kuningan (1 set)
13. Alat tulis (1 set)
14. Earth tester (1 buah)

Material yang digunakan untuk pemasangan MRG dan pengukuran tahanan pentanahan sebagai berikut:

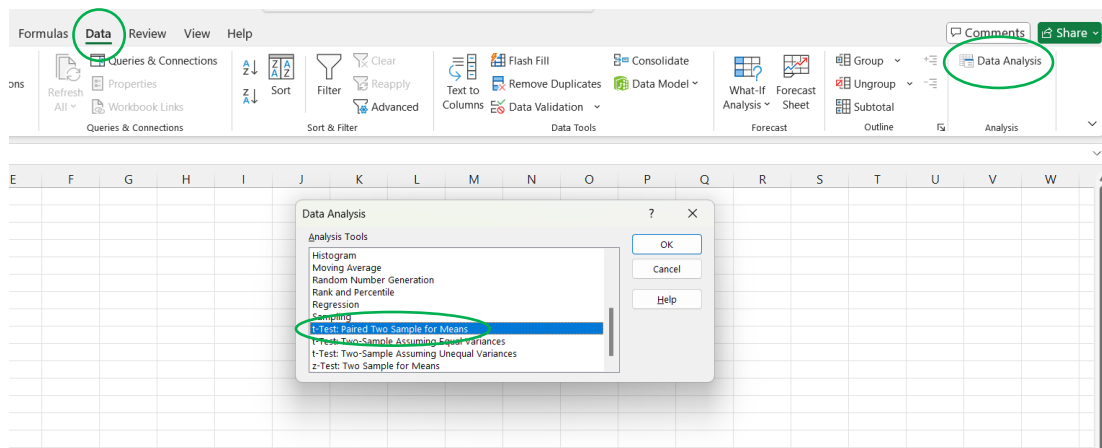
1. *Ground rod*/elektroda batang (12 buah setiap tower)
2. Earth Wire (12 potong tiap tower)
3. Sepatu kabel aluminium (24 buah tiap tower)
4. Mur baut galvanis (24 buah tiap tower)

3.7. Metode Analisa Data

Metode analisa data yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan metode kuantitatif untuk menentukan efektivitas pemasangan MRG terhadap penurunan tahanan pentanahan pada tower-tower SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3 & 4. Pengolahan data yang digunakan pada penelitian ini adalah *paired sample t-test* (uji T sampel berpasangan). Terdapat dua set data yang diukur pada subjek yang sama sebelum dan sesudah perlakuan. Pengaplikasiannya adalah mengolah data hasil tahanan pentanahan tower-tower SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 sebelum dilakukan pemasangan MRG dan setelah pemasangan MRG.

Jumlah data yang akan diolah adalah 53 sampel data tahanan pentanahan tower yang terpasang MRG. Tower-tower yang terpasang MRG adalah tower yang terkena gangguan *reclose* penghantar karena petir pada tahun 2022 dan 2023. MRG juga dipasang pada 5 tower sebelum dan 5 tower sesudah dari tower yang terkena gangguan petir.

Pengolahan data akan dilakukan dengan fitur *Data Analysis* yang terdapat pada *Microsoft Excel Office 2021* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.5. Pemilihan fitur tersebut pada menu bar *Data*, kemudian pilih *Data Analysis*, cari metode *t-Test: Paired Two Sample for Means*.



Gambar 3.5 Tampilan metode *t-Test: Paired Two Sample for Means* pada fitur *Data Analysis* *Microsoft Excel*

Data tahanan pentanahan sebelum dan sesudah pemasangan MRG akan diinput dalam tabel pada *Microsoft Excel*. Pemrosesan dan hasil data akan ditampilkan pada tab yang sama dengan data yang diolah.

