

Analisis Stratified Grounding Menggunakan Finite Element Method (FEM)

¹Riza Alfita, ²Fety Nur Fadila, ³Deni Tri Laksono

^{1,2,3}Teknik Elektro, Universitas Trunojoyo Madura, Bangkalan

¹riza.alfita@trunojoyo.ac.id, ²fetifadilah761@gmail.com, ³deni.laksono@trunojoyo.ac.id

Abstract - This study aims to analyze the effectiveness of a stratified grounding system using the Finite Element Method/FEM approach as a solution to reduce grounding resistance. The grounding system was tested using three soil composition models: Model A (sand-gravel-clay), Model B (clay-sand-gravel), and Model C (gravel-clay-sand). Each model was experimentally tested using a three-point earth tester and simulated using the MATLAB PDE Toolbox with an elliptic PDE approach. To simulate rainy and dry season conditions, tests were conducted on two types of moisture: regular water and saltwater, with volumes varying from 0 to 19 liters. The results showed that soil resistance decreases with increasing moisture, and Model B performed best with the lowest resistance. The addition of saltwater had a more significant effect on reducing resistance compared to regular water. FEM simulations showed a more uniform current distribution in the model with a clay layer below. Validation between simulations and field data yielded relatively close values, with differences of less than 10% in most scenarios. This study demonstrates that the soil stratification approach can enhance the effectiveness of grounding systems, and FEM simulations can serve as a reference for designing efficient and standard-compliant grounding systems.

Keywords —Analysis; Stratified Grounding, Electrode, Three-Point Method, FEM

Abstrak—Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas sistem pentanahan berlapis (stratified grounding) dengan pendekatan Finite Element Method/FEM sebagai solusi untuk menurunkan resistansi pentanahan. Sistem grounding diuji dengan tiga model kombinasi susunan tanah: Model A (pasir-kerikil-tanah liat), Model B (tanah liat-pasir-kerikil), dan Model C (kerikil-tanah liat-pasir). Setiap model diuji secara eksperimental menggunakan earth tester metode tiga titik, serta disimulasikan menggunakan MATLAB PDE Toolbox dengan pendekatan elliptic PDE. Untuk mensimulasikan kondisi musim hujan dan kemarau, dilakukan pengujian pada dua jenis kelembapan: air biasa dan air garam, dengan volume bervariasi dari 0 hingga 19 liter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa resistansi tanah menurun seiring meningkatnya kelembapan, dan model B memberikan performa terbaik dengan resistansi paling rendah. Penambahan air garam lebih signifikan dalam menurunkan resistansi dibandingkan air biasa. Simulasi FEM menunjukkan distribusi arus yang lebih merata pada model dengan lapisan tanah liat di bawah. Validasi antara simulasi dan data lapangan menghasilkan nilai yang relatif dekat, dengan selisih kurang dari 10% pada sebagian besar skenario. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan stratifikasi tanah dapat meningkatkan efektivitas sistem pentanahan, dan simulasi FEM dapat dijadikan acuan dalam perancangan sistem grounding yang efisien dan sesuai standar.

Kata Kunci—Analisis, Stratified Grounding; Elektroda; Metode Tiga Titik.; FEM

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang pesat menuntut adanya sistem perlindungan yang andal terhadap infrastruktur dan perangkat elektronik, terutama di wilayah yang rawan terhadap sambaran petir. Sambaran petir yang menghasilkan arus listrik besar berpotensi merusak berbagai material konstruksi, memicu kebakaran, ledakan, hingga mengganggu jaringan listrik dan distribusinya. Kondisi ini tidak hanya mengancam keberlangsungan operasional peralatan, tetapi juga membahayakan keselamatan manusia. Sebagai negara tropis di wilayah khatulistiwa, Indonesia mengalami frekuensi sambaran petir yang tinggi sepanjang tahun akibat aktivitas konveksi yang intens, sehingga perlindungan terhadap dampak petir menjadi kebutuhan mendesak [1]. Salah satu elemen utama dalam sistem proteksi petir adalah sistem pentanahan (grounding). Sistem ini berfungsi untuk menyalurkan arus gangguan atau sambaran petir ke tanah secara aman, menjaga keselamatan manusia, serta melindungi perangkat dari kerusakan. Efektivitas sistem pentanahan sangat dipengaruhi oleh resistansi tanah, yang bergantung pada jenis tanah, kelembapan, kepadatan, dan kandungan mineralnya [2]. Tanah liat umumnya memiliki daya hantar listrik tinggi karena mampu mempertahankan kelembapan, sedangkan tanah berpasir atau berkerikil cenderung memiliki konduktivitas rendah. Berdasarkan

Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011, nilai resistansi pentanahan ideal adalah $\leq 5 \Omega$, namun kondisi lapangan sering menunjukkan nilai yang lebih tinggi akibat karakteristik tanah yang kurang mendukung.

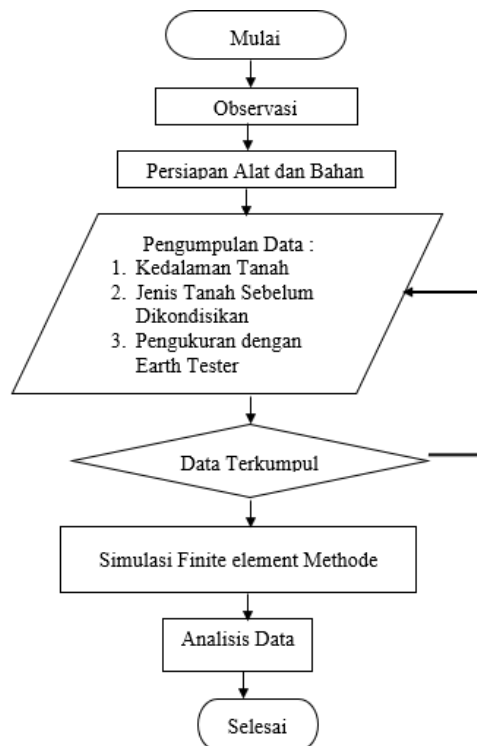
Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengkaji sistem pentanahan berlapis (stratified grounding) dengan memanfaatkan kombinasi tiga jenis tanah yaitu pasir, kerikil, dan tanah liat untuk menurunkan resistansi [3]. Pengujian dilakukan di daerah perkebunan dataran tinggi dengan metode eksperimen langsung dan simulasi numerik menggunakan Finite Element Method (FEM). Pendekatan FEM memungkinkan pemodelan interaksi antara elektroda dan lapisan tanah secara detail, sekaligus menghemat waktu dan biaya dibandingkan metode uji konvensional [3]. Penelitian sebelumnya telah membahas berbagai upaya optimasi sistem pentanahan, termasuk penggunaan material aditif dan variasi kelembapan tanah [3]. Namun, kajian spesifik mengenai pengaruh kombinasi pasir, kerikil, dan tanah liat terhadap resistansi pentanahan melalui pendekatan stratifikasi dan simulasi FEM masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan mengidentifikasi kombinasi lapisan tanah yang paling efektif dalam menurunkan resistansi pentanahan, sekaligus memberikan rekomendasi praktis bagi perancangan sistem grounding yang lebih efisien dan andal [4][5].

