



Pengaruh Jumlah Lapisan Komposit PDMS-Silika Sekam Padi-*Graphene Oxide* terhadap Sifat Resistansi Isolasi Listrik

Annisa Eka Putri^{1*}, Ratnawulan²

¹⁻² Universitas Negeri Padang, Indonesia

email: annisaekap51@gmail.com¹

Article Info :

Received:
20-03-2026
Revised:
03-04-2026
Accepted:
15-04-2026

Abstract

This study analyzes the effect of the number of layers in PDMS–rice husk silica–graphene oxide composites on electrical insulation resistance under dry and wet conditions using a multilayer structure-based experimental approach. The composites were fabricated using the spin-coating method on glass substrates with variations ranging from 1 to 5 layers and characterized using XRD, FTIR, and SEM to evaluate the relationship between morphology, filler distribution, and the material's electrical behavior. The results show that an increase in the number of layers causes significant changes in the interface configuration and the density of filler distribution. Under dry conditions, the insulation resistance decreased from 250 GΩ to 70 GΩ due to increased opportunities for the formation of internal conduction pathways and percolation effects between graphene oxide particles. Conversely, under wet conditions, the resistance increased from 90 GΩ to 200 GΩ because the multilayer structure formed tortuous diffusion pathways that effectively hindered water penetration and ionic transport. These characteristics indicate that the multilayer design plays a crucial role in controlling the electrical stability of polymer-based nanocomposites for high-voltage insulation applications.

Keywords: PDMS, Rice Husk Silica, Graphene Oxide, Insulation Resistance, Multilayer Composite.

Abstrak

Penelitian ini menganalisis pengaruh jumlah lapisan komposit PDMS–silika sekam padi–*graphene oxide* terhadap sifat resistansi isolasi listrik pada kondisi kering dan basah melalui pendekatan eksperimen berbasis struktur multilayer. Komposit difabrikasi menggunakan metode spin coating pada substrat kaca dengan variasi 1 hingga 5 lapisan dan dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, serta SEM untuk mengevaluasi hubungan antara morfologi, distribusi filler, dan perilaku listrik material. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan menyebabkan perubahan signifikan pada konfigurasi antarmuka dan kepadatan distribusi filler. Pada kondisi kering, resistansi isolasi menurun dari 250 GΩ menjadi 70 GΩ akibat meningkatnya peluang terbentuknya jalur konduksi internal dan efek perkolasi antar partikel *graphene oxide*. Sebaliknya, pada kondisi basah resistansi meningkat dari 90 GΩ menjadi 200 GΩ karena struktur multilayer membentuk jalur difusi berliku yang efektif menghambat penetrasi air dan transport ionik. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa desain multilayer berperan penting dalam mengendalikan stabilitas listrik komposit berbasis polimer nano untuk aplikasi isolasi tegangan tinggi.

Kata kunci: PDMS, Silika Sekam Padi, Graphene Oxide, Resistansi Isolasi, Multilayer Komposit.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Perkembangan sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik bertegangan tinggi dalam satu dekade terakhir menunjukkan kecenderungan kuat menuju penggunaan material isolator berbasis polimer yang memiliki stabilitas listrik tinggi, massa ringan, serta ketahanan lingkungan yang lebih baik dibandingkan material konvensional berbasis porselen dan kaca. Transformasi tersebut tidak hanya dipicu oleh kebutuhan efisiensi sistem energi modern, tetapi juga oleh meningkatnya kompleksitas lingkungan operasional yang melibatkan paparan kelembaban, kontaminasi atmosfer, fluktuasi termal, dan stres listrik jangka panjang yang secara simultan mempercepat degradasi permukaan isolator. Kajian mutakhir memperlihatkan bahwa performa isolasi listrik tidak lagi ditentukan semata oleh sifat intrinsik material, melainkan sangat dipengaruhi oleh rekayasa struktur mikro dan antarmuka pada

material komposit polimer berpengisi nano yang mampu mengendalikan jalur transport muatan dan difusi fluida secara lebih efektif (Alabi et al., 2026). Dalam konteks tersebut, Polydimethylsiloxane (PDMS) memperoleh perhatian signifikan karena memiliki sifat hidrofobik tinggi, fleksibilitas struktural, serta kemampuan mempertahankan kestabilan listrik pada lingkungan ekstrem (Singh, 2022). Efektivitas PDMS dalam menekan arus bocor melalui pengendalian energi permukaan juga telah dibuktikan pada aplikasi isolator tegangan tinggi yang beroperasi pada kondisi kontaminasi lingkungan tinggi, sehingga material ini dipandang sebagai kandidat utama dalam pengembangan generasi baru sistem isolasi berbasis polimer fungsional (Kim, 2021). Meskipun demikian, peningkatan tuntutan performa listrik dan stabilitas jangka panjang menempatkan PDMS murni pada posisi yang memerlukan modifikasi struktural lebih lanjut karena karakter mekanik dan ketahanan degradasinya masih menunjukkan keterbatasan ketika dioperasikan secara kontinu pada kondisi medan listrik tinggi dan lingkungan lembab (Smith et al., 2024).

