

The effect of marine mineral additions to composite resin on the remineralization process and restoration durability

Pengaruh penambahan mineral laut pada resin komposit terhadap proses remineralisasi dan ketahanan restorasi

¹Muhammad Ridzki Putra Pratama, ²Faziah Syardilla Syah, ³Andi Athalia Savitri, ⁴Lenni Indriani^{1,2,3}Mahasiswa Tingkat Profesi, Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Hasanuddin⁴Departemen Ilmu Material Teknologi Kedokteran Gigi, Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Hasanuddin

Makassar, Indonesia

Corresponding author, e-mail: 1ridzkiputrapratama@gmail.com**ABSTRACT**

Composite resin is a widely used restorative material in modern dentistry due to its advantages in aesthetics, mechanical strength, and biocompatibility. However, its clinical performance is challenged by issues such as bond degradation, polymerization shrinkage, and microleakage. Innovations in composite resin development have focused on the incorporation of bioactive materials, including marine-derived minerals. Marine minerals such as hydroxyapatite from fish bones, calcium carbonate from shells and corals, and silica from marine diatoms have been explored as fillers or sources of active ions to enhance remineralization potential and improve restoration durability. This review aims to examine the current literature on the impact of marine mineral incorporation into composite resins on the remineralization of dental structures and the mechanical performance of restorations. Findings suggest that marine minerals, particularly in nanoparticle form, can enhance calcium and phosphate ion release, promote the repair of demineralized tooth structures, and exhibit antibacterial effects. Nonetheless, further clinical studies are required to support the broader implementation of these materials in dental practice.

Keywords: composite resin, marine minerals, remineralization, bioactive, restoration durability**ABSTRAK**

Resin komposit merupakan bahan restoratif yang banyak digunakan dalam kedokteran gigi karena keunggulannya dalam hal estetika, kekuatan mekanik, dan biokompatibilitas. Salah satu tantangan utama dalam penggunaannya adalah degradasi ikatan, penyusutan polimerisasi, dan microleakage. Inovasi dalam pengembangan resin komposit difokuskan pada penambahan bahan bioaktif, salah satunya adalah mineral laut. Mineral laut seperti hidroksiapatit dari tulang ikan, kalsium karbonat dari kerang dan koral, serta silika dari diatom laut telah digunakan sebagai pengisi (filler) atau sumber ion aktif untuk meningkatkan sifat remineralisasi dan ketahanan restorasi. Kajian ini bertujuan untuk meninjau literatur terkait pengaruh penambahan mineral laut pada resin komposit terhadap remineralisasi struktur gigi dan peningkatan ketahanan mekanis restorasi. Hasil menunjukkan bahwa bahan mineral laut, terutama dalam bentuk nanopartikel, mampu meningkatkan pelepasan ion kalsium dan fosfat, memperbaiki mikrostruktur gigi yang rusak, serta memberikan efek antibakteri. Penelitian lebih lanjut secara klinis masih dibutuhkan untuk mendukung implementasi luas bahan ini dalam praktik kedokteran gigi.

Kata kunci: resin komposit, mineral laut, remineralisasi, bioaktif, ketahanan restorasi

Received: 10 September 2025

Accepted: 5 January 2026

Published: 1 April 2026

PENDAHULUAN

Penggunaan resin komposit sebagai bahan restorasi semakin meningkat karena kemampuannya yang baik dalam berikatan dengan gigi sehingga mudah diperbaiki apabila terjadi kerusakan serta memiliki faktor estetika yang baik. Komposisi dan ukuran partikel filler dari resin komposit sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat penting resin komposit, termasuk kekuatan, kemudahan dalam pemolesan, serta tingkat transparansinya yang baik menjadikan resin komposit ideal untuk berbagai prosedur klinis.¹⁻³

Kekuatan komposit bergantung pada kemampuan bahan pengikat untuk menyalurkan tegangan dari matriks yang lemah kepada partikel bahan pengisi yang kuat; tanpa bahan pengikat, partikel bahan pengisi tidak dapat menyerap tegangan yang ada dalam matriks dan bertindak seolah sebagai rongga, yang dapat melemahkan matriks. Penggunaan matriks polimer ikatan silang dapat meningkatkan kekerasan atau ketangguhan komposit, karena matriks polimer ikatan silang dapat mencegah rantai polimer ditarik dan dipisahkan saat retakan merambat.⁴

