



Analisis Kelayakan Sistem Grounding PLTS Pulau Akar terhadap Regulasi Permenaker, PUIL 2020, serta IEEE

Tugas Akhir

**Oleh:
Dedy Gunawan Sitinjak (4232201017)**

**Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi
Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam
2026**

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul : **"Analisis Kelayakan Sistem Grounding PLTS Pulau Akar terhadap Regulasi Permenaker, PUIL 2020, serta IEEE"** adalah hasil karya sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan, dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip atau dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Batam, 04 Mei 2026



Dedy Gunwan Sitinjak
NIM: 4232201017

Lembar Pengesahan

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T)
di
Politeknik Negeri Batam

Dedy Gunawan Sitinjak (4232201017)

Tanggal Sidang: 11 Mei 2026

Disetujui oleh:

Penguji 1



1. Muhammad Veven, S.Kom., M.Eng
NIP: 199712272025061005

Pembimbing



1. Irwanto Zarma Putra, S.pd., M.Eng
NIK:118200

Penguji 2



2. Ir. Muhammad Syafei Gozali, S.T., M.T.
NIK:107050

Analisis Kelayakan Sistem Grounding PLTS Pulau Akar terhadap Regulasi Permenaker, PUIL 2020, serta IEEE

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu solusi energi terbarukan yang banyak diterapkan di wilayah terpencil, termasuk Pulau Akar. Namun, keandalan dan keamanan sistem PLTS sangat bergantung pada nilai tahanan sistem *grounding* yang berfungsi melindungi peralatan dan manusia dari bahaya tegangan lebih serta arus bocor. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas sistem *grounding* terhadap tingkat keamanan peralatan pada PLTS di Pulau Akar. Metode yang digunakan adalah observasi lapangan dan analisis komparatif. Pengukuran dilakukan terhadap parameter utama seperti tahanan pentanahan, tegangan sentuh, dan arus bocor menggunakan *Earth Resistance Tester*, *Clamp Meter*, dan *Multimeter Digital*. Data hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan regulasi Permenaker 02/MEN/1989, standar nasional (PUIL 2020) dan internasional (IEEE) untuk menilai kesesuaian dan efektivitas sistem *grounding* yang diterapkan. Hasil penelitian menunjukkan *grounding* petir tidak efektif karena resistansinya berfluktuasi ekstrem ($6,01\Omega$ - 97Ω , melebihi batas 5Ω) akibat keterbatasan *single rod* di dataran tinggi tanah bauksit saat cuaca kering. Sebaliknya, pembumian peralatan efektif ($<5\Omega$) berkat konfigurasi *interconnected grounding* yang membentuk hambatan paralel alami. Aspek keselamatan kedua jalur terpenuhi dengan nilai tegangan sentuh 0 V dan arus bocor 0 mA, sesuai dengan standar IEEE dan PUIL 2020. Secara komparatif, pembumian PLTS Tanjung Uma lebih efektif secara alami ($0,54\Omega$ - $0,56\Omega$) karena elevasi rendah yang dekat dengan muka air tanah. Penelitian menyimpulkan bahwa efektivitas pembumian di dataran tinggi memerlukan rekayasa teknik tambahan seperti *soil treatment* atau penambahan elektroda paralel.

Kata kunci: sistem grounding, PLTS, keamanan peralatan, tahanan pentanahan, arus bocor.

Analysis of the Feasibility of the Akar Island Solar Power Plant Grounding System in Permenaker Regulation, PUIL 2020, and IEEE Standards

Abstract

Solar Power Plants (PLTS) are one of the renewable energy solutions widely implemented in remote areas, including Akar Island. However, the reliability and safety of PLTS systems are highly dependent on the resistance value of grounding systems that protect equipment and humans from the dangers of overvoltage and leakage currents. This study aims to analyze the effectiveness of the grounding system on the safety level of equipment at the PLTS on Akar Island. The methods used are field observation and comparative analysis. Measurements were taken of key parameters such as grounding resistance, touch voltage, and leakage current using an Earth Resistance Tester, Clamp Meter, and Digital Multimeter. The measurement data was then compared with the Permenaker 02/MEN/1989 regulation, national standards (PUIL 2020), and international standards (IEEE) to assess the suitability and effectiveness of the grounding system implemented. The research results indicate that lightning grounding is ineffective because its resistance fluctuates extremely ($6.01\Omega - 97\Omega$, exceeding the 5Ω limit) due to the limitations of a single grounding rod in high-altitude bauxite soil during dry weather. In contrast, equipment grounding is effective ($<5\Omega$) because of the interconnected grounding configuration that forms a natural parallel path. Safety requirements for both systems are met with a touch voltage of 0V and a leakage current of 0mA, in accordance with IEEE and PUIL 2020 standards. In comparison, the grounding at the Tanjung Uma PV plant is naturally more effective ($0.54\Omega - 0.56\Omega$) due to the low elevation near the water table. The study concluded that achieving effective grounding in high-altitude areas requires additional engineering measures such as soil treatment or the addition of parallel electrodes.

Keywords: grounding system, solar power plant, equipment safety, grounding resistance, leakage current.

Kata Pengantar

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan magang ini dengan baik. Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memenuhi kewajiban akademik pada Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Politeknik Negeri Batam, serta sebagai bentuk pertanggungjawaban atas kegiatan magang yang telah penulis laksanakan di PT Pelayanan Energi Batam.

Selama pelaksanaan magang, penulis memperoleh pengalaman dan pemahaman yang berkaitan dengan dunia kerja di bidang pembangkit energi, meliputi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU). Kegiatan yang dilaksanakan mencakup operasional dan pemeliharaan sistem pembangkit, pemantauan kinerja, serta inspeksi peralatan secara berkala. Penulis turut memperoleh kesempatan melakukan kunjungan kerja ke luar pulau yang memberikan tambahan wawasan mengenai pengelolaan pembangkit di berbagai lokasi. Selain itu, penulis memahami penerapan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) di lingkungan industri energi. Pengalaman tersebut berkontribusi dalam meningkatkan wawasan dan kompetensi teknis sebagai bekal menghadapi dunia kerja secara profesional

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan bimbingan, dukungan, bantuan, serta kesempatan selama masa magang, yaitu:

1. Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmat dan karunia-Nya yang telah memberikan kesehatan, kesempatan, serta kelancaran kepada penulis dalam menyelesaikan kegiatan magang dan penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang Tua dan keluarga penulis, yang senantiasa memberikan doa, dukungan, serta motivasi yang tiada henti kepada penulis.
3. PT Pelayanan Energi Batam, yang telah memberikan kesempatan, kepercayaan, serta pengalaman berharga kepada penulis selama pelaksanaan kegiatan magang.
4. Bapak Akmal Mular selaku mentor di perusahaan yang telah memberikan arahan dan bimbingan. Bapak Andi Renaldy dan Bapak Mukhlis Saputra selaku co-mentor atas pendampingan dan ilmu yang diberikan. Seluruh jajaran Divisi Operasi dan Pemeliharaan (O&M) atas kesempatan dan wawasan selama pelaksanaan magang
5. Bapak Irwanto Zarma Putra, S.Pd., M.Eng., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta masukan kepada penulis selama proses pelaksanaan magang dan penyusunan Tugas Akhir ini.

6. Penulis menyampaikan penghargaan dan Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Muhammad Veven, S.Kom., M.Eng selaku Dosen Penguji 1 dan Bapak Ir. Muhammad Syafei Gozali, S.T., M.T selaku Dosen Penguji 2 atas arahan serta masukan yang berharga dalam penyempurnaan Tugas Akhir ini."
7. Saudara Catur atas arahan terkait judul dan gambaran Tugas Akhir, Saudara Ananta dan Saudara Ruri atas pendampingan serta pemberian data selama kunjungan ke Pulau Akar, serta Bapak Penji selaku HSE atas arahan terkait keselamatan dan kesehatan kerja selama magang.
8. Putri Juniaty br. Ompusunggu S.Pi. kekasih penulis yang senantiasa memberikan dukungan, semangat, serta motivasi kepada penulis, serta telah membantu dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
9. Rekan-rekan seperjuangan yaitu Kastu, Ingrid, Suci, Rizky, Novel dan Nurul yang telah memberikan dukungan, kerja sama, serta semangat kepada penulis selama pelaksanaan kegiatan magang dan penyusunan Tugas Akhir ini.

Dalam Proses penyusunan karya ilmiah ini, Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi penyempurnaan Tugas Akhir ini di masa yang akan datang.

Demikian kata pengantar ini Penulis sampaikan. Atas perhatian, dukungan, dan Kerjasama dari semua pihak, Penulis ucapkan terimakasih.

Batam, 04 Mei 2026



Dedy Gunawan Sitinjak

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir i

Lembar Pengesahan..... ii

Abstrakiii

Abstract iv

Kata Pengantar v

Daftar Isivii

Daftar Gambarx

Daftar Tabelxi

Bab 1. Pendahuluan 12

 1.1. Latar Belakang 12

 1.2. Rumusan Masalah..... 13

 1.3. Tujuan..... 13

 1.4. Manfaat 13

 1.5. Batasan 14

Bab 2. Tinjauan Pustaka 15

 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)..... 15

 2.2 Sistem *Grounding* 16

 2.2.1. Sistem *grounding* berdasarkan fungsi proteksi 16

 2.2.2. Sistem *grounding* berdasarkan konfigurasi distribusi..... 16

 2.2.3. Sistem *grounding* berdasarkan Bentuk Fisik Elektroda 19

 2.3 Jenis dan Konfigurasi *Grounding* pada PLTS..... 22

 2.3.1. *Grounding* pada Sistem DC 22

 2.3.2. *Grounding* pada Sistem AC..... 22

 2.3.3. *Surge Protection Device (SPD)*..... 22

 2.3.4. *Surge Counter* 22

 2.4. Parameter Penting dalam *Grounding* 23

 2.4.1. Tahanan Pentanahan (*Grounding Resistance*)..... 23

 2.4.2. Arus Bocor (*Leakage Current*) 23

2.5. Standar dan Regulasi <i>Grounding</i>	23
2.5.1. Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2020).....	23
2.5.2. IEEE Std 81-2012	24
2.5.3. Peraturan Menteri Tenaga Kerja (Permenaker 02/MEN/1989) .	24
Bab 3. Metodologi Penelitian.....	26
3.1. Perancangan	26
3.2. Alat dan Bahan.....	26
3.2.1 Earth Resistance Tester.....	26
3.2.2 <i>Clamp Meter</i>	27
3.2.3 <i>Multimeter Digital</i>	28
3.2.4 Kabel <i>Grounding</i>	28
3.2.5 Elektroda Tembaga (<i>Copper Rod</i>)	29
3.3. Pengujian	29
3.3.1. Lokasi Penelitian	29
3.3.2. Spesifikasi dan Konfigurasi Sistem <i>Grounding</i>	30
3.3.3. Variabel Penelitian	32
3.3.4. Prosedur Pengumpulan Data.....	32
3.3.5. Metode Analisis Data	33
Bab 4. Hasil dan Pembahasan	34
4.1. Data Hasil Penelitian	34
4.2. Pembahasan	36
4.2.1. Kelayakan Sistem terhadap Standar Keselamatan	37
4.2.2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Efektivitas <i>Grounding</i>	39
4.2.3. Perbandingan dengan PLTS Tanjung Uma.....	41
Bab 5. Kesimpulan dan Saran.....	43
5.1. Kesimpulan	43
5.2. Saran.....	44
Daftar Pustaka	45
Biodata	47