Upaya peningkatan performa PDMS kemudian berkembang menuju pendekatan komposit multikomponen dengan memanfaatkan filler anorganik berskala nano yang mampu merekayasa perilaku listrik maupun mekanik material melalui pembentukan antarmuka heterogen di dalam matriks polimer. Silika menjadi salah satu filler paling banyak digunakan karena bersifat isolatif, memiliki stabilitas termal tinggi, dan mampu memperpanjang jalur konduksi muatan melalui mekanisme hambatan transport elektron dalam struktur komposit (Shin et al., 2020). Tren penelitian terkini menunjukkan meningkatnya perhatian terhadap pemanfaatan silika berbasis biomassa, khususnya silika hasil ekstraksi sekam padi, karena material tersebut tidak hanya memiliki kemurnian tinggi dan luas permukaan besar, tetapi juga mendukung agenda keberlanjutan material melalui pemanfaatan limbah agroindustri bernilai rendah menjadi material fungsional bernilai tinggi (Nzereogu et al., 2023). Pada saat yang sama, integrasi graphene oxide ke dalam sistem komposit polimer menghasilkan dimensi baru dalam pengendalian sifat listrik material karena graphene oxide memiliki luas permukaan spesifik besar, kemampuan memperkuat antarmuka matriks-filler, serta karakteristik transport muatan yang sangat sensitif terhadap distribusi dan orientasi partikel di dalam matriks polimer (Ratsameetammajak et al., 2022). Penelitian Shen et al. (2019) memperlihatkan bahwa pelapisan silika pada graphene mampu mempertahankan tingkat isolasi listrik tinggi sekaligus meningkatkan stabilitas dispersi filler dalam matriks PDMS, suatu temuan yang memperlihatkan bahwa kombinasi silika dan graphene oxide tidak sekadar menghasilkan efek aditif sederhana, melainkan membentuk mekanisme sinergistik yang mempengaruhi perilaku listrik material secara kompleks melalui pengaturan jalur perkolasi dan distribusi medan listrik internal.

Meskipun perkembangan tersebut menunjukkan kemajuan signifikan dalam desain material isolator berbasis komposit nano, sebagian besar penelitian masih berorientasi pada optimasi komposisi filler, modifikasi permukaan partikel, atau peningkatan sifat mekanik dan termal material, sementara aspek rekayasa struktur multilayer sebagai variabel pengendali transport muatan relatif belum memperoleh perhatian memadai. Literatur yang tersedia umumnya mengasumsikan bahwa peningkatan kandungan filler akan selalu berkorelasi positif terhadap peningkatan performa isolasi, padahal sejumlah studi terbaru menunjukkan bahwa akumulasi filler konduktif pada konsentrasi tertentu justru dapat memicu terbentuknya jalur perkolasi internal yang menurunkan resistansi isolasi material secara signifikan (Shen et al., 2019). Inkonsistensi juga muncul pada interpretasi hubungan antara ketebalan lapisan dan stabilitas listrik material dalam kondisi kelembaban tinggi, karena beberapa penelitian melaporkan peningkatan resistansi akibat terbentuknya hambatan difusi air, sedangkan penelitian lain menunjukkan penurunan resistansi akibat meningkatnya kemungkinan transport ionik melalui antarmuka multilayer yang tidak homogen (Liu et al., 2025). Permasalahan tersebut menunjukkan adanya celah konseptual penting terkait bagaimana jumlah lapisan mempengaruhi interaksi simultan antara mekanisme perkolasi filler, hopping conduction, dan hambatan difusi kelembaban dalam sistem komposit PDMS–silika–graphene oxide. Ketiadaan model empiris yang secara spesifik mengevaluasi pengaruh jumlah lapisan terhadap resistansi isolasi menyebabkan pemahaman mengenai perilaku listrik komposit multilayer masih bersifat parsial dan belum mampu menjelaskan kompromi antara peningkatan ketahanan kelembaban dan risiko terbentuknya jalur konduktif internal.

Celah penelitian tersebut memiliki implikasi ilmiah dan praktis yang sangat signifikan karena kegagalan isolasi listrik pada material polimer umumnya tidak terjadi akibat kerusakan mekanik makroskopik, melainkan dipicu oleh perubahan gradual pada mekanisme transport muatan dan penetrasi kelembaban yang berlangsung pada skala mikrostruktur. Lingkungan operasional sistem

tenaga modern yang semakin agresif menyebabkan material isolator harus mampu mempertahankan resistansi tinggi dalam kondisi fluktuasi kelembaban dan tegangan listrik yang berulang secara kontinu, sehingga optimasi struktur multilayer menjadi isu yang tidak dapat dipisahkan dari pengembangan material isolasi generasi baru (Alabi et al., 2026). Penelitian mengenai pengaruh kelembaban terhadap degradasi sifat listrik komposit menunjukkan bahwa penetrasi air mampu mengubah karakteristik dielektrik material melalui peningkatan mobilitas ion dan pembentukan jalur konduksi berbasis fluida di dalam matriks polimer (Liu et al., 2025). Pada sisi lain, desain multilayer berpotensi menghasilkan jalur difusi berliku yang dapat memperlambat penetrasi air dan meningkatkan stabilitas resistansi pada kondisi basah, namun peningkatan jumlah lapisan secara simultan juga dapat memperbesar peluang kontak antar filler graphene yang mempercepat perpindahan muatan internal. Kompleksitas hubungan tersebut menunjukkan bahwa optimasi jumlah lapisan bukan sekadar persoalan geometris ketebalan material, melainkan berkaitan langsung dengan rekayasa dinamika transport muatan dan distribusi antarmuka heterogen dalam sistem komposit nano berbasis PDMS.

