

ANALISA MIKROSTRUKTUR DAN KEKERASAN PADUAN Mg-2Zn-1Mn UNTUK APLIKASI IMPLAN TERSERAP TUBUH

MICROSTRUCTURE AND HARDNESS ANALYSIS OF Mg-2Zn-1Mn ALLOY FOR BIOABSORBABLE IMPLANT APPLICATION

Aldi Firmanto⁽¹⁾, Andril Arafat⁽²⁾, Eko Indrawan⁽³⁾, Budi Syahri⁽⁴⁾

^{(1), (2), (3), (4)}Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

Kampus Air Tawar, Padang 25131, Indonesia

aldifirmanto47@gmail.com

arafat@ft.unp.ac.id

ekoindrawan@ft.unp.ac.id

budisyahri@ft.unp.ac.id

Abstrak

Kasus patah tulang sering terjadi, baik itu karena kecelakaan kerja, kecelakaan pengendara, terjatuh atau penyakit. Maraknya kejadian patah tulang ini memicu pentingnya sebuah implan tulang yang lebih baik untuk perawatan. Sebagian besar patah tulang ini terlalu rumit untuk diatasi dengan perawatan medis *eksternal*, oleh karena itu patah tulang tersebut harus diperbaiki melalui pembedahan dengan implan yaitu implan terserap tubuh, salah satu bahan implan terserap tubuh yang direkomendasikan adalah magnesium. Maka dari itu karena magnesium murni tidak memiliki kekuatan mekanis yang baik, Sehingga magnesium dipadukan dengan seng dan mangan dengan persentase yang sesuai mempunyai kelebihan dalam sifat-sifat mekanis maupun biologis untuk menutupi kekurangan tersebut. Dimana peneliti sebelumnya telah membuat paduan Mg-2Zn-1Mn dengan proses pengecoran logam (*metal casting*). Sampel berupa *as-cast* ini perlu dilakukan proses perlakuan panas lanjutan yaitu proses anil (*annealing*) untuk menghilangkan tegangan sisa dan memperbaiki struktur partikelnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh temperatur proses *annealing* terhadap karakteristik paduan khususnya pada mikrostruktur dan nilai kekerasannya. Metode penelitian ini dilakukan mulai dari proses *annealing* dilakukan pada temperatur 320°, dan 340°C selama 120 menit dan dilakukan pendinginan dalam tungku selanjutnya dilakukan pengujian mikrostruktur dan kekerasan *vickers*. Hasil dari proses *annealing* ini dilakukan untuk melihat ukuran butir dan nilai kekerasan, dari perbandingan tiga specimen, hasil mikrostruktur terlihat bahwa ukuran butir terkecil rata-rata sebesar 1.081µm, dan kekerasan tertinggi rata-rata sebesar 50,2 HV yaitu pada temperatur *annealing* 340°C. Hasil dari penelitian ini diharapkan bisa dilanjutkan sehingga menjawab keperluan implan terserap tubuh.

Kata Kunci: *Bioabsorbable Implant, Annealing, Microvickers, Mg-2Zn-1Mn, Microstructure*

Abstract

Fractures are common, be it due to work accidents, motorist accidents, falls or illnesses. The prevalence of these fractures has triggered the need for a better bone implant for treatment. Most of these fractures are too complicated to be treated with external medical treatment, therefore they must be surgically repaired with an implant i.e. a bio-absorbable implant, one of the recommended bio-absorbable implant materials is magnesium. Therefore, because pure magnesium does not have good mechanical strength, so magnesium combined with zinc and manganese with the appropriate percentage has advantages in mechanical and biological properties to make up for these deficiencies. Where previous researchers have made Mg-2Zn-1Mn alloy with metal casting process. Samples in the form of *as-cast* need to be done further heat treatment process, namely annealing process to eliminate residual stress and improve the particle structure. The purpose of this study is to determine the effect of annealing process temperature on the characteristics of the alloy, especially on its microstructure and hardness value. This research method is carried out starting from the annealing process carried out at a temperature of 320°, and 340°C for 120 minutes and cooling in the furnace and then testing the microstructure and Vickers hardness. The results of this annealing process were carried out to see the grain size and hardness values, from the comparison of the three specimens, the microstructure results showed that the smallest grain size averaged 1,081µm, and the highest hardness averaged 50.2 HV at 340°C annealing temperature. The results of this research are expected to be continued so as to answer the needs of bio-absorbed implants.

