

ANALISA KEKERASAN DAN MIKROSTRUKTUR PADUAN Zn-1Mg UNTUK APLIKASI IMPLAN TERSERAP TUBUH DENGAN PROSES EKSTRUSI DAN ROLLING

HARDNESS AND MICROSTRUCTURE ANALYSIS OF Zn-1 Mg ALLOY FOR BODY ABSORBED IMPLANT APPLICATION BY EXTRUSION AND ROLLING PROCESS

Farhan Habibie⁽¹⁾, Zulhan Insan Makruf⁽²⁾, Andril Arafat⁽³⁾, Primawati⁽⁴⁾, Sri Rizki Putri Primandari⁽⁵⁾

^{(1),(2),(3),(4),(5)}Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

Kampus Air Tawar, Padang 25131, Indonesia

habibiefarhan22@gmail.com

zulhaninsan@gmail.com

arafat@ft.unp.ac.id

primawati@ft.unp.ac.id

sri.primandari@ft.unp.ac.id

Abstrak

Paduan bahan berbasis seng (Zn) untuk implan terserap tubuh mendapat perhatian luas akhir-akhir ini sebagai salah satu alternatif selain implan terserap tubuh yang banyak digunakan seperti paduan besi (Fe) dan magnesium (Mg). Namun, penelitian melaporkan bahwa paduan berbasis Fe terlalu lambat dalam proses penguraian ion-ionnya (proses korosi), sedangkan paduan berbasis Mg terlalu cepat. Dikarenakan Zn murni tidak memiliki kekuatan mekanis yang baik, sehingga Zn dipadu Mg dengan persentase yang sesuai mempunyai kelebihan dalam sifat-sifat mekanis maupun biologis untuk menutupi kekurangan tersebut. Pada penelitian Zn-1Mg sebelumnya telah dilakukan pengujian dalam bentuk casting, sehingga dilakukan pengujian lanjutan dikembangkan dengan proses ekstrusi dan pengerolan. Penelitian ini merupakan penelitian fundamental yang mengkaji sifat mekanis dari paduan Zn-1Mg melalui proses ekstrusi dan pengerolan dengan melaporkan nilai kekerasan dan mikrostruktur dari paduan tersebut. Pengujian kekuatan mekanis dari paduan ini tidak menunjukkan hasil yang begitu signifikan. Kekerasan pada proses rolled menjadi lebih kuat sebanyak 14 HV, Sedangkan proses ekstrusi menjadi lebih lemah sebanyak 10 HV. Mikrostruktur pada struktur butiran cast mengalami perubahan pada proses rolling yang menjadi lebih kecil dan batas butir yang tampak mulai menghilang. Menariknya, pada proses ekstrusi batas batas butir tersebut menghilang sepenuhnya dan menghasilkan butiran yang lebih kecil, rapat, dan juga seragam. Kesimpulannya paduan Zn-1Mg yang telah dilakukan termomekanis dalam bentuk rolling untuk implan dalam bentuk pelat dan ekstrusi untuk implan dalam bentuk pin atau sekrup layak dalam hal kekuatan mekanis yang memadai untuk *biodegradable metal* namun untuk lokasi yang tidak membutuhkan banyak kekuatan seperti pada jari tangan, tulang tengkorak, dan lain lain.

Kata Kunci : Implan Terserap Tubuh, Ekstrusi, Pengerolan, Kekerasan, Mikrostruktur.

Abstrak

Zinc (Zn)-based alloys are being explored as a viable option for body-absorbable implants. While iron (Fe) and magnesium (Mg) alloys are commonly used, Fe-based alloys have slow ion decomposition and Mg-based alloys decompose too quickly. To address this, researchers have combined Zn with Mg to improve mechanical and biological properties. Previous studies on Zn-1Mg alloys were conducted using casting, but this study used extrusion and rolling processes to evaluate the mechanical properties. The tests showed that the mechanical strength did not change significantly, but the hardness increased by 14 HV in the rolling process and decreased by 10 HV in the extrusion process. Additionally, the microstructure of the alloy changed in both processes, with the rolling process producing smaller grains and disappearing grain boundaries, while the extrusion process completely eliminated grain boundaries and resulted in smaller, tighter, and uniform grains. In conclusion, the Zn-1Mg alloy thermomechanically processed through rolling and extrusion is suitable for implants requiring sufficient mechanical strength, while implants in areas like fingers and skull bones that do not require as much strength can be made using this alloy.

