

Potential utilization of marine-based natural biomaterials

Potensi pemanfaatan marine biomaterials dari bahan alam berbasis laut

¹Ainun Rezky Ramadhani, ²Jessica Adam Panggalo, ³Fadillah Ilmi, ⁴Acing Habibie Mude

^{1,2,3}Mahasiswa Tingkat Profesi, Fakultas Kedokteran Gigi, Universitas Hasanuddin

⁴Departemen Prostodonsia, Fakultas Kedokteran Gigi, Universitas Hasanuddin

Makassar, Indonesia

Corresponding author, e-mail: ⁴acinghabibie@unhas.ac.id

ABSTRACT

Biomaterials are natural or synthetic materials used to repair, replace, support, or restore tissue function in the human body. Marine-derived biomaterials, such as collagen, alginate, and chitosan, possess biocompatible, bioactive, and biodegradable properties, making them widely used in dentistry, particularly in regenerative therapies. This literature review evaluates the potential utilization of marine-based biomaterials as natural agents in the development of regenerative dentistry therapies and their clinical applications. It is concluded that marine-based biomaterials such as collagen, alginate, chitosan, coral, and carrageenan show promising potential in regenerative dentistry and may be applied in various clinical settings. However, further studies and clinical trials are required to confirm their effectiveness, safety, and standardization for clinical application.

Keywords: marine biomaterials, chitosan, collagen, alginate, regenerative dentistry

ABSTRAK

Biomaterial adalah bahan alami atau sintesis yang digunakan untuk memperbaiki, mengganti, mendukung, atau memulihkan fungsi jaringan dalam tubuh manusia. Biomaterial yang berasal dari laut, seperti kolagen, alginat, dan kitosan, memiliki sifat biokompatibel, bioaktif, dan *biodegradable* sehingga banyak digunakan dalam bidang kedokteran gigi, terutama pada terapi regeneratif. Artikel ini mengkaji potensi pemanfaatan biomaterial berbasis laut sebagai bahan alami dalam perkembangan terapi regeneratif kedokteran gigi dan aplikasinya dalam praktik klinis. Disimpulkan bahwa biomaterial berbasis laut seperti kolagen, alginat, kitosan, *coral* dan *carrageenan* menunjukkan potensi dalam kedokteran gigi regeneratif dan dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi klinis. Namun, diperlukan penelitian lanjutan dan uji klinis untuk memastikan efektivitas, keamanan, serta standarisasi penggunaannya dalam aplikasi klinis.

Kata kunci: biomaterial laut, kitosan, kolagen, alginat, kedokteran gigi regeneratif

Received: 10 June 2026

Accepted: 15 July 2026

Published: 1 August 2026

PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang kedokteran gigi telah mendorong meningkatnya kebutuhan akan biomaterial yang mampu mendukung proses penyembuhan dan regenerasi jaringan secara optimal. Biomaterial merupakan suatu bahan murni, paduan, maupun campuran yang berasal dari alam atau sintesis yang dirancang untuk berinteraksi dengan tubuh manusia dengan fungsi *to repair, to replace, to support, dan to restore* fungsi organ dan atau bagian tubuh manusia. Setelah diketahui ilmu dan teknologi biomaterial, kemudian dunia kedokteran dan sains modern mulai menerapkan teknik pengujian biokompatibilitas bahan sebelum digunakan untuk aplikasi di bidang kedokteran. Prinsip aplikasi biomaterial diperluas konsepnya melalui pendekatan yang sering disebut dengan rekayasa jaringan dan organ buatan; biomaterial tersebut diaplikasikan dalam bentuk kombinasi bahan dengan dimensi dan sifat khusus untuk menjadi matriks di lingkungan sekitar sel (*extracellular matrix* atau ECM) untuk menghasilkan suatu metabolisme dan kondisi biomekanik agar terjadinya pertumbuhan jaringan fungsional tubuh.¹

