

**EVALUASI PENGARUH PERUBAHAN JUMLAH DAN
PANJANG KONDUKTOR *ROD* TIAP BATANG TERHADAP
RESISTANSI PENTANAHAN GITET 500 KV UNGARAN**

LAPORAN TUGAS AKHIR

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana S1 pada
Jurusan Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung**



OLEH

SLAMET MUHSININ

NIM. 30601700075

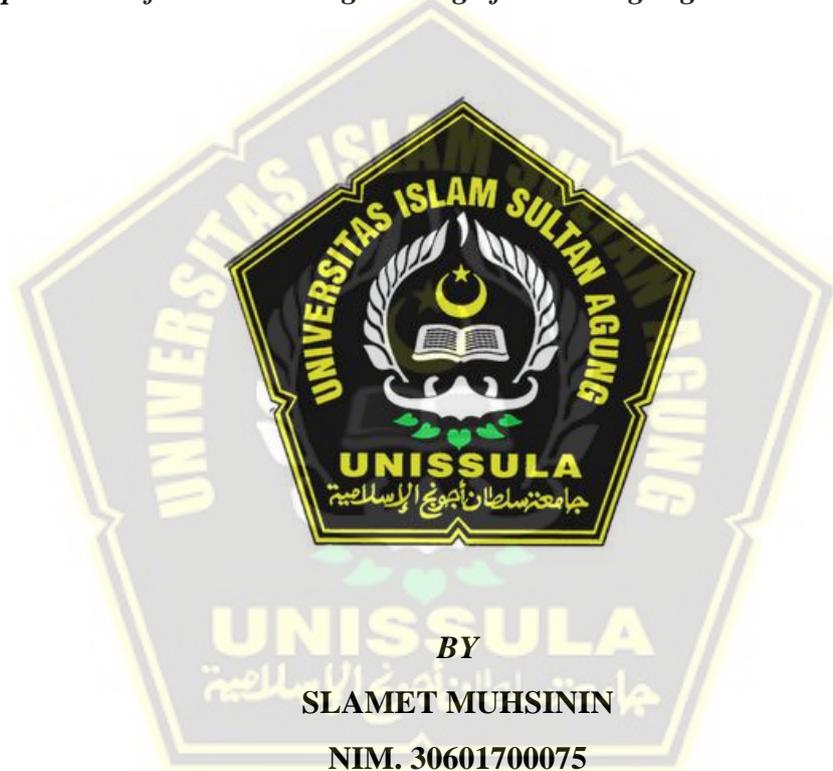
**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2021

***EVALUATION THE EFFECT OF CHANGING THE NUMBER
AND LENGTH OF THE ROD CONDUCTORS PER ROD TO
GROUNDING RESISTANCE OF GITET 500 KV UNGARAN***

FINAL REPORT

***To Complete the Requirement to Obtain a Bachelor's Degree (S1) at
Department of Electrical Engineering of Sultan Agung Islamic University***



BY
SLAMET MUHSININ

NIM. 30601700075

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

2021

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**EVALUASI PENGARUH PERUBAHAN JUMLAH DAN PANJANG KONDUKTOR ROD TIAP BATANG TERHADAP RESISTANSI PENTANAHAN GITET 500 KV UNGARAN**” ini disusun oleh:

Nama : Slamet Muhsinin
NIM : 30601700075
Program Studi : S1 Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh Dosen Pembimbing pada:

Hari : Senin
Tanggal : 20 Desember 2021

Pembimbing I



Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T.

NIDN: 0618066301

Pembimbing II



Ir. Ida Widiastuti, M.T.

NIDN: 0005036501

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.

NIDN: 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**EVALUASI PENGARUH PERUBAHAN JUMLAH DAN PANJANG KONDUKTOR ROD TIAP BATANG TERHADAP RESISTANSI PENTANAHAN GITET 500 KV UNGARAN**” ini telah dipertahankan di depan Dosen Penguji Tugas Akhir pada :

Hari : Senin

Tanggal : 20 Desember 2021

TIM PENGUJI

Anggota I



Dedi Nugroho, S.T., M.T.

NIDN: 0617126602

Anggota II



Munaf Ismail, S.T., M.T.

NIDN: 0613127302

Ketua Penguji



Gunawan, S.T., M.T.

NIDN: 0607117101

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Slamet Muhsinin
NIM : 30601700075
Fakultas : Teknologi Industri
Program Studi : S1 Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro di Fakultas Teknologi Industri UNISSULA Semarang dengan judul "Evaluasi Pengaruh Perubahan Jumlah dan Panjang Konduktor Rod Tiap Batang Terhadap Resistansi Pentanahan GIEEI 500 KV Ungaran", adalah asli (orisinal) dan bukan menjiplak (plagiat) dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan dimanapun dalam bentuk apapun baik sebagian atau keseluruhan, kecuali yang secara tertulis dicanu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab. Apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa karya Tugas Akhir tersebut adalah hasil karya orang lain atau pihak lain, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis.

Semarang, 20 Desember 2021

Yang Menyatakan



Slamet Muhsinin

NIM. 30601700075

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Slamet Muhsinin
NIM : 30601700075
Program Studi : SI Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri
Alamat asal : Kel. Trompo, RT 04/01, Ke. Kendal, Kab. Kendal
No. HP / E-mail : 087831003421 / slain95@std.unissula.ac.id

Dengan ini saya menyerahkan Karya Ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul "EVALUASI PENGARUH PERUBAHAN JUMLAH DAN PANJANG KONDUKTOR ROD TIAP BATANG TERHADAP RESISTANSI PENTANAHAN GIGIT 500 KV UNGARAN" dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih medikan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademik selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila di kemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta / Plagiarisme dalam Karya Ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 20 Desember 2021

Yang Menyatakan




Slamet Muhsinin

NIM. 30601700075

HALAMAN PERSEMBAHAN

Pertama,

Tugas Akhir ini saya persembahkan kepada kedua orang tua saya yang sangat saya cintai (Bapak Munadi dan Ibu Musripah) yang telah membesarkan saya dan menjadi motivasi hidup saya dalam menyelesaikan studi.

Kedua,

Kepada kakak saya (Zaenudin), yang telah menyemangati dan mendoakan saya. Sebuah puji syukur karena dapat menyelesaikan bangku perkuliahan.

Ketiga,

Kepada calon istri saya (Krismon Wahyu Ardiana), yang selalu menyemangati dan mendoakan saya.

Keempat,

Untuk Dosen Pembimbing dan seluruh Dosen yang selalu memberikan saran dan pengarahannya. Serta teman-teman senasib seperjuangan Tugas Akhir dan tidak lupa seluruh teman-teman Elektro angkatan 2017.

HALAMAN MOTTO

“ Bagi seorang engineer, semua permasalahan yang dihadapi harus bisa diselesaikan secara menyeluruh”

(Rachman Setiawan, Ph.D)

“Jangan pergi mengikuti kemana jalan akan berujung. Buat jalanmu sendiri dan tinggalkanlah jejak”

(Ralph Waldo Emerson)

“Rahasia kesuksesan adalah mengetahui yang orang lain tidak ketahui”

(Aristotle Onassis)

“Sukses adalah saat persiapan dan kesempatan bertemu”

(Bobby Unser)

“Pendidikan adalah kemampuan untuk mendengarkan segala sesuatu tanpa membuatmu kehilangan temperamen atau rasa percaya diri”

(Robert Frost)

KATA PENGANTAR

Bismillahirrohmanirrohiim

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan Nikmat dan rahmatNya sehingga penulis masih berkesempatan untuk menuntut ilmu dalam keadaan sehat wal'afiat. Shalawat serta Salam turunkan senantiasa kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW, semoga kelak kita mendapatkan syafaatnya di *Yaumul Qiyamah* nanti. *Amiin Yaa Robbal 'Alamin*.

Penyusunan Laporan Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada Fakultas Teknologi Industri di Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam penulisan Tugas Akhir ini, tentunya banyak pihak yang telah memberikan bantuan baik moril maupun materil. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan *jazaakumullah khoiron katsiroh* dan terima kasih yang tiada hingganya kepada :

1. Bapak Drs. H. Bedjo Santoso, MT., Ph.D, selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Dr. Ir. Novi Marlyana, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Bapak Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T. dan Ibu Ir. Ida Widihastuti, M.T., selaku dosen pembimbing I dan dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan dorongan dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Muhammad Khosyi'in, S.T., M.T., selaku Koordinator Tugas Akhir Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
6. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas ilmu, bimbingan dan bantuannya hingga penulis selesai menyusun Laporan Tugas akhir ini.

7. Kedua orangtua penulis, yaitu Bapak Munadi dan Ibu Musripah, yang selalu memberikan dukungan, doa, semangat, perhatian, kasih sayang, dan kesabaran yang tak pernah henti kepada penulis dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini.
8. Kepada kakak penulis, Zaenudin, yang penulis cintai, yang senantiasa memberikan motivasi, semangat, serta dukungan kepada penulis.
9. Calon istri penulis, Krismon Wahyu Ardiana, yang selalu memberikan motivasi, dukungan, doa, dan perhatian yang besar dan tulus.
10. Teman-teman senasib seperjuangan Teknik Elektro kelas sore angkatan 2017, yang selalu memberikan keceriaan, semangat, dan doa.
11. Semua pihak yang telah terlibat dan membantu, mendukung, serta mendoakan dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis juga menyadari bahwa dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan, baik dari sisi materi maupun penyajiannya. Oleh sebab itu, penulis meminta maaf dan mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak, sehingga laporan ini dapat menjadi lebih baik ke depannya. Akhirnya, penulis sangat berharap semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi pembaca, khususnya bagi penulis juga. *Wallahu a'lam.*

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Semarang, 20 Desember 2021



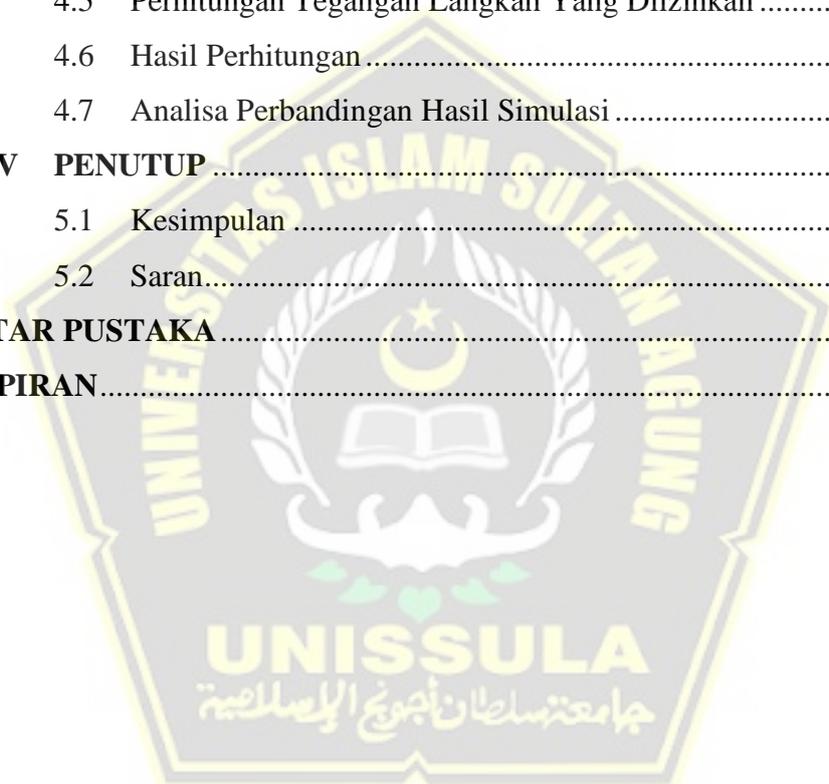
Slamet Muhsinin

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------|
| HALAMAN JUDUL (BAHASA INDONESIA) | i |
| HALAMAN JUDUL (BAHASA INGGRIS) | ii |
| LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING | iii |
| LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI | iv |
| SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR | v |
| PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH | vi |
| HALAMAN PERSEMBAHAN | vii |
| HALAMAN MOTTO | viii |
| KATA PENGANTAR | ix |
| DAFTAR ISI | xi |
| DAFTAR TABEL | xiv |
| DAFTAR GAMBAR | xv |
| DAFTAR LAMPIRAN | xvi |
| ABSTRAK (BAHASA INDONESIA) | xvii |
| ABSTRACT (BAHASA INGGRIS) | xviii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 4 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 4 |
| 1.6 Sistematika Penulisan Laporan | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI | 6 |
| 2.1 Tinjauan Pustaka | 6 |
| 2.2 Landasan Teori..... | 7 |
| 2.2.1 Gardu Induk..... | 7 |
| 2.2.2 Sistem Pentanahan..... | 8 |
| 2.2.3 Sistem Pentanahan <i>Grid</i> | 9 |
| 2.2.4 Sistem Pentanahan <i>Rod</i> | 10 |

| | | |
|----------------|---|----|
| 2.2.5 | Sistem Pentanahan <i>Grid-Rod</i> | 10 |
| 2.2.6 | Resistansi Jenis Tanah..... | 13 |
| 2.2.7 | Jenis Bahaya Gangguan | 14 |
| 2.2.8 | Arus <i>Fibrilasi</i> | 15 |
| 2.2.9 | Arus Gangguan Tanah (Arus <i>Grid</i> Maksimum) | 16 |
| 2.2.10 | Tegangan Sentuh Yang Diizinkan..... | 17 |
| 2.2.11 | Tegangan Sentuh Sebenarnya | 19 |
| 2.2.12 | Tegangan Langkah Yang Diizinkan..... | 21 |
| 2.2.13 | Tegangan Langkah Sebenarnya | 24 |
| 2.2.14 | <i>Ground Potential rise</i> | 25 |
| 2.2.15 | Komponen Pentanahan..... | 25 |
| BAB III | METODOLOGI PENELITIAN | 30 |
| 3.1 | Model Penelitian | 30 |
| 3.2 | Obyek Penelitian | 31 |
| 3.3 | Peralatan Penelitian..... | 32 |
| 3.4 | Data Penelitian | 32 |
| 3.5 | Tahapan Penelitian | 33 |
| BAB IV | HASIL DAN PEMBAHASAN | 35 |
| 4.1 | Pemetaan Perubahan Panjang Konduktor <i>Rod</i> Pada Sistem Pentanahan | 37 |
| 4.2 | Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor <i>Rod</i> | 37 |
| 4.2.1 | Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor <i>Rod</i> Terhadap Resistansi Pentanahan | 38 |
| 4.2.2 | Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor <i>Rod</i> Terhadap Tegangan Sentuh Sebenarnya | 43 |
| 4.2.3 | Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor <i>Rod</i> Terhadap Tegangan Langkah Sebenarnya | 48 |
| 4.2.4 | Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor <i>Rod</i> Terhadap <i>Ground Potential Rise</i> | 52 |
| 4.3 | Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor <i>Rod</i> Tiap Batang .. | 55 |
| 4.3.1 | Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor <i>Rod</i> Tiap | |

| | | |
|--------------|---|----|
| | Batang Terhadap Resistansi Pentanahan | 56 |
| 4.3.2 | Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor <i>Rod</i> Tiap Batang Terhadap Tegangan Sentuh Sebenarnya | 58 |
| 4.3.3 | Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor <i>Rod</i> Tiap Batang Terhadap Tegangan Langkah Sebenarnya | 60 |
| 4.3.4 | Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor <i>Rod</i> Tiap Batang Terhadap <i>Ground Potential Rise</i> | 62 |
| 4.4 | Perhitungan Tegangan Sentuh Yang Diizinkan | 64 |
| 4.5 | Perhitungan Tegangan Langkah Yang Diizinkan | 66 |
| 4.6 | Hasil Perhitungan | 67 |
| 4.7 | Analisa Perbandingan Hasil Simulasi | 68 |
| BAB V | PENUTUP | 71 |
| 5.1 | Kesimpulan | 71 |
| 5.2 | Saran | 72 |
| | DAFTAR PUSTAKA | 73 |
| | LAMPIRAN | 75 |



DAFTAR TABEL

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabel 2.1 | Tahanan jenis tanah dari berbagai jenis tanah | 14 |
| Tabel 2.2 | Tegangan sentuh dan lama gangguan yang diizinkan | 19 |
| Tabel 2.3 | Tegangan langkah dan lama gangguan yang diizinkan | 23 |
| Tabel 4.1 | Data-data sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran | 36 |
| Tabel 4.2 | Pemetaan simulasi perhitungan | 37 |
| Tabel 4.3 | Perubahan jumlah konduktor <i>rod</i> terhadap nilai resistansi pentanahan | 41 |
| Tabel 4.4 | Perubahan jumlah konduktor <i>rod</i> terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya | 46 |
| Tabel 4.5 | Perubahan jumlah konduktor <i>rod</i> terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya | 51 |
| Tabel 4.6 | Perubahan jumlah konduktor <i>rod</i> terhadap nilai <i>ground potential rise</i> | 54 |
| Tabel 4.7 | Perubahan panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang terhadap nilai resistansi pentanahan | 57 |
| Tabel 4.8 | Perubahan panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya..... | 59 |
| Tabel 4.9 | Perubahan panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya | 61 |
| Tabel 4.10 | Perubahan panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang terhadap nilai <i>ground potential rise</i> | 63 |
| Tabel 4.11 | Hasil perhitungan sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran..... | 67 |
| Tabel 4.12 | Hasil perhitungan untuk panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang = 0,1 meter | 69 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Model sistem pentanahan <i>grid</i> | 9 |
| Gambar 2.2 | Model sistem pentanahan <i>grid-rod</i> | 11 |
| Gambar 2.3 | Penentuan panjang konduktor <i>grid</i> | 12 |
| Gambar 2.4 | Ilustrasi tegangan sentuh | 18 |
| Gambar 2.5 | Keadaan dasar kejut..... | 20 |
| Gambar 2.6 | Tegangan langkah yang diketanahkan..... | 22 |
| Gambar 2.7 | Pemasangan elektroda batang..... | 27 |
| Gambar 2.8 | Pemasangan elektroda plat | 28 |
| Gambar 2.9 | Pemasangan elektroda pita | 28 |
| Gambar 3.1 | Model penelitian..... | 30 |
| Gambar 3.2 | Serandang GITET 500 KV Ungaran area <i>switchyard</i> | 31 |
| Gambar 3.3 | Diagram alir (<i>flowchart</i>) tahapan penelitian..... | 33 |
| Gambar 4.1 | Grafik perubahan jumlah konduktor rod terhadap resistansi ... pentanahan..... | 41 |
| Gambar 4.2 | Grafik perubahan jumlah konduktor rod terhadap tegangan sentuh sebenarnya..... | 46 |
| Gambar 4.3 | Grafik perubahan jumlah konduktor rod terhadap tegangan langkah sebenarnya | 50 |
| Gambar 4.4 | Grafik perubahan jumlah konduktor rod terhadap ground | 53 |
| Gambar 4.5 | Grafik perubahan panjang konduktor rod tiap batang..... | 56 |
| Gambar 4.6 | Grafik perubahan panjang konduktor rod tiap batang..... | 58 |
| Gambar 4.7 | Grafik perubahan panjang konduktor rod tiap batang..... | 60 |
| Gambar 4.8 | Grafik perubahan panjang konduktor rod tiap batang..... | 63 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | | |
|-------------------|--|----|
| Lampiran 1 | <i>Layout</i> sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran | 75 |
| Lampiran 2 | Makalah Tugas Akhir | 76 |
| Lampiran 3 | Hasil Turnitin..... | 84 |
| Lampiran 4 | Lembar Revisi Seminar Proposal Tugas Akhir | 85 |
| Lampiran 5 | Lembar Revisi Seminar Hasil Tugas Akhir..... | 87 |
| Lampiran 6 | Lembar Revisi Sidang Tugas Akhir | 89 |



ABSTRAK

Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran termasuk dalam salah satu GITET yang tersusun dalam sistem interkoneksi tenaga listrik di Jawa. Syarat keamanan Gardu Induk berdasarkan IEEE/ANSI Std 80/2013 adalah resistansi pentanahan $\leq 1 \Omega$, tegangan sentuh < tegangan sentuh yang diizinkan, dan tegangan langkah serta GPR < tegangan langkah yang diizinkan. Permasalahan yang terjadi adalah gangguan fasa ke tanah yang menyebabkan mengalirnya arus gangguan secara langsung ke tanah, yang menimbulkan gradien tegangan pada permukaan tanah, berakibat membahayakan keselamatan manusia di area *switchyard*. Konstruksi konduktor pentanahan terutama konduktor *rod* yang pemasangannya ditanam di bawah permukaan tanah, menjadikannya rentan berkarat karena kelembaban tanah dan suhu di dalam tanah yang lebih panas. Usia konduktor *rod* yang sudah bertahun-tahun juga membuat konduktivitas dan daya tahannya semakin menurun dari waktu ke waktu, sehingga dikhawatirkan berdampak pada menurunnya performa konduktor *rod* sebagai piranti pentanahan. Solusinya adalah dibuat sistem pentanahan peralatan dan perlu adanya evaluasi pengaruh kondisi konduktor *rod* dalam sistem pentanahan. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai resistansi pentanahan adalah jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang. Penelitian ini membahas tentang evaluasi pengaruh perubahan jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap resistansi pentanahan GITET 500 KV Ungaran.

Fokus penelitian dilakukan dengan mengubah jumlah dan panjang tiap batang *rod* melalui simulasi untuk mengetahui pengaruhnya terhadap resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah, dan GPR. Tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diizinkan akan dihitung setelahnya sebagai verifikasi atas simulasi hasil modifikasi. Model ditetapkan sebagai sistem pentanahan *grid-rod*. Parameter yang ditentukan meliputi: luas area, panjang konduktor, resistivitas tanah, kedalaman penanaman konduktor, panjang dan lebar konduktor *grid*, serta jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pentanahan masih dalam kondisi baik, dengan resistansi pentanahan $0,2274 \Omega$, tegangan sentuh 57,94 volt, tegangan langkah 30,96 volt, dan GPR 448,07 volt. Perubahan jumlah dan panjang konduktor *rod* berpengaruh terhadap parameter pentanahan. Semakin banyak jumlah dan semakin panjang konduktor *rod* tiap batang, maka semakin kecil resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan GPR. Hasil modifikasi terbaik adalah untuk panjang konduktor *rod* tiap batang pada 0,1 meter dari yang semula 3 meter, dengan selisih resistansi pentanahan 0,3 %, tegangan sentuh 6,9 %, tegangan langkah 6,85 %, dan GPR 0,25 % dari nilai semula.

Kata kunci : Konduktor *Rod*, Resistansi Pentanahan, GITET 500 KV

ABSTRACT

The 500 KV Ungaran Extra High Voltage Substation (GITET) is included in one of the GITETs arranged in an electric power interconnection system in Java. Substation safety requirements based on IEEE/ANSI Std 80/2013 are ground resistance 1Ω , touch voltage $<$ allowable touch voltage, and step voltage and GPR $<$ allowable step voltage. The problem that occurs is the phase to ground fault which causes the fault current to flow directly to the ground, which causes a voltage gradient on the ground surface, resulting in endangering human safety in the switchyard area. The construction of grounding conductors, especially rod conductors whose installation is planted below the ground surface, makes them susceptible to rusting due to soil moisture and warmer ground temperatures. The age of the rod conductor which has been for many years also makes its conductivity and durability decrease from time to time, so it is feared that it will affect the performance of the rod conductor as a grounding device. The solution is to build an equipment grounding system and it is necessary to evaluate the effect of the rod conductor condition in the grounding system. One of the factors that affect the value of grounding resistance is the number and length of rod conductors per rod. This study discusses the evaluation of the effect of changing the number and length of the rod conductors per rod on the GITET 500 KV Ungaran grounding resistance.

The focus of the research is to change the number and length of each rod through simulation to determine its effect on grounding resistance, touch voltage and step voltage, and GPR. The allowable touch stress and step voltage will be calculated afterwards as a verification of the modified simulation. The model is set as a grid-rod grounding system. Parameters determined include: area, conductor length, soil resistivity, conductor embedding depth, length and width of the grid conductor, as well as the number and length of rod conductors per rod.

The results showed that the grounding system was still in good condition, with a grounding resistance of 0.2274 Ω , a touch voltage of 57.94 volts, a step voltage of 30.96 volts, and a GPR of 448.07 volts. Changes in the number and length of rod conductors affect the grounding parameters. The more the number and the longer the rod conductors per rod, the smaller the ground resistance, touch voltage and actual step voltage, and GPR. The best modification results are for the length of the conductor rod for each rod at 0.1 meters from the original 3 meters, with a difference of 0.3% grounding resistance, 6.9% touch voltage, 6.85% step voltage, and 0.25% GPR. from the original value.

Keywords : Rod Conductor, Grounding Resistance, GITET 500 KV

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem interkoneksi tenaga listrik di Jawa tersusun atas beberapa pusat pembangkit tenaga listrik dan beberapa Gardu Induk (GI) yang terhubung melalui saluran transmisi, yang akan tersalur ke konsumen melewati saluran distribusi. Gardu Induk terdiri atas Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV dan Gardu Induk Tegangan Tinggi (GITT) 150 KV. GITET 500 KV Ungaran termasuk dalam salah satu GITET yang tersusun dalam sistem interkoneksi tenaga listrik tersebut [1].

Kehandalan suatu Gardu Induk dapat dilihat dari kehandalan sistem pentanahannya. GITET 500 KV Ungaran memakai sistem pentanahan *grid-rod*. Untuk memperoleh standar keamanan yang memadai dalam sistem pentanahan Gardu Induk, diperlukan batasan parameter pentanahan sesuai IEEE/ANSI Std 80/2013 [2], antara lain:

- a.) Nilai resistansi pentanahan $\leq 1 \Omega$,
- b.) Tegangan sentuh < tegangan sentuh yang diizinkan,
- c.) Tegangan langkah < tegangan langkah yang diizinkan,
- d.) *Ground potential rise* < tegangan langkah yang diizinkan.

Parameter-parameter tersebut dipengaruhi oleh resistansi jenis tanah (ρ), luas area pentanahan (A), kedalaman konduktor (h), dan panjang total konduktor (L). Dalam sistem pentanahan *grid-rod*, panjang total konduktor didapat dengan menjumlahkan total panjang konduktor *grid* (L_c) dan total panjang konduktor *rod* (L_r). Panjang konduktor *rod* dipengaruhi oleh jumlah konduktor *rod* (Q) dan panjang konduktor *rod* tiap batang (P).

GITET 500 KV Ungaran memiliki luas area sistem pentanahan 41280 m², dengan sistem pentanahan yang dipakai adalah model *grid-rod* [3]. Luas area dan pemodelan pentanahan metode *grid-rod* ini dapat mempengaruhi berapa banyak dan berapa panjang konduktor *rod* tiap batang yang digunakan dalam sistem pentanahannya. Terlebih lagi, terdapat banyak komponen utama yang terpasang

pada GITET 500 KV Ungaran. Konfigurasi ini akan mempengaruhi besarnya nilai resistansi pentanahan, tegangan langkah sebenarnya, tegangan sentuh sebenarnya, dan GPR pada GITET 500 KV Ungaran.

Permasalahan yang terjadi pada GITET 500 KV Ungaran adalah gangguan fasa ke tanah yang menyebabkan mengalirnya arus gangguan secara langsung ke tanah. Arus gangguan ini dapat mengalir ke peralatan-peralatan yang terbuat dari metal dan dapat mengalir ke piranti pentanahan, yang dapat menimbulkan gradien tegangan antara peralatan dengan peralatan, peralatan dengan tanah, dan tegangan pada permukaan tanah. Hal ini berakibat membahayakan keselamatan manusia di area *switchyard* [4].

Permasalahan lain yaitu konstruksi konduktor pentanahan terutama konduktor *rod* yang pemasangannya ditanam di bawah permukaan tanah, menjadikannya rentan berkarat karena kelembaban tanah dan suhu di dalam tanah yang lebih panas. Selain itu, usia konduktor *rod* yang sudah bertahun-tahun juga membuat konduktivitas dan daya tahannya semakin menurun dari waktu ke waktu. Hal tersebut, dikhawatirkan berdampak pada menurunnya kemampuan dan performa konduktor *rod* sebagai piranti pentanahan.

Solusi atas permasalahan tersebut adalah dibuat sistem pentanahan peralatan dan perlu adanya evaluasi pengaruh kondisi konduktor *rod* dalam sistem pentanahan. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai resistansi pentanahan adalah jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang.

Penelitian pada obyek yang sama, yang dilakukan oleh Meike Alif Latifah [3] dan Ahmad Riyanda Saputra [5], telah membahas pengaruh konfigurasi berupa perubahan jarak antar konduktor paralel, kedalaman penanaman konduktor, dan resistansi jenis tanah yang berbeda terhadap parameter keamanan sistem pentanahan yang meliputi resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah. Akan tetapi, parameter jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang masih belum dilakukan pembahasan, padahal sesuai permasalahan yang telah penulis jabarkan, seharusnya ada pengaruh dari jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap keamanan sistem pentanahan Gardu Induk tersebut.

