

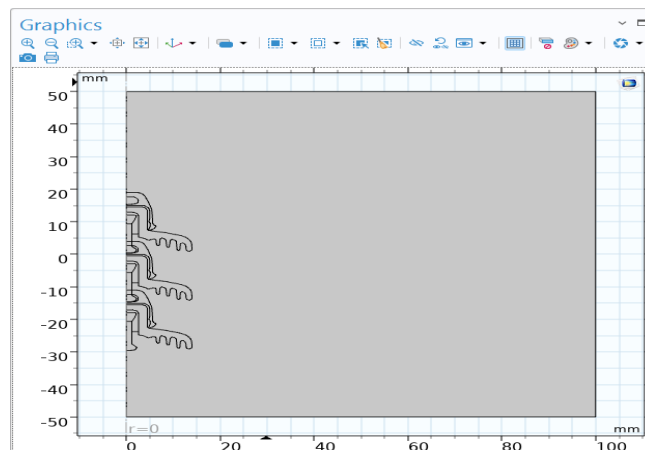
BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Dan Parameter Simulasi

4.1.1 Geometri isolator

Geometri isolator yang digunakan dalam penelitian ini dimodelkan menggunakan perangkat lunak *COMSOL Multiphysics*. Isolator yang digunakan merupakan isolator tarik tipe piring (*disc insulator*) yang tersusun dari 3 unit piring isolator yang dihubungkan secara seri.

Untuk mensimulasikan kondisi operasi yang mendekati keadaan sebenarnya, isolator ditempatkan di dalam domain udara berukuran $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$. Domain udara ini berfungsi sebagai media tempat terbentuk dan terdistribusinya medan listrik di sekitar isolator saat diberikan tegangan.



Gambar 4.1 Pemodelan Isolator

Pemodelan dilakukan menggunakan pendekatan *2D axisymmetric*, sehingga bentuk tiga dimensi isolator dapat direpresentasikan dengan lebih sederhana tanpa mengurangi akurasi hasil simulasi. Pada kondisi terpolusi, permukaan isolator diberikan lapisan abu batubara dengan ketebalan 0.1, 0.2 dan 0.3 mm. Lapisan ini digunakan untuk menggambarkan kontaminasi yang sering terjadi pada isolator yang beroperasi di lingkungan sekitar pembangkit listrik tenaga uap atau kawasan industri yang menghasilkan abu batubara. Geometri yang telah dibuat kemudian digunakan sebagai dasar dalam analisis distribusi medan listrik pada kondisi

isolator bersih maupun terpolusi menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)*.

4.1.2 Parameter simulasi

Simulasi pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak COMSOL Multiphysics untuk mengetahui distribusi medan listrik pada isolator tarik dalam kondisi bersih maupun terpolusi abu batubara. Analisis dilakukan menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)* pada modul Electrostatics.

Pada simulasi ini, elektroda sisi bawah diberikan tegangan sebesar 20 kV dengan frekuensi 50 Hz, sedangkan elektroda sisi atas dihubungkan ke ground. Isolator yang digunakan merupakan rangkaian isolator tarik tipe piring yang terdiri dari lima unit isolator. Untuk memperoleh hasil simulasi yang lebih representatif, isolator ditempatkan pada domain udara berukuran 1000 mm × 1000 mm. Kondisi polusi dimodelkan dengan menambahkan lapisan abu batubara pada permukaan isolator dengan ketebalan 0,1 mm. Lapisan ini diberikan variasi nilai konduktivitas untuk menggambarkan kondisi polusi kering, lembab, dan basah. Perubahan nilai konduktivitas tersebut digunakan untuk melihat pengaruhnya terhadap distribusi medan listrik yang terbentuk di sekitar isolator.

Sifat material yang digunakan dalam simulasi meliputi permitivitas relatif dan konduktivitas listrik dari udara, isolator, serta lapisan abu batubara. Parameter-parameter tersebut dipilih berdasarkan data yang diperoleh dari referensi dan penelitian terdahulu sehingga dapat mendekati kondisi sebenarnya. Parameter material isolator yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada

Tabel 4.1. Parameter konduktivitas isolator piring

Material	Permitivitas Relatif (ϵ_r)	Konduktivitas (S/m)
Udara	1	1×10^{-15}
Porselin	6	1×10^{-14}
Semen Portland	2.1	1×10^{-14}
Baja Galvanis	1×10^6	1.45×10^6

4.1.3 Kondisi Polusi Abu Batubara

Pada penelitian ini, kondisi polusi pada isolator dimodelkan menggunakan lapisan abu batubara (fly ash) yang ditempatkan pada permukaan isolator tarik. Lapisan polusi diberikan dengan ketebalan 0.1, 0.2 dan 0.3 mm untuk menggambarkan kondisi kontaminasi yang sering terjadi pada isolator yang beroperasi di lingkungan sekitar pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) maupun kawasan industri yang menghasilkan abu batubara. Untuk melihat pengaruh tingkat kelembaban terhadap distribusi medan listrik, lapisan abu batubara dimodelkan dalam tiga kondisi, yaitu kering, lembab, dan basah. Perbedaan ketiga kondisi tersebut direpresentasikan melalui variasi nilai konduktivitas listrik yang dimiliki oleh lapisan polusi.

Kondisi kering menggambarkan lapisan abu batubara yang memiliki kandungan air sangat rendah sehingga nilai konduktivitasnya relatif kecil. Kondisi ini merepresentasikan isolator yang beroperasi pada cuaca cerah atau lingkungan dengan kelembaban udara yang rendah.

Pada kondisi lembab, lapisan abu batubara diasumsikan telah menyerap sejumlah uap air dari lingkungan sekitar. Adanya kandungan air pada lapisan polusi menyebabkan nilai konduktivitas meningkat dibandingkan kondisi kering, sehingga sifat penghantaran listrik pada permukaan isolator menjadi lebih besar.

Sementara itu, kondisi basah menggambarkan lapisan abu batubara yang memiliki kandungan air paling tinggi. Kondisi ini dapat terjadi akibat pengaruh hujan, embun, atau kelembaban lingkungan yang tinggi. Meningkatnya kandungan air pada lapisan polusi menyebabkan nilai konduktivitas menjadi lebih besar sehingga dapat memengaruhi distribusi medan listrik pada permukaan isolator. Parameter permitivitas relatif dan konduktivitas listrik yang digunakan untuk setiap kondisi polusi ditentukan berdasarkan referensi dari penelitian terdahulu. Variasi nilai konduktivitas tersebut digunakan untuk menganalisis pengaruh tingkat polusi abu batubara terhadap distribusi medan listrik yang terbentuk pada isolator tarik. Parameter Abu batu bara yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.2. konduktivitas abu batubara