Kekerasan resin komposit berkaitan dengan ketahanan terhadap abrasi dan memiliki hubungan dengan kepadatan dan ukuran dari partikel *filler*. Kekerasan juga merupakan tolak ukur ketahanan resin komposit di dalam rongga mulut. Penurunan kekerasan permukaan dari resin komposit dapat mengakibatkan kerusakan dan pergantian restorasi.⁵ Selain itu, terdapat penyusutan yang membuat tekanan pada polimerisasi sekitar 13 MPa. Tekanan tersebut membuat adanya tekanan pada penghubung antara resin komposit dan gigi yang menyebabkan timbulnya celah kecil yang menyebabkan kebocoran tepi. Tekanan ini juga dapat melebihi kekuatan tensil dari email sehingga menyebabkan keretakan pada email.⁶

Dengan tantangan-tantangan tersebut, muncul upaya pengembangan resin komposit bioaktif dengan menambahkan bahan-bahan alami. Keanekaragaman hayati laut Indonesia sangat melimpah, terutama pada sektor perikanan. Namun, penggunaan bahan alami di ekosistem masih terbatas pada bagian-bagian tertentu saja, semen-

tara limbah sisanya kerap diabaikan dan berpotensi mencemarkan lingkungan.⁷

Beberapa bahkan memiliki begitu banyak manfaat karena kaya akan mineral terutama kalsium yang dapat diubah menjadi hidroksiapatit (HA) yang belakangan ini mendapat perhatian dalam penelitian bidang kedokteran gigi sebagai bahan dasar pengembangan biomaterial. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa mineral laut seperti kalsium karbonat, fosfat, dan silika dari organisme laut seperti koral, kerang, dan alga mikroskopik (diatom) berpotensi digunakan untuk meningkatkan remineralisasi email dan ketahanan restorasi gigi.^{8,9} Artikel ini mengkaji pengaruh penambahan mineral laut pada resin komposit terhadap proses remineralisasi dan ketahanan restorasi.

TINJAUAN PUSTAKA**Resin komposit**

Resin komposit adalah salah satu bahan restorasi yang sering digunakan dalam kedokteran gigi restoratif karena memiliki keunggulan estetika yang menyerupai warna gigi alami serta kekuatannya yang memadai, sehingga cocok digunakan pada restorasi untuk gigi anterior maupun posterior untuk mengembalikan fungsi gigi secara optimal. Bahan ini terdiri dari matriks polimer organik seperti bisphenol A-glycidyl methacrylate (BisGMA), urethane dimethacrylate (UDMA), atau triethylene glycol dimethacrylate (TEGDMA), yang dikombinasikan dengan partikel pengisi anorganik seperti silika, *quartz*, atau zirconia guna meningkatkan kekuatan mekanis dan ketahanan terhadap keausan.^{1,10,11}

Kekuatan resin komposit dibedakan atas a) kekuatan kompresi yang adalah ketahanan bahan terhadap perubahan bentuk dari tekanan yang diberikan pada bahan tersebut. Kekuatan bahan dapat menjadi alat untuk mengetahui teknik dan nilai kekerasan, juga bisa digunakan untuk membandingkan resin komposit yang berbeda. Kekuatan kompresi bisa menjadi indikator terbaik dari ketahanan resin komposit;^{12,13} kekuatan tiap resin komposit dipengaruhi oleh filler yang terkandung di dalamnya. Banyak sekali perhatian yang ditujukan un-