Keywords : Bioasorbable implant, Extrusion, Rolling, Hardness, Microstructure.

I. Pendahuluan

Patah tulang adalah cedera yang paling umum ditemukan dalam suatu kecelakaan, baik itu kecelakaan lalu lintas, terjatuh, tertimpa sesuatu, maupun karena penyakit tulang (Noorisa et al., 2019). Pengobatan tradisional yang paling sering digunakan di Indonesia adalah pemasangan gips atau penyajaran tulang secara manual yang mengakibatkan pasien tersebut terganggu dalam beraktivitas dan juga membutuhkan waktu lama dalam penyembuhannya bahkan bisa jadi itu tidak 100% sembuh setelah sekian lama (Landgraeber et al., 2014). Secara medis, proses untuk menyambung tulang yang patah harus dilakukan pemasangan pen (implan yang terdiri dari pelat dan sekrup). Setelah tulang sembuh dan menyatu sempurna, dilakukan operasi kedua untuk membuka pen. Seiring perkembangan teknologi bahan untuk implan ini, dunia ortopedi telah mengembangkan bahan pen yang dalam aplikasinya bahan tersebut mampu luruh didalam tubuh setelah tulang menyatu kembali, sehingga tidak diperlukan operasi kedua untuk mengangkat implan tersebut (H. Li et al., 2014). Implan terserap tubuh ini telah banyak dikembangkan dengan bahan paduan berbasis besi (Fe), magnesium (Mg), dan seng (Zn) (Dunne et al., 2016; Katarivas Levy et al., 2017; H. F. Li et al., 2015; Ma et al., 2015; Murni et al., 2015).

Besi menunjukkan keunggulan dalam kekuatan mekanis terbaik dari pada Magnesium dan Seng, namun pada pengujian langsung pada hewan besi menunjukkan laju korosi yang sangat lambat, dalam sebuah studi (Peuster et al., 2006) menunjukkan bahwa sebagian besar stent Fe murni tetap di dalam pembuluh darah bahkan setelah dua belas bulan pasca operasi.

Paduan magnesium baik murni ataupun campurannya memiliki laju korosi yang terlalu cepat dan juga kekuatan mekanis yang tidak terlalu lemah jika dibandingkan dengan besi. Magnesium tersebut juga mengurangi integritas mekanis stent selama proses renovasi pembuluh darah arteri selesai dalam waktu 6-12 bulan (Di Mario et al., 2004).

Meskipun banyak upaya untuk meningkatkan sifat implan Mg dan Fe, perhatian saat ini

