PEMODELAN DISTRIBUSI MEDAN LISTRIK PADA VARIASI GEOMETRI ELEKTRODA MENGGUNAKAN METODE *FINITE ELEMENT*

Indra Purnomo

Universitas Jember
E-mail : indrapurnomo619@gmail.com

ABSTRAK

Distribusi medan listrik merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kinerja berbagai perangkat elektrostatik, seperti sistem isolasi tegangan tinggi, sensor kapasitif, aktuator elektrostatik, dan perangkat mikroelektronika. Karakteristik distribusi medan listrik dipengaruhi oleh bentuk geometri elektroda sehingga diperlukan metode analisis yang mampu memodelkan fenomena tersebut secara akurat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi geometri elektroda berbentuk tidak beraturan terhadap distribusi medan listrik menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Penelitian dilakukan dengan pendekatan kuantitatif melalui simulasi numerik berbasis persamaan Laplace pada kondisi elektrostatik tanpa muatan bebas. Sepuluh variasi geometri elektroda, yaitu lingkaran, elips, persegi, persegi panjang, segitiga, heksagon, oktagon, bintang, serta dua bentuk poligon tidak beraturan, dianalisis menggunakan kondisi simulasi yang identik. Parameter yang dievaluasi meliputi distribusi potensial listrik, distribusi medan listrik, nilai medan listrik maksimum, nilai medan listrik rata-rata, *Field Enhancement Factor* (FEF), dan Indeks Homogenitas Medan (IHM). Hasil simulasi menunjukkan bahwa geometri elektroda memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik distribusi medan listrik. Geometri segitiga menghasilkan medan listrik maksimum dan nilai FEF tertinggi, sedangkan geometri persegi panjang menghasilkan distribusi medan listrik yang paling homogen berdasarkan nilai IHM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa optimasi bentuk geometri elektroda dapat digunakan untuk mengendalikan distribusi medan listrik sesuai kebutuhan aplikasi. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan desain elektroda berbasis simulasi numerik serta menjadi referensi bagi penelitian lanjutan pada sistem elektrostatik.

Kata Kunci : *Distribusi Medan Listrik, Geometri Elektroda, Finite Element Method (FEM), Elektrostatik, Persamaan Laplace, Simulasi Numerik.*

ABSTRAK

Electric field distribution is a critical factor influencing the performance of various electrostatic devices, such as high-voltage insulation systems, capacitive sensors, electrostatic actuators, and microelectronic devices. The characteristics of electric field distribution are inherently governed by electrode geometry, necessitating an analytical method capable of accurately modeling this phenomenon. This study aims to analyze the effect of variations in irregular electrode geometries on electric field distribution using the Finite Element Method (FEM). A quantitative approach was employed through numerical simulations based on Laplace's equation under electrostatic conditions without free charges. Ten electrode geometry variations—comprising circular, elliptical, square, rectangular, triangular, hexagonal, octagonal, star, and two irregular polygon shapes—were analyzed under identical simulation conditions. The evaluated parameters included electric potential distribution, electric field distribution, maximum electric field strength, average electric field strength, the Field Enhancement Factor (FEF), and the Field Homogeneity Index (FHI). Simulation results demonstrate that electrode geometry exerts a significant influence on electric field distribution characteristics. The triangular geometry generated the highest maximum electric field and FEF value, whereas the rectangular geometry produced the most homogeneous electric field distribution based on the FHI value. These findings indicate that the optimization of electrode geometry can be effectively utilized to control electric field distribution according to specific application requirements. This study contributes to the development of electrode design based on numerical simulation and serves as a reference for future research on electrostatic systems.

Keywords : *Electric Field Distribution, Electrode Geometry, Finite Element Method (FEM), Electrostatics, Laplace's Equation, Numerical Simulation.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di bidang kelistrikan, elektronika, dan biomedis mendorong meningkatnya kebutuhan terhadap sistem yang mampu menghasilkan distribusi medan listrik yang terkontrol dan stabil. Distribusi medan listrik merupakan salah satu parameter penting yang menentukan performa berbagai perangkat, seperti sensor kapasitif, aktuator elektrostatik, kapasitor, sistem elektroporasi, pengendap elektrostatik (*electrostatic precipitator*), serta isolator tegangan tinggi (Čorović *at.al*, 2007). Pada perangkat-perangkat tersebut, distribusi medan listrik tidak hanya memengaruhi efisiensi kerja, tetapi juga menentukan tingkat keamanan, keandalan, dan umur operasional suatu sistem(Hadi, 2011).

Sistem elektrostatik, distribusi medan listrik dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain besar beda potensial, sifat dielektrik medium, jarak antar elektroda, serta geometri elektroda (1] Alim, 2025). Geometri elektroda menjadi salah satu parameter yang paling menentukan karena secara langsung memengaruhi distribusi potensial listrik di dalam domain. Perubahan bentuk elektroda akan mengubah gradien potensial sehingga menghasilkan pola distribusi medan listrik yang berbeda pada setiap titik pengamatan (Dehaan dan Sontag, 2003).

Fenomena konsentrasi medan listrik pada ujung elektroda yang memiliki kelengkungan kecil atau sudut tajam dikenal sebagai *field enhancement*. Fenomena ini menyebabkan intensitas medan listrik meningkat secara signifikan pada daerah tertentu sehingga banyak dimanfaatkan pada teknologi *field emission*, mikrofluida berbasis dielektroforesis, sistem elektroporasi, dan perangkat bioelektronik (Jin, 2014). Namun, pada aplikasi lain seperti sistem isolasi tegangan tinggi, peningkatan medan listrik lokal justru dapat memicu pelepasan muatan parsial, korona, bahkan *electrical breakdown* yang berpotensi menurunkan keandalan sistem (Ramachandran *et.al*, 2021). Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan antara geometri elektroda dan distribusi medan listrik menjadi aspek penting dalam proses perancangan perangkat elektrostatik.

