
BULK METALLIC GLASS: KARAKTERISTIK MATERIAL DAN POTENSINYA SEBAGAI BIOMATERIAL: LITERATUR REVIEW

Oleh

Steffiola Hiandy¹, Elin Karlina², Gema Gempita³

^{1,2,3}Program Studi Sarjana Kedokteran Gigi, Fakultas Kedokteran Gigi, Universitas Padjadjaran, Indonesia

E-mail: 1steffiola22001@mail.unpad.ac.id

Article History:

Received: 05-03-2026

Revised: 13-03-2026

Accepted: 08-04-2026

Keywords:

Bulk Metallic Glass,
Biomaterial, Amorphous
Alloy, Sifat Bio-Mekanik

Abstract: Bulk Metallic Glass (BMG) merupakan material logam inovatif dengan struktur atom amorf tanpa batas butir dan dislokasi kristal. Struktur ini memberikan kombinasi sifat mekanik unggul, seperti kekuatan luluh tinggi, batas regangan elastis, ketahanan fraktur yang baik, serta resistensi korosi melalui pembentukan lapisan oksida pasif yang stabil dalam lingkungan fisiologis. Literatur review ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik material BMG serta potensinya sebagai biomaterial, khususnya dalam bidang kedokteran gigi. Metode penelitian dilakukan melalui studi literatur terhadap jurnal ilmiah yang dipublikasikan pada rentang tahun 2015–2026 yang diperoleh melalui Google Scholar. Hasil kajian menunjukkan bahwa BMG memiliki biokompatibilitas yang baik, ditandai dengan kemampuan adhesi dan proliferasi sel, rendahnya pelepasan ion logam, serta respon inflamasi yang minimal dibandingkan logam konvensional. Beberapa jenis BMG berbasis Zr, Ti, Mg, dan Fe juga memiliki modulus elastisitas yang lebih mendekati tulang. Meskipun sebagian besar penelitian masih berada pada tahap preklinis, BMG menunjukkan prospek yang signifikan sebagai biomaterial modern di masa depan.

PENDAHULUAN

Biomaterial merupakan substansi yang digunakan untuk meningkatkan kualitas hidup individu melalui penggantian atau perbaikan jaringan, organ, maupun fungsi tubuh yang mengalami kerusakan. Bahan ini dapat berasal dari sumber alami maupun sintetis.¹ Pada masa awal perkembangan biomaterial, manusia telah melakukan berbagai percobaan menggunakan bahan alami seperti cangkang hewan laut sebagai pengganti gigi, kawat emas untuk stabilisasi gigi, serta kayu, tulang, dan gading sebagai substitusi jaringan keras. Namun, keterbatasan ilmu pengetahuan pada masa tersebut menyebabkan berbagai permasalahan, seperti reaksi penolakan tubuh, infeksi, dan korosi material.

¹ Elia Marin, "History of Dental Biomaterials: Biocompatibility, Durability and Still Open Challenges," *Heritage Science* 11, no. 1 (2023): 207, <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01046-8>.

Seiring perkembangan ilmu pengetahuan, konsep biomaterial mulai dikaji secara ilmiah dan sistematis. Menurut Jonathan Cohen, suatu bahan dapat dikategorikan sebagai biomaterial berdasarkan pengalaman klinis melalui proses *trial and error*, yang kemudian diklasifikasikan ke dalam empat kelompok utama, yaitu logam, tulang dan *graft*, plastik, serta keramik dan komposit.² Dalam bidang kedokteran gigi, biomaterial memiliki peran yang sangat luas, meliputi bahan restorasi (amalgam, resin komposit, glass ionomer cement), implan dental (titanium alloy dan zirconia), prostodontik, ortodontik, hingga regenerasi jaringan dan perawatan endodontik. Penggunaan biomaterial ini bertujuan untuk mengembalikan fungsi, estetika, serta integritas biologis rongga mulut.

