

POTENSI BIOPLASTIK BERBASIS L NABATI SEBAGAI MATERIAL KEMASAN RANSUM MILITER: REVIEW JURNAL

Danfort Alexander Cordenov Trinanda¹, Anggi Khairina Hanum Hasibuan², Dewi Angraini Septaningsih³
danfort.act@gmail.com¹, anggi.khairina@gmail.com², dewi.2986@gmail.com³
Universitas Pertahanan

<i>Article Info</i>	ABSTRAK
<p>Article history: Published Mei 31, 2026</p> <hr/> <p>Kata Kunci: Compact Heat Exchanger, Vortex Generator, Curve Delta Winglet, Simulasi Aliran Solidworks.</p>	<p>Compact heat exchanger merupakan salah satu jenis heat exchanger yang mempunyai luas perpindahan panas per satuan volume paling besar ($\geq 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ untuk zat cair dan $\geq 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ untuk gas) yang terdiri dari sirip dan tabung. Namun sering ditemukan penurunan kinerja perpindahan panas pada penukar panas. Untuk meningkatkan kinerja perpindahan panas, dilakukan perubahan pada permukaan.</p>

Keywords:	ABSTRACT
<p>Compact Heat Exchanger, Vortex Generator, Curve Delta Winglet, Solidworks Flow Simulation.</p>	<p>The compact heat exchanger is one type of heat exchanger which has an area of heat transfer per unit volume the largest ($\geq 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ for liquids and $\geq 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ for gases) which is composed of fin and tube. But often found a decrease in heat transfer performance on a heat exchanger. To increase the heat transfer performance, changes are made on the surface of.</p>

1. PENDAHULUAN

Dalam industri pertahanan, kebutuhan akan sistem logistik yang efisien dan berkelanjutan semakin meningkat seiring dengan dinamika operasi militer modern. Salah satu komponen penting dalam sistem logistik tersebut adalah ransum militer, seperti sistem Meal, Ready-to-Eat (MRE) yang digunakan secara luas oleh militer berbagai negara, termasuk militer Amerika Serikat melalui program United States Department of Defense. Sistem ransum ini dirancang untuk memiliki masa simpan panjang, tahan terhadap kondisi ekstrem, serta mampu menjaga keamanan dan kualitas pangan. Namun, material kemasan konvensional yang digunakan umumnya berbasis polimer minyak bumi multilapis yang sulit terurai dan menghasilkan limbah dalam jumlah besar setelah digunakan [1].

Permasalahan limbah kemasan militer menjadi perhatian global karena operasi militer di lapangan sering kali menghasilkan akumulasi sampah non-biodegradable yang sulit dikelola, terutama pada daerah operasi terpencil. Selain itu, penggunaan plastik berbasis

petrokimia berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon dan ketergantungan pada sumber daya tak terbarukan [2]. Meskipun daur ulang dan pengumpulan sampah efektif dalam mengurangi volume plastik yang masuk ke lingkungan, metode ini tidak mengatasi akar penyebab pencemaran plastik [1]. Oleh karena itu, pengembangan material kemasan alternatif yang ramah lingkungan (green material), dapat diperbarui, serta tetap memenuhi standar performa militer menjadi sangat penting.

Salah satu solusi yang sedang berkembang adalah pemanfaatan bioplastik berbasis bahan hayati, khususnya yang berasal dari komponen lipid atau lemak nabati. Bioplastik didefinisikan sebagai material polimer yang berasal dari biomassa dan/atau bersifat biodegradable. Menurut laporan European Bioplastics, produksi bioplastik global terus meningkat setiap tahunnya sebagai respons terhadap tuntutan keberlanjutan industri [2]. Baru-baru ini, terdapat peningkatan minat dalam menggunakan bioplastik yang dapat terurai secara hayati yang terbuat dari asam polilaktat, polihidroksialkanoat, dan polibutilena karena daya tahan yang rendah. Akibatnya, bahan kimia ini dapat digunakan sebagai plastik tradisional [3]. Sayangnya, bahan kimia ini harus disintesis, yang berarti biaya relatif tinggi dan degradasi yang lambat untuk aplikasi industri. Di antara berbagai bahan terbarukan, lemak nabati adalah salah satu alternatif dalam pembuatan bioplastik. Bioplastik berbasis lemak, seperti yang disintesis dari asam lemak, trigliserida, atau turunan minyak nabati, memiliki potensi sebagai bahan pembentuk film kemasan karena sifat hidrofobiknya yang dapat meningkatkan ketahanan terhadap uap air [4]. Penelitian Hernando et al. melaporkan bahwa kombinasi gliserol (10–30% v/w) dan CEPO (minyak sawit teroksidasi asam sitrat) melalui metode solution casting secara signifikan memengaruhi sifat mekanik, termal, serta degradasi bioplastik, dengan sampel ST-CEPO-GLY30 menunjukkan degradasi hingga 94,73% dalam 15 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa formulasi tersebut berpotensi sebagai alternatif kemasan ramah lingkungan berbasis hayati, meskipun optimalisasi sifat dan evaluasi dampak lingkungan lebih lanjut masih diperlukan [5].

Dalam aplikasi kemasan pangan, karakteristik utama yang harus dipenuhi meliputi kekuatan mekanik, ketahanan sobek, elastisitas, stabilitas termal, serta sifat barrier terhadap oksigen dan uap air. Parameter-parameter tersebut sangat menentukan kemampuan kemasan dalam menjaga mutu produk, memperpanjang masa simpan, serta melindungi pangan dari kerusakan akibat oksidasi dan kelembapan. Menurut Siracusa et al., performa barrier terhadap oksigen dan uap air merupakan faktor krusial dalam sistem kemasan aktif maupun pasif karena berkaitan langsung dengan stabilitas kimia dan mikrobiologis produk pangan [6]. Selain itu, Rhim et al. menegaskan bahwa sifat mekanik seperti tensile strength, elongation at break, dan modulus elastisitas menjadi indikator utama dalam menentukan kelayakan film biopolimer untuk aplikasi kemasan, terutama dalam proses distribusi dan penanganan logistik [7].

Penambahan komponen lipid pada matriks biopolimer diketahui mampu meningkatkan sifat hidrofobik material sehingga menurunkan permeabilitas uap air (water vapor permeability). Falguera et al. melaporkan bahwa inkorporasi lipid dalam film berbasis polisakarida atau protein dapat memperbaiki ketahanan terhadap kelembapan, meskipun sering kali menyebabkan penurunan kekuatan tarik akibat berkurangnya interaksi antar-rantai polimer [8]. Hal serupa juga dilaporkan oleh Vieira et al. (2011), yang menunjukkan bahwa komposisi plastisizer dan lipid sangat memengaruhi keseimbangan antara fleksibilitas dan kekuatan mekanik film bioplastik [4]. Oleh karena itu, optimasi formulasi menjadi aspek penting dalam memastikan bahwa peningkatan sifat barrier tidak mengorbankan integritas struktural material.

Dalam konteks kemasan ransum militer, stabilitas termal menjadi aspek yang sangat

vital karena produk harus mampu bertahan dalam variasi suhu ekstrem, mulai dari wilayah tropis lembap hingga lingkungan gurun atau bersuhu rendah. Sistem ransum seperti Meal, Ready-to-Eat (MRE) yang digunakan oleh United States Department of Defense dirancang untuk memiliki masa simpan panjang dan ketahanan terhadap fluktuasi suhu selama penyimpanan dan distribusi [9]. Evaluasi stabilitas termal bioplastik umumnya dilakukan menggunakan Thermogravimetric Analysis (TGA) untuk menentukan suhu degradasi dan kehilangan massa termal, serta Differential Scanning Calorimetry (DSC) untuk mengidentifikasi suhu transisi kaca (glass transition temperature) dan titik leleh material. Menurut Arrieta et al., parameter-parameter termal tersebut sangat penting dalam menentukan kesesuaian biopolimer untuk aplikasi kemasan yang memerlukan ketahanan panas [10].

