

Sintesis Hidrogel Berbasis Ampas Singkong dan Polyvinyl Alcohol (PVA) dengan Pemanfaatan Ekstrak Lada untuk Aplikasi Pembalut Luka Antibakteri

Risna Kirana Rokar, Indah Puspita*, Anisa Indriawati

Program Studi Fisika, Universitas Bangka Belitung

Jl.kampus Peradapan Kampus Terpadu Balunijuk Gd. Dharma Penelitian Lt 1, Bangka, Kepulauan Bangka Belitung, Indonesia 33172

*E-mail korespondensi: indahpuspita@ubb.ac.id

Info Artikel:

Dikirim:

21 Mei 2024

Revisi:

15 September
2025

Diterima:

10 Desember
2025

Kata Kunci:

*Pembalut luka,
Ampas Singkong,
PVA, Na- Alginat,
lada,*

Abstract

Wound healing is a complex biological process in which wound dressings play a vital role in providing protection and supporting tissue regeneration. In this study, cassava dregs waste was utilized as a base material for the development of hydrogel wound dressings. The hydrogel was incorporated with black pepper (*Piper nigrum*) extract to enhance its antibacterial properties. Sample preparation consisted of several stages, including cassava dregs processing, hydrogel synthesis, and extraction of black pepper using the maceration method. The hydrogel was characterized in terms of swelling capacity, gel fraction, swelling kinetics, antibacterial activity against *Staphylococcus aureus*, functional group identification using Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy, and morphological analysis. The results demonstrated that the incorporation of black pepper extract significantly affected the swelling behavior of the hydrogel, with swelling capacities ranging from 263.76% to 387.87%. The hydrogel exhibited a high gel fraction of 86.13% and favorable swelling kinetics with a kinetic constant of 0.5443. Variations in black pepper extract volume were evaluated, including 0 ml (control), 20 ml, 40 ml, and 60 ml. These findings indicate that cassava dregs-based hydrogels enriched with black pepper extract have promising potential as antibacterial wound dressing materials.

PENDAHULUAN

Hidrogel berbasis polimer alami banyak diaplikasikan dalam bidang medis, khususnya sebagai pembalut luka, karena memiliki keunggulan seperti biodegradabilitas, biokompatibilitas, efektivitas biaya, serta ketersediaan bahan baku yang melimpah [1]. Struktur hidrogel yang mampu menyerap dan mempertahankan air dalam jumlah besar menjadikannya efektif dalam menjaga kelembaban luka, sehingga dapat mempercepat proses penyembuhan dan mengurangi risiko trauma jaringan [2]. Salah satu bahan alami yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan dasar hidrogel adalah ampas singkong, yang merupakan hasil samping dari industri pengolahan singkong [3]. Pemanfaatan limbah onggok sebagai bahan pembalut luka tidak hanya bernilai

ekonomis, tetapi juga mendukung upaya pengurangan limbah dan pengembangan material ramah lingkungan. Akan tetapi, hidrogel berbasis polimer alami umumnya memiliki kelemahan, terutama pada stabilitas mekanik dan kestabilan sifat fisikokimia.

Oleh sebab itu, berbagai penelitian melakukan modifikasi hidrogel melalui pencampuran dengan polimer lain, seperti polyvinyl alcohol (PVA) dan natrium alginat (Na-alginat) [4]. PVA banyak digunakan dalam aplikasi biomedis karena bersifat non-toksik, biokompatibel, serta mampu meningkatkan kekuatan dan stabilitas mekanik hidrogel. Sementara itu, Na-alginat merupakan polimer alami yang berasal dari alga coklat dan memiliki kemampuan absorpsi yang tinggi, mampu menjaga kelembaban di sekitar luka, bersifat elastis, biodegradable, serta tidak menimbulkan reaksi alergi [5-6]. Kombinasi PVA dan Na-alginat dalam sistem hidrogel dilaporkan dapat meningkatkan performa hidrogel sebagai pembalut luka [7].