Material berbasis logam merupakan salah satu biomaterial yang paling banyak digunakan dalam kedokteran gigi karena memiliki kekuatan mekanis tinggi, ketahanan aus yang baik, serta kemampuan menahan beban mastikasi.³ Namun demikian, logam konvensional masih memiliki keterbatasan, terutama terkait biokompatibilitas, seperti potensi korosi, pelepasan ion logam, serta ketidaksesuaian modulus elastisitas dengan jaringan tulang. Kondisi ini mendorong pengembangan material logam baru yang memiliki sifat mekanik unggul sekaligus biokompatibilitas yang lebih baik, salah satunya adalah *Bulk Metallic Glass* (BMG).

Metallic glass pertama kali dikembangkan pada tahun 1960 dalam bentuk pita tipis (<100 μm) yang dihasilkan melalui proses pendinginan sangat cepat untuk mencegah kristalisasi.⁴ Perkembangan selanjutnya pada tahun 1970 menunjukkan bahwa paduan dengan lebih dari dua unsur memungkinkan pembentukan struktur amorf dengan laju pendinginan yang lebih rendah, sehingga menghasilkan *bulk metallic glass* (BMG), yaitu material dengan dimensi minimal lebih dari 1 mm.⁵ Pada awalnya, pengembangan BMG terbatas pada logam mulia seperti Pd, Pt, dan Au. Namun, terobosan penting terjadi pada tahun 1990-an dengan ditemukannya Vitreloy 1 berbasis Zr, yang dapat diproduksi dalam ukuran besar dan memiliki kemampuan pembentukan glass yang sangat baik.

Bulk Metallic Glass (BMG) memiliki struktur amorf tanpa susunan kristalin, sehingga tidak mengandung cacat mikrostruktur seperti batas butir dan dislokasi kristal yang umum ditemukan pada logam konvensional. Struktur unik ini memberikan sifat mekanik yang unggul serta ketahanan korosi yang tinggi, menjadikannya kandidat potensial sebagai biomaterial modern.

Berdasarkan latar belakang tersebut, literatur *review* ini bertujuan untuk membahas perkembangan material Bulk Metallic Glass sebagai biomaterial dalam bidang kedokteran gigi serta mengevaluasi potensinya di masa depan guna mendukung pengembangan penelitian lanjutan dan aplikasi klinis yang lebih efektif.

LANDASAN TEORI

a. Teori Biomaterial

² Jonathan Cohen, "Biomaterials in Orthopedic Surgery," *The American Journal of Surgery* 114, no. 1 (1967): 31–41, [https://doi.org/10.1016/0002-9610\(67\)90037-2](https://doi.org/10.1016/0002-9610(67)90037-2).

³ S. Tharani Kumar et al., "Review of Metallic Biomaterials in Dental Applications," *Journal of Pharmacy And Bioallied Sciences* 12, no. 5 (2020): 14, https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_88_20.

⁴ W. Klement et al., "Non-Crystalline Structure in Solidified Gold–Silicon Alloys," *Nature* 187, no. 4740 (1960): 869–70, <https://doi.org/10.1038/187869b0>.

⁵ H. S. Chen, "Thermodynamic Considerations on the Formation and Stability of Metallic Glasses," *Acta Metallurgica* 22, no. 12 (1974): 1505–11, [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(74\)90112-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(74)90112-6).

Menurut Elia Marin, Biomaterial merupakan material yang digunakan untuk menggantikan, memperbaiki, atau meningkatkan fungsi jaringan dan organ tubuh yang mengalami kerusakan. Biomaterial dapat berasal dari bahan alami maupun sintesis dan harus memenuhi kriteria seperti biokompatibilitas, stabilitas kimia, serta kemampuan berinteraksi dengan jaringan biologis tanpa menimbulkan efek toksik. Dalam bidang kedokteran gigi, biomaterial digunakan untuk berbagai aplikasi seperti restorasi gigi, implan dental, serta regenerasi jaringan.⁶

