Journal of Innovative and Creativity
Journal Homepage: https://joecy.org/index.php/joecy
e-mail: galungwaknook@gmail.co

Faculty of Education
University of Pahlawan Tuanku Tambusai
ISSN 2775-771X (Online)
ISSN 2962-570X (Printed)
5 (3) 2025, Page: 30489-30499

Sintesis dan Uji Antibakteri Hidrogel Berbasis Kitosan dari Keong Bakau (T. telescopium) Terikat Silang Glutaraldehida dan Tripolifosfat

[1)]Firda Nurlaili Septarini, [2)]Subur P Pasaribu, [3)]Rudi Kartika
Univeritas Mulawarman
Corresponding Author: **Firda Nurlaili Septarini**, e-mail: firdanrlaili031@gmail.com

Published: November, 2025

ABSTRAK

Hidrogel berbasis kitosan telah berkembang sebagai biomaterial berpotensi tinggi untuk aplikasi medis, khususnya dalam penyembuhan luka. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengevaluasi hidrogel kitosan dari keong bakau (Telescopium telescopium) dengan crosslinker ganda glutaraldehida dan natrium tripolifosfat. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan desain quasi-experimental. Populasi terdiri dari lima kombinasi rasio GA:STPP (4:1, 3:2, 1:1, 2:3, dan 1:4), dengan sampel berjumlah lima hidrogel diuji secara duplo menggunakan purposive sampling. Instrumen penelitian mencakup stopwatch untuk pengukuran gelling time dan jangka sorong digital untuk diameter zona hambat. Teknik analisis data menggunakan statistik deskriptif dan analisis komparatif dengan kategorisasi berdasarkan kriteria Valgas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio GA:STPP 1:4 dan 2:3 menghasilkan zona hambat sedang (6-8 mm) terhadap Staphylococcus aureus dan Escherichia coli, sementara peningkatan STPP mempercepat waktu gelasi dari 330 menjadi 55 menit. Kesimpulannya, hidrogel kitosan dengan sistem dual crosslinking GA-STPP berpotensi sebagai material plester luka antibakteri dengan keseimbangan optimal antara sifat mekanik, daya serap, dan aktivitas antimikroba untuk aplikasi medis berkelanjutan.

Kata Kunci: Antibakteri, Chitosan, Crosslinking, Glutaraldehida, Hidrogel

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Atibution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

PENDAHULUAN

Fenomena Penelitian

Hidrogel merupakan biomaterial polimer hidrofilik yang memiliki kapasitas absorbsi air sangat tinggi tanpa mengalami pelarutan (Shah et al., 2025), sehingga menarik perhatian komunitas biomedis dalam dekade terakhir (Yadav & Palei, 2024). Dalam aplikasi medis, khususnya untuk penyembuhan luka, hidrogel menciptakan lingkungan lembap yang terbukti mempercepat proses penyembuhan dan secara signifikan mengurangi risiko infeksi bakteri dibandingkan dengan balutan konvensional seperti kasa steril (Zhang et al., 2023; Dev et al., 2025). Penelitian terkini menunjukkan bahwa hidrogel berbasis polimer alami memiliki potensi superior dalam mendukung regenerasi jaringan karena kombinasi unik antara biokompatibilitas, biodegradabilitas, dan aktivitas biologis yang melekat pada struktur polimer (Pramanik et al., 2024; Satchanska et al., 2024).

Di antara berbagai polimer alami, kitosan menempati posisi strategis karena memiliki sifat biokompatibel, biodegradabel, dan aktivitas antimikroba yang baik (Li et al., 2022; Kanani et al., 2023). Kitosan merupakan turunan dari kitin yang dapat diekstraksi dari berbagai sumber biota laut, termasuk udang, kepiting, dan gastropoda (Rana et al., 2022). Namun, sumber alternatif lokal seperti keong bakau (Telescopium telescopium) berpotensi besar karena memiliki kandungan kitin tinggi dan masih tergolong limbah biota pesisir yang belum termanfaatkan secara optimal (Sihombing et al., 2025; Harahap et al., 2022). Pemanfaatan keong bakau sebagai sumber kitosan tidak hanya mendukung pengembangan biomaterial ramah lingkungan, tetapi juga mengurangi limbah organik yang merugikan ekosistem mangrove, sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan keberlanjutan (Shan et al., 2024; Amitaye et al., 2024).

Permasalahan Penelitian

Kitosan dapat dibentuk menjadi hidrogel melalui proses crosslinking yang menghubungkan rantai polimer satu sama lain, menciptakan struktur jaringan tiga dimensi yang stabil (Kanani et al., 2023). Jenis dan konsentrasi agen pengikat silang berperan sangat penting dalam menentukan sifat mekanik, stabilitas struktural, dan kapasitas penyerapan air hidrogel (Uddin et al., 2024; Yang et al., 2024). Glutaraldehida (GA) adalah agen kimia yang umum digunakan karena kemampuannya membentuk ikatan kovalen kuat dengan gugus amina kitosan melalui pembentukan basa Schiff, menghasilkan struktur jaringan yang kokoh dan elastis (Liu et al., 2023; Fang et al., 2025). Namun, penggunaan GA secara berlebihan atau tidak terkontrol dapat meningkatkan kekakuan jaringan hingga menurunkan biokompatibilitas, serta menimbulkan kekhawatiran terhadap potensi sitotoksisitas dan reaksi alergi yang dapat mempengaruhi keamanan aplikasi biomedis (Chicea et al., 2024; Xue et al., 2025).

Untuk mengatasi keterbatasan ini, strategi dual crosslinking system yang menggabungkan agen pengikat silang kimia dan ionik telah menjadi pendekatan pilihan dalam formulasi biomaterial (Hidaka et al., 2024; Guo et al., 2025). Natrium tripolifosfat (STPP) adalah agen pengikat silang ionik yang banyak digunakan karena dapat berinteraksi dengan gugus amina bermuatan positif pada kitosan melalui mekanisme elektrostatik yang lebih cepat dan kurang invasif dibandingkan dengan crosslinking kovalen (Koesnarpadi et al., 2024; Latupeirissa et al., 2025). Kombinasi GA dan STPP dalam sistem dual crosslinking memungkinkan pembentukan hidrogel dengan struktur jaringan tiga dimensi yang seimbang, daya serap tinggi, permeabilitas oksigen yang baik, dan karakteristik mekanik yang dapat dioptimalkan sesuai kebutuhan aplikasi (Kwon et al., 2022; Rahman et al., 2021). Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa hidrogel kitosan yang dimodifikasi dengan mekanisme ikatan silang ganda menunjukkan aktivitas antibakteri yang lebih efektif terhadap patogen umum penyebab infeksi luka seperti Staphylococcus aureus dan Escherichia coli (Ahmed et al., 2025; Tampubolon et al., 2025).