Selain memiliki sifat fisik dan mekanik yang baik, pembalut luka hidrogel juga harus memiliki aktivitas antibakteri untuk melindungi luka dari infeksi. Infeksi bakteri, khususnya oleh *Staphylococcus aureus*, merupakan salah satu penyebab utama terhambatnya proses penyembuhan luka [1]. Oleh karena itu, penambahan agen antibakteri menjadi aspek penting dalam pengembangan pembalut luka hidrogel. Penggunaan agen antibakteri alami menjadi alternatif karena cenderung lebih aman dan memiliki efek samping yang lebih rendah dibandingkan agen antibakteri sintetis. Berbagai rempah-rempah yang banyak ditemukan di Indonesia, seperti bawang putih, kunyit, lada, dan kayu manis, telah dilaporkan memiliki aktivitas antibakteri [8]. Lada (*Piper nigrum*) merupakan salah satu bahan alami yang memiliki kandungan senyawa bioaktif seperti piperin yang mampu menghambat pertumbuhan bakteri patogen seperti *Staphylococcus aureus*.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi hidrogel berbasis limbah onggok yang dimodifikasi dengan PVA serta diperkaya dengan ekstrak lada sebagai agen antibakteri. Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui sifat fisik, kimia, dan kemampuan antibakteri hidrogel, sehingga diharapkan material yang dihasilkan berpotensi diaplikasikan sebagai pembalut luka antibakteri yang efektif dan ramah lingkungan.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, gelas ukur, gelas beaker, spatula kaca, neraca analitik, oven, *hotplate stirrer* 875 RPM, penyaring ukuran 50 mesh, *magnetic stirrer*, blender, cawan petri, tabung reaksi, Jarum ose, Inkubator Mikroba, Autoclave Listrik Digital, Gelas Ukur, Bunsen, Mikropipet, Erlenmeyer, Batang Pengaduk, Laminar Air Flow dan cetakan. Adapun alat yang digunakan untuk pengujian yaitu *Fourier Transform Infra Red (FTIR)*, dan *Scanning Electron Microscope (SEM)*. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, limbah onggok singkong, Polyvinyl Alcohol (PVA), Na-Alginat, aquadest, etanol 95%, Nutrient Borth dan bubuk lada

Prosedur Penelitian

Preparasi onggok

Ampas singkong yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari PT. Bangka Asindo Agri, Kabupaten Bangka, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. Preparasi ampas singkong diawali dengan pencucian, pengepresan, dan pengeringan hingga massa stabil. Ampas singkong selanjutnya dihaluskan menjadi berukuran 60 mesh. Selanjutnya serbuk ampas singkong dilarutkan dengan akuades dan dipanaskan pada suhu 90 °C hingga mengalami gelatinisasi.

Ekstrak Lada

Ekstraksi lada dilakukan dengan metode maserasi. Serbuk lada dilarutkan dalam alkohol 95% dengan perbandingan 5:20. Selanjutnya suspensi didiamkan selama 24 jam kemudian disaring dan didapatkan ekstrak lada berwarna kuning pekat.

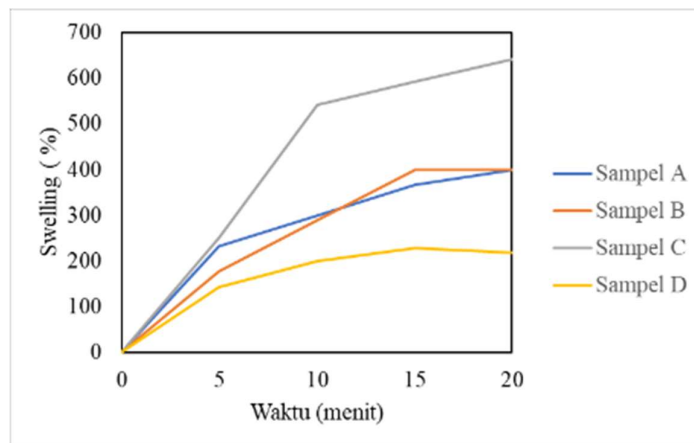
Sintesis Hidrogel Menggunakan Metode Grafting

Sintesis Hidrogel pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode yang dimodifikasi dari penelitian sebelumnya [9]. Tepung onggok disiapkan sesuai dengan berat masing-masing variasi sampel. Tepung onggok dicampurkan dengan aquades dengan perbandingan 1:10 (b/v). Kemudian dipanaskan pada suhu 90 °C selama 30 menit hingga mengalami gelatinisasi. Tepung onggok yang telah mengalami proses gelatinisasi selanjutnya dicampurkan dengan PVA dan Na-alginat. Setelah suspensi homogen, dilakukan penambahan ekstrak lada dengan volume yang divariasikan menjadi 0, 20, 40, dan 150 ml. Setiap variasi diaduk 30 menit dengan kecepatan 400 rpm dan suhu 60°C. Suspensi yang terbentuk dituangkan pada cetakan dan dikeringkan pada suhu 60°C.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Swelling hidrogel