Karakterisasi distribusi medan listrik secara eksperimental masih menghadapi berbagai kendala. Pengukuran medan listrik pada sistem bertegangan tinggi memerlukan instrumen dengan sensitivitas tinggi serta prosedur keselamatan yang ketat (Hussain *et.al*, 2023). Keberadaan sensor pengukuran dapat memengaruhi distribusi medan listrik di sekitar titik pengamatan sehingga hasil yang diperoleh tidak selalu merepresentasikan kondisi sebenarnya (Troughton *et.al*, 2023). Kompleksitas bentuk elektroda juga menyebabkan pengukuran distribusi medan listrik pada seluruh domain menjadi sulit dilakukan, terutama pada geometri yang tidak beraturan. Kondisi tersebut mengakibatkan proses eksperimen membutuhkan biaya yang relatif besar, waktu yang lebih lama, serta belum tentu mampu memberikan informasi spasial secara menyeluruh (Trosan *et.al*, 2024).

Perkembangan metode komputasi memberikan alternatif yang lebih efisien dalam menganalisis distribusi medan listrik. Salah satu metode numerik yang paling banyak digunakan adalah *Finite Element Method* (FEM). Metode ini menyelesaikan persamaan Laplace atau *Poisson* melalui proses diskretisasi domain menjadi elemen-elemen kecil sehingga distribusi potensial listrik dapat dihitung pada setiap elemen secara numerik (Greamaldy *et.al*, 2021). Dibandingkan metode analitik, FEM memiliki keunggulan dalam menangani domain dengan geometri kompleks, kondisi batas yang beragam, serta memungkinkan visualisasi distribusi potensial dan medan listrik dengan tingkat ketelitian yang tinggi (Sijabat dan Rajagukguk, 2020). FEM memberikan fleksibilitas dalam melakukan variasi parameter desain tanpa memerlukan perubahan pada sistem

fisik sehingga sangat sesuai digunakan sebagai alat bantu optimasi geometri elektroda (Hayani et.al, 2026).

Berbagai penelitian telah memanfaatkan FEM untuk menganalisis distribusi medan listrik pada elektroda berbentuk lingkaran, silinder, maupun pelat sejajar (2] Alim, 2025). Penelitian lainnya mengevaluasi pengaruh jarak antar elektroda, besar tegangan, dan sifat material dielektrik terhadap distribusi medan listrik yang dihasilkan (Simbolon *et.al,* 2025). Meskipun demikian, penelitian yang secara khusus membandingkan berbagai geometri elektroda tidak beraturan dalam satu domain simulasi dengan kondisi batas yang identik masih relatif terbatas. Selain itu, sebagian besar penelitian hanya berfokus pada visualisasi distribusi medan listrik tanpa melakukan evaluasi kuantitatif menggunakan parameter seperti medan listrik maksimum, medan listrik rata-rata, indeks homogenitas, maupun *field enhancement factor* sebagai indikator pengaruh geometri elektroda terhadap karakteristik medan listrik (Pratiwi dan Asri, 2021).

Kondisi tersebut masih terdapat ruang penelitian untuk mengembangkan model numerik yang mampu mengevaluasi secara komprehensif pengaruh variasi geometri elektroda terhadap distribusi medan listrik menggunakan parameter kuantitatif yang lebih lengkap. Analisis semacam ini penting untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan antara bentuk elektroda dan karakteristik medan listrik sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam optimasi desain berbagai perangkat elektrostatik.

Penelitian ini bertujuan memodelkan distribusi medan listrik pada elektroda berbentuk tidak beraturan menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dengan variasi geometri elektroda. Simulasi dilakukan pada beberapa bentuk elektroda dengan kondisi batas berupa beda potensial tetap, sedangkan parameter lain seperti luas penampang elektroda, jarak antar elektroda, ukuran domain, dan sifat medium dipertahankan konstan. Analisis dilakukan terhadap distribusi potensial listrik, distribusi medan listrik, nilai medan listrik maksimum, nilai medan listrik rata-rata, indeks homogenitas medan listrik, serta *field enhancement factor*. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode perancangan elektroda yang lebih optimal pada berbagai aplikasi di bidang kelistrikan, elektronika, dan fisika komputasi.

METODE

1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain penelitian kuantitatif dengan pendekatan pemodelan numerik (*numerical modeling*) yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi geometri elektroda berbentuk tidak beraturan terhadap distribusi medan listrik menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Penelitian bersifat simulatif-komputasional, di mana seluruh data diperoleh melalui hasil simulasi numerik tanpa melibatkan eksperimen laboratorium maupun pengukuran secara langsung. Model fisika dibangun berdasarkan persamaan Laplace pada kondisi elektrostatik tanpa muatan bebas, kemudian diselesaikan menggunakan metode elemen hingga untuk memperoleh distribusi potensial listrik dan medan listrik pada domain simulasi.

Desain penelitian menerapkan pendekatan komparatif dengan membandingkan beberapa variasi geometri elektroda yang dianalisis pada kondisi simulasi yang identik. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah bentuk geometri elektroda, sedangkan variabel terikat meliputi distribusi potensial listrik, distribusi medan listrik, nilai medan listrik maksimum, nilai rata-rata medan listrik, indeks homogenitas medan listrik, dan *field enhancement factor*. Sementara itu, parameter seperti beda potensial, jarak antar elektroda, ukuran domain simulasi, permitivitas

medium, dan ukuran elemen (*mesh*) dipertahankan konstan agar perubahan karakteristik medan listrik hanya dipengaruhi oleh variasi geometri elektroda.

