

Integrasi Filler Berbasis Limbah Pertanian terhadap Sifat Material Bioplastik Polylactic Acid (PLA): Tinjauan Literatur Terstruktur

Khairunisa Betariani^{*1}, Puji Rahayu², Rachmadi Tutuka³

^{1,2,3}Teknologi Proses Industri Petrokimia, Politeknik Industri Petrokimia Banten, Indonesia
Email: ¹khairunnisa.betariani@poltek-petrokimia.ac.id

Abstrak

Krisis lingkungan akibat akumulasi plastik berbasis minyak bumi mendorong pengembangan material alternatif yang lebih ramah lingkungan. Polylactic Acid (PLA), sebagai bioplastik biodegradable dari sumber terbarukan, menjanjikan solusi pengganti plastik konvensional, namun sifatnya yang rapuh dan produksinya yang mahal membatasi penggunaannya. Kajian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan filler berbasis limbah pertanian terhadap peningkatan sifat fisik dan mekanik PLA. Studi ini merupakan tinjauan literatur terstruktur dengan menganalisis 32 artikel ilmiah dari 2017–2025. Hasil kajian menunjukkan bahwa filler dari limbah seperti sekam padi (5% berat) dapat meningkatkan tensile strength hingga 55%, yield stress sebesar 88%, dan menurunkan laju transmisi oksigen (OTR) hingga 52%. Kulit delima (15% berat) memperkuat komposit dengan peningkatan modulus tarik sebesar 42% dan *impact strength* sebesar 41%. Biochar dari biomassa karbonisasi juga meningkatkan kekakuan dan stabilitas termal hingga suhu degradasi awal naik 15–18°C. Sebaliknya, filler dari tapioka dan cangkang telur menunjukkan penurunan kekuatan mekanik pada konsentrasi tinggi (>20–30%). Pemanfaatan limbah pertanian sebagai filler dalam PLA berpotensi meningkatkan performa material sekaligus mendukung ekonomi sirkular. Namun, keberhasilannya sangat tergantung pada jenis filler, komposisi, dan kesesuaian interaksi antarfasa. Kajian lanjutan diperlukan untuk mengoptimalkan formulasi komposit.

Kata Kunci: Bioplastik, Filler, Limbah Pertanian, Polylactic Acid (PLA)

Abstract

The environmental crisis caused by the accumulation of petroleum-based plastics has accelerated the search for more sustainable alternative materials. Polylactic Acid (PLA), a biodegradable bioplastic derived from renewable resources, represents a promising candidate to replace conventional plastics. However, its inherent brittleness and high production costs significantly limit its broader application. This study aims to evaluate the effects of incorporating agricultural waste-based fillers on the enhancement of PLA's physical and mechanical properties. A structured literature review was conducted, analyzing 32 scientific articles published between 2017 and 2025. The review reveals that waste-derived fillers such as rice husk silica (5 wt%) can improve tensile strength by up to 55%, yield stress by 88%, and reduce the oxygen transmission rate (OTR) by 52%. Pomegranate peel filler (15 wt%) contributes to mechanical reinforcement by increasing tensile modulus by 42% and impact strength by 41%. Additionally, biochar from carbonized biomass enhances rigidity and thermal stability, with an increase in initial degradation temperature ranging from 15 to 18°C. In contrast, fillers such as tapioca starch and eggshells tend to decrease mechanical performance at higher concentrations (>20–30 wt%) due to poor interfacial adhesion and filler agglomeration. The integration of agricultural waste fillers into PLA composites offers a dual benefit: improving material performance while promoting circular economy practices. Nevertheless, the effectiveness of this approach is highly dependent on the type of filler, its concentration, and interfacial compatibility. Further investigations are essential to optimize composite formulations.

Keywords: Agriculture Waste, Bioplastics, Filler, Polylactic Acid (PLA)

1. PENDAHULUAN

Krisis lingkungan yang disebabkan oleh plastik telah menjadi isu global yang mendesak, dengan dampak yang merugikan terhadap ekosistem, kesehatan manusia, dan perekonomian. Plastik konvensional yang berasal dari sumber daya tak terbarukan seperti minyak bumi menyumbang limbah dan pencemaran dalam jumlah besar karena sifatnya yang tahan lama dan sulit terurai (Hossain et al.,

2020). Keberadaan plastik di lingkungan menimbulkan tantangan serius bagi pengelolaan limbah dan keanekaragaman hayati, karena dapat terfragmentasi menjadi mikroplastik yang mencemari rantai makanan dan habitat (Nikiema & Asiedu, 2022). Menanggapi krisis ini, bioplastik muncul sebagai solusi potensial dengan menawarkan material alternatif berbasis sumber daya terbarukan yang dapat mengurangi dampak negatif dari plastik konvensional.