Lampiran.....	48
---------------	----

Daftar Gambar

Gambar 1. PLTS Pulau Akar	15
Gambar 2. TT System	17
Gambar 3. TN-C System	18
Gambar 4. TN-S System	18
Gambar 5. TN-C-S System	19
Gambar 6. Elektroda Batang Rod	20
Gambar 7. Elektroda Pelat	21
Gambar 8. Sistem <i>Grounding</i>	21
Gambar 9. <i>Flow Chart</i>	26
Gambar 10. <i>Earth Resistance Tester</i>	27
Gambar 11. <i>Clamp Meter</i>	27
Gambar 12. Kabel <i>Grounding</i> BC	28
Gambar 13. Kabel <i>Grounding</i> BC	28
Gambar 14.. Elektroda Tembaga	29
Gambar 15. Lokasi PLTS Pulau Akar Sesuai Titik Koordinat	30
Gambar 16. Lokasi PLTS Tanjung Uma, Batam	30
Gambar 17. Skema Sistem <i>Grounding</i>	31
Gambar 18. Skema Pengukuran Nilai Tahanan <i>Grounding</i>	32
Gambar 19. Grafik Nilai <i>Grounding</i> Petir selama Waktu Pengamatan	37
Gambar 20. Grafik Nilai <i>Grounding</i> Peralatan selama Waktu Pengamatan	38

Daftar Tabel

Tabel 1. Data Pengukuran di PLTS Pulau Akar.....	34
Tabel 2. Nilai Standar yang Diperbolehkan	34
Tabel 3. Data Pengukuran PLTS Tanjung Uma	35
Tabel 4. Hasil Perhitungan Hambatan Jenis Tanah (ρ) Jalur <i>Grounding</i> Petir	35

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Energi listrik merupakan kebutuhan fundamental yang berperan penting dalam menunjang aktivitas sosial, ekonomi, dan pembangunan suatu wilayah. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi serta keterbatasan sumber energi fosil, pemanfaatan energi baru dan terbarukan (EBT) menjadi solusi strategis yang berkelanjutan. Salah satu bentuk pemanfaatan EBT yang banyak dikembangkan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan energi listrik [1]. PLTS memiliki keunggulan berupa sumber energi yang melimpah, ramah lingkungan, serta fleksibel untuk diterapkan di wilayah terpencil dan kepulauan yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional [2]. Pulau Akar merupakan salah satu wilayah pesisir yang memanfaatkan PLTS sebagai sumber utama penyediaan energi listrik. PLTS di Pulau Akar beroperasi dengan sistem *off-grid*, sehingga keandalan dan keamanan instalasi menjadi faktor krusial dalam menjaga kontinuitas pasokan energi listrik bagi masyarakat setempat. Dalam sistem kelistrikan, aspek keselamatan instalasi sangat berkaitan erat dengan penerapan sistem *grounding* (pentanahan). Sistem *grounding* berfungsi sebagai jalur pengaman untuk mengalirkan arus gangguan ke tanah, menstabilkan tegangan sistem, serta melindungi peralatan dan manusia dari bahaya sengatan listrik dan tegangan lebih akibat gangguan maupun sambaran petir [3]. Penerapan sistem *grounding* yang tidak sesuai standar dapat meningkatkan risiko kerusakan peralatan, gangguan operasional, bahkan kecelakaan listrik yang membahayakan keselamatan pengguna. Kondisi lingkungan pesisir seperti di Pulau Akar, yang memiliki tingkat kelembapan tinggi serta kandungan garam tanah yang relatif besar, berpotensi meningkatkan resistivitas tanah dan mempercepat proses korosi pada elektroda *grounding*. Kondisi tersebut dapat menurunkan efektivitas sistem *grounding* apabila tidak dirancang dan dipelihara sesuai dengan standar yang berlaku [4]. Oleh karena itu, evaluasi terhadap sistem *grounding* pada PLTS di wilayah pesisir menjadi hal yang penting untuk memastikan tingkat keamanan instalasi tetap berada dalam batas aman. Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu penelitian yang bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi sistem *grounding* yang diterapkan pada PLTS Pulau Akar. Penelitian ini dilakukan melalui pengukuran langsung parameter sistem *grounding*, seperti tahanan pentanahan, tegangan sentuh, dan arus bocor, kemudian dibandingkan dengan standar nasional dan internasional yang berlaku, seperti PUIL, Permenaker 02/MEN/1989, dan IEEE.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari tugas akhir ini berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kondisi dan konfigurasi sistem *grounding* yang diterapkan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Pulau Akar?
2. Apakah nilai tahanan pentanahan, tegangan sentuh, dan arus bocor pada sistem *grounding* PLTS di Pulau Akar telah memenuhi standar keselamatan dan regulasi yang ditetapkan dalam Permenaker 02/MEN/1989 , PUIL, dan IEEE?
3. Faktor-faktor teknis apa saja yang mempengaruhi nilai tahanan sistem *grounding* pada PLTS di Pulau Akar berdasarkan hasil pengukuran lapangan?
4. Bagaimana perbandingan sistem *grounding* antara PLTS Pulau Akar dan PLTS Tanjung Uma berdasarkan hasil evaluasi terhadap standar yang berlaku?

1.3. Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengidentifikasi dan mendeskripsikan kondisi serta konfigurasi sistem *grounding* yang diterapkan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Pulau Akar.
2. Mengevaluasi nilai tahanan pentanahan, tegangan sentuh, dan arus bocor pada sistem *grounding* PLTS di Pulau Akar berdasarkan hasil pengukuran lapangan dan membandingkannya dengan standar keselamatan dan regulasi yang berlaku (PUIL, Permenaker 02/MEN/1989, dan IEEE).
3. Menganalisis faktor-faktor teknis yang mempengaruhi nilai tahanan sistem *grounding* pada PLTS di Pulau Akar, seperti kondisi tanah, jenis elektroda, dan kualitas sambungan *grounding*.
4. Membandingkan tingkat kelayakan sistem *grounding* antara PLTS Pulau Akar dan PLTS Tanjung Uma sebagai dasar evaluasi penerapan sistem *grounding* pada instalasi PLTS.

1.4. Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat Akademis
Penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan referensi dan kontribusi ilmiah dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang ketenagalistrikan, khususnya terkait sistem *grounding* pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Selain itu, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan evaluasi sistem pentanahan berdasarkan standar keselamatan kelistrikan.

2. Manfaat Praktis

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran kondisi aktual sistem grounding pada PLTS Pulau Akar serta menjadi bahan evaluasi bagi pengelola instalasi dalam meningkatkan keamanan dan keandalan operasional PLTS. Rekomendasi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai dasar perbaikan dan pengelolaan sistem grounding agar sesuai dengan standar dan regulasi PUIL, Permenaker 02/MEN/1989 dan IEEE.

3. Manfaat Sosial

Dengan meningkatnya efektivitas dan keamanan sistem grounding, diharapkan tingkat keselamatan instalasi dan pengguna listrik dapat terjaga dengan baik. Hal ini berdampak pada meningkatnya keandalan pasokan energi listrik bagi masyarakat di Pulau Akar sehingga dapat mendukung aktivitas sosial dan ekonomi secara berkelanjutan.

1.5. Batasan

Agar penelitian lebih terarah, batasan penelitian ini adalah:

1. Fokus penelitian terbatas pada analisis efektivitas sistem grounding dan pengaruhnya terhadap keamanan PLTS.
2. Lokasi penelitian hanya dilakukan di PLTS Pulau Akar, Desa Pulau Setokok, Batam, Kepulauan Riau .
3. Pengukuran dan pengambilan data lapangan dilakukan secara berkala satu minggu sekali selama durasi 3 bulan, terhitung mulai bulan November 2025 sampai dengan Januari 2026
4. Parameter yang diukur dan dianalisis terbatas pada nilai resistansi grounding (R), tegangan sentuh (V touch), dan arus bocor (I leak) pada komponen utama PLTS.
5. Penelitian ini dibatasi pada sistem pembumian sisi Array (rangka panel), inverter, dan Panel Distribusi Utama (MDP), tidak mencakup instalasi listrik di dalam rumah konsumen atau beban akhir.
6. Analisis ini dilakukan pada kondisi tanah pesisir di Pulau Akar saat pengambilan data berlangsung, tanpa mempertimbangkan perubahan nilai akibat variasi musiman (musim hujan/kemarau) atau siklus pasang surut air laut yang ekstrem.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik melalui modul fotovoltaik (photovoltaic module). PLTS menjadi salah satu solusi energi terbarukan yang banyak dikembangkan karena sumber energinya melimpah, ramah lingkungan, dan dapat diterapkan di berbagai kondisi geografis, termasuk wilayah terpencil dan kepulauan [2]. Prinsip kerja PLTS dimulai ketika cahaya matahari mengenai sel fotovoltaik (PV cell) yang tersusun dalam modul surya. Energi cahaya tersebut akan menghasilkan arus listrik searah (Direct Current/DC) melalui efek fotovoltaik. Arus DC kemudian dikonversi menjadi arus bolak-balik (Alternating Current/AC) menggunakan inverter agar dapat digunakan oleh peralatan listrik atau disalurkan ke sistem distribusi [1].



Gambar 1. PLTS Pulau Akar

Sumber: Riski Maruto, "PLN bangun PLTS untuk melistriki Pulau Akar Batam Kepri," *Antara Riau*

Berdasarkan sistem operasinya, PLTS dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu PLTS on-grid, PLTS off-grid, dan PLTS hybrid. PLTS *off-grid* merupakan sistem yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan listrik umum, sehingga sangat bergantung pada komponen pendukung seperti baterai, inverter, serta sistem proteksi dan pengamanan kelistrikan [4]. PLTS yang diterapkan di Pulau Akar termasuk dalam kategori PLTS off-grid, sehingga aspek keandalan dan keselamatan instalasi menjadi faktor yang sangat penting. Dalam sistem PLTS, selain komponen utama seperti modul surya, inverter, dan sistem penyimpanan energi, terdapat komponen pendukung yang berperan penting dalam aspek keselamatan, salah satunya adalah sistem grounding. Sistem grounding berfungsi untuk melindungi peralatan dan pengguna dari bahaya tegangan lebih, arus bocor, serta gangguan akibat sambaran petir atau kesalahan isolasi [3]. Oleh karena itu, penerapan sistem grounding yang sesuai standar menjadi bagian yang tidak terpisahkan dalam perancangan dan pengoperasian PLTS, khususnya pada sistem *off-grid* di wilayah pesisir.

2.2 Sistem *Grounding*

Grounding atau sistem pentanahan adalah sistem penghubung antara bagian tertentu dari peralatan listrik dengan tanah (bumi) menggunakan konduktor logam. Tujuan utama *grounding* adalah:

- Menyediakan jalur bagi arus gangguan agar segera mengalir ke tanah [3].
- Menstabilkan tegangan sistem terhadap tanah [3].
- Melindungi manusia dan peralatan dari bahaya tegangan lebih akibat petir atau kebocoran arus listrik [3].

2.2.1. Sistem *grounding* berdasarkan fungsi proteksi

- *System grounding External*

Grounding eksternal ialah sistem yang melindungi benda dari sambaran petir langsung, secara khusus melibatkan penghubungan bagian dari sistem listrik seperti netral dari transformator atau generator ke tanah di luar peralatan [10]. Ini dilakukan menggunakan batang, pelat, atau jaringan *grounding* yang ditanam di tanah [10].

