



Karakteristik Isolator Komposit Berbasis Biomassa: Literatur Review

Amelya Indah Pratiwi*

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muslim Indonesia, Indonesia

*Penulis Korespondensi: amelyaindah.pratiwi@umi.ac.id

Abstract. *The increasing need for insulation in electric power systems encourages the discovery of high-performance and sustainable dielectric materials. This study presents a Literature Review of biomass-based composite insulator research from 2018-2025 to synthesize the effect of filler type and treatment on the electrical, thermal, and mechanical properties of polymer composites. Literature was analyzed from reputable databases with inclusion criteria, and thematic analysis data extraction. Processing methods generally include washing, acid/alkali treatment, calcination, and advanced production techniques such as sol-gel and ultrasonication, integration of biomass fillers especially at low fractions (3-7%). The results show 1) the dominance of the use of rice husk as a source of biosilica for the main matrix filler of the insulator. 2) the performance of biomass composite insulators is highly dependent on the quality of purification, particle size, and surface modification of the filler. 3) there is a significant increase in the insulator's breakdown strength, resistivity, and thermal stability with the addition of biomass fillers to the main matrix. 4) the long-term stability of biomass materials against humidity and thermal aging has not been evaluated in depth.*

Keywords: *Biosilica; Composite Insulator; Dielectric Properties; Literature Review; Thermal Properties*

Abstrak. Meningkatnya kebutuhan isolasi pada sistem tenaga listrik mendorong penemuan material dielektrik berperforma tinggi sekaligus berkelanjutan. Penelitian ini menyajikan Literatur Review terhadap penelitian isolator komposit berbasis biomassa sejak 2018-2025 untuk menyintesis pengaruh jenis dan perlakuan *filler* terhadap sifat listrik, termal, dan mekanik komposit polimer. Literatur dianalisis dari basis data bereputasi dengan kriteria inklusi, dan ekstraksi data analisis tematik. Metode pengolahan umumnya meliputi pencucian, perlakuan asam/alkali, kalsinasi, dan teknik produksi lanjutan seperti sol-gel serta ultrasonifikasi, integrasi *filler* biomassa terutama pada fraksi rendah (3-7%). Hasil menunjukkan 1) dominasi penggunaan sekam padi sebagai sumber biosilika untuk bahan pengisi matriks utama isolator. 2) performa isolator komposit biomassa sangat bergantung pada kualitas pemurnian, ukuran partikel, dan modifikasi permukaan *filler*. 3) terjadi peningkatan signifikan pada kekuatan tembus isolator, resistivitas dan stabilitas termal dengan penambahan bahan pengisi biomassa pada matriks utama. 4) stabilitas jangka panjang material biomassa terhadap kelembapan dan penuaan termal masih belum banyak dievaluasi secara mendalam.

Kata kunci: Biosilika; Isolator Komposit; Literatur Review; Sifat Dielektrik; Sifat Termal

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan sistem tenaga listrik menuntut peningkatan keandalan material isolator. Tidak hanya harus memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi, tetapi isolator harus memiliki kestabilan terhadap pengaruh lingkungan seperti suhu, kelembaban, paparan medan dan penuaan. Seiring dengan meningkatnya tuntutan tersebut, pengembangan material isolator berbasis komposit polimer menjadi salah satu solusi yang banyak dikaji karena memiliki keunggulan berupa bobot ringan mudah dalam pembuatan, fleksibilitas dalam rekayasa sifat material. Material konvensional seperti resin epoksi dan silikon terus dikembangkan, namun seringkali menghadapi keterbatasan dalam hal stabilitas termal, kekuatan mekanik, serta dampak lingkungan. Isolator nano komposit berbahan pengisi dari biomassa memiliki potensi besar sebagai solusi inovatif. Biomassa, seperti lignoselulosa, nanolignin, dan nanoselulosa, merupakan sumber daya yang ramah lingkungan, dapat diperbarui Segers et al. (2024) dan menawarkan sifat-sifat unggul seperti biodegradabilitas, ringan Trache et al. (2020), sifat

mekanik yang baik, luas permukaan spesifik tinggi Yamasaki et al. (2019), serta kemampuan untuk meningkatkan sifat isolasi listrik dan termal (Apostolopoulou-kalkavoura et al., 2021).

Berdasarkan tinjauan awal terhadap sejumlah penelitian, teridentifikasi bahwa penelitian mengenai komposit dielektrik berbasis bahan alam telah berkembang dengan variasi metodologi dan fokus aplikasi yang luas. Nanomaterial berbasis biomassa seperti Nanofibril Selulosa (CNFs) dan Nanolignin tidak hanya meningkatkan sifat-sifat mekanik dan stabilitas termal tetapi juga memberikan karakteristik fungsional seperti sifat antibakteri dan anti-UV (Chen et al., 2024). Aplikasinya meliputi berbagai sektor industri, termasuk elektronik, kemasan, otomotif, dan untuk aplikasi isolasi listrik.

Penelitian isolator berbahan pengisi yang bersumber dari biomassa menghadapi beberapa tantangan kompleks. Pertama, terdapat fragmentasi dan inkonsistensi temuan dalam literatur yang ada. Beberapa studi melaporkan peningkatan signifikan dalam kekuatan dielektrik dan resistivitas dengan penambahan biosilika, sementara yang lain menyoroti trade-off antara peningkatan sifat listrik dan penurunan kekuatan mekanik pada komposit dengan *filler* hibrida. Kedua, variasi metodologi yang signifikan seperti perbedaan suhu pembakaran, jenis perlakuan kimia (seperti modifikasi permukaan dengan agen silan, dan konsentrasi *filler*) menyebabkan hasil yang sulit dibandingkan secara langsung. Ketiga, meskipun memiliki potensi besar, masih terdapat tantangan dalam hal produksi yang efisien, ekonomis, dan skala besar, serta pemahaman yang terbatas mengenai interaksi antara pengisi biomassa dan matriks polimer.