tuk kekuatan kompresi suatu restorasi karena bahan restorasi yang telah diaplikasikan dalam rongga mulut akan terus mengalami tekanan pengunyahan;^{14b}) kekuatan ikatan, yang dari resin komposit terhadap etsa dan bonding pada dentin dan email biasanya 20-30 MPa. Ikatan resin komposit pada dentin dan email merupakan hasil retensi mikromekanikal dari *bonding agent* terhadap etsa pada permukaan email dan dasar dentin. Pada dentin, lapisan hibrid dari resin bonding dan kolagen sering terbentuk, dan bonding dapat menembus tubulus dentin;^{6c}) kekerasan *knoop* atau kekerasan mekanis yang Kekerasan *knoop* merupakan resistensi suatu bahan terhadap indensitasi di bawah tekanan fungsional. Kekerasan *knoop* dari resin komposit (22-80 kg/mm²) lebih rendah dari email (343 kg/mm²) ataupun dental amalgam (110 kg/mm²). Kekerasan *knoop* resin komposit dengan *fine particles* sedikit lebih baik daripada resin komposit dengan *microfine particles* karena kekerasan dan pecahan volume dari partikel bahan pengisi.⁶

Penyusutan polimer menyebabkan kebocoran tepi yang dapat menyebabkan sensitivitas gigi, perubahan warna bahan, karies sekunder, dan ketidaknyamanan pada saat pasien mengunyah.¹⁵ Terdapat beberapa faktor yang menyebabkan penyusutan polimerisasi; pertama adalah komposisi resin. Matriks resin dengan monomer yang memiliki berat molekul lebih tinggi akan menghasilkan nilai penyusutan yang lebih rendah dibandingkan monomer yang memiliki berat molekul yang rendah. Selain itu, fungsi, struktur, dan massa molekul juga berpengaruh terhadap nilai penyusutan. Faktor kedua adalah sifat bahan. Tegangan pada resin komposit bergantung pada tiga sifat, yaitu kekuatan bahan, derajat konversi dari ikatan ganda ke ikatan tunggal, dan penyusutan volumetrik. Faktor ketiga adalah fraksi volume. Fraksi volume bahan pengisi berbanding terbalik dengan penyusutan volumetrik, dikarenakan semakin meningkatnya fraksi volume bahan pengisi, volume matriks resin akan semakin berkurang. Faktor selanjutnya adalah intensitas cahaya *curing*. Penyusutan polimerisasi akan semakin besar seiring dengan tingginya intensitas cahaya, yang disebabkan oleh tingkat konversi yang lebih besar. Faktor selanjutnya adalah konfigurasi; jika tinggi dapat menyebabkan terjadinya kerusakan berupa debonding. Salah satu efek dari penyusutan polimerisasi adalah *microleakage*.

Microleakage merupakan kelemahan dari bahan restorasi yang bersifat multifaktoral dan dapat menyebabkan karies sekunder atau iritasi pada pulpa. Secara umum, *microleakage* dapat disebabkan oleh beberapa faktor yaitu koefisien ekspansi termal, penyusutan saat polimerisasi, dan adesi.¹⁶ *Microleakage* dapat dikurangi dengan manipulasi yang tepat dan prosedur klinis yang teliti. Resin komposit, GIC, dan RM-GIC memiliki kebocoran yang rendah, jika dilekatkan dengan benar dan adanya pelepasan ion fluor.¹⁷

Warna dan penggabungan corak untuk kecocokan estetik klinis sangat diperlukan. Perubahan warna dan pengurangan kecocokan corak dengan struktur gigi sekitar merupakan alasan untuk mengganti restorasi. Perubahan warna dapat terjadi karena oksidasi dan hasil dari perubahan air dalam matriks polimer yang berinteraksi dengan bagian polimer yang tidak bereaksi dan aktivator-inisiatif yang tidak digunakan. Sifat lain yang dimiliki oleh resin komposit yaitu, stabilitas warna yang baik.⁶ Resin komposit yang baru diaplikasikan memiliki kesamaan warna yang baik dengan gigi sekitarnya. Namun *polishing* mengurangi kilap dan abrasi dapat lebih meningkatkan kekasaran permukaan yang menyebabkan permukaan menjadi bernoda karena pengendapan bahan makanan berwarna.¹⁴