b. Teori Biomaterial Logam dalam Kedokteran Gigi

Özcan dan Hämmerle menyatakan bahwa material logam adalah salah satu biomaterial yang paling banyak digunakan dalam kedokteran gigi karena memiliki kekuatan mekanis tinggi, ketahanan terhadap beban mastikasi, serta daya tahan yang baik terhadap deformasi. Logam yang umum digunakan antara lain titanium dan *stainless steel*. Namun demikian, logam konvensional memiliki keterbatasan, seperti potensi korosi, pelepasan ion logam, serta ketidaksesuaian modulus elastisitas dengan jaringan tulang yang dapat menyebabkan fenomena *stress shielding*.⁷

c. Teori Bulk Metallic Glass (BMG)

Kruzic menjelaskan bahwasanya *Bulk Metallic Glass* (BMG) merupakan material logam dengan struktur atom amorf yang tidak memiliki susunan kristalin seperti logam konvensional. Struktur ini diperoleh melalui proses pendinginan cepat (*rapid quenching*) yang mencegah terjadinya kristalisasi atom, sehingga menghasilkan material tanpa batas butir dan dislokasi kristal. Kondisi ini memberikan sifat mekanik yang unggul serta ketahanan korosi yang tinggi. Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa BMG dapat diproduksi dalam bentuk bulk dengan kemampuan pembentukan kaca (*glass forming ability*) yang baik melalui sistem multikomponen berbasis Zr, Ti, Mg, dan Fe.⁸

d. Teori Biokompatibilitas dan Sifat Mekanis Biomaterial

Trexler dan Thadhani memandang bahwa biokompatibilitas merupakan kemampuan suatu material untuk berinteraksi dengan jaringan biologis tanpa menimbulkan respon negatif seperti inflamasi atau toksisitas. Selain itu, sifat mekanis seperti kekuatan luluh, ketahanan fraktur, serta modulus elastisitas menjadi faktor penting dalam menentukan keberhasilan biomaterial, khususnya pada aplikasi implan dental. Material dengan modulus elastisitas yang mendekati tulang dapat mengurangi risiko *stress shielding* dan meningkatkan stabilitas implan. Dalam hal ini, BMG menunjukkan potensi yang baik karena memiliki kombinasi sifat mekanik unggul serta respon biologis yang minimal.⁹

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode literature review untuk menganalisis perkembangan dan potensi *Bulk Metallic Glass* (BMG) sebagai biomaterial dalam bidang kedokteran gigi. Sumber data diperoleh dari database elektronik Google Scholar. Pencarian

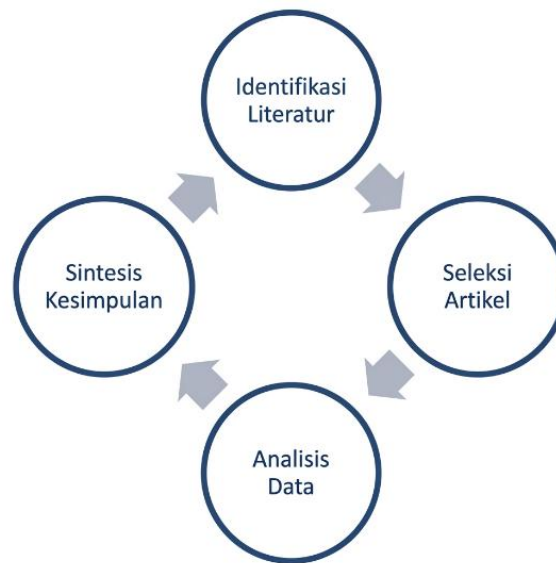
⁶ Marin, "History of Dental Biomaterials."

⁷ Mutlu Özcan and Christoph Hämmerle, "Titanium as a Reconstruction and Implant Material in Dentistry: Advantages and Pitfalls," *Materials* 5, no. 9 (2012): 1528–45, <https://doi.org/10.3390/ma5091528>.