II. METODE PENELITIAN

A. Metode

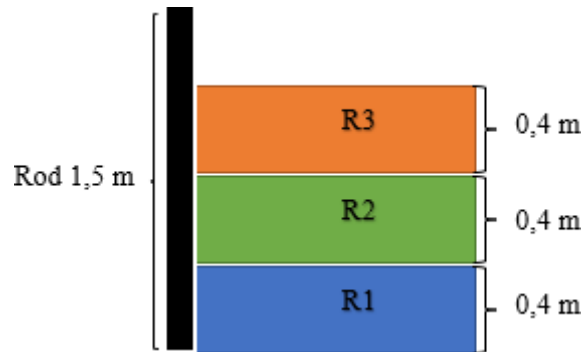
Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dan simulasi numerik. Percobaan dilakukan di Madura dengan menanam elektroda batang vertikal ke dalam tanah setinggi 1,5 meter. Tiga kombinasi susunan tanah diuji: Model A (Pasir-Kerikil-Tanah Liat), Model B (Tanah Liat-Pasir-Kerikil), dan Model C (Kerikil-Tanah Liat-Pasir). Resistansi diukur menggunakan *earth tester analog* metode 3 titik dalam dua kondisi kelembapan: air biasa dan air garam, dengan total 117 pengujian. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB PDE Toolbox (versi 2017b) dengan pendekatan PDE elliptic, untuk menghitung distribusi tegangan dan arus pada tanah berlapis..

B. Gambar dan Tabel



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian ini digambarkan melalui diagram alir pada Gambar 1. Kegiatan penelitian dimulai dengan observasi untuk mengidentifikasi permasalahan serta memahami kondisi nyata di lapangan. Setelah itu, dilakukan persiapan alat dan bahan yang diperlukan untuk proses pengumpulan data dan pelaksanaan simulasi. Pengumpulan data mencakup beberapa parameter utama, seperti jarak antar elektroda, kedalaman penanaman, serta karakteristik tanah sebelum dilakukan pengondisian. Setelah data diperoleh secara lengkap, dilanjutkan dengan perhitungan nilai resistansi tanah pada sistem *stratified grounding*, yakni sistem pentanahan dengan struktur tanah berlapis. Selain perhitungan secara manual, dilanjutkan dengan simulasi menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) melalui software MATLAB PDE Toolbox. Selanjutnya, hasil perhitungan dan simulasi dianalisis guna mengevaluasi apakah sistem pentanahan telah sesuai dengan standar teknis yang berlaku. Analisis ini menjadi dasar dalam menyusun kesimpulan serta memberikan rekomendasi terkait kinerja sistem *grounding* yang diusulkan.

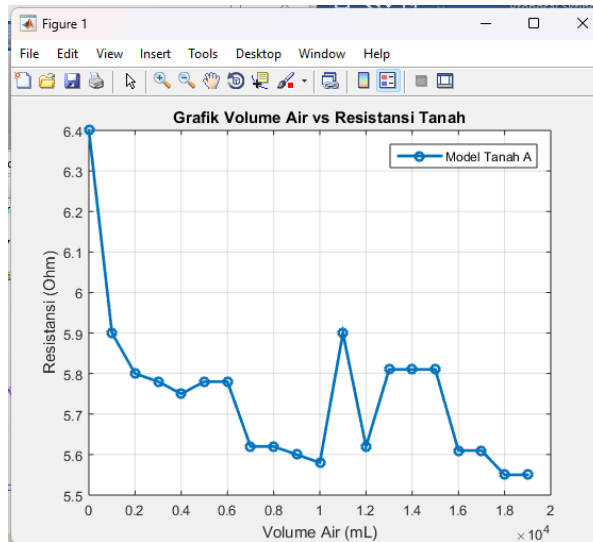


Gambar 2. Desain Sistem Pentanahan

Perancangan model sistem pentanahan dilakukan berdasarkan data hasil observasi lapangan yang telah dikumpulkan sebelumnya (Gambar 2). Tahap ini mencakup pembangunan model tanah berlapis serta konfigurasi elektroda pentanahan yang kemudian dimodelkan menggunakan perangkat lunak MATLAB PDE Toolbox. Dalam desain sistem ini, tanah dibagi menjadi tiga lapisan utama sesuai dengan kondisi aktual di lapangan, yaitu: lapisan pertama berupa kerikil, lapisan kedua terdiri dari tanah pasir, dan lapisan paling bawah menggunakan tanah liat. Masing-masing jenis tanah memiliki karakteristik fisik dan listrik yang berbeda, seperti resistivitas, kelembapan, dan kepadatan, yang berpengaruh terhadap performa sistem *grounding*. Untuk setiap skenario percobaan, dilakukan penambahan air garam ke dalam tanah, guna mensimulasikan kondisi lingkungan yang berbeda (seperti musim hujan dengan kandungan mineral tinggi). Penambahan air ini bertujuan untuk mengamati perubahan nilai resistansi pada sistem pentanahan akibat peningkatan konduktivitas tanah.

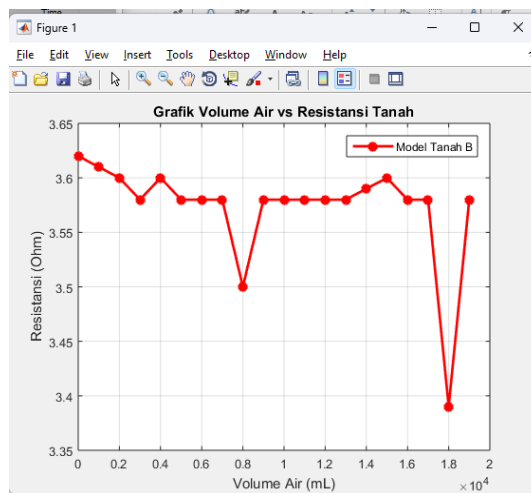
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini pengukuran diasumsikan mewakili kondisi musim hujan dan musim kemarau. Hasil dari pengukurannya berdasarkan variasi kondisi kelembapan dan kandungan larutan garam. Pengujian dilakukan dengan menggunakan air biasa dan air garam. Penambahan air diasumsikan kondisi pada saat musim hujan, di mana tanah menjadi lebih lembap dan konduktif. Sementara itu, kondisi tanah kering tanpa penambahan air diasumsikan mewakili musim kemarau, yang biasanya menyebabkan peningkatan resistansi tanah akibat menurunnya kadar air. Pada pengujian air garam, selain diasumsikan sebagai kondisi saat musim hujan, pengujian juga menggambarkan kondisi tanah yang terpengaruh oleh lingkungan yang memiliki kandungan ion tinggi, seperti pada daerah pesisir pantai, tanah dengan paparan limbah, atau area yang sering diberi pupuk kimia. Hasil dari pengujian ini memberikan gambaran seberapa besar perubahan resistansi akibat pengaruh alam dan lingkungan pada sistem pentanahan.



Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian Model A

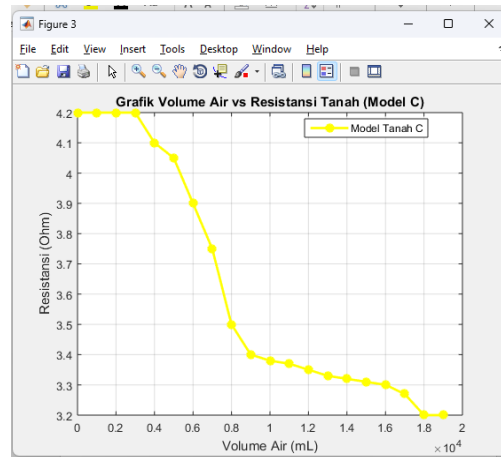
Gambar 3 menunjukkan hasil pengukuran bahwasannya pada model A yang direpresentasikan dengan garis biru memiliki nilai resistansi paling tinggi diawal yakni sebesar 6.4Ω dengan volume air rendah ditunjukkan dengan volume air sebanyak 0 liter. Percobaan selanjutnya dilakukan bertahap sampai 19 liter menunjukkan semakin bertambah volume air yang digunakan maka nilai resistansi cenderung menurun dan stabil pada nilai $5,5 \Omega$ sampai dengan $5,6 \Omega$. Perubahan terjadi setelah penambahan volume air sebanyak 1 liter akan tetapi masih stabil dibawah 6Ω . Hal ini menunjukkan bahwa susunan tanah pada Model A cenderung memiliki daya hantar listrik yang rendah saat kering, dan baru menunjukkan penurunan resistansi yang signifikan setelah tanah menjadi lebih lembap. Hal ini dapat dikuatkan dengan kondisi lapisan tanahnya yakni tanah liat yang bersifat sangat konduktif berada di lapisan paling atas, sehingga tidak berkontribusi langsung pada arus yang disalurkan ke bawah. Sementara lapisan paling bawah adalah pasir yang cenderung kering dan tidak mampu menyimpan kelembapan dengan baik. Kombinasi ini menyebabkan jalur arus ke dalam tanah menjadi kurang efisien. Meskipun begitu perubahan yang terjadi sangat kecil tetapi penurunan tersebut menunjukkan bahwa model A sangat dipengaruhi oleh kelembapan tanah yakni semakin banyak volume air yang ditambahkan maka semakin rendah pula nilai resistansi tanah yang diperoleh.



Gambar 4. Grafik Hasil Pengujian Model B

Gambar 4 menunjukkan hasil pengukuran paling rendah pada model B sebesar $3,5 \Omega$ pada percobaan ke-9 dengan volume air sebanyak 8 liter maka dapat dilihat bahwasannya semakin kecil nilai resistansinya maka semakin baik dan

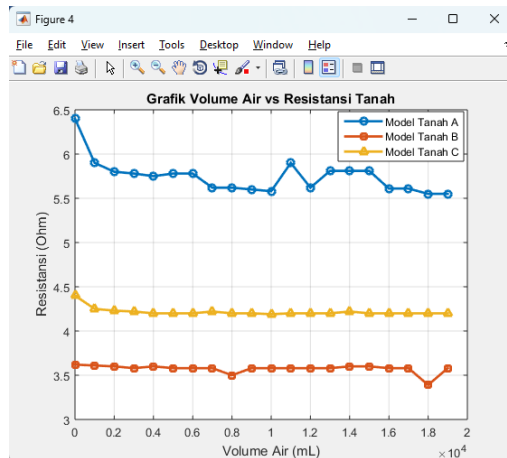
mudah pula aliran arus listriknya. Pada percobaan di model B juga hasil yang diperoleh cenderung paling stabil dan konsisten. Resistansi mulai dari tahap pertama sudah menunjukkan nilai kisaran $3,5 \Omega$ dan tidak menunjukkan perubahan meskipun volume air yang terus bertambah setiap tahapan pengujiannya. Nilai yang stabil menunjukkan bahwa model B cukup optimal dalam mempertahankan nilai resistansinya dalam arti dapat menghantarkan arus listrik baik dalam keadaan kurang lembab. Hal tersebut dapat disimpulkan karena model B memiliki struktur pori atau lapisan tanah yang mendukung sistem pentanahan. Penempatan tanah liat dilapisan paling bawah memiliki daya simpan kelembapan yang tinggi karena berada langsung bersentuhan dengan elektroda di lapisan bawah, kemudian penempatan pasir di lapisan tengah yang membatu memudahkan proses pemerataan pada kelembapan penyerapan air, kemudian di posisi paling atas terdapat kerikil yang mempercepat aliran.



Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian Model C

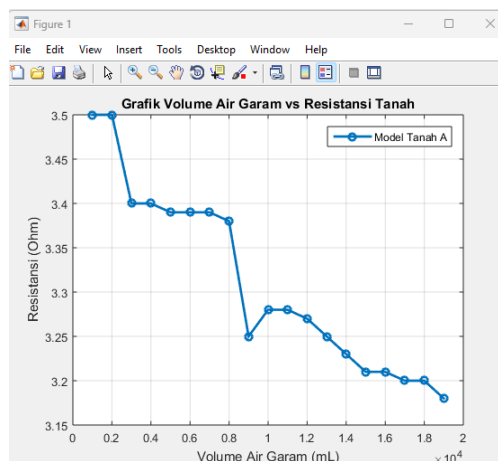
Sementara itu, model tanah C (gambar 5) diatas menunjukkan nilai resistansi yang berada di tengah model A dan model B. Susunan lapisannya terdiri atas kerikil di bawah, tanah liat di tengah, dan pasir di atas. Tanah liat sebagai media konduktif berada di tengah, namun terhalang oleh kerikil di bawah yang memiliki daya hantar rendah dan tidak menyimpan kelembapan dengan baik. Hal ini menyebabkan sebagian besar arus yang turun dari elektroda harus melewati lapisan kerikil terlebih dahulu, sehingga efektivitas grounding-nya berkurang. Sementara pasir di atas lebih banyak berperan dalam menyerap air, namun tidak berdampak besar pada distribusi arus ke bawah. Pada volume air yang rendah, nilai resistansi sekitar 4,4 Ohm, lalu sedikit turun dan stabil pada rentang 4,3 Ohm. Kenaikan resistansi cenderung kecil bahkan tetap, secara keseluruhan perubahan yang terjadi tidak terlalu besar. Model C dapat dikatakan memiliki kemampuan yang cukup baik dalam menjaga resistansi tanah tetap rendah, meskipun kurang efektif dibandingkan model B.

Pada percobaan diatas penambahan air di masing-masing setiap model *stratified grounding* menghasilkan nilai yang digambarkan pada grafik dibawah ini.



