

PENDEKATAN BIOMIMETIK PADA BIDANG KEDOKTERAN GIGI : TINJAUAN PUSTAKA

Gema Gempita^{1*}, Renny Febrida²

Departemen Ilmu dan Teknologi Material Kedokteran Gigi, Fakultas Kedokteran Gigi, Universitas
Padjadjaran^{1,2}

^{*}*Corresponding Author : gema.gempita@unpad.ac.id*

ABSTRAK

Tinjauan pustaka ini membahas pendekatan biomimetik dalam bidang kedokteran gigi yang bertujuan untuk meniru dan menggantikan struktur alami pada area kraniofasial. Pendekatan biomimetik dalam kedokteran gigi merupakan strategi yang berkembang pesat untuk meniru dan menggantikan struktur biologis alami, khususnya pada sistem kraniofasial. Selama beberapa dekade terakhir, penelitian intensif telah mendorong pengembangan biomaterial inovatif yang meniru sifat fisik, mekanis, dan biologis jaringan gigi seperti enamel, dentin, pulpa, dan cementum. Material berbasis alami atau yang menyerupai struktur biologis menunjukkan integrasi yang lebih baik secara klinis dan memberikan hasil perawatan yang lebih optimal. Pendekatan ini tidak hanya diterapkan dalam bidang kedokteran gigi restoratif dan prostodontik melalui penggunaan resin komposit dan keramik biomimetik, tetapi juga dalam endodontik regeneratif dengan pengembangan semen bioaktif dan sistem irigasi saluran akar yang mendukung regenerasi jaringan. Dalam bedah maksilofasial dan periodontal, biomimetik digunakan untuk mendesain membran dan implan yang mendorong pertumbuhan tulang dan osseointegrasi. Keberhasilan strategi biomimetik sangat bergantung pada pendekatan interdisipliner yang melibatkan ilmu kedokteran gigi, rekayasa material, bioteknologi, dan ilmu komputasi.. Di masa depan, tujuan utama dari pendekatan ini adalah kemampuan meregenerasi seluruh jaringan gigi secara fungsional dan estetik. Pendekatan biomimetik diharapkan menjadi jembatan transformatif dalam transisi dari pendekatan reparatif menuju regeneratif di era kedokteran gigi modern

Kata kunci : biomaterial, biomimetik, kedokteran gigi, nanostruktur i, regenerasi jaringan

ABSTRACT

This literature review discusses the biomimetic approach in dentistry that aims to mimic and replace natural structures in the craniofacial area. The biomimetic approach in dentistry is a rapidly evolving strategy to mimic and replace natural biological structures, particularly in the craniofacial system. Over the past decades, intensive research has driven the development of innovative biomaterials that mimic the physical, mechanical, and biological properties of dental tissues such as enamel, dentin, pulp, and cementum. Natural-based materials or those that mimic biological structures demonstrate better clinical integration and provide more optimal treatment outcomes. This approach is applied not only in restorative dentistry and prosthodontics through the use of biomimetic composite resins and ceramics, but also in regenerative endodontics with the development of bioactive cements and root canal irrigation systems that support tissue regeneration. In maxillofacial and periodontal surgery, biomimetic is used to design membranes and implants that promote bone growth and osseointegration. The success of biomimetic strategies relies heavily on an interdisciplinary approach involving dentistry, materials engineering, biotechnology, and computational science. In the future, the ultimate goal of this approach is the ability to regenerate entire tooth tissues functionally and aesthetically. Biomimetic approaches are expected to be a transformative bridge in the transition from reparative to regenerative approaches in the modern era of dentistry.