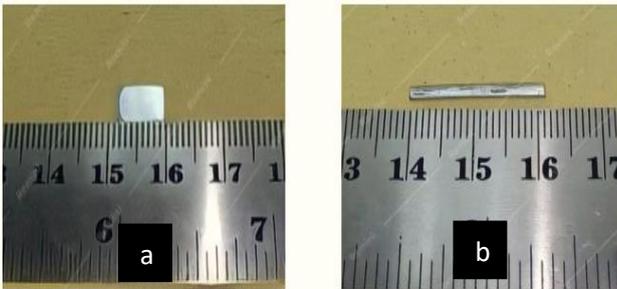
difokuskan pada material alternatif seperti Zn (Murni et al., 2015; Vojtěch et al., 2011), seperti yang diketahui Seng memiliki potensi korosi standar $-0,8$ V, berada di tengah-tengah antara Fe ($0,4$ V) dan Mg ($-2,4$ V) (Cheng et al., 2013). Dan juga Seng merupakan elemen mineral logam terbanyak kedua di dalam tubuh manusia dan merupakan fungsi paling krusial dalam proliferasi sel baik untuk kekebalan tubuh dan sistem saraf (Mostaed et al., 2016). Seng tersebut dibutuhkan dalam jumlah yang lumayan kecil yaitu 2-3 mg/hari untuk bayi sedangkan pada dewasa dibutuhkan sebanyak 8-11 mg/hari (Mostaed et al., 2016). Meskipun demikian, kekuatan tarik yang dihasilkan dari seng murni dalam cast <20 MPa (Vojtěch et al., 2011) maka untuk meningkatkan sifat mekanik dapat dihasilkan dengan menambahkan elemen paduan dan/atau penyempurnaan termomekanis dari ukuran butir dengan ekstrusi, pengerolan, penempaan, dan lain lain (H. Li et al., 2014; Mostaed et al., 2016). Masih sedikit penelitian tentang paduan Zn-Mg sebagai bahan implan bioabsorbable baru baik dari sifat mikrostruktural maupun mekaniknya. Pada penelitian (Vojtěch et al., 2011) menginvestigasi perilaku mekanik dan korosi dari paduan biner Zn-Mg as cast dengan kandungan Mg yang berbeda (dari 1 hingga 3 wt%). Penelitian tersebut menemukan bahwa menambahkan 1% Mg meningkatkan kekuatan mekanik secara signifikan, dari 20 menjadi sekitar 190 MPa melalui pembentukan campuran eutetik Zn + Mg₂Zn₁₁, tetapi mereka juga mencatat nilai *elongation-to-failure* di bawah 2%. sifat-sifat ini tidak akan mencukupi untuk banyak aplikasi beban pada perangkat yang dapat terserap dalam tubuh karena biasanya membutuhkan kekuatan >300 MPa dan *elongation-to-failure* $>15\%$ (Bowen et al., 2013). Oleh karena itu, dilakukan investigasi paduan Zn-1Mg dengan melakukan proses ekstrusi dengan pengujian kekuatan mekanis dan mikrostruktur. Pada penelitian Fauzan dilakukan pengujian secara Rolled yang dipergunakan dalam membuat implan dalam bentuk plat (Fauzan et al., 2022). Kemudian dilakukan investigasi lanjutan dalam ekstrusi untuk diketahui perubahan yang terjadi

apabila implant tersebut di ubah bentuk menjadi pin atau screw.

II. Metode Penelitian

A. Penyiapan Sampel

Penelitian ini fokus pada paduan Zn-1Mg yang telah dipersiapkan dengan proses peleburan Seng murni (99%) dan Magnesium murni (1%). Paduan seng tersebut dilebur pada suhu 500°C di cetakan baja silinder dalam mesin pemanas, kemudian di anil pada suhu 350°C selama 48 jam, setelah itu menghasilkan Zn-1Mg as-cast 80 mm (Champagne et al., 2019). Pada proses rolled paduan Zn-1%Mg digulung menggunakan mesin laminasi. Proses laminasi ini melibatkan penggulungan paduan di antara dua atau lebih roll untuk mengurangi ketebalan dan menghasilkan plat logam yang lebih tipis dengan struktur yang lebih teratur. Pada spesimen uji mendapatkan hasil dengan ukuran panjang 8 mm, lebar 6 mm, dan tebal 1 mm, yang bersesuaian dengan penelitian Fauzan (Fauzan et al., 2022). Kemudian sampel as-cast sebelumnya diperlakukan juga pada proses ekstrusi. Dengan hasil dari spesimen tersebut memiliki sisi 2,5 mm dengan panjang 20 mm.



Gambar 2. 1 Persiapan Sampel Zn-1%Mg a. Rolled b. Ekstrusion

B. Komposisi Kimia

Setelah proses pembentukan, sampel-sampel dari logam paduan Zn-1Mg diuji untuk memastikan kualitas sesuai spesifikasi yang ditargetkan. Sampel kemudian dilakukan proses finishing yang mengikuti pada standar metalurgrafi prosedur seperti pemotongan, penghalusan permukaan. Kemudian sampel tersebut dilakukan analisa dengan menggunakan instrumen X-Ray

Flourensence untuk melihat persentase komposisi unsur yang tertinggal pada paduan tersebut. Pengujian XRF ini menggunakan alat PAN alytical Type: Epsilon 3 sesuai dengan standar ASTM C114-18 (ASTM C114-22, 2022)

C. Kekerasan MicroVickers

Kekerasan *microVickers* ditentukan dengan menggunakan hardness *Vickers Indentec* dari Mesin *microVickers*, dengan load 300 gf yang diterapkan dan *loading time* 10 detik sesuai dengan ASTM-E384-17 (ISO/ASTM International, 2017). Tiga indentasi dibuat untuk setiap sampel dan panjang indentasi diagonal diukur menggunakan mikrometer yang di kalibrasi dipasang pada lensa okuler mikroskop. Kekerasan *microVickers* dihitung menggunakan rumus sebagai berikut

$$HV = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2} \quad (1)$$

Keterangan HV adalah angka kekerasan Vickers (kg/mm²), P adalah beban indenter (kg) dan d adalah panjang diagonal beban lekukan (mm)(H. Li et al., 2014).