Setiap variasi geometri elektroda diperlakukan sebagai skenario simulasi yang dianalisis menggunakan prosedur yang sama. Tahapan penelitian meliputi perancangan geometri elektroda, pembuatan domain simulasi, penentuan kondisi batas (*boundary conditions*), proses *meshing*, penyelesaian model menggunakan FEM, serta analisis hasil simulasi berdasarkan parameter distribusi medan listrik. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai pengaruh geometri elektroda terhadap karakteristik distribusi medan listrik secara kuantitatif.

2. Data yang Dikumpulkan

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini berupa data kuantitatif yang dihasilkan melalui simulasi numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Data tersebut meliputi distribusi potensial listrik (V), distribusi medan listrik (V/m), nilai medan listrik maksimum (V/m), nilai rata-rata medan listrik (V/m), indeks homogenitas medan listrik, dan *field enhancement factor* (FEF). Seluruh data diperoleh dari hasil penyelesaian persamaan Laplace pada domain simulasi dua dimensi dengan beberapa variasi geometri elektroda berbentuk tidak beraturan. Setiap parameter dianalisis untuk mengetahui pengaruh perubahan geometri terhadap karakteristik distribusi medan listrik.

Metode pengumpulan data dilakukan melalui proses simulasi komputasi yang terdiri atas perancangan geometri elektroda, penentuan sifat material dan kondisi batas (*boundary conditions*), pembentukan *mesh*, serta penyelesaian model menggunakan FEM. Distribusi potensial listrik dihitung dalam satuan volt (V), sedangkan distribusi medan listrik, nilai medan listrik maksimum, dan nilai rata-rata medan listrik dinyatakan dalam volt per meter (V/m). Indeks homogenitas medan listrik dan *field enhancement factor* merupakan parameter tanpa satuan (*dimensionless*) yang dihitung berdasarkan hasil simulasi untuk mengevaluasi tingkat keseragaman dan konsentrasi medan listrik pada masing-masing geometri elektroda. Unit analisis penelitian berupa 10 variasi geometri elektroda yang terdiri atas lingkaran, elips, persegi, persegi panjang, segitiga, heksagon, oktagon, bintang, serta dua bentuk poligon tidak beraturan. Seluruh model dianalisis menggunakan parameter simulasi yang sama sehingga data yang diperoleh dapat dibandingkan secara objektif untuk mengevaluasi pengaruh geometri elektroda terhadap distribusi medan listrik.

3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian diawali dengan penyusunan model fisika berdasarkan teori elektrostatik yang mengacu pada persamaan Laplace untuk kondisi tanpa muatan bebas. Pada tahap ini dilakukan identifikasi parameter penelitian yang meliputi bentuk geometri elektroda sebagai variabel bebas, serta distribusi potensial listrik, distribusi medan listrik, nilai medan listrik maksimum, nilai rata-rata medan listrik, indeks homogenitas medan listrik, dan *field enhancement factor* sebagai variabel terikat. Selain itu, parameter simulasi seperti beda potensial, jarak antar elektroda, ukuran domain simulasi, permitivitas medium, dan ukuran *mesh* ditetapkan tetap agar pengaruh variasi geometri elektroda dapat dianalisis secara objektif.

Tahap berikutnya adalah perancangan model geometri elektroda menggunakan perangkat lunak simulasi berbasis *Finite Element Method* (FEM). Penelitian menggunakan sepuluh variasi geometri elektroda yang terdiri atas lingkaran, elips, persegi, persegi panjang, segitiga, heksagon, oktagon, bintang, serta dua bentuk poligon tidak beraturan. Seluruh model ditempatkan pada domain simulasi dua dimensi dengan ukuran yang sama sehingga setiap variasi geometri memiliki kondisi awal yang identik. Setelah model geometri selesai dibuat, dilakukan penentuan sifat

material medium, pemberian kondisi batas (*boundary conditions*), dan proses *meshing* untuk membagi domain menjadi elemen-elemen kecil sebagai dasar perhitungan numerik.

Selanjutnya dilakukan proses simulasi dengan menyelesaikan persamaan Laplace menggunakan metode elemen hingga untuk memperoleh distribusi potensial listrik pada setiap variasi geometri elektroda. Berdasarkan hasil distribusi potensial tersebut, perangkat lunak menghitung distribusi medan listrik melalui gradien potensial. Seluruh hasil simulasi kemudian diekstraksi dalam bentuk data numerik dan visualisasi berupa kontur potensial listrik, peta distribusi medan listrik, serta garis medan listrik. Data yang diperoleh meliputi nilai medan listrik maksimum, nilai rata-rata medan listrik, indeks homogenitas medan listrik, dan *field enhancement factor* untuk setiap model geometri.

Tahap akhir penelitian adalah analisis dan interpretasi hasil simulasi. Data dari setiap variasi geometri dibandingkan untuk mengetahui pengaruh bentuk elektroda terhadap karakteristik distribusi medan listrik. Analisis dilakukan secara kuantitatif dengan membandingkan setiap parameter hasil simulasi serta menghubungkannya dengan konsep elektrostatik dan karakteristik geometri elektroda. Hasil analisis selanjutnya digunakan untuk menentukan geometri elektroda yang menghasilkan distribusi medan listrik paling homogen maupun yang memberikan konsentrasi medan listrik terbesar, sehingga dapat menjadi dasar dalam perancangan elektroda untuk berbagai aplikasi kelistrikan dan elektronika.

4. Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan membandingkan hasil simulasi numerik yang diperoleh dari setiap variasi geometri elektroda. Data hasil simulasi berupa distribusi potensial listrik, distribusi medan listrik, nilai medan listrik maksimum, nilai rata-rata medan listrik, indeks homogenitas medan listrik, dan *field enhancement factor* dianalisis untuk mengetahui pengaruh perubahan geometri elektroda terhadap karakteristik medan listrik. Analisis dilakukan secara komparatif dengan membandingkan setiap parameter pada seluruh model geometri menggunakan kondisi simulasi yang sama, sehingga perbedaan hasil yang diperoleh hanya dipengaruhi oleh variasi bentuk elektroda.

