

PENGARUH REKAYASA PERMUKAAN TERHADAP NILAI KEKERASAN PADUAN MAGNESIUM AZ31

Mu'adz Abdullah Faqih¹, Agung Purniawan^{1*}, Amaliya Rasyida¹, Diah Susanti¹

¹Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

*e-mail : a.purniawan@its.ac.id

Abstrak

Paduan magnesium AZ31 menawarkan prospek yang menjanjikan sebagai material implan biodegradable karena memiliki sifat mekanik yang menyerupai tulang manusia dan biokompatibilitasnya yang unggul. Namun, kelemahan utama material ini adalah laju korosi yang tinggi dapat mengakibatkan kegagalan material sebelum regenerasi jaringan selesai dan kekerasan yang rendah sebagai material implan tulang. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan melakukan rekayasa permukaan melalui metode *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) dan *Hydrothermal Treatment* (HT). Studi ini melibatkan tiga spesimen: AZ31 tanpa perlakuan, AZ31 dengan lapisan PEO, dan AZ31 dengan lapisan PEO yang diberi perlakuan HT. Analisis difraksi sinar-X (XRD) menunjukkan pembentukan senyawa MgO, Mg(OH)₂, Mg₂SiO₄, dan hidroksiapatit pada permukaan lapisan. Intensitas puncak hidroksiapatit tertinggi ditemukan pada spesimen yang menjalani perlakuan HT, menandakan peningkatan kandungan hidroksiapatit yang dapat meningkatkan bioaktif implan. Uji kekerasan Vickers menunjukkan bahwa spesimen dengan lapisan PEO memiliki nilai kekerasan tertinggi sebesar 76,69 HV, meningkat 35% dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan (56,60 HV). Setelah perlakuan HT, kekerasan menurun menjadi 68,94 HV, yang disebabkan oleh relaksasi tegangan internal saat proses hidrotermal. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi metode PEO dan HT tidak hanya meningkatkan kekerasan permukaan, tetapi juga menghasilkan lapisan bioaktif dengan potensi biointegrasi yang lebih baik. Kombinasi ini menjadikan paduan AZ31 sebagai kandidat unggul untuk aplikasi implan biomedis. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mengoptimalkan parameter proses dan mengevaluasi kinerja biologis secara in-vitro dan in-vivo guna mendukung pengembangan aplikasi klinis.

Kata Kunci: AZ31, Kekerasan, *Plasma Electrolytic Oxidation*, *Hydrothermal treatment*.

Abstract

The AZ31 magnesium alloy offers promising prospects as a biodegradable implant material due to its mechanical properties resembling human bone and its superior biocompatibility. However, the main drawback of this material is its high corrosion rate, which can lead to material failure before tissue regeneration is complete, and its low hardness as a bone implant material. This research aims to address these issues by performing surface engineering through the *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) and *Hydrothermal Treatment* methods. (HT). This study involves three specimens: AZ31 without treatment, AZ31 with a PEO layer, and AZ31 with a PEO layer treated with HT. X-ray diffraction (XRD) analysis shows the formation of MgO, Mg(OH)₂, Mg₂SiO₄, and hydroxyapatite compounds on the surface of the layers. The highest peak intensity of hydroxyapatite was found in the specimens that underwent HT treatment, indicating an increase in hydroxyapatite content that can enhance the bioactivity of the implant. The Vickers hardness test showed that the specimen with the PEO coating had the highest hardness value of 76.69 HV, an increase of 35% compared to the untreated specimen (56.60 HV). After the HT treatment, the hardness decreased to 68.94 HV, which was caused by the relaxation of internal stress during the hydrothermal process. The results of this study indicate that the combination of PEO and HT methods not only increases surface hardness but also produces a bioactive layer with better biointegration potential. This combination makes the AZ31 alloy an excellent candidate for biomedical implant applications. Further research is recommended to optimize process parameters and evaluate biological performance in vitro and in vivo to support the development of clinical applications.

Keywords: AZ31, Hardness, *Plasma Electrolytic Oxidation*, *Hydrothermal treatment*.

