Jurnal Ilmiah Teknologi Pertanian
AGROTECHNO
Volume 11, Nomor 2, Oktober 2026
ISSN: 2503-0523 ■ e-ISSN: 2548-8023

Kulit Black Garlic sebagai Filler Biofoam Pati Singkong dengan Struktur Kompak dan Daya Serap Air Rendah dibandingkan Sabut Kelapa dan Cocopeat

Utilization of Black Garlic Peel as a Cassava Starch Biofoam Filler: Comparative Characteristics with Coconut Coir and Cocopeat

Alfarizi[1]*, Efri Mardawati[1], Koko Iwan Agus Kurniawan[1]
[1]Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang Km 21, Jatinangor, Sumedang 45363, Indonesia
**Email: alfarizi22001@mail.unpad.ac.id*

Abstract

Black garlic peel is an underutilized agroindustrial residue that contains lignocellulosic fractions and may serve as a filler in starch-based biofoam. This study compared black garlic peel with coconut coir and cocopeat as fillers in cassava-starch biofoam prepared under the same formulation and processing conditions. Each filler was ground, sieved through a 40-mesh screen, treated with 5% NaOH at 100 °C for 60 min, washed to near-neutral pH, and dried. Cassava starch (30 g), filler (10 g), polyvinyl alcohol (6 g), and water (30 mL) were mixed, and the dough was thermally molded in a closed mold at 130 °C for 60 min. Black garlic peel contained 30.42 ± 0.16% cellulose, 27.40 ± 0.23% hemicellulose, and 18.65 ± 0.20% lignin. The biofoam containing black garlic peel had the highest density (0.7686 ± 0.0342 g/cm³), the lowest 24-h water absorption (64.33%), an intermediate flexural strength (10.906 ± 0.528 MPa), and a mass loss of 66.17 ± 2.99% after 28 days of soil burial. Scanning electron microscopy (SEM) of the cross-sectional surfaces of the black farlic peel biofoam showed a relatively compact, layered structure with local pores, voids, and interfacial gaps. Coconut coir produced the highest flexural strength (20.735 ± 0.970 MPa), whereas cocopeat produced the lowest density (0.5456 ± 0.0374 g/cm³) and the highest mass loss (75.16 ± 2.49%). Based on a descriptive comparison, black garlic peel offered a balanced combination of compactness, water resistance, mechanical performance, and disintegration, although formulation optimization and standardized compostability and application tests are still required.
Keyword: agroindustrial waste, biodegradable foam, black garlic peel, cassava starch, lignocellulose

Abstrak

Kulit black garlic merupakan residu agroindustri yang belum banyak dimanfaatkan, meskipun mengandung fraksi lignoselulosa yang berpotensi sebagai bahan pengisi biofoam berbasis pati. Penelitian ini membandingkan kulit black garlic dengan sabut kelapa dan cocopeat sebagai bahan pengisi pada biofoam pati singkong dengan formulasi dan kondisi proses yang sama. Setiap bahan pengisi digiling hingga lolos ayakan 40 mesh, diberi perlakuan NaOH 5% pada 100 °C selama 60 menit, dicuci hingga mendekati pH netral, dan dikeringkan. Biofoam dibuat dari 30 g pati singkong, 10 g bahan pengisi (sabut kelapa, cocopeat, atau kulit black garlic), 6 g polivinil alkohol, dan 30 mL air, kemudian dicetak secara termal pada 130 °C selama 60 menit. Kulit black garlic mengandung selulosa 30,42 ± 0,16%, hemiselulosa 27,40 ± 0,23%, dan lignin 18,65 ± 0,20%. Biofoam kulit black garlic memiliki densitas tertinggi (0,7686 ± 0,0342 g/cm³), daya serap air 24 jam terendah (64,33%), kuat lentur menengah (10,906 ± 0,528 MPa), dan kehilangan massa 66,17 ± 2,99% setelah penguburan tanah selama 28 hari. Pengamatan morfologi permukaan penampang melintang menggunakan scanning electron microscopy (SEM) menunjukkan struktur berlapis yang relatif kompak dengan pori, rongga, serta celah antarmuka lokal. Sabut kelapa menghasilkan kuat lentur tertinggi (20,735 ± 0,970 MPa), sedangkan cocopeat menghasilkan densitas terendah (0,5456 ± 0,0374 g/cm³) dan kehilangan massa tertinggi (75,16 ± 2,49%). Secara deskriptif, kulit black garlic memberikan profil yang seimbang antara kekompakan struktur, ketahanan air, kinerja mekanik, dan kecenderungan disintegrasi, meskipun optimasi formulasi serta pengujian keterkomposan dan aplikasi terstandar masih diperlukan.
Kata kunci: biofoam, kulit black garlic, lignoselulosa, limbah agroindustri, pati singkong

Alfarizi, Mardawati, E. & Kurniawan, K.I.A. (2026). Kulit Black Garlic sebagai Filler Biofoam Pati Singkong dengan Struktur Kompak dan Daya Serap Air Rendah dibandingkan Sabut Kelapa dan Cocopeat. *Jurnal Ilmu Teknologi Pertanian Agrotechno*, *11*(2), 26-39.

PENDAHULUAN

Expanded polystyrene (EPS) banyak digunakan sebagai bahan kemasan karena ringan, mudah dibentuk, dan mampu meredam benturan. Namun, EPS berasal dari bahan petrokimia dan sangat lambat terurai, sehingga produk sekali pakai dapat bertahan lama setelah dibuang dan menambah akumulasi limbah persisten (Gonçalves *et al.*, 2024). Kondisi tersebut mendorong pengembangan material kemasan yang berasal dari sumber terbarukan, dapat diproses dengan teknologi sederhana, dan mampu mengalami penguraian setelah masa pakainya berakhir. Salah satu pendekatan yang banyak dikaji adalah pembuatan biofoam, yaitu material berpori yang memanfaatkan biopolimer serta bahan pengisi berbasis biomassa untuk menggantikan sebagian fungsi busa sintetis pada aplikasi berumur pakai singkat (Abotbina *et al.*, 2022). Pengembangan biofoam tidak hanya berkaitan dengan penggantian polimer fosil, tetapi juga membuka peluang peningkatan nilai tambah hasil samping pertanian yang selama ini bernilai rendah.

Biofoam yang dikembangkan dalam penelitian ini tersusun atas komponen dengan peran yang berbeda. Pati singkong berperan sebagai matriks utama pembentuk struktur busa: pati yang tergelatinisasi membentuk dinding padat yang menyelimuti komponen lain. Polivinil alkohol (PVA) berperan sebagai pengikat tambahan yang memperbaiki kohesi antarkomponen dan kelenturan matriks. Bahan lignoselulosa (sabut kelapa, *cocopeat*, atau kulit *black garlic*) berperan sebagai bahan pengisi (*filler*), yaitu fase berupa serat atau partikel yang tersebar dalam matriks dan berfungsi sebagai penguat sekaligus pengatur struktur. Air berperan sebagai medium pencampuran dan, ketika menguap saat pemanasan, sebagai pembentuk rongga. Dengan demikian, rongga pada biofoam terbentuk oleh uap air selama proses, bukan berasal dari material berongga yang ditambahkan, dan pati tidak sekadar merekatkan partikel melainkan membentuk matriks utama.

Pati singkong menarik sebagai matriks karena tersedia luas, relatif murah, dapat diperbarui, mudah terurai, dan mampu bergelatinisasi sehingga membentuk matriks padat yang kontinu setelah dipanaskan bersama air. Selama pencetakan termal, granula pati menyerap air, mengembang, dan kehilangan sebagian keteraturan kristalnya, sedangkan penguapan air membentuk tekanan uap dan rongga yang menghasilkan struktur busa (Salgado *et al.*, 2008). Meskipun demikian, material berbasis pati umumnya sensitif terhadap kelembapan dan dapat bersifat rapuh. Banyaknya gugus hidroksil memudahkan interaksi dengan air, sedangkan pembentukan pori yang tidak seragam dapat menghasilkan dinding sel tipis, retak, atau terputus. Oleh karena itu, matriks pati sering dipadukan dengan PVA sebagai pengikat dan bahan lignoselulosa sebagai bahan pengisi untuk memperbaiki kohesi, menjaga kontinuitas matriks, dan meningkatkan kestabilan struktur (Nugroho *et al.*, 2024).