Dalam beberapa dekade terakhir, penggunaan biomaterial alami dalam kedokteran gigi meningkat pesat karena tingginya permintaan akan bahan bioaktif, biokompatibel, dan ramah lingkungan. Lingkungan laut merupakan sumber yang luar biasa dari senyawa alami. Dengan bantuan penelitian yang berkelanjutan di bidang lingkungan biologi laut, berbagai macam produk alami dari laut telah berhasil dikembangkan. Kebutuhan untuk terus mengidentifikasi biomaterial alami yang dapat digunakan sebagai bahan *graft* tulang maupun *scaffold* dalam bidang rekayasa jaringan terus meningkat. Hal ini mendorong eksplorasi berbagai sumber biomaterial baru, termasuk yang berasal dari ekosistem laut. Biomaterial laut seperti kolagen, alginat, dan kitosan telah digunakan untuk berbagai macam aplikasi dalam bidang kedokteran gigi. Lingkungan laut menawarkan keragaman biomaterial yang tak terbatas dengan spektrum aktivitas biologis yang luas, yaitu fungsi antivirus, antibakteri, antijamur, antiprotozoa, antihelminik, anti-inflamasi, imunosupresif, neuroprotektif, dan tidak toksik. Biomaterial ini juga memiliki osteokonduktivitas yang sangat baik serta mendukung adesi, proliferasi, dan diferensiasi sel, sehingga menjadikannya pilihan yang menarik dalam bidang regeneratif. Dari sisi ketersediaan,

biomaterial ini juga relatif lebih ekonomis sehingga berpotensi untuk dimanfaatkan secara luas oleh berbagai lapisan masyarakat.²

Meskipun demikian, pemanfaatan *marine biomaterial* masih memerlukan kajian lebih lanjut terkait sumber, karakteristik, serta aplikasinya dalam bidang medis dan dental. Karena itu, *literature review* ini bertujuan untuk mengkaji potensi pemanfaatan biomaterial berbasis laut sebagai bahan alami dalam mendukung perkembangan terapi regeneratif kedokteran gigi, dan aplikasinya dalam praktik klinis.

TINJAUAN PUSTAKA

Konsep dasar biomaterial

Biomaterial merupakan bahan yang digunakan untuk memperbaiki, mengganti, atau mendukung fungsi jaringan tubuh melalui interaksi dengan sel, jaringan, maupun organ manusia. Biomaterial harus bersifat tidak toksik, tidak imunogenik, *inert* secara kimia, dan dapat diterima oleh tubuh manusia. Bahan sintesis memiliki keunggulan berupa sifat fisikokimia yang dapat dikontrol secara presisi, namun berpotensi menghasilkan produk degradasi yang bersifat toksik. Sebaliknya, polimer alami memiliki sinyal biologis alami dengan biokompatibilitas dan biodegradabilitas yang baik.^{2,3}

Biomaterial yang ideal memiliki sifat biokompatibilitas, biodegradabilitas, dan bioaktivitas.⁴ Biokompatibilitas merupakan kemampuan biomaterial untuk menjalankan fungsinya tanpa menimbulkan efek toksik atau respon biologis yang merugikan.⁵ Dalam kedokteran gigi, sifat ini penting karena biomaterial berkontak langsung dengan mukosa oral, jaringan periodontal, pulpa gigi, tulang alveolar, saliva, dan mikrobiota oral.⁴

Biodegradabilitas adalah kemampuan biomaterial untuk terurai secara bertahap menjadi komponen yang lebih sederhana melalui proses biologis seperti hidrolisis dan aktivitas enzim.⁶ Sifat ini penting dalam regenerasi jaringan karena biomaterial dapat berfungsi sementara sebagai *scaffold* sebelum terdegradasi secara aman.⁷ Bioaktivitas mengacu pada kemampuan biomaterial memberikan respon biologis positif, termasuk mendukung regenerasi tulang melalui sifat osteokonduktif.⁸

Dalam beberapa tahun terakhir, biomaterial berbasis laut seperti kitin, alginat, dan kolagen mulai banyak dikembangkan sebagai *scaf-*

fold, *wound dressing*, dan sistem penghantaran obat dalam rekayasa jaringan dan kedokteran gigi regeneratif.