Distribusi potensial listrik dan distribusi medan listrik dianalisis melalui visualisasi kontur (*contour plot*) dan garis medan listrik (*electric field lines*) untuk mengidentifikasi pola penyebaran medan listrik pada setiap model. Selanjutnya dilakukan analisis kuantitatif terhadap nilai medan listrik maksimum (E_{max}), nilai rata-rata medan listrik ($\bar{E}$), indeks homogenitas medan listrik (IHM), serta *Field Enhancement Factor* (FEF). Nilai IHM digunakan untuk mengevaluasi tingkat keseragaman distribusi medan listrik, sedangkan FEF digunakan untuk menunjukkan tingkat konsentrasi medan listrik pada bagian elektroda yang memiliki kelengkungan kecil atau sudut tajam. Hasil setiap parameter kemudian dibandingkan untuk menentukan geometri elektroda yang menghasilkan distribusi medan listrik paling homogen maupun yang memiliki konsentrasi medan listrik terbesar.

Seluruh proses simulasi dan analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis *Finite Element Method* (FEM), sedangkan pengolahan data numerik dan penyajian grafik dilakukan menggunakan ***Python***. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel, grafik, dan visualisasi kontur untuk mempermudah interpretasi hubungan antara variasi geometri elektroda dan distribusi medan listrik. Validitas hasil penelitian dievaluasi melalui konsistensi model numerik, kesesuaian dengan teori elektrostatik berdasarkan persamaan Laplace, serta perbandingan dengan hasil penelitian terdahulu yang relevan.

1. Persamaan Medan Listrik

$$\mathrm{E} = -\nabla V$$

Persamaan ini digunakan untuk menghitung distribusi medan listrik berdasarkan distribusi potensial listrik yang diperoleh dari hasil simulasi. Medan listrik (E) merupakan gradien negatif dari potensial listrik (V), sehingga arah medan listrik selalu menuju daerah dengan potensial yang lebih rendah. Persamaan ini menjadi dasar dalam menentukan besar dan arah medan listrik pada setiap titik di dalam domain simulasi.

2. Medan Listrik Rata-rata

$$\bar{E} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} E_i$$

Persamaan ini digunakan untuk menentukan nilai rata-rata medan listrik pada seluruh titik pengamatan dalam domain simulasi. Nilai tersebut memberikan gambaran umum mengenai intensitas medan listrik yang dihasilkan oleh setiap variasi geometri elektroda sehingga dapat digunakan sebagai parameter pembanding antar model.

3. Indeks Homogenitas Medan Listrik (IHM)

$$IHM = 1 - \frac{\sigma_E}{\bar{E}}$$

Persamaan ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat keseragaman distribusi medan listrik pada domain simulasi. Nilai IHM yang semakin mendekati 1 menunjukkan distribusi medan listrik semakin homogen, sedangkan nilai yang lebih kecil menunjukkan adanya variasi atau konsentrasi medan listrik yang lebih besar pada daerah tertentu.

4. *Field Enhancement Factor* (FEF)

$$FEF = \frac{E_{\max}}{E_0}$$

Persamaan ini digunakan untuk mengukur tingkat peningkatan medan listrik akibat pengaruh geometri elektroda. Nilai FEF menunjukkan perbandingan antara medan listrik maksimum yang terjadi pada permukaan elektroda dengan medan listrik referensi. Semakin besar nilai FEF, semakin tinggi konsentrasi medan listrik pada daerah tertentu, terutama di sekitar ujung atau sudut tajam elektroda.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Data Temuan

Penelitian ini menghasilkan data numerik berupa distribusi medan listrik pada sepuluh variasi geometri elektroda yang diperoleh melalui simulasi menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Parameter yang diamati meliputi nilai medan listrik maksimum (E_{max}), nilai medan listrik rata-rata (E_{avg}), *Field Enhancement Factor* (FEF), serta Indeks Homogenitas Medan (IHM). Selain data numerik, simulasi juga menghasilkan visualisasi berupa heatmap medan listrik, kontur potensial listrik, arah vektor medan listrik, *streamline* garis gaya medan listrik, dan kontur isopotensial sebagai representasi distribusi medan listrik pada setiap geometri elektroda.

Tabel 1. Nilai Medan Listrik Maksimum dan Rata-rata

Geometri Elektroda	E_{max} (10^5 V/m)	E_{avg} (10^5V/m)
Lingkaran	2,209	1,070

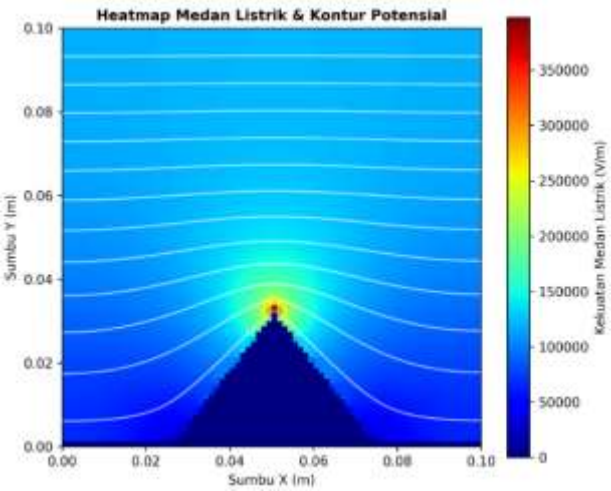
Elips	1,913	1,065
Persegi	2,202	1,117
Persegi Panjang	1,794	1,085
Segitiga	3,978	1,106
Heksagon	2,436	1,123
Oktagon	2,459	1,130
Bintang	2,738	1,167
Poligon *Irreguler* A	2,317	1,211
Poligon *Irreguler* B	2,491	1,098

Tabel 1 menyajikan hasil simulasi berupa nilai medan listrik maksimum (E_{max}) dan medan listrik rata-rata (E_{avg}) yang diperoleh pada sepuluh variasi geometri elektroda. Data ditampilkan dalam satuan volt per meter (V/m) dan menunjukkan hasil perhitungan numerik menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*/FEM) pada kondisi simulasi yang sama untuk seluruh geometri. Nilai-nilai tersebut menjadi data dasar yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik distribusi medan listrik pada masing-masing bentuk elektroda.

