

## PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI BIOPLASTIK DARI PATI UMBI GARUT-KARAGENAN DENGAN PENAMBAHAN PEMLASTIS *EPOXIDIZED FATTY ACID METHYL ESTER (EFAME)* DAN PENGIKAT SILANG $\text{CaCO}_3$ DARI CANGKANG TELUR AYAM

SILVIANAQORI NURULAENI<sup>1</sup>, TIARA MALVITA RAYA NURDIN<sup>1</sup>, NOVA PRATIWI INDRIYANI<sup>1</sup>  
DAN SONI SETIADJI<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati Bandung,  
Jalan A.H. Nasution No.105, Bandung, Jawa Barat, Indonesia

\*alamat email korespondensi: [s.setiadji@uinsgd.ac.id](mailto:s.setiadji@uinsgd.ac.id)

---

### Informasi Artikel      Abstrak/*Abstract*

**Kata Kunci:** bioplastik; pati umbi garut; karagenan; EFAME;  $\text{CaCO}_3$ ; biodegradasi; sifat mekanik; SEM. Plastik konvensional berbahan dasar minyak bumi sulit terurai secara alami dan berkontribusi besar terhadap pencemaran lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan alternatif material yang lebih ramah lingkungan dan dapat terdegradasi secara hayati. Penelitian ini bertujuan untuk membuat dan mengkarakterisasi bioplastik berbasis pati umbi garut dan karagenan dengan penambahan *epoxidized Fatty Acid Methyl Ester* (EFAME) sebagai pemlastis dan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) dari limbah cangkang telur sebagai agen pengikat silang. Variasi EFAME (0,25-1,25 mL) dan  $\text{CaCO}_3$  (0,1-0,5 g) digunakan untuk mengkaji pengaruhnya terhadap sifat fisik, mekanik, biodegradasi dan morfologi bioplastik. Proses pembuatan meliputi tahap gelatinisasi, pencampuran, pencetakan, dan pengeringan. Sedangkan karakterisasi meliputi uji swelling, kekuatan tarik, elongasi, modulus young, uji biodegradasi, serta analisis morfologi menggunakan Scanning Elctron Microscope (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi terbaik diperoleh pada 0,75 mL EFAME dan 0,3 g  $\text{CaCO}_3$  dengan nilai kuat tarik 9,728 MPa dan modulus young 185,3 MPa. Nilai elongasi dan swelling terbaik tercapai pada 0,1 g  $\text{CaCO}_3$  dan 0,25 mL EFAME dan Biodegradasi tertinggi terjadi pada kombinasi 1,25 mL EFAME dan 0,3 g  $\text{CaCO}_3$ . Morfologi permukaan menunjukkan struktur berlapis (lamellar) dengan partikel  $\text{CaCO}_3$  yang belum merata. Kesimpulannya, bioplastik dari kombinasi pati umbi garut dan karagenan dengan penambahan EFAME dan  $\text{CaCO}_3$  memiliki potensi sebagai alternatif plastik ramah lingkungan yang biodegradable, meskipun masih memerlukan optimalisasi untuk mencapai standar nasional.

**Keywords:** *bioplastic; arrowroot starch; carrageenan; EFAME;  $\text{CaCO}_3$ ; biodegradability; mechanical properties; SEM. Conventional petroleum-based plastics are difficult to degrade naturally and contribute significantly to environmental pollution. Therefore, alternative materials that are more environmentally friendly and biodegradable are urgently needed. This study aims to produce and characterize bioplastics based on arrowroot starch and carrageenan with the addition of Epoxidized Fatty Acid Methyl Ester (EFAME) as a plasticizer and calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) derived from eggshell waste as a crosslinking agent. Variations of EFAME (0.25–1.25 mL) and  $\text{CaCO}_3$  (0.1–0.5 g) were used to examine their effects on the physical, mechanical, biodegradability, and morphological properties of the bioplastics. The fabrication process involved gelatinization, mixing, casting, and drying, while characterization included swelling tests, tensile strength, elongation, Young's modulus, biodegradability tests, and morphological analysis using a Scanning Electron Microscope (SEM). The results showed that the best combination was obtained at 0.75 mL EFAME and 0.3 g  $\text{CaCO}_3$ , with a tensile strength of 9.728 MPa and a Young's modulus of 185.3 MPa. The highest elongation and swelling values were achieved at 0.1 g  $\text{CaCO}_3$  and 0.25 mL EFAME. The highest biodegradation rate occurred with the combination of 1.25 mL EFAME and 0.3 g  $\text{CaCO}_3$ . The surface morphology revealed a lamellar structure with unevenly distributed  $\text{CaCO}_3$  particles. In conclusion, bioplastics made from a combination of arrowroot starch and carrageenan with the addition of EFAME and  $\text{CaCO}_3$  have potential as biodegradable and eco-friendly plastic alternatives, although further optimization is needed to meet national standards*

---

## PENDAHULUAN

Plastik merupakan material yang sangat populer dan telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan modern. Daya tarik utamanya terletak pada harga yang terjangkau, ketersediaannya yang melimpah, serta ketahanannya terhadap berbagai kondisi. Hampir setiap aspek kehidupan sehari-hari melibatkan plastik, mulai dari kemasan, perabot rumah tangga, hingga tekstil. Sebagian besar plastik konvensional berbahan dasar minyak bumi memerlukan waktu lebih dari 400 tahun untuk terurai secara alami [1]. Sayangnya, hanya sekitar 12% plastik yang telah dimusnahkan melalui pembakaran, sementara sisanya menumpuk di lingkungan [1].

Di Indonesia, masalah ini menjadi semakin kompleks. Berdasarkan data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), pada tahun 2022 sampah plastik menempati urutan kedua terbanyak setelah sisa makanan, yaitu mencapai 18,2% dari total 19,6 juta ton timbulan sampah nasional [2]. Situasi ini menimbulkan urgensi akan solusi alternatif yang lebih ramah lingkungan, salah satunya adalah pengembangan plastik *biodegradable* (bioplastik) yang mampu terurai oleh mikroorganisme [3].

Bioplastik umumnya terbuat dari bahan terbarukan, seperti polisakarida. Salah satu sumber polisakarida yang potensial adalah pati, karena bersifat *biodegradable* dan tersedia melimpah dengan harga terjangkau [4]. Pati dari umbi garut memiliki kandungan yang tinggi (sekitar 98,10%), menjadikannya sumber bahan baku yang menjanjikan [5]. Namun, penggunaan pati secara tunggal dalam pembuatan bioplastik memiliki keterbatasan, seperti viskositas rendah dan kekuatan mekanik yang lemah [6] [7]. Oleh karena itu, perlu adanya penambahan bahan lain untuk meningkatkan sifat fisik dan mekaniknya.

Karagenan merupakan polisakarida lain yang bersumber dari alga merah dan memiliki kemampuan membentuk gel dengan sifat reologi yang fleksibel dan tahan panas [8] [9]. Kombinasi antara pati umbi garut dan karagenan telah banyak diteliti untuk menghasilkan bioplastik dengan karakteristik yang lebih baik.

Untuk meningkatkan fleksibilitas bioplastik, digunakan pemlastis seperti *Epoxidized Fatty Acid Methyl Ester* (EFAME), yang berasal

dari minyak nabati dan memiliki sifat *biodegradable* [10] [11]. Selain itu, penambahan agen pengikat silang seperti kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) juga diperlukan untuk memperkuat ikatan antar molekul dalam struktur bioplastik.  $\text{CaCO}_3$  dapat diekstraksi dari limbah cangkang telur dan berfungsi sebagai sumber ion  $\text{Ca}^{2+}$  yang efektif dalam meningkatkan kestabilan jaringan bioplastik [12] [13] [14] [15].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini memanfaatkan pati umbi garut dan karagenan sebagai bahan dasar, dengan penambahan EFAME sebagai pemlastis dan  $\text{CaCO}_3$  dari cangkang telur sebagai agen pengikat silang. Kombinasi ini diharapkan mampu menghasilkan bioplastik yang memiliki sifat mekanik dan *biodegradabilitas* yang baik serta ramah lingkungan.