Kemampuan pembengkakan atau *swelling* hidrogel merupakan parameter utama dalam penelitian ini. *Swelling* pada penelitian ini dianalisis melalui nilai kinetika *swelling* dan *Equilibrium Degree of Swelling* (EDS). Kinetika *swelling* pada penelitian ini diamati melalui perendaman selama 20 menit. Berdasarkan hasil analisa kinetika *swelling* pada Gambar 1, waktu perendaman yang semakin lama akan meningkatkan jumlah air yang mampu diserap oleh hidrogel. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa ketika hidrogel direndam dalam air, maka akan terjadi perbedaan konsentrasi ion – ion pada rantai polimer dengan lingkungan. Hal ini akan menyebabkan air mengalir dan berdifusi masuk ke rantai polimer [10].



Gambar 1 Pengaruh waktu perendaman terhadap *swelling* Hidrogel dengan volume ekstrak lada yang divariasikan 0 ml (A), 20 ml (B), 40 ml (C), dan 150 ml (D)

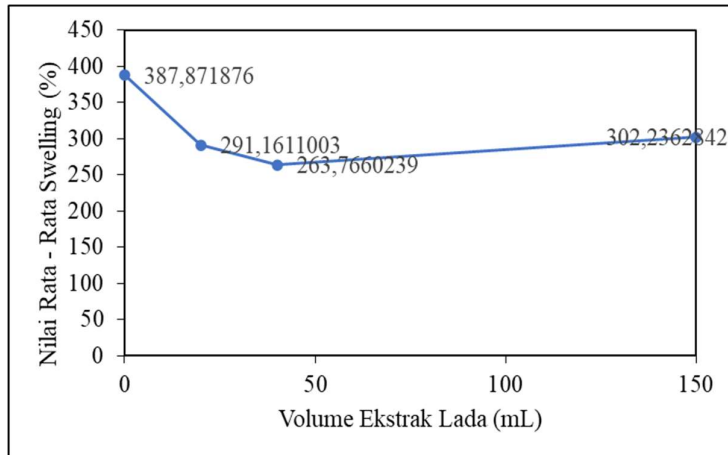
Sementara itu, kinetika *swelling* secara kuantitatif dapat digunakan untuk menentukan nilai eksponen *swelling* (n), konstanta *swelling* (K), dan difusifitas (D) menggunakan Hukum Fick. Berdasarkan Hukum Fick, proses difusi air ke rantai hidrogel disebabkan oleh pergerakan partikel dari konsentrasi tinggi menuju konsentrasi yang lebih rendah. Hal ini lah yang memungkinkan hidrogel untuk menyerap air dalam kondisi lingkungan basah dan melepaskannya lagi pada saat lingkungan lebih kering dibandingkan sistem hidrogel. Nilai konstanta *swelling*, eksponen *swelling*, dan difusifitas hidrogel yang didapatkan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Nilai parameter kinetika *swelling*

Variasi volume ekstrak lada (ml)	Parameter Kinetika		
	n	K	D
0	0,2986	-0,8923	0,1531
20	0,4542	-1,3017	0,2137
40	0,5443	-1,5498	0,2306
150	0,2140	-0,5906	0,1137