Kolagen

Kolagen merupakan protein paling melimpah pada vertebrata, memiliki struktur heliks rangkap tiga, dan menyusun sekitar 30% total massa protein. Dalam rekayasa jaringan, kolagen berperan sebagai *scaffold* yang mendukung perlekatan, migrasi, proliferasi, dan diferensiasi sel. Kolagen umumnya diekstraksi dari kulit serta tendon sapi dan babi, tetapi sumber ini berisiko menularkan penyakit seperti *bovine spongiform encephalopathy* dan penyakit mulut dan kuku, serta memerlukan proses pemurnian yang rumit dan mahal.²

Kolagen laut menjadi alternatif karena memiliki keamanan, biokompatibilitas, biodegradabilitas tinggi, imunogenisitas rendah, serta proses ekstraksi yang lebih mudah. Kolagen laut juga memiliki ketahanan fisik dan kimia yang baik, ketersediaan melimpah, serta bebas dari risiko patogen hewan. Sumber utamanya meliputi kulit, sisik, dan tulang ikan, serta karang, spons, salmon, ubur-ubur, *echinodermata*, dan alga koralin. Kolagen spons laut bersifat lunak, kuat, elastis, menyerap, dan antibakteri.²

Alginat

Alginat merupakan polisakarida alami yang terutama diekstraksi dari alga coklat dan banyak dikembangkan sebagai biomaterial dalam rekayasa jaringan karena sifatnya yang serbaguna. Dalam kedokteran gigi regeneratif, alginat berpotensi digunakan sebagai *scaffold* injeksi maupun matriks pembawa sel dan *growth factor* pada regenerasi tulang alveolar, jaringan periodontal, serta kompleks pulpa-dentin. Kemampuannya membentuk hidrogel memungkinkan alginat menyediakan lingkungan 3D yang mendukung viabilitas, proliferasi, dan diferensiasi sel selama proses regenerasi jaringan.^{9,10}

Alginat memiliki sifat biokompatibel, toksisitas rendah, serta mampu membentuk hidrogel dalam keberadaan kation divalen sehingga banyak digunakan sebagai bahan *scaffold*. Meskipun demikian, alginat murni memiliki keterbatasan berupa kekuatan mekanik yang relatif rendah dan kemampuan adesi sel yang terbatas. Karena itu, alginat sering dikombinasikan dengan biomaterial lain seperti hidroksiapatit (HA), kolagen, atau kitosan untuk meningkatkan stabilitas, bioaktivitas, dan kemampuan mineralisasi. Kombinasi alginat dengan HA dinilai menguntungkan dalam rekayasa jaringan tulang karena HA memiliki kemiripan dengan komponen mineral tulang dan dentin, sehingga dapat memperkuat *scaffold* serta mendukung pembentukan jaringan termineralisasi.¹¹

Kitosan

Kitosan, suatu polisakarida kationik yang diperoleh dari proses deasetilasi kitin yang berasal dari cangkang krustasea, merupakan salah satu biomaterial berbasis laut yang paling menjanjikan. Sifat intrinsiknya, termasuk mucoadesivitas, biokompatibilitas, biodegradabilitas, serta kemampuannya untuk dimodifikasi secara kimia, menjadikannya platform ideal untuk pengembangan sistem penghantaran obat berstruktur nano. Karakteristik tersebut memberikan dasar yang kuat dan serbaguna untuk aplikasi dalam *nanomedicine*. Kitosan juga berperan penting dalam penyembuhan luka berkat kombinasi sifat hemostatik, antimikroba, imunomodulator, dan regeneratif yang dimilikinya. Sejumlah penelitian telah mengonfirmasi potensi regeneratif kitosan dan biomaterial yang berasal dari laut. Kitosan memiliki potensi besar dalam bidang rekayasa jaringan dan regenerasi jaringan gigi karena sifatnya yang biokompatibel, tidak toksik, serta memiliki aktivitas antibakteri. Kitosan dapat dimanfaatkan sebagai bahan *scaf-*

fold untuk mendukung pertumbuhan, adesi, dan proliferasi sel, sekaligus mempercepat regenerasi jaringan lunak maupun keras.¹²

Coral

Corals, spons, cangkang moluska, tulang sotong, *echinodermata*, dan tulang ikan merupakan sumber penting biokeramik laut untuk sintesis kalsium fosfat. *Coral* banyak dikaji sebagai biomaterial regenerasi tulang karena kandungan kalsium karbonatnya dapat dikonversi menjadi HA yang menyerupai mineral tulang dan gigi, sehingga bersifat osteokonduktif dan berpotensi sebagai *bone graft substitute*. Selain itu, struktur 3D *coral* yang berpori dan saling terhubung menyerupai trabekula tulang, mendukung migrasi sel, vaskularisasi, serta pembentukan jaringan tulang baru, sehingga efektif digunakan sebagai *scaffold* rekayasa jaringan.^{2,13,14}

