

PEMANFAATAN KITOSAN SEBAGAI BAHAN DASAR BIOPLASTIK RAMAH LINGKUNGAN

Utilization Of Chitosan As A Base Material For Environmentally Friendly Bioplastics

Pardi¹, Herawati², Siti Adila³, Atdril⁴

¹Program Studi S1 Farmasi, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Ubudiyah Indonesia

²Program Studi S1 PGSD, Fakultas Sosial Sains dan Ilmu Pendidikan, Universitas Ubudiyah Indonesia

*Corresponding Author: pardi@uui.ac.id

Abstrak

Pencemaran limbah plastik berbasis fosil menjadi permasalahan lingkungan global yang serius karena sifatnya yang sulit terurai. Salah satu alternatif yang berpotensi mengatasi permasalahan tersebut adalah bioplastik berbasis bahan alami yang biodegradable, seperti kitosan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan kitosan yang diperoleh dari limbah cangkang udang sebagai bahan dasar bioplastik ramah lingkungan. Untuk meningkatkan sifat fungsionalnya, kitosan dikombinasikan dengan minyak nilam (patchouli essential oil/PEO) sebagai agen antibakteri dan nanokristal selulosa (CNC) dari limbah tongkol jagung sebagai penguat struktur. PEO diinkorporasikan melalui dua metode, yaitu emulsi Tween-80 dan emulsi Pickering berbasis CNC dengan variasi konsentrasi minyak 20%, 30%, dan 40%. Film bioplastik yang dihasilkan dikarakterisasi berdasarkan sifat mekanik, fisik, biodegradabilitas, dan aktivitas antibakteri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kitosan memiliki potensi besar sebagai matriks utama bioplastik. Penambahan emulsi Pickering meningkatkan fleksibilitas, aktivitas antibakteri, serta biodegradabilitas hingga 74,03%. Sementara itu, emulsi Tween-80 menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 6,32 MPa. Dengan demikian, pemanfaatan kitosan sebagai bahan dasar bioplastik yang dikombinasikan dengan bahan alami lain terbukti mampu menghasilkan material ramah lingkungan dengan sifat mekanik dan fungsional yang baik, sehingga berpotensi sebagai alternatif pengganti plastik konvensional.

Kata Kunci: kitosan; bioplastik; minyak nilam; nanokristal selulosa; biodegradabilitas; aktivitas antibakteri

Abstract

Plastic waste pollution derived from fossil-based materials has become a serious global environmental issue due to its non-biodegradable nature. One promising solution to overcome this problem is the development of biodegradable bioplastics from natural resources, such as chitosan. This study aims to investigate the utilization of chitosan derived from shrimp shell waste as a primary material for environmentally friendly bioplastics. To enhance its functional properties, chitosan was combined with patchouli essential oil (PEO) as an antibacterial agent and cellulose nanocrystals (CNC) extracted from corn cob waste as a reinforcing material. PEO was incorporated using two different methods, namely Tween-80 emulsions and CNC-stabilized Pickering emulsions, with varying oil concentrations of 20%, 30%, and 40%. The resulting bioplastic films were characterized in terms of mechanical properties, physical properties, biodegradability, and antibacterial activity. The results showed that chitosan has significant potential as a base material for bioplastics. The addition of Pickering emulsions improved flexibility, antibacterial activity, and biodegradability up to 74.03%, while Tween-80 emulsions produced the highest tensile strength of 6.32 MPa. Overall, the utilization of chitosan as a bioplastic base material, combined with natural additives, successfully produced environmentally friendly materials with enhanced mechanical and functional properties, making them promising alternatives to conventional plastics.

Keywords: Chitosan; Bioplastic; Patchouli essential oil; Cellulose nanocrystals; Biodegradability; Antibacterial activity.

PENDAHULUAN

Akumulasi limbah plastik merupakan tantangan lingkungan yang signifikan di abad ke-21, dengan produksi global plastik berbasis fosil mencapai lebih dari 400 juta ton pada tahun 2022. Jika pengelolaan limbah plastik tidak diperbaiki, emisi tahunan diperkirakan akan meningkat secara drastis pada tahun-tahun mendatang. Plastik konvensional memiliki sifat tidak mudah terdegradasi sehingga dapat bertahan di lingkungan selama ratusan tahun dan menyebabkan pencemaran tanah maupun perairan. Selain itu, degradasi plastik menjadi mikroplastik juga menimbulkan ancaman serius bagi kesehatan manusia dan organisme hidup lainnya (Dhali *et al.*, 2024).