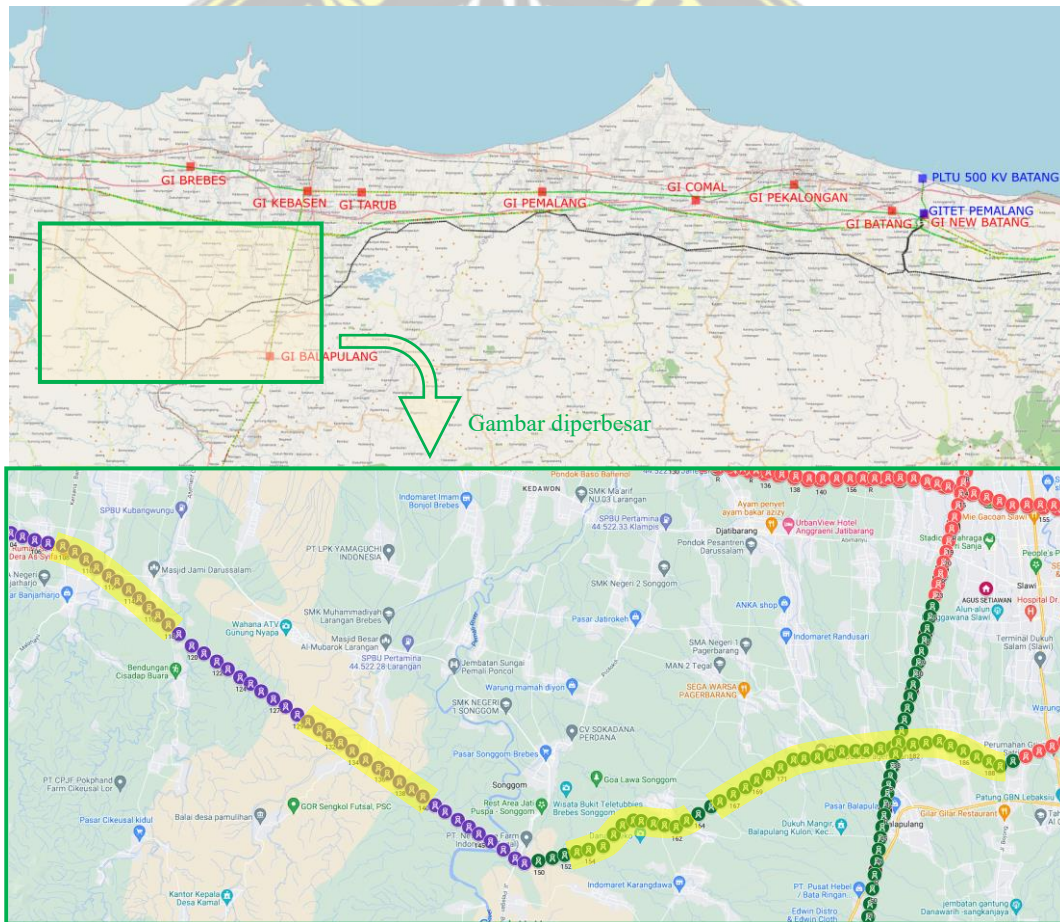


BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Penelitian

Data-data yang diperlukan untuk penelitian ini diantaranya: data gangguan petir SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3 & 4 wilayah ULTG Tegal pada tahun 2022-2024, data pengukuran tahanan pentanahan tower setelah adanya gangguan petir (sebelum dipasang MRG), desain *Multirod Grounding* (MRG), data pemasangan *Multirod Grounding*. Data-data tersebut diperoleh dari lokasi beberapa tower (*highlight* kuning) yang ditampilkan pada gambar 4.1. Data hasil penelitian tersebut akan dijelaskan pada sub bab yang selanjutnya akan dilakukan analisa untuk menjawab pertanyaan rumusan masalah.



Gambar 4. 1 Lokasi tower-tower (*highlight* kuning) yang diambil datanya untuk penelitian

4.1.1. Perhitungan Tahanan Pentanahan

Tower SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang line 3 & 4 merupakan tower *lattice* (tower dengan konstruksi menggunakan susunan baja profil siku yang berukuran kecil) dengan 2 penghantar masing-masing 3 fasa RST. Tower tersebut mempunyai 4 kaki yang masing-masing terhubung dengan sistem pentanahan/*grounding*. Desain pentanahan tower yang digunakan sebelum pemasangan MRG adalah metode *driven rod* dengan panjang elektroda batang yaitu 1,5 meter. Diameter elektroda batang adalah 1,5 inch (0,0381m). Kondisi tanah diumpamakan jenisnya tanah rawa dengan tahanan jenis tanah adalah 30 Ω .m berdasarkan tabel 2.2 dan berdasarkan kondisi *real* di lapangan dimana kebanyakan jenis tanah sekitar tower yang selalu basah (ditanami padi, bawang merah, dan hutan jati). Berdasarkan data-data tersebut maka hasil perhitungan tahanan pentanahan sebelum pemasangan MRG dengan menggunakan persamaan 2.1 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} R &= \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right] \\ &= \frac{30 \Omega.m}{2 \times 22 \div 7 \times 1,5m} \left[\ln \left(\frac{8 \times 1,5m}{0,0381m} \right) - 1 \right] \\ &= 15,12 \Omega \end{aligned}$$

Secara teori untuk mengurangi tahanan pentanahan pada kaki tower adalah dengan menambah elektroda batang secara paralel. Desain MRG pada gambar 2.6 menunjukkan bahwa untuk mengurangi tahanan pentanahan adalah dengan menambah 3 elektroda batang yang dipasang secara vertikal dan masing-masing dihubungkan paralel ke kaki tower. Panjang elektroda batang adalah 1,5m dan diameter 1,5 inch (0,0381m). Jarak antar elektroda batang (s) adalah 2m. Kondisi tanah diumpamakan tanah rawa dengan tahanan jenis tanah 30 Ω .m. Sehingga hasil perhitungan tahanan pentanahan setelah pemasangan MRG dengan menggunakan persamaan 2.2 adalah sebagai berikut:

$$R_t = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 + \frac{L}{s} \ln \left(\frac{1,78n}{2,718} \right) \right]$$

$$= \frac{1}{3} \times \frac{30 \, \Omega \cdot m}{2 \times 22 \div 7 \times 1,5m} \left[\ln \left(\frac{8 \times 1,5m}{0,0381} \right) - 1 + \frac{1,5m}{1,5m} \ln \left(\frac{1,78 \times 3}{2,718} \right) \right]$$

$$= 5,57 \, \Omega$$

Berdasarkan rumus dan perhitungan di atas dapat diketahui bahwa setelah pemasangan MRG, tahanan pentanahan kaki tower akan lebih rendah dibanding sebelum pemasangan MRG yaitu 5.57 Ohm. Nilai yang dihasilkan sudah sesuai dengan standart SPLN T5.012: 2020, yaitu nilai tahanan pentanahan kaki tower di bawah 10 Ω .

4.1.2. Pemasangan *Multirod Grounding* (MRG)

MRG dipasang pada tower yang terkena sambaran petir yang mengakibatkan *reclose* pada penghantar. MRG juga dipasang pada 5 tower sebelum dan 5 tower sesudah tower yang terkena sambaran petir. Hal tersebut dilakukan untuk memperkecil tahanan pentanahan 11 tower tersebut, sehingga arus petir langsung mengalir ke tanah. Pada kasus gangguan petir pada SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 wilayah ULTG Tegal, MRG dipasang pada 53 tower. Pemasangan MRG pada kaki tower mempunyai beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Mengumpulkan personil untuk *briefing* sebelum memulai pekerjaan, hal ini dilakukan untuk memastikan kondisi kesiapan personil, material, dan penjelasan tahapan pekerjaan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Briefing sebelum pekerjaan

2. Menguji tahanan pentanahan tiap kaki tower sebelum pemasangan MRG dan dicatat hasilnya seperti pada gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Menguji tahanan pentanahan tiap kaki tower sebelum pemasangan MRG

3. Mengukur jarak kaki tower dengan *ground rod* yang akan ditanam seperti pada gambar 4.4. Berpedoman pada desain MRG yang ada, pemasangan *ground rod* berjarak 2,5m dari kaki tower dan sudut pemasangan antar *ground rod* ditentukan minimal 30^0 tergantung situasi kondisi di lapangan. Sehingga jarak minimal antar *ground rod* adalah 1,5 meter.



