

# Optimasi Desain Isolator Komposit Tegangan Tinggi Menggunakan Metode Elemen Hingga

Awansah<sup>1\*</sup>, Diah Permata<sup>2</sup>, Herman H. Sinaga<sup>3</sup>, Nining Purwasih<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Lampung

Email: <sup>1</sup>awansah.mt@gmail.com, <sup>2</sup>diah.permata@eng.unila.ac.id, <sup>3</sup>herman.h.sinaga@eng.unila.ac.id, <sup>4</sup>ning.purwasih@eng.unila.ac.id

\*Penulis Korespondensi

**Abstract** — High voltage composite insulators play a critical role in the reliability of electrical transmission and distribution systems. One of the key factors affecting the electrical performance of composite insulators is the electric field distribution along their surface. High electric field concentrations near the metal end fittings can trigger corona discharge, partial discharge, and premature degradation of the insulation system. This study analyzes the effect of metal end fitting radius variations and the addition of zinc oxide (ZnO) grading material on the electric field distribution of an 11 kV composite insulator using the Finite Element Method (FEM) with COMSOL Multiphysics software. Three configurations were evaluated: Configuration-1 with a 1 mm fitting radius, Configuration-2 with a 2 mm fitting radius, and Configuration-3 with a 2 mm fitting radius incorporating ZnO grading material inserted between the FRP core and the silicone rubber housing. The simulation results show that increasing the fitting radius from 1 mm to 2 mm reduces the peak tangential electric field at the high voltage end from  $2.7917 \times 10^5$  V/m to  $2.246 \times 10^5$  V/m, and at the ground end from  $3.0518 \times 10^5$  V/m to  $2.4828 \times 10^5$  V/m. The addition of ZnO grading material on Configuration-3 further reduces the electric field to  $2.241 \times 10^5$  V/m at the high voltage end and  $2.4822 \times 10^5$  V/m at the ground end. These findings confirm that optimizing the fitting end geometry combined with ZnO grading material effectively improves the electric field distribution and contributes to enhanced long-term insulator performance.

**Keywords** — Composite insulator, metal end fitting, electric field distribution, ZnO grading material, finite element method.

**Intisari**— Isolator komposit tegangan tinggi memegang peran penting dalam keandalan sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik. Salah satu faktor kritis yang mempengaruhi kinerja listrik isolator komposit adalah distribusi medan listrik di sepanjang permukaannya. Konsentrasi medan listrik yang tinggi di dekat fitting ujung logam dapat memicu korona, pelepasan muatan parsial, dan degradasi dini sistem insulasi. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi radius fitting ujung logam dan penambahan material grading seng oksida (ZnO) terhadap distribusi medan listrik pada isolator komposit 11 kV menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM) dengan perangkat lunak COMSOL Multiphysics. Tiga konfigurasi dievaluasi, yaitu Konfigurasi-1 dengan radius fitting 1 mm, Konfigurasi-2 dengan radius fitting 2 mm, dan Konfigurasi-3 dengan radius fitting 2 mm yang dilengkapi material grading ZnO yang disisipkan di antara inti FRP dan selubung karet silikon. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan radius fitting dari 1 mm menjadi 2 mm menurunkan puncak medan listrik tangensial pada ujung tegangan tinggi dari  $2,7917 \times 10^5$  V/m menjadi  $2,246 \times 10^5$  V/m, dan pada ujung ground dari  $3,0518 \times 10^5$  V/m menjadi  $2,4828 \times 10^5$  V/m. Penambahan material grading ZnO pada Konfigurasi-3 semakin menurunkan nilai medan listrik menjadi  $2,241 \times 10^5$  V/m pada ujung tegangan tinggi dan

$2,4822 \times 10^5$  V/m pada ujung ground. Hasil ini membuktikan bahwa optimasi geometri fitting ujung yang dikombinasikan dengan material grading ZnO secara efektif memperbaiki distribusi medan listrik dan berkontribusi pada peningkatan kinerja isolator komposit dalam jangka panjang.

**Kata Kunci** — Isolator komposit, fitting ujung logam, distribusi medan Listrik, material grading ZnO, metode elemen hingga

## I. PENDAHULUAN

Sistem Tenaga Listrik merupakan suatu system yang menyalurkan energi Listrik dari pusat pembangkit sampai ke pelanggan [1]. Pada saat ini, masyarakat sangat bergantung pada pasokan daya listrik yang stabil dan berkelanjutan [2,3]. Hal ini dapat diwujudkan melalui desain dan pembuatan peralatan yang tepat untuk pembangkitan, transmisi, dan distribusi tenaga listrik. Isolator tegangan tinggi merupakan salah satu komponen krusial dalam sistem tenaga listrik, terutama pada jaringan transmisi dan distribusi [4]. Di antara berbagai jenis isolator yang tersedia, isolator porselen dan kaca paling banyak digunakan untuk isolasi saluran transmisi dan distribusi. Namun, dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan isolator polimer atau komposit mulai menggantikan isolator porselen dan kaca untuk aplikasi luar ruangan pada jaringan tegangan tinggi [5].