Berdasarkan nilai parameter kinetika *swelling* pada Tabel 2, hidrogel yang mendapatkan penambahan ekstrak lada dengan volume 0, 20, dan 150 ml memiliki nilai eksponen *swelling* kurang dari 0,5 ($n < 0,5$). Hal ini menunjukkan bahwa kategori difusi pada sampel tersebut berada pada kategori difusi fickian (*Fickian diffusion*). Kategori difusi ini menandakan bahwa mobilitas rantai polimer lebih tinggi dibandingkan dengan laju difusi aliran fluida [3]. Sementara itu, untuk sampel yang mendapatkan penambahan 40 ml ekstrak lada masuk ke dalam kategori *non-fickian diffusion* atau difusi anomali. Kategori ini memiliki kemampuan difusi air yang setara dengan relaksasi rantai polimer, sehingga memiliki nilai *swelling* yang cenderung lebih tinggi dibandingkan sampel yang lain. Parameter yang kedua dalam konstanta *Swelling* (K). Nilai ini menunjukkan laju pertambahan air selama proses perendaman [9]. Berdasarkan hasil penelitian pada Tabel 2, nilai mutlak konstanta *swelling* semakin meningkat ketika volume ekstrak lada ditambahkan dan bernilai maksimum pada variasi volume 40 ml dan menurun pada sampel dengan 150 ml ekstrak lada. Nilai ini sesuai dengan nilai eksponen *swelling* yang menunjukkan sampel C berada dalam kategori *non-fickian diffusion*, sehingga memungkinkan untuk memiliki nilai *swelling* yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel yang lain. Tanda negatif pada konstanta *swelling* menandakan bahwa proses yang terjadi adalah proses penyerapan. Selanjutnya, parameter ketiga adalah koefisien difusi (D) yang mengindikasikan laju aliran air yang masuk ke dalam rantai polimer, dengan nilai D yang lebih tinggi menunjukkan peningkatan jumlah air yang diserap oleh hidrogel.

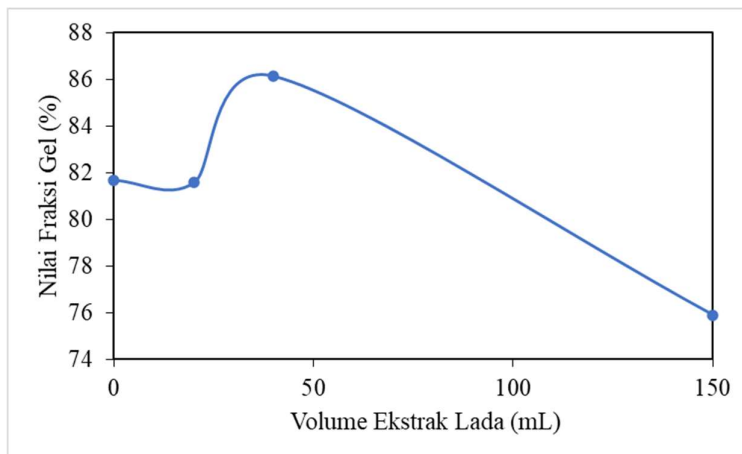
Selain kinetika *swelling*, parameter lain dalam penelitian hidrogel adalah *Equilibrium Degree of Swelling* (EDS). Nilai EDS menunjukkan kemampuan maksimum hidrogel dalam menyerap air. Hasil pengujian EDS pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan data pada Gambar 2, volume ekstrak lada yang semakin bertambah menyebabkan penurunan nilai EDS. Hal ini disebabkan, ekstrak lada tidak hanya berperan sebagai antibakteri, tetapi juga dapat menjadi agen pengikat silang antar rantai polimer hidrogel. Hal ini menyebabkan ketika volume ekstrak lada bertambah, ikatan antar rantai polimer semakin rapat sehingga air sulit untuk penetrasi ke rantai polimer dan berakibat pada nilai EDS yang semakin berkurang. Berdasarkan data pada Gambar 2, nilai EDS hidrogel yang dihasilkan pada penelitian ini berada pada rentang 263,77 – 387,87%. Nilai EDS hidrogel ini berada pada rentang hidrogel untuk pembalut luka, sehingga hidrogel yang dihasilkan cukup mampu untuk menjaga kelembaban luka dan membantu proses penyembuhan.



