ANALISIS PENGARUH FRAKSI VOLUME NANO PARTIKEL SILICA (SiO_2) TERHADAP KARAKTERISTIK DISTRIBUSI MEDAN LISTRIK PADA ISOLASI BERBASIS EPOXY RESIN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

SKRIPSI

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Jurusan Teknik Elektro

Oleh:

MUHAMMAD ARKAN

D1021221052

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS TANJUNGPURA

PONTIANAK

2026

HALAMAN PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhamad Arkan

NIM : D1021221052

Menyatakan bahwa dalam SKRIPSI ini yang berjudul "Analisis Pengaruh Fraksi Volume Nano Partikel Silica (SiO_2) terhadap Karakteristik Distribusi Medan Listrik pada Isolasi Berbasis Epoxy Resin Menggunakan Metode Elemen Hingga" tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar sarjana di suatu perguruan tinggi manapun. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atas diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam Daftar Pustaka.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya. Saya sanggup menerima konsekuensi akademis dan hukum di kemudian hari apabila pernyataan yang dibuat ini tidak benar.

Pontianak, 26 Agustus 2026



Muhamamad Arkan
NIM D1021221052

Dipindai dengan CamScanner

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
FAKULTAS TEKNIK
Jalan Prof. Dr. H. Hadari Nawawi Pontianak 78124
Telepon (0561) 740186, WA: +6282152280907
Email : ft@untan.ac.id Website : http://teknik.untan.ac.id

SURAT KETERENGAN SELESAI PENULISAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini Dosen Pembimbing Utama dan Dosen Pembimbing Pendamping pada penulisan Skripsi yang berjudul "Analisis Pengaruh Fraksi Volume Nano Partikel Silica (SiO_2) terhadap Karakteristik Distribusi Medan Listrik pada Isolasi Berbasis Epoxy Resin Menggunakan Metode Elemen Hingga" yang ditulis oleh mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura:

Nama : Muhammad Arkan
NIM : D1021221052
Jurusan : Teknik Elektro
Prodi : Sarjana Teknik Elektro
Konsentrasi : Tegangan Tinggi

Demikian ini menerangkan bahwa mahasiswatersebut telah menyelesaikan penulisan skripsinya.

Pontianak, 3 September 2026

Pembimbing Utama

Prof. Dr. Eng.Ir. Rudi Kurnianto, S.T., M.T., IPM.
NIP. 196705271995011001

Pembimbing Pendamping

Ir. Managam Rajagukguk, S.T. M.T., IPM.
NIP. 197211162000031001

Dipindai dengan CamScanner

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
FAKULTAS TEKNIK
Jalan Prof. Dr. H. Hadari Nawawi Pontianak 78124
Telepon (0561) 740186, WA: +6282152280907
Email : ft@untan.ac.id Website : http://teknik.untan.ac.id

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH FRAKSI VOLUME NANO PARTIKEL SILICA (SiO2) TERHADAP KARAKTERISTIK DISTRIBUSI MEDAN LISTRIK PADA ISOLASI BERBASIS EPOXY RESIN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Jurusan Teknik Elektro
Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Oleh:

Muhammad Arkan
D1021221052

Telah dipertahankan di depan Penguji Skripsi pada tanggal 03 September 2026
dan diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana.

Susunan Penguji Skripsi

Dosen Pembimbing Utama	:	Prof. Dr. Eng.Ir. Rudi Kurnianto, S.T., M.T., IPM NIP. 196705271995011001
Dosen Pembimbing Kedua	:	Ir. Managam Rajagukguk, S.T., M.T., IPM. NIP. 197211162000031001
Dosen Penguji Utama	:	Dr. Ir. Usman A. Gani, ST, MT, IPM NIP. 197002161995011001
Dosen Penguji Kedua	:	Ir. Danial, M.T., IPM NIP. 196202121992031002

Pontianak, 3 September 2026

Dekan,

Dr.-Ing. Ir. Slamet Widodo, M.T., IPM
NIP. 196712231992031002

Pembimbing Utama

Prof. Dr. Eng.Ir. Rudi Kurnianto, S.T., M.T., IPM.
NIP. 196705271995011001

Dipindai dengan CamScanner

PRAKATA

Puji dan syukur kepada Allah SWT, yang telah memberikan berkat rahmat dan hidayahnya, sehingga penulis diberikan kesanggupan dan kemudahan dalam menyusun skripsi yang berjudul "Analisis Pengaruh Fraksi Volume Nano Partikel Silica (SiO2) Terhadap Karakteristik Distribusi Medan Listrik Pada Isolasi Berbasis Epoxy Resin Menggunakan Metode Elemen Hingga" dengan baik.