Polylactic Acid (PLA) adalah salah satu material bioplastik yang semakin populer, memiliki potensi besar sebagai alternatif plastik konvensional. PLA terbuat dari sumber bahan alam terbarukan, seperti jagung, singkong, dan gula tebu, yang mengalami fermentasi karbohidrat untuk memproduksi asam laktat melalui proses biokimia. Salah satu keunggulan utama PLA adalah sifat biodegradabilitasnya. PLA terurai secara alami di lingkungan, sehingga dapat mengurangi akumulasi limbah plastik yang menjadi masalah global saat ini. Ini sangat berbeda dari plastik konvensional yang memerlukan waktu ratusan tahun untuk terurai (Rahayu et al., 2021). Dengan kemampuannya untuk terdegradasi dan menjadi kompos yang tidak beracun, PLA dapat membantu mengatasi isu pencemaran yang terkait dengan penggunaan plastik sekali pakai. PLA dapat diproses menjadi berbagai bentuk seperti film, botol, dan kemasan lainnya menggunakan teknologi pengolahan plastik yang ada. Ini menyederhanakan transisi dari plastik konvensional ke bioplastik, mengurangi kebutuhan untuk pengaturan pabrik baru dan memanfaatkan infrastruktur yang telah ada (Setiawan et al., 2021).

Dari segi sifat mekanik, PLA memiliki kekuatan mekanik dan stabilitas termal yang baik (Ramadhani & Firdhausi, 2021). Namun demikian, PLA memiliki beberapa keterbatasan yang membatasi aplikasinya, antara lain sifatnya yang rapuh, biaya produksi yang relatif tinggi, serta performa mekanik yang masih lebih rendah dibandingkan plastik konvensional (Ahmad et al., 2024; Li et al., 2023). Untuk mengatasi kelemahan tersebut, salah satu pendekatan yang semakin banyak diteliti adalah dengan menambahkan filler. penggunaan filler berbasis logam dan oksida logam seperti ZnO, TiO₂, aluminium, perak, dan lainnya menimbulkan kekhawatiran terkait potensi toksisitasnya. Sehingga, fokus penelitian kini bergeser ke arah pemanfaatan filler berbasis biomaterial salah satunya dari limbah pertanian ke dalam matriks PLA (Massijaya et al., 2023; Shaik et al., 2022).

Limbah pertanian, seperti jerami, serat tongkol jagung, ampas kopi, sekam padi, dan sabut kelapa, merupakan sumber daya yang melimpah, berbiaya rendah, serta ramah lingkungan. Penggunaan limbah ini sebagai filler pada bioplastik memberikan keuntungan dengan menurunkan biaya produksi dan mengurangi limbah organik yang tidak dimanfaatkan (Li et al., 2023; Zhao et al., 2020). Penerimaan bioplastik di pasar konsumen terus meningkat seiring dengan kesadaran lingkungan dan tekanan regulasi untuk mengurangi limbah plastik. (Hermansyah et al., 2014; Lamberti et al., 2021). Tinjauan terhadap literatur yang ada menunjukkan bahwa integrasi filler berbasis limbah pertanian dalam bioplastik PLA masih belum dieksplorasi secara sistematis, terutama pada karakteristik fisik material yang dihasilkan.

Berdasarkan peran filler terhadap peningkatan performa fisik PLA dan potensi dari limbah pertanian yang belum dimanfaatkan secara optimal, diperlukan suatu tinjauan literatur yang terstruktur dan menyeluruh. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis studi-studi sebelumnya yang membahas integrasi filler berbasis limbah pertanian ke dalam matriks PLA serta menganalisis pengaruhnya terhadap sifat fisik bioplastik yang dihasilkan. Hasil dari tinjauan ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan material PLA berbasis limbah pertanian yang lebih unggul, aplikatif, dan berkelanjutan di masa depan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi tinjauan literatur terstruktur yang disusun untuk mengidentifikasi dan menganalisis berbagai publikasi ilmiah terkait pemanfaatan *Polylactic Acid* (PLA) sebagai bahan dasar bioplastik serta integrasi filler berbasis limbah pertanian untuk peningkatan sifat fisik PLA. Artikel yang dianalisis dalam kajian ini diperoleh dari tiga basis data ilmiah utama, yakni ScienceDirect, PubMed, dan Google Scholar. Strategi pencarian literatur dilakukan dengan memanfaatkan kombinasi kata kunci sebagai berikut: “PLA bioplastic”, “waste filler for bioplastic”, “biodegradable polymer”, dan “agricultural waste”.

Rentang waktu publikasi dibatasi pada periode tahun 2017 hingga 2025 guna memastikan bahwa referensi yang dianalisis mencerminkan perkembangan teknologi dan hasil penelitian terkini dalam bidang bioplastik dan pemanfaatan biomassa limbah. Seluruh artikel yang dipertimbangkan berasal dari publikasi ilmiah yang tersedia dalam bahasa Inggris atau bahasa Indonesia, dan berbentuk artikel hasil penelitian empiris, studi eksperimental laboratorium, maupun tinjauan pustaka (*review article*) yang membahas hubungan antara PLA dan filler berbasis limbah pertanian.