Tabel 2. Nilai *Field Enhancement Factor* dan Indeks Homogenitas Medan

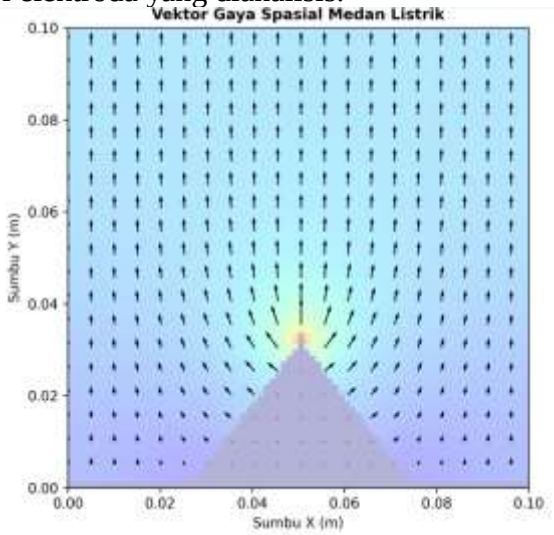
Geometri Elektroda	***Field Enhancement Factor* (FEF)**	**Indeks Homogenitas Medan (IHM)**
Lingkaran	2,065	0,484
Elips	1,797	0,556
Persegi	1,971	0,507
Persegi Panjang	1,654	0,605
Segitiga	3,597	0,278
Heksagon	2,168	0,461
Oktagon	2,176	0,460
Bintang	2,346	0,426
Poligon Irreguler A	1,913	0,523
Poligon Irreguler B	2,268	0,441

Tabel 2 menyajikan nilai *Field Enhancement Factor* (FEF) dan Indeks Homogenitas Medan (IHM) yang diperoleh dari hasil simulasi untuk setiap variasi geometri elektroda. Nilai FEF menunjukkan hasil perhitungan faktor penguatan medan listrik, sedangkan IHM merupakan parameter yang digunakan untuk menggambarkan tingkat keseragaman distribusi medan listrik. Seluruh data dihitung berdasarkan hasil simulasi numerik dengan parameter simulasi yang sama sehingga dapat dibandingkan secara langsung antarvariasi geometri elektroda.



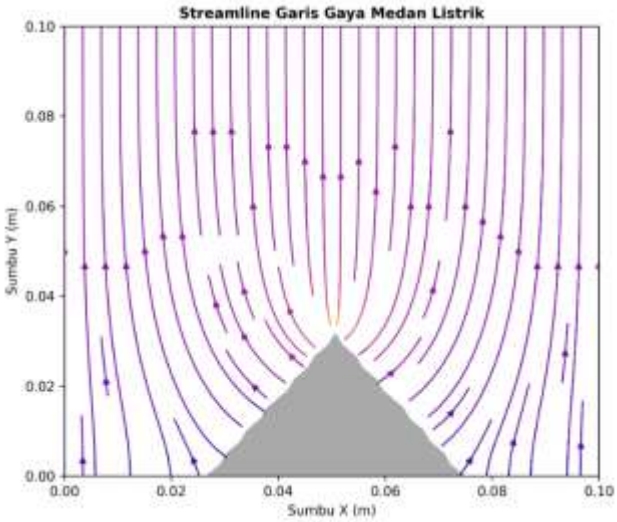
Gambar 1. Simulasi Heatmap Medan Listrik dan Kontur Postensial

Gambar 1 menampilkan hasil simulasi distribusi medan listrik dalam bentuk *heatmap* yang dipadukan dengan kontur potensial listrik pada domain simulasi. Peta warna menunjukkan variasi besar medan listrik pada setiap titik di dalam domain, sedangkan garis kontur memperlihatkan distribusi potensial listrik yang dihasilkan dari penyelesaian persamaan Laplace menggunakan metode elemen hingga. Visualisasi ini digunakan untuk menyajikan hasil distribusi potensial dan medan listrik pada geometri elektroda yang dianalisis.



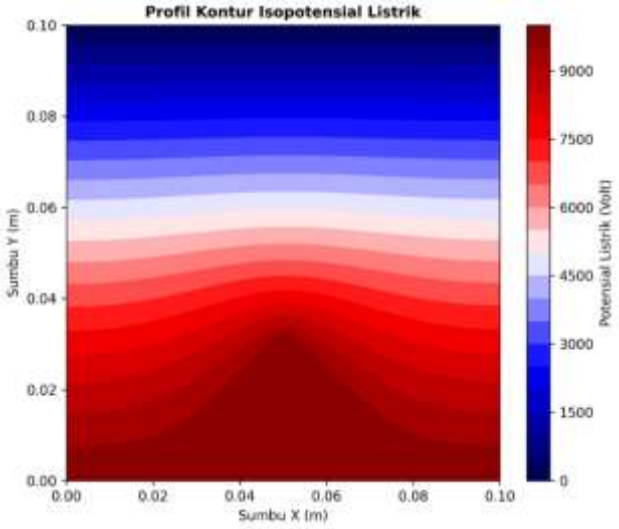
Gambar 2. Simulasi Arah Vektor Gaya Spasial Medan Listrik

Gambar 2 menyajikan visualisasi arah medan listrik dalam bentuk vektor gaya spasial yang diperoleh dari hasil simulasi numerik. Setiap vektor menunjukkan arah medan listrik pada titik tertentu di dalam domain simulasi berdasarkan gradien potensial listrik yang dihitung menggunakan metode elemen hingga. Visualisasi ini memberikan informasi mengenai orientasi distribusi medan listrik pada setiap variasi geometri elektroda.