Gambar 4. 4 Mengukur jarak kaki tower dengan *ground rod* yang akan ditanam

4. Melakukan penggalian tanah sesuai titik yang sudah ditentukan dengan galian panjang 2,5m x lebar 0,5m x tinggi 0,5m, dilanjutkan menanam *ground rod* pada galian hingga tersisa 10 cm di atas permukaan tanah seperti pada gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Melakukan penggalian tanah sesuai ukuran

5. Menghubungkan *ground rod* dan kaki tower dengan *earth wire* yang telah terpasang sepatu kabel di kedua ujungnya seperti pada gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Menghubungkan ground rod dan kaki tower dengan earth wire

6. Menguruk galian dengan tanah hingga rata dengan permukaan tanah.
7. Menguji tahanan pentanahan tiap kaki tower setelah pemasangan MRG dan mencatat hasilnya seperti pada gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Menguji tahanan pentanahan tiap kaki tower setelah pemasangan MRG

8. Membersihkan dan merapikan lokasi pekerjaan.

4.1.3. Hasil Pengukuran

Tahanan pentanahan kaki tower diukur sebelum dan setelah pemasangan *multirod grounding* (MRG). Hasil pengukuran tersebut terdapat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil pengukuran tahanan pentanahan kaki tower sebelum dan sesudah pemasangan MRG

No	Tower	Sebelum Pemasangan MRG (R_{sebelum})				Sesudah Pemasangan MRG (R_{setelah})			
		A	B	C	D	A	B	C	D
1	107	2,28	3,29	1,78	13,66	0,7	0,73	0,12	0,26
2	108	3,52	9,43	4,53	1,14	0,04	0,24	0,06	0,07
3	109	1,41	1,77	1,17	4,31	0,65	0,43	0,82	0,82
4	110	2,94	2,98	2,06	1,6	0,2	0,12	0,45	0,97
5	111	6,03	1,33	2,32	2,71	0,31	0,72	0,69	0,76
6	112	2,08	2,97	4,91	4,23	0,24	0,82	1,14	1,12
7	113	6,3	5	16,44	2,06	0,06	0,46	1,02	1,18
8	114	1,12	4,96	1,4	2,34	0,2	0,93	0,67	0,45
9	115	3,72	1,46	1,1	2,27	0,2	0,28	0,24	0,38
10	116	1,25	1,06	1,21	5,27	0,31	0,41	0,83	0,36
11	117	1,25	1,47	2,6	1,06	0,38	0,98	0,05	1,05
12	129	1,56	4,59	3,59	1,58	1,02	1,38	0,67	0,92
13	130	0,65	0,56	4,9	0,3	0,34	0,48	0,39	0,39
14	131	0,49	0,43	0,59	0,49	0,55	0,47	0,51	1,16
15	133	1,04	0,41	1,13	0,61	0,74	0,67	0,53	0,62
16	134	0,55	0,56	0,58	0,59	0,19	1,30	0,20	1,43
17	135	1,1	0,6	0,58	0,6	1,11	0,19	0,19	0,19
18	136	0,58	0,59	1,37	0,59	0,53	0,45	0,90	0,99
19	137	0,6	1,27	0,6	0,58	0,59	0,60	0,19	0,19
20	138	1,4	1,49	0,63	0,92	0,80	1,25	0,76	0,78
21	139	1,03	1,78	0,48	0,82	0,51	0,73	0,28	0,63
22	153	0,86	0,89	0,89	0,64	0,73	0,42	0,41	0,44
23	154	0,59	0,72	1,58	0,89	0,50	0,79	0,91	0,50
24	155	0,75	0,21	0,72	1,03	0,63	1,47	0,74	1,54
25	156	2,35	2,65	1,31	2,32	1,67	1,78	2,24	1,71
26	157	2,21	3,04	1,16	2,78	1,75	0,94	1,84	1,17
27	158	0,35	0,23	0,49	0,28	1,76	0,71	1,54	1,40
28	159	0,6	0,51	0,68	0,41	1,25	1,95	1,23	0,93
29	160	1,48	0,99	1,12	0,82	1,56	1,82	1,30	1,86
30	161	0,64	1,85	0,56	1,39	1,96	1,63	1,70	1,69
31	162	1,31	0,95	0,48	0,95	1,55	1,74	1,99	1,91
32	163	0,93	1,63	1,19	1,18	1,72	1,67	1,93	2,92
33	166	0,73	1,93	1,24	0,7	1,72	2,23	1,79	1,40
34	167	1,37	1,53	0,78	0,67	0,68	1,53	1,54	1,50

No	Tower	Sebelum Pemasangan MRG (R_{sebelum})				Sesudah Pemasangan MRG (R_{setelah})			
		A	B	C	D	A	B	C	D
35	168	0,9	1,22	0,91	1,03	1,72	1,53	1,67	1,56
36	169	1,28	0,82	0,82	0,92	1,59	1,78	1,64	1,48
37	170	0,87	0,85	1,02	1,73	1,87	1,76	1,51	1,86
38	171	0,57	0,88	0,96	0,89	1,90	1,43	1,46	1,92
39	172	0,96	0,86	0,86	0,93	1,53	1,37	1,91	1,77
40	173	0,82	0,83	0,82	0,81	1,83	1,90	1,93	1,59
41	174	1,12	0,86	0,84	0,84	1,89	1,76	1,93	1,69
42	175	0,84	0,8	0,97	0,84	1,56	1,55	1,50	1,40
43	176	0,95	0,83	0,84	0,86	1,65	1,49	1,43	1,51
44	177	0,89	0,85	0,86	0,97	1,56	1,86	1,51	1,53
45	178	15,65	10,59	17,21	14,81	2,25	1,99	1,12	1,39
46	179	13,01	12,19	12,18	12,45	2,47	2,76	3,69	2,1
47	180	19,01	12,13	12,93	12,91	3,34	2,38	2,12	2,01
48	181	9,29	18,61	9,85	19,95	1,81	2,41	1,46	1,66
49	182	15,61	19,7	10,26	11,71	1,93	2,96	3,58	3,05
50	183	17,04	16	11,45	11,62	3,48	3,28	3,33	1,66
51	184	8,44	8,31	17,46	17,44	3,28	3,29	2,94	2,88
52	185	18,7	9,88	15	14,72	2,52	2,73	2,99	3,05
53	186	13,55	15,97	19,32	14,81	1,53	1,91	2,54	4,8

Tabel 4.1 merupakan hasil pengukuran tahanan pentanahan pada 53 tower sebelum pemasangan MRG dan setelah pemasangan MRG. Pengukuran dilakukan pada setiap *leg*/kaki tower, yaitu *leg* A, B, C, dan D. Hasil pengukuran pada tabel 4.1 akan dilakukan analisa data untuk menentukan efektivitas pemasangan *multirod grounding* pada SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 wilayah ULTG Tegal.

4.2. Pembahasan

Pada pembahasan ini akan menganalisa data pengukuran tahanan pentanahan dan data gangguan penghantar karena petir untuk menjawab rumusan masalah. Analisa data pengukuran tahanan pentanahan akan dijelaskan rinci, dimulai dari langkah-langkah menganalisa data pada *Microsoft Excel* hingga penjelasan hasil analisisnya. Analisa pengaruh pemasangan MRG terhadap pengurangan frekuensi gangguan petir akan dijelaskan melalui pembahasan data gangguan karena petir.