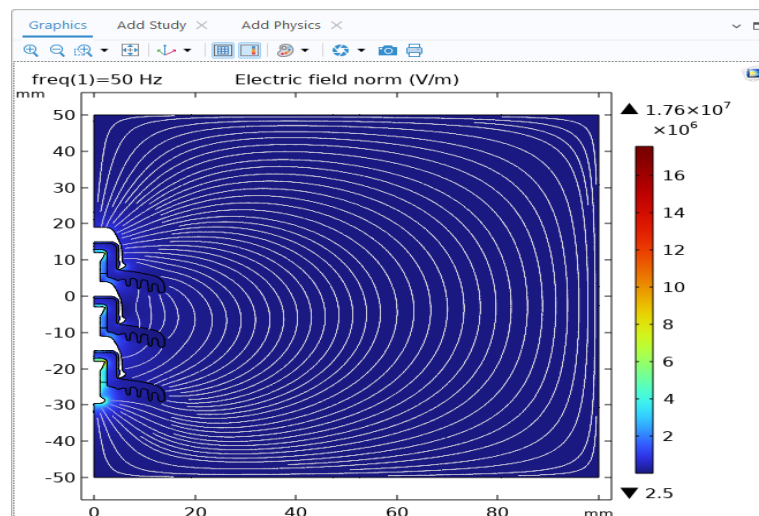
Kondisi	Permitivitas Relatif (ϵ_r)	Konduktivitas (S/m)
Kering	1.75	1×10^{-9}
Lembab	1.75	1×10^{-7}
Basah	1.75	1×10^{-5}

4.2 Distribusi Medan Listrik pada Isolator Tanpa Polusi

Pada tahap awal, simulasi dilakukan pada isolator piring dalam kondisi tanpa polusi atau permukaan isolator masih bersih. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui pola distribusi medan listrik yang terbentuk pada isolator sebelum diberikan lapisan polusi abu batubara. Hasil yang diperoleh dari kondisi ini kemudian digunakan sebagai acuan untuk membandingkan perubahan distribusi medan listrik pada kondisi isolator yang terpolusi.

4.2.1 Hasil Simulasi Distribusi Medan Listrik

Hasil simulasi distribusi medan listrik pada isolator tarik tanpa polusi ditunjukkan pada Gambar 4.2. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak COMSOL Multiphysics dengan frekuensi kerja 50 Hz untuk melihat bagaimana medan listrik terdistribusi pada isolator dalam kondisi bersih sebelum diberikan lapisan polusi abu Batubara. Hasil distribusi medan listrik pada permukaan isolator tanpa polusi ditunjukkan pada Gambar 4.2.



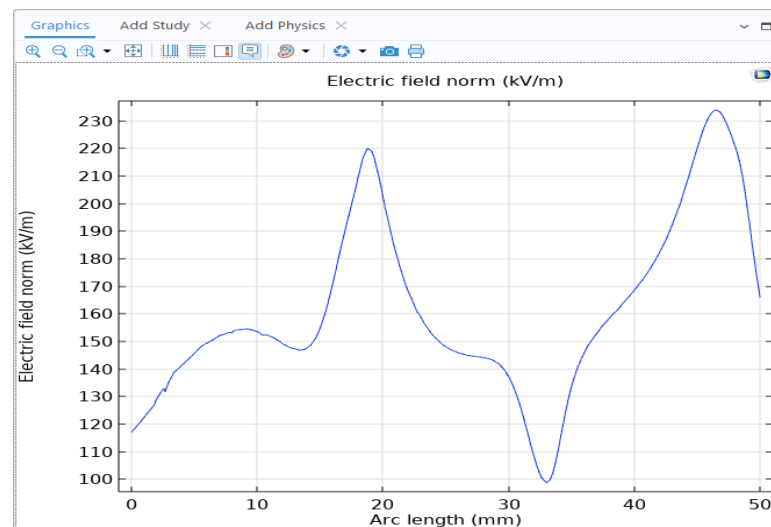
Gambar 4.2 Medan Listrik Tanpa Polusi

Berdasarkan hasil simulasi, terlihat bahwa distribusi medan listrik di sekitar isolator tidak tersebar secara merata. Medan listrik cenderung terkonsentrasi pada bagian yang berada di dekat elektroda dan fitting logam isolator. Hal ini ditunjukkan oleh warna yang lebih terang pada hasil kontur simulasi. Sementara itu, pada daerah yang semakin jauh dari sumber tegangan, nilai medan listrik terlihat semakin rendah yang ditunjukkan oleh dominasi warna biru. Selain itu, garis-garis medan listrik yang terbentuk menunjukkan arah penyebaran medan listrik dari daerah yang memiliki potensial tinggi menuju daerah yang memiliki potensial lebih rendah. Kerapatan garis medan listrik yang lebih tinggi pada bagian tertentu menunjukkan adanya konsentrasi medan listrik yang lebih besar pada area tersebut. Kondisi ini umumnya terjadi di sekitar komponen logam dan pada bagian isolator yang mengalami perubahan bentuk geometri.

Dari hasil simulasi diperoleh nilai medan listrik maksimum sebesar sekitar $1,76 \times 10^7$ V/m. Nilai maksimum tersebut berada pada daerah yang berdekatan dengan elektroda dan fitting logam isolator. Tingginya nilai medan listrik pada area tersebut menunjukkan bahwa bagian tersebut merupakan lokasi yang paling dipengaruhi oleh sumber tegangan yang diberikan. Sementara itu, nilai medan listrik semakin menurun pada daerah yang menjauhi isolator dan mendekati batas domain udara. Secara umum, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada isolator tanpa polusi masih mengikuti karakteristik dasar isolator tarik, di mana konsentrasi medan listrik terbesar terjadi pada bagian yang dekat dengan sumber tegangan. Hasil ini kemudian digunakan sebagai acuan untuk membandingkan perubahan distribusi medan listrik pada isolator yang telah diberikan lapisan polusi abu batubara dengan berbagai kondisi konduktivitas.

4.2.2 Analisis Nilai Medan Listrik pada Isolator Tanpa Polusi

Untuk melihat perubahan nilai medan listrik pada permukaan isolator secara lebih detail, dilakukan pengamatan sepanjang lintasan yang telah ditentukan pada permukaan isolator menggunakan fitur *Cut Line* pada COMSOL Multiphysics. Hasil pengamatan tersebut disajikan dalam bentuk grafik distribusi medan listrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik Medan Listrik Tanpa Polusi

Berdasarkan grafik tersebut, dapat dilihat bahwa nilai medan listrik pada permukaan isolator mengalami perubahan pada setiap titik pengamatan. Pada awal lintasan, nilai medan listrik berada pada kisaran 117 kV/m dan kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai sekitar 220 kV/m pada panjang lintasan sekitar 19 mm. Setelah itu, nilai medan listrik mengalami penurunan hingga mencapai titik terendah sebesar sekitar 100 kV/m pada panjang lintasan sekitar 33 mm.

Selanjutnya, nilai medan listrik kembali meningkat dan mencapai nilai tertinggi sebesar sekitar 233 kV/m pada panjang lintasan sekitar 47 mm. Setelah mencapai titik tersebut, nilai medan listrik kembali menurun hingga berada pada kisaran 167 kV/m pada akhir lintasan pengamatan.