Gambar 6. Nilai Resistansi Pentanahan dengan Air Biasa

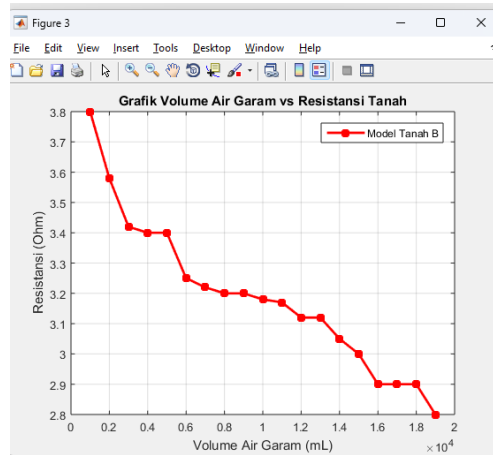
Gambar diatas menunjukkan hubungan antara volume air dalam mililiter dan resistansi tanah dalam besaran ohm untuk tiga jenis model tanah stratified yaitu Model A (Pasir – Kerikil - Tanah Liat), Model B (Tanah Liat - Pasir - Kerikil), dan Model C (Kerikil - Tanah Liat - Pasir). Sumbu X merupakan volume air dari 0 sampai dengan 19.000 mL atau 19 liter hal tersebut menunjukkan bahwa percobaan dilakukan dengan menambahkan air pada tanah stratified mulai dari kondisi kering sampai lembab atau sangat basah. Sedangkan sumbu Y merupakan parameter besar nilai resistansi hasil pengujian yang telah dilakukan di lapangan pada masing-masing kondisi kelembapan. Dari ketiga model tanah dapat dilihat perbandingan pada gambar 6. Pengujian yang telah dilakukan pengukuran dapat disimpulkan bahwa penambahan volume air dapat menurunkan nilai resistansi tanah, namun hal tersebut juga dipengaruhi oleh urutan dan jenis tanah yang digunakan. Pada percobaan pengujian nilai resistansi dengan penambahan air biasa menghasilkan bahwa model tanah B paling optimal karena penempatan tanah liat di lapisan paling bawah, sehingga elektroda dapat langsung menghantarkan arus listrik kedalam tanah dengan resistansi paling rendah dan stabil. nilai tahanan tanah liat atau tanah ladang cenderung lebih kecil apabila dibandingkan dengan pasir basah atau kerikil basah. Hal tersebut menunjukkan bahwa tanah liat paling konduktif untuk ditempatkan dibagian bawah sehingga arus bisa masuk dengan mudah. Sementara model A paling tidak efektif karena posisi yang paling konduktif diletakkan dibagian paling atas sehingga menyisakan pasir dan kerikil kering dibawahnya. Model C memiliki kualitas pentanahan ditengah karena tanah liat tidak langsung terhubung ke elektroda dan terhalang kerikil yang memiliki konduktifitas kurang baik.



Gambar 7. Grafik Hasil Pengujian Air Garam Model A

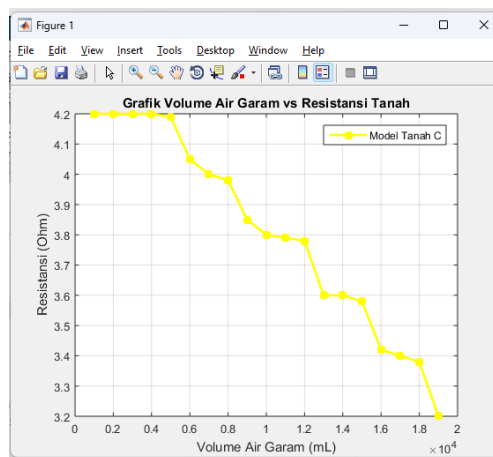
Gambar 7 menunjukkan bahwa pada model susunan tanah berupa pasir, kerikil, dan tanah liat juga memperlihatkan penurunan resistansi secara konsisten, fluktuasi yang terjadi pada model A terlihat meskipun tidak sebesar penurunan

yang terjadi pada Model B. Nilai resistansinya berkurang dari kisaran awal $3,5\Omega$ menjadi sekitar $3,1\Omega$ pada volume maksimum. Penurunan tersebut relatif stabil, namun pada percobaan ke-9 nilai resistansi yang sebelumnya turun justru mengalami sedikit kenaikan. Lonjakan ini kemungkinan disebabkan oleh faktor eksternal seperti pada percobaan sebelumnya di model B, seperti gangguan kontak antara elektroda dengan tanah, distribusi garam yang tidak merata, atau ketidakteraturan kelembapan lokal pada titik pengujian tersebut. hal tersebut menunjukkan bahwa meskipun susunan tanah ini cukup responsif terhadap peningkatan larutan garam, namun efektivitasnya masih di bawah Model B. Hal ini kemungkinan disebabkan posisi kerikil yang berada di lapisan atas, yang membuat distribusi penyebaran ion menjadi kurang merata di bagian bawah tanah.



Gambar 8. Grafik Hasil Pengujian Air Garam Model B

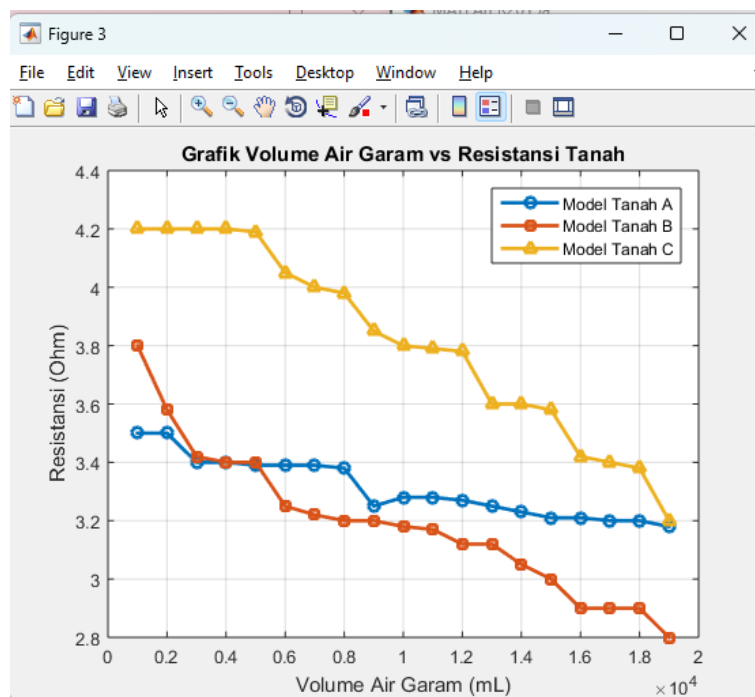
Dari ketiga konfigurasi model tanah yang diuji, model B yang terdiri dari lapisan kerikil, pasir, dan tanah menunjukkan performa hasil paling optimal. Hal ini dibuktikan pada gambar diatas dilihat dengan nilai resistansi yang paling rendah selama pengujian, bahkan pada volume maksimum (sekitar 19.000 mL), resistansi pada Model B turun drastis mendekati angka $2,8\Omega$. Penyusunan lapisan model tanah B yang terdiri dari kerikil di lapisan atas, pasir di tengah, dan tanah liat di lapisan paling bawah, hal tersebut menunjukkan performa paling baik dibandingkan dua model lainnya. Penurunan yang signifikan ini menunjukkan bahwa susunan lapisan tanah pada Model B mampu menyerap dan mendistribusikan larutan air garam secara efisien. Lapisan tanah liat di bagian bawah kemungkinan berperan penting mempertahankan kelembapan dan menyimpan ion-ion garam lebih lama, sementara kerikil dan pasir di bagian atas memfasilitasi aliran dan area peresapan larutan lebih cepat. Kombinasi ini menciptakan jalur konduktif yang ideal untuk penyebaran arus listrik, sehingga resistansi total sistem pentanahan dapat ditekan secara maksimal.



Gambar 9. Grafik Hasil Pengujian Air Garam Model C

Gambar diatas menunjukkan hasil pengujian air gram pada model C yang disusun dari lapisan pasir di atas, kemudian tanah liat dan kerikil. Nilai resistansi paling tinggi yaitu sekitar 4,2 Ohm. Penurunan resistansi pada pengujian model ini terlihat lebih lambat dibandingkan dua model lainnya. Namun setelah volume air garam melebihi 8000 mL, resistansinya mulai menurun lebih signifikan, hingga mencapai sekitar 3,2 Ohm pada volume maksimum. Kemungkinan besar, kinerja kerikil dasar seharusnya membantu konduksi arus akan tapi posisi lapisan tanah liat di lapisan tengah memperlambat air masuk pada lapisan paling dasar, meskipun pasir dilapisan cepat meresap namun tidak efektif . penataan lapisan tanah liat di tengan menyebabkan vaolume air yang dituangkan memerlukan waktu atau kadar kelembapan yang lebih tinggi agar dapat menyerap larutan secara optimal. Sifat tanah liat yang cenderung padat dan sulit dilalui arus membuatnya tidak seefisien kerikil atau pasir dalam mendukung penyebaran arus listrik.