## EKSPERIMEN

Penelitian ini dilakukan pada Januari–Agustus 2024, bertempat di Laboratorium Terpadu UIN Sunan Gunung Djati Bandung, Sekolah Tinggi Teknologi Tekstil Bandung, dan Laboratorium Pusat Survei Geologi Bandung.

### Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tepung pati umbi garut (Lingkar Organik), karagenan (KRI-02), Epoxidized Fatty Acid Methyl Ester (EFAME) (G-Plast X-1), cangkang telur ayam, akuades, asam asetat (8%, Merck®), Effective Microorganism-4 (EM-4), dan tanah kompos.

### Instrumentasi

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Autograph UTM (Shimadzu AG-X) untuk uji mekanik, SEM JSM-6360 untuk analisis morfologi.

### Prosedur

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu preparasi agen pengikat silang  $\text{CaCO}_3$  dari limbah cangkang telur, pembuatan larutan bioplastik, pencetakan bioplastik, dan karakterisasi terhadap bioplastik yang dihasilkan.

Karakterisasi dilakukan melalui uji swelling, uji biodegradasi, uji tarik, uji spesifikasi fisik, serta analisis morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

#### Preparasi Agen Pengikat Silang dari Cangkang Telur

Cangkang telur dicuci, direndam air hangat, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 30 menit. Setelah kering, cangkang dihancurkan menggunakan mortar dan diayak menggunakan saringan 100 mesh untuk menghasilkan serbuk halus CaCO<sub>3</sub>.

#### Pembuatan Bioplastik

CaCO<sub>3</sub> dilarutkan dalam 10 mL asam asetat 8%, dipanaskan di atas hotplate sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* hingga larut sempurna. Larutan pati (1,33 g) dan karagenan (0,67 g), masing-masing dilarutkan dalam 10 mL akuades, kemudian dimasukkan ke dalam larutan CaCO<sub>3</sub>. EFAME ditambahkan sesuai variasi. Campuran dipanaskan pada suhu 85–90°C selama ±1 jam. Setelah mengental, larutan dituangkan ke dalam cetakan dan dioven pada suhu 50°C selama 7 jam. Komposisi bahan pembuatan bioplastik dapat dilihat pada

**Tabel 1.** Komposisi bahan pembuatan bioplastik.

Sampel	Pati (gram)	Karagenan (gram)	EFAME (mL)	CaCO <sub>3</sub> (gram)	Asetat (mL)	Akuades (mL)
S-1	1,33	0,67	0,25	0,1	10	20
S-2	1,33	0,67	0,25	0,3	10	20
S-3	1,33	0,67	0,25	0,5	10	20
S-4	1,33	0,67	0,75	0,3	10	20
S-5	1,33	0,67	1,25	0,3	10	20
Blanko	1,33	0,67	-	-	-	30

#### Karakterisasi

##### Uji Swelling

Sampel (1×1 cm) ditimbang ( $W_{kering}$ ), direndam dalam akuades selama 10 menit, dikeringkan dengan tisu, lalu ditimbang kembali ( $W_{basah}$ ). Persen swelling dihitung menggunakan persamaan:

$$Swelling (\%) = \frac{W_{basah} - W_{kering}}{W_{kering}} \times 100\%$$

##### Uji Spesifikasi

Uji spesifikasi pada penelitian ini hanya difokuskan pada pengukuran ketebalan film bioplastik. Pengukuran ketebalan dilakukan menggunakan mikrometer sekrup.

##### Uji Mekanik

Uji kuat tarik dilakukan menggunakan Autograph UTM (Shimadzu AG-X) dengan kecepatan 1 cm/menit. Sampel dipotong ukuran 1×1 cm dan dikaitkan ke alat uji untuk mendapatkan nilai kuat tarik, elongasi, dan modulus Young.

##### Uji Biodegradasi

Sampel bioplastik (1×1 cm) dikubur dalam tanah dan disiram setiap dua hari dengan air dan EM-4 sebagai media pembanding. Berat sampel diukur setiap dua hari selama 7 hari untuk menghitung degradasi. Persen biodegradasi dihitung menggunakan persamaan:

$$Biodegradasi (\%) = \frac{W_{\text{hari ke-7}} - W_{\text{bioplastik}}}{W_{\text{bioplastik}}} \times 100\%$$

##### Uji Morfologi (SEM)

Sampel bioplastik dipotong ukuran 5×5 cm dan dikeringkan sebelum dianalisis menggunakan SEM JSM-6360 pada pembesaran 5000×.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Agen Pengikat Silang dari Cangkang Telur

Dalam penelitian ini, agen pengikat silang diperoleh dari limbah cangkang telur ayam yang mengandung ±98,2% kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>), 0,9% magnesium, dan 0,9% fosfor [16].

Kandungan  $\text{CaCO}_3$  yang tinggi menjadikannya sumber alternatif yang ekonomis dan ramah lingkungan untuk bahan tambahan polimer.

Preparasi diawali dengan perendaman dan pencucian cangkang menggunakan air hangat untuk menghilangkan kontaminan dan sisa protein. Cangkang kemudian dikeringkan pada  $105^\circ\text{C}$  selama 30 menit, dihancurkan, dan diayak hingga diperoleh serbuk halus berukuran 100 mesh. Serbuk  $\text{CaCO}_3$  inilah yang digunakan sebagai crosslinker dalam sintesis bioplastik, karena kemampuannya membentuk ikatan ionik antara ion  $\text{Ca}^{2+}$  dan gugus sulfat dari karagenan, yang berperan dalam memperkuat struktur jaringan polimer [12] [13].

### **Bioplastik Pati Umbi Garut-Karagenan**

Bioplastik pada penelitian ini dibuat dari pati umbi garut dan karagenan (2:1), dengan penambahan EFAME sebagai pemlastis dan  $\text{CaCO}_3$  dari cangkang telur sebagai agen pengikat silang. Kombinasi bahan ini dipilih karena mudah diperoleh, murah, dan memiliki potensi sebagai material biodegradable yang ramah lingkungan.

$\text{CaCO}_3$  dilarutkan menggunakan asam asetat 8%, menghasilkan kalsium asetat, air, dan karbon dioksida. Reaksi ini penting karena  $\text{CaCO}_3$  hanya larut dalam kondisi asam, dan ion  $\text{Ca}^{2+}$  yang terbentuk memungkinkan terbentuknya ikatan ionik dengan gugus sulfat ( $-\text{SO}_3^-$ ) pada karagenan. Interaksi ini menciptakan jaringan gel yang lebih stabil melalui mekanisme gelatinisasi ionik [17].






Selama pemanasan, terjadi gelatinisasi pati dan karagenan, yang ditandai dengan pengentalan larutan. Proses ini melibatkan pembentukan ikatan intra- dan antar-molekul dalam struktur polisakarida. Pada pati dan karagenan, ikatan ini terjadi melalui gaya tarik hidrogen antara gugus hidroksil ( $-\text{OH}$ ), gugus metil, serta gaya van der Waals [17] [18]. Selain itu, gugus sulfat pada karagenan memungkinkan terbentuknya ikatan ionik tambahan ketika ion kalsium hadir sebagai agen silang. Hal ini memperkuat struktur dan meningkatkan stabilitas bioplastik.

EFAME berperan meningkatkan fleksibilitas dengan cara menyisip di antara rantai polimer. Gugus epoksi EFAME dapat berinteraksi dengan gugus hidroksil pada pati dan gugus sulfat

pada karagenan, menciptakan interaksi intermolekuler yang lebih lemah namun cukup untuk menjaga kohesi struktur [19]. Rantai alkilnya yang panjang dan bersifat hidrofobik juga membantu memperluas jarak antar rantai polimer, menghasilkan struktur yang lebih lentur dan tidak mudah rapuh.