⁸ Jamie J. Kruzic, "Bulk Metallic Glasses as Structural Materials: A Review," *Advanced Engineering Materials* 18, no. 8 (2016): 1308–31, <https://doi.org/10.1002/adem.201600066>.

⁹ Morgana Martin Trexler and Naresh N. Thadhani, "Mechanical Properties of Bulk Metallic Glasses," *Progress in Materials Science* 55, no. 8 (2010): 759–839, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.04.002>.

literatur dilakukan menggunakan kata kunci “*bulk metallic glass*”, “*biomaterial*”, dan “*dentistry*” dengan rentang tahun publikasi 2015–2026. Artikel yang dipilih diseleksi berdasarkan relevansi terhadap topik penelitian, khususnya yang membahas karakteristik material, sifat mekanis, ketahanan korosi, dan biokompatibilitas BMG. Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara kualitatif untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai potensi BMG sebagai biomaterial dalam aplikasi kedokteran gigi.



Gambar 1. Kerangka Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bulk Metallic Glass

Biomaterial logam telah lama menjadi standar dalam penggunaan secara klinis baik untuk kedokteran umum atau gigi. *Bulk metallic glass* (BMG) merupakan salah satu logam biomaterial yang menarik perhatian para peneliti karena keunikannya berupa logam paduan dengan struktur atom yang amorf.¹⁰ BMG diproses dengan metode pendinginan cepat (*rapid quenching*) pada logam cair (10^6 K/s) untuk mencegah terjadinya nukleasi dan kristalisasi atom sehingga dapat diperoleh struktur kristal tak berbentuk (amorf). Kondisi ini terjadi saat tahapan *glassy state*. Seiring perkembangan teknologi, pembentukan BMG dapat diproses dalam ukuran besar (bulk) dengan *critical cooling rate* yang relatif rendah (<100 K/s). Evolusi *metallic glass* generasi awal hanya dapat dibuat dalam bentuk pita tipis. Proses pendinginan *rapid quenching* (10^2 – 10^6 K/s) mencegah atom-atom logam tersusun secara teratur membentuk kisi kristal, sehingga terbentuk struktur amorf homogen tunggal tanpa batas butir atau fasa terpisah antara matriks dan *filler*.

Struktur kristal BMG yang tidak beraturan karena tidak ada fasa matriks kristalin yang mengikat partikel logam lain seperti pada material komposit, membuat material ini tidak memiliki cacat batas butir (*grain boundaries*) dan dislokasi kristal sehingga distribusi

¹⁰ Z. Li et al., “Forming of Metallic Glasses: Mechanisms and Processes,” *Materials Today Advances* 7 (September 2020): 100077, <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100077>; H. F. Li and Y. F. Zheng, “Recent Advances in Bulk Metallic Glasses for Biomedical Applications,” *Acta Biomaterialia* 36 (May 2016): 1–20, <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.03.047>.

deformasinya merata dan kuat serta dapat lebih presisi dalam pembentukannya.¹¹ Keunggulan lainnya, BMG merupakan logam yang dapat dibuat dan dimodifikasi multikomponen sehingga dapat digunakan untuk berbagai fungsi. Berbagai sistem BMG multikomponen telah dikembangkan seperti berbasis Mg, Ca, logam lantanida (Ln), Ti, Zr, Hf, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, dan Au. Semua pengembangan BMG tersebut telah diproduksi melalui berbagai proses solidifikasi. Terdapat jenis BMG dengan komposisi multikomponen yang memiliki excellent glass forming ability (GFA), tetapi hanya khususnya pada BMG berbasis Zr, Mg, La, Pd, Ti, dan Fe. Kemampuan GFA yang tinggi ini memungkinkan pembentukan bulk metallic glass dengan critical cooling rate yang jauh lebih rendah (<100 K/s), sehingga struktur amorf dapat dipertahankan dalam ukuran yang lebih besar.