Gambar 2 Pengaruh volume ekstrak lada terhadap nilai EDS

Fraksi Gel Hidrogel

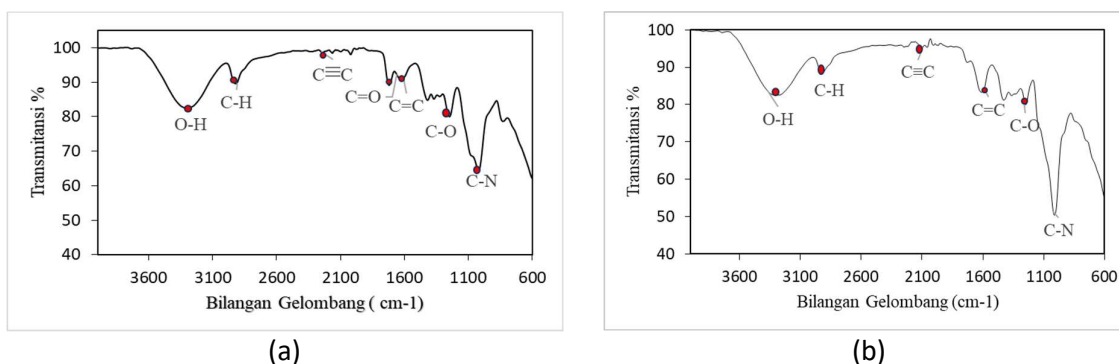
Hasil pengukuran fraksi gel hidrogel yang dihasilkan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3. Pengukuran fraksi gel dilakukan untuk mengukur ketahanan hidrogel ketika dilakukan perendaman. Nilai fraksi gel yang semakin tinggi menunjukkan tingkat kelarutan hidrogel yang semakin rendah. Hal ini menandakan ikatan silang tiga dimensi yang terbentuk dalam hidrogel semakin baik, sehingga tidak mudah terlepas ketika direndam dalam air. Berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan, yang ditunjukkan pada Gambar 3, nilai fraksi gel meningkat ketika volume ekstrak lada yang ditambahkan meningkat, dan paling optimum pada penambahan ekstrak lada sebesar 40 ml. Hal ini disebabkan karena bahan aktif yang terkandung dalam bahan alami seperti lada, jahe, dan lain sebagainya tidak hanya berperan sebagai antibakteri dan anti oksidan, tetapi juga dapat berperan sebagai agen pengikat silang [11]. Hal ini menyebabkan, jumlah ikatan yang terbentuk ketika volume ekstrak lada ditambahkan mengalami peningkatan, sehingga nilai fraksi gel semakin meningkat. Akan tetapi, ketika volume ekstrak lada yang ditambahkan meningkat menjadi 150 ml, nilai fraksi gel mengalami penurunan yang signifikan. Hal ini disebabkan karena volume ekstrak lada yang semakin banyak menghasilkan semakin banyaknya bahan aktif yang mampu membentuk ikatan, akibatnya ikatan yang terbentuk bersifat jenuh dan kurang stabil. Hal ini menyebabkan ikatan yang terbentuk cenderung kurang kuat dan berdampak pada mudahnya hidrogel mengalami degradasi ketika berinteraksi dengan air. Nilai fraksi gel yang paling optimal yang didapatkan pada penelitian ini adalah 86%. Berdasarkan penelitian sebelumnya, nilai ini memenuhi syarat sebagai pembalut luka [12].



Gambar 3 Pengaruh nilai fraksi gel terhadap volume ekstrak lada

Pengujian FTIR Hidrogel

Pengujian FTIR dilakukan untuk menganalisis gugus fungsi yang terkandung pada hidrogel yang dihasilkan pada penelitian ini. Gambar 4 (a) menunjukkan gugus fungsi sampel kontrol atau tanpa penambahan ekstrak lada, sedangkan Gambar 4 (b) menunjukkan gugus fungsi sampel hidrogel yang mendapatkan penambahan ekstrak lada sebanyak 150 ml. Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4 (a), sampel hidrogel yang tidak mendapatkan penambahan ekstrak lada memiliki gugus fungsi OH pada bilangan gelombang $3308,75\text{ cm}^{-1}$, Gugus CH pada bilangan gelombang $2922,41\text{ cm}^{-1}$, gugus fungsi $\text{C}\equiv\text{C}$ pada $2165,98\text{ cm}^{-1}$, gugus fungsi C=O dan C=C dengan bilangan gelombang masing - masing secara berurutan $1721,84\text{ cm}^{-1}$ dan $1628,50\text{ cm}^{-1}$, serta C-O pada bilangan gelombang $1249,84\text{ cm}^{-1}$. Pada sampel ini juga teridentifikasi gugus fungsi C-N pada bilangan gelombang $1022,16\text{ cm}^{-1}$. Sementara itu, pada sampel D (penambahan 150 ml ekstrak lada) yang ditunjukkan oleh Gambar 4 (b), teridentifikasi gugus hidroksil (OH) pada $3301,47\text{ cm}^{-1}$ dan gugus CH pada pita serapan $2924,48\text{ cm}^{-1}$. Pada sampel ini juga teridentifikasi pita serapan pada bilangan gelombang $2102,85\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan keberadaan gugus fungsi $\text{C}\equiv\text{C}$. Selain itu, terdapat gugus fungsi C=C dan C-O dengan bilangan gelombang $1611,38\text{ cm}^{-1}$ dan $1249,84\text{ cm}^{-1}$, serta pita serapan C-N pada bilangan gelombang $1011,97\text{ cm}^{-1}$.