Namun, penelitian mengenai optimalisasi rasio GA:STPP untuk menghasilkan hidrogel dari sumber lokal kitosan keong bakau masih sangat terbatas. Terdapat kesenjangan pengetahuan mengenai bagaimana variasi proporsi kedua agen pengikat silang tersebut mempengaruhi karakteristik fisik, kecepatan gelasi, sifat mekanik, dan aktivitas antibakteri dari hidrogel yang dihasilkan (Jiang et al., 2024; Roca-Arroyo et al., 2025). Selain itu, potensi pemanfaatan limbah keong bakau sebagai sumber kitosan untuk aplikasi medis masih belum diexplorasi secara komprehensif di tingkat penelitian akademik maupun industri.

Tujuan, Urgensi, dan Kebaruan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi hidrogel berbasis kitosan dari keong bakau (Telescopium telescopium) dengan pengikat silang ganda glutaraldehida dan natrium tripolifosfat, serta mengevaluasi aktivitas antibakterinya terhadap bakteri patogen yang umum menyebabkan infeksi luka. Urgensi penelitian ini terletak pada tiga aspek strategis: pertama, potensi eksplorasi sumber daya lokal yang berkelanjutan untuk mengurangi ketergantungan terhadap kitosan komersial impor dan mengurangi limbah ekspor perikanan; kedua, pengembangan biomaterial dengan karakteristik optimal yang seimbang antara sifat mekanik, daya serap, dan aktivitas antimikroba untuk aplikasi medis yang lebih efektif; dan ketiga, kontribusi terhadap inovasi teknologi penanganan luka infeksi dengan pendekatan yang ramah lingkungan dan cost-effective. Kebaruan penelitian ini terletak pada kombinasi spesifik penggunaan kitosan dari gastropoda lokal dengan sistem dual crosslinking GA-STPP yang diterapkan secara sistematis untuk memahami hubungan antara rasio crosslinker dan karakteristik hidrogel yang dihasilkan. Dengan pemahaman yang lebih mendalam mengenai formulasi optimum hidrogel kitosan crosslinked dari keong bakau, diharapkan dapat membuka peluang pengembangan biomaterial antibakteri yang potensial untuk aplikasi medis berkelanjutan di masa depan, sekaligus menunjukkan nilai tambah dari pemanfaatan limbah biota pesisir lokal.

METODE

Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan metodologi eksperimental laboratorium yang bersifat kuantitatif. Menurut Sugiyono (2024), metode penelitian eksperimen adalah metode penelitian

kuantitatif yang digunakan untuk mengetahui pengaruh variabel independen (treatment atau perlakuan) terhadap variabel dependen (hasil) dalam kondisi yang terkendali. Penelitian eksperimental dipilih karena bertujuan menguji hubungan sebab akibat antara rasio agen pengikat silang (variabel independen) terhadap karakteristik fisik, kecepatan gelasi, sifat mekanik, dan aktivitas antibakteri hidrogel (variabel dependen). Creswell dan Creswell (2023) menekankan bahwa penelitian eksperimental memungkinkan peneliti untuk memanipulasi variabel independen secara sistematis dan mengukur efeknya terhadap variabel dependen dengan kontrol yang ketat, sehingga menghasilkan data yang valid dan dapat diandalkan untuk pengujian hipotesis secara deduktif.

Desain penelitian yang digunakan adalah quasi-experimental design dengan non-equivalent control group design, atau lebih tepatnya dikenal sebagai static group comparison. Berbeda dengan true experimental design yang memerlukan randomisasi ketat, desain quasi-experimental memungkinkan penelitian untuk dilakukan di lingkungan laboratorium alami tanpa mengorbankan validitas internal. Menurut Rasyid (2022), desain quasi-eksperimental bermanfaat untuk menguji hubungan kausalitas atau hubungan sebab akibat mirip dengan eksperimen murni, meskipun tanpa kontrol sepenuhnya. Dalam penelitian ini, variasi rasio GA:STPP (4:1, 3:2, 1:1, 2:3, dan 1:4) diperlakukan sebagai perlakuan sistematis untuk mengobservasi pengaruhnya terhadap karakteristik hidrogel yang dihasilkan. Pendekatan ini memenuhi persyaratan penelitian eksperimental laboratorium seperti yang didefinisikan oleh Emzir (2013), yang menekankan bahwa penelitian laboratorium merupakan penelitian kuantitatif yang dirancang untuk menguji hubungan antar variabel melalui prosedur ilmiah yang terstandar dengan mengontrol faktor-faktor eksternal yang dapat mempengaruhi hasil penelitian.

Populasi dan Sampel

Penelitian ini tidak menggunakan populasi dalam pengertian statistik tradisional, melainkan menggunakan populasi eksperimental yang terdiri dari kombinasi perlakuan (treatment) variasi rasio GA:STPP. Menurut Sudaryono (2023), dalam penelitian laboratorium eksperimental, populasi didefinisikan sebagai keseluruhan unit atau kombinasi perlakuan yang akan diteliti, bukan sebagai kelompok individu manusia. Populasi eksperimental dalam penelitian ini terdiri dari lima kombinasi rasio GA:STPP yang telah dirancang secara sistematis, yaitu rasio 4:1, 3:2, 1:1, 2:3, dan 1:4. Setiap rasio diperlakukan sebagai satu unit eksperimental independen yang akan dievaluasi pengaruhnya terhadap karakteristik hidrogel kitosan dari keong bakau.