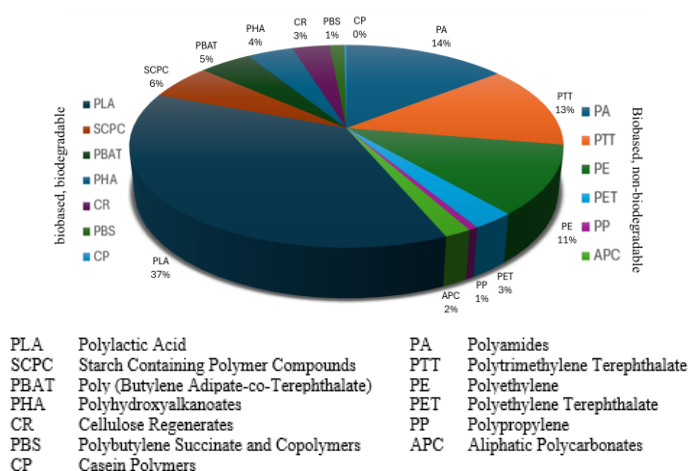
Kriteria inklusi dalam kajian ini meliputi: (1) artikel yang meneliti PLA sebagai matriks utama, (2) penggunaan filler yang berasal dari limbah pertanian atau biomassa residu, dan (3) penyajian data kuantitatif atau kualitatif mengenai sifat fisik material hasil modifikasi. Sebaliknya, kriteria eksklusi mencakup: (1) artikel yang tidak tersedia dalam teks penuh, (2) publikasi yang menggunakan filler non-limbah atau berbasis sintetik murni, serta (3) studi yang tidak menyajikan informasi terkait sifat fisik atau mekanik material.

Hasil pencarian awal menghasilkan sebanyak **3.507 artikel** dari ScienceDirect, **1.167 artikel** dari PubMed, dan **11.700 artikel** dari Google Scholar. Proses penyaringan dilakukan melalui tahapan seleksi judul, abstrak, dan keterkaitan topik, yang dilanjutkan dengan evaluasi kesesuaian isi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Setelah proses pemilihan, diperoleh **32 artikel** yang memenuhi kelayakan untuk dianalisis lebih lanjut. Analisis terhadap artikel terpilih dilakukan secara **naratif dan tematik**, dengan pendekatan klasifikasi berdasarkan jenis filler limbah pertanian yang digunakan, metode preparasi atau modifikasi filler, serta pengaruh terhadap sifat fisik PLA.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Polylactic Acid (PLA) merupakan salah satu bioplastik yang penting dalam produksi global karena sifatnya yang dapat diperbarui, *biodegradable*, serta potensi aplikasinya yang luas di berbagai industri seperti kemasan, tekstil, dan kesehatan. Pasar bioplastik terus berkembang, dengan produksi PLA diperkirakan mencapai sekitar 0,2 juta ton pada tahun 2015 dan meningkat menjadi sekitar 0,3 juta ton pada tahun 2019, menunjukkan tren pertumbuhan yang sejalan dengan meningkatnya kesadaran lingkungan dan permintaan akan bahan yang berkelanjutan (Ncube et al., 2020; Rezvani Ghomi et al., 2021).

Proses produksi PLA umumnya melibatkan fermentasi pati yang umumnya berasal dari sumber seperti jagung dan tebu menjadi asam laktat, yang kemudian dipolimerisasi untuk membentuk PLA (S. Ramesh & Preetha, 2024). Proses berbasis bahan baku terbarukan ini tidak hanya memanfaatkan sumber daya alam yang dapat diperbarui, tetapi juga mendorong prinsip ekonomi sirkular dengan mengintegrasikan limbah pertanian ke dalam jalur produksi, sehingga mengoptimalkan biaya dan pemanfaatan sumber daya (Bucio-Galindo et al., 2023).



Gambar 1. Produksi global bioplastik berdasarkan tipe material pada 2024
(European Bioplastics e.V, 2024)

PLA menguasai 37% dari 2,47 juta ton produksi bioplastik secara global pada 2024 (European Bioplastics e.V, 2024). Angka ini menegaskan pentingnya PLA sebagai pemain utama dalam transisi dari plastik berbasis minyak bumi menuju opsi yang lebih berkelanjutan. Fleksibilitas ini terutama terlihat dalam penggunaannya yang semakin meluas dalam kemasan makanan, di mana sifat biodegradabilitas PLA sangat membantu dalam mengatasi tantangan limbah kemasan (Jacob et al., 2022).

PLA diproduksi dengan pemilihan sumber karbohidrat, yang biasanya berasal dari bahan baku terbarukan seperti jagung, tebu, dan singkong (Rezvani Ghomi et al., 2021). Gula dari bahan baku ini kemudian difermentasi menjadi asam laktat melalui proses fermentasi mikroba yang melibatkan bakteri atau ragi (S. Ramesh & Preetha, 2024). Proses fermentasi adalah tahap kunci dalam produksi PLA, di mana karbohidrat diubah menjadi asam laktat melalui aktivitas mikroorganisme. Mikroorganisme yang umum digunakan dalam proses ini meliputi *Lactobacillus sp* (Ali et al., 2023). Kondisi fermentasi, seperti suhu, pH, dan waktu fermentasi, harus dikontrol dengan cermat untuk memastikan hasil maksimal dalam produksi asam laktat. Hasil dari proses ini adalah larutan asam laktat yang kemudian dapat dimurnikan untuk digunakan lebih lanjut dalam sintesis PLA (Chen et al., 2021). Setelah memperoleh asam laktat, langkah selanjutnya adalah polimerisasi, di mana asam laktat diubah menjadi PLA (Butbunchu & Pathom-Aree, 2019). PLA memiliki keterbatasan seperti rapuh dan harga tinggi. Pencampuran dengan filler alami perlu dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik sekaligus menurunkan biaya produksi dari bioplastik (Gbadeyan et al., 2023).