Perubahan nilai medan listrik yang terjadi di sepanjang permukaan isolator menunjukkan bahwa distribusi medan listrik tidak tersebar secara merata. Kondisi ini dipengaruhi oleh bentuk geometri isolator yang menyebabkan medan listrik terkonsentrasi pada bagian-bagian tertentu. Selain itu, keberadaan fitting logam juga turut memengaruhi pola distribusi medan listrik sehingga terdapat daerah yang memiliki nilai medan listrik lebih tinggi dibandingkan daerah lainnya. Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa medan listrik pada isolator tanpa polusi masih mengikuti pola distribusi yang normal. Nilai medan listrik cenderung lebih tinggi pada bagian yang dekat dengan sumber tegangan dan menurun pada bagian yang lebih jauh. Hasil ini kemudian digunakan sebagai acuan untuk

membandingkan perubahan distribusi medan listrik pada isolator yang telah diberikan lapisan polusi abu batubara dengan kondisi kering, lembab, dan basah.

4.3 Pengaruh Variasi Konduktivitas dan Ketebalan Abu Batubara terhadap Distribusi Medan Listrik

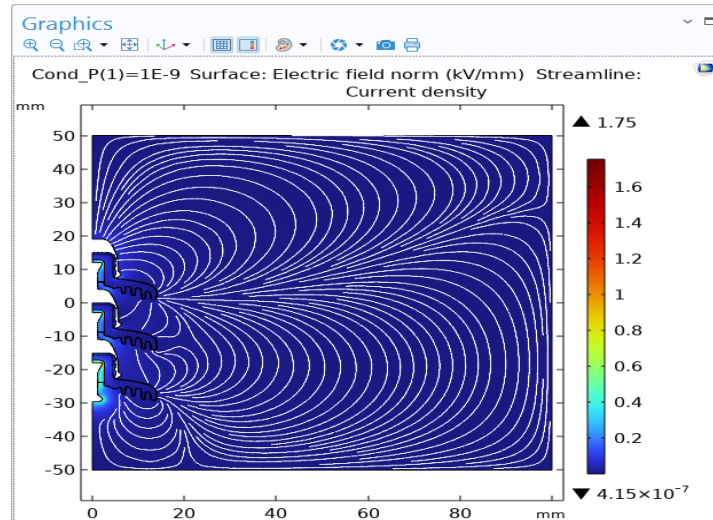
Setelah dilakukan simulasi pada kondisi isolator tanpa polusi, langkah selanjutnya adalah menganalisis pengaruh keberadaan lapisan abu batubara terhadap distribusi medan listrik pada isolator tarik. Pada penelitian ini, lapisan abu batubara dimodelkan dalam tiga kondisi, yaitu kering, lembab, dan basah. Selain itu, ketebalan lapisan polusi juga divariasikan sebesar 0,1 mm, 0,2 mm, dan 0,3 mm untuk melihat pengaruhnya terhadap distribusi medan listrik yang terbentuk.

Perbedaan kondisi polusi pada penelitian ini ditunjukkan melalui nilai konduktivitas listrik yang berbeda pada setiap kondisi. Kondisi kering memiliki nilai konduktivitas yang paling rendah, sedangkan kondisi basah memiliki nilai konduktivitas yang paling tinggi akibat adanya kandungan air yang lebih banyak pada lapisan polusi. Perbedaan nilai konduktivitas tersebut diperkirakan dapat memengaruhi pola distribusi medan listrik pada permukaan isolator. Selain faktor konduktivitas, ketebalan lapisan polusi juga menjadi salah satu parameter yang dianalisis. Semakin tebal lapisan abu batubara yang menempel pada permukaan isolator, maka semakin besar pula kemungkinan terjadinya perubahan distribusi medan listrik. Oleh karena itu, analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi konduktivitas dan ketebalan polusi terhadap karakteristik medan listrik yang terbentuk pada isolator piring.

4.3.1 Ketebalan Polusi 0,1 mm

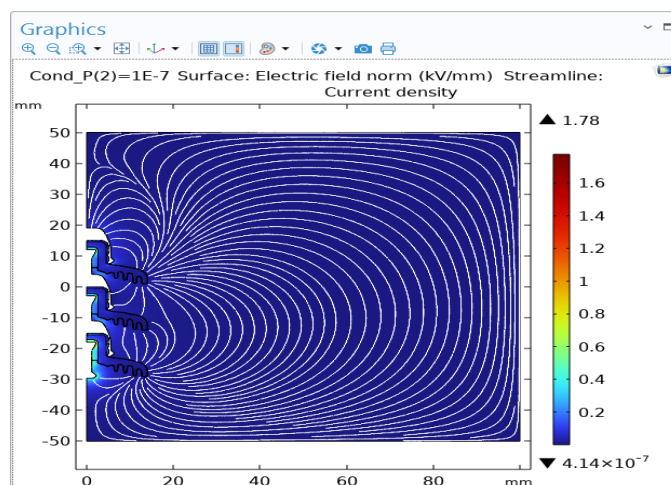
Pada variasi ketebalan polusi 0,1 mm, simulasi dilakukan untuk tiga kondisi polusi yang berbeda, yaitu kondisi kering, lembab, dan basah. Ketiga kondisi tersebut dibedakan berdasarkan nilai konduktivitas listrik lapisan abu batubara. Kondisi kering dimodelkan dengan konduktivitas sebesar 1×10^{-9} S/m, kondisi lembab sebesar 1×10^{-7} S/m, dan kondisi basah sebesar 1×10^{-5} S/m. Variasi

konduktivitas ini digunakan untuk menggambarkan perubahan karakteristik abu batubara akibat pengaruh kandungan air yang berbeda pada permukaan isolator.



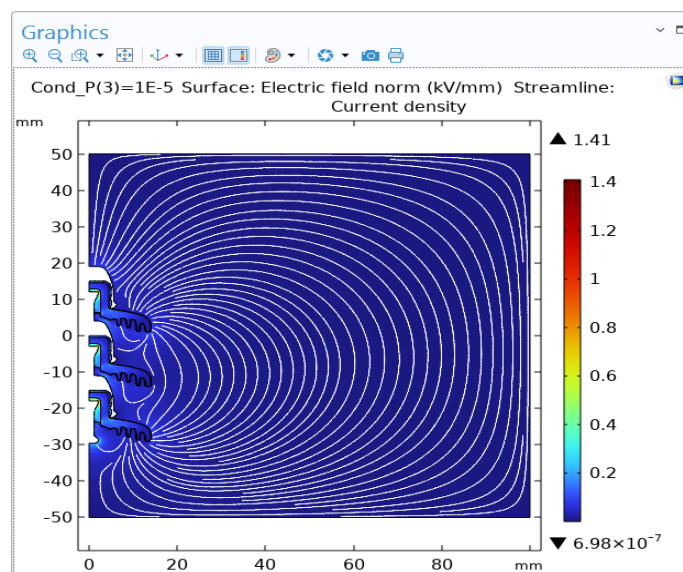
Gambar 4.4 Medan Listrik Kondisi Kering Ketebalan 0.1

Berdasarkan Gambar 4.4 distribusi medan listrik pada kondisi kering menunjukkan bahwa medan listrik masih terkonsentrasi pada daerah di sekitar fitting logam dan bagian ujung sirip isolator. Nilai medan listrik maksimum yang diperoleh dari hasil simulasi berada pada kisaran 17,5 kV/mm. Sebagian besar area domain udara memiliki nilai medan listrik yang relatif rendah yang ditunjukkan oleh warna biru tua. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi kering, lapisan polusi belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penyebaran medan listrik di sekitar isolator.