Posisi penelitian ini berada pada irisan antara rekayasa material komposit nano, fisika isolasi listrik, dan desain struktur multilayer berbasis polimer fungsional, dengan fokus khusus pada bagaimana jumlah lapisan mempengaruhi karakter resistansi isolasi melalui interaksi antara mekanisme perkolasi filler dan hambatan difusi kelembaban. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang lebih menitikberatkan pada variasi konsentrasi filler atau modifikasi kimia permukaan partikel, penelitian ini menempatkan jumlah lapisan sebagai parameter utama yang dianalisis secara sistematis untuk memahami perubahan perilaku listrik material dalam kondisi lingkungan berbeda. Pendekatan tersebut menjadi relevan karena struktur multilayer tidak hanya mengubah ketebalan total material, tetapi juga mempengaruhi kualitas antarmuka antar lapisan, distribusi filler, orientasi jalur transport muatan, dan karakteristik penetrasi fluida ke dalam matriks polimer. Integrasi silika sekam padi sebagai filler isolatif berkelanjutan dengan graphene oxide sebagai penguat antarmuka dalam matriks PDMS memberikan kerangka material yang unik untuk mengevaluasi hubungan antara desain struktur dan performa resistansi isolasi secara simultan. Kajian ini sekaligus memperluas diskursus material isolator berbasis biomassa yang selama ini lebih banyak diarahkan pada aspek keberlanjutan material dibandingkan analisis mendalam mengenai mekanisme listrik pada struktur multilayer.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh jumlah lapisan komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide terhadap sifat resistansi isolasi listrik pada kondisi kering dan basah melalui pendekatan eksperimen berbasis fabrikasi multilayer menggunakan metode spin coating. Kajian ini diarahkan untuk mengidentifikasi perubahan karakteristik resistansi sebagai konsekuensi dari interaksi antara pembentukan jalur konduksi internal dan hambatan difusi kelembaban pada setiap variasi lapisan. Kontribusi teoretis penelitian terletak pada pengembangan pemahaman mengenai mekanisme transport muatan dan perilaku difusi fluida dalam sistem komposit multilayer berbasis polimer nano, khususnya pada kondisi ketika efek perkolasi dan efek penghalang kelembaban bekerja secara simultan. Kontribusi metodologis penelitian diwujudkan melalui penerapan desain multilayer terkontrol sebagai pendekatan evaluatif untuk memetakan hubungan antara struktur lapisan dan performa isolasi listrik, sehingga menghasilkan dasar ilmiah yang dapat digunakan dalam pengembangan material isolator tegangan tinggi dengan stabilitas listrik yang lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan operasional.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi empiris berbasis eksperimen laboratorium yang dirancang untuk menganalisis pengaruh jumlah lapisan komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide terhadap sifat resistansi isolasi listrik pada kondisi lingkungan berbeda. Material komposit dikembangkan menggunakan Polydimethylsiloxane (PDMS) sebagai matriks utama, silika hasil ekstraksi sekam padi sebagai filler isolatif, serta graphene oxide sebagai penguat antarmuka dan pengontrol transport muatan. Silika diperoleh melalui tahapan pengasaman menggunakan larutan HCl, pencucian, pengeringan, dan kalsinasi untuk menghasilkan partikel SiO₂ dengan kemurnian tinggi. Seluruh komponen kemudian dicampur hingga homogen sebelum difabrikasi menggunakan metode spin coating pada substrat kaca berukuran 1 × 1 cm dengan kecepatan putar 1000 rpm selama 30 detik. Proses pelapisan dilakukan secara bertingkat hingga diperoleh variasi 1, 2, 3, 4, dan 5 lapisan dengan kondisi fabrikasi identik pada setiap tahap guna menjaga konsistensi struktur multilayer. Setelah proses deposisi, sampel mengalami curing termal untuk membentuk ikatan silang yang stabil pada matriks polimer. Pendekatan multilayer

dipilih sebagai inovasi metodologis untuk mengevaluasi secara sistematis hubungan antara distribusi filler, ketebalan lapisan, dan mekanisme transport muatan dalam sistem isolasi berbasis polimer nano.

Validasi karakteristik material dilakukan melalui kombinasi pengujian struktur dan evaluasi performa listrik untuk memastikan keterkaitan antara morfologi komposit dan perilaku resistansi isolasi. Analisis struktur kristal dilakukan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD), identifikasi gugus fungsi menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), serta observasi morfologi permukaan dan distribusi filler menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM). Pengujian resistansi isolasi listrik dilakukan menggunakan High Voltage Insulation Tester (HVIT) pada tegangan 10 kV dalam kondisi kering dan basah, di mana sampel pada kondisi basah direndam selama 24 jam sebelum pengujian untuk mensimulasikan pengaruh kelembaban operasional. Setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan guna meningkatkan reliabilitas data dan meminimalkan deviasi eksperimental. Metrik evaluasi utama yang digunakan meliputi nilai resistansi isolasi ($G\Omega$), perubahan resistansi berdasarkan variasi jumlah lapisan, serta hubungan antara ketebalan lapisan dan stabilitas listrik material pada kondisi lingkungan berbeda. Ketahanan metodologis penelitian diperkuat melalui pengendalian parameter fabrikasi, konsistensi kondisi pengujian, dan pendekatan komparatif multilayer yang memungkinkan identifikasi mekanisme perkolasi filler dan hambatan difusi kelembaban secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan komposit lapisan tunggal konvensional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Struktur dan Morfologi Komposit PDMS–Silika Sekam Padi–Graphene Oxide