Keunggulan isolator polimer antara lain bobot yang lebih ringan, tidak mudah hancur, bersifat hidrofobik, tahan terhadap radiasi ozon dan ultraviolet, tahan terhadap guncangan gempa, memiliki sifat self-cleaning, serta tahan terhadap vandalisme [6]. Isolator polimerik umumnya terbuat dari bahan komposit seperti karet silikon dan EPDM (Ethylene Propylene Dien Monomer). Namun demikian, material polimerik rentan terhadap perubahan kimiawi ketika terpapar berbagai tegangan layanan, seperti tekanan listrik, mekanik, dan lingkungan, termasuk berbagai bentuk curah hujan dan polusi [7].

Isolator tegangan tinggi harus mampu menahan tegangan listrik maupun mekanik. Di antara keduanya, tegangan listrik merupakan faktor yang sangat penting untuk dipertimbangkan baik dalam kondisi operasi normal maupun kondisi gangguan akibat petir dan switching. Medan listrik yang tinggi pada fitting ujung logam menimbulkan tegangan listrik yang dapat memicu korona dan loncatan listrik permukaan, yang pada akhirnya dapat menyebabkan degradasi dini. Dalam kondisi yang parah, flashover isolasi secara menyeluruh dapat terjadi.

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan distribusi medan listrik pada isolator komposit. Kuat medan listrik di dekat kedua ujung isolator komposit meningkat pada kondisi tertentu dan menyebabkan terjadinya pelepasan muatan parsial. Adanya metode baru

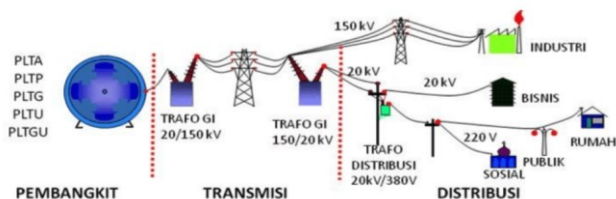
perancangan isolator tiang komposit dengan fitting atas yang terbuat dari material isolasi yang menghasilkan kuat medan listrik hingga lima kali lebih rendah dibandingkan desain konvensional berbahan konduktor.

Dari berbagai penelitian yang telah dilakukan dimensi fitting ujung logam terbukti menjadi salah satu faktor dominan yang menentukan karakteristik isolator komposit. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis pengaruh variasi konfigurasi fitting ujung logam terhadap distribusi medan listrik pada isolator komposit 11 kV. Selain itu digunakan material grading seng oksida (ZnO) di antara inti FRP dan selubung karet silicon untuk meningkatkan performa isolator. Komputasi Medan Listrik dilakukan menggunakan perangkat lunak COMSOL Multiphysics yang menerapkan metode elemen hingga (FEM) dua dimensi (2D) simetri aksial.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik merupakan suatu sistem yang terdiri dari tiga komponen utama seperti pembangkitan, saluran/jaringan, dan beban, yang saling terhubung untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pelanggan. Dalam jaringan terdapat jaringan transmisi dan distribusi [8].



Gambar 1. Sistem Tenaga Listrik

Jaringan transmisi dan distribusi menggunakan tegangan tinggi maupun extra tinggi untuk menyalurkan energi Listrik ke beban. Hal tersebut bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya yang timbul dari jaringan. Namun, tegangan yang dinaikkan sampai ke puluhan sampai ratusan kilovolt menimbulkan masalah baru yaitu harus adanya penggunaan isolator tegangan tinggi. Penggunaan isolator dimaksudkan sebagai keandalan sistem maupun keselamatan manusia dan peralatan.

### B. Isolator Tegangan Tinggi

Isolator tegangan tinggi adalah komponen yang berfungsi sebagai penghalang listrik dan penopang mekanis antara konduktor bertegangan dan struktur menara atau tiang yang terhubung ke tanah. Performa dari isolator mempengaruhi keandalan jaringan transmisi dan distribusi pada sistem tenaga listrik, sehingga pemilihan jenis dan material isolator menjadi aspek kritis dalam perencanaan jaringan tegangan tinggi.

Isolator tegangan tinggi dibedakan menjadi tiga berdasarkan material penyusunnya yaitu isolator porselen, isolator kaca, dan isolator komposit [9].

#### - Isolator Porselen

Isolator porselen adalah jenis isolator yang paling banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik. Isolator ini memiliki kekuatan mekanik tinggi, ketahanan terhadap fluktuasi suhu, dan resistivitas listrik yang sangat baik. Namun, isolator

porselen memiliki beberapa kelemahan seperti permukaannya yang halus dan hidrofilik (mudah dibasahi) menyebabkan pembentukan lapisan air yang kontinu di permukaan saat kondisi lembap atau hujan, sehingga meningkatkan aliran bocor permukaan. Selain itu, beratnya bobot isolator porselen menyulitkan proses transportasi dan instalasi, terutama pada jalur jaringan di lokasi terpencil. Isolator porselen juga rentan terhadap kerusakan akibat vandalisme karena karakteristiknya yang rapuh.