Secara visual, bioplastik yang dihasilkan tampak sebagai lembaran tipis berwarna krem dengan bintik putih dari sisa  $\text{CaCO}_3$  yang tidak larut sempurna, seperti yang terlihat pada . Permukaannya menunjukkan perbedaan tekstur antara sisi yang menyentuh cetakan (halus) dan sisi yang terpapar udara (kasar). Variasi komposisi EFAME dan  $\text{CaCO}_3$  memengaruhi elastisitas dan kekakuan bioplastik, seperti terlihat pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Bioplastik hasil penelitian.

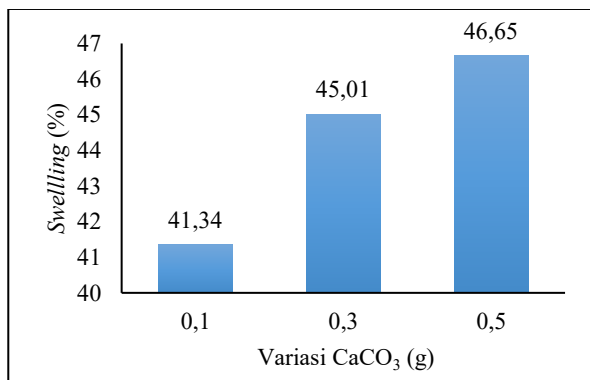
Sampel	Komposisi		Tampilan Bioplastik	Karakteristik Bioplastik
	EFAME (mL)	$\text{CaCO}_3$ (gram)		
S-1	0,25	0,1		Halus, elastis, tidak kaku
S-2	0,25	0,2		Halus, sedikit elastis, tidak kaku
S-3	0,25	0,3		Halus, sedikit elastis, tidak kaku
S-4	0,75	0,3		Agak kasar, tidak elastis, kaku
S-5	1,25	0,3		Halus, sedikit elastis, agak kaku

### **Daya Serap Air (Swelling)**

Uji swelling dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan bioplastik menyerap air, yang secara tidak langsung mencerminkan kekuatan ikatan dalam jaringan polimer dan keteraturannya. Semakin besar persentase swelling, semakin besar pula air yang diserap akibat struktur polimer yang lebih longgar. Dalam konteks ini, uji swelling digunakan untuk melihat

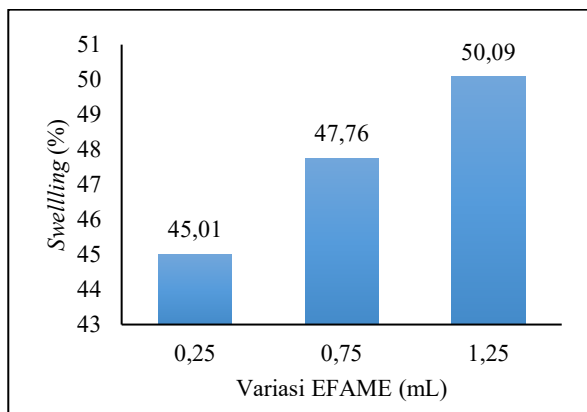
pengaruh penambahan  $\text{CaCO}_3$  sebagai agen pengikat silang dan EFAME sebagai pemlastis terhadap sifat serap air bioplastik berbasis pati umbi garut-karagenan.

Hasil pada **Gambar 1** menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi  $\text{CaCO}_3$  dari 0,1 g hingga 0,5 g menyebabkan swelling meningkat dari 41,34% menjadi 46,65%. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin banyak ion  $\text{Ca}^{2+}$  yang tersedia untuk membentuk ikatan silang dengan gugus sulfat pada karagenan, struktur jaringan menjadi lebih terbentuk namun tetap cukup terbuka untuk menyerap air. Karagenan dan pati yang bersifat hidrofilik juga mendukung daya serap air tersebut [20]. Di samping itu,  $\text{CaCO}_3$  sendiri memiliki sifat sedikit higroskopis, yang turut menambah kapasitas serap air bioplastik [14].



**Gambar 1.** Grafik pengaruh jumlah untuk variasi  $\text{CaCO}_3$ .

Selanjutnya, pengaruh jumlah untuk variasi efame terhadap derajat swelling air dapat dilihat pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Grafik pengaruh jumlah untuk variasi efame terhadap derajat swelling air.

**Gambar 2** menunjukkan bahwa penambahan EFAME dari 0,25 mL hingga 1,25 mL turut meningkatkan swelling dari 45,01% menjadi 50,09%. Efek ini disebabkan oleh peran EFAME sebagai pemlastis yang melemahkan interaksi antar rantai polimer, seperti ikatan hidrogen, sehingga struktur menjadi lebih fleksibel dan pori-pori jaringan lebih terbuka terhadap penetrasi air. Selain itu, EFAME memiliki sifat hidrofilik yang memungkinkan interaksi dengan molekul air, yang turut meningkatkan nilai swelling [21].

Data swelling keseluruhan dapat dilihat pada **Tabel 3**. Bioplastik hasil penelitian menunjukkan nilai swelling 41–50%, lebih rendah dibandingkan dengan bioplastik blanko (77,46%) dan Telobag komersial (51,17%). Hal ini menunjukkan bahwa penambahan  $\text{CaCO}_3$  dan EFAME efektif dalam mengurangi daya serap air, menjadikan bioplastik ini lebih tahan terhadap air dan berpotensi lebih stabil untuk aplikasi tertentu yang membutuhkan ketahanan terhadap kelembaban.

**Tabel 3.** Persen swelling bioplastik pati umbi garut-karagenan dan telobag.

Sampel	Variasi		Swelling (%)
	$\text{CaCO}_3$ (gram)	EFAME (mL)	
S-1	0,1	0,25	41,34
S-2	0,3	0,25	45,01
S-3	0,5	0,25	46,65
S-4	0,3	0,75	47,76
S-5	0,3	1,25	50,09
Blanko	-	-	77,46
Telobag	-	-	51,17

### Spesifikasi Ketebalan

Pengujian spesifikasi fisik dalam penelitian ini difokuskan pada pengukuran ketebalan bioplastik, yang kemudian dibandingkan dengan standar ketebalan film untuk kemasan pangan. Hasil ketebalan bioplastik berbasis pati umbi garut-karagenan dengan variasi EFAME dan  $\text{CaCO}_3$  ditampilkan pada **Tabel 4**.

Secara umum, ketebalan bioplastik yang dihasilkan berada dalam kisaran 0,19–0,25 mm, yang masih sesuai dengan batas ketebalan maksimum film kemasan plastik berdasarkan Japanese Industrial Standard (JIS) 2-1707, yaitu

0,25 mm [22]. Satu sampel, yaitu S-5, memiliki ketebalan sebesar 0,256 mm, sedikit melebihi standar tersebut. Ketebalan ini kemungkinan dipengaruhi oleh viskositas larutan yang meningkat akibat penambahan EFAME dalam jumlah lebih tinggi, sehingga menghasilkan lapisan film yang lebih tebal saat proses pencetakan.

Dibandingkan dengan bioplastik komersial seperti Telobag yang memiliki ketebalan 0,037 mm, bioplastik dalam penelitian ini relatif lebih tebal. Namun, ketebalan ini masih tergolong wajar dan dapat diterima untuk aplikasi tertentu yang lebih mengutamakan ketahanan mekanik dan kelembaban, dibandingkan fleksibilitas tinggi seperti yang dibutuhkan pada plastik sekali pakai.