Keywords : biomimetic, dentistry, biomaterials, tissue regeneration, nanostructure

PENDAHULUAN

Biomimetik merupakan suatu istilah yang pertama kali diciptakan oleh Otto Schmitt, seorang penemu, insinyur, dan ahli biofisika Amerika yang terkenal karena kontribusi

ilmiahnya pada bidang biofisika dan biomedis. Istilah "bio" berarti hidup, dan "mimesis" dalam bahasa Yunani berarti meniru. Biomimetik merupakan studi tentang mekanisme multidisiplin (studi struktur dan fungsi biologis dengan kimia, fisika, matematika, dan teknik) dan bahan yang diproduksi secara biologis untuk merancang produk yang meniru alam. Biomimetik adalah bidang studi yang merancang sistem dan mensintesis bahan melalui biomimikri, yaitu proses meniru mekanisme alamai. (Gempita & Karlina, 2024; Hwang et al., 2015; Zafar, 2020)

Perkembangan biomimetik dimulai pada tahun 1950-an, ketika Otto Schmit menciptakan istilah biomimetik, sedangkan kata "bionik" pertama kali digunakan oleh Jack Steele pada tahun 1960. Istilah biomimetik secara resmi pertama kali tercantum dalam Kamus Webster pada tahun 1974. Meskipun sejarah biomimetik sudah ada sejak abad pertama, istilah ini tidak dipopulerkan di kalangan ilmuwan dan peneliti. Istilah ini menjadi populer pada tahun 1997, setelah Janine Benyus menerbitkan sebuah buku yang sangat inovatif tentang hal ini yang berjudul "*Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*" (Katiyar, Goel, Hawi, & Goel, 2021; Singer, 2023; Zafar, 2020). Pertengahan abad ke-20 merupakan masa penting dalam sejarah biomimetik karena adanya penemuan alat pacu jantung, katup jantung buatan, dan penggantian sendi lutut. Kehilangan dan kerusakan organ serta jaringan yang diobati dengan rekonstruksi bedah, penggunaan perangkat mekanis dan transplantasi organ dari satu individu ke individu lain meningkat dalam beberapa tahun terakhir menyebabkan peningkatan teknologi biomimetik.(Goswami, 2018)

Pendekatan biomimetik dieksplorasi secara luas di berbagai disiplin ilmu, termasuk kedokteran gigi. Dalam kedokteran gigi klinis, biomimetik mengacu pada perbaikan gigi yang terpengaruh dengan meniru karakteristik gigi asli (misalnya, enamel, dentin, tulang, sementum, dll.) dalam hal estetika, biomekanik, dan kompetensi fungsional.(Telgi, 2024; Zafar, 2020) Dalam bidang ilmu kedokteran gigi, kebutuhan akan bahan restoratif yang tidak hanya menggantikan jaringan yang rusak, tetapi juga meniru sifat biologis dan mekanis dari jaringan gigi alami, mendorong berkembangnya pendekatan biomimetik. Hal ini menjadi semakin penting mengingat tantangan dalam mempertahankan vitalitas, estetika, dan fungsi jaringan gigi yang rusak akibat trauma, karies, atau prosedur terapeutik. Pendekatan biomimetik menjembatani celah antara teknologi dan biologi dengan merancang material dan teknik yang mampu merespons lingkungan biologis secara dinamis, serupa dengan jaringan alami gigi.(Liu et al., 2023)

Salah satu contoh sukses dari biomimetik dalam kedokteran gigi adalah pengembangan bahan restoratif berbasis nanoteknologi, seperti resin komposit dan keramik yang menyerupai struktur enamel. Selain itu, dalam bidang endodontik, pengembangan semen bioaktif seperti *Mineral Trioxide Aggregate* (MTA) dan *Biodentine* menunjukkan kemampuan regeneratif yang menyerupai jaringan pulpa dan dentin. Bahan-bahan ini tidak hanya bersifat kompatibel secara biologis tetapi juga mampu merangsang perbaikan dan regenerasi jaringan keras gigi.(Kumar et al., 2022) Tidak hanya terbatas pada restorasi dan endodontik, konsep biomimetik juga merambah ke bidang bedah mulut dan periodontik. Dalam bidang ini, biomimetik diterapkan melalui penggunaan *scaffold*, *membran guided tissue regeneration* (GTR), dan implan berbasis material bioaktif untuk mendukung regenerasi tulang dan integrasi jaringan. Pendekatan ini berperan penting dalam rehabilitasi kraniofasial yang kompleks, serta menjanjikan solusi klinis yang lebih tahan lama dan minim risiko dibandingkan teknik konvensional.(Li et al., 2022)