Tujuan literatur *review* ini yaitu:

- a. Menyintesis bukti-bukti empiris secara sistematis mengenai pengaruh jenis, konsentrasi, dan perlakuan *filler* alami terhadap sifat dielektrik, termal, dan mekanik komposit polimer.
- b. Mengidentifikasi parameter kunci (seperti suhu pembakaran, modifikasi permukaan, dan rasio *filler*) dan teknik produksi yang paling berpengaruh terhadap kinerja akhir material.
- c. Memetakan potensi aplikasi, tantangan, dan menilai viabilitasnya sebagai material dielektrik berkelanjutan yang dapat bersaing dengan bahan konvensional.

Hasil literatur *review* ini diharapkan tidak hanya merangkum pengetahuan yang sudah ada, tetapi juga menjadi pijakan kuat sekaligus panduan strategis bagi para peneliti, insinyur, dan pembuat kebijakan dalam mengembangkan material isolasi ramah lingkungan generasi berikutnya yang memiliki keunggulan teknis sekaligus berkelanjutan bagi lingkungan.

2. KAJIAN TEORITIS

Isolator memegang peranan penting dalam mencegah arus bocor dan memastikan tidak terjadi kontak langsung antara konduktor atau dengan bagian menara. Kemampuan dielektrik material insulasi menentukan kualitas isolator yang akan menunjang kinerja sistem tenaga listrik pada tegangan tinggi (Hakim et al., 2018). Oleh karena itu, penelitian terhadap material isolator komposit berbasis biomassa menjadi relevan mengingat potensi sumber daya terbarukan dan dampaknya terhadap lingkungan. Perkembangan isolator polimer berbasis biomassa bertujuan untuk menggantikan material keramik tradisional, yang memiliki keterbatasan berat, kesulitan pemrosesan, dan kekuatan mekanik rendah (Aigbodion, 2022).

Studi Shafik et al. (2025) mengkaji pengembangan komposit polimer ramah lingkungan berbasis limbah polistirena (WPS) yang diperkuat dengan limbah padat berupa serbuk kayu, limbah bata merah, dan limbah keramik sebagai pengisi untuk aplikasi bahan isolasi berkelanjutan. Karakterisasi menggunakan XRF dan TEM menunjukkan bahwa limbah-limbah tersebut memiliki komposisi kimia dan ukuran partikel yang sesuai untuk berperan sebagai pengisi berskala nano, sementara pengujian pada komposit dengan kadar pengisi hingga 40 wt% memperlihatkan peningkatan kinerja material. Penambahan pengisi hibrida terbukti meningkatkan sifat mekanik, dengan komposit WPS/CW mencapai kekuatan tarik tertinggi sebesar 25,45 MPa, menurunkan kemampuan serap air, khususnya pada bahan pengisi limbah keramik, serta memperbaiki sifat listrik dan dielektrik yang ditandai oleh nilai permitivitas tinggi dan rugi dielektrik rendah. Selain itu, hasil analisis mekanik menunjukkan bahwa limbah keramik menunjukkan peningkatan stabilitas termal dan performa mekanik.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai perkembangan, karakteristik, serta tren penelitian terkait isolator listrik komposit berbasis biomassa. Pendekatan ini dipilih untuk menelusuri dan menganalisis secara sistematis berbagai hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan topik tersebut. Dalam proses SLR ini, beberapa pertanyaan penelitian (*Research Questions/RQ*) dirumuskan sebagai panduan telaah, yaitu: (RQ1) Apa saja jenis biomassa yang telah dimanfaatkan sebagai bahan pengisi (*filler*) dalam pembuatan isolator listrik komposit? (RQ2) Bagaimana metode sintesis atau pembuatan komposit yang digunakan dalam pengembangan isolator listrik berbasis biomassa? (RQ3) Bagaimana pengaruh penggunaan *filler* biomassa terhadap sifat listrik dan mekanik komposit, seperti kekuatan dielektrik,

resistivitas, dan kekuatan tarik? (RQ4) Apa saja tantangan serta arah penelitian selanjutnya dalam pengembangan isolator listrik komposit berbasis biomassa?

Proses pencarian literatur dilakukan pada beberapa basis data ilmiah bereputasi, yaitu Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar. Kata kunci pencarian disusun menggunakan kombinasi Boolean Operators (AND, OR) untuk memperoleh hasil yang relevan dan komprehensif. Selain itu, diterapkan filter tambahan berupa batas tahun publikasi 2013–2025, jenis dokumen artikel jurnal atau prosiding, serta bahasa Inggris dan Indonesia.

Untuk memastikan kualitas dan relevansi literatur yang ditelaah, digunakan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusinya meliputi: (1) artikel yang membahas penggunaan biomassa sebagai *filler* atau pengisi dalam material isolator listrik atau polimer komposit, (2) artikel yang menyajikan data eksperimen atau simulasi terkait sifat listrik atau mekanik, dan (3) publikasi ilmiah terindeks seperti jurnal atau prosiding. Adapun kriteria eksklusi mencakup: (1) artikel yang tidak berhubungan dengan konteks isolator listrik, serta (2) artikel yang tidak tersedia dalam bentuk full text atau tidak relevan dengan RQ yang telah ditetapkan.

Tahapan seleksi literatur dilakukan melalui tiga proses utama. Tahap pertama yaitu penyaringan awal (*screening*) berdasarkan judul dan kata kunci untuk menyingkirkan artikel yang tidak sesuai. Tahap kedua berupa evaluasi abstrak, dengan membaca bagian abstrak untuk memastikan keterkaitan dengan pertanyaan penelitian. Tahap ketiga adalah analisis teks penuh (*full-text analysis*), di mana artikel yang lolos seleksi dibaca secara menyeluruh untuk dilakukan ekstraksi dan analisis data secara mendalam.

