

Biological Activities and Application of Chitosan Compound in Various Human Diseases

Qarina Hasyala Putri

Departemen Biokimia Fakultas Kedokteran Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara,
Indonesia

Alamat : Jalan Gedung Arca No. 53, Medan, 20217, Indonesia

Korespondensi penulis : qarinahasyala@umsu.ac.id*

Abstract: Chitosan is a biopolymer derived from chitin that undergoes a deacetylation process. Chitin that is sold commercially comes from crustacean shells such as oysters and crabs. In addition, chitin can also come from fungi, insects, molluscs and algae that are given a strong alkali solution to produce chitosan. Chitosan is one of the biopolymers that has many biological activities. Because of its diverse biological activities, chitosan is widely developed for applications in the health sector. This article will discuss what biological activities chitosan has and its developing applications.

Keywords : biopolymer, chitin, chitosan, nanoparticle, biotechnology.

Abstrak: Kitosan merupakan biopolimer turunan kitin yang mengalami proses deasetilasi. Kitin yang dijual secara komersial berasal dari cangkang krustasea seperti udang dan kepiting. Selain itu, kitin juga bisa berasal dari jamur, serangga, moluska dan alga yang diberikan larutan alkali kuat untuk menghasilkan kitosan. Kitosan merupakan salah satu biopolimer yang memiliki banyak aktivitas biologis. Karena aktivitas biologisnya yang beragam, kitosan banyak dikembangkan untuk aplikasi di bidang kesehatan. Artikel ini akan membahas apa saja aktivitas biologis yang dimiliki oleh kitosan dan aplikasinya yang sedang berkembang.

Kata Kunci : biopolimer, kitin, kitosan, nanopartikel, bioteknologi.

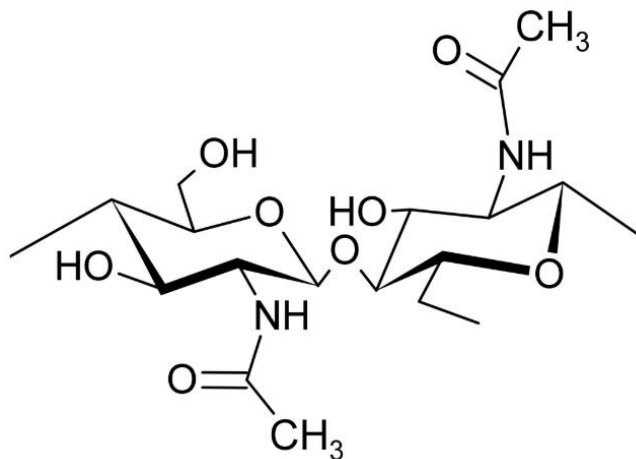
1. PENDAHULUAN

Kitosan adalah polisakarida amino alami yang diperoleh melalui deasetilasi kitin. Biomolekul ini dapat diekstraksi dari residu industri makanan laut, misalnya, kulit udang. Sifatnya yang tidak beracun, *biocompatible*, dan *biodegradable* membuat kitosan diteliti untuk beberapa aplikasi. Selain itu, kitosan memiliki sifat intrinsik penting seperti mukoadhesi, peningkatan permeasi, dan sifat antimikroba. Struktur kimiawi dari kitosan dapat dimodifikasi sehingga meningkatkan sifat fisikokimianya dan memperluas penggunaannya di berbagai aplikasi, terutama di bidang farmasi dan biomedis (Harugade et al., 2023).

Biopolimer kitosan diekstraksi dari rangka luar krustasea, yang berasal dari limbah industri makanan laut. Selain itu, kitin dapat ditemukan di kutikula serangga, alga, dan di dinding sel jamur. Kitosan lebih jarang ditemukan di alam dan terdapat di beberapa jamur (*Mucoraceae*). Kitosan komersial sebagian besar diproduksi dari deasetilasi kimia kitin dari sumber krustasea. Proses ekstraksi menghasilkan sekitar 20–30% kitin, dengan menerapkan perlakuan mekanis dan kimia (Aranaz et al., 2021; Teixeira-Costa & Andrade, 2021).

