



## Pengaruh Pencelupan Komposit PDMS-Silika Sekam Padi-*Graphene Oxide* terhadap Resistansi Isolasi Listrik

Sarmila Yetria<sup>1\*</sup>, Ratnawulan<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup> Universitas Negeri Padang, Indonesia  
email: [sarmilayetri1501@gmail.com](mailto:sarmilayetri1501@gmail.com)

### Article Info :

Received:  
10-03-2026  
Revised:  
02-04-2026  
Accepted:  
15-04-2026

### Abstract

*This study analyzes the effect of varying the number of dips on the electrical insulation resistance of PDMS–rice husk silica–graphene oxide composites using a multi-step dip-coating experimental approach. The composite was synthesized using a polydimethylsiloxane matrix combined with biomass silica extracted from rice husks and graphene oxide as a multifunctional filler to enhance the material's dielectric stability. Dipping variations were performed 1, 3, 5, and 7 times on a glass substrate, then tested using a High Voltage Insulation Tester at 10 kV under dry and wet conditions. Test results showed that the highest insulation resistance was obtained with a single immersion, at 420 GΩ under dry conditions and 100 GΩ under wet conditions. Increasing the number of immersions caused a decrease in resistance due to structural inhomogeneity, filler agglomeration, and an increase in micro-conductive pathways within the composite layer. Wet conditions accelerate the decline in insulation performance because water adsorption on the coating surface increases local conductivity. The integration of PDMS, rice husk silica, and graphene oxide demonstrates high potential as a biomass-based electrical insulator coating with stable dielectric characteristics in humid environments.*

**Keywords:** PDMS, Rice Husk Silica, Graphene Oxide, Dip-Coating, Electrical Insulation Resistance.

### Abstrak

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi jumlah pencelupan terhadap resistansi isolasi listrik komposit PDMS–silika sekam padi–*graphene oxide* melalui pendekatan eksperimen berbasis dip-coating bertingkat. Komposit disintesis menggunakan matriks polydimethylsiloxane yang dipadukan dengan silika biomassa hasil ekstraksi sekam padi dan *graphene oxide* sebagai filler multifungsi untuk meningkatkan stabilitas dielektrik material. Variasi pencelupan dilakukan sebanyak 1, 3, 5, dan 7 kali pada substrat kaca, kemudian diuji menggunakan High Voltage Insulation Tester pada tegangan 10 kV dalam kondisi kering dan basah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa resistansi isolasi tertinggi diperoleh pada variasi 1 kali pencelupan sebesar 420 GΩ pada kondisi kering dan 100 GΩ pada kondisi basah. Peningkatan jumlah pencelupan menyebabkan penurunan resistansi akibat ketidakhomogenan struktur, aglomerasi filler, dan meningkatnya jalur konduktif mikro dalam lapisan komposit. Kondisi basah mempercepat penurunan performa isolasi karena adsorpsi air pada permukaan coating meningkatkan konduktivitas lokal. Integrasi PDMS, silika sekam padi, dan *graphene oxide* menunjukkan potensi tinggi sebagai coating isolator listrik berbasis biomassa dengan karakteristik dielektrik stabil pada lingkungan lembap.

**Kata kunci:** PDMS, Silika Sekam Padi, Graphene Oxide, Dip-Coating, Resistansi Isolasi Listrik.



©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

Peningkatan kompleksitas sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik pada era elektrifikasi global telah mendorong kebutuhan terhadap material isolator yang tidak hanya memiliki resistansi listrik tinggi, tetapi juga stabil terhadap paparan kelembapan, kontaminan lingkungan, dan fluktuasi termal yang ekstrem. Pergeseran paradigma dari isolator berbasis keramik menuju material polimerik menunjukkan kecenderungan yang semakin dominan dalam penelitian material teknik karena polimer silikon menawarkan kombinasi sifat dielektrik, fleksibilitas mekanik, dan ketahanan lingkungan yang lebih unggul dibandingkan material konvensional. Dalam konteks ini, polydimethylsiloxane (PDMS) memperoleh perhatian luas sebagai matriks isolasi karena mampu mempertahankan kestabilan listrik pada kondisi operasi yang kompleks sekaligus memungkinkan rekayasa struktur permukaan melalui

teknik deposisi lapisan tipis. Penelitian mengenai degradasi performa isolator akibat kontaminasi lingkungan memperlihatkan bahwa keberadaan air, garam, maupun partikel polutan mampu mempercepat pembentukan jalur arus bocor pada permukaan isolator polimer, sehingga menurunkan reliabilitas sistem tegangan tinggi secara signifikan (Negara et al., 2021). Persoalan tersebut menjadi semakin relevan di kawasan tropis dengan kelembapan tinggi, ketika stabilitas resistansi isolasi menjadi parameter kritis dalam mencegah kegagalan sistem kelistrikan dan rugi-rugi energi akibat kebocoran arus, sebagaimana ditunjukkan dalam pengembangan sistem monitoring arus bocor isolator yang menempatkan resistansi permukaan sebagai indikator utama performa isolasi (Malago et al., 2022). Dinamika perkembangan material isolasi modern kemudian bergerak menuju pendekatan komposit multifiller yang mengintegrasikan material berbasis silikon, nanopartikel oksida, dan nanomaterial karbon untuk menghasilkan lapisan isolator dengan performa dielektrik yang lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan operasional yang agresif.