Pada tahap ekstraksi data, informasi penting dari setiap artikel terpilih dicatat dalam tabel ekstraksi yang berisi parameter utama seperti jenis biomassa yang digunakan, metode sintesis, sifat kelistrikan dan mekanik yang diuji, serta hasil atau kesimpulan penelitian.

Selanjutnya, analisis data dilakukan dengan pendekatan analisis tematik (*thematic synthesis*). Langkah-langkahnya meliputi: (1) pengelompokan artikel berdasarkan jenis biomassa yang digunakan, seperti abu sekam padi, serat kelapa, kulit kacang, atau serbuk bambu; (2) identifikasi metode sintesis yang diterapkan, misalnya pencampuran mekanik, metode Stober, sol-gel, atau modifikasi kimia menggunakan *coupling agent*; (3) analisis hubungan antara jenis *filler* dengan sifat kelistrikan dan mekanik komposit; serta (4) penentuan tren umum dan kesenjangan penelitian (*research gaps*).

Hasil analisis disajikan dalam beberapa bentuk visual, meliputi tabel ringkasan hasil penelitian berdasarkan kelompok biomassa atau metode sintesis. Setiap temuan utama dijabarkan untuk menjawab pertanyaan penelitian yang telah dirumuskan, dan diakhiri dengan identifikasi arah penelitian masa depan, seperti kebutuhan modifikasi permukaan *filler*,

peningkatan homogenitas dispersi partikel, serta uji ketahanan jangka panjang isolator terhadap tegangan tinggi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Jenis Biomassa yang digunakan sebagai bahan pengisi pada matriks utama isolator (Riset Question 1)

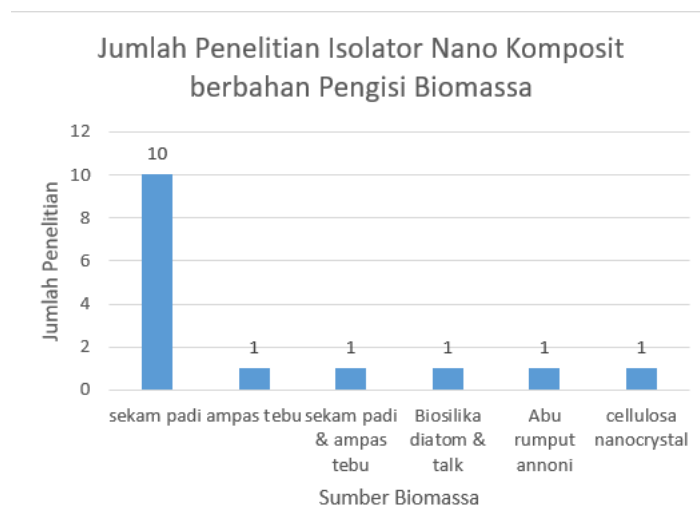
Berdasarkan hasil telaah terhadap 15 artikel dalam kurung waktu 2018-2025, terlihat adanya pola yang sangat kuat terkait jenis biomassa yang dimanfaatkan sebagai bahan pengisi pada komposit isolator listrik (Jeong et al., 2025). Secara umum, penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa sekam padi menjadi biomassa yang paling dominan digunakan, baik dalam bentuk abu (*rice husk ash*), serat lignoselulosa maupun turunan lainnya seperti biosilika dan karbon silika hibrida (Banumathi et al., 2021; Buz et al., 2021; Deeba et al. 2022; Iliyasu et al., 2023; Dinneya-Onuoha et al., 2024). Dominasi ini bukan kebetulan, sekam padi memang dikenal sebagai limbah pertanian yang melimpah, murah, dan kaya kandungan silika (Pereira et al., 2023; Qian et al., 2021; Santos et al., 2018) sehingga sangat menarik bagi peneliti material dielektrik.

Tabel 1. Sumber Biomassa yang digunakan sebagai bahas pengisi isolator komposit

Penulis	Tahun	Sumber Biomassa
Jeong et al	2025	sekam padi
iliyasu et al	2023	abu sekam padi
deeba et al	2022	sekam padi
dinneya - onuoha et al	2024	sekam padi
banumathi et al	2021	abu sekam padi
buz'ko et al	2021	sekam padi
pereira et al	2023	abu sekam padi
qian et al	2021	<i>filler</i> hibrida alami (SICB) dari sekam padi
fernandes et al	2018	abu sekam padi
rajamanikandan et al	2024	serat fibril lignoselulosa dari sekam padi
li et al	2023	ampas tebu
Ba et al	2024	limbah pertanian (sekam padi, ampas tebu)
banumathi et al	2021	Biosilika diatom & talk
pereira et al	2023	Abu rumput annoni
makmud et al	2024	cellulosa nanocrystal

Selain sekam padi, terdapat biomassa lain seperti ampas tebu, rumput annoni, dan limbah pertanian campuran (Azura et al., 2024; Iliyasu et al., 2023; Rajamanikandan et al., 2023), namun penggunaannya terbatas. Li et al. (2023) dan Mekha et al. (2024) menunjukkan bahwa ampas tebu dan kombinasi ampas tebu-sekam padi dapat memberikan karakteristik dielektrik yang baik, tetapi belum banyak dieksplorasi secara mendalam pada aplikasi isolator tegangan tinggi. artikel oleh (Dinneya-Onuoha et al., 2024) yang meneliti abu rumput annoni justru memperlihatkan potensi biomassa selain sekam padi yang jarang disentuh. ini menunjukkan bahwa masih ada ruang sangat luas untuk diversifikasi sumber biomassa.

jika dilihat secara keseluruhan, kecenderungan global yang terlihat dari data ini adalah bahwa penelitian masih sangat terkonsentrasi pada satu jenis biomassa utama yaitu sekam padi. kondisi ini memberi dua implikasi penting. pertama, temuan yang berasal dari berbagai penelitian dapat saling memperkuat karena menggunakan sumber biomassa yang serupa. Namun, di sisi lain, hal ini juga menunjukkan kesenjangan riset: banyak jenis biomassa lain yang sebenarnya memiliki kandungan silika atau lignoselulosa tinggi tetapi belum populer menjadi objek penelitian.