D. Mikrostruktur

Evaluasi struktur mikro dilakukan dengan Mikroskop Optik (*Optical Microscopy*). Semua sampel untuk pengamatan mikroskopis dipoles dengan menggunakan kertas amplas grit #800, #1500, dan #2000 dan polish kemudian dibersihkan sehingga mendapatkan permukaan yang halus dan datar (Fauzan et al., 2022). Kemudian juga dilakukan etsa dengan 5% *Nital ethanol* (5 ml HNO₃+ 100 ml ethanol) *solutions* sesuai dengan ASTM ATAUQUE E407-99 (ASTM International, 2007) untuk memeperjelas struktur mikro yang terjadi pada paduan Zn-1Mg tersebut. Pengamatan menggunakan alat mikroskop optik Infinity 2 dengan perbesaran 20x dan 40x yang dibantu dengan software Infinity Analyze dalam mengamati bentuk permukaan dan juga filter untuk memperjelas citra dari hasil pengamatan tersebut. Hal ini berguna untuk melihat perubahan mikrostruktur paduan tersebut pada kondisi as-cast, rolling dan ekstrusi. Dan

juga hal akan mempengaruhi nilai kekerasan dari struktur butirannya.

III. Hasil dan Pembahasan

A. Hasil Komposisi Kimia

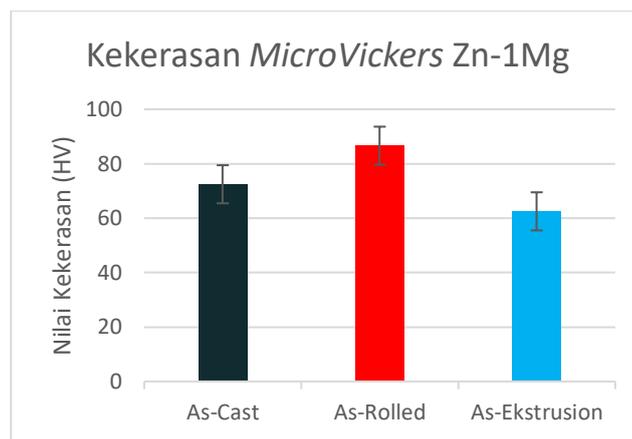
Komposisi kimia dari paduan Zn-1%Mg di tampilkan pada tabel 3.1 evaluasi hasil XRF ini mendapatkan hasil setelah dilakukannya proses ekstrusi dan rolling mendapatkan bahwa perubahan ion Zn pada paduan Zn-1Mg tersebut tidak terlalu signifikan. Pada data tabel 3.1 ion Zn yang terdapat pada proses rolled adalah 96 wt%. Sedangkan pada proses ekstrusi Ion Zn tersebut tebaca 94 wt%. Menariknya ketika dilakukan XRF pada cast konsentrasi awal yang dimiliki ion Zn adalah sebanyak 98 wt%. Berarti setiap perlakuan dalam termomekanis yaitu rolled dan ekstrusi mengalami penurunan sebanyak 2 wt% untuk proses rolling dan 4 wt % untuk proses ekstrusi. Beberapa logam lainnya juga teridentifikasi dalam proses XRF ini namun memiliki persentasi yang kecil yaitu < 0.5 wt% yang tidak mempengaruhi paduan Zn-1Mg tersebut.