Dengan kemajuan teknologi rekayasa jaringan, pencetakan 3D, dan simulasi berbasis kecerdasan buatan, membuat masa depan biomimetik dalam kedokteran gigi terlihat sangat menjanjikan. Kolaborasi interdisipliner menjadi kunci keberhasilan dalam mengembangkan biomaterial yang tidak hanya menyerupai struktur dan fungsi jaringan gigi asli, tetapi juga dapat disesuaikan secara individual berdasarkan kebutuhan pasien(Patel, Sheth, Thakore, &

Dhamat, 2018). Sebagai bagian dari kemajuan ilmu kedokteran gigi modern, pendekatan biomimetik juga memiliki implikasi besar dalam pendidikan dan penelitian. Dengan terus berkembangnya ilmu material dan teknologi digital, mahasiswa kedokteran gigi dan peneliti dituntut untuk memahami tidak hanya aspek teknis restorasi atau rekonstruksi jaringan, tetapi juga filosofi biomimetik yang mendasarinya. Kurikulum pendidikan kedokteran gigi pun mulai mengintegrasikan konsep biomimetik dalam pengajaran preklinik dan klinik. Di sisi lain, penelitian biomimetik juga mendorong kolaborasi multidisipliner yang mempertemukan akademisi, praktisi, serta industri dalam pengembangan material baru yang aman, efektif, dan berkelanjutan. Dengan dukungan regulasi, pendanaan riset, serta kesadaran global akan pentingnya teknologi ramah lingkungan dan pendekatan berbasis pasien, biomimetik diperkirakan akan menjadi fondasi penting dalam praktik kedokteran gigi regeneratif di masa depan (Katiyar et al., 2021; Singer, Fouda, & Bourauel, 2023; Zafar, 2020).

Artikel ini bertujuan untuk membahas lebih lanjut perkembangan terbaru dalam biomimetik kedokteran gigi serta mengevaluasi potensinya di masa depan menunjang praktik klinis yang lebih efektif, personal, dan berkelanjutan.

METODE

Pencarian jurnal dilakukan melalui mesin pencari *Google Scholar* untuk analisis literatur terkait. *Google Scholar* memungkinkan pencarian paralel dari berbagai basis data ilmiah yang bersifat interdisipliner dan global. Pencarian jurnal terkait ditinjau dengan menggunakan kata kunci “*biomimetic*”, dan “*dentistry*” dalam rentang waktu 2018–2025. Artikel tinjauan pustaka ini berfokus pada pendekatan biomimetik pada aplikasi kedokteran gigi restoratif, prostodontik, endodontik beserta aspek regeneratif, serta bedah maksilofasial dan periodontal. Sebanyak 14 artikel dipilih dan dianalisis lebih lanjut berdasarkan relevansi topik dan kualitas publikasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pendekatan Biomimetik pada Aplikasi Kedokteran Gigi Restoratif dan Prostodontik

Tujuan utama biomimetik dalam kedokteran gigi restoratif adalah untuk mengembalikan jaringan keras (enamel dan dentin) agar berfungsi penuh melalui ikatan jaringan keras. Gigi asli selalu dianggap sebagai referensi saat menggunakan pendekatan biomimetik untuk memulihkan jaringan gigi yang sakit atau retak. Gigi manusia memiliki struktur yang kompleks dengan inti bagian dalam yang sangat vaskular, lunak, dan halus yang dikelilingi oleh jaringan email dan dentin yang sangat mineralisasi. Sayangnya, dalam kedokteran gigi, tidak ada biomaterial yang memiliki sifat mekanis, fisik, dan optik yang sama dengan struktur gigi (email, dentin, dan sementum). Dalam pendekatan biomimetik kedokteran gigi restoratif, pencarian dilakukan terhadap material yang memiliki sifat estetika dan fungsional yang lebih dekat dengan struktur gigi.(Singer, 2023; Zafar, 2020)