Sitotoksitas resin komposit banyak dikaitkan dengan proses pelepasan monomer residu, hasil dari reaksi polimerisasi yang tidak

lengkap atau produk sampingan dari proses degradasi matriks resin.¹⁸ Monomer residu merupakan sisa monomer yang tidak terpolimerisasi sempurna. Monomer residu yang telah dilepaskan akan sulit untuk dapat bereaksi kembali.¹⁶ Komponen resin komposit yang terlepas atau terlarut akan berdampak pada jaringan lunak rongga mulut, bahkan pulpa melalui tubulus dentinalis.²⁰ Pelepasan komponen resin komposit serta monomer residu secara terus-menerus dapat menyebabkan sitotoksitas terhadap jaringan lunak rongga mulut.²¹ Monomer Bis-GMA dapat menyebabkan kematian sel karena bersifat liposoluble yang dapat melarutkan lapisan lipid pada membran sel sehingga dapat mengganggu permeabilitas sel, sedangkan monomer UDMA akan menginduksi apoptosis sel melalui aktivasi glutathione dan metabolite radikal.²²

Mineral laut

Beberapa bahan laut digadag-gadag dapat menjadi solusi dan alternatif bahan remineralisasi seperti kerang laut dan mutiara yang memiliki komponen utama berupa kalsium karbonat (sekitar 95%), selain fosfor, mangan, seng, besi, kalium, magnesium, dan mineral lainnya. Pentingnya serbuk ini sebagai sumber alami dan kalsium, terbukti memiliki fungsi bakteriostatik.²³ Selain itu, tulang ikan *Channa striata* yang menjadi salah satu jenis ikan yang meningkatkan produksi limbah di Indonesia dapat menjadi sumber mineral yang berharga terutama fosfor, kalsium, kolagen, dan asam amino.²⁴

Tulang ikan cakalang sendiri juga dikatakan memiliki beberapa kandungan seperti kalsium tinggi yang dapat menghasilkan HA sekitar 60-70%. Selain itu tulang cakalang juga mengandung kolagen yang jika dikombinasi dengan kalsium membuatnya berpotensi sebagai biomaterial.²⁵ Adapun cangkang kerang simping dikatakan mengandung kalsium 17,23% dan fosfat 0,79%, serta 96,15% kalsium oksida yang baik untuk sintesis biokeramik.²⁶

Hidroksiapatit merupakan komponen utama jaringan keras gigi dan tulang, dan telah digunakan secara luas dalam scaffold untuk regenerasi tulang alveolar, terutama dalam prosedur pascaekstraksi dan pemasangan implan.^{8,9} Scaffold yang dikombinasikan dengan gelatin dan kitosan dari laut juga menunjukkan sifat mekanik dan porositas yang sesuai untuk mendukung regenerasi jaringan keras di rongga mulut.²⁶ Selain itu, kerang dan cangkang tiram kaya akan kalsium karbonat juga telah dimanfaatkan sebagai filler dalam resin komposit. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan serbuk cangkang tiram ke dalam resin komposit meningkatkan kekuatan lentur, kekuatan tarik diametral, serta modulus elastisitas mendekati atau melampaui batas minimal standar ISO dan ADA untuk bahan tambal gigi.²⁷

Diatomite, yaitu struktur silika mikroskopik dari alga laut bersel satu, juga digunakan sebagai filler pada resin komposit. Sifat porositasnya yang tinggi memungkinkan terjadinya penguatan struktur resin dan memberikan bioaktivitas tambahan. Diatomite dapat memperkuat ikatan antar partikel komposit dan meningkatkan ketahanan aus serta pelepasan ion silika yang berperan dalam regenerasi dentin.²⁸ Sementara itu, tulang ikan laut, seperti dari ikan cakalang dan tuna, mengandung kalsium dan fosfat dalam bentuk alami. Bahan ini telah dimanfaatkan dalam formulasi pasta gigi eksperimental yang menunjukkan efek remineralisasi dan antibakteri terhadap *Streptococcus mutans*, bakteri utama penyebab karies.²⁹