Kedua penelitian tersebut juga belum membahas pengaruhnya terhadap satu parameter keamanan utama yaitu nilai *ground potential rise* (GPR). Oleh karena itu, penulis tertarik untuk mengevaluasi pengaruh perubahan jumlah dan panjang konduktor *rod* terhadap resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah, serta GPR secara lengkap untuk mengetahui keamanan sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini mengambil judul “Evaluasi Pengaruh Perubahan Jumlah dan Panjang Konduktor *Rod* Tiap Batang Terhadap Resistansi Pentanahan GITET 500 KV Ungaran”. Seiring dengan perkembangan *software engineering*, maka digunakan *Matlab R2015a* untuk membantu mempermudah analisa perhitungan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari latar belakang di atas, maka permasalahan yang terjadi dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana membuat sistem pentanahan Gardu Induk yang aman untuk makhluk hidup di sekitar area Gardu Induk tersebut?
2. Bagaimana mengevaluasi pengaruh perubahan jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap resistansi pentanahan GITET 500 KV Ungaran?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih fokus dan mendalam, peneliti membatasi masalahnya sebagai berikut:

1. Metode sistem pentanahan *grid-rod* digunakan sebagai dasar mencari nilai-nilai yang diperlukan.
2. Nilai variabel awal yang menjadi data diambil dari GITET 500 KV Ungaran.
3. Data mengenai nilai koefisien maupun kontanta lainnya, diambil dari data IEEE/ANSI Std 80/2013 dan PUIL.
4. Perhitungan sistem pentanahan menggunakan bantuan simulasi dari *software Matlab R2015a*.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Membuat sistem pentanahan Gardu Induk yang aman untuk makhluk hidup di sekitarnya yang memenuhi standar keamanan dalam IEEE/ANSI Std 80/2013.
2. Mengevaluasi pengaruh perubahan jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap resistansi pentanahan GITET 500 KV Ungaran.
3. Menentukan berapa jumlah konduktor *rod* atau panjang konduktor *rod* tiap batang yang paling cocok untuk meminimalisir besarnya resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *ground potential rise*.

1.5 Manfaat Penelitian

Diharapkan, penelitian ini dapat memberi manfaat berupa:

- a. Menambah pengetahuan dalam bidang teknik elektro khususnya konsentrasi tenaga listrik dalam mengevaluasi sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran.
- b. Membantu mengevaluasi keamanan sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran apabila terjadi gangguan fasa ke tanah guna melindungi peralatan-peralatan tegangan tinggi serta manusia di sekitar GITET tersebut.

1.6 Sistematika Penulisan Laporan

Penulisan dalam laporan Tugas Akhir ini terdiri atas 5 bab, yaitu pendahuluan, tinjauan pustaka dan landasan teori, metodologi penelitian, hasil dan pembahasan, dan penutup. Sistematika penulisan yang digunakan dalam laporan Tugas Akhir ini meliputi:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab pendahuluan ini membahas tentang latar belakang masalah, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan metode penulisan laporan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Bab ini menginformasikan tentang tinjauan pustaka dari penelitian dalam jurnal-jurnal yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, dasar

teori dari Gardu Induk, sistem pentanahan, tahanan jenis tanah, jenis bahaya gangguan, dan komponen pentanahan.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

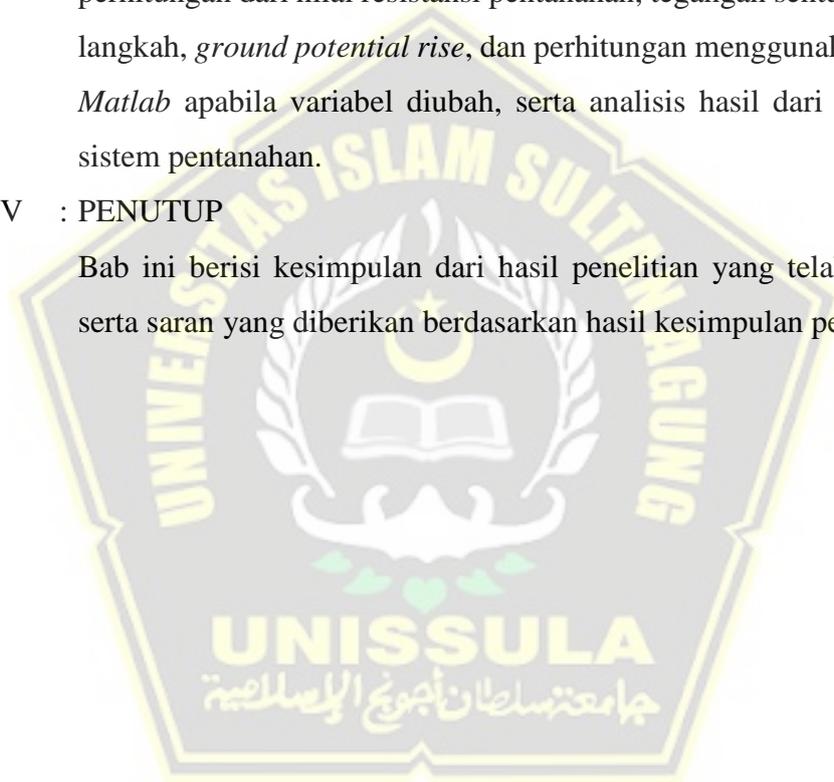
Bab ini memaparkan gambaran umum mengenai tahapan atau prosedur dalam metode penelitian dari awal sampai akhir untuk tujuan menganalisis sistem pentanahan.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini mengulas tentang hasil dari penelitian yang dilakukan, meliputi perhitungan dari nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh, tegangan langkah, *ground potential rise*, dan perhitungan menggunakan simulasi *Matlab* apabila variabel diubah, serta analisis hasil dari perhitungan sistem pentanahan.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran yang diberikan berdasarkan hasil kesimpulan penelitian.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Adapun tujuan dari pengambilan tinjauan pustaka berikut adalah sebagai pembandingan atau referensi dari penelitian-penelitian yang sudah terlebih dahulu dilakukan sebelumnya, yang masih berkaitan dengan topik penelitian yang akan dibahas dalam penelitian ini. Beberapa penelitian terdahulu yang pernah dilakukan pada sistem pentanahan adalah sebagai berikut:

- a. Analisa Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling dengan Konstruksi *Grid* (Kisi-kisi) [6]. Penelitian ini membahas tentang dua metode perhitungan pentanahan *grid*, yaitu perhitungan tanpa batang pentanahan dan dengan batang pentanahan. Nilai resistansi *grid* tanpa batang pentanahan adalah $0,47 \Omega$, sedangkan jika dengan batang pentanahan nilainya menjadi $0,18 \Omega$. Hasilnya, solusi modifikasi berupa penambahan batang elektroda mampu menghasilkan nilai resistansi yang lebih rendah.
- b. Pengaruh Panjang Elektroda, Resistivitas Tanah, dan Frekuensi Arus Petir Terhadap Impedansi Pentanahan Elektroda Batang [7]. Penelitian ini membahas tentang bagaimana dampak yang terjadi pada impedansi pentanahan suatu elektroda batang melalui media simulasi perubahan panjang elektroda pentanahan, tahanan jenis tanah, arus puncak petir, dan frekuensi arus petir. Didapatkan hasil berupa penurunan nilai dari impedansi pentanahan ketika setiap panjang elektroda ditambah $0,5 \text{ m}$ adalah $18,65\%$ pada resistivitas tanah $50 \Omega\text{m}$, dan $37,23\%$ pada resistivitas tanah $100 \Omega\text{m}$. Sehingga impedansi tanah semakin kecil jika elektroda semakin panjang dan resistivitas tanah semakin kecil.
- c. Analisa Dampak Perubahan Jarak Antar Konduktor dan Kedalaman pada Sistem Pentanahan *Grid-Rod* Berbasis IEEE Std 80-2000 [8]. Meneliti tentang nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh, dan tegangan langkah yang dihasilkan apabila jarak antar konduktor dan kedalaman sistem pentanahan dimodifikasi. Besarnya resistansi pentanahan, tegangan sentuh, dan tegangan langkah dihitung

secara manual berdasarkan data yang ada. Kemudian dilakukan perubahan pada nilai jarak antar konduktor dan kedalaman, kemudian menghitung kembali resistansi pentanahan, tegangan sentuh, dan tegangan langkah menggunakan *software matlab*. Hasilnya, nilai resistansi pentanahan berada di kisaran $0,3 \Omega$, dimana masih dinilai aman karena di bawah spesifikasi, yaitu $R \leq 1\Omega$. Begitu juga untuk nilai tegangan sentuhnya sebesar 59,21 volt dan tegangan langkahnya 57,39 volt, yang keduanya masih dalam batas aman. Sehingga, semakin rapat jarak antar konduktor, maka nilai resistansi pentanahan dan tegangan sentuh semakin menurun, sementara tegangan langkah meningkat. Kemudian tegangan sentuh dan tegangan langkah akan semakin kecil nilainya jika penanaman konduktor semakin dalam.

2.2 Landasan Teori

Landasan teori berisi beberapa teori-teori dan persamaan-persamaan terkait sistem pentanahan yang akan diimplementasikan dalam perhitungan pada bab berikutnya. Landasan teori ini di antaranya adalah mengenai gardu induk, sistem pentanahan, resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diizinkan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, *ground potential rise*, dan lain sebagainya.

2.2.1 Gardu Induk

Gardu Induk (GI) merupakan tempat peralatan-peralatan listrik untuk menghubungkan dan memutuskan serta mengatur tegangan listrik yang dibangkitkan dari pembangkit dan merupakan penghubung saluran sistem transmisi. Fungsi dari Gardu Induk adalah untuk mengalirkan daya listrik dari saluran transmisi kemudian didistribusikan kepada konsumen. Fungsi lainnya adalah sebagai tempat pengoperasian, pengontrolan peralatan yang berada di Gardu Induk, sebagai sarana komunikasi antar Gardu Induk satu dengan Gardu Induk yang lainnya dan untuk menurunkan atau menaikkan daya listrik.

Adapun beberapa peralatan tegangan tinggi yang terdapat dalam Gardu Induk antara lain:

1. Transformator daya,
2. Sakelar pemisah tegangan (PMS),
3. Sakelar pemutus tegangan (PMT),
4. *Current transformer (CT)*,
5. *Potential transformer (PT)*,
6. *Lightning arrester*,
7. Baterai DC (aki).

2.2.2 Sistem Pentanahan

Sistem pentanahan adalah sistem pengamanan yang menjadi bagian penting dari sistem tenaga listrik. Sistem pentanahan Gardu Induk bertujuan untuk mengamankan peralatan-peralatan, komponen-komponen instalasi, serta manusia di area Gardu Induk tersebut dari bahaya sengatan listrik maupun bahaya tegangan atau arus abnormal. Secara garis besar, sistem pentanahan merupakan sistem hubungan penghantar yang menghubungkan bumi atau tanah dengan peralatan dan instalasi.

Jenis-jenis sistem pentanahan dibagi menjadi 3, di antaranya adalah:

1. Pentanahan peralatan, yang dibagi menjadi 2, yaitu:
 - a. Pentanahan *Rod*,
 - b. Pentanahan *Grid*,
2. Pentanahan penangkal petir,
3. Pentanahan sistem.

Sistem pentanahan peralatan adalah hubungan dengan tanah antara rangka suatu peralatan listrik atau badan peralatan listrik. Peralatan listrik tersebut di antaranya adalah transformator, generator, motor, pemutus daya, *lightning arrester*, dan bagian-bagian logam lainnya yang tidak memiliki arus dan tidak dialiri arus pada keadaan normal. Besar kecilnya nilai resistansi antara *massa (body)* yang terhubung dengan tanah biasa disebut dengan resistansi pentanahan. Besarnya nilai resistansi pentanahan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu:

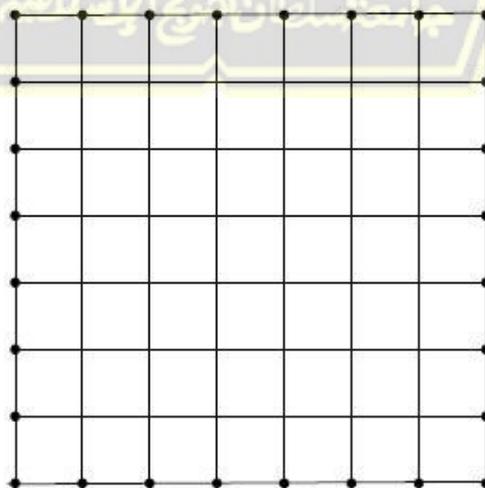
1. *Resistivitas* tanah,
2. Panjang elektroda dari sistem pentanahan,

3. Kedalaman penanaman konduktor,
4. Luas penampang (area) pentanahan.

2.2.3 Sistem Pentanahan *Grid*

Sistem pentanahan *grid* merupakan sistem pentanahan yang diaplikasikan dengan cara menanam batang-batang elektroda yang sejajar di permukaan tanah. Penanaman batang-batang elektroda tersebut memiliki tujuan untuk meratakan tegangan yang mungkin timbul, dimana batang-batang tersebut terhubung antara satu dengan yang lain. Bilamana batang-batang elektroda yang ditanam memiliki jumlah yang banyak, maka bentuknya akan menyerupai bentuk plat. Bentuk yang semacam ini memiliki nilai resistansi yang paling kecil pada daerah tertentu. Tetapi bentuk ini secara biaya termasuk mahal, dikarenakan bentuk ini membutuhkan batang-batang elektroda yang banyak. Oleh karena itu, perlu mencari bentuk yang murah dan sederhana serta memiliki nilai resistansi yang memenuhi persyaratan.

Fungsi konduktor ini adalah untuk menyalurkan arus lebih ke tanah. Nilai resistansinya tidak sebanding dengan konduktor yang ditanam terlalu banyak. Penanaman konduktor yang terlalu berdekatan tidak efektif, hal ini disebabkan karena terdapat arus lebih dari konduktor-konduktor yang tidak bisa diterima oleh volume tanah, yang memiliki kemampuan yang terbatas dalam menerima arus. Model sistem pentanahan *grid* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Model sistem pentanahan *grid* [9]

Umumnya, pentanahan *grid* menanamkan elektroda-elektroda sejajar satu dengan yang lain beberapa puluh sentimeter dari permukaan tanah. Dengan cara memperluas daerah pentanahannya, sistem pentanahan *grid* ini memiliki tujuan agar nilai resistansi pentanahannya lebih kecil. Hal ini dinilai lebih mudah daripada memperdalam penanaman konduktor [10].

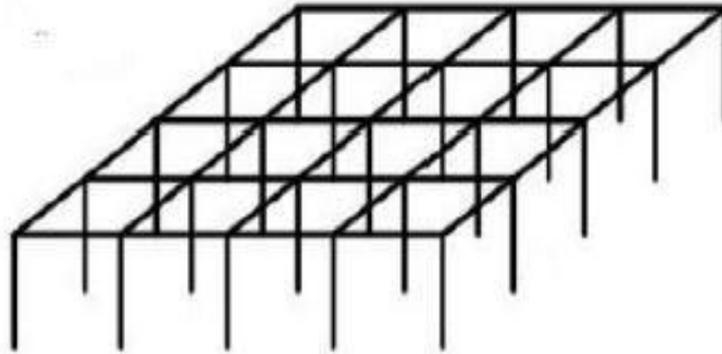
2.2.4 Sistem Pentanahan Rod

Sistem pentanahan *rod* adalah sistem pentanahan yang menanamkan elektroda pentanahan secara tegak lurus di permukaan tanah. Fungsi cara penanaman tersebut adalah untuk mengurangi atau memperkecil nilai resistansi pentanahan. Penanaman batang elektroda yang semakin banyak dapat memperkecil resistansi pentanahan. Gradien yang naik ke permukaan tanah diakibatkan karena terjadinya arus gangguan ke tanah.

Besarnya resistansi pentanahan sebanding dengan besarnya tegangan maksimum yang timbul. Penanaman paralel elektroda yang lebih banyak akan menyebabkan meratanya pendistribusian tegangan, dan menjadikan resistansi pentanahan akan lebih kecil. Jarak antar konduktor yang semakin pendek dan jumlah konduktor yang ditanam semakin banyak menyebabkan semakin kecil konduktivitas dari setiap konduktor [10].

2.2.5 Sistem Pentanahan Grid-Rod

Sistem pentanahan *Grid-rod* merupakan sistem pentanahan gabungan antara sistem pentanahan *grid* dan sistem pentanahan *rod*. Yaitu dengan cara menanamkan batang sejajar di permukaan tanah yang terhubung satu sama lain, kemudian setiap titik ditanami elektroda pentanahan yang tegak lurus di permukaan tanah. Sistem pentanahan ini adalah bentuk dari sistem pentanahan yang banyak digunakan dalam sistem pentanahan Gardu Induk. Sistem pentanahan ini dinilai lebih efektif untuk mengurangi gangguan yang terjadi pada Gardu Induk. Gambar 2.2 merupakan gambaran *layout* sistem pentanahan *grid-rod*.



Gambar 2.2 Model sistem pentanahan *grid-rod* [8]

Besarnya nilai resistansi pentanahan sistem pentanahan *grid-rod* harus berada di bawah 1Ω . Hal ini berdasar pada syarat keamanan suatu Gardu Induk dalam IEEE/ANSI Std 80/2013. Nilai dari resistansi pentanahan sistem *grid-rod* dapat dihitung dengan memakai persamaan (2.1).

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20}A} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (2.1)$$

dengan,

- R_g = Resistansi pentanahan *grid* (Ω),
- ρ = Resistansi jenis rata-rata tanah (Ωm),
- L = Jumlah total panjang konduktor *grid-rod* (m),
- h = Kedalaman penanaman konduktor (m),
- A = Luas area pentanahan *grid* (m^2).

Panjang total konduktor pentanahan (L) merupakan penjumlahan dari panjang total konduktor *grid* dan panjang total konduktor *rod*, sehingga panjang total konduktor pentanahan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.2).

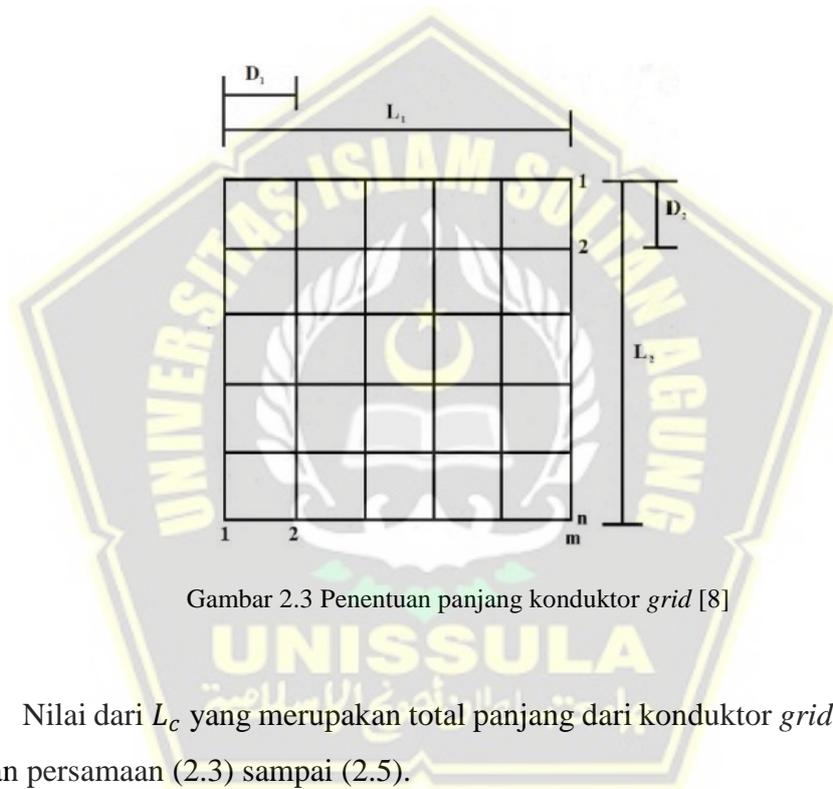
$$L = L_c + L_r \quad (2.2)$$

dengan,

L_c = Total panjang konduktor *grid* (m),

L_r = Total panjang batang *rod* (m).

Nilai dari L_c yang merupakan total panjang dari konduktor *grid* dapat ditentukan dengan memperhatikan Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Penentuan panjang konduktor *grid* [8]

Nilai dari L_c yang merupakan total panjang dari konduktor *grid* dapat dicari dengan persamaan (2.3) sampai (2.5).

$$L_c = L_1 n + L_2 m \quad (2.3)$$

$$n = \frac{L_2}{D_2} + 1 \quad (2.4)$$

$$m = \frac{L_1}{D_1} + 1 \quad (2.5)$$

dengan,

- L_c = Panjang total konduktor *grid* (m),
- L_1 = Panjang konduktor *grid* (m),
- L_2 = Lebar konduktor *grid* (m),
- n = Jumlah konduktor paralel sisi panjang,
- m = Jumlah konduktor paralel sisi lebar,
- D_1 = Jarak antar konduktor sisi panjang (m),
- D_2 = Jarak antar konduktor sisi lebar (m).

Perhitungan panjang konduktor *rod* didapat dengan menentukan jumlah dan panjang dari konduktor *rod* tiap batang. Setelah diketahui berapa jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang, panjang konduktor *rod* dapat diformulasikan dengan persamaan (2.6).

$$L_r = QxP \quad (2.6)$$

dengan,

- L_r = Panjang total konduktor *rod* (m),
- Q = Jumlah konduktor *rod*,
- P = Panjang konduktor *rod* tiap batang (m).

2.2.6 Resistansi Jenis Tanah

Resistansi jenis tanah dilambangkan dengan notasi ρ . Nilai resistansi jenis tanah pada daerah kedalaman dan jenis tanah yang berbeda tidaklah sama. Pembumian itu sendiri merupakan sebuah badan yang sangat besar yang dapat digambarkan sebagai sebuah bak penampung yang tidak terbatas untuk mengalirkan arus ke dalam tanah dan dapat mempertimbangkan resistansi yang kecil untuk mengalirkan arus [8]. Resistansi jenis tanah, pada dasarnya dipengaruhi oleh karakteristik tanah tersebut dan keadaan cuaca di sekitarnya.

Berdasarkan Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011), resistansi jenis tanah dari berbagai jenis tanah disajikan pada Tabel 2.1 [11].

Tabel 2.1 Tahanan jenis tanah dari berbagai jenis tanah

| No. | Jenis tanah | Tahanan jenis tanah (Ωm) |
|-----|-----------------------------|--|
| 1. | Tanah rawa | 30 |
| 2. | Tanah liat dan tanah ladang | 100 |
| 3. | Pasir basah | 200 |
| 4. | Kerikil basah | 500 |
| 5. | Pasir dan kerikil kering | 1000 |
| 6. | Tanah berbatu | 3000 |

Besarnya resistansi jenis tanah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.7).

$$\rho = 2\pi aR \quad (2.7)$$

dengan,

- ρ = Resistansi jenis rata-rata tanah (Ωm),
- a = Jarak antara batang elektroda yang terdekat (m),
- R = Besar tahanan yang terukur (Ω).

2.2.7 Jenis Bahaya Gangguan

Gangguan yang timbul pada Gardu Induk berawal dari gangguan ringan seperti terkejut, kemudian gangguan berbahaya seperti pingsan dan bahkan kematian pada manusia. Hal-hal tersebut merupakan bahaya-bahaya yang ditimbulkan dari gangguan yang terjadi pada Gardu Induk. Terdapat beberapa faktor yang memengaruhi berat atau ringannya suatu gangguan yang timbul, meliputi:

- a. Tegangan terhadap kondisi seseorang.
- b. Besarnya nilai arus yang mengalir melewati tubuh seseorang.
- c. Jenis arus yang mengalir pada tubuh seseorang, arus searah ataupun arus bolak-balik.

Terdapat beberapa gangguan yang terjadi pada sistem pentanahan Gardu Induk. Untuk mengurangi dampak negatif jika sewaktu-waktu terjadi gangguan maka sistem pentanahan pada Gardu Induk harus sangat efektif. Gangguan yang terjadi pada Gardu Induk salah satunya adalah tegangan sentuh dan tegangan langkah.

2.2.8 Arus Fibrilasi [12]

Arus *fibrilasi* merupakan arus listrik yang ketika arus tersebut mengalir pada tubuh manusia atau seseorang dan nilai arus tersebut lebih besar dari nilai arus yang dapat mempengaruhi otot manusia. Arus tersebut memiliki dampak terhadap manusia yaitu pingsan bahkan kematian. Kematian tersebut dapat terjadi dikarenakan arus yang mengalir pada tubuh manusia mempengaruhi kerja jantung. Kerja jantung akan terhenti kemudian peredaran darah juga akan terhenti. Penelitian pernah dilakukan dengan menggunakan binatang yang memiliki badan dan jantung yang menyerupai manusia. Penelitian tersebut dilakukan oleh Dalziel tahun 1968 di *University of California*. Hasil penelitian tersebut menyimpulkan bahwa semua orang yang memiliki massa badan kurang lebih 50 kg, 99,5% dapat bertahan dari besarnya nilai arus dan lamanya waktu yang telah ditentukan menurut persamaan (2.8) dan (2.9).

$$I_k^2 t = K \quad (2.8)$$

$$I_k = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (2.9)$$

dengan,

$$k = \sqrt{K},$$

$$K = 0,0135 \text{ untuk manusia dengan massa } 50 \text{ kg,}$$

$$= 0,0246 \text{ untuk manusia dengan massa } 70 \text{ kg,}$$

maka,

$$I_k^2 t = 0,0135 \text{ untuk massa badan } 50 \text{ kg,}$$

$$I_k = \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

dengan,

$$I_k = \text{ Besar arus yang melewati tubuh manusia (A),}$$

$$t = \text{ Waktu arus yang melewati tubuh manusia atau lama gangguan tanah (detik).}$$

2.2.9 Arus Gangguan Tanah (Arus *Grid* Maksimum)

Tegangan sistem 500 KV di sebuah Gardu Induk berdasarkan nilai pemutusan peralatan pentanahan untuk arus hubung singkat 3 fasa mengambil 60% dari besar nilai arus gangguan hubung tanah maksimum. Sedangkan untuk tegangan sistem 150 KV diambil nilai 80% untuk mencari besar arus hubung tanah dari arus hubung singkat 3 fasa [13].

Terjadinya arus gangguan tanah diakibatkan oleh gangguan yang terjadi pada suatu sistem di Gardu Induk. Akibat dari terjadinya arus hubung singkat tersebut adalah mengalirnya arus ke seluruh sistem pentanahan *grid*. Jika arus gangguan yang terjadi tidak dihilangkan, akibatnya dapat membahayakan makhluk hidup terutama manusia di area Gardu Induk tersebut. Arus gangguan tanah merupakan arus maksimum yang mengalir pada suatu sistem pentanahan. Arus tersebut berdasarkan IEEE/ANSI Std 80/2013, untuk Gardu Induk 500 KV dapat diketahui dengan mengambil 60% atau 0,6 dari arus hubung singkat 3 fasa [2].

Arus *grid* maksimum adalah besarnya arus yang mengalir pada rangkaian sistem pentanahan *grid* ketika terjadinya gangguan fasa ke tanah. Dalam IEEE/ANSI Std 80/2013, arus *grid* maksimum juga dapat ditentukan dengan persamaan (2.10) dan (2.11).

$$I_G = C_p D_f I_g \tag{2.10}$$

$$I_g = S_f I_f \tag{2.11}$$

dengan,

$$I_f = 3I_0$$

$$I_G = \text{Arus } grid \text{ maksimum (A),}$$

$$C_p = \text{Faktor proyeksi untuk kenaikan relatif arus gangguan selama keberlangsungan sistem.}$$

$$\text{Untuk sistem dengan pertumbuhan nol, } C_p = 1,$$

$$D_f = \text{Faktor } decrement. D_f = 1 \text{ untuk waktu gangguan 0,5 detik,}$$

$$I_g = \text{Arus } grid \text{ simetris (A),}$$

$$S_f = \text{Faktor pembagi arus gangguan. } S_f = 0,6 \text{ untuk Gardu Induk berkawat tanah,}$$

$$I_f = \text{Nilai rata-rata dari arus gangguan ke tanah (A),}$$

$$I_0 = \text{Arus gangguan urutan nol.}$$

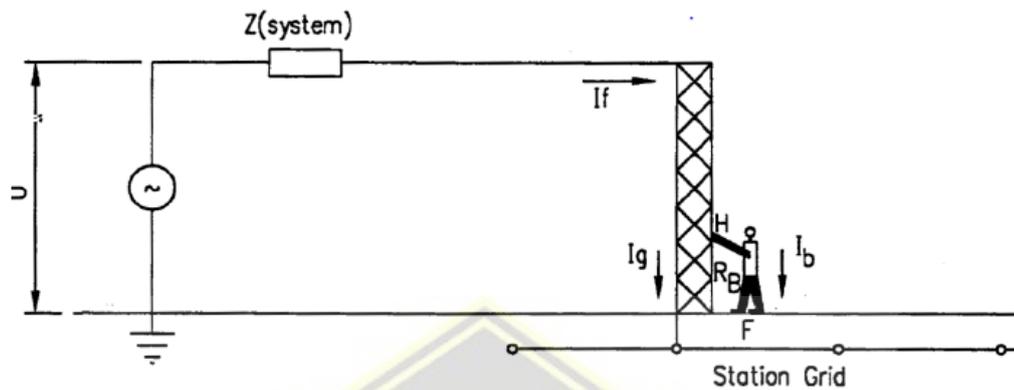
2.2.10 Tegangan Sentuh Yang Diizinkan

Tegangan sentuh adalah tegangan yang terdapat di antara suatu objek yang disentuh dan suatu titik berjarak 1 meter, dengan asumsi bahwa objek yang disentuh dihubungkan dengan kisi-kisi pengetanahan yang berada di bawahnya. Hal tersebut dapat diproyeksikan seperti diperlihatkan pada Gambar 2.4. Tegangan sentuh dapat membahayakan keselamatan manusia, maka tegangan sentuh yang tinggi harus diberi proteksi.