Pada percobaan diatas penambahan air di masing-masing setiap model *stratified grounding* menghasilkan nilai yang digambarkan pada grafik dibawah ini. Pada penelitian ini pengukuran diasumsikan mewakili kondisi musim hujan dengan tingkat kelembapan menggunakan air garam. Sementara itu, kondisi musim kemarau direpresntasikan tanpa penambahan air. Hasil simulasi akan menghasilkan grafik pengaruh dari variasi air pada nilai resistansi. Berikut hasil uji coba pengukuran lapangan resistansi pentanahan dengan dua faktor kelembapan.



Gambar 10. Grafik Pengaruh Massa Garam terhadap Resistansi

Berdasarkan pengukuran yang telah dilakukan nilai dapat diketahui dengan kedalaman rod 150 cm, resistansi pentanahan memenuhi standar PUIL 2000 yaitu kurang dari 5 ohm dengan pemodelan *stratified* pada tanah yang berbeda menunjukkan bahwa nilai resistansi tanah berubah seiring bertambahnya volume air garam yang dimasukkan pada sistem *stratified grounding*. Gambar 10. menunjukkan volume air yang diukur dalam satuan mililiter (mL) yang digambarkan oleh sumbu X dan sumbu Y menunjukkan tampilan nilai resistansi pada pengujian air garam secara bertahap. Terdapat 3 garis berbeda yang menggambarkan masing-masing model tanah berbeda yaitu model A (garis biru), model B (garis merah), dan model tanah c dengan warna garis kuning. Secara detail gambar tersebut dipisahkan menjadi beberapa bagian tiap modelnya sebagai acuan yang lebih jelas untuk perbandingan setiap perubahan yang terjadi. Pada pengujian menggunakan larutan air garam, resistansi tanah pada ketiga model menunjukkan respons yang berbeda seiring bertambahnya volume larutan yang dituangkan ke dalam sistem pentanahan. Pengujian awal saat volume air garam masih rendah, yakni pada kisaran 1 hingga 2000 mL, ketiga model tanah Model A, B, dan C secara umum memiliki nilai resistansi yang relatif tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada awal pengujian, larutan garam

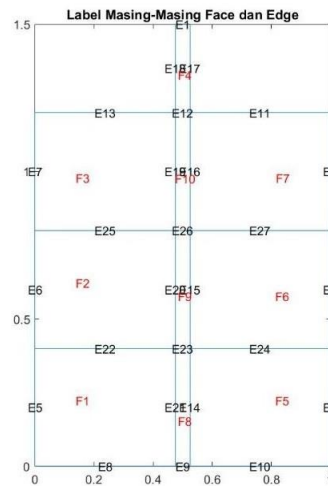
belum cukup tersebar atau meresap pada seluruh lapisan tanah sehingga belum memberikan pengaruh signifikan terhadap konduktivitas tanah.

4.1 Hasil Simulasi Numerik FEM

Hasil simulasi dari sistem pentanahan pada *stratified grounding* system dilakukan dengan tujuan untuk memahami bagaimana pengaruh susunan lapisan tanah terhadap penyebaran arus listrik secara lebih detail. Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan software MATLAB versi 2023b dengan menggunakan metode finite element method melalui matlab PDE toolbox dengan pendekatan tegangan steady-state DC. Berdasarkan hasil dari pengukuran di lapangan yaitu nilai resistansi total (R), konduktivitas tanah tidak dapat dihitung secara langsung untuk setiap lapisan pada sistem tanah berlapis atau stratified grounding karena tidak diketahuinya jalur arus spesifik dan nilai luas penampang tiap lapisan. Oleh karena itu, nilai konduktivitas dalam simulasi ditentukan berdasarkan nilai literatur, sementara nilai resistansi total (R) setiap model digunakan sebagai data pembanding terhadap hasil simulasi pada sistem pentanahan berlapis atau stratified grounding.

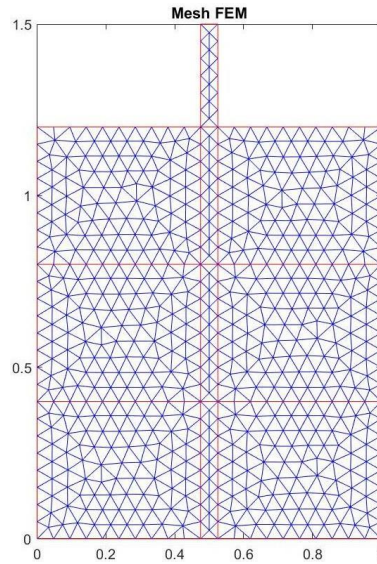
4.2 Geometri dan Kondisi Simulasi

Geometri sistem dimodelkan sebagai bidang 2D dengan dimensi lebar 1 meter dan tinggi 1,2 meter yang dibagi mejadi 3 lapisan dengan ukuran yang sama tiap modelnya, dibagian tengah dipasangkan elektroda pentanahan dengan sepanjang 1,5 meter. Setiap lapisan tanah diberikan nilai konduktivitas yang berbeda menyesuaikan jenis tanahnya.



Gambar 11. Skema Geometri *Label Face dan Edge*

Gambar 11 menunjukkan struktur untuk komponen geometri pada model sistem pentanahan yang digunakan. Setiap entri utama F merepresentasikan face atau permukaan sedangkan label E sama dengan *edge* yang artinya tepi. Setiap komponen memiliki sub-label yang menandakan edge penyusunnya. Struktur diatas menggambarkan pemodelan 3D guna memetakan hubungan tepi dan permukaan objek. Simulasi FEM yang digunakan untuk mengidentifikasi boundary condition atau mesh element dan hubungan antar komponennya sehingga menghasilkan hasil output setelahnya berupa mesh FEM dibawah ini.



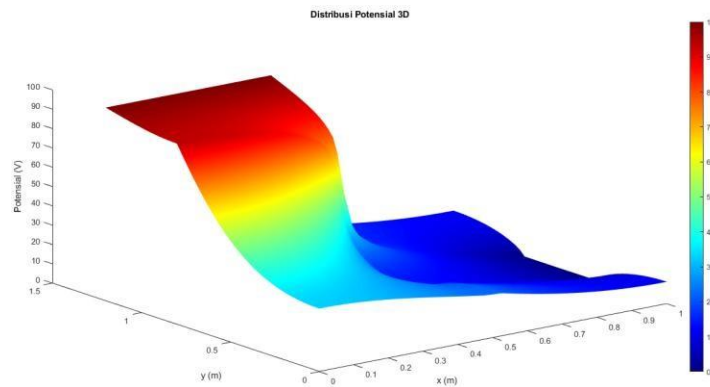
Gambar 12. Hasil Mesh FEM

Gambar diatas menunjukkan hasil simulasi teknik menggunakan metode FEM (simulasi komputer untuk analisis struktur). Angka-angka tersebut (0.5, 0.4, 0.6, 0.8, dan 1) mewakili tingkat tekanan atau kekuatan di berbagai titik pada model. Angka 1 berarti titik tersebut menerima tekanan paling besar, sedangkan angka yang lebih kecil seperti

0.5 berarti tekanannya lebih ringan. Ini membantu engineer melihat bagian mana dari suatu desain yang perlu diperkuat atau diubah. Seperti peta temperatur yang menunjukkan area panas dan dingin, angka-angka ini memberi tahu kita area mana yang mengalami tekanan lebih besar dalam sebuah desain teknik.