Tren terbaru juga menunjukkan penggunaan nanopartikel mineral laut, seperti nanopartikel kalsium fosfat (NACP) dan nanohidroksiapatit (nHA), dalam bahan tambal gigi. Partikel ini tidak hanya memberikan kekuatan mekanik, tetapi juga mampu melepaskan ion Ca²⁺ dan PO₄³⁻ secara bertahap, meningkatkan remineralisasi pada batas

restorasi dan memperpanjang ketahanan terhadap asam dan abrasi.^{30,31} Beberapa riset malah menambahkan unsur stronsium dan seng ke dalam struktur mineral laut untuk meningkatkan efek antibakteri.³²

Secara keseluruhan, pemanfaatan mineral laut sebagai aditif dalam resin komposit atau bahan perawatan gigi lainnya memberikan keuntungan besar dari sisi biokompatibilitas, efisiensi remineralisasi, dan ketahanan struktur. Namun, meskipun hasil laboratorium sangat menjanjikan, penelitian klinis jangka panjang pada manusia masih sangat dibutuhkan sebelum dapat diadopsi secara luas dalam praktik kedokteran gigi.³³

METODE

Sumber penulisan berasal dari jurnal penelitian *online* internasional dan nasional yang berkaitan dengan topik pengaruh penambahan mineral laut pada resin komposit terhadap proses remineralisasi dan ketahanan restorasi dengan kata kunci resin komposit, mineral laut, remineralisasi, ketahanan restorasi, bioaktif, dan ketahanan restorasi. Pencarian artikel dilakukan dengan menggunakan situs PubMed, Google Scholar, dan Science Direct. Artikel penelitian yang dipilih adalah artikel yang telah dipublikasi dalam rentang waktu 2020-2025 agar informasi yang didapatkan tetap mutakhir.

HASIL

Setelah pencarian artikel pada PubMed, Google Scholar, dan Science Direct dengan *keyword*, diperoleh 7 artikel yang dianalisis dan dibahas. Berdasarkan beberapa pustaka terkait topik pembahasan, penjelasan dari setiap pustaka dituang ke dalam tabel 1.

PEMBAHASAN

Tabel 1 dalam penelitian ini memuat ringkasan dari tujuh artikel yang membahas pemanfaatan mineral laut yang berpotensi sebagai bahan tambahan dalam resin komposit dan bahan restorasi gigi lainnya. Dari artikel-artikel tersebut, diperoleh data mengenai penggunaan mineral seperti hidroksiapatit dari tulang ikan, kalsium karbonat dari kerang laut, *bioactive glass*, hingga *nano-seashell* dan *nano-pearl*, yang secara umum menunjukkan efek positif terhadap proses remineralisasi email maupun dentin, peningkatan kekuatan mekanik resin komposit, serta potensi bioaktivitas antibakteri. Tabel ini menyajikan

informasi mengenai nama peneliti, tahun publikasi, judul penelitian, dan simpulan dari masing-masing studi, memberikan gambaran komprehensif mengenai kemajuan dan tren penelitian terkini dalam pemanfaatan mineral laut untuk meningkatkan kualitas bahan restorasi gigi.

Penelitian oleh Syam, et al menggunakan jenis mineral laut hidroksiapatit dari tulang ikan cakalang (*Katsuwonus pelamis*) yang pada proses kalsinasi pada suhu tertentu selama 5 jam menghasilkan struktur kristalin yang menunjukkan dominasi *Whitlockite*. Hal ini mengindikasikan bahwa tulang ikan cakalang kaya akan kalsium fosfat yang berperan penting dalam kekuatan mekanik bahan. Kehadiran hidroksiapatit dan fluorapatit menambah sifat mekanik dan resistensi terhadap degradasi, terutama dengan adanya fluor yang dikenal memperkuat struktur kristalin.¹⁸

Selain itu, penelitian oleh Amalina, et al tentang jenis mineral laut hidroksiapatit dari kerang-simping (*Amusium pleuronectes*) untuk menguji efek remineralisasi gel HA terhadap email gigi yang mengalami demineralisasi menemukan bahwa gel HA 20% meningkatkan kekerasan email secara signifikan dibanding kontrol. Bahan hidroksiapatit dari limbah cangkang kerang-simping berpotensi digunakan sebagai bahan remineralisasi gigi alami.²⁵