PENDAHULUAN

Magnesium dan paduannya, seperti AZ31, telah menarik perhatian dalam aplikasi biomaterial, terutama untuk implan yang dapat terurai (biodegradasi) karena sifat biokompatibilitas dan

kekuatan mekaniknya yang mirip dengan tulang manusia (Zhang et al. 2023). Namun, salah satu tantangan utama dalam penggunaan magnesium sebagai bahan implan adalah tingkat korosi yang tinggi di lingkungan tubuh manusia, yang dapat menyebabkan penurunan sifat mekanik yang cepat

sebelum jaringan tulang baru dapat berfungsi dengan maksimal (Sarian et al. 2022).

Oleh karena itu, pengembangan teknik rekayasa permukaan pada paduan magnesium menjadi penting untuk memperbaiki ketahanan korosi dan memperpanjang umur biodegradasi implan dalam aplikasi medis.

Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) merupakan teknik unggul yang banyak digunakan untuk meningkatkan sifat permukaan paduan magnesium. Teknik ini memungkinkan pembentukan lapisan oksida keramik yang padat, keras, dan tahan terhadap korosi, sehingga meningkatkan daya tahan material dalam berbagai aplikasi, termasuk biomedis dan teknik.

Dengan memodifikasi parameter proses seperti komposisi elektrolit, tegangan listrik, durasi perlakuan, dan temperatur, karakteristik lapisan yang dihasilkan dapat disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan spesifik. Kemampuan untuk mengontrol ketebalan, morfologi, dan komposisi kimia lapisan menjadikan PEO sebagai metode yang sangat fleksibel dan efektif dalam rekayasa permukaan paduan magnesium (Cui et al. 2019; Fattah-alhosseini et al. 2022; H. M. Wang, Chen, and Li 2010).

PEO bekerja pada tegangan tinggi yang menghasilkan micro-plasma dalam elektrolit berbasis basa, seperti KOH. Proses ini membentuk lapisan oksida pada permukaan magnesium yang berfungsi sebagai pelindung. Lapisan tersebut mampu meningkatkan ketahanan korosi material dengan efektif, menjadikannya lebih tahan terhadap degradasi di lingkungan yang agresif. Selain itu, lapisan yang dihasilkan juga meningkatkan sifat mekanik, terutama kekerasan material, sehingga cocok untuk berbagai aplikasi teknis dan biomedis. Kombinasi ketahanan korosi dan peningkatan sifat mekanik membuat PEO menjadi metode rekayasa permukaan yang banyak digunakan untuk material magnesium. (Baghdadabad, Baghdadabad, and Khoei 2020). Namun, meskipun lapisan oksida yang terbentuk cukup efektif, beberapa kelemahan masih ada, terutama dalam hal porositas, ketebalan lapisan, dan biointegrasi yang dapat mempengaruhi kinerja jangka panjang dalam aplikasi medis (Fazel et al. 2019; Peng et al. 2017)

Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan menambahkan perlakuan setelah

proses PEO, seperti Perlakuan Hidrotermal (HT). Proses hidrotermal, yang dilakukan pada temperatur tinggi dalam larutan alkali, dapat mengubah lapisan oksida yang terbentuk, memperbaiki ketahanan korosi, meningkatkan ketahanan aus, dan biointegrasi material (Z. Wang et al. 2021).

Biointegrasi adalah aspek penting dalam aplikasi implan, di mana material harus mampu berinteraksi secara harmonis dengan jaringan tubuh untuk mendukung regenerasi tanpa memicu reaksi negatif. Perlakuan HT diketahui dapat menghasilkan kristalisasi fase-fase tambahan seperti magnesium hidroksida ($Mg(OH)_2$) dan hidroksiapatit ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) yang dapat meningkatkan biointegrasi material (Burdusel et al. 2023; Ling et al. 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh kombinasi rekayasa permukaan PEO dan HT terhadap lapisan pelindung dan sifat kekerasan paduan magnesium AZ31. Tiga jenis spesimen yang diuji dalam penelitian ini adalah paduan magnesium AZ31 yang tidak dilapisi, paduan magnesium AZ31 yang dilapisi dengan lapisan PEO, dan paduan magnesium AZ31 yang dilapisi dengan lapisan PEO kemudian diberi perlakuan HT. Penelitian ini akan mengevaluasi perubahan yang terjadi pada permukaan dan kekerasan dari ketiga spesimen tersebut menggunakan analisis difraksi sinar-X (XRD) dan pengujian kekerasan.