**Tabel 5.**

**Tabel 5.** Sifat mekanik bioplastik yang dihasilkan dan telobag.

Sampel	Variasi		Kuat Tarik (MPa)	Elongasi (%)	Modulus Young (MPa)
	CaCO <sub>3</sub> (gram)	EFAME (mL)			
S-1	0,25	0,1	5,691	25,8	22,06
S-2	0,25	0,3	5,750	14,9	38,59
S-3	0,25	0,5	6,075	13,3	45,68
S-4	0,75	0,3	9,728	5,25	185,30
S-5	1,25	0,3	6,655	6,8	97,86
Blanko	-	-	11,463	9,3	123,26
Telobag	-	-	15,14	156	9,71

### **Kuat Tarik**

Kuat tarik digunakan untuk mengetahui seberapa besar tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh bioplastik sebelum mengalami kerusakan. Pada variasi CaCO<sub>3</sub> (**Gambar 3**), terlihat bahwa peningkatan konsentrasi CaCO<sub>3</sub> dari 0,1 g hingga 0,5 g memberikan kenaikan kuat tarik dari 5,691 MPa menjadi 6,075 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan CaCO<sub>3</sub> berperan dalam memperkuat struktur bioplastik melalui pembentukan ikatan silang antara ion kalsium (Ca<sup>2+</sup>) dengan gugus sulfat dari karagenan [17]. Ikatan ionik ini mampu meningkatkan kohesi dalam jaringan polimer, sehingga material menjadi lebih tahan terhadap gaya tarik.

Sementara itu, pada variasi EFAME (**Gambar 4**), terlihat adanya peningkatan kuat tarik yang signifikan saat EFAME ditingkatkan dari 0,25 mL menjadi 0,75 mL, yaitu dari 5,750

**Tabel 4.** Ketebalan bioplastik pati umbi garut-karagenan dan telobag.

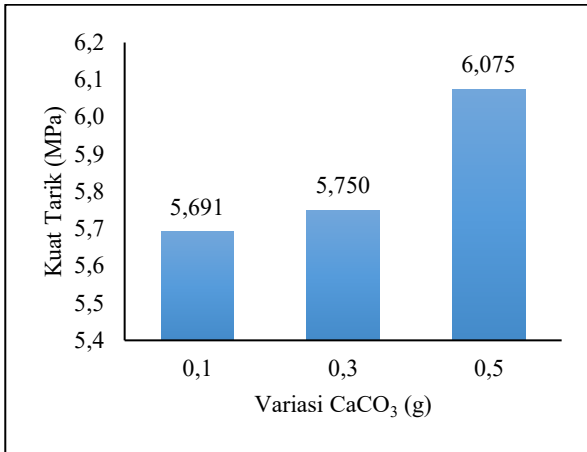
Sampel	Variasi		Ketebalan (mm)
	CaCO <sub>3</sub> (gram)	EFAME (mL)	
S-1	0,1	0,25	0,208
S-2	0,3	0,25	0,228
S-3	0,5	0,25	0,190
S-4	0,3	0,75	0,185
S-5	0,3	1,25	0,256
Telobag	-	-	0,037

### **Sifat Mekanik**

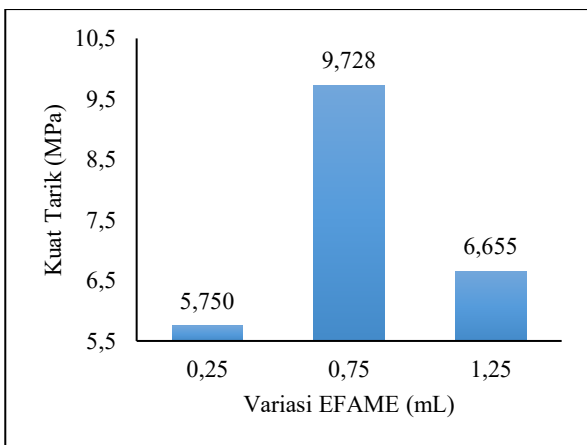
Sifat mekanik bioplastik meliputi kuat tarik, elongasi, dan modulus Young. Ketiga parameter ini menunjukkan ketahanan, kelenturan, dan kekakuan material. Data lengkap disajikan pada

MPa menjadi 9,728 MPa. Namun, peningkatan EFAME lebih lanjut hingga 1,25 mL justru menurunkan kuat tarik menjadi 6,655 MPa. Fenomena ini menunjukkan bahwa EFAME bekerja optimal sebagai pemlastis pada konsentrasi menengah, sedangkan pada konsentrasi tinggi, EFAME dapat mengganggu ikatan antarmolekul, membuat struktur polimer menjadi terlalu lunak [23].

Jika dibandingkan dengan nilai standar kuat tarik menurut SNI 7188:2014, yaitu minimum 13,7 MPa [23], maka seluruh sampel dalam penelitian ini belum memenuhi standar tersebut. Bahkan bioplastik blanko (tanpa EFAME dan CaCO<sub>3</sub>) memiliki kuat tarik yang lebih tinggi (11,463 MPa) dibandingkan seluruh sampel perlakuan. Sementara itu, produk komersial seperti Telobag menunjukkan nilai kuat tarik sebesar 15,14 MPa, yang jauh lebih tinggi dibandingkan sampel uji.



**Gambar 3.** Hasil kuat tarik bioplastik dengan variasi CaCO<sub>3</sub>.

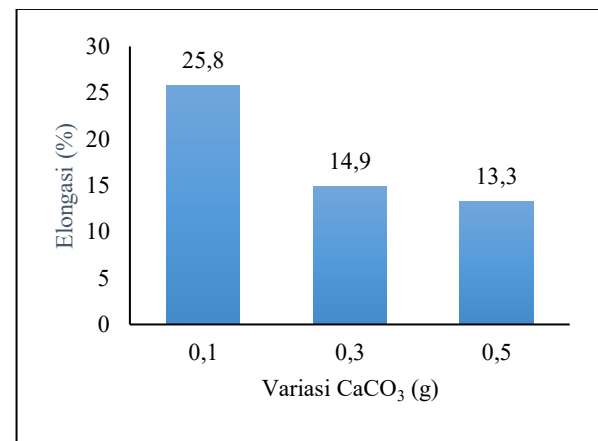


**Gambar 4.** Hasil kuat tarik bioplastik dengan variasi EFAME.

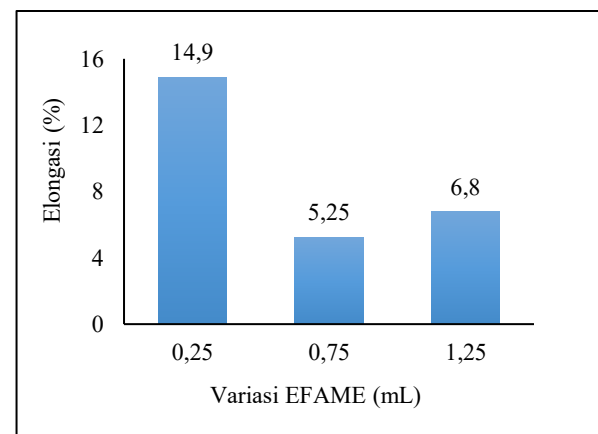
### Elongasi

Elongasi mengukur kemampuan material untuk meregang sebelum mengalami kerusakan. Pada variasi CaCO<sub>3</sub> (**Gambar 5**), nilai elongasi tertinggi diperoleh pada jumlah CaCO<sub>3</sub> terendah, yaitu 25,8% pada 0,1 g. Ketika jumlah CaCO<sub>3</sub> meningkat menjadi 0,3 g dan 0,5 g, elongasi menurun menjadi 14,9% dan 13,3%. Penurunan ini menunjukkan bahwa peningkatan pengikat silang memperkuat struktur namun mengurangi kelenturannya, karena pergerakan rantai polimer menjadi terbatas akibat terbentuknya lebih banyak ikatan silang [14]. Namun demikian, seluruh sampel dengan tambahan CaCO<sub>3</sub> memiliki elongasi yang lebih tinggi dari blanko (9,3%), yang menandakan bahwa meskipun kekakuan meningkat, densitas dan daya ikat jaringan tetap mendukung regangan.