Dalam penyusunan skripsi ini penulis mengalami berbagai hambatan. Namun, semua hal itu dapat dilewati dengan pertolongan Allah SWT, melalui bantuan dan bimbingan serta pengarahan dari berbagai pihak sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ing. Ir. Slamet Widodo, M.T., IPM. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
2. Bapak Prof. Dr- Ing. Seno Darmawan Panjaitan, S.T., M.T., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
3. Bapak Jannus Marpaung, S.T., M.T., IPM., selaku Koordinator Program Studi Sarjana Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
4. Bapak Prof. Dr. Eng.Ir. Rudi Kurnianto, S.T., M.T., IPM., selaku Pembimbing Utama yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan selama penulisan skripsi ini.
5. Bapak Ir. Managam Rajagukguk, S.T., M.T., IPM., selaku Pembimbing Pendamping yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan selama penulisan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Usman A. Gani, S.T., M.T., IPM., selaku Dosen Penguji Utama yang telah memberikan masukan dan kritikan yang membangun untuk menyelesaikan skripsi akhir ini.
7. Bapak Ir. Danial, M.T., IPM., selaku Dosen Penguji Pendamping yang telah memberikan masukan dan kritikan yang membangun untuk menyelesaikan skripsi ini.
8. Segenap Dosen Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura yang sudah memberikan ilmu kepada penulis.

9. Kedua orang tua saya yang selalu memberikan motivasi dan dukungan baik secara moril maupun materil.
10. Seluruh civitas akademika Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura yang sudah memberikan dukungan moril kepada penulis.
11. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Jiren Kansa Ulaya atas dukungan, motivasi dan semangat serta cinta yang diberikan selama proses penyusunan skripsi ini.
12. Terimakasih kepada kabut asap pembakaran hutan yang selalu menemani saya selama pengerjaan skripsi ini, terimakasih sudah mengajarkan akan arti perjuangan dalam menuntut ilmu.
13. Kepada seluruh anggota Radiohead dan juga The Strokes yang sudah menemani saya selama penyusunan skripsi ini dari awal sampai akhir.

Dalam penyusunan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan. Untuk itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangatlah dibutuhkan untuk memperbaiki kekurangan pada skripsi ini. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat dan dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Pontianak, 21 Agustus 2026



Penulis,
Muhammad Arkan
NIM. D1021221052

Dipindai dengan CamScanner

ABSTRAK

Isolasi berbasis epoxy resin murni memiliki keterbatasan performa dielektrik yang mendorong penggunaan filler nanopartikel silika (SiO_2) untuk meningkatkan karakteristik isolasi. Namun, distribusi medan listrik pada skala nano sulit diukur secara eksperimental, sehingga penelitian ini menggunakan metode elemen hingga (FEM) berbasis COMSOL Multiphysics untuk menganalisis pengaruh fraksi volume SiO_2 (0%-30%) terhadap distribusi medan listrik pada isolasi epoxy resin. Penelitian menggunakan tiga jenis model: model makro pelat paralel sebagai baseline, model mikro Representative Volume Element (RVE) dengan satu partikel representatif untuk tujuh variasi fraksi volume, serta model multi-partikel (delapan partikel) sebagai verifikasi efek interaksi antar-partikel. Hasil menunjukkan model RVE valid dengan deviasi permitivitas efektif terhadap model Maxwell-Garnett dan Bruggeman sebesar 0,000%–0,039%. Pada model single-partikel, medan listrik maksimum (Emax) meningkat monoton seiring fraksi volume (deviasi −2,13% hingga −5,20%), mengindikasikan fenomena field enhancement di antarmuka partikel-matriks, bukan reduksi stress seperti hipotesis awal. Sebaliknya, model multi-partikel menunjukkan Emax menurun monoton dari $10{,}519\times10^6$ menjadi $10{,}260\times10^6$ V/m (f=10%-30%), dengan reduksi signifikan pada f=30% (2,47%), mengindikasikan efek shielding kolektif antar-partikel. Verifikasi model makro-homogen menggunakan $\varepsilon_{eff,FEM}$ menghasilkan deviasi 0,00% terhadap prediksi analitik konstitutif $D=\varepsilon_0\varepsilon_{eff}E$. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas SiO_2 dalam mereduksi stress medan listrik lebih ditentukan oleh distribusi spasial dan interaksi antar-partikel dibandingkan fraksi volume semata.