- *System grounding internal*

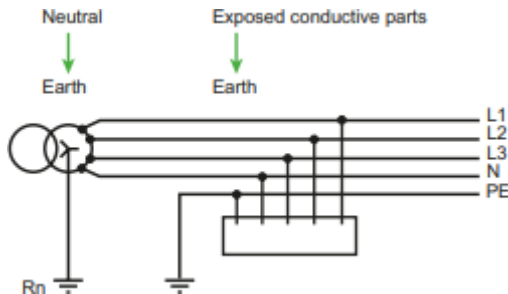
Grounding internal adalah proses penghubungan titik tertentu dalam sistem Listrik biasanya titik netral dari transformator atau generator ke tanah di dalam sistem itu sendiri, bukan melalui koneksi eksternal seperti batang atau pelat tanah [10].

2.2.2. Sistem *grounding* berdasarkan konfigurasi distribusi

Sistem *grounding* juga dapat diklasifikasikan berdasarkan hubungan antara titik netral sumber daya listrik dengan bumi. Konfigurasi sistem pembumian ini mempengaruhi metode proteksi, tingkat keamanan, dan karakteristik arus gangguan pada instalasi tenaga listrik. Adapun pembagian ini sebagai berikut:

- Sistem TT (*Terra-Terra*)

Pada sistem Terra-Terra, satu titik netral pada sumber suplai akan dihubungkan langsung kebumi, sedangkan seluruh bagian konduktif terbuka pada instalasi akan dihubungkan ke elektroda pembumian yang terpisah dari elektroda pembumian sumber [13].



Gambar 2. TT System

Sumber: M. Slinn, M. Matthews, and P. Guest, "Electrical Installation," Spon's Extern. Work. Landsc. Price B. 2012, pp. 453–454, 2020, doi: 10.1201/9780203157091-81.

Karakteristik utama sistem ini ialah penggunaan elektroda bumi berdiri sendiri pada sisi instalasi. Meskipun zona pengaruh kedua elektroda dapat saling tumpang tindih, kondisi ini umumnya tidak mempengaruhi kinerja sistem proteksi[13].

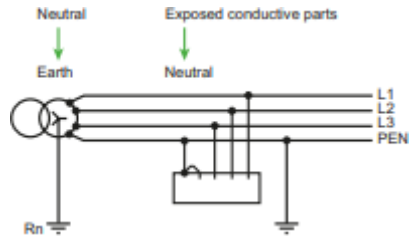
- Sistem TN (*Terra-Neutral*)

Pada sistem *Terra-Neutral*, bagian konduktif terbuka instalasi dihubungkan langsung ke titik netral sumber yang telah di *grounding* [13]. Sistem ini memiliki impedansi loop gangguan yang lebih rendah dibandingkan oleh sistem TT sehingga arus gangguan dapat mengalir lebih besar dan mempermudah perangkat proteksi bekerja dengan cepat

Sistem TN ini dibagi menjadi 3 konfigurasi utama, yaitu:

- Sistem TN-C (*Combined*)

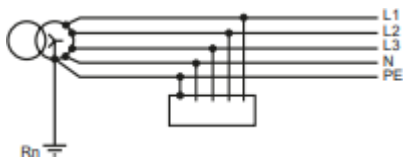
Pada sistem TN-C, fungsi konduktor netral dan konduktor protektif digabung dalam satu penghantar yang disebut konduktor PEN (*Protective Earth and Neutral*) [13]. Sistem ini memiliki efisiensi dari sisi jumlah penghantar dan memiliki beberapa keterbatasan. Penggunaan konduktor PEN tidak diperbolehkan pada penghantar dengan luas penampang kurang dari 10mm² dan pada peralatan portable, hal ini karena dapat meningkatkan risiko bahaya tegangan sentuh apabila terjadi gangguan pada konduktor tersebut [1]. Selain itu, sistem TN-C memerlukan kondisi lingkungan ekipotensial yang baik dengan distribusi elektroda bumi yang merata, karena konduktor PEN membawa arus netral, arus ketidakseimbangan fasa, serta harmonisa orde ketiga secara bersamaan [13].



Gambar 3. TN-C System

Sumber: M. Slinn, M. Matthews, and P. Guest, "Electrical Installation," *Spon's Extern. Work. Landsc. Price B.* 2012, pp. 453–454, 2020, doi: 10.1201/9780203157091-81.

- Sistem TN-S (*Separated*)
Sistem ini menggunakan konduktor netral (N) dan konduktor protektif (PE) yang dipisahkan sepenuhnya sepanjang instalasi. Pada sistem tiga fasa, konfigurasi ini umumnya akan menggunakan lima penghantar, yaitu tiga penghantar fasa, satu netral dan satu penghantar proteksi [13]. Pemisahan antara PE dan N memberikan tingkat keamanan yang lebih tinggi dibandingkan sistem TN-C karena arus netral tidak mengalir melalui penghantar proteksi. Selain itu, sistem TN-S memiliki tingkat interferensi elektromagnetik yang lebih rendah sehingga lebih sesuai digunakan pada instalasi dengan peralatan elektronik sensitif. Oleh karena itu, sistem ini menjadi standar yang direkomendasikan untuk instalasi dengan penghantar berpenampang kecil dan untuk peralatan portabel [13]



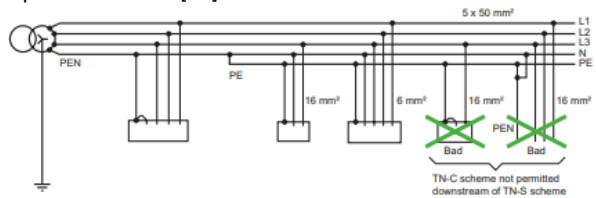
Gambar 4. TN-S System

Sumber: M. Slinn, M. Matthews, and P. Guest, "Electrical Installation," *Spon's Extern. Work. Landsc. Price B.* 2012, pp. 453–454, 2020, doi: 10.1201/9780203157091-81.

- Sistem TN-C-S
Sistem ini ialah kombinasi antara TN-C dan TN-S dalam satu instalasi. Pada bagian awal sistem, konduktor protektif dan netral

digabung sebagai konduktor PEN seperti pada sistem TN-C, kemudian dipisahkan menjadi konduktor PE dan N pada bagian instalasi berikutnya seperti pada sistem TN-S.

Dalam penerapannya, konfigurasi TN-C tidak diperbolehkan digunakan pada bagian hilir (*downstream*) dari sistem TN-S. Hal ini bertujuan untuk mencegah risiko terputusnya konduktor protektif apabila terjadi gangguan atau pemutusan netral pada sisi hulu, yang dapat menyebabkan timbulnya tegangan sentuh berbahaya pada bodi peralatan listrik [13].



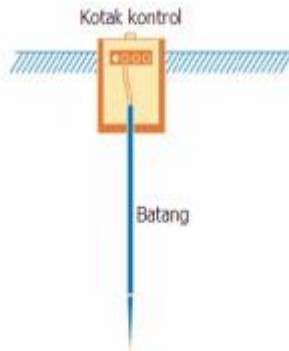
Gambar 5. TN-C-S System

Sumber: M. Slinn, M. Matthews, and P. Guest, "Electrical Installation," *Spon's Extern. Work. Landsc. Price B.* 2012, pp. 453–454, 2020, doi: 10.1201/9780203157091-81.

2.2.3. Sistem *grounding* berdasarkan Bentuk Fisik Elektroda

- Elektroda Batang (Rod)

Sistem *grounding* ini menggunakan elektroda pipa atau besi profil yang dipasang ke dalam tanah. Elektroda jenis ini merupakan elektroda dengan pemasangan yang mudah dengan kelebihan tidak memerlukan lahan yang luas [14]



Gambar 6. Elektroda Batang Rod

Sumber: P. Harahap, Rimbawati, and N. Evalina, Teknik Instalasi Listrik, vol. 2. UMSU Press, 2024.

Pada penggunaan elektroda batang rod, dapat dilakukan perhitungan nilai tahanan pentanahan menggunakan persamaan tahanan pentanahan batang tunggal (*single ground rod*) [14], yaitu:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{\alpha}\right) \quad (2.1)$$

Rumus *Grounding Resistance* batang tunggal (*single ground rod*) dengan keterangan:

- R : tahanan pentanahan (Ω)
- ρ : hambatan jenis tanah ($\Omega \cdot m$)
- L : panjang elektroda (m)
- α : diameter elektroda (m)

- Elektroda Pelat

Sistem ini menggunakan bahan pelat logam (utuh atau berlubang) atau dari kawat kasa yang digunakan bila diinginkan tahanan pentanahan yang kecil dan sulit diperoleh dengan jenis elektroda lainnya. Sama hal nya dengan rod, elektroda ini ditanam dalam [14]



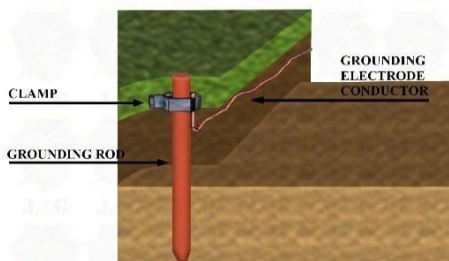
Gambar 7. Elektroda Pelat

Sumber: P. Harahap, Rimbawati, and N. Evalina, Teknik Instalasi Listrik, vol. 2. UMSU Press, 2024.

- Elektroda Pita

Elektroda pita merupakan jenis elektroda pembumian yang dibuat dari penghantar berbentuk pita, penghantar berpenampang bulat, maupun penghantar pilin yang umumnya dipasang dengan cara ditanam di dalam tanah. Namun, pemasangan elektroda ini dapat mengalami kendala apabila kondisi tanah terdiri atas lapisan berbatu. Selain menyulitkan proses instalasi, kondisi tersebut juga dapat menyebabkan sulitnya memperoleh nilai tahanan pentanahan yang rendah. Sebagai alternatif, pemasangan elektroda dapat dilakukan secara vertikal ke dalam tanah maupun secara horizontal dengan kedalaman yang relatif dangkal. Selain metode pemasangan, nilai tahanan pentanahan yang dihasilkan juga sangat dipengaruhi oleh bentuk konfigurasi elektroda yang digunakan, misalnya konfigurasi melingkar, radial, atau kombinasi dari keduanya [14].

Grounding yang tidak sesuai standar dapat menyebabkan tegangan sentuh (*touch voltage*) dan tegangan langkah (*step voltage*) melebihi batas aman, sehingga berpotensi menyebabkan sengatan listrik fatal [5].



Gambar 8. Sistem Grounding

2.3 Jenis dan Konfigurasi *Grounding* pada PLTS

Dalam instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), sistem *grounding* dirancang untuk melindungi peralatan dan instalasi dari gangguan listrik serta menjaga keselamatan pengguna. Secara umum, konfigurasi sistem *grounding* pada PLTS meliputi beberapa bagian utama, yaitu:

2.3.1. *Grounding* pada Sistem DC

Grounding pada sisi DC berfungsi untuk melindungi modul surya dan inverter dari lonjakan tegangan akibat induksi petir maupun gangguan arus balik. Sistem ini membantu mengalirkan arus lebih ke tanah sehingga dapat mencegah kerusakan komponen sensitif pada sisi DC [11].