Carrageenan

Carrageenan merupakan polisakarida sulfat alami yang diekstraksi dari rumput laut merah (*Rhodophyta*). Biomaterial ini memiliki kemampuan membentuk hidrogel dengan struktur 3D yang stabil, sehingga banyak dimanfaatkan sebagai *scaffold* dalam rekayasa jaringan. *Carrageenan* bersifat biokompatibel dan *biodegradable*, serta mampu meniru ECM, sehingga mendukung adesi, proliferasi, dan diferensiasi sel. Dalam bidang biomedis, *carrageenan* menunjukkan aktivitas antimikroba, anti-inflamasi, dan regeneratif yang menjadikannya kandidat potensial untuk aplikasi kesehatan rongga mulut. Polisakarida tersulfatasi seperti *carrageenan* juga dilaporkan memiliki aktivitas antibakteri terhadap patogen oral, termasuk *S. mutans*, serta berkontribusi dalam proses perbaikan dan regenerasi jaringan.¹⁵

PEMBAHASAN

Aplikasi klinis marine biomaterial pada regenerasi tulang alveolar

Kerusakan tulang alveolar akibat periodontitis, trauma, infeksi, atau kehilangan gigi dapat menyebabkan resorpsi tulang dan penurunan *alveolar ridge*. Regenerasi tulang alveolar dapat dilakukan melalui berbagai prosedur periodontal dan regeneratif seperti *guided tissue regeneration* (GTR), *bone augmentation*, serta penggunaan *graft* dan *scaffold*.¹⁶ Kolagen *scaffold* dari *Aurelia aurita* memiliki sifat biokompatibel dan bioaktif yang mendukung adesi, proliferasi, dan diferensiasi sel osteogenik. Porositas *scaffold* ini membantu pembentukan tulang alveolar baru dan meningkatkan regenerasi jaringan, meskipun masih memerlukan validasi lebih lanjut melalui studi *in vivo*.¹⁷

Scaffold kitosan–alginat–fucoidan dari kulit udang putih dan alga coklat memiliki porositas tinggi, biokompatibilitas baik, serta mendukung adesi, migrasi, dan proliferasi sel. Karakteristik ini berpotensi mendukung regenerasi jaringan dan remodeling tulang sebagai alternatif material substitusi tulang.¹⁸

Biomaterial kalsium fosfat dari *coral* memiliki struktur berpori, biokompatibel, dan osteokonduktif sehingga ideal untuk rekayasa jaringan tulang. Kombinasi HA, kitin, dan biokomposit berbasis kitosan juga berpotensi sebagai *scaffold* tulang karena mendukung adesi, migrasi, proliferasi osteoblas, serta memiliki sifat degradasi dan mekanik yang sesuai.²

Scaffold berbasis *carrageenan* memiliki kekuatan struktur yang baik, biokompatibilitas tinggi, serta mirip dengan ECM alami yang tidak hanya memberikan stabilitas mekanik, tetapi juga mendukung proses biologis seperti osteogenesis dan oseointegrasi. *Scaffold* ini mampu meningkatkan adesi, proliferasi, dan diferensiasi osteoblas, yang merupakan tahapan penting dalam pembentukan tulang baru.¹⁵

Aplikasi klinis marine biomaterial dalam regenerasi periodontal

Regenerasi periodontal adalah proses perbaikan dan rekonstruk-

si jaringan pendukung gigi yang rusak akibat penyakit periodontal. Dalam proses ini, biomaterial berperan sebagai *scaffold*, membran, atau sistem penghantaran obat untuk menciptakan lingkungan yang mendukung regenerasi jaringan. Biomaterial yang ideal harus biokompatibel, biodegradabel, serta mampu mendukung kontrol infeksi dan regenerasi jaringan periodontal secara fungsional.