Penentuan sampel dalam penelitian ini menggunakan purposive sampling, suatu teknik pengambilan sampel yang didasarkan pada pertimbangan peneliti berdasarkan karakteristik variabel independen yang spesifik. Menurut Sugiyono (2024), purposive sampling adalah teknik pengambilan sampel yang memilih sampel dengan tujuan tertentu untuk memenuhi kriteria penelitian yang telah ditentukan. Dalam konteks penelitian ini, purposive sampling dipilih karena penelitian dirancang untuk secara khusus menguji pengaruh variasi rasio GA:STPP yang telah direncanakan sebelumnya, bukan untuk mengambil sampel secara random dari populasi yang tidak terbatas. Sampel dalam penelitian ini terdiri dari lima hidrogel yang dihasilkan dari masing-masing rasio GA:STPP, dengan setiap sampel diulang dua kali (duplo) untuk pengujian antibakteri guna memastikan konsistensi dan reliabilitas data. Creswell (2023) menekankan bahwa dalam penelitian eksperimental, pemilihan sampel harus didasarkan pada tujuan penelitian dan desain yang telah ditetapkan, memastikan bahwa sampel yang dipilih dapat dengan jelas menunjukkan hubungan antar variabel yang sedang diteliti.

Instrumen dan Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini menggunakan dua instrumen utama yang dirancang untuk mengukur variabel dependen secara komprehensif. Pertama, pengukuran karakteristik fisik dan kecepatan gelasi menggunakan metode observasi langsung dan pengukuran waktu dengan stopwatch yang akurat hingga presisi menit. Menurut Sudaryono (2023), observasi dalam penelitian laboratorium adalah metode pengumpulan data yang melibatkan pengamatan langsung terhadap objek atau fenomena yang sedang diteliti dengan menggunakan alat pengukur yang telah dikalibrasi. Untuk setiap kombinasi rasio GA:STPP, peneliti mengamati dan mencatat waktu pembentukan gel (gelling time), tekstur fisik, elastisitas, dan karakteristik permukaan hidrogel yang dihasilkan. Pengamatan ini dilakukan secara sistematis dan terstruktur untuk meminimalkan bias subjektif peneliti.

Kedua, pengukuran aktivitas antibakteri menggunakan metode difusi agar (agar diffusion method), yang merupakan teknik standar dalam penelitian antimikroba. Menurut Wang et al. (2024), metode difusi agar adalah prosedur kuantitatif untuk mengevaluasi aktivitas antibakteri suatu substansi dengan mengukur diameter zona hambat (inhibition zone) di sekitar sampel uji pada media agar yang telah diinokulasi dengan bakteri target. Dalam penelitian ini, diameter zona hambat diukur dengan menggunakan jangka sorong digital dengan presisi hingga 0,1 mm. Instrumen pengumpulan data berupa template pengukuran yang telah divalidasi digunakan untuk memastikan konsistensi pengukuran di seluruh replikasi. Data yang dikumpulkan mencakup diameter zona hambat terhadap Staphylococcus aureus (bakteri Gram positif) dan Escherichia coli (bakteri Gram negatif) untuk setiap kombinasi rasio GA:STPP.

Validitas instrumen pengukuran dipastikan melalui kalibrasi peralatan sebelum penelitian dimulai. Sebagaimana ditekankan oleh Emzir (2013), instrumen pengumpulan data dalam penelitian laboratorium harus divalidasi dan dikalibrasi sebelum digunakan untuk mengumpulkan data, memastikan akurasi dan reliabilitas hasil pengukuran. Semua alat laboratorium yang digunakan, termasuk neraca digital, jangka sorong, dan thermometer, telah dikalibrasi sesuai dengan standar metrologi yang berlaku untuk menjamin kevalidan data yang diperoleh.

Teknik Analisis Data

Teknik analisis data dalam penelitian ini menggunakan pendekatan statistik deskriptif dan analisis komparatif. Untuk karakteristik fisik dan kecepatan gelasi, analisis dilakukan secara deskriptif dengan menampilkan pola perubahan seiring dengan variasi rasio GA:STPP. Data numerik seperti waktu pembentukan gel dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk menggambarkan hubungan antara rasio crosslinker dan kecepatan gelasi. Menurut Sudaryono (2023), analisis statistik deskriptif melibatkan pengorganisasian, perangkuman, dan deskripsi data numerik untuk memberikan gambaran yang jelas tentang karakteristik data dan pola yang terkandung di dalamnya.

Untuk data aktivitas antibakteri berupa diameter zona hambat, analisis dilakukan dengan menghitung rata-rata dan standar deviasi untuk setiap kombinasi rasio GA:STPP. Data ini kemudian diklasifikasikan berdasarkan kategori zona hambat menurut kriteria Valgas et al. (2007) dan Davis & Stout (1971), yaitu tidak ada zona hambat (tidak ada aktivitas), zona hambat lemah (kurang dari 5 mm), zona hambat sedang (5-10 mm), dan zona hambat kuat (lebih dari 10 mm). Pengategorian ini memungkinkan interpretasi kualitatif dari data kuantitatif untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang potensi antibakteri hidrogel yang dihasilkan.

Analisis komparatif dilakukan untuk membandingkan aktivitas antibakteri antar kelompok rasio GA:STPP yang berbeda. Creswell dan Creswell (2023) menjelaskan bahwa dalam penelitian eksperimental, analisis komparatif penting untuk mengevaluasi apakah variasi perlakuan (dalam hal ini rasio GA:STPP) menghasilkan perbedaan signifikan pada variabel dependen. Perbandingan dilakukan secara visual melalui tabel dan grafik untuk menunjukkan pola hubungan antara rasio GA:STPP dan aktivitas antibakteri terhadap kedua bakteri uji. Analisis data yang diperoleh dari duplikasi pengujian antibakteri disajikan dalam bentuk rata-rata dengan standar deviasi untuk menunjukkan konsistensi hasil dan reliabilitas data.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian terdiri dari lima tahap utama yang dirancang secara sistematis dan logis. Tahap pertama adalah preparasi sampel bahan baku. Cangkang keong bakau dikumpulkan dari ekosistem mangrove Sangatta Selatan, Kalimantan Timur, pada bulan Maret 2025. Sampel dibersihkan secara menyeluruh dari kotoran organik dan jaringan lunak menggunakan air mengalir sambil disikat lembut untuk memastikan permukaan cangkang bersih. Setelah dibersihkan, cangkang dikeringkan di bawah sinar matahari selama dua hingga tiga hari hingga mencapai berat konstan. Cangkang kering kemudian dihancurkan menggunakan mortar dan pestle sampai menjadi serbuk halus, kemudian diayak menggunakan saringan standar ukuran 100 mesh untuk memastikan ukuran partikel yang seragam dan optimal untuk tahap ekstraksi selanjutnya. Prosedur preparasi ini mengikuti protokol yang ditetapkan oleh Rana et al. (2022) untuk memastikan konsistensi dan komparabilitas hasil penelitian.