Peningkatan ketahanan korosi dan sifat mekanik paduan magnesium AZ31 setelah perlakuan PEO dan HT diperkirakan akan membuka peluang baru dalam penggunaan magnesium sebagai material implan yang lebih aman dan efektif dalam aplikasi klinis. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam mengembangkan teknologi permukaan yang lebih optimal untuk aplikasi biomaterial berbasis magnesium.

KAJIAN TEORI

Persiapan Sampel

Penelitian ini menggunakan paduan magnesium AZ31 berbentuk silinder pejal dengan dimensi diameter 8 mm dan tinggi 25 mm. Proses persiapan dimulai dengan pengamplasan permukaan menggunakan kertas amplas silikon karbida (240, 400, 600, 800, hingga 1000 grit) untuk menghilangkan kontaminan, goresan permukaan, serta memastikan

kehalusan dan permukaan yang homogen. Setelah pengamplasan, sampel dibilas dengan air mengalir untuk menghilangkan sisa partikel debu, kemudian dibersihkan menggunakan etanol untuk melarutkan residu organik. Langkah terakhir adalah pencucian dengan aquades dan pengeringan untuk memastikan permukaan siap untuk perlakuan lebih selanjutnya.

Plasma Electrolytic Oxidation (PEO)

PEO adalah teknik elektro-kimia yang digunakan untuk meningkatkan sifat permukaan logam, khususnya pada material berbasis magnesium. Teknik ini melibatkan pembentukan plasma mikro pada permukaan logam selama proses elektrolisis yang dijalankan pada tegangan tinggi. Plasma tersebut memicu reaksi oksidasi intensif, menghasilkan lapisan oksida keramik yang memiliki kekerasan tinggi, ketahanan korosi yang sangat baik, dan bioaktivitas yang mendukung.

Lapisan ini terdiri dari dua struktur utama: lapisan internal padat yang memberikan kekuatan mekanik dan lapisan eksternal berpori yang memengaruhi sifat adhesi serta interaksi bioaktif dengan lingkungan eksternal. (Farooq et al. 2023; Gnedenkov et al. 2023). Struktur berpori ini memungkinkan penetrasi ion-ion tertentu yang dapat dimanfaatkan untuk modifikasi lebih lanjut, seperti pembentukan hidroksiapatit, yang relevan untuk aplikasi biomaterial (Fattah-alhosseini et al. 2022).

Proses PEO memerlukan elektrolit khusus yang berfungsi sebagai medium untuk transfer ion dan reaksi kimia. Dalam penelitian ini, elektrolit yang digunakan terdiri dari 3,12 gram sodium metasilikat (Na_2SiO_3), 3,12 gram kalium hidroksida (KOH), dan 8 gram hidroksiapatit (HA) yang dilarutkan dalam 1 liter air aquades. Komponen ini dipilih untuk menghasilkan lapisan oksida dengan sifat mekanik dan kimia unggul. Sodium metasilikat berfungsi sebagai sumber ion silikat yang membantu pembentukan lapisan oksida keras, sedangkan KOH meningkatkan konduktivitas larutan dan mendukung pembentukan plasma yang stabil. Hidroksiapatit ditambahkan untuk meningkatkan bioaktivitas lapisan yang terbentuk. Proses PEO dilakukan dengan tegangan 400 volt selama 10 menit, menghasilkan lapisan oksida yang homogen dengan ketebalan optimal. Parameter ini untuk menghasilkan kombinasi terbaik antara kekerasan mekanik dan sifat korosi yang superior, menjadikannya ideal untuk aplikasi pada material implan biodegradable.

Hydrothermal Treatment (HT)

Hydrothermal Treatment (HT) adalah metode pasca-perlakuan yang menggunakan temperatur tinggi (biasanya lebih dari 100°C) dan tekanan tinggi untuk memodifikasi permukaan material. Proses ini dilakukan dalam autoklaf atau reaktor tertutup yang memungkinkan larutan alkali atau larutan lain yang mengandung ion tertentu berinteraksi dengan permukaan material.