Bahan pengisi lignoselulosa dapat berfungsi sebagai pengisi sekaligus penguat pada biofoam. Selulosa memiliki struktur fibril dan gugus hidroksil yang berpotensi membentuk interaksi hidrogen dengan pati maupun PVA. Hemiselulosa lebih amorf dan relatif mudah berinteraksi dengan air, sedangkan lignin cenderung lebih kaku dan lebih hidrofobik dibandingkan polisakarida (Soykeabkaew *et al.*, 2015). Selain komposisi kimia, ukuran partikel, panjang serat, orientasi, tingkat aglomerasi, kualitas pembasahan oleh matriks, dan keberadaan pori atau celah antarmuka ikut menentukan kemampuan transfer beban serta penetrasi air. Pori kecil dan dinding yang kontinu dapat mendukung struktur ringan, sedangkan rongga besar, retakan, dan celah antarmuka dapat menjadi titik awal kerusakan. Perlakuan alkali kerap digunakan untuk membersihkan permukaan serat, mengurangi sebagian komponen non-selulosa, dan meningkatkan keterikatan dengan matriks (Coniwanti *et al.*, 2018).

Sabut kelapa dan *cocopeat* merupakan hasil samping pengolahan kelapa yang memiliki bentuk fisik berbeda. Sabut kelapa didominasi serat memanjang yang dapat berperan sebagai jembatan penguat ketika tertanam dalam matriks, sedangkan *cocopeat* berupa partikel lebih halus yang dapat mengisi ruang, tetapi juga berpotensi membentuk aglomerat dan rongga antarpartikel. Perbedaan geometri tersebut diperkirakan menghasilkan respons berbeda selama pencampuran dan pencetakan termal. Penambahan serat kulit kopi dan PVA dilaporkan dapat mengubah densitas, daya serap air, serta sifat mekanik biofoam pati (Sarlinda *et al.*, 2022). Variasi serat eceng gondok dan pemlastis juga memengaruhi karakteristik biofoam (Hutagalung

et al., 2024), dan pengaruh kadar PVA terhadap struktur serta sifat biofoam pati singkong telah dilaporkan (Nugroho *et al.*, 2024). Dengan demikian, bahan pengisi perlu dinilai sebagai satu sistem bersama matriks pati dan pengikat PVA, bukan hanya berdasarkan komposisi selulosa atau ligninnya.

Produksi *black garlic* juga menghasilkan kulit yang belum banyak dimanfaatkan sebagai material. *Black garlic* diperoleh melalui pemanasan bawang putih pada suhu dan kelembapan terkontrol, sehingga terjadi perubahan warna, tekstur, dan komposisi kimia (Kimura *et al.*, 2017). Kulit yang tersisa masih mengandung fraksi lignoselulosa dan telah dilaporkan dapat menjadi sumber selulosa untuk material *biodegradable* (Hanifah *et al.*, 2025). Dibandingkan residu kelapa, kulit *black garlic* memiliki bentuk partikel dan profil lignoselulosa yang berbeda. Kandungan hemiselulosa yang relatif tinggi dapat meningkatkan aksesibilitas air dan penguraian, sedangkan fraksi lignin yang lebih rendah dapat memengaruhi kekakuan. Namun, pengaruh aktualnya bergantung pada bagaimana partikel menyebar, mengisi matriks, dan membentuk pori selama pencetakan termal. Penggunaan langsung kulit *black garlic* sebagai bahan pengisi biofoam pati masih terbatas dilaporkan, sehingga diperlukan data yang menghubungkan komposisi bahan, sifat fisik, kinerja mekanik, kehilangan massa, dan morfologi.

Kajian biofoam sering kali menilai satu bahan pengisi pada formulasi dan metode yang berbeda, sehingga perbandingan antarbahan sulit dilakukan secara langsung. Penelitian ini menggunakan tiga jenis bahan pengisi pada jumlah, matriks, dan kondisi proses yang sama. Pendekatan tersebut tidak dimaksudkan untuk menetapkan formulasi optimum, melainkan untuk menunjukkan kompromi kinerja yang timbul dari perbedaan karakter bahan. Sabut kelapa diperkirakan memberi penguatan melalui serat memanjang, *cocopeat* berpotensi menghasilkan struktur lebih ringan dan terbuka, sedangkan kulit *black garlic* diperkirakan menghasilkan struktur lebih kompak. Penilaian dilakukan secara deskriptif karena perbedaan nilai belum menunjukkan perbedaan statistik tanpa analisis inferensial.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan kulit *black garlic* sebagai bahan pengisi biofoam pati singkong dan pembandingannya secara langsung dengan sabut kelapa serta *cocopeat* pada formulasi yang sama, disertai pembahasan bentuk serat dan pola struktur yang dihasilkan masing-masing bahan pengisi berdasarkan citra SEM.

Penelitian ini bertujuan (1) menentukan kadar air dan komposisi lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa, dan lignin) sabut kelapa, *cocopeat*, dan kulit *black garlic*; (2) mengevaluasi densitas, daya serap air, kuat lentur, dan kehilangan massa selama *soil burial test* pada biofoam pati singkong dengan ketiga bahan pengisi tersebut; serta (3) menganalisis morfologi permukaan penampang melintang biofoam menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM) untuk menjelaskan keterkaitan bentuk bahan pengisi dengan sifat biofoam. Hasilnya diharapkan memberikan dasar ilmiah bagi pemanfaatan kulit *black garlic* sebagai bahan pengisi biofoam berbasis pati. Klaim aplikasi dibatasi sebagai material kemasan berbasis biomassa yang potensial karena penelitian belum mencakup keamanan kontak pangan, permeabilitas, uji umur simpan, atau uji keterkomposan terstandar.

METODE

Tempat dan rancangan penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Proses dan Bioproses Program Studi Teknologi Industri Pertanian serta Laboratorium Uji Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran. Pengujian kuat lentur dilakukan di Laboratorium Uji Bahan, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung (POLBAN), sedangkan pengamatan SEM dilakukan di Laboratorium KST Samaun Samadikun, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Bandung. Penelitian menggunakan eksperimen laboratorium dengan satu variabel bebas, yaitu jenis bahan pengisi pada tiga taraf: sabut kelapa, *cocopeat*, dan kulit *black garlic*. Ketiga bahan digunakan dalam formulasi dan kondisi proses yang sama. Pengujian kuantitatif dilakukan dalam tiga ulangan, sedangkan SEM dilakukan pada satu spesimen representatif setiap jenis biofoam dengan beberapa bidang pengamatan.

Bahan dan peralatan

Bahan utama meliputi pati singkong komersial, PVA, sabut kelapa, *cocopeat*, kulit *black garlic*, NaOH (5%, 17,5%, dan 4%), H_2SO_4 72%, dan akuades. Kulit *black garlic* dan PVA diperoleh dari Laboratorium Proses dan

Bioproses, sedangkan sabut kelapa dan *cocopeat* diperoleh dari wilayah Bandung. Peralatan utama meliputi *disk mill*, ayakan 40 mesh, *water bath*, oven, tanur, desikator, pH meter, neraca analitik, mikrometer sekrup, *homogenizer*, pelat stainless steel berukuran 20 cm × 20 cm, lembaran teflon, alat uji Marshall merek ELE yang diadaptasi untuk pembebanan tiga titik, serta SEM JEOL JSM-IT300LV.

Preparasi dan perlakuan alkali bahan pengisi

Sabut kelapa, *cocopeat*, dan kulit *black garlic* dibersihkan dari pengotor, dikeringkan, dicacah, kemudian digiling menggunakan *disk mill*. Hasil gilingan diayak hingga lolos ayakan 40 mesh (bukaan sekitar 0,42 mm) untuk mengurangi variasi ukuran dan meningkatkan homogenitas pencampuran. Setiap bahan direndam dalam larutan NaOH 5% hingga terendam, lalu dipanaskan menggunakan *water bath* pada 100 °C selama 60 menit. Setelah perlakuan, bahan dicuci dengan akuades sampai pH air cucian mendekati netral untuk mengurangi sisa alkali. Bahan pengisi kemudian dikeringkan dalam oven pada 105 °C selama 3 jam. Perlakuan alkali digunakan untuk membersihkan permukaan bahan dan mengurangi sebagian komponen yang dapat menghambat kontak antara bahan pengisi dengan matriks (Coniwanti *et al.*, 2018).