Tabel 3. 1 Hasil XRF pada Paduan Zn-1Mg

Alloys	Concentration (wt%)					
	Zn	Mg	P	Al	Si	Fe
Rolled	96.04	2.03	<0.5	<0.5	<0.5	<0.3
Ekstrusion	94.55	2.9	<0.5	<0.5	<0.4	<0.3
Cast	98.04	1.14	-	<0.5	<0.3	<0.3

B. Nilai Kekerasan *MicroVickers*

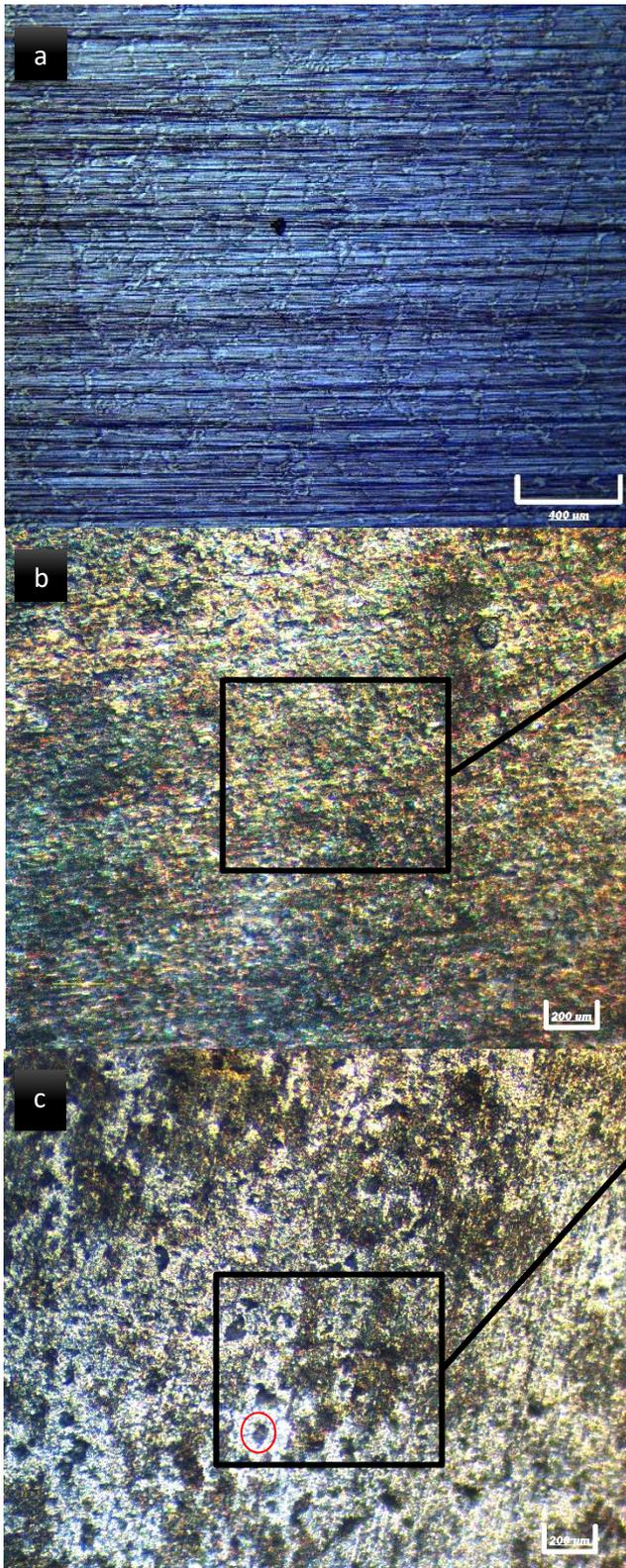
Hasil kekerasan tersebut tampak pada gambar 3.1 menunjukkan hasil kekerasan *microVickers* yang menginvestigasi dalam cast, rolling, dan ekstrusi pada paduan Zn-1Mg.