Gambar 3. Simulasi *Streamline* Garis Gaya Medan Listrik

Gambar 3 memperlihatkan hasil simulasi berupa *streamline* garis gaya medan listrik yang menggambarkan lintasan medan listrik pada domain simulasi. Garis-garis tersebut dihasilkan berdasarkan arah vektor medan listrik sehingga menunjukkan pola penyebaran medan listrik yang terbentuk pada masing-masing geometri elektroda. Visualisasi streamline digunakan sebagai representasi aliran medan listrik hasil simulasi numerik.



Gambar 4. Simulasi Kontur Isopotensial Listrik

Gambar 4 menampilkan kontur isopotensial listrik yang diperoleh dari hasil penyelesaian persamaan Laplace menggunakan metode elemen hingga. Garis-garis isopotensial menunjukkan lokasi-lokasi yang memiliki nilai potensial listrik yang sama pada domain simulasi. Visualisasi ini digunakan untuk menyajikan distribusi potensial listrik yang terbentuk pada setiap variasi geometri elektroda berdasarkan hasil simulasi numerik.

2. Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi geometri elektroda memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik distribusi medan listrik. Berdasarkan hasil yang disajikan pada Tabel 1, setiap geometri menghasilkan nilai medan listrik maksimum (E_{max}) dan medan listrik

rata-rata (E_{avg}) yang berbeda meskipun seluruh model menggunakan parameter simulasi yang identik, yaitu beda potensial, ukuran domain, permitivitas medium, kondisi batas, dan ukuran mesh yang sama. Nilai medan listrik maksimum berada pada rentang 1,794–3,978 V/m, sedangkan nilai medan listrik rata-rata berada pada rentang 1,065–1,211 V/m. Geometri segitiga menghasilkan nilai medan listrik maksimum tertinggi sebesar 3,978 V/m, sedangkan geometri persegi panjang menghasilkan nilai terendah sebesar 1,794 V/m. Di sisi lain, nilai medan listrik rata-rata tertinggi diperoleh pada geometri poligon *irreguler* A sebesar 1,211 V/m, sedangkan nilai terendah diperoleh pada geometri elips sebesar 1,065 V/m. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan bahwa perubahan bentuk geometri elektroda secara langsung memengaruhi distribusi gradien potensial listrik sehingga menghasilkan karakteristik medan listrik yang berbeda pada setiap model. Hasil ini mendukung tujuan penelitian, yaitu menganalisis pengaruh variasi geometri elektroda terhadap distribusi medan listrik menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM).

Perbedaan distribusi medan listrik tersebut juga terlihat pada visualisasi *heatmap*, kontur potensial, vektor medan listrik, dan *streamline* garis gaya medan listrik. Geometri yang memiliki sudut tajam, seperti segitiga, daerah dengan intensitas medan listrik tinggi ditunjukkan oleh warna merah yang terkonsentrasi di sekitar ujung elektroda. Sebaliknya, pada geometri yang memiliki permukaan lebih halus, seperti lingkaran dan elips, distribusi warna tampak lebih merata pada seluruh domain simulasi. Pola yang sama juga terlihat pada kontur potensial listrik, di mana garis-garis isopotensial menjadi lebih rapat di sekitar ujung elektroda segitiga. Kerapatan garis isopotensial menunjukkan gradien potensial yang lebih besar sehingga menghasilkan intensitas medan listrik yang lebih tinggi. Visualisasi vektor medan listrik memperlihatkan bahwa arah medan listrik selalu bergerak dari elektroda potensial tinggi menuju elektroda potensial rendah, sedangkan *streamline* menunjukkan lintasan garis gaya medan listrik yang berkumpul pada daerah dengan konsentrasi medan listrik tinggi. Seluruh hasil visualisasi tersebut konsisten dengan data numerik yang diperoleh melalui simulasi dan memperlihatkan hubungan yang kuat antara bentuk geometri elektroda dengan pola distribusi medan listrik.

Hasil simulasi juga menunjukkan adanya perbedaan *Field Enhancement Factor* (FEF) pada setiap variasi geometri elektroda. Berdasarkan Tabel 2, nilai FEF berada pada rentang 1,654–3,597, dengan nilai tertinggi diperoleh pada geometri segitiga dan nilai terendah pada geometri persegi panjang. Nilai FEF yang tinggi menunjukkan bahwa geometri tersebut mampu menghasilkan konsentrasi medan listrik yang lebih besar pada daerah tertentu. Sebaliknya, geometri dengan nilai FEF yang lebih rendah menghasilkan distribusi medan listrik yang lebih merata. Selain FEF, penelitian ini juga menghasilkan nilai Indeks Homogenitas Medan (IHM) yang berada pada rentang 0,278–0,605. Nilai IHM tertinggi diperoleh pada geometri persegi panjang, sedangkan nilai terendah diperoleh pada geometri segitiga. Hasil tersebut menunjukkan bahwa geometri dengan permukaan yang relatif datar menghasilkan distribusi medan listrik yang lebih homogen dibandingkan geometri yang memiliki sudut tajam. Dengan demikian, data numerik yang diperoleh dari parameter E_{max}, E_{avg}, FEF, dan IHM saling mendukung dalam menggambarkan karakteristik distribusi medan listrik pada setiap variasi geometri elektroda.