Hasil karakterisasi awal menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan menghasilkan perubahan morfologi permukaan yang cukup signifikan pada komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide. Citra SEM memperlihatkan bahwa sampel satu lapisan memiliki distribusi filler yang relatif homogen dengan aglomerasi partikel yang masih rendah. Struktur tersebut menunjukkan bahwa proses spin coating pada kecepatan 1000 rpm mampu menghasilkan dispersi awal yang stabil pada matriks PDMS. Stabilitas dispersi ini berkaitan dengan kemampuan PDMS membentuk adhesi antarmuka yang baik melalui pengendalian densitas ikatan silang dalam matriks polimer (Shin et al., 2020).

Variasi dua dan tiga lapisan memperlihatkan peningkatan kepadatan distribusi filler pada permukaan komposit. Partikel silika mulai membentuk pola jaringan mikro yang lebih rapat, sedangkan graphene oxide tampak tersebar pada daerah antarmuka antar lapisan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penambahan lapisan tidak hanya meningkatkan ketebalan material, tetapi juga mengubah konfigurasi internal jalur transport muatan. Fenomena serupa diamati pada sistem graphene/silika komposit yang menunjukkan perubahan stabilitas dimensi akibat peningkatan kontak antarpartikel pada struktur multilayer (Wang et al., 2021).

Karakterisasi FTIR menunjukkan keberadaan gugus Si–O–Si pada rentang $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ yang menandakan keberhasilan integrasi silika ke dalam matriks PDMS. Intensitas puncak tersebut meningkat seiring bertambahnya jumlah lapisan, yang menunjukkan meningkatnya dominasi fase anorganik pada struktur komposit. Peningkatan ini berkorelasi dengan semakin besarnya luas antarmuka heterogen antara silika dan PDMS pada struktur multilayer. Hubungan antarmuka semacam ini berperan penting dalam menentukan kestabilan isolasi listrik material komposit nano (Yuan et al., 2024).

Distribusi ketebalan lapisan menunjukkan pola peningkatan bertahap yang konsisten terhadap jumlah deposisi material. Sampel satu lapisan memiliki ketebalan rata-rata 1,2 mm, sedangkan lima lapisan mencapai 1,6 mm dengan tingkat homogenitas permukaan yang masih relatif stabil. Peningkatan ketebalan tersebut menunjukkan bahwa proses deposisi bertingkat mampu membentuk struktur multilayer tanpa menghasilkan retakan makroskopik yang signifikan. Karakteristik ini penting karena cacat struktural dapat menjadi pusat konsentrasi medan listrik pada material isolator (Alabi et al., 2026). Tabel 1 memperlihatkan hubungan antara jumlah lapisan dan perubahan karakteristik morfologi permukaan komposit berdasarkan observasi SEM dan pengukuran ketebalan.

Tabel 1. Karakteristik Morfologi dan Ketebalan Komposit

Jumlah Lapisan	Ketebalan (mm)	Distribusi Filler	Homogenitas Permukaan
1	1,2	Homogen	Sangat Baik
2	1,3	Mulai Padat	Baik
3	1,4	Jaringan Mikro Terbentuk	Baik
4	1,5	Kontak Antartikel Tinggi	Sedang
5	1,6	Aglomerasi Lokal Meningkatkan	Sedang

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan mendorong kenaikan intensitas kontak antar filler pada matriks komposit. Struktur multilayer yang semakin rapat memperbesar peluang terbentuknya jaringan transport muatan akibat berkurangnya jarak antartikel graphene oxide. Fenomena ini berkaitan dengan konsep percolation behavior pada komposit polimer konduktif yang dipengaruhi oleh distribusi partikel pengisi dalam matriks isolatif (Wang et al., 2025). Peningkatan kontak antarmuka juga mempengaruhi kestabilan listrik melalui perubahan distribusi medan lokal pada lapisan komposit.

Analisis XRD menunjukkan pola difraksi amorf dominan yang berasal dari PDMS, disertai peningkatan intensitas puncak SiO₂ pada variasi multilayer. Keberadaan fase amorf menunjukkan bahwa matriks PDMS masih mendominasi struktur utama komposit meskipun jumlah lapisan meningkat. Intensitas silika yang semakin tinggi menunjukkan bahwa deposisi berulang menghasilkan akumulasi filler anorganik pada permukaan dan antarlapisan. Karakteristik tersebut sesuai dengan laporan mengenai silika sekam padi yang memiliki stabilitas kristal tinggi dan mampu mempertahankan struktur pada proses pemanasan moderat (Nzereogu et al., 2023).

