

TUGAS AKHIR

**PERANCANGAN *LIGHTNING ARRESTER* SEBAGAI SISTEM
PENGAMAN PADA PLTS PEMATANG JOHAR**

*Diajukan Sebagai Syarat untuk Mendapatkan Gelar Sarjana
Program Strata-1 Pada Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh :

ZAINUDDIN

1607220081



UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2021

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh :

Nama : ZAINUDDIN
NPM : 1607220081
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Perancangan Lightning Arrester Sebagai Sistem
Pengaman Pada PLTS Pematang Johar
Bidang Ilmu : Sistem Tenaga

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

Medan, 25 - Nov - 2021

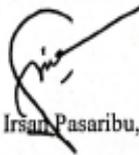
Mengetahui dan Menyetujui :

Dosen Pembimbing



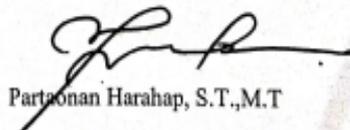
Rimbawati, S.T., M.T

Dosen Penguji I



Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T

Dosen Penguji II



Partoonan Harahap, S.T., M.T

Program Studi Teknik Elektro Ketua,



Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama Lengkap : ZAINUDDIN
Tempat/Tanggal Lahir : Tanjungbalai / 1 Januari 1997
NPM : 1607220081
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Elektro

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

“Perancangan Lightning Arrester Sebagai Sistem Pengaman Pada PLTS Pematang Johar”.

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

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

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

Medan, 25 November 2021

Saya yang menyatakan,


ZAINUDDIN

ABSTRAK

Perancangan lightning arrester pada bangunan PLTS pematang johar bertujuan untuk mengamankan bangunan dari gangguan sambaran petir. Mengingat perangkat elektronik yang terdapat pada bangunan tersebut tergolong mahal dan sangat penting. Mengingat hari guruh di wilayah Kota medan yang cukup tinggi yaitu 224 hari/tahun, serta letak geografis bangunan yang berada ditengah persawahan menjadikan bangunan PLTS pematang johar sangat rentan akan sambaran petir. Oleh karena itu untuk menghindari dampak dari sambaran petir, PLTS pematang johar perlu dipasang proteksi petir eksternal. Metode yang dilakukan yaitu Analisis terhadap beberapa parameter berupa luas penampang konduktor, nilai tahanan grid pentanahan, luas bangunan, tegangan sentuh dan tegangan langkah. Kemudian akan disimulasikan dengan software Etap untuk mengetahui ketahanan dari sistem lightning arrester yang telah dirancang. Dari data yang telah dianalisa sebelumnya didapatkan hasil berupa resistansi pentanahan yang bernilai 1Ω dan resistansi tanah yang bernilai $4.7\ \Omega\text{m}$ serata memiliki nilai efisiensi $0.72\ \%$ yang tergolong pada tingkat proteksi III. Kemudian arus maksimum yang mampu ditahan oleh lightning arrester ini sebesar $6\ \text{kA}$ dan waktu pelepasan arusnya $0.3\ \mu\text{s}$. Adapun untuk menghindari efek induksi yang akan berdampak bagi manusia akibat terjadinya sambaran petir direkomendasikan jarak aman berkisar $\pm 30\ \text{m}$ dari titik referensi dikarenakan memiliki nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah yang memenuhi tegangan yang ditoleransi. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa sistem pentanahan pada PLTS pematang johar cukup baik dan memenuhi standar yaitu dibawah 5Ω .

Kata Kunci : PLTS, Proteksi Petir Eksternal, Etap.

ABSTRACT

The design of the lightning arrester in the Pematang Johar PLTS building aims to secure the building from lightning strikes. Considering the electronic devices contained in the building are quite expensive and very important. Considering the thunder days in the Medan City area which is quite high, namely 224 days/year, and the geographical location of the building in the middle of rice fields makes the Pematang Johar PLTS building very vulnerable to lightning strikes. Therefore, to avoid the impact of lightning strikes, PLTS Pematang Johar needs to be installed with external lightning protection. The method used is an analysis of several parameters in the form of cross-sectional area of the conductor, the value of the resistance of the grounding grid, the building area, the touch voltage and the step voltage. Then it will be simulated with Etap software to determine the resistance of the lightning arrester system that has been designed. From the data that has been previously analyzed, the results are in the form of a ground resistance of 1Ω and a ground resistance of 4.7 m which has an efficiency value of 0.72% which is classified as protection level III. Then the maximum current that this lightning arrester can withstand is 6 kA and the current release time is 0.3 s. As for avoiding the induction effect that will impact humans due to lightning strikes, it is recommended that a safe distance ranges from ± 30 m from the reference point because it has a touch voltage value and a step voltage that meets the tolerable voltage. The results of the study indicate that the grounding system in PLTS Pematang Johar is quite good and meets the standard, which is below 5Ω .

Keywords: PLTS, External Lightning Protection, Etap.

KATA PENGANTAR



Assalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

Segala puji dan Syukur Kehadirat ALLAH Subhana Wata'ala yang telah memberikan Rahmat dan Kesempatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul "Perancangan *Lightning Arrester* Sebagai Sistem Pengaman Pada PLTS Pematang Johar" dengan lancar dan hasil yang baik.

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, tentunya terdapat dukungan dari berbagai pihak yang mendukung, baik dari segi Moril dan Materil. Untuk itu pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah Subhana Wata'ala yang dengan segala Rahmat dan Karunia-Nya serta kesempatan yang diberikan kepada Penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
2. Ayahanda Zamal Siagian dan Ibunda Nursyamsi yang sangat Penulis cintai dan sayangi, Telah berjuang dengan keras baik Doa dan Tindakan, memeras keringat dan air mata dalam mendukung Penulis menggapai impian dan menyelesaikan Tugas akhir ini,
3. Bapak Munawar Alfansury Siregar S.T.,M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
4. Bapak Faisal Irsan Pasaribu S.T.,S.Pd.,M.T dan Ibu Elvy Syahnur S.T.,M.Pd selaku Ketua dan Sekretaris Program Studi S-1 Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Ibunda Rimbawati S.T.,M.T selaku Dosen Pembimbing yang telah membimbing dan mengarahkan Kepada Penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir serta selaku mentor yang memberkan segala solusi terbaik dalam menyelesaikan beberapa masalah.

6. Seluruh Staff Pengajar/Pegawai Program Studi Fakultas Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Teman-teman seperjuangan Teknik Elektro Stambuk 2016, Terkhusus Ridho Ananda, Heri Setiadi, Agung Tajali Ramadhan, Wira Agus Lexmana Tanjung, Andre Dwicahyo, Muhammad Ardiansyah, Yoanda Anziru Defitra dan Defri Afiza yang telah menjadi sahabat terbaik Penulis, Serta teman-teman kelas A-1 Pagi Teknik Elektro.
8. Pak Juman, selaku kepala BUMDES Pematang Johar yang selalu membimbing kami dalam melakukan perakitan dan penelitian pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya.
9. Serta masih banyak lagi pihak-pihak yang sangat berpengaruh dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu. Semoga Allah Yang Mahas Esa senantiasa membalas semua Kebaikan yang telah diberikan kepada Penulis. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat terkhusus bagi Penulis dan kepada pembaca umumnya. Aamiin Ya Rabbal 'Alamin.

Medan, 25 - 10 - 2021

Penulis



ZAINUDDIN

1607220081

DAFTAR ISI

| | |
|---|-------------------------------------|
| TUGAS AKHIR | i |
| HALAMAN PENGESAHAN | Error! Bookmark not defined. |
| SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.... | Error! Bookmark not defined. |
| ABSTRAK | iv |
| ABSTRACK..... | v |
| KATA PENGANTAR..... | vi |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR GAMBAR | x |
| DAFTAR TABEL..... | xi |
| BAB 1..... | 1 |
| PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Ruang Lingkup Masalah | 3 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 3 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA..... | 6 |
| 2.1 Tinjauan Pustaka Relevan..... | 6 |
| 2.2 Landasan Teori..... | 11 |
| 2.2.1 Surja Petir | 11 |
| 2.2.2 Proses Terjadinya Petir | 12 |
| 2.2.3 Parameter Petir..... | 13 |
| 2.2.4 Photovoltaic | 14 |
| 2.2.5 Sistem Grid | 14 |
| 2.2.6 Sistem Pentanahan | 16 |
| 2.2.7 Besarnya Kebutuhan Bangunan Akan Sistem Proteksi Petir | 23 |
| 2.2.8 Beban Tegangan Langkah Dan Tegangan Sentuh..... | 27 |
| 2.2.9 Perhitungan Sambaran Langsung Pada Arrester..... | 28 |
| 2.2.10 Perhitungan Tegangan Induksi Sambaran Petir Tidak Langsung Pada Jarak Tertentu | 28 |
| 2.2.11 Lightning Arrester..... | 29 |
| 2.2.12 Elektroda Udara (Spike Rod)..... | 29 |
| 2.2.13 Elektroda Tanah (Ground Rod) | 30 |
| 2.2.14. Earth Tester | 30 |
| 2.2.15 ETAP (Electrical Transient Analysis Program)..... | 31 |
| BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN | 32 |
| 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian | 32 |
| 3.2 Alat dan Bahan Penelitian | 32 |
| 3.2.1 Alat Penelitian..... | 32 |
| 3.2.2 Bahan Penelitian | 33 |
| 3.3 Tahapan Perencanaan..... | 33 |
| 3.3.1 Langkah - Langkah Penelitian | 34 |

| | | |
|-----------------------|---|-----------|
| 3.3.2 | Persiapan Penelitian | 35 |
| 3.3.3 | Variabel Penelitian | 35 |
| 3.4 | Prosedur Penelitian | 36 |
| 3.5 | Perancangan Lightning Arrester | 38 |
| 3.5.1 | Desain Lightning Arrester | 38 |
| 3.5.2 | Pengujian Sistem Lightning Arrester | 39 |
| 3.6 | Flowchart Perancangan Lightning Arrester | 40 |
| BAB 4 | HASIL DAN PEMBAHASAN | 41 |
| 4.1 | Hasil Pengumpulan Data | 41 |
| 4.1.1 | Data Hari Guruh Per Tahun | 41 |
| 4.1.2 | Data Lightning Protection Level (LPL) | 42 |
| 4.1.3 | Data Tahanan Jenis Tanah | 42 |
| 4.1.4 | Data Spesifikasi Bangunan PLTS | 43 |
| 4.1.5 | Proses Pemasangan Rod Arrester | 44 |
| 4.1.6 | Proses Pemasangan Kabel BC | 44 |
| 4.1.7 | Proses Pemasangan Elektroda Tanah | 45 |
| 4.1.8 | Proses Pengukuran Pentanahan | 45 |
| 4.2 | Pengukuran Tahanan Pentanahan | 46 |
| 4.2.1 | Nilai Tahanan Tanah | 46 |
| 4.3 | Perhitungan Arus Maksimum dan <i>Ground Potential Rise</i> (GPR) | 47 |
| 4.4 | Tingkat Frekuensi Sambaran Petir | 48 |
| 4.4.1 | Menghitung Kerapatan Sambaran Petir Ke Tanah Rata- Rata Tahunan (N_g) | 48 |
| 4.4.2 | Menghitung Area Cakupan Ekuivalen Pada Sisi Bangunan (A_e) | 48 |
| 4.4.3 | Menghitung Frekuensi Sambaran Petir Langsung (N_d) | 49 |
| 4.4.4 | Nilai Efisiensi (E) | 49 |
| 4.5 | Tegangan langkah dan Tegangan Sentuh | 49 |
| 4.5.1 | Beban Tegangan langkah Tanpa Sistem Lightning Arrester | 52 |
| 4.5.2 | Dengan Pemasangan Sistem Lightning Arrester | 54 |
| 4.5.3 | Hasil Perhitungan | 56 |
| 4.6 | Tegangan Induksi Sambaran Petir | 57 |
| 4.6.1 | Perhitungan Sambaran Petir Langsung Pada Penangkal Petir | 57 |
| 4.6.2 | Perhitungan Tegangan Induksi Sambaran Petir Tidak Langsung Pada Jarak Tertentu | 58 |
| 4.6.3 | Hasil Perhitungan Tegangan Induksi | 60 |
| 4.7 | Spesifikasi Lightning Arrester | 61 |
| 4.8 | Simulasi Sistem Lightning Arrester | 61 |
| BAB 5 | KESIMPULAN DAN SARAN | 65 |
| 5.1 | Kesimpulan | 65 |
| 5.2 | Saran | 65 |
| DAFTAR PUSTAKA |Error! Bookmark not defined. | |
| LAMPIRAN | | 69 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1. Gambar 2.1 Pentanahan <i>Grid-rod</i> | 16 |
| Gambar 2.2. Berbagai Teknis Pembuatan Grounding | 19 |
| Gambar 2.3. Elektroda Spike Rod | 30 |
| Gambar 2.4. Elektroda Grounding Rod | 31 |
| Gambar 2.5. Earth Tester Digital..... | 32 |
| Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian..... | 38 |
| Gambar 3.2. Flowchart Sistem Lightning Arrester | 41 |
| Gambar 4.1. Lightning Arrester Pada PLTS | 42 |
| Gambar 4.2. Perancangan Letak Lightning Arrester | 44 |
| Gambar 4.3. Pemasangan Spike Rod..... | 45 |
| Gambar 4.4. Pemasangan Kabel BC | 45 |
| Gambar 4.5. Pemasangan Kabel BC | 45 |
| Gambar 4.6. Proses Pemasangan Elektroda Batang..... | 46 |
| Gambar 4.7. Proses Pengukuran Resistansi Tanah..... | 46 |
| Gambar 4.8. Hasil Pengukuran Resistansi Tanah..... | 46 |
| Gambar 4.9. Tampilan Software Proses Simulasi Grounding..... | 63 |
| Gambar 4.10. Tampilan Running Proses Simulasi..... | 63 |
| Gambar 4.11. Profil Tegangan Sentuh | 64 |
| Gambar 4.12. Profil Tegangan Langkah | 65 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1. Efek Temperatur Terhadap Resistivitas Tanah | 20 |
| Tabel 2.2. Indeks A Bahaya Berdasarkan Penggunaan Dan Isi | 24 |
| Tabel 2.3. Indeks B Bahaya Berdasarkan Konstruksi | 25 |
| Tabel 2.4. Indeks C Bahaya Berdasarkan Tinggi Bangunan..... | 25 |
| Tabel 2.5 Indeks DBahaya Berdasarkan Situasi Bangunan | 25 |
| Tabel 2.6. Indeks E Bahaya Berdasarkan Pengaruh Kilat/Hari Guruh | 26 |
| Tabel 2.7 Indeks R Perkiraan Bahaya Sambaran Petir Berdasarkan PUIPP | 26 |
| Tabel 2.8 Efisiensi System Proteksi Petir | 28 |
| Tabel 4.1: Hari Guruh rata-rata per tahun dan IKL di beberapa kota | 43 |
| Tabel 4.2 Lightning Current For Each LPL Based..... | 43 |
| Tabel 4.3. Tahanan Jenis Tanah | 43 |
| Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Resistansi Tanah | 48 |
| Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Nilai Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah | 53 |
| Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Besar Tegangan Langkah Akibat Gangguan Petir . | 58 |
| Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Tegangan Induksi | 62 |
| Tabel 4.8 Spesifikasi Lightning Arrester | 62 |
| Tabel 4.9 Hasil Simulasi ETAP 16.0 dengan Metode FEM | 64 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan Negara beriklim tropis, dilintasi oleh garis khatulistiwa yang memiliki curah hujan yang tinggi. Rata-rata curah hujan Indonesia setiap tahunnya lebih dari 2,000-3,000 mm per tahun.

Berdasarkan data Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG) terjadinya hari guruh yang sangat tinggi di Indonesia yaitu 100-200 hari guruh pertahunnya jika dibandingkan negara lainnya seperti Eropa sebanyak 30 hari guruh dan Jepang 80 hari guruh, serta besar kerapatan sambaran petir ketanah (Ng) di Indonesia mencapai 5 sampai dengan 15 sambaran petir per km² pertahun lebih tinggi jika dibandingkan dengan Eropa dan Jepang yang hanya berkisar antara 1 sampai dengan 3 sambaran petir per km² pertahun.

Menurut kepala Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Stasiun Meteorologi El Tari, Agung Sudiono Abadi mengatakan, "Petir cenderung memilih tempat terbuka, objek yang tinggi, dan tonjolan di permukaan bumi. Objek tinggi bisa berupa tiang ataupun pohon. Tonjolan bisa berupa bukit atau gunung maupun manusia, hewan, dan bangunan yang berada di tempat terbuka,"(Kepala BMKG, 2019). Bangunan yang terletak di lahan terbuka atau persawahan lebih rentan terkena sambaran petir karena tidak ada objek lain yang lebih tinggi.