Karakterisasi bahan baku

Kadar air dan komposisi lignoselulosa ditentukan pada bahan baku yang telah digiling dan lolos ayakan 40 mesh, yaitu ukuran partikel yang sama dengan bahan yang digunakan untuk membuat biofoam, dengan tiga ulangan. Kadar air ditentukan secara gravimetri. Cawan kering ditimbang sebagai W_0, cawan berisi sampel sebagai W_1, kemudian sampel dikeringkan pada 105 °C sampai massa konstan dan cawan berisi sampel ditimbang sebagai W_2. Kadar air dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \times 100\% \quad (1)$$

Kandungan lignoselulosa dianalisis secara gravimetri termodifikasi yang mengacu pada prinsip TAPPI T 203 (TAPPI, 2009). Selulosa ditentukan sebagai residu yang tidak larut setelah sampel kering direndam dalam NaOH 17,5% selama 30 menit pada suhu ruang dan diencerkan dengan akuades hingga konsentrasi NaOH sekitar 8% (Persamaan 2). Hemiselulosa ditentukan dari fraksi massa yang hilang setelah sampel kering direndam dalam NaOH 1 M (4%) selama 2 jam pada suhu ruang (Persamaan 3). Lignin ditentukan sebagai residu tidak larut asam: 1 g sampel kering direndam dalam 10 mL H_2SO_4 72% selama 4 jam pada suhu ruang, dicuci hingga pH netral, dikeringkan pada 105 °C hingga massa konstan, kemudian diabukan pada 550 °C untuk mengoreksi kadar abu (Persamaan 4). Seluruh residu dikeringkan hingga bobot konstan sebelum ditimbang dan dinyatakan sebagai persentase terhadap massa kering bahan.

$$\text{Selulosa (\%)} = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%$$

$$\text{Hemiselulosa (\%)} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100\%$$

$$\text{Lignin (\%)} = \frac{b - c}{a} \times 100\%$$

dengan m_0 = massa awal sampel kering (g); m_1 = massa residu kering yang tidak larut dalam NaOH 17,5% (g); h_0 = massa awal sampel kering (g); h_1 = massa residu kering setelah ekstraksi NaOH 4% (g); a = massa awal sampel kering (g); b = massa residu kering setelah perlakuan H_2SO_4 72% (g); dan c = massa abu setelah pengabuan (g).

Pembuatan biofoam

Setiap formulasi terdiri atas 30 g pati singkong, 10 g bahan pengisi hasil perlakuan alkali (setara 33,3% terhadap massa pati), 6 g PVA, dan 30 mL air. Seluruh bahan dicampur menggunakan *homogenizer* sampai bahan mulai menyatu. Tahap ini bertujuan mendistribusikan bahan pengisi dalam campuran, bukan memperkecil ukurannya, karena ukuran partikel telah diseragamkan sebelumnya melalui penggilingan dan pengayakan 40 mesh. Jumlah air yang rendah menghasilkan adonan yang relatif padat, sehingga pengadonan dilanjutkan secara manual sampai bahan pengisi terdistribusi relatif merata dalam matriks pati dan PVA. Cetakan disusun dari pelat stainless steel bawah, lembaran teflon, adonan biofoam, lembaran teflon, dan pelat stainless steel atas. Kedua pelat dikencangkan menggunakan mur dan baut pada empat sudut dengan pengatur celah (*spacer*) 5 mm. Adonan kemudian dicetak secara termal, yaitu cetakan tertutup berisi adonan dipanaskan dalam oven pada 130 °C selama 60 menit sehingga pati bergelatinisasi dan air menguap membentuk struktur busa. Biofoam dilepaskan dari cetakan, lalu dikondisikan selama 24 jam pada suhu ruang. Kondisi proses dibuat sama untuk ketiga formulasi agar perbedaan hasil lebih merepresentasikan karakter bahan pengisi.

Pengujian densitas dan daya serap air

Spesimen densitas berukuran 3 cm × 3 cm dipilih dari bagian lembaran yang relatif rata. Massa (m) diukur menggunakan neraca analitik, sedangkan ketebalan diukur pada empat sudut dan bagian tengah (lima titik) menggunakan mikrometer sekrup, kemudian dirata-ratakan menjadi $\bar{t}$. Mikrometer sekrup dipilih karena resolusinya lebih tinggi daripada jangka sorong, sehingga lebih sesuai untuk lembaran biofoam setebal beberapa milimeter yang ketebalannya sedikit berbeda antarbagian. Densitas (ρ, g/cm³) dihitung sebagai massa dibagi volume menggunakan Persamaan (5), dengan volume diperoleh dari panjang (p), lebar (l), dan ketebalan rata-rata spesimen.

$$\rho = \frac{m}{p \times l \times \bar{t}} \quad (5)$$

Daya serap air ditentukan melalui perendaman total termodifikasi yang mengacu pada prinsip ASTM D570/ISO 62. Sampel 3 cm × 3 cm ditimbang sebagai massa awal (M_0), kemudian direndam penuh dalam akuades pada suhu ruang selama 1 menit, 30 menit, 1 jam, 3 jam, 5 jam, 8 jam, atau 24 jam. Setiap waktu perendaman menggunakan sampel yang berbeda dengan tiga ulangan. Waktu 1 menit digunakan sebagai pembanding dengan penelitian biofoam terdahulu, sedangkan waktu lainnya dipilih untuk menelusuri pola penyerapan dari tahap awal hingga jangka panjang. Setelah diangkat, air permukaan diserap perlahan menggunakan tisu tanpa menekan struktur, lalu sampel ditimbang sebagai M_t. Daya serap air dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$\text{Daya serap air (\%)} = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (6)$$

Pengujian kuat lentur

Pengujian kuat lentur menggunakan alat uji Marshall merek ELE yang dilengkapi perangkat pembebanan tiga titik. Spesimen berukuran panjang 100 mm dan lebar 20 mm, sedangkan ketebalan aktual diukur pada setiap spesimen. Jarak antartumpuan ditetapkan 80 mm. Beban maksimum dibaca dari jumlah divisi maksimum (n) pada dial cincin pengukur beban dengan faktor kalibrasi 0,02599 kN/divisi, kemudian dikonversi menjadi newton menggunakan Persamaan (7). Pembebanan diberikan sampai tercapai beban maksimum atau spesimen mengalami kerusakan. Kuat lentur dihitung menggunakan Persamaan (8). Setiap jenis biofoam diuji sebanyak tiga ulangan.

$$F = n \times 25{,}99 \quad (7)$$

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (8)$$

dengan F = beban maksimum (N); n = jumlah divisi maksimum pada dial; σ_f = kuat lentur (MPa); L = jarak antartumpuan (mm); b = lebar spesimen (mm); dan d = ketebalan spesimen (mm). Metode ini merupakan adaptasi pembebanan tiga titik pada alat Marshall dan tidak dinyatakan sebagai pengujian penuh ASTM D790 karena laju pembebanan tidak dikendalikan secara otomatis.

Pengujian kehilangan massa melalui *soil burial test*

Kehilangan massa biofoam dievaluasi menggunakan *soil burial test* selama 28 hari. Sampel dikeringkan dan ditimbang sebagai massa awal (W_0), kemudian dikubur dalam media tanah pada wadah yang sama. Pengamatan dilakukan pada hari ke-7, 14, 21, dan 28. Sampel dikeluarkan, dibersihkan secara hati-hati dari tanah yang menempel, dikondisikan dalam desikator, kemudian ditimbang sebagai W_t; setelah penimbangan hari ke-7, 14, dan 21, sampel dikubur kembali pada kedalaman yang sama. Kehilangan massa kumulatif dihitung menggunakan Persamaan (9). Nilai ini digunakan sebagai indikator komparatif tingkat disintegrasi dalam tanah. *Soil burial test* dapat mencerminkan kehilangan massa akibat aktivitas mikroorganisme dan disintegrasi, tetapi kehilangan massa juga dapat dipengaruhi oleh pelarutan komponen hidrofilik, fragmentasi, serta pelepasan partikel sehingga tidak selalu setara dengan mineralisasi biologis sempurna (Nissa *et al.*, 2019; Folino *et al.*, 2023).

$$\text{Kehilangan massa (\%)} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\% \quad (9)$$

Pengamatan morfologi menggunakan SEM

Morfologi permukaan penampang melintang, yaitu permukaan bidang potong melintang lembaran biofoam, diamati di Laboratorium KST Samaun Samadikun BRIN menggunakan SEM JEOL JSM-IT300LV. Setiap jenis biofoam diwakili oleh satu spesimen representatif berukuran sekitar 1 cm × 1 cm × 0,5 cm yang dipotong secara hati-hati dan dikondisikan dalam keadaan kering. Pengukuran mengikuti metode yang dicantumkan laboratorium, yaitu ASTM

E986-04, menggunakan sinyal *secondary electron* (SE), tegangan percepatan 20 kV, kondisi *high vacuum*, dan tanpa pelapisan emas. Citra diambil pada perbesaran 100×, 500×, dan 1.000× dengan skala berturut-turut 100, 50, dan 10 μm. Beberapa bidang diamati untuk setiap sampel. Interpretasi dilakukan secara kualitatif terhadap bentuk bahan pengisi, ukuran dan keterhubungan pori, rongga, ketebalan dinding, retakan, kekompakan matriks, dan celah antarmuka. Struktur filamen atau partikel bulat tidak diidentifikasi sebagai fase tertentu karena penelitian tidak menggunakan EDS maupun analisis mikrobiologi.