Kata Kunci : nanodielektrik, SiO_2, permitivitas efektif, metode elemen hingga, COMSOL Multiphysics, Representative Volume Element, distribusi medan listrik, field enhancement.

ABSTRACT

Pure epoxy resin insulation exhibits limited dielectric performance, motivating the use of silica (SiO_2) nanoparticle fillers to enhance insulation characteristics. Since electric field distribution at the nanoscale is difficult to measure experimentally, this study employs the finite element method (FEM) using COMSOL Multiphysics to analyze the influence of SiO_2 volume fraction (0%–30%) on the electric field distribution in epoxy resin insulation. Three model types were developed: a macro parallel-plate model as baseline, a micro Representative Volume Element (RVE) model with a single representative particle across seven volume fraction cases, and a multi-particle model (eight particles) to verify inter-particle interaction effects. Results show the RVE model is valid, with effective permittivity deviations of 0.000%–0.039% against the Maxwell-Garnett and Bruggeman analytical models. In the single-particle model, the maximum electric field (Emax) increased monotonically with volume fraction (deviation of −2.13% to −5.20%), indicating a field enhancement phenomenon at the particle-matrix interface rather than the hypothesized stress reduction. Conversely, the multi-particle model showed Emax decreasing monotonically from 10.519×10^6 to 10.260×10^6 V/m (f=10%–30%), with a significant reduction at f=30% (2.47%), indicating a collective inter-particle shielding effect. Verification of the macro-homogeneous model using $\varepsilon_{eff,FEM}$ yielded a 0.00% deviation against the constitutive analytical prediction $D=\varepsilon_0\varepsilon_{eff}E$. These findings indicate that the effectiveness of SiO_2 in reducing electric field stress is more strongly determined by particle spatial distribution and inter-particle interaction than by volume fraction alone.

Keywords *: nanodielectrics, SiO_2, effective permittivity, finite element method, COMSOL Multiphysics, Representative Volume Element, electric field distribution, field enhancement*

DAFTAR ISI

PRAKATA i
DAFTAR ISI v
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL x
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 2
1.3 Tujuan dan Sasaran Penelitian 3
1.4 Pembatasan Masalah 4
1.5 Sistematika Penulisan 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7
2.1 Penelitian Terdahulu 7
2.2 Teori Dasar Bahan Dialektrik dan Isolasi Tegangan Tinggi 10
2.2.1 Definisi dan Fungsi Material Dielektrik 10
2.2.2 Sifat-Sifat Listrik Material Dielektrik 11
2.2.3 Kegagalan Isolasi dan Partial Discharge 12
2.3 Mekanisme Polarisasi pada Material Dielektrik 14
2.3.1 Jenis-Jenis Polarisasi 14
2.3.2 Polarisasi Antarmuka pada Nanokomposit Polimer-SiO_2 16
2.4 Karakteristik Material Nanokomposit Polimer-SiO_2 16
2.4.1 Definisi dan Konsep Nanodielektrik 17
2.4.2 Nanopartikel SiO_2: Karakteristik dan Sifat Dielektrik 17
2.4.3 Zona Antarmuka (*Interphase Zone*) 18
2.4.4 Pengaruh Fraksi Volume terhadap Sifat Dielektrik 19