Semen *glass ionomer* (*glass ionomer cement/GIC*) dianggap sebagai bahan biomimetik karena memiliki koefisien ekspansi termal yang sama dengan struktur gigi, terikat secara adhesif pada email dan dentin, dan melepaskan *fluoride* dalam jangka waktu yang lama.(Singer, 2023) GIC juga memiliki koefisien ekspansi termal yang identik dengan gigi asli. GIC berguna sebagai dasar penambalan kavitas kelas I dan II yang dalam, serta pada penambalan bukal kelas V. GIC melepaskan fluorida, yang memiliki sifat bakterisida, dan merangsang dentin sklerotik. Namun, kekuatan tariknya buruk dan tidak dianjurkan di area dengan tekanan oklusal dan konsentrasi gaya yang tinggi. Saat ini, GIC menjadi bahan utama untuk kedokteran gigi invasif minimal.(Dey, Rao, & Panwar, 2024) Hampir semua hal di alam, termasuk gigi, mutiara, kerang, koral, dan tulang, tersusun dari komposit organik dan anorganik

hibrida. Resin komposit gigi (*resin dental composite/RDC*) merupakan kategori penting dari biomaterial hibrida, yang terdiri dari matriks resin dan pengisi anorganik. Resin komposit telah banyak digunakan dalam kedokteran gigi untuk memulihkan gigi yang sakit dan rusak sejak tahun 1960-an karena estetika yang sangat baik, biokompatibilitas yang baik, dan kemudahan penggunaan.(Katiyar et al., 2021; Verma, TR, Nigam, & Hari, 2023) Salah satu kemajuan penting dalam komposit resin adalah dalam pengembangan bahan pengisi nano, seperti nanopartikel dan *nanocluster*, yang dapat meningkatkan sifat mekanis material. Selain itu, bahan pengisi nano juga berkontribusi pada peningkatan estetika dengan mencapai tampilan yang lebih alami. Selain perbaikan fisik dan mekanis, kemajuan dalam komposit resin juga berfokus pada biokompatibilitas dan sifat adhesi. Pengembangan sistem adhesif telah merevolusi kedokteran gigi restoratif modern, yang memungkinkan pengikatan bahan restoratif ke struktur gigi.(Fatima Balderrama et al., 2024)

Perkembangan yang terbaru seperti struktur komposit resin berlapis ganda dianggap sebagai sistem restorasi biomimetik baru, yang meniru struktur serat kompleks dentin-enamel. Struktur ini terbuat dari dasar yang dibentuk dari resin komposit yang diperkuat serat kaca (*fiber reinforced composite/FRC*) dan permukaan komposit resin yang lebih mudah dipoles dan tahan aus. (Singer, 2023) Ada berbagai macam keramik yang digunakan dalam kedokteran gigi termasuk keramik bioinert (zirkonia, bagian pengisi komposit restoratif) dan keramik bioaktif (*hydroxyapatite/HA* dan *calcium phosphates/CaP*). Keramik bioaktif digunakan dalam endodontik dan dapat dikategorikan sebagai *bioresorbable* (pengganti tulang CaP) dan *non-bioresorbable* (semen kalsium silikat atau hidrolik), yang kemudian akan dibahas pada subbab selanjutnya.(Zafar, 2020) Keramik bioinert terutama digunakan untuk aplikasi restorative. Keramik gigi ini digunakan untuk restorasi tidak langsung, dengan fokus pada bidang prostetik, terutama untuk pembuatan mahkota yang didukung gigi dan implan serta gigi tiruan sebagian tetap.