A. Visualisasi Hasil Simulasi Model A

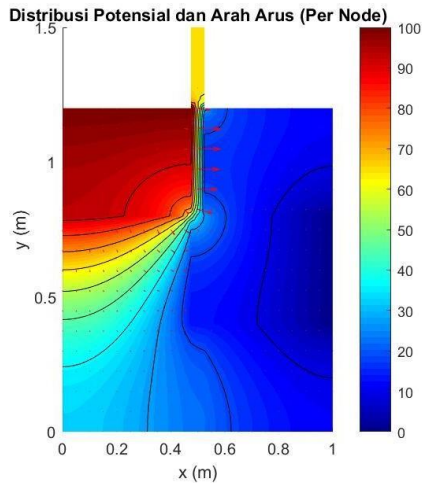
Gambar-gambar berikut menampilkan hasil simulasi untuk Model A (Pasir-Kerikil-Tanah Liat):



Gambar 13. Distribusi Potensial 3D Model A

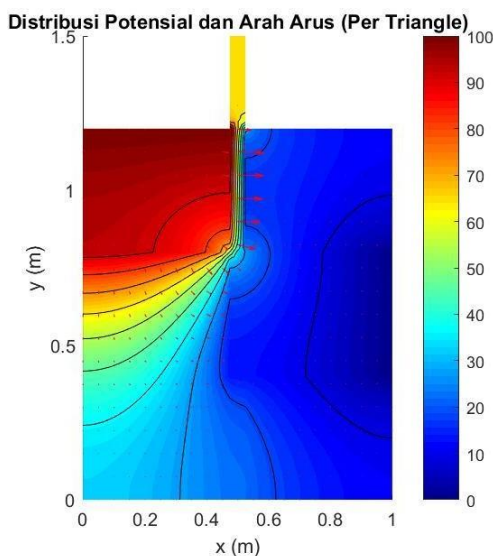
Gambar diatas menampilkan representasi tiga dimensi dari distribusi potensial listrik yang diperoleh melalui simulasi sistem pentanahan menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM). Ilustrasi ini menggambarkan penyebaran tegangan pada model tanah berlapis dengan susunan elektroda vertikal yang dipasang di pusat area simulasi. Sumbu X dan Y merepresentasikan bidang horizontal dan vertikal permukaan tanah, sementara sumbu Z menampilkan besarnya potensial listrik (dalam volt). Pada grafik, terlihat bahwa nilai potensial maksimum (yang ditunjukkan dengan warna merah) terkonsentrasi di sekitar elektroda tempat arus dialirkan ke dalam tanah. Gradasi warna dari merah ke biru

menunjukkan penurunan tegangan secara bertahap seiring dengan bertambahnya jarak dari elektroda, baik secara horizontal maupun vertikal. Pola ini menggambarkan penyebaran arus listrik dari sumber ke seluruh bagian tanah serta pembentukan medan listrik di sekitar sistem pentanahan. Penurunan permukaan yang curam di dekat elektroda mengindikasikan fokus aliran arus pada wilayah tersebut. Kontur permukaan yang tidak seragam juga menunjukkan perbedaan karakteristik lapisan tanah (akibat variasi resistivitas tiap lapisan) yang memengaruhi pola distribusi tegangan. Visualisasi 3D ini sangat berguna untuk menganalisis penyebaran gangguan listrik melalui tanah dan menilai kinerja sistem pentanahan dalam berbagai kondisi lapisan tanah yang berbeda



Gambar 14 Distribusi Potensial dan Arah Arus (Per Node)

Gambar 14 merupakan hasil simulasi dari distribusi potensial tegangan dan arah arus pada node pada model stratified grounding A yakni pasir-kerikil-tanah. Potensial tertinggi terlihat di sekitar elektroda pbumian, terutama di lapisan tanah liat (resistivitas rendah), karena arus cenderung mengalir ke area ini. Di lapisan pasir (resistivitas tinggi), potensial lebih rendah dengan gradien tegangan yang curam, berisiko menyebabkan step voltage. Dari grafik diatas berfungsi untuk mengidentifikasi titik kritis seperti lokasi tegangan yang tidak aman pada permukaan tanah.



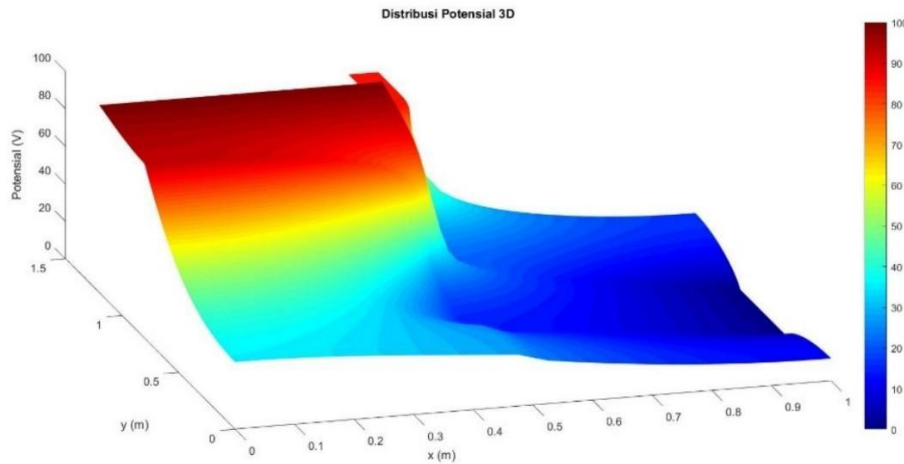
Gambar 15 Distribusi Potensial dan Arah Arus (Per Triangle)

Gambar 15 menunjukkan distribusi arus dan potensial per elemen segitiga (FEM), menggambarkan aliran arus melalui lapisan tanah berstruktur. Arus mengalir dominan secara vertikal melalui kerikil (resistivitas menengah)

menuju tanah liat, dengan sedikit penyebaran horizontal di lapisan pasir. Pola aliran arus memperlihatkan efek resistivitas lapisan: pasir menghambat, tanah liat mempercepat disipasi arus.