Penelitian oleh Alpin, et al dengan menggunakan jenis mineral laut nano CaCO_3 dari kerang laut (*Codakia orbicularis*) yang dilakukan untuk mengkaji penguatan resin PMMA dengan bubuk kerang terhadap sifat mekanik dan estetika dan memberikan hasil bahwa penambahan 6% di bawah 50 μm nanokerang meningkatkan kekerasan dan estetika PMMA tanpa meningkatkan kerapuhan relevan untuk meningkatkan ketahanan restorasi. Hal ini sejalan pula dengan penelitian oleh Eliwa, et al yang menggunakan nano-hydroxyapatite (nHA), *nano-shell* (kerang laut) dan *nano-pearl* (mutiara laut), mengatakan bahwa semua bahan meningkatkan *microhardness* email. Pasta fluoride memiliki peningkatan tertinggi, namun *nano-pearl* dan *nano-seashell* memberikan hasil remineralisasi yang sebanding.

Eliwa, et al memaparkan bahwa pasta nano-kerang, nano-mutiara, nano-hidroksiapatit, dan pasta gigi berbasis fluoride memiliki potensi remineralisasi yang tinggi. Penggunaan klinis partikel nano-kerang dan nano-mutiara merupakan metode baru yang non-invasif defektif untuk remineralisasi *non-cavitated initial enamel lesion*.²³

Tabel 1 Sintesis pengaruh penambahan mineral laut pada resin komposit terhadap proses remineralisasi dan ketahanan restorasi.

Penulis, tahun	Judul	Kesimpulan
Syam S, et al, 2025	Karakterisasi hidroksiapatit tulang ikan cakalang (<i>Katsuwonus pelamis</i>) kalsinasi 5 jam dengan analisis xrd (<i>x-ray diffraction</i>)	Tulang ikan cakalang berpotensi besar sebagai sumber biomineral, terutama untuk teknologi medis dan bahan. Analisis XRD pada tulang ikan cakalang mendapatkan tiga fase kristalin utama yaitu whitlockite hidroksiapatit, dan fluorapatit, yang didominasi oleh whitlockite.
Rizki A, et al, 2021	Pembuatan gel HA cangkang kerang-simping (<i>Amusium pleuronectes</i>) dan pengaruhnya setelah aplikasi di lesi white-spot email gigi	Bahan hidroksiapatit dari limbah cangkang kerang-simping berpotensi digunakan sebagai bahan remineralisasi gigi alami.
Alpin M, et al, 2023	Potensi manfaat kerang laut sebagai bahan tambahan biokomposit	Potensi manfaat kerang laut sebagai bahan tambahan biokomposit.
Syam S, et al, 2024	Kandungan tulang ikan cakalang sebagai Sumber kalsium untuk remineralisasi gigi.	Tulang ikan cakalang dapat dijadikan sebagai sumber kalsium untuk remineralisasi gigi. Namun masih perlu pengujian lebih lanjut untuk kadar hidroksil, karbonat, dan fosfat.
Eliwa MEED, et al, 2022	<i>A comparative evaluation of remineralization potential of nano-seashell, nano-pearl, and nano-hydroxyapatite pastes versus fluoride-based toothpaste on non-cavitated initial enamel lesion: an in vitro study</i>	Pasta nano-kerang, nano-mutiara, nano-hidroksiapatit, dan pasta gigi berbasis fluoride memiliki potensi remineralisasi yang tinggi. Penggunaan klinis partikel nano-kerang dan nano-mutiara merupakan metode baru yang non-invasif dan efektif untuk remineralisasi <i>non-cavitated initial enamel lesions</i> .
Bin-Jardan LI, et al, 2023	<i>Inorganic compounds as remineralizing fillers in dental restorative materials: narrative review</i>	Bahan restoratif berbasis resin yang mengandung filler remineralisasi seperti NACP, CaF_2 , BAG, HA, FA, dan BN digunakan untuk mencegah karies sekunder. Penggunaannya membantu menetralkan asam, remineralisasi struktur gigi, dan menghambat pembentukan biofilm. Kombinasi dengan senyawa antibakteri meningkatkan efektivitasnya, menjadikannya pilihan potensial untuk restorasi gigi yang lebih tahan lama dan bersifat bioaktif.
Mai S, et al, 2022	<i>Recent advances in direct adhesive restoration resin-based dental materials with remineralizing agents</i>	Berbagai agen remineralisasi seperti HA, ACP, BAG, dan CaF_2 mampu memperbaiki kekuatan ikatan resin dan mencegah karies sekunder. Namun, tantangan seperti stabilitas mekanis dan efisiensi jangka panjang masih perlu diatasi untuk aplikasi klinis.