Sifat material BMG (mekanis dan biologis)

Di bidang kedokteran gigi, pertimbangan dalam memilih material implan dental membutuhkan kriteria sifat mekanis spesifik seperti kekuatan tarik (*tensile strength*), kekuatan tekan (*compressive strength*), kekuatan geser (*shear strength*), kekuatan luluh (*yield strength*), kekuatan lelah (*fatigue strength*), keuletan (*ductility*), kekerasan (*hardness*), ketangguhan (*toughness*), dan modulus elastisitasnya (*young's modulus*). Implan dengan kekuatan tarik dan tekan yang tinggi dapat mencegah fraktur dan meningkatkan stabilitas fungsional.¹² Material yang memiliki kekuatan luluh dan lelah yang baik membuat implan tahan terhadap fraktur akibat sifat brittleness ketika mendapat beban kunyah. Duktilitas merupakan kemampuan sebuah logam untuk sedikit mengalami deformasi sedikit ketika mendapat suatu beban stres tanpa terjadinya kegagalan material, dan pada umumnya implan memiliki tingkat duktilitas sekitar 8-15%. Implan dental juga harus tahan terhadap keausan, oleh karena itu diperlukan kekerasan dan ketangguhan tertentu. Salah satu sifat yang paling dipertimbangkan dalam pemilihan sifat material implan ialah modulus elastisitas. Material implan idealnya memiliki modulus elastisitas yang mendekati tulang (18 Gpa) untuk memastikan persebaran tekanan yang merata dan meminimalkan pergerakan relatif pada permukaan tulang-implan.¹³ Sifat-sifat ini diperlukan agar implan tidak mudah mengalami kegagalan dan tidak adanya resorpsi tulang akibat perbedaan modulus elastisitas implan dan tulang.

BMG memiliki ketahanan fraktur yang meningkat 4 hingga 6 kali lebih kuat pada kondisi dinamis, serta ketahanan korosi yang tinggi karena pembentukan lapisan pasif oksida multipel (ZrO_2 , TiO_2 , Al_2O_3), membuatnya sangat stabil secara kimia dan tahan terhadap lingkungan agresif dalam tubuh. BMG memiliki kekuatan luluh yang sangat tinggi, berkisar antara 1–5 GPa, serta batas regangan elastis hingga sekitar 2%. Kombinasi kekuatan tinggi dan batas regangan elastis yang besar ini memungkinkan BMG menyimpan energi elastik dalam jumlah signifikan sebelum mengalami deformasi plastis.¹⁴ Tidak seperti keramik, berbagai komposisi BMG menunjukkan kekuatan patah sedang hingga tinggi (>20 MPa \sqrt{m}) serta memiliki kemampuan deformasi lentur yang baik. BMG juga terbukti memiliki aktivitas proliferasi sel yang lebih tinggi, yang menghasilkan pertumbuhan sel lebih cepat

¹¹ Li et al., "Forming of Metallic Glasses."

¹² Monika Saini, "Implant Biomaterials: A Comprehensive Review," *World Journal of Clinical Cases* 3, no. 1 (2015): 52, <https://doi.org/10.12998/wjcc.v3.i1.52>.

¹³ Saini, "Implant Biomaterials."

¹⁴ Kruzic, "Bulk Metallic Glasses as Structural Materials."

pada permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa BMG mempunyai biokompatibilitas yang baik.¹⁵ Modulus elastisitas BMG yang lebih mendekati tulang, BMG (± 18 Gpa) berpotensi mengurangi terjadinya *stress shielding* (Tabel 1). Kondisi ini secara langsung menurunkan risiko pelonggaran implan (*implant loosening*) yang sering menjadi komplikasi pada penggunaan titanium.¹⁶