3.1. Penggunaan Filler Alami dari Limbah Pertanian

Dalam pengembangan bioplastik, filler adalah bahan tambahan yang dicampurkan ke dalam matriks plastik seperti polylactic acid (PLA), pati, atau polihidroksialkanoat (PHA), dengan tujuan memperbaiki sifat mekanik, kestabilan termal, ketahanan air, serta aspek fungsional lainnya. Salah satu sumber potensial filler adalah limbah pertanian, yang memiliki nilai tambah tinggi karena melimpah, murah, dan ramah lingkungan. Limbah ini dapat dimanfaatkan kembali untuk mengurangi pencemaran dan mendukung keberlanjutan. Berdasarkan asalnya, limbah pertanian diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu limbah nabati dan hewani (Varghese et al., 2023). Sumber nabati yaitu dari limbah tanaman, limbah proses, serta limbah buah dan sayuran dan sumber hewani berupa cangkang telur, bulu unggas, dan limbah daging yang merupakan produk samping pertanian yang sering terbuang, di mana hanya sebagian kecil yang digunakan sebagai pakan ternak, sementara sisanya dibakar dan dapat merusak lingkungan. Berbagai jenis limbah pertanian ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 2. Sumber limbah pertanian (Varghese et al., 2023)

Produksi limbah pertanian setiap tahunnya meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan industri. Tanpa metode pembuangan yang tepat, hal ini menyebabkan pencemaran lingkungan serta bahaya kesehatan bagi manusia dan hewan. Sebagian besar limbah pertanian tidak diolah dengan baik dan kurang dimanfaatkan. Para peneliti secara aktif mencari teknologi baru, inovatif, dan ramah lingkungan untuk pengelolaan limbah (Gbadeyan et al., 2023).

3.2. Sifat Mekanik PLA dengan penambahan Filler

PLA memiliki keterbatasan seperti kerapuhan, sifat mekanik yang terbatas, dan harga produksi yang relatif tinggi. Untuk mengatasi kekurangan tersebut, beberapa penelitian telah difokuskan pada modifikasi PLA melalui penambahan bahan pengisi (*filler*) dari limbah pertanian dan biomassa. Ringkasan beberapa studi yang mengkaji penambahan filler alami terhadap PLA terdapat pada tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan sifat mekanik PLA dengan berbagai jenis filler dari limbah pertanian

Jenis Filler	Konsentrasi	Sifat Mekanik	Ref
Silika dari sekam padi	≤5%	Meningkatkan tensile strength hingga 55%, tensile stress sebesar 88%, dan modulus yield sebesar 89%. Mengurangi OTR hingga 52% dan meningkatkan kristalinitas.	(Jacob et al., 2022)

Pati tapioka	10–70t%	Peningkatan tensile strength dan modulus pada rasio 70:30. Namun, terjadi penurunan ketahanan impact pada kandungan >30% karena inkompatibilitas fasa. (Yusoff et al., 2021)
Kulit delima	5–25 %	Meningkatkan tensile strength sebesar 13,6%, modulus tarik sebesar 42%, compressive strength sebesar 9,3%, impact strength sebesar 41%, dan hardness sebesar 26%. (S. Ramesh & Preetha, 2024)
CaCO ₃ dari cangkang telur & batu kapur	5–20 %	Meningkatkan modulus tarik dan lentur. Namun, impact strength menurun dan water absorption meningkat, terutama pada filler dari cangkang telur. (Betancourt & Cree, 2017)
Cangkang telur coklat	≤20t%	Partikel lebih kecil (32 µm) meningkatkan dispersi dan kekuatan. Namun, degradasi dan penyerapan air juga lebih tinggi. (Cree et al., 2023)
Kulit kacang Pecan	5–7,5%	Meningkatkan tensile, flexural, dan impact strength, khususnya setelah perlakuan. Thermal stability menurun pada kandungan filler tinggi. (Sivakumar et al., 2024)
Cangkang telur + cangkang kerang	Hingga 140 %	Hardness material meningkat secara signifikan dan struktur mikro tetap stabil. (Cecchi et al., 2019)
Cangkang telur + kulit kenari	-	Komposit PLA yang diplastisasi dengan minyak kedelai menunjukkan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan kombinasi PLA–kulit kenari. (Sivakumar et al., 2024)
Biochar kayu & lumpur limbah	≤20 wt%	Stiffness dan thermal stability meningkat, penyerapan air juga meningkat. (Pudelko et al., 2021)