Tahap kedua adalah ekstraksi dan pembuatan kitosan dari serbuk cangkang keong bakau. Serbuk keong bakau diekstraksi melalui tiga tahap proses kimiawi yang terstandar: deproteinasi menggunakan larutan natrium hidroksida (NaOH) 3,5%, demineralisasi menggunakan asam klorida (HCl) 1 N, dan deasetilasi menggunakan NaOH 60% pada suhu 100 hingga 120 derajat Celsius selama 1,5 jam untuk mengkonversi kitin menjadi kitosan. Setelah setiap tahap proses, sampel dicuci dengan air deionisasi hingga mencapai pH netral untuk menghilangkan sisa-sisa bahan kimia, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 60 derajat Celsius hingga berat konstan. Prosedur ekstraksi ini mengikuti protokol standar yang telah divalidasi dalam penelitian sebelumnya (Li et al., 2022) untuk memastikan kualitas dan kemurnian kitosan yang dihasilkan memenuhi standar untuk tahap sintesis hidrogel berikutnya.

Tahap ketiga adalah sintesis hidrogel kitosan dengan variasi rasio GA:STPP. Larutan kitosan 2% dibuat dengan melarutkan kitosan dalam asam asetat glasial 2% (v/v) dengan pencampuran menggunakan magnetic stirrer pada suhu kamar hingga kitosan larut sepenuhnya. Secara terpisah, larutan glutaraldehida 5% (v/v) dan natrium tripolifosfat 5% (b/v) disiapkan. Sintesis hidrogel dilakukan dengan mencampurkan larutan kitosan dengan kombinasi GA:STPP dalam lima variasi rasio yang telah ditentukan: 4:1, 3:2, 1:1, 2:3, dan 1:4. Pencampuran dilakukan dengan magnetic stirrer pada kecepatan konstan selama sekitar 60 menit hingga terbentuk gel homogen. Setelah pencampuran, gel dibiarkan diam selama 24 jam pada suhu kamar untuk stabilisasi struktur jaringan, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 30 derajat Celsius. Hidrogel kering akhirnya disimpan dalam desikator hingga digunakan untuk pengujian. Pengontrolan suhu dan waktu reaksi dalam tahap ini sangat penting untuk memastikan konsistensi karakteristik hidrogel yang dihasilkan di antara berbagai rasio GA:STPP.

Tahap keempat adalah karakterisasi fisik dan pengukuran kecepatan gelasi hidrogel yang dihasilkan. Untuk setiap rasio GA:STPP, waktu pembentukan gel dicatat mulai dari saat pencampuran hingga terbentuk gel yang homogen. Tekstur fisik, elastisitas, kekakuan, dan karakteristik permukaan hidrogel diamati dan didokumentasikan secara deskriptif. Pengamatan ini dilakukan segera setelah proses sintesis untuk menangkap karakteristik hidrogel pada keadaan optimalnya. Data karakteristik fisik ini membantu mengidentifikasi formula optimal yang menyeimbangkan antara kecepatan gelasi, elastisitas, dan stabilitas struktural.

Tahap kelima dan terakhir adalah pengujian aktivitas antibakteri menggunakan metode difusi agar. Hidrogel yang telah dihasilkan diuji aktivitas antibakterinya terhadap Staphylococcus aureus (bakteri Gram positif) dan Escherichia coli (bakteri Gram negatif), dua patogen umum penyebab infeksi luka. Pengujian dilakukan dengan menempatkan sampel hidrogel pada media Nutrient Agar yang telah diinokulasi dengan suspensi bakteri, kemudian diinkubasi pada suhu 36 derajat Celsius dalam inkubator selama 24 jam. Setelah inkubasi, diameter zona hambat di sekitar sampel diukur menggunakan jangka sorong digital dengan presisi hingga 0,1 mm. Pengukuran dilakukan pada minimal empat titik berbeda di sekitar sampel untuk mendapatkan nilai rata-rata yang akurat. Setiap rasio GA:STPP diuji secara duplo (pengulangan dua kali) untuk memastikan konsistensi dan reliabilitas hasil. Hasil pengukuran zona hambat dibandingkan dengan kriteria kategori zona hambat standar untuk menentukan tingkat aktivitas antibakteri setiap formula hidrogel.

Seluruh prosedur penelitian dilaksanakan dengan standar protokol laboratorium ketat, termasuk sterilisasi peralatan, penggunaan teknik aseptik dalam pengujian antibakteri, dan pencatatan data yang sistematis dan terstruktur. Penelitian dilakukan selama lima bulan dari bulan Maret hingga Juli 2025 di Laboratorium Kimia Organik FMIPA Universitas Mulawarman dengan pengawasan dosen pembimbing untuk memastikan kualitas dan validitas eksperimen di setiap tahapnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Tegangan Tertinggi Sistem