Tabel. 1 Modulus Elastisitas BMG

Peneliti & Tahun	BMG	Modulus Elastisitas
(Yokoyama <i>et al.</i> , 2009)	Hypoeutectic Zr ₆₀ Cu ₃₀ Al ₁₀ BMG	80 GPa
(Ida <i>et al.</i> , 2018)	Zr ₇₀ Ni ₁₆ Cu ₆ Al ₈	70 GPa
(Yokoyama <i>et al.</i> , 2009)	Zr ₅₅ Cu ₃₀ Al ₇ Nb ₅ Pd ₃	73 GPa
(Huang <i>et al.</i> , 2012)	Zr ₆₀ Al ₁₅ Co _{2.5} Ni _{7.5} Cu ₁₅	85–95 GPa
(Liens <i>et al.</i> , 2018)	Ti ₄₀ Zr ₁₀ Cu ₃₆ Pd ₁₄	96 GPa
(Wang <i>et al.</i> , 2025)	Zr ₆₁ Cu ₂₃ Al ₁₂ Ti ₂ Ag ₂	94.20 \pm 7.16 GPa
(Li <i>et al.</i> , 2017)	Ti ₄₀ Zr ₁₀ Cu ₃₆ Pd ₁₄	78–115 GPa
(Li <i>et al.</i> , 2017)	Zr ₄₈ Cu ₃₆ Al ₈ Ag ₈	80–100 GPa
(Kokubun <i>et al.</i> , 2015)	Ti ₄₀ Zr ₁₀ Cu ₃₄ Pd ₁₄ Sn ₂	78–115 GPa
(Sun <i>et al.</i> , 2022)	Zr ₆₁ Ti ₂ Cu ₂₅ Al ₁₂ (ZT1)	83 GPa
(Malo <i>et al.</i> , 2013)	Tulang	30–40 GPa
(Wang <i>et al.</i> , 2025)	Tulang Kortikal	10–30 GPa
(Li <i>et al.</i> , 2017)	Natural Bone	3–20 GPa

Aplikasi penggunaan BMG Sebagai Biomaterial

Sejumlah kumpulan studi yang telah ditinjau menunjukkan bahwa BMG berbasis Zr, Ti, Mg, dan Fe menunjukkan hasil yang menjanjikan sebagai biomaterial dilihat dari aspek biokompatibilitas dan sifat mekanisnya.¹⁷ BMG menunjukkan potensi besar untuk penggunaan di berbagai bidang medis. Beberapa contoh aplikasi BMG yang sebagian besar penelitiannya masih mengevaluasi pada tahap preklinis yaitu pada bidang kardiovaskular, untuk penggunaannya sebagai material stent yang lebih aman dan tahan lama. Material stent yang umum digunakan seperti 316L stainless steel dan NiTi (mengandung nikel), yang diketahui dapat memicu respons imun local. Bidang lainnya yaitu ortopedi, dalam penggunaannya untuk osteosintesis seperti sekrup tulang, plat, dan intramedullary nail. BMG juga dikembangkan sebagai material implan tulang. Bidang medis selain kedokteran umum, BMG juga sangat berperan di bidang kedokteran gigi, dalam penggunaannya sebagai implan

¹⁵ Michał Biały *et al.*, "Review on Biocompatibility and Prospect Biomedical Applications of Novel Functional Metallic Glasses," *Journal of Functional Biomaterials* 13, no. 4 (2022): 245, <https://doi.org/10.3390/jfb13040245>.

¹⁶ Hiroto Ida *et al.*, "Biosafety, Stability, and Osteogenic Activity of Novel Implants Made of Zr₇₀Ni₁₆Cu₆Al₈ Bulk Metallic Glass for Biomedical Application," *Acta Biomaterialia* 74 (July 2018): 505–17, <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.05.020>.

