

**Pengaruh penambahan unsur Ag pada paduan Zr-Al terhadap
struktur mikro dan kekerasan**

***The influence of Ag addition on Zr-Al alloy on microstructure and
hardness***

SKRIPSI

Oleh:

Nama: Muhammad Yuda Aditya Pratama

NPM: 193030064



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS PASUNDAN
BANDUNG
2025**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Muhammas Yuda Aditya Pratama

Nomor Pokok Mahasiswa : 193030064

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Dalam Skripsi yang saya kerjakan ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan/ditulis oleh orang lain untuk memperoleh gelar dari suatu perguruan tinggi,
2. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu/dikutip/disitasi dalam naskah ini dan disebutkan dalam referensi,
3. Naskah laporan skripsi yang ditulis bukan dilakukan secara *copy paste* dari karya orang lain dan mengganti beberapa kata yang tidak perlu.
4. Naskah laporan skripsi bukan hasil plagiarisme.

Apabila dikemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apapun sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 10 Februari
2025

Penulis,



M Yuda Aditya P

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini, sebagai sivitas akademik Universitas Pasundan saya:

N a m a : Muhammad Yuda Aditya Pratama

NPM : 193030064

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Jenis Karya : Skripsi, makalah, laporan magang kerja, karya profesi

Menyatakan bahwa sebagai pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, saya menyetujui memberikan kepada Universitas Pasundan Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“Pengaruh penambahan unsur Ag pada paduan Zr-Al terhadap struktur mikro dan kekerasan “

Beserta perangkat yang ada (jika ada). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pasundan berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pakalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Bandung, 10 Febuari 2025

Yang menyatakan,



M Yuda Aditya P

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Pengaruh penambahan unsur Ag pada paduan Zr-Al terhadap struktur mikro dan kekerasan



**Nama: Muhammad Yuda Aditya
Pratama
NPM: 193030064**

Pembimbing Utama



Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME.

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Pengaruh Penambahan Unsur Ag pada Paduan Zr-Al Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan



Nama: Muhammad Yuda Aditya
Pratama
NPM:193030064

Tanggal sidang skripsi: 29 November 2024

Ketua : Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.



Sekretaris : Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME.



Anggota : Dr. Ir. Endang Achdi, M.T



Anggota : Dr. Ir. Widiyanti Kwintarini, M.T



KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur panjatkan kehadiran ALLAH SWT atas rahmat dan hidayah- Nya, sehingga penulis mampu menyusun dan menyelesaikan Skripsi yang berjudul “**Pengaruh Penambahan unsur Ag pada paduan Zr-Al terhadap struktur mikro dan kekerasan**” sebagai persyaratan untuk memenuhi syarat kelulusan akademik dalam program Sarjana Teknik (ST) Universitas Pasundan, Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin. Sholawat dan salam semoga senantiasa tercurahkan limpahkan kepada Nabi Muhammad SAW. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua yang telah memberikan dukungan :

1. Bapak Dr. Ir. Sugiharto, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan sekaligus Dosen Penguji yang telah memberikan saran bagi Penulis agar dapat menyelesaikan skripsi.
2. Bapak Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama Skripsi yang telah memberikan bimbingan ilmu pengetahuan serta meluangkan waktu untuk Penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi.
3. Bapak Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME. selaku dosen Pembimbing Pendamping Skripsi yang telah memberikan bimbingan ilmu pengetahuan serta meluangkan waktu untuk Penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi.
4. Kedua orang tua yang selalu mendo'akan dan memberikan dukungan untuk senantiasa bersemangat dalam menuntaskan kewajiban. Mengingatkan dan memotivasi dan do'a selama membuat laporan ini.