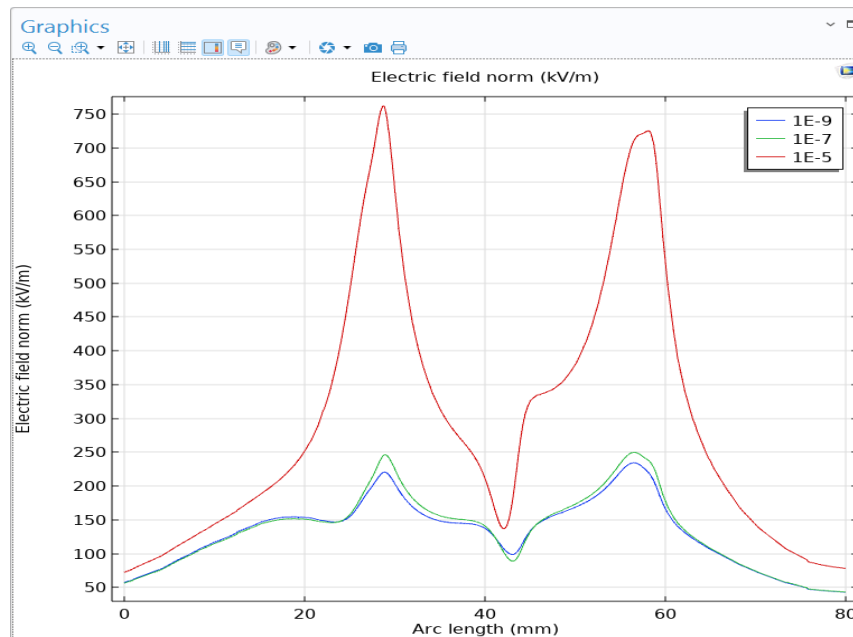
Gambar 4.5 Medan Listrik Kondisi Lembab Ketebalan 0.1

Pada kondisi lembab, pola distribusi medan listrik yang terbentuk masih relatif sama dengan kondisi kering. Konsentrasi medan listrik tetap berada pada daerah yang berdekatan dengan fitting logam dan permukaan isolator. Hasil simulasi menunjukkan nilai medan listrik maksimum sebesar sekitar 17,8 kV/mm. Nilai tersebut sedikit lebih tinggi dibandingkan kondisi kering. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konduktivitas dari 1×10^{-9} S/m menjadi 1×10^{-7} S/m mulai memberikan pengaruh terhadap distribusi medan listrik, meskipun perubahan yang terjadi masih relatif kecil.



Gambar 4.6 Medan Listrik Kondisi Basah Ketebalan 0.1

Berbeda dengan kondisi sebelumnya, pada kondisi basah terlihat adanya perubahan distribusi medan listrik yang lebih jelas. Nilai medan listrik maksimum yang diperoleh mencapai sekitar 14,1 kV/mm. Meskipun nilai maksimum pada kontur terlihat lebih rendah dibandingkan kondisi kering dan lembab, hasil grafik distribusi medan listrik menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi medan listrik pada beberapa titik pengamatan di sepanjang permukaan isolator. Kondisi ini menunjukkan bahwa meningkatnya konduktivitas lapisan polusi memengaruhi pola distribusi medan listrik sehingga terjadi perubahan konsentrasi medan listrik pada area tertentu. Untuk melihat perbedaan distribusi medan listrik pada ketiga kondisi secara lebih rinci, dilakukan analisis menggunakan grafik distribusi medan listrik sepanjang lintasan pengamatan pada permukaan isolator.



Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Distribusi Medan Listrik Ketebalan 0.1

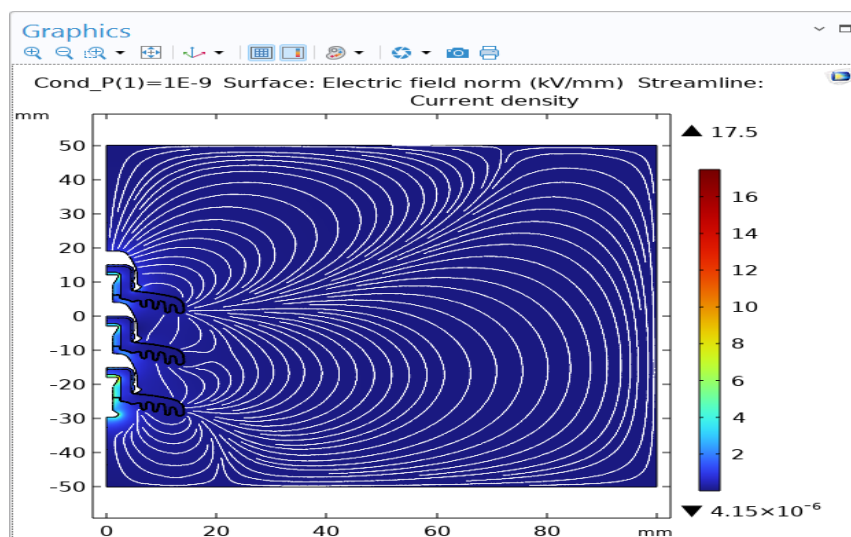
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.7 terlihat bahwa kondisi kering (1×10^{-9} S/m) dan kondisi lembab (1×10^{-7} S/m) memiliki pola distribusi medan listrik yang hampir sama. Kedua kurva menunjukkan kenaikan dan penurunan nilai medan listrik pada lokasi yang relatif serupa dengan nilai puncak yang tidak jauh berbeda. Nilai medan listrik maksimum pada kedua kondisi tersebut berada pada kisaran 220–250 kV/m.

Sementara itu, kondisi basah (1×10^{-5} S/m) menunjukkan perilaku yang berbeda secara signifikan. Kurva medan listrik mengalami peningkatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi kering dan lembab. Pada puncak pertama, nilai medan listrik mencapai sekitar 760 kV/m, sedangkan pada puncak kedua mencapai sekitar 720 kV/m. Nilai ini hampir tiga kali lebih besar dibandingkan kondisi kering dan lembab. Peningkatan medan listrik yang cukup signifikan pada kondisi basah menunjukkan bahwa konduktivitas lapisan polusi memiliki pengaruh yang besar terhadap distribusi medan listrik pada permukaan isolator. Semakin tinggi konduktivitas lapisan abu batubara, semakin mudah muatan listrik terdistribusi pada permukaan isolator sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan konsentrasi medan listrik pada beberapa titik tertentu. Kondisi ini berpotensi meningkatkan risiko terjadinya pelepasan muatan listrik pada permukaan isolator

apabila dioperasikan pada kondisi lingkungan dengan tingkat kelembaban yang tinggi.