2.5 Teori Permitivitas Efektif 20
2.5.1 Model Maxwell-Garnett 21
2.5.2 Model Bruggeman 21
2.5.3 Perbandingan Model dan Penerapannya sebagai Validasi 22
2.6 Konsep Representative Volume Element (RVE) 23
2.6.1 Definisi dan Tujuan RVE 23
2.6.2 Penentuan Ukuran RVE 23
2.6.3 Kondisi Batas Periodik pada RVE 24
2.6.4 Ekstraksi Permitivitas Efektif dari Simulasi RVE 25
2.6.5 Strategi *Meshing* untuk Model RVE Nano 25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 27
3.1 Bahan Penelitian 27
3.1.1 Matriks Polimer Epoksi 27
3.1.2 Nanopartikel SiO_2 28
3.1.3 Variasi Fraksi Volume SiO_2 28
3.2 Alat Yang Dipergunakan 29
3.2.1 Finite Element Method 29
3.2.2 COMSOL Multiphysics 31
3.2.3 Laptop 33
3.3 Metode Penelitian 33
3.3.1 Desain Geometri Model 33
3.3.2 Definisi Properti Material 38
3.3.3 Pengaturan Fisika dan Kondisi Batas 38
3.3.4 Strategi *Meshing* 39
3.3.5 Pelaksanaan Simulasi dan Parametric Sweep 40
3.4 Variabel atau Data yang Dikumpulkan 42

3.5 Analisis Hasil 45
3.6 Diagram Alir Penelitian 48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 49
4.1 Model Makro (Konfigurasi Pelat Paralel) 49
4.1.1 Langkah Simulasi Model Makro 50
4.1.2 Hasil Simulasi Model Makro 51
4.1.3 Visualisasi Distribusi Medan Listrik 52
4.2 Model Mikro RVE (7 Kasus Fraksi Volume) 55
4.2.1 Langkah Simulasi Model Mikro RVE 56
4.2.2 Hasil Simulasi Model Mikro RVE 57
4.3 Validasi Model RVE melalui Perbandingan Permitivitas Efektif 59
4.3.1 Perhitungan Deviasi 60
4.3.2 Visualisasi Perbandingan εeff terhadap Fraksi Volume 61
4.3.3 Kesesuaian antara Model *Maxwell-Garnett* dan *Bruggeman* 62
4.4 Analisis Distribusi Medan Listrik Lokal 62
4.4.1 Distribusi Medan Listrik - Surface Plot 63
4.4.2 Distribusi Medan Listrik - Slice Plot 3D 64
4.4.3 Distribusi Medan Listrik - Contour Plot Garis Ekipotensial 66
4.4.4 Sintesis Analisis Lintas-Fraksi Volume 68
4.5 Evaluasi Pengaruh Fraksi Volume terhadap Emax 69
4.5.1 Kompilasi Data Emax dan Perhitungan Δemax 69
4.5.2 Analisis Laju Kenaikan Emax terhadap Fraksi Volume 70
4.5.3 Grafik Emax terhadap Fraksi Volume 72
4.5.4 Interpretasi terhadap Hipotesis 72
4.6 Verifikasi Reduksi Emax melalui Model Multi-Partikel 73
4.6.1 Langkah Simulasi Model Multi-Partikel 75