Selain aspek teknis, keberlanjutan bahan baku juga menjadi pertimbangan strategis. Indonesia sebagai salah satu produsen utama minyak kelapa sawit dunia memiliki potensi besar dalam pengembangan bioplastik berbasis lemak nabati. Data dari Food and Agriculture Organization menunjukkan bahwa minyak nabati merupakan sumber lipid terbarukan yang melimpah dan dapat dimanfaatkan sebagai prekursor polimer ramah lingkungan. Pemanfaatan minyak kelapa sawit, minyak kelapa, maupun turunan asam lemak lainnya dalam sintesis bioplastik tidak hanya meningkatkan nilai tambah komoditas nasional, tetapi juga sejalan dengan konsep sustainable defense logistics, yaitu integrasi prinsip keberlanjutan dalam sistem logistik pertahanan.

Meskipun penelitian mengenai bioplastik untuk kemasan pangan komersial telah berkembang pesat, kajian yang secara spesifik mengevaluasi kesesuaiannya untuk kebutuhan militer masih relatif terbatas. Padahal, standar kemasan militer umumnya lebih ketat dibandingkan kemasan komersial, terutama dalam aspek ketahanan mekanik, stabilitas termal, dan umur simpan panjang. Oleh karena itu, tinjauan komprehensif terhadap karakteristik struktural, sifat mekanik, serta stabilitas termal bioplastik berbasis lemak nabati menjadi penting untuk menilai kelayakannya sebagai material kemasan ransum militer yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

2. METODOLOGI

Metode penelitian yang digunakan dalam penyusunan artikel ini adalah metode penelitian kepustakaan (Library Research). Metode ini dilakukan dengan cara mengumpulkan, menelaah, serta menganalisis berbagai sumber literatur yang relevan dengan topik yang diangkat. Data diperoleh dari buku ilmiah, jurnal nasional dan internasional terindeks, prosiding seminar, laporan penelitian, standar pengujian material, serta sumber ilmiah daring yang berkaitan dengan bioplastik berbasis lemak nabati.

Literatur yang dikaji mencakup pembahasan mengenai potensi lemak nabati (seperti minyak kelapa sawit, minyak kedelai, dan minyak jarak) sebagai bahan baku bioplastik, proses sintesis dan modifikasi kimianya, serta karakterisasi material yang dihasilkan. Selain itu, dilakukan telaah terhadap berbagai penelitian yang membahas sifat mekanik (kuat tarik, elongasi, dan modulus elastisitas), stabilitas termal (analisis TGA dan DSC), serta ketahanan terhadap lingkungan (kelembapan, oksidasi, dan degradasi biologis) dalam konteks aplikasinya sebagai material kemasan ransum militer.

Data yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengidentifikasi keunggulan, keterbatasan, serta peluang pengembangan bioplastik berbasis lemak nabati sebagai alternatif material kemasan yang ramah lingkungan, memiliki ketahanan mekanik yang baik, serta stabil terhadap kondisi penyimpanan ekstrem yang umum ditemui dalam distribusi dan penyimpanan ransum militer.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada artikel ini membahas karakterisasi bioplastic berbasis lemak mencakup Minyak kelapa sawit,

Minyak Kelapa Sawit

Minyak kelapa sawit merupakan salah satu sumber bahan baku terbarukan yang sangat potensial karena ketersediaannya yang melimpah, khususnya di negara-negara tropis seperti Indonesia dan Malaysia. Selain sebagai bahan pangan dan biodiesel, minyak kelapa sawit juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber karbon dalam produksi polimer biodegradable seperti polyhydroxyalkanoates (PHA). Pemanfaatan minyak nabati sebagai bahan baku bioplastik dinilai mampu menurunkan ketergantungan terhadap bahan baku fosil sekaligus mendukung konsep ekonomi sirkular berbasis biomassa.[11]

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa minyak kelapa sawit maupun turunannya, seperti epoxidized palm oil (EPO) dan limbah industri kelapa sawit (misalnya palm oil mill effluent/POME), dapat digunakan sebagai bahan baku atau bahan aditif dalam pembuatan bioplastik. Misalnya, penelitian terbaru menunjukkan bahwa minyak kelapa sawit dapat meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan air pada bioplastik berbasis pati, sehingga memperbaiki kelemahan utama bioplastik konvensional yang umumnya bersifat rapuh dan mudah menyerap air.[12]

Hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa gugus fungsi utama penyusun pati, yaitu –OH, C–H, C=O, dan C–O–C (cincin anhidroglukosa), teridentifikasi pada rentang bilangan gelombang 3300–3311 cm^{-1} , 2922–2855 cm^{-1} , 1640–1650 cm^{-1} , serta 1006–1117 cm^{-1} , yang mengonfirmasi keberadaan struktur amilosa dan amilopektin dalam matriks bioplastik. Pada wilayah bilangan gelombang rendah, pita vibrasi cincin glukosa bertumpang tindih dengan vibrasi regangan dan tekukan C–OH serta ikatan glikosidik C–O–C. Penambahan CEPO menyebabkan pergeseran pita –OH dari 3284 cm^{-1} menjadi 3272 cm^{-1} hingga 3262 cm^{-1} pada larutan oligomer, yang menunjukkan terbentuknya ikatan hidrogen antara gugus hidroksil pati dan atom oksigen dari CEPO. Pergeseran ke bilangan gelombang yang lebih rendah ini mengindikasikan penurunan energi vibrasi akibat interaksi antarmolekul dan peningkatan kompatibilitas dalam sistem pati–CEPO.

Selain itu, intensitas pita regangan simetris C–H pada 2922–2877 cm^{-1} menurun seiring peningkatan konsentrasi CEPO, yang dikaitkan dengan perubahan lingkungan molekuler akibat interaksi seperti ikatan hidrogen dan gaya van der Waals. Peningkatan konsentrasi minyak juga memperkuat pita serapan pada 1644–1571 cm^{-1} (C=O) serta memunculkan puncak pada 1385 cm^{-1} yang berkaitan dengan tekukan dalam bidang gugus –OH. Spektrum oligomer CEPO menunjukkan karakteristik khas pada regangan O–H (3262 cm^{-1}), C–O (1571–1373 cm^{-1}), dan C=O (1570–1680 cm^{-1}), yang mendukung adanya mekanisme interaksi kimia dan fisik antara pati dan CEPO. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan CEPO memodifikasi struktur internal matriks pati, meningkatkan homogenitas, serta berpotensi memperbaiki sifat mekanik dan stabilitas bioplastik untuk aplikasi kemasan.