Kajian-kajian mutakhir menunjukkan bahwa integrasi filler anorganik ke dalam matriks PDMS mampu menghasilkan peningkatan performa mekanik, termal, dan dielektrik secara simultan, meskipun efektivitasnya sangat ditentukan oleh homogenitas dispersi filler dan kualitas antarmuka antar fase material. Cordoba et al. (2023) menunjukkan bahwa komposit PDMS/SiO<sub>2</sub> mampu meningkatkan stabilitas mekanik lapisan isolasi sekaligus mempertahankan resistivitas listrik volumetrik yang tinggi melalui pembentukan jaringan penghalang mikro pada matriks polimer. Penelitian lanjutan oleh Cordoba et al. (2025) mengonfirmasi bahwa sintesis in-situ PDMS–SiO<sub>2</sub> menghasilkan interaksi antarmuka yang lebih stabil sehingga mampu memperbaiki ketahanan termal dan performa isolasi pada tegangan tinggi. Pada saat yang sama, pengembangan sumber silika berbasis biomassa memperoleh perhatian karena memberikan keuntungan ekonomi dan keberlanjutan material. Anisyah et al. (2023) membuktikan bahwa sekam padi dapat diekstraksi menjadi silika amorf berkadar tinggi melalui pengendalian suhu pembakaran dan proses alkalisasi, sedangkan Emiliyah et al. (2025) memperlihatkan bahwa variasi silika sekam padi dalam matriks PDMS berpengaruh terhadap struktur permukaan dan sifat hidrofobik lapisan. Sintesis kritis terhadap temuan-temuan tersebut memperlihatkan bahwa kontribusi utama silika tidak hanya terletak pada peningkatan kekakuan material, melainkan juga pada kemampuannya membatasi pembentukan jalur konduktif akibat penetrasi air melalui pengisian celah mikro pada struktur polimer. Perspektif ini menandakan bahwa keberhasilan komposit isolator modern tidak lagi ditentukan oleh dominasi satu material tunggal, melainkan oleh kualitas sinergi antarmuka antar fase penyusun komposit.

Perkembangan penggunaan nanomaterial karbon dalam sistem isolasi polimer memperluas lanskap rekayasa komposit karena graphene oxide memiliki struktur dua dimensi dengan luas permukaan tinggi dan gugus oksigen aktif yang memungkinkan peningkatan interaksi antarmuka dengan matriks polimer maupun partikel oksida. Aliansah dan Munasir (2025) menunjukkan bahwa modifikasi graphene oxide berbasis silika mampu menghasilkan struktur nanomaterial dengan stabilitas yang lebih baik melalui penguatan ikatan antar fase. Karakteristik tersebut membuka kemungkinan pembentukan lapisan komposit dengan distribusi filler yang lebih homogen dan ketahanan listrik yang lebih tinggi dibandingkan sistem PDMS–silika konvensional. Meskipun demikian, literatur yang tersedia memperlihatkan inkonsistensi konseptual terkait pengaruh graphene oxide terhadap performa isolasi listrik. Sebagian penelitian menempatkan graphene oxide sebagai filler penghambat pembentukan jalur bocor karena sifat konduktivitasnya lebih rendah dibandingkan graphene murni, sedangkan studi lain memperingatkan bahwa peningkatan fraksi nanomaterial karbon berpotensi memicu efek perkolasi parsial yang justru meningkatkan konduktivitas lokal dan menurunkan resistansi isolasi material (Novianty et al., 2025). Kontradiksi ini menunjukkan bahwa hubungan antara komposisi filler, struktur lapisan, dan karakteristik dielektrik masih belum sepenuhnya dipahami, terutama ketika graphene oxide diintegrasikan bersama silika biomassa dalam matriks PDMS. Kompleksitas tersebut semakin meningkat karena performa listrik komposit tidak hanya ditentukan oleh komposisi material, tetapi juga dipengaruhi secara signifikan oleh parameter fabrikasi lapisan yang mengontrol ketebalan, porositas, dan distribusi mikrostruktur.

Keterbatasan paling mendasar dalam literatur saat ini terletak pada minimnya kajian yang secara simultan mengevaluasi pengaruh parameter deposisi lapisan terhadap resistansi isolasi komposit berbasis PDMS–silika biomassa–graphene oxide pada kondisi lingkungan yang berbeda. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada optimasi komposisi filler atau karakterisasi sifat mekanik dan hidrofobik tanpa mengaitkannya secara langsung dengan perubahan performa resistansi isolasi akibat

variasi proses fabrikasi. Padahal, metode deposisi lapisan memiliki implikasi mikrostruktural yang sangat menentukan terhadap terbentuknya jalur kebocoran arus dan kestabilan dielektrik material. Khademsameni et al. (2024) memperlihatkan bahwa kualitas lapisan superhidrofobik pada isolator tegangan tinggi sangat dipengaruhi oleh integritas struktur permukaan dan kemampuan lapisan mempertahankan karakteristiknya pada kondisi lingkungan ekstrem. Celah empiris menjadi semakin jelas ketika jumlah siklus pencelupan dalam metode dip-coating jarang diperlakukan sebagai variabel utama dalam studi performa isolasi listrik, meskipun peningkatan jumlah pencelupan secara teoritis dapat menghasilkan dua konsekuensi yang saling bertentangan, yaitu peningkatan ketebalan lapisan yang memperkuat hambatan arus bocor dan peningkatan risiko aglomerasi filler yang menciptakan cacat mikro konduktif. Ketiadaan kajian sistematis mengenai hubungan nonlinier antara jumlah pencelupan, homogenitas struktur komposit, dan resistansi isolasi pada kondisi kering maupun basah menyebabkan pemahaman mekanisme degradasi listrik material komposit masih bersifat fragmentaris dan belum mampu menjelaskan kondisi optimum fabrikasi secara presisi.