Keberadaan graphene oxide pada sistem multilayer memberikan pengaruh penting terhadap kestabilan struktur antarmuka. Observasi morfologi menunjukkan bahwa graphene oxide membentuk jembatan mikro antara partikel silika dan matriks PDMS, sehingga meningkatkan keterikatan struktural antar lapisan. Interaksi tersebut memperkuat kontinuitas struktur komposit sekaligus meningkatkan kemungkinan terbentuknya jalur perpindahan muatan internal. Efek antarmuka serupa dilaporkan pada sistem heterojunction berbasis graphene yang menunjukkan peningkatan interaksi antarfasa akibat konfigurasi partikel karbon dan silika (Chen et al., 2020).

Sampel empat dan lima lapisan menunjukkan munculnya aglomerasi lokal pada beberapa area permukaan komposit. Aglomerasi tersebut menyebabkan distribusi medan listrik menjadi lebih tidak seragam dibandingkan variasi lapisan rendah. Kondisi ini meningkatkan probabilitas terjadinya konsentrasi muatan pada titik tertentu yang berpotensi mempengaruhi stabilitas resistansi isolasi. Gejala tersebut umum ditemukan pada komposit multilayer dengan kandungan filler konduktif tinggi yang mendekati ambang perkolasi listrik (Ramirez et al., 2021).

Karakteristik morfologi yang diperoleh memperlihatkan bahwa jumlah lapisan memiliki hubungan langsung terhadap perubahan konfigurasi internal komposit. Struktur multilayer tidak hanya meningkatkan ketebalan material, tetapi juga mempengaruhi kualitas dispersi filler dan kontinuitas jalur antarmuka. Perubahan tersebut menjadi faktor dominan yang menentukan perilaku transport muatan pada pengujian resistansi isolasi berikutnya. Kecenderungan ini mendukung pandangan bahwa rekayasa struktur multilayer merupakan pendekatan penting dalam pengembangan material isolator berbasis polimer nano modern (Prsetyo et al., 2025).

Pengaruh Jumlah Lapisan terhadap Resistansi Isolasi Listrik pada Kondisi Kering

Pengujian resistansi isolasi pada kondisi kering menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan menyebabkan penurunan nilai resistansi secara bertahap. Sampel satu lapisan menghasilkan resistansi sebesar 250 GΩ, sedangkan sampel lima lapisan mengalami penurunan hingga 70 GΩ. Tren tersebut memperlihatkan bahwa struktur multilayer mempengaruhi mekanisme transport muatan di dalam matriks PDMS secara signifikan. Penurunan resistansi pada sistem multilayer sering dikaitkan dengan meningkatnya kemungkinan terbentuknya jalur konduksi internal akibat interaksi antar filler konduktif (Wang et al., 2025).

Variasi satu lapisan menunjukkan performa isolasi tertinggi karena distribusi graphene oxide masih terpisah secara efektif oleh matriks PDMS dan partikel silika. Struktur tersebut menghasilkan hambatan transport elektron yang relatif besar sehingga perpindahan muatan berlangsung sangat terbatas. Matriks PDMS berperan dominan sebagai penghalang listrik melalui karakter hidrofobik dan elastisitas strukturalnya yang stabil. Karakteristik tersebut sejalan dengan laporan mengenai kemampuan PDMS mempertahankan kestabilan listrik pada aplikasi isolator tegangan tinggi (Singh, 2022).

Penurunan resistansi mulai terlihat signifikan pada variasi dua dan tiga lapisan. Struktur multilayer menyebabkan jarak antarpartikel graphene oxide menjadi semakin dekat sehingga probabilitas tunneling electron meningkat. Fenomena tersebut memperbesar peluang perpindahan muatan melalui mekanisme hopping conduction pada daerah antarmuka antar lapisan. Model transport semacam ini umum ditemukan pada komposit polimer dengan filler karbon yang berada mendekati ambang perkolasi (Wang et al., 2025).

Analisis morfologi menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan menyebabkan distribusi filler menjadi lebih padat dan kompleks. Kontak antar partikel silika dan graphene oxide membentuk jaringan mikro yang mempercepat proses migrasi muatan pada kondisi medan listrik tinggi. Keadaan tersebut menyebabkan resistansi intrinsik material mengalami penurunan meskipun matriks PDMS masih mendominasi struktur utama komposit. Hubungan antara peningkatan kontak antarfase dan perubahan sifat listrik juga dilaporkan pada sistem graphene/PDMS berbasis nano-komposit multilayer (Shen et al., 2019). Tabel 2 menunjukkan perubahan resistansi isolasi pada kondisi kering berdasarkan variasi jumlah lapisan komposit.

Tabel 2. Resistansi Isolasi Komposit pada Kondisi Kering

Jumlah Lapisan	Tegangan Uji (kV)	Resistansi (GΩ)
1	10	250
2	10	150
3	10	120
4	10	100
5	10	70

Data pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa penurunan resistansi berlangsung secara nonlinier terhadap penambahan lapisan. Penurunan paling besar terjadi antara satu dan dua lapisan, yang menunjukkan fase awal pembentukan jalur konduksi internal pada sistem komposit. Setelah tiga lapisan, laju penurunan resistansi cenderung lebih stabil karena jaringan transport muatan mulai terbentuk secara lebih kontinu. Karakteristik tersebut sesuai dengan konsep equivalent circuit pada komposit polimer konduktif yang menunjukkan perubahan drastis resistansi di sekitar ambang perkolasi (Wang et al., 2025).

