

Analisis Sifat Korosif Komposit Magnesium Biodegradabel Mg-xC_{Ap} (x=0, 5%, 10%, dan 15%) untuk Aplikasi Implant Tulang

The Corrosive Properties Analysis of Biodegradable Magnesium Composites Mg-xC_{Ap} (x=0, 5%, 10%, and 15%) for Bone Implant Applications

Ana Karina Bano¹, Ni Nyoman Rupiasih^{1*}, Iwan Setyadi², Mirza Wibisono², Suryadi², I Nyoman Jujur²

¹Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Udayana University, Bali 80361, Indonesia

²Advanced Materials Research Center, BRIN, BJ Habibie Science and Technology (KST) Area, Building 224, South Tangerang, Banten 15314, Indonesia

Email: anabano1530@gmail.com, rupiasih@unud.ac.id, iwan015@brin.go.id, mirz001@brin.go.id, sury011@brin.go.id, inyo002@brin.go.id

Received: 19th November 2025; Revised: 02nd January 2026; Accepted: 03th January 2026

Abstrak - Magnesium (Mg) merupakan material biodegradabel yang menjanjikan untuk aplikasi implan tulang karena kesesuaian sifat mekanik dan biokompatibilitasnya dengan tulang alami. Namun, degradasinya yang terlalu cepat dalam lingkungan fisiologis masih menjadi kendala utama dalam penerapan klinis. Penambahan karbonat apatit (carbonated apatite (C_{Ap})) sebagai fase penguat bioaktif diharapkan mampu meningkatkan ketahanan korosi komposit berbasis Mg melalui pembentukan lapisan permukaan yang lebih stabil. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi sifat korosi komposit Mg-xC_{Ap} dengan variasi kandungan C_{Ap} sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Pengujian korosi dilakukan secara elektrokimia dalam larutan simulated body fluid (SBF) menggunakan metode Open Circuit Potential (OCP), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), dan polarisasi Tafel. Hasil OCP menunjukkan pergeseran potensial ke arah yang lebih positif hingga $-1,87$ V seiring meningkatnya fraksi C_{Ap}, yang mengindikasikan peningkatan kestabilan elektrokimia. Analisis EIS memperlihatkan peningkatan progresif resistansi transfer muatan (R_{ct}), dengan nilai tertinggi sebesar $309,8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ pada komposit Mg-15C_{Ap}, menandakan terbentuknya lapisan permukaan yang lebih protektif terhadap penetrasi ion agresif. Hasil polarisasi Tafel mengonfirmasi penurunan laju korosi yang signifikan, di mana Mg-15C_{Ap} menunjukkan laju korosi terendah sebesar 2,03 mm/tahun. Secara keseluruhan, penambahan C_{Ap} terbukti efektif dalam mengendalikan degradasi Mg dan meningkatkan ketahanan korosi komposit, sehingga berpotensi memperluas aplikasi Mg-C_{Ap} sebagai material implan tulang biodegradabel.

Kata kunci: Magnesium (Mg); karbonat apatite (C_{Ap}); komposit biodegradabel; laju korosi; implan tulang

Abstract - Magnesium (Mg) is a promising biodegradable material for bone implant applications due to its suitability of mechanical properties and biocompatibility with natural bone. However, its rapid degradation in physiological environments remains a major obstacle in clinical applications. The addition of carbonated apatite (C_{Ap}) as a bioactive reinforcing phase is expected to improve the corrosion resistance of Mg-based composites by forming a more stable surface layer. This study aims to evaluate the corrosion properties of Mg-xC_{Ap} composites with variations in C_{Ap} content of 0%, 5%, 10%, and 15%. Corrosion testing was carried out electrochemically in simulated body fluid (SBF) solutions using the Open Circuit Potential (OCP), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), and Tafel polarization methods. The OCP results showed a potential shift towards a more positive direction up to -1.87 V as the C_{Ap} fraction increased, indicating increased electrochemical stability. EIS analysis showed a progressive increase in charge transfer resistance (R_{ct}), with the highest value of $309.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ in the Mg-15C_{Ap} composite, indicating the formation of a more protective surface layer against aggressive ion penetration.