Gambar 2. Isolator Porselen

#### - Isolator Kaca

Isolator kaca yang digunakan umumnya adalah kaca temper (toughened glass) yang telah menjalani perlakuan panas khusus untuk meningkatkan kekuatan mekanis dan ketahanan terhadap kejutan termal. Keunggulan utama isolator kaca dibandingkan isolator porselen adalah transparansinya, yang memungkinkan inspeksi visual kondisi isolator dari jarak jauh tanpa memerlukan pendekatan langsung. Kerusakan pada isolator kaca, seperti retakan atau pecahan akibat tekanan mekanis atau sambaran petir, dapat segera teridentifikasi secara visual. Selain itu, isolator kaca memiliki karakteristik permukaan yang lebih resisten terhadap akumulasi polutan dibandingkan dengan porselen. Namun, sama halnya seperti isolator porselen, isolator kaca memiliki kelemahan berupa berat, sifat rapuh, dan permukaan hidrofilik yang memfasilitasi pembentukan lapisan air penghubung dalam kondisi lembab.



Gambar 3. Isolator Kaca

#### - Isolator komposit

Isolator ini penggunaannya terus meningkat seiring dengan kemajuan teknologi material polimer. Isolator komposit terdiri dari tiga komponen utama: batang inti sebagai penopang mekanis utama, selubung polimer beserta sirip-sirip yang melindungi inti dari kondisi lingkungan dan menyediakan jarak rambat yang memadai, serta fitting ujung logam yang terpasang pada kedua ujung isolator sebagai penghubung mekanis ke konduktor dan struktur menara.



Gambar 4. Isolator Polimer

Keunggulan isolator komposit dibandingkan isolator keramik konvensional meliputi bobot yang jauh lebih ringan, sifat hidrofobik yang dapat menular ke lapisan polutan di permukaan, ketahanan terhadap vandalisme, ketahanan terhadap guncangan gempa bumi, kemudahan pemasangan, serta kemampuan self-cleaning dalam kondisi tertentu. Namun, isolator komposit memiliki kelemahan, yaitu kerentanan terhadap degradasi kimia akibat paparan jangka panjang terhadap tegangan listrik, polusi, dan kondisi lingkungan ekstrem, yang dapat mengakibatkan erosi permukaan, pelacakan, dan penurunan sifat hidrofobik secara bertahap.

C. Distribusi Medan Listrik pada Isolator

Medan listrik timbul akibat dari beda potensial antara muatan listrik pada dua titik. Partikel-partikel bermuatan jika berada pada medan listrik maka akan mempunyai energi potensial.

Distribusi medan listrik pada isolator dianalisis berdasarkan persamaan yang diturunkan dari hukum Maxwell. Distribusi potensial listrik di dalam domain isolasi memenuhi persamaan Laplace atau persamaan Poisson sebagai berikut:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1)$$

dari definisi D yaitu

$$D = \epsilon E \quad (2)$$

dimana  $\epsilon$  adalah permitivitas material. Medan listrik E kemudian diperoleh dari gradien negative potensial listrik:

$$E = -\nabla V \quad (3)$$

Kemudain dengan substitusi didapatkan:

$$\nabla \cdot D = \rho = \nabla(\epsilon E) = -\nabla(\epsilon \nabla V) \quad (4)$$

atau,

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (5)$$

Persamaan di atas berlaku untuk daerah serba sama dengan  $\epsilon$  tetap.

Operasi  $\nabla \cdot \nabla$  disingkat  $\nabla^2$  (dibaca “del kuadrat”) yang merupakan turunan parsial orde ke 2 dalam koordinat

Cartesian dan jika  $\rho = 0$  yang menunjukkan bahwa kerapatan muatan ruang sama dengan nol, tetapi membiarkan muatan titik, muatan garis dan kerapatan muatan ruang permukaan terdapat pada perbatasan sebagai sumber medan, maka

$$\nabla^2 V = 0 \quad (6)$$

merupakan persamaan Laplace. Operasi  $\nabla^2$  disebut Laplacian dari V.

D. Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga merupakan sebuah cara untuk memecahkan persamaan differensial, dikembangkan pertama kali untuk analisis tegangan dan regangan pada system kompleks. Namun kini metode elemen hingga digunakan untuk menemukan Solusi dalam memecahkan persamaan differensial maupun persamaan integral.

Prinsip dari metode elemen hingga Adalah membagi arus kerja menjadi elemen-elemen kecil yang jumlahnya berhingga sehingga dapat dihitung reaksi akibat beban pada kondisi batas yang diberikan. Dari elemn-elemen tersebut dapat disusun persamaan-persamaan matriks yang bisa diselesaikan secara numerik dan hasilnya menjadi jawaban dari kondisi beban yang diberikan pada area kerja tersebut. Persamaan medan Listrik biasanya berupa persamaan Poisson dan Laplace yang merupakan jenis persamaan diferensial parsial.