Mengingat lokasi bangunan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) di tengah tanah terbuka (Lahan persawahan), bahaya yang timbul akibat adanya sambaran petir cenderung lebih sering terjadi dan hal ini berdampak pada rusaknya peralatan-peralatan listrik seperti motor, kulkas, televisi, dan lain-lain. Hal ini

dikarenakan tidak adanya system proteksi yang mengamankan peralatan ketika terjadi sambaran petir. Untuk mencegah kerusakan akibat terjadinya sambaran petir pada panel surya, dibutuhkan sebuah alat yang berfungsi untuk menangkal terjadinya sebuah sambaran petir ke arah bangunan tersebut.

Perlindungan terhadap sambaran petir pada bangunan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) perlu dilakukan dengan memasang sistem proteksi pada bangunan PLTS. proteksi bangunan ini terdiri dari sistem proteksi internal dan eksternal. Sistem proteksi internal adalah suatu sistem yang memproteksi suatu bangunan untuk menghindari terjadinya beda potensial pada semua titik di instalasi atau peralatan yang terdapat di dalam bangunan. Sedangkan sistem proteksi eksternal adalah sistem proteksi yang terletak di luar konstruksi gedung yang berfungsi sebagai titik sambar petir yang menerima arus petir secara langsung dan mengalirkannya ke sistem grounding melalui kawat penghantar [1].

Oleh karena itu, dari uraian diatas maka penelitian tentang sistem proteksi petir eksternal (*Lightning Arrester*) akan disusun dalam sebuah skripsi dengan judul “**PERANCANGAN *LIGHTNING ARRESTER* SEBAGAI SISTEM PENGAMAN PADA PLTS PEMATANG JOHAR**”. Diharapkan penelitian ini mampu memberikan dampak yang positif bagi PLTS itu sendiri maupun makhluk hidup disekitarnya serta menjadi sebuah literatur baru bagi ilmu pendidikan dimasa yang akan datang. Pemasangan sistem akan dilakukan berdasarkan pada standar-standar yang di tetapkan di Indonesia yaitu standar PUIL 2011, NFPA 780, standar IEC 1024-1-1 dan standar SNI 03-7015-201. Perhitungan ini digunakan untuk mengetahui kebutuhan pemasangan sistem proteksi petir pada bangunan PLTS.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka permasalahan yang akan dibahas adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana cara merancang sistem pengaman lightning arrester yang sesuai standart PUIL pada PLTS pematang johar?
2. Sebarapa efektif kinerja dari sistem proteksi lightning arrester yg dirancang untuk melakukan pengamanan peralatan listrik pada PLTS pematang johar?

1.3 Ruang Lingkup Masalah

Adapun ruang lingkup permasalahan dari tugas akhir ini antara lain:

1. Mengetahui sistem proteksi eksternal yang tepat untuk digunakan pada PLTS Pematang Johar.
2. Mengetahui kemampuan maksimum dari sistem lightning arrester yang digunakan pada bangunan PLTS untuk mengalirkan surja petir ketanah.
3. Mengetahui tahanan tanah pada lokasi bangunan PLTS pematang johar serta membandingkan nya melalui metode simulasi pada software Etap 16.0.0.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan Rumusan masalah diatas, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mendapatkan suatu hasil rancangan sistem proteksi lightning arrester yang mampu membuang surja petir langsung ketanah sesuai dengan standart PUIL pada bangunan PLTS.
2. Untuk mengetahui seberapa efektif kinerja dari sistem proteksi lightning arrester yang dirancang mengamankan peralatan listrik pada PLTS.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat yang dapat diambil dalam penelitian ini adalah :

1. Untuk memperkenalkan kepada mahasiswa teknik elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara tentang perancangan lightning arrester, dalam hal ini terkhusus pada PLTS.
2. Untuk menambah wawasan dan pengalaman langsung tentang sistem lightning arrester.
3. Sebagai acuan dan referensi pada penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan sistem perancangan lightning arrester pada PLTS.

1.6 Metodologi Penelitian

Metodologi yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri dari :

1. Studi Literatur

Hal ini dilakukan untuk mempelajari teori dan menjadi referensi penunjang dalam pelaksanaan yang berkaitan dengan penelitian.

2. Perancangan Sistem

Melakukan perancangan system lightning arrester yang memenuhi standart PUIL untuk memaksimalkan kinerja dari alat tersebut.

3. Pengujian dan Analisis

Pengujian merupakan metode untuk memperoleh data dari sistem sehingga dapat diketahui dan diperoleh nilai-nilai yang dijalankan dari sistem.

1.7 Sistematika Penulisan

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

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan penyusunan tugas akhir, berupa Latar belakang, Rumusan masalah, dan Batasan masalah, Manfaat penulisan, Metodologi penelitian serta Sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan konsep teori yang menunjang pada penelitian, memuat tentang dasar teori tentang perancangan system lightning arrester pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Bab ini akan menerangkan mengenai lokasi dilaksanakannya penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, prosedur penelitian, perancangan sistem lalu menerangkan mengenai diagram alir / flowchart dan hal-hal lain yang berhubungan dengan proses system yang akan dibuat.

BAB 4 ANALISA DAN HASIL PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai besar tahanan tanah, kinerja lightning arrester serta ketahanan system ketika terjadi sambaran petir.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini memuat kesimpulan dari penelitian yang dilakukan dan saran- saran yang dapat digunakan sebagai tindak lanjut dari penelitian yang telah dilakukan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Para peneliti dari Smithsonian Tropical Institute (STRI) bepusat dipanama telah menerbitkan peta dramatis yang menunjukkan lokasi sambaran petir melintasi wilayah tropis pada jurnal *Global Change Biology*, berdasarkan data tanah dan satelit mereka memperkirakan lebih dari 100 juta serangan petir terjadi di daratan wilayah iklim tropis setiap tahunnya. Sedangkan menurut data dari Badan Meteorologi Kimia dan Geofisika (BMKG) mencatat berdasarkan rekaman peralatan lightning detector di stasiun geofisika telah terjadi sambaran petir untuk wilayah Sumatera Utara sebanyak 41.817 kali selama periode bulan Juli sedangkan pada periode Desember 2020 di kota medan sekitarnya telah terjadi sambaran petir sebanyak 9.969 kali.

Petir merupakan fenomena alam yang mempunyai dampak yang sangat membahayakan objek yang terkena sambaran dan objek yang berada disekitar sambaran. Sambaran petir dapat terjadi antara awan dengan bumi, awan dengan awan, atau sambaran yang terjadi di dalam awan. Sambaran awan dengan bumi mempunyai dampak yang paling tinggi dibanding dengan jenis sambaran yang lain. Gedung bertingkat (menjulung tinggi) serta bangunan yang berada di kawasan terbuka mempunyai resiko sambaran lebih tinggi dibandingkan gedung tidak bertingkat dan daerah padat penduduk. Adapun sambaran petir dapat menyebabkan tegangan impuls yang memiliki variasi waktu yang bermacam-macam untuk mencapai puncak gelombang dan memiliki berbagai macam waktu penurunan tegangannya [2].

Standar tegangan impuls petir yang digunakan adalah Standar Jepang, Amerika, Inggris, dan IEC. Pencegahan sambaran petir pada gedung bertingkat dan bangunan di kawasan terbuka dapat dilakukan dengan merancang penangkal petir yang baik dan benar. Adapun penelitian tugas akhir yang menyatakan aplikasi penangkal petir tipe emisi mula (Early streamer emission) pada gedung wisma MM UGM meliputi beberapa perhitungan antara lain: perhitungan tahanan tanah lokasi, tahanan pentanahan, sudut proteksi, jumlah terminal udara yang dibutuhkan. Berdasarkan pengukuran langsung, tahanan tanah di lokasi wisma MM UGM bernilai tahanan jenis tanah ρ : 32,65 Ω /meter ohm, sedangkan nilai tahanan pentanahan dengan sebaran tanah (R_d) sebesar 2 Ω /meter. Untuk Gedung Wisma Mahasiswa Program Studi Magister Manajemen UGM dengan ketinggian penangkal petir dari atap 10 meter dapat diketahui jarak yang mampu dilindungi yaitu 100 meter dengan besar ΔL yaitu 51,8 (meter). Adapun sistem proteksi berfungsi untuk melindungi sistem tenaga listrik, operator serta peralatan itu sendiri dari berbagai gangguan yang mungkin terjadi [3]

Arrester merupakan salah satu sistem proteksi utama yang digunakan untuk melindungi peralatan listrik terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir. Oleh sebab itu Labado menyatakan bahwa peralatan dapat dilindungi dengan menempatkan arrester sedekat mungkin pada peralatan yang akan dilindungi dan tidak perlu menggunakan alat pelindung lain pada tiap bagian peralatan yang akan dilindungi. Walaupun berpengaruh dengan gelombang berjalan akan timbul tegangan lebih tinggi ditempat yang agak jauh dari arrester, dan peralatan masih dapat dilindungi dengan baik bila jarak arrester dan peralatan masih dalam batas yang diinginkan [4].

Sistem pembumian/lightning arrester adalah suatu perangkat instalasi yang berfungsi untuk mengamankan arus lebih dan tegangan lebih listrik yang diakibatkan oleh petir maupun gangguan internal listrik dengan melepas muatan ke tanah. Salah satu faktor yang berpengaruh terhadap nilai resistansi pembumian adalah nilai resistansi jenis tanah [5].

Menurut penelitian dalam tugas akhir menyatakan bahwa untuk mengetahui karakteristik kerja Lightning Arrester ZnO setelah adanya penambahan kapasitor parallel. Metode yang digunakan pada penelitian ini dimulai dari tahap studi literatur, simulasi menggunakan program ATP Draw untuk mengetahui tingkat keefektifitasan rangkaian yang akan diuji, hingga pengujian secara riil di laboratorium tegangan tinggi. Hasil pengujian yang dilakukan adalah dapat dibuktikan bahwa penambahan kapasitor yang dirangkai parallel dengan arrester dapat memotong tegangan impuls sebesar 92-97 persen. Apabila nilai kapasitans kapasitor yang diberikan semakin besar maka pemotongan tegangan yang akan didapatkan juga semakin besar, namun tetapi riak tegangan yang diperoleh juga semakin banyak. Namun pemakaian kapasitor dalam jangka panjang juga tidak terlalu handal [6].

Sedangkan penelitian Darmayusa dalam jurnal SPEKTRUM yang melakukan pengujian di lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Minihydro di Tukad Balian Kabupaten Tabanan membutuhkan nilai resistansi tanah $\leq 2 \text{ Ohm}$. Berdasarkan hasil analisa perhitungan sistem pembumian dengan beberapa tipe yang digunakan didapatkan hasil sebagai berikut : dengan menggunakan tipe satu batang elektroda (satu rod) untuk mendapat hasil resistansi pentanahan $\leq 2\Omega$, batang elektroda ditanam sedalam 13 meter. Dengan menggunakan tipe dua

batang elektroda (dua rod) $S > L$ untuk mendapatkan hasil pentanahan $\leq 2\Omega$, batang elektroda ditanam dengan panjang 7 meter dan jarak antara elektroda 9 meter. Dengan menggunakan tipe dua batang elektroda (dua rod) $S < L$ untuk mendapatkan hasil pentanahan $\leq 2\Omega$, batang elektroda ditanam dengan panjang 8 meter dan jarak antara elektroda 2 meter. Dengan menggunakan tipe plat untuk mendapatkan hasil pentanahan $\leq 2\Omega$, diperlukan sebanyak 3 buah plat dengan kedalaman 1 meter. Dengan menggunakan tipe grid untuk diperoleh hasil pentanahan $\leq 2\Omega$, panjang elektroda yang diperlukan 45 meter [7].

Adapun penelitian Bhaskara dalam jurnal SPEKTRUM menyatakan bahwa pada proses penyaluran daya listrik dapat terjadi berbagai macam gangguan sehingga diperlukan adanya sistem proteksi untuk menjaga kontinuitas dan stabilitas penyaluran daya listrik. Selama tahun 2016 terjadi tiga kali kegagalan arrester konvensional (Metal Oxide Arrester), adapun setelah dipasang Multi Chamber Arrester, kegagalan arrester mengalami penurunan menjadi satu kali kegagalan selama tahun 2017 [8].

Demikian penelitian yang lain oleh Paraisu pada eJurnal Teknik Elektro dan Komputer menyatakan dalam menentukan atau memilih arrester yang handal untuk digunakan, perlu diperhatikan nilai pengenalan/rating dari arrester tersebut apakah tepat untuk digunakan pada jaringan transmisi. Dari penelitian ini, hasil analisa dan perhitungan nilai pengenalan/rating dari arrester yang akan digunakan pada jaringan transmisi ini adalah sebagai berikut: tegangan pengenalan arrester (UC) = 57,94 kV, tegangan kerja arrester (UA) = 208,79 kV, arus kerja arrester (IA) = 2,99 kA, dan faktor perlindungan (FP) = 29% [9].

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Septian mengenai Efisiensi Sistem

Proteksi Petir (SPP) pada PLTS Terpusat sebesar 0,95 berada pada tingkat proteksi II dengan nilai efisiensi diantara 90% - 95%. Oleh karena itu tingkat proteksi yang sesuai adalah tingkat II. Tegangan langkah yang disebabkan oleh sambaran petir dengan resistansi tanah yaitu sebesar 12.369.957,54 Volt jauh lebih besar dengan tegangan langkah pada resistansi sistem pentanahan yaitu sebesar 272.139,07 Volt masing-masing 0.1 meter dari titik referensi. Hasil perhitungan tegangan induksi yang dihasilkan akibat sambaran petir yaitu sebesar 52,715 kV jauh melebihi batas tegangan aman pada manusia 50 Volt. Perubahan nilai tegangan induksi karena petir terhadap jarak mengikuti fungsi hiperbolik, dimana jarak 5 m dari titik referensi menghasilkan tegangan induksi 80,156 kV jauh lebih kecil dengan jarak 160 m dari titik referensi dengan tegangan induksi 2,505 kV [10].

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) merupakan suatu pembangkit energi terbarukan yang dapat mengurangi dampak lingkungan dan sosial yang ditimbulkan oleh pembangkit listrik tenaga fosil. PLTS membutuhkan sistem proteksi lightning arrester/sistem grounding yang merupakan suatu proteksi terhadap keselamatan personel dan perangkat yang menggunakan listrik sebagai sumber tenaga dari lonjakan listrik. Pada penelitian yang dilakukan oleh Alwini dalam jurnal JETri dipaparkan hasil analisis terhadap rancangan sistem pentanahan pada PLTB 2,5 MW di Sidrap Sulawesi Selatan. Analisis dilakukan dengan bantuan software ETAP 16.0 untuk menentukan nilai tegangan sentuh aktual, tegangan langkah, dan tahanan pentanahan. Dari hasil simulasi ETAP diperoleh nilai tegangan sentuh aktual sebesar 2162,8 V dan tegangan langkah sebesar 726,2 V, dan tahanan pentanahan sebesar 0,8 Ω . Hasil ini menunjukkan

bahwa sistem pentanahan PLTB dapat melindungi personel dan peralatan di sekitarnya [11].

Sistem pentanahan yang berkualitas, handal dan efisien adalah merupakan persyaratan utama dalam merancang suatu sistem pentanahan untuk dapat mengamankan peralatan dan para pekerja di area pembangkit. Pada penelitian dalam jurnal SPEKTRUM Hasil perhitungan dan analisis dari beberapa sistem pbumian yang digunakan yaitu sistem pbumian Grid-Rod pada tanah basah dan tanah lempung merupakan jenis sistem pbumian yang paling optimal yang dapat digunakan sebagai acuan perbaikan sistem pbumian dengan nilai tahanan pbumian pada tanah basah sebesar 0,4543 Ohm dengan biaya Rp. 5.416.625,- per unit dan pada tanah lempung sebesar 0,4461 Ohm dengan biaya Rp. 8.728.125,- per unit. Pada proteksi internal dengan menggunakan arrester sebagai alat proteksi, penempatan arrester dipasang di dua titik yaitu pada kontak kombiner yang menghubungkan antara panel surya dan solar charge control. Tujuannya untuk melindungi komponen panel distribusi penempatan arrester antara panel distribusi dan battery yang bertujuan untuk melindungi battery dan sambungan ke rumah-rumah penduduk. Dengan demikian penempatan arrester di dua titik tersebut dapat meningkatkan kapasitas kemampuan proteksi petir dengan menggunakan arrester tipe C diharapkan akan dapat melakukan proteksi petir pada PLTS terpusat bekerja dengan maksimal [12].