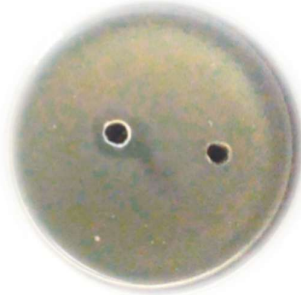
Gambar 4 Gugus fungsi hidrogel berdasarkan pengujian FTIR (a) tanpa penambahan ekstrak lada (sampel A), dan (b) dengan penambahan ekstrak lada 150 ml (sampel D)

Perbandingan spektrum FTIR hidrogel tanpa (Gambar 4 (a)) dan dengan penambahan ekstrak lada (Gambar 4 (b)) menunjukkan adanya perubahan intensitas dan pergeseran bilangan gelombang pada beberapa pita serapan utama. Pada hidrogel dengan penambahan ekstrak lada 150 ml, pita serapan gugus hidroksil (OH) mengalami pergeseran dan peningkatan intensitas yang mengindikasikan bertambahnya ikatan hidrogen akibat interaksi antara matriks hidrogel onggok-PVA dan senyawa fenolik dalam ekstrak lada. Selain itu, pita serapan gugus $\text{C}\equiv\text{C}$ dan C=C pada sampel dengan ekstrak lada tampak lebih jelas, yang berkaitan dengan keberadaan senyawa bioaktif lada yang memiliki ikatan rangkap dan struktur aromatik. Perubahan intensitas pada pita C=O, C-O, serta penguatan pita C-N juga menunjukkan adanya interaksi antara gugus fungsional hidrogel dan komponen alkaloid dalam ekstrak lada. Secara keseluruhan, hasil ini mengonfirmasi bahwa penambahan ekstrak lada tidak membentuk gugus fungsi baru, namun memodifikasi struktur hidrogel melalui peningkatan interaksi ikatan hidrogen dan kepadatan jaringan polimer, yang berpotensi berkontribusi terhadap peningkatan sifat fungsional hidrogel sebagai material pembalut luka dengan aktivitas antibakteri..

Antibakteri

Pengujian aktivitas antibakteri terhadap bakteri patogen gram positif yaitu *S. Aureus* dilakukan dengan metode sumuran. Pengujian aktivitas antibakteri menggunakan metode difusi sumuran dipilih karena lebih mudah mengukur luas zona hambat yang terbentuk sebab aktivitas

bakteri. Uji antibakteri ekstrak lada menunjukkan kemampuan untuk menghentikan bakteri. Zona hambat atau zona bening yang terbentuk setelah inkubasi selama proses 24 jam menunjukkan aktivitas antibakteri *S. aureus*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil penelitian pada Gambar 5 menunjukkan diameter zona hambat bening ekstrak lada adalah sekitar 12,26 mm. Berdasarkan literatur, antimikroba memiliki 4 kategori zona hambat yaitu aktivitas lemah (<5 mm), sedang (5-10 mm), kuat (>10- 20 mm), sangat kuat (>20 – 30 mm) [13]. Oleh sebab itu, berdasarkan hasil penelitian nilai zona hambat antibakteri yang dihasilkan pada penelitian ini termasuk kategori zona kuat. Hal ini menunjukkan bahwa ekstrak lada termasuk ke dalam senyawa fenolik yang memiliki kemampuan kuat dalam menangkal aktivitas bakteri.



Gambar 5 Aktivitas antibakteri ekstrak lada terhadap banteri *S. Aureus* menggunakan metode sumuran

Ekstrak lada memiliki kandungan fitokimia, seperti fenol (flavonoid, tannin), alkaloid (piperin, piperidin), dan minyak esensial. Hal ini yang menyebabkan zona hambat bening terbentuk ketika dilakukan pengujian aktivitas antibakteri menggunakan metode sumuran. Senyawa Fenol dapat berinteraksi dengan sel bakteri melalui proses adsorpsi yang melibatkan ikatan hidrogel. Hal ini menyebabkan struktur tiga dimensi protein menjadi acak, merusak DNA bakteri, menyebabkan lisis bakteri, kebocoran komponen sel yang penting, dan kematian bakteri.