Keywords: *Bioabsorbable Implant, Annealing, Microvickers, Mg-2Zn-1Mn, Microstructure*

I. Pendahuluan

Kasus patah tulang sering terjadi, baik itu karena kecelakaan kerja, kecelakaan pengendara, terjatuh atau penyakit, maraknya kejadian patah tulang ini memicu pentingnya sebuah implan tulang yang lebih baik untuk perawatan. Sebagian besar patah tulang ini terlalu rumit untuk diatasi dengan perawatan medis eksternal, oleh karena itu patah tulang tersebut harus diperbaiki melalui pembedahan dengan implan (Kamrani & Fleck, 2019).

Pengobatan patah tulang biasanya dilakukan dengan pemasangan pen tulang. Pada jangka waktu tertentu ketika tulang sudah tersambung dengan baik maka pen tulang ini akan dibuka kembali melalui operasi yang dilakukan kepada pasien. Kelemahannya ada pada proses operasi kedua ketika pembukaan pen itu dimana terkadang pasien tersebut dalam kondisi menderita penyakit lain ataupun sudah pada masa lansia yang dapat mengakibatkan timbulnya penyakit baru dan memperlama proses penyembuhan ataupun dengan ekonomi yang sulit (Kamrani & Fleck, 2019)

Oleh karena itu, efisiensi dan kualitas pengobatan patah tulang penting bagi pasien dan pada saat yang sama, merupakan prioritas bagi dokter secara umum bagi sistem kesehatan dan dari sudut pandang ekonomi (Tsakiris et al., 2021). Namun dengan kemajuan keilmuan saat sekarang ini dunia ortopedi telah mengembangkan bahan implan yang dapat luruh dalam tubuh sehingga langsung menyatu dalam tubuh tanpa diperlukan operasi untuk mengangkatnya kembali (Tsakiris et al., 2021). Penelitian terkait dengan bahan *bioabsorbable* ini telah banyak dilakukan dengan bahan paduan berbasis besi (Fe), magnesium (Mg), dan seng (Zn) (Heath, 2019).; (Zhao et al., 2022). (Xing et al., 2022). (Dinata & Yasa, 2021), besi menunjukkan kelebihan dalam kekuatan mekanis yang baik dari pada magnesium dan seng, tetapi memiliki laju korosi yang lambat.

Pada penelitian ini terdapat 3 jenis logam dasar *bioabsorbable* yang direkomendasikan yakni magnesium, seng dan mangan. Unsur yang terpenting untuk nutrisi pada tulang adalah magnesium (Mg) sebagai bahan struktur paling ringan, yang berperan dalam meningkatkan aliran darah, yang tepat untuk aplikasi implan terserap tubuh, bermanfaat dalam penyerapan atau jika kadarnya berlebih dapat dikeluarkan melalui urin. Penambahan seng (Zn) pada matriks magnesium dapat meningkatkan sifat mekaniknya (Simons et al., 2022). Sementara penambahan paduan dengan unsur mangan (Mn), berbagai penelitian telah menjelaskan bahwa unsur Mn berpotensi sebagai unsur penyeimbang yang berpengaruh pada sifat mekaniknya dan sangat membantu dalam penyempurnaan ukuran butir (Figueira et al., 2021).

Paduan dari ketiga unsur tersebut perlu dilakukan proses anil setelah dilakukan peleburan paduan untuk

mendapatkan karakteristik bahan yang lebih baik yang bertujuan untuk mengubah sifat fisik dan sifat mekanis bahan sesuai dengan yang diinginkan (Fantria et al., 2019).

Penelitian dari (Setiawan & Basuki, 2019) yang menemukan bahwa paduan Mg-4Zn-0.2Ca yang telah melalui proses *annealing* terjadi perubahan mikrostruktur yakni ukuran butir menjadi lebih kecil dibandingkan *as-cast* spesimen tanpa *heat treatment*. Selanjutnya penelitian dari (Li dkk., 2020) menemukan bahwa Mg-2Zn-0,46Ynd setelah selesai *annealing* pada suhu 330°C selama 1 jam rata-rata ukuran butirnya menjadi 8,4µm sedangkan yang dilakukan *treatment annealing* dengan suhu 350°C selama 30 menit ukuran butirnya menjadi 7,1µm.

Disisi lain tingkat kekerasan dari paduan Mg yang telah digabungkan dengan bahan lain yakni (Yunpeng Hu et al., 2022) yang meneliti tentang paduan magnesium dan seng, hasilnya adalah kekerasan ketiga paduan spesimen akan meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan seng (Zn).