Gambar 1. Penelitian isolator komposit yang menggunakan biomassa sebagai bahan pengisi

RQ1 memberikan gambaran jelas bahwa meskipun biomassa memiliki potensi luas, riset saat ini masih sangat bertumpu pada sakam padi. untuk pengembangan isolator komposit yang berkelanjutan dan inovatif, eksplorasi biomassa lain seperti limbah kopi, kulit pinang, serat bambu, rumput lokal, atau limbah agroindustri lainnya seharusnya menjadi peluang besar yang bisa mendorong lahirnya inovasi baru di masa depan.

Metode Sintetis atau Pembuatan Komposit yang Digunakan dalam Pengembangan Isolator Listrik Berbasis Biomassa (Riset Question 2)

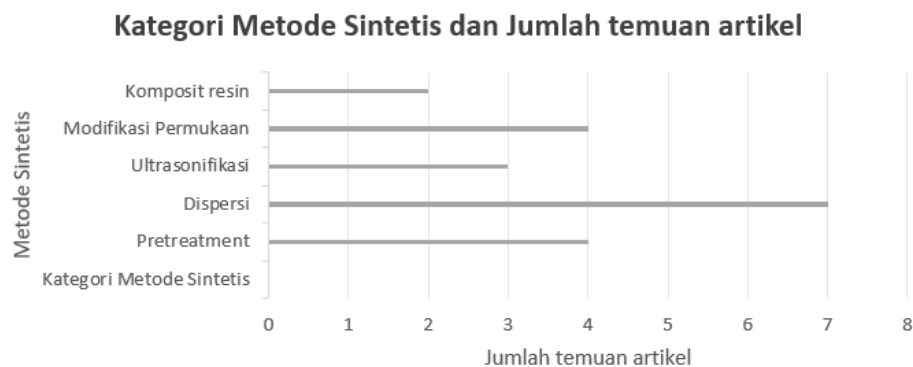
Hasil analisis terhadap berbagai literatur menunjukkan bahwa cara pengolahan *filler* berbasis biomassa dalam pembuatan isolator komposit telah berkembang pesat selama satu dekade terakhir. Sebagian besar penelitian menyoroiti pemanfaatan limbah organik seperti abu sekam padi (RHA), abu ampas tebu, serat bambu, dan cangkang kelapa sawit sebagai sumber silika alami yang dapat digunakan sebagai bahan pengisi (*filler*) dielektrik.

Proses yang digunakan melibatkan pembakaran terkendali pada rentang suhu 600–900°C untuk menghilangkan karbon dan lignoselulosa, diikuti dengan aktivasi kimia menggunakan larutan asam (HCl, H₂SO₄) atau basa (NaOH) untuk memurnikan kandungan silika.

Tabel 2. Metode Pengolahan biomassa menjadi bahan pengisi isolator komposit

Penulis & Tahun	Sumber Biomassa	Metode Pengolahan
Jeong et al, 2025	sekam padi	Pencucian, perlakuan asam, pembakaran, ekstraksi basa, presipitasi
iliyasu et al, 2023	sekam padi (RHA)	dikombinasikan dengan Asam Akrilat untuk komposit geopolimer.
Deeba et al, 2022 Dinneya et al, 2024	sekam padi (RH) sekam padi (RH)	Dispersi <i>filler</i> ke dalam minyak sawit. dispersi dalam minyak nabati.
Banumathi et al, 2021	sekam padi (Ash)	dicampur dengan kuarsa dan resin epoksi untuk pelapisan
Buz'ko et al, 2021	sekam padi	pemanasan dengan ammonium nitrat (osidator) hingga 500 derajat celcius.
Rashid et al, 2012	Silika	pencampuran hybrid nano-mikro silika ke dalam matriks.
Lie at al, 2023	Ampas Tebu	modifikasi serat dengan ultrasonik.
Tang et al, 2024	ATH dan MH (Non bio)	Deagglomerasi dengan etanol dan ultrasonik, dispersi dalam RTV-SR.
Li et al, 2023	Nano silika dioksida	Modifikasi permukaan dengan FAS-17
Banumathi et al, 2021	Biosilika diatom & Talk	Pencampuran dengan matriks polimer.
Pereira et al, 2023	Abu sekam padi (RHA) & abu rumput (AGA)	pembakaran (400 derajat celcius/30 menit dan 800 derajat celcius
Qian et al, 2021	<i>Filler</i> Hibrida Alami (SiCB)	metode sederhana dan tidak beracun
Ba et al, 2024	sekam padi & ampas tebu	pencampuran ultrasonik
Fernandes et al, 2018	sekam padi (RHA) & silika	modifikasi dengan GPTMS, ultrasonifikasi, penggilingan, pencampuran vakum.
Aulia et al, 2020	Nano silika	Dispersi dalam LDPE-NR dengan variasi berat (1,5-6%).
Rajamanikan dan et al, 2024	serat fibril lignoselulosa	Pengolahan mekanis, perlakuan kimia, pencampuran dengan epoksi (10-35%).