SEM (Scanning Electron Microscope)



Gambar 6. Morfologi hidrogel dengan perbesaran 2000 kali (kiri) dan 10.000 kali (kanan)

Gambar 6 menunjukkan morfologi hidrogel yang mendapatkan penambahan 150 ml ekstrak lada pada perbesaran 2000 dan 10.000 kali. Hasil karakterisasi morfologi hidrogel menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) pada pembesaran 2000 \times dan 10000 \times menunjukkan terbentuknya struktur permukaan yang tidak homogen serta jaringan berpori pada matriks hidrogel. Pada pembesaran 2000 \times , permukaan hidrogel tampak kasar, berkerut, dan tidak rata, yang mengindikasikan terbentuknya jaringan polimer tiga dimensi akibat proses cross-linking antar rantai polimer selama sintesis hidrogel. Morfologi permukaan yang tidak rata ini

merupakan karakteristik umum hidrogel berbasis polimer alam dan sintetis yang telah mengalami proses pengeringan sebelum pengamatan SEM[14].

Pada pembesaran yang lebih tinggi (10000×), struktur mikro hidrogel terlihat lebih jelas dengan adanya rongga atau pori-pori berukuran mikro yang tersebar pada seluruh matriks. Keberadaan pori-pori tersebut menunjukkan bahwa hidrogel memiliki struktur porous yang memungkinkan terjadinya difusi cairan dan molekul aktif melalui jaringan hidrogel. Struktur berpori ini berperan penting dalam meningkatkan kapasitas penyerapan cairan (swelling behavior) serta mendukung mekanisme pelepasan zat aktif secara bertahap, yang sangat relevan untuk aplikasi hidrogel sebagai balutan luka dan sistem penghantaran obat [15].

KESIMPULAN

Penambahan ekstrak lada secara signifikan memengaruhi kemampuan hidrogel dalam menyerap air yang dilihat dari parameter kinetika swelling dan *equilibrium degree of swelling* (EDS). Nilai rata-rata EDS yang dihasilkan pada penelitian ini berkisar antara 263,76% hingga 387,87%. Penambahan ekstrak lada juga mempengaruhi ketahanan hidrogel yang dapat diamati berdasarkan analisis nilai fraksi gel. Nilai fraksi gel yang didapatkan berada pada rentang 75,9% hingga 86,13%, juga diamati. Berdasarkan hasil analisis, volume ekstrak lada yang paling optimal dalam menghasilkan hidrogel dengan EDS yang paling tinggi adalah 150 ml. Hidrogel yang dihasilkan dari variasi ini memiliki nilai EDS 302,23%, nilai eksponen swelling 0,214, dan nilai fraksi gel sebesar 75,90%. Pengujian antibakteri menggunakan metode sumuran menunjukkan hasil dengan nilai 12,26 mm. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa hidrogel ini memenuhi kriteria sebagai pembalut luka yang ideal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Shen, C. Zhang, T. Wang, and J. Xu, "Advances in Functional Hydrogel Wound Dressings: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 9, p. 2000, Apr. 2023, doi: 10.3390/polym15092000.
- [2] Y. Zhao, X. Wang, R. Qi, and H. Yuan, "Recent Advances of Natural-Polymer-Based Hydrogels for Wound Antibacterial Therapeutics," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 15, p. 3305, Aug. 2023, doi: 10.3390/polym15153305.
- [3] I. Puspita, M. Kurniati, C. Winarti, and A. Maddu, "Cassava waste pulp – poly(acrylamide-acrylic acid) based hydrogels using gamma irradiation," *J Phys Conf Ser*, vol. 1912, no. 1, p. 012017, May 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1912/1/012017.
- [4] F. Ramadhani, L. Miratsi, Z. Humaeroh, and F. Afriani, "Sintesis dan Karakterisasi Hidrogel PVA/Alginat Mengandung Ekstrak Lada sebagai Pembalut Luka Antibakteri," *Newton-Maxwell Journal of Physics*, vol. 2, no. 2, pp. 54–59, Oct. 2021, doi: 10.33369/nmj.v2i2.17752.
- [5] A. Safiya Azhar *et al.*, "Sodium Alginate-Based Hydrogel and Natural Plant Extracts for Wound Healing Applications," *Jurnal Kejuruteraan*, vol. 37, no. 4, pp. 1801–1812, Jul. 2025, doi: 10.17576/jkukm-2025-37(4)-19.
- [6] Z. Soyulu, B. Oktay, A. Erarslan, and E. Ahlatcioğlu Özerol, "Multifunctional polymeric wound dressings," *Polymer Bulletin*, vol. 82, no. 11, pp. 5325–5383, Jul. 2025, doi: 10.1007/s00289-025-05753-z.
- [7] A. Rasyida, D. F. Purnamabroto, A. Purniawan, I. C. Pramadio, F. Gapsari, and A. S. Ednanda, "Evaluation of alginate/poly(vinyl alcohol)/BaSO₄ hydrogels for nucleus pulposus regeneration," *RSC Adv*, vol. 15, no. 41, pp. 34733–34745, 2025, doi: 10.1039/D5RA04291G.