Pada variasi EFAME (**Gambar 6**), elongasi justru menunjukkan pola yang tidak linear. Pada jumlah EFAME sebesar 0,25 mL, elongasi sebesar 14,9% diperoleh. Namun, nilai ini turun drastis menjadi 5,25% pada 0,75 mL dan hanya meningkat sedikit menjadi 6,8% pada 1,25 mL. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan EFAME dalam jumlah menengah membuat struktur bioplastik terlalu rapat atau kaku, sehingga fleksibilitasnya menurun [21]. Pada jumlah tertinggi, EFAME mulai menunjukkan kembali efek pemlastis, meskipun belum signifikan.



**Gambar 5.** Hasil elongasi bioplastik dengan variasi CaCO<sub>3</sub>.

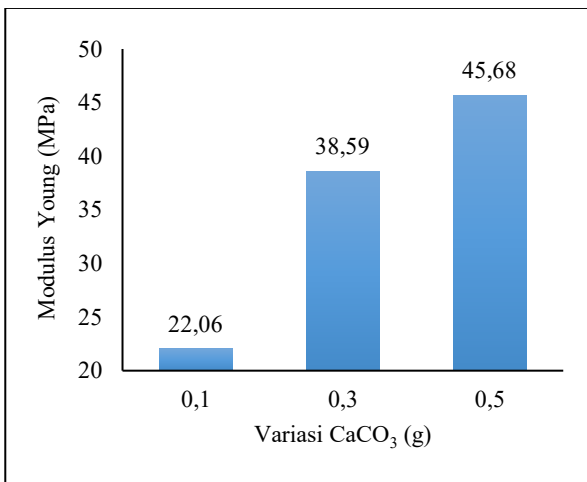


**Gambar 6.** Hasil elongasi bioplastik dengan variasi EFAME.

Menurut standar SNI 7188:2014, nilai elongasi yang disyaratkan adalah 21–220% [23]. Dalam penelitian ini, hanya satu sampel, yaitu S-1, yang memenuhi syarat tersebut dengan elongasi sebesar 25,8%. Dibandingkan dengan Telobag yang mencapai 156%, bioplastik hasil penelitian ini memiliki tingkat kelenturan yang lebih rendah.

### Modulus Young

Modulus Young atau modulus elastisitas mengukur tingkat kekakuan suatu material. Semakin tinggi nilai modulus, semakin besar gaya yang dibutuhkan untuk menyebabkan deformasi elastis. Pada variasi  $\text{CaCO}_3$  (**Gambar 7**), peningkatan konsentrasi  $\text{CaCO}_3$  dari 0,1 g ke 0,5 g menyebabkan peningkatan modulus dari 22,06 MPa menjadi 45,68 MPa. Hal ini sesuai dengan peningkatan ikatan silang yang terjadi akibat penambahan ion  $\text{Ca}^{2+}$ , yang membatasi pergerakan molekul dalam matriks bioplastik dan menjadikannya lebih kaku [17].

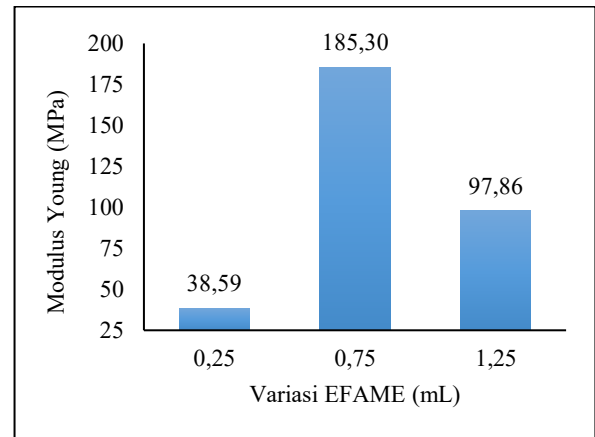


**Gambar 7.** Hasil modulus young bioplastik dengan variasi  $\text{CaCO}_3$ .

Pada variasi EFAME (**Gambar 8**), nilai modulus Young meningkat drastis dari 38,59 MPa (0,25 mL EFAME) menjadi 185,30 MPa (0,75 mL). Hal ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi menengah, EFAME justru berperan memperkuat struktur dengan cara yang tidak biasa. Akan tetapi, pada konsentrasi EFAME 1,25 mL, modulus menurun menjadi 97,86 MPa. Penurunan ini menunjukkan bahwa pada kadar tinggi, EFAME lebih berfungsi sebagai pemlastis yang melemahkan kekakuan struktur dan meningkatkan kelenturan [21].

Jika dibandingkan dengan Telobag yang memiliki modulus Young hanya 9,71 MPa, maka bioplastik dalam penelitian ini cenderung lebih kaku. Dengan rentang modulus Young antara 22–185 MPa, bioplastik ini lebih sesuai digunakan untuk aplikasi yang memerlukan kekakuan, seperti wadah makanan, sendok plastik, atau pengemas

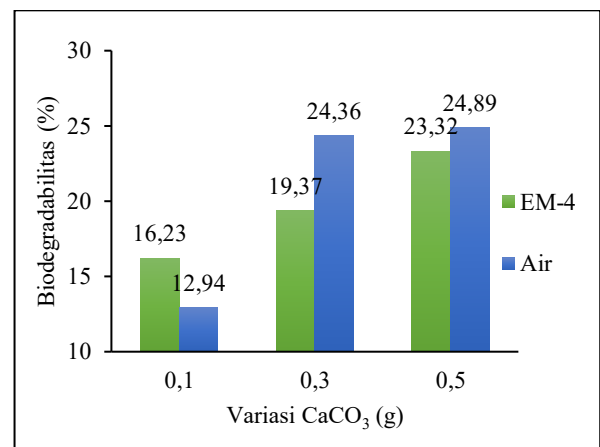
padat sekali pakai, daripada untuk aplikasi seperti kantong plastik fleksibel.



**Gambar 8.** Hasil modulus young bioplastik dengan variasi EFAME.

### Biodegradabilitas

Pengujian biodegradabilitas bertujuan untuk mengetahui seberapa cepat dan efektif bioplastik dapat terurai secara alami di lingkungan. Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan menggunakan metode *soil burial test*, yaitu dengan mengubur bioplastik dalam tanah selama 7 hari. Untuk mempercepat proses degradasi, digunakan dua jenis media siram, yakni air dan EM-4—larutan yang mengandung mikroorganisme efektif.



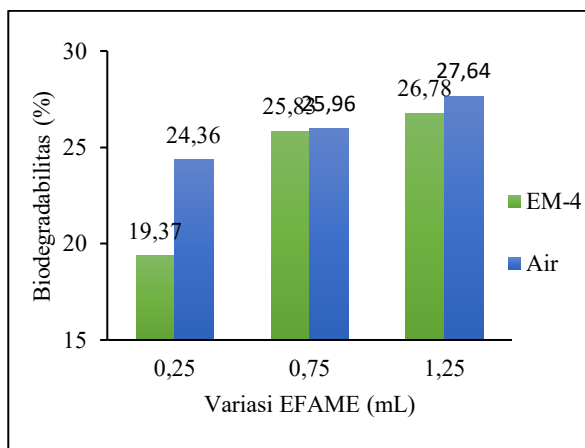
**Gambar 9.** Persen biodegradasi bioplastik dengan variasi  $\text{CaCO}_3$ .