Limbah pertanian menawarkan perpaduan antara efektivitas biaya dan keramahan lingkungan. Sekam padi, produk sampingan pertanian, sekarang dimasukkan sebagai serat alami dalam pembuatan biokomposit (Abdul Azam et al., 2020). Sekam padi merupakan salah satu limbah pertanian yang melimpah dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber silika mesoporous. Silika ini disintesis melalui proses sol-gel dan dimodifikasi dengan biosurfaktan untuk meningkatkan dispersinya dalam PLA. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi persentase berat (*weight percentage*) filler terhadap sifat struktural, morfologi, termomekanik, dan kemampuan *gas barrier* dari PLA. Hasil analisis morfologi menunjukkan bahwa *filler* terdispersi secara merata dalam matriks PLA hingga konsentrasi 5% berat. Data laju transmisi oksigen (*oxygen transmission rate*, OTR) menunjukkan penurunan sebesar 52%, yang mengindikasikan peningkatan signifikan pada sifat penghalang oksigen dari material kemasan. Penurunan ini menandakan rendahnya permeabilitas oksigen, yang sangat penting dalam mempertahankan kesegaran serta memperpanjang masa simpan produk-produk yang sensitif terhadap oksigen seperti bahan pangan dan farmasi. Kandungan abu sebesar 20–50% dalam komposit berkontribusi pada peningkatan stabilitas termal, densitas, serta kemampuan biodegradasi, sekaligus menurunkan daya serap air. Komposit juga menunjukkan peningkatan indeks kristalinitas dan mempercepat proses kristalisasi. Namun demikian, peningkatan ini dapat disertai dengan penurunan stabilitas termal dan peningkatan serapan kelembapan. Uji mekanik menunjukkan peningkatan signifikan pada *tensile strength*, *yield stress*, dan *tensile modulus*; masing-masing meningkat sebesar 55%, 88%, dan 89%. Selain itu, sifat permukaan komposit menunjukkan peningkatan sifat hidrofobik dibandingkan PLA murni, yang mendukung material ini sebagai bioplastik (Jacob et al., 2022). Peningkatan indeks kristalinitas, kekuatan tarik, dan modulus elastisitas memperkuat potensi aplikasi filler ini pada produk kemasan yang membutuhkan kestabilan dimensi dan proteksi oksigen.

Komposit PLA juga dapat diperkuat dengan penambahan pati tapioka (*tapioca starch*/TS), khususnya untuk aplikasi kemasan makanan. Komposit PLA/TS dibuat menggunakan metode *melt blending* dan *injection molding* dengan variasi komposisi dari 10% hingga 70% berat TS. Hasil uji tarik menunjukkan peningkatan kekuatan tarik maksimum pada komposisi 70:30 (PLA:TS), mencapai 9,7 MPa dibandingkan dengan PLA murni sebesar 7,0 MPa. Nilai modulus elastis (Young's Modulus) juga meningkat hingga 9,37 MPa pada komposisi yang sama. Namun, peningkatan kandungan TS di atas 30% menyebabkan penurunan kekuatan tarik karena lemahnya interaksi antara matriks PLA dan pati, sebagaimana dikonfirmasi oleh pengamatan mikroskopik (SEM) yang menunjukkan adanya *void* dan

ketidakhomogenan. PLA murni memiliki ketahanan benturan tertinggi, yaitu 2,26 J/m², dan semakin menurun dengan bertambahnya kandungan TS, mencapai 0,51 J/m² pada komposisi 30:70. Penurunan ini disebabkan oleh inkompatibilitas antara PLA yang bersifat hidrofobik dan TS yang bersifat hidrofilik, sehingga ikatan antarmolekul menjadi lemah dan komposit menjadi lebih rapuh. Namun, produk ini hanya cocok digunakan dalam kondisi suhu di bawah 160 °C (Yusoff et al., 2021).

Studi lain mengevaluasi pengaruh filler partikel limbah kulit delima sebagai penguat baru terhadap sifat mekanik, termal, dan termomekanik dari biokomposit berbasis PLA. Biofiller dari kulit delima dikarakterisasi menggunakan berbagai teknik karakterisasi, dan digunakan dalam konsentrasi berbeda antara 5 hingga 25% berat untuk pembuatan komposit berbasis PLA. Komposit yang dihasilkan kemudian diuji melalui serangkaian pengujian mekanik dan termal. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa biokomposit dengan 15% berat biofiller memberikan peningkatan sifat mekanik yang signifikan dibandingkan dengan PLA murni, yaitu peningkatan kekuatan tarik sebesar 13,6%, modulus tarik sebesar 42%, kekuatan tekan sebesar 9,34%, kekuatan dampak sebesar 41%, dan kekerasan sebesar 26%. Selain itu, komposit juga menunjukkan perilaku termal dan termomekanik yang lebih baik. Morfologi menunjukkan adanya ikatan *interface* yang baik antara komponen penyusun komposit. (M. Ramesh et al., 2025).

Cangkang telur putih dan batu kapur juga diteliti sebagai filler berbasis kalsium karbonat (CaCO₃). *Tensile strength* tertinggi diperoleh pada penambahan 5% filler, dan modulus Young's meningkat seiring dengan peningkatan kandungan filler hingga 20%. Filler berukuran lebih kecil (32 µm) menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan partikel berukuran lebih besar, dan PLA dengan batu kapur menunjukkan ketangguhan yang lebih tinggi dibandingkan PLA dengan cangkang telur. Meskipun penambahan filler meningkatkan modulus Young's, *impact strength* justru menurun pada beberapa komposisi karena terjadinya aglomerasi partikel yang menghambat transfer tegangan efektif. Penyerapan air meningkat pada komposit yang mengandung CaCO₃, terutama dari cangkang telur, karena struktur permukaan yang lebih berpori dan sifat hidrofiliknya (Betancourt & Cree, 2017).