4.2.1. Analisa Hasil Pengukuran Tahanan Pentanahan

Pada analisa hasil pengukuran, perlu dipahami hipotesis statistik pada penelitian ini terlebih dahulu. Hipotesis statistik metode *paired sample t test* atau uji t sampel berpasangan ini adalah Hipotesis Nol (H_0) dan Hipotesis Alternatif (H_1) yang dijabarkan sebagai berikut:

1. Hipotesis Nol (H_0): Tidak ada perbedaan signifikan antara tahanan pentanahan tower sebelum dan setelah pemasangan MRG. Dengan kata lain, pemasangan MRG tidak menurunkan tahanan pentanahan.

$H_0: \mu_1 \leq \mu_2$ (tahanan pentanahan tower sebelum pemasangan MRG kurang dari atau sama dengan tahanan pentanahan setelah pemasangan MRG).

2. Hipotesis Alternatif (H_1): Ada perbedaan signifikan antara tahanan pentanahan tower sebelum dan setelah pemasangan MRG.

$H_1: \mu_1 > \mu_2$ (tahanan pentanahan sebelum pemasangan MRG lebih tinggi daripada setelah pemasangan MRG).

Setelah menentukan hipotesis statistik, selanjutnya adalah menentukan nilai signifikansi α (*alpha*). Pada *Microsoft Excel*, *setting default* nilai signifikansi α adalah 0,05 (5%). Ini berarti penerimaan peluang 5% adanya kemungkinan tidak ada perbedaan signifikan antara sebelum dan setelah pemasangan MRG. Jika pada hasil perhitungan menggunakan $\alpha=0,05$ didapatkan H_0 ditolak, akan digunakan nilai signifikansi $\alpha = 0,01$ (1%).

Tahapan analisa hasil pengukuran tahanan pentanahan untuk menghitung efektivitas pemasangan MRG dengan fitur *Data Analysis* pada *Micorosoft Excel* dijelaskan sebagai berikut:

1. Mengubah susunan tabel 4.1 menjadi hanya 2 kolom data pada *Microsoft Excel*, data pengukuran *leg B* (sebelum pemasangan MRG) dipindah di bawah data pengukuran *leg A* (sebelum pemasangan MRG), begitu pula data pengukuran *leg C* dan *D*. Hal yang sama dilakukan untuk data pengukuran setelah pemasangan MRG yang ditunjukkan pada gambar 4.8. Pengubahan menjadi 2 kolom data pengukuran sebelum dan sesudah pemasangan MRG ini dilakukan agar data dapat dianalisa menggunakan metode *paired sample t test* pada fitur “*Data Analysis*” *Micorosoft Excel*.

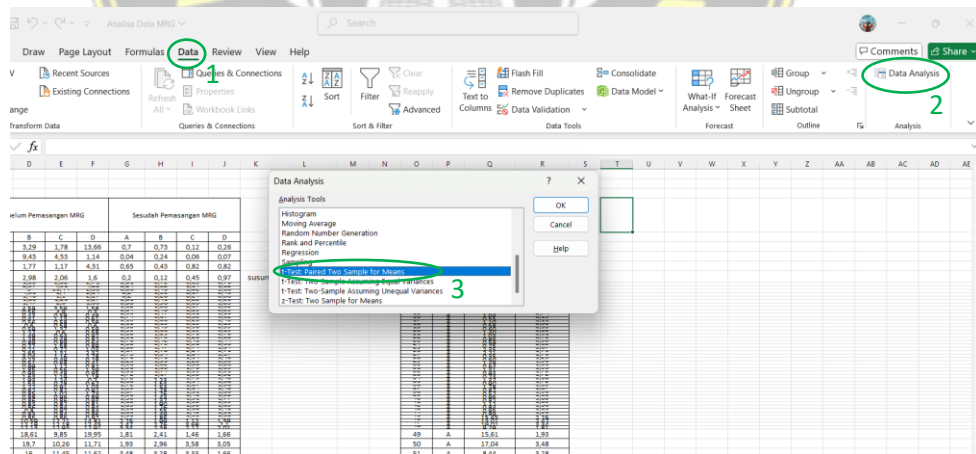
susunan kolom diubah menjadi

No	Tower	Sebelum Pemasangan MRG				Setelah Pemasangan MRG			
		B	C	D	E	F	G	H	I
1	107	2,28	3,29	1,78	13,66	0,7	0,73	0,12	0,26
2	108	3,52	9,43	4,53	1,14	0,04	0,24	0,06	0,07
3	109	1,41	1,77	1,17	4,31	0,65	0,43	0,82	0,82
4	110	2,94	2,98	2,06	1,6	0,2	0,12	0,45	0,97
49	182	15,61	15,7	10,26	11,71	1,93	2,96	3,58	3,05
50	183	17,04	16	11,45	11,62	3,48	3,28	3,33	1,66
51	184	8,44	8,31	17,46	17,44	3,28	3,29	2,94	2,88
52	185	18,7	9,88	15	14,72	2,52	2,73	2,99	3,05
53	186	13,55	15,97	19,32	14,81	1,53	1,91	2,54	4,8

No	Leg	Sebelum Pemasangan MRG	Setelah Pemasangan MRG
1	A	2,28	0,70
2	A	3,52	0,04
3	A	1,41	0,65
4	A	2,94	0,20
5	A	6,03	0,31
49	A	15,61	1,93
50	A	17,04	3,48
51	A	8,44	3,28
52	A	18,70	2,52
53	A	13,55	1,53
54	B	3,29	0,73
55	B	9,43	0,24
56	B	1,77	0,43
57	B	2,98	0,12
58	B	1,33	0,72
59	B	2,97	0,82
60	B	5,00	0,46