Analisis data

Data kadar air, lignoselulosa, densitas, kuat lentur, dan kehilangan massa disajikan sebagai rata-rata ± standar deviasi (SD) dari tiga ulangan. Koefisien variasi (CV) dihitung dengan Persamaan (10) untuk menilai keterulangan densitas dan kuat lentur; semakin kecil CV, semakin dekat hasil antarulangan. Data daya serap air disajikan sebagai kurva rata-rata terhadap waktu perendaman. Perbandingan antarjenis bahan pengisi dilakukan secara deskriptif karena setiap bahan hanya diuji pada satu formulasi dan penelitian tidak dirancang sebagai optimasi multifaktor. Oleh sebab itu, istilah lebih tinggi atau lebih rendah menunjukkan perbedaan nilai terukur dan tidak dimaknai sebagai perbedaan signifikan secara statistik.

$$\text{CV (\%)} = \frac{\text{SD}}{\overline{x}} \times 100\%$$

dengan SD = standar deviasi dan $\overline{x}$ = nilai rata-rata dari tiga ulangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik bahan baku

Kadar air bahan baku berada pada rentang 10,05-12,46% (Tabel 1). *Cocopeat* memiliki kadar air awal tertinggi, diikuti kulit *black garlic* dan sabut kelapa. Partikel *cocopeat* yang halus menyediakan luas permukaan dan ruang antarpartikel yang dapat menahan kelembapan, sedangkan bentuk sabut kelapa yang berserat relatif lebih mudah melepaskan air selama pengeringan. Kulit *black garlic* berada pada posisi menengah. Karena bahan pengisi dikeringkan sebelum digunakan dalam formulasi, kadar air awal tidak ditafsirkan sebagai penyebab langsung perbedaan pori atau densitas biofoam. Hasil kadar air terutama menunjukkan kondisi awal bahan dan pentingnya tahap pengeringan agar massa bahan pengisi yang digunakan lebih seragam.

Tabel 1. Kadar air dan komposisi lignoselulosa bahan baku

Bahan	Kadar air (%)	Selulosa (%)	Hemiselulosa (%)	Lignin (%)
Sabut kelapa	10,05 ± 0,27	48,56 ± 0,65	13,14 ± 0,41	35,60 ± 0,81
Cocopeat	12,46 ± 0,40	28,05 ± 0,22	13,01 ± 0,12	37,03 ± 0,14
Kulit *black garlic*	11,04 ± 0,37	30,42 ± 0,16	27,40 ± 0,23	18,65 ± 0,20

Keterangan: nilai disajikan sebagai rata-rata ± standar deviasi (n = 3). Analisis dilakukan pada bahan berukuran lolos ayakan 40 mesh.

Komposisi lignoselulosa memperlihatkan karakter yang jelas berbeda. Sabut kelapa mempunyai selulosa tertinggi sebesar 48,56 ± 0,65%, sehingga secara kimia menyediakan fraksi penguat terbesar. Selulosa dapat meningkatkan kemampuan transfer beban apabila serat terdispersi dan terikat baik dengan matriks pati-PVA (Abotbina *et al.*, 2022). *Cocopeat* memiliki lignin tertinggi sebesar 37,03 ± 0,14%. Lignin dapat menambah kekakuan, tetapi juga dapat mengurangi pembasahan permukaan dan aksesibilitas gugus hidroksil apabila partikel tidak terdispersi dengan baik. Kulit *black garlic* mengandung selulosa 30,42 ± 0,16%, hemiselulosa tertinggi 27,40 ± 0,23%, dan lignin terendah 18,65 ± 0,20%. Profil tersebut menunjukkan bahwa kulit *black garlic* masih kaya polisakarida dan lebih sedikit didominasi lignin dibandingkan residu kelapa.

Kandungan hemiselulosa kulit *black garlic* yang tinggi dapat mendukung interaksi melalui gugus hidroksil, tetapi juga berpotensi meningkatkan afinitas terhadap air dan aksesibilitas disintegrasi. Hasil produk menunjukkan bahwa biofoam kulit *black garlic* justru memiliki daya serap air 24 jam paling

rendah. Temuan ini menegaskan bahwa komposisi kimia tidak dapat ditafsirkan secara terpisah dari densitas, distribusi partikel, dan morfologi. Struktur yang lebih rapat serta jalur kapiler yang terbatas dapat menghambat penetrasi air meskipun bahan penyusunnya hidrofilik. Nilai lignoselulosa juga dapat berbeda dari literatur akibat asal bahan, perlakuan awal, kondisi pemanasan saat produksi *black garlic*, dan metode analisis (Hanifah *et al.*, 2025).

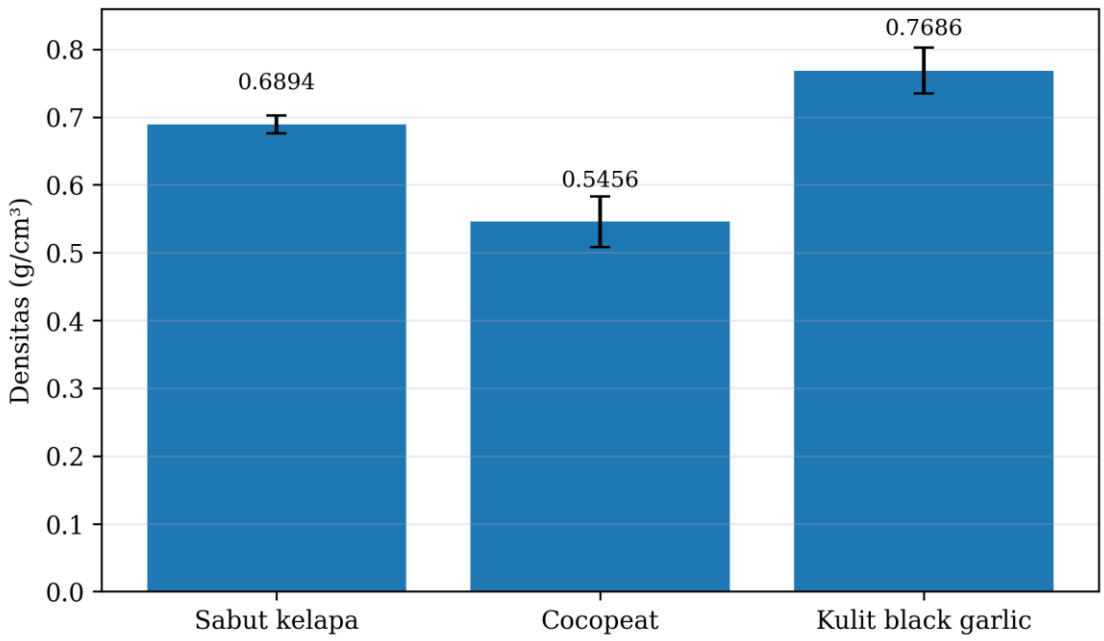
Pembentukan dan penampakan biofoam

Ketiga formulasi dapat dicetak menjadi lembaran melalui pencetakan termal. Jumlah air 30 mL menghasilkan adonan padat, sehingga pencampuran menggunakan *homogenizer* perlu dilanjutkan dengan pengadonan manual. Selama pemanasan pada 130 °C, granula pati menyerap air dan mengembang, kehilangan sebagian struktur kristalnya, dan melepaskan sebagian molekul amilosa; proses ini disebut gelatinisasi. Pati tergelatinisasi bersama PVA membentuk massa kental yang menyelimuti partikel bahan pengisi. Penguapan air kemudian menghasilkan tekanan uap dan rongga di dalam adonan (Salgado *et al.*, 2008), sedangkan pengeringan dan pendinginan mengeraskan campuran pati-PVA menjadi dinding padat di sekeliling rongga. Istilah matriks kontinu dalam naskah ini merujuk pada kesinambungan fase padat pati-PVA yang menyelimuti bahan pengisi dan membatasi rongga sebagaimana teramati pada citra SEM, bukan pada sifat alir atau reologi adonan yang tidak dievaluasi dalam penelitian ini. Kemampuan matriks mempertahankan gas hingga strukturnya cukup kaku menentukan kestabilan bentuk busa (Gonçalves *et al.*, 2024). Lembaran teflon membantu pelepasan biofoam dari pelat, sedangkan pengondisian 24 jam dilakukan untuk menstabilkan bentuk sebelum pengujian.

Secara visual, bahan pengisi menentukan warna dan tekstur produk. Sabut kelapa memperlihatkan jejak serat yang lebih nyata, *cocopeat* membentuk warna cokelat dengan tekstur lebih granular, sedangkan kulit *black garlic* menghasilkan lembaran lebih gelap dan relatif rapat. Ketebalan aktual spesimen uji kuat lentur berkisar 4,40-5,29 mm, sehingga ketebalan diukur pada setiap spesimen.