Penelitian lainnya mengevaluasi potensi limbah cangkang telur cokelat sebagai bahan pengisi (*filler*) alternatif dengan bubuk batu kapur dengan variasi ukuran partikel (32 µm dan 63 µm) dan konsentrasi pengisian hingga 20% berat. Hasil mekanik menunjukkan bahwa penambahan filler LS dan BESP mampu meningkatkan modulus tarik dan lentur secara signifikan dibandingkan PLA murni, khususnya pada konsentrasi filler 20% berat. Namun, kekuatan tarik dan kekuatan *impact* menurun dengan meningkatnya fraksi filler, terutama pada cangkang telur cokelat. Pengamatan menggunakan mikroskop elektron menunjukkan bahwa ukuran partikel yang lebih kecil (32 µm) memberikan dispersi yang lebih baik dalam matriks PLA, yang berdampak positif terhadap sifat mekanik. Uji perendaman selama lima minggu menunjukkan bahwa komposit dengan cangkang telur cokelat menyerap lebih banyak air dan mengalami kehilangan massa yang lebih tinggi dibandingkan dengan komposit batu kapur, yang juga ditunjukkan oleh adanya pelepasan kalsium karbonat (CaCO₃) ke dalam media air. Analisis statistik menggunakan ANOVA menunjukkan bahwa semua sifat mekanik secara signifikan dipengaruhi oleh jenis dan konsentrasi filler. Hasil ini mengindikasikan bahwa limbah cangkang telur cokelat dapat dimanfaatkan sebagai biofiller dalam produksi komposit PLA, terutama untuk aplikasi yang memerlukan peningkatan kekakuan, meskipun perlu perhatian terhadap sifat degradasi dan ikatan antar fasa material (Cree et al., 2023).

PLA dengan *Filler* dari kulit kacang pecan juga menunjukkan potensi, terutama setelah perlakuan ekstraksi menggunakan kloroform untuk menghilangkan *fatty acid* (lipid, minyak, dan lilin). Sifat mekanik—seperti *tensile modulus* dan lentur serta *impact strength*—meningkat secara signifikan dibandingkan PLA murni, terutama pada komposit dengan kulit kacang pecan yang telah diberi perlakuan. Namun, peningkatan kadar kulit kacang pecan menyebabkan penurunan stabilitas termal (Sánchez-Acosta et al., 2019). Serbuk cangkang telur dan cangkang kerang hijau dicampurkan dengan PLA dalam jumlah besar, yaitu 140% dari berat PLA. Kekerasan komposit PLA meningkat secara signifikan, khususnya pada PLA dengan serbuk cangkang telur dibandingkan dengan PLA murni. Analisis morfologi menunjukkan struktur mikro yang lebih seragam pada serbuk cangkang telur dibandingkan cangkang kerang (Cecchi et al., 2019). Dalam studi lain, pencampuran serbuk cangkang telur dan serbuk kulit kenari ke dalam PLA yang telah diplastisasi dengan 5% berat minyak kedelai

epoksidasi dengan penambahan filler limbah pertanian menyebabkan penurunan sifat mekanik dibandingkan PLA murni, komposit PLA yang diplastisasi dengan minyak kedelai menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan komposit PLA–kulit kenari dalam hal kekuatan mekanik (Sivakumar et al., 2024). Selain itu, penggunaan biochar dari kayu sebagai filler dalam komposit PLA dan juga menunjukkan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan termal. Penambahan biochar hingga 20% berat meningkatkan kekakuan serta kemampuan penyerapan air komposit (Pudelfko et al., 2021).

Setiap jenis filler memiliki keterbatasan. Filler pati, selain bersifat hidrofilik, juga memiliki ketahanan termal yang rendah, sehingga membatasi penggunaannya pada aplikasi bersuhu tinggi. Cangkang telur dan batu kapur, meskipun meningkatkan modulus elastisitas, cenderung menurunkan ketangguhan akibat aglomerasi partikel dan struktur permukaan yang berpori (Cree et al., 2023). Biochar meningkatkan kekakuan dan kestabilan dimensi, tetapi sifat porositasnya menyebabkan peningkatan daya serap air, yang tidak diinginkan dalam aplikasi luar ruangan atau kelembapan tinggi (Pudelfko et al., 2021). Kulit kacang pecan menunjukkan peningkatan sifat mekanik setelah proses ekstraksi lipid, namun menurunkan kestabilan termal akibat sisa senyawa organik yang mudah terdegradasi (Sánchez-Acosta et al., 2019).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur ini, dapat disimpulkan bahwa integrasi filler berbasis limbah pertanian ke dalam matriks Polylactic Acid (PLA) memberikan dampak positif terhadap peningkatan sifat mekanik, kestabilan termal, dan potensi biodegradasi material bioplastik. Namun, efektivitas tersebut sangat bergantung pada jenis filler, komposisi, dan kesesuaian karakteristik antarfasa antara filler dan PLA. Secara umum, filler dari silika sekam padi pada komposisi 5% berat menunjukkan performa paling menonjol dalam meningkatkan ketahanan termal dan sifat *gas barrier*, dengan penurunan *oxygen transmission rate* hingga 52% dan peningkatan suhu degradasi awal sebesar 12°C. Sementara itu, biofiller dari kulit delima menunjukkan efektivitas tinggi dalam penguatan mekanik, khususnya pada komposisi 15% berat, dengan peningkatan kekuatan tarik sebesar 13,6%, modulus tarik sebesar 42%, dan kekuatan impak sebesar 41%. Di sisi lain, biochar dari biomassa karbonisasi juga terbukti meningkatkan kestabilan termal dan kekakuan komposit PLA secara signifikan pada kadar hingga 20% berat, dengan peningkatan suhu degradasi awal sebesar 15–18°C. Sebaliknya, filler seperti pati tapioka dan cangkang telur cenderung menurunkan performa termal dan ketangguhan mekanik pada konsentrasi di atas 20–30% berat, akibat terbentuknya *void*, aglomerasi partikel, dan buruknya ikatan antarfasa. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa jenis filler yang paling efektif adalah sekam padi (5%), kulit delima (15%), dan biochar ($\leq 20\%$), masing-masing unggul dalam aspek ketahanan termal, kekuatan mekanik, dan kestabilan dimensi. Oleh karena itu, penggunaan filler limbah pertanian dalam komposit PLA pada komposisi yang terkendali dan dengan perlakuan yang sesuai memiliki prospek aplikatif. Diperlukan kajian lanjutan untuk memastikan kompatibilitas bahan, kestabilan produk, serta efisiensi proses produksi, agar inovasi ini dapat diterapkan secara komersial dan berkontribusi nyata terhadap pengurangan pencemaran lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Azam, F. A., Rajendran Royan, N. R., Yuhana, N. Y., Mohd Radzuan, N. A., Ahmad, S., & Sulong, A. B. (2020). Fabrication of Porous Recycled HDPE Biocomposites Foam: Effect of Rice Husk Filler Contents and Surface Treatments on the Mechanical Properties. *Polymers*, 12(2), 475. <https://doi.org/10.3390/polym12020475>
- Ahmad, A., Banat, F., Alsafar, H., & Hasan, S. W. (2024). An overview of biodegradable poly (lactic acid) production from fermentative lactic acid for biomedical and bioplastic applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(3), 3057–3076. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02581-3>
- Ali, W., Ali, H., Gillani, S., Zinck, P., & Souissi, S. (2023). Polylactic acid synthesis, biodegradability, conversion to microplastics and toxicity: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1761–1786. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01564-8>