Kitin merupakan polimer linier yang sebagian besar terdiri dari unit β -(1 $\rightarrow$ 4)-2-asetamido-2-deoksi-D-glukopiranosida dan sejumlah kecil residu β -(1 $\rightarrow$ 4)-2-amino-2-deoksi-D-

glukopiranososa (Gambar 1). Dalam keadaan padat, kitin dapat ditemukan dalam tiga struktur polimorf kristal yang berbeda, rantai N-asetilglukosamin anti-paralel atau α -kitin, rantai paralel N-asetilglukosamin atau β -kitin, dan dua rantai paralel yang berselang-seling dengan satu rantai anti-paralel, membentuk γ -kitin (Teixeira-Costa & Andrade, 2021).



Gambar 1. Struktur kimia kitin (Teixeira-Costa & Andrade, 2021)

Kitosan adalah derivat kitin yang dideasetilasi. Kitosan merupakan sebuah famili polisakarida linier yang terdiri dari sejumlah ($\beta 1 \rightarrow 4$) residu gabungan dari N-asetil-2- amino-2-deoksi-D-glukosa (glukosamin, GlcN) dan 2-amino-2-deoksi-D-glukosa (N-asetil-glukosamin, GlcNAc) (Aranaz et al., 2021).

2. METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian: Penelitian ini bersifat review atau tinjauan pustaka yang mengumpulkan, menganalisis, dan mensintesis hasil penelitian sebelumnya mengenai aktivitas biologis dan aplikasi kitosan pada berbagai penyakit manusia. Sumber Data: Data dikumpulkan dari literatur sekunder yang mencakup jurnal ilmiah, artikel penelitian, dan buku yang relevan. Referensi utama berasal dari database ilmiah seperti PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, dan jurnal open-access lainnya.

Kriteria Inklusi:

Artikel yang membahas tentang sifat biologis kitosan dan aplikasinya. Penelitian yang diterbitkan dalam 10 tahun terakhir untuk memastikan relevansi. Artikel yang tersedia dalam bahasa Inggris dan Indonesia.

Kriteria Eksklusi:

Artikel dengan data tidak lengkap atau tidak relevan dengan topik utama. Penelitian yang diterbitkan sebelum tahun 2010, kecuali dianggap penting untuk konteks sejarah.

Prosedur Analisis:

Pengumpulan data berdasarkan kata kunci seperti “kitosan”, “aktivitas biologis”, “antimikroba”, “antikanker”, dan “antidiabetik”. Penyaringan artikel berdasarkan abstrak dan tujuan penelitian untuk memastikan kecocokan. Analisis dan sintesis data dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian yang sejenis, mencari pola, serta mengevaluasi aplikasi kitosan. Pendekatan: Penelitian menggunakan metode deskriptif dengan pendekatan naratif untuk mengintegrasikan informasi yang relevan dalam bentuk kesimpulan yang terorganisasi.

3. KAJIAN PUSTAKA**Struktur dan Sifat Kitosan**

Kitosan adalah derivat kitin yang diperoleh melalui proses deasetilasi. Kitosan memiliki sifat biokompatibel, biodegradable, dan antimikroba, yang membuatnya ideal untuk aplikasi biomedis (Aranaz et al., 2021).

Aktivitas Biologis Kitosan

- a) Antimikroba: Kitosan dapat merusak dinding sel mikroba melalui interaksi elektrostatis, yang menyebabkan destabilisasi membran dan kerusakan DNA (Chandrasekaran et al., 2020).
- b) Antioksidan: Kitosan memutus reaksi rantai oksidasi yang memicu stres oksidatif, dengan demikian melindungi sel dari kerusakan akibat radikal bebas (Muthu et al., 2021).
- c) Anti-inflamasi: Kitosan menurunkan pelepasan sitokin inflamasi seperti TNF- α , IL-6, dan IL-8, serta membantu penyembuhan inflamasi kronis (Chen et al., 2018).
- d) Penyembuh Luka: Kompleks kitosan dengan kondroitin sulfat meningkatkan polarisasi makrofag M2, yang mempercepat penyembuhan luka (Sharma et al., 2022).
- e) Antikanker: SiRNA yang ditautkan pada kitosan mampu menghambat ekspresi gen kanker, meningkatkan apoptosis, serta menghambat proliferasi sel kanker (Shakil et al., 2021).
- f) Antidiabetik: Derivat kitosan memengaruhi jalur sinyal insulin dan metabolisme glukosa, sehingga menurunkan kadar gula darah (Priyanka et al., 2022).