Urgensi ilmiah dari persoalan ini berkaitan langsung dengan kebutuhan pengembangan material isolator generasi baru yang mampu mempertahankan stabilitas listrik pada lingkungan tropis dengan kelembapan tinggi dan tingkat kontaminasi permukaan yang terus meningkat akibat industrialisasi. Dari perspektif rekayasa material, kemampuan mempertahankan resistansi isolasi pada kondisi basah merupakan parameter yang jauh lebih relevan dibandingkan performa pada kondisi laboratorium kering, karena kegagalan isolasi dalam sistem nyata umumnya dipicu oleh akumulasi kelembapan dan pembentukan jalur bocor pada permukaan lapisan. Persoalan tersebut memiliki implikasi praktis yang luas terhadap efisiensi sistem transmisi tenaga listrik, keamanan operasional peralatan tegangan tinggi, dan umur pakai isolator polimer. Penggunaan silika sekam padi sebagai filler juga memperluas dimensi keberlanjutan penelitian karena menghubungkan pengembangan material maju dengan pemanfaatan limbah agroindustri bernilai rendah menjadi komponen fungsional bernilai tinggi. Pada saat yang sama, integrasi graphene oxide dalam sistem komposit PDMS–silika biomassa menawarkan kemungkinan terbentuknya struktur isolasi multiskala yang tidak hanya memperbaiki sifat hidrofobik dan stabilitas permukaan, tetapi juga memodifikasi mekanisme hambatan arus bocor melalui rekayasa antarmuka material. Posisi riset ini berada pada irisan antara rekayasa material komposit, teknologi lapisan tipis, dan sistem isolasi tegangan tinggi, dengan fokus utama pada bagaimana parameter proses fabrikasi mempengaruhi performa dielektrik material secara nyata dalam kondisi lingkungan yang berbeda.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah pencelupan pada proses dip-coating terhadap resistansi isolasi listrik komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide pada kondisi kering dan basah, sekaligus mengevaluasi hubungan antara peningkatan ketebalan lapisan dengan perubahan performa dielektrik material. Kajian ini menempatkan jumlah siklus pencelupan sebagai variabel fabrikasi utama yang menentukan homogenitas struktur, distribusi filler, dan pembentukan cacat mikro dalam lapisan komposit. Kontribusi teoretis penelitian terletak pada pengembangan pemahaman mengenai hubungan nonlinier antara parameter deposisi lapisan dan mekanisme resistansi isolasi pada sistem komposit multifiller berbasis biomassa dan nanomaterial karbon. Kontribusi metodologis penelitian diwujudkan melalui pendekatan eksperimental yang mengombinasikan variasi siklus dip-coating dengan pengujian resistansi isolasi pada dua kondisi lingkungan berbeda untuk memetakan stabilitas performa material secara lebih komprehensif. Penelitian ini juga memperluas perspektif rekayasa material isolator dengan menempatkan limbah sekam padi sebagai sumber silika fungsional dalam sistem komposit teknik berperforma tinggi. Hasil penelitian diharapkan mampu memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan pelapis isolator listrik yang lebih efisien, berkelanjutan, dan adaptif terhadap tantangan lingkungan operasional modern.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini merupakan studi empiris berbasis eksperimen laboratorium yang dirancang untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah pencelupan terhadap resistansi isolasi listrik komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide melalui pendekatan rekayasa material dan deposisi lapisan tipis. Pengembangan inovasi dilakukan dengan memanfaatkan silika hasil ekstraksi sekam padi sebagai filler berbasis biomassa yang diintegrasikan ke dalam matriks polydimethylsiloxane (PDMS) bersama graphene oxide untuk membentuk sistem komposit multifiller dengan karakteristik dielektrik yang ditingkatkan. Silika diperoleh melalui proses pengasaman dan kalsinasi abu sekam padi hingga menghasilkan struktur amorf berkadar tinggi, kemudian didispersikan bersama graphene oxide dalam

pelarut etanol menggunakan sonikasi untuk meminimalkan aglomerasi partikel dan meningkatkan homogenitas dispersi. Campuran tersebut selanjutnya dikombinasikan dengan Sylgard 184 elastomer base dan curing agent pada rasio 10:1, kemudian diaplikasikan pada substrat kaca berukuran  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  menggunakan metode dip-coating dengan variasi jumlah pencelupan sebanyak 1, 3, 5, dan 7 siklus. Setiap siklus pencelupan dilakukan selama 10 detik dengan kecepatan penarikan konstan dan diikuti tahap pengeringan pada suhu  $60^\circ\text{C}$  selama 15 menit untuk mengontrol pembentukan lapisan secara bertahap. Seluruh sampel kemudian mengalami proses curing akhir pada suhu  $80^\circ\text{C}$  selama 2 jam untuk memperkuat ikatan silang matriks PDMS dan meningkatkan stabilitas struktur komposit. Pendekatan metodologis ini dirancang untuk menghasilkan kontrol yang presisi terhadap ketebalan lapisan, distribusi filler, dan kualitas antarmuka material sehingga memungkinkan evaluasi hubungan antara parameter fabrikasi dan performa isolasi listrik secara lebih komprehensif.

Validasi performa komposit dilakukan melalui pengujian resistansi isolasi listrik menggunakan High Voltage Insulation Tester (HVIT) pada tegangan uji 10 kV dalam dua kondisi lingkungan, yaitu kondisi kering dan kondisi basah setelah perendaman sampel selama 24 jam di dalam air untuk mensimulasikan paparan kelembapan operasional. Evaluasi dilakukan dengan menempatkan elektroda pada kedua ujung lapisan komposit untuk mengukur kemampuan material dalam menghambat arus bocor melalui permukaan dan volume lapisan. Ketahanan metodologis penelitian diperkuat melalui penggunaan parameter pengujian yang seragam pada seluruh variasi sampel sehingga perubahan resistansi isolasi dapat diatribusikan secara langsung terhadap variasi jumlah pencelupan dan perubahan karakteristik struktur lapisan. Metrik evaluasi utama meliputi nilai resistansi isolasi listrik dalam satuan giga-ohm ( $\text{G}\Omega$ ), perubahan resistansi antara kondisi kering dan basah, serta hubungan antara ketebalan lapisan dengan performa dielektrik komposit. Analisis dilakukan secara deskriptif-kuantitatif untuk mengidentifikasi pola nonlinier antara peningkatan jumlah pencelupan dan penurunan resistansi isolasi akibat potensi aglomerasi filler serta pembentukan cacat mikro pada struktur komposit. Keunikan metodologi penelitian ini terletak pada integrasi material biomassa berbasis silika sekam padi dengan graphene oxide dalam sistem PDMS melalui pendekatan dip-coating bertingkat, yang memungkinkan pemetaan simultan terhadap pengaruh proses deposisi, homogenitas lapisan, dan stabilitas isolasi listrik pada kondisi lingkungan yang berbeda.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Karakteristik Resistansi Isolasi Listrik Komposit pada Kondisi Kering**