Gambar 3. 1 Hasil Kekerasan *MicroVickers* Zn-1Mg

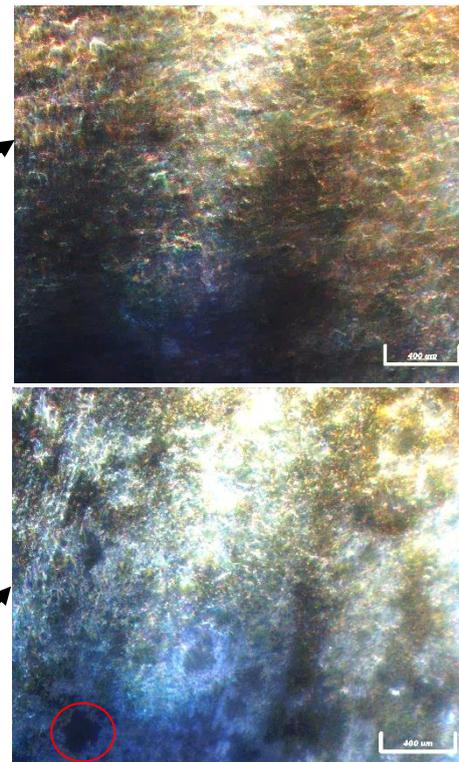
Bar data tersebut proses cast dan rolling mengalami peningkatan dari 72 HV menjadi 86 HV, sedangkan proses casting dan ekstrusi mengalami penurunan 72 HV menjadi 62 HV. Menariknya hal tersebut menunjukkan bahwa penambahan 1% magnesium pada paduan seng mengalami peningkatan yang sangat signifikan dari pada hasil kekerasan Zn murni yang berkisar 30 HV (Mostaed et al., 2016). Sedangkan hasil dari perubahan bentuk dengan proses termomekanis ini tidak menunjukkan hasil yang begitu signifikan hanya terjadi penambahan kekuatan mekanis sebanyak 1,19 kali pada rolling dan mengalami penurunan 0,86 kali pada proses ekstrusi. Membuktikan bahwa penghalusan butiran tidak terlalu mempengaruhi hasil kekerasan tersebut. Karena implan dibutuhkan karena ingin menjaga posisi tulang tetap dan terhabilitas secara sempurna maka paduan yang dibuat tersebut juga harus memiliki kekuatan mekanis melebihi kekuatan tulang sebagai pembanding. Kekuatan mekanis ini bersesuaian dengan penelitian dari Katarivas yang menguji rolled dengan hasil 88 ± 0.5 HV (Katarivas Levy et al., 2017). Sedangkan untuk kekuatan mekanis tulang cancellous yang ada pada tubuh manusia merupakan hasil dari penelitian Ahmed Ibrahim yang mendapatkan hasil pada titik B 52.2 ± 5.8 HV (Ibrahim et al., 2020). Hal ini juga menjadikan paduan Zn-1%Mg layak untuk dilakukan penelitian dalam perkembangan biodegradable metals karena memiliki nilai yang lebih kuat dari pada tulang cancellous tersebut.

C. Analisa Mikrostruktur



Pengamatan yang dilakukan pada mikrostruktur yang terdapat pada gambar 3.2a Mikrostruktur Zn-1Mg casting dengan perbesaran 40x, kemudian dapat dilihat pada gambar 3.2b Paduan Zn-1%Mg ekstrusi memiliki bentuk permukaan yang lebih halus dimana struktur butir partikelnya

terlihat lebih kecil, jarak antar partikel yang lebih rapat, dan seragam. Sedangkan pada gambar 3.2c paduan Zn-1%Mg rolling memiliki permukaan yang cenderung lebih kasar dengan struktur butir yang lebih melebar, jarak antar partikel antara satu sama lain sangat jauh dan tidak seragam. Hasil ini bersesuaian dengan penemuan Mostaed yang menggunakan paduan yang sama Zn-1%Mg dengan melakukan penglihatan dalam SEM setelah dilakukannya immersion 336 jam (Mostaed et al., 2016).



Gambar 3. 2 Hasil Pengamatan Mikrostruktur Zn-1Mg (a) Casting (b) Ekstrusi (C) Rolling pada Perbesaran 20x dan 40x.

Dilakukan investigasi dan perbandingan cast memiliki struktur butiran mirip batang/ tongkat (*rod-like*) eutetik dengan batas batas butir yang masih terlihat jelas sedangkan pada rolled batas butir tersebut sudah mulai menghilang dan struktur butiran tersebut mengecil dan berubah menjadi lebih bulat (*globular*) eutetik yang tidak tampak lagi bentuk batas butir tersebut sehingga ini juga yang meningkatkan kekuatan mekanis dari rolling tersebut.

Pada Ekstrusi batas - batas butir tersebut hilang sepenuhnya tidak lagi tampak batas butir dan

tersisa bentuk struktur butiran berupa Lancip (*acicular*) eutetik yang membuat butiran tersebut menjadi lebih kecil dan lebih seragam, namun karena beberapa ion seng berkurang sebanyak 4% dari sebelumnya menjadikan kekuatan mekanis dari proses ekstrusi ini berkurang namun tidak terlalu signifikan.