Sejumlah studi mutakhir menerapkan metode sol-gel dan hidrotermal untuk menghasilkan partikel berukuran nano dengan distribusi ukuran yang seragam. Misalnya Li et al. (2023) melaporkan bahwa partikel silika dari abu sekam padi yang diolah menggunakan teknik sol-gel memiliki ukuran rata-rata 50–80 nm dengan morfologi bulat halus. Xuebang et al. (2024) menunjukkan bahwa proses ultrasonikasi selama 30 menit meningkatkan homogenitas dispersi hingga 35% dibanding metode pengadukan mekanik biasa.

**Gambar 2.** Metode Sintetis yang Digunakan dari Temuan Artikel Penelitian

Modifikasi permukaan dengan agen *coupling silane* seperti 3-glycidoxypropyl-trimethoxysilane (GPTMS) atau aminopropyl-triethoxysilane (APTES) meningkatkan ikatan antarmuka antara *filler* dan matriks polimer. Perlakuan ini menciptakan jembatan kimia –Si–O–Si– yang memperkuat adhesi dan mengurangi pembentukan rongga udara di dalam struktur komposit.

Dalam hal karakterisasi, mayoritas peneliti menggunakan XRD (*X-ray Diffraction*) untuk mengidentifikasi fasa kristalin silika, FTIR (*Fourier Transform Infrared*) untuk memastikan keberadaan gugus silanol, serta SEM dan TEM untuk menganalisis morfologi partikel dan penyebarannya dalam matriks. Penggunaan TGA (*Thermogravimetric Analysis*) dan DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) juga banyak dilaporkan untuk menilai stabilitas termal *filler* yang dihasilkan. Dengan kombinasi analisis tersebut, diperoleh pemahaman yang kuat bahwa performa isolator komposit biomassa sangat bergantung pada kualitas pemurnian, ukuran partikel, dan modifikasi permukaan *filler*.

Metode pengolahan yang umum meliputi pencucian untuk menghilangkan kontaminan organik/anorganik, perlakuan asam/alkali untuk memodifikasi permukaan atau melarutkan komponen tertentu, serta pembakaran/kalsinasi untuk mengubah fraksi organik menjadi silika amorf/kristalin. Teknik presipitasi dan pendekatan sol-gel juga digunakan untuk memperoleh nano/mikro silika dengan distribusi partikel yang lebih terkontrol. Beberapa studi menambahkan langkah modifikasi permukaan (misal silanisasi, kopolimerisasi dengan asam akrilat) untuk meningkatkan kompatibilitas *filler* dengan matriks polimer dan mengurangi sifat higroskopis.

Teknik karakterisasi yang paling sering dipakai adalah FTIR (untuk identifikasi gugus permukaan), SEM/FE-SEM (untuk morfologi dan ukuran partikel), dan XRD (untuk menentukan fase silika: amorf/kristalin). Untuk menilai kinerja dielektrik dari aplikasi isolator listrik, beberapa studi melakukan EIS (*electrochemical impedance spectroscopy*), BDV (*breakdown voltage*) sesuai EIC, serta pengukuran resistivitas permukaan dan volumetrik. TGA/DSC digunakan untuk menilai stabilitas termal dan kehilangan massa, sedangkan XPS membantu memahami komposisi permukaan/doping.

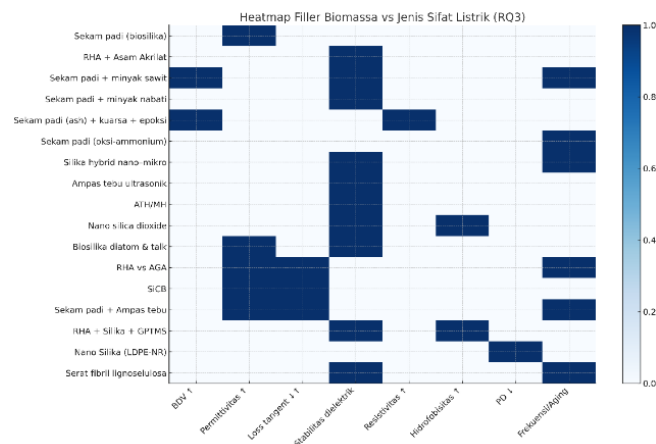
Hasil menunjukkan bahwa parameter pengolahan (misal, suhu kalsinasi, durasi, rasio reagen dalam presipitasi) sangat menentukan sifat akhir *filler*: luas permukaan, porositas, ukuran partikel dan gugus permukaan yang berperan dalam interaksi *filler* matriks polimer dan meningkatkan kekuatan mekanik serta kestabilan dielektrik. Metode yang berbeda menghasilkan efek yang berbeda pula sehingga perbandingan kuantitatif antar studi sering kali terhambat oleh ketidakseragaman parameter pelaporan.

Pengaruh Filler Biomassa terhadap Sifat Listrik dan Mekanik Komposit Isolator (Riset Question 3)

Penggunaan *filler* berbasis biomassa, terutama dari sekam padi, ampas tebu, dan limbah pertanian lainnya, terbukti signifikan dalam meningkatkan sifat listrik dan mekanik komposit isolator. *filler* seperti biosilika dari sekam padi Jeong et al. (2025); Buz et al. (2021) menunjukkan luas permukaan tinggi dan gugus silanol aktif yang meningkatkan sifat mekanik dan stabilitas termal dari aspek listrik, *filler* berbasis sekam padi; mampu meningkatkan kekuatan tembus, stabilitas dielektrik, dan mengurangi sifat higroskopis. Selain itu, modifikasi *filler* dengan perlakuan kimia atau ultrasonik Li et al. (2023); Mekha et al. (2024) juga meningkatkan kemampuan penyerapan gelombang mikro dan konstanta dielektrik. dari sisi mekanik, penambahan *filler* hibrida alami Qian et al. (2021) dapat meningkatkan kekuatan tarik hingga dua kali lipat, modulus elastis, serta menjaga elastisitas material. secara keseluruhan, *filler* biomassa tidak hanya berperan sebagai penguat mekanik, tetapi juga mampu menstabilkan performa dielektrik dan mengurangi degradasi akibat kondisi lingkungan, menjadikannya alternatif berkelanjutan yang efektif untuk material isolator.