Penelitian Ashari et al., (2021) menjelaskan bahwa Mg murni memiliki tingkat kekerasan 40 HV. Maka dengan adanya Zn dalam paduan Mg akan meningkatkan nilai kekerasannya. Dikarenakan pada penelitian sebelumnya itu melakukan pengujian untuk pembuatan *casting* yang mana pada proses *casting* masih terdapat celah udara atau yang dikenal dengan cacat cor maka perlu dilakukan pengujian *annealing* untuk meratakan dan mengurangi bahkan menghilangkan cacat cor tersebut untuk membuktikan bagaimana pengaruh dari proses *annealing* ini dengan variasi suhu *annealing* 320°C dan 340°C untuk mendapatkan mikrostruktur dan kekerasan yang lebih baik dari pada spesimen *as-cast*.

II. Metode Penelitian

A. Proses Annealing

Sampel paduan Mg-2Zn-1Mn berupa batangan (*rod*) yang berdiameter 15mm dan panjang 100mm. Sampel *as-cast* dipotong menjadi spesimen dengan ketebalan 7mm sebanyak tiga buah spesimen, satu untuk spesimen kontrol (*as-cast*), satu untuk *annealing* pada suhu 320°C dan satunya lagi untuk *annealing* pada suhu 340°C. Tiga buah spesimen lainnya juga disiapkan untuk pengujian nilai kekerasannya. Prosedur dalam pengujian ini diadaptasi dari prosedur yang dilakukan oleh (Peng et al., 2015a) dan (Miao et al., 2019). Spesimen dipanaskan dalam tungku listrik (*muffle furnace*) merek Hofmann tipe 1200°C (Austria) *as-cast* sampel pada suhu 320°C dan 340°C selama 120 menit lalu dibiarkan dingin didalam tungku sampai suhu ruangan.

B. Mikrostruktur

Spesimen yang telah dilakukan proses *annealing* dilanjutkan dengan proses *mounting* menggunakan resin dan *hardener* berdiameter 20mm dengan tebal 15mm. Permukaan spesimen dihaluskan dengan menggunakan mesin poles dengan tahapan *grinding* dan *polishing* (Future-tech FTP-2M, Jepang) menggunakan kertas amplas mulai dari grit #800, #1500, #2000. Setelah permukaan rata dan halus selanjutnya dilakukan proses etsa sesuai ASTM Standar E 407-99 (ASTM Standard E 407– 99, 1999) dengan komposisi larutan nital 5ml HNO₃ dalam 95 ml ethanol 95% yang bertujuan untuk memperjelas batas butir pada mikrostruktur. Mikrostruktur spesimen dianalisa menggunakan optikal mikroskop (Carlzeiss Primotech D/A pol, Jerman) dengan pembesaran 100x untuk mendapatkan gambar mikrostruktur dari masing-masing spesimen yang selanjutnya dianalisa ukuran butir menggunakan *software image-J*.

C. Kekerasan

Penelitian ini dilakukan dengan metode kuantitatif dengan eksperimen terhadap paduan Mg-2Zn-1Mn, setelah dilakukan proses *annealing* selanjutnya dilakukan persiapan yaitu pencetakan specimen dengan resin, lalu dilanjutkan dengan proses *grinding* dan *polishing* dan dirasa sudah rata dan bersih selanjutnya dikarakterisasi dengan pengujian nilai kekerasan paduan Mg-2Zn-1Mn spesimen uji menggunakan alat uji kekerasan bahan dengan metode *microvickers hardness test* (Future-tech FM800, Jepang). Maka dilakukan pengujian kekerasan yang dilakukan dengan 3 titik lokasi yang berbeda pada masing-masing spesimen dengan beban 500gf dan waktu 7 detik penahanan sesuai dengan panduan ASTM E384-17 (ASTM Standard E384–17, 2017) yang juga sesuai dengan penelitian dari (Alawad et al., 2022).