Pada variasi  $\text{CaCO}_3$  (**Gambar 9**), terlihat bahwa penambahan senyawa ini memberikan pengaruh terhadap peningkatan biodegradasi bioplastik, baik saat disiram dengan EM-4

maupun air. Dalam media EM-4, nilai biodegradasi meningkat seiring bertambahnya konsentrasi  $\text{CaCO}_3$ : dari 16,23% (0,1 g) menjadi 19,37% (0,3 g), lalu 23,32% (0,5 g). Pola serupa juga terlihat pada media air, di mana persentasenya naik dari 12,94% menjadi 24,89%.

Peningkatan ini dapat dijelaskan secara ilmiah melalui peran  $\text{CaCO}_3$  sebagai pengikat silang yang sekaligus membentuk celah atau ruang antar matriks polimer. Celah ini memungkinkan penetrasi air dan oksigen, serta memberikan ruang bagi mikroorganisme untuk menempel dan berkembang. Mikroorganisme dapat lebih mudah mengakses rantai polimer, memecahnya dengan bantuan enzim, dan mempercepat proses degradasi [24]. Selain itu,  $\text{CaCO}_3$  juga dapat meningkatkan porositas dan luas permukaan, sehingga laju biodegradasi meningkat [25].

Sementara itu, pada variasi EFAME (**Gambar 10**), penambahan senyawa ini juga mempercepat proses degradasi. Pada media EM-4, biodegradasi meningkat dari 19,37% (0,25 mL EFAME) menjadi 26,78% (1,25 mL). Di media air, angkanya pun meningkat dari 24,36% menjadi 27,64%.



**Gambar 10.** Persen biodegradasi bioplastik dengan variasi EFAME.

EFAME yang memiliki gugus polar cenderung meningkatkan sifat hidrofilik bioplastik. Sifat ini memudahkan air meresap ke dalam struktur bioplastik, membuat material lebih lembab dan rentan mengalami kerusakan fisik. Struktur yang lembek ini memudahkan mikroorganisme menempel dan mengakses rantai polimer. Terlebih lagi, EM-4 yang mengandung mikroba seperti bakteri fotosintetik, ragi, dan

bakteri asam laktat dapat menghidrolisis komponen EFAME maupun matriks bioplastik menjadi senyawa sederhana yang lebih mudah diuraikan [26].

Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa EFAME dapat mengalami biofragmentation di lingkungan, terutama di bawah kondisi aerobik. Senyawa hasil degradasi seperti  $\text{NH}_4^+$  bahkan berpotensi menyuburkan tanah [26]. Adapun kemiripan pola dengan hasil uji swelling menunjukkan bahwa peningkatan daya serap air pada bioplastik juga berkaitan erat dengan kemampuannya untuk terdegradasi, karena air menjadi media penting bagi mikroorganisme untuk bekerja [27] [28].

Berdasarkan data pada **Tabel 6**, seluruh sampel menunjukkan tingkat biodegradasi antara 12% hingga 27% selama 7 hari penguburan. Angka ini masih jauh di bawah standar yang ditetapkan oleh SNI 7188:2016, yaitu minimal 60% dalam waktu 7 hari [29]. Sampel dengan biodegradasi tertinggi adalah S-5 (EFAME 1,25 mL dan  $\text{CaCO}_3$  0,3 g) dengan nilai 27,64% pada media siram air.

**Tabel 6.** Persen biodegradasi bioplastik pati umbi Garut-Karagenan.

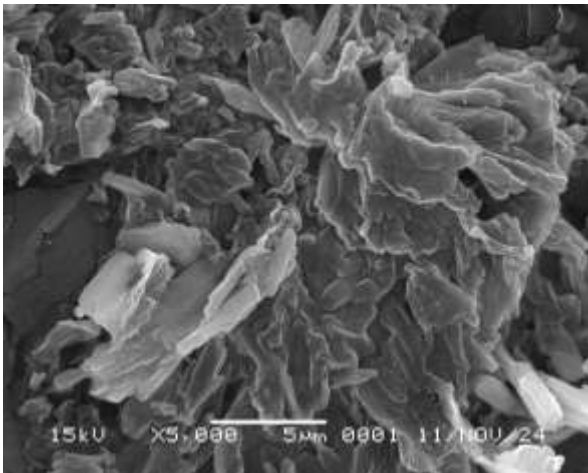
Sampel	Variasi		Biodegradasi	
	$\text{CaCO}_3$ (gram)	EFAME (mL)	Biodegradasi (%)	
			EM-4	Air
S-1	0,1	0,25	16,23	12,94
S-2	0,3	0,25	19,37	24,36
S-3	0,5	0,25	23,32	24,89
S-4	0,3	0,75	25,83	25,96
S-5	0,3	1,25	26,78	27,64

Sebagai pembanding, bioplastik blanko yang hanya terdiri dari pati dan karagenan tanpa tambahan  $\text{CaCO}_3$  dan EFAME hanya terdegradasi sebesar 18,94% (EM-4) dan 19,86% (air). Ini menunjukkan bahwa penambahan kedua bahan tersebut memang dapat meningkatkan laju biodegradasi, meskipun belum cukup untuk memenuhi standar nasional.

### Morfologi Permukaan

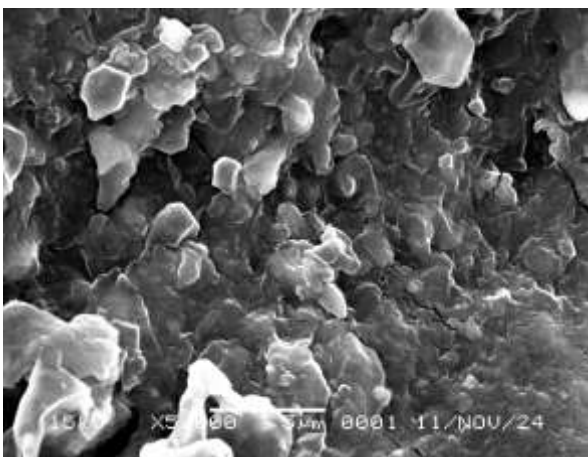
Morfologi permukaan bioplastik dianalisis menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) untuk mengamati struktur

mikro dari film bioplastik yang dihasilkan. Hasil pengamatan SEM ditampilkan pada **Gambar 11**.



**Gambar 11.** Bioplastik hasil penelitian.

Dari gambar tersebut, terlihat bahwa bioplastik hasil penelitian menunjukkan struktur permukaan yang tidak rata dengan tampilan berlapis-lapis (lamellar) dan partikel-partikel lempengan yang tersebar tidak merata. Permukaan tampak kasar, dan partikel  $\text{CaCO}_3$  terlihat tersebar namun tidak seluruhnya terintegrasi ke dalam jaringan polimer. Kehadiran celah dan retakan kecil menandakan distribusi partikel yang masih belum homogen.

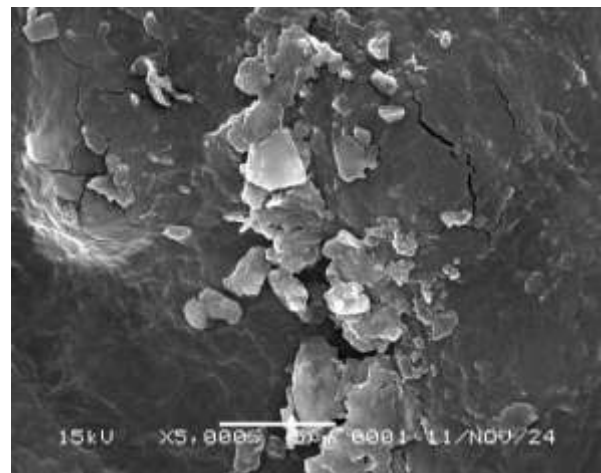


**Gambar 12.** Bioplastik blanko.

Struktur ini menunjukkan bahwa kombinasi pati, karagenan, EFAME, dan  $\text{CaCO}_3$  mampu menghasilkan morfologi yang lebih kompleks dibandingkan bioplastik blanko (**Gambar 12**), yang tampak lebih kasar dan tidak beraturan, dengan aglomerasi partikel besar yang menandakan kurangnya dispersi dan gelatinisasi

yang baik [30] [31-44]. Bioplastik blanko juga tidak menunjukkan struktur lamellar yang berarti, karena tidak adanya bahan tambahan seperti pengikat silang dan pemlastis.