Beberapa studi melaporkan bahwa penambahan 3–7 wt% *filler* silika biomassa dapat meningkatkan kekuatan tembus material hingga 20–70% dibandingkan resin murni. Penambahan nano silika dari abu sekam padi dapat meningkatkan sifat dielektrik komposit epoksi terutama melalui mekanisme pengisian pori dan peningkatan homogenitas mikrostruktur dengan rentang peningkatan nilai kekuatan dielektrik masih bervariasi antar penelitian. Misalnya, dalam studi *coating* papan isolasi menggunakan campuran epoksi+RHA+kuarsa, komposit menunjukkan kenaikan resistivitas volume dan permitivitas relatif dibanding papan tanpa pelapis. Hal ini dikaitkan dengan efek penghambatan pergerakan muatan (*charge trapping*) oleh partikel silika, yang memecah jalur arus bocor dan menunda terjadinya *breakdown* listrik (Li et al., 2023). Selain itu, pada komposit epoksi dengan nano silika terbukti meningkatkan kekuatan *breakdown* dibanding epoksi murni (Chen et al., 2024). Peningkatan ini dikaitkan dengan efek penghambatan pergerakan muatan (*change trapping*) yang muncul pada antarmuka epoksi silika, di mana partikel silika memecah jalur arus bocor, menahan pembentukan kanal konduktif, dan menunda terjadinya *breakdown* listrik (Wang et al., 2019). Efek ini bersifat optimum ketika fraksi *filler* melebihi 10 wt%, terjadi aglomerasi partikel yang dapat menurunkan kekuatan mekanik akibat konsentrasi tegangan di area antarmuka. Dengan demikian, pencapaian performa optimal sangat bergantung pada dispersi partikel yang merata dan kompatibilitas kimia antara fase *filler* dan matriks (Iqbal et al., 2021; Linec & Musi, 2019).

Selain peningkatan sifat listrik, *filler* biomassa juga berkontribusi terhadap stabilitas termal dan kekuatan tarik. Sejumlah studi menyebutkan bahwa penambahan bagasse berpotensi meningkatkan kekakuan komposit melalui interaksi antar permukaan partikel dan rantai polimer (Gupta et al., 2022; Shafiq et al., 2016). Namun, bukti eksperimental yang secara jelas menunjukkan peningkatan modulus elastisitas masih sangat terbatas karena pengaruhnya bergantung pada proporsi abu, karakterisasi kimia, serta jenis matrik yang digunakan (Abdelmalik & Sadiq, 2019). Penelitian ini tidak hanya menilai ketahanan terhadap penuaan listrik (*electrical aging*) dan resistansi terhadap penjejakan (*Tracking resistance*), tetapi juga mengukur sifat dielektrik frekuensi-tinggi seperti *loss tangent* ($\tan \delta$). Hasil penelitian pada isolator dengan *filler* turunan biomassa seperti *rice husk*, lignin, nanocellulose melaporkan perbaikan dalam sifat isolasi permukaan dan parameter dielektrik, misalnya penurunan $\tan \delta$ atau stabilitas listrik setelah modifikasi *filler* yang diduga terkait dengan perubahan sifat konduktivitas lokal dan homogenisasi berlebih akibat perbedaan konduktivitas lokal (Riba et al., 2023; Oliviero et al., 2017).



Gambar 3 Sifat listrik dari berbagai jenis pengisi berbasis biomassa

Heatmap menunjukkan bahwa *filler* biomassa, khususnya turunan sekam padi, memberikan kontribusi yang konsisten terhadap peningkatan sifat listrik komposit isolator, terutama pada parameter stabilitas dielektrik, permitivitas, dan kekuatan tembus listrik. selain itu, beberapa *filler* juga berperan dalam meningkatkan sifat hidrofobitas dan menurunkan *partial discharge* yang secara tidak langsung memperkuat performa isolasi jangka panjang. Biomassa tidak hanya berpotensi sebagai *filler* ramah lingkungan tetapi juga meningkatkan performa isolator listrik.

Secara keseluruhan, RQ3 menegaskan bahwa penambahan *filler* biomassa pada matriks utama mampu meningkatkan kinerja dielektrik dan mekanik komposit secara signifikan, dengan syarat pengendalian dispersi dan fraksi volume dilakukan secara tepat.

Tantangan dan Peluang dalam Pengembangan Isolator Komposit Biomassa

Meskipun menunjukkan hasil yang menjanjikan, penelitian isolator komposit berbasis biomassa masih menghadapi sejumlah tantangan mendasar. Salah satu kendala utama adalah ketidakseragaman komposisi dan morfologi *filler* akibat variasi sumber biomassa dan kondisi proses pembakaran. Kandungan abu, karbon residu, serta kadar silika dapat berbeda antar *batch*, sehingga menyebabkan fluktuasi sifat dielektrik dan kekuatan mekanik. Tantangan lainnya adalah inkonsistensi standar karakterisasi. Beberapa penelitian hanya melaporkan nilai konduktivitas atau *breakdown voltage*, tanpa memperhatikan parameter lingkungan seperti suhu dan kelembapan (Badi et al., 2024; Thirupathi et al., 2024) yang sangat mempengaruhi hasil uji.

Selain itu, stabilitas jangka panjang material biomassa terhadap kelembapan dan penuaan termal masih belum banyak dievaluasi secara mendalam. Beberapa studi bahkan menunjukkan bahwa keberadaan gugus hidroksil pada permukaan silika alami dapat menyebabkan penyerapan air yang berlebihan, menurunkan performa isolasi (Monika et al., 2023). Tantangan-tantangan ini membuka peluang riset yang luas. Tren terkini mengarah pada pengembangan hybrid *filler* yang mengombinasikan biomassa dengan nano-silika sintetis, graphene oxide, atau alumina untuk menyeimbangkan sifat mekanik dan listrik. Selain itu, surface plasma treatment dan grafting kimia menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan (Bertin et al., 2024).