- Keuntungan penggunaan FEM dalam Pemodelan
  - a. Kecepatan
    - Dapat diaplikasikan pada matriks yang jarang digunakan.
    - Disesuaikan dengan kerapatan mata jala
  - b. Akurasi
    - Menggunakan diskretisasi domain dengan kualitas tinggi
    - Mampu mengurangi gangguan
    - Pengaruhnya sedikit terhadap Batasan dan regulasi pada akurasi Solusi.
    - Algoritma yang sesuai untuk kasus non-linier.
  - c. Fleksibilitas
    - Pemodelan yang akurat pada geometris 2D dan 3D yang kompleks.
    - Memungkinkan aplikasi sederhana pada keadaan batas yang berbeda.
    - Memungkinkan templatng mata jala elemen hingga dan penempatan ulang titik simpul untuk pencitraan dinamis.
- Langkah-langkah Pemecahan Metode Elemen Hingga
  - a. Diskretisasi
 

Diskretisasi daerah menjadi elemen-elemen hingga. Dalam dua dimensi, pembentukan elemen-elemen hingga biasanya berbentuk polygon, dimana polygon yang paling sederhana Adalah segitiga dan segiempat.
  - b. Pendekatan Fungsi Potensial dalam elemen
 

Proses mencari nilai potensial pada setiap sudut elemen hasil diskretisasi.
  - c. Penggabungan Elemen
 

Energi total yang berhubungan dengan gabungan semua elemen dalam domain sama dengan jumlah keseluruhan dari energi tiap elemen.
  - d. Permasalahan kondisi Batas

Setelah menggabungkan semua elemen dalam domain Solusi untuk mendapatkan perilaku global dari suatu permasalahan, kemudian dimasukkan ke dalam perhitungan keadaan kondisi batas.

**E. Material Grading ZnO**

Seng oksida (ZnO) merupakan material semikonduktor tipe-n dengan struktur kristal wurtzite yang memiliki sifat kelistrikan unik berupa karakteristik tegangan-arus nonlinear. Sifat nonlinear ini menjadikan ZnO sangat efektif sebagai material grading pada isolator tegangan tinggi karena kemampuannya dalam merespons perubahan medan listrik berada di bawah tegangan ambang batas, ZnO berperilaku seperti isolator dengan konduktivitas yang sangat rendah. Namun ketika medan listrik lokal meningkat melampaui nilai ambang batasnya, konduktivitas ZnO meningkat secara dramatis sehingga arus konduksi yang terbentuk mendistribusikan kembali tegangan listrik secara lebih merata di sepanjang permukaan isolator.

Dalam aplikasi isolator komposit, material grading ZnO umumnya digunakan dalam bentuk komposit mikrovaristor yang terdiri dari partikel ZnO dengan aditif seperti Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub>, CoO, dan Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang diproses melalui sintering pada suhu tinggi. Penambahan aditif ini membentuk lapisan batas butiran (grain boundary) yang berperan sebagai sambungan p-n mikro yang memberikan karakteristik varistor nonlinear pada material komposit. Penggunaan lapisan ZnO setebal 1 mm yang disisipkan di antara inti FRP dan selubung karet silikon telah terbukti efektif dalam merelaksasi konsentrasi medan listrik pada daerah ujung fitting logam tanpa menambah bobot maupun dimensi keseluruhan isolator secara signifikan.

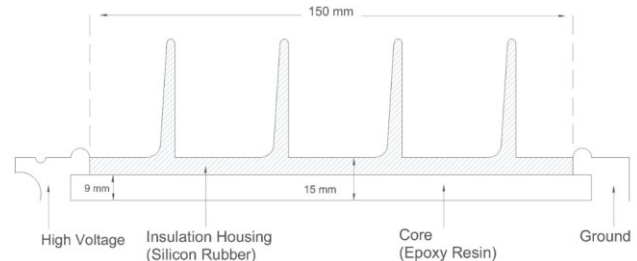
**III. METODE PENELITIAN**

**A. Model dan Parameter Desain Isolator**

Penelitian ini menggunakan model asimetri aksial dua dimensi (2D) untuk mensimulasikan isolator komposit. Analisis elemen hingga dilakukan menggunakan modul electric current (ec) pada perangkat lunak COMSOL Multiphysics. Pada penelitian ini digunakan tegangan tinggi sebesar 11 kV yang diberikan pada isolator komposit tegangan tinggi dengan parameter desain yang berbeda. Parameter dan dimensi dari model isolator yang digunakan dapat dilihat pada tabel 1 dan gambar 1.

Tabel 1. Parameter Desain

Parameter Desain	Nilai (mm)
Jarak Antar Sirip	30
Diameter Sirip	80
Jarak Rambut	450
Panjang Inti	190
Tebal Inti	9



Gambar 5. Struktur dari Isolator Komposit

Tegangan sebesar 11 kV diberikan pada elektroda bagian atas (Terminal tegangan tinggi) sedangkan elektroda bagian bawah dihubungkan ke tanah (ground). Konduktivitas dan permitivitas merupakan parameter yang diperlukan untuk simulasi isolator. Parameter material diperlihatkan pada tabel II.