Analisis termal bioplastik pati–CEPO–gliserol melalui TGA dan DTG menunjukkan tiga tahap utama dekomposisi pada rentang suhu 30–250 °C, 250–345 °C, dan 345–500 °C. Tahap pertama (di bawah 100 °C) berkaitan dengan hilangnya kadar air dan senyawa bermassa molekul rendah akibat pelemahan ikatan air dalam matriks film. Tahap kedua dikaitkan dengan penguapan gliserol dan pelepasan air terikat, sedangkan tahap ketiga merepresentasikan degradasi utama pati, gliserol, dan CEPO. Sampel ST-CEPO-GLY10 menunjukkan stabilitas termal lebih baik dengan nilai T5% dan Tmax masing-masing sebesar 200,2 °C dan 302,1 °C. Peningkatan konsentrasi gliserol menurunkan T5% dan Tmax, yang mengindikasikan bahwa kadar gliserol tinggi menurunkan stabilitas termal akibat keberadaan gliserol bebas dan air terikat. Kurva DTG juga menunjukkan bahwa

formulasi dengan gliserol lebih rendah memiliki kestabilan termal lebih baik dibandingkan konsentrasi 20% dan 30%, sehingga reduksi kadar gliserol direkomendasikan untuk meningkatkan ketahanan panas bioplastik.

Hasil DSC memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan perubahan perilaku pelelehan (T_m) dan kristalinitas akibat variasi gliserol. Sampel dengan 10% gliserol menunjukkan puncak leleh yang lebih lebar, intensitas lebih rendah, serta Tonset dan T_m lebih tinggi, yang menandakan struktur kristalin lebih stabil. Penambahan gliserol hingga 20% dan 30% menyebabkan puncak leleh bergeser ke suhu lebih rendah dan menjadi lebih tajam, bahkan muncul beberapa puncak T_m , yang mengindikasikan penurunan kompatibilitas serta perubahan struktur kristalin. Fenomena ini berkaitan dengan penurunan berat molekul pati akibat hidrolisis, gangguan pada fraksi amilopektin sebagai pembentuk kristal utama, serta peningkatan mobilitas rantai polimer akibat berkurangnya keterikatan antarrantai. Secara keseluruhan, peningkatan kadar gliserol meningkatkan fleksibilitas namun menurunkan stabilitas termal dan keteraturan kristalin, sehingga komposisi optimum diperlukan untuk menghasilkan bioplastik dengan keseimbangan sifat mekanik dan ketahanan panas yang sesuai untuk aplikasi kemasan.

Pengujian sifat mekanik menunjukkan bahwa peningkatan kadar gliserol secara signifikan memengaruhi kuat tarik (TS), elongasi saat putus (EAB), dan modulus Young (YM) bioplastik pati-CEPO. Nilai TS menurun seiring peningkatan gliserol, dari 7,71 MPa (GLY10) menjadi 5,73 MPa (GLY20) dan 4,03 MPa (GLY30), yang menunjukkan bahwa penambahan plasticizer melemahkan interaksi antarmolekul pati. Pada konsentrasi gliserol rendah, ikatan hidrogen antar rantai pati (pati-pati) masih dominan sehingga menghasilkan kuat tarik dan kekakuan lebih tinggi. Hal ini juga tercermin pada nilai YM, di mana GLY10 menunjukkan modulus tertinggi (42,54 MPa), kemudian menurun pada GLY20 (37,21 MPa) dan GLY30 (34,98 MPa). Penurunan TS dan YM mengindikasikan berkurangnya kekakuan akibat meningkatnya mobilitas rantai polimer dalam matriks.

Sebaliknya, peningkatan gliserol secara signifikan meningkatkan nilai elongasi. EAB meningkat dari 18,07% (GLY10) menjadi 26,47% (GLY20), dan mencapai 49,37% (GLY30), menunjukkan peningkatan fleksibilitas film. Fenomena ini disebabkan oleh peran gliserol dalam memutuskan sebagian ikatan hidrogen antar molekul pati dan menggantinya dengan ikatan hidrogen antara pati dan plasticizer, sehingga meningkatkan mobilitas rantai dan kemampuan deformasi sebelum putus. Kurva tegangan-regangan menunjukkan bahwa formulasi dengan gliserol rendah bersifat lebih kaku dan rapuh, sedangkan konsentrasi lebih tinggi menghasilkan film yang lebih elastis namun kurang kuat. Secara keseluruhan, hasil ini konsisten dengan analisis termal sebelumnya, di mana peningkatan gliserol meningkatkan fleksibilitas tetapi menurunkan stabilitas termal dan kekuatan mekanik, sehingga diperlukan formulasi optimum untuk aplikasi kemasan yang menuntut keseimbangan antara ketahanan panas dan performa mekanik.

Minyak Jagung

Salah satu sumber bahan baku yang memiliki potensi besar dalam pengembangan bioplastik adalah jagung, termasuk minyak jagung dan turunannya. Jagung merupakan tanaman yang melimpah secara global dan telah lama dimanfaatkan sebagai sumber pati untuk produksi bioplastik. Namun, selain pati, minyak jagung juga memiliki kandungan asam lemak yang dapat dimodifikasi secara kimia menjadi bahan polimer ramah lingkungan, misalnya melalui proses epoksidasi dan polimerisasi. Pendekatan ini dinilai mampu menghasilkan material bioplastik dengan sifat mekanik dan ketahanan air yang lebih baik dibandingkan bioplastik berbasis pati murni.[13]

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa minyak nabati, termasuk minyak jagung,

dapat digunakan sebagai bahan aditif maupun bahan utama dalam pembuatan bioplastik. Minyak nabati berfungsi sebagai plasticizer alami yang mampu meningkatkan fleksibilitas, stabilitas termal, dan sifat hidrofobik dari film bioplastik. Penelitian yang dipublikasikan dalam jurnal internasional menunjukkan bahwa kombinasi pati dengan minyak nabati epoksidasi mampu menghasilkan bioplastik dengan sifat mekanik yang lebih baik serta daya serap air yang lebih rendah dibandingkan bioplastik konvensional berbasis pati.

Analisis Fourier Transform Infrared (FTIR) dengan metode Attenuated Total Reflectance (ATR) menunjukkan bahwa seluruh film menampilkan pita serapan yang lebar pada kisaran $3600\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ yang berkaitan dengan pembentukan ikatan hidrogen antara protein dengan molekul gliserol maupun air. Fenomena ini juga dilaporkan pada film berbasis sodium caseinate [14] Selain itu, spektrum memperlihatkan puncak pada kisaran $2922\text{--}2926\text{ cm}^{-1}$ dan $2854\text{--}2864\text{ cm}^{-1}$ yang masing-masing berkaitan dengan regangan simetris dan asimetris gugus C-H. Puncak lain pada 1747 cm^{-1} dikaitkan dengan gugus karbonil (C=O) yang umumnya terdapat pada triacylglycerol dalam minyak jagung [15] Intensitas puncak pada 1747 cm^{-1} sangat rendah pada film berbasis SOL karena tidak mengandung minyak, sedangkan pada film berbasis CE puncak tersebut tampak lebih kuat, terutama pada film yang dibuat dari emulsi CE dengan konsentrasi protein lebih rendah (2,5 wt.% WPC). Hal ini menunjukkan bahwa interaksi antara minyak dan protein relatif lemah. Selain itu, sinyal pada 1161 cm^{-1} yang berkaitan dengan vibrasi gugus ester (C-O) hanya ditemukan pada film berbasis CE dan terlihat paling kuat pada spektrum CEWPC2.5T0. Kondisi ini menunjukkan bahwa minyak pada film CE mudah terlepas, yang mengindikasikan bahwa whey protein concentrate (WPC) kurang efektif sebagai matriks enkapsulasi untuk mikro-droplet minyak.