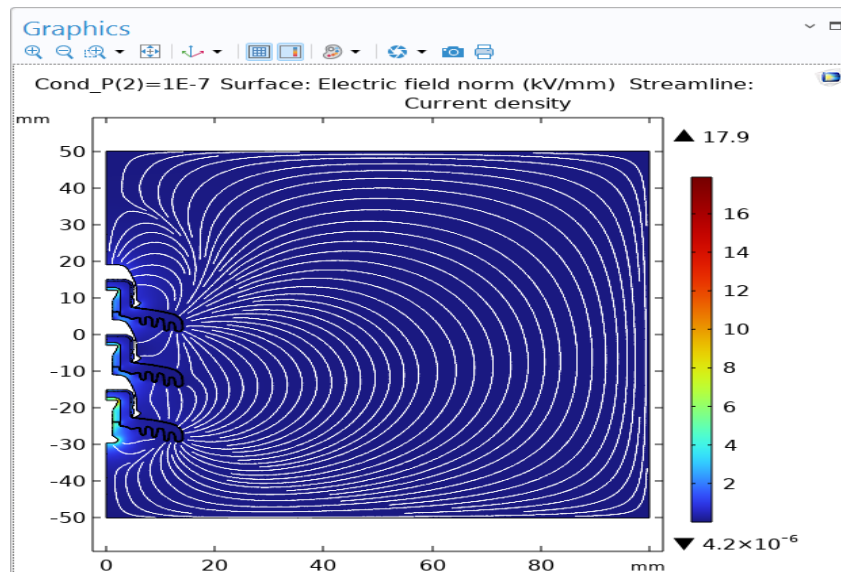
4.3.2 Ketebalan Polusi 0,2 mm

Pada variasi ketebalan polusi 0,2 mm, simulasi dilakukan untuk tiga kondisi polusi yang berbeda, yaitu kondisi kering, lembab, dan basah. Masing-masing kondisi direpresentasikan oleh nilai konduktivitas yang berbeda, yaitu 1×10^{-9} S/m untuk kondisi kering, 1×10^{-7} S/m untuk kondisi lembab, dan 1×10^{-5} S/m untuk kondisi basah. Variasi konduktivitas ini digunakan untuk mengetahui pengaruh kandungan air pada lapisan abu batubara terhadap distribusi medan listrik pada permukaan isolator.



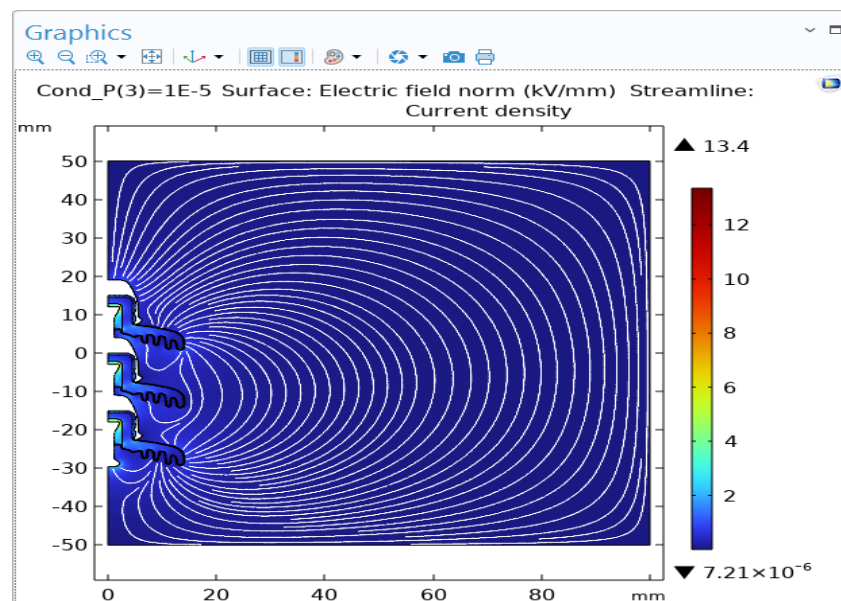
Gambar 4.8 Medan Listrik Kondisi Kering Ketebalan 0.2

Berdasarkan hasil simulasi pada kondisi kering, distribusi medan listrik masih terkonsentrasi pada daerah yang berada di sekitar fitting logam dan bagian ujung sirip isolator. Nilai medan listrik maksimum yang diperoleh mencapai sekitar 17,9 kV/mm. Sementara itu, sebagian besar domain udara di sekitar isolator menunjukkan nilai medan listrik yang relatif rendah yang ditandai dengan dominasi warna biru pada hasil kontur. Kondisi ini menunjukkan bahwa lapisan polusi dengan konduktivitas rendah belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penyebaran medan listrik pada permukaan isolator.



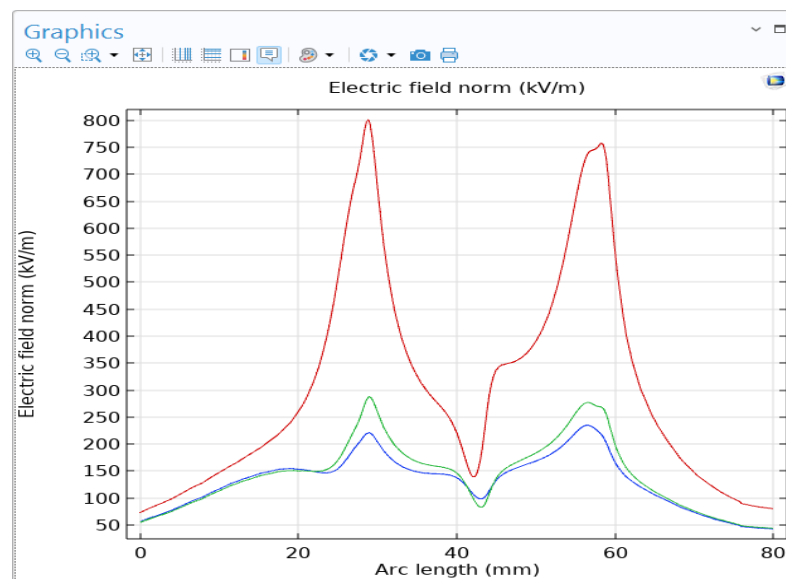
Gambar 4.9 Medan Listrik Kondisi Lembab Ketebalan 0.2

Pada kondisi lembab, pola distribusi medan listrik yang terbentuk masih memiliki karakteristik yang hampir sama dengan kondisi kering. Konsentrasi medan listrik masih terlihat pada daerah yang berdekatan dengan fitting logam dan sirip isolator. Namun demikian, terlihat adanya sedikit peningkatan intensitas medan listrik pada beberapa bagian permukaan isolator. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konduktivitas akibat adanya kelembaban mulai memberikan pengaruh terhadap distribusi medan listrik yang terbentuk.