4.6.2 Hasil Simulasi Model Multi-Partikel 75
4.6.3 Kompilasi Data Simulasi Model Multi-Partikel 79
4.6.4 Perbandingan Emax: Model Single-Partikel terhadap Multi-Partikel . 80
4.6.5 Interpretasi Fisis: Pembalikan Tren dan Mekanisme Shielding..... 80
4.7 Analisis Komponen Medan Normal (En) dan Kontinuitas D di Interface.. 82
4.7.1 Ekstraksi dan Perbandingan Komponen Medan Normal (E_n)..... 82
4.7.2 Verifikasi Kontinuitas Fluks Perpindahan Listrik (D_n)..... 83
4.8 Verifikasi Model Makro-Homogen menggunakan εeff (f=10/20/30%) 84
4.8.1 Konfigurasi Model Makro-Homogen 84
4.8.2 Hasil Simulasi E_Z dan ⟨D⟩..... 85
BAB V PENUTUP..... 88
5.1 Kesimpulan 88
5.2 Saran..... 89
DAFTAR PUSTAKA 90
LAMPIRAN A..... 1
VISUALISASI DISTRIBUSI MEDAN LISTRIK LOKAL 1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 *Electrical Tree* Akibat PD Berulang..... 14
Gambar 2. 2 Jenis-jenis dan Mekanisme Utama Polarisasi..... 15
Gambar 2. 3 Dominasi Sifat Antarmuka terhadap Ukuran Partikel..... 17
Gambar 2. 4 Model Multi-Core Tanaka pada Zona Antarmuka Nanopartikel ... 19
Gambar 3. 1 Hasil Meshing Model Mikro RVE di COMSOL..... 40
Gambar 4. 1 Geometri Model Makro Konfigurasi Pelat Paralel..... 50
Gambar 4. 2 Surface Plot Distribusi Medan Listrik pada Model Makro 53
Gambar 4. 3 Contour Plot Garis Ekipotensial pada Model Makro 53
Gambar 4. 4 Grafik 1 D Cut Line Intensitas Medan Listrik (Ez) Sepanjang Sumbu-z pada Model Makro 54
Gambar 4. 5 Geometri Model Mikro RVE..... 56
Gambar 4. 6 Grafik εeff FEM, Maxwell-Garnett, dan Bruggeman terhadap Fraksi Volume..... 61
Gambar 4. 7 Surface Plot Distribusi Medan Listrik pada Semua Fraksi..... 63
Gambar 4. 8 Slice Plot 3D Distribusi Medan Listrik pada Semua Fraksi..... 65
Gambar 4. 9 Contour Plot Garis Ekipotensial pada Semua Fraksi..... 67
Gambar 4. 10 Arrow Surface Plot Medan Listrik di Sekitar Nanopartikel SiO^2. 69
Gambar 4. 11 Grafik Emax terhadap Fraksi Volume SiO_2 72
Gambar 4. 12 Geometri Model Mikro Multi-Partikel Kasus f = 30% 74
Gambar 4. 13 Perbandingan Skema Geometri Model Single-Partikel dan Ilustrasi Multi-Partikel Riil, Kasus f = 10% 77
Gambar 4. 14 Perbandingan Skema Geometri Model Single-Partikel dan Ilustrasi Multi-Partikel Riil, Kasus f = 20% 77
Gambar 4. 15 Perbandingan Skema Geometri Model Single-Partikel dan Ilustrasi Multi-Partikel Riil, Kasus f = 30% 78

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Parameter material SiO_2 18
Tabel 2. 2 Perbandingan Antara ***Maxwell-Garnett*** dan ***Brugeman***..... 22
Tabel 3. 1 Spesifikasi Properti Listrik Epoxy Resin 27
Tabel 3. 2 Spesifikasi Properti Listrik Nanopartikel SiO_2..... 28
Tabel 3. 3 Variasi Fraksi Volume Nanopartikel SiO_2 28
Tabel 3. 4 Spesifikasi Perangkat Lunak 31
Tabel 3. 5 Fitur COMSOL Multiphysics yang digunakan 32
Tabel 3. 6 Spesifikasi Laptop 33
Tabel 3. 7 Spesifikasi Geometri Model Makro 34
Tabel 3. 8 Spesifikasi Geometri Model Mikro RVE 3D 34
Tabel 3. 9 Spesifikasi Geometri Model Mikro Multi-Partikel 36
Tabel 3. 10 Radius Partikel Model Multi-Partikel per Fraksi Volume 37
Tabel 3. 11 Assign Properti Material pada Subdomain Model RVE 38
Tabel 3. 12 Kondisi Batas yang Diterapkan pada Model RVE..... 38
Tabel 3. 13 Strategi Ukuran Elemen Mesh pada Model RVE 39
Tabel 3. 14 Konfigurasi Parametric Sweep Fraksi Volume SiO_2..... 41
Tabel 3. 15 Data yang Diekstrak dari Hasil Simulasi 41
Tabel 3. 16 Variabel Bebas Penelitian 42
Tabel 3. 17 Variabel Terikat Penelitian..... 42
Tabel 3. 18 Jenis Visualisasi Data Kualitatif..... 43
Tabel 3. 19 Metode Ekstraksi Data Kuantitatif 44
Tabel 3. 20 Template Rekap Hasil Simulasi Seluruh Variasi Fraksi 45
Tabel 4. 1 Perbandingan hasil simulasi terhadap solusi analitik 52
Tabel 4. 2 Rekap Hasil Simulasi Model Mikro RVE per Fraksi Volume..... 58
Tabel 4. 3 Deviasi ε_{eff} FEM terhadap Maxwell-Garnett dan Bruggeman..... 60
Tabel 4. 4 Persentase Perubahan Emax terhadap Polimer Murni (f=0%)..... 70
Tabel 4. 5 Laju Kenaikan Marginal Emax Antar-Fraksi Volume 71
Tabel 4. 6 Radius Partikel pada Model Multi-Partikel per Fraksi Volume..... 76
Tabel 4. 7 Hasil Simulasi Model Multi-Partikel 79
Tabel 4. 8 Perbandingan Emax Single-Partikel dan Multi-Partikel 80