Densitas

Kulit *black garlic* menghasilkan densitas tertinggi sebesar 0,7686 ± 0,0342 g/cm³, diikuti sabut kelapa 0,6894 ± 0,0131 g/cm³ dan *cocopeat* 0,5456 ± 0,0374 g/cm³ (Gambar 1). Koefisien variasi (CV) masing-masing sebesar 4,46%, 1,91%, dan 6,85%. Nilai CV sabut kelapa yang paling rendah menunjukkan keterulangan terbaik, sedangkan variasi *cocopeat* lebih besar, kemungkinan karena distribusi partikel halus dan pembentukan rongga tidak sepenuhnya seragam.



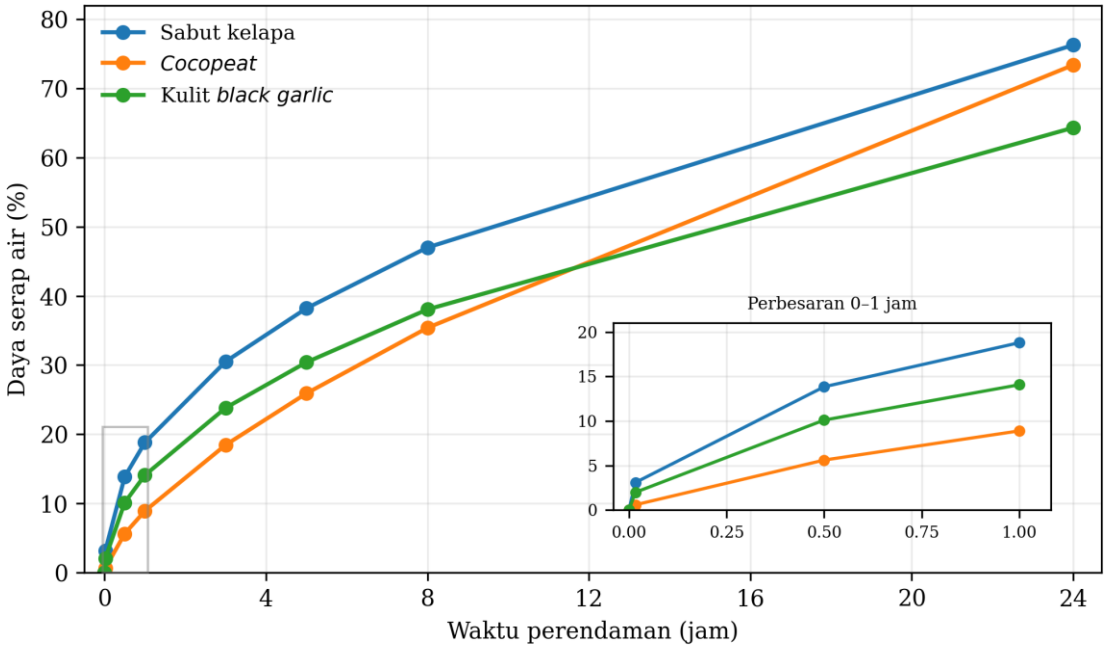
Gambar 1. Densitas biofoam berdasarkan jenis bahan pengisi, batang galat menunjukkan standar deviasi (n = 3).

Densitas tinggi pada biofoam kulit *black garlic* menunjukkan massa yang lebih besar pada volume yang sama dan mengindikasikan struktur yang lebih kompak. Partikel kulit diduga mengisi ruang antarkomponen dalam matriks pati sehingga jumlah rongga besar berkurang. Sabut kelapa berada pada posisi menengah karena jaringan serat tetap menyediakan ruang antarserat, sedangkan *cocopeat* menghasilkan material paling ringan akibat ruang antarpartikel dan ekspansi yang lebih besar. Densitas biofoam berkaitan dengan tingkat ekspansi, ukuran pori, ketebalan dinding, dan kontinuitas fase padat (Soykeabkaew *et al.*, 2015).

Densitas rendah tidak otomatis menunjukkan kinerja terbaik. Material yang ringan menguntungkan untuk mengurangi massa kemasan, tetapi porositas tinggi dapat meningkatkan penyerapan air dan menurunkan kuat lentur apabila dinding pori tipis atau memiliki retakan. Sebaliknya, densitas tinggi dapat menambah kekompakan, tetapi tidak menjamin penguatan apabila partikel tidak mampu menjembatani retak. Penelitian biofoam berbasis selulosa juga menunjukkan bahwa kekuatan dan ketahanan air ditentukan oleh kualitas titik kontak serta ikatan dalam jaringan, bukan semata-mata oleh densitas (Liao *et al.*, 2022). Karena itu, hasil densitas perlu dibaca bersama kuat lentur dan citra SEM. Selain itu, karena setiap bahan pengisi hanya diuji pada satu jumlah dan tanpa kontrol pati-PVA tanpa bahan pengisi, kontribusi masing-masing bahan pengisi terhadap densitas belum dapat dipisahkan dari pengaruh formulasi dasar.

Daya serap air

Seluruh biofoam mengalami peningkatan massa selama perendaman 24 jam (Gambar 2). Pada menit pertama, *cocopeat* menunjukkan daya serap terendah sebesar 0,59%, diikuti kulit *black garlic* 1,99% dan sabut kelapa 3,09%. Setelah 1 jam, nilai tersebut meningkat menjadi 8,89% pada *cocopeat*, 14,07% pada kulit *black garlic*, dan 18,79% pada sabut kelapa. Penyerapan awal sabut kelapa yang lebih cepat diduga berkaitan dengan serat memanjang dan celah antarmuka yang membentuk jalur kapiler. Air dapat masuk melalui permukaan, pori, rongga, dan batas antara bahan pengisi dengan matriks.



Gambar 2. Perubahan daya serap air biofoam selama perendaman 24 jam. Waktu perendaman dinyatakan dalam jam pada sumbu numerik sehingga jarak antartitik proporsional terhadap waktu aktual; sisipan memperbesar rentang 0-1 jam. Titik menunjukkan nilai rata-rata (n = 3).

Setelah 24 jam, daya serap sabut kelapa mencapai 76,29%, *cocopeat* 73,40%, dan kulit *black garlic* 64,33%. Massa air yang terserap secara absolut berturut-turut adalah 2,2757, 2,7783, dan 1,9878 g. *Cocopeat* menahan jumlah air absolut tertinggi, sedangkan kulit *black garlic*

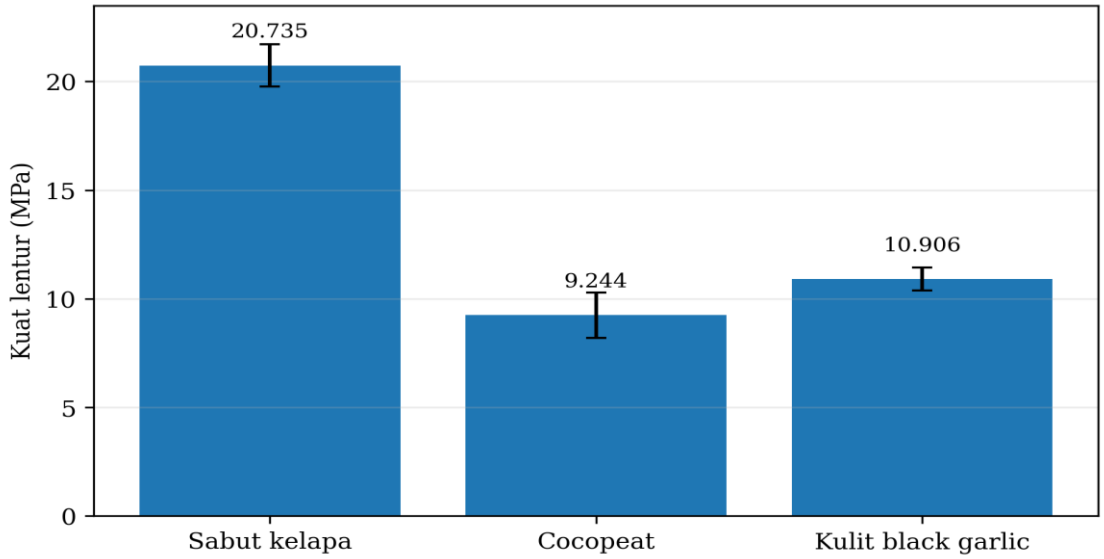
menunjukkan penyerapan relatif dan absolut terendah pada akhir pengujian. Perubahan urutan dari fase awal ke 24 jam menunjukkan bahwa laju masuknya air dan kapasitas penyimpanan air dikendalikan oleh mekanisme yang tidak sepenuhnya sama. *Cocopeat* relatif lambat pada kontak awal, tetapi ruang antarpartikelnya menampung air dalam jumlah besar ketika waktu perendaman diperpanjang.