2.3.2. *Grounding* pada Sistem AC

Grounding pada sisi AC berperan dalam menstabilkan sistem distribusi listrik serta melindungi peralatan dan beban listrik dari gangguan arus bocor dan tegangan lebih. Sistem *grounding* AC juga berfungsi sebagai proteksi terhadap bahaya sengatan listrik pada rangka peralatan [12].

2.3.3. *Surge Protection Device (SPD)*

Surge Protection Device (SPD) dipasang pada jalur DC dan AC untuk mengalihkan lonjakan arus atau tegangan lebih ke tanah ketika terjadi surja tegangan, baik akibat sambaran petir langsung maupun tidak langsung. Keberadaan SPD sangat penting untuk meningkatkan tingkat perlindungan peralatan PLTS terutama inverter, SPD perlu dipasang jika jarak antar panel surya dan inverter lebih dari 10 meter [12].

2.3.4. *Surge Counter*

Surge counter merupakan perangkat yang digunakan untuk menghitung jumlah kejadian surja tegangan yang diterima oleh *Lightning Arrester (LA)* atau sistem proteksi petir. Alat ini berfungsi sebagai indikator apakah sistem proteksi petir telah bekerja ketika terjadi lonjakan tegangan, sehingga dapat digunakan sebagai bahan evaluasi kinerja sistem *grounding* [12].

Jenis elektroda pentanahan yang umum digunakan pada sistem PLTS adalah batang tembaga (*copper rod*) yang ditanam ke dalam tanah dengan kedalaman sekitar 2–3 meter. Pada lokasi dengan resistivitas tanah tinggi, dapat digunakan

jaring tembaga (*copper mesh*) untuk memperluas area kontak dengan tanah dan menurunkan nilai tahanan pentanahan [2].

2.4. Parameter Penting dalam Grounding

Dalam evaluasi sistem *grounding*, terdapat beberapa parameter teknis utama yang menjadi fokus analisis untuk menilai tingkat keselamatan dan efektivitas sistem, antara lain:

2.4.1. Tahanan Pentanahan (*Grounding Resistance*)

Tahanan pentanahan menunjukkan besarnya hambatan yang dialami arus listrik saat mengalir dari sistem *grounding* ke bumi. Nilai tahanan pentanahan yang rendah menandakan sistem *grounding* yang efektif. Menurut IEEE Std 80-2013, nilai tahanan pentanahan yang direkomendasikan adalah di bawah 5 Ω untuk sistem tenaga dan di bawah 1 Ω untuk sistem elektronik sensitif seperti PLTS [3].

2.4.2. Arus Bocor (*Leakage Current*)

Arus bocor merupakan arus listrik yang mengalir dari rangka peralatan ke tanah akibat kegagalan isolasi, kondisi lingkungan lembap, atau kerusakan komponen [5]. Nilai arus bocor yang melebihi batas aman dapat membahayakan keselamatan manusia dan merusak peralatan. Nilai arus bocor yang direkomendasikan agar tetap berada pada kondisi aman adalah kurang dari 3,5 mA untuk sistem satu fasa dan kurang dari 5 mA untuk sistem tiga fasa [3].

2.5. Standar dan Regulasi Grounding

Penerapan sistem *grounding* pada instalasi PLTS harus mengacu pada standar dan regulasi yang berlaku untuk menjamin keselamatan instalasi dan pengguna. Beberapa standar utama yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

2.5.1. Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2020)

PUIL 2020 adalah Standar Nasional Indonesia dalam mengatur perencanaan, pemasangan, dan verifikasi instalasi listrik tegangan rendah di Indonesia. PUIL 2020 ditetapkan sebagai revisi dari PUIL 2011 dan disusun dengan mengacu pada standar internasional IEC 60364-1 mengenai instalasi listrik tegangan rendah sehingga selaras dengan praktik kelistrikan global [7]. Standar ini bertujuan untuk menjamin keselamatan manusia, ternak, dan perlindungan terhadap harta benda dari bahaya yang dapat ditimbulkan dari instalasi listrik dalam operasi normal [7]. PUIL 2020 mengatur ambang batas voltase sentuh (*touch voltage*) sebesar 50 V AC untuk kondisi lingkungan normal [7]. Dalam konfigurasi khusus, seperti sirkit keluaran generator, PUIL mewajibkan proteksi

grounding pada batasan voltase maksimal 30 V dan arus bocor (*I leak*) tidak melebihi 5 mA [7]. Untuk menjaga paarameter keselamatan tersebut, PUIL juga merinci penggunaan berbagai gawai proteksi, seperti:

- Gawai Impedens Proteksi (*Protective Impedance Device*)
Komponen ini membatasi arus sentuh untuk keadaan tunak (*steady state*) ke tingkat yang tidak berbahaya [7]
- Gawai Proteks Arus Sisa (GPAS)
Komponen ini akan memutus sirkuit ketika terjadi arus bocor mencapai nilai ambang tertentu, umumnya kurang dari 30 mA untuk proteksi manusia [7]
- Gawai Proteks Arus Lebih (GPAL)
Gawai ini bekerja berdasarkan durasi arus yang melebihi nilai pengenalan, hal ini bertujuan untuk mencegah kerusakan termal [7]

2.5.2. IEEE Std 81-2012

IEEE Std 81-2012 ialah panduan internasional dalam metodologi pengukuran praktis untuk karakteristik listrik sistem *Grounding*. Standar ini akan menjelaskan teknik untuk mengukur resistivitas tanah, impedansi sistem *Grounding* ke bumi jauh, serta potensi permukaan bumi seperti voltase langkah (*step voltage*) dan voltase sentuh (*touch voltage*) [8]. IEEE berbeda dengan regulasi yang bersifat mewajibkan angka tertentu, standar ini menyediakan prosedur pengujian yang akurat agar hasil pengukuran valid secara teknis [8].

Dalam implementasi lapangan terdapat penggunaan *clamp-on meter* yang mana dijelaskan oleh standar ini bahwa alat bekerja dengan menginduksi tegangan pada frekuensi tertentu (1kHz-3.4 kHz) ke dalam sistem *Grounding* melalui penghantar (*down lead*) [8]. Metode ini akan mengukur arus uji (*I_{test}*) yang mengalir ke sistem *multiground* untuk menentukan impedansi dengan asumsi impedansi sisten netral di luar elektrode yang diuji mendekati nol ($Z_{eq} \approx 0$) [8].

Standar ini juga memperingatkan adanya arus liar atau arus bocor (*stray current*) yang dapat mendistorsi akurasi pengukuran, sehingga diperlukan ketelitian dalam pemilihan instrumen dan metode pengujian [8].

2.5.3. Peraturan Menteri Tenaga Kerja (Permenaker 02/MEN/1989)

Permenaker 02/MEN/1989 ialah regulasi hukum yang mengatur tentang pengawasan instalasi penyalur petir di tempat kerja di Indonesia. Peraturan ini berfokus pada melindungi tenaga kerja dan sumber produksi dari bahaya sambaran petir yang dapat menyebabkan kebakaran, ledakan atau kecelakaan kerja lainnya.

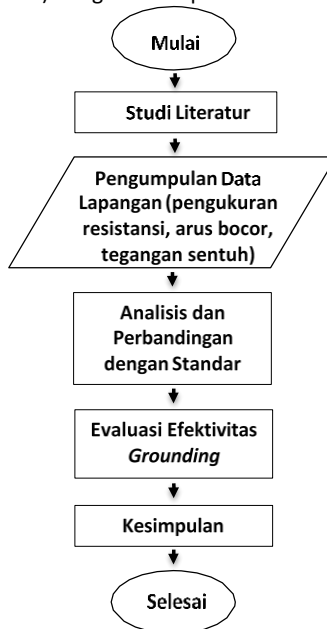
Peraturan ini menetapkan angka yang tegas dalam kriteria kelulusan teknis. Pada Pasal 54, disebutkan secara eksplisit bahwa besar resistansi Grounding dari seluruh sistem *grounding* ialah kurang dari 5 ohm [9]. Jika hal ini tidak dapat dicapai dalam pengukuran, maka instalasi dianggap tidak memenuhi syarat keselamatan kerja dan harus dilakukan penambahan elektrode *Grounding* [9].

Penerapan standar-standar tersebut menjadi sangat penting. Integrasi antara parameter teknis dalam PUIL 2020, metodologi akurasi pengukuran menurut IEEE 81-2012, serta kepatuhan regulasi Permenaker 02/MEN/1989 akan membentuk satu kesatuan yang komprehensif dalam sistem proteksi, terutama pada instalasi PLTS di wilayah pesisir seperti Pulau Akar yang memiliki tingkat kelembapan dan kandungan garam tanah tinggi, karena kondisi tersebut dapat mempengaruhi kinerja dan keandalan sistem *grounding*.

Bab 3. Metodologi Penelitian

3.1. Perancangan

Penelitian ini menggunakan metode observasi lapangan dan analisis komparatif. Observasi dilakukan secara langsung di PLTS Pulau Akar untuk mengukur parameter sistem *grounding*. Data lapangan kemudian dibandingkan dengan dengan regulasi dan standar nasional (Permenaker 02/MEN/1989, PUIL 2020, dan IEEE Std.81-2012). Diagram alur penelitian ditunjukkan pada Gambar



Gambar 9. Flow Chart

3.2. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

3.2.1 Earth Resistance Tester

Alat ini berfungsi untuk mengukur nilai tahanan pentanahan (*ground resistance*) pada sistem *grounding*. Pengukuran dilakukan dengan metode tiga titik (*Fall of Potential Method*) untuk mendapatkan hasil yang akurat. *Earth Resistance*

Tester bekerja dengan mengalirkan arus kecil ke tanah melalui elektroda bantu, kemudian mengukur tegangan jatuh di antara dua titik. Hasil pengukuran menunjukkan besarnya hambatan antara sistem *grounding* dengan bumi.

Dalam penelitian ini digunakan *Earth Resistance Tester* digital tipe tiga terminal dengan rentang pengukuran 0–2000 Ω dan tingkat akurasi $\pm 2\%$.



Gambar 10. *Earth Resistance Tester*

Sumber: Kyoritsu Indonesia, “Kyoritsu Indonesia - Earth Testers KEW 4105A,” Kyoritsu-indonesia.com

3.2.2 *Clamp Meter*

Clamp meter digunakan untuk mengukur arus bocor (*leakage current*) serta tegangan sentuh (*touch voltage*) pada sistem PLTS. Alat ini bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana penjepitnya (*clamp*) mendeteksi arus yang mengalir pada konduktor tanpa harus memutuskan rangkaian listrik. Dengan kemampuan True RMS, clamp meter mampu membaca arus dan tegangan AC/DC secara akurat meskipun bentuk gelombang tidak sinusoidal.

Clamp meter juga digunakan untuk memastikan tidak terjadi kebocoran arus yang berpotensi membahayakan manusia maupun merusak peralatan.



Gambar 11. *Clamp Meter*

Sumber: “Proster Digital Clamp Meter TRMS Auto Ranging 5999 Counts Multimeter,” PROSTER store

3.2.3 *Multimeter Digital*

Multimeter digital digunakan untuk mengukur tegangan, arus, resistansi, serta kontinuitas kabel pada sistem *grounding*. Alat ini berfungsi sebagai pendukung dalam proses pengujian tegangan sentuh pada rangka logam inverter, panel distribusi, dan modul surya. Selain itu, multimeter digunakan untuk memeriksa kondisi koneksi kabel *grounding* agar memastikan tidak ada hambatan tinggi pada sambungan. Multimeter yang digunakan memiliki rentang pengukuran hingga 1000 Volt dengan resolusi 0,1 Volt.