Oleh karena itu, berbagai upaya telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini, seperti pemanfaatan mikroorganisme untuk degradasi plastik (Chow *et al.*, 2023), proses daur ulang (Alaghemandi, 2024), pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan konstruksi (Ikechukwu & Naghizadeh, 2022), serta pengembangan material biodegradable (Flury & Narayan, 2021). Di antara berbagai pendekatan tersebut, bioplastik menjadi salah satu solusi yang menjanjikan karena mampu terurai secara alami dan lebih ramah lingkungan (Ahsan *et al.*, 2023).

Bioplastik berbasis bahan alami umumnya berasal dari biomassa seperti pati, selulosa, protein, dan kitin. Salah satu bahan yang memiliki potensi besar adalah kitosan, yang diperoleh melalui proses deasetilasi kitin dari limbah cangkang udang. Pemanfaatan limbah perikanan ini tidak hanya membantu mengurangi pencemaran lingkungan, tetapi juga memberikan nilai tambah ekonomi terhadap limbah yang sebelumnya kurang dimanfaatkan (Teixeira-Costa & Andrade, 2021). Kitosan memiliki keunggulan berupa sifat biodegradable, biokompatibel, serta memiliki aktivitas antibakteri alami yang berasal dari gugus amina bermuatan positif yang mampu berinteraksi dengan membran sel bakteri (Khubiev *et al.*, 2023). Hal ini menjadikan kitosan sebagai kandidat utama dalam pengembangan bioplastik, khususnya untuk aplikasi kemasan pangan aktif.

Meskipun demikian, penggunaan kitosan sebagai bahan dasar bioplastik masih menghadapi beberapa keterbatasan, seperti sifat hidrofilik yang tinggi sehingga mudah menyerap air, serta kekuatan mekanik yang relatif rendah. Kelemahan ini menyebabkan film kitosan kurang optimal dalam aplikasi praktis, terutama untuk kemasan produk dengan kadar air tinggi. Oleh karena itu, diperlukan modifikasi melalui penambahan bahan lain guna meningkatkan performa bioplastik berbasis kitosan (Bahsaine *et al.*, 2023).

Salah satu bahan alami yang berpotensi digunakan sebagai aditif adalah minyak nilam (*Pogostemon cablin Benth*), yang dikenal memiliki aktivitas antibakteri yang kuat. Kandungan senyawa aktif seperti *patchouli alcohol*, *patchoulene*, dan *pogostone* berperan dalam menghambat pertumbuhan mikroorganisme patogen, sehingga minyak nilam berpotensi digunakan sebagai agen antimikroba dalam sistem kemasan pangan (Pandey *et al.*, 2021; Szewczuk *et al.*, 2023). Namun, sifat hidrofobik minyak nilam menjadi tantangan dalam proses pencampuran dengan matriks kitosan yang bersifat hidrofilik, sehingga diperlukan metode khusus untuk meningkatkan stabilitas dan distribusinya dalam sistem film.

Salah satu pendekatan yang efektif untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah penggunaan emulsi Pickering, yaitu sistem emulsi yang distabilkan oleh partikel padat seperti nanokristal selulosa (CNC). CNC yang diperoleh dari limbah pertanian seperti tongkol jagung memiliki keunggulan berupa luas permukaan tinggi, kekuatan mekanik yang baik, serta kemampuan membentuk lapisan stabil pada antarmuka minyak-air (Amara *et al.*, 2021). Penggunaan CNC dalam sistem emulsi Pickering tidak hanya meningkatkan stabilitas emulsi, tetapi juga memperbaiki sifat mekanik dan ketahanan air dari film bioplastik (Ji & Wang, 2023). Selain itu, CNC mampu membantu mendistribusikan minyak nilam secara lebih merata dalam matriks kitosan serta mengontrol pelepasan senyawa aktif, sehingga meningkatkan efektivitas aktivitas antibakteri (Liu *et al.*, 2022).