Fenomena tersebut sesuai dengan teori elektrostatik yang menyatakan bahwa medan listrik merupakan gradien negatif dari potensial listrik ($\mathrm{E} = -\nabla V$). Menurut Griffiths (2017), distribusi medan listrik pada suatu konduktor sangat dipengaruhi oleh bentuk permukaannya. Daerah yang memiliki jari-jari kelengkungan kecil atau sudut tajam akan menghasilkan rapat garis gaya listrik yang lebih besar sehingga intensitas medan listrik meningkat. Penjelasan serupa juga dikemukakan

oleh Sadiku (2021), yang menyatakan bahwa perubahan geometri konduktor akan mengubah distribusi potensial listrik dan gradien potensial sehingga memengaruhi distribusi medan listrik pada seluruh domain. Perbedaan hasil simulasi pada setiap geometri elektroda dalam penelitian ini dapat dijelaskan berdasarkan perubahan distribusi gradien potensial yang terjadi akibat variasi bentuk elektroda.

Temuan penelitian ini memiliki kesesuaian dengan berbagai penelitian terdahulu. Jin menjelaskan bahwa metode *Finite Element Method* (FEM) merupakan salah satu metode numerik yang memiliki tingkat akurasi tinggi dalam menyelesaikan distribusi medan listrik pada geometri yang kompleks. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa perubahan bentuk geometri akan menyebabkan distribusi medan listrik sehingga daerah dengan kelengkungan kecil atau sudut tajam menghasilkan intensitas medan listrik yang lebih tinggi. Hasil tersebut konsisten dengan penelitian ini, di mana geometri segitiga menghasilkan nilai medan listrik maksimum dan nilai FEF tertinggi. Penelitian Ivorra dan Rubinky (2007), juga menunjukkan bahwa keberadaan sudut tajam pada elektroda menyebabkan terjadinya *field enhancement*, yaitu peningkatan konsentrasi medan listrik pada daerah tertentu. Hasil simulasi pada penelitian ini memperlihatkan kecenderungan yang sama, di mana peningkatan nilai FEF pada geometri segitiga diikuti dengan meningkatnya nilai medan listrik maksimum.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ramachandran *et.al* (2021), yang menyatakan bahwa representasi geometri pada model FEM sangat menentukan akurasi distribusi medan listrik yang diperoleh. Mereka menunjukkan bahwa semakin kompleks bentuk geometri yang digunakan, semakin besar variasi distribusi medan listrik yang dihasilkan. Pada penelitian ini, geometri poligon tidak beraturan menghasilkan pola distribusi medan listrik yang berbeda dibandingkan geometri sederhana seperti lingkaran dan persegi, meskipun seluruh parameter simulasi dipertahankan tetap. Selain itu, penelitian Dehaan dan Sontag (2003), melaporkan bahwa elektroda dengan permukaan yang lebih halus menghasilkan distribusi medan listrik yang lebih homogen dibandingkan elektroda yang memiliki sudut tajam. Hasil tersebut sesuai dengan nilai IHM yang diperoleh pada penelitian ini, di mana geometri persegi panjang memiliki tingkat homogenitas tertinggi. Visualisasi streamline dan kontur potensial listrik yang dihasilkan dalam penelitian ini juga memiliki pola yang serupa dengan hasil simulasi yang dilaporkan oleh Trosan *et.al* (2024), yang menunjukkan bahwa metode FEM mampu menggambarkan distribusi medan listrik secara konsisten melalui representasi numerik maupun visual.

Dibandingkan dengan penelitian terdahulu, penelitian ini memiliki kebaruan pada pendekatan yang digunakan. Sebagian besar penelitian sebelumnya hanya membandingkan dua hingga lima variasi geometri elektroda atau berfokus pada satu parameter medan listrik saja. Penelitian ini membandingkan sepuluh variasi geometri elektroda dalam satu skenario simulasi yang menggunakan kondisi batas, beda potensial, ukuran domain, permitivitas medium, dan ukuran *mesh* yang identik. Selain itu, evaluasi tidak hanya dilakukan terhadap nilai medan listrik maksimum, tetapi juga melibatkan medan listrik rata-rata, *Field Enhancement Factor* (FEF), Indeks Homogenitas Medan (IHM), distribusi potensial listrik, *heatmap* medan listrik, vektor medan listrik, *streamline* garis gaya listrik, serta kontur isopotensial. Pendekatan tersebut memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai pengaruh bentuk geometri terhadap karakteristik distribusi medan listrik sehingga dapat menjadi referensi dalam proses perancangan elektroda untuk berbagai aplikasi teknik.