Kitosan berperan sebagai agen adjuvan dalam terapi periodontitis dan gingivitis melalui berbagai bentuk aplikasi, termasuk *antimicrobial photodynamic therapy* (aPDT), membran regeneratif, serta sistem penghantaran obat lokal pada poket periodontal. Efek biologisnya meliputi aktivitas antimikroba, anti-inflamasi, dan kemampuan mendukung regenerasi jaringan periodontal, yang berkontribusi dalam penurunan beban bakteri subgingival dan peningkatan penyembuhan jaringan periodontal. Dalam aplikasi periodontal, kitosan dapat digunakan sebagai gel, membran, spons, *scaffold*, nanopartikel, maupun sistem penghantaran obat lokal pada poket periodontal. Aktivitas antimikrobanya membantu menurunkan jumlah bakteri patogen periodontal, sedangkan sifat mukoadesifnya memungkinkan bahan bertahan lebih lama pada jaringan periodontal sehingga meningkatkan waktu kontak bahan aktif pada area lesi.^{19,20}

Dalam proses regenerasi jaringan, kitosan dapat berperan sebagai *scaffold* atau membran yang menyediakan kerangka sementara bagi perlekatan, migrasi, proliferasi, dan diferensiasi sel periodontal. Struktur kitosan yang dapat dimodifikasi menjadi spons atau membran berpori memungkinkan infiltrasi sel, difusi nutrisi, serta pembentukan jaringan baru yang berkontribusi pada regenerasi ligamen periodontal dan tulang alveolar.^{19,20}

Coral-derived biomaterials dalam regenerasi periodontal berperan sebagai *scaffold* biokeramik untuk mendukung pembentukan tulang baru, bukan bahan utama untuk meregenerasi seluruh komponen periodontal. Peran utamanya adalah menyediakan kerangka osteokonduktif yang memungkinkan sel pembentuk tulang bermigrasi, melekat, dan membentuk jaringan tulang baru pada area defek periodontal.²

Carrageenan memiliki peran penting dalam regenerasi periodontal, yaitu berpotensi membantu kontrol inflamasi dan penghantaran bahan terapeutik secara lokal. Pada periodontitis, respons inflamasi yang berlebih berkontribusi terhadap kerusakan jaringan periodontal, sehingga biomaterial dengan aktivitas anti-inflamasi dapat membantu proses penyembuhan. *Scaffold* berbasis *carrageenan* membentuk jaringan 3D yang menyediakan lingkungan suportif bagi fibroblas dan sel epitel untuk adesi, proliferasi, serta deposisi ECM. Hal ini mempercepat perbaikan jaringan gingiva dan membantu *re-establishment* perlekatan periodontal. Bukti eksperimental terbaru menunjukkan bahwa *scaffold carrageenan* dapat mengurangi inflamasi lokal sekaligus merangsang regenerasi epitel, sehingga berpotensi untuk diaplikasikan dalam membran GTR.^{15,19}

Aplikasi klinis biomateri marin pada terapi endodontik regeneratif

Terapi endodontik regeneratif bertujuan regenerasi pulpa-dentin pada gigi nekrosis atau akar imatur. *Marine biomaterials* berpotensi digunakan karena biokompatibel, *biodegradable*, bioaktif, dan dapat berperan sebagai *scaffold* untuk mendukung perlekatan, migrasi, proliferasi, serta diferensiasi sel.²

Alginate berfungsi sebagai hidrogel *scaffold*, pembawa *stem cell*, dan sistem penghantaran molekul bioaktif di dalam saluran akar. Sifat hidrogelnya membantu menyesuaikan bentuk kanal, menjaga viabilitas sel, dan mendukung pelepasan zat aktif secara bertahap.⁹

Kitosan berperan dalam kontrol infeksi karena bersifat antimikroba, biokompatibel, dan *biodegradable*. Selain itu, kitosan dapat digunakan sebagai *scaffold* atau pembawa bahan antibakteri dan mole-

kul bioaktif secara lokal.⁹

Coral-derived biomaterials lebih sesuai untuk regenerasi jaringan keras, terutama pada defek tulang periapikal, karena dapat menyerupai mineral jaringan keras gigi.^{9,17} Carrageenan berpotensi sebagai hidrogel pendukung penghantaran lokal serta membantu modulasi inflamasi dan aktivitas antimikroba.^{15,19}