- Betancourt, N. G., & Cree, D. E. (2017). Mechanical Properties of Poly (lactic acid) Composites Reinforced with CaCO₃ Eggshell Based Fillers. *MRS Advances*, 2(47), 2545–2550. <https://doi.org/10.1557/adv.2017.473>
- Bucio-Galindo, , Adolfo, Lopez Velazquez, L. Y., & Canché Escamilla, G. (2023). Bioplastics: Environment-friendly materials and their production technologies. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i4.2373>
- Butbunchu, N., & Pathom-Aree, W. (2019). Actinobacteria as Promising Candidate for Polylactic Acid Type Bioplastic Degradation. *Frontiers in Microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02834>
- Cecchi, T., Giuliani, A., Iacopini, F., Santulli, C., Sarasini, F., & Tirillò, J. (2019). Unprecedented high percentage of food waste powder filler in poly lactic acid green composites: synthesis, characterization, and volatile profile. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(7), 7263–7271. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04187-1>
- Chen, X., Kroell, N., Li, K., Feil, A., & Pretz, T. (2021). Influences of bioplastic polylactic acid on near-infrared-based sorting of conventional plastic. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 39(9), 1210–1213. <https://doi.org/10.1177/0734242X211003969>
- Cree, D., Owuamanam, S., & Soleimani, M. (2023). Mechanical Properties of a Bio-Composite Produced from Two Biomaterials: Polylactic Acid and Brown Eggshell Waste Fillers. *Waste*, 1(3), 740–760. <https://doi.org/10.3390/waste1030044>
- European Bioplastics e.V. (2024). *Bioplastics Market Development Update 2024*. <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics-market-development-update-2024/>
- Gbadeyan, O. J., Liganiso, L. Z., & Deenadayalu, N. (2023). Assessment and Optimization of Thermal Stability and Water Absorption of Loading Snail Shell Nanoparticles and Sugarcane Bagasse Cellulose Fibers on Polylactic Acid Bioplastic Films. *Polymers*, 15(6), 1557. <https://doi.org/10.3390/polym15061557>
- Hermansyah, H., Carissa, R., Faiz, M. B., & Deni, P. (2014). Food Grade Bioplastic Based on Corn Starch with Banana Pseudostem Fibre/Bacterial Cellulose Hybrid Filler. *Advanced Materials Research*, 997, 158–168. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.997.158>
- Hossain, S., Rahman, M. A., Ahmed Chowdhury, M., & Kumar Mohonta, S. (2020). Plastic pollution in Bangladesh: A review on current status emphasizing the impacts on environment and public health. *Environmental Engineering Research*, 26(6), 200535–0. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.535>
- Jacob, J., Robert, V., Valapa, R. B., Kuriakose, S., Thomas, S., & Loganathan, S. (2022). Poly(lactic acid)/Polyethylenimine Functionalized Mesoporous Silica Biocomposite Films for Food Packaging. *ACS Applied Polymer Materials*, 4(7), 4632–4642. <https://doi.org/10.1021/acsapm.1c01551>
- Lamberti, F. M., Ingram, A., & Wood, J. (2021). Synergistic Dual Catalytic System and Kinetics for the Alcoholysis of Poly(Lactic Acid). *Processes*, 9(6), 921. <https://doi.org/10.3390/pr9060921>
- Li, R., Zhu, X., Peng, F., & Lu, F. (2023). Biodegradable, Colorless, and Odorless PLA/PBAT Bioplastics Incorporated with Corn Stover. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(24), 8870–8883. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c00691>
- Masssijaya, S. Y., Lubis, M. A. R., Nissa, R. C., Nurhamiyah, Y., Nugroho, P., Antov, P., Lee, S.-H., Papadopoulos, A. N., Kusumah, S. S., & Karlinasari, L. (2023). Utilization of Spent Coffee Grounds as a Sustainable Resource for the Synthesis of Bioplastic Composites with Polylactic Acid, Starch, and Sucrose. *Journal of Composites Science*, 7(12), 512. <https://doi.org/10.3390/jcs7120512>
- Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., & Beas, I. N. (2020). Environmental Impact of Food Packaging Materials: A Review of Contemporary Development from Conventional

- Plastics to Polylactic Acid Based Materials. *Materials*, 13(21), 4994. <https://doi.org/10.3390/ma13214994>
- Nikiema, J., & Asiedu, Z. (2022). A review of the cost and effectiveness of solutions to address plastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(17), 24547–24573. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18038-5>
- Pudelko, A., Postawa, P., Stachowiak, T., Malińska, K., & Drózd, D. (2021). Waste derived biochar as an alternative filler in biocomposites - Mechanical, thermal and morphological properties of biochar added biocomposites. *Journal of Cleaner Production*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123850>
- Rahayu, P., Agustina, S., Pramesty, M., Rosalina, R., & Putri, D. K. (2021). Pengaruh Waktu Pengadukan pada Proses Poliblend Poly Lactic Acid dengan Poly Ethylene Glycol-400 Terhadap Viskositas dan Densitas Bioplastik. *CHEESA: Chemical Engineering Research Articles*, 4(2), 100. <https://doi.org/10.25273/cheesa.v4i2.8945.100-108>
- Ramadhani, A. A., & Firdhausi, N. F. (2021). Potensi Limbah Sisik Ikan Sebagai Kitosan dalam Pembuatan Bioplastik. *JURNAL AL-AZHAR INDONESIA SERI SAINS DAN TEKNOLOGI*, 6(2), 90. <https://doi.org/10.36722/sst.v6i2.782>
- Ramesh, M., Rajeshkumar, L., Sanjay, M., & Siengchin, S. (2025). Sustainable biocomposites based on polylactic acid and agro waste biofillers for lightweight applications: Fabrication and properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. <https://doi.org/10.1177/08927057251322165>
- Ramesh, S., & Preetha, R. (2024). Preparations of Nano Cellulose Particles from Agricultural Wastes for Eco-Friendly Biodegradable Take Away Bowls for Food. *ACS Agricultural Science & Technology*, 4(11), 1216–1229. <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.4c00425>
- Rezvani Ghomi, E. R., Khosravi, F., Saedi Ardahaei, A. S., Dai, Y., Neisiany, R. E., Foroughi, F., Wu, M., Das, O., & Ramakrishna, S. (2021). The Life Cycle Assessment for Polylactic Acid (PLA) to Make It a Low-Carbon Material. *Polymers*, 13(11), 1854. <https://doi.org/10.3390/polym13111854>
- Sánchez-Acosta, D., Rodriguez-Urbe, A., Álvarez-Chávez, C. R., Mohanty, A. K., Misra, M., López-Cervantes, J., & Madera-Santana, T. J. (2019). Physicochemical Characterization and Evaluation of Pecan Nutshell as Biofiller in a Matrix of Poly(lactic acid). *Journal of Polymers and the Environment*, 27(3), 521–532. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01374-6>
- Setiawan, A., Anggraini, F. D. M., Ramadani, T. A., Cahyono, L., & Rizal, M. C. (2021). Pemanfaatan Jerami Padi Sebagai Bioplastik Dengan Menggunakan Metode Perlakuan Pelarut Organik. *METANA*, 17(2), 69–80. <https://doi.org/10.14710/metana.v17i2.42254>
- Shaik, S. A., Schuster, J., Shaik, Y. P., & Kazmi, M. (2022). Manufacturing of Biocomposites for Domestic Applications Using Bio-Based Filler Materials. *Journal of Composites Science*, 6(3), 78. <https://doi.org/10.3390/jcs6030078>
- Sivakumar, A., Srividhya, S., Prakash, R., & Subbarayan, M. R. (2024). Exploring the effects of eco-friendly and biodegradable biocomposite with PLA incorporating eggshell and walnut powder as fillers. *Global Nest Journal*, 26(3), 1–6. <https://doi.org/10.30955/gnj.005471>
- Varghese, S. A., Pulikkalparambil, H., Promhuad, K., Srisa, A., Laorenza, Y., Jarupan, L., Nampitch, T., Chonhenchob, V., & Harnkarnsujarit, N. (2023). Renovation of Agro-Waste for Sustainable Food Packaging: A Review. *Polymers*, 15(3), 648. <https://doi.org/10.3390/polym15030648>
- Yusoff, N. H., Pal, K., Narayanan, T., & de Souza, F. G. (2021). Recent trends on bioplastics synthesis and characterizations: Polylactic acid (PLA) incorporated with tapioca starch for packaging applications. *Journal of Molecular Structure*, 1232. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.129954>
- Zhao, X., Cornish, K., & Vodovotz, Y. (2020). Narrowing the Gap for Bioplastic Use in Food Packaging: An Update. *Environmental Science & Technology*, 54(8), 4712–4732. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03755>

Halaman Ini Dikosongkan