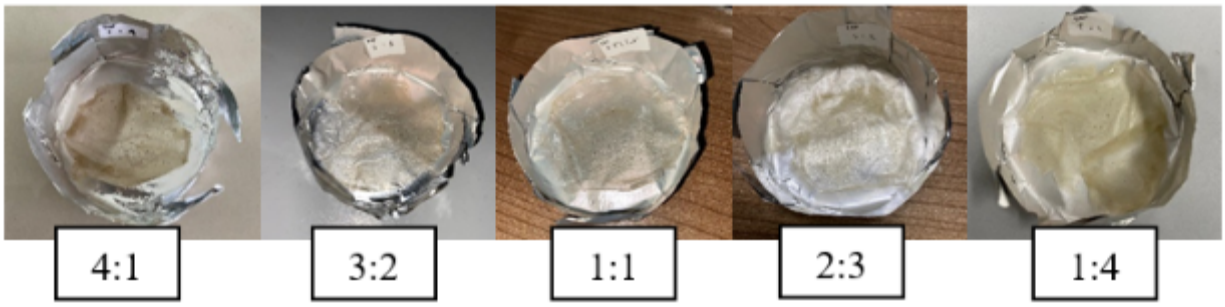
Sintesis Hidrogel Kitosan-GA/STPP

Penelitian ini dilakukan untuk menghasilkan hidrogel berbasis kitosan dari keong bakau (*Telescopium telescopium*) yang terikat silang glutaraldehid dan natrium tripolifosfat (TPP). Proses pembentukan hidrogel berlangsung melalui dua mekanisme ikatan, yaitu ikatan kovalen antara gugus

amino ($–NH_2$) kitosan dengan gugus aldehid dari glutaraldehid, serta interaksi ionik antara muatan positif gugus $–NH_3^+$ pada kitosan dengan gugus fosfat bermuatan negatif dari TPP.

Kehadiran kedua jenis ikatan silang ini memberikan struktur jaringan tiga dimensi yang stabil dan lebih kuat dibandingkan kitosan tanpa pengikat silang. Berdasarkan **Gambar 1**, hasil yang diperoleh dari preparasi hidrogel kitosan keong bakau dengan penambahan agen pengikat silang glutaraldehida dan tripolifosfat menunjukkan perbedaan karakteristik fisik berdasarkan variasi rasio yang digunakan. Pada rasio 4:1, hidrogel yang terbentuk memiliki tekstur yang cukup padat, elastis, dan permukaan yang relatif halus, menunjukkan struktur yang stabil karena dominasi glutaraldehida. Sementara itu, pada rasio 3:2, teksturnya masih elastis tetapi mulai terasa lebih lunak dengan permukaan yang agak kasar. Pada rasio 1:1, hidrogel menjadi kurang elastis, cenderung kaku, tetapi permukaannya tampak halus. Hidrogel dengan rasio 2:3 menunjukkan tekstur yang lebih kaku dan kasar, serta mulai tampak rapuh di beberapa bagian, menunjukkan pengaruh TPP yang lebih dominan. Terakhir, pada rasio 1:4, hidrogel tampak paling kaku, paling tebal, dan mudah robek, menunjukkan bahwa ikatan silang yang didominasi TPP menghasilkan struktur yang padat tetapi tidak elastis dan mudah robek.

Glutaraldehida membentuk ikatan kovalen berupa basa Schiff melalui reaksi antara gugus amina primer ($–NH_2$) pada kitosan dengan gugus aldehida, sehingga membutuhkan waktu reaksi yang lebih lama untuk menghasilkan struktur yang stabil (Rinaudo, 2006). Sebaliknya, TPP membentuk ikatan silang elektrostatik antara gugus amonium bermuatan positif pada kitosan dan gugus fosfat bermuatan negatif pada TPP, yang terjadi lebih cepat tanpa pembentukan ikatan kovalen (Zhao dkk., 2016). Oleh karena itu, peningkatan kandungan TPP mempercepat proses gelasi, tetapi cenderung menghasilkan hidrogel dengan struktur yang lebih kaku dan rapuh.



Gambar 1. Hidrogel kitosan keong bakau/GA:STPP

Tabel 1. Sintesis Hidrogel Kitosan Keong Bakau – GA/STTP

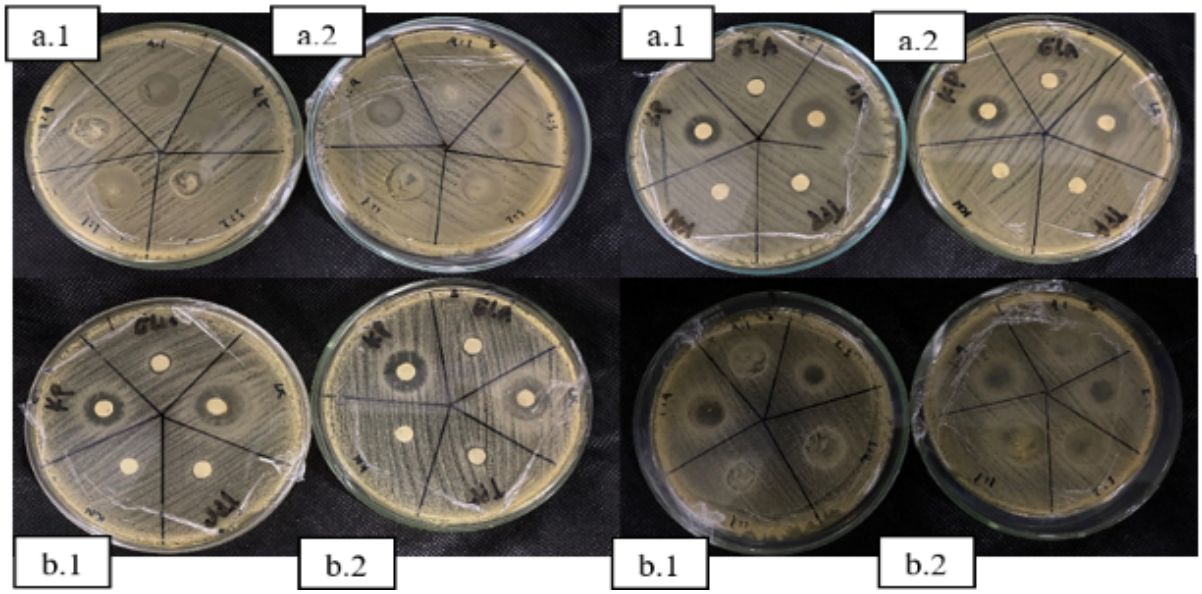
No	Variasi (G:TPP)	*Gelling Time* (menit)	Massa Awal *(estimasi)* (gram)	Massa setelah dioven (gram)
1	4:1	330 menit	8,000	1,9672
2	3:2	170 menit	7,700	1,5689
3	1:1	90 menit	7,900	1,4351
4	2:3	68 menit	8,100	1,3803
5	1:4	55 menit	8,800	1,3485

Berdasarkan data pada **Tabel 1**, waktu pembentukan gel hidrogel kitosan dari siput bakau yang disintesis dengan berbagai rasio glutaraldehida dan tripolifosfat (G:TPP) menunjukkan pola yang menurun seiring dengan peningkatan proporsi TPP dalam campuran. Waktu pembentukan gel pada rasio 4:1, 3:2, 1:1, 2:3, dan 1:4 berturut-turut adalah 330 menit, 170 menit, 90 menit, 68 menit, dan 55 menit. Semakin tinggi konsentrasi TPP yang digunakan, semakin pendek waktu pembentukan gel yang

dihasilkan. Fenomena ini terjadi karena perbedaan mekanisme ikatan silang antara kedua agen pengikat tersebut.