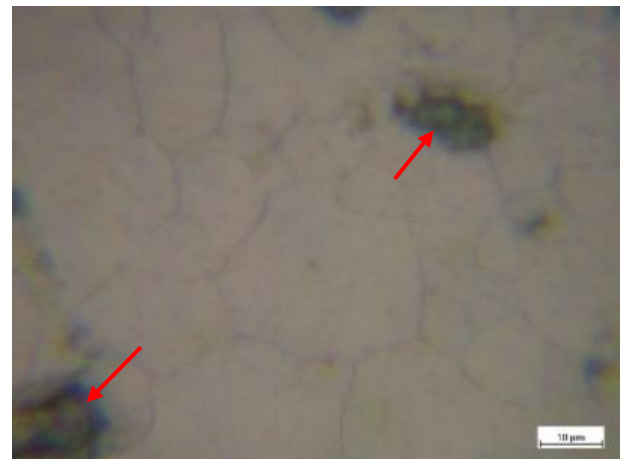
Gambar 1. Spesimen uji

III. Hasil dan Pembahasan

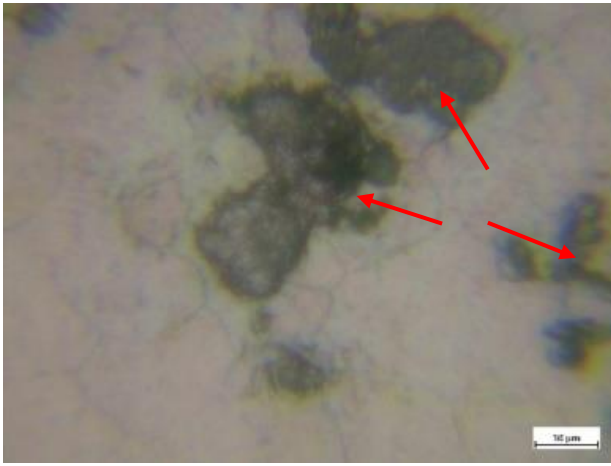
A. Hasil Pengujian Mikrostruktur

Mikrostruktur adalah suatu bentuk susunan struktur yang terbentuk pada material logam dan ukurannya sangat kecil dan tidak beraturan, bentuknya berbeda-beda tergantung pada unsur dan proses yang dialami pada saat pembentukannya. Gambaran dari kumpulan butir yang dapat diamati melalui teknik metalografi. Hasil yang diperoleh dari pengujian mikrostruktur dapat dilihat pada gambar 2, menunjukkan hasil mikrostruktur paduan Mg-2Zn-1Mn yang telah dietsa menggunakan optikal mikroskop. Gambar 2.a adalah mikrostruktur spesimen *as-cast* dengan ukuran butir yang terlihat relatif lebih besar dibandingkan spesimen yang telah dilakukan proses *annealing* pada temperatur 320 °C (Gambar 2.b) dan 340 °C (Gambar 2.c). Terdapat juga beberapa bagian butir yang terkorosi karena faktor proses etsa seperti yang ditunjukkan panah warna merah.

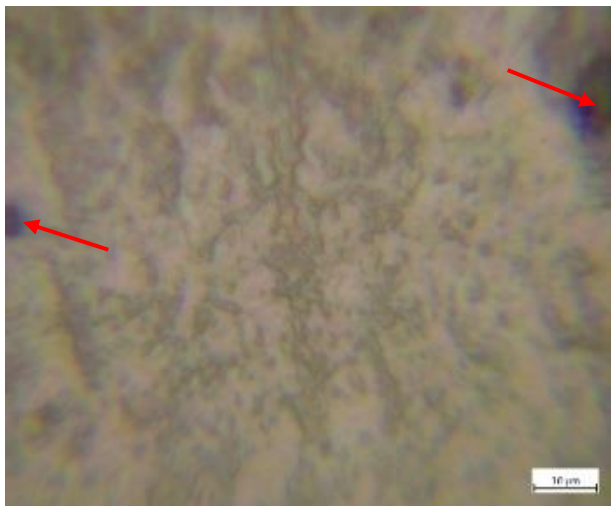
Pada Gambar 2.b ukuran butir paduan mulai relatif kecil dibanding spesimen *as-cast* dan Gambar 2.c menunjukkan perubahan butir yang lebih signifikan dengan ukuran yang lebih kecil, rapat dan padat. Perubahan ukuran butir ini diakibatkan oleh efek temperatur selama proses *annealing* yang membuat partikel paduan menjadi lebih kecil dan rapat. Hasil mikrostruktur dengan proses *annealing* ini juga dilaporkan oleh (Sivakesavam & Prasad, 2003) dan (Peng et al., 2015). Untuk menganalisa ukuran butir ini agar lebih detail dan valid secara kuantitatif, digunakan *software image-J* seperti pada Gambar 3.