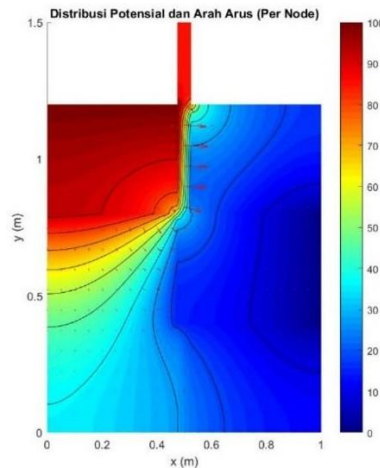
B. Visualisasi Hasil Simulasi Model B

Gambar-gambar berikut menampilkan hasil simulasi untuk **Model B** (Tanah Liat Pasir-Kerikil):



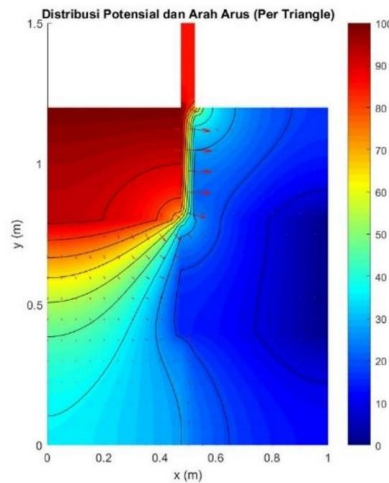
Gambar 16 Distribusi Potensial 3D Model B

Pada model B terlihat dari garis kontur dan warnanya lebih padat dan kompleks sedangkan untuk warnanya sendiri lebih dominan tua yaitu merah tua dan biru pekat berbeda dengan model a sebelumnya, hal ini menandakan bahwasannya ada perubahan resistivitas yang ekstrem. Berikut adalah versi detail dari distribusi potensial 3D yang diperkecil pada tampilan 2D nya sebagai berikut:



Gambar 17 Distribusi potensial dan Arah arus Model B

Gambar diatas merupakan hasil pemetaan potensial listrik pada permukaan tanah berdasarkan pengukuran di setiap titik (node). Sumbu x dan y merepresentasikan posisi koordinat dengan jarak antar titik sebesar 0,2 meter. Variasi warna atau kontur menggambarkan distribusi tegangan, di mana warna terang atau kemerahan menunjukkan daerah dengan nilai potensial tinggi (biasanya di sekitar elektroda), sedangkan warna gelap atau kebiruan menandakan daerah berpotensi rendah. Pola perubahan warna menunjukkan arah aliran arus listrik. Visualisasi ini sangat berguna untuk mengidentifikasi area berbahaya, terutama di lokasi yang memiliki perubahan tegangan tajam (gradien tinggi), karena berisiko menimbulkan tegangan sentuh atau langkah (step voltage) yang membahayakan.

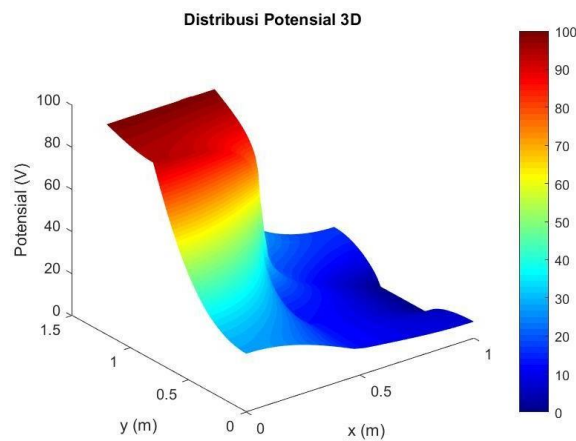


Gambar 18. Distribusi Potensial dan Arah Arus PerTriangle

Selanjutnya Gambar 18 memperlihatkan hasil simulasi menggunakan elemen segitiga dari metode Finite Element Method (FEM), yang memberikan visualisasi rinci terhadap penyebaran arus listrik dalam volume tanah. Sumbu y merepresentasikan kedalaman hingga 1 meter, memungkinkan analisis terhadap distribusi arus pada tiap lapisan tanah. Pola warna atau kontur yang ditampilkan menunjukkan jalur aliran arus yang mengikuti zona dengan resistivitas paling rendah, seperti lapisan tanah liat yang bersifat lebih konduktif. Visualisasi ini bermanfaat untuk memahami bagaimana struktur tanah berlapis memengaruhi efektivitas sistem pentanahan dalam melepas arus gangguan.

C. Visualisasi Hasil Simulasi Model C

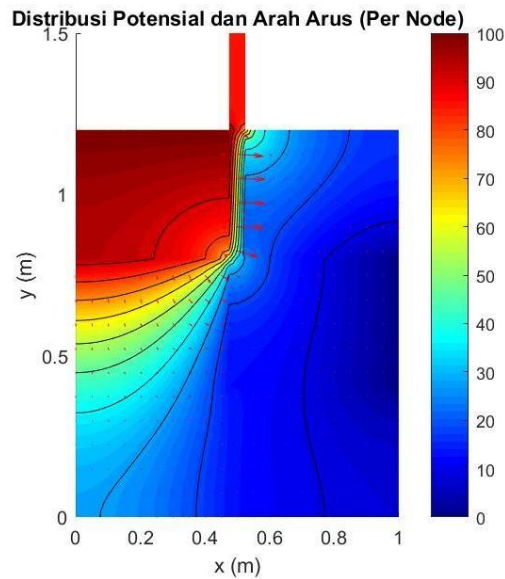
Gambar-gambar berikut menampilkan hasil simulasi untuk Model C (Kerikil Tanah Liat Pasir):



Gambar 19. Distribusi Arus 3D Model C

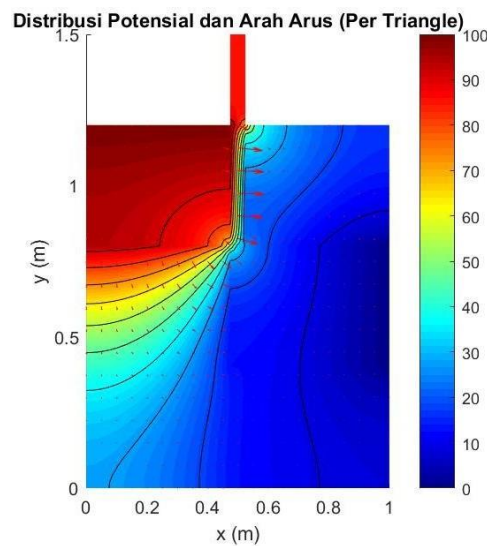
Visualisasi Distribusi Potensial 3D sekilas terlihat seperti sama dengan model lain akan tetapi perubahan tegangan dari 0 hingga 100 volt yang terdistribusi secara simetris terhadap sumbu tengah. Area berwarna merah terang pada kedalaman antara 0 hingga 0,5 meter menunjukkan zona dengan tegangan tinggi (>80 V), yang secara bertahap menurun menjadi warna biru gelap pada kedalaman lebih dari 1 meter dengan tegangan di bawah 20 V. Pola ini mengindikasikan bahwa lapisan atas, seperti pasir atau kerikil, memiliki resistivitas tinggi yang menyebabkan tegangan bertahan di permukaan. Sebaliknya, lapisan bawah yaitu tanah liat atau area dengan kelembapan tinggi mampu menghantarkan arus lebih baik sehingga tegangan cepat terdisipasi. Gambar diatas divualisasikan lebih jelas melalui gambar distribusi potensial dan arah arus baik per node maupun pertiangle guna menganalisis lebih dalam pengaruh lapisannya . Warna (merah ke biru) disini merepresentasikan gradien potensial, di mana merah adalah

tegangan tinggi dengan risiko step voltage dan biru adalah tegangan rendah area aman. Sedangkan untuk arah arus sendiri berupa garis atau vektor menunjukkan jalur resistansi terendah. Arus vertikal ke bawah mengindikasikan disipasi arus ke tanah dalam, sementara penyebaran horizontal menandakan lapisan konduktif yang memperluas distribusi arus. Untuk lebih jelasnya akan ditampilkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 20. Distribusi Tegangan dan Arah Arus Per Node Model C

Pada visualisasi Per Node, titik-titik dengan potensial tinggi terkonsentrasi di sekitar $x = 0.4-0.6$ m, mengindikasikan lokasi elektroda. Arah arus ditunjukkan oleh vektor yang awalnya mengalir vertikal ke bawah (menuju lapisan konduktif) lalu menyebar horizontal di kedalaman >0.8 m. Pola ini menegaskan bahwa arus mencari path resistivitas terendah, yaitu lapisan tanah liat di kedalaman.