Hasil kulit *black garlic* mengindikasikan bahwa struktur fisik lebih dominan daripada kandungan hemiselulosa dalam menentukan penyerapan jangka panjang. Densitas tinggi dan matriks yang lebih kontinu diduga mengurangi pori terbuka serta memperpanjang jalur penetrasi air. Cahyani *et al.* (2023) juga melaporkan bahwa struktur biofoam yang lebih padat dan keterikatan antarkomponen yang lebih baik berkaitan dengan penurunan daya serap air. Sebaliknya, pori yang saling terhubung, rongga besar, dan celah antarmuka dapat meningkatkan akses air ke bagian dalam. Interpretasi tersebut didukung oleh citra SEM, meskipun ukuran pori belum diukur secara kuantitatif.

Daya serap 24 jam seluruh sampel masih tinggi untuk aplikasi yang bersentuhan langsung dengan bahan basah. Kepekaan terhadap air merupakan keterbatasan utama biofoam pati karena pati, PVA, selulosa, dan hemiselulosa memiliki banyak gugus hidroksil (-OH) yang bersifat polar dan membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air. Air yang masuk melalui pori dan celah antarmuka karenanya tertahan di dalam material dan menaikkan massanya. Peningkatan massa pada pengujian ini terutama mencerminkan masuknya dan tertahannya air di pori dan matriks, bukan pelarutan material, karena selulosa kristalin dan pati tergelatinisasi yang terikat dalam matriks umumnya tidak larut dalam air pada suhu ruang selama pengujian. Namun, kemungkinan terlarutnya sebagian komponen yang larut air (misalnya sebagian PVA, amilosa, atau hemiselulosa) tidak ditentukan karena sampel tidak dikeringkan kembali setelah perendaman. Penambahan kitosan dilaporkan dapat menurunkan daya serap air biofoam pati (Hendrawati *et al.*, 2017). Perubahan kadar PVA turut mengubah respons penyerapan air dan karakteristik material (Sarlinda *et al.*, 2022), dan penggunaan serat eceng gondok serta variasi pemlastis menghasilkan respons yang bergantung pada komposisi dan kompatibilitas antarfase (Hutagalung *et al.*, 2024). Pengembangan berikutnya perlu memprioritaskan pengendalian pori dan penggunaan pelapis *biodegradable* tanpa menghilangkan kecenderungan disintegrasi.

Kuat lentur

Biofoam sabut kelapa menghasilkan kuat lentur tertinggi sebesar 20,735 ± 0,970 MPa. Nilai berikutnya diperoleh kulit *black garlic* sebesar 10,906 ± 0,528 MPa dan *cocopeat* sebesar 9,244 ± 1,044 MPa (Gambar 3). Secara deskriptif, nilai sabut kelapa 90,13% lebih tinggi daripada kulit *black garlic* dan 124,32% lebih tinggi daripada *cocopeat*. Koefisien variasi sabut kelapa, *cocopeat*, dan kulit *black garlic* masing-masing 4,68%, 11,30%, dan 4,84%, sehingga hasil *cocopeat* menunjukkan variasi antarulangan paling besar.



Gambar 3. Kuat lentur biofoam berdasarkan jenis bahan pengisi, batang galat menunjukkan standar deviasi (n = 3).

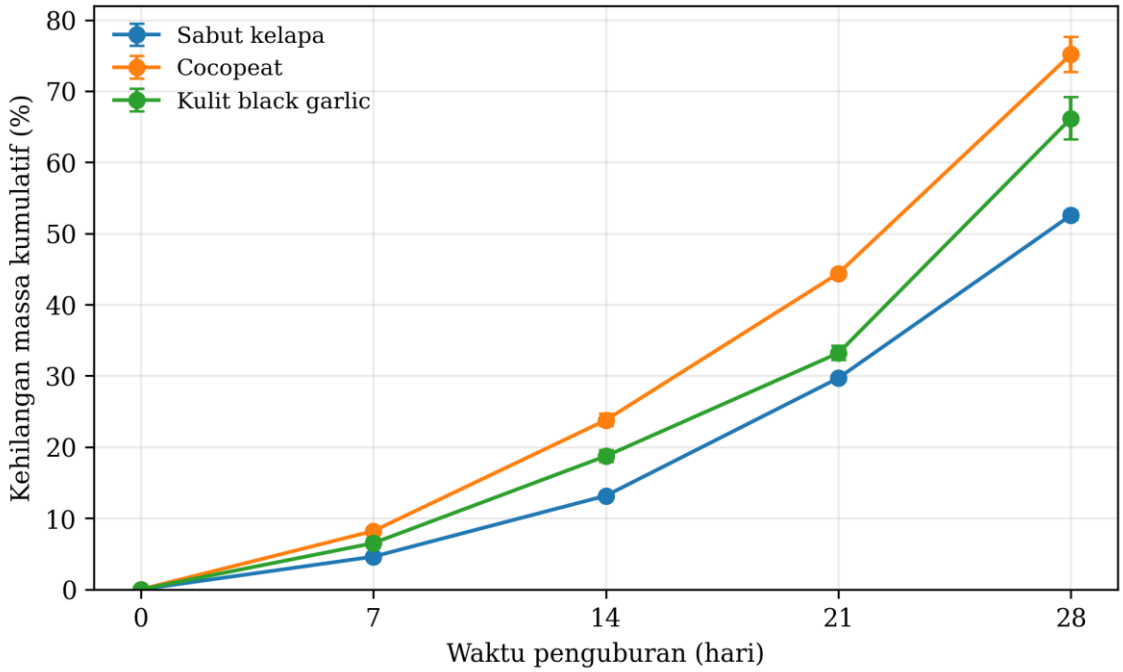
Kuat lentur tertinggi pada sabut kelapa sejalan dengan kandungan selulosanya yang paling besar dan bentuk serat yang memanjang. Serat dapat berfungsi sebagai jembatan penguat yang menyalurkan beban, menahan perkembangan retak, dan mempertahankan integritas penampang selama pembengkokan. Mekanisme ini hanya efektif pada bagian serat yang terlapisi dan terikat pada matriks. Citra SEM menunjukkan bahwa ikatan belum seragam karena masih terdapat pori, rongga, dan celah antarmuka, tetapi keberadaan jaringan serat tetap memberikan kontribusi penguatan yang lebih besar daripada partikel *cocopeat* atau kulit *black garlic*. Temuan ini memperlihatkan bahwa densitas bukan satu-satunya penentu sifat mekanik: sabut kelapa mempunyai densitas lebih rendah daripada kulit *black garlic*, tetapi kuat lenturnya hampir dua kali lebih tinggi.

Kulit *black garlic* memiliki kuat lentur menengah. Struktur yang lebih rapat membantu membentuk fase padat yang kontinu, tetapi partikel yang cenderung pendek dan berlapis tidak memberi efek jembatan sepanjang serat sabut kelapa. Beberapa rongga dan celah lokal juga dapat menjadi konsentrasi tegangan. *Cocopeat* mempunyai nilai terendah dan variasi terbesar. Partikel halus yang tidak terdistribusi seragam dapat membentuk aglomerat, dinding pori tipis, dan titik lemah yang memicu kerusakan lebih awal. Secara umum, kuat lentur biofoam ditentukan oleh kombinasi kontinuitas matriks, kemampuan pembasahan bahan pengisi, distribusi pori, dan cacat awal pada dinding sel (Gonçalves *et al.*, 2024).

Nilai kuat lentur pada penelitian ini perlu dibandingkan secara hati-hati dengan publikasi lain karena metode pencetakan, dimensi spesimen, alat, jarak tumpuan, dan formulasi berbeda. Pengujian menggunakan adaptasi pembebanan tiga titik pada alat Marshall, sehingga hasil terutama digunakan untuk perbandingan internal ketiga formulasi. Walaupun demikian, pola yang diperoleh konsisten dengan prinsip penguatan serat: jaringan serat yang mempunyai titik kontak baik dapat meningkatkan kemampuan menahan beban, sementara pori besar dan ikatan yang tidak merata menurunkan kekuatan (Liao *et al.*, 2022).

Kehilangan massa selama *soil burial test*

Kehilangan massa meningkat pada seluruh biofoam selama penguburan 28 hari (Gambar 4), dengan urutan yang sama sejak hari ke-7: *cocopeat* tertinggi, diikuti kulit *black garlic*, dan sabut kelapa. Peningkatan lebih tajam terjadi pada minggu ketiga dan keempat. Setelah 28 hari, kehilangan massa *cocopeat* mencapai 75,16 ± 2,49%, kulit *black garlic* 66,17 ± 2,99%, dan sabut kelapa 52,57 ± 0,63%.