Gambar 4. 8 Mengubah susunan tabel ke dalam 2 kolom untuk analisa data

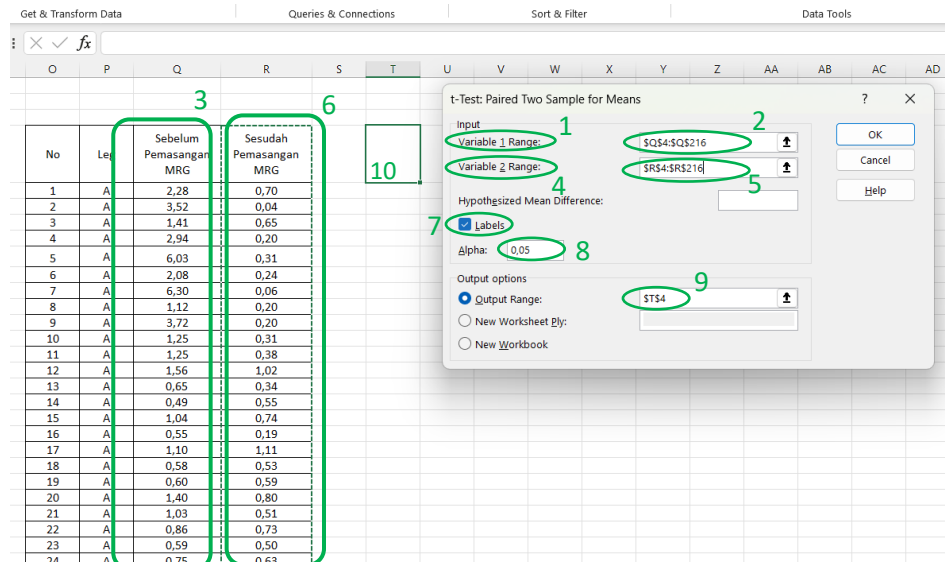
- Memilih menu “Data”, kemudian pilih “Data Analysis”, akan muncul jendela “Data Analysis”, scroll ke bawah untuk memilih “t-Test: Paired Two Sample for Means”, pilih OK seperti yang ditunjukkan gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Menampilkan menu t-Test: Paired Two Sample for Means pada Microsoft Excel

- Pada jendela “t-Test: Paired Two Sample for Means”, mengisi “Variable 1 range” dengan memilih semua data pada kolom “sebelum pemasangan MRG” dan mengisi “Variable 2 range” dengan memilih semua data pada kolom “setelah pemasangan MRG”. Selanjutnya centang pada “Labels”, isi “Alpha”

0,05, tentukan “*Output Range*” dengan pilih salah satu kotak kolom misal T4, dan yang terakhir klik OK. Tahapan tersebut ditunjukkan pada gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Tahapan pemilihan kolom data dan pengisian parameter analisa data

Pada “*Output Range*” akan ditampilkan tabel analisa hasil pengukuran tahanan pentanahan seperti pada tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4. 2 Hasil analisa pengukuran tahanan pentanahan dengan $\alpha=0,05$

t-Test: Paired Two Sample for Means		$\alpha = 0,05$
	Sebelum Pemasangan MRG	Sesudah Pemasangan MRG
Mean	3,748301887	1,330508417
Variance	27,35956772	0,742974318
Observations	212	212
Pearson Correlation	0,533800614	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	211	
t Stat	7,29474717	
P(T<=t) one-tail	2,97888E-12	
t Critical one-tail	1,652107286	
P(T<=t) two-tail	5,95777E-12	
t Critical two-tail	1,971270646	

Pada tabel 4.2 yang telah dibuat melalui *Microsoft Excel* tersebut dapat dideskripsikan sebagai berikut:

1. Nilai signifikansi $\alpha = 0,05$
2. Nilai rata-rata (*means*) tahanan pentanahan sebelum pemasangan MRG adalah $3,75 \Omega$ dan nilai rata-rata tahanan pentanahan setelah pemasangan MRG adalah $1,33 \Omega$.
3. $t_{hitung} (t_{stat}) > t_{tabel} (t_{critical one-tail})$ ditunjukkan dengan nilai $7,29 > 1,65$
4. P-value ($P_{(T \leq t) one-tail} < \alpha (alpha)$) ditunjukkan dengan nilai $2,97888 \times 10^{-12} < 0,05$
5. Berdasarkan perbandingan nilai poin 3&4 di atas, disimpulkan bahwa **hipotesis nol ditolak** dan menerima hipotesis alternatif bahwa ada perbedaan **signifikan** antara tahanan pentanahan tower sebelum dan setelah pemasangan MRG. Disebut perbedaan signifikan karena $\alpha=0,05$.

Nilai *mean* atau rata-rata pada tabel 4.2 di atas, dapat dihitung secara manual dengan mengambil data tahanan pentanahan sebelum pemasangan MRG ($R_{sebelum}$) dan setelah pemasangan MRG ($R_{setelah}$) yang ditampilkan pada tabel 4.1. Perhitungan manual *mean* atau rata-rata sebagai berikut:

$$\text{Nilai rata-rata } R_{sebelum} = \frac{\text{Jumlah nilai semua data } R_{sebelum}}{\text{Banyaknya data } R_{sebelum}}$$

$$\text{Nilai rata-rata } R_{sebelum} = \frac{794,64}{212} = 3,75 \Omega$$

$$\text{Nilai rata-rata } R_{setelah} = \frac{\text{Jumlah nilai semua data } R_{setelah}}{\text{Banyaknya data } R_{setelah}}$$

$$\text{Nilai rata-rata } R_{setelah} = \frac{282,07}{212} = 1,33 \Omega$$

Pada tabel 4.2 terdapat nilai t_{stat} (t_{hitung}) dimana perhitungan manualnya mengambil data dari tabel 4.1 dan berdasarkan persamaan 2.4 & 2.5 sebagai berikut:

$$t_{hit} = \frac{\bar{D}}{\left(\frac{SD}{\sqrt{n}}\right)}$$

Dimana:

t_{hit} = nilai t hitung

D = $R_{sebelum} - R_{setelah}$ (selisih)

$\bar{D}$ = rata-rata selisih pengukuran 1 dan 2

SD = standar deviasi selisih pengukuran 1 dan 2

n = jumlah sampel = 212

Sebelum menghitung t_{hit} , perlu menghitung D , $\bar{D}$ & SD sebagai berikut:

$$\begin{aligned} D &= R_{sebelum} - R_{setelah} \\ &= 2,28 - 0,7 = 1,58 \text{ (contoh nilai selisih (D) pada leg A tower 107)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{D} &= \frac{\sum D}{n} \\ &= \frac{512,57}{212} \\ &= 2,4178 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SD &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{212-1} 4914,01} \\ &= \sqrt{\frac{4914,01}{211}} \\ &= 4,82588 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan D , $\bar{D}$ & SD dimasukkan pada persamaan 2.4 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 t_{hit} &= \frac{\bar{D}}{\left(\frac{SD}{\sqrt{n}}\right)} \\
 &= \frac{2,4178}{\left(\frac{4,82588}{\sqrt{212}}\right)} \\
 &= \frac{2,4178}{0,33144} \\
 &= \mathbf{7,29}
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan manual *means* dan t_{hit} di atas, dihasilkan nilai yang sama dengan perhitungan analisa pada *Microsoft Excel*.