¹⁷ Alethea Liens *et al.*, "On the Potential of Bulk Metallic Glasses for Dental Implantology: Case Study on Ti₄₀Zr₁₀Cu₃₆Pd₁₄," *Materials* 11, no. 2 (2018): 249, <https://doi.org/10.3390/ma11020249>.

dental dan miniscrew ortodontik.¹⁸

Di bidang kedokteran gigi, penelitian yang banyak dilakukan saat ini terutama ditujukan untuk pengembangan implan dental. Beberapa basis BMG telah diuji secara *in vitro* dan *in vivo*. Sifat material yang diperlukan untuk implan dental yang baik meliputi kekuatan untuk menahan tekanan, kekakuan, biokompatibilitas, ketahanan terhadap abrasi, serta ketahanan terhadap korosi.¹⁹ Berdasarkan kriteria tersebut, berbagai komposisi bulk metallic glass (BMG) telah dikembangkan dan dievaluasi sebagai kandidat material implan dental seperti, Ti-based, Zr-based, Fe-based, dan Mg-base.²⁰

KESIMPULAN

Literatur *review* ini menekankan potensi *Bulk Metallic Glass* (BMG) sebagai material biomaterial inovatif dalam bidang kedokteran gigi. Berdasarkan berbagai penelitian, BMG menunjukkan keunggulan sifat mekanik, meliputi kekuatan luluh yang tinggi, batas elastisitas yang besar, serta ketahanan fraktur yang baik. Selain itu, struktur amorf tanpa batas butir memberikan ketahanan korosi yang lebih baik melalui pembentukan lapisan oksida pasif yang stabil dibandingkan logam konvensional. Dari aspek biokompatibilitas, BMG juga menunjukkan hasil yang menjanjikan, ditandai dengan kemampuan proliferasi sel yang baik, pelepasan ion logam yang minimal, serta nilai modulus elastisitas yang lebih mendekati jaringan tulang. Hal ini menjadikan BMG sebagai kandidat potensial untuk aplikasi biomaterial, khususnya pada implan dental. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berada pada tahap preklinis, sehingga diperlukan penelitian lanjutan yang lebih komprehensif, terutama terkait uji biokompatibilitas, stabilitas jangka panjang, dan efektivitas klinis. Dengan demikian, pengembangan BMG sebagai biomaterial di masa depan diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kualitas perawatan kedokteran gigi

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Biały, Michał, Mariusz Hasiak, and Amadeusz Łaszcz. "Review on Biocompatibility and Prospect Biomedical Applications of Novel Functional Metallic Glasses." *Journal of Functional Biomaterials* 13, no. 4 (2022): 245. <https://doi.org/10.3390/jfb13040245>.
- [2] Chen, H. S. "Thermodynamic Considerations on the Formation and Stability of Metallic Glasses." *Acta Metallurgica* 22, no. 12 (1974): 1505–11. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(74\)90112-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(74)90112-6).
- [3] Cohen, Jonathan. "Biomaterials in Orthopedic Surgery." *The American Journal of Surgery* 114, no. 1 (1967): 31–41. [https://doi.org/10.1016/0002-9610\(67\)90037-2](https://doi.org/10.1016/0002-9610(67)90037-2).
- [4] Ida, Hiroto, Masahiro Seiryu, Nobuo Takeshita, et al. "Biosafety, Stability, and Osteogenic Activity of Novel Implants Made of Zr70Ni16Cu6Al8 Bulk Metallic Glass for Biomedical Application." *Acta Biomaterialia* 74 (July 2018): 505–17. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.05.020>.

¹⁸ Muhammad Mudasser Khan et al., "Recent Advancements in Bulk Metallic Glasses and Their Applications: A Review," *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* 43, no. 3 (2018): 233–68, <https://doi.org/10.1080/10408436.2017.1358149>.

¹⁹ Tharani Kumar et al., "Review of Metallic Biomaterials in Dental Applications."

²⁰ Li and Zheng, "Recent Advances in Bulk Metallic Glasses for Biomedical Applications."