Aplikasi Kitosan dalam Sistem Penghantaran Obat

Kitosan berfungsi sebagai pembawa obat yang efisien karena muatan positifnya berinteraksi dengan membran sel bermuatan negatif. Hal ini meningkatkan penyerapan obat serta efektivitas terapeutiknya (Sarkar et al., 2020).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Aktivitas Biologis Kitosan

Kitosan merupakan molekul yang aktif secara biologis. Kitosan menunjukkan beberapa aktivitas biologis seperti antimikrobal, antioksidan, anti-inflamasi, antikanker, antidiabetes, dan penyembuhan luka. Berkat semua aktivitas ini, kitosan banyak digunakan dalam aplikasi biomedis dan penghantaran obat seperti oral, nasal, okular, paru-paru, mukosa, penghantaran gen, dan penghantaran vaksin.

Aktivitas Antimikrobal

Kitosan dapat menghambat proliferasi dari berbagai bakteri, jamur dan ragi. Kitosan yang menempel dengan dinding sel bakteri akan menyebabkan bakteri tersebut mati. Menempelnya kitosan ke dinding sel bakteri menyebabkan terjadinya interaksi elektrostatis pada dinding sel. Hal ini akan menyebabkan destabilisasi dinding sel, perubahan permeabilitas membran, ketidak seimbangan osmosis, dan pelepasan senyawa intraseluler. Selain itu, kitosan dalam bentuk nanopartikel yang masuk ke dalam sel bakteri akan menyebabkan perubahan pada rantai transpor elektron. Kitosan juga menempel pada *Deoxyribonucleic Acid* (DNA) bakteri yang kemudian akan menyebabkan gagalnya transkripsi *Ribonucleic Acid* (RNA) dan translasi protein sehingga terjadi kerusakan DNA. Di dalam sel bakteri, kitosan juga meningkatkan pembentukan *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang dapat menyebabkan kerusakan DNA. Proses lain yang terjadi di dalam sel bakteri adalah kelasi ion logam. Kelasi ion logam akan mengakibatkan keluarnya kation-kation penting seperti Ca^{2+} , K^{+} dan Na^{+} (Chandrasekaran et al., 2020).

Kitosan juga memiliki aktivitas antimicrobial terhadap jamur dan ragi. Kitosan yang bermuatan positif akan menempel di dinding sel jamur yang bermuatan negatif. Kitosan yang diberikan ke sel jamur merupakan campuran dari ukuran polimer yang berbeda. Kitosan dengan polimer panjang akan merusak sel jamur, sedangkan oligomer pendek akan masuk ke dalam sel jamur. Masuknya oligomer kitosan menyebabkan kitosan berinteraksi dengan komponen intraseluler sehingga terjadi pembentukan ROS. Pembentukan ROS kemudian akan menyebabkan proses-proses di dalam sel jamur terganggu dan membuat sel jamur mati (Poznanski et al., 2023).

Kitosan juga dapat meningkatkan efek terapi, contohnya pada octominin yang dienkapsulasi dengan karboksimetil kitosan dan kitosan. Proses gelas ionotropik membuat octominin dilapisi karboksimetil kitosan pada lapisan pertama dan kitosan pada lapisan kedua. Kitosan yang berbeda muatan dengan dinding sel mikroba akan menyebabkan penarikan dan permeabilisasi pada dinding selnya. Dinding sel kemudian akan pecah dan octominin masuk

ke dalam sel sehingga terjadi peningkatan ROS dan alterasi morfologi mikroba (Jayathilaka et al., 2022).

Aktivitas Antioksidan

Reaksi radikal bebas banyak dibahas karena kaitannya dengan berbagai penyakit. ROS yang diproduksi selama proses metabolik seperti oksidasi lipid, protein, karbohidrat dan materi nukleat menyebabkan stres oksidatif. Radikal bebas H_2O_2 dapat diubah menjadi ROS dan sebaliknya menggunakan enzim *superoxide dismutase*. H_2O_2 dapat diubah menjadi molekul air (H_2O) menggunakan enzim katalase. H_2O_2 akan bersifat merugikan ketika diubah menjadi asam hipoklorik oleh enzim myeloperoksidase dan radikal hidroksil oleh Fe^{2+} juga Cu^+ . Asam hipoklorik, radikal hidroksil dan peningkatan ROS akan menyebabkan terjadi stres oksidatif pada sel yang mengakibatkan oksidasi protein, kerusakan DNA, dan peroksidasi lipid. Kitosan dapat menginterupsi rantai reaksi oksidasi sehingga stres oksidatif tidak terjadi (Muthu et al., 2021; Riaz Rajoka et al., 2019).