Pengujian resistansi isolasi listrik pada kondisi kering menunjukkan bahwa variasi jumlah pencelupan memberikan pengaruh langsung terhadap stabilitas dielektrik lapisan komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide. Nilai resistansi tertinggi diperoleh pada variasi pencelupan rendah yang menunjukkan bahwa homogenitas struktur lapisan masih terjaga dengan baik pada tahap deposisi awal. Fenomena tersebut berkaitan dengan kemampuan matriks PDMS dalam membentuk jaringan penghalang listrik yang stabil ketika distribusi filler masih berada pada kondisi optimum (Cordoba et al., 2023). Stabilitas resistansi pada kondisi kering juga memperlihatkan bahwa interaksi antara silika biomassa dan graphene oxide mampu menghasilkan jalur hambatan muatan yang efektif pada tegangan uji 10 kV.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa peningkatan jumlah pencelupan dari 1 kali menjadi 7 kali menyebabkan penurunan resistansi isolasi secara bertahap. Kondisi ini memperlihatkan adanya hubungan nonlinier antara ketebalan lapisan dan performa dielektrik komposit yang tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan peningkatan volume material. Ketidakteraturan struktur mikro akibat penumpukan lapisan diperkirakan menjadi faktor dominan yang mengurangi kemampuan material dalam menahan arus bocor. Karakteristik serupa juga diidentifikasi pada lapisan PDMS berbasis nanopartikel oksida yang mengalami penurunan stabilitas listrik akibat peningkatan densitas cacat antarmuka (Cordoba et al., 2025).

Distribusi filler pada matriks PDMS memiliki peran penting dalam menentukan kualitas isolasi listrik komposit. Silika sekam padi yang diperoleh melalui proses ekstraksi termal dan alkalisasi menghasilkan struktur amorf dengan luas permukaan tinggi sehingga mampu mengisi rongga mikro pada matriks polimer secara lebih efektif (Anisyah et al., 2023). Interaksi tersebut meningkatkan hambatan terhadap perpindahan elektron pada kondisi kering dan memperkuat kestabilan lapisan terhadap tegangan tinggi. Struktur amorf silika biomassa juga mendukung pembentukan lapisan yang lebih homogen dibandingkan filler berbasis mineral sintesis konvensional.

Nilai resistansi yang relatif tinggi pada pencelupan 1 kali menunjukkan bahwa lapisan awal memiliki densitas cacat yang rendah. Graphene oxide pada konsentrasi terbatas berperan sebagai penguat antarmuka yang meningkatkan keterikatan antar fase dalam sistem komposit. Karakteristik ini berkaitan dengan keberadaan gugus hidroksil dan epoksi pada graphene oxide yang memperbaiki kompatibilitas terhadap PDMS dan silika (Paramundhita & Suaebah, 2025). Stabilitas antarmuka tersebut menghasilkan distribusi tegangan listrik yang lebih merata selama pengujian berlangsung.

Tabel 1 menunjukkan perubahan resistansi isolasi listrik dan ketebalan lapisan pada kondisi kering untuk setiap variasi pencelupan. Peningkatan ketebalan lapisan tidak diikuti oleh peningkatan resistansi listrik secara proporsional sehingga memperlihatkan adanya keterbatasan proses deposisi berulang dalam mempertahankan homogenitas komposit. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa parameter fabrikasi memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan sekadar peningkatan jumlah material pelapis. Fenomena penurunan performa akibat akumulasi lapisan juga ditemukan pada coating PDMS antikorosi dengan ketebalan tinggi yang mengalami pembentukan mikroretakan permukaan (Thukral et al., 2024).

**Tabel 1. Resistansi Isolasi Listrik Komposit pada Kondisi Kering**

Jumlah Pencelupan	Tegangan Uji (kV)	Resistansi ( $G\Omega$ )	Ketebalan (mm)
1 kali	10	420	1,4
3 kali	10	400	1,6
5 kali	10	200	1,8
7 kali	10	180	2,0

Penurunan resistansi yang cukup tajam pada variasi 5 dan 7 kali pencelupan mengindikasikan munculnya ketidakhomogenan struktur akibat akumulasi filler dalam matriks PDMS. Aglomerasi partikel silika dan graphene oxide berpotensi membentuk jalur lokal dengan konduktivitas lebih tinggi dibandingkan daerah sekitarnya. Kondisi tersebut menyebabkan distribusi medan listrik menjadi tidak merata dan mempercepat terbentuknya arus bocor mikro pada lapisan komposit. Mekanisme serupa dijelaskan oleh Putri dan Putri (2024) yang menyatakan bahwa peningkatan densitas graphene oxide dapat meningkatkan konduktivitas lokal apabila dispersi partikel tidak stabil.

Karakteristik permukaan komposit juga mempengaruhi kestabilan resistansi isolasi pada kondisi kering. Permukaan yang lebih homogen mampu mengurangi konsentrasi medan listrik pada titik tertentu sehingga menghambat pembentukan discharge mikro. Pengamatan terhadap peningkatan ketebalan lapisan menunjukkan bahwa pencelupan berulang menghasilkan struktur permukaan yang lebih kasar dan berpotensi meningkatkan distribusi pori mikro. Temuan tersebut memiliki kesesuaian dengan studi Emiliyah et al. (2025) yang memperlihatkan bahwa variasi kandungan silika mempengaruhi morfologi dan sifat hidrofobik lembaran PDMS.

Nilai resistansi pada seluruh sampel masih berada jauh di atas standar minimum resistansi instalasi listrik tegangan rendah. Kondisi tersebut memperlihatkan bahwa sistem komposit berbasis PDMS–silika sekam padi–graphene oxide tetap memiliki kapasitas isolasi yang baik meskipun mengalami penurunan performa akibat peningkatan jumlah pencelupan. Stabilitas tersebut didukung oleh sifat intrinsik PDMS yang memiliki kemampuan menghambat perpindahan muatan pada struktur polimer silikon (Savitri et al., 2024). Penggunaan material organosilikon dalam sistem isolasi modern juga dikaitkan dengan kemampuan mempertahankan kestabilan termal dan dielektrik pada lingkungan operasional yang kompleks.

Hubungan antara resistansi isolasi dan ketebalan lapisan menunjukkan bahwa penambahan lapisan tidak selalu menghasilkan peningkatan performa listrik. Ketika ketebalan meningkat hingga 2 mm pada variasi 7 kali pencelupan, resistansi justru menurun hingga 180  $G\Omega$  akibat meningkatnya ketidakteraturan mikrostruktur. Kondisi tersebut menguatkan argumentasi bahwa kualitas deposisi lebih menentukan dibandingkan kuantitas lapisan yang terbentuk selama proses dip-coating. Pendekatan serupa juga disampaikan oleh Putra dan Artonang (2025) yang menegaskan bahwa kestabilan coating silika–PDMS lebih dipengaruhi oleh integritas struktur permukaan dibandingkan peningkatan ketebalan material secara langsung.

