

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan sistem tenaga listrik saat ini semakin pesat seiring meningkatnya kebutuhan energi listrik yang harus disalurkan secara andal, aman, dan efisien. Sistem tenaga listrik yang mencakup proses pembangkitan, transmisi, hingga distribusi dituntut mampu menjaga kontinuitas suplai serta kestabilan tegangan dalam berbagai kondisi operasi agar dapat memenuhi kebutuhan masyarakat maupun sektor industri (Ye et al., 2026). Selain peningkatan kapasitas penyaluran energi, sistem tenaga listrik juga harus memiliki tingkat keandalan yang tinggi untuk meminimalkan terjadinya gangguan yang dapat menyebabkan pemadaman, kerusakan peralatan, maupun penurunan kualitas daya listrik. Dalam sistem tenaga listrik, keberadaan sistem isolasi menjadi salah satu komponen yang sangat penting karena berperan dalam mencegah terjadinya aliran arus listrik ke bagian yang tidak diinginkan serta menjaga jarak isolasi antar penghantar maupun terhadap tanah (Verginadis et al., 2023). Sistem isolasi yang memiliki performa baik mampu mengurangi risiko terjadinya hubung singkat (*short circuit*), pelepasan muatan sebagian (*partial discharge*), hingga kegagalan isolasi (*electrical breakdown*) yang dapat mengganggu keandalan sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, pengembangan material isolasi dengan karakteristik dielektrik yang baik menjadi salah satu aspek penting dalam mendukung peningkatan keandalan sistem tenaga listrik.

Peran penting sistem isolasi juga sejalan dengan Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan, khususnya Pasal 44 ayat (1) dan ayat (2), yang menegaskan bahwa setiap instalasi tenaga listrik wajib memenuhi persyaratan keselamatan dan keandalan. Hal tersebut menunjukkan bahwa setiap komponen penyusun sistem tenaga listrik, termasuk isolator, harus memiliki karakteristik listrik dan mekanik yang baik agar mampu beroperasi secara aman selama masa layan. Oleh karena itu, pengembangan material isolator dengan karakteristik dielektrik yang lebih baik serta distribusi medan listrik yang lebih merata menjadi salah satu aspek penting dalam meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik (Vega & Kovscek, 2022).

Pada peralatan *indoor* seperti GIS dan *switchgear*, isolator tidak hanya berfungsi sebagai pemisah antar bagian yang bertegangan, tetapi juga berperan dalam mengatur

distribusi medan listrik. Jika distribusi medan listrik tidak merata, maka dapat terjadi penumpukan tegangan pada titik-titik tertentu, seperti di permukaan isolator atau pada daerah pertemuan material (*triple junction*)(Yang et al., 2024). Kondisi ini dapat memicu munculnya *partial discharge* (PD), yang dalam jangka panjang bisa merusak material isolator dan menyebabkan kegagalan sistem(Fahmi et al., 2024; Ye et al., 2026).

Secara umum, material isolator yang digunakan terdiri dari keramik, kaca, dan polimer. Isolator keramik dikenal kuat dan tahan terhadap suhu tinggi, namun cenderung berat dan mudah retak. Isolator kaca lebih mudah dalam mendeteksi kerusakan, tetapi cukup sensitif terhadap benturan. Sementara itu, isolator polimer seperti *epoxy resin* dan *silicone rubber* lebih ringan, fleksibel, dan memiliki kemampuan isolasi yang baik, namun masih memiliki kelemahan seperti mudah mengalami penuaan serta degradasi akibat fenomena listrik seperti *tracking* dan *electrical treeing*. Selain jenis material, bentuk atau desain geometris isolator juga sangat berpengaruh terhadap kinerjanya. Desain dengan bentuk yang tajam cenderung menyebabkan konsentrasi medan listrik, sedangkan bentuk yang lebih halus dapat membantu mendistribusikan medan listrik secara lebih merata(Melnyk et al., 2025). Oleh karena itu, optimasi desain menjadi hal penting untuk meningkatkan performa isolator. Untuk memahami distribusi medan listrik secara lebih detail, digunakan metode simulasi seperti *Finite Element Method (FEM)*. Metode ini memungkinkan analisis yang lebih akurat terhadap kondisi medan listrik pada berbagai desain isolator. Namun, penelitian yang menggabungkan pengaruh material dan desain geometris masih terbatas, padahal keduanya saling berkaitan(NURHAKIM et al., 2021).