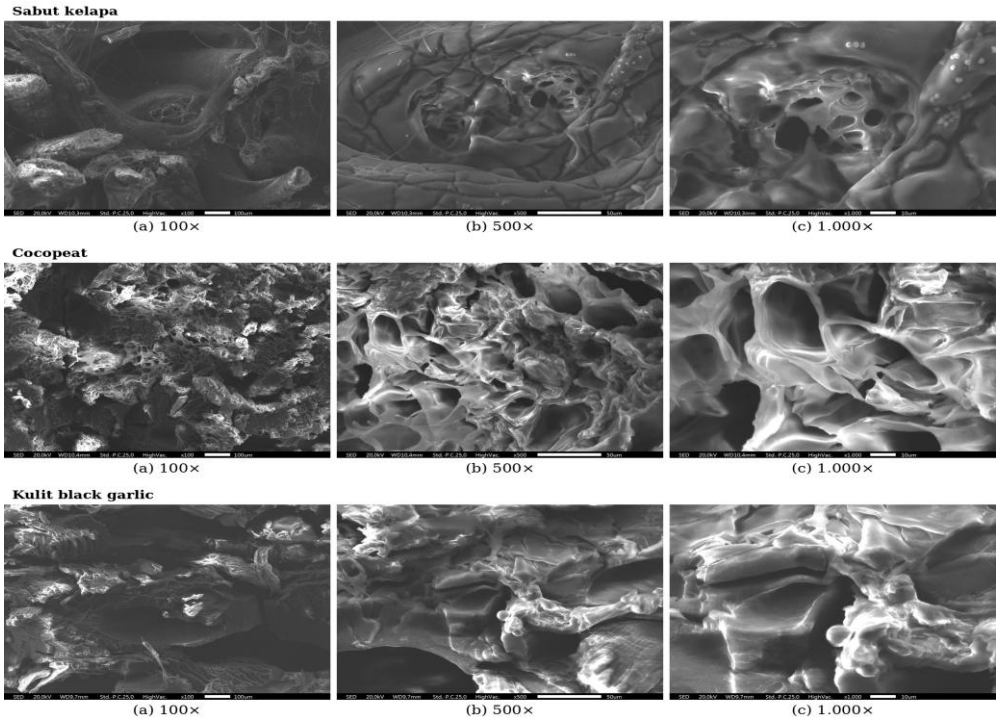
Gambar 4. Kehilangan massa kumulatif biofoam selama *soil burial test* 28 hari, batang galat menunjukkan standar deviasi (n = 3).

Cocopeat mengalami kehilangan massa tertinggi meskipun kandungan ligninnya paling tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa aksesibilitas struktur dapat lebih dominan daripada komposisi kimia tunggal. Densitas rendah dan struktur berpori membuka jalur bagi air dan media tanah untuk mencapai bagian dalam material. Luas permukaan kontak yang besar mempercepat pelemahan matriks pati dan pelepasan partikel. Sebaliknya, serat sabut kelapa mempertahankan integritas fisik lebih lama melalui jaringan penguat, sehingga kehilangan massa paling rendah. Kulit *black garlic* berada di antara keduanya: lignin lebih rendah dan hemiselulosa lebih tinggi dapat mendukung disintegrasi, tetapi struktur yang lebih kompak memperlambat penetrasi media pada tahap awal.

Soil burial test tidak membuktikan mineralisasi sempurna menjadi karbon dioksida, air, dan biomassa. Nissa *et al.* (2019) menjelaskan bahwa kehilangan massa pada pengujian ini dapat berasal dari aktivitas mikroorganisme, pelarutan komponen hidrofilik, dan fragmentasi. Folino *et al.* (2023) menegaskan bahwa kehilangan massa tidak identik dengan mineralisasi sempurna karena partikel juga dapat terlepas selama pengujian dan pembersihan. Oleh sebab itu, hasil diposisikan sebagai indikator komparatif pada kondisi pengujian yang sama. Perbedaan dengan penelitian lain juga dapat dipengaruhi jenis tanah, kelembapan, ukuran sampel, kandungan PVA, dan lama penguburan. Meskipun demikian, kehilangan lebih dari setengah massa pada semua formulasi menunjukkan bahwa material mampu mengalami disintegrasi substansial dalam 28 hari.

Untuk aplikasi kemasan, kehilangan massa yang lebih tinggi tidak selalu identik dengan performa terbaik karena produk tetap harus mempertahankan fungsi selama penyimpanan dan penggunaan. Kulit *black garlic* menunjukkan kompromi yang menarik: penyerapan air jangka panjang paling rendah, densitas paling tinggi, kuat lentur menengah, dan kehilangan sekitar dua pertiga massa setelah 28 hari. Kombinasi tersebut menunjukkan potensi keseimbangan antara stabilitas penggunaan dan disintegrasi setelah pembuangan. Namun, penelitian ini belum mencakup kuat tekan, permeabilitas uap air, migrasi, keamanan kontak pangan, umur simpan, dan uji keterkomposan terstandar, sehingga hasilnya belum dapat digunakan untuk menyatakan produk siap komersial.

Morfologi permukaan penampang melintang biofoam



Gambar 5. Citra SEM permukaan penampang melintang biofoam sabut kelapa, *cocopeat*, dan kulit *black garlic* pada perbesaran (a) 100×, (b) 500×, dan (c) 1.000×.

Citra SEM memperlihatkan bahwa bentuk bahan pengisi menghasilkan pola struktur penampang yang berbeda jelas pada ketiga biofoam (Gambar 5): jaringan serat memanjang pada sabut kelapa, struktur seluler berongga yang terbuka pada *cocopeat*, dan susunan lapisan sejajar yang rapat pada kulit *black garlic*. Ketiganya memiliki pori, rongga, dan celah antarmuka, tetapi dengan ukuran, keterhubungan, dan kekompakan yang berbeda.

Pada sabut kelapa, bidang 100× menunjukkan serat memanjang yang saling melilit membentuk jaringan dengan rongga antarserat. Perbesaran 500× dan 1.000× memperlihatkan dinding serat berongga, matriks yang membungkus sebagian permukaan serat, serta jaringan serat halus yang melintasi penampang. . Karena ayakan 40 mesh membatasi lebar partikel tetapi tidak panjang serat, panjang serat dalam biofoam tidak dikendalikan maupun diukur. Bentuk serat memanjang inilah yang menjadi struktur utama biofoam sabut kelapa: serat yang tertanam dalam matriks dapat menyalurkan beban dan menjembatani retak selama pembengkokan, sehingga selaras dengan kuat lentur tertinggi. Pada sejumlah lokasi, matriks tampak menempel pada serat, sedangkan lokasi lain masih memperlihatkan celah yang menandakan keterikatan belum homogen sehingga rongga dan pori tetap berpotensi menjadi titik awal retak. Rongga antarserat dan celah antarmuka juga dapat menjadi jalur kapiler, yang sejalan dengan penyerapan air awal yang paling cepat, sementara jaringan serat yang utuh sejalan dengan kehilangan massa terendah.

Cocopeat menunjukkan morfologi paling terbuka. Karena berupa partikel halus dan bukan serat memanjang, bahan ini tidak membentuk jaringan penyalur beban. Pada perbesaran 100× terlihat fragmen kasar dan rongga besar yang tersebar tidak seragam, sedangkan perbesaran 500× dan 1.000× memperlihatkan struktur seluler dengan pori yang saling berhubungan, dinding relatif tipis, lembaran matriks yang terputus, dan aglomerat lokal. Struktur ini konsisten dengan densitas terendah, kuat lentur terendah dengan variasi terbesar, dan kehilangan massa tertinggi karena ruang terbuka memudahkan penetrasi air serta media tanah. Namun, daya serap pada menit pertama tetap rendah, yang menunjukkan bahwa pori terbuka pada bidang SEM tidak selalu langsung merepresentasikan laju pembasahan seluruh sampel. Orientasi pori, lapisan permukaan, dan jalur kapiler tiga dimensi ikut menentukan respons awal.

Biofoam kulit *black garlic* memperlihatkan struktur lebih padat dengan susunan lapisan sejajar dan fragmen dinding yang cenderung lebih tebal dibandingkan *cocopeat*. Berbeda dari sabut kelapa, kulit *black garlic* tidak membentuk jaringan serat memanjang, melainkan partikel pendek berlapis yang tersusun sejajar. Pori dan rongga tetap ditemukan, tetapi pada beberapa bidang matriks tampak lebih kontinu. Susunan berlapis ini sejalan dengan densitas tertinggi dan daya serap 24 jam terendah, karena lapisan yang rapat dapat memperpanjang jalur penetrasi air. Namun, distribusi partikel belum seragam dan masih terdapat celah antarmuka serta celah antarlapisan yang dapat menjadi bidang lemah, dan lapisan pendek tidak memberikan penguatan memanjang seperti serat sabut kelapa sehingga kuat lenturnya tidak melampaui sabut kelapa.