Analisis hasil pengujian pada kondisi kering memperlihatkan bahwa variasi pencelupan optimum berada pada rentang deposisi rendah dengan struktur lapisan yang masih homogen dan minim cacat mikro. Sistem komposit multifiller yang digunakan mampu menghasilkan resistansi tinggi karena sinergi antara PDMS sebagai matriks dielektrik, silika biomassa sebagai pengisi penghambat arus, dan graphene oxide sebagai penguat antarmuka material. Efektivitas struktur tersebut menunjukkan bahwa rekayasa deposisi lapisan memiliki peran strategis dalam pengembangan material isolator berbasis biomassa untuk aplikasi tegangan tinggi. Karakteristik ini relevan terhadap kebutuhan sistem isolasi modern yang menuntut stabilitas listrik tinggi pada material ringan dan ramah lingkungan (Riba & Moreno-eguilaz, 2023).

### Karakteristik Resistansi Isolasi Listrik Komposit pada Kondisi Basah

Pengujian resistansi isolasi listrik pada kondisi basah memperlihatkan perubahan performa dielektrik yang lebih kompleks dibandingkan kondisi kering. Paparan air selama 24 jam menyebabkan terbentuknya lapisan konduktif pada permukaan komposit sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya arus bocor mikro. Nilai resistansi pada setiap variasi pencelupan mengalami penurunan yang cukup signifikan meskipun masih berada pada kategori isolasi tinggi. Karakteristik tersebut sesuai dengan investigasi leakage current pada isolator polimer yang menunjukkan bahwa keberadaan kelembapan mampu meningkatkan mobilitas ion pada permukaan material (Salem et al., 2022).

Variasi pencelupan tetap menunjukkan pola penurunan resistansi yang serupa dengan kondisi kering, namun laju degradasinya menjadi lebih nyata setelah material terpapar air. Resistansi tertinggi tercatat pada variasi 1 kali pencelupan sebesar 100 G $\Omega$ , sedangkan nilai terendah diperoleh pada variasi 7 kali pencelupan sebesar 60 G $\Omega$ . Penurunan tersebut memperlihatkan bahwa struktur lapisan yang lebih tebal tidak selalu memiliki ketahanan lebih baik terhadap penetrasi air. Distribusi filler yang tidak homogen diperkirakan membentuk jalur difusi kelembapan pada area mikrostruktur tertentu sehingga mempercepat penurunan kemampuan isolasi.

Mekanisme degradasi resistansi pada kondisi basah dipengaruhi oleh interaksi molekul air dengan gugus aktif pada graphene oxide dan silika. Gugus hidroksil dan karboksilat pada graphene oxide memiliki kecenderungan menyerap molekul air sehingga meningkatkan konduktivitas permukaan ketika kelembapan meningkat (Aliansah & Munasir, 2025). Karakteristik ini menyebabkan sebagian area lapisan mengalami peningkatan transfer muatan yang berdampak pada menurunnya hambatan listrik total komposit. Struktur PDMS masih mampu mempertahankan sebagian sifat hidrofobiknya, namun efektivitas tersebut berkurang ketika jumlah pencelupan meningkat dan ketidakaturan lapisan menjadi lebih dominan.

Silika sekam padi dalam sistem komposit berperan sebagai penghambat penetrasi air melalui pengisian rongga mikro pada matriks PDMS. Efektivitas fungsi tersebut sangat bergantung pada homogenitas distribusi partikel dan kualitas ikatan antarmuka dengan polimer silikon. Ketika jumlah pencelupan meningkat, akumulasi filler menyebabkan sebagian partikel mengalami aglomerasi sehingga terbentuk area dengan densitas pori lebih tinggi. Kondisi tersebut sesuai dengan laporan Yuan et al. (2024) yang menyatakan bahwa distribusi nanopartikel silika yang tidak merata dapat menurunkan integritas struktural lapisan komposit pada lingkungan lembap.

Tabel 2 memperlihatkan perubahan nilai resistansi isolasi listrik pada kondisi basah untuk seluruh variasi pencelupan. Penurunan resistansi terjadi secara konsisten seiring bertambahnya jumlah lapisan, meskipun ketebalan komposit meningkat dari 1,4 mm menjadi 2,0 mm. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa faktor dominan dalam kestabilan dielektrik bukan hanya ketebalan material, melainkan kualitas mikrostruktur dan kemampuan lapisan mempertahankan sifat hidrofobiknya. Pola serupa juga ditemukan pada coating RTV berbasis silikon yang mengalami penurunan performa isolasi akibat peningkatan kontaminasi dan kelembapan permukaan (Salem et al., 2024).

**Tabel 2. Resistansi Isolasi Listrik Komposit pada Kondisi Basah**

Jumlah Pencelupan	Tegangan Uji (kV)	Resistansi (G $\Omega$ )	Ketebalan (mm)
1 kali	10	100	1,4
3 kali	10	80	1,6
5 kali	10	70	1,8

<b>Jumlah Pencelupan Tegangan Uji (kV) Resistansi (GΩ) Ketebalan (mm)</b>			
7 kali	10	60	2,0

Perubahan resistansi dari 100 GΩ menjadi 60 GΩ menunjukkan bahwa peningkatan jumlah pencelupan memperbesar kemungkinan terbentuknya jalur bocor berbasis kelembapan. Jalur tersebut berasal dari akumulasi molekul air pada daerah mikroretakan dan pori antarlapisan yang terbentuk selama proses dip-coating bertingkat. Struktur permukaan yang semakin kasar mempercepat proses adsorpsi air sehingga distribusi medan listrik menjadi kurang stabil pada tegangan tinggi. Temuan ini mendukung studi Khademsameni et al. (2024) yang menunjukkan bahwa ketahanan isolator polimer terhadap kondisi basah sangat dipengaruhi oleh integritas lapisan superhidrofobik pada permukaan material.