Persyaratan yang harus dipenuhi berdasarkan IEEE/ANSI Std 80/2013 antara lain dalam waktu 1 detik tegangan sentuh yang diizinkan adalah sebesar 626 volt. Sementara persyaratan kehandalan Gardu Induk yang sudah ditetapkan adalah bahwa tegangan sentuh sebenarnya harus berada di bawah tegangan sentuh yang diizinkan.

Apabila nilai tegangan sentuh yang dihasilkan menunjukkan berada di bawah tegangan sentuh yang diizinkan, maka syarat Gardu Induk yang dikatakan aman dapat dipenuhi. Seseorang yang berada dalam area pentanahan yang sudah memenuhi syarat aman tersebut mungkin masih bisa terkena suatu kejutan saat

terjadi gangguan. Namun hal itu tidak akan menyebabkan *ventricular fibrillation*, yakni suatu kondisi abnormal jantung yang berujung pada kematian.



Gambar 2.4 Ilustrasi tegangan sentuh

Setelah meninjau Gambar 2.4, maka persamaan (2.12) digunakan untuk mengukur tegangan sentuh.

$$E_t = \left(R_k + \frac{R_f}{2} \right) I_k \quad (2.12)$$

dengan,

- E_t = Tegangan sentuh (v),
- R_k = Resistansi tubuh manusia (=1000 Ω),
- R_f = Resistansi kontak ke tanah dari satu kaki pada tanah yang diberi lapisan koral 10 cm (= 3000 Ω),
- I_k = Besaran arus yang melewati badan (A).

Resistansi pada tubuh manusia telah dilakukan penelitian oleh beberapa ahli, sehingga diambil nilai terdekat dengan $R_k = 1000 \Omega$. Resistansi R_f mendekati harga $3\rho_s$, dimana ρ_s di sini merupakan resistansi jenis tanah yang ada di sekitar permukaan, dan $I_k = \frac{0,116}{\sqrt{t}}$, sehingga didapatkan persamaan (2.13).

$$E_{t50} = \left(1000 + \frac{3\rho_s}{2} C_s\right) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (2.13)$$

dengan,

E_{t50} = Tegangan sentuh yang diizinkan untuk manusia dengan massa 50 kg (v),

ρ_s = Tahanan jenis tanah di sekitar permukaan tanah (Ωm).
= 3000 Ωm untuk permukaan tanah yang dilapisi koral 10 cm,

C_s = Faktor reduksi resistivitas permukaan tanah ($C_s = 1$),

t = Waktu kejut dan lama gangguan tanah (s).

Hubungan tegangan sentuh yang diizinkan dengan lama waktu gangguan tanah diperlihatkan dengan Tabel 2.2.

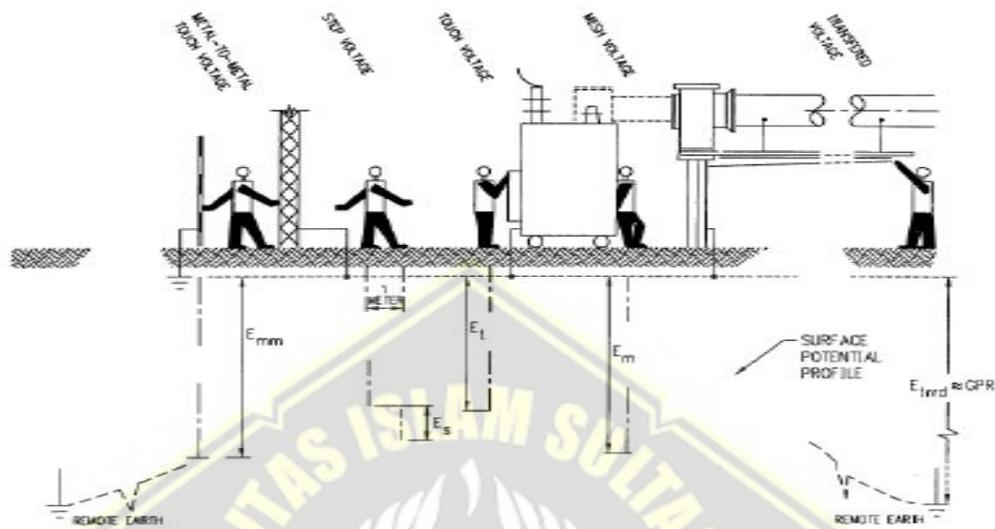
Tabel 2.2 Tegangan sentuh dan lama gangguan yang diizinkan

| No. | Lama gangguan (s) | Tegangan sentuh yang diizinkan (v) |
|-----|-------------------|------------------------------------|
| 1. | 0,1 | 1980 |
| 2. | 0,2 | 1400 |
| 3. | 0,3 | 1140 |
| 4. | 0,4 | 990 |
| 5. | 0,5 | 890 |
| 6. | 1,0 | 626 |
| 7. | 2,0 | 443 |
| 8. | 3,0 | 362 |

2.2.11 Tegangan Sentuh Sebenarnya [13]

Tegangan sentuh sebenarnya adalah tegangan pada peralatan yang diketanahkan ke dalam daerah yang membentuk konduktor kisi-kisi selama gangguan tanah. Pada konduktor kisi-kisi arus yang mengalir tidak sama, dikarenakan resistansi jenis tanah pada kenyataanyapun tidak merata. Tegangan sentuh sebenarnya sangat dipengaruhi oleh panjang konduktor *grid* dan total

panjang dari konduktor *rod*. Untuk keadaan dasar kejut pada tegangan sentuh dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Keadaan dasar kejut

Mengacu pada IEEE/ANSI Std 80/2013, besarnya nilai tegangan sentuh sebenarnya harus di bawah dari nilai tegangan sentuh yang diizinkan, untuk memperoleh syarat dari suatu Gardu Induk yang dapat dikatakan aman. Besarnya nilai tegangan sentuh sebenarnya untuk sistem pentanahan *grid-rod* tergantung pada faktor geometrik tegangan *mesh* (K_m), faktor koreksi tegangan sentuh (K_i), resistansi jenis tanah rata-rata (ρ), dan besar arus pembumian *grid* maksimum (I_G), dengan total panjang konduktor *grid* (L_c) dan total panjang konduktor *rod* (L_r), dapat dilihat pada persamaan (2.14). Besarnya faktor koreksi dapat dilihat pada persamaan (2.15) sampai (2.17).

$$E_{tm} = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_c + 1,15 L_r} \quad (2.14)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right] \quad (2.15)$$

$$N = \sqrt{n \cdot m} \quad (2.16)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (2.17)$$

dengan,

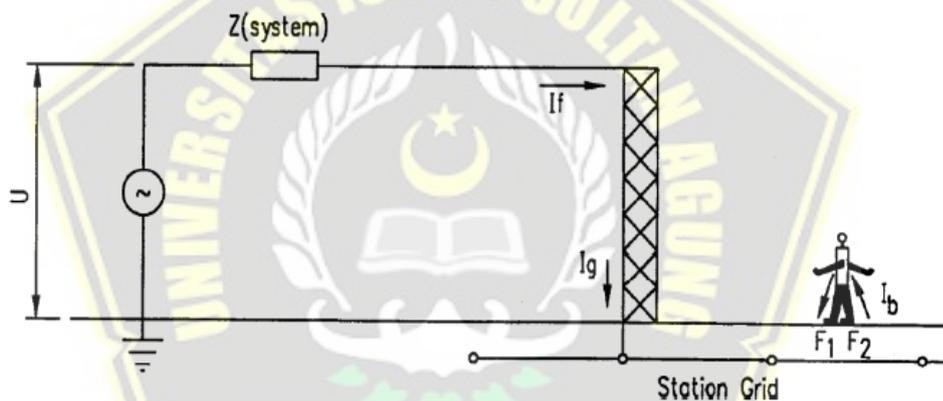
- E_{tm} = Tegangan sentuh sebenarnya yang terjadi pada *grid* (v),
- ρ = Tahanan jenis tanah (Ωm),
- I_G = Besar arus gangguan tanah (A),
- K_m = Faktor geometrik tegangan sentuh,
- K_i = Faktor koreksi untuk ketidak-merataan kerapatan arus.
= $0,656 + 0,172N$,
- L_c = Panjang total konduktor *grid* (m),
- L_r = Panjang total konduktor *rod* (m),
- D = Jarak antara konduktor paralel pada kisi-kisi (m),
- d = Diameter konduktor kisi-kisi (m),
- h = Kedalaman penanaman konduktor (m),
- h_0 = konstanta kedalaman tanah *grid* (=1 m),
- K_h = Faktor koreksi massa pada tekanan dari efek kedalaman *grid*,
- K_{ii} = 1 (untuk sistem pentanahan dengan *rod*),
- N = Jumlah konduktor paralel dalam kisi-kisi *grid* (digunakan pada K_m dan K_i dalam menghitung tegangan sentuh sebenarnya),
- n = Jumlah konduktor paralel sisi panjang,
- m = Jumlah konduktor paralel sisi lebar.

2.2.12 Tegangan Langkah Yang Diizinkan

Tegangan langkah yaitu ketika seseorang berdiri di atas tanah kemudian terdapat tegangan yang timbul di antara dua kaki seseorang tersebut selama sedang terjadi gangguan. Dimisalkan ketika seseorang tidak menggunakan sepatu dengan jarak antara kedua kaki seseorang 1 meter dan diameter kaki orang tersebut dimisalkan 8 cm. Permukaan tanah yang dipijak atau menopang seseorang dengan jarak tertentu tanpa menggunakan sepatu akan menghasilkan tegangan langkah. Hal

yang demikian ini terjadi karena terdapat beda potensial di tanah pada saat terjadi gangguan, dimana tanah terhubung dengan kisi-kisi (*grid*). Arus listrik dapat mengalir di antara kedua kaki seseorang. Fenomena ini disebabkan karena terdapat beda potensial yang ada diantara kedua kaki seseorang. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.6. [8].

Jika nilai tegangan langkah yang dihasilkan menunjukkan berada di bawah tegangan langkah yang diizinkan, maka syarat Gardu Induk yang dikatakan aman dapat dipenuhi. Seseorang yang berada dalam area pentanahan yang sudah memenuhi syarat aman mungkin masih bisa terkena suatu kejutan saat terjadi gangguan. Namun hal itu tidak akan menyebabkan *ventricular fibrillation*, yaitu kondisi abnormal jantung yang berujung pada kematian.



Gambar 2.6 Tegangan langkah yang diketanahkan

Ditinjau dari Gambar 2.6, besarnya tegangan langkah yang diizinkan dipengaruhi oleh besarnya resistansi yang mengalir pada badan seseorang (R_k), resistansi kontak ke tanah dari satu kaki (R_f), dan juga besarnya arus fibrilasi (I_k). Tegangan langkah yang diizinkan ditunjukkan persamaan (2.18) sampai (2.20).

$$E_s = (R_k + 2R_f)I_k \quad (2.18)$$

$$R_f = 3\rho_s C_s \quad (2.19)$$

$$E_{s50} = (R_k + 6\rho_s C_s) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (2.20)$$

dengan,

- E_s = Tegangan langkah yang diizinkan (v),
 E_{s50} = Tegangan langkah yang diizinkan untuk manusia dengan massa 50 kg (v),
 R_k = Tahanan badan orang (Ω) = 1000 Ω ,
 R_f = Tahanan kontak ke tanah dari satu kaki (Ω),
 I_k = Arus fibrilasi (A),
 ρ_s = Tahanan jenis tanah di sekitar permukaan tanah (Ωm).
 = 3000 Ω untuk permukaan tanah yang dilapisi koral 10 cm,
 C_s = Faktor reduksi untuk besarnya resistivitas permukaan tanah ($C_s = 1$).

Lama tegangan langkah yang diizinkan dengan lama waktu gangguan tertentu diperlihatkan dalam Tabel 2.3. Tegangan langkah yang diizinkan merupakan batas aman tegangan langkah yang mengalir pada sebuah Gardu Induk.

Tabel 2.3 Tegangan langkah dan lama gangguan yang diizinkan

| No. | Lama gangguan (s) | Tegangan langkah yang diizinkan (v) |
|-----|-------------------|-------------------------------------|
| 1. | 0,1 | 7000 |
| 2. | 0,2 | 4950 |
| 3. | 0,3 | 4040 |
| 4. | 0,4 | 3500 |
| 5. | 0,5 | 3140 |
| 6. | 1,0 | 2216 |
| 7. | 2,0 | 1560 |
| 8. | 3,0 | 1280 |

2.2.13 Tegangan Langkah Sebenarnya

Tegangan langkah sebenarnya merupakan tegangan yang timbul di antara dua kaki orang yang sedang berdiri di atas tanah yang sedang dialiri oleh arus gangguan ke tanah. Besarnya nilai tegangan langkah sebenarnya, tergantung pada nilai resistansi jenis tanah (ρ), konstanta tegangan langkah sebenarnya (K_s), Faktor koreksi (K_i), arus gangguan tanah maksimum (I_G), dan panjang total konduktor *grid* (L_c) dan panjang total konduktor *rod* (L_r). Mengacu pada IEEE/ANSI Std 80/2013, besarnya nilai tegangan langkah sebenarnya harus di bawah dari nilai tegangan langkah yang diizinkan, untuk memperoleh syarat dari suatu Gardu Induk yang dapat dikatakan aman. Persamaan (2.21) dan (2.22) digunakan untuk mendapatkan nilai pendekatan tegangan langkah sebenarnya untuk sistem pentanahan *grid-rod*.

$$E_{sm} = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_c + 1,15 L_r} \quad (2.21)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{N-2}) \right] \quad (2.22)$$

dengan,

- E_{sm} = Tegangan langkah yang terjadi pada *grid* (v),
- K_s = Nilai konstanta tegangan langkah sebenarnya,
- K_i = Faktor koreksi saat terjadi peningkatan arus ekstrimitas pada *grid*.
= $0,65 + 0,172N$,
- I_G = Arus gangguan tanah maksimum (A),
- ρ = Resistansi jenis tanah rata-rata (Ωm),
- L = Panjang total konduktor (m),
- N = Jumlah konduktor paralel *grid* dan yang tersebar (digunakan pada K_s dan K_i dalam menghitung tegangan langkah sebenarnya),
- h = Kedalaman penanaman konduktor pentanahan (m),
- D = Jarak antar konduktor paralel (m).

2.2.14 Ground Potential Rise

Ground Potential Rise (GPR) merupakan suatu tegangan maksimum yang mampu dicapai oleh suatu pentanahan *grid* terhadap suatu titik pentanahan yang diasumsikan potensial atau voltase yang sama dengan potensial bumi. Besarnya nilai GPR tergantung dari besar arus *grid* maksimum (I_G) dan resistansi pentanahan (R_g). Karena resistansi pentanahan sangat dipengaruhi oleh nilai panjang total konduktor pentanahan (L), maka besarnya nilai GPR dipengaruhi oleh nilai (L). Dalam IEEE/ANSI Std 80/2013, menunjukkan bahwa besarnya nilai GPR untuk keamanan suatu Gardu Induk adalah harus berada di bawah dari nilai tegangan langkah yang diizinkan. Nilai dari GPR diperoleh dengan persamaan (2.23).

$$GPR = R_g I_G \quad (2.23)$$

dengan,

$$\begin{aligned} GPR &= \text{Ground potential rise (v),} \\ R_g &= \text{Resistansi pentanahan grid } (\Omega), \\ I_G &= \text{Arus grid maksimum (A).} \end{aligned}$$

2.2.15 Komponen Pentanahan

Suatu sistem di dalam Gardu Induk dapat dinilai baik jika memiliki komponen sistem pentanahan. Secara garis besar, komponen dari sistem pentanahan ini dibagi menjadi 2 bagian, yakni:

1. Hantaran Penghubung (Konduktor)

Hantaran penghubung yaitu suatu saluran penghantar (konduktor) yang digunakan untuk menghubungkan titik kontak pada kerangka peralatan gardu induk dengan elektroda pentanahan. Konduktor pentanahan tersebut memiliki fungsi untuk menyalurkan arus gangguan pada sistem pentanahan [10]. Konduktor pentanahan harus memenuhi beberapa persyaratan, meliputi:

- a. Memiliki daya hantar jenis (*conductivity*) yang cukup besar sehingga tidak akan memperbesar beda potensial lokal yang berbahaya.
- b. Memiliki kekuatan secara mekanis pada tingkat yang tinggi. Terutama bila digunakan untuk daerah yang tidak terlindung terhadap kerusakan fisik.
- c. Tahan terhadap peleburan dari buruknya sambungan listrik, walaupun konduktor tersebut akan terkena magnitudo arus gangguan dalam waktu yang lama.
- d. Tahan terhadap korosi.

Tembaga merupakan bahan elektroda yang dianjurkan dalam IEEE/ANSI Std 80/2013 berdasarkan persamaan kapasitas arus.

2. Elektroda Pentanahan [3]

Pengertian elektroda pentanahan adalah suatu penghantar yang ditanam ke dalam tanah dan berhubungan kontak langsung dengan tanah. Fungsi dari elektroda pentanahan tersebut yakni untuk mengalirkan arus ke tanah yang dihantarkan elektroda tersebut. Fungsi selanjutnya adalah untuk mempertahankan tegangan tanah pada konduktor yang dihubungkan. Tujuan dari hal tersebut adalah bilamana terjadi gangguan, maka dapat diperoleh perlakuan arus yang sebaik-baiknya.

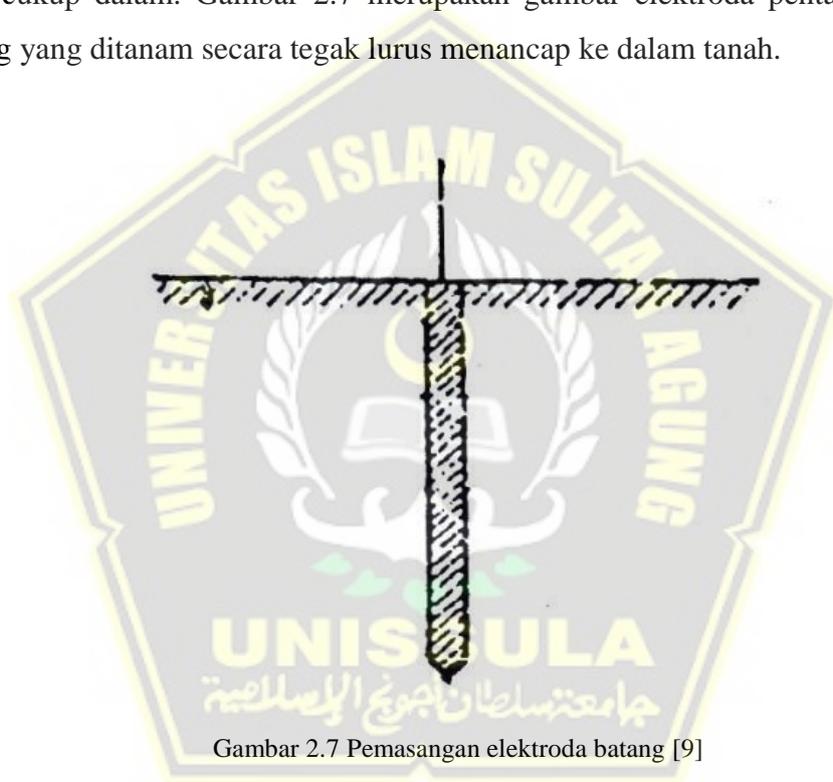
Terdapat syarat-syarat yang harus dipenuhi untuk mendapatkan nilai resistansi pentanahan yang serendah mungkin [3]. Beberapa persyaratan yang harus dipenuhi, yaitu:

- a. Resistansi elektroda pentanahan harus lebih kecil dari nilai yang telah ditentukan.
- b. Elektroda pentanahan harus tahan terhadap korosi dan memiliki sifat kimia yang baik.
- c. Elektroda pentanahan harus memiliki sifat mampu dialiri arus hubung singkat dengan nilai yang besar.
- d. Elektroda pentanahan harus memiliki sifat mekanis yang baik.

Sistem pentanahan umumnya memiliki beberapa macam elektroda, antara lain elektroda batang, elektroda plat, dan elektroda pita.

a. Elektroda Batang [5]

Elektroda batang dapat berupa tembaga yang dilapisi pipa netral yang dapat ditanam di dalam tanah secara tegak lurus terhadap tanah. Elektroda ini yang sering digunakan pada Gardu Induk karena dapat menghasilkan resistansi pentanahan yang cukup rendah. Untuk memperoleh resistansi yang rendah tergantung pada panjang dan ukuran penampangnya dengan jarak antara elektroda tersebut minimum dua kali panjangnya. Banyaknya pemasangan elektroda dilihat dari jenis pentanahan itu sendiri. Pada Gardu Induk biasanya ditanam dengan kedalaman yang cukup dalam. Gambar 2.7 merupakan gambar elektroda pentanahan jenis batang yang ditanam secara tegak lurus menancap ke dalam tanah.

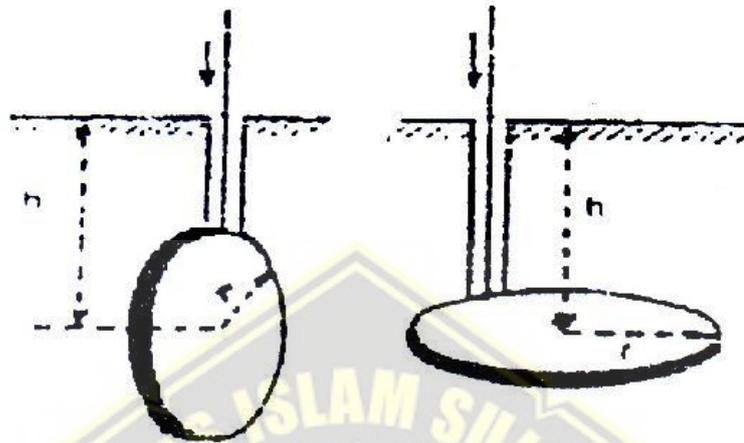


Gambar 2.7 Pemasangan elektroda batang [9]

b. Elektroda Plat [5]

Elektroda plat terbuat dari plat logam, plat logam yang berlubang atau kawat kasa. Plat tersebut ditanam tegak lurus di dalam tanah, pada umumnya jenis elektroda ini menggunakan plat berukuran 1 m x 0,5 m. sisi atas pada elektroda plat harus terletak minimum 1 m di bawah permukaan tanah. Jika untuk memperoleh resistansi pentanahan yang lebih rendah, maka dianjurkan jarak antara plat logam jika dipasang paralel adalah minimum 3 meter. Elektroda ini digunakan apabila

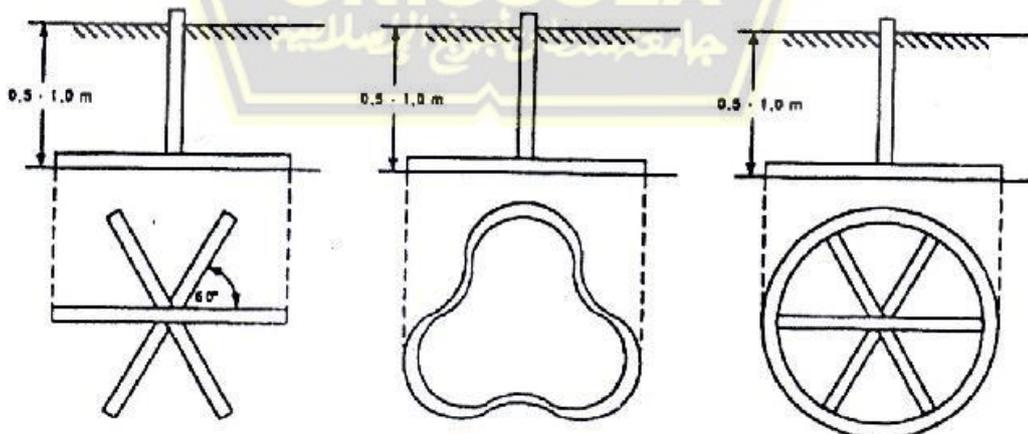
diinginkan tahanan pentanahan yang kecil yang sulit diperoleh dengan menggunakan jenis elektroda yang lain. Gambar 2.8 merupakan pemasangan elektroda pentanahan jenis plat.



Gambar 2.8 Pemasangan elektroda plat [9]

c. Elektroda Pita [5]

Elektroda pita merupakan jenis elektroda yang berbentuk pita (lempengan tipis) atau dapat berbentuk bulat seperti kawat pilin. Elektroda ini terbuat dari bahan metal yang ditanam di dalam tanah sedalam 0,5 sampai 1 meter. Berikut merupakan gambar elektroda pentanahan jenis pita seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Pemasangan elektroda pita [9]

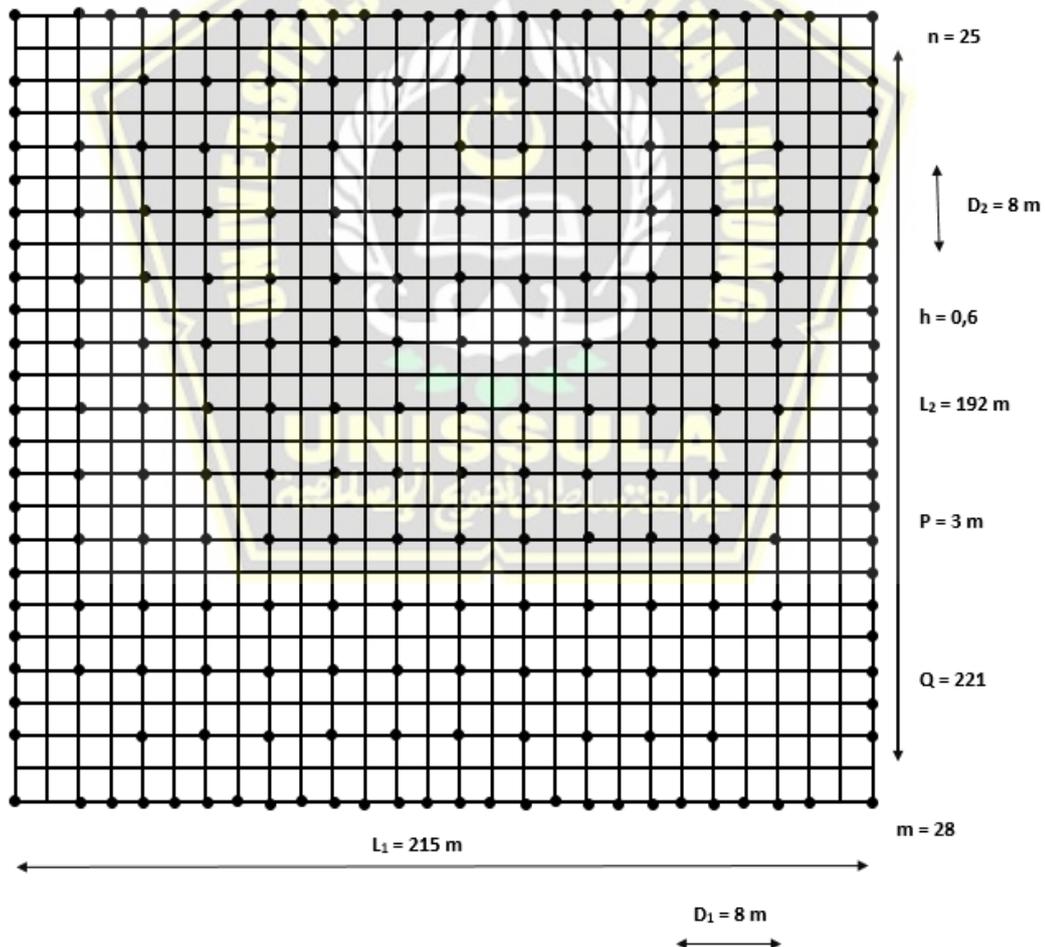
Biasanya elektroda pita dipasang pada struktur tanah yang mempunyai nilai resistansi jenis tanah yang rendah pada permukaan tanah dan di daerah yang tidak mengalami kekeringan. Pengaruh kelembaban lapisan tanah terhadap resistansi pentanahan harus diperhatikan. Resistansi elektroda pita ini sebagian besar tergantung pada panjang elektroda dan sedikit tergantung pada luas penampang.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Model Penelitian

Model penelitian merupakan suatu gambaran skema pemodelan pada Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran yang dipakai sebagai acuan dalam mendapatkan nilai yang akan dicari, menghitung, dan menganalisa nilai tersebut. Sistem pentanahan yang dipakai pada GITET 500 KV Ungaran mengaplikasikan sistem pentanahan *grid-rod*. Gambar 3.1 memperlihatkan model dari sistem pentanahan *grid-rod* yang akan digunakan sebagai acuan dasar dalam menentukan nilai-nilai pentanahan yang akan dicari.



