



**JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING,
MANUFACTURES, MATERIALS AND ENERGY**

DOI: 10.31289/jmemme.v7i2.10028

Available online <http://ojs.uma.ac.id/index.php/jmemme>

**Pengaruh Waktu Aging Terhadap Struktur Kristal dan Kekerasan
Pada Mg-Zn Sebagai Material Biodegradable**

***Effect of Aging on Crystalline Structure and Violence in Mg-Zn as
Biodegradable Materials***

Ramanda Jiwa Satria Yohanes^{1*}, Derlini², Budiarto¹, Sesmoro Max Yuda¹, Tony
Siagian², Zakir Husin³

¹ Universitas Kristen Indonesia, Indonesia

² Universitas Pembinaan Masyarakat Indonesia, Indonesia

³ Universitas Teuku Umar, Indonesia

Diterima: 07-07-2023

Disetujui: 02-11-2023

Dipublikasikan: 31-12-2023

*Corresponding author: yohanes.ramanda@gmail.com

Abstrak

Kemajuan teknologi dalam menangani kasus patah tulang (fraktur) belakangan ini berfokus pada metode pembuatan implan menggunakan material yang dapat diserap oleh tubuh (biodegradable) dengan syarat memiliki struktur dan kandungan yang menyerupai tulang manusia. Salah satu material yang menyerupai adalah magnesium (Mg) akan tetapi magnesium memiliki kekurangan dimana laju luruhnya tinggi sehingga memerlukan unsur lain sebagai paduan untuk mengurangi laju luruhnya. Dalam penelitian ini ditambahkan Zinc (Zn) yang memberikan manfaat untuk mengurangi laju luruh. Kombinasi Mg-Zn dalam implan dapat mempercepat proses penyembuhan tulang. Optimalisasi parameter untuk membuat paduan berpori Mg-Zn sebagai agen pengembang dengan melakukan variasi waktu kalsinasi 30, 60, dan 150 menit dengan temperatur tetap sintering 225°C. Karakterisasi struktur mikro paduan Mg-Zn dilakukan dengan pengujian XRD (X-ray Diffraction) dan untuk pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Brinell. Hasil dari penelitian ini untuk ukuran kristal berdasarkan grafik cenderung menurun pada saat waktu kalsinasi 60 menit dan kembali naik pada waktu kalsinasi 150 menit. Untuk kerapatan dislokasi dan regangan mikro cenderung meningkat saat waktu kalsinasi 60 menit dan kembali turun pada waktu kalsinasi 150 menit. Sedangkan pengujian kekerasan paduan Mg-Zn semakin lama waktu kalsinasi maka semakin tinggi nilai kekerasannya.

Kata Kunci: Kekerasan; Material Biodegradable; Metalurgi Serbuk; Paduan Mg-Zn; XRD

Abstract

Recent technological advances in treating fractures have focused on methods of making implants using materials that can be absorbed by the body (biodegradable) on condition that they have a structure and content that resembles human bone. One material that resembles is magnesium (Mg), but magnesium has the disadvantage of having a high decay rate, so it requires other elements as alloys to reduce the decay rate. In this research, Zinc (Zn) is added which provides benefits to reduce the rate of decay. The combination of Mg-Zn in the implant can accelerate the bone healing process. Optimization of parameters to make porous Mg-Zn alloy as a developer agent by varying the calcination time of 30, 60, and 150 minutes with a fixed sintering temperature of 225°C. Characterization of the microstructure of Mg-Zn alloy is done by XRD (X-ray Diffraction) testing and for hardness testing is done by the Brinell method. The results of this study for the size of the crystals based on the graph tends to decrease at the time of calcination time 60 minutes and back up at 150 minutes calcination time. For dislocation density and microstrain tend to increase when the calcination time of 60 minutes and back down at 150 minutes calcination time. While testing the hardness of Mg-Zn alloy, the longer the calcination time, the higher the hardness value.

Keywords: Hardness; Biodegradable Material; Powder Metallurgy; Mg-Zn Alloy; XRD

How to Cite: Yohanes, R.J.S. 2023, Pengaruh Waktu Aging Terhadap Struktur Kristal dan Kekerasan Pada Mg-Zn Sebagai Material Biodegradable, JMEMME (Journal of Mechanical Engineering, Manufactures, Materials and Energy), 7 (2): 229-241.

PENDAHULUAN

Perkembangan dunia kedokteran, khususnya dalam penanganan kasus patah tulang, telah menjadi fokus utama dalam upaya meningkatkan kualitas hidup pasien dan mempercepat proses penyembuhan. Saat ini, para ahli medis dan peneliti berusaha menciptakan terobosan terbaru dengan memanfaatkan teknologi dan bahan yang dapat diserap oleh tubuh untuk mengatasi masalah patah tulang [1]. Ketika seseorang mengalami patah tulang, tindakan medis yang paling umum adalah operasi untuk memasang implan tulang. Implan ini terbuat dari material khusus yang dirancang sedemikian rupa agar dapat larut atau diserap oleh tubuh seiring berjalannya waktu. Hal ini memiliki banyak manfaat, karena implan yang tidak perlu diangkat kembali setelah tulang sembuh mengurangi risiko komplikasi dan menghemat biaya perawatan [2]. Implan tulang yang dapat diserap juga membantu memfasilitasi proses penyembuhan. Mereka memungkinkan tulang yang patah untuk menyambung kembali secara alami, sementara implan bertindak sebagai kerangka sementara yang mendukung dan melindungi area patah. Selain itu, implan dapat digunakan untuk menggantikan jaringan tulang yang hilang atau rusak akibat patah, mempercepat proses penyembuhan, dan mengembalikan fungsi tulang secara optimal.

Tulang adalah objek penelitian yang menarik bagi para insinyur, terutama yang bergerak di bidang material, karena strukturnya yang sangat unik dan sifat mekaniknya yang kompleks. Pemahaman mendalam tentang tulang memberikan wawasan yang berharga dalam pengembangan material baru untuk aplikasi medis. Salah satu tantangan utama adalah menciptakan implan tulang yang dapat berintegrasi dengan tubuh, tetapi juga memiliki sifat sementara atau bisa terdegradasi secara alami (*biodegradable*) [3]. Ini penting untuk mengurangi komplikasi yang mungkin timbul dari penggunaan implan permanen. Oleh karena itu, pengembangan material implan yang ramah lingkungan dan sesuai dengan tubuh menjadi fokus penelitian yang mendalam dalam dunia kedokteran dan teknik material.

Material *biodegradable* adalah salah satu inovasi terpenting dalam dunia medis. Material tersebut memiliki kemampuan untuk meluruh secara alami dalam tubuh dan tidak meninggalkan residu berpotensi beracun. Keistimewaan utama dari material ini adalah kemampuannya untuk menghilang tanpa memerlukan operasi kedua, sehingga pasien tidak perlu menjalani prosedur tambahan yang dapat menimbulkan risiko dan biaya tambahan [4]. Implan yang terbuat dari material *biodegradable* telah membawa perubahan signifikan dalam praktek medis. Jenis implan

ini termasuk batang penyangga, pelat, pin, sekrup (bone screw), dan jangkar jahitan untuk sutura. Mereka telah dirancang untuk memfasilitasi proses penyembuhan, menjaga struktur tulang yang patah, dan akhirnya terurai secara alami ketika tulang telah sembuh sepenuhnya. Keamanan dan efektivitas implan *biodegradable* ini telah memperluas pilihan perawatan untuk pasien yang mengalami patah tulang[5].

Proses penuaan, yang merujuk pada tahap perlakuan panas yang menghasilkan perkembangan presipitat, memiliki dampak penting dalam meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan atau komposit. Waktu penuaan juga memegang peranan krusial dalam menentukan modulus elastisitas serta tingkat kekerasan pada komposit magnesium. Fenomena ini adalah inti dari penelitian dan pengembangan di bidang material dan teknik material, serta memberikan wawasan mendalam mengenai sifat mekanik material[6]. Penerapan prinsip-prinsip penuaan yang cermat dalam paduan magnesium adalah aspek kunci dalam upaya mencapai material yang lebih kuat dan tahan lama, yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi teknik dan industri.

Dalam tulang, terdapat beberapa unsur anorganik, termasuk Magnesium, Kalsium, Zinc, Besi, Natrium, dan Fosfor. Magnesium, di antara unsur-unsur ini, memiliki peran yang paling krusial. Magnesium mendukung sirkulasi darah yang sehat, memfasilitasi reaksi enzimatik penting, dan berperan dalam fungsi sistem saraf[7]. Penurunan konsentrasi Magnesium dalam tulang dapat mengakibatkan penurunan kekuatan tulang dan meningkatkan risiko osteoporosis. Sekitar 60% dari total kandungan Magnesium dalam tubuh terdapat dalam tulang[8]. Penggabungan Zinc (Zn) dalam paduan dengan Magnesium dapat meningkatkan ketahanan terhadap deformasi plastis. Kecepatan deformasi plastis ini akan mengalami penurunan dengan peningkatan konsentrasi Zn hingga mencapai 6 wt%. Hal ini memiliki implikasi signifikan dalam pemahaman mekanisme deformasi material paduan magnesium, yang relevan dalam aplikasi teknik dan industri[9], [10].

Magnesium (Mg) merupakan bahan yang menjanjikan sebagai implan ortopedi sementara di dalam tubuh. Ini disebabkan oleh karakteristiknya yang memiliki nilai kepadatan dan kekuatan mendekati tulang, serta sifatnya yang dapat terdegradasi dan biokompatibel[11]–[13]. Namun, baik magnesium murni maupun paduannya memiliki laju degradasi yang relatif cepat dalam tubuh. Magnesium membantu mengendalikan apa yang masuk dan keluar melalui membran sel, mengubah lemak, protein, dan gula menjadi energi, memberikan sinyal saraf sepanjang jalur saraf, serta berperan dalam mengatur pH darah dan keseimbangan cairan tubuh[14]–[16]. Mg memiliki kemampuan untuk terdegradasi secara spontan dalam lingkungan fisiologis. Selain itu,

magnesium juga memainkan peran penting dalam metabolisme manusia sebagai kofaktor untuk banyak enzim[17]. Secara umum, implan berbahan dasar magnesium memiliki beberapa keunggulan, termasuk: (1) Biokompatibilitas yang baik dan kemampuan untuk mendorong pertumbuhan tulang[18], (2) Sifat biodegradable sehingga mengurangi kebutuhan re-operasi, dan (3) Kemiripan sifat mekanik dengan tulang asli. Untuk dapat berfungsi sebagai biomaterial, magnesium dan paduannya harus memenuhi sifat mekanik yang sesuai, daya tahan terhadap korosi yang seimbang dengan pertumbuhan jaringan tulang, dan biokompatibilitas yang baik[19]–[21].

Penambahan unsur Zinc dapat mengurangi laju korosi pada paduan Magnesium. Selain itu, penambahan Zinc dilakukan karena unsur tersebut merupakan unsur yang diperlukan oleh tulang serta dapat diserap oleh tubuh[22]. Zinc berperan dalam lebih dari 90 enzim yang terkait dengan metabolisme karbohidrat dan energi, degradasi/sintesis protein, sintesis asam nukleat, biosintesis heme, transport CO₂ (anhidrase karbonik), serta reaksi-reaksi lainnya[23]–[25]. Porositas dapat dipengaruhi oleh suhu pemanasan yang digunakan selama proses casting. Oleh karena itu, dilakukan penelitian untuk menganalisis pengaruh waktu aging terhadap struktur kristal dan kekerasan paduan Mg-Zn sebagai bahan biodegradable.

Berdasarkan uraian diatas maka tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh variasi waktu aging terhadap struktur kristal pada komposisi unsur Mg-Zn sebagai material biodegradable dan untuk menganalisis pengaruh waktu aging terhadap kekerasan pada komposisi unsur Mg-Zn sebagai material biodegradable.

METODE PENELITIAN

Pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia, Jakarta. Untuk pengujian struktur kristal (XRD), penelitian dilakukan di Pusat Terpadu Laboratorium Universitas Indonesia, sedangkan pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Universitas Kristen Indonesia, Jakarta. Tahapan pengerjaan sampel dimulai dengan persiapan alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini, yaitu serbuk logam Magnesium dan Zink. Magnesium dan Zinc diukur dengan teliti menggunakan timbangan analitik. Selanjutnya, dilakukan proses pengadukan kering (*mixing dry mill*) pada bahan yang telah ditimbang selama 30 menit hingga homogen. Setelah itu, dilakukan proses pemadatan dingin (*cold compaction*) dalam cetakan seperti diperlihatkan pada gambar 1 dengan tekanan sebesar 10 ton/m² selama 5 menit. Setelah sampel berubah menjadi pellet, mereka mengalami proses

disintering dengan suhu 225°C, dengan variasi waktu penahanan (*holding time*) sebesar 30 menit, 60 menit, dan 150 menit dalam alat Sintering seperti diperlihatkan pada gambar 2. Setelah tahapan ini, dilakukan pengujian XRD dan uji kekerasan. Proses sintering ini menyebabkan partikel-partikel menyatu dengan baik, sehingga kepadatan meningkat, dan dalam proses ini terbentuklah batas-batas butir, yang merupakan tahap dari rekristalisasi[26].



Gambar 1. Alat *Die Pressing*



Gambar 2. Alat Sintering

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimen, dengan desain yang disebut "*one-shot case study*". Dalam desain ini, eksperimen melibatkan satu kali perlakuan pada

objek penelitian yang diamati, dicatat, dan didokumentasikan hasilnya. Data hasil perlakuan berupa variasi temperatur sintering dikumpulkan dan dimasukkan ke dalam tabel. Dari sini, analisis data dilakukan untuk mengevaluasi perbedaan hasil variasi waktu sintering terhadap struktur kristal dan kekerasan paduan Mg-Zn. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari serbuk Magnesium (Mg) sebanyak 59,94 gram dan Zinc sebanyak 0,06 gram. Peralatan yang digunakan meliputi mesin pencampur (*Ball Mill*) untuk menghaluskan dan menggiling campuran serbuk, alat cetak sampel dengan dimensi 20mm x 15mm, *Hydraulic Press* untuk menekan serbuk dalam cetakan dengan tekanan sebesar 10 ton, alat *Furnace (Thermoline)* untuk pemanasan mekanis dengan suhu 225°C, timbangan analitik, serta alat XRD untuk menganalisis komposisi kimia sampel. Alat uji XRD diperlihatkan pada gambar 3.



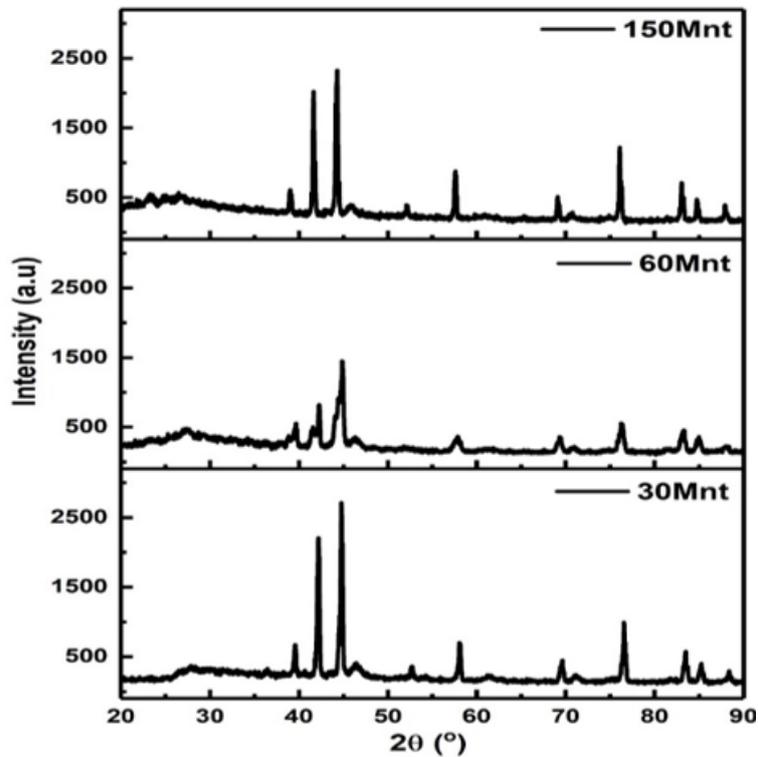
Gambar 3. Alat uji XRD

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang diperoleh dari hasil pengujian paduan Mg-Zn adalah berupa difraktogram seperti diperlihatkan pada gambar 4 yang dapat dianalisa datanya dari tabel yang menjelaskan tentang gambar hasil dari difraktogram pengujian. Tabel 1, 2, dan 3 berisi ukuran kristal, kerapatan dislokasi, dan regangan mikro menggunakan metode difraksi sinar X (XRD) sedangkan untuk data pengujian kekerasan dan kuat tarik menggunakan metode Brinell diperlihatkan pada table 4.

Hasil analisis XRD pada $2\theta = 20^\circ - 90^\circ$ untuk paduan Mg-Zn dengan variasi waktu kalsinasi 30 menit, 60 menit, dan 150 menit dengan temperatur tetap 225°C ditunjukkan pada gambar 4.1 dengan tabel 4.1; 4.2; 4.3. Fasa yang terbentuk dalam paduan Mg-Zn adalah fasa α -Mg ($2\theta 36^\circ$) dan fasa entermetalit Mg-Zn₂ ($2\theta 64^\circ$) fasa α -Mg terbentuk karena Mg sebagai logam dasar dalam paduan. Munculnya fasa intermetalit Mg-Zn ketika penambahan komposisi

Zn lebih besar 4% berat, dimana fasa Mg-Zn ini mengakibatkan struktur permukaan paduan Mg-Zn menjadi rapuh dan ketahanan korosi menjadi berkurang[27].



Gambar 4. Difraktogram Sinar X dari paduan Mg-Zn dengan variasi waktu 30 menit, 60 menit, dan 150 menit

Tabel 1. Data Hasil Uji XRD paduan Mg-Zn sintering 30 Menit

No.	Pos.(2θ)	FWHM,β (rad)	Ukuran Kristal (nm)	Kerapatan Dislokasi (garis/mm ²)	Regangan Mikro Kisi (ε)
1	36,42	0,49	3,01	0,11	0,037
2	39,5	0,26	5,67	0,031	0,018
3	42,1	0,25	5,9	0,028	0,016
4	54,29	0,4	3,68	0,073	0,019
5	62,19	0,1	14,75	0,004	0,004
6	76,5	0,18	8,19	0,014	0,005
7	83,4	0,25	5,9	0,028	0,007
Rata-rata			6,73	0,041	0,015

Gambar 5 mengindikasikan bahwa penambahan waktu sintering menghasilkan pori-pori dengan ukuran kristal yang berkisar antara 3,923 hingga 7,089. Pori-pori yang terbentuk masih berjenis pori tertutup (closed cell), yang artinya pori-pori ini belum memiliki konektivitas dengan pori-pori lain yang telah terbentuk sebelumnya[28]. Keberadaan pori tertutup dapat dilihat secara visual melalui permukaan dasar pada lubang-lubang pori dalam gambar hasil SEM[29]–[33].

Tabel 2. Data Hasil Uji XRD paduan Mg-Zn sintering 60 Menit

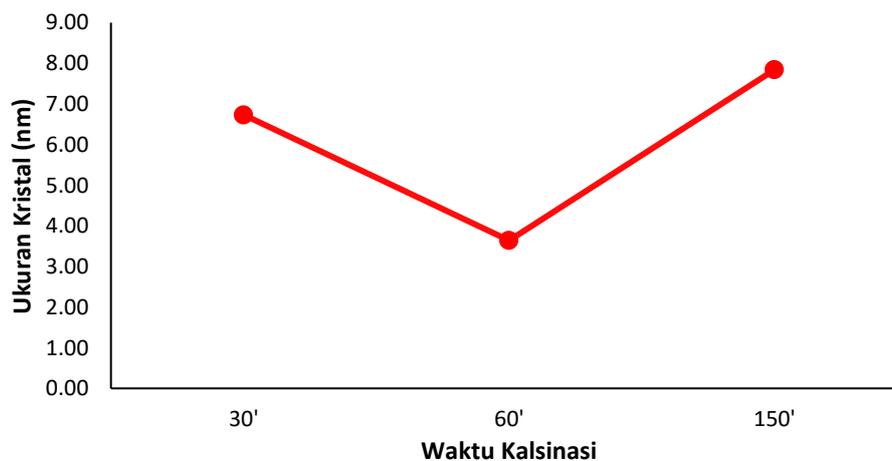
No.	Pos.(2θ)	FWHM,β	Ukuran Kristal	Kerapatan Dislokasi	Regangan Mikro Kisi
		(rad)	(nm)	(garis/mm ²)	(ε)
1	36,19	0,4	3,68	0,073	0,03
2	38,97	0,6	2,45	0,166	0,042
3	42	0,19	7,76	0,016	0,012
4	58	0,74	1,99	0,252	0,033
5	65,61	0,44	3,35	0,089	0,017
6	76	0,47	3,13	0,102	0,014
7	83,04	0,47	3,13	0,102	0,013
Rata-rata			3,64	0,114	0,023

Tabel 3. Data Hasil Uji XRD paduan Mg-Zn sintering 150 Menit

No.	Pos.(2θ)	FWHM,β	Ukuran Kristal	Kerapatan Dislokasi	Regangan Mikro Kisi
		(rad)	(nm)	(garis/mm ²)	(ε)
1	34	0,1	14,75	0,004	0,008
2	39,04	0,29	5,08	0,038	0,02
3	44,23	0,25	5,9	0,028	0,015
4	52,09	0,3	4,91	0,041	0,015
5	65,4	0,2	7,37	0,018	0,007
6	76,07	0,17	8,67	0,013	0,005
7	83,01	0,18	8,19	0,014	0,005
Rata-rata			7,84	0,022	0,011

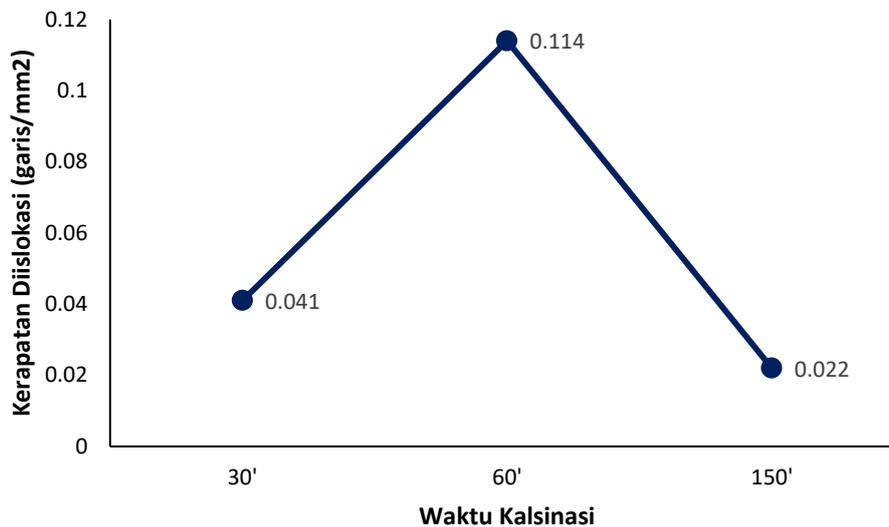
Tabel 4. Data Hasil Uji Kekerasan paduan Mg-Zn yang disinterring

No.	Sampel Uji (Menit)	Hasil Uji Kekerasan Skala Brinell (HB)	Rerata (HB)	Kekuatan Tarik (MPa)
1	30	188, 166, 180	178	630
2	60	196, 184, 207	196	694
3	150	235, 217, 211	221	782



Gambar 5. Grafik Waktu Kalsinasi terhadap Ukuran Kristal

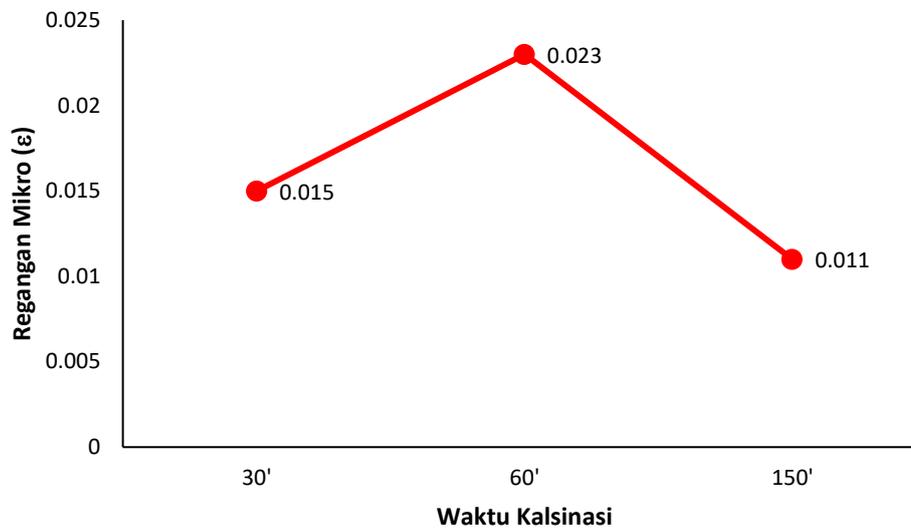
Dalam Gambar 6, dapat dilihat bahwa kerapatan dislokasi pada waktu kalsinasi selama 30 menit adalah sebesar 0,04, meningkat menjadi 0,12 (nilai tertinggi) pada kalsinasi selama 60 menit, dan kemudian mengalami penurunan menjadi 0,02 pada waktu kalsinasi selama 150 menit. Perubahan ini mencerminkan terbentuknya cacat kristal dalam bentuk garis yang paling sedikit pada waktu kalsinasi selama 150 menit pada paduan Mg-Zn. Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa paduan Mg-Zn yang telah dihasilkan memiliki kerapatan dislokasi terendah ketika proses kalsinasi dilakukan selama 150 menit. Fenomena ini menunjukkan peningkatan struktur kristal paduan pada tingkat kalsinasi yang lebih lama. Hal ini berarti waktu kalsinasi yang lebih panjang dapat mengurangi jumlah cacat kristal dalam bentuk garis pada paduan Mg-Zn, yang dapat mempengaruhi sifat dan kekuatan material tersebut. Penelitian ini membantu pemahaman lebih lanjut tentang pengaruh waktu kalsinasi terhadap struktur kristal paduan Mg-Zn.



Gambar 6. Grafik Waktu Kalsinasi terhadap Kerapatan Dislokasi

Dalam Gambar 7, tampak bahwa regangan mikro (ϵ) pada waktu kalsinasi selama 30 menit adalah sebesar 0,015, meningkat menjadi 0,025 (nilai tertinggi) pada waktu kalsinasi selama 60 menit, dan kemudian kembali menurun menjadi 0,01 pada waktu kalsinasi selama 150 menit. Hasil ini menggambarkan bahwa regangan mikro dan kerapatan dislokasi dalam paduan ini secara signifikan dipengaruhi oleh waktu kalsinasi yang diterapkan. Peningkatan regangan mikro seiring dengan peningkatan waktu kalsinasi mencerminkan perubahan yang signifikan dalam struktur kristal paduan. Hal ini menunjukkan bahwa kerapatan dislokasi dan regangan mikro (ϵ) merupakan hasil dari efek gabungan dari proses kalsinasi yang diaplikasikan pada paduan ini. Dengan demikian, waktu kalsinasi yang lebih lama memiliki potensi untuk memengaruhi secara

positif atau negatif karakteristik mekanik dan struktur paduan Mg-Zn, dan hal ini memiliki implikasi penting dalam pemahaman lebih mendalam tentang proses dan sifat material tersebut.



Gambar 7. Grafik Waktu Kalsinasi terhadap Regangan Mikro

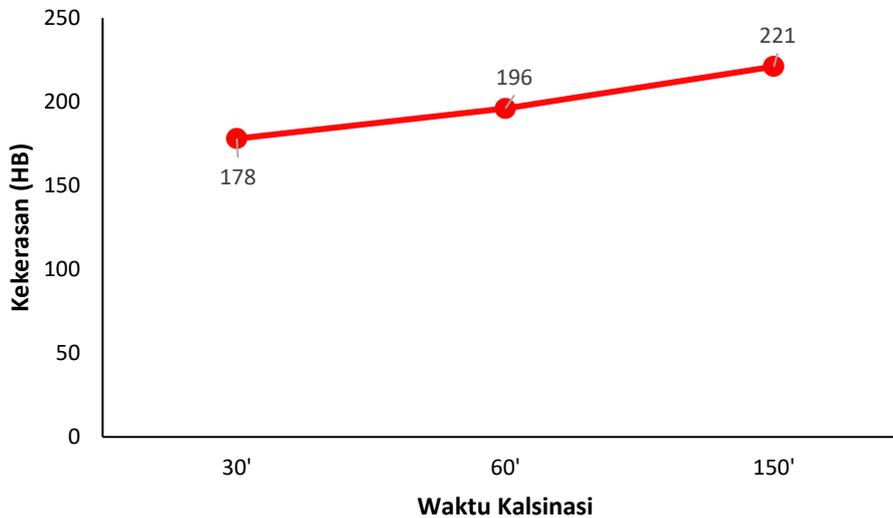
Tabel 5 memperlihatkan hasil pengujian kekerasan Brinell dan kekuatan tarik paduan Mg-Zn. Hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu kalsinasi berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan kekuatan paduan Mg-Zn. Sampel dengan waktu kalsinasi 150 menit memiliki kekerasan Brinell dan kekuatan tarik tertinggi, yaitu 221 HB dan 782 MPa, menunjukkan kualitas material yang lebih baik. Sementara itu, sampel dengan waktu kalsinasi 60 menit memiliki kekerasan Brinell sebesar 196 HB dan kekuatan tarik sebesar 694 MPa, sedangkan sampel dengan waktu kalsinasi 30 menit memiliki kekerasan Brinell 178 HB dan kekuatan tarik 630 MPa. Dari temuan ini, dapat disimpulkan bahwa waktu kalsinasi adalah faktor kunci dalam pembentukan sifat mekanik paduan Mg-Zn. Waktu kalsinasi yang lebih lama menghasilkan material dengan kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi, sehingga pemilihan waktu kalsinasi yang tepat sangat penting dalam pengembangan dan produksi material dengan kualitas yang diinginkan.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kekerasan dan Kekuatan Tarik (BRINELL)

No.	Sampel Uji (Menit)	Hasil Uji Kekerasan Skala Brinell (HB)	Rerata (HB)	Kekuatan Tarik (MPa)
1	30	188, 166, 180	178	630
2	60	196, 184, 207	196	694
3	150	235, 217, 211	221	782

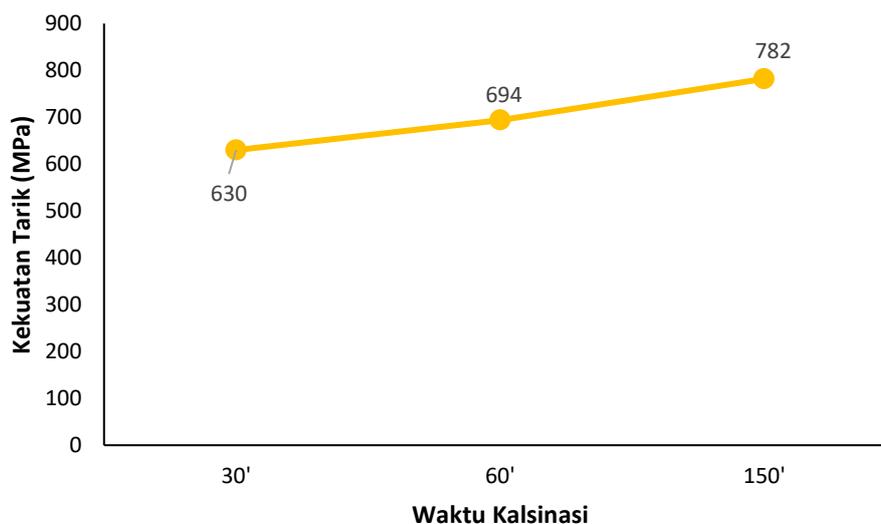
Gambar 8 menunjukkan nilai kekerasan meningkat dengan bertambahnya waktu kalsinasi hal ini mungkin disebabkan oleh karakteristik yang melekat pada efek waktu kalsinasi. Waktu

kalsinasi efektif yang menghasilkan pengurangan ukuran kristal yang menyebabkan peningkatan kekerasan. Selain itu sampel paduan Mg-Zn yang dihasilkan akan kurang padat ditunjukkan dengan nilai kekerasan yang rendah. Nilai kekerasan tertinggi pada paduan Mg-Zn disebabkan karena telah terbentuknya fasa entermetalit Mg-Zn₂ yang dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 8. Grafik Kekerasan paduan Mg-Zn

Gambar 9 memperlihatkan nilai kuat tarik yang meningkat dengan bertambahnya waktu kalsinasi, hal ini mungkin disebabkan oleh karakteristik yang melekat pada efek waktu kalsinasi. Waktu kalsinasi efektif yang menghasilkan pengurangan ukuran kristal yang menyebabkan peningkatan kuat tarik. Selain itu sampel paduan Mg-Zn yang dihasilkan akan kurang padat ditunjukkan dengan nilai kuat tarik yang rendah. Nilai kuat tarik tertinggi pada paduan Mg-Zn disebabkan telah terbentuknya fasa entermetalit Mg-Zn₂ yang dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 9. Grafik Kekuatan Tarik paduan Mg-Zn

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan pembahasan yang telah diuraikan, kesimpulan yang dapat diambil adalah bahwa penambahan waktu kalsinasi pada paduan Mg-Zn mempengaruhi ukuran kristal pori, dengan ukuran terkecil 3,923 dan terbesar 7,089. Selain itu, nilai kekerasan dan kekuatan tarik paduan juga meningkat seiring dengan peningkatan waktu kalsinasi. Hal ini disebabkan oleh karakteristik yang terkait dengan efek waktu kalsinasi, yang berperan penting dalam pembentukan sifat mekanik paduan tersebut. Temuan ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan material dengan kualitas yang optimal.

REFERENSI

- [1] H. S. Brar, M. O. Platt, M. Sarntinoranont, P. I. Martin, and M. V. Manuel, "Magnesium as a biodegradable and bioabsorbable material for medical implants," *Biomedical Materials and Devices*, vol. 61, no. 1, pp. 31–34, 2009.
- [2] K. Munir, J. Lin, C. Wen, P. F. A. Wright, and Y. Li, "Mechanical, corrosion, and biocompatibility properties of Mg-Zr-Sr-Sc alloys for biodegradable implant applications," *Acta Biomater*, vol. 102, no. 1, pp. 493–507, 2020.
- [3] M. J. Olszta *et al.*, "Bone structure and formation: A new perspective," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 58, no. 3–5, pp. 77–116, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.mser.2007.05.001.
- [4] D. VOJTĚCH, J. KUBÁSEK, J. ČAPEK, and I. POSPÍŠILOVÁ, "Magnesium, Zinc and Iron Alloys for Medical Applications in Biodegradable Implants," *Metal*, vol. 21, no. 2, pp. 23–30, 2014.
- [5] M. Salahshoor and Y. Guo, "Biodegradable Orthopedic Magnesium-Calcium (MgCa) Alloys, Processing, and Corrosion Performance," *Materials*, vol. 5, no. 12, pp. 135–155, Jan. 2012, doi: 10.3390/ma5010135.
- [6] A. Reyes, E. Bedolla, R. Perez, and A. Contreras, "Effect of heat treatment on the mechanical and microstructural characterization of Mg-AZ91E/TiC composites," *Compos Interfaces*, vol. 24, no. 6, pp. 593–609, Jul. 2017, doi: 10.1080/09276440.2017.1248201.
- [7] I. Antoniac and D. Laptoiu, "Magnesium Alloys – Current Orthopedic Application," *Revista de Ortopedie*, vol. 20, no. 4, pp. 44–54, 2010.
- [8] S. Castiglioni, A. Cazzaniga, W. Albisetti, and J. Maier, "Magnesium and Osteoporosis: Current State of Knowledge and Future Research Directions," *Nutrients*, vol. 5, no. 8, pp. 3022–3033, Jul. 2013, doi: 10.3390/nu5083022.
- [9] M. Gupta and S. Ling, *Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites*. 2011.
- [10] S. Cai, T. Lei, N. Li, and F. Feng, "Effects of Zn on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Mg-Zn alloys," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 32, no. 8, pp. 2570–2577, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.msec.2012.07.042.
- [11] M. P. Staiger, A. M. Pietak, J. Huadmai, and G. Dias, "Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review," *Biomaterials*, vol. 27, no. 9, pp. 1728–1734, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.biomaterials.2005.10.003.
- [12] A. Atrens, M. Liu, and N. I. Z. Abidin, "Corrosion mechanism applicable to biodegradable magnesium implants," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 176, no. 20, pp. 1609–1636, 2011.
- [13] M. Y. Yuhazri, A. J. Zulfikar, and A. Ginting, "Fiber Reinforced Polymer Composite as a Strengthening of Concrete Structures: A Review," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1003, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/1003/1/012135.
- [14] B. Jensen, *Terapi Jus: Menuju Hidup Sehat dan Panjang Umur*, 2nd ed. Jakarta Bhuana Ilmu Populer, 2004.

- [15] A. J. Zulfikar, D. A. A. Ritonga, S. Pranoto, F. A. K. Nasution, Z. Arif, and J. Junaidi, "Analisis Kekuatan Mekanik Komposit Polimer Diperkuat Serbuk Kulit Kerang," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 6, no. 1, pp. 30-40, 2023.
- [16] A. J. Zulfikar, M. Y. R. Siahaan, and R. B. Syahputra, "Analisis Signifikansi Roda Skateboard Berbahan Komposit Serbuk Batang Pisang Terhadap Perfoma Kecepatan Dengan Metode Anova," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 4, no. 2, pp. 83-90, 2021.
- [17] A. C. Hänzi, I. Gerber, M. Schinhammer, J. F. Löffler, and P. J. Uggowitzer, "On the in vitro and in vivo degradation performance and biological response of new biodegradable Mg-Y-Zn alloys☆," *Acta Biomater*, vol. 6, no. 5, pp. 1824-1833, May 2010, doi: 10.1016/j.actbio.2009.10.008.
- [18] F. Witte, "The history of biodegradable magnesium implants: A review☆," *Acta Biomater*, vol. 6, no. 5, pp. 1680-1692, May 2010, doi: 10.1016/j.actbio.2010.02.028.
- [19] F. P. Lestari, I. Kartika, A. L. Juwono, and Anawati, "Kajian Komposit Berbasis Paduan Logam Magnesium Berpenguat Keramik untuk Aplikasi Ortopedi," *Teknik*, vol. 43, no. 3, pp. 236-253, 2022.
- [20] N. Hidayat, A. J. Zulfikar, and M. Y. R. Siahaan, "Analisis Kekuatan Tekan Struktur Beton Kolom Silinder Diperkuat Komposit Laminat Hibrid Jute E-glass Epoksi Eksperimental dan ANOVA," *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING BUILDING AND TRANSPORTATION*, vol. 6, no. 1, pp. 37-44, 2022.
- [21] D. Alamsyah, A. J. Zulfikar, M. Yusuf, and R. Siahaan, "Optimasi kekuatan tekan beton kolom silinder diperkuat selubung komposit laminat jute dengan metode anova," *Jcebt*, vol. 6, no. 1, pp. 30-36, 2022, [Online]. Available: <http://ojs.uma.ac.id/index.php/jcebt>
- [22] Y. Zheng, "Mg-Ca-Based Alloy System for Biomedical Application," in *Magnesium Alloys as Degradable Biomaterials*, 1st ed., CRC Press, 2015, pp. 56-96.
- [23] S. Almatsier, *Prinsip Dasar Ilmu Gizi*, 1st ed. Jakarta: Gramedia, 2001.
- [24] D. Wang *et al.*, "Tuning layer thickness and layer arrangement in a GdMnO₃ and GdMnO₃-MoSe₂ bi-layer absorber to cover the S, C, and X band frequency range," *Surfaces and Interfaces*, vol. 36, no. 1, p. 102507, 2023.
- [25] M. I. Tambusay, A. J. Zulfikar, and I. Iswandi, "Analisis Metode Split Tensile Test Komposit Laminat Hibrid Jute E-Glass Akibat Beban Tarik Beton Kolom Silinder," *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, vol. 1, no. 2, pp. 45-54, 2022.
- [26] M. S. Anwar, "Pengaruh Serbuk Nikel dan Waktu Sintering terhadap Induksi Remanen Magnetik dan Kekerasan pada Nickel - Iron Soft Magnetic Alloys," Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, 2007.
- [27] C. Suryanarayana, "Mechanical alloying and milling," *Prog Mater Sci*, vol. 46, no. 1-2, pp. 1-184, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0079-6425(99)00010-9.
- [28] H. F. Haris and Budiarto, "Pengaruh Waktu Tempering Terhadap Struktur Kristal, Kekerasan, dan Kuat Tarik Pada Baja VCN 150," *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, vol. 7, no. 2, Jun. 2023, doi: 10.31289/jmemme.v7i2.9472.
- [29] T. Li, Y. He, H. Zhang, and X. Wang, "Microstructure, mechanical property and in vitro biocorrosion behavior of single-phase biodegradable Mg-1.5Zn-0.6Zr alloy," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 2, no. 2, pp. 181-189, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.jma.2014.05.006.
- [30] B. Budiarto, D. Antonius, and B. A. Putra, "Analisis Pengaruh Waktu Artificial Age Terhadap Kekerasan, Densitas Dan Struktur Kristal Paduan Alumunium (7075) Untuk Bahan Sirip Roket," *Jurnal Kajian Ilmiah*, vol. 20, no. 1, pp. 13-28, Jan. 2020, doi: 10.31599/jki.v20i1.67.
- [31] D. Derlini and A. J. Zulfikar, "Penyelidikan Kegagalan pada Alat Pemisah Karet Alam Jenis LRH 410," *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, vol. 1, no. 3, pp. 51-61, 2022.
- [32] A. J. Zulfikar, "The Flexural Strength of Artificial Laminate Composite Boards made from Banana Stems," *Budapest International Research in Exact Sciences (BirEx) Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 334-340, 2020.
- [33] D. A. Siregar and A. J. Zulfikar, "Analisis Kekuatan Tekan Selubung Komposit Laminat E-glass pada Beton Kolom Silinder dengan Metode Vacuum Bagging," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 5, no. 1, pp. 20-25, 2022.