Aktivitas Anti-inflamasi

Aktivitas anti-inflamasi yang dimiliki oleh kitosan menjadi salah satu alasan banyaknya penelitian yang berkembang mengenai perannya dalam penyembuhan inflamasi. Inflamasi merupakan sebuah respon biologis dari sistem imun yang dapat dipicu oleh berbagai faktor, seperti patogen, sel yang rusak, atau senyawa yang toksik. Faktor – faktor tersebut dapat menginduksi respon inflamasi secara akut maupun kronik di berbagai organ yang kemudian akan menyebabkan kerusakan jaringan atau penyakit. Mekanisme inflamasi secara umum dapat disimpulkan menjadi 4 tahap, yaitu reseptor pola permukaan sel mengenali stimulus yang mengganggu; aktivasi jalur inflamatorik; pelepasan penanda inflamatorik; dan perekrutan sel – sel inflamatorik (Chen et al., 2018).

Kitosan berperan dalam menurunkan stimulus inflamatorik. Beberapa stimulus inflamatorik adalah interleukin (IL)-6, IL-8, IL-1 β , dan *Tumour Necrosis Factor* (TNF)- α . Regulasi dari proses inflamasi diperantarai oleh *Transforming Growth Factor* (TGF)- β dan makrofag M2 (Kim et al., 2023). Secara umum, fungsi TGF- β adalah untuk menekan aktivitas beberapa sel imunokompeten sambil menginduksi fenotip dari beberapa sel immunosupresif. TGF- β dapat memicu polarisasi makrofag dan neutrofil dari makrofag M1 dan neutrofil N1 klasik menjadi makrofag M2 dan neutrofil N2 alternatif dengan karakteristik beberapa sifat immunosupresif (Deng et al., 2024).

Kitosan digunakan untuk membantu mengatur inflamasi dari dalam sel. Hal ini dilakukan dengan cara memasukkan obat dalam bentuk gen ke dalam nanopartikel kitosan,

yaitu gen NP- κ B/p65 antisens (GNA). Kitosan akan mengantarkan GNA ke dalam sel hingga masuk sampai ke dalam nukleus. (Ma et al., 2016).

Aktivitas Penyembuh Luka

Kitosan dapat membantu penyembuhan luka. Sebuah penelitian *in situ* mengembangkan pembersih luka menggunakan *polyelectrolyte complexation* (PEC) di antara polisakarida kationik *chitosan* (CH) dan glikosaminoglikan anionik *chondroitin sulfate* (CS) yang selanjutnya dikenal sebagai CH-CS PEC. CH-CS PEC masuk ke dalam luka dan menunjang terjadinya penyembuhan luka. Efek antimikrobal dari kitosan dan juga kondroitin sulfat menyebabkan perforasi membran bakteri, peningkatan pembentukan ROS dan kematian bakteri. Hal ini diamati dari penurunan *Colony-Forming Unit* (CFU). CH-CS PEC mendukung proses polarisasi makrofag M2 untuk mempercepat penyembuhan luka. Pada luka yang diberikan CH-CS PEC terjadi peningkatan B1-integrin, morfologi makrofag memanjang, dan meningkatkan fagositosis. Hal ini disebabkan karena penurunan Tumor Necrosis Factor (TNF)- α , peningkatan interleukin (IL)-10 dan penurunan *nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells* (NF- κ B) (Sharma et al., 2022).

Aktivitas Antikanker

Terapi pada kanker yang dapat bisa diberikan kepada penderita kanker terdiri dari beberapa tipe. Terapi kanker yang diberikan merupakan kombinasi dari lebih dari satu tipe. Modifikasi dari sediaan terapi kanker dapat membuatnya lebih mudah diserap oleh tubuh dengan efek samping minimal. (National Cancer Institute, 2025). Salah satu terapi kanker adalah penggunaan DNA atau RNA. Penggunaan siRNA berfungsi sebagai inhibitor mRNA yang diekspresikan terlalu banyak pada sel kanker. Agar siRNA dapat masuk ke dalam inti sel, siRNA akan ditautkan dengan kitosan. Masuknya siRNA ke dalam inti sel akan berdampak pada inhibisi metastasis, penurunan proliferasi sel dan meningkatkan penghantaran obat yang tertarget (Shakil et al., 2021).