Gambar 3.1 Model penelitian [8]

Keterangan:

- L_1 = Panjang sisi konduktor *grid*,
- L_2 = Lebar sisi konduktor *grid*,
- D_1 = Jarak antar konduktor *grid* sisi panjang,
- D_2 = Jarak antar konduktor *grid* sisi lebar,
- h = Kedalaman penanaman konduktor *grid*,
- m = Jumlah konduktor paralel di sisi lebar *grid*,
- n = Jumlah konduktor paralel di sisi panjang *grid*,
- P = Panjang konduktor *rod* tiap batang,
- Q = Jumlah konduktor *rod*.

3.2 Obyek Penelitian

Lokasi penelitian yang diambil dalam penelitian ini adalah GITET 500 KV Ungaran. Gambar 3.2 merupakan foto serandang GITET 500 KV Ungaran yang menunjukkan area *switchyard*.



Gambar 3.2 Serandang GITET 500 KV Ungaran area *switchyard*

Data sekunder yang hendak disubstitusikan dalam penelitian ini diambil dari jurnal-jurnal terbaru yang membahas tentang sistem pentanahan dengan lokasi penelitian yang sama, yaitu GITET 500 KV Ungaran. Sehingga hal ini memungkinkan untuk dilakukannya penelitian yang mengarah pada lokasi tersebut. Lokasi GITET 500 KV Ungaran beralamat di Jl. Jend. Sudirman No. 54A, Gedanganak, Ungaran, Semarang, Jawa Tengah 50519. Terdapat beberapa area di dalam lokasi penelitian, di antaranya adalah ruang pengendali, area transformator, dan area *switchyard*.

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan penelitian berikut berfungsi untuk menunjang penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Beberapa peralatan yang digunakan, di antaranya:

1. Laptop

Penggunaan laptop adalah sebagai media simulasi perhitungan *software matlab* dan penyusunan Laporan Tugas Akhir.

2. *Software Matlab R2015a*

Software Matlab R2015a merupakan sebuah software yang difungsikan untuk melakukan simulasi perhitungan data yang sudah diambil dalam penelitian ini, sehingga didapatkan nilai yang dicari dalam perhitungan tersebut.

3. Pemodelan Pentanahan

Pemodelan pentanahan merupakan sebuah model pentanahan pada gardu induk seperti ditunjukkan Gambar 3.1 yang digunakan sebagai acuan dalam menghitung nilai-nilai yang akan dicari.

3.4 Data Penelitian

Terdapat dua data yang dipakai dalam penelitian ini, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data yang diperoleh melalui sumber penelitian secara langsung. Penulis memperoleh data primer ini pada GITET 500 KV Ungaran.

Data primer meliputi:

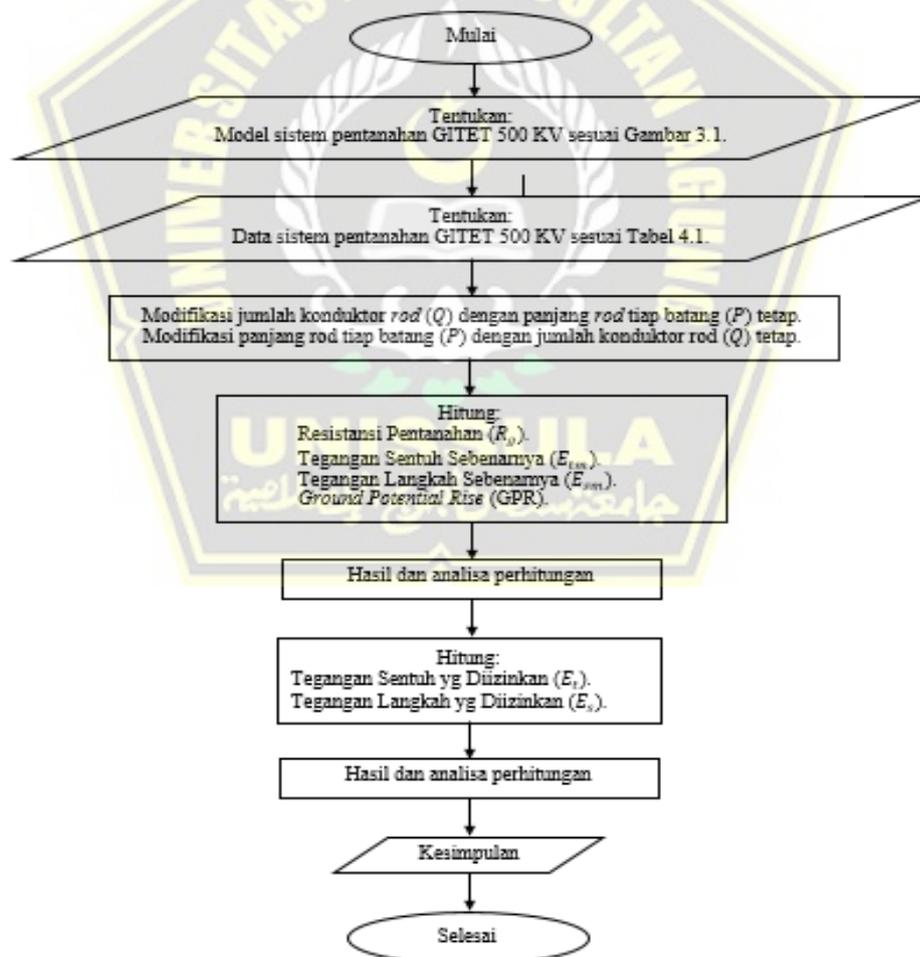
1. Foto serandang GITET 500 KV Ungaran.
2. Gambar *layout* sistem pentanahan yang ada di GITET 500 KV Ungaran (terlampir pada bagian Lampiran 1).

Kemudian untuk data sekunder meliputi:

1. Jurnal ilmiah yang terpublikasi dalam 5 tahun terakhir.
2. Tugas Akhir yang terpublikasi dalam 5 tahun terakhir.
3. Literatur lain yang berasal dari buku-buku dan internet.

3.5 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan dalam penyusunan Tugas Akhir ini diperlihatkan melalui Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram alir (*flowchart*) tahapan penelitian

Gambar 3.3 merupakan diagram alir (*flowchart*) yang berisi tahapan-tahapan atau langkah-langkah dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Berikut adalah langkah-langkah penelitian yang dilakukan:

1. Menentukan model sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran sesuai Gambar 3.1. Pemodelan *grid-rod* adalah yang dipakai pada Gambar 3.1.
2. Menentukan data-data konfigurasi yang ada pada sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran sesuai dengan Tabel 4.1. Data-data tersebut meliputi panjang konduktor *rod* tiap batang (P), jumlah konduktor *rod* (Q), resistansi pentanahan (R_g), resistansi jenis tanah (ρ), dan lain sebagainya.
3. Melakukan modifikasi panjang konduktor *rod* yang berfokus pada perubahan jumlah konduktor *rod* (Q) dengan panjang konduktor *rod* tiap batang (P) tetap. Selanjutnya, melakukan modifikasi kembali dengan melakukan perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang (P) dengan jumlah konduktor *rod* (Q) tetap.
4. Melakukan perhitungan dengan aplikasi *matlab* nilai resistansi pentanahan (R_g), tegangan sentuh sebenarnya (E_{tm}), tegangan langkah sebenarnya (E_{sm}), dan *ground potential rise* (GPR) berdasarkan data Tabel 4.1.
5. Mencatat hasil perhitungan dan menganalisa hasil tersebut.
6. Melakukan perhitungan tegangan sentuh yang diizinkan (E_t) dan tegangan langkah yang diizinkan (E_s) berdasarkan data Tabel 4.1.
7. Mencatat hasil perhitungan dan menganalisa hasil tersebut. Selanjutnya membandingkan hasil perhitungan tersebut dengan data yang telah dimodifikasi sebelumnya sebagai verifikasi. Nilai-nilai tersebut harus memenuhi standar keamanan GITET 500 KV, yaitu $R_g \leq 1 \Omega$, $E_{tm} < E_t$, $E_{sm} < E_s$, dan $GPR < E_s$.
8. Menarik kesimpulan berdasarkan hasil penelitian yang telah dianalisa.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang perhitungan dengan memakai data-data yang ada pada Tabel 4.1. Kemudian dilakukan simulasi dengan mengubah atau memodifikasi nilai dari panjang konduktor *rod* tiap batang (P) dan jumlah konduktor *rod* (Q) pada sistem pentanahan Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi 500 KV Ungaran, untuk mengetahui pengaruh atas perubahan yang terjadi terhadap nilai-nilai yang menjadi faktor penentu keamanan dan kehandalan suatu GITET berdasarkan IEEE/ANSI Std 80/2013. Perhitungan ini bertujuan untuk mencari besarnya nilai resistansi pentanahan.

Selanjutnya juga akan ditentukan berapa besarnya arus *grid* maksimum. Arus *grid* maksimum ini akan berpengaruh dalam mendapatkan hasil dari tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya. Tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya ini merupakan bahaya-bahaya yang dapat terjadi di area *switchyard* Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi 500 KV Ungaran ketika terjadi gangguan, utamanya gangguan fasa ke tanah. Gangguan ini nantinya akan diminimalisir oleh sistem pentanahan untuk memberikan keamanan dan keselamatan makhluk hidup yang berada di area *switchyard* tersebut. Setelah itu, akan dicari nilai *ground potential rise* (GPR) dari hasil resistansi pentanahan dan arus *grid* maksimum yang nilainya sudah didapatkan.

Kemudian menentukan nilai mana yang paling baik untuk dapat diaplikasikan pada sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran berdasarkan hasil dari modifikasi yang telah dilakukan. Setelah nilai-nilai parameter pentanahan yaitu resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya dan tegangan langkah sebenarnya, serta *ground potential rise* didapatkan dari hasil modifikasi tersebut, kemudian akan dilakukan perhitungan tegangan sentuh yang diizinkan dan juga tegangan langkah yang diizinkan.

Nilai-nilai ini kemudian akan diverifikasi dengan ketentuan-ketentuan yang ada pada IEEE/ANSI Std 80/2013, sebagai tolak ukur keamanan dan kehandalan suatu GITET. Perhitungan ini dimaksudkan sebagai verifikasi atas nilai-nilai

parameter yang telah didapatkan sebelumnya dari perhitungan sesuai Tabel 4.1, dengan panjang konduktor *rod* tiap batang beserta jumlah konduktor *rod* yang telah dimodifikasi, apakah nilai-nilai parameter tersebut masih berada dalam batas aman atau tidak.

Tabel 4.1 merupakan data-data yang diperlukan untuk melakukan perhitungan dan analisa dari sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran untuk memperoleh beberapa nilai yang dicari.

Tabel 4.1 Data-data sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran [3]

| No. | Deskripsi | Nilai | Satuan |
|-----|--|--------|--------|
| 1. | Resistansi pentanahan | 0,3 | Ohm |
| 2. | Arus hubung singkat | 3.284 | Ampere |
| 3. | Lama waktu gangguan hubung singkat | 0,075 | Detik |
| 4. | Resistansi jenis rata-rata tanah | 100 | Ohm |
| 5. | Jumlah konduktor <i>rod</i> | 221 | Buah |
| 6. | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang | 3 | Meter |
| 7. | Kedalaman penanaman konduktor | 0,6 | Meter |
| 8. | Diameter batang pentanahan | 0,0127 | Meter |
| 9. | Panjang sisi konduktor <i>grid</i> | 215 | Meter |
| 10. | Lebar sisi konduktor <i>grid</i> | 192 | Meter |
| 11. | Jarak antar konduktor <i>grid</i> | 8 | Meter |
| 12. | Ketebalan lapisan batu koral | 0,1 | Meter |

Data sekunder pada Tabel 4.1 ini merupakan data utama dalam melakukan perhitungan untuk mencari nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh, tegangan langkah, dan *ground potential rise* pada GITET 500 KV Ungaran. Selain itu juga sebagai penentu dalam mencari besarnya tegangan sentuh yang diizinkan dan tegangan langkah yang diizinkan. Data-data tersebut sudah penulis dapatkan secara lengkap dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Ahmad Riyanda Saputra tahun 2018 dan Meike Alif Latifah tahun 2019 mengenai sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran.

4.1 Pemetaan Perubahan Panjang Konduktor Rod Pada Sistem Pentanahan

Perkalian antara jumlah konduktor *rod* dengan panjang konduktor *rod* tiap batang menghasilkan L_r , yang mana merupakan panjang konduktor *rod* secara total. Akan dilakukan pembahasan mengenai jumlah konduktor *rod* dan panjang konduktor *rod* tiap batang pada bagian ini. Simulasi dilakukan dengan melakukan modifikasi terhadap jumlah konduktor *rod* dan panjang konduktor *rod* tiap batang pada sistem pentanahan. Dilakukannya modifikasi ini bertujuan untuk mengetahui dampak atau pengaruh yang terjadi atas perubahan jumlah konduktor *rod* dan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap parameter sistem pentanahan. Parameter sistem pentanahan ini meliputi resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, serta *ground potential rise* (GPR).

Simulasi perubahan yang akan dilakukan dari jumlah konduktor *rod* dan panjang konduktor *rod* tiap batang berupa perubahan pada salah satu variabelnya saja. Sehingga perubahan tidak dilakukan terhadap kedua variabel tersebut, melainkan salah satu nilainya saja, yang disesuaikan dengan Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Pemetaan simulasi perhitungan

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang |
|-----|-----------------------------|--|
| 1. | Variabel | Tetap |
| 2. | Tetap | Variabel |

Pemetaan simulasi perubahan yang akan dilakukan, disesuaikan dengan Tabel 4.2, yang memberikan gambaran tentang perhitungan apa yang akan divariabelkan dan yang tidak divariabelkan atau tetap.

4.2 Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor Rod

Jumlah konduktor *rod* (Q) merupakan jumlah total banyaknya konduktor yang menancap tegak lurus ke dalam tanah, yang menempel di bawah konstruksi *grid*. Simulasi perhitungan yang akan dilakukan yaitu melakukan perubahan jumlah konduktor *rod* yang akan dibuat semakin sedikit dan semakin banyak dari jumlah

konduktor *rod* semula. Perubahan ini dilakukan dengan panjang tiap batang *rod* yang masih tetap. Kemudian mencari nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya, tegangan langkah sebenarnya, dan *ground potential rise*.

4.2.1 Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor *Rod* Terhadap Resistansi Pentanahan

Mengacu pada ketentuan IEEE/ANSI Std 80/2013, nilai resistansi pentanahan harus bernilai $\leq 1 \Omega$. Bilamana nilai resistansi pentanahan berada pada nilai $\leq 1 \Omega$, maka sistem pentanahan suatu GITET dapat dikatakan dalam kondisi baik dan memenuhi standar. GITET 500 KV Ungaran memiliki nilai resistansi pentanahan terukur sebesar $0,3 \Omega$. Nilai tersebut sudah dapat dikatakan baik karena telah memenuhi standar.

Nilai resistansi pentanahan terhitung dapat dicari dengan mencari nilai resistansi jenis tanah. Nilai resistansi jenis tanah yang akan dipakai menyesuaikan data resistansi jenis tanah pada Tabel 2.1 berdasarkan PUIL 2011. Selanjutnya mencari total panjang konduktor *grid* dan total panjang konduktor *rod*, yang dari keduanya akan didapatkan nilai total panjang konduktor pentanahan. Kemudian mencari luas area sistem pentanahan.

Berikut adalah perhitungan dalam mencari resistansi pentanahan dengan jumlah konduktor *rod* = 221. Besarnya nilai resistansi pentanahan dicari dengan persamaan (2.1) dengan mensubstitusikan data-data yang ada pada Tabel 4.1. Sebelum mencari nilai resistansi pentanahan, perlu mencari dahulu beberapa nilai yang dibutuhkan, yaitu:

1. Jumlah konduktor paralel di sisi panjang *grid*

$$\begin{aligned} n &= \frac{L_2}{D_2} + 1 \\ &= \frac{192}{8} + 1 \\ &= 24 + 1 \\ &= 25 \text{ buah} \end{aligned}$$

2. Jumlah konduktor paralel di sisi lebar *grid*

$$\begin{aligned}
 m &= \frac{L_1}{D_1} + 1 \\
 &= \frac{215}{8} + 1 \\
 &= 26,875 + 1 \\
 &= 27,875 \\
 &= 28 \text{ buah}
 \end{aligned}$$

3. Total panjang konduktor *grid*

$$\begin{aligned}
 L_c &= L_1 n + L_2 m \\
 &= (215 \cdot 25) + (192 \cdot 28) \\
 &= 5375 + 5376 \\
 &= 10751 \text{ m}
 \end{aligned}$$

4. Total panjang konduktor *rod*

$$\begin{aligned}
 L_r &= Q \cdot P \\
 &= 221 \cdot 3 \\
 &= 663 \text{ m}
 \end{aligned}$$

5. Total panjang konduktor pentanahan

$$\begin{aligned}
 L &= L_c + L_r \\
 &= 10751 + 663 \\
 &= 11414 \text{ m}
 \end{aligned}$$

6. Luas area pentanahan *grid-rod*

$$\begin{aligned}
 A &= L_1 \cdot L_2 \\
 &= 215 \cdot 192 \\
 &= 41280 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

7. Resistansi pentanahan

$$\begin{aligned}
 R_g &= \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \\
 &= 100 \left[\frac{1}{11414} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 41280}} \left(1 + \frac{1}{1+0,6\sqrt{\frac{20}{41280}}} \right) \right] \\
 &= 100 \left[\frac{1}{11414} + \frac{1}{908,625} \left(1 + \frac{1}{1+(0,6 \times 0,022)} \right) \right] \\
 &= 100 \left[0,0000876 + \frac{1}{908,625} \left(1 + \frac{1}{1,0132} \right) \right] \\
 &= 100 [0,0000876 + (0,0011 \times 1,987)] \\
 &= 100(0,0000876 + 0,0021857) \\
 &= 100(0,002274) \\
 &= 0,2274 \Omega
 \end{aligned}$$

Menurut perhitungan, nilai resistansi pentanahan GITET 500 KV Ungaran tergolong masih aman dan dalam kondisi baik karena bernilai 0,2274 Ω . Sedangkan menurut pengukuran di lapangan dalam Tabel 4.1 didapatkan nilai 0,3 Ω . Terdapat sedikit selisih nilai antara hasil perhitungan dengan pengukuran, akan tetapi nilai resistansi pentanahan pada GITET 500 KV Ungaran masih sesuai standar keamanan, yaitu $R_g \leq 1 \Omega$.

Hasil dari simulasi perhitungan atas perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap resistansi pentanahan ini disajikan dalam Gambar 4.1. Simulasi dilakukan sebanyak 700 kali, mulai dari 1 buah sampai dengan 700 buah. Sementara panjang konduktor *rod* tiap batang dibuat tetap, yaitu 3 meter. Jumlah konduktor *rod* dibuat lebih sedikit dan lebih banyak dari jumlah awal secara bertahap untuk mengetahui perubahan yang terjadi terhadap resistansi pentanahan.



Gambar 4.1 Grafik perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap resistansi pentanahan

Hasil simulasi untuk mengetahui berapa nilai resistansi pentanahan jika jumlah konduktor *rod* diubah dan panjang konduktor *rod* tiap batang dibuat tetap, divisualkan dengan Tabel 4.3 untuk lebih menjelaskan hasil simulasi berdasarkan Gambar 4.1.

Tabel 4.3 Perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai resistansi pentanahan

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai resistansi penta- nahan (Ω) |
|-----|---------------------------------------|---|---|
| 1. | 40 | 3 | 0,2279 |
| 2. | 130 | 3 | 0,2277 |
| 3. | 270 | 3 | 0,2273 |
| 4. | 460 | 3 | 0,2269 |
| 5. | 700 | 3 | 0,2265 |

Dari Tabel 4.3, dapat dilakukan analisa atas perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap resistansi pentanahan. Alasan pengambilan nilai sebanyak 5 contoh dari 40 sampai 700 didasarkan menurut keseimbangan konstruksi sistem pentanahan, dimana konduktor *rod* akan mengikuti konstruksi konduktor paralel *grid* yang berjumlah 25 dan 28 pada sisi panjang dan lebarnya.

Apabila jumlah konduktor *rod* semakin banyak, maka nilai resistansi pentanahan akan semakin menurun atau semakin kecil. Sedangkan apabila jumlah konduktor *rod* semakin sedikit, maka nilai resistansi pentanahan akan semakin meningkat atau semakin besar.

Ketika jumlah konduktor *rod* awal sebanyak 221 buah, nilai resistansi pentanahannya sebesar 0,2274 Ω . Kemudian jumlah konduktor *rod* diubah menjadi 40 buah, nilai resistansi pentanahannya mengalami peningkatan sebesar 0,0005 Ω , sehingga menjadi 0,2279 Ω . Saat jumlah konduktor *rod* diubah kembali menjadi 130 buah, maka nilai resistansi pentanahannya mengalami kenaikan kembali sebesar 0,0003 Ω , menjadi 0,2277 Ω .

Untuk mengetahui pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap resistansi pentanahan, dilakukan simulasi kembali dengan memperbanyak jumlah konduktor *rod*. Jumlah konduktor *rod* diperbanyak menjadi 270 buah. Maka terjadi penurunan nilai resistansi pentanahan sebesar 0,0001 Ω , sehingga menjadi 0,2273 Ω . Kemudian saat jumlah konduktor *rod* menjadi 460 buah, nilai resistansi pentanahan menurun sebesar 0,0005 Ω menjadi 0,2269 Ω . Lalu dengan mengubah jumlah konduktor *rod* menjadi 700 buah, nilai resistansi pentanahan menurun sebesar 0,0009 Ω , menjadi 0,2265 Ω .

Nilai resistansi pentanahan ketika dilakukan perubahan jumlah konduktor *rod* dengan panjang konduktor *rod* tiap batang tetap, mengalami perubahan yang cukup terlihat. Peningkatan dan penurunan nilai resistansi pentanahan ini relatif kecil, yaitu senilai 0,0001 Ω sampai 0,0009 Ω , dengan hasil perhitungan antara 0,2265 Ω sampai 0,2279 Ω .

Jadi, penambahan dan penyusutan jumlah konduktor *rod* memang berpengaruh terhadap resistansi pentanahan, akan tetapi tidak berpengaruh besar

dan masih dalam batas aman, dimana nilai tertingginya adalah $0,2277 \Omega$ dan masih sesuai standar PLN yaitu $\leq 1 \Omega$.

4.2.2 Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor Rod Terhadap Tegangan Sentuh Sebenarnya

Sebelum mencari nilai tegangan sentuh sebenarnya (E_{tm}), perlu mencari besar nilai arus *grid* maksimum (I_G). Sesuai IEEE/ANSI Std 80/2013, besar arus *grid* maksimum (I_G) untuk GITET 500 KV Ungaran yaitu sebanyak 60% dari arus hubung singkat 3 fasa Gardu Induk. Arus hubung singkat 3 fasa pada GITET 500 KV Ungaran sebesar 3284 ampere, maka arus *grid* maksimumnya (I_G) sebesar 1970,4 ampere. Selain itu, besar arus *grid* maksimum dapat dibuktikan dengan persamaan (2.10) dan (2.11).

$$\begin{aligned}
 I_G &= C_p D_f I_g \\
 &= C_p D_f S_f I_f \\
 &= 1 \times 1 \times (0,6) \times 3284 \\
 &= (0,6) \times 3284 \\
 &= 1970,4 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Besarnya nilai tegangan sentuh sebenarnya tidak boleh lebih dari tegangan sentuh yang diizinkan. Selanjutnya, tegangan sentuh sebenarnya (E_{tm}) dapat dicari dengan mendapatkan nilai resistansi tanah rata-rata (ρ) dan nilai arus *grid* maksimum (I_G) yang telah didapatkan pada perhitungan sebelumnya.

Perhitungan tegangan sentuh sebenarnya dapat mengacu pada persamaan (2.14) dan data sekunder dari Tabel 4.1. Berdasarkan persamaan (2.14), langkah awal adalah diperlukan untuk mencari nilai faktor geometrik tegangan sentuh sebenarnya (K_m) dahulu dengan persamaan (2.15), yang di dalamnya juga ditunjang dengan persamaan (2.16) dan (2.17). Kemudian langkah selanjutnya mencari nilai faktor koreksi untuk ketidakmerataan kerapatan arus (K_i). Setelah semua nilai

didapatkan, maka nilai tegangan sentuh sebenarnya dapat dicari. Perhitungan nilai tegangan sentuh sebenarnya untuk $Q = 221$ adalah sebagai berikut.

1. Faktor koreksi massa pada tekanan dari efek kedalaman *grid*

$$\begin{aligned}
 K_h &= \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \\
 &= \sqrt{1 + \frac{0,6}{1}} \\
 &= \sqrt{1 + 0,6} \\
 &= \sqrt{1,6} \\
 &= 1,265
 \end{aligned}$$

2. Jumlah konduktor paralel dalam kisi-kisi *grid*

$$\begin{aligned}
 N &= \sqrt{n \times m} \\
 &= \sqrt{25 \times 28} \\
 &= \sqrt{700} \\
 &= 26,46 \\
 &= 27 \text{ buah}
 \end{aligned}$$

3. Faktor geometrik tegangan sentuh sebenarnya

$$\begin{aligned}
 K_m &= \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right] \\
 &= \frac{1}{2 \times 3,14} \left[\ln \left(\frac{8^2}{16 \times 0,6 \times 0,0127} + \frac{(8+2 \times 0,6)^2}{8 \times 8 \times 0,0127} - \frac{0,6}{4 \times 0,0127} \right) + \frac{1}{1,265} \ln \frac{8}{3,14(2 \times 27 - 1)} \right] \\
 &= \frac{1}{6,28} \left[\ln \left(\frac{64}{0,1219} + \frac{9,2^2}{0,8128} - \frac{0,6}{0,0508} \right) + 0,79 \ln \frac{8}{3,14 \times 53} \right] \\
 &= \frac{1}{6,28} \left[\ln \left(\frac{64}{0,1219} + \frac{84,64}{0,8128} - \frac{0,6}{0,0508} \right) + 0,79 \ln \frac{8}{166,42} \right] \\
 &= 0,159 [\ln(525 + 104,13 - 11,81) + 0,79 \ln 0,048] \\
 &= 0,159 [\ln(617,32) + 0,79 \ln 0,048]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,159[(6,425) + (0,79x(-3,03655))] \\
 &= 0,159[6,425 - 2,399] \\
 &= 0,159x(4,026) \\
 &= 0,64
 \end{aligned}$$

4. Faktor koreksi untuk ketidakmerataan kerapatan arus

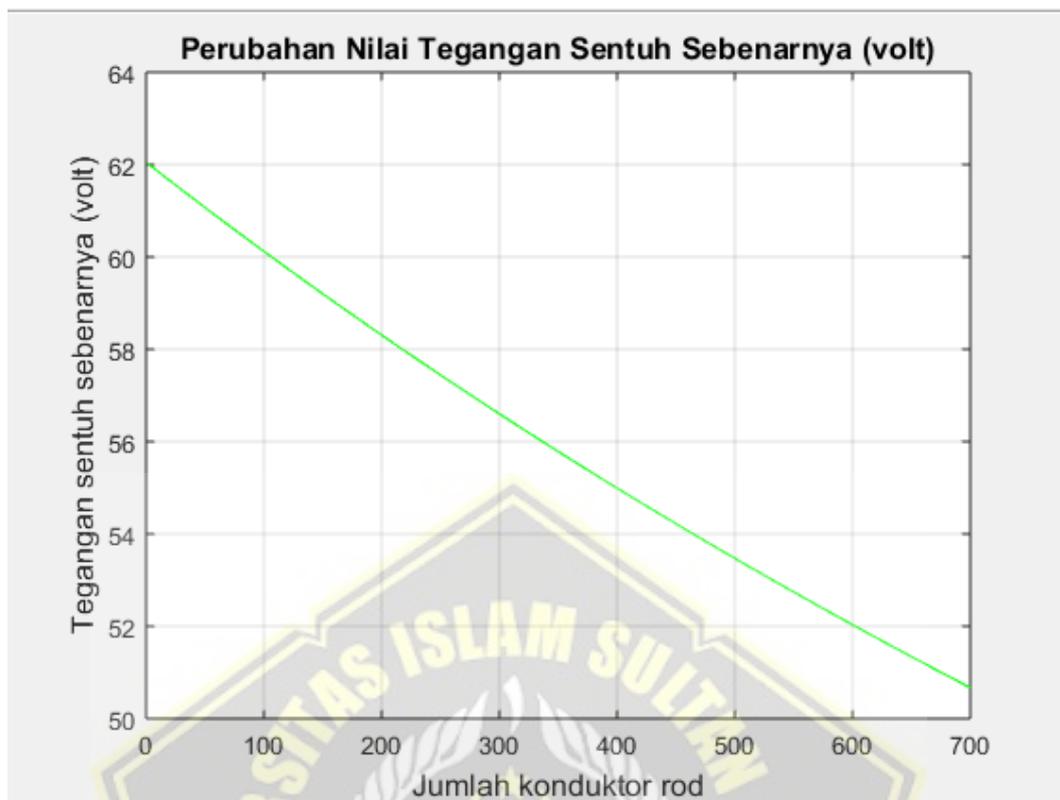
$$\begin{aligned}
 K_i &= 0,65 + 0,172(N) \\
 &= 0,65 + (0,172 \times 27) \\
 &= 0,65 + 4,64 \\
 &= 5,29
 \end{aligned}$$

5. Tegangan sentuh sebenarnya

$$\begin{aligned}
 E_{tm} &= \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_c + 1,15L_r} \\
 &= \frac{100 \times 1970,4 \times 0,64 \times 5,29}{10751 + (1,15 \times 663)} \\
 &= \frac{667098,624}{10751 + 762,45} \\
 &= \frac{667098,624}{11513,45} \\
 &= 57,94 \text{ v}
 \end{aligned}$$

Perhitungan ini menghasilkan nilai tegangan sentuh sebenarnya sebesar 57,94 volt.