HT bertujuan untuk mengubah struktur mikro dan komposisi permukaan sehingga meningkatkan sifat mekanik, ketahanan korosi, dan bioaktivitas material. Pada paduan magnesium, HT dapat merangsang pembentukan senyawa keramik tambahan, seperti magnesium hidroksida ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) dan hidroksiapatit (HA), yang meningkatkan kualitas lapisan permukaan dan memperbaiki interaksi material dengan jaringan tubuh (Peng et al. 2017).

Proses HT dilakukan dengan merendam sampel dalam larutan alkali $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ pada autoklaf dengan temperature 150°C selama 5 jam.

Analisis XRD dan Pengukuran Nilai Kekerasan

Karakterisasi lapisan pada magnesium AZ31 dilakukan menggunakan X-ray Diffraction (XRD) untuk mengidentifikasi senyawa kristal yang terbentuk pada permukaan. Puncak-puncak difraksi pada pola XRD memberikan informasi tentang jenis fase seperti MgO , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, Mg_2SiO_4 , dan Hidroksiapatit. Pada penelitian ini, alat yang digunakan untuk uji XRD adalah PAN Analytical.

Selain itu, Pengukuran kekerasan material merupakan langkah penting dalam mengevaluasi ketahanan deformasi material terhadap gaya tekan. Salah satu metode yang paling banyak digunakan dalam penelitian ini adalah metode Vickers, yang mengukur kekerasan berdasarkan indentasi yang ditinggalkan oleh piramida intan dengan sudut apex 136° . Proses pengukuran dimulai dengan menekan indenter piramida intan ke permukaan material dengan gaya tertentu hingga terbentuk jejak indentasi. Pada penelitian ini, alat yang digunakan untuk pengujian kekerasan adalah Wilson Hardness Model 402MVD, yang dilengkapi dengan sistem pengukuran yang akurat untuk menentukan panjang diagonal jejak indentasi. Rumus untuk menghitung nilai kekerasan Vickers (HV) pada dasarnya adalah:

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} \quad (1)$$

Dengan menggunakan indenter piramida intan (136°), maka rumus dapat disederhanakan menjadi :

$$HV = \frac{F \cdot 1,854}{d^2} \quad (2)$$

Dimana :

- HV = Kekerasan Vickers (dalam kgf/mm²)
 F = Gaya yang diberikan (dalam kgf)
 θ = Sudut dari piramida indenter
 1,854 = Konstanta indenter untuk piramida dengan sudut 136°
 d = rata-rata panjang diagonal indentasi (dalam mm).

Hasil pengukuran ini memberikan informasi penting tentang ketahanan material terhadap deformasi, yang dapat digunakan untuk mengevaluasi peningkatan sifat mekanik setelah perlakuan permukaan PEO dan HT. Dalam penelitian ini, data kekerasan diperoleh dengan membandingkan hasil dari spesimen yang tidak diperlakukan, spesimen dengan lapisan PEO, dan spesimen yang menjalani perlakuan HT, guna memahami pengaruh rekayasa permukaan terhadap kekerasan paduan magnesium AZ31 secara mendetail.

Kombinasi analisis XRD dan pengukuran kekerasan Vickers memberikan pemahaman yang lengkap tentang hubungan antara proses rekayasa permukaan, lapisan kimia yang terbentuk, dan sifat mekanik material, yang penting untuk pengembangan material implan dengan performa optimal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis XRD