Tabel 4. 9 Komponen Medan Normal E_n dan D_n di Antarmuka SiO_2-Epoksi f=30% 83
Tabel 4. 10 Hasil Simulasi Model Makro-Homogen dan Verifikasi Konstitutif . 85

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A. Visualisasi Distribusi Medan Listrik Lokal……...…A-1

GLOSARIUM

SiO_2 (Silika)	Nanopartikel filler berbasis silikon dioksida ($\varepsilon_r \approx 3{,}9$) yang ditambahkan ke matriks epoxy untuk memodifikasi distribusi medan listrik dan sifat dielektrik komposit
Representative Volume Element	Domain simulasi berskala kecil (di sini, kubus 100×100×100 nm) yang dianggap representatif terhadap sifat material komposit secara keseluruhan.
Partial Discharge (PD)	Peristiwa pelepasan muatan listrik lokal di dalam rongga, retakan mikro, atau antarmuka material dengan permitivitas berbeda, tanpa mencapai breakdown penuh; menjadi motivasi utama penelitian ini.
Nanodielektrik	Material dielektrik yang dimodifikasi dengan penambahan filler berukuran nanometer (di sini, SiO_2) untuk meningkatkan performa isolasi.
COMSOL Multiphysics	Perangkat lunak simulasi berbasis metode elemen hingga (FEM) yang digunakan untuk memodelkan dan menyelesaikan seluruh simulasi elektrostatik pada penelitian ini.
Elemen Hingga (*Finite Element Method*/FEM)	Metode numerik untuk menyelesaikan persamaan diferensial pada domain kompleks dengan membagi domain menjadi elemen-elemen kecil (mesh), digunakan sebagai pendekatan utama penelitian ini.
Permitivitas Efektif (εeff)	Nilai permitivitas tunggal yang merepresentasikan sifat dielektrik rata-rata suatu material komposit heterogen (matriks + filler), diekstraksi dari hasil simulasi model mikro RVE.

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem tenaga listrik modern sangat bergantung pada keandalan komponen isolasi tegangan tinggi. Isolasi berfungsi sebagai pelindung utama yang mencegah arus bocor antar konduktor bertegangan serta melindungi peralatan dan keselamatan operasional. Pada jaringan transmisi dan distribusi, kegagalan isolasi menjadi salah satu penyebab utama gangguan sistem yang berdampak luas terhadap keandalan suplai daya. Dengan perkembangan teknologi yang pesat, permintaan terhadap material isolasi dengan kekuatan dielektrik dan mekanik yang lebih tinggi terus meningkat secara signifikan. Oleh karena itu, pengembangan material isolasi yang mampu beroperasi secara andal di bawah kondisi tegangan tinggi menjadi prioritas dalam rekayasa teknik tenaga listrik.[1].

Material isolasi berbasis polimer konvensional, salah satunya Bisphenol-A Epoxy Resin (DGEBA), telah lama digunakan dalam aplikasi tegangan tinggi karena kemudahannya dalam pemrosesan, kemampuan adhesi yang baik, dan bobotnya yang ringan, dan juga telah lama digunakan dalam aplikasi tegangan tinggi karena kemudahannya dalam pemrosesan dan bobotnya yang ringan. Namun, material ini memiliki keterbatasan mendasar dalam hal ketahanan dielektrik. tegangan breakdown Bisphenol-A Epoxy Resin (DGEBA) tercatat hanya sekitar 26 kV/mm pada kondisi tanpa pengisi dan rentan terhadap fenomena partial discharge (PD) yang dapat memperburuk kondisi isolasi secara bertahap[2]. Kejadian partial discharge yang berulang dalam jangka panjang dapat berujung pada kegagalan isolasi total, sehingga pemantauan dan pengendalian distribusi medan listrik di dalam material isolasi menjadi aspek yang sangat kritis[3].