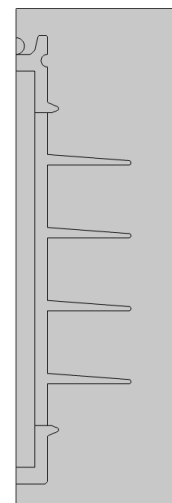
Tabel II. Parameter Material yang digunakan untuk Model Isolator

Material	Permitivitas Relatif	Konduktivitas
Udara	1	$1.0 \times 10^{-13}$
Forged Steel	1	$5.9 \times 10^7$
Silikon Rubber	4.3	$1.0 \times 10^{-13}$
Epoksi resin	3.5	$1.0 \times 10^{-13}$
ZnO	12	$1.0 \times 10^{-6}$

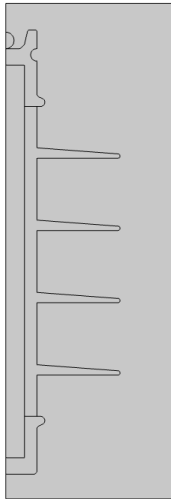
**B. Konfigurasi Model Isolator**

Dalam penelitian ini, tiga model konfigurasi dirancang dan dibandingkan yaitu:

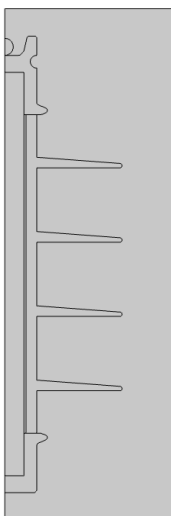
- Konfigurasi-1: Isolator komposit dengan radius ujung fitting logam sebesar 1mm.
- Konfigurasi-2: Isolator komposit dengan radius ujung fitting logam sebesar 2mm.
- Konfigurasi-3: Isolator komposit dengan penambahan material grading ZnO.



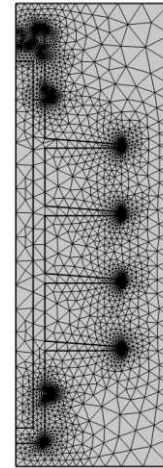
Gambar 6. Model Isolator dengan Konfigurasi-1



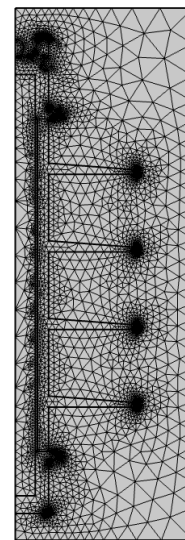
Gambar 7. Model Isolator dengan Konfigurasi-2



Gambar 8. Model Isolator dengan Konfigurasi-3



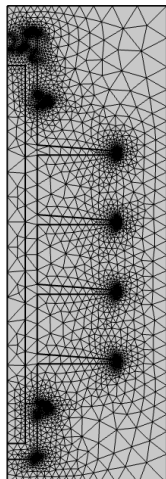
Gambar 10. Free triangle mesh dari model isolator konfigurasi-2



Gambar 11. Free triangle mesh dari model isolator konfigurasi-3

C. Fungsi Mesh dan Kondisi Batas

Mesh segitiga dengan model simetri aksial 2D digunakan dalam analisis ini. Jenis mesh dipilih berdasarkan bentuk geometri dan kondisi batas model. Kondisi batas diterapkan dengan memberikan tegangan 11 kV pada elektroda atas sebagai sumber tegangan tinggi, sedangkan elektroda bawah ditetapkan sebagai ground.

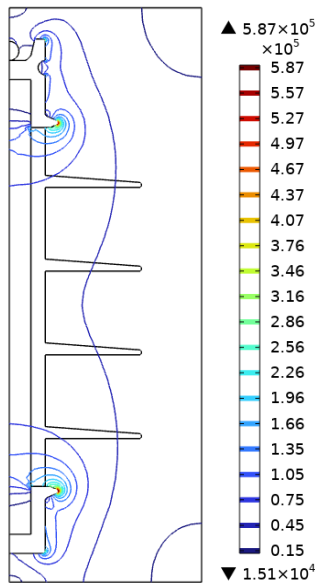


Gambar. 9 Free triangle mesh dari model isolator konfigurasi-1

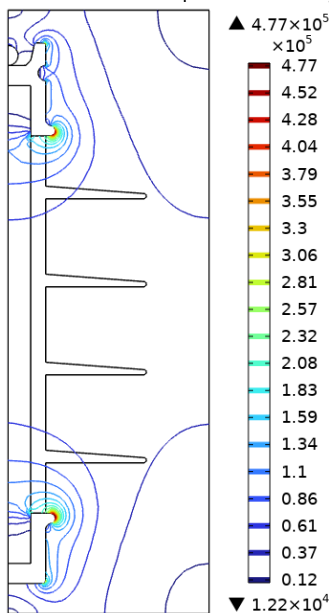
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Distribusi Medan Listrik

Analisis distribusi medan listrik pada Konfigurasi-1 dan Konfigurasi-2 dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi dimensi fitting ujung logam terhadap pola distribusi medan listrik di sepanjang permukaan isolator komposit. Distribusi medan listrik divisualisasikan dalam bentuk peta kontur medan listrik pada penampang melintang isolator, sedangkan nilai medan listrik diplot sepanjang jalur rambat dari ujung tegangan tinggi menuju ujung ground.