(a)

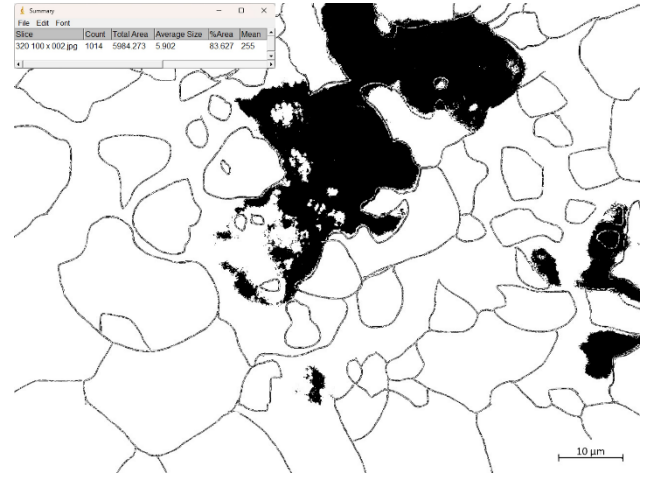


(b)

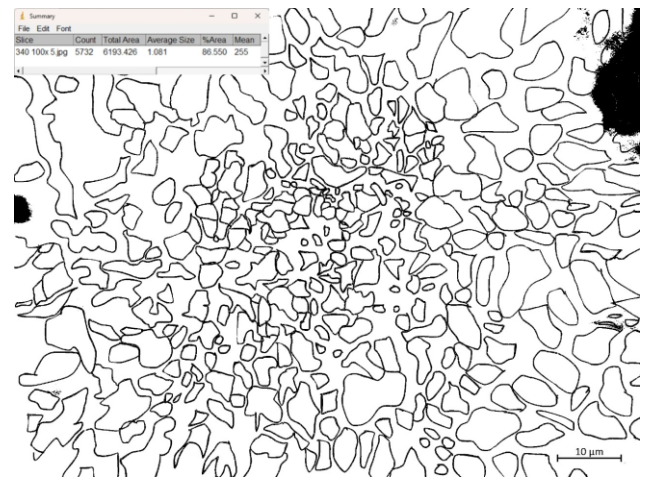


(c)

Gambar 2. Mikrostruktur paduan Mg-2Zn-1Mn: (a) *as-cast*, (b) *annealing 320°C*, (c) *annealing 340°C*.



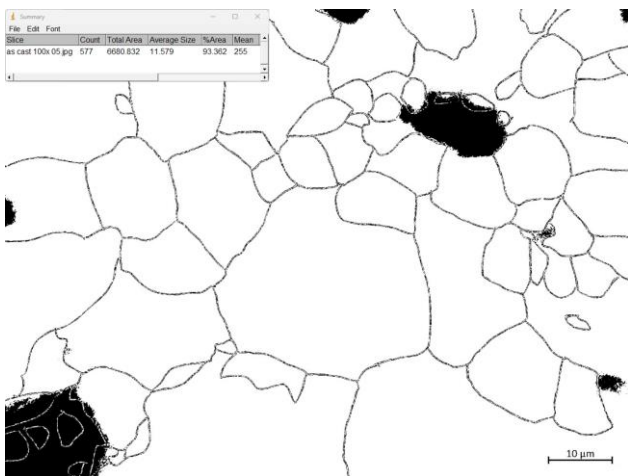
(b)



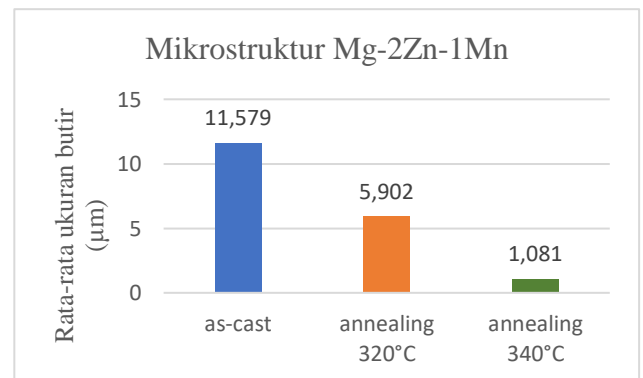
(c)

Gambar 3. Analisa ukuran butir paduan Mg-2Zn-1Mn menggunakan *software image-J*: (a) *as-cast*, (b) *annealing 320°C*, (c) *annealing 340°C*.

Gambar 3 di atas memperlihatkan gambar tiga spesimen yang telah di proses dengan menggunakan *software image-J*. Penelitian (Makarenzo & Zentsova, 2021) dan (Ireti et al., 2018) menjelaskan bahwa analisa mikrostruktur dengan menggunakan *image-J* sangat akurat, valid, reliabel, dan sangat cepat. Analisa menggunakan *image-J* bisa langsung memperoleh nilai rata-rata ukuran butir seperti Gambar 4.