Tafel polarization results confirmed a significant decrease in corrosion rate, with Mg-15CAp showing the lowest corrosion rate of 2.03 mm/year. Overall, the addition of CAp proved effective in controlling Mg degradation and improving the corrosion resistance of the composite, thus potentially expanding the application of Mg-CAp as a biodegradable bone implant material.

Keywords: *Magnesium (Mg); carbonate apatite (CAp); biodegradable composite; corrosion rate; bone implant.*

1. Pendahuluan

Material *biodegradable* mulai banyak dikembangkan sebagai bahan implan karena mampu terurai secara alami di dalam tubuh. Magnesium (Mg) merupakan salah satu material *biodegradable* karena densitas dan modulus elastisitasnya mendekati tulang manusia, serta memiliki biokompabilitas yang baik [1]. Meskipun mempunyai beberapa keunggulan, magnesium masih memiliki kelemahan yaitu laju degradasi yang terlalu cepat di lingkungan fisiologis, dimana dapat menimbulkan pelepasan gas hidrogen berlebihan dan penurunan kekuatan mekanik sebelum jaringan tulang selesai beregenerasi [2]. Oleh sebab itu, penurunan laju degradasi menjadi fokus utama dalam penelitian material berbasis magnesium sebagai implan tulang.

Salah satu upaya yang dilakukan untuk mengatasi kelemahan tersebut adalah dengan memadukan Mg dengan material bioaktif, seperti *carbonate apatite* (CAp). *Carbonate apatite* (CAp) merupakan salah satu material penguat yang banyak diteliti karena merupakan mineral yang secara alami terdapat pada jaringan tulang. CAp memiliki sifat biokompatibel dan osteokonduktif sehingga mampu meningkatkan kemampuan implan berintegrasi dengan jaringan tulang [3]. Selain itu, penambahan CAp dalam komposit diharapkan dapat membantu menstabilkan struktur permukaan magnesium sehingga reaksi korosi dapat diperlambat.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan CAp dalam matriks magnesium terbukti mampu meningkatkan sifat mekanik komposit. Peningkatan fraksi CAp dalam komposit Mg dapat membantu memperbaiki struktur mikro material sehingga ketahanan mekanik terhadap korosi juga semakin baik [4]. Selain itu, penambahan mineral apatite dapat menurunkan laju degradasi di dalam tubuh [5]. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan CAp dapat memberikan lapisan tambahan terhadap proses degradasi sehingga material menjadi lebih stabil di lingkungan fisiologis [6].

Performa korosi material sangat dipengaruhi oleh kondisi elektrolit lingkungan. Keberadaan ion klorida dalam larutan diketahui mampu mempercepat laju korosi magnesium melalui peningkatan reaksi elektrokimia baik pada proses anodik maupun katodik [7]. Oleh karena itu, tanpa adanya penguatan atau modifikasi material, magnesium cenderung mengalami degradasi yang terlalu cepat sehingga kurang sesuai untuk aplikasi medis. Pengembangan komposit Mg-CAp diharapkan mampu mempertahankan integritas mekanik implan selama proses penyembuhan tulang, meskipun material mengalami degradasi secara bertahap [5]. Keberadaan fase kalsium fosfat dalam komposit berperan sebagai penghalang difusi ion agresif, sehingga mampu memperlambat reaksi pelarutan magnesium dan meningkatkan ketahanan korosi material.

Penurunan laju degradasi ini menunjukkan bahwa fase mineral bioaktif tidak hanya meningkatkan keunggulan biologis, tetapi juga memberikan perlindungan terhadap reaksi elektrokimia yang berpotensi mempercepat kerusakan material. Penambahan fase *apatite* dalam komposisi yang tepat, dapat memperbaiki kestabilan permukaan magnesium serta memberikan ketahanan korosi yang lebih baik pada aplikasi implan [8].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada optimasi komposisi komposit Mg-xCAp dengan variasi CAp sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Pengujian dilakukan melalui uji elektrokimia untuk mengevaluasi perilaku korosi, meliputi pengukuran potensial korosi *open circuit potential* (OCP), *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS), dan kurva polarisasi Tafel. Hasil pengujian ini, diharapkan dapat menunjukkan komposisi CAp yang memberikan performa terbaik.