Variasi empat dan lima lapisan menunjukkan peningkatan intensitas interaksi antar filler graphene oxide pada matriks PDMS. Struktur multilayer menghasilkan jalur konduksi yang lebih panjang dan saling terhubung sehingga hambatan terhadap aliran elektron menjadi lebih rendah. Kondisi tersebut menyebabkan arus bocor internal meningkat ketika material diberikan tegangan uji sebesar 10 kV. Efek serupa ditemukan pada sistem komposit karbon-silika yang mengalami peningkatan konduktivitas akibat terbentuknya jaringan konduktif mikro pada struktur multilayer (Ramirez et al., 2021).

Perubahan resistansi juga dipengaruhi oleh kualitas adhesi antarmuka antara PDMS dan partikel pengisi. Pada jumlah lapisan rendah, ikatan antarmuka masih relatif stabil sehingga distribusi medan listrik berlangsung lebih homogen. Penambahan lapisan memperbesar kemungkinan terbentuknya area antarmuka tidak seragam yang dapat menjadi pusat akumulasi muatan. Kondisi tersebut berhubungan dengan perubahan densitas ikatan silang pada PDMS yang mempengaruhi stabilitas struktural komposit (Shin et al., 2020).

Keberadaan silika sekam padi dalam matriks komposit tetap memberikan kontribusi penting terhadap kestabilan isolasi listrik. Partikel SiO₂ berfungsi memperpanjang jalur perpindahan muatan

dan menekan mobilitas elektron bebas pada sistem multilayer. Efektivitas tersebut menyebabkan resistansi material masih berada pada kategori tinggi meskipun jumlah lapisan meningkat hingga lima lapisan. Peran silika biomassa sebagai filler isolatif juga telah dibuktikan pada berbagai sistem komposit listrik berbasis material organik dan polimer (Junian et al., 2021).

Pola penurunan resistansi pada kondisi kering memperlihatkan bahwa jumlah lapisan menjadi parameter kritis dalam menentukan stabilitas listrik komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide. Struktur multilayer menghasilkan kompromi antara peningkatan integritas struktur dan meningkatnya risiko terbentuknya jalur konduktif internal. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa optimasi jumlah lapisan harus mempertimbangkan keseimbangan antara distribusi filler, homogenitas antarmuka, dan ambang perkolasi material. Pendekatan rekayasa multilayer semacam ini menjadi perhatian utama dalam pengembangan material isolator nano-komposit modern dengan performa listrik adaptif (Alabi et al., 2026).

Stabilitas Resistansi Isolasi pada Kondisi Basah dan Mekanisme Hambatan Difusi Kelembaban

Pengujian resistansi isolasi pada kondisi basah menunjukkan kecenderungan yang berbeda dibandingkan kondisi kering. Nilai resistansi meningkat secara bertahap seiring bertambahnya jumlah lapisan komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide. Sampel satu lapisan menghasilkan resistansi sebesar 90 G Ω , sedangkan variasi lima lapisan mencapai 200 G Ω setelah perendaman selama 24 jam. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa struktur multilayer memberikan pengaruh signifikan terhadap kemampuan material dalam menghambat penetrasi air dan transport ionik internal (Liu et al., 2025).

Variasi satu lapisan memperlihatkan penurunan resistansi yang cukup besar dibandingkan kondisi kering karena jalur difusi kelembaban masih relatif terbuka. Molekul air dapat menembus struktur komposit dan membentuk medium konduksi ionik pada daerah antarmuka PDMS dan filler. Kondisi tersebut meningkatkan mobilitas ion serta mempercepat terbentuknya arus bocor ketika tegangan tinggi diberikan pada material. Fenomena serupa banyak ditemukan pada sistem isolator polimer yang mengalami degradasi akibat pengaruh kelembaban lingkungan (Kim, 2021).

Penambahan jumlah lapisan menghasilkan perubahan konfigurasi difusi fluida pada struktur komposit. Variasi dua dan tiga lapisan mulai membentuk jalur difusi berkelok yang memperpanjang lintasan penetrasi molekul air menuju bagian internal material. Struktur tersebut menyebabkan laju migrasi ion menjadi lebih lambat sehingga resistansi isolasi meningkat secara bertahap. Mekanisme tortuous path pada komposit multilayer dikenal efektif dalam meningkatkan kestabilan listrik material pada kondisi lembab (Wang et al., 2025).

Keberadaan silika sekam padi memberikan kontribusi penting terhadap peningkatan ketahanan kelembaban komposit. Partikel SiO₂ berfungsi sebagai penghalang mikro yang menghambat perpindahan fluida melalui matriks PDMS. Distribusi silika yang semakin rapat pada variasi multilayer menyebabkan jalur difusi air menjadi lebih kompleks dan tidak linier. Karakteristik ini sesuai dengan laporan mengenai filler berbasis biomassa yang mampu meningkatkan stabilitas dielektrik material isolasi melalui pengendalian porositas dan penetrasi kelembaban (Khan et al., 2025). Tabel 3 memperlihatkan perubahan resistansi isolasi komposit pada kondisi basah berdasarkan variasi jumlah lapisan.