(a)



Gambar 4. Rata-rata ukuran butir menggunakan *software image-J*

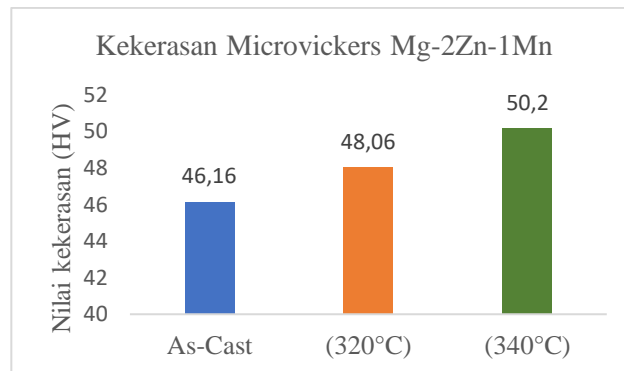
Berdasarkan data grafik di atas dapat dilihat bahwa spesimen Mg-2Zn-1Mn *as-cast* rata-rata ukuran butirnya adalah $11.579\mu\text{m}$ yang jauh lebih besar dibanding spesimen yang di *annealing*. Pada proses *annealing* di temperatur 320°C , rata-rata ukuran butirnya adalah $5.902\mu\text{m}$ dan $1.081\mu\text{m}$ pada temperatur 320°C . Hasil analisa kuantitatif menggunakan *software image-J* ini sejalan dengan penelitian dari (Setiawan & Basuki, 2019) yang melaporkan bahwa setelah diberikan proses *heat treatment* khususnya *annealing*, ditemukan terjadi perubahan mikrostruktur yakni ukuran butir menjadi lebih kecil dibandingkan *as-cast* spesimen tanpa *annealing*. Temuan serupa juga disampaikan pada penelitian (Li dkk., 2020)

Berdasarkan hasil penelitian di atas dan kajian dari penelitian sebelumnya maka dapat diketahui bahwa perbedaan suhu dari proses *annealing* yang dilakukan terhadap paduan Mg-2Zn-1Mn akan mempengaruhi ukuran butir dimana makin tinggi temperatur proses *annealing* akan membuat ukuran butir dari paduan Mg-2Zn-1Mn menjadi lebih kecil. Dengan ukuran yang lebih kecil ini, mengindikasikan bahwa tujuan penelitian ini untuk mendapatkan sifat mekanis yang lebih baik dari paduan *as-cast* telah tercapai.

B. Hasil Pengujian Kekerasan

Pada penelitian ini menggunakan pengujian kekerasan mikro *vickers*. Pengujian mikro *vickers* adalah metode pengujian kekerasan dengan pembebanan yang relatif kecil yang sulit dideteksi oleh metode pengujian makro *vickers*. Kekerasan merupakan salah satu sifat mekanik yang penting bagi suatu material, karena kekerasan menentukan ukuran ketahanan material terhadap deformasi tekan.

Hasil dari pengujian kekerasan terlihat pada Gambar 5 dibawah, hasil uji kekerasan paduan Mg-2Zn-1Mn. Dari grafik tersebut terlihat adanya kenaikan nilai kekerasan seiring dengan naiknya temperatur *annealing* terhadap paduan. Hal ini diakibatkan oleh struktur partikel paduan spesimen *as-cast* yang relatif besar dan tidak teratur karena terdapatnya tegangan sisa pasca pengecoran (*casting*) yang meninggalkan ruang-ruang kosong antar butir. Dengan bantuan proses *annealing* dengan suhu 320°C dan 340°C yang ditahan selama 120 menit, mengakibatkan partikel paduan kembali terkoreksi dan membuat ukuran butir partikel lebih teratur, kecil dan rapat. Kondisi ini secara prinsip keilmuan metalurgi akan meningkatkan nilai kekerasan dari suatu paduan.



Gambar 5. Nilai kekerasan paduan Mg-2Zn-1Mn: (a) *as-cast*, (b) *annealing* 320°C , (c) *annealing* 340°C

Penelitian dari (Ashari et al., 2021) yang meneliti paduan magnesium sebagai *bioabsorbable* melaporkan bahwa magnesium murni memiliki nilai kekerasan 37,9HV. Penelitian (Nanda et al., 2019) menemukan bahwa paduan Mg jika ditambah unsur Zn sebanyak 2% dapat meningkatkan nilai kekerasan hingga 60HV, dikarenakan penambahan Zn ke Mg meningkatkan kekuatan dan ketahanannya sedangkan penambahan unsur Mn sangat membantu dalam homogenisasi ukuran butirnya (Figueira et al., 2021).