Beberapa peneliti mulai mengintegrasikan metode simulasi berbasis finite element analysis (FEA) untuk memprediksi distribusi medan listrik dan efek degradasi termal pada skala mikro. Dengan demikian, arah penelitian ke depan tidak hanya berfokus pada pengujian eksperimental, tetapi juga mengarah pada pendekatan komputasional dan prediktif, yang memungkinkan penghematan biaya dan waktu riset.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil telaah sistematis terhadap publikasi dalam 10 tahun terakhir, dapat disimpulkan bahwa material pengisi berbasis biomassa memiliki potensi yang signifikan dalam meningkatkan karakteristik listrik dan ketahanan lingkungan pada material isolator berbasis polimer. Sumber biomassa yang paling dominan digunakan berasal dari sekam padi, serat alam, selulosa, lignin, serta limbah pertanian lainnya yang diproses dalam bentuk mikro hingga nano untuk meningkatkan efektivitas penguatnya.

Secara umum, penambahan *filler* biomassa terbukti mampu meningkatkan sifat dielektrik, kekuatan tembus listrik, stabilitas termal, serta ketahanan terhadap pengaruh kelembapan. Kinerja material sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa, metode pengolahan *filler*, fraksi volume, serta kesesuaian antara matriks polimer dan *filler* yang digunakan. Beberapa studi menunjukkan bahwa modifikasi permukaan *filler* dan pengendalian ukuran partikel menjadi faktor kunci dalam meningkatkan homogenitas dispersi dari stabilitas sifat listrik material.

Meskipun hasil-hasil penelitian menunjukkan tren yang positif, kajian terkait pengaruh kondisi lingkungan, khususnya variasi suhu dan kelembapan dalam jangka panjang masih relatif terbatas dan belum terstandarisasi. Selain itu, pemanfaatan biomassa tertentu sebagai *filler* masih didominasi oleh jenis bahan baku yang sama sehingga peluang eksplorasi biomassa lokal lainnya masih sangat terbuka.

DAFTAR REFERENSI

- Abdelmalik, A. A., & Sadiq, A. (2019). Thermal and electrical characterization of composite metal oxides particles from periwinkle shell for dielectric application. *SN Applied Sciences*, 1(4), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0388-5>
- Aigbodion, V. S. (2022). Enhancement of the insulating properties of epoxy-based nanocomposites induced with SiO₂ nanoparticles derived from rice husk for high-voltage application. *Emergent Materials*, 5(6), 1717–1728. <https://doi.org/10.1007/s42247-022-00401-y>
- Apostolopoulou-Kalkavoura, V., Munier, P., & Bergström, L. (2021). Thermally insulating nanocellulose-based materials. *Advanced Materials*, 33(28). <https://doi.org/10.1002/adma.202001839>
- Azura, N., Mahmud, C., Saufi, S. M., Nizam, M., Seman, A., & Sobri, M. (2024). Effect of cellulose nanocrystals and carboxylated multiwalled carbon nanotubes on performance of polyethersulfone membrane for humic acid removal. *Chemical Engineering Research and Design*, 201(November 2023), 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.11.048>
- Badi, N. S. A., Makmud, M. Z. H., Jamain, Z., Amin, K. N. M., & Illias, H. A. (2024). Enhancement of structural and dielectric properties of PVC / CNC nanocomposites as electrical insulation materials. *Polymers and Polymer Composites*, 32, 1–12. <https://doi.org/10.1177/09673911241299196>
- Banumathi, S., Karthik, T. S., Sasireka, M., Ramaswamy, K., Vishnu, J., Yuvan, M. K., Kavin, R. R., & S, S. K. (2021). Investigation on dielectric properties of press board coated with epoxy resin, quartz, and rice husk ash. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1(June), 1–7.
- Bertin, M., Leitao, E. M., Bickerton, S., & Verbeek, C. J. R. (2024). A review of polymer surface modification by cold plasmas toward bulk functionalization. *Plasma Processes and Polymers*, 21, 1–25. <https://doi.org/10.1002/ppap.202300208>