Namun, ketika dibandingkan dengan Telobag, sebuah produk bioplastik komersial (**Gambar 13**), perbedaan morfologi menjadi sangat jelas. Permukaan Telobag terlihat lebih halus, dengan distribusi partikel yang lebih merata dan nyaris tanpa celah besar. Struktur yang tampak homogen ini menunjukkan kualitas formulasi yang telah dioptimasi secara industri, baik dari sisi bahan baku, proses pencampuran, pencetakan, hingga pengeringan. Retakan kecil yang mungkin timbul akibat gaya eksternal tidak berkembang luas, karena kekompakan matriks yang baik memberikan stabilitas struktural lebih tinggi.



**Gambar 13.** Telobag.

Dengan demikian, bioplastik hasil penelitian ini menunjukkan peningkatan struktur mikro dibandingkan blanko, berkat peran  $\text{CaCO}_3$  yang menciptakan ikatan silang dan EFAME yang membantu pelunakan struktur. Namun, kualitas morfologinya masih kalah rapat dan homogen dibandingkan Telobag, yang telah diformulasikan secara optimal di skala industri. Hasil ini menunjukkan bahwa untuk mencapai performa morfologi setara produk komersial, pengembangan formulasi dan proses produksi bioplastik masih perlu ditingkatkan.

## SIMPULAN

Penelitian ini berhasil menghasilkan dan mengkarakterisasi bioplastik berbasis pati umbi

garut-karagenan dengan penambahan EFAME sebagai pemlastis dan  $\text{CaCO}_3$  sebagai pengikat silang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi bahan ini memengaruhi sifat fisik, mekanik, biodegradasi, dan morfologi bioplastik secara signifikan.

Uji swelling menunjukkan peningkatan daya serap air seiring penambahan EFAME dan  $\text{CaCO}_3$ . Namun, seluruh sampel tetap memiliki tingkat swelling yang lebih rendah dibandingkan blanko dan Telobag, menunjukkan ketahanan air yang lebih baik.

Secara spesifikasi, ketebalan bioplastik berkisar antara 0,19–0,25 mm, mayoritas masih sesuai dengan batas standar JIS 2-1707. Hanya sampel dengan EFAME tertinggi (S-5) yang sedikit melebihi batas tersebut.

Dalam pengujian mekanik, sampel S-1 (EFAME 0,25 mL;  $\text{CaCO}_3$  0,1 g) menunjukkan kinerja paling seimbang, dengan kuat tarik 5,691 MPa, elongasi 25,8%, dan modulus Young 22,06 MPa. Meskipun nilai kuat tarik belum memenuhi standar SNI 7188:2014 ( $\geq 13,7$  MPa), elongasi S-1 telah masuk dalam rentang standar (21–220%), menjadikannya sampel paling fleksibel dan relatif kuat dibandingkan variasi lain.

Uji biodegradasi selama 7 hari dalam media tanah menunjukkan bahwa EM-4 lebih efektif dibanding air. Biodegradasi tertinggi tercapai pada S-5 (27,64%), namun tetap belum memenuhi standar SNI 7188:2016 ( $>60\%$ ). Meski demikian, penambahan EFAME dan  $\text{CaCO}_3$  terbukti membantu percepatan degradasi.

Analisis morfologi SEM menunjukkan bahwa bioplastik hasil penelitian memiliki struktur permukaan lebih kompleks daripada blanko, tetapi masih kurang homogen dibanding Telobag. Kehadiran partikel  $\text{CaCO}_3$  membentuk lapisan flaky, namun belum merata sempurna.

Secara keseluruhan, bioplastik pati umbi garut-karagenan dengan komposisi seperti pada sampel S-1 dinilai paling optimal dari segi fleksibilitas dan struktur permukaan. Namun, untuk dapat bersaing dengan produk komersial seperti Telobag, diperlukan optimasi lebih lanjut pada formulasi dan proses produksinya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Bapak Dr. Soni Setiadji, M.T., M.Si.

sebagai dosen pembimbing 1 dan Ibu Nova Pratiwi Indriyani, M.Si. sebagai dosen pembimbing 2 atas bimbingan dan dukungan selama proses penelitian. Apresiasi juga disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu, baik melalui dukungan akademik, teknis, maupun dorongan semangat yang turut mendampingi penyelesaian penelitian ini.

## REFERENSI

- [1] L. Parker, "A whopping 91% of plastic isn't recycled," National Geographic, 20 Desember 2018. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/plastic-produced-recycling-waste-ocean-trash-debris-environment>. [Diakses 17 Juni 2023].
- [2] Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), "Komposisi Sampah," 2022. [Online]. Available: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/komposisi>. [Diakses 24 April 2023].
- [3] A. H. A. Radtra dan S. Udjiana, "Pembuatan Plastik Biodegradable Dari Pati Limbah Tongkol Jagung (*Zea mays*) Dengan Penambahan Filler Kalsium Silikat Dan Kalsium Karbonat," *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 7, no. 2, pp. 427-435, 2021.
- [4] S. Pérez dan E. Bertoft, "The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review," *Starch*, vol. 62, no. 8, pp. 389-420, 2010.
- [5] A. Shafqat, N. Al-Zaqri, A. Tahir dan A. Alsalmeh, "Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers," *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 28, no. 3, pp. 1739-1749, 2021.
- [6] R. F. Santana, R. C. F. Bonomo, O. R. R. Gandolfi, L. B. Rodrigues, L. S. Santos, D. Santos, A. C. Pires, C. P. de Oliveira, R. da Costa Ilhéu Fontan dan C. M. Veloso, "Characterization of starch-based bioplastics from jackfruit seed plasticized with glycerol," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 55, no. 1, pp. 278-286, 2018.