Pendekatan ini juga sejalan dengan konsep pemanfaatan limbah biomassa secara berkelanjutan, di mana limbah cangkang udang dan tongkol jagung dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku utama dalam produksi material ramah lingkungan. Integrasi berbagai bahan alami tersebut tidak hanya meningkatkan sifat fungsional bioplastik, tetapi juga mendukung konsep ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah yang lebih efisien. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan kitosan

sebagai bahan dasar bioplastik ramah lingkungan dengan penambahan minyak nilam dan nanokristal selulosa melalui sistem emulsi Pickering. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menghasilkan material bioplastik dengan sifat mekanik, biodegradabilitas, dan aktivitas antibakteri yang lebih baik, sehingga berpotensi sebagai alternatif pengganti plastik konvensional dalam aplikasi kemasan pangan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan selama 3 bulan sejak Desember 2025 sampai Maret 2026 di Laboratorium Terpadu, Universitas Syiah Kuala. Pengujian Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang bertujuan untuk mengembangkan bioplastik berbasis kitosan dari limbah cangkang udang. Kitosan diperoleh melalui proses demineralisasi, deproteinasi, dan deasetilasi dari cangkang udang. Selanjutnya, nanokristal selulosa (CNC) diisolasi dari limbah tongkol jagung melalui proses perlakuan alkali, bleaching, dan hidrolisis asam.

Minyak nilam digunakan sebagai agen antibakteri dan diinkorporasikan ke dalam matriks kitosan melalui dua metode, yaitu emulsi Tween-80 dan emulsi Pickering berbasis CNC dengan variasi konsentrasi 20%, 30%, dan 40%. Larutan kitosan kemudian dicampur dengan emulsi sesuai formulasi, dicetak menggunakan metode casting, dan dikeringkan untuk menghasilkan film bioplastik. Karakterisasi dilakukan untuk mengevaluasi pemanfaatan kitosan sebagai bahan dasar bioplastik, meliputi: sifat mekanik (kekuatan tarik dan elongasi); sifat fisik (ketebalan, kadar air, kelarutan); biodegradabilitas; aktivitas antibakteri; serta morfologi menggunakan SEM.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

A. Mekanika Bioplastik

1. Sifat Mekanik Film

Sifat mekanik film, yaitu kekuatan tarik dan elongasi saat putus, ditentukan melalui uji tarik (Tabel 1). Film dengan emulsi PEO yang distabilkan oleh Tween-80 (C0E30) menunjukkan kekuatan tarik terbaik (6,32 MPa) dari semua formulasi, meskipun memiliki elongasi terendah (8,57%). Peningkatan signifikan dalam kekuatan mekanik ini menunjukkan adanya mekanisme penguatan yang sangat efisien, di mana komponen patchouli alcohol membentuk ikatan silang fisik melalui ikatan hidrogen dengan gugus fungsional kitosan. Selain itu, tetesan minyak yang terdispersi halus akibat emulsifikasi efektif oleh Tween-80 berperan sebagai fase pengisi penguat (Roy *et al.*, 2023).

Tabel 1. Ketebalan dan Sifat Mekanik Film Bioplastik

Sample	Thickness (μm)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)
C ₀ E ₀	60	20	3,88
C ₀ E ₃₀	90	8,57	6,32
C ₂ E ₀	75	16,83	4,75
C ₂ E ₂₀	140	20,74	4,28
C ₂ E ₃₀	150	11,62	3,55
C ₂ E ₄₀	120	9,25	2,58