Hasil perhitungan perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap tegangan sentuh sebenarnya dengan simulasi *matlab*, disajikan seperti pada Gambar 4.2. Simulasi dilakukan sebanyak 700 kali, mulai dari 1 buah sampai dengan 700 buah. Sementara panjang konduktor *rod* tiap batang dibuat tetap, yaitu 3 meter. Jumlah konduktor *rod* dibuat lebih sedikit dan lebih banyak dari jumlah awal secara bertahap untuk mengetahui perubahan yang terjadi terhadap tegangan sentuh sebenarnya.



Gambar 4.2 Grafik perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap tegangan sentuh sebenarnya

Hasil simulasi untuk mengetahui berapa nilai tegangan sentuh sebenarnya jika jumlah konduktor *rod* diubah dan panjang konduktor *rod* tiap batang dibuat tetap, divisualkan dengan Tabel 4.4 untuk lebih menjelaskan hasil simulasi dari Gambar 4.2.

Tabel 4.4 Perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap tegangan sentuh sebenarnya

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai tegangan sentuh sebenarnya (volt) |
|-----|---------------------------------------|---|--|
| 1. | 40 | 3 | 61,26 |
| 2. | 130 | 3 | 59,56 |
| 3. | 270 | 3 | 57,10 |
| 4. | 460 | 3 | 54,07 |
| 5. | 700 | 3 | 50,67 |

Dari Tabel 4.4, dapat dilakukan analisa atas perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap tegangan sentuh sebenarnya. Alasan pengambilan nilai sebanyak 5 contoh dari 40 sampai 700 didasarkan menurut keseimbangan konstruksi sistem pentanahan, dimana konduktor *rod* akan mengikuti konstruksi konduktor paralel *grid* yang berjumlah 25 dan 28 pada sisi panjang dan lebarnya.

Apabila jumlah konduktor *rod* semakin banyak, maka nilai tegangan sentuh sebenarnya akan semakin menurun atau semakin kecil. Sedangkan apabila jumlah konduktor *rod* semakin sedikit, maka nilai tegangan sentuh sebenarnya akan semakin meningkat atau semakin besar.

Ketika jumlah konduktor *rod* awal sebanyak 221 buah, tegangan sentuh sebenarnya sebesar 57,94 volt. Kemudian jumlah konduktor *rod* diubah menjadi 40 buah, nilai tegangan sentuh sebenarnya mengalami peningkatan sebesar 3,32 volt, sehingga menjadi 61,26 volt. Saat jumlah konduktor *rod* diubah kembali menjadi 130 buah, maka tegangan sentuh sebenarnya mengalami kenaikan kembali sebesar 1,62 volt, menjadi 59,56 volt.

Untuk mengetahui pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya, dilakukan simulasi kembali dengan memperbanyak jumlah konduktor *rod*. Jumlah konduktor *rod* diperbanyak menjadi 270 buah. Maka terjadi penurunan tegangan sentuh sebenarnya sebesar 0,84 volt, sehingga menjadi 57,10 volt. Kemudian saat jumlah konduktor *rod* menjadi 460 buah, tegangan sentuh sebenarnya menurun kembali sebesar 3,87 volt menjadi 54,07 volt. Lalu dengan mengubah jumlah konduktor *rod* menjadi 700 buah, nilai tegangan sentuh sebenarnya menurun sebesar 7,27 volt, menjadi 50,67 volt.

Nilai tegangan sentuh sebenarnya ketika dilakukan perubahan jumlah konduktor *rod* dengan panjang konduktor *rod* tiap batang tetap, mengalami perubahan yang cukup terlihat. Peningkatan dan penurunan nilai tegangan sentuh sebenarnya relatif kecil, yaitu dari 0,84 volt sampai 7,27 volt, dengan hasil perhitungan antara 50,67 volt sampai 61,26 volt.

Jadi, penambahan dan penyusutan jumlah konduktor *rod* memang berpengaruh terhadap tegangan sentuh sebenarnya, akan tetapi tidak berpengaruh besar.

4.2.3 Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor Rod Terhadap Tegangan Langkah Sebenarnya

Sebelum mencari tegangan langkah sebenarnya (E_{sm}), perlu untuk mencari besar nilai arus *grid* maksimum (I_G). Sesuai IEEE/ANSI Std 80/2013, besar arus *grid* maksimum (I_G) untuk GITET 500 KV Ungaran yaitu sebanyak 60% dari arus hubung singkat 3 fasa gardu induk. Arus hubung singkat 3 fasa pada GITET 500 KV Ungaran sebesar 3284 ampere, maka arus *grid* maksimumnya (I_G) sebesar 1970,4 ampere. Selain itu, besar arus *grid* maksimum dapat dibuktikan atau dicari dengan persamaan (2.10) dan (2.11).

$$\begin{aligned}
 I_G &= C_p D_f I_g \\
 &= C_p D_f S_f I_f \\
 &= 1 \times 1 \times (0,6) \times 3284 \\
 &= (0,6) \times 3284 \\
 &= 1970,4 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Besarnya tegangan langkah sebenarnya (E_{sm}) tidak boleh lebih dari tegangan langkah yang diizinkan. Nilai tegangan langkah sebenarnya (E_{sm}) dapat ditentukan dengan mendapatkan nilai resistansi tanah rata-rata (ρ) dan nilai arus *grid* maksimum (I_G) yang telah didapatkan pada perhitungan sebelumnya.

Perhitungan tegangan langkah sebenarnya mengacu pada persamaan (2.21) dan data sekunder dari Tabel 4.1. Berdasarkan persamaan (2.21) tersebut, terlebih dahulu diperlukan untuk mencari nilai konstanta tegangan langkah sebenarnya (K_s) dengan persamaan (2.22). Untuk menentukan besarnya K_s , diperlukan persamaan (2.16) untuk mendapatkan nilai N , yaitu jumlah konduktor paralel dalam kisi-kisi *grid*. Setelah semua nilai didapatkan, maka dapat ditentukan nilai tegangan langkah sebenarnya. Perhitungan nilai tegangan langkah sebenarnya adalah sebagai berikut.

1. Jumlah konduktor paralel dalam kisi-kisi *grid*

$$\begin{aligned}
 N &= \sqrt{n \times m} \\
 &= \sqrt{25 \times 28} \\
 &= \sqrt{700} \\
 &= 26,46 \\
 &= 27 \text{ buah}
 \end{aligned}$$

2. Konstanta tegangan langkah sebenarnya

$$\begin{aligned}
 K_s &= \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{N-2}) \right] \\
 &= \frac{1}{3,14} \left[\frac{1}{2 \times 0,6} + \frac{1}{8+0,6} + \frac{1}{8} (1 - 0,5^{27-2}) \right] \\
 &= 0,3185 \left[\frac{1}{1,2} + \frac{1}{8,6} + \frac{1}{8} (1 - 0,5^{25}) \right] \\
 &= 0,3185 [0,833 + 0,116 + 0,125(1 - 2,98 \times 10^{-8})] \\
 &= 0,3185 [0,949 + 0,125(1)] \\
 &= 0,3185 \times (1,074) \\
 &= 0,342
 \end{aligned}$$

3. Faktor koreksi untuk ketidakmerataan kerapatan arus

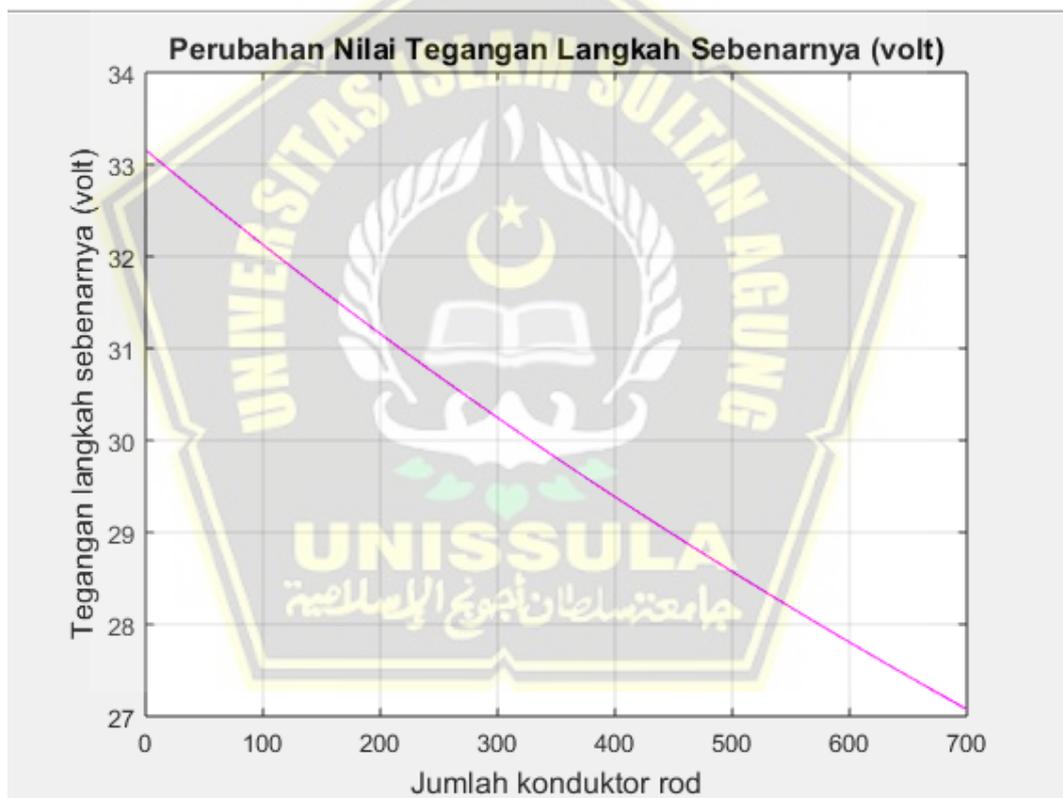
$$\begin{aligned}
 K_i &= 0,65 + 0,172(N) \\
 &= 0,65 + (0,172 \times 27) \\
 &= 0,65 + 4,64 \\
 &= 5,29
 \end{aligned}$$

4. Tegangan langkah sebenarnya

$$\begin{aligned}
 E_{sm} &= \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_c + 1,15 L_r} \\
 &= \frac{100 \times 1970,4 \times 0,342 \times 5,29}{10751 + (1,15 \times 663)} \\
 &= \frac{356480,8272}{10751 + 762,45}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{356480,8272}{11513,45} \\
 &= 30,96 \text{ v}
 \end{aligned}$$

Perhitungan jumlah konduktor paralel dalam kisi-kisi *grid*, konstanta tegangan langkah sebenarnya, dan faktor koreksi untuk ketidakmerataan kerapatan arus, menghasilkan nilai tegangan langkah sebenarnya yang terdapat pada GITET 500 KV Ungaran sebesar 30,96 volt. Selanjutnya, untuk mengetahui bagaimana pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap berapa besarnya nilai tegangan langkah sebenarnya, dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap tegangan langkah sebenarnya

Hasil simulasi untuk mengetahui berapa nilai tegangan langkah sebenarnya jika jumlah konduktor *rod* diubah dan panjang konduktor *rod* tiap batang dibuat tetap, divisualkan dengan Tabel 4.5 untuk lebih menjelaskan hasil simulasi dari Gambar 4.3.

Tabel 4.5 Perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap tegangan langkah sebenarnya

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai tegangan langkah sebenarnya (volt) |
|-----|---------------------------------------|---|---|
| 1. | 40 | 3 | 32,74 |
| 2. | 130 | 3 | 31,83 |
| 3. | 270 | 3 | 30,51 |
| 4. | 460 | 3 | 28,89 |
| 5. | 700 | 3 | 27,08 |

Dari Tabel 4.5, dapat dilakukan analisa atas perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap tegangan langkah sebenarnya. Alasan pengambilan nilai sebanyak 5 contoh dari 40 sampai 700 didasarkan menurut keseimbangan konstruksi sistem pentanahan, dimana konduktor *rod* akan mengikuti konstruksi konduktor paralel *grid* yang berjumlah 25 dan 28 pada sisi panjang dan lebarnya.

Apabila jumlah konduktor *rod* semakin banyak, maka nilai tegangan langkah sebenarnya akan semakin menurun atau semakin kecil. Sedangkan apabila jumlah konduktor *rod* semakin sedikit, maka nilai tegangan langkah sebenarnya akan semakin meningkat atau semakin besar.

Ketika jumlah konduktor *rod* awal sebanyak 221 buah, besarnya tegangan langkah sebenarnya adalah 30,96 volt. Kemudian jumlah konduktor *rod* diubah menjadi 40 buah, nilai tegangan langkah sebenarnya meningkat sebesar 1,78 volt, sehingga menjadi 32,74 volt. Saat jumlah konduktor *rod* diubah kembali menjadi 130 buah, maka tegangan langkah sebenarnya mengalami kenaikan kembali sebesar 0,87 volt, menjadi 31,83 volt.

Untuk mengetahui pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap tegangan langkah sebenarnya, simulasi kembali dilakukan dengan memperbanyak jumlah konduktor *rod*. Jumlah konduktor *rod* diperbanyak menjadi 270 buah. Maka terjadi penurunan tegangan langkah sebenarnya sebesar 0,45 volt, sehingga menjadi 30,51 volt. Kemudian saat jumlah konduktor *rod* menjadi 460 buah, tegangan langkah sebenarnya menurun kembali sebesar 2,07 volt menjadi 28,89 volt. Lalu

dengan mengubah jumlah konduktor *rod* menjadi 700 buah, nilai tegangan langkah sebenarnya terus menurun sebesar 3,88 volt, menjadi 27,08 volt.

Nilai tegangan langkah sebenarnya ketika dilakukan perubahan jumlah konduktor *rod* dengan panjang konduktor *rod* tiap batang tetap, mengalami perubahan yang cukup terlihat. Peningkatan dan penurunan nilai tegangan langkah sebenarnya ini relatif kecil, yaitu dari 0,45 volt sampai 3,88 volt, dengan hasil perhitungan antara 27,08 volt sampai dengan 32,74 volt.

Jadi, penambahan dan penyusutan jumlah konduktor *rod* memang berpengaruh terhadap besarnya tegangan langkah sebenarnya, akan tetapi tidak berpengaruh besar.

4.2.4 Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor Rod Terhadap Ground Potential Rise

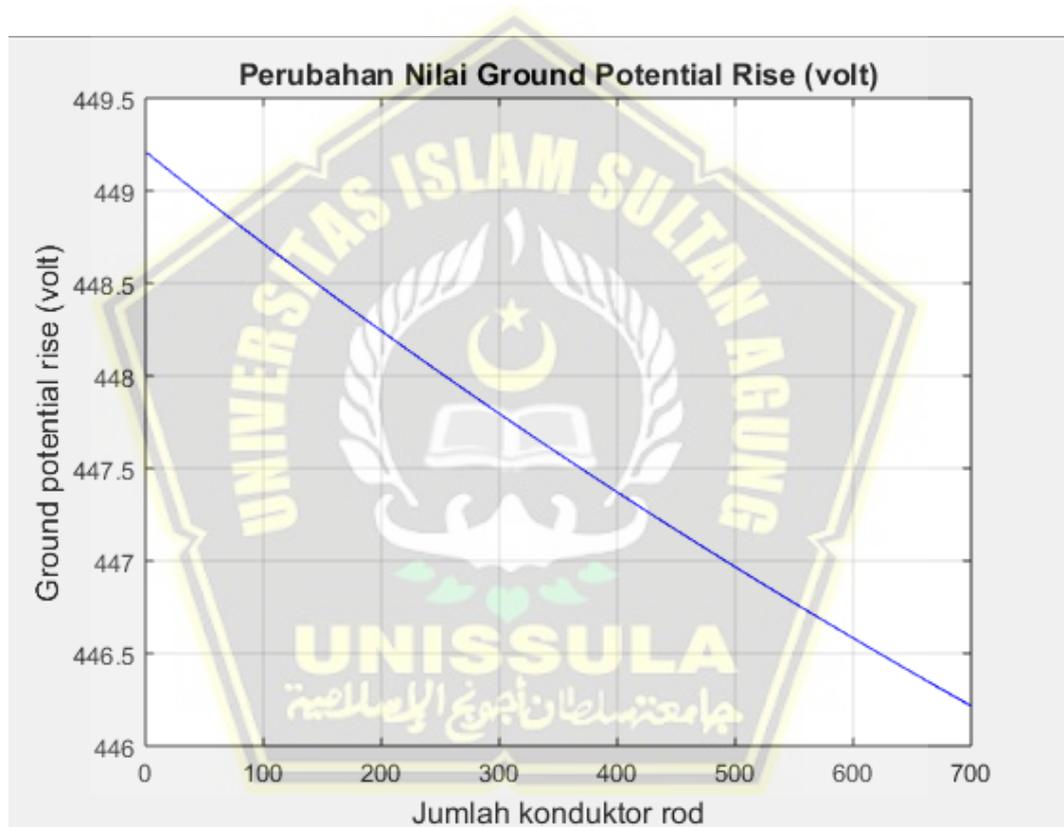
Salah satu aspek yang menjadikan suatu GITET dapat dikatakan memenuhi standar keamanan adalah nilai *ground potential rise* (GPR). Nilai GPR ini tidak boleh melebihi besarnya nilai tegangan langkah yang diizinkan pada GITET 500 KV Ungaran. Setelah mencari besarnya nilai GPR pada GITET 500 KV Ungaran, selanjutnya harus menentukan besarnya nilai tegangan langkah yang diizinkan, sehingga dapat menjadi pembanding apakah nilai GPR ini nantinya dapat dikatakan sudah aman dan memenuhi standar yang berlaku atau belum.

Besarnya nilai GPR tergantung dari besarnya nilai resistansi pentanahan (R_g) dan arus *grid* maksimum (I_G). Hal ini dikarenakan GPR merupakan hasil perkalian antara resistansi pentanahan (R_g) dan arus *grid* maksimum (I_G). Berikut adalah salah satu perhitungan dalam mencari GPR dari hasil modifikasi jumlah konduktor *rod* untuk $Q = 221$. Perhitungan nilai dari GPR ini diperoleh dengan persamaan (2.23).

$$\begin{aligned} GPR &= R_g I_G \\ &= 0,2274 \times 1970,4 \\ &= 448,07 \text{ v} \end{aligned}$$

Hasil dari perhitungan nilai GPR, didapatkan besarnya nilai GPR adalah sebesar 448,07 volt.

Untuk mengetahui pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai GPR, dapat dilihat pada Gambar 4.4. Simulasi dilakukan sebanyak 700 kali, mulai dari 1 buah sampai dengan 700 buah. Sementara panjang konduktor *rod* tiap batang dibuat tetap, yaitu 3 meter. Jumlah konduktor *rod* dibuat lebih sedikit dan lebih banyak dari jumlah awal secara bertahap untuk mengetahui perubahan yang terjadi terhadap nilai GPR.



Gambar 4.4 Grafik perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap *ground potential rise*

Hasil simulasi untuk mengetahui berapa besarnya nilai *ground potential rise* jika jumlah konduktor *rod* diubah dan panjang konduktor *rod* tiap batang dibuat tetap, telah divisualkan melalui Tabel 4.6 untuk lebih menjelaskan mengenai isi dari hasil simulasi dengan *matlab* yang sebelumnya telah disajikan dengan Gambar 4.4.

Tabel 4.6 Perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap *ground potential rise*

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai <i>ground potential rise</i> (volt) |
|-----|---------------------------------------|---|--|
| 1. | 40 | 3 | 449,1 |
| 2. | 130 | 3 | 448,6 |
| 3. | 270 | 3 | 447,9 |
| 4. | 460 | 3 | 447,1 |
| 5. | 700 | 3 | 446,2 |

Tabel 4.6 dapat dijadikan acuan dalam melakukan analisa atas perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai GPR. Alasan pengambilan nilai sebanyak 5 contoh dari 40 sampai 700 didasarkan menurut keseimbangan konstruksi sistem pentanahan, dimana konduktor *rod* akan mengikuti konstruksi konduktor paralel *grid* yang berjumlah 25 dan 28 pada sisi panjang dan lebarnya.

Apabila jumlah konduktor *rod* semakin banyak, maka nilai GPR akan semakin menurun atau semakin kecil. Sedangkan apabila jumlah konduktor *rod* semakin sedikit, maka besarnya nilai GPR akan semakin meningkat atau semakin besar.

Ketika jumlah konduktor *rod* awal sebanyak 221 buah, besarnya nilai GPR berada di 448,07 volt. Kemudian jumlah konduktor *rod* diubah menjadi 40 buah, nilai GPR meningkat sebesar 1,03 volt, sehingga menjadi 449,1 volt. Saat jumlah konduktor *rod* diubah kembali menjadi 130 buah, maka nilai GPR mengalami kenaikan kembali sebesar 0,53 volt, menjadi 448,6 volt.

Untuk mengetahui pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap besarnya nilai GPR, simulasi kembali dilakukan dengan memperbanyak jumlah konduktor *rod*. Jumlah konduktor *rod* diperbanyak menjadi 270 buah. Maka terjadi penurunan nilai GPR sebesar 0,17 volt, sehingga menjadi 447,9 volt. Kemudian saat jumlah konduktor *rod* dinaikkan menjadi 460 buah, besarnya GPR menurun kembali sebesar 0,97 volt menjadi 447,1 volt. Lalu dengan mengubah jumlah konduktor *rod* menjadi 700 buah, besarnya nilai GPR terus menurun sebesar 1,87 volt, menjadi 446,2 volt.

Nilai GPR ketika dilakukan perubahan jumlah konduktor *rod* dengan panjang konduktor *rod* tiap batang tetap, mengalami perubahan yang cukup terlihat. Peningkatan dan penurunan nilai dari GPR ini sangat kecil, yaitu dari 0,17 volt sampai 1,87 volt, dengan hasil perhitungan antara 446,2 volt sampai 449,1 volt.

Jadi, penambahan dan penyusutan jumlah konduktor *rod* memang berpengaruh terhadap besarnya GPR, akan tetapi tidak berpengaruh besar.

4.3 Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor Rod Tiap Batang

Panjang konduktor *rod* tiap batang merupakan panjang konduktor *rod* untuk masing-masing batang yang terletak di bawah rangkaian kisi-kisi *grid* dan menancap tegak lurus ke dalam tanah. Batang konduktor *rod* ini panjangnya antara satu batang dengan yang lainnya adalah sama. Simulasi perhitungan yang akan dilakukan yaitu dengan melakukan perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang yang akan dibuat semakin pendek dan semakin panjang dari panjang konduktor *rod* tiap batang yang semula.

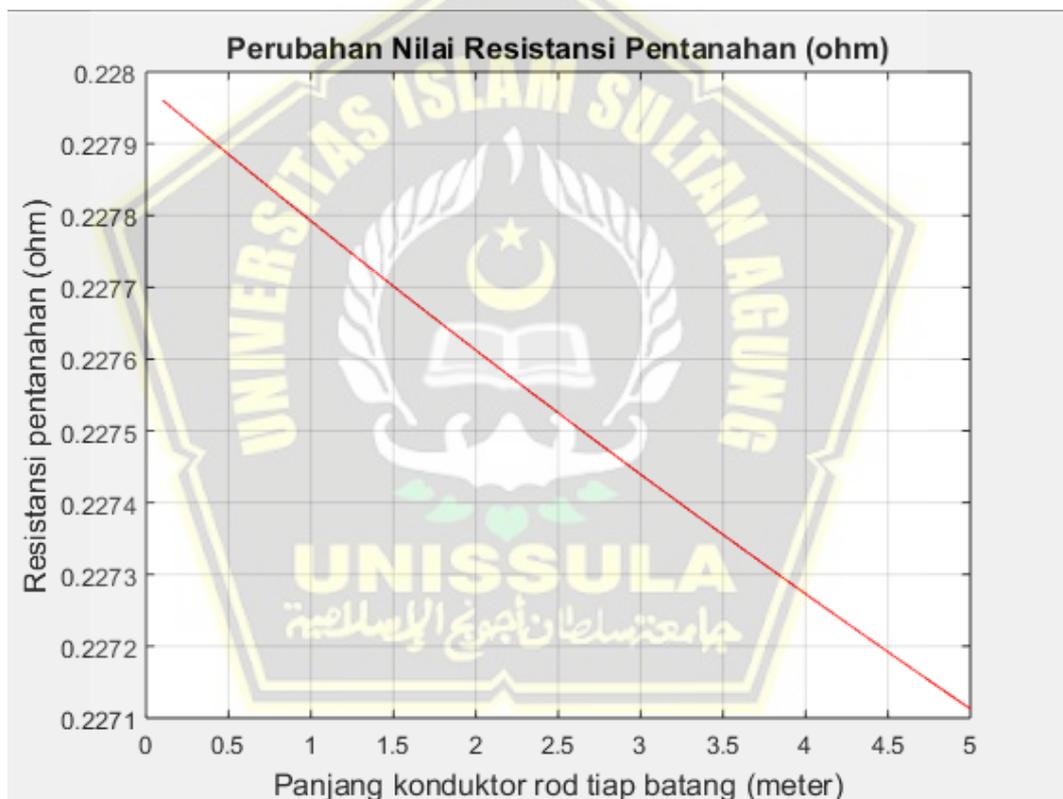
Perubahan ini dilakukan dengan jumlah konduktor *rod* yang dibuat tetap. Kemudian mencari besarnya nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya, tegangan langkah sebenarnya, dan nilai *ground potential rise*. Simulasi dilakukan sebanyak 50 kali, mulai dari 0,1 meter sampai dengan 5 meter, dengan selisih masing-masing panjangnya merata sebesar 0,1 meter.

Alasan pengambilan selisih 0,1 meter ini adalah supaya hasil simulasi yang didapat bisa lebih banyak, sehingga nantinya akan lebih terlihat perbedaan nilai dari hasil modifikasi yang telah disimulasikan. Panjang minimal konduktor *rod* tiap batang yang diambil adalah 0,1 meter. Ini dikarenakan syarat sistem pentanahan *grid-rod* yang dipakai oleh PLN mengharuskan untuk terdapat batang *rod* yang menempel pada *grid*, sehingga penelitian ini membatasi panjang minimal konduktor *rod* ada di 0,1 meter.

Panjang konduktor *rod* tiap batang dibuat lebih pendek dan lebih panjang dari yang semula di 3 meter secara bertahap untuk mengetahui perubahan yang terjadi terhadap resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya, tegangan langkah sebenarnya, dan nilai *ground potential rise*.

4.3.1 Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor *Rod* Tiap Batang Terhadap Resistansi Pentanahan

Pengaruh perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap resistansi pentanahan ditunjukkan Gambar 4.5, yang berisi hasil simulasi perhitungan perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap resistansi pentanahan, sementara jumlah konduktor *rod* dibuat tetap 221 buah. Panjang konduktor *rod* tiap batang dibuat lebih pendek dan lebih panjang dari yang semula di 3 meter secara bertahap untuk mengetahui perubahan yang terjadi terhadap nilai resistansi pentanahan.



Gambar 4.5 Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap resistansi pentanahan

Hasil simulasi untuk mengetahui berapa besarnya nilai resistansi pentanahan jika panjang konduktor *rod* tiap batang diubah dan jumlah konduktor *rod* dibuat tetap, divisualkan melalui Tabel 4.7 untuk lebih menjelaskan mengenai kandungan dari hasil simulasi dengan *matlab* yang sebelumnya telah disajikan dengan Gambar 4.5.

Tabel 4.7 Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap resistansi pentanahan

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai resistansi penta- nahan (Ω) |
|-----|---------------------------------------|---|---|
| 1. | 221 | 0,1 | 0,2280 |
| 2. | 221 | 1,3 | 0,2277 |
| 3. | 221 | 2,5 | 0,2275 |
| 4. | 221 | 3,8 | 0,2273 |
| 5. | 221 | 5 | 0,2271 |

Jika panjang konduktor *rod* tiap batang semakin panjang, maka nilai resistansi pentanahan akan semakin menurun atau semakin kecil. Sedangkan jika panjang konduktor *rod* tiap batang semakin menurun, maka nilai resistansi pentanahan akan semakin meningkat atau semakin besar.

Ketika panjang konduktor *rod* tiap batang semula 3 meter, nilai resistansi pentanahannya sebesar 0,2274 Ω . Kemudian panjang konduktor *rod* tiap batang diubah menjadi 0,1 meter, hasilnya nilai resistansi pentanahannya mengalami peningkatan sebesar 0,0006 Ω , sehingga menjadi 0,2280 Ω . Saat panjang konduktor *rod* tiap batang diubah kembali menjadi 1,3 meter, maka nilai resistansi pentanahannya mengalami kenaikan kembali sebesar 0,0003 Ω , menjadi 0,2277 Ω . Panjang konduktor *rod* tiap batang diubah kembali menjadi 2,5 meter, maka terjadi kenaikan nilai resistansi pentanahan sebesar 0,0001 Ω , sehingga menjadi 0,2275 Ω .