Karena kesimpulan dari analisa yang menggunakan $\alpha=0,05$ didapatkan H_0 ditolak, selanjutnya akan dianalisa menggunakan nilai signifikansi $\alpha = 0,01$. Pada tahapan ketiga proses analisa di *Microsoft Excel*, diubah nilai α dari 0,05 menjadi 0,01 pada isian “*Alpha*”. Sehingga didapatkan tabel analisa hasil pengukuran tahanan pentanahan seperti pada tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4. 3 Hasil analisa pengukuran tahanan pentanahan dengan $\alpha=0,01$

t-Test: Paired Two Sample for Means $\alpha = 0,01$		
	Sebelum Pemasangan MRG	Sesudah Pemasangan MRG
Mean	3,748301887	1,330508417
Variance	27,35956772	0,742974318
Observations	212	212
Pearson Correlation	0,533800614	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	211	
t Stat	7,29474717	
P(T<=t) one-tail	2,97888E-12	
t Critical one-tail	2,344150403	
P(T<=t) two-tail	5,95777E-12	
t Critical two-tail	2,599330216	

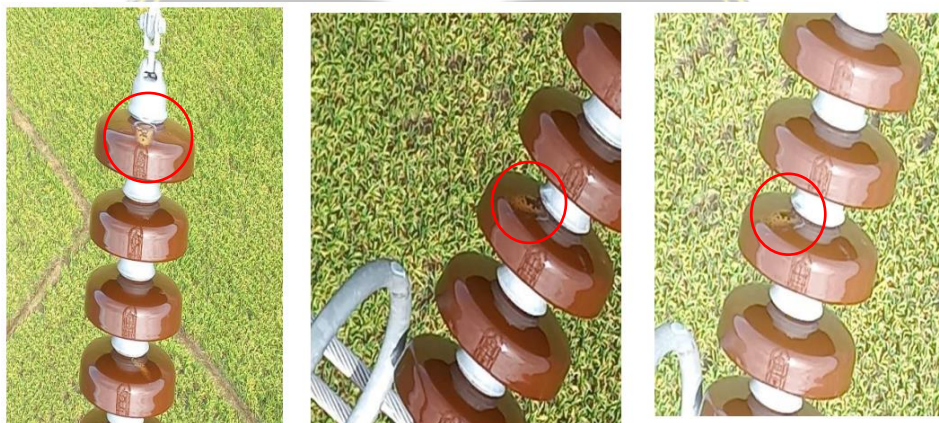
Pada tabel 4.3 tersebut dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Nilai signifikansi $\alpha = 0,01$

2. Nilai rata-rata (*means*) tahanan pentanahan sebelum pemasangan MRG adalah $3,75 \Omega$ dan nilai rata-rata tahanan pentanahan setelah pemasangan MRG adalah $1,33 \Omega$.
3. $t_{hitung} (t_{stat}) > t_{tabel} (t_{critical \ one-tail})$ ditunjukkan dengan nilai $7,29 > 2,34$
4. P-value ($P_{(T \leq t) \ one-tail}) < \alpha$ (*alpha*) ditunjukkan dengan nilai $2,97888 \times 10^{-12} < 0,01$
5. Berdasarkan perbandingan nilai pada poin 3&4 di atas, maka disimpulkan **hipotesis nol ditolak** dan menerima hipotesis alternatif bahwa ada perbedaan **sangat signifikan** antara tahanan pentanahan tower sebelum dan setelah pemasangan MRG. Disebut perbedaan sangat signifikan karena $\alpha=0,01$. Sehingga dapat disimpulkan **pemasangan MRG efektif secara statistik**.

4.2.2. Analisa Pengurangan Kerusakan Isolator Tower

Pada tahun 2022 di tower 171 SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 terdapat isolator yang rusak (*flashover*) karena sambaran petir seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.11.



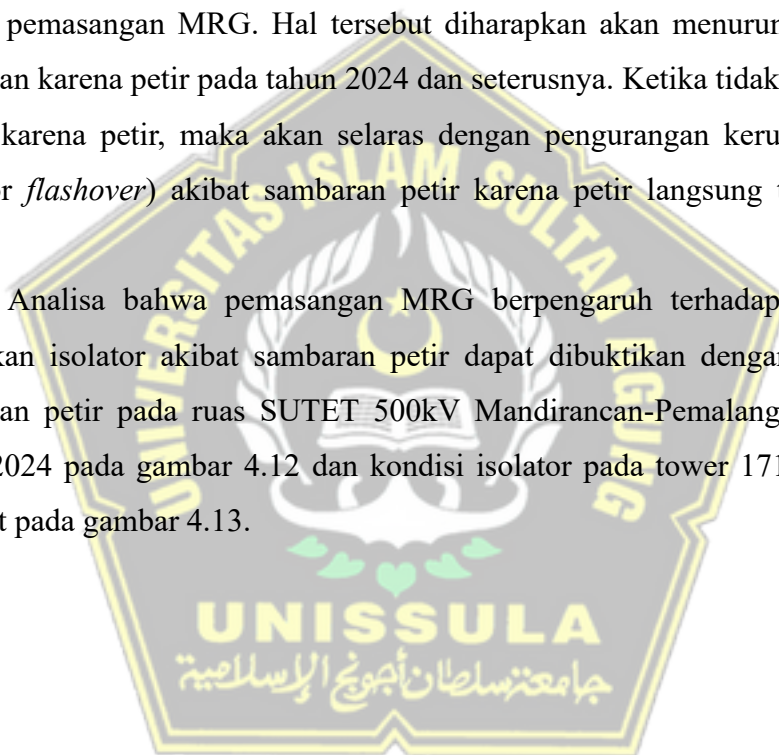
Gambar 4. 11 Kerusakan isolator (*flashover*) yang disebabkan sambaran petir pada T.171