Gambar 12. Distribusi Medan Listrik pada isolator dengan konfigurasi-1



Gambar 13. Distribusi Medan Listrik pada isolator dengan konfigurasi-2

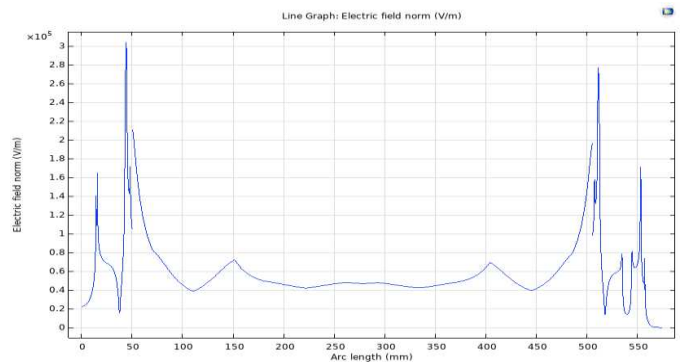
Hasil simulasi distribusi medan listrik pada permukaan isolator Konfigurasi-1 menunjukkan bahwa nilai medan listrik puncak terkonsentrasi di dekat fitting ujung logam pada terminal tegangan tinggi maupun terminal ground. Tingginya nilai medan listrik di sekitar daerah tersebut disebabkan oleh dimensi fitting yang kecil sehingga gradien medan menjadi sangat tajam di sekitar ujung fitting. Kondisi ini berpotensi memicu inisiasi korona dan pelepasan muatan parsial yang dapat mempercepat degradasi isolator.

Pada Konfigurasi-2, distribusi medan listrik memperlihatkan penurunan besaran medan listrik maksimum di dekat fitting ujung dibandingkan Konfigurasi-1. Peningkatan dimensi fitting ujung memberikan efek perataan gradien medan listrik di sekitar daerah kritis, karena permukaan fitting yang lebih luas mendistribusikan kerapatan fluks listrik secara lebih merata. Perbandingan kedua konfigurasi ini menunjukkan bahwa fitting dengan dimensi lebih besar secara efektif mampu mengurangi konsentrasi tegangan listrik di dekat ujung isolator.

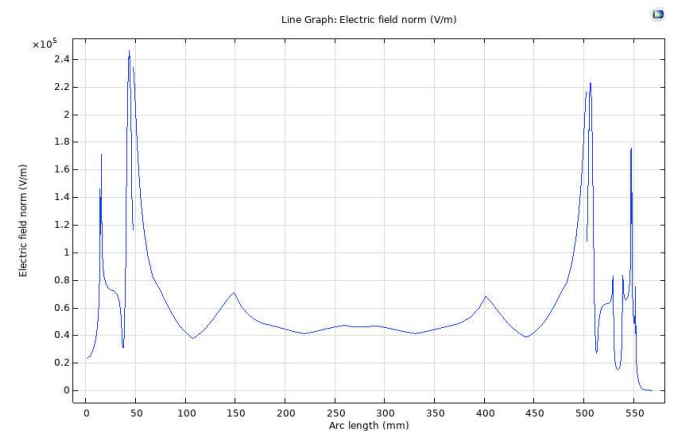
*B. Profil Medan Listrik Tangensial Sepanjang Jalur Rambut*

Distribusi medan listrik tangensial sepanjang jalur rambut dianalisis untuk kedua konfigurasi. Jarak antara kedua fitting ujung didefinisikan sebagai jalur rambut, dan pengukuran dilakukan pada permukaan polimer dari ujung tegangan tinggi menuju ujung ground.

Pada kedua gambar menunjukkan bahwa Konfigurasi-2 dengan fitting 2 mm menghasilkan distribusi medan listrik tangensial yang lebih baik dibandingkan Konfigurasi-1, dengan penurunan puncak medan listrik di kedua ujung isolator. Hal ini membuktikan bahwa fitting ujung dengan dimensi yang lebih besar dan tepi yang lebih lebar mampu mereduksi tegangan listrik dan menampilkan kinerja listrik yang lebih baik.



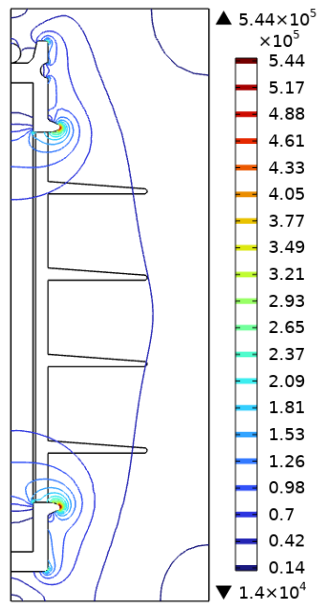
Gambar 14. Distribusi Medan Listrik Tangensial pada seluruh permukaan isolator dengan konfigurasi-1



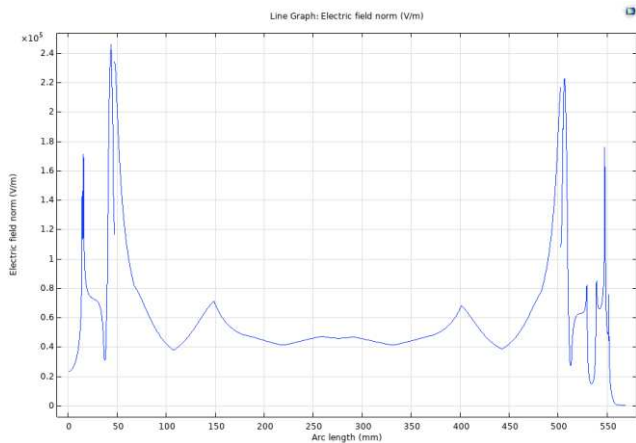
Gambar 15. Distribusi Medan Listrik Tangensial pada seluruh permukaan isolator dengan konfigurasi-2