Uji Antibakteri

Uji antibakteri terhadap *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli* menunjukkan bahwa hidrogel dengan rasio GA:STPP = 4:1 memberikan zona hambat sedang terhadap kedua bakteri. Hal ini mengindikasikan adanya aktivitas antimikroba yang dihasilkan oleh gugus amonium bermuatan positif pada kitosan yang berinteraksi dengan dinding sel bakteri bermuatan negatif. Menurut Li et al. (2022), muatan positif kitosan menyebabkan kebocoran isi sel dan gangguan permeabilitas membran bakteri. Selain itu, residu glutaraldehida yang tertinggal dalam jumlah kecil juga dapat berperan sebagai agen antimikroba tambahan. Aktivitas ini menjadikan hidrogel kitosan–GA/STPP potensial sebagai material plester luka dengan fungsi ganda: menjaga kelembapan dan mencegah infeksi mikroba.



Gambar 2. Uji Antibakteri (a.1) S.aureus 1 (a.2) S.aureus 2 (b.1) E.coli 1 (b.2) E.coli 2

Tabel 2. Hasil Uji Antibakteri secara Duplo

Sampel	S.aureus 1	2	Rata-rata	Kategori Zona Hambat (Valgas *et al.,*2007; Davis & Stout, 1971)	E.coli 1	2	Rata-rata	Kategori Zona Hambat (Valgas *et al.,*2007; Davis & Stout, 1971)
GA/STPP 1:4	7 mm	7 mm	7 mm	Sedang	6 mm	6 mm	6 mm	Sedang
GA/STPP 2:3	8 mm	8 mm	8 mm	Sedang	6 mm	7 mm	6,5 mm	Sedang
GA/STPP 1:1	4 mm	6 mm	5 mm	Lemah	7 mm	9 mm	8 mm	Lemah
GA/STPP 3:2	7 mm	4 mm	5,5 mm	Lemah	8 mm	7 mm	6 mm	Lemah
GA/STPP 4:1	7 mm	4 mm	5,5 mm	Lemah	6 mm	5 mm	5,5 mm	Lemah
Glutaraldehid 2%	2 mm	3 mm	2,5 mm	Lemah	3 mm	4 mm	3,5 mm	Lemah
Tripolifosfat 5%	-	-	-	Tidak ada	-	-	-	Tidak ada

Lar. Kitosan Keong Bakau 2%	9 mm	9 mm	9 mm	Sedang	8 mm	7 mm	7,5 mm	Sedang
Bioplacenton 50 µg/mL	9 mm	11 mm	10 mm	Sedang	9 mm	9 mm	9 mm	Sedang
Aquades	-	-	-	Tidak ada	-	-	-	Tidak ada

Berdasarkan hasil uji antibakteri yang ditunjukkan pada **Tabel 2**, masing-masing sampel menunjukkan kemampuan yang bervariasi dalam menghambat pertumbuhan Staphylococcus aureus (Gram positif) dan Escherichia coli (Gram negatif). Hidrogel dengan kombinasi GA/STPP dengan rasio 1:4 dan 2:3 menghasilkan zona hambat sedang (6–8 mm), yang menunjukkan aktivitas antibakteri yang cukup efektif. Sebaliknya, kombinasi GA/STPP dengan rasio 1:1, 3:2, dan 4:1 hanya menghasilkan zona hambat yang relatif lemah (≤5,5 mm), sehingga efektivitasnya lebih rendah. Larutan glutaraldehida 2% dan tripolifosfat 5% hampir tidak menghasilkan zona hambat, yang menunjukkan perannya sebagai agen antibakteri relatif minimal. Sementara itu, larutan kitosan siput bakau 2% menunjukkan zona hambat yang lebih besar (7–9 mm), sehingga dikategorikan sedang dan memiliki kemampuan antibakteri yang cukup baik terhadap kedua bakteri tersebut.

CONCLUSION

Penelitian ini berhasil mensintesis hidrogel berbasis kitosan dari keong bakau (Telescopium telescopium) dengan sistem dual crosslinking menggunakan glutaraldehida dan natrium tripolifosfat. Temuan utama menunjukkan bahwa peningkatan proporsi STPP mempercepat waktu pembentukan gel dari 330 menit pada rasio GA:STPP 4:1 menjadi 55 menit pada rasio 1:4, menghasilkan hidrogel dengan karakteristik fisik yang bervariasi. Hasil uji antibakteri mengungkapkan bahwa rasio 1:4 dan 2:3 menghasilkan zona hambat sedang terhadap Staphylococcus aureus dan Escherichia coli, dengan diameter zona hambat berkisar antara 6 hingga 8 mm. Zona hambat sedang ini menunjukkan potensi signifikan hidrogel kitosan crosslinked GA-STPP sebagai material plester luka dengan fungsi ganda dalam menjaga kelembapan luka dan mencegah infeksi bakteri. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa formulasi hidrogel dengan rasio GA:STPP yang optimal dapat mencapai keseimbangan antara sifat mekanik, kecepatan gelasi, dan aktivitas antimikroba yang dibutuhkan untuk aplikasi medis.