Tabel 3. Resistansi Isolasi Komposit pada Kondisi Basah

Jumlah Lapisan	Tegangan Uji (kV)	Resistansi (G Ω)
1	10	90
2	10	110
3	10	150
4	10	180
5	10	200

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa peningkatan resistansi berlangsung cukup konsisten pada setiap penambahan lapisan. Kenaikan terbesar terjadi pada transisi dari dua ke tiga lapisan, yang

menunjukkan mulai dominannya mekanisme hambatan difusi kelembaban dibandingkan efek transport ionik internal. Struktur multilayer menghasilkan hambatan tambahan pada setiap antarmuka sehingga molekul air memerlukan energi lebih besar untuk menembus bagian dalam material. Pola ini memperlihatkan hubungan erat antara konfigurasi multilayer dan peningkatan performa isolasi listrik pada lingkungan lembab (Alabi et al., 2026).

Variasi empat dan lima lapisan menunjukkan resistansi tertinggi karena struktur komposit menjadi semakin padat dan sulit ditembus air. Lapisan tambahan meningkatkan kontinuitas fase hidrofobik PDMS sehingga kontak langsung antara molekul air dan filler konduktif menjadi lebih terbatas. Keadaan tersebut menyebabkan pembentukan jalur konduksi ionik mengalami penurunan yang cukup signifikan. Sifat hidrofobik PDMS memang dikenal efektif dalam menekan arus bocor permukaan pada aplikasi tegangan tinggi berbasis polimer (Singh, 2022).

Graphene oxide pada kondisi basah menunjukkan perilaku yang berbeda dibandingkan pada kondisi kering. Interaksi antara graphene oxide dan silika menghasilkan struktur antarmuka yang lebih stabil terhadap penetrasi kelembaban karena partikel silika mampu membatasi kontak langsung graphene dengan medium air. Konfigurasi tersebut mengurangi kemungkinan terbentuknya jalur konduktif berbasis ion pada daerah multilayer. Efek stabilisasi antarmuka ini juga diamati pada sistem reduced graphene oxide yang dimodifikasi menggunakan silika untuk meningkatkan kestabilan struktur komposit (Munasir, 2025).

Peningkatan resistansi pada kondisi basah juga berkaitan dengan perubahan energi permukaan material komposit. Struktur multilayer menyebabkan sudut kontak permukaan meningkat sehingga air lebih sulit menyebar pada permukaan material. Kondisi tersebut menurunkan peluang terbentuknya lapisan air kontinu yang biasanya menjadi medium utama transport ionik pada isolator polimer. Efektivitas lapisan hidrofobik dalam mengendalikan arus bocor telah dibuktikan pada berbagai sistem coating isolator tegangan tinggi (Widati et al., 2025).

Karakteristik resistansi pada kondisi basah menunjukkan bahwa desain multilayer mampu meningkatkan stabilitas listrik komposit melalui pengendalian simultan terhadap difusi kelembaban dan transport muatan. Struktur berlapis menghasilkan kombinasi antara hambatan fisik, penguatan antarmuka, dan peningkatan sifat hidrofobik pada sistem komposit berbasis PDMS. Mekanisme tersebut memperlihatkan bahwa peningkatan jumlah lapisan tidak selalu menurunkan performa isolasi, tetapi sangat bergantung pada kondisi lingkungan operasional material. Temuan ini memperkuat pendekatan rekayasa multilayer sebagai strategi penting dalam pengembangan material isolator listrik dengan ketahanan kelembaban tinggi dan stabilitas jangka panjang (Prasetyo et al., 2025).

KESIMPULAN

Jumlah lapisan komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide terbukti mempengaruhi karakteristik struktur, morfologi, dan resistansi isolasi listrik material secara signifikan melalui perubahan distribusi filler, konfigurasi antarmuka, dan mekanisme transport muatan pada sistem multilayer. Peningkatan jumlah lapisan menghasilkan struktur komposit yang semakin padat dengan intensitas kontak antar partikel yang lebih tinggi, sehingga pada kondisi kering resistansi isolasi mengalami penurunan akibat meningkatnya peluang terbentuknya jalur konduksi internal dan efek perkolasi graphene oxide di dalam matriks PDMS. Kondisi berbeda ditunjukkan pada lingkungan basah, di mana struktur multilayer membentuk hambatan difusi kelembaban yang lebih kompleks dan efektif memperlambat penetrasi air serta transport ionik, sehingga resistansi isolasi meningkat secara bertahap seiring bertambahnya jumlah lapisan. Karakteristik tersebut menunjukkan adanya kompetisi antara mekanisme konduksi internal dan efek penghalang kelembaban yang dikendalikan oleh konfigurasi multilayer komposit. Pendekatan rekayasa multilayer pada sistem PDMS–silika sekam padi–graphene oxide memberikan kontribusi penting dalam pengembangan material isolator berbasis polimer nano yang memiliki stabilitas listrik lebih adaptif terhadap variasi kondisi operasional tegangan tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

Alabi, A. S., Popoola, P. A., Popoola, O. M., Umaru, O. B., & Joshua, G. (2026). Overview on the recent technique on the evaluation of insulation of the polymer micro- and nanocomposite materials. *Polymer Micro and Nanocomposites for High Voltage Insulation*, 195–219. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21716-6.00003-8>