Pengaruh kondisi basah terhadap performa listrik komposit juga berkaitan dengan peningkatan leakage current pada area antarmuka material. Ketika lapisan menyerap air, resistivitas permukaan mengalami penurunan sehingga sebagian arus mengalir melalui jalur konduktif tipis yang terbentuk di permukaan coating. Fenomena tersebut menyebabkan distribusi tegangan pada material menjadi tidak merata dan meningkatkan kemungkinan terjadinya pelepasan muatan lokal. Karakteristik serupa dijelaskan oleh Malago et al. (2022) yang menempatkan arus bocor sebagai indikator utama degradasi performa isolator tegangan tinggi.

Kondisi lingkungan lembap memiliki pengaruh besar terhadap kestabilan material polimer berbasis silikon pada aplikasi kelistrikan. Simulasi kontaminasi permukaan isolator menunjukkan bahwa kombinasi kelembapan dan partikel polutan mampu mempercepat degradasi resistansi permukaan secara signifikan (Negara et al., 2021). Sistem komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide dalam penelitian ini masih mampu mempertahankan nilai resistansi relatif tinggi meskipun terpapar air selama 24 jam. Stabilitas tersebut menunjukkan bahwa matriks PDMS masih memberikan kontribusi dominan terhadap penghambatan arus bocor pada lingkungan lembap.

Penurunan resistansi pada variasi pencelupan tinggi memperlihatkan bahwa peningkatan ketebalan lapisan memiliki batas optimum tertentu. Ketika jumlah deposisi melebihi kapasitas homogenisasi material, distribusi graphene oxide dan silika menjadi tidak stabil sehingga membentuk area dengan konduktivitas lokal lebih tinggi. Efek tersebut berkaitan dengan fenomena perkolasi parsial yang memungkinkan perpindahan muatan melalui jaringan filler yang saling terhubung. Novianty et al. (2025) menjelaskan bahwa peningkatan densitas material konduktif pada sistem isolasi dapat memicu penurunan resistansi apabila distribusi partikel tidak terkendali dengan baik.

Analisis kondisi basah menunjukkan bahwa kualitas struktur lapisan menjadi faktor utama dalam mempertahankan kestabilan isolasi listrik komposit. Variasi pencelupan rendah menghasilkan lapisan yang lebih homogen sehingga penyerapan air dan pembentukan jalur bocor dapat diminimalkan secara lebih efektif. Integrasi silika biomassa dan graphene oxide dalam matriks PDMS terbukti mampu menghasilkan material dengan resistansi tinggi meskipun berada pada lingkungan lembap. Karakteristik tersebut mendukung pengembangan coating isolator berbasis silikon yang memiliki kombinasi sifat dielektrik, hidrofobik, dan keberlanjutan material untuk aplikasi tegangan tinggi modern (Munasir, 2025).

### **Perbandingan Performa Resistansi Isolasi Listrik pada Kondisi Kering dan Basah**

Perbandingan performa resistansi isolasi listrik antara kondisi kering dan basah menunjukkan bahwa lingkungan operasional memberikan pengaruh signifikan terhadap stabilitas dielektrik komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide. Setiap variasi pencelupan mengalami penurunan resistansi setelah perendaman selama 24 jam, meskipun tingkat degradasinya berbeda pada masing-masing sampel. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan sifat permukaan akibat adsorpsi air menjadi faktor utama yang menentukan performa listrik material. Karakteristik serupa dilaporkan oleh Salem et al. (2022) yang menunjukkan bahwa kelembapan mampu meningkatkan leakage current pada isolator polimer melalui pembentukan jalur konduktif tipis di permukaan material.

Variasi pencelupan rendah memperlihatkan kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan kestabilan resistansi ketika kondisi lingkungan berubah dari kering menjadi basah. Sampel dengan 1 kali pencelupan mengalami penurunan resistansi sebesar 320 GΩ, namun nilai akhirnya masih lebih tinggi dibandingkan variasi pencelupan lain. Fenomena tersebut memperlihatkan bahwa kualitas awal

struktur lapisan memiliki pengaruh lebih besar dibandingkan nilai absolut penurunan resistansi. Struktur lapisan yang homogen mampu menghambat penetrasi air dan menjaga distribusi medan listrik tetap stabil selama pengujian berlangsung.

Penurunan resistansi pada variasi pencelupan tinggi menunjukkan adanya peningkatan sensitivitas material terhadap kelembapan. Lapisan yang lebih tebal memiliki kemungkinan lebih besar mengalami ketidakteraturan distribusi filler sehingga terbentuk jalur penetrasi air pada area mikrostruktur tertentu. Kondisi tersebut mempercepat terbentuknya konduktivitas lokal yang menyebabkan arus bocor meningkat ketika material berada pada lingkungan basah. Riba dan Moreno-eguilaz (2023) menjelaskan bahwa kestabilan tracking resistance pada material polimer sangat dipengaruhi oleh kualitas permukaan dan kemampuan lapisan mempertahankan homogenitas struktur selama operasional.

Perbedaan nilai resistansi antara kondisi kering dan basah memperlihatkan bahwa ketebalan lapisan bukan satu-satunya parameter penentu performa dielektrik. Ketika ketebalan meningkat dari 1,4 mm menjadi 2 mm, penurunan resistansi justru menjadi lebih nyata akibat bertambahnya densitas cacat mikro pada struktur coating. Karakteristik tersebut mengindikasikan bahwa proses deposisi berulang menghasilkan akumulasi tegangan internal yang mempengaruhi integritas lapisan komposit. Hubungan antara ketebalan dan degradasi sifat listrik juga diamati pada coating berbasis organosilikon yang mengalami penurunan performa akibat pembentukan pori mikro selama proses curing (Savitri et al., 2024).

Tabel 3 menunjukkan perbandingan nilai resistansi pada kondisi kering dan basah beserta selisih penurunannya untuk setiap variasi pencelupan. Variasi 1 dan 3 kali pencelupan memiliki selisih resistansi terbesar sebesar 320 GΩ karena nilai awal resistansi pada kondisi kering masih sangat tinggi. Variasi 5 dan 7 kali pencelupan menunjukkan selisih yang lebih rendah, namun resistansi akhirnya juga lebih kecil sehingga memperlihatkan kualitas isolasi yang lebih rendah secara keseluruhan. Pola tersebut memperlihatkan bahwa besarnya penurunan resistansi tidak dapat diinterpretasikan secara tunggal tanpa mempertimbangkan kualitas awal lapisan dan kondisi akhir material setelah paparan air.