Gambar 12. Kabel *Grounding* BC

Sumber: 6-Function Professional Digital Multimeter [TM100],” SEALEY, 2026

3.2.4 *Kabel Grounding*

Kabel *grounding* merupakan bahan penghantar listrik yang menghubungkan bagian logam peralatan listrik ke elektroda pentanahan di tanah. Kabel ini terbuat dari bahan tembaga berpenampang 16 mm² yang memiliki konduktivitas tinggi dan tahan terhadap korosi. Pemilihan kabel tembaga bertujuan untuk meminimalkan resistansi penghantar dan menjamin jalur arus gangguan menuju tanah bekerja efektif.



Gambar 13. Kabel *Grounding* BC

Sumber: Arad Branding, “Used Copper Cable; Flexible Lightweight Reliable Low Signal Loss,” Arad Branding

3.2.5 Elektroda Tembaga (*Copper Rod*)

Sistem pentanahan (*Grounding*) merupakan bagian esensial dari instalasi listrik yang bertujuan utama untuk proteksi keselamatan sesuai dengan prinsip fundamental PUIL 2020 (SNI 0225-1:2020) [7]. Melalui konduktor *Grounding* dan elektroda yang ditanam ke dalam tanah, sistem ini berfungsi sebagai titik kontak antara instalasi listrik dengan bumi. Fungsi utamanya adalah memastikan proteksi dari kejut listrik (arus kejut) dengan menyediakan jalur bagi arus gangguan ke bumi. Selain itu, sistem pentanahan membatasi potensi voltase lebih (lonjakan tegangan) yang dapat membahayakan manusia dan peralatan, sehingga memberikan jalur aman bagi arus gangguan yang mengalir ke bumi.



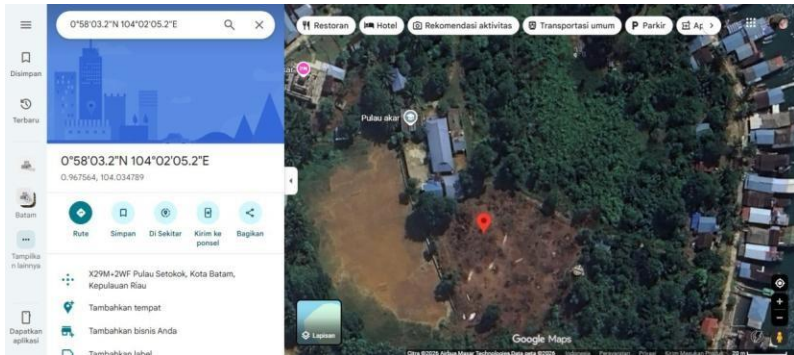
Gambar 14.. Elektroda Tembaga

Sumber: "GROUNDING ROD LAPIS TEMBAGA 5/8 X 1.5 MTR, ROD COPPER BONDED (IMPORT)," [Lazada.co.id](https://www.lazada.co.id)

3.3. Pengujian

3.3.1. Lokasi Penelitian

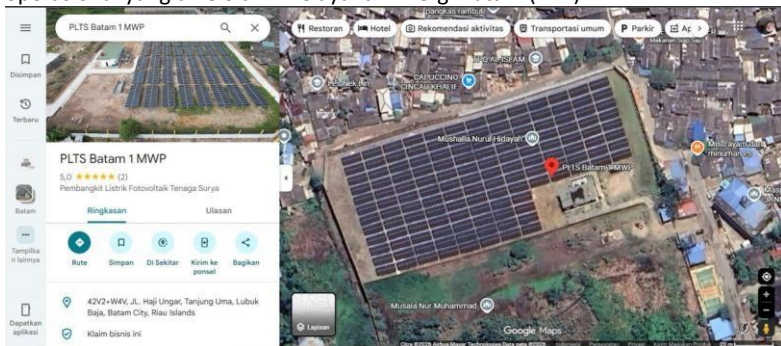
Penelitian ini dilaksanakan pada instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Pulau Akar dengan kapasitas ± 152 kWp yang menggunakan sistem *off-grid*. PLTS tersebut dikelola oleh PT Pelayanan Energi Batam (PEB) dan berlokasi di wilayah pesisir. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada kondisi lingkungan pesisir yang memiliki karakteristik tanah dengan kelembapan dan resistivitas relatif tinggi, sehingga berpengaruh terhadap kinerja sistem *grounding*.



Gambar 15. Lokasi PLTS Pulau Akar Sesuai Titik Koordinat

Sumber : *Google Maps*

Penelitian ini melibatkan PLTS Tanjung Uma sebagai lokasi studi komparatif atau pembandingan. Pemilihan lokasi ini dikarenakan pada status PLTS Tanjung Uma ialah salah satu instalasi pembangkit dengan model sistem terbaik secara operasional yang dikelola PT Pelayanan Energi Batam (PEB).

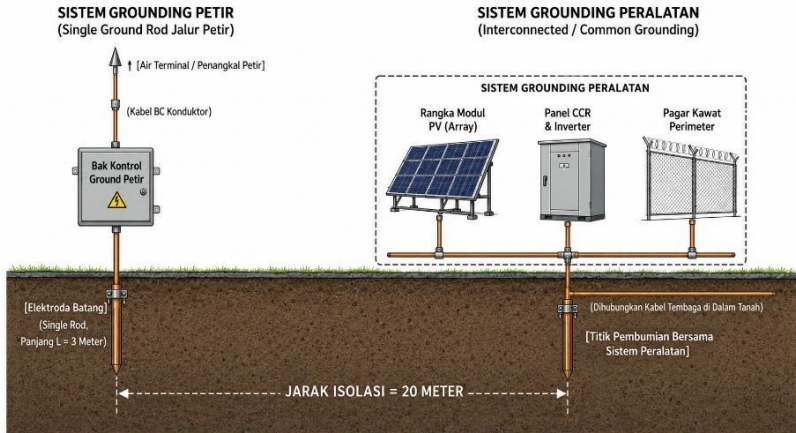


Gambar 16. Lokasi PLTS Tanjung Uma, Batam

Sumber : *Google Maps*

3.3.2. Spesifikasi dan Konfigurasi Sistem *Grounding*

Sistem grounding yang diimplementasikan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Pulau Akar dirancang dengan memisahkan dua sistem. Sistem Petir dan Peralatan ini dipisahkan dengan jarak isolasi fisik sejauh 20 meter.



Gambar 17. Skema Sistem Grounding

Sumber : Ilustrasi Penulis

Berdasarkan gambar diatas, berikut penjelasan detail mengenai jenis sistem *grounding* yang digunakan sebagai berikut:

1. **Sistem *Grounding* Proteksi Petir (*Lightning Protection Grounding*)**
 Jenis sistem *grounding* yang digunakan dalam jalur proteksi petir ialah sistem elektroda batang tunggal (*single ground rod*), sistem ini hanya mengandalkan satu buah batang elektroda berbahan *copper-clad steel* dengan panjang (L) 3 meter yang ditanam secara vertikal tegak lurus di bawah struktur tiang penangkal petir. Jalur ini berfungsi khusus untuk media disipasi arus petir langsung menuju bumi
2. **Sistem *Grounding* Peralatan (*Equipment Grounding*)**
 Jenis sistem *grounding* yang digunakan untuk peralatan daya dan lingkungan PLTS ialah sistem pembumian terinterkoneksi (*Interconnected/Common Grounding*) yang dipadukan dengan konfigurasi sistem distribusi TN-S serta proteksi *Surge Arrester*. Sistem ini tidak menggunakan elektroda tunggal, melainkan mengintegrasikan seluruh komponen konduktif terbuka dan bagian fungsional elektrik ke dalam satu kesatuan sistem pembumian yang terdiri dari 3 titik teroneksi utama:
 - Modul PV
Meng-ground-kan seluruh bingkai aluminium panel surya untuk menghindari bahaya tegangan induksi
 - Panel pada *Central Control Room* (CCR)
Jalur grounding ini untuk mengamankan komponen elektronik daya sensitif dari arus bocor internal
 - Pagar Pengaman

Struktur pagar kawat keliling PLTS yang diinterkoneksi ke sistem *grounding* peralatan sesuai dengan instruksi keselamatan kerja PUIL 2020 untuk mengantisipasi tegangan sentuh

3.3.3. Variabel Penelitian

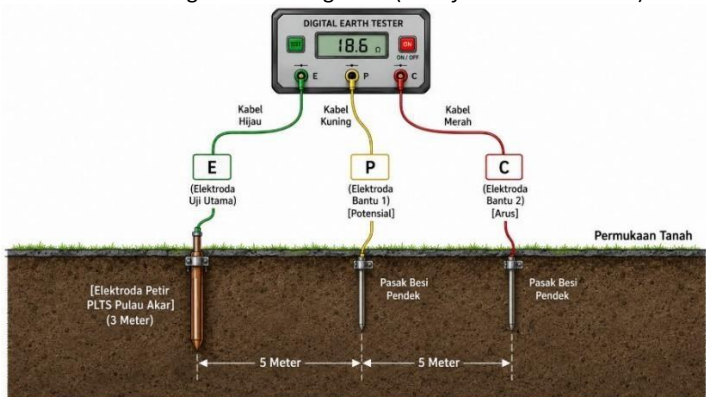
Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif–evaluatif, sehingga variabel penelitian dikelompokkan sebagai berikut:

1. Variabel deskriptif
 - Jenis dan konfigurasi sistem *grounding* pada PLTS.
 - Tipe elektroda pentanahan yang digunakan.
2. Variabel teknis terukur
 - Nilai tahanan pentanahan (*ground resistance*).
 - Nilai tegangan sentuh (*touch voltage*).
 - Nilai arus bocor (*leakage current*).
3. Variabel pendukung
4. Kondisi lingkungan tanah, seperti kelembapan dan karakteristik tanah di lokasi PLTS.

3.3.4. Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan dan pengukuran langsung, dengan tahapan sebagai berikut:

1. Melakukan survei lapangan untuk mengidentifikasi konfigurasi sistem *grounding* yang diterapkan pada PLTS Pulau Akar.
2. Melakukan pengukuran nilai tahanan pentanahan menggunakan *Earth Resistance Tester* dengan metode tiga titik (*Fall of Potential Method*).



Gambar 18. Skema Pengukuran Nilai Tahanan *Grounding*

Sumber : Ilustrasi Penulis

3. Mengukur nilai tegangan sentuh pada bagian rangka logam inverter, panel distribusi, dan struktur modul surya menggunakan alat ukur yang sesuai.
4. Mengukur nilai arus bocor (*leakage current*) pada sistem menggunakan *clamp meter*.
5. Mencatat seluruh hasil pengukuran ke dalam tabel observasi sebagai data primer penelitian.