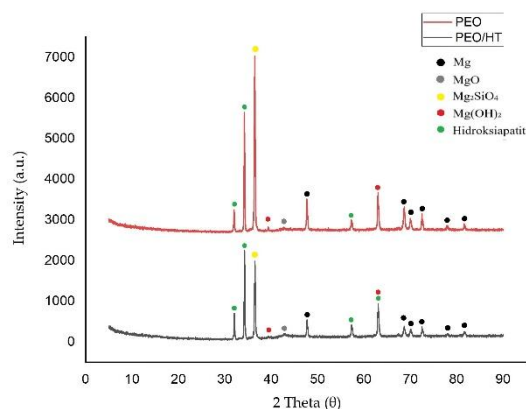
Berdasarkan hasil analisis XRD, spesimen AZ31 yang telah mengalami rekayasa permukaan menggunakan metode *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) berbasis elektrolit silikat dan hidroksiapatit, serta *Hydrothermal Treatment* (HT) dengan larutan alkali Al(NO₃)₃, menunjukkan adanya puncak-puncak difraksi yang khas. Gambar 1 dapat dilihat puncak-puncak tersebut meliputi Mg, MgO, Mg₂SiO₄, Mg(OH)₂, dan hidroksiapatit, yang mengindikasikan bahwa proses rekayasa permukaan telah berhasil dilakukan.

Pembentukan senyawa-senyawa ini menandakan adanya lapisan oksida dan fase keramik yang terbentuk selama proses PEO, yang berfungsi sebagai pelindung terhadap korosi. Lapisan ini juga memperbaiki sifat permukaan, yang penting untuk meningkatkan kinerja paduan magnesium dalam aplikasi biomedis.

Pada spesimen dengan perlakuan kombinasi PEO dan HT (PEO/HT), analisis XRD menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam jumlah dan intensitas puncak hidroksiapatit dibandingkan dengan spesimen hanya PEO. Peningkatan intensitas puncak hidroksiapatit ini menandakan bahwa proses HT, yang dilakukan dalam kondisi suhu tinggi dan tekanan tinggi dalam larutan alkali, mendorong pembentukan kristal hidroksiapatit pada permukaan lapisan.

Hidroksiapatit merupakan senyawa dengan sifat bioaktif yang baik dan memiliki potensi untuk mendukung proses biointegrasi, sehingga dapat meningkatkan interaksi antara material dan jaringan biologis. Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa perlakuan HT dapat memperkaya lapisan permukaan dengan senyawa bioaktif, yang tidak hanya memperbaiki sifat mekanik tetapi juga memiliki potensi material sebagai implan yang biokompatibel.

Penemuan ini menjadi landasan penting dalam pengembangan teknologi permukaan untuk aplikasi biomaterial berbasis magnesium. (Furko et al. 2022; Kurosawa, Takeuchi, and Ryu 2021; Shahn, Shamanian, and Kharaziha 2022). Dengan terbentuknya senyawa baru pada permukaan paduan magnesium AZ31, diharapkan terjadi peningkatan sifat mekanik yang akan di uji dengan metode Hardness Vickers (HV).



Gambar 1. Hasil uji XRD pada spesimen PEO dan PEO/HT

Perhitungan Nilai Kekerasan

Dari Gambar 2.1 terlihat bahwa hasil uji hardness dengan indentasi piramida intan 136° berhasil dilakukan. Didapatkan panjang diagonal indentasi yang dapat digunakan untuk menghitung nilai kekerasan. Gambar 2.1 (a) menunjukkan hasil uji hardness dengan menggunakan beban 1 kgf (F) pada AZ31 tanpa perlakuan mendapatkan hasil rata-rata panjang diagonal sebesar 0,181 mm (d). Berikut

perhitungan nilai HV dengan menggunakan rumus (2) :

$$HV = \frac{F \cdot 1,854}{d^2}$$

$$HV = \frac{1 \cdot 1,854}{0,181^2}$$

$$HV = \frac{1,854}{0,0327}$$

$$HV = 56,60 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

Sedangkan dari gambar 2.1 (b) uji hardness pada spesimen PEO dengan beban yang sama mendapatkan hasil rata-rata panjang diagonal sebesar 0,156 mm. Berikut perhitungan nilai HV dengan menggunakan rumus (2) :

$$HV = \frac{F \cdot 1,854}{d^2}$$

$$HV = \frac{1 \cdot 1,854}{0,156^2}$$

$$HV = \frac{1,854}{0,0241}$$

$$HV = 76,69 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

Sedangkan dari gambar 2.1 (c) uji hardness pada spesimen PEO/HT dengan beban yang sama mendapatkan hasil rata-rata panjang diagonal sebesar 0,164 mm. Berikut perhitungan nilai HV dengan menggunakan rumus (2) :

$$HV = \frac{F \cdot 1,854}{d^2}$$

$$HV = \frac{1 \cdot 1,854}{0,164^2}$$

$$HV = \frac{1,854}{0,0268}$$

$$HV = 68,94 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

Hasil pengukuran kekerasan menunjukkan bahwa rekayasa permukaan pada spesimen AZ31 mempengaruhi nilai kekerasan spesimen. Kekerasan tertinggi terjadi pada spesimen AZ31/PEO dengan nilai HV sebesar 76,69, meningkat sekitar 35%.