- Chen, J. P., Jia, H., Liu, Z., Kong, Q. Q., Hou, Z. H., Xie, L. J., ... & Chen, C. M. (2020). Construction of C-Si heterojunction interface in SiC whisker/reduced graphene oxide aerogels for improving microwave absorption. *Carbon*, *164*, 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.03.049>.
- Junian, S. S., Makmud, M. Z. H., Jamain, Z., Mohd Amin, K. N., Dayou, J., & Azil Illias, H. (2021). Effect of rice husk filler on the structural and dielectric properties of palm oil as an electrical insulation material. *Energies*, *14*(16), 4921. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/16/4921#>.
- Khan, Y., Sattar, A., Ullah, S. A., Rehman, W., Khan, S., Hussain, R., ... & Gulshan, U. (2025). Rice Husk Based Bio-composites. In *Rice Husk Biomass: Processing, Properties and Applications* (pp. 235-270). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-1082-2_13.
- Kim, T. (2021). Application of hydrophobic coating to reduce leakage current through surface energy control of high voltage insulator. *Applied Surface Science*. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151820>
- Liu, S., Wu, C., Zuo, Z., Zhou, Y., Mei, H., Wang, Q., Lyu, X., Li, W., & Liang, X. (2025). Influence of Moisture on Electrical Properties of Fibre-Reinforced Polymer Core Rod in the Decay-Like Degraded Composite Insulator |. 1–10. <https://doi.org/10.1049/hve2.70191>
- Munasir, M. (2025). Sintesis Dan Karakterisasi Reduced Graphene Oxide Dari Cangkang Sawit Termodifikasi Silika. *Inovasi Fisika Indonesia*, *14*(2), 268-275. <https://doi.org/10.26740/ifi.v14n2.p268-275>.
- Nzereogu, P. U., Omah, A. D., Ezema, F. I., Iwuoha, E. I., & Nwanya, A. C. (2023). Silica extraction from rice husk : Comprehensive review and applications. *Hybrid Advances*, *4*(October), 100111. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100111>
- Prasetyo, M. T., Sulistyono, S., Nugroho, S., Syakur, A., & Mohamed, A. I. (2025). Fabrication and Testing of Epoxy Resin-Based Composites for Electrical Insulation Material Applications. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, *135*(1), 71-82. <https://doi.org/10.37934/aram.135.1.7182>.
- Ramirez, C., Belmonte, M., Miranzo, P., & Osendi, M. I. (2021). Applications of ceramic/graphene composites and hybrids. *Materials*, *14*(8), 2071. <https://doi.org/10.3390/ma14082071>.
- Ratsameetammajak, N., Autthawong, T., Chairuang Sri, T., Kurata, H., Yu, A. S., & Sarakonsri, T. (2022). Rice husk-derived nano-SiO₂ assembled on reduced graphene oxide distributed on conductive flexible polyaniline frameworks towards high-performance lithium-ion batteries. *RSC Advances*, *12*(23), 14621–14630. <https://doi.org/10.1039/d2ra00526c>
- Shen, C., Wang, H., Zhang, T., & Zeng, Y. (2019). Silica coating onto graphene for improving thermal conductivity and electrical insulation of graphene / Polydimethylsiloxane nanocomposites. *Journal of Materials Science & Technology*, *35*(1), 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.016>
- Shin, E., Lee, S. B., Kim, G. H., Jung, J., & Lee, C. K. (2020). Enhanced interfacial adhesion of polydimethylsiloxane (PDMS) by control of the crosslink density. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *20*(11), 6768-6775. <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.18804>
- Singh, A. K. (2022). Polydimethylsiloxane based sustainable hydrophobic / oleophilic coatings for oil / water separation : A review. *Cleaner Materials*, *6*(April), 100136. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100136>
- Smith, A. M., Inocencio, D. G., Pardi, B. M., Gopinath, A., & Andresen Eguiluz, R. C. (2024). Facile determination of the Poisson's ratio and Young's modulus of polyacrylamide gels and polydimethylsiloxane. *ACS Applied Polymer Materials*, *6*(4), 2405-2416. <https://doi.org/10.1021/acsapm.3c03154>
- Wang, J., Zhou, Y., Li, J., Feng, Y., Zhang, J., Yu, H., & Zhuang, X. (2021). Improved wettability and dimensional stability of bamboo timber by coating graphene/silica composites. *International Journal of Polymer Science*, *2021*(1), 7053143. <https://doi.org/10.1155/2021/7053143>.
- Wang, Z., Zhang, J., & Weng, G. J. (2025). Modeling the percolation behavior of conductive particles / insulating polymer-based composites with equivalent circuit of resistance. *Polymer*, *324*(March), 128262. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.128262>
- Wang, Z., Zhou, B., Li, Y., Shen, Z., & Wang, J. H. (2025). Recent advances on multilayer polymer composites of high energy density and low dielectric loss. *Polymer Reviews*, *65*(1), 281-301. <https://doi.org/10.1080/15583724.2024.2406970>

- Widati, A. A., Salsabilah, A. F., Aisyah, A., Rahmawati, Z., Nazwanie, W., & Abdullah, W. (2025). *Enhancing Surface Properties Through the Applications of Silica Superhydrophobic Coating*. 25(4), 1291–1301. <https://doi.org/10.22146/ijc.99793>.
- Yuan, K., Lin, G., Li, T., Guo, Y., Li, W., Gao, H., & Miao, J. (2024). Enhancing electrical insulation and thermal conductivity in polydimethylsiloxane polymer nanocomposites through silica coating on carbon fibers. *Polymer*, 312, 127572. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127572>.