Bandung, 10 Februari
2025

Penulis,



M Yuda Aditya

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN.....	i
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1. Latar belakang	1
2. Rumusan masalah	1
3. Tujuan.....	1
4. Manfaat	1
5. Lingkup masalah	1
6. Sistematika penulisan	2
BAB II STUDI LITERATUR.....	3
1. Zirkonium dan paduannya	3
2. Alumunium dan paduannya.....	4
3. Perak dan paduannya	5
4. Paduan Zr-Al-Ag	6
5. Proses solidifikasi logam	7
6. Tungku busur listrik.....	7

7. Pengujian metalografi.....	7
8. Uji SEM-EDS	8
9. Uji keras (<i>hardness test</i>)	9
BAB III METODOLOGI.....	10
1. Tahapan penelitian.....	10
2. Tempat penelitian	12
3. <i>Material balance</i>	13
4. <i>Set up</i> pengujian.....	15
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	18
1. Hasil pengujian dan pembahasan.....	18
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	37
1. Kesimpulan.....	37
2. Saran	37
DAFTAR PUSTAKA.....	38

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Hasil pengujian struktur mikro	4
Gambar 4. Hasil kultur bakteri paduan Ti-5Ag [4]	5
Gambar 5. Tahapan penelitian	10
Gambar 6. Hasil pengujian mikrostruktur Zr-6Al sebelum di etsa.....	18
Gambar 7. Hasil pengujian mikrostruktur Zr-6Al sesudah di etsa	18
Gambar 8. Hasil pengamatan struktur mikro Zr-6Al sesudah di etsa	19
Gambar 9. Paduan Zr-6Al-Ag sebelum di etsa.....	19
Gambar 10. Hasil pengamatan struktur mikro Zr-6Al-Ag sesudah di etsa.....	20
Gambar 11. Hasil pengamatan struktur mikro Zr-6Al-Ag sesudah di etsa.....	20
Gambar 12. Paduan Zr-6Al-2Ag sebelum di etsa	21
Gambar 13. Hasil pengamatan struktur mikro Zr-6Al-2Ag sesudah di etsa.....	21
Gambar 14. Hasil pengamatan struktur mikro Zr-6Al-2Ag.....	22
Gambar 15. Hasil metalografi (a) Zr-6Al, (b) Zr-6Al-Ag), (c) Zr-6Al-2Ag.....	22
Gambar 16. Hasil Pengamatan Zr-6Al Struktur Mikro SEM.....	23
Gambar 17. Hasil Pengamatan Zr-6Al-Ag Struktur Mikro SEM	24
Gambar 18. Hasil Pengamatan Zr-6Al-2Ag Struktur Mikro SEM	24
Gambar 19. Area Pengujian EDS Pada Hasil SEM Paduan Zr-6Al	25
Gambar 20. Hasil Pengujian EDS Zr-6Al Pada Area 1	25
Gambar 21. Hasil Pengujian EDS Zr-6Al Pada Area 2	26
Gambar 22. Area Pengujian EDS Pada Hasil SEM Paduan Zr-6Al-Ag	26
Gambar 23. Hasil Pengamatan EDS Paduan Zr-6Al-Ag Pada Area 1	27
Gambar 24. Hasil Pengamatan EDS Paduan Zr-6Al-Ag Pada Area 2	28
Gambar 25. Area Pengujian EDS Pada Hasil SEM Paduan Zr-6Al-2Ag	29
Gambar 26. Hasil Pengamatan EDS Paduan Zr-6Al-2Ag Pada Area 1.....	29
Gambar 27. Hasil Pengamatan EDS Paduan Zr-6Al-2Ag Pada Area 2.....	30
Gambar 28. Analis Fasa Menggunakan Diagram Ternary Zr-Al-Ag	31
Gambar 29. Hasil Indentasi Zr 94%-Al 6%-Ag 0%	32
Gambar 30. Hasil Indentasi Zr 93%-Al 6%-Ag 1%	33
Gambar 31. Hasil Indentasi Zr 93%-Al 6%-Ag 2%	34
Gambar 32. Nilai rata-rata kekerasan.....	35

DAFTAR TABEL

Tabel 2. Persentase komposisi paduan	13
Tabel 3. Berat Komposisi paduan.....	14
Tabel 4. Data hasil pengujian <i>vickers</i> Zr 94%-Al 6%--Ag 0%.....	32
Tabel 5. Data hasil pengujian <i>vickers</i> Zr 93%-Al 6%--Ag 1%.....	33
Tabel 6. Data hasil pengujian <i>vickers</i> Zr 92%-Al 6%--Ag 2%.....	34