- [5] Khan, Muhammad Mudasser, Ali Nemati, Zia Ur Rahman, Umair Hussain Shah, Hassnain Asgar, and Waseem Haider. "Recent Advancements in Bulk Metallic Glasses and Their Applications: A Review." *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* 43, no. 3 (2018): 233–68. <https://doi.org/10.1080/10408436.2017.1358149>.
- [6] Klement, W., R. H. Willens, and Pol Duwez. "Non-Crystalline Structure in Solidified Gold–Silicon Alloys." *Nature* 187, no. 4740 (1960): 869–70. <https://doi.org/10.1038/187869b0>.
- [7] Kruzic, Jamie J. "Bulk Metallic Glasses as Structural Materials: A Review." *Advanced Engineering Materials* 18, no. 8 (2016): 1308–31. <https://doi.org/10.1002/adem.201600066>.
- [8] Li, H. F., and Y. F. Zheng. "Recent Advances in Bulk Metallic Glasses for Biomedical Applications." *Acta Biomaterialia* 36 (May 2016): 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.03.047>.
- [9] Li, T. H., P. C. Wong, S. F. Chang, P. H. Tsai, J. S. C. Jang, and J. C. Huang. "Biocompatibility Study on Ni-Free Ti-Based and Zr-Based Bulk Metallic Glasses." *Materials Science & Engineering. C, Materials for Biological Applications* 75 (June 2017): 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.02.006>.
- [10] Li, Z., Z. Huang, F. Sun, X. Li, and J. Ma. "Forming of Metallic Glasses: Mechanisms and Processes." *Materials Today Advances* 7 (September 2020): 100077. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100077>.
- [11] Liens, A., A. Etienne, P. Rivory, et al. "On the Potential of Bulk Metallic Glasses for Dental Implantology: Case Study on Ti40Zr10Cu36Pd14." *Materials* 11, no. 2 (2018). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ma11020249>.
- [12] Malo, M. K. H., D. Rohrbach, H. Isaksson, et al. "Longitudinal Elastic Properties and Porosity of Cortical Bone Tissue Vary with Age in Human Proximal Femur." *Bone* 53, no. 2 (2013): 451–58. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2013.01.015>.
- [13] Marin, Elia. "History of Dental Biomaterials: Biocompatibility, Durability and Still Open Challenges." *Heritage Science* 11, no. 1 (2023): 207. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01046-8>.
- [14] Özcan, Mutlu, and Christoph Hämmerle. "Titanium as a Reconstruction and Implant Material in Dentistry: Advantages and Pitfalls." *Materials* 5, no. 9 (2012): 1528–45. <https://doi.org/10.3390/ma5091528>.
- [15] Saini, Monika. "Implant Biomaterials: A Comprehensive Review." *World Journal of Clinical Cases* 3, no. 1 (2015): 52. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v3.i1.52>.
- [16] Sun, K., R. Fu, X. W. Liu, et al. "Osteogenesis and Angiogenesis of a Bulk Metallic Glass for Biomedical Implants." *Bioactive Materials* 8 (February 2022): 253–66. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.06.018>.
- [17] Tharani Kumar, S., S. Prasanna Devi, Chandrasekaran Krithika, and Rn Raghavan. "Review of Metallic Biomaterials in Dental Applications." *Journal of Pharmacy And Bioallied Sciences* 12, no. 5 (2020): 14. https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_88_20.
- [18] Trexler, Morgana Martin, and Naresh N. Thadhani. "Mechanical Properties of Bulk Metallic Glasses." *Progress in Materials Science* 55, no. 8 (2010): 759–839. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.04.002>.
- [19] Wang, Feifei, Yunshu Wu, Fu Zheng, et al. "A Lasting Antibacterial, pro-Angiogenic, and

- pro-Osteogenic Zirconium-Based Bulk Metallic Glass for Dental Implants." *VIEW* 6, no. 2 (2025): 20240099. <https://doi.org/10.1002/VIW.20240099>.
- [20] Yokoyama, Y., K. Fujita, A. R. Yavari, and A. Inoue. "Malleable Hypoeutectic Zr–Ni–Cu–Al Bulk Glassy Alloys with Tensile Plastic Elongation at Room Temperature." *Philosophical Magazine Letters* 89, no. 5 (2009): 322–34. <https://doi.org/10.1080/09500830902873575>.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN