

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di era kemajuan teknologi yang semakin pesat meningkatkan pentingnya sistem perlindungan yang handal untuk infrastruktur dan peralatan elektronik, terutama di daerah rawan petir. Petir merupakan fenomena alam yang menghasilkan arus listrik besar. Sambaran petir dapat merusak struktur yang terbuat dari bahan seperti kayu, baja, dan bahan lainnya. Sambaran petir dapat menghantarkan arus listrik tinggi, yang dapat memanaskan material dan menyebabkan kebakaran, ledakan, atau kerusakan berbahaya pada. Selain itu, sambaran petir juga dapat menyebabkan gangguan pada jaringan listrik dan jaringan distribusi. Hal ini dapat memengaruhi stabilitas seluruh sistem kelistrikan. Oleh karena itu, sistem proteksi petir dan pembumian yang efektif sangat penting di banyak area. Indonesia, sebagai negara tropis yang terletak di wilayah khatulistiwa, menghadapi fenomena petir dengan frekuensi tinggi sepanjang tahun. Fenomena ini, yang dipicu oleh proses konveksi intensif akibat cuaca tropis, sering kali menimbulkan dampak serius, seperti kerusakan pada infrastruktur, gangguan operasional perangkat elektronik, dan ancaman terhadap keselamatan manusia [1].

Sistem pentanahan memiliki peran penting dalam infrastruktur kelistrikan, berfungsi sebagai perlindungan terhadap perangkat dari arus berlebih dan sambaran petir, serta menjaga keselamatan manusia. Pentanahan yang optimal mampu mengurangi risiko gangguan listrik, terutama pada tanah dengan lapisan berbeda. Tanah yang terdiri dari berbagai jenis memiliki karakteristik listrik beragam, yang pada akhirnya mempengaruhi efektivitas sistem pentanahan. Oleh karena itu, pendekatan yang tepat dalam menganalisis dan merancang sistem pentanahan pada tanah berlapis menjadi faktor utama dalam meningkatkan keselamatan dan efisiensi sistem kelistrikan. Salah satu faktor utama dalam menentukan efektivitas sistem pentanahan adalah resistansi pentanahan (*grounding resistance*) [2]. Resistansi ini menunjukkan seberapa baik elektroda pentanahan dapat mengalirkan arus ke tanah. Semakin rendah nilai resistansi, semakin baik kinerja sistem pentanahan dalam melepas arus gangguan. Berdasarkan standar Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011, nilai resistansi pentanahan yang ideal tidak boleh lebih dari 5Ω . Namun, di banyak lokasi, nilai resistansi tanah sering kali lebih tinggi dari batas yang disarankan. Penyebab utama dari tingginya resistansi tanah adalah karakteristik tanah yang kurang mendukung, seperti tingginya kandungan pasir dan kerikil yang memiliki daya hantar listrik yang rendah.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi resistansi tanah dalam sistem pentanahan. Faktor utama adalah jenis tanah, kelembapan, kepadatan tanah, serta kandungan mineral dan elektrolit di dalamnya. Jenis tanah sangat berpengaruh karena setiap jenis tanah memiliki kemampuan menghantarkan listrik yang berbeda. Tanah liat cenderung memiliki konduktivitas tinggi karena mampu mempertahankan kelembapan dalam waktu lama, sementara tanah berpasir dan berkerikil memiliki daya hantar listrik yang lebih rendah. Hal ini terjadi karena pasir dan kerikil memiliki struktur partikel yang besar serta daya serap air yang rendah. Selain itu, kadar air dalam tanah juga berperan penting. Semakin tinggi kelembapan tanah, semakin rendah resistansinya, karena air berfungsi sebagai penghantar listrik yang baik. Sebaliknya, tanah yang kering memiliki resistansi lebih tinggi, sehingga kurang efektif dalam melepas arus gangguan. Faktor lain yang juga berpengaruh adalah kepadatan tanah. Tanah yang padat memiliki kontak antar partikel yang lebih rapat sehingga lebih mudah menghantarkan listrik. Sebaliknya, tanah yang longgar memiliki banyak ruang udara di antara partikelnya yang menyebabkan resistansi lebih tinggi. Selain itu, kandungan mineral dan elektrolit dalam tanah juga berperan penting dalam menentukan resistansi. Tanah yang mengandung mineral konduktif atau garam memiliki resistansi yang lebih rendah karena ion-ion dalam tanah membantu meningkatkan daya hantar listrik.