Meskipun penelitian ini menghasilkan temuan penting, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Pertama, pengujian antibakteri hanya dilakukan pada dua jenis bakteri, sehingga spektrum aktivitas antimikroba belum sepenuhnya tergambar. Kedua, penelitian ini belum melakukan uji biokompatibilitas dan toksisitas in vitro, yang merupakan prasyarat penting sebelum aplikasi klinis. Ketiga, karakterisasi fisik hidrogel masih terbatas pada observasi deskriptif tanpa analisis instrumental mendalam seperti scanning electron microscopy (SEM) atau fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk memperluas pengujian antibakteri terhadap berbagai patogen oportunistik, melakukan uji biokompatibilitas pada sel epitel kulit, dan mengkarakterisasi struktur makromolekul hidrogel menggunakan teknik analisis spektroskopik. Implikasi praktis dari penelitian ini mencakup potensi pengembangan produk plester luka antibakteri yang ramah lingkungan dan berbasis sumber daya lokal, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada kitosan komersial impor dan meningkatkan nilai ekonomi limbah biota pesisir Indonesia.

REFERENSI

Ahmed, T., Ananda, K. D., Tseng, S. C., & Mancini, P. (2025). Application of chitosan-based drug delivery systems in the treatment of wound and burn infections. *Drug Delivery*, 32(1), 2514140. **https://doi.org/10.1080/10717544.2025.2514140**

Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 105–121. **https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006**

Amitaye, A. N., Kumar, R., & Singh, V. (2024). Chitosan: A sustainable biobased material for diverse environmental and biomedical applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 12(21), 10156–10178. **https://doi.org/10.1039/d4tb00892h**

Berger, J., Reist, M., Mayer, J. M., Felt, O., Peppas, N. A., & Gurny, R. (2004). Structure and

interactions in covalently and ionically crosslinked chitosan hydrogels for biomedical applications. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 57(1), 19–34. https://doi.org/10.1016/S0939-6411(03)00161-9

Chicea, D., Popescu, V., & Iacob, G. (2024). A review of chitosan-based materials for biomedical applications: From production to toxicological assessment. *Polymers*, 16(23), 3421. https://doi.org/10.3390/polym16233421

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications. https://doi.org/10.1093/oso/9780199873905.001.0001

Davis, W. W., & Stout, T. R. (1971). Disc plate methods of microbiological antibiotic assay. *Applied Microbiology*, 22(4), 659–665.

Deng, C., Zhang, P., Vulesevic, B., & Yu, X. (2021). Ionic crosslinking of chitosan–tripolyphosphate hydrogels: Structure and controlled release behavior. *Carbohydrate Polymers*, 272, 118501. https://doi.org/10.1016/j.carpolym.2021.118501

Dev, A. S., Chen, T., Sharma, S., Banerjee, A., & Nair, V. (2025). Chitosan-based composite scaffolds for accelerated epidermal-dermal wound healing. *Exploration in Medical Biology*, 2(3), 101336. https://doi.org/10.37349/emb.2025.00064

Emzir. (2013). *Metodologi penelitian pendidikan: Kuantitatif dan kualitatif*. Rajawali Pers.

Fang, X., Li, Y., & Wang, H. (2025). Green synthesis of starch/chitosan complex via ozone-induced Schiff base cross-linking: Structure, water retention and gel network formation. *Carbohydrate Polymers*, 348, 124847. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.124847

Ghorbani, M., Amini, M., & Afshar, E. (2024). Dual-crosslinked chitosan hydrogels for biomedical applications. *Materials Science & Engineering C*, 160, 117465. https://doi.org/10.1016/j.msec.2024.117465

Guo, H., Wang, S., & Li, Y. (2025). Preparation of a chitosan/polyvinyl alcohol-based dual-crosslinked hydrogel wound dressing with enhanced antibacterial and antioxidant properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 229, 1324–1337. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.12.156

Harahap, I. M., Syahrial, S., Erniati, E., Erlangga, E., Imanullah, I., & Ezrneti, R. (2022). Gastropoda Telescopium Telescopium (Linnaeus, 1758) di hutan mangrove Desa Cut Mamplam Provinsi Aceh, Indonesia. *Jurnal Kelautan Tropis*, 25(2), 156–168. https://doi.org/10.14710/jkt.v25i2.13353

Hayati, A. R., Singkam, A. R., & Jumiarni, D. (2022). Uji antibakteri ekstrak etanol daun Theobroma Cacao L. terhadap pertumbuhan Escherichia coli dengan metode difusi cakram. *Bioedusains: Jurnal Pendidikan Biologi Dan Sains*, 5(1), 31–40. https://doi.org/10.31539/bioedusains.v5i1.3160

Hidaka, M., Chikae, M., & Tamiya, E. (2024). Characterization of chitosan hydrogels obtained through dual-crosslinking with phenol groups and sodium tripolyphosphate. *Polymer Chemistry*, 15(21), 2156–2166. https://doi.org/10.1039/d4py00194j

Indriyani, N., Ratnawati, R., & Wardhani, D. H. (2023). Sintesa dan pemanfaatan hidrogel: Review. *Inovasi Teknik Kimia*, 8(4), 245–254. https://doi.org/10.31942/inteka.v8i4.8126

Jiang, T., Chen, L., Zhang, B., Liu, X., & Zhang, Y. (2024). Synthesis, characterization of chitosan/tripolyphosphate nanoparticles for controlled release of 2-methoxy-5-chloropropionic acid. *Nature Scientific Reports*, 14, 18706. https://doi.org/10.1038/s41598-024-69438-9

Kanani, A., Ramesh, M., & Devi, M. (2023). Extraction and physicochemical characterization of chitosan from mollusk shells. *International Journal of Biological Macromolecules*, 231, 1378–1386. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.09.015

Kanani, N., Wardhono, E. Y., Adiwibowo, M. T., Pinem, M. P., Wardalia, W., Demustila, H., Farhan, M., & Anwari, R. (2023). Ekstraksi kitosan berbasis cangkang keong mas (Pomacea canaliculata) menggunakan gelombang ultrasonikasi. *Jurnal Integrasi Proses*, 12(2), 73–80. https://doi.org/10.36055/jip.v12i2.22217

Koesnarpadi, S., Anuar, H., Widodo, N. T., Hastuti, B., & Hadi, S. (2024). Chitosan crosslinking from clam shells (Cerithidea obtusa) with tripolyphosphate for cadmium (II) adsorption. *Jurnal Kimia*