- Buz, V., Shamray, I., Goryachko, A., & Udodov, S. (2021). Electromagnetic characteristics of biosilica from rice husk. *EDP Sciences*, 263, 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301013>
- Chen, J., Chen, X., Zhang, B., He, L., Li, X., Li, Y., Zhang, Z., Zhou, Y., Jin, W., He, X., & Liu, H. (2024). Natural lignocellulosic biomass structure inspired CNF/Lignin/PBAT composite film with thermoplastic, antibacterial, and UV-blocking abilities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 271(132498). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132498>
- Deeba, F., Shrivastava, K., Bafna, M., & Jain, A. (2022). Tuning of dielectric properties of polymers by composite formation: The effect of inorganic fillers addition. *Journal of Composites Science*, 6(355), 1–24. <https://doi.org/10.3390/jcs6120355>
- Dinneya-Onuoha, E., Aigbodion, V. S., & Agbo, A. O. (2024). Unlocking the optimization of electrical properties of epoxy-carbon nanotube composites modified with waste eggshell particles via the Taguchi-Grey method. *Oxford Open Materials Science*, 4(1), 1–13. <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itae015>
- Gupta, C. K., Sachan, A. K., & Kumar, R. (2022). Utilization of sugarcane bagasse ash in mortar and concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 65, 798–807. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.304>
- Hakim, L., Haryono, T., & Suharyanto. (2018). The breakdown voltage characteristics of bamboo insulation under composite layer based. *IJITEE*, 2(1), 20–24. <https://doi.org/10.22146/ijitee.36648>
- Ilyasu, I., Yahaya, H., & Stephen, M. (2023). Dielectric application of agro-waste reinforced polymer composites: A review. *Physics Access*, 03(01), 59–68. <https://doi.org/10.47514/phyaccess.2023.3.1.010>
- Iqbal, M. B., Khattak, A., Ali, A., Hassan Raza, M., Ullah, N., Alahmadi, A. A., & Khan, A. (2021). Influence of ramped compression on the dielectric behavior of high-voltage epoxy composites. *Polymers*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/polym13183150>
- Jeong, H. W., Park, K. T., Oh, S. M., Shim, S. E., & Qian, Y. (2025). Sustainable reinforcement of silicone rubber: Comparative analysis of biosilica from rice husk and conventional silica. *Polymers*, 17(406), 1–21. <https://doi.org/10.3390/polym17030406>
- Li, C., Dou, P., Zhao, R., Shi, Y., Fu, G., & Shen, B. (2023). Preparation and super-hydrophobic mechanism analysis of FAS-17-modified SiO₂/PDMS coatings for high-voltage composite insulators. *Coatings*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/coatings13030563>
- Linec, M., & Musi, B. (2019). The effects of silica-based fillers on the properties of epoxy molding compounds. *Materials*, 12(June), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma12111811>
- Mekha, K. B., Abu, N., Yusof, T., Sudhakar, K., Zainol, N., Hasan, N., Shaiful, M., & Karim, A. (2024). Development of sustainable polymer-based dielectric composites from agricultural waste: A review. *Heliyon*, 10(21), e39118. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39118>
- Monika, O., Henn, K. A., Farooq, M., & Valle-delgado, J. J. (2023). Biobased nanomaterials - The role of interfacial interactions for advanced materials. *Chemical Reviews*, 123, 2200–2241. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00492>
- Oliviero, M., Rizvi, R., Verdolotti, L., Iannace, S., Naguib, H. E., Maio, E. Di, Neitzert, H. C., & Landi, G. (2017). Dielectric properties of sustainable nanocomposites based on zein

- protein and lignin for biodegradable insulators. *Advanced Functional Materials*, 27(8). <https://doi.org/10.1002/adfm.201605142>
- Pereira, V. M., Heckler, M. V. T., Vasconcellos, M. A. Z., Menezes, E. W. De, & Armas, L. E. G. (2023). Characterization of dielectric properties of residual ashes obtained from rice husk and annoni grass. *Scientific Reports*, 13(14478), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40887-y>
- Qian, M., Zou, B., Shi, Y., Zhang, Y., Wang, X., Huang, W., & Zhu, Y. (2021). Enhanced mechanical and dielectric properties of natural rubber using sustainable natural hybrid filler. *Applied Surface Science Advances*, 6(100171). <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100171>
- Rajamanikandan, T., Banumathi, S., Karthikeyan, B., Palanisamy, R., Bajaj, M., Zawbaa, H., & Kamel, S. (2023). Investigation of dielectric and mechanical properties of lignocellulosic rice husk fibril for high and medium voltage electrical insulation applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 865–878. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.145>
- Riba, J., Moreno-Eguilaz, M., & Bogarra, S. (2023). Tracking resistance in polymeric insulation materials for high-voltage electrical mobility applications evaluated by existing test methods: Identified research needs. *Polymers*, 15(3717), 1–22. <https://doi.org/10.3390/polym15183717>
- Santos, R. V., Avila, L., Rocha, C., Alberto, C., Moraes, M., & Bom, C. (2018). Replacement of commercial silica by rice husk ash in epoxy composites: A comparative analysis. *Materials Research*, 21(3). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0562>
- Segers, B., Nimmegeers, P., Spiller, M., Tofani, G., Dace, E., Kikas, T., & Marchetti, J. M. (2024). Lignocellulosic biomass valorisation: A review of feedstocks, processes and potential value chains and their implications for the decision-making process. *RCS Sustainability*, 12(2), 3730–3749. <https://doi.org/10.1039/d4su00342j>
- Shafik, E. S., Wissa, D. A., Labeeb, A. M., & Ward, A. A. (2025). Green polymeric composites based on construction and packaging waste: Toward advanced insulating materials. *Scientific Reports*, 15(38495).
- Shafiq, N., Hussein, A. A. E., Nuruddin, M. F., & Mattarneh, H. Al. (2016). Effects of sugarcane bagasse ash on the properties of concrete. *ICE Proceedings*, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-22450-z>
- Thirupathi, S., Gopalan, V., & Mallichetty, E. (2024). Optimizing dielectric constants of epoxy composites infused with palmyra palm and nano fillers using response surface methodology. *Heliyon*, 10(21), e39657. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39657>
- Trache, D., Tarchoun, A. F., Derradji, M., & Hamidon, T. S. (2020). Nanocellulose: From fundamentals to advanced applications (Vol. 8, Issue May). <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00392>
- Wang, R., Xie, C., Luo, S., Gou, B., Xu, H., & Zeng, L. (2019). The influence mechanism of nanoparticles on the dielectric properties of epoxy resin. *RCS Advances*, 9(June), 19648–19656. <https://doi.org/10.1039/c9ra02889g>
- Xuebang, T., Bhutta, M. S., Ahmed, M., & Shah, H. U. (2024). Micro-/nano-alumina trihydrate and -magnesium hydroxide fillers in RTV-SR composites under electrical and environmental stresses. *Nanotechnology Reviews*, 13, 1–16. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2024-0093>

Yamasaki, S., Sakuma, W., Yasui, H., & Daicho, K. (2019). Nanocellulose xerogels with high porosities and large specific surface areas. *Frontiers in Chemistry*, 7(May), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00316>