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis terhadap sistem pentanahan dengan model stratified grounding menggunakan *Finite Element Method*, stratified grounding adalah teknik pentanahan yang mempertimbangkan berbagai lapisan tanah untuk meningkatkan efektivitas pelepasan arus gangguan. Penelitian ini dilakukan pada daerah perkebunan dataran tinggi yang memiliki variasi karakteristik tanah. Pengujian dilakukan dengan cara membuat lubang pentanahan sedalam $\pm 1,5$ meter yang diisi dengan kombinasi tiga jenis lapisan tanah, yaitu pasir, kerikil, dan tanah liat. Tujuan dari variasi ini adalah untuk mencari kombinasi lapisan tanah yang menghasilkan resistansi pentanahan paling rendah. Untuk memperoleh hasil yang akurat, pengujian dilakukan sebanyak 3ⁿ kali percobaan, dengan n sebagai jumlah variabel eksperimen. Setiap lubang diisi dengan lapisan tanah dalam urutan yang berbeda, kemudian elektroda pentanahan (ground rod) dimasukkan ke dalamnya. Setelah itu, resistansi pentanahan diukur menggunakan alat *earth tester* untuk mengetahui efektivitas kombinasi lapisan tanah dalam menurunkan resistansi sistem grounding dengan mempertimbangkan banyak parameter yakni mulai dari dimensi dari setiap lapisan tanah (panjang, lebar, dan tebal lapisan) kemudian resistivitas, tipe atau jenis tanah yang pada akhirnya disimulasikan menggunakan Metode FEM (*Finite Element Method*).

Penggunaan *Finite Element Method* (FEM) sebagai teknik simulasi untuk kinerja sistem grounding dengan pendekatan stratifikasi tanah dan memodelkan interaksi antara elektroda dan tanah menggunakan metode FEM dengan lebih detail dibandingkan metode pengukuran konvensional. Dalam FEM, sistem pentanahan dimodelkan menjadi elemen-elemen kecil yang saling berhubungan, sehingga memungkinkan prediksi yang lebih akurat mengenai bagaimana elektroda pentanahan berinteraksi dengan berbagai jenis tanah. Keunggulan utama metode FEM adalah kemampuannya dalam mengevaluasi berbagai kondisi tanpa perlu melakukan pengujian fisik yang memakan banyak waktu dan biaya. Dengan metode ini, dapat diketahui bagaimana variasi lapisan tanah mempengaruhi distribusi arus gangguan serta efektivitas sistem pentanahan dalam menyalurkan arus ke tanah.

Mengutip pada penelitian sebelumnya telah membahas metode optimasi sistem pentanahan untuk mengurangi resistansi tanah. Salah satu metode yang telah dikembangkan adalah dengan menambahkan material aditif bentonit dan tanpa bentonit untuk meningkatkan konduktivitas tanah. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa kelembapan tanah sangat berpengaruh terhadap resistansi pentanahan. Hasil studi sebelumnya mengungkapkan bahwa tanah yang lebih lembap cenderung memiliki nilai resistansi lebih rendah dibandingkan dengan tanah kering. Di sisi lain, ada penelitian yang menggunakan pendekatan simulasi berbasis metode numerik seperti FEM untuk memahami hubungan antara elektroda pentanahan dan berbagai jenis tanah. Namun, terdapat sedikit penelitian yang secara khusus membahas pengaruh kombinasi pasir, kerikil, dan tanah liat dalam sistem stratified grounding terhadap resistansi pentanahan. Hingga saat ini, belum banyak studi yang menganalisis bagaimana variasi lapisan tanah dalam sistem grounding dapat membantu menurunkan resistansi dengan pendekatan simulasi FEM. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan melakukan analisis dan identifikasi kombinasi lapisan tanah yang paling efektif dalam menurunkan resistansi pentanahan[3].

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan rekomendasi yang lebih tepat dalam perancangan dan pelaksanaan sistem pentanahan yang efektif dan efisien, meningkatkan kesehatan dan keamanan instalasi listrik di masa depan. Dengan penggunaan studi empiris dan hasil simulasi yang akurat, sistem pendukung serta strategi mitigasi yang adaptif perlu dipertimbangkan untuk menghadapi potensi ancaman dari sambaran petir dan gangguan lainnya. Efektivitas penanganan situasi ini tidak hanya berkontribusi terhadap keselamatan, tetapi juga terhadap keandalan jaringan listrik secara keseluruhan di Indonesia[4]. Keseluruhan upaya dalam penelitian ini menekankan ketegangan antara teori dan praktik dalam desain sistem pentanahan. Dengan pendekatan komprehensif yang menggabungkan

simulasi, percobaan empiris, dan eksplorasi berkelanjutan terhadap peningkatan teknik yang ada, diharapkan penelitian ini dapat memberi kontribusi yang berkelanjutan dalam optimasi sistem pentanahan di bidang teknik elektro. Efektivitas penggunaan kombinasi material yang tepat dalam pembuatan sistem pentanahan juga akan berfungsi sebagai dasar untuk kebijakan keselamatan dalam instalasi listrik di masa depan[5].

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana cara kerja stratified grounding pada ketebalan lapisan tanah memengaruhi kinerja sistem pentanahan saat terjadi sambaran petir?
2. Seberapa besar pengaruh karakteristik fisik tanah, seperti kelembapan, kepadatan, dan tekstur, terhadap efektivitas sistem pentanahan?
3. Sejauh mana metode pemodelan numerik FEM dapat digunakan untuk menganalisis respons sistem pentanahan pada tanah berlapis?
4. Apakah terdapat perbedaan kinerja sistem pentanahan antara tanah alami dan tanah yang telah mengalami modifikasi?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1 Tujuan Penelitian

- a. menganalisis kinerja sistem grounding dengan pendekatan stratifikasi tanah dan memodelkan interaksi antara elektroda dan tanah menggunakan metode FEM.
- b. Mengevaluasi kinerja stratified grounding yang diterapkan untuk memastikan bahwa sistem tersebut dapat memberikan perlindungan yang optimal terhadap arus gangguan ke tanah.
- c. Memahami bagaimana distribusi arus pada berbagai lapisan tanah yang berbeda dapat mempengaruhi resistansi sistem grounding dan keefektifannya dalam mendistribusikan arus gangguan secara optimal.
- d. Membandingkan performa sistem pentanahan antara tanah alami dan tanah yang telah dimodifikasi, untuk mengidentifikasi perbedaan efektivitas dalam menanggapi arus gangguan.

1.3.2 Manfaat Penelitian

- a. Memberikan pemahaman yang lebih baik tentang faktor yang mempengaruhi kinerja sistem grounding, sehingga dapat merancang sistem yang lebih baik..
- b. Menghasilkan rekomendasi pemodelan grounding untuk meningkatkan keandalan dan keamanan sistem kelistrikan di berbagai instalasi, termasuk di pusat-pusat kegiatan penting.

1.4 Batasan Masalah

- a. Penelitian ini akan berfokus pada analisis pemodelan sistem grounding dengan variasi tanah sebanyak tiga jenis material yaitu pasir, kerikil, dan tanah liat yang dibasahi dengan analisis kelembapan dalam kondisi alami tanpa intervensi buatan seperti penambahan bahan aditif.
- b. Pengujian dilakukan melalui eksperimen lapangan dengan metode stratified grounding dan pengukuran menggunakan *earth tester*, sedangkan simulasi numerik menggunakan Finite Element Method (FEM) hanya mempertimbangkan model sederhana.

1.5 Metodologi Penelitian

1.5.1 Metode Studi Pustaka dan Literatur

Pada tahap ini, dilakukan pencarian dan kajian literatur terkait dengan sistem grounding, khususnya metode stratified grounding dan penerapannya dalam analisis sistem kelistrikan. Literatur yang digunakan mencakup buku, jurnal ilmiah, artikel penelitian, serta standar internasional yang relevan, seperti IEEE dan PUIL. Selain itu, penelitian terdahulu yang membahas penggunaan Finite Element Method (FEM) dalam analisis distribusi arus dan tegangan pada sistem grounding juga dikaji untuk memperkuat dasar teori penelitian ini.

1.5.2 Pengumpulan Data dan Analisis Data

Data yang dikumpulkan meliputi informasi terkait karakteristik tanah di lokasi penelitian, seperti jenis tanah (pasir, kerikil, tanah liat), tingkat kelembapan, dan resistivitas tanah. Selain itu, dilakukan pengukuran resistansi pentanahan menggunakan *earth tester* pada berbagai kombinasi lapisan tanah. Data ini digunakan sebagai parameter utama dalam pemodelan numerik menggunakan Finite Element Method (FEM) untuk menganalisis efektivitas sistem stratified grounding. Setelah data diperoleh, dilakukan analisis awal untuk memastikan kelengkapan serta kesesuaiannya dengan tujuan penelitian.

1.5.3 Interpretasi Hasil

Hasil analisis yang diperoleh dari pengukuran lapangan dan simulasi menggunakan FEM akan dibandingkan untuk mengevaluasi efektivitas metode stratified grounding dalam menurunkan resistansi pentanahan. Evaluasi dilakukan dengan melihat distribusi tegangan, arus gangguan, serta perbandingan hasil pengukuran dengan standar yang berlaku. Interpretasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola pengaruh

lapisan tanah terhadap kinerja sistem grounding serta keakuratan metode simulasi dalam memprediksi kondisi nyata di lapangan.

1.5.4 Metode Diskusi

Diskusi dilakukan untuk membahas hasil analisis dan simulasi yang telah diperoleh. Proses ini melibatkan diskusi dengan dosen pembimbing, rekan mahasiswa, serta pihak yang memiliki keahlian dalam sistem grounding dan pemodelan numerik menggunakan FEM. Diskusi ini bertujuan untuk memperoleh masukan guna meningkatkan akurasi penelitian serta memahami lebih dalam faktor-faktor yang mempengaruhi performa sistem stratified grounding.

1.5.5 Penyusunan Laporan

Setelah seluruh tahapan penelitian selesai, dilakukan penyusunan laporan yang mencakup metodologi, hasil pengukuran, simulasi, analisis, serta kesimpulan dari penelitian ini. Laporan ini disusun berdasarkan data yang telah diperoleh dan mengikuti format yang ditetapkan oleh Universitas Trunojoyo Madura. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan sistem grounding yang lebih efektif, khususnya pada kondisi tanah berlapis.

1.6 Sistematikan Penulisan

1.6.1 Bab 1: Pendahuluan

Bab ini menjelaskan latar belakang penelitian yang mengidentifikasi pentingnya sistem stratified grounding dalam meningkatkan efektivitas sistem pentanahan, terutama dalam menghadapi kondisi tanah berlapis. Selain itu, bab ini mencakup perumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, serta batasan masalah yang akan diteliti. Metodologi penelitian yang digunakan dalam analisis Finite Element Method (FEM) juga diuraikan, serta sistematika penulisan skripsi yang memberikan gambaran umum mengenai struktur penelitian ini.

1.6.2 Bab 2: Teori Penunjang

Bab ini membahas teori-teori dasar yang mendukung penelitian, termasuk konsep stratified grounding, prinsip kerja sistem grounding, serta faktor-faktor yang mempengaruhi resistansi tanah. Selain itu, dijelaskan juga teori mengenai metode pemodelan numerik Finite Element Method (FEM) yang digunakan dalam simulasi sistem grounding. Kajian literatur dari penelitian terdahulu yang relevan juga disajikan sebagai landasan untuk membandingkan hasil penelitian ini dengan studi sebelumnya.

1.6.3 Bab 3: Metode Penelitian

Bab ini menguraikan tahapan penelitian yang dilakukan dalam menganalisis sistem stratified grounding. Metode penelitian mencakup tahapan persiapan, pengumpulan data terkait karakteristik tanah dan resistivitasnya, eksperimen pengukuran resistansi pentanahan di lapangan, serta pemodelan numerik menggunakan FEM. Selain itu, dijelaskan juga bagaimana data diolah dan dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas sistem grounding berdasarkan variasi lapisan tanah yang digunakan.

1.6.4 Bab 4: Hasil Penelitian dan Analisa

Bab ini menyajikan hasil eksperimen dan simulasi yang diperoleh dari pengujian sistem stratified grounding. Hasil pengukuran resistansi pentanahan di lapangan dibandingkan dengan hasil pemodelan FEM untuk melihat keakuratan metode simulasi. Analisis dilakukan terhadap pengaruh variasi lapisan tanah terhadap efektivitas grounding, serta bagaimana metode FEM dapat membantu memprediksi kinerja sistem grounding di berbagai kondisi tanah.

1.6.5 Bab 5: Penutup

Bab ini menyimpulkan hasil penelitian berdasarkan temuan dari eksperimen dan simulasi, serta memberikan rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut dalam optimasi sistem *stratified grounding*. Selain itu, diberikan saran terkait penerapan metode ini dalam berbagai kondisi tanah guna meningkatkan keamanan dan keandalan sistem pentanahan di berbagai lingkungan.