Kemasan dan Produk Kimia, 9(2), 80996. https://doi.org/10.20961/jkpk.v9i2.80996
Kwon, S. H., Lee, D. W., & Kim, J. (2022). Ionically and covalently crosslinked chitosan hydrogels for tissue regeneration. *Polymers*, 14(22), 4853. https://doi.org/10.3390/polym14224853
Latupeirissa, J., Nursyamsi, S., & Sifaudin, S. (2025). Synthesis and characterization of tripolyphosphate chitosans through a crosslinking process from high chemical weight chitosans. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(6), 10903. https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i6.10903
Li, X., Xiong, Y., & Zhang, Y. (2022). Application of "click" chemistry in biomedical hydrogels. *ACS Omega*, 7(42), 36918–36928. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05230
Liu, W., Tang, J., & Chen, Z. (2023). Glutaraldehyde-crosslinked chitosan hydrogels with enhanced mechanical strength for biomedical use. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(15), e54031. https://doi.org/10.1002/app.54031
Pramanik, S., Adarsh, K., Kar, A., & Bellucci, S. (2024). Chitosan as a versatile biomaterial for tissue engineering and wound healing: Advancing regenerative medicine. *Royal Society of Chemistry Advances*, 14, d4ra01594k. https://doi.org/10.1039/d4ra01594k
Rahman, M. A., Islam, M. M., & Alam, M. M. (2021). Influence of crosslinking density on the swelling and mechanical behavior of chitosan hydrogels. *Polymer Bulletin*, 78, 5311–5324. https://doi.org/10.1007/s00289-021-03623-0
Rana, A., Roy, S., & Das, P. (2022). Extraction and characterization of chitosan from marine gastropods. *Marine Pollution Bulletin*, 183, 114117. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114117
Rasyid, R. (2022). Metode penelitian quasi eksperimen dalam menguji hubungan kausalitas. *Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran*, 8(2), 125–142.
Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603–632. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001
Roca-Arroyo, A. F., McBride, S., & Cole, D. J. (2025). Hydrogel network architecture design space: A comprehensive review of crosslinking strategies, mechanical tuning, and biomedical applications. *Advanced Materials Interfaces*, 12(20), e2301898. https://doi.org/10.1002/admi.202301898
Satchanska, G., Kostova, I., & Momekov, G. (2024). Insights into recent therapeutic and antimicrobial applications of natural and synthetic polymers. *Polymers*, 16(8), 1159. https://doi.org/10.3390/polym16081159
Shah, J., Nair, G., Chundawat, T. S., Yadav, K. K., Yadav, S. K., Crespo, J. G., & Banat, F. (2025). Recent advancements in chitosan-based biomaterials for wound healing applications: A comprehensive review. *Carbohydrate Polymers*, 307, 120582. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.120582
Shan, J., Wang, X., & Liu, Y. (2024). Recent advances of chitosan-based composite hydrogel systems for bone repair. *Polymers*, 16(18), 2615. https://doi.org/10.3390/polym16182615
Sihombing, K. A., Hasan, B., & Sidauruk, S. W. (2025). Potential of chitosan from mangrove snail shells (Telescopium sp.) in body scrub formulation. *Aquatic Life Sciences*, 2(1), 21–27. https://doi.org/10.58920/aqlis0201340
Sudaryono. (2023). *Metodologi penelitian pendidikan* (Edisi revisi). Rajawali Pers.
Sugiyono. (2024). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D* (Edisi ke-14). Alfabeta.
Tampubolon, M. I., Riyadi, S., & Aldi, Y. (2025). PVA/chitosan hydrogel with Piper betle extract: Waterproof design, exudate management, and antibacterial efficacy against Staphylococcus aureus and Escherichia coli. *Nukleus*, 22(1), 7908. https://doi.org/10.51800/nukleus.v22i1.7908
Uddin, M. S., Aftab, A., & Hassan, S. (2024). Effect of crosslinking agents on chitosan hydrogel properties and drug loading and releasing capacities. *International Journal of Polymeric Materials*, 73(8), 598–612. https://doi.org/10.1080/00914037.2023.2276541
Valgas, C., de Souza, S. M., Smânia, E. F. A., & Smânia Jr, A. (2007). Screening methods to determine antibacterial activity of natural products. *Brazilian Journal of Microbiology*, 38(2), 369–380. https://doi.org/10.1590/S1517-83822007000200034

Wang, Z., Lu, J., Yuan, Z., Pi, W., Huang, X., Lin, X., Zhang, Y., Lei, H., Wang, P., & Pan, X. (2024). Natural carrier-free binary small molecule self-assembled hydrogel synergize antibacterial effects and promote wound healing by inhibiting virulence factors and alleviating the inflammatory response. *Small*, 20(15), 2310528. **https://doi.org/10.1002/smll.202310528**

Xue, X., Li, Q., & Wang, H. (2025). Investigating the pH-dependence of gelation process in chitosan-glutaraldehyde hydrogels using rheological and diffusing wave spectroscopy. *Polymer*, 309, 127637. **https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127637**

Yadav, S., & Palei, N. N. (2024). Chitosan as biomaterial for wound healing: Mechanisms and various applications. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 17(10), 5102–5112. **https://doi.org/10.52711/0974-360X.2024.00784**

Yang, Y., Pan, X., & Wang, Q. (2024). Chitosan-cysteine-gallic acid hydrogel with antibacterial and antioxidant properties for wound healing. *Biomaterials Advances*, 162, 213844. **https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2024.213844**

Zhang, W., Lulu, L., & Hui, C. (2023). Hydrogel-based dressings designed to facilitate wound healing. *Materials Horizons*, 5, 1364–1394. **https://doi.org/10.1039/D3MA00682D**

Zhang, X., Yongping, L., & Zhou, M. (2024). Chitosan-based self-healing hydrogel dressing for wound healing. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 332, 103267. **https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103267**

Zhao, Q., Qian, J. Q., An, Q. D., Sun, Z. Y., & Zhan, S. H. (2016). Preparation and characterization of chitosan/sodium tripolyphosphate/montmorillonite nanocomposite hydrogel beads and their application for removal of heavy metals from aqueous solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 489, 39–47. **https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.10.053**