Gambar 4.10 Medan Listrik Kondisi Basah Ketebalan 0.2

Pada kondisi basah, distribusi medan listrik menunjukkan perubahan yang lebih jelas dibandingkan kondisi kering dan lembab. Daerah dengan konsentrasi medan listrik terlihat lebih luas di sekitar permukaan isolator. Meskipun nilai maksimum pada kontur berada pada kisaran 13,4 kV/mm, penyebaran medan listrik di sekitar lapisan polusi terlihat lebih besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa meningkatnya konduktivitas lapisan abu batubara menyebabkan perubahan pola distribusi medan listrik pada permukaan isolator.



Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Distribusi Medan Listrik Tiga Kondisi Ketebalan 0.2

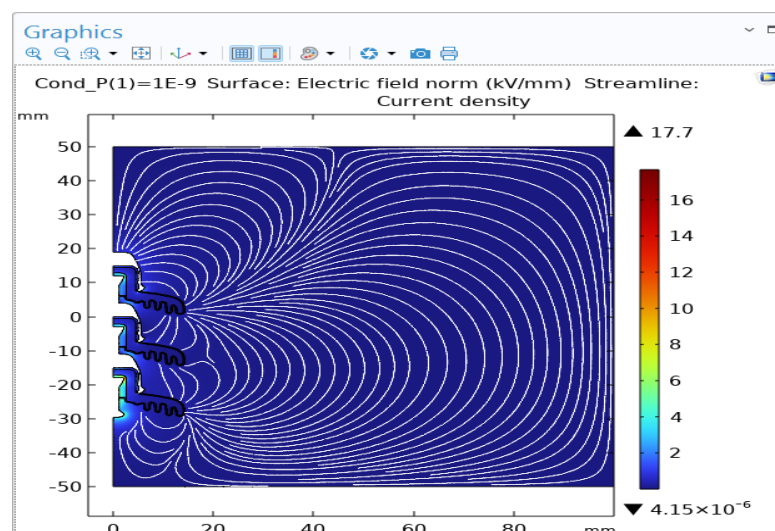
Untuk melihat pengaruh konduktivitas secara lebih rinci, dilakukan analisis terhadap grafik distribusi medan listrik pada ketiga kondisi polusi. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa kondisi kering dan lembab memiliki pola distribusi medan listrik yang relatif serupa. Kedua kurva menunjukkan kenaikan dan penurunan nilai medan listrik pada posisi yang hampir sama dengan perbedaan nilai yang tidak terlalu besar.

Pada kondisi kering, nilai medan listrik maksimum berada pada kisaran 220 kV/m. Ketika konduktivitas meningkat menjadi 1×10^{-7} S/m pada kondisi lembab, nilai medan listrik maksimum juga meningkat hingga sekitar 287 kV/m. Peningkatan ini menunjukkan bahwa bertambahnya konduktivitas lapisan polusi mulai memengaruhi distribusi medan listrik pada permukaan isolator.

Perubahan yang paling signifikan terjadi pada kondisi basah dengan konduktivitas 1×10^{-5} S/m. Pada kondisi ini, nilai medan listrik maksimum meningkat secara drastis hingga mencapai sekitar 800 kV/m pada puncak pertama dan sekitar 750 kV/m pada puncak kedua. Nilai tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi kering maupun lembab. Selain itu, bentuk kurva juga menunjukkan peningkatan yang lebih tajam pada beberapa titik pengamatan yang berada di sekitar sirip isolator. Hasil simulasi yang diperoleh, peningkatan konduktivitas lapisan abu batubara menyebabkan medan listrik menjadi lebih terkonsentrasi pada bagian tertentu dari permukaan isolator. Semakin tinggi nilai konduktivitas, semakin besar kemampuan lapisan polusi dalam menghantarkan muatan listrik sehingga distribusi medan listrik yang terbentuk menjadi lebih tidak merata. Kondisi ini menyebabkan nilai medan listrik pada beberapa titik mengalami peningkatan yang cukup signifikan.

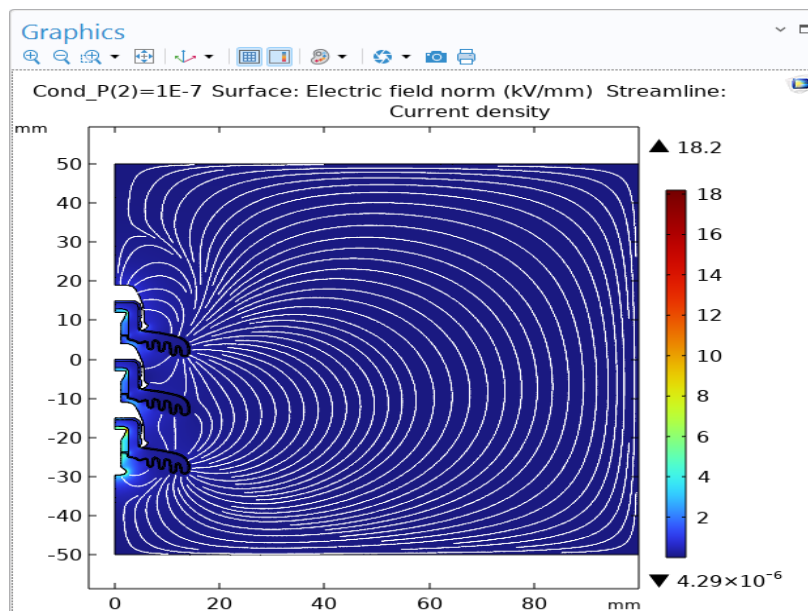
4.3.3 Ketebalan Polusi 0,3 mm

Pada variasi ketebalan polusi 0,3 mm, simulasi dilakukan pada tiga kondisi polusi yang berbeda, yaitu kondisi kering dengan konduktivitas 1×10^{-9} S/m, kondisi lembab dengan konduktivitas 1×10^{-7} S/m, dan kondisi basah dengan konduktivitas 1×10^{-5} S/m. Variasi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh peningkatan konduktivitas terhadap distribusi medan listrik pada isolator dengan ketebalan polusi yang lebih besar dibandingkan variasi sebelumnya.