3.3.5. Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan metode deskriptif dan evaluatif, melalui langkah-langkah berikut:

1. Menghitung nilai rata-rata hasil pengukuran tahanan pentanahan, tegangan sentuh, dan arus bocor.
2. Membandingkan hasil pengukuran dengan batas standar keselamatan yang berlaku, yaitu:
 - $R < 5 \Omega$ sesuai Permenaker 02/MEN/1989
 - $V_{touch} < 50 V$ sesuai PUIL 2020
 - $I_{leak} < 5 \text{ mA}$ sesuai IEEE
3. Melakukan evaluasi terhadap kondisi sistem *grounding* berdasarkan kesesuaian atau ketidaksesuaian hasil pengukuran dengan standar yang ditetapkan.
4. Menganalisis faktor-faktor teknis yang mempengaruhi nilai tahanan pentanahan, seperti kondisi kelembapan tanah, korosi elektroda, serta kualitas sambungan konduktor *grounding*.
5. Melakukan analisis komparatif antara hasil pengukuran pada **PLTS Pulau Akar** dan **PLTS Tanjung Uma** untuk menilai perbedaan efektivitas sistem *grounding* pada kedua lokasi tersebut.

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Data Hasil Penelitian

Berikut merupakan hasil pengukuran sistem grounding di PLTS Pulau Akar yang diperoleh selama periode pemantauan yaitu selama 12 minggu. Data tersebut akan digunakan sebagai dasar dalam proses analisis yang mengevaluasi performa dan tingkat keamanan sistem *grounding* pada instalasi pembangkit listrik tenaga surya.

Tabel 1. Data Pengukuran di PLTS Pulau Akar

Parameter	Minggu											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Grounding Petir (ohm)	97	23,8	21,9	11,5	6,97	7,81	8,93	11,02	9,33	96,9	6,01	23,8
Grounding Pelaratan (ohm)	3,15	4,38	4,36	3,44	1,11	4,31	3,12	1,03	4,25	3,07	1,17	3,68
Tegangan Sentuh (V)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Arus Bocor (A)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Untuk menilai tingkat kelayakan dan keamanan sistem *grounding* pada instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Pulau Akar, diperlukan acuan nilai standar yang diperbolehkan berdasarkan regulasi dan standar yang berlaku. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan beberapa referensi yaitu, nilai resistansi *grounding* yang mengacu pada Permenaker No.02/MEN/1989, batas tegangan sentuh mengacu pada PUIL 2020, dan batas arus bocor yang mengacu pada IEEE 142-2007.

Tabel 2. Nilai Standar yang Diperbolehkan

Resistansi	<5 Ohm
Tegangan Sentuh	50 V
Arus Bocor	5 mA

Untuk memperkuat analisis, penelitian ini juga menampilkan data pengukuran dari PLTS Tanjung Uma sebagai pembanding. Data ini nantinya digunakan sebagai dasar evaluasi dalam menilai efektivitas penerapan sistem *grounding* pada instalasi PLTS.

Tabel 3. Data Pengukuran PLTS Tanjung Uma

Pengujian	1	2
<i>Grounding</i> Petir (ohm)	0,56	0,57
<i>Grounding</i> Pelaratan (ohm)	0,64	0,62
Tegangan Sentuh (V)	0	0
Arus Bocor (mA)	0	0

Selanjutnya dilakukan perhitungan hambatan jenis tanah dengan menggunakan metode *single ground rod* berdasarkan nilai resistansi *grounding* yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan. Berikut ditampilkan contoh proses perhitungan hambatan jenis tanah yang bertujuan untuk memberikan gambaran tahapan analisis dalam menentukan nilai resistivitas tanah pada *grounding* petir di minggu pertama pengamatan.

Perhitungan Tahanan Jenis Tanah

1. *Grounding* Petir, minggu 1

$$R = \frac{4L}{2\pi L \ln\left(\frac{4}{\alpha}\right)}$$

$$97 \Omega = \frac{\rho}{2 \cdot 3,14 \cdot 3 m} \ln\left(\frac{4 \cdot 3 m}{0,015875 m}\right)$$

$$97 \Omega = \frac{\rho}{18,84 m} \ln(755,906)$$

$$97 \Omega = \frac{\rho}{18,84 m} 6,628$$

$$\rho = \frac{97 \Omega}{6,628} \cdot 18,84 m$$

$$\rho = 275,725 \Omega m$$

Setelah contoh perhitungan ditampilkan, hasil perhitungan tahanan jenis tanah untuk setiap minggu selama periode pengamatan selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel guna mempermudah proses analisis terhadap dinamika perubahan hambatan jenis tanah yang terjadi selama periode pengamatan.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Hambatan Jenis Tanah (ρ) Jalur *Grounding* Petir

Perhitungan Hambatan Jenis Tanah ρ (<i>Grounding</i> Petir)					
	<i>Grounding</i> Petir (ohm)	$2\pi(L)$	$4L/\alpha$	$\ln 4L/\alpha$	ρ
Minggu 1	97	18,84	755,906	6,628	275,725
Minggu 2	23,8	18,84	755,906	6,628	67,652
Minggu 3	21,9	18,84	755,906	6,628	62,251

Minggu 4	11,5	18,84	755,906	6,628	32,689
Minggu 5	6,97	18,84	755,906	6,628	19,812
Minggu 6	7,81	18,84	755,906	6,628	22,200
Minggu 7	8,93	18,84	755,906	6,628	25,384
Minggu 8	11,02	18,84	755,906	6,628	31,325
Minggu 9	9,33	18,84	755,906	6,628	26,521
Minggu 10	96,9	18,84	755,906	6,628	275,440
Minggu 11	6,01	18,84	755,906	6,628	17,084
Minggu 12	23,8	18,84	755,906	6,628	67,652
rata-rata					76,978

Berdasarkan Tabel 4. Hasil Perhitungan Hambatan Jenis Tanah (ρ) Jalur *Grounding* Petir, diperoleh nilai rata-rata hambatan jenis tanah (*soil resistivity*, ρ) senilai 76,978 Ω m. Nilai ini dijadikan sebagai parameter acuan karakteristik tanah di seluruh lokasi penelitian PLTS Pulau Akar, hal ini dikarenakan seluruh sistem *grounding* baik pada jalur proteksi petir maupun proteksi peralatan berada dalam satu lingkungan geologis homogen, yakni jenis tanah bauksit.

4.2. Pembahasan

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Pulau Akar merupakan pembangkit tenaga surya mandiri yang memiliki konfigurasi *off grid* yang mengandalkan 100% energi matahari dan menggunakan baterai untuk menyimpan daya agar bisa digunakan selama 24 jam. PLTS berkapasitas 152 kWp yang beroperasi di wilayah kepulauan ini berada pada elevasi 18,54 m di atas permukaan laut (mdpl). Letak ini memiliki keuntungan dalam hal perlindungan dari genangan air laut, namun ketinggian ini menempatkan area PLTS pada posisi yang relative kering dibandingkan area sekitarnya. Selain itu, lahan area PLTS ini didominasi oleh tanah bauksit.

Untuk mengatasi kondisi tersebut, sistem *grounding* yang dirancang di PLTS Pulau Akar menggunakan metode *deep grounding*, dimana penanaman elektroda pbumian di kedalaman tertentu untuk mencapai lapisan tanah dengan hambatan yang lebih rendah yaitu pada kedalaman sekitar 3 m. Selain itu pula, jarak antar elektroda *grounding* dipasang sejauh sekitar 2 m untuk mengurangi kemungkinan interfensi antar elektroda saat mengalirkan arus gangguan ke tanah. Sistem *grounding* pada Pulau Akar ini juga dibagi dalam dua jalur utama, yaitu *grounding* petir untuk menyalurkan arus sambaran dari sistem penangkal petir dan *grounding* peralatan untuk membumikan bagian logam non-arus agar dapat meminimalkan tegangan sentuh berbahaya.

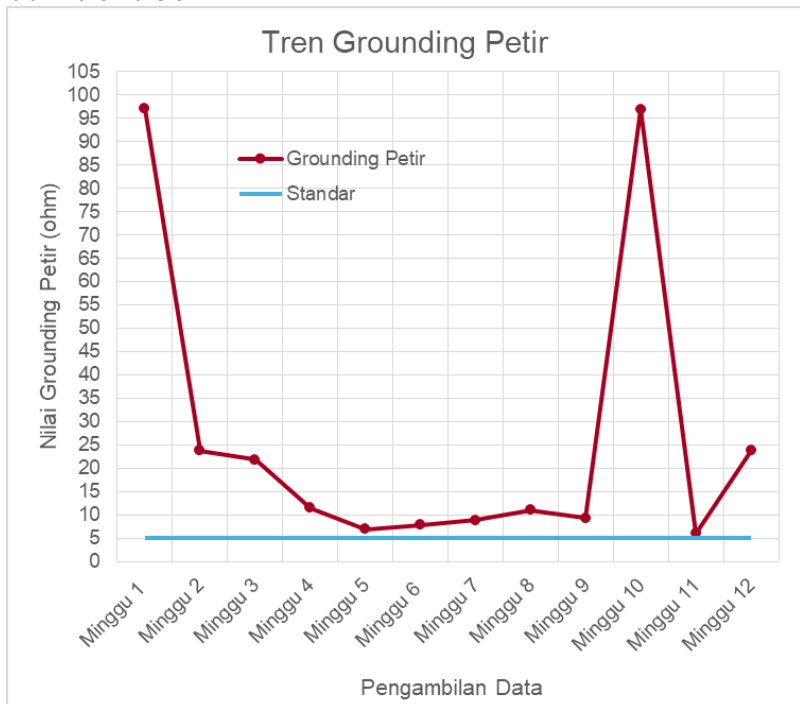
Untuk memastikan keandalan sistem *grounding* yang diterapkan, dilakukan pemantauan selama 12 minggu dengan mengamati parameter utama seperti resistansi grounding, tegangan sentuh, dan arus bocor sebagai indikator adanya potensi kegagalan isolasi pada kabel maupun komponen sistem di PLTS Pulau Akar.

4.2.1. Kelayakan Sistem terhadap Standar Keselamatan

4.2.1.1. Resistansi Grounding

Analisis sistem *grounding* pada PLTS Pulau Akar ini didasarkan pada tiga parameter utama keselamatan kelistrikan, yaitu resistansi grounding, tegangan sentuh (V_{touch}), dan arus bocor (I_{leak}), parameter-parameter ini akan digunakan untuk mengevaluasi tingkat keamanan sistem terhadap gangguan listrik baik dari kegagalan isolasi ataupun sambaran petir

Berdasarkan Permenaker No.02/MEN/1989 dan PUIL 2020, nilai resistansi *grounding* baik pada sistem proteksi petir maupun pembumian dipersyaratkan ialah maksimal 5 ohm.

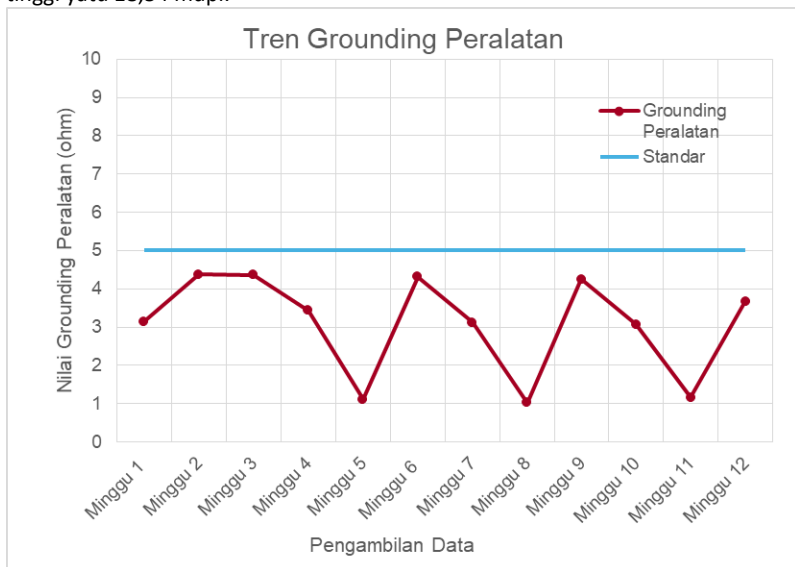


Gambar 19. Grafik Nilai *Grounding* Petir selama Waktu Pengamatan

Berdasarkan grafik diatas ditemukan kondisi nilai resistansi *grounding* petir selama 12 minggu pengamatan yang sangat fluktuatif. Hasil pengukuran menunjukkan nilai terendah 6,01 ohm pada minggu ke 11 dan nilai tertinggi mencapai 97,0 ohm pada minggu pertama pengukuran. Nilai pengukuran selama 12 minggu pengamatan ini menunjukkan bahwa pengukuran jauh di atas standar yang dipersyaratkan, sehingga sistem *grounding* petir dapat dikategorikan tidak memenuhi standar.