Terlihat bahwa penambahan unsur seng sangat berpengaruh terhadap nilai kekerasan paduan Mg, yang mana setelah dilakukan tambahkan 2%Zn dan 1%Mn dapat membantu dalam penyempurnaan ukuran dan kerapatan butirnya yang sesuai dengan keilmuan metalografi membuat nilai kekerasannya menjadi lebih keras, dari spesimen *as-cast* mendapatkan nilai kekerasan rata-rata 46.16HV, yang mana sesudah dilakukan proses *annealing* ini membuat kekerasan dari paduan *as-cast* menjadi lebih keras, pada proses *annealing* di temperatur 320°C mendapatkan nilai kekerasan rata-rata 48.06HV, dan begitu juga dengan temperatur *annealing* di suhu 340°C yang mendapatkan nilai kekerasan rata-rata 50.2 HV.

Berdasarkan hasil penelitian ini dan penelitian sebelumnya didapatkan bahwa semakin tinggi suhu pada proses *annealing* terhadap spesimen maka semakin naik nilai kekerasan pada spesimen tersebut. Dalam penelitian (Li et al., 2021) yang menjelaskan tulang diafisis lebih keras dibandingkan metafisis. Diantara diafisis tulang panjang, metafisis yaitu ujung tulang panjang yang melebar ke samping, tulang kortikal tibia memiliki nilai 51.20HV merupakan yang paling keras. Sesuai dengan penelitian paduan Mg-2Zn-1Mn yang sudah diteliti yaitu yang mendekati rata-rata kekerasan dari tulang kortikal tibia yaitu pada spesimen *annealing* pada suhu 340°C yang mencapai kekerasan 50.02HV, dengan ini kekerasan hasil dari penelitian ini menjadikan paduan Mg-2Zn-1Mn sesuai untuk dijadikan penelitian dalam tahap awal pembuatan implan terserap tubuh (*absorbable*).

Hal ini selaras dengan terbentuknya mikrostruktur

yang terjadi di dalam paduan dari ruang kosong spesimen *as-cast* lalu membuat perbaikan dan penyusunan atom-atom atau butir yang menjadi kecil, rapat dan padat setelah dilakukannya *annealing* membuat peningkatan kekerasan yang signifikan.

III. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisa mikrostruktur dan pengujian kekerasan, setelah dilakukan proses *annealing* maka membuat bentuk, ukuran dan jumlah dari butir yang dihasilkan menjadi lebih kecil dan membuat cacat cor *casting* menjadi lebih rapat padat setelah dilakukan *annealing*, maka semakin tinggi temperatur *annealing* dan dengan waktu tahan yang diberikan maka akan memperoleh jumlah butir yang banyak dengan ukuran yang semakin kecil, rapat, padat dan kekerasan yang semakin tinggi. Variasi temperatur dan waktu tahan yang diberikan menghasilkan ukuran butir dan kekerasan yang optimal adalah di variasi *annealing* 340°C. Diharapkan kepada peneliti berikutnya tentang paduan Mg-2Zn-1Mn ini dilakukan pengujian yang lebih lanjut, supaya mendapatkan karakteristik material yang lainnya.