Sedangkan pada spesimen dengan *post-treatment hydrothermal* (HT) mengalami penurunan sebesar 10% dari spesimen PEO menjadi 69,94. Akan tetapi jika nilai kekerasan PEO/HT dibandingkan dengan spesimen AZ31 tanpa rekayasa perlakuan, nilai

kekerasan meningkat sekitar 23% yang dapat dilihat pada tabel 1.

Berdasarkan hasil yang didapatkan, terbukti bahwa rekayasa permukaan dengan PEO dapat meningkatkan kekerasan paduan magnesium AZ31 (Baghdadabad, Baghdadabad, and Khoei 2020).



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2. Pengamatan dengan mikroskop optik dengan perbesaran 5x hasil uji hardness (a) AZ31, (b) PEO, (c) PEO/HT, (d) skala perbandingan yang digunakan.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Nilai Kekerasan Vickers

Spesimen	d (mm)	F (kgf)	HV (kgf/mm ²)
AZ31	0,181	1	56,60
PEO	0,156	1	76,69
PEO/HT	0,164	1	68,94

PENUTUP

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi metode *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) dan *Hydrothermal Treatment* (HT) secara signifikan meningkatkan sifat mekanik dan kimia permukaan paduan magnesium AZ31. Analisis XRD mengidentifikasi keberadaan senyawa MgO, Mg₂SiO₄, Mg(OH)₂, dan Hidroksiapatit. Adanya senyawa tersebut menunjukkan proses rakayasa permukaan pada paduan magnesium AZ31 dengan metode PEO dan HT berhasil dilakukan.

Dengan adanya lapisan oksida keramik, maka terjadi peningkatan nilai kekerasan hingga 76,69 HV pada spesimen AZ31/PEO. Meskipun setelah perlakuan HT, kekerasan menurun menjadi 68,94 HV, hal ini tidak signifikan karena hanya menurun 10%. Penurunan nilai kekerasan ini disebabkan oleh proses HT dilakukan pada temperatur yang cukup tinggi (150°C) selama 5 jam. Setelah itu, terjadi proses pendinginan lambat yang menyebabkan berkurangnya tegangan internal pada permukaan spesimen. Dengan berkurangnya tegangan internal ini, maka sifat mekanik, seperti kekerasan, akan menurun.

Studi ini memberikan dasar untuk pengembangan lebih lanjut, termasuk optimasi parameter proses untuk aplikasi biomedis. Temuan ini mendukung penggunaan material berbasis magnesium untuk aplikasi biomedis yang lebih andal dan berkelanjutan, terutama dari hasil uji XRD spesimen PEO/HT, didapatkan peak dan intensitas hidroksiapatit yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan potensinya sebagai material implan untuk mendukung biointegrasi yang lebih baik.