2. Metoda Eksperimen

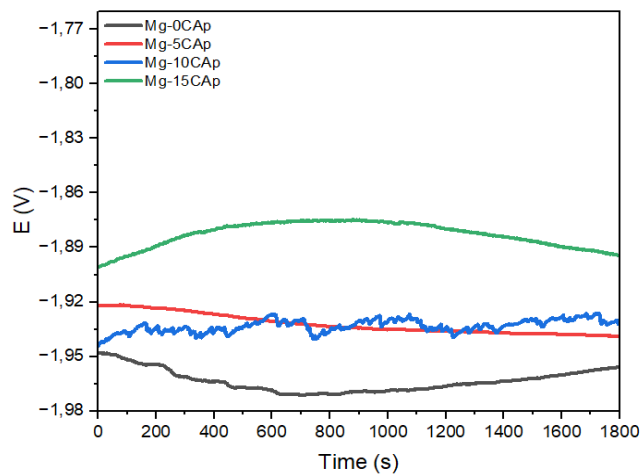
Pada penelitian ini digunakan sampel komposit Mg-xCAp dengan variasi CAp sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%, yang diberi nama Mg-0CAp, Mg-15CAp, Mg-10CAp, dan Mg-15CAp. Sampel-sampel tersebut dikembangkan oleh Pusat Riset Material Maju - Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRMM-BRIN) dalam bentuk *rods* dengan teknik pemadatan hangat dan ekstruksi panas dengan rasio ekstruksi 4 (R4). Sampel kemudian dipotong berbentuk pelet dengan tebal ± 3 mm, disambungkan dengan kawat konduktif, dan

dipasang resin epoksi sehingga hanya permukaan uji yang terekspos. Selanjutnya permukaan sampel di-*grinding* secara bertahap menggunakan kertas amplas dengan *grit* 400 hingga #1000, kemudian di-*polishing* dengan kain beludru dan cairan diapro 3 μm untuk memperoleh permukaan halus dan seragam. Analisis laju korosi dilakukan melalui uji korosi elektrokimia menggunakan potensiostat/galvanostat PARSTAT 4000A dengan sistem tiga elektroda. Sampel Mg-0CAp, Mg-5CAp, Mg-10CAp, dan Mg-15CAp, dengan luas penampang masing-masing (A) = 0,636 cm^2 digunakan sebagai elektroda kerja (WE), untuk elektroda referensi digunakan Ag/AgCl (3,5 M KCl, 0,205 V vs SHE) dan elektroda lawan adalah platinum (CE). Seluruh sampel direndam dalam *simulated body fluid* (SBF) pada suhu ruang dan distabilkan selama 1800 detik untuk memperoleh nilai OCP. Selanjutnya, uji EIS dilakukan menggunakan sinyal AC 10 mV dengan rentang frekuensi 10 mHz –10 kHz dan dianalisis menggunakan *electrical equivalent circuit* (EEC), diikuti dengan pengukuran kurva Tafel untuk mendapatkan nilai laju korosi.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1. Pengujian open circuit potential (OCP)

Untuk mendapatkan informasi terkait dengan kestabilan potensial korosi teradap waktu dari komposit Mg-xCAp telah dilakukan pengujian OCP. Hasil pengujian seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 1



Gambar 1. Kurva OCP dari sampel Mg-0CAp, Mg-5CAp, Mg-10CAp, dan Mg-15CAp.