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Surja Petir

Petir merupakan salah satu fenomena alam yang terjadi karena adanya pelepasan muatan listrik positif maupun negatif yang terdapat di dalam awan-

awan konvektif (Zhou et al., 2001) khususnya awan CB. Pelepasan tersebut terjadi akibat adanya perbedaan muatan yang sangat besar antara awan dengan lingkungan sekitarnya (awan lainnya, udara dan bumi) [13]. Awan yang memiliki muatan akan menimbulkan muatan induksi di muka bumi sehingga menimbulkan medan listrik. Jika Medan listrik melebihi medan tembus udara maka akan menyebabkan terjadinya pelepasan muatan yang disebut dengan sambaran petir.

Sambaran petir memiliki empat jenis yaitu Pelepasan muatan listrik dalam awan / petir awan ke awan (Intra Cloud-IC), Antara awan dengan awan (Inter Cloud-CC), Dari awan ke bumi (Cloud to ground-CG) dan dari awan ke udara (Cloud to Air-CA) (Price, 2008). Petir CG merupakan yang paling berbahaya dan merusak. Petir CG terbagi menjadi dua yaitu Petir CG negatif (CG-) yang terjadi akibat induksi medan listrik positif di permukaan bumi dengan bagian pusat awan yang bermuatan negatif, dan petir CG positif (CG+) terjadi akibat induksi medan listrik negatif di permukaan dengan bagian atas awan yang terkonsentrasi listrik positif. Parameter CG- berhubungan dengan curah hujan konvektif sementara CG+ lebih banyak terdeteksi pada awan CB [14]

2.2.2 Proses Terjadinya Petir

Teori yang secara luas dapat diterima tentang petir yaitu bahwa awan terdiri dari daerah bermuatan positif dan negatif. Pusat-pusat muatan ini menginduksikan muatan berpolaritas berlawanan ke awan terdekat atau ke bumi. Gradien potensial di udara antara pusat-pusat muatan di awan atau antara awan dan bumi tidak seragam tapi gradient tersebut timbul pada bagian konsentrasi muatan tinggi. Ketika gradient tegangan tinggi pada titik konsentrasi muatan dari

awan melebihi harga tembus udara yang terionisasi, maka udara di daerah konsentrasi tekanan tinggi mengionisasi atau tembus (breakdown) .[13]

Muatan dari pusat muatan mengalir ke dalam kanal terionisasi, mempertahankan gradient tegangan tinggi pada ujung kanal dan melanjutkan proses tembus listrik. Sambaran petir ke bumi mulai ketika suatu muatan sepanjang pinggir awan menginduksikan suatu muatan lawan ke bumi Kemudian akan timbul lidah petir arah bawah menyebar dari awan ke bumi Begitu lidah petir mendekati bumi, sambaran kearah atas terbentuk, biasanya dari titik tertinggi disekitarnya. Bila lidah petir kearah atas dan kearah bawah bertemu Muatan-muatan dapat terinduksi ke jaringan listrik yang ada disekitar sambaran petir ke tanah walaupun muatan awan dan bumi dinetralisir [15].

2.2.3 Parameter Petir

Parameter petir menyatakan karakteristik atau penggambaran petir itu sendiri. Parameter-parameter tersebut antara lain : bentuk gelombang arus petir, kerapatan sambaran, arus puncak, kecuraman gelombang atau steepness.

1. Bentuk gelombang arus petir

Bentuk gelombang arus petir ini menggambarkan besar arus, kecuraman (kenaikan arus), serta lamanya kejadian (durasi gelombang), dinyatakan oleh waktu ekor

2. Kerapatan sambaran petir (Ng).

Parameter ini menyatakan banyaknya aktifitas petir atau sambaran petir ke bumi dalam rentang satu tahun di suatu wilayah, dinyatakan dalam sambaran per km^2 per tahun. Jumlah sambaran kilat ini sebanding dengan jumlah hari guruh per tahun atau biasa disebut Iso Kerounic Level (IKL).

3 Arus puncak (I_{max})

Parameter arus petir puncak ini menentukan jatuh tegangan resistif pada tahanan pembumian dan tahanan peralatan yang terkena sambaran. Biasanya, nilai arus puncak ini yang digunakan dalam menyatakan suatu gelombang impuls petir, bersama-sama dengan dua besaran gelombang sebelumnya yaitu waktu muka (t_f) dan waktu ekor (t_t).

4 Kecuraman gelombang (*Steepness*)

Parameter ini menyatakan kecepatan kenaikan arus petir dalam setiap satuan waktu (di/dt). Semakin besar nilai arus dalam setiap satuan waktu, berarti semakin curam bentuk gelombang arusnya dan semakin pendek durasi muka gelombang (*front duration*).

5 Hari Guruh

Hari Guruh adalah banyaknya hari dimana terdengar guntur paling sedikit satu kali dalam jarak kira-kira 15 Km dari stasiun pengamatan. Hari guruh yang tinggi memungkinkan banyak terjadi bahaya dan kecelakaan akibat sambaran petir [16].

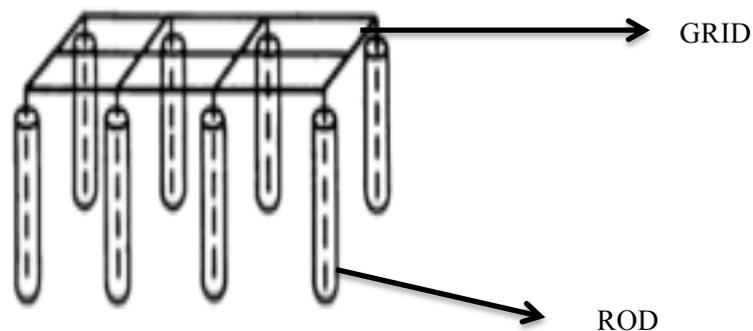
2.2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pada pelaksanaan pembangunan pembangkit listrik tenaga surya, tentu tidak terlepas dari sistem pengontrolan otomatis yang akan digunakan untuk mendeteksi sistem pengaturan beban, pengisian daya baterai, daya keluaran pembangkit, tegangan keluaran dan arus keluaran. Berbagai jenis sensor pun dipasang dalam sistem ini, seperti: sensor arus, tegangan, suhu, kelembaban dan radiasi matahari. Seluruh data yang terekam pada sensor akan dikirim melalui notifikasi kepada teknisi setiap 1 jam secara real time sehingga dapat diketahui

fluktuasi beban setiap saat. Selain hal itu juga akan diketahui besarnya daya baterai yang tersedia pada saat itu. Sistem pengontrolan di desain dengan menggunakan smart relay, guna mempermudah system pemantauan. Sistem ini bekerja apabila cahaya matahari cerah maka energi dapat langsung dipergunakan, jika berlebih akan digunakan untuk mengisi daya baterai sebagai bentuk saving energy. Namun apabila kondisi cuaca mendung dan daya baterai sudah berada dibawah 20% maka sistem akan terinterkoneksi dengan grid guna melakukan pengisian. Hal ini dilakukan untuk memperpanjang life time baterai, sehingga dapat mengurangi cost dalam perawatan sistem [17].

2.2.5 Sistem Grid

Sistem pentanahan pada pembangkit bayu ini menggunakan gabungan sistem pentanahan *grid* dengan batang pentanahan *rod* seperti diperlihatkan pada Gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Pentanahan Grid-rod

Pada sistem pentanahan *grid*, batang-batang elektroda ditanam sejajar dengan permukaan tanah, hal ini merupakan usaha untuk meratakan tegangan yang timbul. Sedangkan pada sistem *rod*, batang-batang elektroda ditanam tegak lurus kedalam tanah, yang fungsinya untuk mengurangi/memperkecil tahanan pentanahan.

Perancangan pada penelitian ini menggunakan *finite element method* (FEM) pada ETAP 16.0. Nilai tahanan yang didapatkan melalui Metode FEM sangat dekat dengan nilai sebenarnya dibandingkan dengan hasil perhitungan metode konvensional. Nilai tahanan pentanahan yang mendekati nilai sebenarnya dapat menghasilkan rancangan yang mampu menahan arus gangguan yang berlebihan dengan efisien [18].

2.2.6 Sistem Pentanahan

Grounding system atau sistem terminasi bumi yaitu bagian dari sistem proteksi petir eksternal yang berfungsi untuk mengalirkan arus dari petir ke tanah. Kelayakan grounding atau pembumian harus bisa mendapatkan nilai tahanan sebaran maksimal 5 Ohm (bila dibawah 5 Ohm lebih baik) dengan menggunakan Ohm meter khusus (*Earth Tester Meter*) [19]. Untuk mendapatkan nilai tahanan sebaran grounding dibawah 5 Ohm tidak semua areal bisa dengan mudah memenuhi nilai grounding yang diinginkan, tergantung oleh berbagai macam faktor yang mempengaruhinya, misalnya :

1. Kadar Air

Bila air tanah dangkal / penghujan maka nilai tahanan sebaran mudah didapatkan sebab sela-sela tanah mengandung air bahkan berlebih, sehingga konduktifitas tanah semakin baik

2. Mineral

Kandungan mineral tanah sangat mempengaruhi tahanan karena semakin berlogam dan bermineral tinggi maka tanah semakin mudah menghantarkan listrik.

3. **Tekstur tanah**

Untuk daerah yang bertekstur pasir akan sulit mendapatkan tahanan sebaran yang baik karena untuk jenis tanah ini air dan mineral akan mudah hanyut dan tanah mudah kering. Melihat karakteristik tanah sebagaimana di atas maka sistem terminasi bumi perlu dirancang sedemikian rupa sehingga memperkecil tegangan sentuh dan tegangan langkah sehingga aman bagi manusia dan peralatan yang terdapat di sekitar daerah yang di proteksi. Ada berbagai teknis pembuatan grounding yang bisa dipakai :

a) Single Rod Grounding

Grounding yang hanya terdiri dari satu buah titik penancapan stik rod arus pelepas di dalam tanah dengan kedalaman tertentu. Untuk daerah yang memiliki karakteristik tanah yang konduktif tentu mudah untuk didapatkan tahanan sebaran tanah dibawah 5 Ohm hanya dengan satu buah rod.

b) Pararel Rod Graounding

Grounding system pararel menjadi tindakan alternatif bila single masih mendapatkan hasil yang kurang baik, maka perlu ditambahkan stik arus pelepas dengan minimal jarak antar stik 2 meter dari ground sebelumnya dan di sambung ke ground baru disebelahnya, hal ini dilakukan berulang sampai menghasilkan nilai tahanan tanah yang diinginkan.

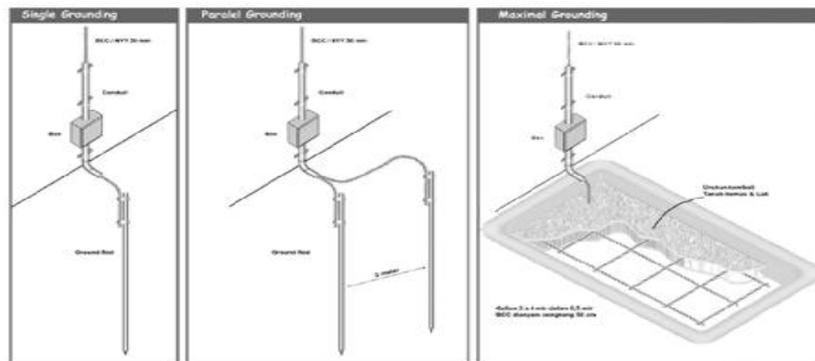
c) Multi Grounding System

Bila didapati kondisi tanah yang memiliki ciri :

- a) Kering/air tanah dalam

- b) Kandungan logam sedikit
- c) Basa (berkapur)
- d) Pasir dan Porous

Maka penggunaan 2 cara sebelumnya akan susah dan bisa gagal untuk mendapatkan resistansi kecil, maka teknis yang digunakan dengan cara penggantian tanah yang mempunyai sifat air atau tanah yang kandungan mineral garam dapat menghantarkan listrik dengan baik, pada daerah titik logam rod ground yang ditancapkan dan di kisaran kabel penghubung antar ground nya. Tanah humus, tanah dari kotoran ternak, tanah liat sawah cukup bisa memenuhi standart hantar tanah yang baik. Berikut adalah contoh gambar berbagai teknis pembuatan grounding:



Gambar 2.2. Berbagai Teknis Pembuatan Grounding

2.2.6.1 Tahanan Jenis Tanah

Tahanan jenis tanah (Ωm) merupakan nilai resistansi dari bumi yang menggambarkan nilai konduktivitas listrik bumi dan didefinisikan sebagai tahanan, dalam ohm, antara permukaan yang berlawanan dari suatu kubus satu meter kubik [16][20].

Berikut adalah rumus pentanahan elektroda batang tunggal:

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

dimana:

R = Tahanan pentanahan untuk batang tunggal (Ω)

ρ = Tahanan jenis tanah (Ωm)

L = Panjang elektroda (m)

a = Jari-jari elektroda (m)

Faktor keseimbangan antara tahanan pembumian dan kapasitansi di sekelilingnya adalah tahanan jenis tanah yang direpresentasikan dengan ρ . Harga tahanan jenis tanah dalam kedalaman tertentu tergantung pada beberapa faktor yaitu :

1. Jenis tanah : liat, berpasir, berbatu dan lain-lain
2. Lapisan tanah : berlapis-lapis dengan tahanan jenis berlainan atau uniform
3. Kelembaban tanah
4. Temperatur

Adapun efek temperature pada nilai resistivitas tanah dapat kita lihat pada table 2.1.

Tabel 2.1 Efek Temperatur Terhadap Resistivitas Tanah

| NO | Temperature ($^{\circ}\text{C}$) | Resistivitas ($\Omega. \text{cm}$) |
|----|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | -5 | 70.000 |
| 2 | 0 | 30.000 |
| 3 | 0 | 10.000 |
| 4 | 10 | 8.000 |
| 5 | 20 | 7.000 |
| 6 | 30 | 6.000 |
| 7 | 40 | 5.000 |
| 8 | 50 | 4.000 |

Sumber : IEEE STD 142-1991

5. Kepadatan tanah

2.2.6.2 Penentuan Tahanan Grid

Sistem pentanahan yang baik akan menghasilkan tahanan tanah yang rendah untuk meminimalisir nilai *ground potential rise* (GPR). Nilai tahanan tanah untuk substasiun dan stasiun pembangkit biasanya bernilai 1 Ω atau kurang, sedangkan untuk substasiun jaringan distribusi rendah biasanya tahanan tanah bernilai 1 – 5 Ω tergantung pada keadaan sekitar [6][21]. Untuk menentukan nilai tahanan pentanahan digunakan Persamaan (2.2).

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana: R_g adalah tahanan pentanahan (Ω), ρ adalah tahanan jenis tanah (Ωm), L_T adalah panjang total konduktor yang di tanah (m), A adalah luas area pentanahan *grid* (m²), h adalah kedalaman penanaman konduktor *grid* (m).

2.2.6.3 Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah yang Diizinkan

Berdasarkan Standar IEEE 80-2000, nilai maksimum tegangan sentuh dan tegangan langkah dapat dihitung dengan Persamaan 2.3. Untuk berat badan 50 kg.

$$E_{langkah\ 50} = (1000 + 6C_S \cdot \rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t_S}} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$E_{sentuh\ 50} = (1000 + 1.5C_S \cdot \rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t_S}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Untuk berat badan 70 kg.

$$E_{langkah\ 70} = (1000 + 6C_S \cdot \rho_S) \frac{0.157}{\sqrt{t_S}} \dots\dots\dots(2.5)$$

$$E_{sentuh\ 70} = (1000 + 1.5C_S \cdot \rho_S) \frac{0.157}{\sqrt{t_S}} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :

$E_{langkah}$ adalah tegangan langkah (V)

E_{sentuh} adalah tegangan sentuh (V)

C_S adalah faktor *derating* permukaan tanah

t_S adalah durasi dari arus kejut dalam (s)

$$C_S = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_S}\right)}{2h_S + 0.09} \dots\dots\dots(2.7)$$

ρ_S adalah tahanan permukaan material (Ωm), Jika lapisan pelindung tidak digunakan, maka nilai $C_S = 1$ dan $\rho_S = \rho$.

2.2.6.4 Penentuan Arus Grid Maksimum

Arus *grid* maksimum merupakan arus terbesar yang mengalir pada *grid* pentanahan pada saat terjadi gangguan. Nilai arus *grid* maksimum dapat ditentukan dengan Persamaan 2.3.

$$I_G = D_F \times I_F \times S_F \dots\dots\dots(2.8)$$

2.2.6.5 Perhitungan Ground Potential Rise (GPR)

Ground Potential Rise (GPR) adalah suatu tegangan maksimum

yang dapat dicapai oleh suatu *grid* pentanahan yang dapat diperoleh dengan Persamaan (10) berikut.

$$GPR = R_G \times I_G \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

R_G adalah resistansi *grid* pentanahan (Ω),

I_G adalah arus *grid* maksimum (A).

2.2.6.6 Penentuan Ukuran Konduktor Minimum

Panas yang diakibatkan oleh arus gangguan dan durasi gangguan seharusnya tidak boleh menghancurkan konduktor pentanahan tersebut. Oleh sebab itu besarnya ukuran konduktor yang akan digunakan perlu ditentukan dengan Persamaan (2.3).

$$A = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana: A adalah luas penampang konduktor (mm^2), I adalah arus gangguan (kA), $TCAP$ adalah kapasitas termal per unit volume ($\text{J}/\text{cm}^3\text{°C}$), t_c adalah durasi gangguan (s), α_r adalah koefisien panas resistivitas material pada temperature T_r ($1/\text{°C}$), ρ_r adalah tahanan konduktor pentanahan pada temperatur T_r ($\mu\Omega\text{cm}$), K ; adalah koefisien yang nilainya $1/(Lr)$ atau $1/(\alpha_7) - T_r$ (°C), T_m adalah batas temperatur maksimum yang dapat ditahan material (°C), T_a adalah temperatur tanah disekitar lokasi (°C).

2.2.7 Besarnya Kebutuhan Bangunan Akan Sistem Proteksi Petir

Instalasi-instalasi bangunan yang berdasarkan letak, bentuk, penggunaannya dianggap mudah terkena sambaran dan perlu diberi penangkap petir adalah :

- a. Bangunan-bangunan tinggi, seperti menara- menara, gedung-gedung bertingkat, cerobong- cerobong pabrik.
- b. Bangunan-bangunan penyimpanan bahan mudah terbakar atau meledak misalnya seperti pabrik amunisi, gudang penyimpanan bahan peledak, gudang penyimpanan cairan atau gas yang mudah terbakar, dan lain-lain.
- c. Bangunan-bangunan untuk umum, misalnya gedung tempat ibadah, gedung pertunjukan, gedung sekolah, stasiun, dan lain-lain.
- d. Bangunan-bangunan yang berdasarkan fungsi khusus perlu dilindungi secara baik, misalnya museum, gedung arsip Negara, dan lain-lain. Berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP) besarnya kebutuhan kebutuhan tersebut dapat ditentukan secara empiris berdasarkan indeks- indeks yang menyatakan faktor-faktor tertentu. . sehingga didapat perkiraan bahaya akibat sambaran petir (R) adalah :

$$R = A + B + C + D + E \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana

A : Bahaya berdasarkan jenis bangunan

B : Bahaya berdasarkan konstruksi bangunan

C : Bahaya berdasarkan tinggi bangunan

D : Bahaya berdasarkan situasi bangunan

E : Bahaya berdasarkan hari guruh yang terjadi Jika nilai $R > 12$, maka

bangunan tersebut dianjurkan menggunakan sistem proteksi petir.

Tabel 2.2. Indeks A
Bahaya Berdasarkan Penggunaan Dan Isi

| Penggunaan dan isi | indeks A |
|--|----------|
| Bangunan biasa yang tidak perlu diamankan baik bangunan maupun isinya | -10 |
| Bangunan dan isi jarang dipergunakan seperti danau ditengah sawah, gudang, menara, atau tiang metal. | 0 |
| Bangunan yang berisi peralatan sehari-hari atau tempat tinggal orang (rumah tinggal, toko, pabrik kecil, tenda atau stasiun kereta api, dsb) | 1 |
| Bangunan atau isinya cukup penting (menara air, toko barang-barang berharga, kantor, pabrik, gedung pemerintahan, tiang atau menara non metal, dsb) | 2 |
| Bangunan yang berisi banyak sekali orang, seperti supermarket, bioskop, masjid, gereja, sekolah, apartemen, monumen bersejarah yang sangat penting, dsb) | 3 |
| Instalasi gas, minyak, SPBU, rumah sakit, dsb | 5 |
| Bangunan yang mudah meledak, gudang bahan kimia, gudang penyimpanan gas, gudang bahan peledak, dsb | 15 |

Sumber : PUIPP (1983)

Table 2.3 Indeks B
Bahaya Berdasarkan Konstruksi

| Konstruksi bangunan | Indeks B |
|--|----------|
| Seluruh bangunan terbuat dari logam (mudah menyalurkan arus listrik) | 0 |
| Bangunan dengan konstruksi beton bertulang, atau kerangka besi dengan atap logam | 1 |
| Bangunan dengan konstruksi beton bertulang kerangka besi dan atap bukan logam | 2 |
| Bangunan kayu dengan atap bukan logam | 3 |

Sumber : PUIPP (1983)

Tabel 2.4 Indeks C
Bahaya Berdasarkan Tinggi Bangunan

| Tinggi Bangunan | Indeks C |
|-----------------|----------|
| ≤ 6 | 0 |
| ≤ 12 | 2 |
| ≤ 17 | 3 |
| ≤ 25 | 4 |
| ≤ 35 | 5 |
| ≤ 50 | 6 |
| ≤ 70 | 7 |
| ≤ 100 | 8 |
| ≤ 140 | 9 |
| ≤ 200 | 10 |

Sumber : PUIPP (1983)

Table 2.5 Indeks D
Bahaya Berdasarkan Situasi Bangunan

| Situasi Bangunan | Indeks D |
|---|----------|
| Di tanah datar pada semua ketinggian | 0 |
| Di kaki bukit sampai tiga perempat tinggi bukit atau pegunungan sampai 1000 m | 1 |
| Di puncak gunung atau pegunungan lebih besar dari 1000 m | 2 |

Sumber : PUIPP (1983)

Table 2.6 Indeks E
Bahaya Berdasarkan Pengaruh Kilat/Hari Guruh

| Hari guruh pertahun | indeks E |
|---------------------|----------|
| 2 | 0 |
| 4 | 1 |
| 8 | 2 |
| 16 | 3 |
| 32 | 4 |
| 64 | 5 |
| 128 | 6 |
| 256 | 7 |

Sumber : PUIPP (1983)

Table 2.7 Indeks R
Perkiraan Bahaya Sambaran Petir Berdasarkan PUIPP

| R=A+B+C+D+E | Perkiraan Bahaya (Resiko) | Pengaman |
|-------------|---------------------------|-------------------|
| < 11 | Diabaikan | Tidak Perlu |
| =11 | Kecil | Tidak Perlu |
| 12 | Tidak Begitu Kecil | Agak Dianjurkan |
| 13 | Agak Besar | Dianjurkan |
| 14 | Besar | Sangat Dianjurkan |
| >14 | Sangat Besar | Sangat Perlu |

Sumber : PUIPP (1983)

Berdasarkan Badan Standar Nasional Indonesi (SNI 03-7015-2004), kerapatan kilat petir ke tanah atau kerapatan sambaran petir ke tanah rata-rata tahunan di daerah tempat suatu struktur berada dinyatakan sebagai:

$$Ng = 0,04 \times Td^{1,25} / km^2 / tahun \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana Td adalah jumlah hari guruh per tahun yang diperoleh dari data isokeraunic level di daerah tempat struktur yang akan di proteksi yang dikeluarkan oleh Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG).

Frekuensi rata-rata tahunan sambaran petir langsung (N_d) ke bangunan dapat dihitung:

$$N_d = N_g \times A_e \times 10^{-6} / \text{tahun} \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana A_e adalah area cakupan ekivalen dari bangunan (m^2) yaitu daerah permukaan tanah yang dianggap sebagai struktur yang mempunyai frekuensi sambaran langsung tahunan. Adapun area cakupan ekivalen (A_e) tersebut dapat di hitung berdasarkan persamaan di bawah ini :

$$A_e = ab + 6h(a+b) + 9\pi h^2 \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana :

a : panjang bangunan (m)

b: lebar bangunan (m)

h : tinggi bangunan (m)

Pengambilan keputusan perlu atau tidaknya memasang sistem proteksi petir pada bangunan berdasarkan perhitungan N_d dan N_c dilakukan sebagai berikut:

- a. Jika $N_d \leq N_c$ tidak perlu sistem proteksi
- b. Jika $N_d > N_c$ diperlukan sistem proteksi petir dengan efisiensi

Efisiensi:

$$E \geq 1 - N_c / N_d \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana hubungan antara nilai E (efisiensi) dengan tingkat proteksi dapat dilihat sebagai berikut :

$E < 0\%$ tidak diperlukan sistem proteksi petir

$0\% < E < 80\%$ berada pada tingkat proteksi IV

$80\% < E < 90\%$ berada pada tingkat proteksi III

$90\% < E < 95\%$ berada pada tingkat proteksi II

95% < E < 98% berada pada tingkat proteksi I

Maka setelah di hitung nilai E (Efisiensi Sistem Proteksi Petir) sesuai dengan persamaan (2.15), setelah itu dapat ditentukan tingkat proteksinya sesuai dengan tingkat proteksi tabel 7.

Table 2.8 Efisiensi System Proteksi Petir

| Tingkat Proteksi | Efisiensi SPP |
|------------------|---------------|
| I | 0,98 |
| II | 0,95 |
| III | 0,90 |
| IV | 0,80 |

2.2.8 Beban Tegangan Langkah Dan Tegangan Sentuh

Manusia merupakan bagian objek yang harus dilindungi, dalam hal ini selain gedung yang dilindungi manusia yang ada disekitar bangunan juga harus dilindungi baik dari sambaran langsung maupun tidak langsung.

Besar tegangan langkah dari titik terdekat dengan penghantar penangkal petir sampei dengan titik terjauh yang masih dalam batas cakupan ekivalen penangkal petir. Hal ini juga dipertimbangkan sesuai dengan jarak arus sambaran petir pada area bangunan tersebut. Rata – rata panjang langkah orang indonesia adalah 0.5 meter.

$$U = I \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{s}{d(d+s)} \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana :

U = Tegangan langkah (v)

I = Amplitudo Arus Petir (A)

ρ = resistansi tanah (Ωm)

s = jarak kedua kaki yang terjauh (m)

d = jarak kaki terdekat dengan titik aliran arus petir di bumi (0.1 m)

2.2.9 Perhitungan Sambaran Langsung Pada Arrester

Untuk bahan konduktor tembaga sebagai penyalur arus petir, maka induktansi bahan sebesar $1\mu\text{H}$ per meter. Sehingga tegangan induksi pada tahanan grounding penangkal petir adalah:

$$U = I \times R \times U_L \frac{di}{dt} \dots \dots \dots (2.17)$$

2.2.10 Perhitungan Tegangan Induksi Sambaran Petir Tidak Langsung Pada Jarak Tertentu

Tegangan induksi yang terjadi merupakan tegangan akibat adanya fenomena kopling. Diasumsikan bahwa menara berada pada sumbu y positif berupa suatu penghantar tegak lurus dengan bidang x . Arus petir diasumsikan menyambar pada menara di distribusikan pada grounding kawat tanah. Tegangan induksi yang terjadi adalah akibat medan magnetik dan medan listrik akibat arus petir yang mengalir pada menara dan menuju ke pentanahan [10][14].

Tegangan induksi pada jarak tertentu, misalnya tegangan induksi yang dihasilkan dengan jarak 5 m dari titik referensi atau titik dimana arus petir disalurkan. Maka tegangan induksinya adalah:

$$U_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{d} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta \frac{1}{\sqrt{1-0.5 \beta^2}} \right) \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana:

U_{\max} = Tegangan Puncak Induksi Petir (Kv)

Z_0 = Impedansi Ruang Hampa (Ohm)

I_0 = Arus Piuncak Petir (Ka)

d = Jarak Antar Menara Dengan Konduktor Logam (m)

h = Tinggi Bangunan (M)

2.2.11 Lightning Arrester

Lightning Arrester adalah alat pelindung bagi peralatan sistem tenaga listrik terhadap surja petir. Arester membentuk jalan yang mudah dilalui oleh arus petir, sehingga tidak timbul tegangan lebih pada peralatan. Bila timbul surja dia berlaku sebagai konduktor, jadi melewatkan aliran arus yang tinggi. Setelah surja hilang, arester harus membuka dengan cepat kembali, sehingga pemutus daya tidak sempat membuka. Ada dua jenis arester yang umum dipakai, yaitu arester jenis ekspulsi dan jenis katup. Salah satu dari jenis arester katup yaitu arrester MOV (Metal Oxide Varistor) [22].

2.2.12 Elektroda Udara (Spike Rod)

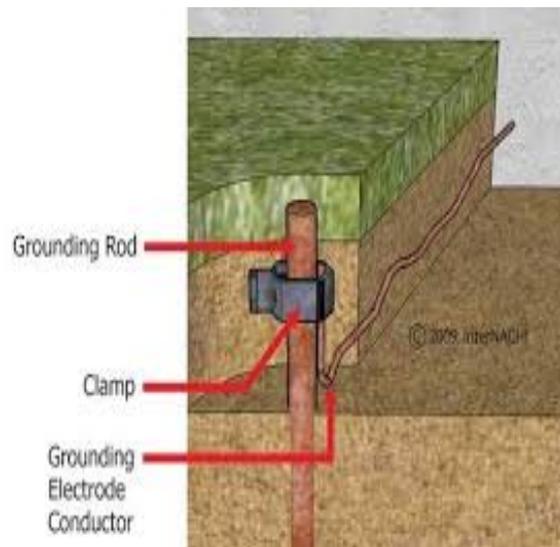
Umumnya sistem penangkal petir sangat bergantung kepada copper rod (batang tembaga) ini. Karena copper rod juga berfungsi membuang kelebihan arus yang diakibatkan oleh naik turunnya tegangan dari arus PLN akibat gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh petir serta meneruskan arus lebih yang timbul akibat adanya surja petir pada bangunan. Dengan pemasangan dan pemilihan bahan yang tepat sebagai grounding rod yaitu copper rod diharapkan mampu bekerja dengan optimal.



Gambar 2.3. Elektroda Spike Rod

2.2.13 Elektroda Tanah (Ground Rod)

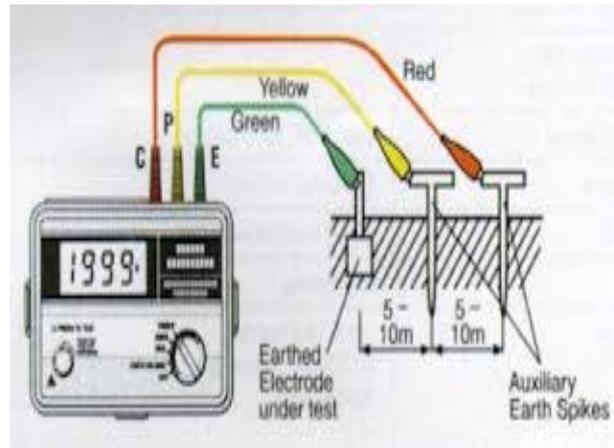
Grounding rod merupakan sebuah elemen yang sangat penting untuk keamanan dan keselamatan bagi sebuah bangunan, karena berfungsi menyalurkan petir yang menyambar langsung ke head penangkal petir yang berada diatas bangunan langsung mengalirkan ketanah melalui kabel penghubung untuk di netralkan.



Gambar 2.4. Elektroda Grounding Rod

2.2.14. Earth Tester

Earth Tester adalah alat untuk mengukur nilai resistansi dari grounding, Besarnya tahanan tanah sangat penting untuk diketahui sebelum dilakukan pentanahan dalam sistem pengamanan dalam instalasi listrik. Untuk mengetahui besar tahanan tanah pada suatu area digunakan alat ukur dengan penampil analog. Hasil pengukuran secara analog sering terjadi kesalahan dalam pembacaan hasil pengukurannya.



Gambar 2.5 Earth Tester Digital

2.2.15 ETAP (Electrical Transient Analysis Program)

ETAP merupakan sebuah software yang berfungsi sebagai penganalisis sebuah sistem kelistrikan secara rinci, mulai dari power bahkan hingga network. ETAP ini mampu bekerja secara offline untuk menganalisis load flow, short circuit, ground grid sistem, harmonic maupun pengamanan pada motor. Bahkan ETAP dapat bekerja secara online dan menganalisa data secara real time seperti (SCADA). Etap Power Station memungkinkan kita untuk menganalisis banyak hal hanya dengan diagram satu garis. Software ini dirancang dengan 3 konsep utama yaitu: virtual reality operation, total integration data dan simplicity in data entry. ETAP merupakan software terbaik dalam menganalisa secara keseluruhan dalam sistem, dengan mengacu dari beberapa standart baku seperti: (ANSI atau IEC), frekuensi maupun jenis-jenis elemennya (elemen AC, elemen DC serta instrumen) [11][23].

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian yang berjudul Perancangan Lightning Arrester Sebagai Sistem Pengaman Pada PLTS Pematang Johar ini dilaksanakan di lokasi Wisata Sawah Dusun VI, jl. Johar Raya, Desa Pematang Johar, Kec. Labuhan Deli Serdang, Kab. Deli Serdang pada tanggal 22 November 2020 sampai selesai.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini, diperlukan beberapa alat dan bahan antara lain:

3.2.1 Alat Penelitian

Adapun alat alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Toolkit : sebagai alat bantu perakitan alat
2. Laptop : sebagai alat bantu pengujian sistem
3. Earth tester model 4105 A : Sebagai alat ukur tahanan sistem grounding
4. Meteran : Sebagai pengukuran jarak antar Batang elektroda
5. Martil : Sebagai alat untuk memukul batang elektroda
6. Software Etap : Berfungsi sebagai pengujian data
7. Mesin bor : Untuk pemasangan baut

3.2.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Pipa galvanis : sebagai sambungan jarum tembaga
2. Jarum tembaga lightning arrester : sebagai media sambaran petir
3. Elektroda grounding : sebagai media penampang ketanah
4. Kabel BC 50 mm : sebagai penghantar sambaran petir
kemudian dialirkan ketanah
5. Drat penghubung : sebagai penghubung tiap elektroda
6. Cincin Penghubung : sebagai penghubung kabel BC dengan
elektroda grounding
7. Paku klem : untuk merapikan instalasi pada kabel
8. Pipa paralon : sebagai pengaman kabel
9. Skun kabel : untuk menghubungkan kabel pada
- 10 Bahan penunjang lainnya : sebagai bahan pelengkap.

3.3 Tahapan Perencanaan

Tahapan perencanaan dilakukan sebagai dasar penentuan pokok-pokok prosedur dalam penelitian yang akan dilakukan. Hal-hal yang dilakukan adalah sebagai berikut :

a) Perumusan Masalah

Dalam penentuan pokok-pokok dasar penelitian dilakukan perumusan masalah agar penelitian yang dilakukan dapat dicari titik terang dengan sesuatu yang akan diteliti serta jelas dalam penentuan hal-hal yang harus diteliti secara terstruktur.

b) Penentuan Tujuan Penelitian

Tujuan Penelitian dilakukan agar objek yang diteliti sesuai dengan tujuannya dilakukan penelitian dalam menjawab persoalan-persoalan yang dirumuskan.

3.3.1 Langkah - Langkah Penelitian

Agar dapat diperoleh rancangan sistem pentahanan yang baik, langkah-langkah yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut:

- 1) Mengumpulkan data penunjang seperti model tanah pada lokasi bangunan PLTS, area yang akan ditanahkan.
- 2) Menentukan tingkat proteksi dan ukuran konduktor sistem pentahanan yang paling efisien untuk bangunan PLTS.
- 3) Menentukan nilai tegangan sentuh (Esentuh) dan tegangan langkah (Elangkah) yang dapat ditoleransi/diizinkan selama durasi gangguan;
- 4) Membuat rancangan awal sistem pentahanan berupa konduktor yang langsung ditanahkan.
- 5) Menentukan nilai tahanan tanah (R_g).
- 6) Menghitung arus gangguan (IG), yang menggambarkan kondisi gangguan terburuk yang dapat terjadi.
- 7) Menghitung GPR dari rancangan awal, jika nilainya kurang dari tegangan sentuh yang diizinkan, maka tidak diperlukan analisis lebih lanjut.
- 8) Kemudian menghitung menggunakan metode simulasi dengan *software* ETAP untuk mengetahui apakah batang elektroda yang ditanam sudah sesuai standart yang di inginkan.

3.3.2 Persiapan Penelitian

Persiapan Penelitian dilakukan agar objek yang akan diteliti dapat diketahui kategori dan spesifikasinya sesuai dengan apa yang akan dirancang dan akan dipasang pada objek utama penelitian. Adapun Persiapan penelitian mencakup hal-hal sebagai berikut :

a) Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan dimulai dari pengumpulan data tentang perancangan system lightning arrester yang sesuai dengan bangunan serta kondisi alam disekitarnya. Hal ini diperoleh dari sumber sumber ilmiah seperti Jurnal, Artikel, Buku serta Karya Tulis seseorang yang berhubungan dengan objek penelitian.

b) Analisis Kebutuhan Alat dan Sistem

Analisis kebutuhan alat dan sistem adalah tahap menentukan alat, komponen, serta media yang dibutuhkan dalam perancangan serta sistem yang akan dibangun. Kebutuhan sistem yang digunakan meliputi Kebutuhan perangkat lunak (software), terdiri dari perangkat lunak sistem operasi dan spesifikasi arrester yang sesuai agar perancangan alat dapat berjalan dengan apa yang di inginkan. Perangkat yang digunakan adalah software ETAP 16.0.

3.3.3 Variabel Penelitian

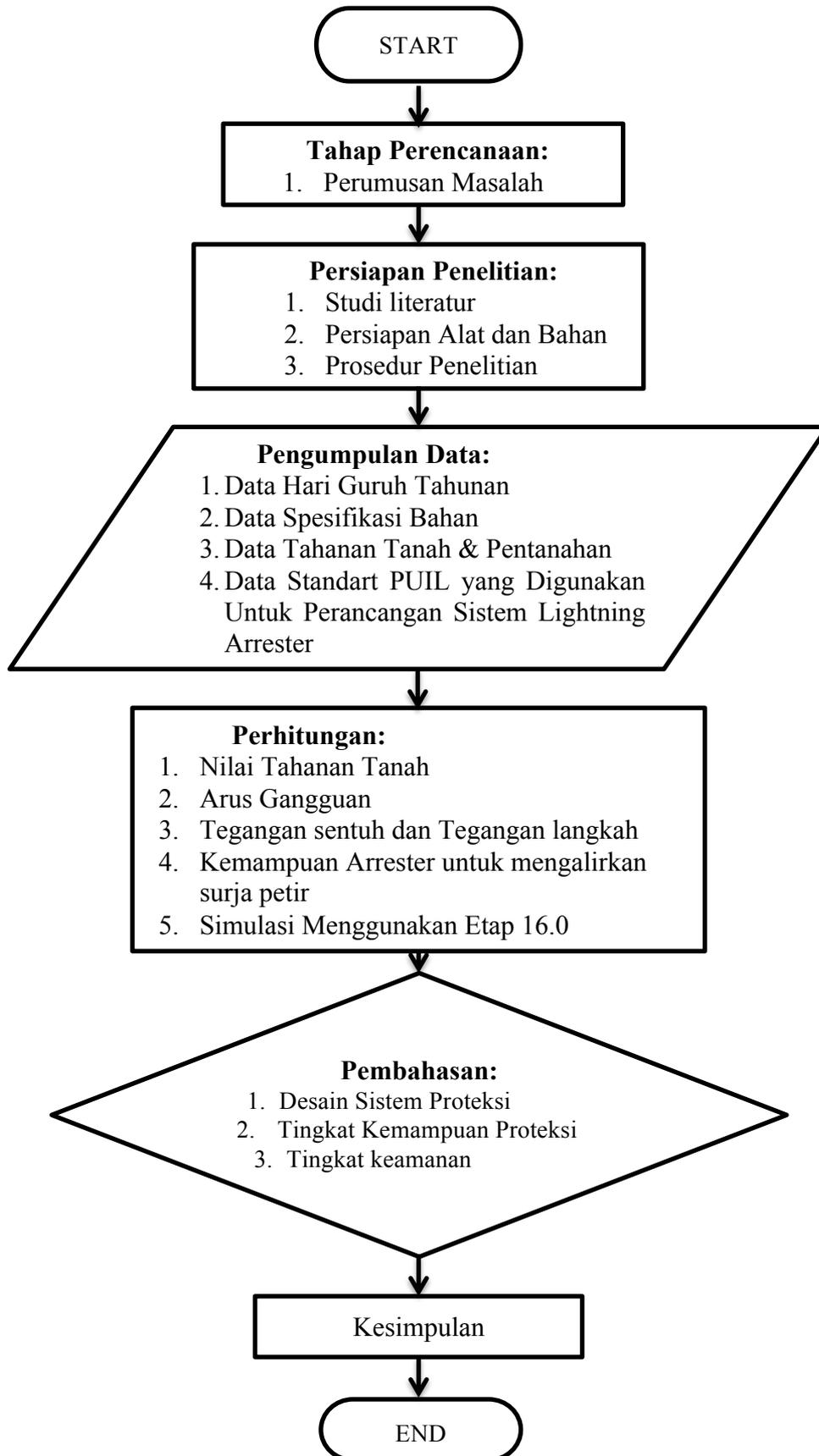
Variabel penelitian adalah obejek penelitian yang menjadi sumber titik perhatian dalam penelitian. Dalam penelitian ini yang menjadi objek penelitian

atau variabel penelitiannya adalah menghasilkan rancangan lightning arrester yang sesuai dengan bangunan PLTS berdasarkan standart PUIL. Berdasarkan variable penelitian yang ditetapkan, maka penelitian ini mencakup:

- a) Penentuan besarnya kebutuhan penelitian berdasarkan PUIPP ditentukan dengan penjumlahan indeks-indeks tertentu yang mewakili keadaan bangunan PLTS.
- b) Penentuan tingkat proteksi yang digunakan pada standar NFPA 780 hampir sama dengan cara yang digunakan pada PUIL yaitu dengan menjumlahkan sejumlah indeks yang mewakili Kenaikan Tegangan Pada Pembumian. Berdasarkan standart IEC 1024-1-1, pemilihan tingkat proteksi yang memadai untuk suatu sistem proteksi petir didasarkan pada frekwensi sambaran petir langsung setempat yang diperkirakan ke struktur yang diproteksi dan frekwensi sambaran petir tahunan setempat yang diperbolehkan.
- c) Penentuan proteksi menggunakan desain proteksi Eksternal dengan menghitung tahanan tanah dan menentukan kapasitas komponen arrester yang sesuai kebutuhan.

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian merupakan serangkaian proses-proses yang terjadi selama penelitian yang disusun secara urut dari tahap yang pertama sekali dilakukan sampai dengan tahap yang terakhir. Dengan alur penelitian, dapat ditentukan tujuan dan arah penelitian tugas akhir ini dilakukan. Adapun prosedur penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada diagram alir di bawah ini:



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.5 Perancangan Lightning Arrester

Pada tahap perancangan ini dimulai dengan melakukan studi literatur terlebih dahulu untuk kebutuhan menganalisis kekuatan dan intensitas petir yang ada di daerah pematang johar, kemudian menghitung jumlah beban pemakaian listrik yang di alirkan dari PLTS tersebut. Lalu menempatkan batang elektroda atas dan batang elektroda bawah pada lokasi yang tepat demi mendapatkan tahanan tanah yang diharapkan di lokasi PLTS pematang johar agar sesuai dengan hasil analisis dan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya.

3.5.1 Desain Lightning Arrester

Desain lightning arrester dibuat sebagai acuan peneliti dalam proses pengerjaan perancangan sistem, agar seluruh komponen dapat di sesuaikan dengan spesifikasi dan standart yang telah ditetapkan sebelumnya serta memudahkan peneliti dalam mengerjakan perancangan di lapangan. Pembuatan desain lightning arrester akan menggunakan software autocad 2017 dengan skala 1:1.

3.5.1.1 Pemasangan Jarum Rod

Tahapan awal yang akan dilakukan yaitu penempatan pemasangan jarum rod pada bagian atas bangunan PLTS. Adapun jarum rod sendiri terbuat dari tembaga, memiliki panjang 30 cm dan disambung dengan tiang penyangga sepanjang 1 meter.

3.5.1.2 Pemasangan Instalasi kabel

Pada proses ini pemasangan instalasi kabel dari jarum rod yang digunakan ialah kabel BC dengan diameter 50 mm yang langsung di

hubungkan ke elektroda grounding, adapun sebagai perlindungan keamanan bangunan digunakan pipa paralon sebagai isolasi agar kabel BC tidak langsung menyentuh bangunan tersebut.

3.5.1.3 Pemasangan Elektroda Grounding

Adapun elektroda grounding yang digunakan yaitu tembaga dengan panjang ± 6 meter, diameter 5/8 inch. Telah disesuaikan dengan hasil analisis pada kondisi disekitar bangunan.

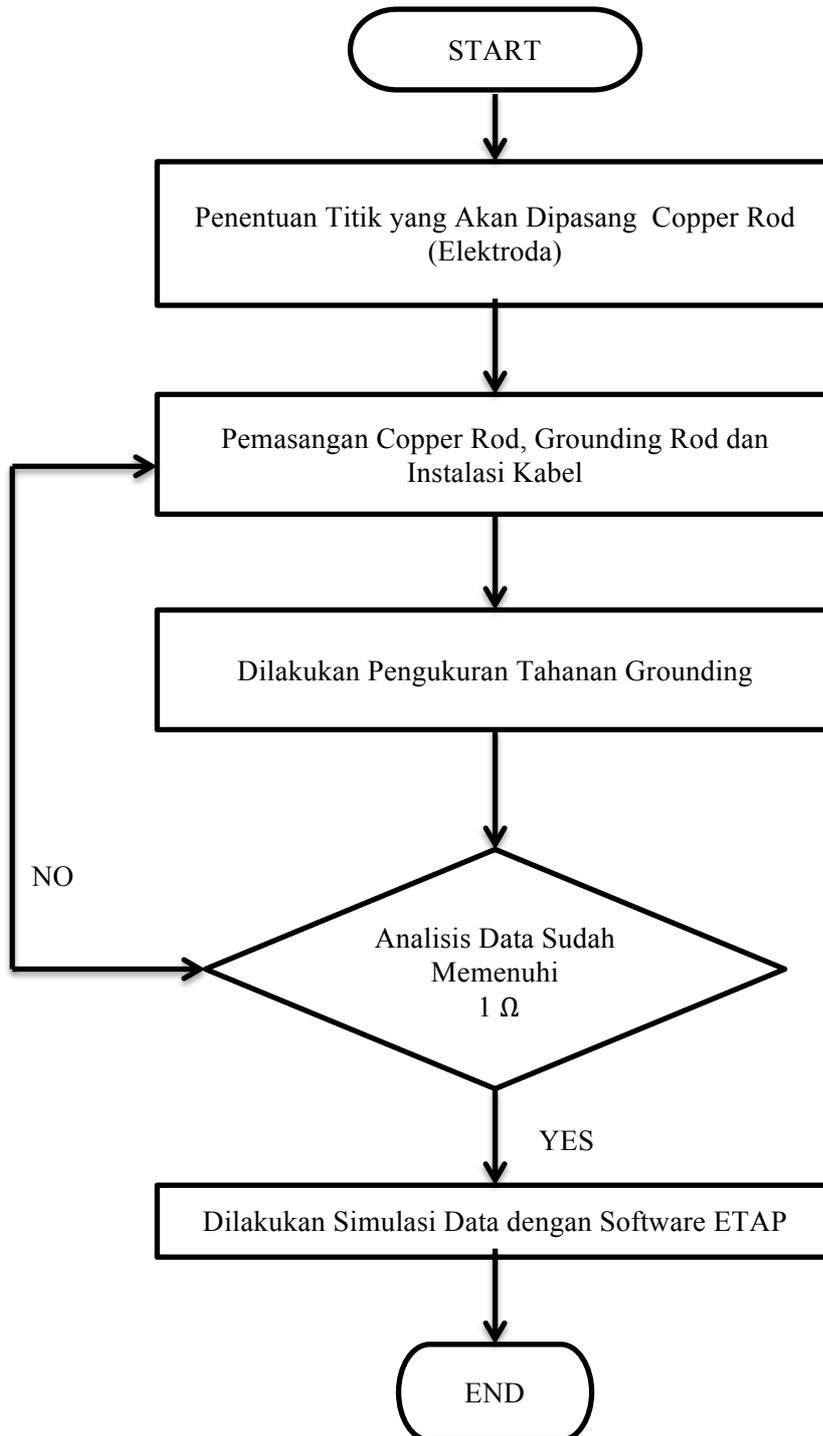
3.5.1.4 Pengukuran Tahanan Grounding

Adapun proses pengukuran tahanan grounding pada penelitian ini yaitu dengan menggunakan digital eart tester KYORITSU model 4102 sebagai alat pengambilan data dengan tegangan pada arah jarum eart tester di arahkan pada 100 ohm. Pada pengambilan data resistansi pentanahan diharapkan untuk dilakukan secara berkala agar nilai tahanan yang didapatkan lebih akurat dan tidak menyebabkan terjadinya kesalahan data juga menghindari kesalahan dari eart tester itu sendiri.

3.5.2 Pengujian Sistem Lightning Arrester

Setelah perancangan sistem lightning arrester selesai maka tahap selanjutnya adalah proses pengujian alat yang bertujuan untuk mengetahui kinerja dari sistem lightning arrester tersebut apakah sesuai dengan yang diharapkan. Adapun pengujian akan menggunakan software ETAP 16.0 sebagai simulator ketahanan sistem lightning arrester dalam melindungi bangunan dari sambaran petir yang ada di daerah pematang johar.

3.6 Flowchart Perancangan Lightning Arrester



Gambar 3.2. Flowchart Sistem Lightning Arrester

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas tentang pengujian dan hasil analisa perancangan sistem lightning arrester yang telah dibuat. Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah sistem yang dibuat dapat bekerja dengan baik dan sesuai yang telah ditentukan atau tidak. Metode yang dilakukan dalam pengujian ini adalah dengan penghitungan data – data dari lapangan yang telah dikumpulkan sebelumnya serta akan disimulasikan dalam sebuah software ETAP 16.0 untuk mengetahui ketahanan dari sistem lightning arrester yang telah dirancang.



Gambar 4.1 Lightning Arrester Pada PLTS

4.1 Hasil Pengumpulan Data

Adapun data yang akan dikumpulkan untuk mendapatkan hasil yang maksimal pada penelitian ini adalah:

4.1.1 Data Hari Guruh Per Tahun

Data hari guruh dibutuhkan untuk memperkirakan kerapatan serta frekuensi sambaran petir pertahunnya serta pada bangunan yang akan dipasang lightning arrester. Adapun data hari guruh pada daerah sumatera utara dapat dilihat pada tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4.1: Hari Guruh rata-rata per tahun dan IKL di beberapa kota di Sumatera

| No | Kota | Curah Petir | IKL | Tingkat |
|----|----------------|-------------|-------|---------|
| 1 | Medan | 224 | 61.34 | Tinggi |
| 2 | Lhoksemawe | 201 | 55.07 | Tinggi |
| 3 | B. Aceh | 55 | 15.12 | Rendah |
| 4 | Belawan | 246 | 67.36 | Tinggi |
| 5 | G. Sitoli | 112 | 30.68 | Sedang |
| 6 | Padang Panjang | 122 | 33.47 | Sedang |
| 7 | Pang. Brandan | 214 | 58.60 | Tinggi |
| 8 | Sibolga | 158 | 43.29 | Tinggi |
| 9 | Jambi | 76 | 20.74 | Rendah |
| 10 | Palembang | 156 | 42.67 | Sedang |
| 11 | Riau | 217 | 59.33 | Tinggi |

Sumber: Data Isokeraunik Level (BMKG 2019)

4.1.2 Data Lightning Protection Level (LPL)

Tabel 4.2 Lightning Current For Each LPL Based On 10/350 μ s waveform

| LPL | I | II | III | IV |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|
| Maximum current (kA) | 200 | 150 | 100 | 100 |
| Minimum current (kA) | 3 | 5 | 10 | 16 |

IEC 62305-1 2010

4.1.3 Data Tahanan Jenis Tanah

Tabel 4.3. Tahanan Jenis Tanah

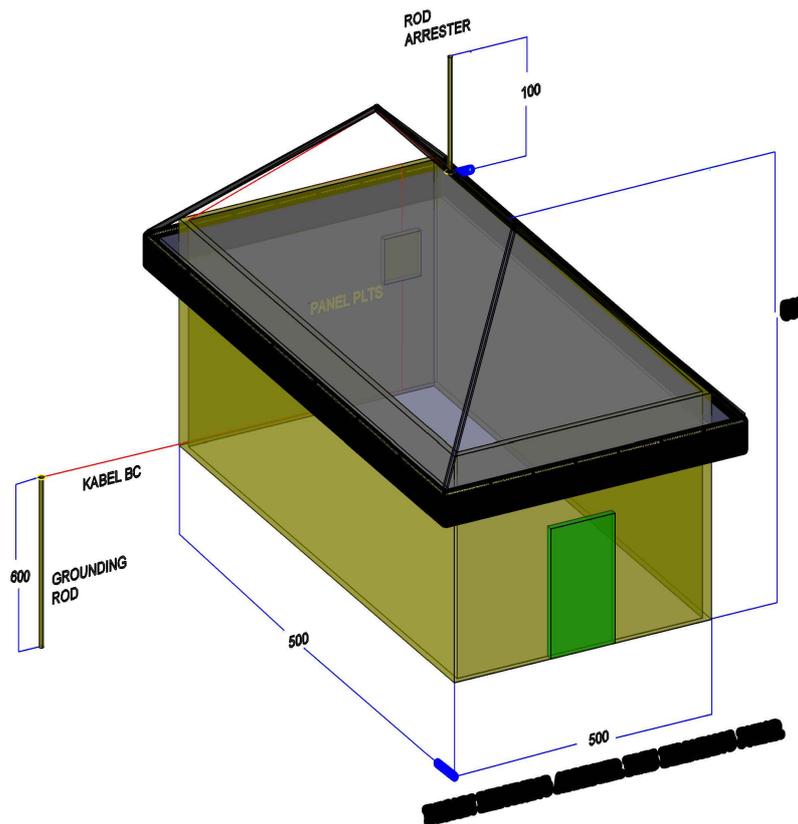
| No | Jenis Tanah | Resistansi Tanah (Ω m) |
|----|----------------------|--------------------------------|
| 1 | Tanah Rawa | 10 – 40 |
| 2 | Tanah Pertanian | 20 – 100 |
| 3 | Pasir Basah | 50 – 200 |
| 4 | Kerikil Basah | 200 – 3000 |
| 5 | Kerikil Kering | < 1000 |
| 6 | Tanah Berbatu | 2000 – 3000 |
| 7 | Air Laut & Air Tawar | 10 – 100 |

Sumber : PUIL 2000

4.1.4 Data Spesifikasi Bangunan PLTS

Kemudian dapat dilihat dibawah ini spesifikasi dan desain lightning arrester pada bangunan PLTS pematang johar.

| NO | DATA | KETERANGAN (cm) |
|----|------------------|-----------------|
| 1 | Panjang Bangunan | 500 |
| 2 | Lebar Bangunan | 500 |
| 3 | Tinggi Bangunan | 600 |
| 4 | Rod Arrester | 100 |
| 5 | Grounding Rod | 600 |
| 6 | Kabel Bc | 2000 |



Gambar 4.2 Perancangan Letak Lightning Arrester Pada Bangunan PLTS

Menggunakan Software Autocad 2017

4.1.5 Proses Pemasangan Rod Arrester



Gambar 4.3 Pemasangan Rod Arrester Jenis Splitzen

4.1.6 Proses Pemasangan Kabel BC



Gambar 4.4 Pemasangan Kabel BC



Gambar 4.5 Pemasangan Kabel BC

4.1.7 Proses Pemasangan Elektroda Tanah

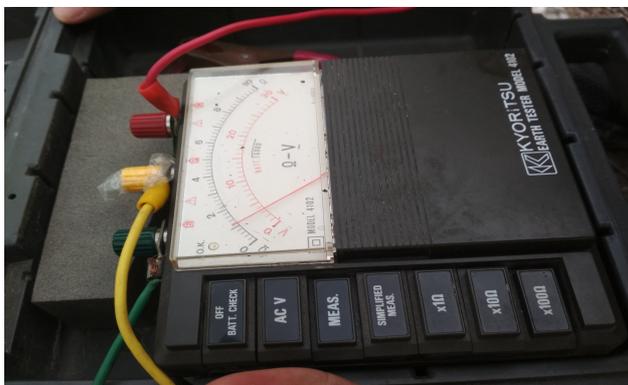


Gambar 4.6 Pemasangan Elektroda Batang

4.1.8 Proses Pengukuran Pentanahan



Gambar 4.7 Proses Pengukuran Resistansi Tanah



Gambar 4.8 Hasil Pengukuran Resistansi Tanah

4.2 Pengukuran Tahanan Pentanahan

Pengukuran tahanan pentanahan bertujuan untuk menentukan tahanan antara elektroda tembaga yang ditanam dalam tanah untuk melindungi bangunan serta peralatan listrik disekitarnya terhadap gangguan petir. Dengan demikian elektroda tersebut harus ditanam sehingga mendapatkan nilai tahanan yang sekecil – kecilnya. Setelah mendapatkan data tahanan pentanahan maka dapat dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai tahanan tanah yang ada disekitar bangunan yang akan di pasang sistem lightning errester. Tahanan pentanahan harus sekecil mungkin untuk menghindari bahaya-bahaya yang ditimbulkan oleh adanya arus gangguan tanah. Nilai standar mengacu pada Persyaratan Umum Instalasi Listrik atau PUIL 2011 (peraturan yang sesuai dan berlaku hingga saat ini) yaitu kurang dari atau sama dengan 5 (lima) ohm. Dijelaskan bahwa nilai sebesar 5 ohm merupakan nilai maksimal atau batas tertinggi dari hasil resistan pembumian (grounding) yang masih bisa ditoleransi.

4.2.1 Nilai Tahanan Tanah

Adapun setelah melakukan pengambilan data di lapangan didapatkan hasil yaitu tahanan pentanahan (R) = 1 (ohm), diameter grounding (D) = 5/8 inch = 0.01587 (m) maka (a) = 0.0079 (m), dan panjang elektroda ke tanah (L) = 6 (m). Maka dapat dihitung dengan menggunakan persamaan rumus 2.1

$$R_G = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \left(\ln \left(\frac{4 \times L}{a} \right) - 1 \right)$$

$$1 = \frac{\rho}{2 \times 3,14 \times 6} \left(\ln \left(\frac{4 \times 6}{0.0079} \right) - 1 \right)$$

$$1 = \frac{\rho}{37.68} (\ln (3037.9) - 1)$$

$$1 = \frac{\rho}{37.68} (8.018)$$

$$37.68 = (8.018) \rho$$

$$\rho = 4.7 \Omega m$$

4.2.1.1 Hasil pengukuran

Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Resistansi Tanah

| No | Data | keterangan |
|----|-----------------------|----------------|
| 1 | Jenis Elektroda | Batang |
| 2 | Kedalaman | 6 Meter |
| 3 | Jumlah Elektroda | 3 Batang |
| 4 | Resistansi Pentanahan | 1 Ω |
| 5 | Resistansi Tanah | 4.7 Ωm |

4.3 Perhitungan Arus Gangguan Maksimum dan *Ground Potential Rise*

(GPR)

Arus maksimum dihitung dengan Persamaan (2.8) sebagai berikut:

$$I_G = 0,6 \times 10.000 \times 1$$

$$I_G = 6000 \text{ A}$$

Ground Potential Rise (kenaikan tegangan tanah), yang merupakan tegangan maksimum yang mengalir pada *grid* saat terjadi gangguan dihitung dengan Persamaan (10). Untuk tahanan tanah lapis pertama, $R_g = 1 \Omega m$.

$$GPR = 1 \times 6000$$

$$GPR = 6000 \text{ V}$$

4.4 Tingkat Frekuensi Sambaran Petir

Setelah mendapatkan data-data yang dibutuhkan dalam perhitungan maka untuk mengetahui tingkat frekuensi sambaran petir per tahun nya dapat dihitung dengan menggunakan rumus (2.11), (2.12), (2.13) dan (2.14)

$$R = A + B + C + D + E$$

$$R = 2 + 3 + 0 + 0 + 7$$

$$R = 12$$

Dari data table 2.8 diketahui bahwa apabila $R = 12$ maka perkiraan bahaya sambaran petir menurut PUIPP tidak begitu kecil serta agak dianjurkan untuk menggunakan system proteksi petir.

4.4.1 Menghitung Kerapatan Sambaran Petir Ke Tanah Rata- Rata

Tahunan (Ng).

$$Ng = 0.04 \times Td^{1.25} / \text{km}^2/\text{tahun}$$

$$Ng = 0.04 \times 224^{1.25}$$

$$Ng = 34.6633 / \text{Km}^2/\text{Tahun}$$

4.4.2 Menghitung Area Cakupan Ekivalen Pada Sisi Bangunan (Ae).

Area cakupan ekivalen untuk bangunan yang mempunyai Tinggi (h) 5 meter, Panjang (a) 5 meter dan Lebar (b) 5 meter dapat dihitung berdasarkan rumus (2.714) yaitu :

$$Ae = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2$$

$$Ae = 5 \times 5 + 6 \times 5(5 + 5) + 9 \times 3.14 \times 5^2$$

$$Ae = 25 + 30(10) + 706.5$$

$$Ae = 25 + 300 + 706.5$$

$$Ae = 1031.5 \text{ m}^2$$

4.4.3 Menghitung Frekuensi Sambaran Petir Langsung (Nd)

$$Nd = Ng \times Ae \times 10^{-6}$$

$$Nd = 34.6633 \times 1031.5 \times 10^{-6}$$

$$Nd = 0.36 \text{ Sambaran/Tahun}$$

Maka didapat hasil dari perhitungan frekuensi sambaran petir per tahun pada daerah bangunan sebesar 0.36 sambaran/tahun.

4.4.4 Nilai Efisiensi (E)

$$E \geq 1 - \frac{Nc}{Nd}$$

$$E \geq 1 - \frac{10^{-1}}{0.36}$$

$$E \geq 1 - 0.28$$

$$E \geq 0.72$$

$$E \geq 0.72\%$$

$E < 80\%$ berada pada tingkat proteksi IV dengan penambahan alat proteksi, dengan demikian nilai E sebesar 0,72 berada pada tingkat proteksi IV dengan nilai efisiensi diantara 0% - 80%.

4.5 Tegangan langkah dan Tegangan Sentuh

Tegangan sentuh adalah tegangan yang timbul di antara suatu objek yang disentuh dimana objek tersebut secara langsung dihubungkan dengan pentanahan. Tegangan langkah adalah beda potensial pada permukaan tanah yang timbul di antara dua kaki manusia yang berjarak satu langkah atau 1 meter ketika berdiri di atas tanah yang sedang dialiri oleh arus gangguan ke tanah tanpa menyentuh

peralatan apapun. Perhitungan tegangan yang diizinkan untuk berat manusia 50 kg dan 70 kg terlihat dalam persamaan (2.3 – 2.6) dimana C_S memiliki nilai 1 karena tidak adanya lapisan permukaan tanah (langsung ke tanah).

a) Tegangan Langkah dan tegangan sentuh 50 Kg

Adapun untuk tegangan langkah dan tegangan sentuh sebenarnya pada berat 50 kg adalah: diketahui $t_s = 0.5$ s dari hasil simulasi menggunakan etap.

$$E_{\text{langkah } 50} = (1000 + 6C_S \cdot \rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{\text{langkah } 50} = (1000 + 6 \times 1 \cdot 1) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{langkah } 50} = (1006) \frac{0.116}{0.707}$$

$$E_{\text{langkah } 50} = (1006) 0.164$$

$$E_{\text{langkah } 50} = 164.984 V$$

Pada tegangan langkah sebenarnya untuk berat 50 kg didapatkan hasil yaitu sebesar 164.984 V.

$$E_{\text{sentuh } 50} = (1000 + 1.5C_S \cdot \rho_S) \frac{0.166}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{\text{sentuh } 50} = (1000 + 1.5 \times 1 \times 1) \frac{0.166}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{sentuh } 50} = (1000 + 1.5 \times 1 \times 1) 0.164$$

$$E_{\text{sentuh } 50} = 164.246 V$$

Pada tegangan sentuh sebenarnya untuk berat 50 kg didapatkan hasil yaitu sebesar 164.246 V.

b) Tegangan Langkah dan tegangan sentuh 70 Kg

kemudian Untuk tegangan langkah dan tegangan sentuh sebenarnya pada berat 70 kg adalah:

$$E_{langkah\ 70} = (1000 + 6C_S \cdot \rho_S) \frac{0.157}{\sqrt{t_S}}$$

$$E_{langkah\ 70} = (1000 + 6 \times 1 \times 1) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{langkah\ 70} = (1000 + 6 \times 1 \times 1) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{langkah\ 70} = (1006) 0.22$$

$$E_{langkah\ 70} = 223.33\ V$$

Pada tegangan langkah sebenarnya untuk berat 70 kg didapatkan hasil yaitu sebesar 223.33 V.

$$E_{sentuh\ 70} = (1000 + 1.5C_S \cdot \rho_S) \frac{0.157}{\sqrt{t_S}}$$

$$E_{sentuh\ 70} = (1000 + 1.5 \times 1 \cdot 1) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{sentuh\ 70} = (1001.5) 0.22$$

$$E_{sentuh\ 70} = 220.33$$

Pada tegangan sentuh sebenarnya untuk berat 70 kg didapatkan hasil yaitu sebesar 220.33 V. Adapun hasil dari perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah dapat dilihat dari table berikut ini:

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Nilai Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah

| NO | KRITERIA | TEGANGAN (V) |
|----|------------------------|--------------|
| 1 | $E_{\text{step } 50}$ | 164.984 |
| 2 | $E_{\text{touch } 50}$ | 164.246 |
| 3 | $E_{\text{step } 70}$ | 223.33 |
| 4 | $E_{\text{touch } 70}$ | 220.33 |

4.5.1 Beban Tegangan langkah Tanpa Sistem Lightning Arrester

Besar tegangan langkah dari titik terdekat dengan penghantar penangkal petir sampai dengan titik terjauh yang masih dalam cakupan ekivalen penangkal petir. Hal ini dapat dipertimbangkan sesuai dengan jarak arus sambaran petir pada area tersebut. Rata – rata panjang langkah orang indonesia yaitu 0.5 meter dengan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 0.1 m yaitu :

$$U = I \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{s}{d(d+s)}$$

$$U = 6000 \frac{100}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{0.1(0.1 + 0.5)}$$

$$U = 7,850,000 \text{ V}$$

Dari perhitungan diatas ditunjukkan besar tegangan langkah pada jarak terdekat tanpa grounding sistem. Besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 5 m yaitu :

$$U = I \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{s}{d(d+s)}$$

$$U = 6000 \frac{100}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{5 (5 + 0.5)}$$

$$U = 17,127.27 V$$

Adapun besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 10 m yaitu :

$$U = I \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{s}{d (d + s)}$$

$$U = 93.220 \frac{100}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{10 (10 + 0.5)}$$

$$U = 7,068.547 V$$

Kemudian untuk besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 15 m yaitu :

$$U = I \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{s}{d (d + s)}$$

$$U = 6000 \frac{100}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{15 (15 + 0.5)}$$

$$U = 2,025.81 V$$

Untuk besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 20 m yaitu :

$$U = I \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{s}{d (d + s)}$$

$$U = 6000 \frac{100}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{20 (20 + 0.5)}$$

$$U = 1,148.78 V$$

Untuk besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 25 m yaitu :

$$U = I \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{s}{d(d+s)}$$

$$U = 6000 \frac{100}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{25(25 + 0.5)}$$

$$U = 738.82 V$$

Dan untuk besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 20 m yaitu :

$$U = I \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{s}{d(d+s)}$$

$$U = 6000 \frac{100}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{30(30 + 0.5)}$$

$$U = 514.75 V$$

4.5.2 Dengan Pemasangan Sistem Lightning Arrester

Besar tegangan langkah dari titik terdekat dengan penghantar penangkal petir sampai dengan titik terjauh yang masih dalam cakupan ekivalen penangkal petir. Hal ini dapat dipertimbangkan sesuai dengan jarak arus sambaran petir pada area tersebut. Adapun ketika menggunakan sistem lightning arrester maka dapat dihitung mulai dari titik terdekat dengan panjang langkah yang sama yaitu 0.5 meter dan dimulai pada jarak kaki terdekat dengan titik aliran arus petir dibumi yaitu 0.1 m antara lain :

$$U = I \frac{R}{2\pi} \times \frac{s}{d(d+s)}$$

$$U = 6000 \frac{1}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{0.1 (0.1 + 0.5)}$$

$$U = 78,500 V$$

Adapun besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 5 m yaitu :

$$U = I \frac{R}{2\pi} \times \frac{s}{d (d + s)}$$

$$U = 600 \frac{1}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{5 (5 + 0.5)}$$

$$U = 171.27 V$$

Adapun besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 10 m yaitu :

$$U = I \frac{R}{2\pi} \times \frac{s}{d (d + s)}$$

$$U = 6000 \frac{1}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{10 (10 + 0.5)}$$

$$U = 44.86 V$$

Adapun besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 15 m yaitu :

$$U = I \frac{R}{2\pi} \times \frac{s}{d (d + s)}$$

$$U = 6000 \frac{1}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{15 (15 + 0.5)}$$

$$U = 20.25 V$$

Adapun besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 20 m yaitu :

$$U = I \frac{R}{2\pi} \times \frac{s}{d(d+s)}$$

$$U = 6000 \frac{1}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{20(20 + 0.5)}$$

$$U = 11.49 V$$

Adapun besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 25m yaitu :

$$U = I \frac{R}{2\pi} \times \frac{s}{d(d+s)}$$

$$U = 6000 \frac{1}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{25(25 + 0.5)}$$

$$U = 7.38 V$$

Adapun besar tegangan langkah berdasarkan jangkauan arus petir dengan panjang langkah 0.5 meter dan jarak kaki terdekat pada titik aliran arus petir dibumi 30 m yaitu :

$$U = I \frac{R}{2\pi} \times \frac{s}{d(d+s)}$$

$$U = 6000 \frac{1}{2 \times 3.14} \times \frac{0.5}{30(30 + 0.5)}$$

$$U = 5.15 V$$

4.5.3 Hasil Perhitungan

Pada simulasi perhitungan diatas adalah perbandingan tegangan

langkah yang dihasilkan oleh sambaran petir tanpa sistem grounding serta menggunakan sistem grounding. Dapat disimpulkan bahwa pada jarak terjauh perhitungan sesuai cakupan ekivalen penangkal petir yaitu 30 meter, juga masih berpotensi menimbulkan kerusakan pada peralatan elektronik namun kecil. Tetapi mampu melindungi manusia dengan jarak yang sudah dihitung mengingat batas aman manusia yaitu 50 Volt. Perbedaan tegangan langkah tanpa sistem grounding dengan yang telah dipasang sistem grounding dapat dilihat pada tabel 4.6 dibawah ini.

Gambar Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Besar Tegangan Langkah Akibat Gangguan Petir

| Jarak (d) Meter | Resistansi | | Tegangan langkah (V) | |
|--------------------|-------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|
| | Tanah (Ωm) | Sistem Pentanahan (Ω) | Tanah | Sistem Pentanahan |
| 0.1 | 100 | 1 | 7,850,000 | 78,500 |
| 5 | 100 | 1 | 17,127.27 | 171.27 |
| 10 | 100 | 1 | 7,068.547 | 44.86 |
| 15 | 100 | 1 | 2,025.81 | 20.25 |
| 20 | 100 | 1 | 1,148.78 | 11.49 |
| 25 | 100 | 1 | 738.82 | 7.38 |
| 30 | 100 | 1 | 514.75 | 5.15 |

4.6 Tegangan Induksi Sambaran Petir

4.6.1 Perhitungan Sambaran Petir Langsung Pada Penangkal Petir

Dari data diketahui bahwa arus maksimal petir I adalah 6 kA dan kecuraman petir 20 kA/ μs . Sedangkan besar resistansi sistem pentanahan

yang diukur adalah 1 ohm. Untuk bahan konduktor tembaga sebagai penyalur arus petir, maka induktansi bahan sebesar 1 μ H per meter. Sehingga tegangan induksi pada tahanan grounding penangkal petir adalah :

$$U = I \times R \times U_L \frac{di}{dt}$$

$$U = 6 \times 1 \times 84 \times 10^{-6} \times 20,000 \text{ A}/\mu\text{s}$$

$$U = 10.08 \text{ kV}$$

4.6.2 Perhitungan Tegangan Induksi Sambaran Petir Tidak Langsung

Pada Jarak Tertentu

Tegangan induksi pada jarak tertentu, misalnya tegangan induksi yang dihasilkan dengan jarak 5 meter dari titik referensi atau titik dimana arus petir disalurkan. Maka tegangan induksi nya dapat dihitung sebagai berikut :

$$U_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{d} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times \beta^2}} \right)$$

$$U_{\max} = \frac{30 \times 6 \times 5}{5} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} 0.8 \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times 0.8^2}} \right)$$

$$U_{\max} = 180 \times 1.686$$

$$U_{\max} = 303.48 \text{ kV}$$

Dengan jarak 10 meter dari titik referensi atau titik dimana arus petir disalurkan. Maka tegangan induksi nya dapat dihitung sebagai berikut :

$$U_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{d} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times \beta^2}} \right)$$

$$U_{\max} = \frac{30 \times 6 \times 5}{10} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} 0.8 \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times 0.8^2}} \right)$$

$$U_{\max} = 90 \times 1.686$$

$$U_{\max} = 151.74 \text{ kV}$$

Dengan jarak 15 meter dari titik referensi atau titik dimana arus petir disalurkan. Maka tegangan induksi nya dapat dihitung sebagai berikut :

$$U_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{d} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times \beta^2}} \right)$$

$$U_{\max} = \frac{30 \times 6 \times 5}{15} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} 0.8 \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times 0.8^2}} \right)$$

$$U_{\max} = 60 \times 1.686$$

$$U_{\max} = 101.16 \text{ kV}$$

Dengan jarak 20 meter dari titik referensi atau titik dimana arus petir disalurkan. Maka tegangan induksi nya dapat dihitung sebagai berikut :

$$U_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{d} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times \beta^2}} \right)$$

$$U_{\max} = \frac{30 \times 6 \times 5}{20} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} 0.8 \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times 0.8^2}} \right)$$

$$U_{\max} = 45 \times 1.686$$

$$U_{\max} = 75.87 \text{ kV}$$

Dengan jarak 25 meter dari titik referensi atau titik dimana arus petir disalurkan. Maka tegangan induksi nya dapat dihitung sebagai berikut :

$$U_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{d} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times \beta^2}} \right)$$

$$U_{\max} = \frac{30 \times 6 \times 5}{25} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} 0.8 \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times 0.8^2}} \right)$$

$$U_{\max} = 36 \times 1.686$$

$$U_{\max} = 60.7 \text{ kV}$$

Dengan jarak 30 meter dari titik referensi atau titik dimana arus petir disalurkan. Maka tegangan induksi nya dapat dihitung sebagai berikut :

$$U_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{d} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times \beta^2}} \right)$$

$$U_{\max} = \frac{30 \times 6 \times 5}{30} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} 0.8 \frac{1}{\sqrt{1 - 0.5 \times 0.8^2}} \right)$$

$$U_{\max} = 30 \times 1.686$$

$$U_{\max} = 50.58 \text{ kV}$$

4.6.3 Hasil Perhitungan Tegangan Induksi

Adapun hasil dari perhitungan tegangan induksi dapat dilihat pada table berikut ini antara lain:

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Tegangan Induksi

| No | Jarak Dari Titik Referensi (m) | Tegangan Induksi (kV) |
|----|-----------------------------------|--------------------------|
| 1 | 5 | 303.48 |
| 2 | 10 | 151.74 |
| 3 | 15 | 101.16 |
| 4 | 20 | 75.87 |
| 5 | 25 | 60.7 |
| 6 | 30 | 50.58 |

4.7 Spesifikasi Lightning Arrester

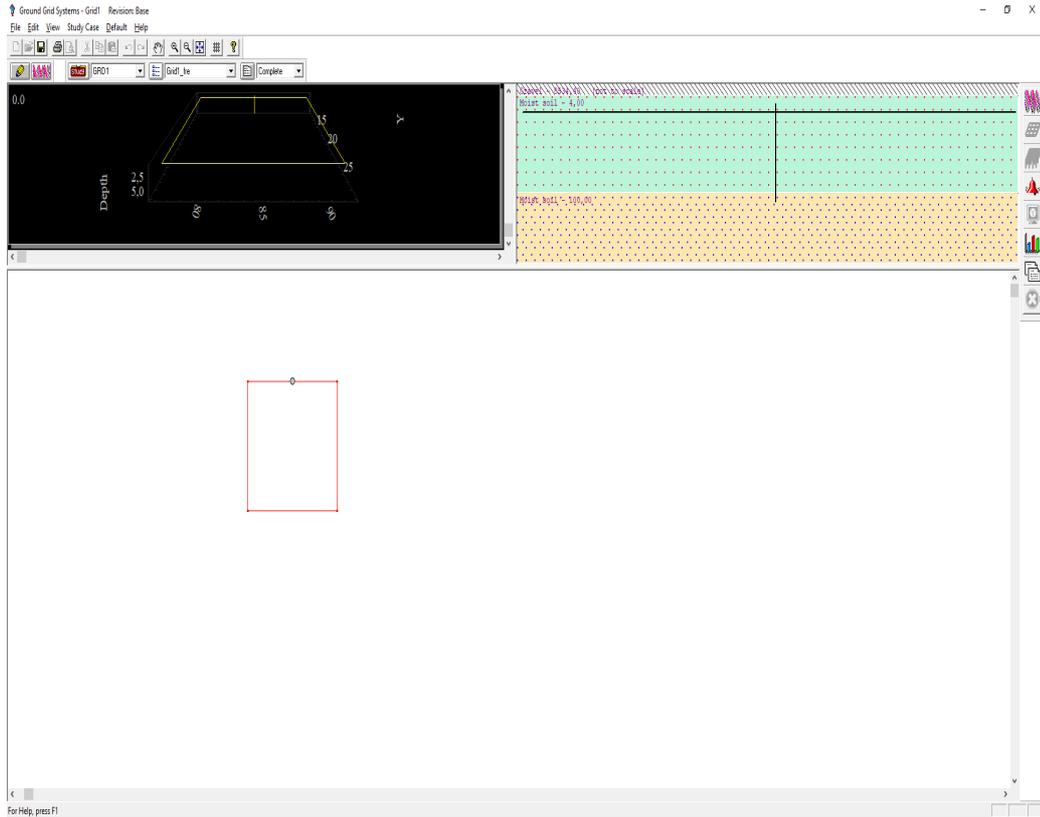
setelah melakukan analisis dan kemudian mendapatkan data-data yang dibutuhkan untuk mengetahui kinerja dari lightning arrester yang memiliki tingkat proteksi III, maka dapat dilihat tabel dibawah ini:

Tabel 4.8 Spesifikasi Lightning Arrester

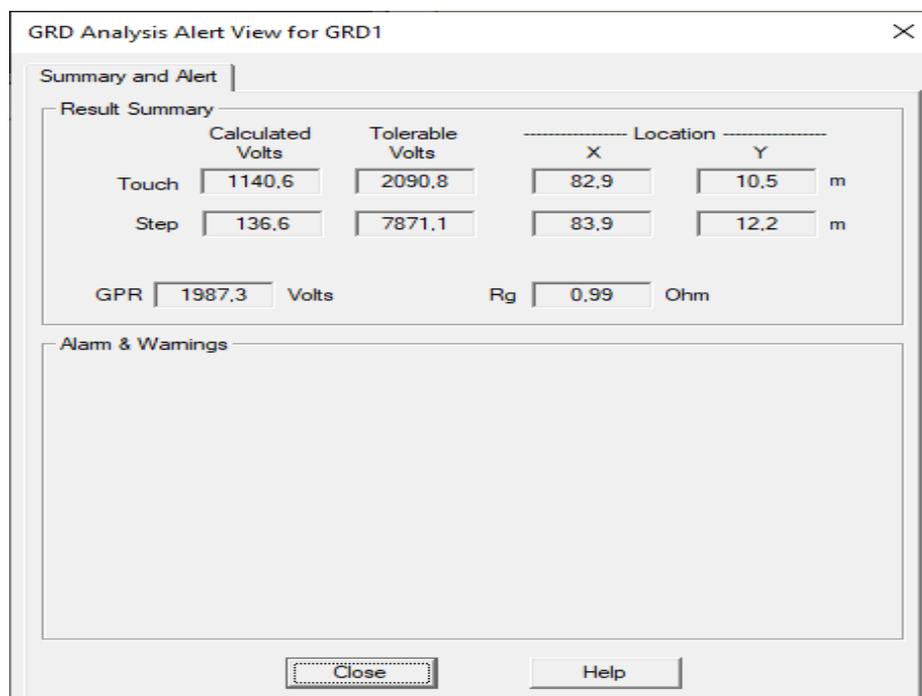
| Jenis Arrester | Lapisan Rod | I Max kA | I Grid kA | di/dt kA/ μ s | (Waktu) $t = I \text{ max}/(di/dt)$ μ s |
|-----------------------------|-------------|-------------|--------------|----------------------|---|
| Splitzen Tombak (F.Cone) | Temabaga | 6 | 2 | 20 | 0.3 |

4.8 Simulasi Sistem Lightning Arrester

simulasi yang akan dilakukan yaitu dengan menggunakan perangkat lunak ETAP 16.0 sebagai pengolah data untuk menguji kemampuan lightning arrester yang telah di rancang sebelumnya. Pada proses simulasi akan menggunakan metode ground rod yang dimana sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui kinerja dari lightning arrester itu sendiri. Adapun simulasi dengan menggunakan perangkat lunak ETAP 16.0 dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.9 Tampilan Software ETAP Proses Simulasi Grounding



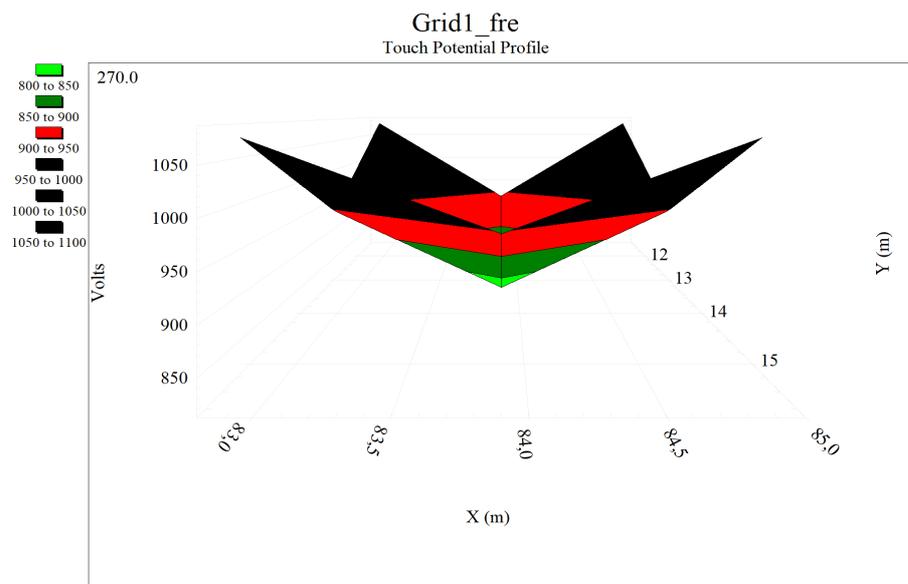
Gambar 4.10 Tampilan Runing Proses Simulasi

Hasil perhitungan sistem pentanahan, yang telah memenuhi Standar IEEE 80- 2000, dengan menggunakan ETAP diperlihatkan dalam Tabel 4.8. Tegangan sentuh aktual sebesar 1140.6 V dan tegangan langkah 136.6 V masih lebih kecil dari tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan yaitu untuk tegangan sentuh sebesar 2090.8 V serta tegangan langkah 7871.1 V, selain itu tahanan pentanahan sebesar 0,99 Ω telah memenuhi standar penelitian yaitu dibawah 1 ohm.

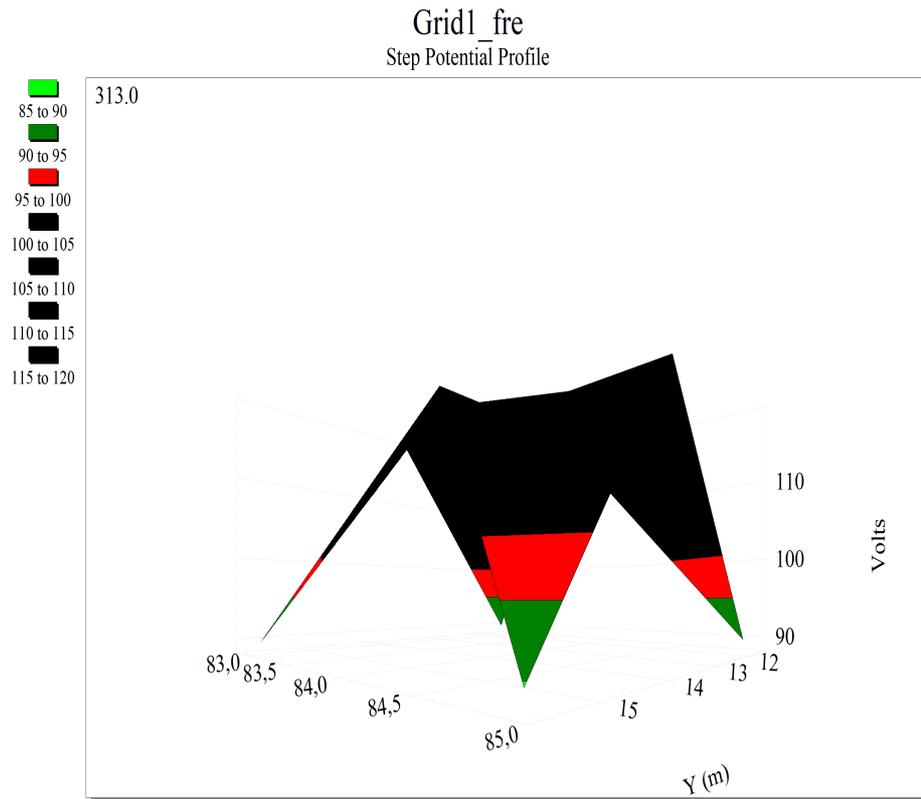
Tabel 4.9 Hasil Simulasi ETAP 16.0 dengan Metode FEM

| R_G (Ω) | GPR (V) | E_{sentuh} Aktual (V) | E_{langkah} Aktual (V) | E_{sentuh} Toleransi (V) | E_{langkah} Toleransi(V) |
|-----------------------|---------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 0.99 | 1987.3 | 1140.6 | 136.6 | 2090.8 | 7871.1 |
| KRITERIA | | 223.33 | 220.33 | | |

Adapun profil tegangan langkah dan tegangan sentuh rancangan akhir simulasi sistem grounding pada PLTS pematang johar menggunakan FEM diperlihatkan dalam Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 dibawah ini.



Gambar 4.11 Profil Tegangan Sentuh Sistem Grounding



Gambar 4.12 Profil Tegangan Langkah Sistem Grounding

Profil tegangan langkah dan tegangan sentuh tersebut menunjukkan nilai-nilai dari tegangan sentuh dan tegangan langkah pada sistem saat terjadi gangguan arus lebih pada sistem. Nilai tegangan langkah dan tegangan sentuh tersebut berbeda dari satu titik dengan titik lain di dalam area bangunan yang di proteksi. Nilai maksimal tegangan pada titik tersebut merupakan hasil perhitungan dan masih berada di bawah nilai yang diizinkan sehingga rancangan sistem pentanahan PLTS dapat dipergunakan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Pada proteksi external dengan menggunakan arrester sebagai alat proteksi. Penempatan arrester dipasang di satu titik, yaitu pada atap bangunan PLTS yang menghubungkan antara panel surya dan solar charge control. Tujuannya untuk melindungi semua peralatan yang ada pada bangunan tersebut.
2. Resistansi pentanahan yang dihitung menggunakan eart tester bernilai 1Ω , dan Resistansi tanah bernilai $4.7\ \Omega$ m. Sedangkan pada saat simulasi resistansi pentanahan bernilai $0.99\ \Omega$.
3. Arus maksimum yang mampu ditahan pada system lightning arrester ini adalah 6 kA dan waktu pelepasan 0.3μ s.
4. Nilai efisiensi dari proses analisis sebesar 0.72% yang tergolong pada tingkat proteksi III.
5. Jarak yang paling aman saat terjadinya sambaran petir yaitu 30 m, tegangan sentuh 223.33 V dan tegangan langkah 220.33 V tergolong dalam kondisi baik karena berada pada nilai tegangan yang ditoleransi.

5.2 Saran

1. Pemasangan konduktor penyalur (*down conductor*) sebaiknya dipasang pada ketinggian tertentu.
2. Dalam melakukan pengukuran resistansi sebaiknya dilakukan secara berkala.
3. Proteksi petir yang digunakan sebaiknya menggunakan proteksi petir konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Pranata, I. Ismeddiyanto, and M. Olivia, "Analysis of Configuration and Performance of Arrester for Protecting Substation Against Impulse Lightning Using Atp-Emp Software," *J. Online Mhs. Fak. Tek. Univ. Riau*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2017.
- [2] D. Andriawan, "Kinerja Arrester Yang Sudah Berusia Lebih Dari 10 Tahun Di Gardu Induk 150 KV Ungaran - Semarang," *J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 2, 2014, doi: 10.15294/jte.v6i2.3582.
- [3] A. Faisal and S. Abduh, "Analisis Sistem Pentanahan Turbin Pembangkit listrik Tenaga Bayu Sidrap Sulawesi Selatan," *Univ. Trisakti*, vol. 16, no. 2, pp. 121–134, 2019.
- [4] A. Syakur, A. Warsito, and L. Nilawati, "Kinerja Arrester Akibat Induksi Sambaran Petir Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV," *Univ. Diponegoro*, vol. 11, no. 1, pp. 9–15, 2010, doi: 10.12777/transmisi.11.1.9-15.
- [5] Ujang Wiharja, "PERENCANAAN DAN ANALISA SISTEM PENTANAHAN PADA PEMBANGKIT LISTRIKTENAGA GAS 100 MW DI GORONTALO," *J. Ilm. Elektrokrisna*, vol. 6, no. 1, pp. 33–41, 2017.
- [6] R. Diamanis *et al.*, "Analisa Jarak Paralel Antara Konduktor Sistem Grounding Grid PLTP Lahendong Unit 5 Dan 6," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 7, no. 3, pp. 239–250, 2018.
- [7] I. M. Darmayusa, I. G. N. Janardana, I. W. A. Wijaya, J. T. Elektro, F. Teknik, and U. Udayana, "Analisa Sistem Pembumian Pada Pembangkit Listrik Tenaga Minihydro Di Tukad Balian Kabupaten Tabanan," *Tek. UNTAN*, vol. 6, no. 3, pp. 45–51, 2019.
- [8] Bhaskara, "ANALISA KEGAGALAN LIGHTNING ARRESTER PADA PENYULANG SULAHAN BANGLI," *J. spektrum*, vol. 6, no. 3, pp. 94–100, 2019.
- [9] Paraisu, "Analisa Rating Lightning Arrester Pada Jaringan Transmisi 70 Kv Tomohon-Teling," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 2, no. 1, 2013.
- [10] M. Septian, "Desain Sistem Proteksi Petir Internal Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya," *Univ. Tanjungpura*.
- [11] D. Saefudin, "Analisis Elektrik Load Flow (Aliran Daya Listrik) Dalam Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Software Etap Power Station 4.00 Di Pt. Lokatex Pekalongan," *Edu Elektr. J.*, vol. 4, no. 1, pp. 17–23, 2015.
- [12] Jayanthana, "ANALISIA PENEMPATAN LIGHTNING ARRESTER PADA CABLE HEAD 60 SEBAGAI PENGAMAN TRANSFORMATOR GIS BANDARA NGURAH RAI," *J. spektrum*, vol. 7, no. 1, pp. 144–151, 2020.
- [13] I. D. Asnidar, "Perencanaan sistem proteksi terhadap petir melalui analisis risiko kemungkinan terkena sambaran langsung petir (studi kasus: gedung smk generasi madani cibinong)," *Univ. Ibn khaldun Bogor*, no. November 2012, 2018.
- [14] L. Aditya, "Analisa Kegagalan Sistem Grounding & Penangkal Petir Pada Apartemen Pancoran Riverside," vol. 6, no. 1, pp. 33–41, 2017.
- [15] jauhari.; Fardhan Arkan.; Wahri Sunanda, "DATA AUTOMATIC MESSAGE SWITCHING CENTER DI PERUM LPPNPI

- PANGKALPINANG,” *Proseding Semin. Nas.*, pp. 128–133, 2019.
- [16] Prasetyo, “Analisis Karakteristik Diurnal Petir Dan Curah Hujan Berdasarkan Data Lightning Detector Dan Helmann Di Medan,” *Instrumentasi*, vol. 43, no. 2, p. 125, 2019, doi: 10.31153/instrumentasi.v43i2.175.
- [17] Rimbawati, Z. Siregar, M. Yusri, and M. Al Qamari, “Penerapan Pembangkit Tenaga Surya Pada Objek Wisata Kampung Sawah Guna Mengurangi Biaya Pembelian Energi listrik,” vol. 4, pp. 145–151, 2021.
- [18] Z. Hakim, “Perencanaan Sistem Proteksi Petir Masjid Raya Mujahidin Menggunakan Metode Bola Bergulir (Rolling Sphere Method),” *Univ. Tanjungpura*, pp. 1–7, 2017.
- [19] E. R. Ibnu Hajar, “Kajian Pemasangan Lightning Arrester Pada Sisi Hv Transformator Daya Unit Satu Gardu Induk Teluk Betung,” *J. Ilm. Energi Kelistrikan*, vol. 9, no. 2, pp. 168–179, 2018, doi: 10.33322/energi.v9i2.42.
- [20] A. Sugiharto, “Pentanahan untuk Perlindungan Peralatan dan Bangunan Gedung,” *Maj. Ilm. Swara Patra*, vol. 9, pp. 34–42, 2019.
- [21] S. Abduh and M. Sulistiani, “Analisis Desain Sistem Grid Pentanahan Pltu Berau Kalimantan Timur 2 X 7 Mw,” *JETri*, vol. 11, pp. 95–110, 2014.
- [22] M. I. Jambak *et al.*, “Analysis of transmission lightning arrester locations using Tflash,” *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.)*, vol. 14, no. 4, pp. 1228–1234, 2016, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v14i4.3792.
- [23] Z. Hakim, “Masjid Raya Mujahidin Menggunakan Metode Bola Bergulir (Rolling Sphere Method),” *Univ. Tanjungpura*, pp. 1–7, 2017.

Project: **ETAP** Page: 1
 Location: **16.0.0C** Date: 08-23-2021
 Contract: SN: 4359168
 Engineer: Study Case: GRD1 Filename: etap212

Ground Grid Summary Report

| Rg Ground Resistance ohm | GPR Ground Potential Rise Volts | Maximum Touch Potential | | | | | Maximum Step Potential | | | | |
|-----------------------------------|--|-------------------------|------------|------|-----------------|------|------------------------|------------|-----|-----------------|-------|
| | | Tolerable Volts | Calculated | | Coordinates (m) | | Tolerable Volts | Calculated | | Coordinates (m) | |
| | | | Volts | % | X | Y | | Volts | % | X | Y |
| 0.990 | 1987.3 | 2090.8 | 1140.6 | 54.6 | 82.9 | 10.5 | 7871.1 | 136.6 | 1.7 | 83.90 | 12.20 |

Total Fault Current: 2.000 kA Reflection Factor (K): -0.999

Maximum Grid Current: 2.006 kA Surface Layer Derating Factor (Cs): 0.917

Decrement Factor (Df): 1.003

Gambar 4.6 Tampilan Tegangan Langkah Dan Tegangan Sentuh Dari Proses Simulasi

Project: **ETAP** Page: 1
 Location: **16.0.0C** Date: 08-23-2021
 Contract: SN: 4359168
 Engineer: Study Case: GRD1 Filename: etap212

Ground Grid Input Data

System Data

| Freq. | Weight | Ambient Temp. | Short-Circuit Current | | | | Fault Duration (Seconds) | | | Plot Step | Extended Boundary Length |
|-------|--------|---------------|-----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------|-----------|--------------------------|
| | | | Total Fault Current | Sf Division Factor | Cp Projection Factor | Tf for Total Fault Duration | Tc for Sizing Ground Conductors | Ts for Available Body Current | | | |
| Hz | kg | °C | kA | X/R | % | % | Duration | Conductors | Body Current | m | m |
| 50.0 | 50 | 40.00 | 2.000 | 1.00 | 100.0 | 100.0 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 1.0 | 0.00 |

Soil Data

| Surface Material | | | Upper Layer Soil | | | Lower Layer Soil | |
|------------------|-------------------|---------|------------------|-------------------|---------|------------------|-------------------|
| Material Type | Resistivity ohm.m | Depth m | Material Type | Resistivity ohm.m | Depth m | Material Type | Resistivity ohm.m |
| Gravel | 8534.4 | 0.500 | Moist soil | 4.0 | 6.00 | Moist soil | 100.0 |

Material Constants

| Conductor/Rod | Type | Conductivity % | α_r Factor @ 20 °C /°C | K0 @ 0 °C | Fusing Temperature °C | Resistivity of Ground Conductor @ 20°C micro ohm.cm | Thermal Capacity Per Unit Volume J/(cm³.°C) |
|---------------|--------------------------|----------------|-------------------------------|-----------|-----------------------|---|---|
| | | | | | | | |
| Rod | Copper-clad steel wire 1 | 40.0 | 0.00378 | 245.0 | 1084.0 | 4.40 | 3.85 |

Conductor Data

| Label | Type | mm² | From | | | To | | | Length m | Insulated Yes/No | Cost \$/m |
|-------|-----------------------------|-----|-------|-------|------|-------|-------|------|----------|------------------|-----------|
| | | | X | Y | Z | X | Y | Z | | | |
| --- | Copper, annealed soft-drawn | 50 | 76.30 | 13.50 | 1.00 | 91.30 | 13.50 | 1.00 | 15.00 | YES | 10.00 |
| --- | Copper, annealed soft-drawn | 50 | 91.30 | 13.50 | 1.00 | 91.30 | 28.50 | 1.00 | 15.00 | YES | 10.00 |
| --- | Copper, annealed soft-drawn | 50 | 76.30 | 28.50 | 1.00 | 91.30 | 28.50 | 1.00 | 15.00 | YES | 10.00 |
| --- | Copper, annealed soft-drawn | 50 | 76.30 | 13.50 | 1.00 | 76.30 | 28.50 | 1.00 | 15.00 | YES | 10.00 |

Rod Data

| Label | Type | Diameter cm | From | | | To | | | Length m | Insulated Yes/No | Cost \$/Rod |
|-------|--------------------------|-------------|-------|-------|------|-------|-------|------|----------|------------------|-------------|
| | | | X | Y | Z | X | Y | Z | | | |
| R0 | Copper-clad steel wire 1 | 4.000 | 83.90 | 13.50 | 0.50 | 83.90 | 13.50 | 6.50 | 6.00 | NO | 100.00 |

Gambar 4.7 Data Hasil Simulasi