Sebagai respons terhadap keterbatasan material konvensional, teknologi nanodielektrik hadir sebagai solusi yang menjanjikan. Nanodielektrik merupakan material inovatif yang dihasilkan dari penggabungan nanopartikel ke dalam matriks polimer, dengan tujuan meningkatkan performa dielektriknya secara signifikan [4]. Di antara berbagai jenis nanofiller yang telah diteliti, nanopartikel silikon dioksida (SiO_2) mendapatkan perhatian besar karena sifatnya

yang unggul. Studi telah membuktikan bahwa nanokomposit mengandung konsentrasi filler rendah seperti SiO_2 menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap partial discharge secara signifikan dibandingkan polimer murni [2]. Lebih lanjut, doping nanopartikel SiO_2 terbukti secara efektif memodulasi perilaku muatan pada antarmuka material dengan menghadirkan shallow defect states dan rekonstruksi dipol antarmuka, yang secara langsung meningkatkan performa isolasi tegangan tinggi [5].

Meskipun manfaat penambahan nanopartikel SiO_2 telah banyak terdokumentasi secara eksperimental, pengamatan langsung distribusi medan listrik di skala nano pada material nanokomposit menghadapi keterbatasan teknis yang signifikan. Pengukuran eksperimental distribusi medan listrik di dalam bulk material isolasi sulit dilakukan tanpa merusak sampel, membutuhkan peralatan khusus berbiaya tinggi, dan sering kali tidak mampu menangkap variasi lokal medan pada skala partikel nano. Pengetahuan mengenai distribusi medan listrik di dalam dan sekitar peralatan tegangan tinggi merupakan aspek krusial dalam desain, eksploitasi, dan performa isolasi [3]. Untuk mengatasi keterbatasan ini, metode simulasi berbasis Finite Element Method (FEM) menjadi pendekatan terbaik yang memungkinkan visualisasi distribusi medan listrik secara detail tanpa kendala eksperimental. COMSOL Multiphysics sebagai perangkat lunak berbasis FEM telah terbukti mampu menyimulasikan distribusi medan listrik secara akurat pada berbagai konfigurasi isolasi tegangan tinggi, dengan validasi yang baik terhadap data eksperimen[2].

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh penambahan nanopartikel SiO_2 terhadap distribusi medan listrik pada material isolasi tegangan tinggi menggunakan simulasi FEM berbasis COMSOL Multiphysics. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah yang kuat bagi pengembangan material isolasi nanokomposit yang lebih andal untuk aplikasi sistem tenaga listrik

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, pemantauan dan pengendalian distribusi medan listrik sangat kritis untuk mencegah kegagalan

isolasi. Oleh karena itu, perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik distribusi medan listrik secara makroskopis pada model isolasi tegangan tinggi dengan konfigurasi pelat paralel?
2. Bagaimana pengaruh penambahan nanopartikel SiO_2, yang dimodelkan pada skala mikro di dalam matriks polimer, terhadap perubahan pola distribusi medan listrik lokal?
3. Sejauh mana penambahan partikel silika (SiO_2) tersebut mampu mendistribusikan ulang atau mereduksi konsentrasi *stress* medan listrik maksimum jika dibandingkan dengan material polimer murni?

1.3 Tujuan dan Sasaran Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Menganalisis karakteristik dan profil distribusi medan listrik secara makroskopis pada model isolasi tegangan tinggi dengan konfigurasi pelat paralel menggunakan simulasi FEM
2. Menganalisis pengaruh keberadaan nanopartikel SiO_2 terhadap perubahan pola distribusi medan listrik pada skala mikro di dalam matriks polimer.
3. Mengevaluasi efektivitas penambahan *filler* nanopartikel SiO_2 dalam mereduksi atau mendistribusikan ulang konsentrasi *stress* medan listrik maksimum dibandingkan dengan material isolasi polimer murni, serta menentukan konsentrasi optimal nanopartikel untuk mencapai distribusi medan listrik yang paling seragam.