Sebaliknya, film berbasis NE menunjukkan intensitas sinyal yang sangat rendah, yang mengindikasikan adanya interaksi yang lebih kuat antara minyak dan protein. Hal ini sejalan dengan stabilitas film tersebut yang mampu mempertahankan minyak tanpa pelepasan yang terdeteksi dalam waktu lama. Pada wilayah $1634\text{--}1644\text{ cm}^{-1}$ dan sekitar 1540 cm^{-1} terdeteksi pita yang berkaitan dengan gugus amida I dan amida II. Tidak terdapat perbedaan signifikan antar film pada wilayah ini, meskipun pergeseran pita amida II menuju posisi protein murni (sekitar 1510 cm^{-1}) menunjukkan adanya perubahan konformasi protein akibat interaksi dengan molekul lain.

Selain itu, sinyal pada wilayah $1447\text{--}1457\text{ cm}^{-1}$ dan $1399\text{--}1405\text{ cm}^{-1}$ juga dikaitkan dengan gugus amida [16] Sementara itu, pita pada kisaran $1036\text{--}1041\text{ cm}^{-1}$ berhubungan dengan interaksi C-O antara protein dan gliserol. Intensitas pita ini terlihat lebih kuat pada film berbasis SOL karena formulasi yang lebih sederhana dan tidak mengandung minyak.

Table 5
TGA weight losses at different temperatures and residual mass for all films. ^B.

Film ^A	100 °C (%)	250 °C (%)	290 °C (%)	500 °C (%)	Residual mass (%)
SOLWPC2.5T0	13.5 ^a	36.0 ^a	6.7 ^a	28.9 ^a	14.9 ^a
SOLWPC2.5T0.5	10.1 ^b	32.9 ^b	6.2 ^a	27.2 ^b	23.6 ^b
SOLWPC5.0T0	7.7 ^c	32.8 ^b	14.7 ^b	29.9 ^c	14.9 ^a
SOLWPC5.0T0.5	8.6 ^d	33.7 ^c	10.4 ^c	28.2 ^a	19.1 ^b
SOLWPC7.5T0	9.0 ^{de}	34.3 ^c	10.6 ^c	27.9 ^b	18.2 ^b
SOLWPC7.5T0.5	9.7 ^e	31.2 ^d	9.8 ^c	29.0 ^a	20.3 ^c
CEWPC2.5T0	7.6 ^a	26.0 ^a	6.5 ^a	49.7 ^a	10.2 ^a
CEWPC2.5T0.5	7.4 ^a	26.3 ^a	5.1 ^b	45.3 ^b	15.8 ^b
CEWPC5.0T0	9.4 ^b	29.4 ^b	8.8 ^c	41.0 ^c	11.4 ^a
CEWPC5.0T0.5	8.9 ^b	27.8 ^c	8.3 ^c	39.2 ^d	15.7 ^b
CEWPC7.5T0	10.3 ^c	30.5 ^d	8.9 ^c	36.0 ^e	14.2 ^c
CEWPC7.5T0.5	6.5 ^d	29.2 ^b	11.3 ^d	36.9 ^e	16.2 ^b
NEWPC2.5T0	4.6 ^a	28.7 ^a	5.6 ^a	45.2 ^a	15.9 ^a
NEWPC2.5T0.5	7.2 ^b	26.5 ^b	5.3 ^a	39.7 ^b	21.3 ^b
NEWPC5.0T0	6.7 ^b	28.7 ^a	11.4 ^b	37.6 ^c	15.6 ^a
NEWPC5.0T0.5	10.9 ^c	28.2 ^a	7.2 ^c	34.5 ^d	19.2 ^c
NEWPC7.5T0	9.0 ^d	31.3 ^c	9.9 ^d	35.2 ^d	14.6 ^d
NEWPC7.5T0.5	2.9 ^e	29.0 ^a	13.2 ^e	36.5 ^c	18.4 ^c

Selain karakterisasi gugus fungsi melalui analisis FTIR, stabilitas termal film juga dianalisis menggunakan Thermogravimetric Analysis (TGA). Analisis ini memberikan informasi mengenai tahapan kehilangan massa komponen film pada berbagai rentang temperatur. Berdasarkan data pada Tabel 5, seluruh film menunjukkan pola dekomposisi yang relatif serupa. Kehilangan massa pertama terjadi pada suhu sekitar 50–110 °C yang dikaitkan dengan penguapan air bebas yang terdapat dalam matriks film. Pada tahap ini seluruh film mengalami kehilangan massa sekitar 10 wt.%, yang menunjukkan bahwa kandungan air bebas relatif serupa pada berbagai formulasi.

Tahap berikutnya terjadi pada rentang suhu 120–220 °C yang berhubungan dengan pelepasan air terikat (associated water) yang berinteraksi dengan matriks protein. Film berbasis SOL menunjukkan kehilangan massa air terikat yang lebih besar dibandingkan film berbasis CE dan NE. Kondisi ini kemungkinan disebabkan oleh tidak adanya fase lipid pada film SOL sehingga lebih banyak molekul air yang berikatan dengan struktur protein. Temuan ini sejalan dengan hasil analisis FTIR sebelumnya yang menunjukkan adanya pita serapan lebar pada 3600–3000 cm⁻¹ yang berkaitan dengan pembentukan ikatan hidrogen antara protein dengan molekul air maupun gliserol.

Pada rentang suhu 250–340 °C terjadi kehilangan massa yang dikaitkan dengan degradasi gliserol sebagai plasticizer dalam matriks film. Sementara itu, tahap dekomposisi utama terjadi pada suhu yang lebih tinggi, yaitu sekitar 350–500 °C, yang berkaitan dengan degradasi komponen protein dan fase minyak. Film berbasis CE dan NE menunjukkan kehilangan massa yang lebih besar pada tahap ini dibandingkan film SOL. Hal ini kemungkinan berkaitan dengan dekomposisi trigliserida dari fase minyak yang terdapat pada kedua jenis film tersebut. Temuan ini juga mendukung hasil FTIR yang menunjukkan keberadaan gugus karbonil (C=O) pada sekitar 1747 cm⁻¹ yang berasal dari komponen trigliserida dalam minyak.

Selain itu, penambahan nanopartikel TiO₂ pada film tidak menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap pola dekomposisi termal. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan TiO₂ tidak banyak mempengaruhi stabilitas termal matriks protein secara keseluruhan. Pola dekomposisi yang diperoleh juga sejalan dengan penelitian sebelumnya pada film protein seperti sodium caseinate maupun sistem campuran sodium caseinate/WPI [17], [18].

Secara keseluruhan, hasil TGA mendukung temuan FTIR yang menunjukkan adanya interaksi antara protein, air, gliserol, dan komponen minyak dalam matriks film. Kombinasi kedua analisis ini menunjukkan bahwa komposisi fase lipid dan konsentrasi protein mempengaruhi interaksi molekuler serta stabilitas termal film yang dihasilkan.

Setelah karakterisasi stabilitas termal melalui analisis Thermogravimetric Analysis (TGA), sifat mekanik film selanjutnya dievaluasi menggunakan Dynamic Mechanical Analysis (DMA) serta uji tarik (tensile test). Analisis ini memberikan informasi mengenai kemampuan film dalam menahan deformasi serta perilaku viskoelastiknya. Berdasarkan data pada Tabel 3, nilai storage modulus (E') yang merepresentasikan sifat elastis material menunjukkan peningkatan seiring dengan meningkatnya konsentrasi protein pada sistem awal. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kandungan protein memperkuat jaringan matriks film yang terbentuk. Selain itu, penambahan nanopartikel TiO_2 juga meningkatkan nilai E' , yang mengindikasikan adanya efek penguatan (reinforcement) dari partikel anorganik dalam matriks protein.