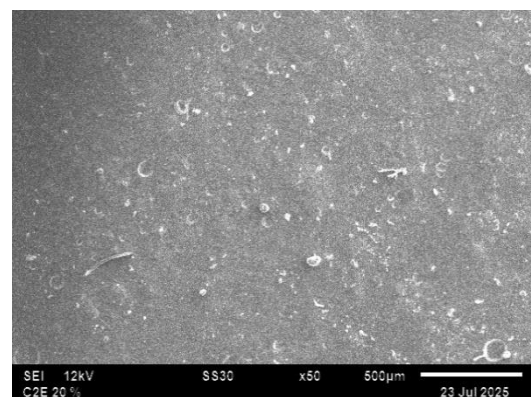
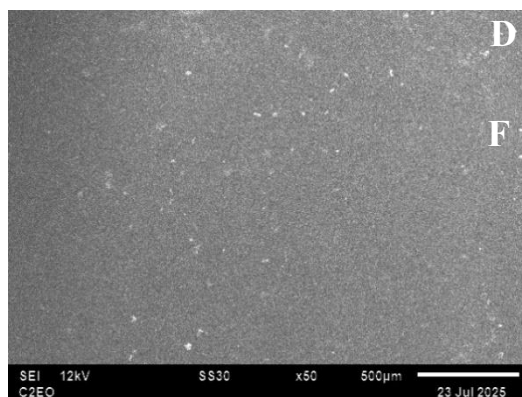
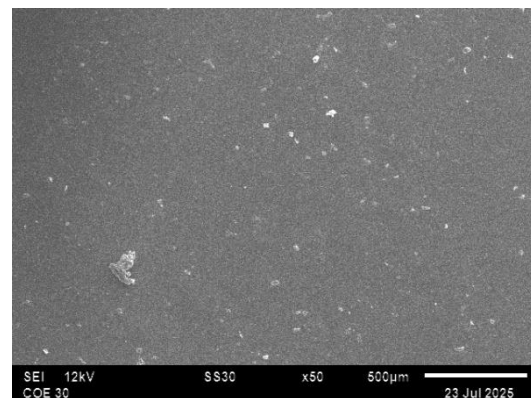
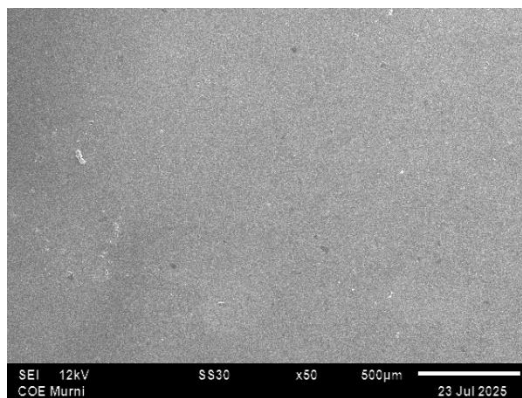
Film dengan emulsi Pickering PEO yang distabilkan oleh CNC menunjukkan karakteristik mekanik yang beragam. Film C2E0 (2% CNC tanpa PEO) menunjukkan peningkatan moderat dalam kekuatan tarik (4,75 MPa) dibandingkan kontrol, yang mengindikasikan bahwa partikel CNC berkontribusi terhadap penguatan matriks kitosan melalui ikatan hidrogen dan penguncian mekanik (Talebi *et al.*, 2022).

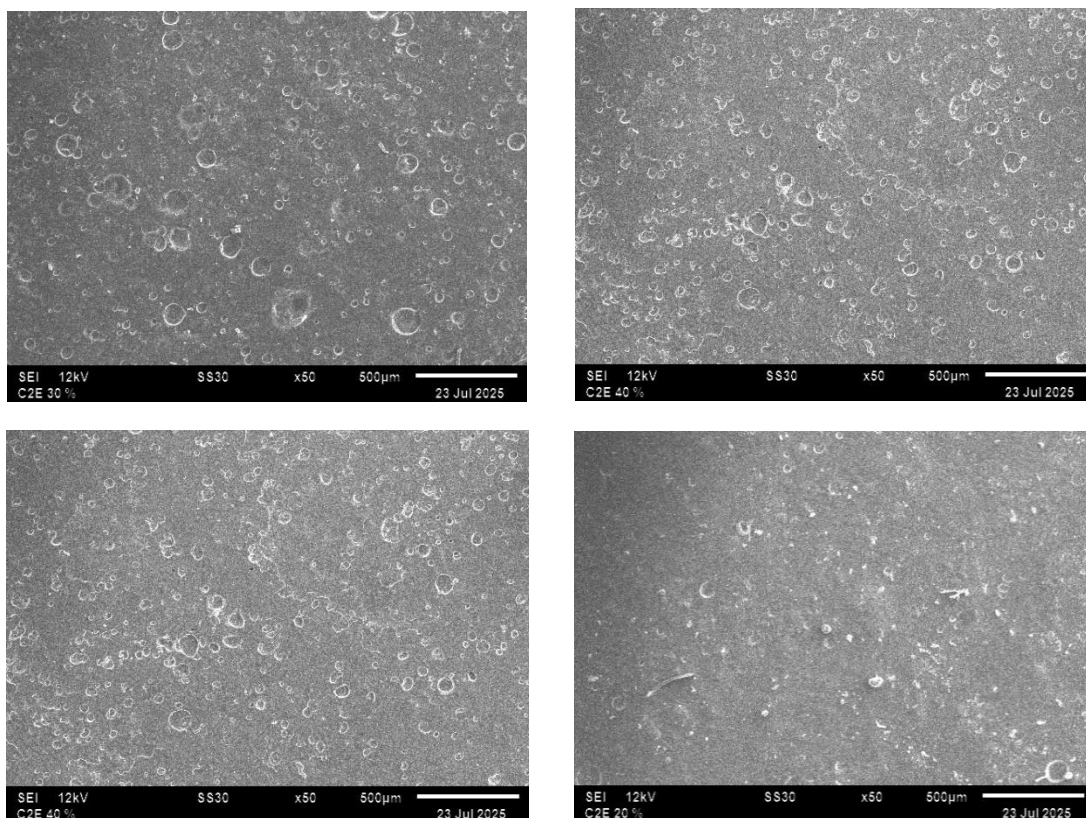
Kombinasi CNC dengan 20% PEO (C2E20) menghasilkan sifat mekanik yang seimbang antara kekuatan dan fleksibilitas, dengan kekuatan tarik sebesar 4,28 MPa dan elongasi sebesar 20,74%.

Namun, peningkatan konsentrasi PEO menjadi 30% dan 40% (C2E30 dan C2E40) menyebabkan penurunan bertahap pada kekuatan tarik dan elongasi. Film C2E40 menunjukkan nilai terendah dalam kekuatan tarik (2,58 MPa) dan elongasi (9,25%). Penurunan ini menunjukkan bahwa peningkatan kandungan minyak dapat mengganggu kontinuitas matriks polimer dan menghambat transfer tegangan, kemungkinan akibat pemisahan fase dan terbentuknya area lemah dalam struktur komposit (Yang *et al.*, 2024). Hasil ini menunjukkan bahwa stabilisasi menggunakan CNC dapat mempertahankan sifat mekanik pada konsentrasi PEO rendah (20%), namun metode Tween-80 lebih efektif dalam meningkatkan kekuatan tarik. Kinerja unggul film C0E30 menunjukkan bahwa stabilisasi surfaktan konvensional lebih efektif dibandingkan emulsi Pickering dalam kondisi penelitian ini.

2. Ketebalan dan Morfologi Film

Nilai ketebalan film menunjukkan variasi yang cukup besar, yaitu antara 60 μm hingga 150 μm . Film kontrol (C0E0) memiliki ketebalan paling kecil, sesuai dengan karakteristik matriks kitosan-gliserol murni (Chen *et al.*, 2024a). Peningkatan ketebalan terjadi setelah penambahan CNC dan PEO, baik secara terpisah maupun bersamaan. Hal ini disebabkan oleh penambahan partikel padat CNC dan tetesan minyak PEO yang meningkatkan kandungan padatan serta mengisi volume dalam matriks (Liu *et al.*, 2024). Kombinasi CNC dan PEO (C2E20–C2E40) menghasilkan film dengan ketebalan terbesar, yang menunjukkan adanya efek sinergis antara nanopartikel CNC dan tetesan minyak dalam meningkatkan struktur dimensi film.



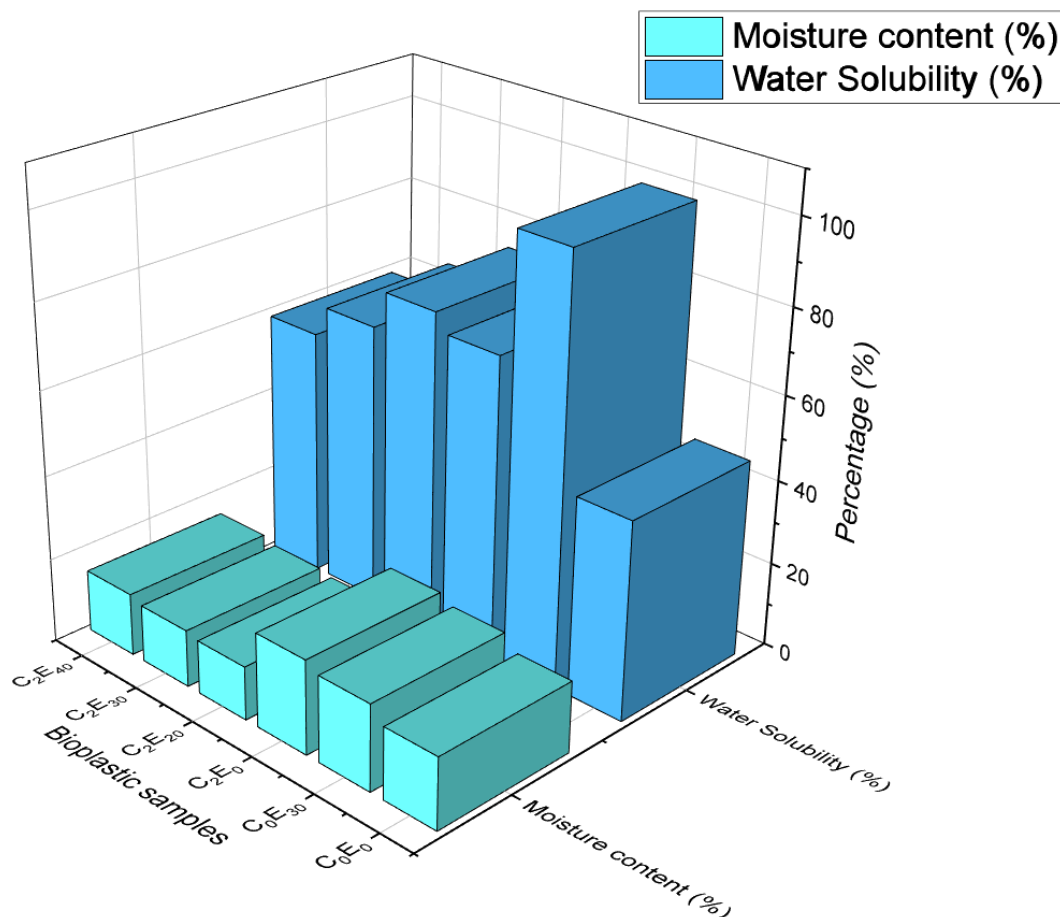


Gambar 1. Ketebalan dan Morfologi Film

Gambar 1 Morfologi permukaan dan penampang film dianalisis menggunakan SEM. Film C0E0 menunjukkan permukaan halus, padat, dan homogen tanpa pori, yang menandakan interaksi kuat antar rantai polimer (Yadav *et al.*, 2020).

Penambahan PEO dengan Tween-80 (C0E30) menghasilkan struktur sedikit lebih kasar namun tetap kontinu. Tetesan minyak yang kecil dan terdispersi merata menunjukkan kompatibilitas yang baik antara kitosan dan PEO (Elshamy *et al.*, 2021). Film C2E0 menunjukkan adanya partikel kecil dan ketidakteraturan akibat agregasi CNC dalam matriks (Díaz-Cruz *et al.*, 2022). Sebaliknya, film dengan emulsi Pickering (C2E20–C2E40) menunjukkan perubahan morfologi signifikan dengan munculnya pori-pori berbentuk bulat akibat penguapan tetesan minyak selama pengeringan (Chaabane *et al.*, 2023). Jumlah dan ukuran pori meningkat seiring peningkatan konsentrasi PEO, terutama pada C2E40, yang menunjukkan struktur lebih berpori dan kurang kompak (Bu *et al.*, 2022). Secara umum, emulsi Tween-80 menghasilkan struktur lebih homogen, sedangkan emulsi Pickering menghasilkan permukaan lebih kasar dengan distribusi pori yang merata (Cahyana *et al.*, 2022).

3. Kadar Air dan Kelarutan dalam Air



Gambar 2 Kadar Air dan Kelarutan dalam Air

Gambar 2 menunjukkan kadar air film bioplastik. Film kontrol (C₀E₀) memiliki kadar air sebesar 17,00% karena sifat hidrofilik kitosan dan gliserol (Silva *et al.*, 2024a). Film C₀E₃₀ menunjukkan peningkatan kadar air menjadi 20,45% akibat sifat higroskopis Tween-80 (Chen *et al.*, 2024). Penambahan CNC meningkatkan kadar air hingga 22,38% (C₂E₀) karena adanya gugus hidroksil yang bersifat hidrofilik. Namun, penambahan PEO melalui emulsi Pickering menurunkan kadar air menjadi 12,73–14,81% karena sifat hidrofobik minyak (Pires *et al.*, 2025). Kelarutan film dipengaruhi oleh interaksi antara matriks kitosan, plasticizer, aditif, dan air. Film C₀E₃₀ larut sempurna dalam air karena Tween-80 bersifat sangat hidrofilik. Film kontrol (C₀E₀) menunjukkan kelarutan sedang (~47%), sedangkan penambahan CNC meningkatkan kelarutan menjadi ~71% karena mempercepat penetrasi air (Wigati *et al.*, 2025). Film Pickering (C₂E₂₀ dan C₂E₃₀) menunjukkan kelarutan tertinggi (~75% dan ~66%) karena struktur emulsi mempercepat degradasi. Namun pada C₂E₄₀, kelarutan menurun (~58,9%) karena kandungan minyak tinggi membentuk penghalang hidrofobik yang memperlambat penetrasi air (Kong *et al.*, 2022).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kitosan yang diperoleh dari limbah cangkang udang memiliki potensi yang sangat baik sebagai bahan dasar dalam pembuatan bioplastik ramah lingkungan. Kitosan mampu membentuk matriks film yang stabil, biodegradable, serta memiliki sifat antibakteri alami, sehingga layak dikembangkan sebagai alternatif pengganti plastik konvensional. Penambahan minyak nilam sebagai agen antibakteri dan nanokristal selulosa (CNC) sebagai penguat struktur terbukti mampu

meningkatkan sifat fungsional bioplastik. Penggunaan emulsi Tween-80 menghasilkan kekuatan tarik tertinggi, sedangkan emulsi Pickering berbasis CNC memberikan peningkatan pada fleksibilitas, aktivitas antibakteri, serta biodegradabilitas.

Variasi konsentrasi minyak nilam memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik, fisik, dan aktivitas antibakteri film. Konsentrasi tinggi minyak nilam meningkatkan efektivitas antibakteri, namun cenderung menurunkan kekuatan mekanik akibat gangguan pada struktur matriks polimer. Secara keseluruhan, kombinasi kitosan, minyak nilam, dan CNC menghasilkan bioplastik dengan karakteristik yang lebih baik, terutama dalam hal biodegradabilitas dan aktivitas antibakteri. Oleh karena itu, pemanfaatan kitosan sebagai bahan dasar bioplastik yang dimodifikasi dengan bahan alami lainnya memiliki prospek yang sangat menjanjikan dalam pengembangan material kemasan pangan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan selanjutnya adalah sebagai berikut. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengoptimalkan komposisi kitosan, minyak nilam, dan nanokristal selulosa (CNC) guna memperoleh keseimbangan yang lebih baik antara sifat mekanik, fleksibilitas, dan aktivitas antibakteri. Hal ini penting karena peningkatan konsentrasi minyak nilam terbukti meningkatkan aktivitas antibakteri, namun dapat menurunkan kekuatan mekanik film. Selain itu, perlu dilakukan pengembangan metode formulasi yang lebih efektif, seperti kombinasi teknik emulsi atau penggunaan bahan tambahan lain, untuk meningkatkan kompatibilitas antara komponen hidrofilik dan hidrofobik dalam matriks bioplastik. Dengan demikian, distribusi minyak nilam dalam matriks kitosan dapat lebih homogen dan stabil.

Pengujian lebih lanjut juga diperlukan dalam skala aplikasi nyata, khususnya pada kemasan pangan, untuk mengetahui kinerja bioplastik terhadap daya simpan produk, interaksi dengan bahan pangan, serta keamanan penggunaannya. Uji toksisitas dan uji migrasi juga penting dilakukan untuk memastikan bahwa bioplastik aman digunakan dalam industri pangan. Selain itu, penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengeksplorasi pemanfaatan sumber biomassa lokal lainnya sebagai bahan tambahan atau penguat, sehingga dapat meningkatkan nilai guna limbah dan mendukung konsep ekonomi sirkular. Terakhir, diperlukan kajian skala industri dan analisis ekonomi untuk menilai kelayakan produksi bioplastik berbasis kitosan secara massal, sehingga dapat menjadi alternatif yang kompetitif dan berkelanjutan dalam menggantikan plastik konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Khalil, H. P. S., Muhammad, S., Yahya, E. B., Amanda, L. K. M., Abu Bakar, S., Abdullah, C. K., Aiman, A. R., Marwan, M., & Rizal, S. (2022). Synthesis and Characterization of Novel Patchouli Essential Oil Loaded Starch-Based Hydrogel. *Gels*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/gels8090536>
- Ahsan, W. A., Hussain, A., Lin, C., & Nguyen, M. K. (2023). Biodegradation of Different Types of Bioplastics through Composting—A Recent Trend in Green Recycling. In *Catalysts* (Vol. 13, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal13020294>
- Aisyah, Y., Yunita, D., & Amanda, A. (2021). Antimicrobial activity of patchouli (*Pogostemon cablin* Benth) citronella (*Cymbopogon nardus*), and nutmeg (*Myristica fragrans*) essential oil and their mixtures against pathogenic and food spoilage microbes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 667(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/667/1/012020>
- Alaghemandi, M. (2024). Sustainable Solutions Through Innovative Plastic Waste Recycling Technologies. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 16, Issue 23). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su162310401>

- Amara, C., El Mahdi, A., Medimagh, R., & Khwaldia, K. (2021). Nanocellulose-based composites for packaging applications. In *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* (Vol. 31). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100512>
- Asghar, L., Sahar, A., Khan, M. I., & Shahid, M. (2024). Fabrication and Characterization of Chitosan and Gelatin-Based Antimicrobial Films Incorporated with Different Essential Oils. *Foods*, *13*(12). <https://doi.org/10.3390/foods13121796>
- Bahsaine, K., El Allaoui, B., Benzeid, H., El Achaby, M., Zari, N., El Kacem Qaiss, A., & Bouhfid, R. (2023). Hemp cellulose nanocrystals for functional chitosan/polyvinyl alcohol-based films for food packaging applications. *RSC Advances*, *13*(47), 33294–33304. <https://doi.org/10.1039/d3ra06586c>
- Bu, N., Sun, R., Huang, L., Lin, H., Pang, J., Wang, L., & Mu, R. (2022). Chitosan films with tunable droplet size of Pickering emulsions stabilized by amphiphilic konjac glucomannan network. *International Journal of Biological Macromolecules*, *220*, 1072–1083. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.157>
- Cahyana, Y., Putri, Y. S. E., Solihah, D. S., Lutfi, F. S., Alqurashi, R. M., & Marta, H. (2022). Pickering Emulsions as Vehicles for Bioactive Compounds from Essential Oils. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules27227872>
- Chaabane, D., Mirmazloum, I., Yakdhane, A., Ayari, E., Albert, K., Vatai, G., Ladányi, M., Koris, A., & Nath, A. (2023). Microencapsulation of Olive Oil by Dehydration of Emulsion: Effects of the Emulsion Formulation and Dehydration Process. *Bioengineering*, *10*(6). <https://doi.org/10.3390/bioengineering10060657>
- Chen, H., Xin, K., & Yu, Q. (2024a). Sausage Preservation Using Films Composed of Chitosan and a Pickering Emulsion of Essential Oils Stabilized with Waste-Jujube-Kernel-Derived Cellulose Nanocrystals. *Foods*, *13*(21). <https://doi.org/10.3390/foods13213487>
- Chen, H., Xin, K., & Yu, Q. (2024b). Sausage Preservation Using Films Composed of Chitosan and a Pickering Emulsion of Essential Oils Stabilized with Waste-Jujube-Kernel-Derived Cellulose Nanocrystals. *Foods*, *13*(21). <https://doi.org/10.3390/foods13213487>
- Chow, J., Perez-Garcia, P., Dierkes, R., & Streit, W. R. (2023). Microbial enzymes will offer limited solutions to the global plastic pollution crisis. In *Microbial Biotechnology* (Vol. 16, Issue 2, pp. 195–217). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14135>
- Daeialiakbar, M., Yousefi, S., & Weisany, W. (2025). Enhanced properties of chitosan-PVA nanocomposite films with lemongrass oil microcapsules. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, *9*. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100668>
- Dhali, S. L., Parida, D., Kumar, B., & Bala, K. (2024). Recent trends in microbial and enzymatic plastic degradation: a solution for plastic pollution predicaments. *Biotechnology for Sustainable Materials*, *1*(1). <https://doi.org/10.1186/s44316-024-00011-0>