SARAN

Pada penelitian selanjutnya, parameter proses PEO dan HT dapat diperbaiki untuk mendapatkan kekerasan yang lebih tinggi dan hidroksiapatit yang lebih banyak. Selain itu, uji biologis seperti invitro dan invivo diperlukan untuk analisis klinis yang lebih lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- Baghdadabad, Daniyal Momen, Ahmad Reza Momen Baghdadabad, and Seyed Mohammad Mousavi Khoei. 2020. "Characterization of Bioactive Ceramic Coatings Synthesized by Plasma Electrolyte Oxidation on AZ31 Magnesium Alloy Having Different Na₂SiO₃·9H₂O Concentrations." *Materials Today Communications* 25(August): 101642. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101642>.
- Burdusel, Alexandra Cristina et al. 2023. "Microwave-Assisted Hydrothermal Treatment of Multifunctional Substituted Hydroxyapatite with Prospective Applications in Bone Regeneration." *Journal of Functional Biomaterials* 14(7).
- Cui, Zeqin et al. 2019. "Effect of Nano-HA Content on the Mechanical Properties, Degradation and Biocompatible Behavior of Mg-Zn/HA Composite Prepared by Spark Plasma Sintering." *Materials Characterization* 151(November 2018): 620–31.
- Farooq, Ameer et al. 2023. "Effect of Micro-Arc Oxidation Voltage on the Morphology and Electrochemical Properties of AZ31B Magnesium Alloy." 000609: 1–8.
- Fattah-alhosseini, Arash et al. 2022. "A Review of Effective Strides in Amelioration of the Biocompatibility of PEO Coatings on Mg Alloys." *Journal of Magnesium and Alloys* 10(9): 2354–83. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.09.002>.
- Fazel, M. et al. 2019. "Influence of Hydrothermal Treatment on the Surface Characteristics and Electrochemical Behavior of Ti-6Al-4V Bio-Functionalized through Plasma Electrolytic Oxidation." *Surface and Coatings Technology* 374(April): 222–31. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.088>.
- Furko, Monika et al. 2022. "Preparation and Morphological Investigation on Bioactive Ion-Modified Carbonated Hydroxyapatite-Biopolymer Composite Ceramics as Coatings for Orthopaedic Implants." *Ceramics International* 48(1): 760–68.
- Gnedenkov, A. S., S. L. Sinebryukhov, V. S. Filonina, and S. V. Gnedenkov. 2023. "Hydroxyapatite-Containing PEO-Coating Design for Biodegradable Mg-0.8Ca Alloy: Formation and Corrosion Behaviour." *Journal of Magnesium and Alloys* 11(12): 4468–84. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.12.002>.
- Kurosawa, Ryo, Masato Takeuchi, and Junichi Ryu. 2021. "Fourier-Transform Infrared and X-Ray

- Diffraction Analyses of the Hydration Reaction of Pure Magnesium Oxide and Chemically Modified Magnesium Oxide." *RSC Advances* 11(39): 24292–311.
- Ling, Lei et al. 2022. "Recent Advances in Hydrothermal Modification of Calcium Phosphorus Coating on Magnesium Alloy." *Journal of Magnesium and Alloys* 10(1): 62–80. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.05.014>.
- Peng, Feng et al. 2017. "Sealing the Pores of PEO Coating with Mg-Al Layered Double Hydroxide: Enhanced Corrosion Resistance, Cytocompatibility and Drug Delivery Ability." *Scientific Reports* 7(1): 1–12. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-08238-w>.
- Sarian, Murni Nazira et al. 2022. "Potential Bioactive Coating System for High-Performance Absorbable Magnesium Bone Implants." *Bioactive Materials* 12(October 2021): 42–63. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.10.034>.
- Shahin, Nasir, Morteza Shamanian, and Mahshid Kharaziha. 2022. "Electrochemical Behavior of the Double-Layer Diamond-like Carbon/Plasma Electrolytic Oxidation on AZ31 Alloy: A Comparison of Different PEO Interlayers." *Diamond and Related Materials* 130(July): 109405. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109405>.
- Wang, H. M., Z. H. Chen, and L. L. Li. 2010. "Corrosion Resistance and Microstructure Characteristics of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on AZ31 Magnesium Alloy." *Surface Engineering* 26(5): 385–91.
- Wang, Zhihu, Jumei Zhang, Lijing Bai, and Guojun Zhang. 2021. "Effects of Al³⁺ Concentration in Hydrothermal Solution on the Microstructural and Corrosion Resistance Properties of Fabricated MgO Ceramic Layer on AZ31 Magnesium Alloy." *Materials and Corrosion* 72(4): 620–32.
- Zhang, Gen et al. 2023. "In-Situ LDHs Growth on PEO Coatings on AZ31 Magnesium Alloy for Active Protection: Roles of PEO Composition and Conversion Solution." *Journal of Magnesium and Alloys* 11(7): 2376–91. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.09.001>.