Nilai resistansi yang tinggi pada nilai *grounding* petir ini dapat mengurangi sistem proteksi eksternal dalam menyalurkan arus sambaran petir yang dapat berpotensi menimbulkan lonjakan tegangan (*surge*) yang dapat merambat ke dalam sistem listrik dan berisiko merusak komponen *sensitif* pada instalasi PLTS.

Hasil evaluasi teknis menunjukkan bahwa kondisi ini merupakan kegagalan fungsional dari konfigurasi single ground rod ketika dihadapkan pada karakteristik geologi PLTS Pulau Akar yang didominasi oleh tanah bauksit berpori dengan elevasi tinggi yaitu 18,54 mdpl.



Gambar 20. Grafik Nilai *Grounding* Peralatan selama Waktu Pengamatan

Sebaliknya, berdasarkan grafik nilai *grounding* peralatan diatas menunjukkan performa yang baik dengan rentang 1,03 ohm sampai 4,38 ohm. Nilai resistansi yang dibawah 5 Ohm selama 12 minggu waktu pemantauan ini menunjukkan berada di bawah standar yang ditetapkan, hal ini menunjukkan resistansi sudah sesuai dengan standar. Kondisi ini pula menunjukkan sistem *grounding* peralatan bekerja dengan efektif dalam menyalurkan arus gangguan ke tanah sehingga

mengindikasikan bahwa elektroda *grounding* terpasang mencapai lapisan tanah yang cukup konduktif sehingga mampu menjaga stabilitas sistem dan meningkatkan keamanan instalasi

4.2.1.2. Tegangan Sentuh

Berdasarkan standar PUIL 2020 ditetapkan bahwa batas tegangan sentuh aman bagi manusia ialah kurang dari 50V. Adapun hasil pengukuran lapangan selama 12 minggu pengamatan menunjukkan nilai 0V secara konsisten. Nilai ini mengindikasikan tidak terdapat perbedaan potensial antara bodi peralatan dan tanag pada saat pengukuran dilakukan. Nilai ini juga membuktikan bahwa *grounding* peralatan yang dilakukan berhasil, dimana sistem *grounding* bekerja dengan baik dalam menjaga seluruh bagian logam non-arus tetap berada pada potensial yang sama dengan bumi. Dengan ini pula, risiko tegangan sentuh yang dapat membahayakan dapat diminimalkan.

4.2.1.3. Arus Bocor (I leak)

Berdasarkan nilai hasil pengamatan selama 12 minggu pengamatan menunjukkan nilai yang sama konsisten nya dengan tegangan sentuh, yaitu 0 mA. Nilai ini sangat sesuai dengan standar yang ditentukan, yaitu standar IEEE yaitu keamanan peralatan dan personel berada di bawah 5 mA. Dengan tidak ditemukan arus bocor menunjukkan bahwa sistem memiliki sistem pengabelan dan isolasi pada komponen *Power Convension System* (PCS), seperti inverter dan *charge controller* berada dalam kondisi baik. Nilai ini juga sejalan dengan tegangan sentuh (*V touch*) yang tercatat 0 V, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem instalasi pada PLTS Pulau Akar memenuhi aspek keselamatan operasional serta memberikan perlindungan yang memadai bagi operator dari risiko *electric shock*.

4.2.2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Efektivitas *Grounding*

Dalam mengevaluasi performa sistem *grounding* di PLTS Pulau Akar, analisis dibagi menjadi dua kategori fungsional sesuai SNI 03-7015-2004: Sistem *Grounding Eksternal* (proteksi petir) yang berfungsi yang berfungsi mendisipasikan arus surja berenergi tinggi, dan Sistem *Grounding Internal* (sistem kelistrikan/peralatan) yang berfungsi menjaga kesetaraan potensial (*equipotential bonding*) serta keamanan operasional.

Berdasarkan perhitungan hambatan jenis tanah yang telah dilakukan menggunakan persamaan tahanan *grounding* batang tunggal (*single gound rod*) pada *grounding* petir menunjukkan nilai rata-rata hambatan jenis tanah sebesar 76,978 Ω m. Nilai ini digunakan sebagai acuan karakteristik tanah pada lokasi penelitian karena seluruh sistem *grounding* berada dalam satu lingkungan dan jenis tanah yang sama, yaitu tanah bauksit. Namun demikian, berdasarkan tabel 4. Hasil Perhitungan Hambatan Jenis Tanah (ρ) Jalur *Grounding* Petir pada minggu ke -1 dan minggu ke-10 terjadi pelonjakan nilai hingga melebihi 200 Ω m ketika kondisi cuaca berada pada suhu yang relatif tinggi. Peningkatan yang signifikan dan jauh

dari nilai rata-rata ini mengindikasikan bahwa tanah bauksit mengalami kondisi kering yang ekstrem. Secara karakteristik, tanah bauksit memiliki tingkat porositas yang cukup tinggi sehingga kandungan air di dalam pori-pori tanah lebih cepat menguap saat temperatur meningkat.

Selain dipengaruhi oleh kondisi kelembapan tanah, hasil evaluasi juga menunjukkan bahwa faktor topografi dan konfigurasi elektroda turut mempengaruhi performa sistem *grounding*. Berdasarkan kondisi lokasi penelitian yang berada di elevasi 18,54 m di atas permukaan laut, pemasangan elektroda dengan panjang 3 m secara teoritis masih berada pada lapisan permukaan tanah (*topsoil*) yang cenderung kering. Kondisi ini menyebabkan ujung elektroda belum mencapai zona tanah dengan kelembapan yang lebih stabil atau mendekati muka air tanah. Hal ini mengakibatkan, nilai tahanan *grounding* menjadi sangat bergantung pada kandungan air hasil infiltrasi curah hujan di lapisan atas tanah, disaat curah hujan rendah dan temperatur lingkungan meningkat, kelembapan tanah menurun secara signifikan sehingga konduktivitas tanah yang berkurang. Fenomena dehidrasi lapisan tanah atas akibat faktor elevasi ini mengevaluasi mengapa konfigurasi *single-point dissipation* pada jalur proteksi petir menjadi sama sekali tidak efektif pada musim kemarau, karena keterbatasan luas bidang kontak elektroda tunggal dalam mendisipasikan arus surja ke dalam tanah yang sedang bersifat isolatif.

Di sisi lain, hasil pengukuran pada *grounding* peralatan tetap menunjukkan nilai tahanan pembumian yang berada pada kategori baik meskipun berada dalam lingkungan tanah yang sama. Kondisi ini menunjukkan keberhasilan sistem *grounding* peralatan tidak semata-mata dipengaruhi oleh nilai resistivitas tanah, melainkan oleh konfigurasi sistem *grounding* TN-S, penggunaan Arrester dan konfigurasi yang saling terhubung (*interconnected grounding*). *Grounding* peralatan yang terhubung dengan berbagai struktur logam seperti rangka Modul PV, Panel CCR, dan Pagar Perimeter sehingga membentuk jalur disipasi arus yang lebih luas. Selain itu implementasi sistem TN-S (*Terra Neutral-Separated*) memberikan proteksi dengan memisahkan konduktor netral dan konduktor protektif (PE) sejak dari sumber hingga ke beban. Hal ini menjamin bahwa setiap arus bocor atau gangguan pada bodi peralatan memiliki jalur balik yang spesifik dan terisolasi, sehingga meminimalkan risiko tegangan sentuh (*touch voltage*) yang berbahaya bagi personel maupun komponen sensitif. Sementara itu, peran Arrester menjadi sangat krusial karena bertindak sebagai 'katup pengaman' terhadap surja tegangan transien (seperti sambaran petir tidak langsung atau *switching surge*). Keefektifan Arrester bergantung pada seberapa cepat arus lonjakan tersebut dapat didisipasikan ke bumi. Dalam sistem ini, konfigurasi *interconnected grounding* menyediakan jalur disipasi paralel berimpedansi rendah yang memungkinkan Arrester membuang energi surja dengan sangat cepat sebelum mencapai komponen sensitif seperti Inverter atau Central Control Room (CCR).

Dengan demikian, efektivitas sistem *grounding* pada area dengan nilai hambatan jenis tanah yang tinggi tidak dapat hanya mengandalkan kondisi alami tanah, melainkan juga bergantung pada konfigurasi desain. Sistem eksternal di PLTS Pulau Akar terbukti rentan dengan *single-point dissipation*, sementara sistem internal terbukti andal karena menerapkan *distributed-point dissipation*. Untuk menjamin keselamatan operasional, rekayasa konfigurasi paralel multi-titik atau *soil treatment* diperlukan pada sistem eksternal agar setara dengan keandalan sistem internal.

4.2.3. Perbandingan dengan PLTS Tanjung Uma

Studi komparatif dengan PLTS Tanjung Uma dilakukan dalam penelitian ini dengan alasan strategis bahwa kedua lokasi ini sama-sama dikelola oleh PT Pelayanan Energi Batam dan memiliki karakteristik geologi yang identik, yaitu didominasi oleh jenis tanah bauksit. Selain itu dalam analisis, PLTS Tanjung Uma dijadikan sebagai referensi sistem *grounding* sebagai sistem yang ideal dikarenakan seluruh aspek parameter *grounding* ($R < 1$) yaitu sebesar $0,56 \Omega$ dan $0,57 \Omega$ pada *grounding* petir dan $0,64 \Omega$ dan $0,62 \Omega$ pada *grounding* peralatan. Melalui perbandingan ini, PLTS Tanjung Uma dijadikan sebagai parameter referensi sistem *grounding* yang ideal guna mengevaluasi sejauh mana faktor eksternal lingkungan mempengaruhi efektivitas sistem *grounding*.

Jika ditinjau dari aspek konfigurasi instalasi fisik, sistem *grounding* di kedua PLTS ini memiliki karakteristik desain yang serupa, yaitu sistem *grounding* proteksi petir mengadopsi konfigurasi elektroda batang tunggal (*single ground rod*) yang dipasang 3 m ke dalam tanah, dan sistem *grounding* peralatan menerapkan metode interkoneksi (*interconnected common grounding*). Namun terlepas dari kesamaan tersebut, nyatanya performa unjuk kerja efektivitas yang kontras, khususnya pada jalur proteksi petir saat musim kemarau.