IV. Referensi

- Alawad, M. O., Alateyah, A. I., El-Garaihy, W. H., BaQais, A., Elkhatny, S., Kouta, H., Kamel, M., & El-Sanabary, S. (2022). Optimizing the ECAP Parameters of Biodegradable Mg-Zn-Zr Alloy Based on Experimental, Mathematical Empirical, and Response Surface Methodology. *Materials*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/ma15217719>
- Ashari, A. M., Lestari, F. P., Hakim, R. N., Mulyati, I., Nugraha Thaha, Y., Kartika, I., & Agus Basuki, E. (2021). *STUDY ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Mg-Zn-Fe-Cu-Co AS HIGH ENTROPY ALLOYS FOR URETERAL IMPLANT* (Vol. 1). www.ejurnalmaterialmetalurgi.com
- ASTM Standard E 407– 99. (1999). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*.
- ASTM Standard E384 – 17. (2017). *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*.
- Dinata, I. G. S., & Yasa, A. A. G. W. P. (2021). The Overview of Spinal Cord Injury. *Ganesha Medicine*, 1(2). <https://doi.org/10.23887/gm.v1i2.39735>
- Fantria, Yonas, D., & Sugito, B. (2019). *Analisa Pengaruh Perlakuan Panas Hasil Pengelasan Dengan Metode Friction Stir Welding (Fsw) Pada Aluminium Sejenis (Al Serie 1100) Terhadap Sifat Fisis Dan Mekanis*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Figueira, G., Rovere, C. A. Della, & Gargarella, P. (2021). Electrodeposition of Fe–Mn alloys from chloride-based bath: A preliminary study for biomedical applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.103>
- Heath, D. E. (2019). A Review of Decellularized Extracellular Matrix Biomaterials for Regenerative Engineering Applications. In *Regenerative Engineering and Translational Medicine* (Vol. 5, Issue 2, pp. 155–166). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s40883-018-0080-0>
- Ireti, A. F., Omeiza, A. E., Oluwasegun, K. M., Adeyemi, I. D., Adewale, O. A., & Gnozi, E. (2018). Comparison of Imagej Analysis of Structure of Two Constructional Steel. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(1), 318–326. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2018.318.326>
- Kamrani, S., & Fleck, C. (2019). Biodegradable magnesium alloys as temporary orthopaedic implants: a review. In *BioMetals* (Vol. 32, Issue 2, pp. 185–193). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10534-019-00170-y>
- Li, S., Wang, J. zhao, Yin, B., Hu, Z. sheng, Zhang, X. juan, Wu, W., Liu, G. bin, Liu, Y. ke, Fu, L., & Zhang, Y. ze. (2021). Atlas of Human Skeleton Hardness Obtained Using the Micro-indentation Technique. *Orthopaedic Surgery*, 13(4). <https://doi.org/10.1111/os.12841>
- Makarenko, K., & Zentsova, E. (2021). Method of the Analysis of Materials' Microstructure Based on the Fractal Analysis of Images. *Internasional*.
- Miao, H., Zhang, D., Chen, C., Zhang, L., Pei, J., Su, Y., Huang, H., Wang, Z., Kang, B., Ding, W., Zeng, H., & Yuan, G. (2019). Research on Biodegradable Mg–Zn–Gd Alloys for Potential Orthopedic Implants: In Vitro and in Vivo Evaluations. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 5(3), 1623–1634. <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.8b01563>
- Nanda, I. P., Hassim, M. H., Idris, M. H., Jahare, M. H., Abdulmalik, S. S., & Arafat, A. (2019). Mechanical and degradation properties of zinc adopted magnesium alloys for biomedical application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 602(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/602/1/012094>
- Peng, J., Zhong, L., Wang, Y., Yang, J., Lu, Y., & Pan, F. (2015a). Effect of Ce addition on thermal conductivity of Mg-2Zn-1Mn alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 639, 556–562. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.03.197>
- Peng, J., Zhong, L., Wang, Y., Yang, J., Lu, Y., & Pan, F. (2015b). Effect of Ce addition on thermal conductivity of Mg-2Zn-1Mn alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 639, 556–562. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.03.197>
- Simons, Y., Sutresman, O. S., & Arsyad, H. (2022). Effect of Mg and Zn Composition Variations on Surface Characteristics and Flexural Strength of Biodegradable Mg-Zn-Ca Alloys by Powder Metallurgy Method. *EPI International Journal of Engineering*, 5(2). <https://doi.org/10.25042/eji-ije.082022.08>
- Sivakesavam, O., & Prasad, Y. V. R. K. (2003). Perilaku Deformasi Panas Dari Paduan Mg-2Zn-1Mn As Cast Dalam Kompresi: Sebuah Studi Dengan Peta Pemrosesan. *Materials Science & Engineering*, 118–124.

- Tsakiris, V., Tardei, C., & Clicinschi, F. M. (2021). Biodegradable Mg alloys for orthopedic implants – A review. In *Journal of Magnesium and Alloys* (Vol. 9, Issue 6). <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.06.024>
- Xing, F., Li, S., Yin, D., Xie, J., Rommens, P. M., Xiang, Z., Liu, M., & Ritz, U. (2022). Recent progress in Mg-based alloys as a novel bioabsorbable biomaterials for orthopedic applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(6), 1428–1456. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.02.013>
- Yunpeng Hu, Guo, X., Qiao, Y., Wang, X., & Lin, Q. (2022). *Preparation of medical Mg–Zn alloys and the effect of different zinc contents on the alloy.*
- Zhao, Z., Zong, L., Liu, C., Ding, W., Zhu, L., Qi, C., Wang, C., Shao, S., Wang, J., & Jian, X. (2022). Strengthened corrosion control of biodegradable poly(trimethylene carbonate) coating on bioabsorbable Mg alloy by introducing graphene oxide. *Surface and Coatings Technology*, 451. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129052>