Hubungan antara SEM dan sifat makroskopik menunjukkan bahwa kualitas biofoam ditentukan oleh bentuk bahan pengisi serta keseimbangan porositas dan kontinuitas matriks. Serat memanjang menghasilkan jaringan penguat, partikel halus menghasilkan struktur seluler terbuka, dan partikel berlapis menghasilkan struktur kompak; karena itu tidak ada satu bahan pengisi yang unggul pada seluruh parameter. Pori diperlukan untuk menghasilkan struktur busa dan mengurangi massa, tetapi rongga yang terlalu besar, saling terhubung, atau berdinding tipis dapat mempercepat penyerapan air, pelemahan mekanik, dan disintegrasi. Celah antarmuka secara khusus menunjukkan kontak yang kurang rapat antara bahan pengisi dan matriks. Cahyani *et al.* (2023) melaporkan bahwa penambahan kitosan dapat membentuk struktur lebih padat dan memperbaiki ketahanan air biofoam. Liao *et al.* (2022) menunjukkan bahwa penguatan titik kontak dalam jaringan selulosa dapat meningkatkan kekuatan dan kestabilan terhadap air. Dalam penelitian ini, istilah lebih rapat, lebih terbuka, dan lebih berpori digunakan sebagai perbandingan visual, bukan sebagai perbedaan kuantitatif, karena ukuran dan fraksi pori tidak diukur dan SEM hanya mewakili bidang yang dipilih pada satu spesimen setiap jenis biofoam.

Pada beberapa bidang sabut kelapa terlihat struktur filamen sangat halus dan partikel bulat. Objek tersebut tidak diidentifikasi sebagai jamur, spora, granula pati, atau kontaminan karena SEM sekunder hanya memperlihatkan bentuk

permukaan. Identifikasi fase memerlukan analisis tambahan seperti EDS, FTIR, atau pengujian mikrobiologi. Pembatasan interpretasi ini penting agar kesimpulan tetap didasarkan pada bukti yang tersedia.

KESIMPULAN

Kulit *black garlic* (selulosa 30,42 ± 0,16%, hemiselulosa 27,40 ± 0,23%, lignin 18,65 ± 0,20%) dapat digunakan sebagai bahan pengisi biofoam pati singkong pada formulasi 30 g pati, 10 g bahan pengisi, 6 g PVA, dan 30 mL air yang dicetak secara termal pada 130 °C selama 60 menit. Dibandingkan sabut kelapa dan *cocopeat*, biofoam kulit *black garlic* memiliki densitas tertinggi (0,7686 ± 0,0342 g/cm³) dan daya serap air 24 jam terendah (64,33%, berbanding 76,29% pada sabut kelapa dan 73,40% pada *cocopeat*), dengan kuat lentur menengah (10,906 ± 0,528 MPa; sabut kelapa 20,735 ± 0,970 MPa; *cocopeat* 9,244 ± 1,044 MPa) dan kehilangan massa 66,17 ± 2,99% setelah 28 hari (sabut kelapa 52,57 ± 0,63%; *cocopeat* 75,16 ± 2,49%). Citra SEM menunjukkan bahwa bentuk bahan pengisi menghasilkan pola struktur yang berbeda dengan struktur berlapis yang kompak pada kulit *black garlic*, jaringan serat memanjang pada sabut kelapa, dan struktur seluler terbuka pada *cocopeat*. Hasil ini bersifat deskriptif pada satu formulasi; penelitian lanjutan perlu mencakup variasi konsentrasi, kontrol tanpa bahan pengisi, serta pengujian keterkomposan dan aplikasi terstandar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Proses dan Bioproses serta Laboratorium Uji Fakultas Teknologi Industri Pertanian Universitas Padjadjaran atas dukungan fasilitas penelitian, Laboratorium Uji Bahan, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung atas pelaksanaan pengujian kuat lentur, serta Laboratorium KST Samaun Samadikun BRIN Bandung atas pengujian SEM. Penulis juga berterima kasih kepada komisi pembimbing dan pihak teknis laboratorium yang membantu pelaksanaan penelitian.

KONTRIBUSI PENULIS

Alfarizi: konseptualisasi, investigasi, kurasi data, analisis formal, visualisasi, dan penulisan draf awal. Efri Mardawati: konseptualisasi, metodologi, supervisi, validasi, dan telaah serta penyuntingan naskah. Koko Iwan Agus Kurniawan: metodologi, supervisi, validasi, dan telaah serta penyuntingan naskah.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian dan penyusunan artikel ini.

KETERSEDIAAN DATA

Data pengulangan, dokumentasi pengujian, dan citra pendukung yang digunakan dalam artikel ini tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

DAFTAR PUSTAKA

Abotbina, W., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A., Sultan, M. T. H., Alkbir, M. F. M., Sulaiman, S., Harussani, M. M., & Bayraktar, E. (2022). Recent developments in cassava (*Manihot esculenta*) based biocomposites and their potential industrial applications: A comprehensive review. *Materials*, *15*(19), 6992. https://doi.org/10.3390/ma15196992

Cahyani, A. L., Linda, V., Guntama, D., Dewi, M. N., & Hakim, L. (2023). Effect of chitosan variation in starch and cellulose based biofoam. *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology*, *5*(3), 0230306. https://doi.org/10.26877/asset.v5i3.17126

Coniwanti, P., Mu'in, R., Saputra, H. W., Andre, M. R. A., & Robinsyah. (2018). Pengaruh konsentrasi NaOH serta rasio serat daun nanas dan ampas tebu pada pembuatan biofoam. *Jurnal Teknik Kimia*, *24*(1), 1-7. https://doi.org/10.36706/jtk.v24i1.411

Folino, A., Pangallo, D., & Calabrò, P. S. (2023). Assessing bioplastics biodegradability by standard and research methods: Current trends and open issues. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(2), 109424. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109424

Gonçalves, L. F. F. F., Reis, R. L., & Fernandes, E. M. (2024). Forefront research of foaming strategies on biodegradable polymers and their composites by thermal or melt-based processing technologies: Advances and perspectives. *Polymers*, *16*(9), 1286. https://doi.org/10.3390/polym16091286

Hanifah, A., Permana, D., Mardawati, E., & Masruchin, N. (2025). Isolasi selulosa limbah kulit bawang putih dan black garlic dengan menggunakan metode deep eutectic solvent (DES). *METANA*, *21*(2), 55-64. https://doi.org/10.14710/metana.v21i2.72275

Hendrawati, N., Lestari, Y. I., & Wulansari, P. A. (2017). Pengaruh penambahan kitosan dalam

pembuatan biodegradable foam berbahan baku pati. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, *11*(2), 1-7. https://doi.org/10.23955/rkl.v11i2.5002

Hutagalung, S., Sibarani, J., Pramesti, R. Y., & Puspaningtyas, T. H. R. (2024). Modifikasi biofoam berbasis pati singkong dengan serat eceng gondok dan variasi konsentrasi plasticizer. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, *10*(2), 114-125. https://doi.org/10.22487/kovalen.2024.v10.i2.17104

Kimura, S., Tung, Y. C., Pan, M. H., Su, N. W., Lai, Y. J., & Cheng, K. C. (2017). Black garlic: A critical review of its production, bioactivity, and application. *Journal of Food and Drug Analysis*, *25*(1), 62-70. https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.11.003

Liao, J., Luan, P., Zhang, Y., Chen, L., Huang, L., Mo, L., Li, J., & Xiong, Q. (2022). A lightweight, biodegradable, and recyclable cellulose-based bio-foam with good mechanical strength and water stability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(3), 107788. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107788

Nissa, R. C., Fikriyyah, A. K., Abdullah, A. H. D., & Pudjiraharti, S. (2019). Preliminary study of biodegradability of starch-based bioplastics using ASTM G21-70, dip-hanging, and soil burial test methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *277*, 012007. https://doi.org/10.1088/1755-1315/277/1/012007

Nugroho, A., Permadi, S. B., Legowo, A. C., & Wibowo, A. D. (2024). Biodegradable foam from cassava starch blended with water hyacinth fiber: Effects of polyvinyl alcohol content. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1354*(1), 012021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1354/1/012021

Salgado, P. R., Schmidt, V. C., Molina Ortiz, S. E., Mauri, A. N., & Laurindo, J. B. (2008). Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process. *Journal of Food Engineering*, *85*(3), 435-443. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.08.005

Sarlinda, F., Hasan, A., & Ulma, Z. (2022). Pengaruh penambahan serat kulit kopi dan PVA terhadap karakteristik biodegradable foam dari pati kulit singkong. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan*, *4*(2), 9-20. https://doi.org/10.35970/jppl.v4i2.1430

Soykeabkaew, N., Thanomsilp, C., & Suwantong, O. (2015). A review: Starch-based composite foams. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *78*, 246-263. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.014

TAPPI. (2009). *T 203 cm-09: Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp*. TAPPI Press.