Disimpulkan bahwa mineral laut sebagai bahan tambahan dalam resin komposit berpotensi besar meningkatkan remineralisasi gigi dan ketahanan mekanik restorasi. Berbagai bentuk mineral laut seperti hidroksiapatit, kalsium karbonat, *bioactive glass*, dan *diatomite* terbukti memperkuat struktur bahan restorasi, meningkatkan pelepasan

ion bioaktif, serta memberikan efek antibakteri.

Meskipun hasil *in vitro* dan *eks vivo* sangat menjanjikan, penerapan klinis masih memerlukan validasi melalui studi jangka panjang pada manusia untuk memastikan keamanan, efektivitas, dan kestabilan bahan restorasi berbasis mineral laut secara menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

- Ridhani MI, Erita I, Elsa Y. Pelepasan ion kalsium pada resin komposit bioaktif setelah direndam minuman probiotik dan sari buah jeruk. *Dentin J Kedokt Gigi* 2021;5(1):21–2.
- Rovi F, Sofiani E. Pengaruh lama penyinaran dan ketebalan resin komposit *bulk fill* terhadap kebocoran mikro. *Insisiva Dent J* 2020;9(2):73
- Fibryanto E. Bahan adhesive restorasi resin komposit. *J Kedokt Gigi Terpadu* 2020;2(1):8
- Garg N. *Textbook of operative dentistry*. Garg N, Garg A, editors. New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers; 2010.
- Anusavice KJ, Shen C, Rawls HR. *Philips science of dental materials*. 12th ed. St. Louis: Saunders; 2013.
- Powers JM, Sakaguchi RL. *Craig's restorative dental materials*. 12th ed. St. Louis: Elsevier; 2006. p.189–212.
- Syam S, Mattulada IK, Asmah N, Lauddin T, Yasmin Y. Karakterisasi hidroksiapatit tulang ikan cakalang (*Katsuwonus pelamis*) kalsinasi 5 jam dengan analisis XRD (x-ray diffraction). *e-GiGi*. 2025;13(2): 377.
- Nurmala S, Hikmawati D, Apsari R. Development of hydroxyapatite from corals obtained from contamination waters of northern Java by precipitation method. *Ecol Environ Conserv*. 2020;26(3):1300–4.
- Yuliaty A, Merlindika Y, Munadzirah E, Ari A, El Fadhlallah MP, Rianti D, et al. Mechanical strength and porosity of carbonate apatite-chitosan-gelatin scaffold in various ratio as a biomaterial candidate in tissue engineering. *Key Eng Mater*. 2020;829:173–81.
- Dobrzyński W, Piszko PJ, Kiryk J, Kiryk S, Michalak M, Kotela A, et al. Dental resin composites modified with chitosan: A systematic review. *Mar Drugs*. 2025;23(2).
- Dantagnan C-A, Babajko S, Nassif A, Houari S, Jedeon K, François P, et al. Analysis of resin-based dental materials' composition depending on their clinical applications. *Polymers (Basel)*. 2024;16(1–2).
- Kidd EAM, Smith BGN, Watson TF. *Pickard's manual of operative dentistry*. 9th ed. London: Oxford University Press; 2011.
- Van E, Mine A, Merbeek V. *Bonding of low-shrinking composites in high C-factor cavities*; 2012.
- McCabe JF, Walls AWG. *Applied dental materials*. 9th ed. Oxford: Blackwell Munksgaard; 2008.
- Hatrick CD, Eakle WS, Bird WF. *Dental materials: Clinical applications for dental assistants and dental hygienists*. 2nd ed. Missouri: Saunders Elsevier; 2011. p.203.