Mikrostruktur paduan Zn-1Mg ini juga bersesuaian dengan penelitian Nurfitri yang menemukan bahwa proses rolling mengakibatkan material menjadi lebih keras karena setelah proses tersebut ukuran butiran menjadi lebih kecil (Nurfitri Rahmi Sari et al., 2019). Namun setelah dilakukannya ekstrusi ukuran butir partikel lebih kecil namun dalam kekuatan mekanis lebih rendah sedikit dari pada rolling. Hal ini mungkin juga dipengaruhi dari komposisi yang telah dilakukan pada tabel 3.1 pada rolling konsentrasi Zn sebanyak 96 wt% sedangkan pada ekstrusi mengalami penurunan ke 94 wt% yang mungkin terjadi ketika dilakukannya proses ekstrusi ion Zn ada yang terbuang. Sehingga dalam hal kekuatan mekanis pun ekstrusi mengalami penurunan.

IV. Kesimpulan

Penelitian ini berguna untuk melaporkan perubahan nilai kekerasan dan mikrostruktur yang terjadi pada paduan Zn-1Mg setelah dilakukan proses ekstrusi dan pengerolan.

Komposisi ion Zn dari proses cast mengalami penurunan sebanyak 2% pada proses pengerolan dan 4% pada proses ekstrusi. Kemudian, kekuatan mekanis dari pengujian ini tidak menunjukkan hasil yang begitu signifikan. Kekerasan pada proses rolled menjadi lebih kuat sebanyak 14 HV dari cast. Sedangkan proses ekstrusi menjadi lebih lemah sebanyak 10 HV dari cast. Dan mikrostruktur pada struktur butiran cast mengalami perubahan pada proses rolling yang menjadi lebih kecil dan batas butir yang tampak mulai menghilang. Menariknya, pada proses ekstrusi batas batas butir tersebut menghilang sepenuhnya dan menghasilkan butiran yang lebih kecil, rapat, dan juga seragam.

Paduan Zn-1Mg yang telah dilakukan termomekanis dalam bentuk rolling untuk implan dalam bentuk pelat dan ekstrusi untuk implan dalam bentuk pin atau sekrup layak dalam hal kekuatan mekanis yang memadai untuk biodegradable metal namun untuk lokasi yang tidak membutuhkan banyak kekuatan seperti pada jari tangan, tulang tengkorak, dll. Hal ini menunjukkan bahwa Zn-1Mg berpotensi untuk dijadikan bahan untuk aplikasi implan biomedis. Saran melakukan uji laju korosi dan memperkirakan tingkat keluruhan yang terjadi pada implan tersebut.

Referensi

- ASTM C114-22. (2022). Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. In *Astm*. <https://doi.org/10.1520/C0114-18>
- ASTM International. (2007). ASTM E407-07e1: Standard practice for microetching metals and alloys. *Annual Book of ASTM Standards*, 22. <https://doi.org/10.1520/E0407-07.2>
- Bowen, P. K., Drelich, J., & Goldman, J. (2013). Zinc exhibits ideal physiological corrosion behavior for bioabsorbable stents. *Advanced Materials*, 25(18), 2577–2582. <https://doi.org/10.1002/adma.201300226>
- Champagne, S., Mostaed, E., Safizadeh, F., Ghali, E., Vedani, M., & Hermawan, H. (2019). In vitro degradation of absorbable zinc alloys in artificial urine. *Materials*, 12(2), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma12020295>
- Cheng, J., Liu, B., Wu, Y. H., & Zheng, Y. F. (2013). Comparative invitro study on pure metals (Fe, Mn, Mg, Zn and W) as biodegradable metals. *Journal of Materials Science and Technology*, 29(7), 619–627. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.03.019>
- Di Mario, C., Griffiths, H., Goktekin, O., Peeters, N., Verbist, J., Bosiers, M., Deloose, K., Heublein, B., Rohde, R., Kasese, V., Ilesley, C., & Erbel, R. (2004). Drug-eluting bioabsorbable magnesium stent. *Journal of Interventional Cardiology*, 17(6), 391–395. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8183.2004.04081.x>
- Dunne, C. F., Levy, G. K., Hakimi, O., Aghion, E., Twomey, B., & Stanton, K. T. (2016).