**Tabel 3. Perbandingan Resistansi Isolasi Listrik pada Kondisi Kering dan Basah**

Jumlah Pencelupan	Tegangan Uji (kV)	Resistansi Kering (GΩ)	Resistansi Basah (GΩ)	Selisih Resistansi (GΩ)	Ketebalan (mm)
1 kali	10	420	100	320	1,4
3 kali	10	400	80	320	1,6
5 kali	10	200	70	130	1,8
7 kali	10	180	60	120	2,0

Perubahan resistansi pada kondisi basah menunjukkan bahwa air berperan sebagai medium yang mempercepat perpindahan muatan pada permukaan komposit. Molekul air yang teradsorpsi mengisi rongga mikro dan membentuk jalur semi-konduktif yang menghubungkan area dengan distribusi filler tidak homogen. Ketika jumlah pencelupan meningkat, area antarmuka antar lapisan menjadi lebih banyak sehingga kemungkinan terbentuknya jalur konduksi juga meningkat. Temuan tersebut mendukung penelitian Salem et al. (2024) yang menyatakan bahwa kondisi polusi dan kelembapan mempengaruhi reliabilitas coating isolator melalui perubahan karakteristik permukaan secara progresif.

Graphene oxide memiliki kontribusi ganda terhadap performa komposit pada kondisi lingkungan berbeda. Pada konsentrasi terkontrol, material ini memperkuat ikatan antarmuka dan meningkatkan kestabilan struktur PDMS-silika melalui pembentukan jaringan dispersi yang lebih homogen. Ketika distribusinya tidak merata akibat deposisi berulang, graphene oxide berpotensi membentuk jalur perkolasi parsial yang meningkatkan konduktivitas lokal. Karakteristik tersebut sesuai dengan hasil penelitian Paramundhita dan Suaebah (2025) yang menunjukkan bahwa modifikasi graphene oxide dengan nanopartikel silika memerlukan kontrol dispersi yang sangat presisi untuk mempertahankan stabilitas sifat listrik material.

Silika sekam padi tetap menunjukkan efektivitas sebagai filler penghambat arus bocor meskipun komposit berada pada kondisi lembap. Struktur amorf silika hasil ekstraksi biomassa memiliki

kemampuan mengisi rongga mikro pada matriks PDMS sehingga mengurangi kemungkinan terbentuknya jalur konduktif berbasis air. Efektivitas tersebut bergantung pada stabilitas distribusi partikel dan kualitas ikatan silang polimer selama proses curing. Studi Yusniati et al. (2021) menjelaskan bahwa resistansi isolasi yang tinggi berkaitan langsung dengan kemampuan material dalam membatasi arus bocor pada permukaan dan volume isolator.

Perbandingan performa pada dua kondisi lingkungan menunjukkan bahwa variasi pencelupan optimum berada pada tahap deposisi rendah hingga menengah. Lapisan yang terlalu tebal cenderung menghasilkan struktur tidak homogen sehingga ketahanan terhadap air mengalami penurunan lebih cepat dibandingkan lapisan tipis yang stabil. Efek tersebut menunjukkan adanya batas optimum pada metode dip-coating dalam menghasilkan coating dielektrik berbasis PDMS. Cordoba et al. (2025) menekankan bahwa performa isolasi material komposit lebih ditentukan oleh kualitas antarmuka dan integritas struktur dibandingkan peningkatan jumlah filler atau ketebalan lapisan secara langsung.

Analisis komparatif antara kondisi kering dan basah memperlihatkan bahwa sistem komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide memiliki potensi besar sebagai material coating isolator tegangan tinggi berbasis biomassa. Resistansi listrik yang tetap berada pada rentang giga-ohm menunjukkan bahwa material masih mampu mempertahankan karakteristik isolasi meskipun mengalami degradasi akibat kelembapan. Integrasi metode dip-coating bertingkat dengan filler biomassa menghasilkan pendekatan fabrikasi yang relatif sederhana namun efektif untuk pengembangan material isolator modern. Karakteristik tersebut relevan terhadap kebutuhan teknologi coating listrik yang ringan, tahan lingkungan, dan memiliki keberlanjutan material tinggi pada sistem kelistrikan masa depan (Thukral et al., 2024).

## KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi jumlah pencelupan pada komposit PDMS–silika sekam padi–graphene oxide memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik resistansi isolasi listrik pada kondisi kering maupun basah. Variasi pencelupan rendah menghasilkan performa dielektrik yang lebih stabil karena struktur lapisan masih homogen, distribusi filler lebih merata, dan densitas cacat mikro relatif rendah dibandingkan pencelupan bertingkat tinggi. Peningkatan jumlah pencelupan menyebabkan ketebalan lapisan meningkat, namun resistansi isolasi justru menurun akibat terbentuknya aglomerasi partikel, ketidakaturan antarmuka, dan meningkatnya potensi jalur konduktif lokal pada matriks komposit. Kondisi basah memperlihatkan penurunan resistansi yang lebih besar dibandingkan kondisi kering karena adsorpsi air pada permukaan coating meningkatkan konduktivitas dan mempercepat terbentuknya arus bocor. Meskipun demikian, seluruh sampel masih mempertahankan nilai resistansi pada rentang giga-ohm sehingga tetap menunjukkan karakteristik isolator yang baik untuk aplikasi tegangan tinggi. Integrasi silika sekam padi dan graphene oxide dalam matriks PDMS melalui metode dip-coating terbukti mampu menghasilkan material isolasi berbasis biomassa dengan performa dielektrik yang stabil, ringan, dan berpotensi dikembangkan sebagai coating isolator listrik modern pada lingkungan operasional lembap.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aliansah, F., & Munasir. (2025). Sintesis dan Karakterisasi Reduced Graphene Oxide dari Cangkang Sawit Termodifikasi Silika. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 14(2), 268–275. <https://doi.org/10.26740/ifi.v14n2.p268-275>
- Anisyah, Nurlaila, R., Sylvia, N., & Ibrahim, I. (2023). Analisa Suhu Dan Waktu Pembakaran Abu Sekam Padi Terhadap Hasil Silika Dari Proses Ekstraksi Menggunakan Pelarut NaoH. *Chemical Engineering Journal Storage*, 3(2), 216–225. <https://doi.org/10.29103/cejs.v3i2.9768>
- Cordoba, A., Rivera-Muñoz, E. M., Velázquez-Castillo, R., & Esquivel, K. (2023). PDMS/TiO<sub>2</sub> and PDMS/SiO<sub>2</sub> nanocomposites: mechanical properties' evaluation for Improved Insulating Coatings. *Nanomaterials*, 13(10), 1699. <https://doi.org/10.3390/nano13101699>.
- Cordoba, A., Vargas-coronado, R. F., Velázquez-castillo, R., Cauich-rodríguez, J. V., & Esquivel, K. (2025). Mechanical and Thermal Performance of In-Situ Synthesized PDMS-SiO<sub>2</sub> Composite as Electrical Insulating Coatings. *Molecules*, 30, 1–19. <https://doi.org/10.3390/molecules30102107>