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan unsur perak (Ag) pada paduan Zirkonium-Aluminium (Zr-Al) terhadap struktur mikro dan kekerasan material. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan komposisi Ag sebesar 0%, 1%, dan 2%. Paduan dibuat menggunakan tungku busur listrik, kemudian diuji menggunakan metode metalografi, *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersion Spectroscopy* (SEM-EDS), dan uji kekerasan Vickers. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan Ag memberikan dampak signifikan pada sifat mekanik dan struktur mikro paduan. Paduan Zr-Al dengan penambahan 2% Ag menghasilkan kekerasan tertinggi, yaitu 587,7 VHN, meningkat dibandingkan dengan paduan tanpa Ag yang memiliki kekerasan rata-rata 533,86 VHN. Penambahan Ag juga memengaruhi struktur mikro paduan, terlihat dari terbentuknya senyawa intermetalik Zr_3Al . Senyawa ini berkontribusi dalam memperbaiki sifat mekanik paduan melalui penguatan solusi padat dan presipitasi. Analisis SEM-EDS mengonfirmasi komposisi kimia paduan dan distribusi unsur di dalamnya, yang menunjukkan bahwa Ag larut secara merata dalam matriks paduan. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan Ag meningkatkan kekerasan dan kualitas struktur mikro paduan Zr-Al, menjadikannya lebih unggul untuk aplikasi biomaterial. Potensi penggunaan paduan ini sebagai bahan implan tulang didukung oleh sifat mekanik yang baik dan stabilitas kimia yang dihasilkan dari penambahan Ag. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan material biomaterial berbasis logam dengan performa tinggi.

Kata Kunci: Zirkonium-Aluminium, penambahan perak, struktur mikro, kekerasan material, biomaterial, SEM-EDS, *Vickers*.

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of silver (Ag) addition to the Zirconium-Aluminum (Zr-Al) alloy on the microstructure and hardness of the material. The research was conducted by varying the Ag composition at 0%, 1%, and 2%. The alloy was prepared using an electric arc furnace and tested using metallography, Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersion Spectroscopy (SEM-EDS), and Vickers hardness tests. The results showed that the addition of Ag significantly impacted the mechanical properties and microstructure of the alloy. The Zr-Al alloy with 2% Ag addition exhibited the highest hardness value of 587.7 VHN, an improvement compared to the alloy without Ag, which had an average hardness of 533.86 VHN. The addition of Ag also affected the alloy's microstructure, as evidenced by the formation of the intermetallic compound Zr_3Al . This compound contributed to improving the alloy's mechanical properties through solid solution strengthening and precipitation. SEM-EDS analysis confirmed the chemical composition and element distribution within the alloy, showing that Ag was uniformly dissolved in the alloy matrix. These findings demonstrate that adding Ag enhances the hardness and microstructural quality of the Zr-Al alloy, making it superior for biomaterial applications. The potential use of this alloy as a bone implant material is supported by its excellent mechanical properties and chemical stability resulting from Ag addition. Thus, this study provides significant contributions to the development of high-performance metal-based biomaterials.

Keywords: Zirconium-Aluminum, silver addition, microstructure, material hardness, biomaterial, SEM-EDS, Vickers.

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Paduan Zirkon memiliki kekurangan seperti sifat anti bakteri yang rendah dan properti mekanik nya yang rendah [1]. Dengan adanya penelitian unsur paduan Ti-Zr-Nb-Ta memiliki properti mekanik dan biokompatibilitas yang tinggi [2]. Tetapi terdapat kekurangan seperti tingkat korosi yang tinggi dan sifat antibakteri yang rendah.

Alumunium dapat mengurangi tingkat korosi yang tinggi, dalam penelitian unsur paduan Fe-2,9Al-0,9C, penambahan Alumunium dapat mengurangi tingkat korosi yang tinggi [3]. Penambahan unsur Perak (Ag) dapat meningkatkan sifat antibakteri, pada penelitian unsur paduan Ti-5Ag, penambahan unsur Ag dapat meningkatkan sifat antibakteri pada material [4].

Pendekatan yang dilakukan untuk dilaksanakannya penelitian biomaterial menggunakan paduan Zr-Al-Ag dimana variasi Ag (0%, 1%, dan 2%) dan dilakukan pengujian Mikrostruktur, *SEM-EDS*, dan uji keras *Vickers* untuk meningkatkan sifat mekanik serta kekerasan material sebagai aplikasi biomaterial.

2. Rumusan masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah membuat paduan Zr-Al dengan penambahan unsur Ag untuk mengetahui struktur mikro dan kekerasannya.

3. Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang sudah dikemukakan, tujuan yang ingin dicapai pada skripsi ini adalah:

- a. Merancang dan membuat paduan Zr-Al-Ag,
- b. Melakukan pengujian struktur mikro dan sifat mekanik.

4. Manfaat

Manfaat dari hasil penelitian ini yaitu mengetahui perbandingan kekerasan logam Zr-Al-Ag dan mengetahui pengaruh penambahan unsur Ag pada paduan Zr-Al.

5. Lingkup masalah

Batasan masalah adalah suatu batasan terhadap sebuah ruang lingkup dari suatu permasalahan agar pembahasan yang akan dilakukan tidak terlampau jauh dan melebar.

Batasan masalah diperlukan karena:

- a. Material yang dibuat yaitu paduan Zr-Al yang ditambahkan adalah unsur Ag,
- b. Metode peleburan logam menggunakan *Electric Arc Furnace*,
- c. Pengujian yang dilakukan menggunakan metalografi, SEM-EDS, dan uji keras *Vickers*.

6. Sistematika penulisan

Laporan penelitian ini terdiri dari lima bab, dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Menjelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, lingkup masalah, dan sistem penulisan.

BAB II STUDI LITERATUR

Bab ini berisi tentang teori-teori dasar penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini.

BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi proses pembuatan produk.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini membahas tentang kesimpulan dan saran keseluruhan penelitian yang dilakukan

DAFTAR PUSTAKA

Terdapat buku acuan atau jurnal yang digunakan penulis dalam pembuatan laporan skripsi.

LAMPIRAN

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian penambahan unsur Ag pada paduan Zr-Al dapat diberikan suatu kesimpulan diantaranya:

- a. Berdasarkan hasil pemeriksaan metalografi fasa yang dimiliki oleh paduan Zr-6Al adalah α -Zr dan β -Zr. Penambahan unsur perak (Ag) memunculkan senyawa intermetallik berupa Zr₃Al.
- b. Berdasarkan hasil pengujian SEM-EDS, komposisi unsur dari paduan Zr-6Al-2Ag2Ag sedikit tidak sesuai dengan apa yang telah direncanakan sebelumnya terutama untuk unsur Ag, begitupun dengan logam Zr dan logam Al tidak begitu sesuai dikarenakan adanya faktor error dalam pengujian EDS, Zr memiliki nilai *error* 3,44% sedangkan Al memiliki nilai Error 6,29% dan Ag memiliki nilai *error* sebesar 60,61%. Jika dibulatkan nilainya, hasil uji EDS dari area kesatu memiliki komposisi Zr, Al, dan Ag secara berurutan adalah 91,56%, 7,48%, dan 0,91%.
- c. Penambahan unsur perak (Ag) dapat menambahkan nilai kekerasan paduan Zr-6Al dari 533,86 HV menjadi 561,87 HV pada paduan Zr-6Al-1Ag dan 587,767 HV pada paduan Zr-6Al-2Ag. Meningkatnya nilai kekerasan disebabkan oleh unsur Ag larut dalam paduan Zr-Al menghasilkan penguatan Solusi padat yang meningkatkan kekerasan paduan. Dengan penambahan Ag pada paduan Zr-Al membantu memperhalus butir pada paduan Zr-Al pada proses solidifikasi logam.

2. Saran

Dari hasil penelitian pengaruh penambahan unsur Ag terhadap Paduan Zr-Al dapat diberikan suatu saran penelitian selanjutnya. Saran-saran tersebut diantaranya:

- a. Melakukan pengujian korosi untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur Ag terhadap paduan logam Zr-Al dan pengaruh uji korosi terhadap ketahanan korosi paduan Zr-Al-Ag.
- b. Melakukan pengujian antibakteri untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Lin, C. Yin, and A. Mo, "Zirconia Based Dental Biomaterials: Structure, Mechanical Properties, Biocompatibility, Surface Modification, and Applications as Implant," *Frontiers in Dental Medicine*, vol. 2, p. 689198, Aug. 2021, doi: 10.3389/FDMED.2021.689198/BIBTEX.
- [2] T. Xiang *et al.*, "Phase-tunable equiatomic and non-equiatomic Ti-Zr-Nb-Ta high- entropy alloys with ultrahigh strength for metallic biomaterials," *J Mater Sci Technol*, vol. 117, pp. 196–206, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JMST.2021.12.014.
- [3] M. Rahmati and M. Mozafari, "Biocompatibility of alumina-based biomaterials-A review," *J Cell Physiol*, vol. 234, no. 4, pp. 3321–3335, Apr. 2019, doi: 10.1002/JCP.27292.
- [4] C. Song *et al.*, "In situ alloying Ti–Ag antibacterial biomaterials via laser powder bed fusion: Microstructure, mechanical properties and bioperformance," *Mater Today Adv*, vol. 20, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mtadv.2023.100445.
- [5] A. N. R, R. Gupta, and D. Kurt K. Weber, "Zirconia Biomaterials," *StatPearls*, Aug. 2023, Accessed: Nov. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK493144/>
- [6] C. Piconi and G. Maccauro, "Zirconia as a ceramic biomaterial," *Biomaterials*, vol. 20, no. 1, pp. 1–25, Jan. 1999, doi: 10.1016/S0142-9612(98)00010-6.
- [7] M. Rahmati and M. Mozafari, "Biocompatibility of alumina-based biomaterials-A review," *J Cell Physiol*, vol. 234, no. 4, pp. 3321–3335, Apr. 2019, doi: 10.1002/JCP.27292.
- [8] R. Kartikasari, A. Susiana, and D. Ocktavian, "Peningkatan kekerasan dan ketahanan korosi paduan Fe-2,9Al-0,4C dengan proses karburisasi padat," *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 11, no. 1, p. 1, Mar. 2021, doi: 10.29303/dtm. V 11i1.352
- [9] J. M. Corrêa, M. Mori, H. L. Sanches, A. D. Da Cruz, E. Poiate, and I. A. V. P. Poiate, "Silver nanoparticles in dental biomaterials," *Int J Biomater*, vol. 2015, Jan. 2015, doi: 10.1155/2015/485275.

- [10] R. A. Bapat *et al.*, “An overview of application of silver nanoparticles for biomaterials in dentistry,” *Materials Science and Engineering: C*, vol. 91, pp.881–898, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.MSEC.2018.05.069.
- [11] R. Siskey, L. Ciccarelli, M. K. C. Lui, and S. M. Kurtz, “Are PEEK-on-Ceramic Bearings an Option for Total Disc Arthroplasty? An In Vitro Tribology Study,” *Clin Orthop Relat Res*, vol. 474, no. 11, pp. 2428–2440, Nov. 2016, doi: 10.1007/s11999-016-5041-7.
- [12] D. Špehar and M. Jakovac, “New Knowledge about Zirconium-Ceramic as a Structural Material in Fixed Prosthodontics.,” *Acta Stomatol Croat*, vol. 49, no. 2, pp. 137–44, Jun. 2015, doi: 10.15644/asc49/2/7.
- [13] C. Piconi and G. Maccauro, “Zirconia as aceramic biomaterial,” *Biomaterials*, vol. 20, no. 1, pp. 1–25, Jan. 1999, doi: 10.1016/S0142-9612(98)00010-6.
- [14] Y. Zhang, M. J. Sun, and D. Zhang, “Designing functionally graded materials with superior load-bearing properties,” *Acta Biomater*, vol. 8, no. 3, pp. 1101–1108, 2012, doi: 10.1016/j.actbio.2011.11.033
- [15] C. Gautam, J. Joyner, A. Gautam, J. Rao, and R. Vajtai, “Zirconia based dental ceramics: structure, mechanical properties, biocompatibility and applications,” *Dalton Transactions*, vol. 45, no. 48, pp. 19194–19215, 2016, doi: 10.1039/c6dt03484e.
- [16] B. Cales, “Zirconia as a sliding material: Histologic, laboratory, and clinical data,” *Clin Orthop Relat Res*, no. 379, pp. 94–112, 2000.
- [17] G. Sannino, A. Pozzi, R. Schiavetti, and A. Barlattani, “Stress Distribution on A Three-unit Implant Supported Zirconia Framework A 3D Finite Element Analysis an Fatigue Test,” *Oral Implantol (Rome)*, vol. 5, no. 1, pp. 11–20, 2012.
- [18] H. Reveron *et al.*, “Towards long lasting zirconia-based composites for dental implants: Transformation induced plasticity and its consequence on ceramic reliability,” *Acta Biomater*, vol. 48, pp. 423–432, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.actbio.2016.11.040
- [19] M. Rahmati and M. Mozafari, “Biocompatibility of alumina-based biomaterials A review,” *J Cell Physiol*, vol. 234, no. 4, pp. 3321–3335, Apr. 2019, doi:10.1002/JCP.27292.
- [20] J. M. Anderson, A. Rodriguez, and D. T. Chang, “Foreign body reaction to biomaterials,” *Semin Immunol*, vol. 20, no. 2, pp. 86–100, Apr. 2008, doi :

10.1016/j.smim.2007.11.004.