- [8] E. Besan, N. Triadisti, M. Priamsari, K. Rahayu, and Husnunnisa, *Tanaman Obat Berkhasiat Tinggi dari Alam untuk Kesehatan*, 1st ed., vol. 1. Padang: Get Press Indonesia, 2025.
- [9] I. Puspita, M. Kurniati, C. Winarti, and A. Maddu, "Superabsorbent Hydrogel from Cassava Waste Pulp – Acrylamide – Acrylic Acid to Increase Water Holding Capacity in Sandy Soils," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1267, no. 1, p. 012088, Dec. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1267/1/012088.
- [10] I. Puspita and M. Kurniati, "Sifat Mekanik dan Densitas Ikatan Silang Hidrogel berbasis Tapioka Nanopartikel," *Jurnal Riset Fisika Indonesia*, vol. 3, no. 1, pp. 32–42, Dec. 2022, doi: 10.33019/jrfi.v3i1.3665.
- [11] T. I. Sari and M. H. Dahlan, *Rempah - rempah dan Essential Oil: sebagai Antibakteri dan Antioksidan Hidrogel dari PVA/Hidrokoloid*, 1st ed., vol. 1. Yogyakarta: Deepublish Digital (CV Budi Utama), 2024.
- [12] D. Fransiska and A. Reynaldi, "Karakteristik Hidrogel Dari Iota Karaginan dan PVA (Poly-Vinyl Alcohol) Dengan Metode Freezing-Thawing Cycle," *Jambura Fish Processing Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 28–36, Feb. 2020, doi: 10.37905/jfpj.v1i1.4503.
- [13] F. U. Datta, A. N. Daki, I. Benu, A. I. R. Detha, N. D. F. K. Foeh, and N. A. Ndaong, "Uji Aktivitas Antimikroba Bakteri Asam Laktat Cairan Rumen terhadap Pertumbuhan Salmonella Enteritidis, Bacillus cereus, Escherichia coli, dan Staphylococcus aureus Menggunakan Metode Difusi Sumur Agar," in *Prosiding Seminar Nasional VII Fakultas Kedokteran Hewan Universitas Nusa Cendana*, Kupang: Fakultas Kedokteran Hewan Universitas Nusa Cendana, Oct. 2019. Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://media.neliti.com/media/publications/298668-uji-aktivitas-antimikroba-bakteri-asam-l-0064bfcd.pdf>
- [14] Z. Kaberova, E. Karpushkin, M. Nevoralová, M. Vetrík, M. Šlouf, and M. Dušková-Smrčková, "Microscopic Structure of Swollen Hydrogels by Scanning Electron and Light Microscopies: Artifacts and Reality," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 3, p. 578, Mar. 2020, doi: 10.3390/polym12030578.
- [15] M. A. K. Tolentino, E. Y. Du, G. Silvani, E. Pandzic, K. A. Kilian, and J. J. Gooding, "Decoding Hydrogel Porosity: Advancing the Structural Analysis of Hydrogels for Biomedical Applications," *Adv Healthc Mater*, vol. 14, no. 22, Aug. 2025, doi: 10.1002/adhm.202500658.