- [7] M. M. Abe, J. R. Martins, P. B. Sanvezzo, J. V. Macedo, M. C. Branciforti, P. Halley, V. R. Botaro dan M. Brienza, "Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from Starch and Lignocellulosic Components," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 15, p. 2484, 2021.
- [8] C. Cheng, S. Chen, J. Su, M. Zhu, M. Zhou, T. Chen dan Y. Han, "Recent advances in carrageenan-based films for food packaging applications," *Frontiers in Nutrition*, vol. 9, 2022.
- [9] M. G. Tasende dan J. Manriquez-Hernandez, "Carrageenan Properties and Applications: A Review," dalam *Carrageenans: Sources and Extraction Methods, Molecular Structure, Bioactive Properties and Health Effects*, Nova Science Publishers, 2016, pp. 17-50.
- [10] J. Wang, X. Zhao and D. Liu, "Preparation of Epoxidized Fatty Acid Methyl Ester with in situ Auto-Catalyzed Generation of Performic Acid and the Influence of Impurities on Epoxidation," *Waste Biomass Valor*, vol. 9, p. 1881-1891, 2018.
- [11] M. G. A. Vieira, M. A. da Silva, L. O. dos Santos dan M. M. Beppu, "Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review," *European Polymer Journal*, vol. 47, no. 3, pp. 254-263, 2011.
- [12] A. Ridlo, S. Sedjati, E. Supriyanti dan D. A. Zanjabila, "Pengembangan Dan Karakterisasi Bioplastik Karagenan-Alginat-Gliserol Dengan Perlakuan Kalsium Klorida," *Buletin Oseanografi Marina*, vol. 12, no. 1, pp. 43-53, 2023.
- [13] S. Sariyer, D. Duranoğlu, Ö. Doğan dan İ. Küçük, "pH-responsive double network alginate/kappa-carrageenan hydrogel beads for controlled protein release: Effect of pH and crosslinking agent," *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, vol. 56, 2020.
- [14] L. Nuriyah, G. Saroja dan J. Rohmad, "The Effect of Calcium Carbonate Addition to Mechanical Properties of Bioplastic Made from Cassava Starch with Glycerol as Plasticizer," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 546*, 2019.
- [15] Y. R. Hasanah dan H. Haryanto, "Pengaruh Penambahan Filler Kalsium Karbonat (CaCO<sub>3</sub>) Dan Clay Terhadap Sifat Mekanik Dan Biodegradable Plastik Dari Limbah Tapioka," *Jurnal Techno*, vol. 18, no. 2, pp. 96-107, 2017.
- [16] A. M. King ori, "A Review of the Uses of Poultry Eggshells and Shell Membranes," *International Journal of Poultry Science*, vol. 10, no. 11, pp. 908-912, 2011.
- [17] M. Tako, Y. Tamaki, T. Teruya dan Y. Takeda, "The Principles of Starch Gelatinization and Retrogradation," *Food and Nutrition Sciences*, vol. 5, pp. 280-291, 2014.
- [18] T. Bourtoom dan M. S. Chinnan, "Preparation and properties of rice starch-chitosan blend biodegradable film," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 41, no. 5, pp. 1633-1641, 2008.
- [19] Z. Xie, Y. Chen, C. Wang, Y. Liu, F. Chu dan L. Jin, "Effects of bio-based plasticizers on mechanical and thermal properties of PVC/wood flour composites," *BioResources*, vol. 9, no. 4, pp. 7389-7402, 2014.
- [20] R. D. Ismawanti, W. D. R. Putri, E. S. Murtini dan H. Purwoto, "Edible Film Made of Corn Starch-Carrageenan-Rice Bran: The Characteristic of Formula's Viscosity, Water Content, and Water Vapor Transmission Rate," *Industria: Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*, vol. 9, no. 3, pp. 173-183, 2020.
- [21] A. Ghosh-dastidar, R. F. Eaton, A. Adamczyk, B. M. Bell dan R. M. Campbell, "Vegetable-oil derived plasticizer". United States Patent WO2013003225A2, 3 Januari 2013.
- [22] M. Rahmawati, M. Arief dan W. H. Satyantini, "The Effect of Sorbitol Addition on the Characteristic of Carrageenan Edible Film," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 236, pp. 1-8, 2019.
- [23] K. S. D. N. Dewi, N. L. Yulianti dan Y. Setiyo, "Karakteristik Fisik Kemasan Bioplastik dari Pati Singkong dan Karagenan dengan Variasi Durasi Gelatinisasi dan Jenis Plasticizer," *Jurnal Beta (Biosistem Dan Teknik Pertanian)*, vol. 11, no. 2, pp. 289-296, 2023.
- [24] S. Hegde, E. Dell, C. Lewis, T. A. Trabold dan C. A. Diaz, "Anaerobic Biodegradation of Bioplastic Packaging Materials," *The 21st IAPRI World*

- Conference on Packaging*, 2018.
- [25] N. T. Berghuis, D. K. Mutmainah, M. N. Savitri, A. Meri, D. D. Yunita, F. Awaluddin, R. R. Peranginangin, A. Nursalsabila dan R. K. Bramasta, "Bioplastic from Cassava peel and eggshell waste," *Journal of Natural Science and Mathematics Research*, vol. 8, no. 2, pp. 75-83, 2022.
- [26] E. Ariyanto, S. Mayasari dan D. Kharismadewi, "Pengaruh Penambahan Effective Microorganisms-4 Sebagai Biocatalyst Terhadap Peningkatan Konsentrasi Ammonium Sebagai Sumber Pupuk," *Jurnal Indobiosains*, vol. 4, no. 1, pp. 28-35, 2022.
- [27] M. Rizwan dan T. Jamal, "Degradation of Bioplastics under the Influence of Several Environmental conditions," *International Journal of Innovations in Science & Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 93-101, 2021.
- [28] D. Adhikari, M. Mukai, K. Kubota, T. Kai, N. Kaneko, K. S. Araki dan M. Kubo, "Degradation of Bioplastics in Soil and Their Degradation Effects on Environmental Microorganisms," *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, vol. 5, pp. 23-34, 2016.
- [29] M. R. B. Saputra dan E. Supriyo, "Pembuatan Plastik Biodegradable Menggunakan Pati Dengan Penambahan Katalis ZnO dan Stabilizer Gliserol," *PENTANA*, vol. 1, no. 1, pp. 41-51, 2020.
- [30] M. R. Amin, M. A. Chowdhury dan M. A. Kowser, "Characterization and performance analysis of composite bioplastics synthesized using titanium dioxide nanoparticles with corn starch," *Heliyon*, vol. 5, 2019.
- [31] S Setiadji, *et al.*, "Synthesis of Polydimethylsiloxane and its Monomer from Hydrolysis of Dichlorodimethylsilane", *Key Engineering Materials* 860, 234-238, 2020.
- [32] S Setiadji, *et al.*, "Optimization of Polydimethylsiloxane synthesized parameters as vitreous humour substitutes", *Materials Science Forum* 966, 189-193, 2019.
- [33] DG Auliya, *et al.*, "Physical characterization and in vitro toxicity test of PDMS synthesized from low-grade d4 monomer as a vitreous substitute in the human eyes", *Journal of Functional Biomaterials* 13 (1), 3, 2022.
- [34] S Setiadji, *et al.*, "Synthesis and Characterization of Polydimethylsiloxane (PDMS) with Medium Viscosity via Ring-Opening Polymerization", *Materials Science Forum* 1028, 346-351, 2021.
- [35] DG Auliya, *et al.*, "Synthesis of low viscosity polydimethylsiloxane using low grade of octamethylcyclotetrasiloxane", *Materials Science Forum* 1028, 365-370, 3, 2021.
- [36] S SETIADJI, *et al.*, "Uji stabilitas bahan polydimethylsiloxane", *J. Material dan Energi Indonesia* 9, 8-17, 2019.
- [37] DG Auliya, *et al.*, "Use of Dichlorodimethylsilane to Produce polydimethylsiloxane as a substitute for vitreous humour: characteristics and in vitro toxicity", *Journal of Functional Biomaterials* 14 (8), 425, 2023.
- [38] U Fauziah, *et al.*, "Synthesis of Polydimethylsiloxane with hydrolysis and condensation methods using monomer of Dichlorodimethylsilane as vitreous humour substitute", *Journal of Physics: Conference Series* 2165 (1), 012026, 2022.
- [39] DG Auliya, *et al.*, "Stability Test and Storage of PDMS as a Biomaterial for Vitreous Humour Substitution in Vitreoretinal Surgery", *Applied Mechanics and Materials* 915, 25-30, 2023.
- [40] VF Arini, *et al.*, "Synthesis of low viscosity of polymethylhydrosiloxane using monomer of dichloromethylsilane", *Journal of Physics: Conference Series* 2165 (1), 012041, 2022.
- [41] W Waslaluiddin, *et al.*, "Formulation, Process, and Scale-Up Engineering of Silicone Oil", *Materials Science Forum* 1028, 377-382, 2021.
- [42] D SANDI, *et al.*, "Sintesis Dan Karakterisasi Monomer Pengganti Octamethylcyclotetrasiloxane Dari Hidrolisis Senyawa Dichlorodimethylsilane", *Jurnal Material dan Energi Indonesia* 10 (02), 83-88, 2020.
- [43] DG Auliya, *et al.*, "Enhance the viscosity of polydimethylsiloxane by controlling the volume ratio of monomer and chain terminator", *AIP Advances* 14 (10), 2024.



- [44] DG Auliya, *et al.*, "Tailoring polymethylhydrosiloxane as candidate material for vitreous humour substitution: physical properties and in vitro toxicity", BMC chemistry 19 (1), 210, 2025.