Seiring dengan perkembangan teknologi material, kebutuhan akan material isolasi yang lebih ekonomis, ramah lingkungan, dan memiliki karakteristik dielektrik yang baik semakin meningkat. Salah satu alternatif yang mulai banyak diteliti adalah pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan pengisi (*filler*) pada material *silicone rubber*. Penggunaan *fly ash* tidak hanya mendukung pemanfaatan limbah industri, tetapi juga berpotensi meningkatkan karakteristik listrik material isolator. Namun demikian, pengaruh variasi komposisi *fly ash* terhadap distribusi medan listrik pada berbagai geometri isolator masih belum banyak dikaji. Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi komposisi fly ash dan variasi geometri terhadap distribusi *current density* dan

medan listrik maksimum (E_{max}) sebagai indikator performa isolator polimer (Huang et al., 2018).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana kombinasi antara variasi geometri dan permitivitas material mempengaruhi performa isolator dalam menekan konsentrasi medan listrik?
2. Bagaimana pengaruh penambahan *fly ash* pada material isolator polimer terhadap nilai permitivitas dan distribusi medan listrik?
3. Bagaimana hasil desain isolator pasang dalam (*indoor*) yang optimal berdasarkan simulasi comsol dengan mempertimbangkan distribusi medan listrik yang merata dan minim risiko kegagalan isolasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan di atas, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh kombinasi variasi geometri dan permitivitas material terhadap performa isolator dalam menekan konsentrasi medan listrik.
2. Mengkaji pengaruh penambahan *fly ash* pada material isolator polimer terhadap nilai permitivitas serta distribusi medan listrik.
3. Menentukan desain isolator pasang dalam (*indoor*) yang optimal berdasarkan hasil simulasi *COMSOL* dengan mempertimbangkan distribusi medan listrik yang merata dan meminimalkan risiko kegagalan isolasi.

1.4 Manfaat

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, manfaat mempelajari skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik tegangan tinggi, khususnya terkait pengaruh geometri dan permitivitas material terhadap distribusi medan listrik pada isolator.
2. Menjadi referensi dalam perancangan isolator pasang dalam (*indoor*) yang lebih optimal, sehingga dapat meningkatkan keandalan dan keamanan peralatan seperti GIS dan *switchgear*.

3. Memberikan alternatif penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengisi pada isolator polimer yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Dalam menyusun skripsi ini, agar pembahasan menjadi tertuju serta mendapatkan hasil yang diinginkan, oleh karena itu penulis perlu membuat batasan-batasan masalah yang akan diteliti. Adapun ruang lingkup masalah pada penulisan skripsi ini, yaitu :

1. Penelitian difokuskan pada isolator pasang dalam (*indoor*) pada peralatan tegangan tinggi seperti GIS dan *switchgear*, dengan analisis pada distribusi medan listrik.
2. Variasi yang dikaji meliputi desain geometris isolator dan sifat material polimer (*epoxy/silicone rubber*) dengan penambahan *fly ash* sebagai bahan pengisi, khususnya terhadap nilai permitivitas (ϵ_r).
3. Parameter data material *fly ash* diambil dari empat daerah yaitu Pangkep, Lombok, Bekasi, dan Suralaya untuk melihat pengaruh variasi lingkungan terhadap distribusi medan listrik isolator.
4. Analisis dilakukan menggunakan simulasi numerik berbasis *Finite Element Method (FEM)* dengan *COMSOL*, dengan parameter utama berupa distribusi medan listrik dan konsentrasi medan listrik pada area kritis

1.6 Kebaharuan

Sub bab ini akan membahas terkait kebaruan yang dijelaskan sebagai berikut:

Penelitian ini menawarkan kebaruan dengan mengkaji secara terintegrasi pengaruh variasi desain geometris dan sifat material, khususnya permitivitas, terhadap distribusi medan listrik pada isolator pasang dalam (*indoor*). Selain itu, penelitian ini mengembangkan penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengisi pada isolator polimer serta menganalisis pengaruhnya terhadap nilai permitivitas dan potensi konsentrasi medan listrik. Pendekatan yang digunakan berbasis simulasi numerik menggunakan *COMSOL (Finite Element Method/FEM)* untuk mengidentifikasi daerah kritis dan menentukan desain isolator yang optimal. Fokus pada kombinasi antara geometri, material komposit, dan aplikasi pada sistem *indoor* menjadi pembeda utama dibandingkan penelitian sebelumnya yang umumnya masih mengkaji aspek tersebut secara terpisah.

1.7 Hipotesis

Adapun hipotesis dari penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Kombinasi desain geometri yang optimal dan nilai permitivitas material yang sesuai dapat mengurangi konsentrasi medan listrik pada isolator.
2. Penambahan *fly ash* pada material isolator polimer dapat meningkatkan nilai permitivitas dan memperbaiki distribusi medan listrik.
3. Desain isolator hasil optimasi menggunakan simulasi *COMSOL* mampu menghasilkan distribusi medan listrik yang lebih merata dan menurunkan risiko terjadinya kegagalan isolasi.