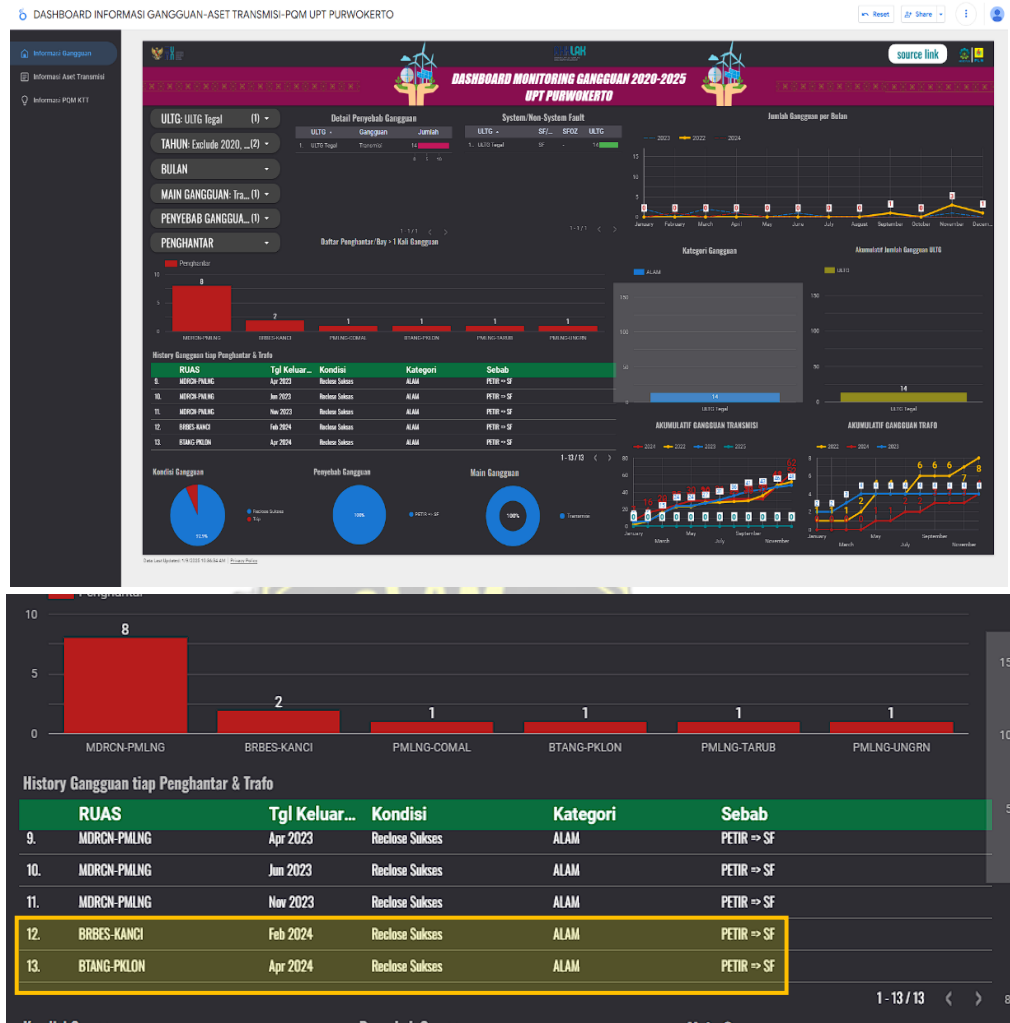
Isolator yang rusak (*flashover*) tersebut diganti dengan isolator kondisi baik. Untuk mencegah terjadinya isolator *flashover* maka dilakukan pemasangan MRG pada kaki tower. Hal tersebut adalah usaha untuk memperkecil tahanan pentanahan kaki tower agar petir langsung dapat tersalurkan ke tanah sehingga tidak terjadi

kerusakan isolator (*flashover*). Pemasangan MRG dilakukan pada tower yang terkena gangguan dan beberapa tower di sebelahnya yaitu 5 tower sebelum dan 5 tower sesudah dari tower yang terkena gangguan.

Tindak lanjut gangguan karena petir yang terjadi pada 5 tower SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 wilayah ULTG Tegal pada tahun 2022 hingga 2023, sudah dilaksanakan pemasangan MRG pada 53 tower. Analisa hasil pengukuran tahanan pentanahan pada 53 tower, didapatkan adanya perbedaan *sangat signifikan secara statistik* antara tahanan pentanahan tower sebelum dan setelah pemasangan MRG. Hal tersebut diharapkan akan menurunkan frekuensi gangguan karena petir pada tahun 2024 dan seterusnya. Ketika tidak ada gangguan sistem karena petir, maka akan selaras dengan pengurangan kerusakan isolator (isolator *flashover*) akibat sambaran petir karena petir langsung tersalurkan ke tanah.

Analisa bahwa pemasangan MRG berpengaruh terhadap pengurangan kerusakan isolator akibat sambaran petir dapat dibuktikan dengan data jumlah gangguan petir pada ruas SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 di tahun 2024 pada gambar 4.12 dan kondisi isolator pada tower 171 ruas SUTET tersebut pada gambar 4.13.





Gambar 4. 12 Data gangguan petir wilayah ULTG Tegal tahun 2024

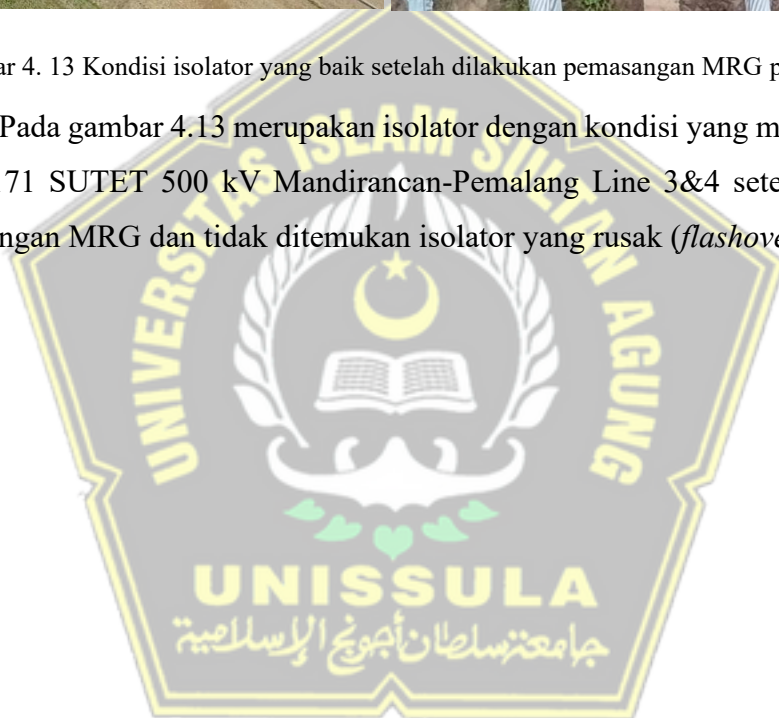
Pada “Dashboard Monitoring Gangguan 2020-2025 UPT Purwokerto” yang ditunjukkan pada gambar 4.11 menunjukkan bahwa tahun 2024 tidak ada gangguan petir pada SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4.

Kondisi isolator pada tower ruas SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 pada tahun 2024 ditunjukkan gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Kondisi isolator yang baik setelah dilakukan pemasangan MRG pada tower 171

Pada gambar 4.13 merupakan isolator dengan kondisi yang masih baik pada tower 171 SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 setelah dilakukan pemasangan MRG dan tidak ditemukan isolator yang rusak (*flashover*).



BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan tentang Analisa Efektivitas Pemasangan *Multirod Grounding* (MRG) untuk Mengatasi Gangguan *Reclose* karena Petir pada SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 Wilayah ULTG Tegal dengan Metode *Paired Sample T Test*, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pemasangan *multirod grounding* (MRG) dapat menurunkan tahanan pentanahan pada tower SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 yang terkena gangguan. Nilai rata-rata tahanan pentanahan sebelum pemasangan MRG adalah $3,75 \Omega$ dan setelah pemasangan MRG adalah $1,33 \Omega$.
2. Pemasangan MRG dinilai *efektif* secara statistik dan terdapat perbedaan *sangat signifikan* antara tahanan pentanahan tower sebelum dan setelah pemasangan MRG. Hal tersebut ditunjukkan dengan hasil $t_{hitung} > t_{tabel}$ ($7,29 > 2,34$) dan hasil $P\text{-value} < \alpha$ ($2,97888 \times 10^{-12} < 0,01$).
3. Pemasangan MRG berpengaruh terhadap pengurangan kerusakan isolator akibat sambaran petir pada tahun 2024 di tower SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 yang ditunjukkan isolator tower 171 masih kondisi baik.

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran sebagai berikut:

1. Pada penelitian berikutnya dapat menganalisa efektivitas perbaikan tahanan pentanahan dengan metode lain seperti metode *counterpoise* agar bisa dibandingkan dengan analisa efektivitas pemasangan MRG.
2. Analisa data yang digunakan pada penelitian berikutnya dapat menggunakan metode Analisis Varians (Anova) untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan dalam hasil perbaikan tahanan pentanahan antara metode *multirod grounding* dan metode *counterpoise*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Perusahaan Listrik Negara, “Statistik PLN 2023,” PT PLN (Persero), Jakarta, 2024.
- [2] Unit Induk Pembangunan Jawa Bagian Tengah, “Tower Schedule Pembangunan SUTET 500kV Batang-Mandirancan Seksi 1 & 2,” PT PLN (Persero), Jakarta, 2022.
- [3] Bidang Perencanaan dan Evaluasi, “Dashboard Monitoring Gangguan 2020-2024,” PT PLN (Persero) UPT Purwokerto, 2024.
- [4] D. Pranatali, “Analisa Kelayakan Pentanahan Tower SUTT 150 kV Jelok – Bringin Menggunakan Metode Komparasi,” Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, 2022.
- [5] I. A. Wicaksana, “Analisis Sistem Pembumian Tower Saluran Transmisi dari Gardu Induk Kapal – Gardu Induk Gianyar,” Universitas Udayana, 2021.
- [6] B. E. Prasetyo, “Analisis Perbaikan Sistem Pentanahan pada Tower Transmisi 150 kV Terhadap Sambaran Petir Menggunakan Simulasi Alternative Transient Program (ATP),” Politeknik Negeri Malang, Malang, 2022.
- [7] N. M. Mucharomah, “Analisis Pemasangan Multirod Grounding Pada Ruas SUTT 70 kV Sunyaragi-Kuningan,” Universitas Diponegoro, Semarang, 2023.
- [8] Puslitbang Ketenagalistrikan PLN, *Pembumian Pada Gardu Induk dan Jaringan Transmisi SPLN T5.012: 2020*. Jakarta: PT PLN (Persero), 2022.
- [9] IEEE-SA Standards Board, *IEEE Std 80-2013 - IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, Std 80. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015.
- [10] Divisi Transmisi Regional Jawa Madura Bali, “Review dan Revisi Kepdir. No:0520 K/DIR/2014 tentang Buku Pedoman SUTT SUTET,” PT PLN (Persero), Jakarta, 2022.
- [11] British Standard, *Code of Practice for Protective Earthing of Electrical Installations, BS 7430:2011*, BS 7430. UK: BSI Standard Publication, 2011.
- [12] IEEE-SA Standards Board, *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*, Std 142. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Std 142:2007, 2007.

- [13] Badan Standarisasi Nasional, “Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011),” Standar Nasional Indonesia, Jakarta, 2011.
- [14] H. Kurniawan, “Studi Pentanahan Kaki Menara Transmisi 500kV Sumatera Turun Peranap New Aurduri,” Universitas Batanghari, Jambi, 2018.
- [15] Bidang Pemeliharaan Jaringan, “Instruksi Kerja Pemasangan Multirod Grounding,” PT PLN (Persero) UIT Jawa Bagian Tengah, Bandung, 2022.
- [16] D. Syafriani, A. Darmana, F. A. Syuhada, and D. P. Sari, *Buku Ajar Statistik Uji Beda untuk Penelitian Pendidikan (Cara dan Pengolahannya dengan SPSS)*. Purbalingga: Eureka Media Aksara, 2023.
- [17] R. A. Fisher, “Statistical methods for research workers,” in *Breakthroughs in statistics: Methodology and distribution*, London: Springer, 1970, pp. 66–70.
- [18] S. S. Wiwaha, R. Duanaputri, S. S. Wibowo, A. Prasetyo, and S. W. Dali, “Evaluasi Pentanahan Terhadap Sambaran Petir Pada SUTT 70 kV Menggunakan Electro Magnetic Transient Program (EMTP),” *ELPOSYS J. Sist. Kelistrikan*, vol. 8, no. 3, pp. 132–137, 2021.
- [19] Science Learning Hub, “Lightning Explained,” <https://www.sciencelearn.org.nz/>. Accessed: Mar. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/239-lightning-explained>
- [20] S. Muhammad, “Analisis Penurunan Gangguan Akibat Petir pada Transmisi 150 kV Penghantar Maninjau–Simpang Empat Menggunakan DGS (Direct Grounding System),” Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat, Padang, 2022.
- [21] H. F. Hasibuan, “Petir dalam Perspektif Al-Qur’an dan Relevansinya Terhadap Ilmu Pengetahuan Alam,” Institut PTIQ Jakarta, 2022.