*C. Pengaruh Material Grading ZnO terhadap Medan Listrik*

Penambahan material grading ZnO pada Konfigurasi-3 menurunkan besaran medan listrik di dekat ujung tegangan tinggi dan ujung ground dibandingkan Konfigurasi-2 yang memiliki dimensi fitting sama namun tanpa material grading. Hasil distribusi medan listrik menunjukkan bahwa gradien medan listrik yang tinggi di dekat kedua ujung isolator mengalami penurunan, sehingga distribusi medan listrik di sepanjang keseluruhan permukaan isolator komposit menjadi lebih merata.



Gambar 16. Distribusi Medan Listrik pada Isolator dengan konfigurasi-3



Gambar 17. Distribusi Medan Listrik Tangensial pada seluruh permukaan isolator dengan konfigurasi-3

Tabel III. Perbandingan Medan Listrik Tangensial

Model	High Voltage end (V/m) *10 <sup>5</sup>	Ground End (V/m) *10 <sup>5</sup>
Konfigurasi-1	2,7917	3,0518
Konfigurasi-2	2,246	2,4828
Konfigurasi-3	2,241	2,4822

Perbandingan nilai Medan listrik tangensial antara Konfigurasi-1 dan Konfigurasi-2 dapat dilihat pada Tabel III. Konfigurasi-2 dengan radius fitting 2 mm berhasil menurunkan nilai medan listrik pada ujung tegangan tinggi sebesar 19,55% dibandingkan Konfigurasi-1, yaitu dari  $2,7917 \times 10^5$  V/m menjadi  $2,246 \times 10^5$  V/m. Pada ujung ground, penurunan yang terjadi sebesar 18,65%, yaitu dari  $3,0518 \times 10^5$  V/m menjadi  $2,4828 \times 10^5$  V/m. Penurunan ini membuktikan bahwa peningkatan radius fitting ujung logam memberikan dampak yang nyata terhadap redistribusi medan listrik, khususnya pada daerah kritis di sekitar ujung isolator.

Penurunan medan listrik pada Konfigurasi-2 disebabkan oleh bertambahnya luasan permukaan fitting ujung logam yang berinteraksi dengan medium di sekitarnya. Fitting dengan radius lebih besar memiliki kelengkungan permukaan yang

lebih kecil sehingga kerapatan muatan permukaan yang terbentuk di tepi fitting menjadi lebih rendah. Hal ini sesuai dengan prinsip elektrostatik bahwa kerapatan medan listrik berbanding terbalik dengan jari-jari kelengkungan permukaan konduktor. Dengan demikian, fitting ujung dengan geometri yang lebih membulat dan berdimensi lebih besar secara konsisten menghasilkan distribusi medan listrik yang lebih merata dan nilai puncak yang lebih rendah dibandingkan fitting berdimensi kecil.

Perbandingan antara Konfigurasi-2 dan Konfigurasi-3 dilakukan untuk mengevaluasi secara khusus kontribusi material grading ZnO terhadap perbaikan distribusi E-field. Kedua konfigurasi ini memiliki dimensi fitting ujung yang identik, yaitu radius 2 mm, sehingga perbedaan hasil simulasi yang diperoleh secara eksklusif mencerminkan pengaruh penambahan lapisan ZnO setebal 1 mm di antara inti FRP dan selubung karet silikon.

Mekanisme kerja material grading ZnO dalam meratakan distribusi E-field dapat dijelaskan melalui sifat konduktivitas nonlinearnya. Pada daerah di mana E-field lokal tinggi, seperti di sekitar ujung fitting, ZnO merespons dengan meningkatkan konduktivitasnya sehingga sebagian energi medan listrik disalurkan melalui arus konduksi yang terbentuk. Arus ini kemudian mendistribusikan muatan ke daerah yang memiliki E-field lebih rendah, sehingga terjadi efek perataan distribusi E-field secara aktif di sepanjang permukaan isolator [10]. Mekanisme self-regulating ini menjadi keunggulan utama ZnO dibandingkan material grading konvensional yang bersifat pasif, karena kemampuan responnya yang adaptif terhadap perubahan kondisi operasi.

### V. KESIMPULAN

Hasil simulasi distribusi medan listrik pada isolator komposit 11 kV menggunakan metode elemen hingga (FEM) dengan perangkat lunak COMSOL Multiphysics menunjukkan bahwa dimensi radius fitting ujung logam berpengaruh signifikan terhadap distribusi medan listrik. Peningkatan radius fitting dari 1 mm menjadi 2 mm mampu menurunkan puncak medan listrik tangensial pada ujung tegangan tinggi dari  $2,7917 \times 10^5$  V/m menjadi  $2,246 \times 10^5$  V/m, dan pada ujung ground dari  $3,0518 \times 10^5$  V/m menjadi  $2,4828 \times 10^5$  V/m. Fitting ujung dengan dimensi yang lebih besar terbukti efektif dalam mendistribusikan kerapatan medan listrik secara lebih merata.