Secara keseluruhan, *marine biomaterials* mendukung terapi endodontik regeneratif melalui *scaffold*, kontrol infeksi, penghantaran obat, dan stimulasi pembentukan jaringan. Namun, diperlukan uji klinis lebih lanjut untuk memastikan efektivitas, keamanan, dan standarisasi klinisnya.^{9,15,17,19}

Aplikasi klinis *marine biomaterials* dalam penyembuhan luka

Luka intraoral akibat trauma, prosedur bedah, atau ulserasi oral merupakan kasus umum dalam kedokteran gigi. Penyembuhannya berlangsung melalui fase hemostasis, inflamasi, proliferasi, dan maturasi yang dipengaruhi lingkungan rongga mulut, kolonisasi mikroba, dan stres mekanis. Biomaterial dikembangkan untuk mendukung regenerasi jaringan intraoral.⁴

Kolagen laut mampu meningkatkan proliferasi fibroblas, sintesis kolagen, re-epitelisasi, serta aktivitas antimikroba melalui stimulasi *epidermal growth factor* (EGF) dan *fibroblast growth factor* (FGF).¹⁷ *Marine collagen peptides* (MCPs) dari kulit ikan nila juga meningkatkan proliferasi fibroblas, angiogenesis, deposisi kolagen, serta menekan inflamasi sehingga mempercepat penyembuhan ulkus mukosa oral. MCPs memiliki antigenisitas rendah dan potensi tinggi sebagai biomaterial penyembuhan luka rongga mulut.²¹

Material yang mengandung kitosan juga menunjukkan potensi dalam bedah mulut, termasuk pada manajemen pasca pencabutan gigi, karena sifat biokompatibilitas, hemostatik, antimikroba, serta kemampuannya dalam mendukung regenerasi jaringan. Struktur kitosan merupakan polisakarida bermuatan positif dengan gugus amino pada rantai utamanya. Muatan positif ini berinteraksi secara elektrostatik dengan molekul bermuatan negatif pada permukaan eritrosit, sehingga meningkatkan viskositas darah, mengaktifkan adesi dan agregasi trombosit, serta meningkatkan transportasi trombosit ke dinding pembuluh darah yang menghasilkan hemostasis. Karakteristik tersebut dapat mempercepat proses penyembuhan, menurunkan risiko infeksi, dan meningkatkan kenyamanan pasien. Dibandingkan dengan terapi standar seperti irigasi *saline*, *packing* kasa, dan *dressing* konvensional, bahan berbasis kitosan dapat memberikan manfaat tambahan berupa stabilitas bekuan darah yang lebih baik, penurunan inflamasi, serta peningkatan regenerasi jaringan.¹⁹

Pada lesi intraoral seperti *denture stomatitis*, penggunaan larutan kitosan dibandingkan dengan terapi nistatin konvensional menunjukkan penurunan signifikan jumlah blastospora dan hifa, luas area eritema, sensasi rasa terbakar, serta waktu yang dibutuhkan untuk perbaikan klinis. Kitosan juga dilaporkan sebagai alternatif obat kumur antijamur yang efektif karena memiliki aktivitas antifungal serta biokompatibilitas alami yang baik.¹⁷

Disimpulkan bahwa biomaterial berbasis laut seperti kolagen, alginat, kitosan, *coral*, dan *carrageenan* menunjukkan potensi besar dalam kedokteran gigi regeneratif karena memiliki sifat biokompatibel, *biodegradable*, bioaktif, antimikroba, anti-inflamasi, serta osteokonduktif pada beberapa bahan. Karakteristik tersebut memungkinkan *marine biomaterials* berperan sebagai *scaffold*, membran, *wound dressing*, dan *bone graft substitute* yang mendukung adesi, proliferasi, diferensiasi sel, serta pembentukan jaringan baru. Secara klinis, biomaterial ini berpotensi dimanfaatkan pada rekayasa jaringan periodontal, regenerasi tulang alveolar, terapi endodontik regeneratif, dan

penyembuhan luka intraoral. Namun, diperlukan penelitian lanjutan, stabilitas, kontrol degradasi, sifat mekanik, serta standarisasi peng-
dan uji klinis jangka panjang untuk memastikan efektivitas, keamanan- gunannya dalam aplikasi klinis kedokteran gigi.