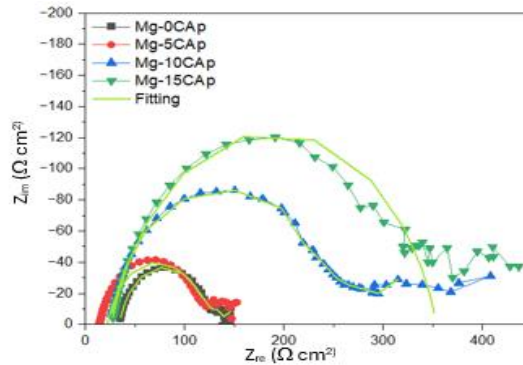
Berdasarkan Gambar 1 dan Tabel 1, seluruh sampel memiliki nilai potensial terbuka (open circuit potential, OCP) yang bersifat negatif, yang merupakan karakteristik khas magnesium dalam lingkungan elektrolit berair. Namun, terdapat tren pergeseran OCP ke arah yang lebih positif seiring dengan bertambahnya komposisi CAp. Sampel Mg-15CAp memiliki rentang potensial ($E_{\text{min}}-E_{\text{max}}$) paling positif (-1,90 hingga -1,87 V), yang menunjukkan bahwa sampel tersebut memiliki stabilitas permukaan terbaik serta kecenderungan aktivitas elektrokimia yang lebih rendah dibandingkan sampel lainnya [9,10]. Pergeseran potensial tersebut mengindikasikan terbentuknya lapisan protektif terhidrasi berupa karbonat-apatit pada permukaan material, yang berperan sebagai penghalang difusi ion agresif dan mampu menghambat reaksi oksidasi magnesium serta menurunkan laju korosi awal. Komposit Mg-CAp pada penelitian ini menunjukkan kecenderungan yang serupa, di mana peningkatan fraksi CAp dapat menurunkan keaktifan elektrokimia magnesium serta menghasilkan potensial korosi yang lebih stabil [9,10].

Tabel 1. Nilai hasil uji OCP.

Sampel	E_{min} (V)	E_{max} (V)
Mg-0CAp	-1,97	-1,94
Mg-5CAp	-1,93	-1,92
Mg-10CAp	-1,94	-1,92
Mg-15CAp	-1,90	-1,87

3.2. Pengujian electrochemical impedance spectroscopy (EIS)

Untuk mengevaluasi respon impedansi sampel Mg-xCAp telah dilakukan uji EIS di dalam larutan SBF. Kurva hasil *fitting* data EIS menggunakan *software* Zviews 4 untuk semua sampel digabungkan dengan menggunakan aplikasi Origin, seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Dari hasil *fitting* kurva EIS, diperoleh nilai Rct (*charge transfer resistance*) seperti tampak pada Tabel 2.



Gambar 2. Kurva EIS dari sampel Mg-0CAp, Mg-5CAp, Mg-10CAp, dan Mg-15CAp.

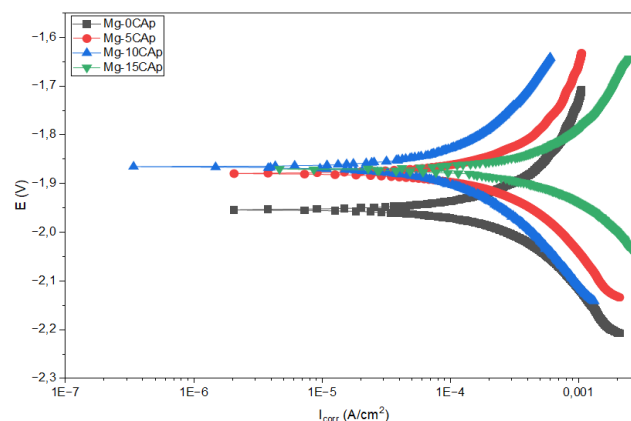
Tabel 2. Nilai hasil *fitting* kurva EIS untuk sampel Mg-0CAp, Mg-5CAp, Mg-10CAp, dan Mg-15CAp.

Sampel	Rct ($\Omega \text{ cm}^2$)
Mg-0CAp	103,3
Mg-5CAp	256,6
Mg-10CAp	272,5
Mg-15CAp	309,8

Tabel 2 menunjukkan nilai Rct berubah dari 103,3 $\Omega \text{ cm}^2$ pada Mg-0CAp menjadi 309,8 $\Omega \text{ cm}^2$ pada Mg-15CAp, yang menandakan bahwa penambahan CAp mampu meningkatkan hambatan perpindahan elektron dan memperlambat reaksi korosi. Nilai Rct yang lebih besar merupakan indikator terbentuknya lapisan pasif dalam menahan transfer muatan selama proses korosi [11]. Keberadaan CAp dalam matriks Mg dapat meningkatkan hambatan elektrokimia dan menambah ketahanan terhadap korosi melalui mekanisme lapisan pasif [12,13].

3.3. Hasil pengujian Tafel

Telah dilakukan pengukuran Tafel untuk mengevaluasi sifat ketahanan sampel terhadap korosi. Gambar 3 menampilkan kurva polarisasi hasil pengujian Tafel, yang merepresentasikan reaksi anodik dan katodik dari setiap sampel komposit Mg-xCAp. Dari analisis kurva Tafel diperoleh nilai laju korosi dalam satuan mm/y seperti yang disajikan pada Tabel 3.



Gambar 3. Kurva Tafel dari sampel Mg-0CAp, Mg-5CAp, Mg-10CAp, dan Mg-15CAp.

Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai laju korosi mengalami penurunan seiring dengan peningkatan fraksi CAp. Penurunan laju korosi pada Mg-xCAp menunjukkan efektivitas CAp dalam membentuk lapisan pasif, yang mana mampu membantu memperlambat laju reaksi anodik dan katodik [5]. Oleh karena itu, komposisi CAp yang lebih tinggi dapat menurunkan densitas arus korosi melalui mekanisme penguatan mikrostruktur serta membantu meningkatkan resistansi permukaan terhadap laju korosi [14-16]. Peningkatan kandungan CAp ini menghasilkan struktur kristal yang lebih reaktif terhadap permukaan Mg [17]. Hal ini, menyebabkan nilai laju korosi menurun pada sampel dengan kandungan CAp yang lebih tinggi. Pada penelitian ini, hasil Tafel menunjukkan bahwa Mg-15CAp merupakan komposisi material komposit yang memiliki laju korosi paling rendah, yaitu 2,0300 mm/y.

Tabel 3. Nilai hasil pengujian Tafel.

Sampel	Laju Korosi (mm/y)
Mg-0CAp	2,5963
Mg-5CAp	2,4508
Mg-10CAp	2,3800
Mg-15CAp	2,0300

4. Kesimpulan

Telah dilakukan penelitian tentang bagaimana pengaruh komposit Mg-xCAp terhadap laju korosi untuk aplikasi implan tulang. Dari hasil uji korosi elektrokimia dapat disimpulkan bahwa komposit Mg-xCAp mampu membantu menurunkan laju korosi. Komposit Mg-15CAp menunjukkan performa yang baik dengan pergeseran nilai potensial ke arah positif dan memiliki nilai R_{ct} tertinggi ($309,8 \Omega \text{ cm}^2$), serta nilai laju korosi yang rendah, yaitu 2,0300 mm/y.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada seluruh staff dosen Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Udayana serta tim Peneliti Kelompok Riset Biokompatibel, Pusat Riset Material Maju, BRIN atas bimbingan yang telah diberikan.

Pustaka

- [1] Liu C, Ren Z, Xu Y, Pang S, Zhao X and Zhao Y 2018 Biodegradable Magnesium Alloys Developed as Bone Repair Materials: A Review *Scanning* **2018** 9216314 1–15 <https://doi.org/10.1155/2018/9216314>
- [2] Witte F, et al 2006 In vivo corrosion of four magnesium alloys and the associated bone response *Biomaterials* **27(17)** 2824–2834
- [3] Rahyussalim A J, Marsetio A F, Kamal A F, Supriadi S, Setyadi I, Pribadi P M, Mubarak W, and Kurniawati T 2021 Synthesis, Structural Characterization, Degradation Rate, and Biocompatibility of Magnesium-Carbonate Apatite (Mg-Co3Ap) Composite and Its Potential as Biodegradable Orthopaedic Implant Base Material *Journal of Nanomaterials* **2021** 615614 1–10 <https://doi.org/10.1155/2021/6615614>
- [4] Setyadi I, Marsetio A F, Kamal A F, Rahyussalim, Supriadi S, and Suharno B 2020 Microstructure and microhardness of carbonate apatite particle-reinforced Mg composite consolidated by warm compaction for biodegradable implant application *Materials Research Express* **7(5)** 056526
- [5] Campo R D, Savoini B, Muñoz A, Monge M A, and Garcés G 2014 Mechanical properties and corrosion behavior of Mg-HAP composites *59 Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* **39** 238–246
- [6] Yang C W, Liu C, Lin D J, Yeh M L, and Lee T M 2017 Hydrothermal treatment and butylphosphonic acid derived self-assembled monolayers for improving the surface chemistry and corrosion resistance of AZ61 magnesium alloy *Scientific Reports* **7** 16219
- [7] Abdo H S, Seikh A H, Mohammed J A, Luqman M, Ragab S A, AND Almotairy S M 2020 Influence of Chloride Ions on Electrochemical Corrosion Behavior of Dual-Phase Steel over Conventional Rebar in Pore Solution *Applied Sciences* **10(13)** 4568

- [8] Sitompul H, Dahlan K, Noviana D, Silalahi M, Sukaryo S G, and Gunanto Y E 2019 Synthesis and Corrosion Test of Magnesium Zinc-5% Hydroxyapatite (MgZn-5% wt.Hap) Biocomposites as a Bone Biodegradable Implant Material *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya* **15(1)** 1–6
- [9] Fitriana M F and Anawati A 2019 Remarkable improvement in corrosion resistance of anodized AZ31 alloy by sealing with beeswax-colophony resin *J. Phys.: Conf. Ser.* **1191** 012032
- [10] Saifullah Mahmud, Mostafizur Rahman, Md Kamruzzaman, Hazera Khatun, Md Osman Ali, Md Monjurul Haque 2023 Recent developments in hydroxyapatite coating on magnesium alloys for clinical applications *Results in Engineering* **17** 101002
- [11] Feliu S 2020 Electrochemical Impedance Spectroscopy for the Measurement of the Corrosion Rate of Magnesium Alloys: Brief Review and Challenges *Metals* **10(6)** 775
- [12] Setyadi I, Pribadi P M, Marsetio A F, Kamal A F, Rahyussalim A J, Suharno B, and Supriadi S 2020 Characteristics Investigation of the Initial Development of Miniplate Made from Composite of Magnesium/Carbonate Apatite Fabricated by Powder Metallurgy Method for Biodegradable Implant Applications *Key Engineering Materials* **833** 194–198
- [13] Asaduzzaman C M, Helal H M, Hossain N, Hossen Z, Arefin K M, and Masud R M 2022 Advances in coatings on Mg alloys and their anti-microbial activity for implant applications *Arabian Journal of Chemistry* **15(11)** 104214
- [14] Setyadi I, Bano A K, Rizky A S N, Wibisono M, Suryadi A, Hidayat A, Adhitya K, Mustika T, Harahap M E, Alam G W, Sah J, Juju I N, and Rupiasih N N 2025 Study of the effect of *anodizing* times on the degradation rate of Mg–5CAp biodegradable composites as bone implants *Journal of Physics: Conference Series* **2980(1)** 012029
- [15] Cui L Y, Gao L, Zhang J C, Tang Z, Fan X L, Liu J C, Chen D C, Zeng R C, Li S Q and Zhi K Q 2021 In vitro corrosion resistance, antibacterial activity and cytocompatibility of a layer-by-layer assembled DNA coating on magnesium alloy *Journal of Magnesium and Alloys* **9(1)** 266–280
- [16] Zhou W, et al 2020 The effects of high-content bioactive ceramic additives on the electrochemical behavior of Mg alloys *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* **31(8)** 66
- [17] Wang Y, et al 2021 Effect of excessive carbonate content in apatite coatings on the corrosion resistance of magnesium alloys *Surface and Coatings Technology* **405** 126651.