Kitosan yang dikombinasikan dengan ligan juga dapat meningkatkan tingkat penyerapan obat antikanker. Kompleks kitosan-ligan akan menjadi cangkang obat antikanker. Cangkang kitosan-ligan ini berfungsi untuk membantu obat anti kanker masuk ke dalam sel. Ligan yang terdapat pada kompleks kitosan-ligan akan berikatan dengan reseptornya yang banyak diekspresikan pada sel kanker. Selanjutnya, obat anti kanker akan mengaktifkan jalur persinyalan PI3K-AKT sehingga menyebabkan apoptosis dari sel kanker. Selain apoptosis, penurunan invasi dan proliferasi dari sel kanker juga terjadi (Eshkiki et al., 2024).

Aktivitas Antidiabetik

Efek antidiabetik yang dimiliki oleh kitosan mengakibatkan penurunan kadar gula darah. Kitosan dan derivatnya dapat memberikan efek terapeutik secara langsung dengan cara mempengaruhi jalur – jalur persinyalan yang ada pada pankreas, otot, jaringan lemak, hati, dan saluran cerna. Peningkatan proliferasi sel beta pada pankreas dan *Glucose transporter* (GLUT) 2 serta penurunan kadar gula darah akan menyebabkan peningkatan sekresi insulin. Peningkatan *phosphorylated Adenosine Monophosphate activated Protein Kinase* (pAMPK) terjadi pada jaringan lemak, otot dan hati. Selain itu, peningkatan glukokinase dan glikolisis serta penurunan dan *Phosphoenolpyruvate carboxykinase* (PEPCK) serta glukoneogenesis terjadi pada jaringan lemak. Pada otot, peningkatan kerja dari Protein kinase B (PKB/AKT) dan GLUT 4 terjadi setelah pemberian kitosan. Peningkatan hormon leptin dan adiponectin terjadi pada hati. Pemberian kitosan menyebabkan peningkatan bakteri menguntungkan dan penurunan enzim – enzim metabolisme karbohidrat pada saluran cerna (Priyanka et al., 2022).

Selain pemberian secara langsung, kitosan juga dapat diberikan sebagai sebagai penghantar obat antidiabetes. Obat antidiabetik yang dihantarkan kitosan dapat berupa sediaan oral, nasal atau subkutan. Antidiabetik-kitosan lebih mudah berikatan dengan membran plasma. Hal ini dikarenakan kitosan yang bermuatan positif, sedangkan membran plasma bermuatan negatif. Antidiabetik-kitosan akan mengalami endositosis kemudian obat dapat masuk ke dalam sel. Masuknya obat antidiabetik ke dalam sel akan menyebabkan perbaikan dari gangguan metabolisme glukosa dan lipid yang berhubungan dengan diabetes mellitus (Sarkar et al., 2020).

5. KESIMPULAN

Penelitian mengenai kitosan beserta turunannya masih berkembang hingga saat ini. Banyaknya sifat menguntungkan yang dimiliki oleh kitosan menyebabkan penggunaannya yang beragam untuk penelitian mengenai berbagai penyakit. Selain pemberian kitosan secara langsung, kitosan juga dapat bertindak sebagai agen penghantaran obat. Muatan positif yang dimiliki kitosan menjadikannya kandidat yang kuat sebagai penghantar obat agar mudah masuk ke dalam sel target.