Gambar 21. Distribusi Potensial dan Arah Arus Per Triangle Model C

Sementara itu, hasil simulasi dengan distribusi potensial dan arah arus per triangle menunjukkan transisi gradien warna yang lebih lembut antar elemen segitiga, menggambarkan perbedaan konduktivitas secara rinci. Dominasi warna merah di permukaan dan biru di kedalaman menandakan perubahan signifikan antara lapisan tanah yang resistif

dan konduktif. Arah arus divisualisasikan menyerupai kipas yang mengalir ke bawah dari elektroda, lalu menyebar ke samping, mengindikasikan peran penting lapisan bawah dalam memperluas distribusi arus tanah.

D. Hasil Perbandingan Pengujian Lapangan

Untuk memverifikasi hasil simulasi, dilakukan pengukuran langsung di lapangan menggunakan alat *earth tester* dengan metode tiga titik pada masing-masing skenario. Nilai resistansi yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari simulasi.

Tabel 1. Hasil Pengujian Dengan Air Biasa

No	Kandungan Massa Garam (g)	Volume Air (L)	Dengan Garam		
1.	0	0	-	-	-
2.	100	1	3,6	3,8	4,2
3.	150	2	3,5	3,58	4,2
4.	200	3	3,4	3,4	4,18
5.	250	4	3,4	3,4	4,2
6.	300	5	3,39	3,37	4,2
7.	350	6	3,25	3,25	4,1
8.	400	7	3,29	3,25	4,08
9.	450	8	3,28	3,2	3,9
10.	500	9	3,25	3,18	3,85
11.	550	10	3,28	3,18	3,8
12.	600	11	3,38	3,15	3,75
13.	650	12	3,29	3,15	3,78
14.	700	13	3,25	3,12	3,7
15.	750	14	3,23	3	3,6
16.	800	15	3,2	3	3,59
17.	850	16	3,2	3,08	3,5
18.	900	17	3,18	3	3,4
19.	950	18	3,2	2,9	3,39
20.	1000	19	3,18	2,8	3,25

Tabel 2. Hasil Pengujian Air Garam

No	Kandungan Massa Garam (g)	Volume Air (L)	Tanpa Garam		
			A	B	C
	0	0	6,4	3,62	4,4
	0	1	5,9	3,61	4,3
	0	2	5,7	3,6	4,2
	0	3	5,6	3,6	4,2
	0	4	5,7	3,6	4,2
	0	5	5,8	3,6	4,2
	0	6	5,6	3,58	4,2
	0	7	5,6	3,58	4,2
	0	8	5,5	3,5	4,2
	0	9	5,9	3,58	4,2
	0	10	5,7	3,5	4,2
	0	11	5,9	3,58	4,2
	0	12	5,9	3,58	4,2
	0	13	5,9	3,58	4,3
	0	14	5,7	3,6	4,3
	0	15	5,7	3,6	4,2
	0	16	5,4	3,58	4,1
	0	17	5,5	3,58	4,1
	0	18	5,6	3,39	3,9
	0	19	5,6	3,58	3,9

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa sistem stratified grounding dengan susunan lapisan tanah liat di bagian dasar (Model B) terbukti paling efektif dalam menurunkan nilai resistansi pentanahan. Selain itu, penggunaan air garam lebih efektif dibandingkan air biasa dalam meningkatkan konduktivitas tanah, sehingga mampu menurunkan resistansi secara signifikan. Hasil simulasi menggunakan metode Finite Element Method (FEM) juga menunjukkan kemampuan prediksi kinerja sistem pentanahan dengan tingkat akurasi tinggi, dengan selisih hasil pengukuran lapangan kurang dari 10%.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sukamdi, Sri Wahyuni Dali, Chandra Wiharya, and Abdu Alimil Asror, "Perencanaan Instalasi Penangkal Petir Pada Bangunan Industri Furniture," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 9, no. 2, pp. 52–57, 2023, doi: 10.33795/elposys.v9i2.616.
- [2] R. Duanaputri, Ruwah Joto, Sigi Syah Wibowo, and Fery Nova Dwi Prasetyo, "Perencanaan Instalasi Penangkal Petir Pada Bangunan Industri Bengkel Pembuatan Mesin CV. Karya Brawijaya," *ELPOSYS J. Sist. Kelistrikan*, vol. 8, no. 3, pp. 1–7, 2021, doi: 10.33795/elposys.v8i3.53.
- [3] R. R. Fazrin, T. Trisnawiyana, and T. Tohir, "Pengujian Nilai Resistansi Pentanahan Elektroda Batang dengan Zat Aditif

-
- Bentonit dan Tanpa Bentonit,” *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 14, no. 1, pp. 103–108, 2023, doi: 10.35313/irwns.v14i1.5369.
- [4] N. M. Seniari, A. Natsir, I. Ayu, S. Adnyani, S. Nababan, and S. Mataram, “PENGENALAN DASAR-DASAR PERENCANAAN INSTALASI PROTEKSI PETIR PADA GEDUNG BERTINGKAT DI SMAN 8 MATARAM Introduction to the Basics of Lightning Protection Installation Planning on Store Building at SMAN 8 Mataram 1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram,” vol. 8, pp. 352–357, 2021.
- [5] K. Karsun, O. A. Rozak, and M. Z. Ramadhan Nurhadi, “Penggunaan Elektrostatis Sebagai Proteksi Petir Plts on-Grid Pada Gedung B Universitas Pamulang,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 11, no. 3s1, 2023, doi: 10.23960/jitet.v11i3s1.3497.
- [6] A. Fitriani, J. Panjaitan, and S. A. Syahputra, “The Effect of Soil Type on Touch Voltage and Step Voltage in the Grid Grounding System,” *Elkha*, vol. 16, no. 1, p. 56, 2024, doi: 10.26418/elkha.v16i1.78396.
- [7] P. Surya, B. Surya, T. Umar, and B. E. P, “Rancang Bangun Grounding Box *Soil Treatment* Sebagai Media Pengukuran Resistansi Pentanahan untuk Proteksi Pembangkit Hybrid PV – Angin Politeknik Negeri Malang,” vol. 11, no. 3, 2024.
- [8] A. R. J. de Araújo *et al.*, “Computation of ground potential rise and grounding impedance of simple arrangement of electrodes buried in frequency-dependent stratified soil,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 198, no. April, 2021, doi: 10.1016/j.epr.2021.107364.
- [9] G. U. Hardi, T. Taufiq, Raihan Putri, and F. A. Nasution, “Pengaruh Tahanan Jenis Tanah Terhadap Sistem Pentanahan Menggunakan Elektroda Batang Dilokasi Gedung Teknik Elektro Unimal,” *INSOLOGI J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 2, pp. 314–326, 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i2.1818.
- [10] M. Ghomi, H. Zhang, C. Leth Bak, F. Faria da Silva, and K. Yin, “Integrated model of transmission tower surge impedance and multilayer grounding system based on full-wave approach,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 198, no. April, p. 107355, 2021, doi: 10.1016/j.epr.2021.107355.