Untuk mengetahui pengaruh perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap resistansi pentanahan, dilakukan simulasi kembali dengan menambah panjang dari konduktor *rod* tiap batang. Saat panjang konduktor *rod* tiap batang naik menjadi 3,8 meter, nilai resistansi pentanahan menurun sebesar 0,0001 Ω menjadi 0,2273 Ω . Lalu dengan mengubah panjang konduktor *rod* tiap batang menjadi 5 meter, maka nilai resistansi pentanahan menurun sebesar 0,0003 Ω , menjadi 0,2271 Ω .

Nilai resistansi pentanahan ketika dilakukan perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang dengan jumlah konduktor *rod* tetap, mengalami perubahan yang cukup terlihat. Peningkatan dan penurunan nilai resistansi pentanahan ini relatif

kecil, yaitu senilai $0,0001 \Omega$ sampai $0,0006 \Omega$, dengan hasil perhitungan antara $0,2271 \Omega$ sampai $0,2280 \Omega$.

Jadi, penambahan dan penyusutan panjang konduktor *rod* tiap batang memang berpengaruh terhadap resistansi pentanahan, akan tetapi tidak berpengaruh besar dan masih dalam batas aman, dimana nilai tertinggi adalah $0,2280 \Omega$ dan masih sesuai standar PLN yaitu $\leq 1 \Omega$.

4.3.2 Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor *Rod* Tiap Batang Terhadap Tegangan Sentuh Sebenarnya

Pengaruh perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya, dapat dilihat pada hasil dari simulasi *matlab* yang divisualkan oleh Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap tegangan sentuh sebenarnya

Hasil simulasi untuk mengetahui berapa nilai tegangan sentuh sebenarnya jika panjang konduktor *rod* tiap batang diubah dan jumlah konduktor *rod* dibuat tetap, dijelaskan dengan Tabel 4.8 untuk lebih menjelaskan hasil simulasi dari Gambar 4.6.

Tabel 4.8 Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap tegangan sentuh sebenarnya

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai tegangan sentuh sebenarnya (volt) |
|-----|---------------------------------------|---|--|
| 1. | 221 | 0,1 | 61,90 |
| 2. | 221 | 1,3 | 60,20 |
| 3. | 221 | 2,5 | 58,59 |
| 4. | 221 | 3,8 | 56,94 |
| 5. | 221 | 5 | 55,50 |

Jika panjang konduktor *rod* tiap batang semakin panjang, maka nilai tegangan sentuh sebenarnya akan semakin menurun atau semakin kecil. Sedangkan jika panjang konduktor *rod* tiap batang semakin menurun, maka nilai tegangan sentuh sebenarnya akan semakin meningkat atau semakin besar.

Ketika panjang konduktor *rod* tiap batang semula 3 meter, nilai tegangan sentuh sebenarnya sebesar 57,94 volt. Kemudian panjang konduktor *rod* tiap batang diubah menjadi 0,1 meter, hasilnya nilai tegangan sentuh sebenarnya mengalami peningkatan sebesar 3,96 volt, sehingga menjadi 61,90 volt. Saat panjang konduktor *rod* tiap batang diubah kembali menjadi 1,3 meter, nilai tegangan sentuh sebenarnya mengalami kenaikan kembali sebesar 2,26 volt, menjadi 60,20 volt. Panjang konduktor *rod* tiap batang diubah kembali menjadi 2,5 meter, maka terjadi kenaikan nilai tegangan sentuh sebenarnya sebesar 0,65 volt, menjadi 58,59 volt.

Untuk mengetahui pengaruh perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap besarnya tegangan sentuh sebenarnya, dilakukan simulasi kembali dengan menambah panjang dari konduktor *rod* tiap batang. Saat panjang konduktor *rod* tiap batang naik menjadi 3,8 meter, nilai tegangan sentuh sebenarnya menurun sebesar 1 volt menjadi 56,94 volt. Lalu dengan mengubah panjang konduktor *rod* tiap

batang menjadi 5 meter, kemudian nilai tegangan sentuh sebenarnya menurun sebesar 2,44 volt, menjadi 55,50 volt.

Besarnya nilai tegangan sentuh sebenarnya ketika dilakukan perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang dengan jumlah konduktor *rod* tetap, mengalami perubahan yang cukup terlihat. Peningkatan dan penurunan nilai tegangan sentuh sebenarnya yang terjadi relatif kecil, yaitu dari 0,65 volt sampai 3,96 volt, dengan hasil perhitungan antara 55,50 volt sampai 61,90 volt.

Jadi, penambahan dan pengurangan panjang konduktor *rod* tiap batang berpengaruh terhadap tegangan sentuh sebenarnya, akan tetapi tidak berpengaruh besar.

4.3.3 Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor *Rod* Tiap Batang Terhadap Tegangan Langkah Sebenarnya

Pengaruh perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya, ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap tegangan langkah sebenarnya

Hasil simulasi untuk mengetahui berapa nilai tegangan langkah sebenarnya jika panjang konduktor *rod* tiap batang diubah dan jumlah konduktor *rod* dibuat tetap, diperlihatkan dalam Tabel 4.9 untuk lebih menjelaskan hasil simulasi dari Gambar 4.7.

Tabel 4.9 Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai tegangan langkah sebenarnya (volt) |
|-----|---------------------------------------|---|--|
| 1. | 221 | 0,1 | 33,08 |
| 2. | 221 | 1,3 | 32,17 |
| 3. | 221 | 2,5 | 31,31 |
| 4. | 221 | 3,8 | 30,42 |
| 5. | 221 | 5 | 29,65 |

Jika panjang konduktor *rod* tiap batang semakin panjang, maka nilai tegangan langkah sebenarnya akan semakin menurun atau semakin kecil. Sedangkan jika panjang konduktor *rod* tiap batang semakin menurun, maka nilai tegangan langkah sebenarnya akan semakin meningkat atau semakin besar.

Ketika panjang konduktor *rod* tiap batang semula 3 meter, nilai tegangan langkah sebenarnya ada pada 30,96 volt. Kemudian panjang konduktor *rod* tiap batang diubah menjadi 0,1 meter, hasilnya nilai tegangan langkah sebenarnya mengalami peningkatan sebesar 2,12 volt, sehingga menjadi 33,08 volt. Saat panjang konduktor *rod* tiap batang diubah kembali menjadi 1,3 meter, nilai tegangan langkah sebenarnya mengalami kenaikan kembali sebesar 1,21 volt menjadi 32,17 volt. Panjang konduktor *rod* tiap batang diubah kembali menjadi 2,5 meter, maka terjadi kenaikan nilai tegangan langkah sebenarnya sebesar 0,35 volt, menjadi 31,31 volt.

Untuk mengetahui pengaruh perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap besarnya tegangan langkah sebenarnya, dilakukan simulasi kembali

dengan menambah panjang dari konduktor *rod* tiap batang. Saat panjang konduktor *rod* tiap batang naik menjadi 3,8 meter, nilai tegangan langkah sebenarnya menurun sebesar 0,54 volt menjadi 30,42 volt. Lalu dengan mengubah panjang konduktor *rod* tiap batang menjadi 5 meter, nilai tegangan langkah sebenarnya menurun sebesar 1,31 volt, menjadi 29,65 volt.

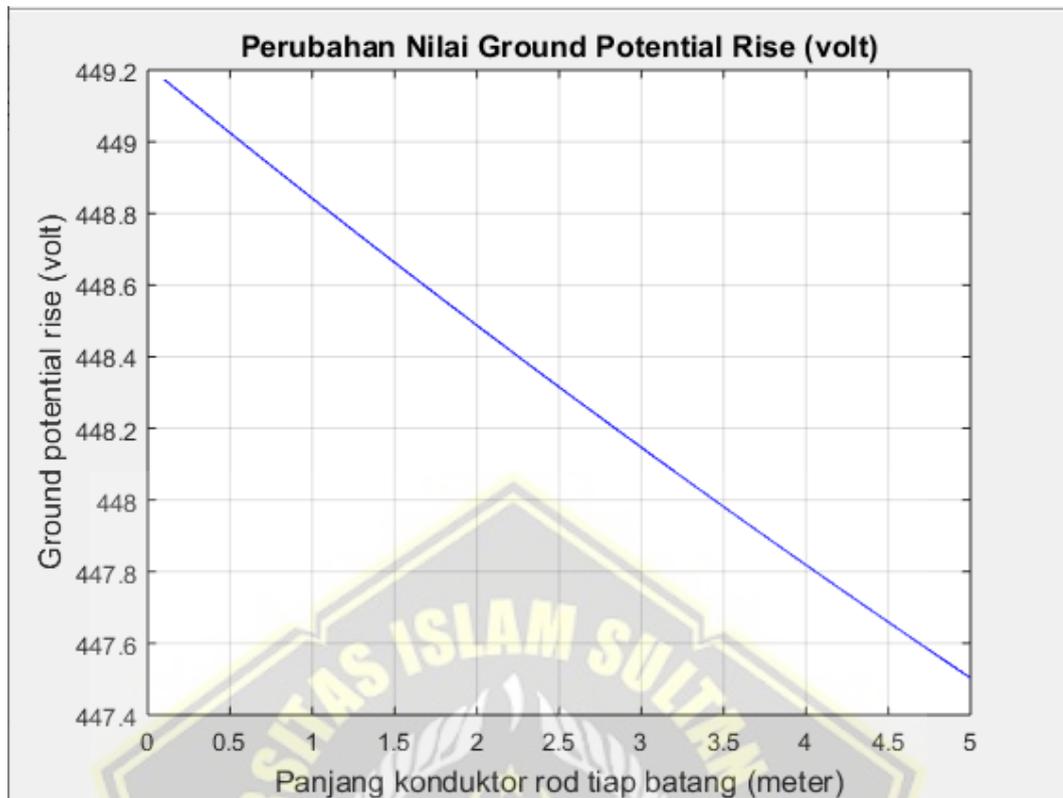
Besarnya nilai tegangan langkah sebenarnya ketika dilakukan perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang dengan jumlah konduktor *rod* tetap, mengalami perubahan yang cukup terlihat. Peningkatan dan penurunan nilai tegangan langkah sebenarnya yang terjadi relatif kecil, yaitu dari 0,35 volt sampai 2,12 volt, dengan hasil perhitungan antara 29,65 volt sampai 33,08 volt.

Jadi, penambahan dan pengurangan panjang konduktor *rod* tiap batang berpengaruh terhadap besarnya tegangan langkah sebenarnya, akan tetapi tidak berpengaruh besar.

4.3.4 Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor *Rod* Tiap Batang Terhadap *Ground Potential Rise*

Hasil simulasi atas pengaruh perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap besarnya nilai *ground potential rise* (GPR), dapat dilihat pada Gambar 4.8. Dari hasil analisa pada Tabel 4.10, perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap besarnya nilai GPR dapat dianalisa. Konduktor *rod* tiap batang dibuat lebih pendek dan lebih panjang secara bertahap untuk mengetahui perubahan yang terjadi terhadap berapa besarnya nilai GPR.

Sama halnya dengan simulasi yang dilakukan terhadap resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya dan tegangan langkah sebenarnya, simulasi pengaruh perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap GPR ini dilakukan sebanyak 5 kali, mulai dengan panjang konduktor *rod* tiap batangnya sebesar 0,1 meter sampai dengan akhirnya 5 meter. Panjang konduktor *rod* tiap batang ditambah dan dikurangi secara bertahap sebanyak 0,1 meter. Sementara itu jumlah konduktor *rod* dibuat tetap, yaitu 221 buah.



Gambar 4.8 Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap *ground potential rise*

Hasil simulasi untuk mengetahui berapa besarnya nilai GPR jika panjang konduktor *rod* tiap batang dimodifikasi dan jumlah konduktor *rod* dibuat tetap, diperlihatkan dalam Tabel 4.10 sebagai analisa untuk lebih menjelaskan hasil simulasi dari Gambar 4.8.

Tabel 4.10 Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap *ground potential rise*

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai <i>ground potential</i> <i>rise</i> (volt) |
|-----|---------------------------------------|---|---|
| 1. | 221 | 0,1 | 449,2 |
| 2. | 221 | 1,3 | 448,7 |
| 3. | 221 | 2,5 | 448,3 |
| 4. | 221 | 3,8 | 447,9 |
| 5. | 221 | 5 | 447,5 |

Apabila panjang konduktor *rod* tiap batang semakin panjang, maka nilai GPR akan semakin menurun atau semakin kecil. Sedangkan jika panjang konduktor *rod* tiap batang semakin menurun, maka nilai GPR akan semakin meningkat.

Ketika panjang konduktor *rod* tiap batang semula 3 meter, nilai GPR berada pada 448,07 volt. Kemudian panjang konduktor *rod* tiap batang diubah menjadi 0,1 meter, hasilnya nilai GPR mengalami peningkatan sebesar 1,13 volt menjadi 449,2 volt. Saat panjang konduktor *rod* tiap batang diubah kembali menjadi 1,3 meter, nilai GPR mengalami kenaikan kembali sebesar 0,36 volt menjadi 448,7 volt. Panjang konduktor *rod* tiap batang diubah kembali menjadi 2,5 meter, maka terjadi kenaikan nilai GPR sebesar 0,23 volt, menjadi 448,3 volt.

Untuk mengetahui pengaruh perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap besarnya nilai GPR, dilakukan simulasi kembali dengan menambah panjang dari konduktor *rod* tiap batang. Saat panjang konduktor *rod* tiap batang naik menjadi 3,8 meter, nilai GPR menurun sebesar 0,17 volt menjadi 447,9 volt. Lalu dengan mengubah panjang konduktor *rod* tiap batang menjadi 5 meter, nilai GPR menurun sebesar 0,57 volt menjadi 447,5 volt.

Peningkatan dan penurunan nilai GPR yang terjadi relatif kecil, yaitu dari 0,17 volt sampai 1,13 volt, dengan hasil perhitungan antara 447,5 volt sampai dengan 449,2 volt.

Jadi, penambahan dan pengurangan panjang konduktor *rod* tiap batang berpengaruh terhadap besarnya nilai GPR, akan tetapi tidak berpengaruh besar.

4.4 Perhitungan Tegangan Sentuh yang Diizinkan

Tegangan sentuh yang diizinkan (E_t) merupakan parameter yang penting dalam menentukan keandalan dan keamanan sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran. Besarnya nilai tegangan sentuh sebenarnya, tidak boleh melebihi tegangan sentuh yang diizinkan. Bilamana tegangan sentuh sebenarnya melebihi nilai tegangan sentuh yang diizinkan, maka arus *fibrilasi* dapat mengalir menuju badan manusia yang berada di area GITET 500 KV Ungaran, dan dapat menyebabkan kematian dikarenakan besarnya arus yang mengalir melewati tubuh dari manusia.

Tegangan sentuh yang diizinkan dapat dicari nilainya melalui perhitungan besarnya arus *fibrilasi* pada manusia dengan lama waktu gangguan yang terjadi pada GITET 500 KV Ungaran. Untuk massa manusia sebesar 50kg, arus *fibrilasinya* setara dengan 0,116 A. Dimana lama gangguan hubung singkat yang ada pada GITET 500 KV Ungaran sebesar 0,075 detik. Maka tegangan sentuh yang diizinkan dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.13). Untuk dapat mencari besarnya nilai tegangan sentuh yang diizinkan, diperlukan dahulu nilai arus *fibrilasinya*, yang didapatkan dengan persamaan (2.9).

$$\begin{aligned}
 I_k &= \frac{K}{\sqrt{t}} \\
 &= \frac{0,116}{\sqrt{t}} \\
 &= \frac{0,116}{\sqrt{0,075}} \\
 &= \frac{0,116}{0,274} \\
 &= 0,4236 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan nilai $I_k = 0,4236$ ampere, selanjutnya besarnya tegangan sentuh yang diizinkan dapat dicari dengan persamaan (2.13).

$$\begin{aligned}
 E_{t50} &= \left(1000 + \frac{3\rho_s}{2} C_s\right) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \\
 &= (1000 + 1,5 \times 3000 \times 1) \times 0,4236 \\
 &= (1000 + 4500) \times 0,4236 \\
 &= (5500) \times 0,4236 \\
 &= 2329,8 \\
 &= 2330 \text{ v}
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan yang didapatkan untuk tegangan sentuh yang diizinkan adalah 2330 volt, dengan lama waktu gangguan selama 0,075 detik. Karena berada di bawah standar yang ada pada Tabel 2.2, nilai ini masih dianggap sesuai dan aman untuk GITET 500 KV Ungaran.

Jadi, besarnya nilai tegangan sentuh yang diizinkan untuk GITET 500 KV Ungaran masih dalam batas aman dan sesuai standar.

4.5 Perhitungan Tegangan Langkah yang Diizinkan

Tegangan langkah yang diizinkan (E_s) merupakan parameter yang penting dalam menentukan keandalan dan keamanan sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran. Besarnya nilai tegangan langkah sebenarnya, tidak boleh melebihi tegangan langkah yang diizinkan. Jika tegangan langkah sebenarnya melebihi nilai tegangan langkah yang diizinkan, maka arus *fibrilasi* dapat mengalir menuju badan manusia yang berada di area GITET 500 KV Ungaran, dan dapat menyebabkan kematian dikarenakan besarnya arus yang mengalir melewati tubuh dari manusia.

Tegangan langkah (E_s) yang diizinkan dapat dicari nilainya melalui perhitungan besarnya arus *fibrilasi* pada manusia dengan lama waktu gangguan yang terjadi pada GITET 500 KV Ungaran. Untuk massa manusia sebesar 50kg, arus *fibrilasinya* setara dengan 0,116 A. Dimana lama waktu gangguan hubung singkat yang ada pada GITET 500 KV Ungaran adalah sebesar 0,075 detik. Maka tegangan langkah yang diizinkan dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.20). Untuk dapat mencari besarnya nilai tegangan langkah yang diizinkan, juga diperlukan dahulu nilai arus *fibrilasinya*, yang didapatkan dengan persamaan (2.9).

$$\begin{aligned}
 I_k &= \frac{K}{\sqrt{t}} \\
 &= \frac{0,116}{\sqrt{t}} \\
 &= \frac{0,116}{\sqrt{0,075}} \\
 &= \frac{0,116}{0,274} \\
 &= 0,4236 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Setelah nilai I_k didapatkan yaitu sebesar 0,4236 ampere, selanjutnya besarnya tegangan langkah yang diizinkan dapat dicari dengan persamaan (2.20).

$$\begin{aligned}
 E_{s50} &= (R_k + 6\rho_s C_s) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \\
 &= (1000 + 6 \times 3000 \times 1) \times 0,4236 \\
 &= (1000 + 18000) \times 0,4236 \\
 &= (19000) \times 0,4236 \\
 &= 8048,4 \\
 &= 8048 \text{ v}
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan yang didapatkan untuk tegangan langkah yang diizinkan adalah 8048 volt, dengan lama waktu gangguan selama 0,075 detik. Dikarenakan berada di bawah standar yang ada pada Tabel 2.3, nilai ini masih dianggap sesuai dan aman untuk GITET 500 KV Ungaran.

Jadi, besarnya nilai tegangan langkah yang diizinkan untuk GITET 500 KV Ungaran juga masih dalam batas aman dan sesuai standar.

4.6 Hasil Perhitungan

Nilai-nilai hasil dari perhitungan beberapa parameter pentanahan yang telah didapatkan sebelumnya telah dirangkum dalam Tabel 4.11. Pembuatan Tabel 4.11 ini bertujuan untuk mempermudah dalam melihat hasil dari perhitungan parameter-parameter sistem pentanahan yang menjadi faktor penentu dalam menentukan keamanan dan kehandalan suatu Gardu Induk. Dimana dalam hal ini Gardu Induk yang dijadikan obyek penelitian adalah GITET 500 KV Ungaran.

Tabel 4.11 Hasil perhitungan sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran

| No. | Deskripsi | Nilai | Satuan |
|-----|---------------------------------|--------|--------|
| 1. | Resistansi pentanahan | 0,2274 | Ohm |
| 2. | Tegangan sentuh sebenarnya | 57,94 | Volt |
| 3. | Tegangan langkah sebenarnya | 30,96 | Volt |
| 4. | <i>Ground potential rise</i> | 448,07 | Volt |
| 5. | Tegangan sentuh yang diizinkan | 2330 | Volt |
| 6. | Tegangan langkah yang diizinkan | 8048 | Volt |

Nilai-nilai yang ada dalam Tabel 4.11 merupakan nilai standar yang ada pada GITET 500 KV Ungaran berdasarkan hasil dari perhitungan dengan bantuan simulasi. Hasil yang ditunjukkan dalam Tabel 4.11 menunjukkan bahwa semua nilai masih terpenuhi karena berada di bawah batas maksimal. Semua nilai tersebut juga telah memenuhi syarat berdasarkan standar yang telah ditentukan, yaitu:

- a.) Nilai resistansi pentanahan $\leq 1 \Omega$,
- b.) Tegangan sentuh sebenarnya < tegangan sentuh yang diijinkan,
- c.) Tegangan langkah sebenarnya < tegangan langkah yang diijinkan,
- d.) *Ground potential rise* < tegangan langkah yang diijinkan.

Nilai-nilai ini masih dalam batas aman untuk sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran jika sewaktu-waktu terjadi gangguan.

4.7 Analisa Perbandingan Hasil Simulasi

Hasil simulasi perhitungan pada GITET 500 KV Ungaran untuk nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan juga *GPR* sudah memenuhi standar.

GITET 500 KV Ungaran memiliki nilai resistansi pentanahan terukur sebesar $0,3 \Omega$ dan nilai terhitung terbesar ada pada $0,2280 \Omega$ berdasarkan hasil simulasi modifikasi. Nilai tegangan sentuh yang diizinkan sebesar 2330 volt dan tegangan sentuh sebenarnya terbesar ada pada nilai 61,9 volt. Untuk tegangan langkah yang diizinkan yaitu sebesar 8048 volt dan tegangan langkah sebenarnya yang terbesar menurut hasil simulasi adalah 33,08 volt. Lalu untuk perhitungan *GPR* terbesar adalah 449,2 volt, dengan tegangan langkah yang diizinkan sebesar 8048 volt. Semua nilai tersebut sudah sesuai standar dan masih dalam batas aman. Nilai tersebut dikatakan aman karena nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya, tegangan langkah sebenarnya, dan *GPR* berada di bawah batas maksimum yang diizinkan pada GITET 500 KV Ungaran.

Semakin banyak jumlah konduktor *rod*, nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya, tegangan langkah sebenarnya, dan *GPR* akan semakin kecil. Pengujian dengan mengubah jumlah konduktor *rod* menjadi lebih sedikit,

didapatkan hasil bahwa nilai resistansi pentanahan dan GPR tidak terlalu mengalami perubahan yang signifikan. Perubahan yang terjadi ketika jumlah konduktor *rod* diubah menjadi 40 buah terhadap resistansi pentanahan dan GPR masing-masing ada pada 0,22 % dan 0,23 %. Berbeda dengan tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, perubahannya cukup besar, yaitu masing-masing di 5,73 % dan 5,75 %.

Semakin panjang konduktor *rod* tiap batang, nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya, tegangan langkah sebenarnya, dan GPR akan semakin kecil. Pengujian dengan mengubah panjang konduktor *rod* tiap batang menjadi 0,1 meter, didapatkan hasil bahwa nilai resistansi pentanahan dan GPR tidak terlalu mengalami perubahan yang signifikan. Perubahan yang terjadi terhadap resistansi pentanahan dan GPR masing-masing ada pada 0,3 % dan 0,25 %. Berbeda dengan tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, perubahannya cukup besar, yaitu ada pada masing-masing di 6,9 % dan 6,85 %.

Kemudian, jika hendak diambil satu nilai terbaik atas perubahan jumlah konduktor *rod* maupun panjang konduktor *rod* tiap batang dalam penelitian ini, maka yang paling baik adalah ketika panjang tiap batang konduktor *rod* dibuat menjadi 0,1 meter dengan jumlah konduktor *rod* tetap 221 buah. Pernyataan ini diperkuat dengan Tabel 4.12, yang berisi mengenai hasil nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan GPR yang merupakan nilai terbesar dari pengujian keseluruhan yang telah dilakukan.

Tabel 4.12 Hasil perhitungan untuk panjang konduktor *rod* tiap batang = 0,1 meter

| No. | Deskripsi | Nilai | Satuan |
|-----|------------------------------|--------|--------|
| 1. | Resistansi pentanahan | 0,2280 | Ohm |
| 2. | Tegangan sentuh sebenarnya | 61,90 | Volt |
| 3. | Tegangan langkah sebenarnya | 33,08 | Volt |
| 4. | <i>Ground potential rise</i> | 449,2 | Volt |

Alasan kenapa nilai yang diambil adalah yang terbesar, dikarenakan nilai ini masih memenuhi syarat keamanan GITET. Dari segi faktor konstruksi dan

ekonomis, nilai ini merupakan yang paling mudah dan murah, dikarenakan hanya membutuhkan panjang konduktor *rod* tiap batang yang relatif pendek yaitu 0,1 meter, dan juga dapat mengurangi biaya material untuk panjang konduktor *rod* yang semula adalah 3 meter.

Ditinjau dari hasil yang ada dalam Tabel 4.12 tersebut, sistem pentanahan pada GITET 500 KV Ungaran saat ini masih bisa dipakai sebagaimana mestinya, tanpa perlu melakukan perubahan signifikan pada panjang konduktor *rod* tiap batangnya. Hal ini dikarenakan nilai atas keempat parameter penentu keamanan GITET antara hasil simulasi pada Tabel 4.12 dengan nilai saat ini seperti ditunjukkan pada Tabel 4.11 yang perbedaannya tidak terlalu besar. Namun demikian, hasil simulasi tersebut dapat dijadikan acuan ketika suatu saat hendak mendirikan GITET baru dengan luas area pentanahan yang sama.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Sesuai perhitungan dan analisa yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran telah memenuhi standar keamanan yang ada, dimana berdasarkan perhitungan dengan simulasi *matlab*, nilai resistansi pentanahan hanya sebesar 0,2274 Ω . Terdapat selisih dengan data yang ada, yaitu 0,3 Ω , akan tetapi, nilai ini masih berada di bawah batas maksimalnya yaitu 1 Ω . Besarnya tegangan sentuh sebesar 57,94 volt, nilai ini masih aman karena batas maksimumnya sebesar 2330 volt. Begitu juga tegangan langkah dan GPR yang masing-masing sebesar 30,96 volt dan 448,07 volt, yang masih berada jauh di bawah batas maksimumnya yaitu 8048 volt. Nilai-nilai ini membuat sistem pentanahan tersebut aman untuk makhluk hidup di sekitar Gardu Induk tersebut.
2. Perubahan jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang mempengaruhi parameter pentanahan yang ada. Meningkatnya jumlah konduktor *rod* membuat nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *ground potential rise* menjadi semakin menurun. Hal yang sama juga berlaku untuk semakin meningkatnya panjang konduktor *rod* tiap batang, maka akan mengakibatkan semakin menurunnya resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *ground potential rise*.
3. Dikarenakan semua hasil modifikasi masih dalam batas aman, maka untuk alasan menekan biaya dan banyaknya material, dipilih hasil yang paling baik mengarah pada simulasi dengan panjang konduktor *rod* tiap batang sebesar 0,1 meter. Hasilnya, nilai resistansi pentanahan dan GPR yang masing-masing hanya selisih 0,3 % dan 0,25 % dari nilai semula, begitu pula dengan tegangan sentuh dan tegangan langkah yang selisih masing-masing di 6,9 % dan 6,85 %.