DAFTAR PUSTAKA

- Aranaz, I., Alcántara, A. R., Civera, M. C., Arias, C., Elorza, B., Caballero, A. H., & Acosta, N. (2021). Chitosan: An overview of its properties and applications. *Polymers*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/polym13193256>
- Chandrasekaran, M., Kim, K. D., & Chun, S. C. (2020). Antibacterial activity of chitosan nanoparticles: A review. *Processes*, 8(9), 1–21. <https://doi.org/10.3390/PR8091173>
- Chen, L., Deng, H., Cui, H., Fang, J., Zuo, Z., Deng, J., Li, Y., Wang, X., & Zhao, L. (2018). Oncotarget 7204 www.impactjournals.com/oncotarget Inflammatory responses and inflammation-associated diseases in organs. *Oncotarget*, 9(6), 7204–7218. www.impactjournals.com/oncotarget/
- Deng, Z., Fan, T., Xiao, C., Tian, H., Zheng, Y., Li, C., & He, J. (2024). TGF- β signaling in health, disease, and therapeutics. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41392-024-01764-w>
- Eshkiki, Z. S., Mansouri, F., Karamzadeh, A. R., Namazi, A., Heydari, H., Akhtari, J., Tabaeian, S. P., & Akbari, A. (2024). Chitosan and Its Derivative-Based Nanoparticles in Gastrointestinal Cancers: Molecular Mechanisms of Action and Promising Anticancer Strategies. *Journal of Clinical Pharmacy and Therapeutics*. <https://doi.org/10.1155/2024/1239661>
- Harugade, A., Sherje, A. P., & Pethe, A. (2023). Chitosan: A review on properties, biological activities and recent progress in biomedical applications. *Reactive and Functional Polymers*, 191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105634>
- Jayathilaka, E. H. T. T., Nikapitiya, C., De Zoysa, M., & Whang, I. (2022). Antimicrobial Peptide Octominin-Encapsulated Chitosan Nanoparticles Enhanced Antifungal and Antibacterial Activities. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24). <https://doi.org/10.3390/ijms232415882>
- Kim, Y., Zharkinbekov, Z., Raziyeve, K., Tabyldiyeva, L., Berikova, K., Zhumagul, D., Temirkhanova, K., & Saparov, A. (2023). Chitosan-Based Biomaterials for Tissue Regeneration. *Pharmaceutics*, 15(807). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030807>
- Ma, L., Shen, C. an, Gao, L., Li, D. wei, Shang, Y. ru, Yin, K., Zhao, D. xu, Cheng, W. feng, & Quan, D. qin. (2016). Anti-inflammatory activity of chitosan nanoparticles carrying NF- κ B/p65 antisense oligonucleotide in RAW264.7 macrophage stimulated by lipopolysaccharide. In *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* (Vol. 142). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.02.031>
- Muthu, M., Gopal, J., Chun, S., Devadoss, A. J. P., Hasan, N., & Sivanesan, I. (2021). Crustacean waste-derived chitosan: Antioxidant properties and future perspective. *Antioxidants*, 10(2), 1–27. <https://doi.org/10.3390/antiox10020228>
- National Cancer Institute. (2025). *Types of Cancer Treatment*. <https://www.cancer.gov/about-cancer/treatment/types>
- Poznanski, P., Hameed, A., & Orczyk, W. (2023). Chitosan and Chitosan Nanoparticles:

Parameters Enhancing Antifungal Activity. *Molecules*, 28(7).
<https://doi.org/10.3390/molecules28072996>

- Priyanka, D. N., Prashanth, K. V. H., & Tharanathan, R. N. (2022). A review on potential anti-diabetic mechanisms of chitosan and its derivatives. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 3(February), 100188. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100188>
- Riaz Rajoka, M. S., Zhao, L., Mehwish, H. M., Wu, Y., & Mahmood, S. (2019). Chitosan and its derivatives: synthesis, biotechnological applications, and future challenges. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(4), 1557–1571. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9550-z>
- Sarkar, S., Das, D., Dutta, P., Kalita, J., Wann, S. B., & Manna, P. (2020). Chitosan: A promising therapeutic agent and effective drug delivery system in managing diabetes mellitus. *Carbohydrate Polymers*, January, 116594. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116594>
- Shakil, S., Mahmud, K. M., Sayem, M., Niloy, M. S., Halder, S. K., Hossen, S., Uddin, F., & Hasan, A. (2021). *Using Chitosan or Chitosan Derivatives in Cancer Therapy*. 795–816. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2040048>
- Sharma, S., Madhyastha, H., Kirwale, S. S., Sakai, K., Katakia, Y. T., Majumder, S., & Roy, A. (2022). Dual antibacterial and anti-inflammatory efficacy of a chitosan-chondroitin sulfate-based in-situ forming wound dressing. *Carbohydrate Polymers*, 298, 120–126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120126>.