REFERENSI

1. Sukmana I, Risano AYE, Wicaksono MA, Saputra RA. Perkembangan dan aplikasi biomaterial dalam bidang kedokteran modern: a review. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi* 2022; 1(5): 635-46.
2. Varghese MG, George TV, Thomas NG, Pyas AM, Francis AM. Marine based biomaterials in dental regeneration. *Int J Innov Res Med Sci* 2020; 5(10): 443-8
3. Gobbi SJ, Reinke G, Gobbi VJ, Rocha Y, Sousa TP, Coutinho MM. Biomaterial: concepts and basics properties. *Eur Int J Sci Technol* 2020;9(2):23-42
4. Zhang H, Wu X, Quan L, Ao Q. Characteristics of marine biomaterials and their applications in biomedicine. *Mar Drug* 2022; 20: 372.
5. Huzum B, Puha B, Necoara RM, Gheorghevi S, Puha G, Filip A, et al. Biocompatibility assessment of biomaterials used in orthopedic devices: An overview. *Exp Ther Med* 2021; 22(5): 1315.
6. Mndlovu H, Kumar P, du Toit LC. A review of biomaterial degradation assessment approaches employed in the biomedical field. *Mater Degrad* 2024; 8(66):1
7. Gao Y, Wang S, Shi B, Wang Y, Chen Y, Wang X, et al. Advances in modification methods based on biodegradable membranes in guided bone/tissue regeneration: a review. *Polymers*. 2022; 14(5): 871.
8. Agrawal R, Kumar A, Mohammed MKA, Singh S. Biomaterial types, properties, medical applications, and other factors: a recent review. *J Zhejiang Univ Sci A* 2023; 1-16.
9. Lin GSS. An insight into the role of marine biopolymer alginate in endodontics: a review. *J Endod* 2022; 20: 539.
10. Ramachandran L, Umesh SG, Sreenu B, Cholan P, Sujatha V. Alginate as a biological scaffold for alveolar bone regeneration. *J Interdiscipl Dent* 2026; 16(1): 3-13.
11. Gupta S, Selvam SP, Ramadoss R, Sundar S. Alginate-hydroxyapatite scaffolds: A comprehensive characterization study. *J Oral Biol Craniofac Res* 2025;15(3):555–62.
12. Chilwant M, Paganini V, Di Gangi M, Brignone SG, Chetoni P, Burgalassi S, et al. From sea to therapy: marine biomaterials for drug delivery and wound healing. *Pharmaceut* 2025; 18(8):1093.
13. Wahyudi I, Tajrin A, Mubarak H. The potential use of hydroxyapatite from sea coral as a bone substitute: a systematic review. *Craniofac Surg* 2025; 26(5):175-82.
14. Wang H, Li X, Xuan M, Yang R, Zhang J, Chang J. Marine biomaterials for sustainable bone regeneration. *Giant* 2024; 19:100298.
15. Jeyachandran S. Therapeutic applications of red marine seaweeds in dental care: innovations in oral health and treatment. *Biomater Investig Dent* 2025; 12:300-12
16. Tsuchida S, Nakayama T. Recent clinical treatment and basic research on the alveolar bone. *Biomed* 2023;11:843.
17. Rachmawati R, Hidayat M, Permatasari N, Widyarti S. Jellyfish (*Aurelia aurita*) collagen scaffolds potential in alveolar bone regeneration. *J F1000 Res* 2021;10:318.
18. Hamrun N, Herdianto N, Gustiono D, Oktawati S, Kamil K, Marlina E, et al. Synthesis, physical characteristics, and biocompatibility test of chitosan-alginate-fucoidan scaffold as an alternative material for alveolar bone substitution. *BMC Oral Health* 2025; 25:1199.
19. Qadir BH, Mahmood MK, Rasheed TA, Othman KS, Mahmood MA, Abdulghafor MA, et al. Applications of chitosan in oral health and diseases. *Front Oral Health* 2025; 6: 1632233.
20. Walendowska MP. Chitosan sponges as next-generation biomaterials for dental tissue engineering and periodontal regeneration. *Mater* 2025;17:1622.
21. Gao Q, Liu Y, Zhang Y, Wang H, Li X. Marine collagen peptides: a novel biomaterial for the healing of oral mucosal ulcers. *J Oral Rehabil* 2022;41(6): 850-9.