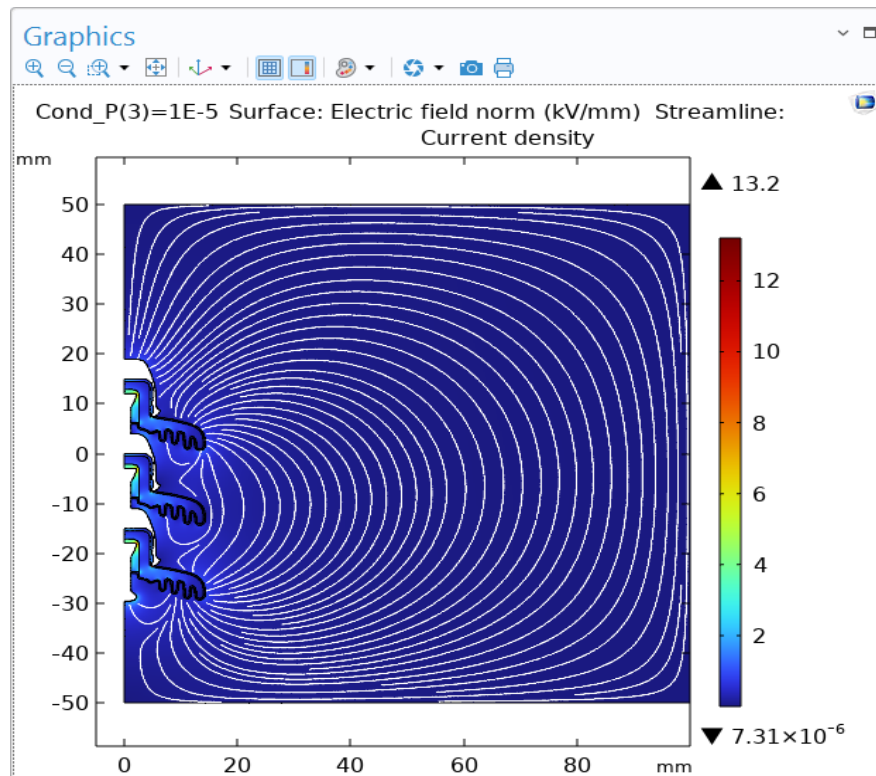
Gambar 4.12 Medan Listrik Kondisi Kering Ketebalan 0.3

Hasil simulasi pada kondisi kering, distribusi medan listrik masih terkonsentrasi pada daerah di sekitar fitting logam dan bagian ujung sirip isolator. Konsentrasi medan listrik terbesar terlihat pada fitting logam bagian bawah yang terhubung ke sisi pembumian (ground). Hal ini ditunjukkan oleh daerah berwarna biru muda hingga hijau yang lebih dominan dibandingkan area lainnya. Nilai medan listrik maksimum yang diperoleh pada kondisi ini mencapai sekitar 17,7 kV/mm. Sebagian besar daerah di luar isolator masih didominasi oleh warna biru tua yang menunjukkan bahwa medan listrik relatif rendah dan penyebarannya masih terbatas di sekitar permukaan isolator.



Gambar 4.13 Medan Listrik Kondisi Lembab Ketebalan 0.3

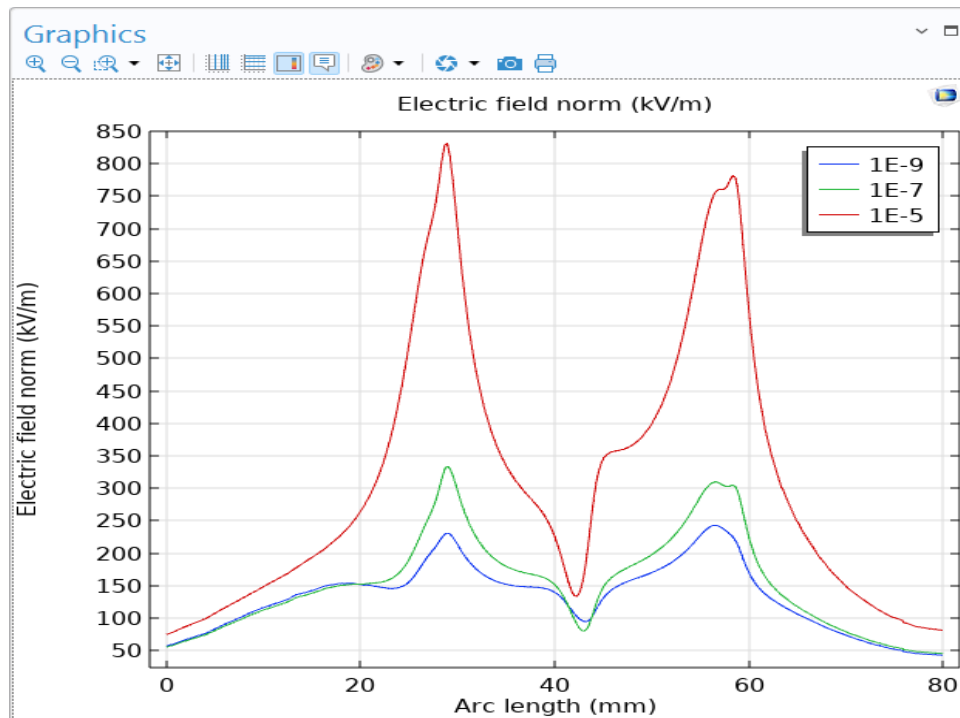
Pada kondisi lembab, pola distribusi medan listrik masih menunjukkan karakteristik yang hampir sama dengan kondisi kering. Konsentrasi medan listrik terbesar tetap berada pada daerah fitting logam dan ujung sirip isolator, khususnya pada unit isolator bagian bawah. Nilai medan listrik maksimum meningkat menjadi sekitar 18,2 kV/mm. Peningkatan nilai maksimum tersebut menunjukkan bahwa kenaikan konduktivitas mulai memberikan pengaruh terhadap distribusi medan listrik. Namun secara visual, perubahan pola distribusi medan listrik masih belum terlalu signifikan dibandingkan kondisi kering.



Gambar 4.14 Medan Listrik Kondisi Basah Ketebalan 0.3

Pada kondisi basah terlihat perubahan distribusi medan listrik yang lebih jelas dibandingkan kondisi kering dan lembab. Daerah dengan intensitas medan listrik yang lebih tinggi tampak menyebar lebih luas di sekitar permukaan isolator. Konsentrasi medan listrik tidak hanya berada pada fitting logam, tetapi juga mulai menyebar ke area sekitar sirip isolator. Walaupun nilai maksimum pada kontur terlihat sebesar sekitar 13,2 kV/mm, area yang mengalami konsentrasi medan listrik menjadi lebih luas dibandingkan dua kondisi sebelumnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan konduktivitas lapisan polusi akibat adanya kandungan air menyebabkan distribusi medan listrik menjadi lebih aktif pada permukaan isolator.

Dari ketiga gambar kontur yang diperoleh, dapat diamati bahwa konsentrasi medan listrik terbesar secara umum berada pada daerah fitting logam bagian bawah dan daerah pertemuan antara fitting logam dengan permukaan isolator. Area tersebut menjadi lokasi utama terjadinya penumpukan medan listrik karena adanya perubahan geometri dan perbedaan sifat material antara logam, isolator, dan lapisan polusi.



Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Distribusi Medan Listrik Tiga Kondisi Ketebalan 0.3

Hasil grafik yang diperoleh, terlihat bahwa kondisi kering dan lembab memiliki pola distribusi yang relatif mirip. Pada kedua kondisi tersebut, nilai medan listrik mengalami kenaikan secara bertahap hingga mencapai puncak pertama pada panjang lintasan sekitar 28–30 mm. Nilai maksimum pada kondisi kering mencapai sekitar 230 kV/m, sedangkan pada kondisi lembab meningkat hingga sekitar 330 kV/m. Setelah mencapai puncak pertama, nilai medan listrik mengalami penurunan hingga mencapai titik minimum pada panjang lintasan sekitar 42 mm. Selanjutnya medan listrik kembali meningkat dan membentuk puncak kedua pada panjang lintasan sekitar 57–59 mm. Perubahan yang paling signifikan terjadi pada kondisi basah dengan konduktivitas 1×10^{-5} S/m. Pada kondisi ini nilai medan listrik meningkat sangat tajam hingga mencapai sekitar 830 kV/m pada puncak pertama dan sekitar 780 kV/m pada puncak kedua. Nilai tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi kering maupun lembab.

Hasil simulasi, peningkatan konduktivitas lapisan abu batubara menyebabkan terjadinya peningkatan konsentrasi medan listrik pada permukaan isolator. Semakin tinggi nilai konduktivitas lapisan polusi, semakin besar kemampuan lapisan

tersebut dalam menghantarkan muatan listrik sehingga distribusi medan listrik menjadi lebih terkonsentrasi pada titik-titik tertentu.

4.4 Analisis Pengaruh Ketebalan dan Konduktivitas Abu Batubara terhadap Distribusi Medan Listrik

Pada penelitian ini, analisis distribusi medan listrik dilakukan pada kondisi isolator tanpa polusi dan isolator yang terpapar polusi abu batubara dengan variasi ketebalan 0,1 mm, 0,2 mm, dan 0,3 mm serta variasi konduktivitas yang merepresentasikan kondisi kering, lembab, dan basah. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengetahui pengaruh keberadaan polusi abu batubara terhadap distribusi medan listrik pada permukaan isolator tarik.

Tabel 4.2 Perbandingan Nilai Medan Listrik Maksimum pada Berbagai Kondisi Polusi Abu Batubara

Kondisi	Ketebalan (mm)	Konduktivitas (S/m)	Medan Listrik Maksimum (kV/m)
Tanpa Polusi	-	-	230
Kering	0,1	1×10^{-9}	233
Lembab	0,1	1×10^{-7}	249
Basah	0,1	1×10^{-5}	761
Kering	0,2	1×10^{-9}	234
Lembab	0,2	1×10^{-7}	280
Basah	0,2	1×10^{-5}	801
Kering	0,3	1×10^{-9}	242
Lembab	0,3	1×10^{-7}	333
Basah	0,3	1×10^{-5}	830

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, terlihat bahwa kondisi tanpa polusi menghasilkan distribusi medan listrik yang relatif lebih merata dibandingkan kondisi yang telah terkontaminasi abu batubara. Pada kondisi tanpa polusi, konsentrasi medan listrik terutama berada pada daerah fitting logam dan ujung sirip isolator akibat pengaruh geometri isolator dan perbedaan sifat material antara

logam dan porselen. Namun, nilai medan listrik yang terbentuk masih relatif stabil dan belum menunjukkan peningkatan yang signifikan pada area tertentu. Setelah lapisan abu batubara ditambahkan pada permukaan isolator, distribusi medan listrik mulai mengalami perubahan. Pada kondisi kering dengan konduktivitas 1×10^{-9} S/m, perubahan yang terjadi masih relatif kecil dibandingkan kondisi tanpa polusi. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan polusi yang memiliki konduktivitas rendah belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik medan listrik pada permukaan isolator. Ketika konduktivitas meningkat menjadi 1×10^{-7} S/m pada kondisi lembab, nilai medan listrik mulai mengalami peningkatan pada beberapa titik pengamatan. Dari grafik distribusi medan listrik terlihat bahwa nilai puncak medan listrik meningkat dibandingkan kondisi kering. Hal ini menunjukkan bahwa adanya kandungan air pada lapisan polusi mulai memengaruhi kemampuan lapisan tersebut dalam menghantarkan muatan listrik sehingga menyebabkan perubahan distribusi medan listrik pada permukaan isolator.

Perubahan yang paling signifikan terjadi pada kondisi basah dengan konduktivitas 1×10^{-5} S/m. Pada kondisi ini terlihat peningkatan nilai medan listrik yang sangat besar dibandingkan kondisi kering maupun lembab. Berdasarkan grafik distribusi medan listrik, nilai medan listrik maksimum meningkat hingga mencapai lebih dari 700 kV/m bahkan mendekati 800 kV/m pada beberapa titik pengamatan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa konduktivitas merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap distribusi medan listrik pada permukaan isolator. Selain pengaruh konduktivitas, ketebalan lapisan polusi juga memberikan pengaruh terhadap distribusi medan listrik yang terbentuk. Pada ketebalan 0,1 mm, perubahan distribusi medan listrik sudah mulai terlihat terutama pada kondisi basah. Ketika ketebalan ditingkatkan menjadi 0,2 mm dan 0,3 mm, pengaruh konduktivitas terhadap distribusi medan listrik menjadi semakin jelas. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan polusi yang menempel pada permukaan isolator, semakin besar pula pengaruhnya terhadap karakteristik medan listrik yang terbentuk.

Dari hasil konsentrasi distribusi medan listrik pada seluruh variasi simulasi, dapat diamati bahwa konsentrasi medan listrik terbesar selalu berada pada daerah

fitting logam dan bagian ujung sirip isolator. Area tersebut merupakan daerah yang mengalami perubahan geometri secara tajam sehingga garis-garis medan listrik cenderung berkumpul pada lokasi tersebut. Selain itu, keberadaan lapisan polusi menyebabkan konsentrasi medan listrik semakin meningkat pada area yang berdekatan dengan permukaan isolator. Jika dibandingkan antara ketebalan 0,1 mm, 0,2 mm, dan 0,3 mm, terlihat bahwa ketebalan 0,3 mm menghasilkan distribusi medan listrik yang paling tinggi, terutama pada kondisi basah. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi antara ketebalan polusi yang besar dan konduktivitas yang tinggi merupakan kondisi yang paling kritis bagi kinerja isolator.

Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh, nilai medan listrik maksimum tertinggi berada pada kisaran sekitar 800 kV/m atau 0,8 kV/mm. Nilai ini masih berada jauh di bawah kuat medan tembus udara yang secara umum berada pada kisaran sekitar 3 kV/mm atau 3000 kV/m pada kondisi atmosfer normal. Oleh karena itu, berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, medan listrik yang terbentuk pada seluruh variasi kondisi masih berada dalam kategori aman dan belum mencapai nilai yang berpotensi menyebabkan tembus listrik pada udara di sekitar isolator. Meskipun demikian, peningkatan medan listrik akibat konduktivitas dan ketebalan polusi tetap perlu diperhatikan karena konsentrasi medan listrik yang tinggi dapat menjadi indikasi awal terjadinya fenomena pelepasan muatan parsial (*partial discharge*) maupun *dry band arcing* apabila kondisi lingkungan semakin ekstrem dan lapisan polusi terus bertambah. Oleh karena itu, pemeliharaan dan pembersihan isolator secara berkala tetap diperlukan untuk menjaga kinerja sistem isolasi pada jaringan transmisi tenaga listrik.