Secara praktis, hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam menentukan bentuk elektroda sesuai dengan kebutuhan aplikasi. Geometri yang menghasilkan nilai *Field Enhancement Factor* tinggi dapat digunakan pada aplikasi yang memerlukan konsentrasi medan listrik, seperti aktuator elektrostatik, sistem pelepasan muatan listrik, dan perangkat mikroelektronika. Sebaliknya, geometri yang menghasilkan nilai Indeks Homogenitas Medan tinggi lebih sesuai untuk aplikasi yang memerlukan distribusi medan listrik yang seragam, seperti sensor kapasitif, sistem isolasi tegangan tinggi, serta perangkat biomedis berbasis medan listrik. Informasi yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam proses optimasi desain elektroda berbasis simulasi numerik sebelum dilakukan proses fabrikasi maupun pengujian eksperimental.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Model simulasi yang digunakan masih berupa model dua dimensi dengan asumsi kondisi elektrostatik, medium homogen dan isotropik, serta belum mempertimbangkan pengaruh temperatur, muatan ruang (*space charge*), maupun sifat material non linier. Selain itu, hasil penelitian belum divalidasi melalui eksperimen laboratorium sehingga masih terbatas pada analisis numerik. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan menggunakan model tiga dimensi, variasi jenis material dielektrik, kondisi medan listrik AC maupun *transien*, serta melakukan validasi eksperimental sehingga model yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi dan representasi yang lebih tinggi terhadap kondisi nyata.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis pengaruh variasi geometri elektroda berbentuk tidak beraturan terhadap distribusi medan listrik menggunakan *Finite Element Method* (FEM) melalui pendekatan pemodelan numerik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bentuk geometri elektroda memberikan pengaruh yang signifikan terhadap distribusi potensial listrik, distribusi medan listrik, nilai medan listrik maksimum, nilai medan listrik rata-rata, *Field Enhancement Factor* (FEF), dan Indeks Homogenitas Medan (IHM). Geometri dengan sudut tajam cenderung menghasilkan konsentrasi medan listrik yang lebih tinggi dan nilai FEF yang lebih besar, sedangkan geometri dengan permukaan yang lebih halus menghasilkan distribusi medan listrik yang lebih homogen. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan geometri elektroda merupakan faktor penting dalam mengendalikan karakteristik distribusi medan listrik sehingga dapat dijadikan dasar dalam optimasi desain elektroda untuk berbagai aplikasi, seperti sistem tegangan tinggi, sensor kapasitif, perangkat mikroelektronika, aktuator elektrostatik, dan perangkat biomedis. Penelitian ini masih terbatas pada simulasi dua dimensi dengan asumsi medium homogen, kondisi elektrostatik, dan belum divalidasi melalui pengujian eksperimental, sehingga penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan model tiga dimensi, mempertimbangkan variasi material dielektrik dan kondisi medan listrik dinamis, serta melakukan validasi eksperimen untuk meningkatkan akurasi dan memperluas penerapan hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Alim, M. (2025). Pengaruh bentuk geometri dan jenis logam elektroda terhadap tegangan tembus minyak isolasi transformator. (2021). *Jurnal Teknik Elektro dan Informatika*, 17(1), 1–10.

Alim, M. (2025). Pengaruh Bentuk Geometri dan Jenis Logam Elektroda Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Trafo pada Elektroda Seragam. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, *13*(3S1).

Čorović, S., Pavlin, M., & Miklavčič, D. (2007). Analytical and numerical quantification and comparison of the local electric field in the tissue for different electrode configurations. *Biomedical engineering online*, *6*(1), 37.

Dehaan, M. J., & Sontag, A. C. (2003). Finite-element modeling of needle electrodes in tissue from the perspective of frequent model computation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 50(11), 1221–1232.

Greamaldy, G., Kurnianto, R., & Gani, U. A. Analisis Distribusi Medan Listrik Pada Kabel Bawah Tanah N2XSY 1 x 630 mm2 Yang Mengandung Void Dengan Menggunakan Femm. *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, *9*(1).

Griffiths, D. J. (2017). *Introduction to electrodynamics* (4th ed.). Cambridge University Press.

Hadi, S. P. (2011). Pemetaan Elektroporasi Pada Jaringan Biologis Terpapar Denyut Listrik (Electroporation Mapping on Electric Pulse Exposed Biological Tissue). *Journal of People and Environment*, *18*(3), 212-219.

Hayani, N. M., Girsang, H. D., Nabila, N., Gunawan, K. P., Manuella, N. P., Qonita, M., ... & Rafhida, S. A. (2026). Simulasi Propagasi Sinyal Wi-Fi Menggunakan Metode Elemen Hingga pada Ruangan Kompleks dengan Variasi Posisi Router. *Techno. com*, *25*(1), 197.

Hussain, G. A., Hassan, W., Mahmood, F., Shafiq, M., Rehman, H., & Kay, J. A. (2023). Review on partial discharge diagnostic techniques for high voltage equipment in power systems. *IEEE Access*, *11*, 51382-51394.

Ivorra, A., & Rubinsky, B. (2007). Analytical and numerical quantification and comparison of the local electric field and current density in electroporation. *Bioelectrochemistry*, 70(2), 286–291.

Jin, J. (2014). *The finite element method in electromagnetics* (3rd ed.). Wiley.

Pratiwi, A. I., & Asri, M. (2021). Analisis Tegangan Tembus Dan Hidrofobisitas Isolator Nano Komposit Resin Epoksi Dan SiO2. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, *3*(2), 89-93.

Ramachandran, R. P., Jothi, V., Neamathulla, M. I., Pachamuthu, S., Sankaranarayanan, K., & Sundararajan, R. (2021). Electric Field Distribution Study of Hexagonal and Pentagonal Electrode Geometries. *Recent Developments in Medicine and Medical Research Vol. 2*, 117-127.

Sadiku, M. N. O. (2021). *Elements of electromagnetics* (8th ed.). Oxford University Press.

Sijabat, J. P., & Rajagukguk, M. (2020). Simulasi Distribusi Potensial Dan Medan Listrik Pada Kabel Bawah Tanah Menggunakan Femm. *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, *8*(1).

Simbolon, S., Silalahi, R. O., Zalukhu, M. S., & Sinaga, D. J. (2025). Analisis Sensitivitas Geometri Sirip (Sheds) Isolator Long-Rod Polimer terhadap Konsentrasi Medan Listrik

Maksimum (E_max) Menggunakan Metode Beda Hingga (FDM). *Jurnal Ilmiah Penelitian Mahasiswa*, *3*(6), 278-287.

Trosan, D., Walther, P., McLaughlin, S., Salvi, D., Mazzeo, A., & Stapelmann, K. (2024). Analysis of the effects of complex electrode geometries on the energy deposition and temporally and spatially averaged electric field measurements of surface dielectric barrier discharges. *Plasma Processes and Polymers*, *21*(2), 2300133.

Troughton, J. G., Ansong Snr, Y. O., Duobaite, N., & Proctor, C. M. (2023). Finite element analysis of electric field distribution during direct current stimulation of the spinal cord: implications for device design. *APL bioengineering*, *7*(4).