

Analisa Efektivitas Pemasangan *Multirod-Grounding* pada SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 dengan Metode *Paired Sample T-Test*

Reza Muhammad Ghani¹, Jenny Putri Hapsari²

Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang
Jl. Kaligawe Raya No.Km.4, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112

¹rezaghani30@gmail.com

²jenny@unissula.ac.id

Intisari — Pertumbuhan pelanggan PLN terus meningkat setiap tahunnya, dengan kenaikan dari tahun 2014 hingga tahun 2023 rata-rata 5,26%. Dibutuhkan keandalan pada sistem transmisi SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang line 3 & 4 yang menyalurkan tenaga listrik dari 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. Usaha 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* dengan mengolah data hasil pengukuran tahanan pentanahan pada 53 tower SUTET sebelum dan setelah pemasangan MRG. Pengolahan data dilakukan dengan fitur *Data Analysis* pada *Microsoft Excel*. Berdasarkan pengukuran di lapangan diperoleh 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 $t_{hitung} (t_{stat}) > t_{tabel} (t_{critical one-tail})$ dengan nilai 7,29 > 2,34 dan diperoleh *P-value* ($P_{(T \leq t) one-tail}$) < α (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 yang disebabkan petir pada ruas transmisi SUTET ini, sehingga pemasangan MRG berpengaruh terhadap pengurangan frekuensi gangguan petir pada ruas 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 of 5.26% from 2014 to 2023. Reliability is needed in the 500kV Mandirancan-Pemalang line 3 & 4 SUTET transmission system which distributes electricity from the Batang PLTU and Tanjungjati PLTU. Throughout 2022 and 2023, there were 5 *reclose* disturbances caused by lightning on the SUTET in the ULTG Tegal. Efforts to prevent lightning disturbances are 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, in front (5 towers) and behind (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 data from grounding resistance measurements on 53 SUTET towers before and after the installation of MRG. Data processing is done using the *Data Analysis* feature in *Microsoft Excel*. Based on field measurements, the average grounding resistance value before and after the installation of MRG is 3.75 Ω and 1.33 Ω . Based on data analysis using the *Paired Sample T Test method*, obtained $t_{count} (t_{stat}) > t_{table} (t_{critical one-tail})$ with a value of 7.29 > 2.34 and the *P-value* ($P_{(T \leq t) one-tail}$) < α (alpha) with a value of $2.97888 \times 10^{-12} < 0.01$. 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, there was no disturbance caused by lightning on this SUTET transmission, so that the installation of MRG had an effect on reducing the frequency of lightning disturbances on this SUTET.

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

I. PENDAHULUAN

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 2023 rata-rata 4,31%. [1] Sehingga dibutuhkan keandalan dari sistem transmisi, salah satunya adalah SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang line 3&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* yang 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. [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.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Sistem Pentanahan Kaki Menara Tower

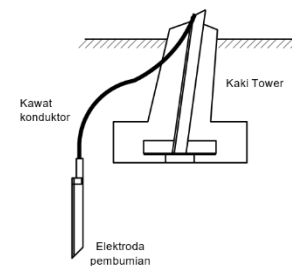
Pentanahan (*Grounding*) adalah menghubungkan sebuah objek atau jaringan kelistrikan ke tanah atau bumi melalui konduktor. Pembumian pada tower transmisi pada Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi (SUTET) bertujuan untuk menjamin keamanan personil dari tegangan sentuh dan tegangan langkah pada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

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 level tegangan 500kV adalah ≤ 1 ohm.

B. 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 (Gbr. 1). Jumlah driven rod disesuaikan sehingga didapat nilai pembumian yang dibutuhkan. [8]



Gbr. 1 Contoh metode *driven rod*

Tahanan elektrode batang R dalam ohm (Ω) dapat dihitung seperti pada rumus persamaan 1 [11]:

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

dengan :

R = tahanan elektrode batang, dalam ohm (Ω)

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

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

d = diameter elektrode batang, dalam meter (m)

Beberapa batang biasanya digunakan untuk menyediakan resistansi pentanahan rendah yang dibutuhkan oleh instalasi berkapasitas tinggi.[12] Pada koneksi paralel elektrode batang yang sejajar vertikal, tahanan total dapat dihitung pada rumus persamaan 2 sebagai berikut [11]:

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

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)

C. 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. Tahanan Jenis Tanah

Tahanan jenis tanah (*soil resistivity*) adalah nilai yang menunjukkan resistansi spesifik tanah, dinyatakan dalam satuan ohm.meter (Ωm). 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.

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 1. [13]

Tabel 1. Tahanan jenis beberapa jenis tanah

No	Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah (Ωm)
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

E. Multirod Grounding (MRG)

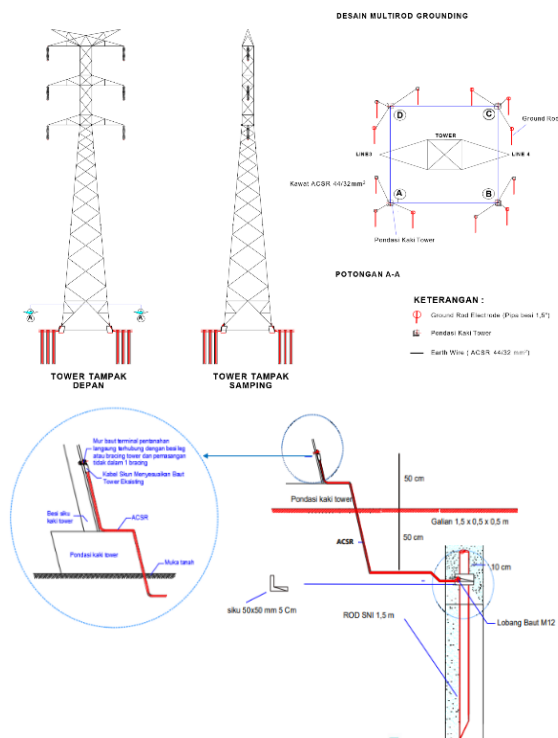
Multirod Grounding pada tower transmisi adalah sebuah metode menurunkan tahanan pentanahan tower dengan pemasangan 3 buah *ground rod* (elektroda batang) yang tertanam secara vertikal dalam tanah yang dihubungkan paralel dan terhubung pada kaki tower.

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 Gbr. 2 [15]. Komponen-komponen desain MRG diantaranya *ground rod* (elektroda batang), *earth wire*, sepatu kabel, mur dan baut.

F. 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. [16]



Gbr. 2 Desain Multirod Grounding (MRG)

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

1) Menentukan nilai t hitung

$$t_{hit} = \frac{\bar{D}}{\left(\frac{SD}{\sqrt{n}}\right)} \quad (3)$$

Ingat :

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Dimana :

t_{hit} = nilai t hitung

D = selisih pengukuran 1 dan 2

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

SD = standar deviasi selisih pengukuran 1 dan 2

n = jumlah sampel

2) 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.

3) 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).

III. METODE PENELITIAN

A. 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).

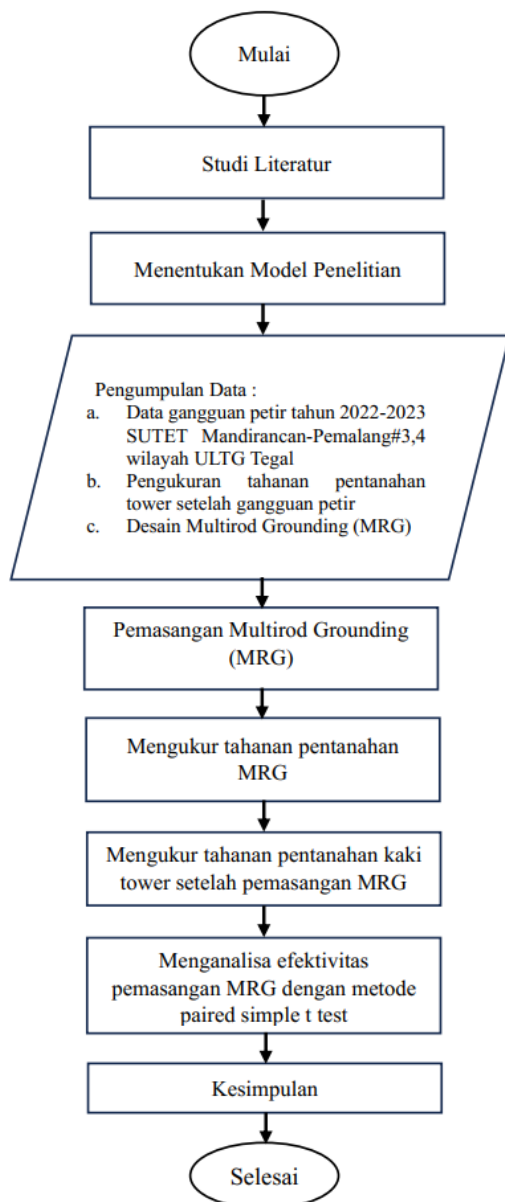
B. Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini tersusun secara urut yang ditunjukkan pada *flowchart* Gbr. 3.

C. 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.



Gbr. 3 Diagram Alir Proses Penelitian

D. Pengukuran Tahanan Pentanahan Tower

Peralatan yang digunakan untuk pengukuran tahanan pentanahan tower yaitu *Earth Resistance Tester* dengan merk Kyoritsu model 4105A seperti pada Gbr. 4.

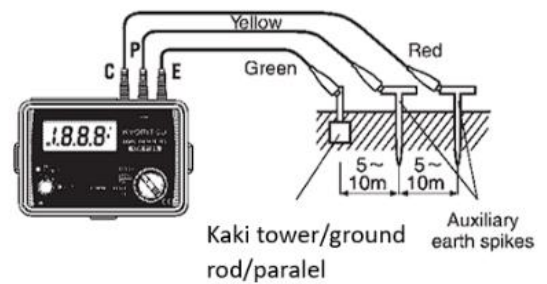


Gbr. 4 Earth Resistance Tester dengan Merk Kyoritsu Model 4105A

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 seperti pada Gbr. 5.



Gbr. 5 Metode Pengukuran pada kaki tower / rod / paralel

E. 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 :

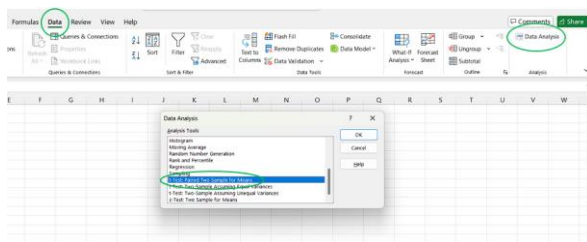
1. *Ground rod*/elektroda batang (12 buah setiap tower)
2. Earth Wire (12 potong tiap tower)
3. Sepatu kabel aluminium (24 buah tiap tower)
4. Mur baut galvanis (24 buah tiap tower)

F. 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) yang mengolah data hasil tahanan pentanahan 53 tower SUTET tersebut sebelum dilakukan pemasangan MRG dan setelah pemasangan 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 Gbr. 6. Pemilihan fitur tersebut pada menu bar *Data*, kemudian pilih *Data Analysis*, cari metode *t-Test: Paired Two Sample for Means*.



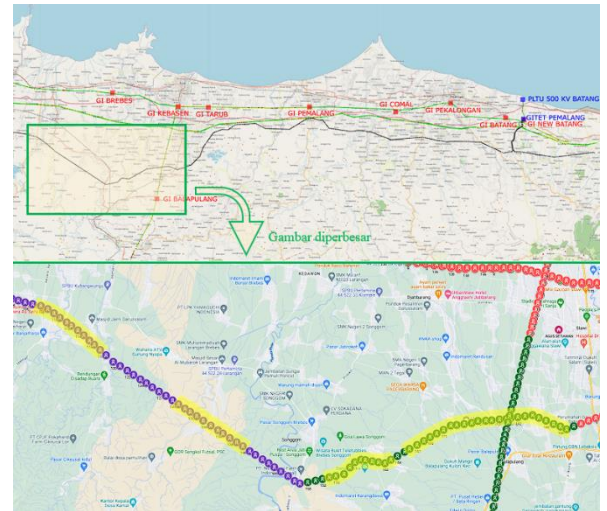
Gbr. 6 Tampilan metode *t-Test: Paired Two Sample for Means* pada fitur *Data Analysis* *Microsoft Excel*

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

Data gangguan petir, data pengukuran tahanan pentanahan, dan data pemasangan MRG diperoleh dari 53 tower (*highlight kuning*) yang ditampilkan pada Gbr. 7. Data hasil penelitian tersebut akan dijelaskan pada

sub bab yang selanjutnya akan dilakukan analisa untuk menjawab pertanyaan rumusan masalah.



Gbr. 7 Lokasi tower-tower (*highlight kuning*) yang diambil datanya untuk penelitian

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 1 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 1 adalah sebagai berikut :

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

Secara teori untuk mengurangi tahanan pentanahan pada kaki tower adalah dengan menambah elektroda batang secara paralel. Desain MRG pada Gbr. 2 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 $30 \Omega.m$. Sehingga hasil perhitungan tahanan pentanahan setelah pemasangan MRG dengan menggunakan persamaan 2 adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 R_t &= \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 + \frac{L}{s} \ln \left(\frac{1,78n}{2,718} \right) \right] \\
 &= \frac{1}{3} \times \frac{30 \Omega.m}{2 \times 22 \div 7 \times 1,5m} \left[\ln \left(\frac{8 \times 1,5m}{0,0381} \right) - 1 + \right. \\
 &\quad \left. \frac{1,5m}{1,5m} \ln \left(\frac{1,78 \times 3}{2,718} \right) \right] \\
 &= 5,57 \Omega
 \end{aligned}$$

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 10Ω .

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.
2. Menguji tahanan pentanahan tiap kaki tower sebelum pemasangan MRG dan dicatat hasilnya.
3. Mengukur jarak kaki tower dengan ground rod yang akan ditanam. Berpedoman pada desain MRG yang ada, pemasangan ground rod berjarak 2,5m dari kaki tower dan sudut pemasangan antar ground rod ditentukan minimal 30° tergantung situasi kondisi di lapangan. Sehingga jarak minimal antar ground rod adalah 1,5 meter.
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.
5. Menghubungkan ground rod dan kaki tower dengan earth wire yang telah terpasang sepatu kabel di kedua ujungnya.
6. Menguruk galian dengan tanah hingga rata dengan permukaan tanah.

7. Menguji tahanan pentanahan tiap kaki tower setelah pemasangan MRG dan mencatat hasilnya.
8. Membersihkan dan merapikan lokasi pekerjaan.

Tahanan pentanahan kaki tower diukur sebelum dan setelah pemasangan *multirod grounding* (MRG). Hasil pengukuran tersebut terdapat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Hasil pengukuran tahanan pentanahan kaki tower sebelum pemasangan MRG

No	Tower	Sebelum Pemasangan MRG Rsebelum (Ω)			
		A	B	C	D
1	107	2,28	3,29	1,78	13,66
2	108	3,52	9,43	4,53	1,14
3	109	1,41	1,77	1,17	4,31
4	110	2,94	2,98	2,06	1,6
5	111	6,03	1,33	2,32	2,71
6	112	2,08	2,97	4,91	4,23
7	113	6,3	5	16,44	2,06
8	114	1,12	4,96	1,4	2,34
9	115	3,72	1,46	1,1	2,27
10	116	1,25	1,06	1,21	5,27
11	117	1,25	1,47	2,6	1,06
12	129	1,56	4,59	3,59	1,58
13	130	0,65	0,56	4,9	0,3
14	131	0,49	0,43	0,59	0,49
15	133	1,04	0,41	1,13	0,61
16	134	0,55	0,56	0,58	0,59
17	135	1,1	0,6	0,58	0,6
18	136	0,58	0,59	1,37	0,59
19	137	0,6	1,27	0,6	0,58
20	138	1,4	1,49	0,63	0,92
21	139	1,03	1,78	0,48	0,82
22	153	0,86	0,89	0,89	0,64
23	154	0,59	0,72	1,58	0,89
24	155	0,75	0,21	0,72	1,03
25	156	2,35	2,65	1,31	2,32
26	157	2,21	3,04	1,16	2,78
27	158	0,35	0,23	0,49	0,28
28	159	0,6	0,51	0,68	0,41
29	160	1,48	0,99	1,12	0,82
30	161	0,64	1,85	0,56	1,39
31	162	1,31	0,95	0,48	0,95

No	Tower	Sebelum Pemasangan MRG Rsebelum (Ω)			
		A	B	C	D
32	163	0,93	1,63	1,19	1,18
33	166	0,73	1,93	1,24	0,7
34	167	1,37	1,53	0,78	0,67
35	168	0,9	1,22	0,91	1,03
36	169	1,28	0,82	0,82	0,92
37	170	0,87	0,85	1,02	1,73
38	171	0,57	0,88	0,96	0,89
39	172	0,96	0,86	0,86	0,93
40	173	0,82	0,83	0,82	0,81
41	174	1,12	0,86	0,84	0,84
42	175	0,84	0,8	0,97	0,84
43	176	0,95	0,83	0,84	0,86
44	177	0,89	0,85	0,86	0,97
45	178	15,65	10,59	17,21	14,81
46	179	13,01	12,19	12,18	12,45
47	180	19,01	12,13	12,93	12,91
48	181	9,29	18,61	9,85	19,95
49	182	15,61	19,7	10,26	11,71
50	183	17,04	16	11,45	11,62
51	184	8,44	8,31	17,46	17,44
52	185	18,7	9,88	15	14,72
53	186	13,55	15,97	19,32	14,81

Tabel 3. Hasil pengukuran tahanan pentanahan kaki tower sesudah pemasangan MRG

No	Tower	Sesudah Pemasangan MRG Rsetelah (Ω)			
		A	B	C	D
1	107	0,7	0,73	0,12	0,26
2	108	0,04	0,24	0,06	0,07
3	109	0,65	0,43	0,82	0,82
4	110	0,2	0,12	0,45	0,97
5	111	0,31	0,72	0,69	0,76
6	112	0,24	0,82	1,14	1,12
7	113	0,06	0,46	1,02	1,18
8	114	0,2	0,93	0,67	0,45
9	115	0,2	0,28	0,24	0,38
10	116	0,31	0,41	0,83	0,36
11	117	0,38	0,98	0,05	1,05
12	129	1,02	1,38	0,67	0,92
13	130	0,34	0,48	0,39	0,39
14	131	0,55	0,47	0,51	1,16

No	Tower	Sesudah Pemasangan MRG Rsetelah (Ω)			
		A	B	C	D
15	133	0,74	0,67	0,53	0,62
16	134	0,19	1,30	0,20	1,43
17	135	1,11	0,19	0,19	0,19
18	136	0,53	0,45	0,90	0,99
19	137	0,59	0,60	0,19	0,19
20	138	0,80	1,25	0,76	0,78
21	139	0,51	0,73	0,28	0,63
22	153	0,73	0,42	0,41	0,44
23	154	0,50	0,79	0,91	0,50
24	155	0,63	1,47	0,74	1,54
25	156	1,67	1,78	2,24	1,71
26	157	1,75	0,94	1,84	1,17
27	158	1,76	0,71	1,54	1,40
28	159	1,25	1,95	1,23	0,93
29	160	1,56	1,82	1,30	1,86
30	161	1,96	1,63	1,70	1,69
31	162	1,55	1,74	1,99	1,91
32	163	1,72	1,67	1,93	2,92
33	166	1,72	2,23	1,79	1,40
34	167	0,68	1,53	1,54	1,50
35	168	1,72	1,53	1,67	1,56
36	169	1,59	1,78	1,64	1,48
37	170	1,87	1,76	1,51	1,86
38	171	1,90	1,43	1,46	1,92
39	172	1,53	1,37	1,91	1,77
40	173	1,83	1,90	1,93	1,59
41	174	1,89	1,76	1,93	1,69
42	175	1,56	1,55	1,50	1,40
43	176	1,65	1,49	1,43	1,51
44	177	1,56	1,86	1,51	1,53
45	178	2,25	1,99	1,12	1,39
46	179	2,47	2,76	3,69	2,1
47	180	3,34	2,38	2,12	2,01
48	181	1,81	2,41	1,46	1,66
49	182	1,93	2,96	3,58	3,05
50	183	3,48	3,28	3,33	1,66
51	184	3,28	3,29	2,94	2,88
52	185	2,52	2,73	2,99	3,05
53	186	1,53	1,91	2,54	4,8

B. Analisa Hasil Pengukuran Tahanan Pentanahan

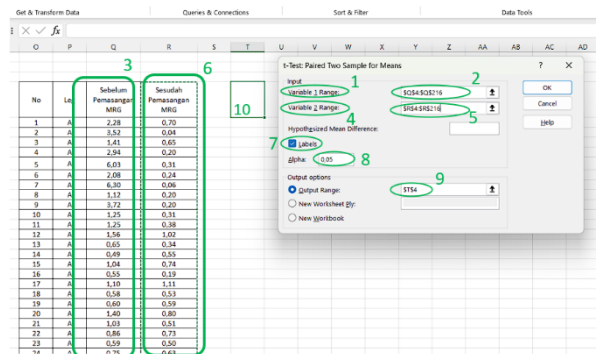
Pada analisa hasil pengukuran, perlu dipahami hipotesis statistik pada penelitian ini terlebih dahulu. Hipotesis statistik metode *paired sample t test* atau uji t sampel berpasangan ini adalah Hipotesis Nol (H_0) dan Hipotesis Alternatif (H_1) yang dijabarkan sebagai berikut:

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 penelitian ini menggunakan nilai signifikansi $\alpha = 0,01$ (1%).

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

1. Mengubah susunan tabel 2 dan 3. 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.
2. 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
3. Pada jendela “t-Test: Paired Two Sample for Means”, isi seperti pada Gbr. 8



Gbr. 8 Tahapan pemilihan kolom data dan pengisian parameter analisa data

Pada “Output Range” akan ditampilkan tabel analisa hasil pengukuran tahanan pentanahan seperti pada Gbr. 9. Pada Gbr 9. dapat disimpulkan sebagai berikut :

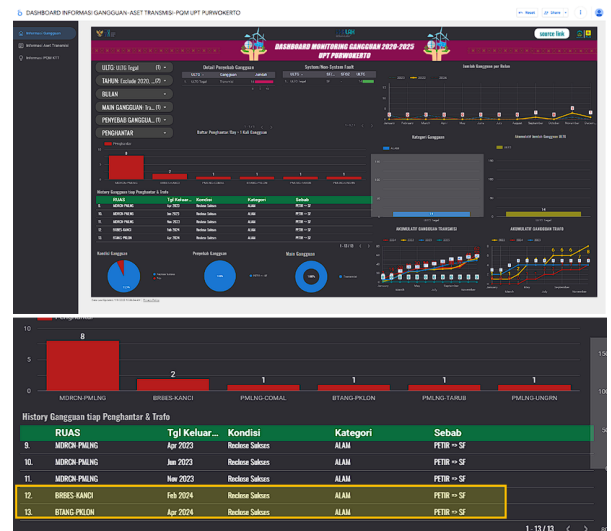
1. Nilai signifikansi $\alpha = 0,01$
2. Nilai rata-rata (*means*) tahanan pentanahan sebelum pemasangan MRG adalah $3,75 \Omega$ dan nilai rata-rata tahanan pentanahan setelah pemasangan MRG adalah $1,33 \Omega$.
3. $t_{hitung} (t_{stat}) > t_{tabel} (t_{critical} \text{ one-tail})$ ditunjukkan dengan nilai $7,29 > 2,34$
4. $P\text{-value} (P_{(T \leq t)} \text{ one-tail}) < \alpha$ (*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**.

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	

Gbr. 9 Hasil analisa pengukuran tahanan pentanahan dengan $\alpha=0,01$

C. Analisa Pengurangan Frekuensi 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 yang ditunjukkan pada Gbr. 9, 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. Berdasarkan “Dashboard Monitoring Gangguan 2020-2025 UPT Purwokerto” yang ditunjukkan pada Gbr. 10 menunjukkan bahwa **tahun 2024 tidak ada gangguan petir pada SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4**. Sepanjang tahun 2024 hanya terlihat adanya gangguan pada penghantar lain di bulan Februari & April 2024.



Gbr. 10 Data gangguan petir wilayah ULTG Tegal tahun 2024

V. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dapat disimpulkan bahwa cara untuk menurunkan tahanan pentanahan pada tower SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 yang terkena gangguan petir adalah dengan pemasangan *multirod grounding* (MRG) yang menggunakan 3 buah *ground rod* (elektroda batang) yang ditanam secara vertikal dalam tanah dan terhubung secara paralel pada kaki tower. Berdasarkan perhitungan secara teori didapatkan nilai tahanan pentanahan sebelum pemasangan MRG adalah 15,12 Ω dan setelah pemasangan MRG adalah 5,57 Ω . Berdasarkan perhitungan data *real* di lapangan diperoleh nilai rata-rata tahanan pentanahan sebelum dan setelah pemasangan MRG adalah 3,75 Ω dan 1,33 Ω . Berdasarkan analisa pengukuran tahanan pentanahan sebelum dan setelah pemasangan MRG dengan metode *Paired Sample T Test* pada fitur *Data Analysis Microsoft Excel*, diperoleh hasil $t_{hitung} (t_{stat}) > t_{tabel} (t_{critical one-tail})$ ditunjukkan dengan nilai 7,29 > 2,34, diperoleh hasil P-value ($P(T \leq t) one-tail$) < α ($alpha$) ditunjukkan 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 sepanjang 2024 di UPT Purwoketo ULTG

Tegal, diperoleh data tidak adanya gangguan yang disebabkan petir pada ruas SUTET 500 kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4, sehingga pemasangan MRG berpengaruh terhadap pengurangan frekuensi gangguan petir pada ruas tersebut.

REFERENSI

- [1] Perusahaan Listrik Negara, “Statistik PLN 2023,” PT PLN (Persero), Jakarta, 2024.
- [2] U. JBT, “Tower Schedule Pembangunan SUTET 500kV Batang-Mandirancan Seksi 1 & 2,” PT PLN (Persero), Jakarta, 2022.
- [3] P. Data, “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, 2023.
- [8] R. Institute, “Pembumian Pada Gardu Induk dan Jaringan Transmisi SPLN T5.012: 2020,” PT PLN (Persero), Jakarta, 2022.
- [9] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 80-2013 - IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. 2015.
- [10] D. RJT, “Review dan Revisi Kepdir. No:0520 K/DIR/2014 tentang Buku Pedoman SUTT SUTET,” PT PLN (Persero), Jakarta, 2022.
- [11] B. Standard, *Code of Practice for Protective Earthing of Electrical Installations, BS 7430:2011*, BS 7430. UK: BSI Standard Publication, 2011.
- [12] I.-S. S. 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] B. S. N. (BSN), “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] P. Transmisi, “Instruksi Kerja Pemasangan Multirod Grounding,” PT PLN (Persero) UIT Jawa Bagian Tengah, 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.