Secara biomimetik, keramik gigi mampu meniru tampilan alami gigi. Popularitas keramik gigi telah meluas dalam tiga dekade terakhir setelah evolusi teknologi kedokteran gigi berbasis komputer dan pengenalan konsep “alur kerja digital” dalam kedokteran gigi. Keramik gigi biomimetik harus mampu membentuk adhesi bebas celah pada substansi gigi yang direstorasi dan mendorong regenerasi alami jaringan di sekitarnya. Aplikasi biomimetik pada keramik gigi juga mencakup implan keramik berlapis bioaktif. Beberapa keramik kaca bioaktif tersedia secara komersial dan digunakan untuk melapisi implan gigi titanium dan zirkonia. Pelapisan meningkatkan osseointegrasi dan ikatan jaringan di sekitar implan keramik. Keramik hibrida adalah contoh lain dari material keramik biomimetik. Mereka diperkenalkan dalam uji coba untuk menggabungkan keunggulan keramik dan komposit agar memperoleh sifat fisik (misalnya, *modulus Young* dan kekerasan) yang mirip dengan email dan dentin.(Fatima Balderrama et al., 2024; Goswami, 2018; Singer, 2023)

Pendekatan Biomimetik pada Aplikasi Kedokteran Gigi Endodontik dan Aspek Regeneratif

Bidang endodontik regeneratif melibatkan studi tentang struktur dan fungsi gigi asli untuk merancang bahan dan teknik yang sangat menyerupai sifat asli, dengan perawatan yang lebih efektif dan tahan lama bagi pasien dengan nekrosis gigi. Terdapat berbagai macam aplikasi biomimetik dalam bidang endodontik, termasuk biomaterial (agen irigasi, medikamen dan semen intrakanal) dan regenerasi jaringan (regenerasi dentin dan pulpa, revaskularisasi).(Fatima Balderrama et al., 2024; Kumar et al., 2022; Patel et al., 2018; Zafar, 2020) Beberapa irigan digunakan untuk irigasi saluran akar yang mengubah permukaan dentin di saluran akar dengan menghilangkan *smear layer* yang mendukung prosedur regeneratif. Irigasi saluran akar yang umum digunakan adalah are sodium hypochlorite (NaOCl), *hydrogen peroxide* (H₂O₂), *chlorhexidine* (CHX), *ethylene diamine tetraacetic acid* (EDTA), dan air

salin. Kombinasi irigasi kimia dan obat intrakanal yang digunakan untuk mendisinfeksi saluran akar dan menghilangkan peradangan yang mendukung prosedur endodontik regeneratif.(Zafar, 2020)

Salah satu bidang di mana biomimetik memiliki dampak signifikan dalam ilmu endodontik adalah pengembangan bahan bioaktif untuk terapi saluran akar. Bioaktivitas bahan kedokteran gigi mengacu pada kemampuannya untuk menginduksi respons fisiologis lokal guna membentuk ikatan kimia atau pembentukan jaringan melalui interaksi kimia atau fisik.(Fatima Balderrama et al., 2024; Singer, 2023) Bahan biomimetik, di sisi lain, dirancang untuk merangsang proses penyembuhan alami pada pulpa gigi dan untuk meningkatkan regenerasi jaringan sehat. Semen telah dikembangkan dengan sifat remineralisasi; namun, salah satu contoh semen biomimetik yang digunakan dalam endodontik adalah dengan penggabungan kaca bioaktif. Kaca bioaktif memiliki kapasitas untuk berikatan dengan jaringan hidup dan meningkatkan mineralisasi, mirip dengan proses pembentukan gigi alami. Ketika ditempatkan di saluran akar, kaca bioaktif dapat merangsang pertumbuhan jaringan gigi baru dan membantu memperbaiki kerusakan yang disebabkan oleh infeksi atau trauma. Hal ini dapat menghasilkan hasil yang lebih baik bagi pasien dan mengurangi kebutuhan untuk perawatan tambahan di masa mendatang.(Fatima Balderrama et al., 2024)

Endodontik regeneratif dapat menjadi perawatan pilihan bagi pasien pada gigi nonvital dengan apeks terbuka, terutama dalam kedokteran gigi anak dan endodontik. Penggunaan biomimetik dalam endodontik regeneratif bertujuan untuk mencapai perkembangan akar yang lengkap dengan peningkatan ketebalan dinding pada dentin akar, sehingga menghasilkan kompleks pulpa-dentin yang sehat dan fungsional. Teknik endodontik regeneratif (*regenerative endodontic techniques/RET*) bekerja berdasarkan 2 prinsip berikut: revaskularisasi pulpa yang merupakan induksi angiogenesis dalam saluran akar yang dirawat secara endodontic, dan regenerasi pulpa yang merupakan revaskularisasi pulpa serta pemulihan odontoblas dan/atau serabut saraf yang fungsional.(Kumar et al., 2022; Patel et al., 2018)