- [21] E. Denes, G. Barrière, E. Poli, and G. Lévêque, “Alumina biocompatibility,” *J Long Term Eff Med Implants*, vol. 28, no. 1, pp. 9–13, 2018, doi: 10.1615/JLongTermEffMedImplants.2018025635.
- [22] J. Kim, “Systematic approach to characterize the dynamics of protein adsorption on the surface of biomaterials using proteomics,” *Colloids Surf B Biointerfaces*, vol. 188, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.colsurfb.2019.110756.
- [23] M. Rahmati and M. Mozafari, “Biocompatibility of alumina-based biomaterials- A review,” *J Cell Physiol*, vol. 234, no. 4, pp. 3321–3335, Apr. 2019, doi: 10.1002/JCP.27292.
- [24] S. Christel, “Biocompatibility of surgical-grade dense polycrystalline alumina,” *Clin Orthop Relat Res*, vol. 282, pp. 10–18, 1992, doi: 10.1097/00003086199209000-00003.
- [25] J. Liu *et al.*, “Biocompatibility and osseointegration properties of a novel high strength and low modulus β - Ti10Mo6Zr4Sn3Nb alloy.,” *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 11, p. 1127929, 2023, doi: 10.3389/fbioe.2023.1127929.
- [26] R. Klopffleisch and F. Jung, “The pathology of the foreign body reaction against biomaterials,” *J Biomed Mater Res A*, vol. 105, no. 3, pp. 927–940, Mar. 2017, doi: 10.1002/jbm.a.35958.
- [27] N. Arici, B. S. Akdeniz, A. A. Oz, Y. Gencer, M. Tarakci, and S. Arici, “Effectiveness of medical coating materials in decreasing friction between orthodontic brackets and archwires.,” *Korean J Orthod*, vol. 51, no. 4, pp. 270–281, Jul. 2021, doi: 10.4041/kjod.2021.51.4.270
- [28] R. Kartikasari, A. Susiana, and D. Ocktavian, “Peningkatan kekerasan dan ketahanan korosi paduan Fe-2,9Al-0,4C dengan proses karburisasi padat,” *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 11, no. 1, p. 1, Mar. 2021, doi: 10.29303/dtm. V11i1.352.
- [29] S. Sinha *et al.*, “Fabrication, Characterization, and Modeling of an Aluminum Oxide-Gate Ion-Sensitive Field-Effect Transistor-Based pH Sensor.,” *J Electron Mater*, vol. 50, no. 12, pp. 7085–7097, Dec. 2021, doi: 10.1007/s11664-021-09220-z.
- [30] R. Bento, A. Gaddam and J. M. F. Ferreira, “Sol-Gel Synthesis and Characterization of a Quaternary Bioglass for Bone Regeneration and Tissue Engineering.,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 16, Aug. 2021, doi: 10.3390/ma14164515.

- [31] D. W. Haam *et al.*, “Reconstruction of Segmental Bone Defect in Canine Tibia Model Utilizing Bi-Phasic Scaffold: Pilot Study,” *Int J Mol Sci*, vol. 25, no. 9, May 2024, doi: 10.3390/ijms25094604.
- [32] J.M. Corrêa, M. Mori, H. L. Sanches, A. D. Da Cruz, E. Poiate, and I. A. V.P Poiate, “Silver nanoparticles in dental biomaterials,” *Int J Biomater*, vol. 2015, Jan. 2015, doi: 10.1155/2015/485275.
- [33] R. A. Bapat *et al.*, “An overview of application of silver nanoparticles for biomaterials in dentistry,” *Materials Science and Engineering: C*, vol. 91, pp.881–898, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.MSEC.2018.05.069.

