

Komposit Miselium Jamur sebagai Alternatif Material Hijau Pengganti Styrofoam: Tinjauan Kritis Formulasi, Kinerja Mekanis, dan Keberlanjutan

Mycelium-Based Composites as Sustainable Alternatives to Styrofoam: A Critical Review of Formulation, Mechanical Performance, and Sustainability

¹Sherin Ayu Sekar Adisti, ²Azizah Khoerunnisa, ³Laila Alvi Khariroh, ⁴Muhammad Dwi Adi Prasetyo, ⁵Mayndra Choiri Hadiyani

Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Pertanian, Universitas Tidar, Jl. Kapten Suparman No. 39, Potrobangsari, Kec. Magelang Utara, Kota Magelang, Jawa Tengah.

Telepon: (0293) 364113, Kode Pos: 56116, Indonesia.

¹E-mail korespondensi: sherinayusekaradisti@students.untidar.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan kemasan pelindung Expanded Polystyrene (styrofoam) secara masif memicu krisis lingkungan akibat sifatnya yang tidak dapat terurai secara alami dan ketergantungannya pada petrokimia. Mycelium-Based Composite (MBC) hadir sebagai inovasi material hijau alternatif yang memanfaatkan miselium jamur untuk mengikat limbah lignoselulosa. Kajian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh jenis jamur dan substrat terhadap karakteristik fisik-mekanik MBC, serta menentukan formulasi paling optimal sebagai pengganti styrofoam. Metode yang digunakan adalah Critical Narrative Review dengan mengumpulkan data literatur ilmiah global mengenai kinerja mekanis, formulasi bioproses, dan aspek keberlanjutan MBC. Hasil kajian menunjukkan bahwa Formulasi A1 yang mengombinasikan jamur tiram (*Pleurotus ostreatus*) dengan substrat serbuk gergaji dan sabut kelapa (rasio 3:2) merupakan resep paling optimal dan seimbang. Formulasi ini menghasilkan kuat tekan mencapai 0,432 MPa (lima kali lebih kuat dari styrofoam) dan indeks ketahanan api (LOI) > 21%. Meskipun memiliki kelemahan pada daya serap air yang tinggi (120–185%), stabilitas fisiknya tetap terjaga dan dapat ditingkatkan melalui teknik kempa panas. Berdasarkan analisis siklus hidup (LCA), produksi MBC mampu mereduksi emisi karbon hingga 57% dan dapat terurai sempurna di tanah dalam waktu 2 hingga 6 minggu tanpa meninggalkan residu berakik. Kesimpulannya, MBC dengan formulasi *Pleurotus ostreatus* berbasis limbah serbuk gergaji dan sabut kelapa memiliki potensi regulasi yang sangat layak dan kompetitif untuk menggantikan kemasan plastik sintetis demi mendukung ekonomi sirkular.

Kata Kunci: *Expanded Polystyrene*, kemasan berkelanjutan, limbah lignoselulosa, *Mycelium-Based Composite*, *Pleurotus ostreatus*

ABSTRACT

The massive use of Expanded Polystyrene (styrofoam) protective packaging triggers a severe environmental crisis due to its non-biodegradable nature and reliance

on petrochemicals. Mycelium-Based Composite (MBC) emerges as an innovative green material that utilizes fungal mycelium to bind lignocellulosic waste. This study aims to evaluate the effects of fungal species and substrates on the physical-mechanical properties of MBC, and to determine the most optimal formulation to replace styrofoam. The method employed was a Critical Narrative Review, compiling data from global scientific literature regarding mechanical performance, bioprocess formulation, and MBC sustainability. The results indicate that Formulation A1, which combines the white-rot fungus *Pleurotus ostreatus* with a substrate of sawdust and coconut coir (3:2 ratio), is the most optimal and balanced recipe. This formulation achieves a compressive strength of 0.432 MPa (five times stronger than styrofoam) and a Limiting Oxygen Index (LOI) > 21%. Despite its drawback in high water absorption (120–185%), its physical shape remains intact and can be further enhanced via hot-pressing. Based on Life Cycle Assessment (LCA), MBC production reduces carbon emissions by up to 57% and fully biodegrades in soil within 2 to 6 weeks without toxic residues. In conclusion, MBC formulated with *Pleurotus ostreatus* on sawdust and coconut coir waste possesses highly viable and competitive properties to replace synthetic plastic packaging in supporting a circular economy.

Keywords: Expanded Polystyrene, lignocellulosic waste, Mycelium-Based Composite, *Pleurotus ostreatus*, sustainable packaging.

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perkembangan industri logistik, manufaktur, dan e-commerce telah meningkatkan penggunaan kemasan pelindung berbasis *Expanded Polystyrene* (EPS) atau styrofoam secara signifikan. Material ini banyak digunakan karena memiliki bobot yang ringan, harga relatif murah, serta kemampuan meredam benturan yang baik sehingga mampu melindungi produk selama proses distribusi. Meskipun demikian, penggunaan styrofoam secara masif menimbulkan permasalahan lingkungan yang serius karena material tersebut sulit terurai secara alami. Limbah styrofoam dapat bertahan dalam lingkungan selama waktu yang sangat lama dan akan terfragmentasi menjadi partikel-partikel berukuran kecil yang berkontribusi terhadap pencemaran mikroplastik di tanah maupun perairan. Selain itu, produksi styrofoam masih bergantung pada bahan baku berbasis petrokimia yang tidak terbarukan dan memerlukan konsumsi energi yang tinggi sehingga turut meningkatkan emisi gas rumah kaca serta memperburuk dampak perubahan iklim global (Pohan *et al.*, 2023).

Meningkatnya kesadaran terhadap isu lingkungan mendorong pencarian material alternatif yang lebih berkelanjutan untuk menggantikan plastik sintetis. Salah satu inovasi yang berkembang dalam beberapa tahun terakhir adalah *Mycelium Based Composite* (MBC), yaitu material komposit yang memanfaatkan kemampuan miselium jamur sebagai perekat biologis alami. Material ini dibuat dengan memanfaatkan limbah lignoselulosa, seperti serbuk gergaji, sekam padi, jerami, tongkol jagung, dan berbagai residu pertanian lainnya sebagai substrat pertumbuhan jamur. Selama proses pertumbuhan, jaringan hifa jamur akan mengkolonisasi dan mengikat partikel-partikel substrat sehingga membentuk struktur komposit yang kokoh, ringan, dan dapat terurai secara alami. Pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan baku tidak hanya mengurangi volume limbah organik yang tidak termanfaatkan,

tetapi juga memberikan nilai tambah melalui pengembangan produk ramah lingkungan yang mendukung konsep ekonomi sirkular (Putri *et al.*, 2024).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa MBC memiliki potensi besar sebagai pengganti styrofoam karena mampu menghasilkan karakteristik fisik dan mekanik yang sesuai untuk aplikasi kemasan pelindung. Beberapa spesies jamur, seperti *Pleurotus ostreatus*, dan *Trametes spp.*, telah dilaporkan mampu membentuk komposit dengan kemampuan menyerap benturan, densitas rendah, serta sifat isolasi termal yang baik. Namun demikian, kualitas komposit yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh jenis jamur dan bahan baku lignoselulosa yang digunakan. Perbedaan kombinasi kedua komponen tersebut dapat menghasilkan karakteristik yang berbeda dalam hal kekuatan tekan, daya serap energi, porositas, maupun ketahanan terhadap kondisi lingkungan. Oleh karena itu, pemilihan kombinasi jamur dan substrat yang tepat menjadi faktor penting dalam menghasilkan material komposit yang mampu menyaingi bahkan menggantikan performa styrofoam konvensional (Jiménez-Obando *et al.*, 2025).

Perkembangan penelitian mengenai MBC saat ini telah banyak berfokus pada pengujian sifat fisik, mekanik, termal, dan biodegradabilitas material yang dihasilkan. Berbagai studi menunjukkan bahwa setiap spesies jamur memiliki kemampuan kolonisasi yang berbeda pada jenis substrat tertentu sehingga menghasilkan performa komposit yang beragam. Selain itu, karakteristik limbah lignoselulosa yang digunakan juga memengaruhi struktur internal dan kualitas akhir material. Meskipun penelitian terkait MBC telah berkembang pesat, hasil yang diperoleh masih menunjukkan variasi yang cukup besar sehingga belum terdapat kesepakatan mengenai kombinasi jamur dan substrat yang paling optimal untuk aplikasi kemasan pelindung. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya kajian yang lebih komprehensif untuk membandingkan berbagai formulasi MBC yang telah dikembangkan dan mengevaluasi potensinya sebagai alternatif pengganti styrofoam.

Berdasarkan kondisi tersebut, kebaruan dalam kajian ini terletak pada upaya mengevaluasi dan membandingkan berbagai kombinasi spesies jamur dan substrat lignoselulosa sebagai suatu “resep” pembentuk MBC yang paling potensial untuk aplikasi kemasan berkelanjutan. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya hanya berfokus pada satu jenis jamur atau satu jenis substrat, kajian ini mengintegrasikan berbagai hasil penelitian untuk mengidentifikasi kombinasi bahan yang mampu menghasilkan karakteristik paling mendekati atau bahkan melampaui performa styrofoam. Dengan demikian, kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai arah pengembangan material kemasan ramah lingkungan berbasis miselium pada masa mendatang.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, permasalahan yang dibahas dalam kajian ini adalah bagaimana dampak penggunaan styrofoam terhadap lingkungan dan mengapa diperlukan material alternatif yang lebih berkelanjutan. Selain itu, perlu dikaji sejauh mana potensi *Mycelium Based Composite* (MBC) sebagai pengganti styrofoam serta bagaimana pengaruh kombinasi spesies jamur dan bahan baku lignoselulosa terhadap karakteristik material yang dihasilkan. Kajian ini juga berupaya mengidentifikasi kombinasi jamur dan substrat yang paling potensial untuk menghasilkan MBC dengan sifat fisik dan mekanik yang sesuai sebagai material kemasan pelindung.

C. Maksud dan Tujuan

Maksud dari penulisan ini adalah mengkaji potensi Mycelium-Based Composite (MBC) sebagai material kemasan ramah lingkungan yang dapat menggantikan styrofoam melalui analisis berbagai hasil penelitian yang telah dipublikasikan. Adapun tujuan penulisan ini adalah mengevaluasi pengaruh jenis jamur dan bahan baku lignoselulosa terhadap karakteristik MBC yang dihasilkan, membandingkan berbagai formulasi yang telah dikembangkan, serta menentukan kombinasi bahan yang paling potensial untuk menghasilkan material kemasan berkelanjutan dengan performa yang kompetitif terhadap kemasan sintesis berbasis polystyrene.

D. Manfaat Penulisan

Kajian ini diharapkan dapat memberikan manfaat secara akademis maupun praktis. Secara akademis, penulisan ini dapat menjadi sumber referensi ilmiah mengenai perkembangan penelitian biomaterial berbasis miselium serta menjadi dasar bagi penelitian lanjutan terkait optimasi komposit miselium. Secara praktis, hasil kajian dapat menjadi bahan pertimbangan bagi industri kemasan, logistik, dan manufaktur dalam mengembangkan material alternatif yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, pemanfaatan limbah lignoselulosa sebagai bahan baku MBC diharapkan dapat mendukung pengurangan limbah pertanian, mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku petrokimia, serta mendorong penerapan ekonomi sirkular dan pembangunan industri yang lebih berkelanjutan.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Critical Narrative Review* (Tinjauan Naratif Kritis). Metode ini dipilih karena data penelitian mengenai komposit miselium jamur sebagai material alternatif pengganti styrofoam yang dipublikasikan di berbagai belahan dunia menunjukkan variasi yang sangat tinggi, baik dari segi formulasi bioproses, jenis substrat yang digunakan, spesies jamur, maupun parameter pengujian kinerja mekanis. Variasi tersebut menuntut pendekatan analisis yang fleksibel dalam merangkum berbagai temuan, namun tetap kritis dalam menilai validitas, konsistensi, dan relevansi data antar studi.

Teknik pengumpulan data dalam review ini dilakukan melalui studi literatur, yaitu dengan menelusuri dan mengkaji artikel-artikel ilmiah yang relevan dengan topik optimasi bioproses komposit miselium jamur, formulasi material, kinerja mekanis, dan aspek keberlanjutannya sebagai alternatif material hijau.

Unit analisis dalam review ini berfokus pada data teknis yang meliputi nilai kekuatan mekanis komposit miselium (seperti kuat tekan, kuat lentur, atau ketahanan terhadap beban), jenis substrat organik yang digunakan sebagai bahan baku (antara lain jerami dan serbuk kayu), serta jenis jamur pelapuk putih (*white-rot fungi*) yang berperan dalam proses pertumbuhan miselium dan pembentukan struktur komposit. Ketiga aspek ini menjadi titik fokus dalam mengevaluasi sejauh mana komposit miselium jamur dapat menjadi alternatif material hijau yang kompetitif dibandingkan styrofoam, baik dari sisi performa mekanis maupun keberlanjutan lingkungannya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Seleksi Jamur (Mikologi) dan Titik Kritis Formulasi

Jenis jamur merupakan faktor utama yang menentukan kualitas kemasan berbasis miselium (*Mycelium-Based Composites* / MBC) karena setiap spesies memiliki karakteristik biologis yang berbeda dalam kemampuan kolonisasi, degradasi lignin, dan pembentukan jaringan hifa. Berdasarkan hasil review terhadap berbagai penelitian, kelompok *white-rot fungi* (jamur pelapuk putih) mendominasi pengembangan material kemasan ekologis ini. Kelompok jamur ini mampu menghasilkan enzim ligninase ekstraseluler yang sangat efektif dalam mendegradasi substrat lignoselulosa kasar dan mengonversinya menjadi jaringan pengikat polimer alami (*bio-binder*).

Trametes multicolor (dan *Trametes versicolor*, termasuk strain BS7) merupakan spesies yang paling banyak digunakan dalam aplikasi struktural karena mampu menghasilkan jaringan miselium yang sangat padat, tebal, dan homogen. Elsacker *et al.* (2019) menunjukkan bahwa jamur ini memiliki kemampuan superior untuk mengkolonisasi substrat berserat tebal seperti rami (*hemp*), flaks (*flax*), dan jerami (*straw*) secara optimal sehingga menghasilkan material dengan karakteristik mekanik yang baik. Temuan serupa dilaporkan oleh Daâssi *et al.* (2025), di mana strain *T. versicolor* BS7 menghasilkan jaringan miselium permukaan yang jauh lebih rapat dibandingkan strain lainnya saat ditumbuhkan pada substrat dengan kombinasi ampas kopi dan serbuk gergaji kayu. Hal ini dipicu oleh kecocokan nutrisi serta tingginya efisiensi sekresi enzim *laccase* jamur untuk memutus ikatan lignin keras, yang kemudian mentransformasikannya menjadi anyaman hifa tipe dimitik/trimitik yang sangat kaku, kokoh, dan tahan terhadap degradasi termal.

Sebaliknya, spesies *Pleurotus ostreatus* (jamur tiram putih) dan *Coprinus comatus* seperti yang digunakan dalam studi oleh Houette *et al.* (2022) menunjukkan keunggulan pada laju pertumbuhan yang adaptif serta kemampuan kolonisasi awal yang sangat baik pada media cetakan. *Pleurotus ostreatus* didukung oleh karakteristik hifa monomitik yang tumbuh secara agresif, sehingga mampu menutup penuh permukaan substrat seperti serbuk gergaji murni dan kenaf dalam kurun waktu singkat, yaitu antara 8 hingga 20 hari (Rahma Yanti & Asfar, 2026; Ahmad Farrahnoor *et al.*, 2025). Namun, karena dinding sel hifa monomitik cenderung lebih tipis dan menghasilkan struktur internal yang bersifat *porous* (berpori), kekuatan mekanik murni material yang dihasilkan dari kedua jamur ini masih berada pada tingkat sedang. Oleh karena itu, performa akhir dari komposit berbasis *Pleurotus ostreatus* dan *Coprinus comatus* sangat dipengaruhi oleh variabel perlakuan pasca-produksi (*post-treatment*), seperti optimasi pemadatan kempa (*pressing*) dan suhu pemanggangan di dalam oven untuk mematikan pertumbuhan biologis sekaligus mengeraskan matriks struktural kemasan (Houette *et al.*, 2022; Sivaprasad *et al.*, 2021).

Sementara itu, peninjauan terhadap strain spesifik *Abortiporus biennis* yang dilaporkan oleh Balaeş *et al.*, (2023) memberikan alternatif solusi yang menjanjikan untuk mengatasi kelemahan penyerapan air pada kemasan organik. Spesies ini memiliki karakteristik pertumbuhan permukaan yang luar biasa aktif, yang memungkinkannya membentuk lapisan kulit miselium (*fungus skin*) yang jauh lebih kompak dan padat pada campuran limbah kayu mentah. Struktur luarnya yang rapat memberikan sifat hidrofobik yang lebih baik, sehingga *Abortiporus biennis* memiliki potensi tinggi untuk digunakan sebagai material kemasan khusus yang memerlukan ketahanan ekstra terhadap kelembapan udara lingkungan sekitar.

Titik kritis pertama dalam keberhasilan produksi *Mycelium-Based Composites* (MBC) adalah pemilihan spesies jamur (*strain*). Komposisi biologis jalinan serat hifa jamur menentukan efisiensi penetrasinya dalam mencerna matriks lignoselulosa serta kekuatan mekanis struktural akhir dari komposit kemasan yang dihasilkan. Berdasarkan literatur yang dianalisis, spesies *Trametes versicolor* (atau sering diklasifikasikan sebagai *Trametes multicolor*) memiliki karakteristik sistem hifa kaku (dimitik/trimitik) serta kemampuan sekresi enzim pelapuk putih (*white-rot enzymes*) seperti laccase dan peroksidase yang sangat kuat. Enzim ini secara aktif mendegradasi komponen lignin kompleks pada substrat keras seperti Tandan Kosong Kelapa Sawit (EFB) dan ampas kopi secara optimal. Proses biokimia ini menghasilkan anyaman biopolimer alami yang sangat padat, memiliki densitas tinggi, serta sifat impermeabilitas yang baik terhadap air (Elsacker *et al.*, 2019; Daâssi *et al.*, 2025).

Tabel 1. Matriks Kombinasi Spesies Jamur dan Karakteristik Substrat terhadap Performa Kemasan Miselium

Spesies Jamur	Karakteristik Substrat / Bahan Baku	Interaksi Mikrostruktur Jalinan	Karakteristik Fisik Akhir Kemasan
<i>Pleurotus ostreatus</i> (<i>Hifa Monomitik</i>)	Partikel Halus (Serbuk Gergaji Kayu Murni)	Porositas mikro terbentuk sangat rapat (0,75 µm). Hifa tipis mampu mengunci celah kecil dengan homogen.	Struktur padat, keras, permukaan kompak dan tidak mudah rontok, namun rentan retak jika dehidrasi berlebih.
<i>Pleurotus ostreatus</i> (<i>Hifa Monomitik</i>)	Serat Pendek + Nutrisi (Kenaf + Dedak Gandum)	Kolonisasi miselium permukaan berjalan sangat cepat, membentuk jaringan luar yang rapat.	Bobot ringan, memiliki fase empuk seperti busa (<i>foam-like</i>), ideal untuk kemasan pelindung benturan.
<i>Trametes versicolor</i> (<i>Hifa Dimitik/Trimitik</i>)	Serat Panjang Mentah (Biomassa Rami / <i>Industrial Hemp</i>)	Jalinan hifa tebal dan kaku mengunci serat rami panjang tanpa perlu proses pemisahan serat (<i>minimally processed</i>).	Kerapatan mekanis tinggi, elastisitas baik, memotong biaya logistik tanpa menurunkan kekuatan penahan beban.
<i>Trametes versicolor</i> BS7 (<i>Hifa Dimitik/Trimitik</i>)	Partikel Kompak Ber-Nitrogen (Ampas Kopi + Serbuk Gergaji)	Sekresi enzim pelapuk putih mengurai lignin secara agresif. Jaringan hifa tumbuh super lebat karena pasokan nitrogen kopi.	Densitas tinggi (0,580 g/cm ³) dengan stabilitas termal ekstrem (menahan panas hingga 601,23°C).
<i>Abortiporus biennis</i> (<i>Strain Agresif</i>)	Campuran Serat Kasar (Limbah Kayu + Seresah Daun)	Pertumbuhan luar biasa aktif di bagian luar substrat, membentuk lapisan kulit miselium (<i>fungal skin</i>) yang tebal.	Nilai impermeabilitas (ketahanan air) tinggi dan memberikan proteksi mekanis permukaan yang baik.

B. Bahan Baku (Substrat Lignoselulosa)

Komposisi fisik, geometri, serta jenis konstituen kimia dari bahan baku sisa agrikultur (*agrowaste*) memegang peranan utama sebagai cetakan kerangka mekanis pada komposit miselium. Kompilasi data dari rangkaian literatur membuktikan bahwa karakteristik performa fisik komposit terbagi secara kontras menjadi dua kategori fungsional yang berbeda berdasarkan jenis komoditas limbah yang digunakan:

1. Matriks Partikel Halus (Serbuk Gergaji Kayu Murni dan Ampas Kopi)

Karakteristik partikel yang berukuran kecil dan bertekstur bubuk halus seperti yang diterapkan pada kode sampel A1, A2, dan campuran ampas kopi terbukti menghasilkan material dengan struktur porositas mikro yang sangat rapat hingga mencapai ukuran 0,75 μm . Geometri partikel yang halus ini memudahkan hifa generatif jamur untuk melakukan penetrasi dan mengikat sela-sela terkecil secara efisien (Rahma Yanti & Asfar, 2026). Selain itu, tingginya kandungan komponen *lignin* alami pada serbuk kayu keras memberikan kontribusi terhadap kekakuan struktural intrinsik. Akibatnya, pasca-proses pengeringan, komposit mengalami pemadatan yang optimal, menjadi lebih keras, kokoh, serta memiliki ketahanan permukaan yang baik sehingga tidak mudah rontok.

2. Matriks Serat Panjang dan Ringan (Jerami Wheat, Kenaf, Serat EFB Sawit, dan Rami)

Karakteristik substrat pada kode sampel A3, B1, B2, dan B3 didominasi oleh struktur anyaman berserat panjang dengan kandungan selulosa yang melimpah. Jalinan serat yang tidak beraturan ini menciptakan struktur dengan densitas rendah, bobot ringan, dan menyisakan banyak kantung udara internal (pori makro) di dalam komposit. Karakteristik makro-pori berongga ini memberikan fungsi mekanis sekunder yang sangat bernilai, yaitu bertindak sebagai insulator termal (menahan rambatan suhu) dan penyerap gelombang suara akustik (Sivaprasad *et al.*, 2021; Elsacker *et al.*, 2019). Keberhasilan penggunaan rami industri mentah (*minimally processed hemp*) tanpa pemisahan komponen kulit (*bast*) dan batang (*hurd*) juga membuktikan bahwa serat panjang mentah sangat potensial menekan biaya manufaktur logistik tanpa menurunkan reliabilitas penahan beban struktural (Bhaskar *et al.*, 2026)

Tabel 2. Formulasi A *Pleurotus ostreatus* (Jamur Tiram)

Formulasi	Komposisi Substrat	Suhu Tumbuh & RH	Suhu Oven & Durasi	Lama Inkubasi
A1	Serbuk gergaji + Sabut kelapa (Rasio 3:2)	27–30 °C, RH 80%	140 °C, 20 menit	14 hari
A2	Serbuk gergaji halus (100%)	24–27 °C, RH 80%	Suhu ruang / rendah	8–10 hari
A3	Kenaf + Dedak gandum + CaCO ₃ (80:19:1)	23 °C, RH 60%	60 °C, 24 jam	20 hari

Tabel 3. Formulasi B *Trametes multicolor* (Jamur Bracket)

Formula si	Komposisi Substrat	Suhu Tumbuh & RH	Suhu Oven & Durasi	Lama Inkubasi
B1	EFB — Tandan Kosong Kelapa Sawit (100% serat EFB, lignin tinggi, pori besar)	23 °C, RH 60%	60 °C, 24 jam (optimal)	20 hari
B2	Jerami gandum (100% jerami, struktur ringan berpori)	24 °C, RH 75–80%	100 °C, 45 menit	28 hari
B3	Kenaf (tunggal) (100% serat kenaf, selulosa tinggi, rapat)	23 °C, RH 60%	60 °C, 24 jam	20 hari

Berdasarkan hasil dari Formulasi A1: *Pleurotus ostreatus* dengan komposisi Serbuk Gergaji : Sabut Kelapa = 3 : 2 adalah kombinasi paling optimal, paling teruji, dan paling seimbang. Penelitian Sivaprasad dkk. (2021) menegaskan bahwa rasio ini dipilih melalui uji coba, di mana serbuk gergaji berfungsi sebagai sumber nutrisi utama yang mempercepat pertumbuhan miselium, sedangkan sabut kelapa yang kaya akan lignin berperan sebagai penguat struktur sekaligus memperpanjang masa simpan material hingga 67 hari, karena lignin sulit diuraikan oleh mikroorganisme alami. Pada kondisi suhu tumbuh 27–30 °C dan kelembapan 80%, jamur ini tumbuh sangat subur dan cepat, mampu membentuk ikatan serat yang sangat padat dalam waktu 14 hari, dan proses pengeringan pada suhu 140 °C selama 20 menit terbukti efektif menghentikan pertumbuhan sekaligus menghasilkan material dengan kekuatan tekan mencapai 0,432 MPa lima kali lebih kuat dibandingkan Styrofoam serta memiliki sifat tahan api alami dengan nilai Indeks Oksigen Batas (LOI) > 21% yang membuatnya tidak mudah merambatkan api (Sivaprasad *et al.*, 2021).

Formulasi lain seperti A2 yang hanya menggunakan serbuk gergaji murni namun memiliki masa simpan lebih pendek karena kurangnya kandungan lignin (Jose *et al.*, 2021), atau formulasi B1–B3 dengan jamur *Trametes multicolor* yang meski kuat namun tumbuh lebih lambat dan butuh kondisi lingkungan lebih ketat (Elsacker *et al.*, 2019; Appels *et al.*, 2019), Formulasi A1 menawarkan keseimbangan terbaik antara kemudahan produksi, kecepatan pertumbuhan, kekuatan mekanis, dan ketersediaan bahan baku murah dan melimpah. Hasil uji juga menegaskan bahwa material ini memiliki kemampuan penyerapan suara rata-rata 0,2275 yang jauh lebih baik dibandingkan EPS, tetap mempertahankan bentuk fisik meskipun menyerap air, dan sepenuhnya terurai secara alami dalam waktu singkat, menjadikannya alternatif paling layak dan unggul untuk menggantikan bahan kemasan berbasis plastik sintetis (Sivaprasad *et al.*, 2021; Sağlam & Özgünler, 2022).

Selain itu, kombinasi ini juga sesuai dengan prinsip dasar yang dikemukakan dalam berbagai tinjauan literatur, di mana bahan berkayu seperti serbuk gergaji menghasilkan material padat dan kuat, sedangkan penambahan serat keras seperti sabut kelapa meningkatkan stabilitas termal dan ketahanan biologis (Elsacker *et al.*, 2020). Secara keseluruhan, Formulasi A1 memenuhi semua kriteria utama: mudah dikembangkan dengan *Pleurotus ostreatus* yang fleksibel terhadap suhu, menggunakan limbah pertanian yang melimpah, memiliki performa mekanis unggul, aman dari bahaya kebakaran, dan memberikan dampak lingkungan positif dengan pengurangan emisi karbon hingga 57% serta kemampuan dikomposkan dalam beberapa minggu (Jones *et al.*, 2017).

Berikut adalah pembahasan lengkap, lugas, dan dikutip langsung sesuai data penelitian dari dokumen yang ada, disusun dalam paragraf yang jelas:

C. Proses Produksi (Bioprocess)

Pembuatan komposit miselium dilakukan melalui metode fermentasi padat (*Solid-State Fermentation*), di mana substrat limbah lignoselulosa disterilisasi, dicampur bibit jamur, dan dikembangkan dalam kondisi lingkungan terkontrol. Menurut Sivaprasad dkk. (2021), kondisi suhu tumbuh paling efektif untuk formulasi serbuk gergaji dan sabut kelapa adalah 27–30 °C dengan kelembapan 80%, di mana *Pleurotus ostreatus* tumbuh sangat subur, cepat, dan membentuk ikatan serat paling padat serta kuat. Hal ini sejalan dengan Jose dkk. (2021) yang menyatakan rentang suhu 24–27 °C adalah batas ideal; suhu di bawah 24 °C menghambat pertumbuhan, sedangkan di atas 30 °C berisiko merusak sel jamur dan meningkatkan kontaminasi.

Selain *Pleurotus ostreatus*, jenis jamur lain yang juga digunakan dan diuji dalam berbagai penelitian meliputi *Trametes multicolor* / *Trametes versicolor*, *Ganoderma lucidum*, *Fomes fomentarius*, serta variasi lain seperti *Pleurotus cystidiosus*, *Lentinula edodes*, dan *Schizophyllum commune*. Dari semua jenis yang diuji, *Trametes multicolor* juga memiliki kinerja sangat baik, mampu menghasilkan ikatan serat yang sangat kuat dan lebih tahan terhadap kelembapan serta perubahan suhu, namun jenis ini tumbuh jauh lebih lambat dan membutuhkan pengaturan kondisi lingkungan yang lebih ketat serta sulit dibandingkan *Pleurotus ostreatus* (Elsacker *et al.*, 2019; Appels *et al.*, 2019). Jenis *Ganoderma* menghasilkan material paling keras dan kaku seperti kayu, sangat cocok untuk aplikasi struktural, namun waktu tumbuhnya sangat lama dan biaya produksi lebih tinggi (Elsacker *et al.*, 2020). *Fomes fomentarius* memiliki daya tahan biologis tinggi namun pertumbuhannya sangat lambat (Jones *et al.*, 2017). Oleh karena itu, dari berbagai jenis jamur yang telah diuji coba, jenis *Pleurotus ostreatus* adalah yang paling umum digunakan dan menjadi pilihan utama karena memiliki fleksibilitas tinggi, toleransi suhu yang lebih luas, mudah dikembangkan, ketersediaan bibit melimpah, serta memberikan keseimbangan terbaik antara kecepatan pertumbuhan, kemudahan budidaya, dan kekuatan mekanis material akhir yang paling sesuai untuk pengganti *Styrofoam* (Sivaprasad *et al.*, 2021; Elsacker *et al.*, 2020).

Setelah inkubasi berlangsung selama 14 hari dan miselium telah mengisi seluruh substrat hingga membentuk struktur utuh, pertumbuhan dihentikan melalui proses pengovenan untuk mematikan aktivitas biologis dan menstabilkan bentuk material. Sivaprasad dkk. (2021) menerapkan suhu 140 °C selama 20 menit, yang terbukti efektif mengurangi kadar air hingga di bawah 10%, menghasilkan material dengan kekuatan mekanis serta masa simpan tertinggi hingga 67 hari. Farrahnoor dkk. (2025) menegaskan suhu 60 °C selama 24 jam adalah kondisi paling aman dan seimbang, karena pada suhu ini struktur hifa tetap utuh dan ikatan antar serat tidak rusak, sedangkan penggunaan suhu di atas 80 °C justru membuat material menjadi getas dan rapuh.

D. Performa vs Styrofoam

Komposit miselium memiliki keunggulan signifikan dibandingkan *Styrofoam* (EPS) pada aspek kekuatan mekanis dan ketahanan api, meskipun memiliki kelemahan pada daya serap air. Menurut Sivaprasad dkk. (2021) komposit miselium memiliki kekuatan tekan rata-rata 0,432 MPa, nilai ini 5 kali lebih tinggi dibandingkan EPS yang hanya sekitar 0,009 MPa, sehingga mampu menahan beban jauh lebih besar dan memungkinkan pengurangan ketebalan material saat digunakan untuk kemasan. Dari segi keamanan kebakaran, Sivaprasad dkk. (2021) juga membuktikan bahwa komposit miselium memiliki Indeks Oksigen Batas (LOI) > 21%, yang berarti bersifat memadamkan sendiri dan tidak merambatkan api, berbeda dengan EPS yang memiliki LOI hanya 19%, mudah terbakar, meleleh, dan meneteskan bahan

berbahaya. Hal ini didukung oleh Jose dkk. (2021) yang dalam uji pembakaran menemukan bahwa komposit miselium melepaskan partikel debu ($153,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dan gas beracun seperti nitrogen dioksida ($43,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) jauh lebih sedikit dibandingkan EPS (masing-masing $1643,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $89,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sehingga jauh lebih aman bagi kesehatan dan lingkungan.

Namun, kelemahan utama material ini tercatat pada uji penyerapan air oleh Sivaprasad dkk. (2021), di mana komposit mampu menyerap air sebanyak 120–185% dari beratnya, jauh lebih tinggi dibandingkan EPS yang hampir tidak menyerap air, meskipun bentuk fisik material tetap utuh dan tidak hancur. Appels dkk. (2019) dan Elsacker dkk. (2020) menyarankan kelemahan ini dapat diatasi dengan teknik pengepresan panas atau pemberian pelapis alami untuk menutup pori-pori permukaan, sehingga daya serap air dapat diturunkan hingga di bawah 30% tanpa mengurangi sifat unggul lainnya.

E. Dampak Lingkungan (LCA)

Ditinjau dari aspek lingkungan dan analisis siklus hidup, komposit miselium terbukti menjadi alternatif yang sangat ramah lingkungan dan berkelanjutan dibandingkan Styrofoam. Attias dkk. (2020) menyatakan bahwa penggunaan komposit miselium mampu mengurangi dampak pemanasan global hingga ~57% jika dibandingkan dengan produksi dan pembuangan EPS, karena bahan baku utamanya berasal dari limbah pertanian dan kehutanan yang terbarukan, proses produksi membutuhkan energi jauh lebih rendah, serta tidak melibatkan bahan bakar fosil maupun zat kimia berbahaya.

Sivaprasad dkk. (2021) mengonfirmasi sifat terurai sempurna material ini, mencatat bahwa komposit miselium sepenuhnya terbiodegradasi dan dapat dikomposkan di tanah dalam waktu hanya 2 hari hingga 4-6 minggu, terurai menjadi unsur hara alami tanpa meninggalkan residu beracun atau mikroplastik, berbeda dengan EPS yang membutuhkan waktu lebih dari 500 tahun untuk terurai dan menjadi pencemar tanah serta air dalam jangka panjang. Selain itu, Jones dkk. (2017) dan Elsacker dkk. (2020) menjelaskan bahwa penerapan material ini membantu mengubah limbah pertanian bernilai rendah menjadi produk bernilai tambah tinggi, sekaligus menutup siklus ekonomi sirkular di mana sisa produksi atau material bekas pakai dapat dikembalikan ke tanah sebagai pupuk alami, sehingga memberikan kontribusi nyata dalam pengurangan limbah dan emisi gas rumah kaca.

KESIMPULAN

Kajian ini menetapkan bahwa *Mycelium-Based Composite* (MBC) dari kombinasi *Pleurotus ostreatus* dengan substrat serbuk gergaji dan sabut kelapa (rasio 3:2) adalah formulasi paling optimal untuk menggantikan *styrofoam*. Kebaruan konseptualnya terletak pada sintesis interaksi mikrostruktur hifa monomitik dan substrat kaya lignin menjadi sebuah standar formulasi baru yang terbukti berkinerja mekanis superior, yakni memiliki kuat tekan 0,432 MPa (lima kali lipat *styrofoam*) dan tahan api (LOI > 21%). Gagasan ini menawarkan solusi ekonomi sirkular komprehensif yang mampu memangkas emisi karbon 57% dan terurai alami dalam 2-6 minggu, mempromosikan transisi industri logistik menuju pengemasan generatif tanpa limbah mikroplastik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ibu Nabila Faradina Iskandar, S.T.P., M.Sc., selaku dosen pembimbing, atas dedikasi waktu, arahan dan diskusi yang diberikan selama proses penyusunan kajian ilmiah ini. Dukungan dari beliau sangat berperan penting dalam membantu perumusan gagasan hingga penyelesaian penelitian mengenai komposit miselium ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan moral maupun materiil sehingga karya tulis ini dapat terwujud dan diharapkan mampu berkontribusi nyata pada pengembangan material berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, F., Noor Hishamuddini, A. D., Yusoff, H., Hyie, K. M., Che Maideen, N., Mohd Fohimi, N. A., & Zhou, B. T. (2025). *Influence of drying temperature in the oven on physical, morphology and mechanical properties of mycelium composite*. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 33(1), 219–240. <https://doi.org/10.47836/pjst.33.1.10>
- Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P., & Wösten, H. A. B. (2019). *Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites*. *Materials & Design*, 161, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>
- Balaes, T., Radu, B.-M., & Tănase, C. (2023). *Mycelium-composite materials—A promising alternative to plastics?* *Journal of Fungi*, 9(2), 210. <https://doi.org/10.3390/jof9020210>
- Bhaskar, R., Rutledge, T., Trangone, K., & Latimore, O. (2026). *Mycelium-based composites using minimally processed industrial hemp biomass: Impact of species and feedstock ratio on mechanical performance compared to polystyrene packaging*. *Polymers*, 18(3), 400. <https://doi.org/10.3390/polym18030400>
- Daâssi, D., Alhumairi, A. M., Mellah, B., Fdhil, N., Baccar, N., & Chamkha, M. (2025). *Physico-mechanical, thermal, and biodegradation performance of mycelium biocomposites derived from residual agrowastes*. *Polymer Bulletin*, 82, 11295–11321. <https://doi.org/10.1007/s00289-025-05978-y>
- Elsacker, E., Vandeloek, S., Brancart, J., Peeters, E., & De Laet, L. (2019). *Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates*. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/569749>
- Houette, T., Maurer, C., Niewiarowski, R., & Gruber, P. (2022). *Growth and mechanical characterization of mycelium-based composites towards future bioremediation and food production in the material manufacturing cycle*. *Biomimetics*, 7(3), 103. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7030103>
- Jiménez-Obando, N., Pineda-Gómez, P., Salazar-Melo, J. A., & Velásquez-Cock, J. A. (2025). *Mycelium-based composites as sustainable alternatives to expanded polystyrene: A review of production, properties, and applications*. *Journal of Materials Research and Technology*, 35, 2201–2225. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.123>

- Jose, J., Uvais, K. N., Sreenadh, T. S., Deepak, A. V., & Rejeesh, C. R. (2021). *Investigations into the development of a mycelium biocomposite to substitute polystyrene in packaging applications*. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46, 2975–2984. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05247-2>
- Rasid, H. A. A., Yusoff, H., Hyie, K. M., Hazwani, F., Izmin, A., Zhou, B. T., & Ahmad, F. (2026). *Evaluation of drying times in natural fiber-based mycelium composites from empty fruit bunches and kenaf*. *Fibers*, 14(1), 7. <https://doi.org/10.3390/fib14010007>
- Sağlam, S. S., & Özgünler, S. A. (2022). *An experimental study on production opportunities of biocomposite by using fungal mycelium*. *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning*, 3(2), 237–260. <https://doi.org/10.47818/DRArch.2022.v3i2056>
- Sivaprasad, S., Byju, S. K., Prajith, C., Shaju, J., & Rejeesh, C. R. (2021). *Development of a novel mycelium bio-composite material to substitute for polystyrene in packaging applications*. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5032–5037. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04>.*** (sesuaikan nomor DOI lengkap pada artikel asli)
- Yanti, R. T., & Asfar, M. (2025). *Karakterisasi miselium jamur sebagai alternatif komposit kemasan berbasis ekologis*. *Buletin LOUPE (Laporan Umum Penelitian)*, 21(1), 40–48.