- Devara AR, Lunardi CG, Yuanita T. Perbedaan kebocoran tepi antara GIC konvensional dan resin modified GIC pada restorasi kelas V. *Conserv Dent J*. 2016;6(2):77–81.
- World Health Organization. *Future use of materials for dental restoration: Report of the meeting convened at WHO HQ, Geneva*: WHO; 2010. p.65.
- Salehi S, Gwinner F, Mitchel JC, Pfeifer C, Ferracane JL. Cytotoxicity of resin composites containing bioactive glass fillers. *Dent Mater* 2014;31(2):1-9
- Kamalak H, Kamalak A, Taghizadehghalehjoughi A, Hacimu' A, Nalci K. Cytotoxic and biological effects of bulk fill composites on rat cortical neuron cells. *Springer*. 2024;1–12.
- Harahap KI, Agusnas H, Sastrodihardjo S. Perbedaan penyerapan air ke dalam resin komposit mikrohibrid dan nanohibrid setelah direndam di dalam saliva buatan. *Dentika Dent J*. 2013;17(4):319–23.
- Al-Shekhli AAR, Aubi IA. Solubility of nanofilled versus conventional composites. *Pak Oral Dent J*. 2014;34(1):118–21.
- Murdiyanto D, Andrian DS. Evaluasi sitotoksitas serat daun nanas (*Ananas comosus* (L.) Merr) dan polyethylene sebagai fiber reinforced composite. *B Dent*. 2019;6(2):126–31.
- Eliwa MEED, Aidaros N, Kamh R. A comparative evaluation of remineralization potential of nano-seashell, nano-pearl, and nano-hydroxyapatite pastes versus fluoride-based toothpaste on non-cavitated initial enamel lesion: an *in vitro* study. *Egypt Dent J* 2022; 68: 1037.
- Dewi N, Rahmah RA, Wardhana AS, Puspitasari D, Wasiaturrehman Y, GustonoD. Remineralizing potential of natural hydroxy apatite from snakehead (*Channa striata*) fish bone on remineralization of primary teeth enamel : an *in vitro* study. *Eur J Gen Dent* 2025; 14:12.
- Amalina R, Monica D, Feranisa A, Syafaat Fy, Sari M, Yusuf Y. Pembuatan gel hidroksiapatit cangkang kerang-simping (*Amusium Pleuronectes*) dan pengaruhnya setelah aplikasi di lesi white-spot email gigi. *Cakradonya Dent J*. 2021; 13(2): 82.
- Sari TP. Scaffold berbasis kalsium karbonat laut: Karakteristik fisik dan bioaktivitas. *J Biomater Indones*. 2023;12(2):98–105.
- Tavares JAA. Oyster shell powder as filler in dental resin composites: Mechanical and physical properties. *J Mater Res Technol*. 2021;10:1727–35.
- Zhang M, Wang Y. Mechanical properties of dental resin composites by co-filling diatomite and nanosized silica particles. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2020;103:103544.
- Simatupang GM. Kandungan tulang ikan cakalang (*Katsuwonus pelamis*) sebagai sumber kalsium untuk remineralisasi gigi. *J Biol Tropis* 2022;22:44-9
- Xu HHK, Moreau JL. Nanocomposite containing amorphous calcium phosphate nanoparticles for caries inhibition. *Dent Mater* 2012;28(8):749–60.
- Sui T. Effect of Sr-doped nano-hydroxyapatite in resin composites on remineralization and mechanical strength. *Mater (Basel)* 2023;16(4):1121.
- Wang H. Calcium phosphate and strontium/zinc modified bioactive resins in caries prevention. *Dent Mater* 2024;40(1):103-12.
- Ryu JH. Clinical potential and limitations of bioactive restorative materials. *J Korean Dent Assoc*. 2023;61(3):134–41