- Emiliah, Ratnawulan, Darvina, Y., & Jonuarti, R. (2025). The Effect Of Rice Husk Silica Variation On The Surface Structure And Hydrophobic Properties Of PDMS Sheets. *Pillar of Physics*, 18(2), 65–70. <https://doi.org/10.24036/ptxv6t83>
- Khademsameni, H., Jafari, R., Allahdini, A., & Momen, G. (2024). Regenerative Superhydrophobic Coatings for Enhanced Performance and Durability of High-Voltage Electrical Insulators in Cold Climates. *Materials*, 17(7), 1622. <https://doi.org/10.3390/ma17071622>
- Malago, Y., Hulukati, S. A., & Amali, A. I. P. M. K. (2022). Rancang Bangun Sistem Monitoring Arus Bocor Isolator. *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 16(1), 111-115. <https://doi.org/10.23960/elc.v16n1.2242>.
- 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>.
- Negara, I. M. Y., Hernanda, I. G. N. S., Asfani, D. A., Wardani, M. K., Yegar, B. K., & Syahril, R. (2021). Effect of Seawater and Fly Ash Contaminants on Insulator Surfaces Made of Polymer Based on Finite Element Method. *Energies*, 14(24), 8581. <https://doi.org/10.3390/en14248581>
- Novianty, V., Daud, M., Fariadi, D., Hasibuan, A., & Badriana, B. (2025). Studi Perencanaan Nilai Tahanan Isolasi Lightning Arrester 150 kV di Gardu Induk Lhokseumawe. *Jurnal Litek : Jurnal Listrik Telekomunikasi Elektronika*, 22(2), 123-129. <https://doi.org/10.30811/litek.v22i2.81>.
- Paramundhita, F. A., & Suaebah, E. (2025). Sintesis Dan Karakterisasi Graphene Oxide (Go) Yang Dimodifikasi Dengan Nanopartikel Silika Berbasis Limbah Cangkang Sawit. *Inovasi Fisika Indonesia*, 14(3), 369-376. <https://doi.org/10.26740/ifi.v14n3.p369-376>.
- Putra, I. G. G. T., & Aritonang, S. (2025). Komparasi Ketahanan Erosi dan Korosi pada Coating Hidrofobik Sol-Gel dan Silika-PDMS untuk Logam Alloy. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 8(2), 375-383. <https://doi.org/10.30596/rmme.v8i2.25159>.
- Putri, F. A., & Putri, N. P. (2024). Karakteristik Graphene Oxide (Go) Dari Bahan Purun Tikus (*Eleocharis Dulcis*): Kata Kunci: graphene oxide (GO), ultrasonifikasi, konduktivitas listrik. *Inovasi Fisika Indonesia*, 13(3), 89-94. <https://doi.org/10.26740/ifi.v13n3.p89-94>.
- Riba, J., & Moreno-eguilaz, M. (2023). Tracking Resistance in Polymeric Insulation Materials for High-Voltage Electrical Mobility Applications Evaluated by Existing Test Methods: Identified Research Needs. *Polymers*, 15, 3717. <https://doi.org/10.3390/polym15183717>
- Salem, A. A., Al-gailani, S. A., Ahmed, A., Amer, G., Alsharef, M., Bajaj, M., Zaitsev, I., & Ngah, R. (2024). Classification of RTV-Coated Porcelain Insulator Condition Under Different Profiles and Levels of Pollution. *Scientific Reports*, 14, 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73520-7>
- Salem, A. A., Lau, K. Y., Rahiman, W., Malek, Z. A., Gailani, S. A. Al, Rahman, R. A., & Ameri, S. Al. (2022). Leakage Current Characteristics in Estimating Insulator Reliability : Experimental Investigation and Analysis. *Scientific Reports*, 12(1), 1–22. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17792-x>
- Savitri, A. C., Wati, L. S., Nanda, N., Nurliani, N., Anggraeni, M. E., & Pasaribu, M. H. (2024). Article Review: Organosilicon-Based Ceramic Innovation: Polymer-Derived Ceramics (PDCs). *Nusantara Journal of Science and Technology*, 1(1), 40-54. <https://doi.org/10.69959/nujst.v1i1.10>.
- Thukral, T. S., Rabbi, F., Matthew, A., Patrick, M., & Miljkovic, N. (2024). Article Scalable and durable polydimethylsiloxane coating for anti-corrosion , anti-fouling , and condensation applications Scalable and durable polydimethylsiloxane coating. *Cell Reports Physical Science*, 5(10), 102243. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102243>
- Yuan, S., Hou, Y., Liu, S., & Ma, Y. (2024). A Comparative Study on Rice Husk , as Agricultural Waste , in the Production of Silica Nanoparticles via Different Methods. *Materials*, 17, 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma17061271>.
- Yusniati, Y., Pelawi, Z., Armansyah, A., & Taufik, I. (2021). Pengukuran resistansi isolasi instalasi penerangan basement pada gedung rumah sakit grend mitra medika medan. *Buletin Utama Teknik*, 16(3), 240-247. <https://doi.org/10.30743/but.v16i3.3788>.