5.2 Saran

Penulis berharap dapat dilakukan pengukuran secara berkala terhadap nilai resistansi pentanahan, karena nilainya dapat berubah-ubah. Perawatan rutin terhadap konduktor pentanahan juga perlu dilakukan agar kondisi sistem pentanahan selalu prima. Selain itu, terdapat variabel dalam sistem pentanahan yang belum dibahas, yaitu pengaruh luas area pentanahan. Hasil pembahasan tersebut penulis harapan nantinya dapat digunakan sebagai bahan perbandingan dalam menentukan sistem pentanahan Gardu Induk di kemudian hari.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Marsudi, *Operasi Sistem Tenaga Listrik*, 1st ed. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
- [2] S. Committee, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, 2015.
- [3] M. A. Latifah, *Analisa Pengaruh Perubahan Jarak Antar Konduktor, Kedalaman, Tahanan Jenis Tanah Pada Sistem Pentanahan Grid-Rod Gardu Induk*. Semarang: Universitas Islam Sultan Agung Semarang, 2019.
- [4] M. Haddin, *Pengaruh Jumlah Konduktro Parallel Terhadap Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah pada Sistem Pentanahan GITET 500 KV*. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada, 2002.
- [5] A. R. Saputra, *Pengaruh Konfigurasi dan Kedalaman Penanaman Konduktor Terhadap Resistansi Pentanahan Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran*. Semarang: Universitas Islam Sultan Agung Semarang, 2018.
- [6] A. Pranoto, H. Tumaliang, and G. M. C. Mangindaan, “Analisa Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling Dengan Konstruksi Grid (Kisi-kisi),” *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 7, no. 3, pp. 189–198, 2018.
- [7] N. M. Seniari and B. W. D. S., “Pengaruh Panjang Elektroda, Resistivitas Tanah Dan Frekuensi Arus Petir Terhadap Impedansi Pentanahan Elektroda Batang,” *Dielektr. [P-ISSN 2086-9487] [E-ISSN 2579-650x]*, vol. 8, no. 1, pp. 31–35, 2021.
- [8] M. A. Latifah and M. Haddin, “Analisa Dampak Perubahan Jarak Antar Konduktor Dan Kedalaman Pada Sistem Pentanahan Grid-Rod Berbasis IEEE Std 80 – 2000,” *J. Ilm. Setrum*, vol. 8, no. 2, pp. 1–12, 2019.
- [9] A. R. Saputra, M. Haddin, and A. A. Nugroho, “Pengaruh Konfigurasi Dan Kedalaman Penanaman Konduktor Terhadap Resistans Pentanahan Gardu

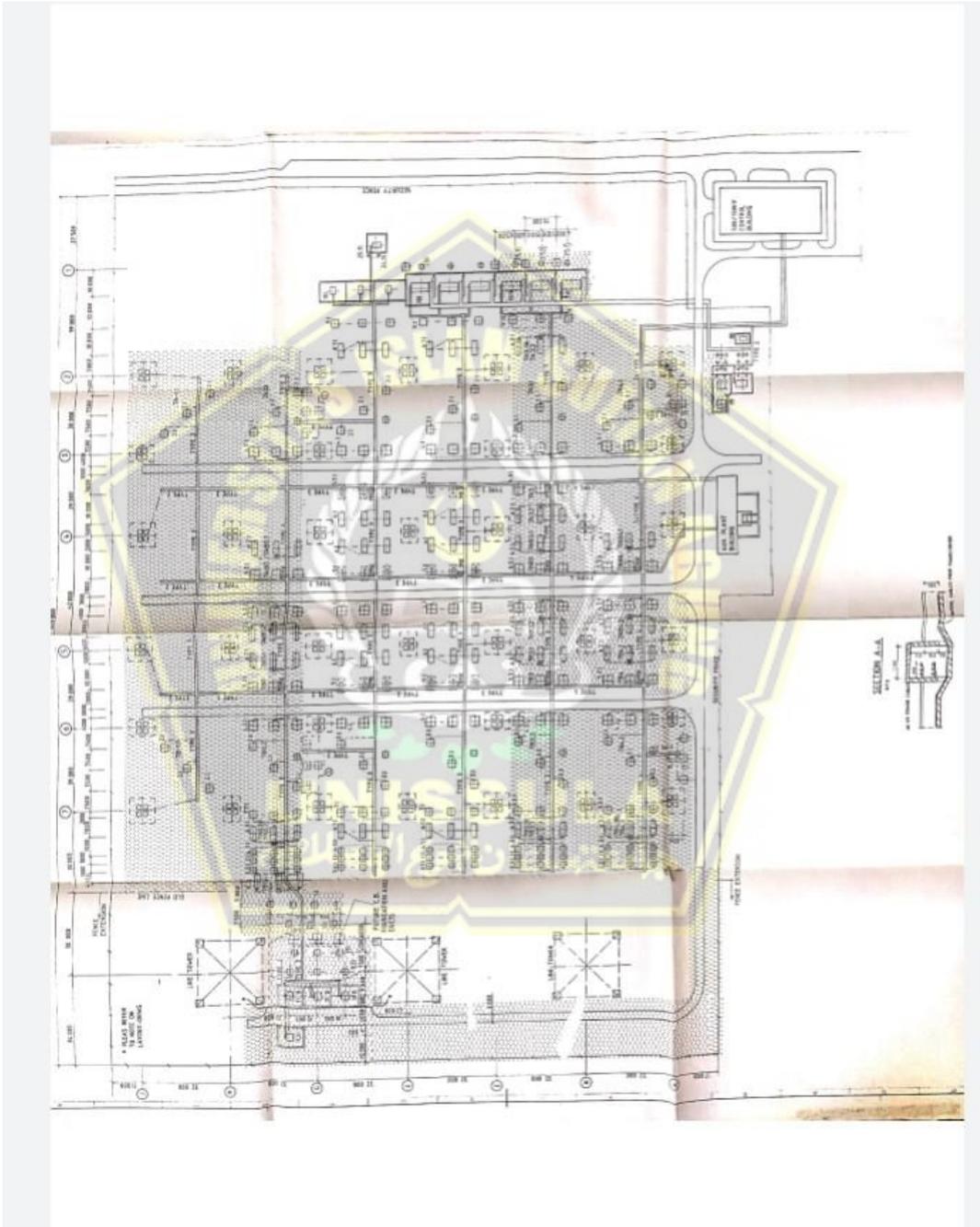
Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran,” *Media Elektr.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, 2018.

- [10] P. A.S. and I. A. Hadi, *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta: Erlangga, 1991.
- [11] B. Sayogo, F. Widjaja, S. T. Sinaga, Soemarjanto, D. S. Soetarman, and S. Simangunsong, *Puil 2011*, 2014th ed., vol. 2011. Jak: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2011.
- [12] T. S. Hutaaruk, *Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*. Jakarta: Erlangga, 1991.
- [13] H. Karuna, *Evaluasi Keamanan Pada Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 KV Jajar*. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Suarakarta, 2014.



LAMPIRAN

Lampiran 1 *Layout* sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran



Lampiran 2 Makalah Tugas Akhir

Evaluasi Pengaruh Perubahan Konduktor Rod Terhadap Resistansi Pentanahan GITET 500 KV Ungaran

Slamet Muhsinin, Muhamad Haddin, Ida Widiastuti
Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang
Jl. Kaligawe Raya Km. 4, Semarang 50112
e-mail: sinin95@std.unissula.ac.id; haddin@unissula.ac.id; ida_fti@unissula.ac.id

Abstrak—Gangguan fasa ke tanah menyebabkan mengalirnya arus gangguan secara langsung ke tanah, yang menimbulkan gradien tegangan. Hal ini membahayakan keselamatan manusia di area *switchyard*. Solusinya adalah dibuat sistem pentanahan peralatan. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai resistansi pentanahan adalah konduktor rod. Penelitian ini membahas tentang evaluasi pengaruh perubahan konduktor rod terhadap resistansi pentanahan Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran. Fokus penelitian dilakukan dengan mengubah jumlah dan panjang konduktor rod dan melihat pengaruhnya terhadap resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *Ground Potential Rise (GPR)*. Model ditetapkan sebagai sistem pentanahan *grid-rod*. Parameter yang ditentukan meliputi: luas area, panjang konduktor, resistivitas tanah, kedalaman penanaman konduktor, panjang dan lebar konduktor *grid*, serta jumlah dan panjang tiap batang rod. Hasil menunjukkan bahwa semakin panjang konduktor rod, maka semakin kecil resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, serta *GPR*. Hal ini dibuktikan pada contoh penambahan jumlah konduktor rod dari semula 221 menjadi 321 buah, nilai resistansi pentanahan yang semula 0.2274 Ω menjadi 0.2272 Ω , tegangan sentuh sebenarnya yang semula 57.94 volt menjadi 56.26 volt, tegangan langkah sebenarnya yang semula 30.96 volt menjadi 30.06 volt, dan *GPR* yang semula 448.07 volt menjadi 447.67 volt. Begitu pula untuk hasil dari penambahan panjang konduktor rod tiap batang. Hasil terbaik ada pada modifikasi panjang rod tiap batang menjadi 5 meter dari yang semula 3 meter, dengan resistansi pentanahan 0.2271 Ω , tegangan sentuh sebenarnya 55.49 volt, tegangan langkah sebenarnya 29.65 volt, dan *GPR* 447.48 volt.

Kata kunci : Konduktor Rod, Resistansi Pentanahan, GITET 500 KV Ungaran, Tegangan Sentuh, Tegangan Langkah

Abstract— A phase-to-ground fault causes a fault current to flow directly to ground, which creates a voltage gradient. This endangers human safety in the switchyard area. The solution is to create an equipment grounding system. One of the factors that affect the value of grounding resistance is the rod conductor. This study discusses the evaluation of the effect of changing rod conductors on the grounding resistance of the 500 KV Ungaran Extra High Voltage Substation (GITET). The focus of the research was carried out by changing the number and length of rod conductors and looking at their effect on grounding resistance, touch voltage and actual step voltage, and Ground Potential rise (GPR). The model is set as a grid-rod grounding system. Parameters determined include: area, conductor length, soil resistivity, conductor embedding depth, length and width of the grid conductor, as well as the number and length of each rod. The results show that the longer the rod conductor, the smaller the ground resistance, touch voltage and actual step voltage, as well as the GPR. This is evidenced in the example of adding the number of rod conductors from the original 221 to 321 units, the grounding resistance value which was originally 0.2274 to 0.2272 Ω , the actual touch voltage which was originally 57.94 volts to 56.26 volts, the actual step voltage which from 30.96 volts to 30.06 volts, and GPR which was originally 448.07 volts to 447.67 volts. Likewise for the results of increasing the length of the rod conductor for each rod. The best results are in the modification of the length of each rod to 5 meters from the original 3 meters, with a grounding resistance of 0.2271 Ω , the actual touch voltage is 55.49 volts, the actual step voltage is 29.65 volts, and the GPR is 447.48 volts.

Key words : Rod Conductor, Grounding Resistance, GITET 500 KV Ungaran, Touch Voltage, Step Voltage

I. PENDAHULUAN

Sistem interkoneksi tenaga listrik di Jawa tersusun atas beberapa pusat pembangkit tenaga listrik dan beberapa Gardu Induk (GI) yang terhubung melalui saluran transmisi, yang akan tersalur ke konsumen melewati saluran distribusi. Gardu Induk terdiri atas Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV dan Gardu Induk Tegangan Tinggi (GIT) 150 KV. GITET 500 KV Ungaran termasuk dalam salah satu GITET yang tersusun dalam sistem interkoneksi tersebut [1]. Untuk memperoleh standar keamanan yang memadai dalam sistem pentanahan Gardu Induk, diperlukan

batasan parameter pentanahan sesuai *IEEE/ANSI Std 80/2013* [2], yaitu nilai resistansi pentanahan $\leq 1 \Omega$, tegangan sentuh < tegangan sentuh yang diizinkan, tegangan langkah < tegangan langkah yang diizinkan, *ground potential rise* < tegangan langkah yang diizinkan.

GITET 500 KV Ungaran memiliki luas area sistem pentanahan 41280 m², dengan sistem pentanahan yang dipakai adalah model *grid-rod* [3]. Luas area dan pemodelan pentanahan metode *grid-rod* ini dapat mempengaruhi berapa banyak dan berapa panjang konduktor rod tiap batang yang digunakan dalam sistem pentanahannya. Terlebih lagi, terdapat banyak komponen utama yang terpasang pada

2

GITET 500 KV Ungaran. Konfigurasi ini mempengaruhi besarnya nilai resistansi pentanahan, tegangan langkah sebenarnya, tegangan sentuh sebenarnya, dan *Ground Potential Rise (GPR)* pada GITET 500 KV Ungaran.

Permasalahan yang terjadi adalah gangguan fasa ke tanah menyebabkan mengalirnya arus gangguan secara langsung ke tanah. Arus gangguan ini dapat mengalir ke peralatan-peralatan yang terbuat dari metal dan dapat mengalir ke piranti pentanahan. Arus gangguan tersebut dapat menimbulkan gradien tegangan di antara peralatan dengan peralatan, peralatan dengan tanah, dan tegangan pada permukaan tanah. Hal ini berakibat membahayakan keselamatan manusia di area *switchyard* [4]. Solusinya adalah dibuat sistem pentanahan peralatan. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai resistansi pentanahan adalah konduktor *rod*. Penelitian ini membahas tentang evaluasi pengaruh perubahan konduktor *rod* terhadap resistansi pentanahan Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran untuk memastikan keamanannya.

II. STUDI PUSTAKA

A. Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian terdahulu yang pernah dilakukan pada sistem pentanahan adalah sebagai berikut:

Analisa Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling dengan Konstruksi *Grid* (Kisi-kisi) [5]. Penelitian ini membahas tentang dua metode perhitungan pentanahan *grid*, yaitu perhitungan tanpa batang pentanahan dan dengan batang pentanahan. Nilai resistansi *grid* tanpa batang pentanahan adalah $0,47 \Omega$, sedangkan jika dengan batang pentanahan nilainya menjadi $0,18 \Omega$. Hasilnya, solusi modifikasi berupa penambahan batang elektroda mampu menghasilkan nilai resistansi yang lebih rendah.

Pengaruh Panjang Elektroda, Resistivitas Tanah, dan Frekuensi Arus Petir Terhadap Impedansi Pentanahan Elektroda Batang [6]. Penelitian ini membahas tentang bagaimana dampak yang terjadi pada impedansi pentanahan suatu elektroda batang melalui media simulasi perubahan panjang elektroda pentanahan, tahanan jenis tanah, arus puncak petir, dan frekuensi arus petir. Didapatkan hasil berupa penurunan nilai impedansi pentanahan ketika setiap panjang elektroda ditambah $0,5 \text{ m}$ adalah $18,65\%$ pada resistivitas tanah $50 \Omega\text{m}$, dan $37,23\%$ pada resistivitas tanah $100 \Omega\text{m}$. Sehingga impedansi tanah semakin kecil jika elektroda semakin panjang dan resistivitas tanah semakin kecil.

Analisa Dampak Perubahan Jarak Antar Konduktor dan Kedalaman pada Sistem Pentanahan *Grid-Rod* Berbasis *IEEE Std 80-2000* [7]. Meneliti tentang nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh, dan tegangan langkah yang dihasilkan jika jarak antar konduktor dan kedalaman sistem pentanahan dimodifikasi. Penelitian dilakukan dengan mengubah jarak antar konduktor dan kedalaman, kemudian menghitung kembali resistansi pentanahan, tegangan sentuh, dan tegangan langkah menggunakan *matlab*. Hasilnya, resistansi pentanahan berada di $0,3 \Omega$, dimana masih dinilai aman karena di bawah spesifikasi, yaitu $R \leq 1 \Omega$. Begitu juga untuk tegangan sentuhnya sebesar $59,21 \text{ volt}$ dan tegangan langkahnya $57,39 \text{ volt}$, yang keduanya masih dalam batas

aman. Sehingga, semakin rapat jarak antar konduktor, maka nilai resistansi pentanahan dan tegangan sentuh semakin menurun, sementara tegangan langkah meningkat. Tegangan sentuh dan tegangan langkah akan semakin kecil nilainya jika penanaman konduktor semakin dalam.

B. Dasar Teori

Sistem pentanahan *grid-rod* merupakan gabungan antara sistem pentanahan *grid* dan sistem pentanahan *rod*, yaitu dengan menanamkan batang sejajar di permukaan tanah yang terhubung satu sama lain, kemudian setiap titik ditanami elektroda *rod* yang tegak lurus di permukaan tanah. Sistem pentanahan ini adalah yang banyak digunakan dalam Gardu Induk, karena dinilai lebih efektif untuk mengurangi gangguan yang terjadi pada Gardu Induk [7]. Resistansi pentanahan (R_g) *grid-rod* dipengaruhi oleh resistansi jenis rata-rata tanah (ρ), jumlah total panjang konduktor (L), kedalaman penanaman *grid* (h), dan luas area pentanahan *grid* (A), seperti ditunjukkan persamaan (1).

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

Jumlah total panjang konduktor (L) adalah jumlah panjang konduktor *grid* (L_c) dan panjang konduktor *rod* (L_r), seperti pada persamaan (2).

$$L = L_c + L_r \quad (2)$$

Panjang konduktor *grid* ditunjukkan pada persamaan (3), dengan dipengaruhi panjang konduktor *grid* (L_1) dan lebarnya (L_2), serta jumlah konduktor paralel sisi panjang (n) dan sisi lebar (m).

$$L_c = L_1 n + L_2 m \quad (3)$$

Panjang konduktor *rod* dipengaruhi jumlah konduktor *rod* (Q) dan panjang konduktor *rod* tiap batang (P), seperti pada persamaan (4).

$$L_r = Q \times P \quad (4)$$

Tegangan sentuh sebenarnya merupakan tegangan pada peralatan yang diketanahkan ke dalam daerah yang membentuk konduktor kisi-kisi selama gangguan tanah [8]. Besarnya tegangan sentuh sebenarnya tergantung pada faktor geometrik (K_m), faktor koreksi (K_i), resistansi jenis tanah (ρ), dan arus *grid* maksimum (I_G), dengan panjang konduktor *grid* (L_c) dan panjang konduktor *rod* (L_r) seperti pada persamaan (5).

$$E_{tm} = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_c + 1,15 L_r} \quad (5)$$

Tegangan langkah sebenarnya merupakan tegangan yang timbul di antara dua kaki orang yang sedang berdiri di atas tanah yang sedang dialiri oleh arus gangguan ke tanah [3]. Besarnya tegangan langkah sebenarnya, tergantung pada resistansi jenis tanah (ρ), konstanta tegangan langkah

(K_p), Faktor koreksi (K_i), arus *grid* maksimum (I_G), serta panjang konduktor *grid* (L_G) dan panjang konduktor *rod* (L_r), yang ditunjukkan pada persamaan (6).

$$E_{sm} = \frac{\rho_l K_p K_i K_r}{L_G + 1,15 L_r} I_G \quad (6)$$

Ground Potential Rise (GPR) merupakan tegangan maksimum yang mampu dicapai oleh suatu pentanahan *grid* terhadap suatu titik pentanahan yang diasumsikan potensial atau voltase yang sama dengan potensial bumi. Besarnya *GPR* tergantung dari besar arus *grid* maksimum (I_G) dan resistansi pentanahan (R_g), yang ditunjukkan pada persamaan (7).

$$GPR = R_g I_G \quad (7)$$

Tegangan sentuh dapat membahayakan keselamatan manusia, maka tegangan sentuh yang tinggi harus diberi proteksi. Persyaratan kehandalan Gardu Induk menetapkan bahwa tegangan sentuh sebenarnya harus berada di bawah tegangan sentuh yang diizinkan, untuk memastikan keamanan manusia yang ada di area *switchyard* dari *ventricular fibrillation*, yakni suatu kondisi abnormal jantung yang berujung pada kematian [7]. Tegangan sentuh yang diizinkan (E_t) ditunjukkan pada persamaan (8), dimana terdapat resistansi tubuh manusia (R_k), resistansi kontak ke tanah dari satu kaki pada tanah yang diberi lapisan koral 10 cm (R_f), dan besar arus yang melewati badan manusia (I_k).

$$E_t = \left(R_k + \frac{R_f}{2} \right) I_k \quad (8)$$

Tegangan sentuh yang diizinkan untuk manusia dengan massa 50 kg (E_{t50}) ditunjukkan pada persamaan (9), dengan terdapat tahanan jenis tanah di sekitar permukaan tanah (ρ_s), faktor reduksi (C_r), dan lama gangguan tanah (t).

$$E_{t50} = \left(1000 + \frac{3\rho_s C_r}{2} \right) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (9)$$

Tegangan langkah (E_x) yaitu ketika seseorang berdiri di atas tanah kemudian terdapat tegangan yang timbul di antara dua kaki seseorang tersebut selama sedang terjadi gangguan [7]. Tegangan langkah sebenarnya dan *GPR* harus berada di bawah tegangan langkah yang diizinkan, untuk memastikan keamanan manusia yang ada di area *switchyard* dari *ventricular fibrillation*. Besarnya tegangan langkah yang diizinkan (E_x) dipengaruhi oleh besarnya resistansi yang mengalir pada badan seseorang (R_k), resistansi kontak ke tanah dari satu kaki (R_f), dan besarnya arus *fibrilasi* (I_k), seperti pada persamaan (10).

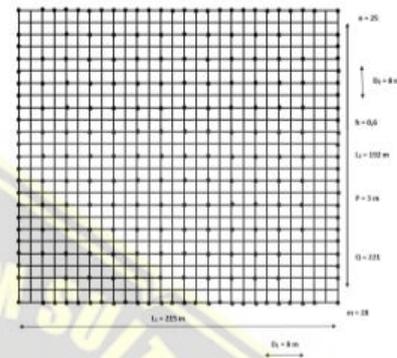
$$E_x = (R_k + 2R_f) I_k \quad (10)$$

Tegangan langkah yang diizinkan untuk manusia dengan massa 50 kg (E_{x50}) ditunjukkan pada persamaan (11), dengan dipengaruhi lama gangguan tanah (t).

$$E_{x50} = (R_k + 6\rho_s C_r) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (11)$$

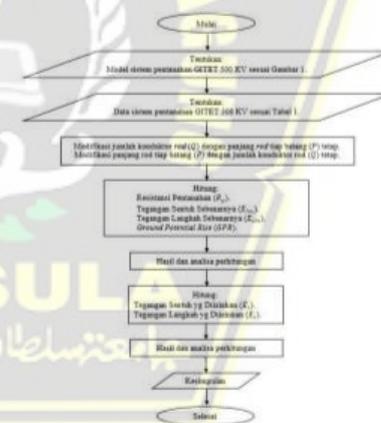
III. METODE

Model sistem pentanahan *grid-rod* yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan nilai-nilai pentanahan yang akan dicari, ditunjukkan oleh Gambar 1. Parameter yang ditentukan adalah jumlah dan panjang konduktor *rod* tiap batang. Penelitian dilakukan di Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran, yang beralamat di Jl. Jend. Sudirman No. 54A, Ungaran, Semarang, Jawa Tengah 50519.



Gambar 1. Model Penelitian [3]

Tahapan penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 2, sebagai rangkaian proses penelitian dari tahapan mulai sampai selesai.



Gambar 2. Diagram alir (flowchart) tahapan penelitian

4

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 merupakan data yang diperlukan untuk melakukan perhitungan dan analisa sistem pentanahan Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 KV Ungaran untuk memperoleh beberapa nilai yang dicari. Mengacu pada Gambar 1 dan Tabel 1, dilakukan simulasi dengan memodifikasi panjang konduktor *rod* tiap batang (P) dan jumlah konduktor *rod* (Q).

Tabel 1. Data-data sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran [3]

| No. | Deskripsi | Nilai | Satuan |
|-----|--|--------|--------|
| 1. | Resistansi pentanahan | 0,3 | Ohm |
| 2. | Arus hubung singkat | 3.284 | Ampere |
| 3. | Lama waktu gangguan hubung singkat | 0,075 | Detik |
| 4. | Resistansi jenis rata-rata tanah | 100 | Ohm |
| 5. | Jumlah konduktor <i>rod</i> | 221 | Buah |
| 6. | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang | 3 | Meter |
| 7. | Kedalaman penanaman konduktor | 0,6 | Meter |
| 8. | Diameter batang pentanahan | 0,0127 | Meter |
| 9. | Panjang sisi konduktor <i>grid</i> | 215 | Meter |
| 10. | Lebar sisi konduktor <i>grid</i> | 192 | Meter |
| 11. | Jarak antar konduktor <i>grid</i> | 8 | Meter |
| 12. | Ketebalan lapisan batu koral | 0,1 | Meter |

Kemudian mencari nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan GPR dari data modifikasi sesuai ditunjukkan Tabel 2.

Tabel 2. Penetapan simulasi perhitungan

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang |
|-----|-----------------------------|--|
| 1. | Variabel | Tetap |
| 2. | Tetap | Variabel |

Besarnya resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan GPR akan dicari sesuai dengan jumlah konduktor *rod* dan panjang konduktor *rod* tiap batang yang telah dimodifikasi. Kemudian menentukan nilai mana yang paling baik untuk dapat diaplikasikan pada sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran berdasarkan hasil modifikasi yang telah dilakukan. Setelah didapatkan hasil tersebut, dilakukan perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diizinkan. Nilai-nilai pentanahan hasil modifikasi ini kemudian akan diverifikasi dengan ketentuan-ketentuan yang ada pada *IEEE/ANSI Std 80/2013* sebagai tolak ukur keamanan dan kehandalan GITET 500 KV Ungaran.

A. Pengaruh Perubahan Jumlah Konduktor Rod

Jumlah konduktor *rod* (Q) merupakan jumlah total banyaknya konduktor yang menancap tegak lurus ke dalam tanah, yang menempel di bawah konstruksi *grid*. Simulasi yang akan dilakukan yaitu melakukan perubahan jumlah konduktor *rod* yang akan dibuat semakin sedikit dan semakin banyak dari jumlah *rod* semula. Perubahan ini dilakukan dengan panjang tiap batang *rod* yang masih tetap. Kemudian mencari nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya, tegangan langkah sebenarnya, dan *ground potential rise*.

Perhitungan resistansi pentanahan menghasilkan nilai seperti Tabel 3. Jumlah konduktor *rod* secara bertahap dikurangi dan ditambah sebanyak 50 buah untuk mengetahui pengaruh yang terjadi.

Tabel 3. Perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai resistansi pentanahan

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai resistansi pentanahan (Ω) |
|-----|------------------------------------|--|--|
| 1. | 121 | 3 | 0,2277 |
| 2. | 171 | 3 | 0,2276 |
| 3. | 221 | 3 | 0,2274 |
| 4. | 271 | 3 | 0,2273 |
| 5. | 321 | 3 | 0,2272 |

Selanjutnya untuk lebih mudah melihat perubahan yang terjadi pada resistansi pentanahan, divisualkan oleh grafik pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap nilai resistansi pentanahan

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 3, jika jumlah konduktor *rod* semakin bertambah, maka resistansi pentanahan akan semakin kecil, dan jika jumlah konduktor *rod* semakin berkurang, maka resistansi pentanahan akan semakin besar. Ketika jumlah konduktor *rod* awal sebanyak 221 buah, kemudian dikurangi menjadi 171 buah, resistansi pentanahan mengalami peningkatan sebesar 0,0002 Ω . Saat jumlah konduktor *rod* disusutkan kembali menjadi 121 buah, resistansi pentanahan kembali naik sebesar 0,0001 Ω . Untuk mengetahui pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap resistansi pentanahan, dilakukan simulasi kembali dengan memperbanyak jumlah konduktor *rod* menjadi 271 buah. Maka terjadi penurunan resistansi pentanahan sebesar 0,0001 Ω . Kemudian saat konduktor *rod* ditambah lagi menjadi 321 buah, resistansi pentanahannya kembali mengalami penurunan sebesar 0,0001 Ω .

Peningkatan dan penurunan nilai resistansi pentanahan ini sangat kecil, yaitu 0,0001 sampai 0,0002 Ω , dengan hasil perhitungan antara 0,2272 sampai 0,2277 Ω . Jadi, penambahan dan penyusutan jumlah konduktor *rod* memang berpengaruh terhadap resistansi pentanahan, namun tidak besar dan masih dalam batas aman, dimana nilai tertingginya adalah 0,2277 Ω dan masih sesuai standar yaitu ≤ 1 Ω . Pengaruh perubahan jumlah konduktor *rod* terhadap besarnya tegangan sentuh sebenarnya diperlihatkan pada Tabel 4 dan Gambar 4.

Tabel 4. Perubahan jumlah konduktor rod terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya

| No. | Jumlah konduktor rod (buah) | Panjang konduktor rod tiap batang (meter) | Nilai tegangan sentuh sebenarnya (volt) |
|-----|-----------------------------|---|---|
| 1. | 121 | 3 | 59,73 |
| 2. | 171 | 3 | 58,82 |
| 3. | 221 | 3 | 57,94 |
| 4. | 271 | 3 | 57,09 |
| 5. | 321 | 3 | 56,26 |

Perubahan yang terjadi pada tegangan sentuh sebenarnya, divisualkan oleh grafik pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik perubahan jumlah konduktor rod terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya

Analisa dari Tabel 4 dan Gambar 4 adalah ketika jumlah konduktor rod semakin bertambah, maka tegangan sentuh sebenarnya akan semakin kecil, dan jika jumlah konduktor rod semakin berkurang, maka tegangan sentuh sebenarnya akan semakin besar. Saat jumlah konduktor rod awal 221 buah dikurangi menjadi 171 buah, tegangan sentuh sebenarnya meningkat 0,88 volt. Saat jumlahnya disututkan menjadi 121 buah, tegangan sentuh sebenarnya kembali naik sebesar 0,91 volt. Simulasi kembali dilakukan dengan memperbanyak jumlah rod menjadi 271 buah, lalu tegangan sentuh sebenarnya menurun sebesar 0,85 volt. Saat jumlah rod ditambah menjadi 321 buah, tegangan sentuh sebenarnya menurun kembali sebesar 0,83 volt dari nilai sebelumnya. Terjadi penurunan dan peningkatan tegangan sentuh sebenarnya antara 0,83 sampai 0,91 volt. Jadi, penambahan dan penyusutan jumlah konduktor rod berpengaruh terhadap besar kecilnya tegangan sentuh sebenarnya. Nilai tertinggi adalah 59,73 volt. Pengaruh perubahan jumlah konduktor rod terhadap tegangan langkah sebenarnya diperlihatkan Tabel 5 dan Gambar 5.