Pendekatan Biomimetik pada Aplikasi Bedah Maksilofasial dan Periodontal

Pendekatan rekayasa jaringan (*tissue engineering*) dalam regenerasi periodontal menggunakan pembawa dan/atau membran, yang dikenal sebagai regenerasi tulang terpandu (*guided-bone regeneration/GBR*), untuk menghindari migrasi jaringan epitel selama penyembuhan dan/atau untuk melepaskan faktor pertumbuhan di sekitar lokasi penyembuhan. Membran regeneratif multifungsi biomimetik yang meningkatkan pertumbuhan menunjukkan bahwa membran dengan faktor pertumbuhan yang disertakan meningkatkan bioaktivitas sekaligus mendukung proliferasi dan diferensiasi osteoblas. Integrasi biomaterial dengan sel dan molekul bioaktif telah diusulkan untuk meningkatkan hasil klinis dan melestarikan anatomi tulang. Pada implan gigi, pendekatan biomimetik bertujuan untuk mencapai tingkat kapasitas *osseointegration* dan *osseointroduction* untuk meniru struktur alami jaringan selama perawatan. Strategi modifikasi permukaan pada implant terkini telah digunakan untuk menerapkan struktur topografi hierarkis yang berkontribusi pada percepatan dan peningkatan osseointegrasi. Salah satu contohnya adalah pelapis kalsium fosfat (CaP) berstruktur nano pada permukaan implan telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam mempercepat osseointegrasi.(Fatima Balderrama et al., 2024; Li et al., 2022; Liu et al., 2023; Upadhyay et al., 2020)

KESIMPULAN

Tinjauan pustaka ini menekankan pendekatan biomimetik yang digunakan dalam kedokteran gigi. Jelas bahwa penelitian intensif selama bertahun-tahun telah menghasilkan pengembangan biomaterial yang sangat inovatif dan futuristik, serta teknik untuk

mensimulasikan dan mengganti struktur alami di daerah kraniofasial. Namun demikian, sebagai pertimbangan biomimetik, material yang berasal dari alam atau yang mirip secara biologis diketahui memiliki hasil klinis yang lebih baik dengan peluang yang lebih tinggi untuk penerapan klinis dan penggunaan pasien. Dengan demikian, diperlukan pendekatan interdisipliner yang mengintegrasikan kedokteran, bioteknologi, bioteknologi, dan ilmu komputasi untuk memajukan penelitian terkini untuk mengembangkan bahan biomimetik. Di masa depan, tersedianya jaringan gigi yang diregenerasi sepenuhnya (enamel, dentin, pulpa, dan sementum) dengan sifat nanostruktur biologis, mekanis, dan mineralisasi yang menyerupai jaringan gigi alami sangat diharapkan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Kami menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terimakasih khusus kami sampaikan kepada rekan-rekan sejawat atas saran, dukungan, dan inspirasi yang sangat berarti selama proses penelitian berlangsung. Kami juga mengucapkan terimakasih kepada Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Padjadjaran, khususnya Departemen Ilmu dan Teknologi Material Kedokteran Gigi atas dukungan moral, fasilitas, serta kesempatan yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik. Seluruh bentuk kerja sama, dedikasi, dan kolaborasi yang telah terjalin memberikan dampak besar bagi kelancaran dan keberhasilan penelitian ini. Semoga segala kontribusi yang telah diberikan menjadi bagian dari kemajuan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang kedokteran gigi.