Penambahan material grading ZnO pada Konfigurasi-3 semakin menurunkan nilai puncak medan listrik tangensial pada ujung tegangan tinggi menjadi  $2,241 \times 10^5$  V/m dan pada ujung ground menjadi  $2,4822 \times 10^5$  V/m, yang merupakan nilai terendah di antara ketiga konfigurasi yang diuji. Kombinasi optimasi geometri fitting ujung logam 2 mm dengan material grading ZnO menghasilkan distribusi medan listrik yang paling optimal, sehingga berkontribusi pada pengurangan risiko korona, pelepasan muatan parsial, dan degradasi dini pada material insulasi yang dapat meningkatkan performa isolator komposit tegangan tinggi sehingga dapat berpengaruh pada kestabilan sistem tenaga.

### REFERENSI

[1] F. Y. Setyadi, D. Nugroho, A. A. Nugroho, "Analisa Peramalan Beban pada Gardu Induk 150 kV Mranggan dengan Metode Regresi Linier dan Ekspensial," JTE UNIBA, vol. 8, no.2, hal. 419-431, 2024.

- [2] H. Ikbal, A. Syofian, S. Amalia, dan A. Y. Dewi, "Analisa Perencanaan Switchgear 20 kV Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) Trans Padang," JTE UNIBA, vol. 10, no. 1, hal. 665-672, 2025.
- [3] A. Goro, A. B. Muljono, N. M. Seniari, "Identifikasi Tegangan Transien Akibat Surja Petir pada SUTT Menggunakan Software EMTP," JTE UNIBA, vol. 10, no. 2, hal. 698-705, 2025.
- [4] A. Solihin, dan O. A. Rozak, "Prototype Monitoring Temperatur dan Tekanan Minyak Transformator Distribusi dengan SCADA LabVIEW," JTE UNIBA, vol. 9, no. 1, hal. 486-495, 2024.
- [5] N. Murugan, G. Sharmila, dan G. Kannayeram, "Design Oprimization of High Voltage Composite Insulator Using Electric Field Computation," ICCPCT-2013, hal. 315-320.
- [6] R. A. Rifai, A. H. Mansour, dan M. A. H. Ahmed, "Estimation of the Electric Field and Potensial Distribution on Three Dimension Model of Polymeric Insulator Using Finite Element Method," IJEDR, vol. 3, issue 2, hal. 694-705, 2015.
- [7] X. Tan, Y. Liu, N. Sun, dan W. Zhang, "Insulator-Integrated Voltage-Current Sensor Based on Electric Field Coupling and Tunneling Magnetoresistance Technology," MDPI, hal. 1-23, 2025.
- [8] I. M. Y. Negara, I. G. N. S. Hernanda, D. A. Asfani, M. K. Wardani, B. K. Yegar, dan R. Syahril, "Effect of Seawater and Fly Ash Contaminants on Insulator Surfaces Made of Polymer Based on Finite Element Method," MDPI, hal. 1-21, 2021.
- [9] M. G. Mardika, T. A. Puri, Suwarna, M. Walch, U. Schicler, dan G. Godel, "High Voltage Test on 245 kV Post Insulators with Different Materials," ICITEE, hal. 394-397, 2015.
- [10] M. M. Ali, A. Nugroho, dan A. Syakur, "Pembuatan Dan Analisis Pengaruh Kondisi Permukaan Terhadap Unjuk Kerja Isolator Polimer 20 Kv Tipe Sirip Tak Seragam Dengan Variasi Tegangan Uji," TRANSIENT, vol. 6, no. 3, hal. 396-403, 2017.
- [11] Julaipah, M. T. Prasetyo, "Efektifitas Pemanfaatan Arang Bonggol Jagung Sebagai Filler Komposit Resin Epoksi Untuk Isolator Listrik," UNIMUS, vol. 5, hal. 180-188, 2022.
- [12] R. Kartono, M. Harlanu, dan A. Suryanto, "Pemanfaatan Isolasi Resin Epoksi Sebagai Upaya Meningkatkan Kualitas Penyaluran Energi Listrik Ditinjau Dari Karakteristik Hidrofobik," SAINTEKNOL, vol. 10, no. 1, hal. 76-83, 2012.
- [13] I. M. Y. Negara, D. A. Asfani, D. Fahmi, "The Electrical Characteristics of Medium Voltage Insulators Against Contaminants at Coastal Area," IJIE, vol. 13, no. 6, hal. 265-274, 2021.
- [14] S. B. Walukow, S. Manjang, F. A. Samman, dan Z. Zainuddin, "Comparison of Leak Flow Insulator Resin Epoksi Fly Ash Fillers and Ash Rice Husk for Outside Pairs," ICAST, hal. 503-509, 2018.
- [15] F. C. Priambada, A. Syakur, Hermawan, "Analisis Unjuk Kerja Isolator Polimer 20 Kv Resin Epoksi Bahan Pengisi Sio<sub>2</sub> (Silicone Dioxide) Dengan Sirip Seragam Pada Kondisi Konduktivitas Yang Bervariasi," TRANSIENT, vol. 10, no. 2, hal. 300-306, 2021.