Pada PLTS Tanjung Uma yang berada pada elevasi 4,43 mdpl yang mana posisi permukaan tanah relatif dekat dengan zona jenuh air (*saturated zone*) atau muka air tanah. Posisi permukaan tanah ini memungkinkan terjadinya proses kapiler dari air tanah yang menjaga kelembapan tanah bauksit stabil di sepanjang waktu. Kondisi tanah yang lembab ini akan menjaga nilai resistansi tanah tetap rendah sehingga sistem *grounding* bekerja secara optimal. Sebaliknya, di PLTS Pulau Akar berada di elevasi 18,54 yang jauh lebih besar terhadap permukaan tanah, sehingga nilai resistansi yang dihasilkan cenderung tinggi terutama saat kondisi cuaca panas, yang mana hal ini sudah dijelaskan sebelumnya pada subbab **Faktor-faktor yang Mempengaruhi Efektivitas Grounding**. Hal ini lah yang menyebabkan performa yang dihasilkan tidak sama dengan sistem *grounding* di PLTS Tanjung Uma.

Tanah bauksit yang memiliki karakteristik porositas yang cukup tinggi menyebabkan air hujan cepat meresap ke dalam tanah (*drainage*), dengan elevasi sebesar 4,43 mdpl di PLTS Tanjung Uma, air yang meresap ke dalam tanah

cenderung tertahan oleh muka air tanah yang dangkal sehingga kelembapan tanah ini tetap terjaga. Berbeda dengan PLTS Pulau Akar, elevasi yang lebih tinggi menyebabkan air hujan yang meresap ke dalam tanah segera mengalami perkolasi menuju lapisan tanah yang lebih dalam tanpa adanya sumber air tanah yang dekat untuk mempertahankan kelembapan. Hal ini lah yang menciptakan fenomena “bak kering” atau lapisan tanah di sekitar elektroda kehilangan kelembapan.

Dengan menjadikan PLTS Tanjung Uma sebagai sistem acuan, dapat disimpulkan bahwa efektivitas unjuk kerja sistem *grounding* di PLTS Pulau Akar tidak hanya ditentukan oleh konfigurasi elektroda, tetapi juga oleh kondisi lingkungan alami di lokasi instalasi. Oleh karena itu, dengan elevasi yang lebih tinggi diperlukan rekayasa tambahan untuk meningkatkan konduktivitas tanah di sekitar elektroda seperti *soil treatment*, penambahan jumlah elektroda dan kedalaman elektroda.

Bab 5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dengan pengukuran lapangan selama 12 minggu dapat disimpulkan:

1. Sistem *grounding* PLTS Pulau Akar ialah sistem *off grid* yang menggunakan konfigurasi *deep grounding* dengan elektroda batang tunggal yang disambung hingga kedalaman 3 meter. Sistem ini memisahkan jalur proteksi petir (eksternal) yang menggunakan konfigurasi *single-point dissipation* dan Sistem Grounding Internal (peralatan) yang menggunakan *interconnected grounding* dengan sistem TN-S dan arrester. Kedua sistem dipisahkan sejauh 20 meter pada area tanah bauksit dengan elevasi 18,54 mdpl.
2. Jalur *grounding* petir (eksternal) dinyatakan tidak memenuhi standar dengan nilai pengukuran diatas 5Ω , Ketidakefektifan ini disebabkan gangguan oleh penggunaan konfigurasi *single-point dissipation* pada topografi elevasi tinggi tanah bauksit berpori, yang menyebabkan elektroda gagal mencapai zona jenuh air saat hambatan jenis tanah tinggi. Sedangkan jalur *grounding* peralatan (Internal) efektif dengan nilai yang konsisiten disetiap minggu nya memenuhi standar Permenaker 02/MEN/1989 yaitu dibawah 5Ω . Efektivitas ini dicapai dengan implementasi konfigurasi *interconnected grounding* (pengintegrasian rangka modul PV, panel CCR, dan pagar perimeter) dipadukan dengan konfigurasi sistem distribusi TN-S serta proteksi *Surge Arrester* yang menciptakan efek pembagian hambatan parallel alami, sehingga mampu mereduksi total nilai resistansi sistem meskipun hambatan jenis tanah tinggi. Adapun nilai Tegangan sentuh dan arus bocor pada PLTS Pulau Akar menunjukkan nilai 0 (nol) secara konsisten selama periode pengamatan, sehingga dinyatakan memenuhi standar keselamatan IEEE 142-2007 dan PUIL 2020.
3. Kondisi geologis dan konfigurasi instalasi menjadi faktor penting selama penelitian yang mempengaruhi efektivitas sistem *grounding*. Fluktuasi resistivitas tanah bauksit yang tinggi dapat menciptakan peningkatan nilai resistansi *grounding* secara signifikan. Selain itu, elevasi lokasi yang tinggi dengan konfigurasi yang digunakan mempengaruhi efektivitas sistem *grounding*.
4. Sistem *grounding* di PLTS Tanjung Uma dan Pulau Akar sangat jauh berbeda, terkhusus pada *grounding* petir. PLTS Tanjung uma yang konsisten berada pada $0,54\Omega$ dan $0,56\Omega$ sedangkan pada PLTS Pulau Akar berada pada $6,01\Omega$ hingga 97Ω . Perbedaan ini disebabkan oleh faktor elevasi yang berbeda antar kedua PLTS sehingga menghasilkan resistansi yang berbeda.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil analisis dan kesimpulan yang telah diperoleh, maka beberapa saran berikut diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan untuk meningkatkan keandalan sistem:

1. Penerapan *soil treatment*

Dengan tinggi nya nilai ρ pada tanah bauksit saat kering, disarankan untuk memberikan bentonit pada titik *grounding* petir sebagai material *higroskopis* yang mampu menyerap dan mengikat kelembapan di sekitar elektroda dan mengisi pori-pori tanah bauksit yang kasar.

2. Penambahan jumlah elektroda

Penambahan jumlah elektroda yang dipasang secara paralel dengan jarak elektroda minimal 20 meter yang bertujuan untuk memperluas area disipasi arus ke dalam tanah serta mengurangi kemungkinan *overlap* pada daerah pengaruh masing-masing elektroda.

3. Perawatan berkala

Melakukan pembersihan rutin pada setiap titik sambungan (*jointing*) untuk mencegah oksidasi, mengingat sifat kimia tanah bauksit dapat mempercepat korosi pada material logam jika tidak dirawat dengan baik

4. Penelitian selanjutnya

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menambah variabel penelitian seperti kadar kelembapan tanah (*soil moisture*) dan suhu tanah secara *real-time* agar mendapat gambaran yang lebih nyata mengenai faktor -faktor yang mempengaruhi fluktuasi resistivitas pada tanah bauksit.

Daftar Pustaka

- [1] D. Icha, "Literature Review: Upaya Energi Bersih dan Terjangkau", *Jurnal Sains Edukatika Indonesia (JSEI)*, vol. 4, pp. 8-11, Mei. 2022, doi: <https://jurnal.uns.ac.id/jsei/article/view/70928>
- [2] P. Fidelchristo, D.P.K. Brahmana dan P.P. Lasman, "Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Energi Ramah Lingkungan yang Berkelanjutan", *Industrial & System Engineering Journals*, vol. 2, No.2, pp. 201-207, Juni.2024,doi: <https://jurnal.ukdc.ac.id/index.php/isejou/article/download/631/388/2360>
- [3] Fauzi dan Radhiah, "Peran Tahanan Pentanahan pada Peralatan Listrik", *Jurnal Listrik Telekomunikasi Elektronika*, Vol. 18, No.1, pp. 28-33, Maret. 2021, doi: <https://ejournal.pnl.ac.id/litek/article/view/2151>
- [4] M. Rizky, P.N. Rizky dan A. Zidan, "Analisis Sistem Grounding Menggunakan Elektroda Ground Rod Jenis Tembaga Pada Gedung A dan D di Universitas Peradaban", *Journal Of Telecommunication, Electronics and Control Engineering (JTECE)*, Vol. 4, No. 2, pp. 100-107, July. 2022, doi: <https://share.google/Qs3bgotccXnwcMENf>
- [5] M.Supari, K. Khusnul dan N.A. Alfiantin, "Analisis Kritis Terhadap Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Tipe Photovoltaic (PV) Sebagai Energi Alternatif Masa Depan", *Rang Teknik Journal*, Vol. 3, No.1,pp. 120-130, Januari. 2020, doi: <https://jurnal.umsb.ac.id/index.php/RANGTEKNIKJOURNAL/article/view/1638>
- [6] Badan Standardisasi Nasional. Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020, "Bagian 1: Pendahuluan, prinsip fundamental dan definisi", SNI 0225-1:2020. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2020, doi: <https://pdfcoffee.com/qdownload/sni-puil-2020-2-pdf-free.html>
- [7] Standar Nasional Indonesia , *Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020*. Badan Standarisasi Nasional, 2020.
- [8] IEEE Power and Energy Society 2, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2012. Accessed: Jan. 17, 2026. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6392181>
- [9] MENTERI TENAGA KERJA REPUBLIK INDONESIA, "PERATURAN MENTERI TENAGA KERJA REPUBLIK INDONESIA NOMOR : PER.02/MEN/1989," Feb. 21, 1989. https://temank3.kemnaker.go.id/page/perundangan_detail/46/b47214a59062b6a0affa8167e19245e2 (accessed Jan. 17, 2026).
- [10] SNI 03-7015-2004, *Sistem Proteksi Petir Pada Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2004.

- [11] B. Poltak Pandapotan, A. Cahyo Kumoro, and W. Widayat, "Sis-tem Pem-bumian Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," jurnal Profesi In-sinyur Indonesia, vol. 3 (1) 34-38, Dec. 2024, Accessed: Dec. 20, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jpii/article/download/25734/12265>
- [12] DEHN + SÖHNE, "Lightning and surge protection for rooftop photovoltaic sys-tems," DEHN + SÖHNE, White Paper WP018/E/0615, Jun. 2015. [Online]. Available: <https://www.dehn-international.com/sites/default/files/media/files/pv-rooftop-wp018-e.pdf> Accessed: Dec. 20, 2025]
- [13] M. Slinn, M. Matthews, and P. Guest, "Electrical Installation," *Spon's Extern. Work. Landsc. Price B. 2012*, pp. 453–454, 2020, doi: 10.1201/9780203157091-81.
- [14] P. Harahap, Rimbawati, and N. Evalina, *Teknik Instalasi Listrik*, vol. 2. UMSU Press, 2024.

Biodata



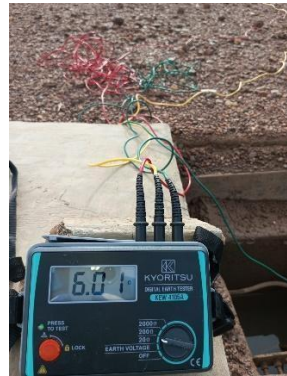
Nama	: Dedy Gunawan Sitingjak
TTL	: Batam, 23 Juni 2003
Agama	: Kristen Protestan
Alamat	: Sagulung Sumber Jadi Blok B7 No 15
Email	: dgsitingjak@gmail.com
Riwayat Pendidikan	SMA/SMK : SMK Negeri 1 Batam
	SMP : SMP Negeri 21 Batam

Lampiran

Dokumentasi Pengambilan Data di PLTS Pulau Akar



Grounding Petir Minggu 1



Grounding Petir Minggu 11



Grounding Peralatan Minggu 6



Grounding Peralatan Minggu 12



Arus Bocor



Tegangan Sentuh

Dokumentasi Pengambilan Data di PLTS Tanjung Uma



Grounding Petir



Grounding Petir



Grounding Peralatan



Grounding Peralatan