DAFTAR PUSTAKA

- Dey, P., Rao, D., & Panwar, S. (2024). Bio-mimetic materials in dentistry: A review. *Odvotos - International Journal of Dental Sciences*, 6, 16-18.
- Fatima Balderrama, I., Schafer, S., El Shatanofy, M., Bergamo, E. T. P., Mirsky, N. A., Nayak, V. V., . . . Witek, L. (2024). *Biomimetic Tissue Engineering Strategies for Craniofacial Applications*. *Biomimetics*, 9(10), 636. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2313-7673/9/10/636>
- Gempita, G., & Karlina, E. (2024). Tinjauan Umum Biomimetik dalam Bidang Kedokteran Gigi. Bandung: Drexra.
- Goswami, S. (2018). *Biomimetic dentistry*. *Journal of Oral Research and Review*, 10(28). doi:10.4103/jorr.jorr_3_17
- Hwang, J., Jeong, Y., Park, J. M., Lee, K. H., Hong, J. W., & Choi, J. (2015). *Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine*. *Int J Nanomedicine*, 10, 5701-5713. doi:10.2147/ijn.S83642
- Katiyar, N. K., Goel, G., Hawi, S., & Goel, S. (2021). *Nature-inspired materials: Emerging trends and prospects*. *NPG Asia Materials*, 13(1), 56. doi:10.1038/s41427-021-00322-y
- Kumar, N., Maher, N., Amin, F., Ghabbani, H., Zafar, M. S., Rodríguez-Lozano, F. J., & Oñate-Sánchez, R. E. (2022). *Biomimetic Approaches in Clinical Endodontics*. *Biomimetics (Basel)*, 7(4). doi:10.3390/biomimetics7040229
- Li, Y., Hu, Y., Chen, H., Meng, X., Chen, D., Gu, H., . . . Li, Z. (2022). *A novel conceptual design of a biomimetic oral implant and its biomechanical effect on the repairment of a large mandibular defect*. *Medicine in Novel Technology and Devices*, 15, 100147. doi:<https://doi.org/10.1016/j.medntd.2022.100147>
- Liu, S., Yu, J.-M., Gan, Y.-C., Qiu, X.-Z., Gao, Z.-C., Wang, H., . . . Hou, H.-H. (2023). *Biomimetic natural biomaterials for tissue engineering and regenerative medicine: new*

- biosynthesis methods, recent advances, and emerging applications. Military Medical Research, 10(1), 16. doi:10.1186/s40779-023-00448-w*
- Patel, J., Sheth, T., Thakore, D., & Dhamat, D. (2018). *Biomimetics in Endodontics: A Review of the Changing Trends in Endodontics. Journal of Advanced Oral Research, 9, 11-14.* doi:10.1177/2320206818816186
- Singer, L., Fouda, A., & Bourauel, C. (2023). *Biomimetic approaches and materials in restorative and regenerative dentistry: review article. BMC Oral Health, 23(1), 105.* doi:10.1186/s12903-023-02808-3
- Singer, L. F., A.; Bourauel, C. (2023). *Biomimetic approaches and materials in restorative and regenerative dentistry: review article. . BMC Oral Health, 23(1), 105.* doi:0.1186/s12903-023-02808-3.
- Telgi, C. (2024). *Biomimetic materials in pediatric dentistry: A review article. GSC Biological and Pharmaceutical Sciences, 23, 67-075.* doi:10.30574/gscbps.2023.23.1.0136
- Upadhyay, A., Pillai, S., Khayambashi, P., Sabri, H., Lee, K. T., Tarar, M., . . . Tran, S. D. (2020). *Biomimetic Aspects of Oral and Dentofacial Regeneration. Biomimetics (Basel), 5(4).* doi:10.3390/biomimetics5040051
- Verma, S., TR, C., Nigam, D., & Hari, R. (2023). *Biomimetic materials in pediatric dentistry: A review article. GSC Biological and Pharmaceutical Sciences,, 23(01), 067-075.* doi:10.30574/gscbps.2023.23.1.0136
- Zafar, M. S. A., F.; Fareed, M.A.; Ghabbani, H.; Riaz, S.; Khurshid, Z.; Kumar, N. . (2020). *Biomimetic Aspects of Restorative Dentistry Biomaterials. Biomimetics (Basel), 5(3), 34.* doi:10.3390/biomimetics5030034