Adapun sasaran yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Terbentuknya model geometri simulasi pada perangkat lunak COMSOL Multiphysics yang mencakup model makro (*parallel plate*) dan model mikro (kubus matriks 100nm x 100nm x 100nm dengan *filler sphere* SiO_2).
2. Diperolehnya visualisasi berupa peta kontur (*contour plot*) dan data numerik mengenai intensitas medan listrik pada seluruh domain isolasi.
3. Teridentifikasinya perilaku distribusi medan listrik pada area antarmuka (*interface*) antara matriks polimer dan nanopartikel SiO_2 untuk memahami fenomena *local field enhancement*.

4. Diperolehnya perbandingan nilai kuat medan listrik maksimum antara polimer murni dan nanokomposit SiO_2 sebagai indikator peningkatan performa isolasi.

1.4 Pembatasan Masalah

Agar penelitian ini tetap terfokus pada tujuan yang ingin dicapai dan menghindari perluasan pembahasan yang tidak relevan, maka penelitian ini dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut:

1. Pemodelan Skala Mikro: Penelitian ini menggunakan pendekatan *Representative Volume Element* (RVE) dengan dimensi kubus 100 nm × 100 nm × 100 nm sebagai representasi unit terkecil material.
2. Nanopartikel SiO_2 dimodelkan sebagai satu bola sempurna (*single representative sphere*) per kasus fraksi volume, dengan radius partikel yang diskalakan secara proporsional mengikuti besarnya fraksi volume yang disimulasikan, untuk menyederhanakan geometri simulasi pada skala nano tanpa memodelkan interaksi antar-partikel.
3. Konfigurasi Makro: Simulasi skala makro menggunakan konfigurasi pelat paralel ideal dengan asumsi pengabaian efek tepi (*edge effect*) pada distribusi medan listrik.
4. Sifat Material: Material dielektrik, baik matriks polimer maupun pengisi SiO_2, diasumsikan sebagai material linier, isotropik, dan homogen.
5. Kondisi Material: Analisis tidak mempertimbangkan adanya cacat manufaktur seperti *void* atau *micro-crack*, serta mengabaikan interaksi kimia kompleks pada antarmuka (*interface*) antara partikel dan matriks.
6. Batasan Fisika: Simulasi difokuskan sepenuhnya pada fenomena elektrostatik stasioner, sehingga efek dinamis, transien, dampak termal, maupun tegangan mekanis tidak diikutsertakan. Analisis distribusi medan listrik pada interface difokuskan pada komponen normal (En), sedangkan komponen tangensial tidak menjadi fokus utama analisis.
7. Kondisi Lingkungan: Kondisi batas (*boundary condition*) diasumsikan ideal dengan mengabaikan pengaruh kebocoran arus (*leakage current*) maupun pengaruh lingkungan eksternal seperti kelembapan.

8. Variabel Penelitian: Variabel bebas utama dibatasi pada fraksi volume nanopartikel SiO_2, dengan asumsi nilai permitivitas material konstan terhadap perubahan suhu maupun besaran kuat medan listrik yang diberikan.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan guna mempermudah dalam menyusun skripsi ini secara terstruktur sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan sasaran penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Membahas teori dasar bahan dielektrik dan isolasi tegangan tinggi, mekanisme polarisasi, karakteristik material nanokomposit (Polimer-SiO_2), teori permitivitas efektif, konsep *Representative Volume Element* (RVE), teori dasar Metode Elemen Hingga (FEM), serta hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan distribusi medan listrik pada nanodielektrik.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menguraikan bahan dan alat penelitian (material dielektrik dan perangkat lunak COMSOL Multiphysics), metode penelitian (desain geometri RVE 3D, properti material, *physics*, dan kondisi batas), variabel atau data, analisis hasil berupa ekstraksi nilai permitivitas efektif, serta diagram alir penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil simulasi model makro dan model mikro RVE untuk tujuh variasi fraksi volume nanopartikel SiO_2, meliputi ekstraksi permitivitas efektif, validasi terhadap model Maxwell-Garnett dan Bruggeman, serta analisis distribusi medan listrik lokal dan medan listrik

maksimum. Bab ini juga membahas hasil model multi-partikel, verifikasi model makro-homogen, serta pembahasan umum yang mengaitkan seluruh hasil dengan rumusan masalah penelitian.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan pada bab sebelumnya, serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.