Sebaliknya, keberadaan fase minyak cenderung sedikit menurunkan nilai E' . Film yang dibuat dari sistem conventional emulsion (CE) umumnya menunjukkan performa mekanik yang lebih rendah dibandingkan film berbasis larutan protein (SOL). Hal ini kemungkinan disebabkan oleh adanya fase minyak yang mengganggu pembentukan jaringan protein yang kontinu. Pada sistem nanoemulsion (NE), beberapa formulasi dengan konsentrasi protein rendah, seperti NEWPC2.5T0 dan NEWPC2.5T0.5, menunjukkan kerapuhan yang tinggi sehingga tidak dapat dianalisis menggunakan DMA. Kondisi ini berkaitan dengan luas permukaan droplet nano yang lebih besar dibandingkan droplet konvensional, sehingga lebih banyak protein yang digunakan untuk menstabilkan droplet minyak dan lebih sedikit protein yang tersedia untuk membentuk jaringan film.

Meskipun demikian, peningkatan konsentrasi protein pada sistem nanoemulsi mampu memperbaiki sifat mekanik film. Film NEWPC5.0T0 dan NEWPC5.0T0.5 sudah cukup kuat untuk dianalisis dengan DMA, meskipun nilai E' masih sedikit lebih rendah dibandingkan film berbasis CE dengan konsentrasi protein yang sama. Menariknya, pada konsentrasi protein yang lebih tinggi (7,5 wt.% WPC), film berbasis nanoemulsi menunjukkan perilaku mekanik yang lebih baik dibandingkan film berbasis emulsi konvensional. Nilai E' pada film NEWPC7.5T0 dan NEWPC7.5T0.5 bahkan mendekati nilai yang diperoleh pada film berbasis larutan protein. Selain itu, film tersebut juga menunjukkan stabilitas yang lebih baik karena tidak terjadi pelepasan minyak selama penyimpanan satu bulan pada suhu ruang, berbeda dengan film berbasis CE yang menunjukkan pemisahan fase minyak setelah 24 jam. Hal ini mengindikasikan bahwa droplet minyak berukuran nano dapat terenkapsulasi secara lebih efektif dalam matriks protein yang lebih kuat.

Tren serupa juga diamati pada loss modulus (E''), meskipun nilainya jauh lebih kecil dibandingkan E' . Hal ini menunjukkan bahwa seluruh film memiliki perilaku yang lebih dominan elastis dibandingkan viskos, sehingga bersifat lebih menyerupai padatan.

Table 4
Young modulus (E), the ultimate strength (σ_b), and elongation at break (ϵ_b) for all films.

Film ^a	E (MPa) ^b			σ_b (MPa) ^b			ϵ_b (%) ^b		
SOLWPC2.5T0	7.2	±	0.3 ^a	0.51	±	0.03 ^a	30	±	8 ^a
SOLWPC2.5T0.5	16.5	±	0.4 ^b	0.57	±	0.08 ^a	67	±	7 ^b
SOLWPC5.0T0	10.0	±	0.5 ^c	0.66	±	0.09 ^a	55	±	9 ^b
SOLWPC5.0T0.5	19.0	±	0.7 ^d	0.82	±	0.05 ^b	84	±	8 ^c
SOLWPC7.5T0	18.7	±	0.6 ^d	0.93	±	0.08 ^b	93	±	5 ^c
SOLWPC7.5T0.5	20.6	±	0.3 ^e	1.13	±	0.11 ^b	118	±	8 ^d
CEWPC2.5T0	4.6	±	0.7 ^a	0.50	±	0.02 ^a	22	±	4 ^a
CEWPC2.5T0.5	11.1	±	0.5 ^b	0.56	±	0.10 ^a	22	±	7 ^a
CEWPC5.0T0	8.7	±	0.2 ^c	0.53	±	0.04 ^a	57	±	6 ^b
CEWPC5.0T0.5	11.6	±	0.6 ^b	0.70	±	0.04 ^b	63	±	10 ^b
CEWPC7.5T0	12.1	±	1.5 ^b	0.55	±	0.03 ^a	89	±	5 ^c
CEWPC7.5T0.5	16.2	±	0.6 ^d	0.75	±	0.05 ^b	97	±	8 ^c
NEWPC5.0T0	8.5	±	0.9 ^a	0.55	±	0.06 ^a	58	±	3 ^a
NEWPC5.0T0.5	11.8	±	0.7 ^b	0.70	±	0.03 ^b	73	±	3 ^b
NEWPC7.5T0	12.4	±	0.3 ^b	0.59	±	0.06 ^a	99	±	6 ^b
NEWPC7.5T0.5	19.4	±	1.3 ^c	0.76	±	0.02 ^b	119	±	9 ^c

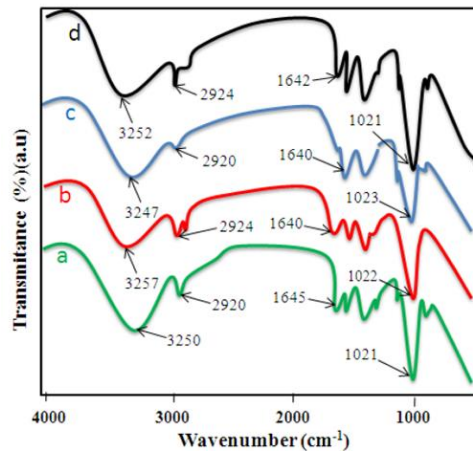
Hasil uji tarik yang disajikan pada Tabel 4 menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan analisis DMA. Nilai Young's modulus (E) meningkat dengan bertambahnya konsentrasi protein pada semua sistem (SOL, CE, dan NE), yang menunjukkan peningkatan kekakuan film. Secara umum, film berbasis SOL memiliki nilai modulus yang lebih tinggi dibandingkan film yang mengandung fase minyak. Namun demikian, film NEWPC7.5T0 dan NEWPC7.5T0.5 menunjukkan nilai modulus yang berada di antara film SOL dengan konsentrasi protein 5,0 dan 7,5 wt.% WPC, yang menunjukkan bahwa sistem nanoemulsi dengan konsentrasi protein tinggi mampu menghasilkan sifat mekanik yang mendekati film berbasis larutan.

Parameter ultimate tensile strength (σ_b) menunjukkan pengaruh yang relatif kecil dari variasi konsentrasi protein, meskipun penambahan TiO₂ cenderung sedikit meningkatkan nilai kekuatan tarik. Sementara itu, elongation at break (ϵ_b) meningkat seiring bertambahnya konsentrasi protein dan juga meningkat dengan penambahan TiO₂, yang menunjukkan peningkatan fleksibilitas film. Film NEWPC7.5T0.5 bahkan menunjukkan kombinasi sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan film berbasis CE, yaitu lebih kuat sekaligus lebih fleksibel.

Secara keseluruhan, hasil analisis mekanik ini melengkapi temuan sebelumnya dari analisis FTIR dan TGA. Interaksi molekuler antara protein, gliserol, serta fase minyak yang teridentifikasi melalui FTIR dan stabilitas termal yang diamati melalui TGA berperan penting dalam menentukan struktur jaringan film. Selain itu, ukuran droplet minyak juga menjadi faktor kunci yang mempengaruhi distribusi protein dalam matriks serta kinerja mekanik film yang dihasilkan. Film dengan droplet berukuran lebih kecil pada konsentrasi protein yang cukup tinggi menunjukkan sifat mekanik yang lebih baik dan stabilitas sistem yang lebih tinggi.

Minyak Zaitun

Dalam beberapa tahun terakhir, minyak nabati mulai banyak digunakan sebagai bahan baku maupun bahan tambahan dalam pembuatan bioplastik, termasuk minyak zaitun. Minyak zaitun memiliki kandungan asam lemak tak jenuh yang tinggi, sehingga dapat dimodifikasi secara kimia maupun digunakan sebagai plasticizer alami dalam pembuatan film bioplastik. Penelitian dalam jurnal internasional menunjukkan bahwa minyak nabati, seperti minyak kedelai dan minyak nabati lainnya, mampu meningkatkan fleksibilitas, ketahanan air, serta stabilitas termal bioplastik berbasis pati maupun protein. Beberapa penelitian secara khusus menunjukkan bahwa minyak zaitun dapat digunakan sebagai komponen dalam pembuatan film biodegradable. Studi yang dipublikasikan dalam Food Research International menunjukkan bahwa penambahan minyak zaitun pada film berbasis gelatin mampu meningkatkan sifat hidrofobik, memperbaiki ketahanan terhadap uap air, serta meningkatkan kekuatan tarik film. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa minyak zaitun memiliki potensi yang baik sebagai bahan tambahan dalam pengembangan bioplastik ramah lingkungan, terutama untuk aplikasi kemasan pangan [19]



Analisis Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi pola interaksi intermolekul antara matriks biopolimer pati aren dan kitosan dengan penambahan minyak zaitun ekstra murni (**Extra Virgin Olive Oil, EVOO). Spektrum FTIR pada film biokomposit menunjukkan pola puncak serapan yang relatif serupa pada semua sampel, terutama pada daerah 3700–3000 cm^{-1} yang berkaitan dengan getaran regangan gugus hidroksil (O–H) [20] dari struktur polisakarida pati dan kitosan. Puncak pada sekitar 2920–2924 cm^{-1} mengindikasikan adanya getaran regangan C–H [21], sedangkan pita serapan pada kisaran 1640–1645 cm^{-1} berhubungan dengan getaran regangan C=O. Selain itu, pita pada sekitar 1551 cm^{-1} dikaitkan dengan pembengkokan N–H, pita pada 1405 cm^{-1} menunjukkan regangan C–N, dan pita kuat pada sekitar 1021–1023 cm^{-1} berkaitan dengan getaran regangan C–O–C dari struktur polisakarida [22]. Penambahan EVOO tidak menyebabkan perubahan signifikan pada jenis gugus fungsi yang terdeteksi, namun mempengaruhi intensitas beberapa puncak serapan. Penurunan intensitas pita pada daerah 3000–3300 cm^{-1} menunjukkan berkurangnya gugus hidroksil bebas akibat terbentuknya ikatan hidrogen antara molekul pati, kitosan, dan EVOO. Interaksi ini berkontribusi terhadap berkurangnya kemampuan penyerapan air film karena jumlah gugus hidroksil bebas dalam matriks polimer menurun. Sebaliknya, peningkatan intensitas pita pada sekitar 2924 cm^{-1} menunjukkan kontribusi gugus hidrokarbon dari komponen lipid EVOO dalam sistem biokomposit. Mekanisme pembentukan film terutama terjadi melalui interaksi ikatan hidrogen antara gugus NH_3^+ dari kitosan dan gugus OH^- dari pati, yang menghasilkan struktur matriks polimer yang lebih rapat [23], [24]. Kehadiran EVOO juga dapat mengisi ruang bebas dalam matriks polimer dan bertindak sebagai plastisiser, sehingga meningkatkan fleksibilitas rantai polimer. Secara keseluruhan, interaksi intermolekul ini berpengaruh terhadap sifat fisik dan fungsional film biokomposit, termasuk ketebalan, stabilitas termal, sifat mekanik, sifat penghalang, serta morfologi material.

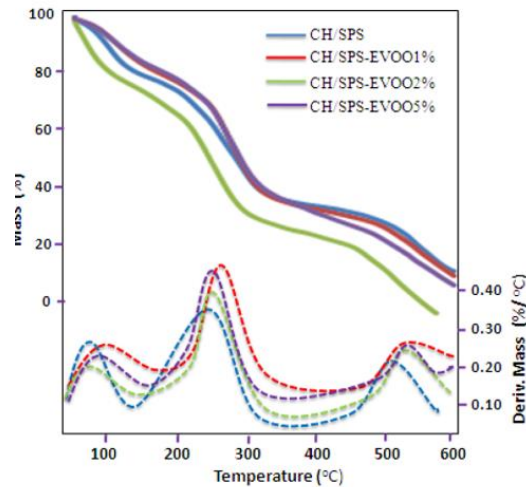


Fig. 5. TGA thermogram and DTG curves of CH/SPS and CH/SPS-EVOOs blend films.

Sifat termal film polimer, khususnya film untuk kemasan pangan, merupakan parameter penting yang harus dievaluasi karena berkaitan langsung dengan stabilitas material selama proses pengolahan dan penggunaan. Analisis thermogravimetric analysis (TGA) digunakan untuk menentukan stabilitas termal film CH/SPS yang ditambahkan minyak zaitun ekstra murni (EVOO). Kurva TGA dan turunannya (DTG) menunjukkan bahwa seluruh sampel mengalami tiga tahap degradasi termal yang serupa. Tahap pertama terjadi pada rentang suhu 50–150 °C dengan kehilangan massa sebesar 17–20%, yang berkaitan dengan penguapan air, plasticizer, dan molekul air terikat dalam matriks film [25], [26] Tahap kedua berlangsung pada suhu 184–326 °C dengan kehilangan massa sebesar 42–49%, yang disebabkan oleh degradasi gugus fungsional seperti gugus amina dan hidroksil pada struktur polimer [27]. Tahap ketiga merupakan tahap degradasi akhir yang terjadi pada rentang suhu 473–600 °C dengan kehilangan massa sebesar 20–30%, yang berkaitan dengan kerusakan segmen molekul polimer yang lebih kompleks [28], [29].

Table 4
TGA profile of SPS/CH blend films.

Film samples	Thermal degradation temperature (°C)					Residue ^d (%)
	T _{onset} ^a	T _{max} ^b	T ₂₀ ^c	T ₅₀ ^c	T ₈₀ ^c	
CH/SPS	184.20	284.20	135.30	278.70	553.10	12.09
CH/SPS-EVOO1%	221.80	265.70	168.20	183.90	544.00	10.55
CH/SPS-EVOO2%	223.10	266.80	142.10	271.10	480.40	00.00
CH/SPS-EVOO5%	218.10	279.10	180.90	288.40	520.70	07.86

^a Temperature which initial degradation.

^b Temperature maximum of degradation.

^c Degradation temperature with 20%, 50%, and 80% of weight loss.

^d Residue at temperature of 600 °C.

Tahap kedua degradasi termal merupakan tahap yang paling penting karena pada tahap ini struktur molekul utama film mulai terdegradasi melalui pemutusan gugus fungsional. Berdasarkan data karakteristik termal yang dirangkum dalam Tabel 4, nilai initial decomposition temperature (Tonset) terendah diperoleh pada film CH/SPS tanpa penambahan EVOO, yaitu sebesar 184,2 °C. Sebaliknya, nilai Tonset tertinggi diperoleh pada film CH/SPS-EVOO 2% sebesar 223,1 °C, yang menunjukkan bahwa penambahan EVOO dalam jumlah optimum mampu meningkatkan stabilitas termal film. Peningkatan ini diduga disebabkan oleh terbentuknya interaksi yang kuat antara EVOO dan matriks CH/SPS, baik melalui interaksi elektrostatis maupun interaksi hidrofobik. Nilai Tonset untuk film CH/SPS-EVOO 1% dan CH/SPS-EVOO 5% masing-masing adalah 221,8 °C dan 218,1 °C. Secara umum, seluruh film menunjukkan ketahanan termal yang baik dan masih berada dalam kisaran suhu yang sesuai untuk aplikasi kemasan pangan, yaitu sekitar 100–150 °C. Hasil ini juga sejalan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa

stabilitas termal (Tonset) film pati kentang/kitosan yang ditambahkan Aloe vera berada pada rentang 215–227 °C [30].

Table 3
TS, EB, and E data of CH/SPS and CH/SPS-EVOOs blend films.

Film samples	TS (MPa)	EB (%)	E (MPa)
CH/SPS	0.79 ± 0.11 ^a	25.98 ± 3.48 ^a	3.11 ± 0.87 ^a
CH/SPS-EVOO1%	0.81 ± 0.12 ^a	26.66 ± 1.59 ^a	3.08 ± 0.63 ^a
CH/SPS-EVOO2%	2.58 ± 0.17 ^c	84.34 ± 5.56 ^b	3.09 ± 0.39 ^a
CH/SPS-EVOO5%	1.60 ± 0.04 ^b	29.55 ± 2.08 ^a	5.42 ± 0.37 ^b

Value within column followed the same letter shows no significant difference at the significance level $p < 0.05$.

Selain sifat termal, sifat mekanik juga merupakan parameter penting dalam menentukan kinerja film polimer untuk aplikasi kemasan pangan. Parameter yang umum digunakan untuk mengevaluasi sifat mekanik film meliputi tensile strength (TS), elongation at break (EB), dan modulus elastisitas (E). Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa penambahan EVOO memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik film CH/SPS.

Nilai TS dan EB tertinggi diperoleh pada film CH/SPS-EVOO 2% dengan nilai masing-masing sebesar 2.581 MPa dan 84,31%, sedangkan nilai TS dan EB terendah ditunjukkan oleh film CH/SPS tanpa penambahan EVOO, yaitu sebesar 0,789 MPa dan 25,98%. Penambahan EVOO sebesar 1% (b/b) belum menunjukkan peningkatan yang signifikan ($p < 0,05$), yang diduga disebabkan oleh distribusi EVOO yang belum merata dalam matriks film. Namun, pada penambahan EVOO sebesar 2% (b/b), terjadi peningkatan TS dan EB yang signifikan ($p < 0,05$), yang menunjukkan bahwa konsentrasi tersebut merupakan kondisi optimum dalam membentuk interaksi yang kuat antara EVOO dan matriks CH/SPS. Sementara itu, penambahan EVOO sebesar 5% (b/b) masih meningkatkan nilai TS, namun nilainya lebih rendah dibandingkan dengan penambahan 2%, yang kemungkinan disebabkan oleh ketidakseimbangan distribusi fase dalam matriks film [31].

Peningkatan nilai TS dan EB ini sejalan dengan data ketebalan film, di mana penambahan EVOO meningkatkan ketebalan film akibat bertambahnya gugus hidroksil dari EVOO yang dapat berinteraksi dengan matriks CH/SPS. Selain itu, keberadaan lipid tak jenuh tunggal dalam EVOO diduga berperan dalam membentuk kompleks yang lebih fleksibel dengan matriks polimer [32]. EVOO juga dapat memberikan efek plastisasi melalui mekanisme hidrofilik dan hidrofobik. Asam lemak bebas, khususnya asam oleat, dapat berinteraksi secara elektrostatik dengan gugus amina pada kitosan melalui pembentukan ikatan hidrogen, sementara rantai lipidnya berinteraksi secara hidrofobik melalui gaya van der Waals [33].

Hasil ini juga sejalan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa film pati kentang–kitosan memiliki nilai tensile strength dan elongation at break masing-masing sebesar 19,74 MPa dan 16,03%, dan penambahan ekstrak kulit kacang tanah dapat meningkatkan kedua parameter tersebut [34]. Selain itu, Zheng et al. [35] juga melaporkan bahwa sifat mekanik film kitosan–pati akorn yang mengandung eugenol menunjukkan peningkatan nilai tensile strength hingga mencapai nilai maksimum sebesar 16,8 MPa pada penambahan eugenol 6%, kemudian mengalami penurunan ketika konsentrasinya melebihi 6%.

Dengan demikian, hasil ini konsisten dengan pembahasan sifat termal sebelumnya, di mana penambahan EVOO dalam jumlah optimum (2%) mampu meningkatkan interaksi antar komponen dalam matriks film, sehingga tidak hanya meningkatkan stabilitas termal tetapi juga memperbaiki sifat mekanik film yang dihasilkan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur dalam review jurnal tersebut, minyak kelapa sawit dapat disimpulkan sebagai bahan lemak nabati yang paling baik dan paling potensial untuk pengembangan bioplastik dibandingkan minyak jagung dan minyak zaitun. Hal ini didukung oleh hasil pembahasan yang menunjukkan bahwa bioplastik berbasis minyak kelapa sawit memiliki stabilitas termal yang lebih baik, terutama pada sistem pati–CEPO–gliserol dengan konsentrasi gliserol rendah yang menunjukkan suhu degradasi (T5% dan Tmax) lebih tinggi. Selain itu, dari sisi sifat mekanik, bioplastik berbasis minyak kelapa sawit menunjukkan keseimbangan yang lebih baik antara kuat tarik, elastisitas, dan modulus elastisitas dibandingkan formulasi berbasis minyak nabati lainnya. Ditinjau dari aspek ketersediaan bahan baku dan potensi pengembangan skala industri, minyak kelapa sawit juga lebih unggul karena merupakan sumber minyak nabati yang melimpah dan mudah diperoleh, sehingga lebih realistis untuk dikembangkan sebagai material kemasan ransum militer yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Saran

Berdasarkan hasil review tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk lebih memfokuskan pengembangan bioplastik berbasis minyak kelapa sawit dengan melakukan optimasi komposisi antara matriks biopolimer, minyak kelapa sawit, dan plasticizer agar diperoleh keseimbangan terbaik antara kekuatan mekanik, fleksibilitas, dan stabilitas termal. Selain itu, perlu dilakukan pengujian lebih lanjut terhadap sifat barrier terhadap oksigen dan uap air, ketahanan terhadap suhu dan kelembapan ekstrem, serta evaluasi kelayakan produksi pada skala industri agar bioplastik berbasis minyak kelapa sawit benar-benar dapat diterapkan sebagai material kemasan ransum militer yang ramah lingkungan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- L. Li, J. Zuo, X. Duan, S. Wang, K. Hu, and R. Chang, "Impacts and mitigation measures of plastic waste: A critical review," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 90, p. 106642, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.eiar.2021.106642.
- J. G. Rosenboom, R. Langer, and G. Traverso, "Bioplastics for a circular economy," *Nature Reviews Materials* 2022 7:2, vol. 7, no. 2, pp. 117–137, Jan. 2022, doi: 10.1038/s41578-021-00407-8.
- M. G. A. Vieira, M. A. Da Silva, L. O. Dos Santos, and M. M. Beppu, "Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review," *Eur. Polym. J.*, vol. 47, no. 3, pp. 254–263, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011.
- H. Hernando et al., "Impact of glycerol on oil palm trunk starch bioplastics enhanced with citric acid epoxidized palm oil oligomers," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, no. 10, p. 100839, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.100839.
- V. Siracusa, P. Rocculi, S. Romani, and M. D. Rosa, "Biodegradable polymers for food packaging: a review," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 19, no. 12, pp. 634–643, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.tifs.2008.07.003.
- J. W. Rhim, H. M. Park, and C. S. Ha, "Bio-nanocomposites for food packaging applications," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 38, no. 10–11, pp. 1629–1652, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008.
- V. Falguera, J. P. Quintero, A. Jiménez, J. A. Muñoz, and A. Ibarz, "Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 22, no. 6, pp. 292–303, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.tifs.2011.02.004.
- M. P. Arrieta, M. D. Samper, M. Aldas, and J. López, "On the use of PLA-PHB blends for sustainable food packaging applications," *Materials*, vol. 10, no. 9, Aug. 2017, doi: 10.3390/ma10091008.
- S. H. Kee et al., "A review on biorefining of palm oil and sugar cane agro-industrial residues by bacteria into commercially viable bioplastics and biosurfactants," *Fuel*, vol. 321, p. 124039, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124039.

- J. Yang, Y. C. Ching, J. Sabariah Julai, C. H. Chuah, D. H. Nguyen, and P. C. Lin, "Comparative study on the properties of starch-based bioplastics incorporated with palm oil and epoxidized palm oil," *Polymers and Polymer Composites*, vol. 30, Mar. 2022, doi: 10.1177/09673911221087595.
- J. Yang et al., "Influence of starch silylation on the structures and properties of starch/epoxidized soybean oil-based bioplastics," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 258, p. 129037, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.129037.
- M. P. Arrieta, M. A. Peltzer, M. D. C. Garrigós, and A. Jiménez, "Structure and mechanical properties of sodium and calcium caseinate edible active films with carvacrol," *J. Food Eng.*, vol. 114, no. 4, pp. 486–494, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.09.002.
- R. W. Silverstein and G. C. Bassler, "Spectrometric identification of organic compounds," *J. Chem. Educ.*, vol. 39, no. 11, pp. 546–553, 1962, doi: 10.1021/ed039p546.
- P. L. M. Barreto, A. T. N. Pires, and V. Soldi, "Thermal degradation of edible films based on milk proteins and gelatin in inert atmosphere," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 79, no. 1, pp. 147–152, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0141-3910(02)00267-7.
- Q. Lei et al., "Research on Antimicrobial Activity and Packaging Performance of Degradable Protein Films," *Adv. Mat. Res.*, vol. 915–916, pp. 947–953, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.915-916.947.
- J. M. Montes de Oca-Ávalos, R. J. Candal, and M. L. Herrera, "Colloidal properties of sodium caseinate-stabilized nanoemulsions prepared by a combination of a high-energy homogenization and evaporative ripening methods," *Food Research International*, vol. 100, pp. 143–150, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.foodres.2017.06.035.
- W. Ma et al., "Characterization of gelatin-based edible films incorporated with olive oil," *Food Research International*, vol. 49, no. 1, pp. 572–579, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.foodres.2012.07.037.
- S. F. Hosseini, M. Rezaei, M. Zandi, and F. Farahmandghavi, "Bio-based composite edible films containing *Origanum vulgare* L. essential oil," *Ind. Crops Prod.*, vol. 67, pp. 403–413, May 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.01.062.
- Z. Kalaycıoğlu, E. Torlak, G. Akın-Evingür, İ. Özen, and F. B. Erim, "Antimicrobial and physical properties of chitosan films incorporated with turmeric extract," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 101, pp. 882–888, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.03.174.
- K. Shahzadi et al., "Preparation and characterization of bio-based hybrid film containing chitosan and silver nanowires," *Carbohydr. Polym.*, vol. 137, pp. 732–738, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.carbpol.2015.11.012.
- A. Giannakas, A. Patsoura, N. M. Barkoula, and A. Ladavos, "A novel solution blending method for using olive oil and corn oil as plasticizers in chitosan based organoclay nanocomposites," *Carbohydr. Polym.*, vol. 157, pp. 550–557, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.carbpol.2016.10.020.
- R. Thakur, P. Pristijono, C. J. Scarlett, M. Bowyer, S. P. Singh, and Q. V. Vuong, "Starch-based films: Major factors affecting their properties," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 132, pp. 1079–1089, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190.
- X. Hu, L. Yan, Y. Wang, and M. Xu, "Self-assembly of binary oppositely charged polysaccharides into polyelectrolyte complex hydrogel film for facile and efficient Pb²⁺ removal," *Chemical Engineering Journal*, vol. 388, p. 124189, May 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.124189.
- X. Hu, Y. Wang, L. Zhang, M. Xu, J. Zhang, and W. Dong, "Mechanical and thermal reinforcement of photocrosslinked salean composite hydrogel incorporating niobium carbide nanoparticles for cell adhesion," *Polym. Test.*, vol. 69, pp. 396–404, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.048.
- E. I. Rabea, M. E. T. Badawy, C. V. Stevens, G. Smagghe, and W. Steurbaut, "Chitosan as antimicrobial agent: Applications and mode of action," *Biomacromolecules*, vol. 4, no. 6, pp. 1457–1465, Nov. 2003, doi: 10.1021/bm034130m.
- M. A. Javaid et al., "Synthesis and molecular characterization of chitosan/starch blends based polyurethanes," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 146, pp. 243–252, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.12.234.

- X. Hu, Y. Wang, and M. Xu, "Study of the cell responses in tantalum carbide nanoparticles-enriched polysaccharide composite hydrogel," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 135, pp. 501–511, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.05.191.
- D. Bajer, K. Janczak, and K. Bajer, "Novel Starch/Chitosan/Aloe Vera Composites as Promising Biopackaging Materials," *Journal of Polymers and the Environment* 2020 28:3, vol. 28, no. 3, pp. 1021–1039, Jan. 2020, doi: 10.1007/s10924-020-01661-7.
- A. N. Adilah, B. Jamilah, M. A. Noranizan, and Z. A. N. Hanani, "Utilization of mango peel extracts on the biodegradable films for active packaging," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 16, pp. 1–7, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.fpsl.2018.01.006.
- Z. J. Zhang et al., "Preparation and characterization of biocomposite chitosan film containing *Perilla frutescens* (L.) Britt. essential oil," *Ind. Crops Prod.*, vol. 112, pp. 660–667, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.12.073.
- I. K. D. Dimzon, J. Ebert, and T. P. Knepper, "The interaction of chitosan and olive oil: Effects of degree of deacetylation and degree of polymerization," *Carbohydr. Polym.*, vol. 92, no. 1, pp. 564–570, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.carbpol.2012.09.035.
- W. Meng, J. Shi, X. Zhang, H. Lian, Q. Wang, and Y. Peng, "Effects of peanut shell and skin extracts on the antioxidant ability, physical and structure properties of starch-chitosan active packaging films," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 152, pp. 137–146, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.02.235.
- K. Zheng et al., "Chitosan-acorn starch-eugenol edible film: Physico-chemical, barrier, antimicrobial, antioxidant and structural properties," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 135, pp. 344–352, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.05.151.
- "Market – European Bioplastics e.V." Accessed: Mar. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.european-bioplastics.org/market/>
- "Operational Rations." Accessed: Mar. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.dla.mil/Troop-Support/Subsistence/Operational-rations/>