- Corrosion behaviour of biodegradable magnesium alloys with hydroxyapatite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 289, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.01.045>
- Fauzan, A., Andril, A., Irzal, I., & Hendri, N. (2022). ANALISA LAJU KOROSI PADUAN SENG (Zn) UNTUK APLIKASI IMPLAN TERSEKAP TUBUH Jurnal Vokasi Mekanika (VoMek). <http://vomek.ppj.unp.ac.id/index.php/vomek/article/view/335>
- Ibrahim, A., Magliulo, N., Groben, J., Padilla, A., Akbik, F., & Hamid, Z. A. (2020). Hardness, an Important Indicator of Bone Quality, and the Role of Collagen in Bone Hardness. *Journal of Functional Biomaterials*, 11(4), 85. <https://doi.org/10.3390/jfb11040085>
- ISO/ASTM International. (2017). Designation: E384-17 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. *The Biology of the Xenarthra*, 281–293. <https://doi.org/10.1520/E0384-17>
- Katarivas Levy, G., Leon, A., Kafri, A., Ventura, Y., Drelich, J. W., Goldman, J., Vago, R., & Aghion, E. (2017). Evaluation of biodegradable Zn-1%Mg and Zn-1%Mg-0.5%Ca alloys for biomedical applications. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 28(11), 174. <https://doi.org/10.1007/s10856-017-5973-9>
- Landgraber, S., Jäger, M., Jacobs, J. J., & Hallab, N. J. (2014). The pathology of orthopedic implant failure is mediated by innate immune system cytokines. *Mediators of Inflammation*, 2014, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/185150>
- Li, H. F., Xie, X. H., Zheng, Y. F., Cong, Y., Zhou, F. Y., Qiu, K. J., Wang, X., Chen, S. H., Huang, L., Tian, L., & Qin, L. (2015). Development of biodegradable Zn-1X binary alloys with nutrient alloying elements Mg, Ca and Sr. *Scientific Reports*, 5(1), 10719. <https://doi.org/10.1038/srep10719>
- Li, H., Zheng, Y., & Qin, L. (2014). Progress of biodegradable metals. *Progress in Natural Science: Materials International*, 24(5), 414–422. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.08.014>
- Ma, J., Zhao, N., & Zhu, D. (2015). Endothelial Cellular Responses to Biodegradable Metal Zinc. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 1(11), 1174–1182. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.5b00319>
- Mostaed, E., Sikora-Jasinska, M., Mostaed, A., Loffredo, S., Demir, A. G., Previtali, B., Mantovani, D., Beanland, R., & Vedani, M. (2016). Novel Zn-based alloys for biodegradable stent applications: Design, development and in vitro degradation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 60, 581–602. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.03.018>
- Murni, N. S., Dambatta, M. S., Yeap, S. K., Froemming, G. R. A., & Hermawan, H. (2015). Cytotoxicity evaluation of biodegradable Zn-3Mg alloy toward normal human osteoblast cells. *Materials Science and Engineering C*, 49, 560–566. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.01.056>
- Noorisa, R., Apriliwati, D., Aziz, A., & Bayusentono, S. (2019). the Characteristic of Patients With Femoral Fracture in Department of Orthopaedic and Traumatology RSUD Dr. Soetomo Surabaya 2013 – 2016. (*JOINTS*) *Journal Orthopaedi and Traumatology Surabaya*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.20473/joints.v6i1.2017.1-11>
- Nurfritri Rahmi Sari, Nizwardi Jalinus, Rheda Pratama, & Andril Arafat. (2019). Analisa Kekerasan Dan Struktur Mikro Paduan Seng (Zn) Biodegradeable Untuk Aplikasi Implan Biomedis. *Journal Of Multidisciplinary Research and Development*, 966–966.
- Peuster, M., Hesse, C., Schloo, T., Fink, C., Beerbaum, P., & von Schnakenburg, C. (2006). Long-term biocompatibility of a corrodible peripheral iron stent in the porcine descending aorta. *Biomaterials*, 27(28), 4955–4962. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.05.029>
- Vojtěch, D., Kubásek, J., Šerák, J., & Novák, P. (2011). Mechanical and corrosion properties of newly developed biodegradable Zn-based alloys for bone fixation. *Acta Biomaterialia*, 7(9), 3515–3522. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.05.008>