Tabel 5. Perubahan jumlah konduktor rod terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya

| No. | Jumlah konduktor rod (buah) | Panjang konduktor rod tiap batang (meter) | Nilai tegangan langkah sebenarnya (volt) |
|-----|-----------------------------|---|--|
| 1. | 121 | 3 | 31,92 |
| 2. | 171 | 3 | 31,43 |
| 3. | 221 | 3 | 30,96 |
| 4. | 271 | 3 | 30,51 |
| 5. | 321 | 3 | 30,06 |

Perubahan yang terjadi pada tegangan langkah sebenarnya, divisualkan oleh grafik pada Gambar 5.



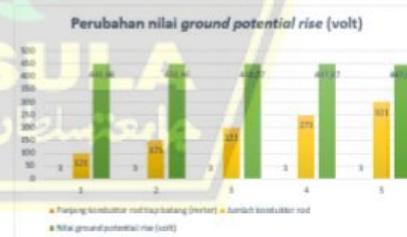
Gambar 5. Grafik perubahan jumlah konduktor rod terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya

Tabel 5 dan Gambar 5 menunjukkan jika jumlah konduktor rod semakin bertambah, maka tegangan langkah sebenarnya akan semakin kecil, begitu pula sebaliknya. Saat jumlah rod awal 221 buah dikurangi menjadi 171 buah, tegangan langkah sebenarnya meningkat 0,47 volt. Saat jumlahnya disusutkan menjadi 121 buah, tegangan langkah sebenarnya kembali meningkat 0,49 volt. Ketika jumlah rod diperbanyak menjadi 271 buah, terjadi penurunan tegangan langkah sebenarnya sebesar 0,45 volt, lalu ketika jumlah rod ditambah lagi menjadi 321 buah, nilai tegangan langkah sebenarnya kembali menurun sebesar 0,45 volt. Terjadi penurunan dan peningkatan tegangan langkah sebenarnya 0,45 volt sampai 0,49 volt. Jadi, penambahan dan pengurangan jumlah rod juga berpengaruh terhadap besar kecilnya tegangan langkah sebenarnya, namun tidak terlalu besar, dimana nilai tertingginya adalah 31,92 volt. Pengaruh perubahan jumlah konduktor rod terhadap *Ground Potential Rise (GPR)* diperlihatkan Tabel 6 dan Gambar 6.

Tabel 6. Perubahan jumlah konduktor rod terhadap nilai *ground potential rise*

| No. | Jumlah konduktor rod (buah) | Panjang konduktor rod tiap batang (meter) | Nilai <i>ground potential rise</i> (volt) |
|-----|-----------------------------|---|---|
| 1. | 121 | 3 | 448,66 |
| 2. | 171 | 3 | 448,46 |
| 3. | 221 | 3 | 448,07 |
| 4. | 271 | 3 | 447,87 |
| 5. | 321 | 3 | 447,67 |

Perubahan pada *GPR*, divisualkan pada Gambar 6.

Gambar 6. Grafik perubahan jumlah konduktor rod terhadap nilai *ground potential rise*

6

Hasil dari Tabel 6 dan Gambar 6 memperlihatkan ketika jumlah konduktor *rod* semakin bertambah, maka *GPR* akan semakin kecil, dan jika jumlah konduktor *rod* semakin berkurang, maka *GPR* akan semakin besar. Saat jumlah konduktor *rod* awal 221 buah dikurangi menjadi 171 buah, *GPR* meningkat sebesar 0,39 volt. Saat jumlah *rod* disusutkan menjadi 121 buah, *GPR* kembali meningkat 0,20 volt. Ketika jumlah *rod* diperbanyak menjadi 271 buah, terjadi penurunan nilai *GPR* sebesar 0,20 volt, lalu ketika jumlah *rod* ditambah lagi menjadi 321 buah, nilai *GPR* kembali menurun sebesar 0,20 volt. Terjadi penurunan dan peningkatan *GPR* antara 0,20 sampai 0,39 volt. Jadi, penambahan dan pengurangan jumlah konduktor *rod* juga berpengaruh terhadap besar kecilnya *GPR*, namun tidak terlalu besar, dimana nilai tertingginya adalah 448,66 volt.

B. Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor Rod Tiap Batang

Panjang konduktor *rod* tiap batang (*P*) merupakan panjang konduktor untuk masing-masing batang *rod* yang terletak di bawah rangkaian kisi-kisi *grid* dan menancap tegak lurus ke dalam tanah. Panjang *rod* satu dengan yang lain adalah sama. Simulasi dilakukan dengan mengubah panjang *rod* tiap batang semakin pendek dan panjang dari panjang semula. Perubahan ini dilakukan dengan jumlah *rod* yang dibuat tetap. Kemudian mencari besarnya nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh sebenarnya, tegangan langkah sebenarnya, dan *ground potential rise*. Perhitungan resistansi pentanahan menghasilkan nilai seperti Tabel 7.

Tabel 7. Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai resistansi pentanahan

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai resistansi pentanahan (Ω) |
|-----|------------------------------------|--|--|
| 1. | 221 | 1 | 0,2278 |
| 2. | 221 | 2 | 0,2276 |
| 3. | 221 | 3 | 0,2274 |
| 4. | 221 | 4 | 0,2273 |
| 5. | 221 | 5 | 0,2271 |

Perubahan yang terjadi pada resistansi pentanahan, divisualkan oleh grafik pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai resistansi pentanahan

Ditinjau dari Tabel 7 dan Gambar 7, jika panjang *rod* tiap batang semakin bertambah, maka resistansi pentanahan akan semakin kecil, dan jika panjang *rod* tiap batang semakin berkurang, maka resistansi pentanahan akan semakin besar. Panjang *rod* tiap batang secara bertahap dikurangi dan ditambah sebanyak 1 meter untuk mengetahui pengaruh yang terjadi. Ketika panjang tiap batang *rod* awal 3 m dikurangi menjadi 2 m, resistansi pentanahan meningkat sebesar 0,0002 Ω . Saat panjang tiap batang *rod* diubah menjadi 1 m, resistansi pentanahan kembali naik sebesar 0,0002 Ω . Dilakukan simulasi kembali dengan menambah panjang tiap batang *rod* menjadi 4 m, terjadi penurunan resistansi pentanahan sebesar 0,0001 Ω . Kemudian panjang tiap *rod* ditambah lagi menjadi 5 m, hasilnya resistansi pentanahan kembali mengalami penurunan sebesar 0,0002 Ω .

Peningkatan dan penurunan nilai resistansi pentanahan ini sangat kecil, yaitu 0,0001 sampai 0,0002 Ω . Jadi, penambahan dan pengurangan panjang tiap batang *rod* memang berpengaruh terhadap resistansi pentanahan, namun tidak besar dan masih dalam batas aman, dimana nilai tertingginya adalah 0,2278 Ω dan masih sesuai standar yaitu $\leq 1 \Omega$. Pengaruh perubahan panjang tiap batang *rod* terhadap tegangan sentuh sebenarnya diperlihatkan Tabel 8 dan Gambar 8.

Tabel 8. Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai tegangan sentuh sebenarnya (volt) |
|-----|------------------------------------|--|---|
| 1. | 221 | 1 | 60,62 |
| 2. | 221 | 2 | 59,25 |
| 3. | 221 | 3 | 57,94 |
| 4. | 221 | 4 | 56,69 |
| 5. | 221 | 5 | 55,49 |

Selanjutnya, perubahan yang terjadi pada tegangan sentuh sebenarnya divisualkan oleh grafik pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai tegangan sentuh sebenarnya

Sesuai hasil pada Tabel 8 dan Gambar 8, ketika panjang tiap *rod* semakin bertambah, maka tegangan sentuh sebenarnya akan semakin kecil, dan berlaku sebaliknya. Saat panjang tiap *rod* awal 3 m menjadi 2 m, tegangan sentuh sebenarnya meningkat 1,31 volt. Saat panjang *rod* dikurangi lagi menjadi 1 m, tegangan sentuh sebenarnya kembali naik sebesar 1,37 volt. Simulasi kembali dilakukan

dengan menambah panjang tiap *rod* menjadi 4 m, lalu tegangan sentuh sebenarnya menurun sebesar 1,25 volt. Saat panjang tiap *rod* ditambah menjadi 5 m, tegangan sentuh sebenarnya menurun kembali sebesar 1,20 volt.

Terjadi penurunan dan peningkatan tegangan sentuh sebenarnya antara 1,20 sampai 1,37 volt. Jadi, penambahan dan penyusutan panjang tiap *rod* berpengaruh terhadap besar kecilnya tegangan sentuh sebenarnya, dimana nilai tertingginya adalah 60,62 volt. Pengaruh perubahan panjang tiap *rod* terhadap tegangan langkah sebenarnya diperlihatkan Tabel 9 dan Gambar 9.

Tabel 9. Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai tegangan langkah sebenarnya (volt) |
|-----|------------------------------------|--|--|
| 1. | 221 | 1 | 32,39 |
| 2. | 221 | 2 | 31,66 |
| 3. | 221 | 3 | 30,96 |
| 4. | 221 | 4 | 30,29 |
| 5. | 221 | 5 | 29,65 |

Sementara itu, Gambar 9 adalah grafik berdasarkan visualisasi dari Tabel 9.



Gambar 9. Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai tegangan langkah sebenarnya

Mengacu pada hasil Tabel 9 dan Gambar 9, ketika panjang tiap *rod* semakin bertambah, maka tegangan langkah sebenarnya akan semakin kecil, dan berlaku sebaliknya. Saat panjang tiap *rod* awal 3 m dikurangi menjadi 2 m, tegangan langkah sebenarnya meningkat sebesar 0,70 volt. Saat panjang tiap *rod* dikurangi lagi menjadi 1 m, tegangan langkah sebenarnya kembali naik sebesar 0,73 volt. Simulasi kembali dilakukan dengan menambah panjang tiap *rod* menjadi 4 m, lalu tegangan langkah sebenarnya menurun sebesar 0,67 volt. Saat panjang tiap *rod* ditambah menjadi 5 m, tegangan langkah sebenarnya menurun kembali sebesar 0,64 volt.

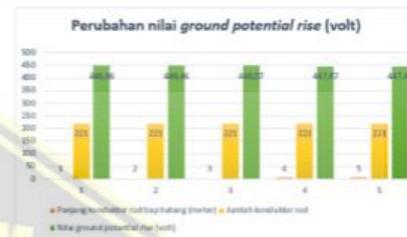
Terjadi penurunan dan peningkatan pada nilai tegangan langkah sebenarnya yaitu antara 0,64 sampai 0,73 volt. Jadi, penambahan dan penyusutan panjang tiap konduktor *rod* berpengaruh terhadap besar kecilnya nilai tegangan langkah sebenarnya, dimana nilai tertingginya berada pada 32,39 volt.

Pengaruh perubahan panjang tiap *rod* terhadap *Ground Potential Rise (GPR)* ditunjukkan Tabel 10 dan Gambar 10.

Tabel 10. Perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai *ground potential rise*

| No. | Jumlah konduktor <i>rod</i> (buah) | Panjang konduktor <i>rod</i> tiap batang (meter) | Nilai <i>ground potential rise</i> (volt) |
|-----|------------------------------------|--|---|
| 1. | 221 | 1 | 448,86 |
| 2. | 221 | 2 | 448,46 |
| 3. | 221 | 3 | 448,07 |
| 4. | 221 | 4 | 447,87 |
| 5. | 221 | 5 | 447,48 |

Kemudian untuk lebih mudah melihat perubahan yang terjadi terhadap *GPR*, divisualkan grafik pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik perubahan panjang konduktor *rod* tiap batang terhadap nilai *ground potential rise*

Sesuai Tabel 10 dan Gambar 10, ketika panjang tiap *rod* semakin bertambah, maka *GPR* akan semakin kecil, dan berlaku sebaliknya. Saat panjang tiap *rod* awal 3 m dikurangi menjadi 2 m, *GPR* meningkat sebesar 0,39 volt. Saat panjang tiap *rod* dikurangi lagi menjadi 1 m, *GPR* kembali naik sebesar 0,40 volt. Simulasi kembali dilakukan dengan menambah panjang tiap *rod* menjadi 4 m, lalu *GPR* menurun sebesar 0,20 volt, sedangkan saat panjang tiap *rod* ditambah menjadi 5 m, *GPR* menurun kembali sebesar 0,39 volt. Terjadi penurunan dan peningkatan *GPR* sebesar 0,20 sampai 0,40 volt. Jadi, penambahan dan penyusutan panjang tiap *rod* berpengaruh terhadap besar kecilnya *GPR*, dimana nilai tertinggi adalah 448,86 volt.

C. Verifikasi Hasil Modifikasi

Tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diizinkan dipakai untuk verifikasi atas hasil modifikasi yang telah dilakukan apakah masih dalam batas aman atau tidak. Besarnya tegangan sentuh sebenarnya harus di bawah tegangan sentuh yang diizinkan, dan tegangan langkah sebenarnya serta *GPR* juga tidak boleh melebihi tegangan langkah yang diizinkan. Tegangan sentuh yang diizinkan dapat dicari melalui perhitungan dengan persamaan (9). Sedang tegangan langkah yang diizinkan dicari dengan persamaan (11).

Hasil perhitungan tegangan sentuh dan langkah sebenarnya, resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan langkah yang diizinkan, serta *GPR* dirangkum dalam Tabel 11. Hasil di dalam Tabel 11 menunjukkan bahwa semua nilai masih terpenuhi karena masih berada di bawah batas maksimal berdasarkan standar yang telah ditentukan, yaitu nilai resistansi pentanahan $\leq 1 \Omega$, tegangan sentuh

8

sebenarnya < tegangan sentuh yang diizinkan, tegangan langkah sebenarnya dan *ground potential rise* < tegangan langkah yang diizinkan.

Tabel 11. Hasil perhitungan sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran

| No. | Deskripsi | Nilai | Satuan |
|-----|---------------------------------|--------|--------|
| 1. | Resistansi pentanahan | 0,2274 | Ohm |
| 2. | Tegangan sentuh sebenarnya | 57,94 | Volt |
| 3. | Tegangan langkah sebenarnya | 30,96 | Volt |
| 4. | <i>Ground potential rise</i> | 448,07 | Volt |
| 5. | Tegangan sentuh yang diizinkan | 2330 | Volt |
| 6. | Tegangan langkah yang diizinkan | 8048 | Volt |

Kemudian, jika hendak diambil satu nilai terbaik atas modifikasi dalam penelitian ini, maka yang paling baik adalah ketika panjang tiap batang *rod* dibuat menjadi 5 m dengan jumlah *rod* tetap 221 buah. Pernyataan ini diperkuat dengan Tabel 12 yang berisi hasil resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *GPR* yang merupakan nilai terkecil dari pengujian keseluruhan yang telah dilakukan.

Tabel 12. Hasil perhitungan untuk panjang *rod* tiap batang = 5 m

| No. | Deskripsi | Nilai | Satuan |
|-----|------------------------------|--------|--------|
| 1. | Resistansi pentanahan | 0,2271 | Ohm |
| 2. | Tegangan sentuh sebenarnya | 55,49 | Volt |
| 3. | Tegangan langkah sebenarnya | 29,65 | Volt |
| 4. | <i>Ground potential rise</i> | 447,48 | Volt |

Namun dengan hasil perhitungan Tabel 11, sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran saat ini masih bisa dipakai sebagaimana mestinya, tanpa perlu melakukan perubahan signifikan pada panjang konduktor *rod* tiap batangnya. Hal ini dikarenakan nilai atas 4 parameter penentu keamanan GITET antara hasil simulasi pada Tabel 12 dengan nilai saat ini yang ditunjukkan Tabel 11, perbedaannya tidak terlalu besar. Selain itu, jika hendak dilakukan perubahan agar mendapat nilai sesuai Tabel 12, perlu material dan biaya yang lebih besar. Namun, hasil simulasi tersebut dapat dijadikan acuan ketika suatu saat hendak mendirikan GITET baru dengan spesifikasi luas area pentanahan yang sama.

V. KESIMPULAN

Sistem pentanahan GITET 500 KV Ungaran telah memenuhi standar keamanan yang ada, dimana resistansi pentanahannya hanya sebesar 0,2274 Ω , masih berada di bawah 1 Ω , dengan tegangan sentuhnya 57,94 volt, jauh di bawah batas maksimumnya yaitu 2330 volt. Tegangan langkah dan *GPR*, dimana masing-masing bernilai 30,96 volt dan 448,07 volt, dengan ambang batasnya sebesar 8048 volt. Nilai-nilai ini membuat sistem pentanahan tersebut aman untuk makhluk hidup di sekitar Gardu Induk tersebut.

Perubahan panjang konduktor *rod* yang terbagi atas jumlah konduktor *rod* (Q) dan panjang konduktor *rod* tiap batang (P) mempengaruhi parameter pentanahan yang ada. Meningkatnya jumlah konduktor *rod* membuat nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *GPR* menjadi semakin menurun. Hal yang sama juga berlaku untuk semakin meningkatnya panjang konduktor *rod* tiap batang, maka akan mengakibatkan semakin menurunnya resistansi pentanahan,

tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya, dan *GPR*.

Hasil modifikasi panjang konduktor *rod* yang paling baik dari simulasi, mengarah pada simulasi dengan panjang konduktor *rod* tiap batang sebesar 5 m, yang menghasilkan nilai-nilai yang paling kecil di antara modifikasi lainnya, baik untuk resistansi pentanahan yang menjadi 0,2271 Ω , tegangan sentuh sebenarnya sebesar 55,49 volt, tegangan langkah sebenarnya sebesar 29,65 volt, dan *GPR* yang menjadi 447,48 volt. Namun tentunya diperlukan tambahan material yang cukup banyak untuk mendapatkan hasil sesuai simulasi atas modifikasi tersebut.

Mengingat masih terdapat variabel yang belum dibahas dalam penelitian ini yaitu luas area pentanahan, penulis berharap dapat dilakukan penelitian sejenis atas pengaruh dari variabel tersebut.

REFERENSI

- [1] D. Marsudi, *Operasi Sistem Tenaga Listrik*, 1st ed. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
- [2] S. Committee, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, 2015.
- [3] M. A. Latifah, *Analisa Pengaruh Perubahan Jarak Antar Konduktor, Kedalaman, Tahanan Jenis Tanah Pada Sistem Pentanahan Grid-Rod Gardu Induk*. Semarang: Universitas Islam Sultan Agung Semarang, 2019.
- [4] M. Haddin, *Pengaruh Jumlah Konduktor Paralel Terhadap Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah pada Sistem Pentanahan GITET 500 KV*. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada, 2002.
- [5] A. Pranoto, H. Tumalang, and G. M. C. Mangindan, "Analisa Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling Dengan Konstruksi Grid (Kisi-kisi)," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 7, no. 3, pp. 189-198, 2018.
- [6] N. M. Semari and B. W. D. S., "Pengaruh Panjang Elektroda, Resistivitas Tanah Dan Frekuensi Arus Petir Terhadap Impedansi Pentanahan Elektroda Batang." *Dielekt. [P-ISSN 2086-9487] [E-ISSN 2579-650x]*, vol. 8, no. 1, pp. 31-35, 2021.
- [7] M. A. Latifah and M. Haddin, "Analisa Dampak Perubahan Jarak Antar Konduktor Dan Kedalaman Pada Sistem Pentanahan Grid-Rod Berbasis IEEE Std 80 - 2000," *J. Ilm. Setram*, vol. 8, no. 2, pp. 1-12, 2019.
- [8] H. Karuna, *Evaluasi Keamanan Pada Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 KV Jajar. Sarakarna: Universitas Muhammadiyah Surakarta*. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2014.

Lampiran 3 Hasil Turnitin

EVALUASI PENGARUH PERUBAHAN KONDUKTOR ROD TERHADAP RESISTANSI PENTANAHAN GITET 500 KV *المعد 8 من*

ORIGINALITY REPORT

| | | | |
|------------------|------------------|--------------|----------------|
| 5% | 6% | 1% | 3% |
| SIMILARITY INDEX | INTERNET SOURCES | PUBLICATIONS | STUDENT PAPERS |

PRIMARY SOURCES

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | jurnal.unimus.ac.id Internet Source | 3% |
| 2 | repositori.usu.ac.id Internet Source | 1% |
| 3 | repositori.ub.ac.id Internet Source | 1% |
| 4 | core.ac.uk Internet Source | 1% |

Exclude quotes On Exclude matches < 1%

Exclude bibliography On



UNISSULA
جامعة سلطان أبو نوح الإسلامية

Lampiran 4 Lembar Revisi Seminar Proposal Tugas Akhir

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
 Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA)
 Jl. Raya Kaligawe Km.4 Telp. 024-6583584 Psw. 340 Faks. 024-6582455
 Semarang 50112 <http://www.fi.unissula.ac.id>



LEMBAR REVISI PEMAPARAN

Berdasarkan Rapat Tim Penilai Pemaparan :

Hari : Senin
 Tanggal : 28 Juni 2021
 Tempat : Teleconference/Online

Memutuskan bahwa mahasiswa :

Nama : Slamet Muhsinin
 NIM : 30601700075
 Judul TA : Analisa Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor Rod
 Pada Grounding System Grid-Rod Gardu Induk 500 Kv

wajib melakukan perbaikan seperti tercantum dibawah ini:

| NO | REVISI | BATAS REVISI |
|----|---|--------------|
| | a. Nilai resistans pentanahan $R \leq 1 \text{ Ohm}$, b. Tegangan sentuh < tegangan sentuh yang diijinkan, c. Tegangan langkah < tegangan langkah yang diijinkan, d. Ground potential rise < tegangan langkah yang diijinkan. | |

Semarang, 28 Juni 2021
 Penguji 1

DR. Ir. H. M. Haddin, MT

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
 Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA)
 Jl. Raya Kaligawe Km.4 Telp. 024-6583584 Psw. 340 Faks. 024-6582455
 Semarang 50112 http://www.fti.unissula.ac.id



LEMBAR REVISI PEMAPARAN

Berdasarkan Rapat Tim Penilai Pemaparan :

Hari : Senin
 Tanggal : 28 Juni 2021
 Tempat : Teleconference/Online

Memutuskan bahwa mahasiswa :

Nama : Slamet Muhsinin
 NIM : 30601700075
 Judul TA : Analisa Pengaruh Perubahan Panjang Konduktor Rod
 Pada Grounding System Grid-Rod Gardu Induk 500 Kv

wajib melakukan perbaikan seperti tercantum dibawah ini:

| NO | REVISI | BATAS REVISI |
|----|--|--|
| | Latar belakang, Rumusan masalah, Tujuan. | ACC 5/7/21  |

Semarang, 28 Juni 2021
 Penguji 2

Ir. H. Sukarno, B. MT

Lampiran 5 Lembar Revisi Seminar Hasil Tugas Akhir

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA)
 J. Raya Kaligawe Km.4 Telp. 024-8583584 Fax. 024-8582455
 Semarang 50112 <http://www.unissula.ac.id>



LEMBAR REVISI SEMINAR TUGAS AKHIR

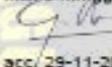
Berdasarkan Rapat Tim Penilai Seminar Tugas Akhir :

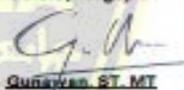
Hari : Jum'at
 Tanggal : 28 November 2021
 Tempat : Zoom Online

Memutuskan bahwa mahasiswa :

Nama : **SLAMET MUHSININ**
 NIM : **30601700075**
 Konsentrasi : **Sistem Tenaga Listrik**
 Judul TA : **Evaluasi Pengaruh Perubahan Konduktor Rod Terhadap Resistansi Pentanahan Gilet 500 Kv Ungaran**

wajib melakukan perbaikan seperti tercantum dibawah ini:

| NO. | REVISI | BATAS REVISI |
|-----|---|---|
| | Flowchart pada laporan diperbaiki Menarik Kesimpulan, diorientasikan pada obyek yg diteliti. | Max.2 minggu  acc/29-11-2021 |

Semarang, 28 November 2021
 Penilai/Penguji 1

Gunawan, ST, MT



LEMBAR REVISI SEMINAR TUGAS AKHIR

Berdasarkan Rapat Tim Penilai Seminar Tugas Akhir:

Hari : Jum'at
 Tanggal : 26 November 2021
 Tempat : Zoom Online

Memutuskan bahwa mahasiswa:

Nama : SLAMET MUHSININ
 NIM : 30601700075
 Konsentrasi : Sistem Tenaga Listrik
 Judul TA : Evaluasi Pengaruh Perubahan Konduktor Rod Terhadap Resistansi Pentanahan Gigit 500 Kv Ungaran

wajib melakukan perbaikan seperti tercantum dibawah ini:

| NO. | REVISI | BATAS REVISI |
|-----|---|--------------|
| 1. | Abstrak | |
| 2. | Persamaan | |
| 3. | Hasil ada di Gambar dan Tabe (pilih salah satu) | |

Semarang, 26 November 2021

Penilai, Penguji 2

Dr. Ir. H. Muhammad Haddis, MT

Lampiran 6 Lembar Revisi Sidang Tugas Akhir

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
 Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA)
 Jl. Raya Kaligawe Km.4 Telp. 024-6583584 Psw. 340 Faks. 024-6582455
 Semarang 50112 http://www.unissula.ac.id



LEMBAR REVISI dan TUGAS UJIAN SARJANA

Berdasarkan Rapat Tim Penguji Ujian Sarjana

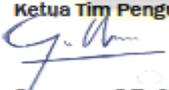
Hari : Senin
 Tanggal : 20 Desember 2021
 Tempat : Online / Teleconference

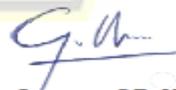
Memutuskan bahwa mahasiswa :

Nama : SLAMET MUHSININ
 NIM : 30601700075
 Judul TA : Evaluasi Pengaruh Perubahan Konduktor Rod Terhadap Resistansi Pentanahan Gilet 500 Kv Ungaran

wajib melakukan perbaikan dan membuat tugas seperti tercantum dibawah ini:

| NO | REVISI | BATAS REVISI |
|----|---|--------------|
| | Alasan jumlah dinaikin / diturunkan selisih jumlah 50, seharusnya dengan keseimbangan konstruksi. Fokus masalah / titik kritis dilakukan simulasi tidak jelas.. | <i>G. A.</i> |
| NO | TUGAS | |
| | | |

Mengetahui,
 Ketua Tim Penguji

Gunawan, S.T., MT
 NIDN. 0607117101

Semarang, 20 Desember 2021
 Penguji 1,

Gunawan, S.T., MT
 NIDN. 0607117101

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
 Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA)
 Jl. Raya Kaligawe Km.4 Telp. 024-6583584 Psw. 340 Faks. 024-6582455
 Semarang 50112 http://www.unissula.ac.id

LEMBAR REVISI dan TUGAS UJIAN SARJANA

Berdasarkan Rapat Tim Penguji Ujian Sarjana

Hari : Senin
 Tanggal : 20 Desember 2021
 Tempat : Online / Teleconference

Memutuskan bahwa mahasiswa :

Nama : SLAMET MUHSININ
 NIM : 30601700075
 Judul TA : Evaluasi Pengaruh Perubahan Konduktor Rod Terhadap Resistansi Pentanahan Gigit 500 Kv Ungaran

wajib melakukan perbaikan dan membuat tugas seperti tercantum dibawah ini:

| NO | REVISI | BATAS REVISI |
|----|---|--|
| 1. | Judul dipertegas lagi | 2 minggu <i>Handwritten signature</i> |
| 2. | Latar belakang disesuaikan lagi dengan hasil riset anda, latar belakang dapat mengacu pada riset – riset peneliti lain yang sejenis dengan judul riset anda. Kemudian bisa dijelaskan perbedaannya. | |
| 3. | Gambar model penelitian, diberikan keterangan – keterangan parameternya yang jelas sehingga pembaca bisa mudah memahami | |

| NO | TUGAS |
|----|--|
| | Semarang, 20 Desember 2021 Penguji 2. |

Mengetahui,
 Ketua Tim Penguji

Handwritten signature
Gunawan, S.T., MT
 NIDN. 0607117101

Semarang, 20 Desember 2021
 Penguji 2.

Handwritten signature
Dedi Nugroho, S.T., M.T.
 NIDN. 0617126602



LEMBAR REVISI dan TUGAS UJIAN SARJANA

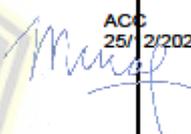
Berdasarkan Rapat Tim Penguji Ujian Sarjana

Hari : Senin
 Tanggal : 20 Desember 2021
 Tempat : Online / Teleconference

Memutuskan bahwa mahasiswa :

Nama : SLAMET MUHSININ
 NIM : 30601700075
 Judul TA : Evaluasi Pengaruh Perubahan Konduktor Rod Terhadap Resistansi Pentanahan Giset 500 Kv Ungaran

wajib melakukan perbaikan dan membuat tugas seperti tercantum dibawah ini:

| NO | REVISI | BATAS REVISI |
|----|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Halaman kata pengantar format numbering disesuaikan dengan panduan TA • Analisa matlab ditampilkan / dibandingkan dengan perhitungan Bab IV • Kesimpulan di beri persentase perubahan dari kondisi riil dan hasil perbaikanya | ACC 25/12/2021  |

| NO | TUGAS |
|----|--|
| |  |

Mengetahui,
 Ketua Tim Penguji



Gunawan, S.T., MT
 NIDN. 0607117101

Semarang, 20 Desember 2021
 Penguji 3,



Munaf Ismail, ST, MT
 NIDN. 0613127302