



Studi Pendahuluan Karakteristik Mekanik Paduan Berbasis Zr untuk Biomaterial

Muhammad Awwaluddin¹, Kusdi Prijono²

^{1,2} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No. 1, Tangerang Selatan, Indonesia

^{1,2} Pusat Riset Teknologi Kekuatan Struktur, Organisasi Riset Energi dan Manufaktur, Badan Riset dan Inovasi Nasional, 15310, Indonesia

E-mail : ¹ dosen00543@unpam.ac.id, ² dosen00656@unpam.ac.id

Masuk: 3 Maret 2025

Direvisi: 28 Maret 2025

Disetujui: 14 April 2025

Abstract: Zirconium (Zr) is a non-toxic and biotolerant metal with the potential to be developed as a biomaterial. Zr exhibits high mechanical strength, fracture toughness, and good plasticity, making it suitable as a structural material. This study aims to develop a Zr-based alloy, namely Zr-6Mo-4Ti-xY, with $x = 0, 1$, and 3 wt% yttrium, for potential application as a biomaterial. Mechanical characterization was carried out through microhardness, tensile strength, and compressive strength tests. The specimens used in this study were micro-sized and cut using wire cutting techniques. The results showed a significant effect of yttrium addition on the mechanical properties of the alloy. The hardness decreased with increasing yttrium content, accompanied by a reduction in both tensile and compressive strength. These findings are consistent with previous studies regarding microstructural changes in the alloy. Based on the results, it can be concluded that the Zr-6Mo-4Ti-xY alloy, with $x = 0, 1$, and 3 wt% yttrium, possesses favorable mechanical characteristics for use as a biomaterial.

Keywords: Biomaterial, Zr Alloy, Yttrium, Microhardness, Tensile Strength.

Abstrak: Zirkonium (Zr) adalah logam non-toksik dan biotoleran yang berpotensi dikembangkan sebagai salah satu biomaterial. Zr memiliki kekuatan mekanik dan ketangguhan patah yang tinggi serta plastisitas yang baik, sehingga dapat berperan sebagai bahan struktural. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan paduan berbasis Zr, yaitu Zr-6Mo-4Ti-xY, dengan variasi $x = 0, 1$, dan 3 %wt yttrium, yang dapat digunakan sebagai biomaterial. Karakterisasi mekanik dilakukan melalui pengujian kekerasan mikro, kekuatan tarik, dan kekuatan tekan paduan. Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah spesimen mikro yang dipotong menggunakan teknik *wire cutting*. Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh signifikan dari penambahan unsur yttrium terhadap sifat mekanik paduan. Kekerasan paduan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya kandungan yttrium, yang juga diikuti oleh penurunan kekuatan tarik dan kekuatan tekan. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya mengenai perubahan struktur mikro paduan. Berdasarkan hasil karakterisasi tersebut, dapat disimpulkan bahwa paduan Zr-6Mo-4Ti-xY dengan $x = 0, 1$, dan 3 %wt yttrium memiliki karakteristik mekanik yang baik dan berpotensi untuk digunakan sebagai biomaterial.

Kata kunci: Biomaterial, Paduan Zr, Yttrium, Kekerasan Mikro, Kekuatan Tarik.

PENDAHULUAN

Biomaterial dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok berdasarkan tujuan penggunaannya, yaitu biokompatibel, bioinert, dan biotoleran [1]. Biokompatibel adalah bahan yang dapat bertahan di dalam tubuh tanpa memengaruhi atau merusak jaringan manusia. Bioinert adalah biomaterial yang mampu menyatu dengan jaringan tubuh atau memungkinkan pertumbuhan jaringan pengganti. Biotoleran adalah biomaterial yang memiliki toksisitas rendah dan dapat diterima oleh jaringan tubuh saat digunakan sebagai biomaterial.

Dalam beberapa tahun terakhir, logam telah menjadi semakin populer sebagai biomaterial, terutama untuk implan ortopedi, dibandingkan dengan keramik atau polimer. Hal ini disebabkan oleh sifat mekaniknya yang sangat baik dalam menahan beban. Saat ini, biomaterial yang beredar di pasaran meliputi biomaterial

berbasis Fe (Fe-18Cr-14Ni-2.5Mo, Fe-11Mn-17Cr-3Mo) [2], berbasis Co (Co-28Cr-6Mo, 40Co-20Cr-16Fe-15Ni-7Mo), dan berbasis Ti (Ti-6Al-4V, Ti-13Nb-13Zr) [3].

Paduan berbasis zirkonium (Zr) memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai salah satu biomaterial. Zr merupakan logam yang memiliki karakteristik mekanik yang baik, bersifat non-toksik, serta menunjukkan biokompatibilitas yang tinggi. Zr menawarkan kekuatan mekanik yang tinggi, ketangguhan patah yang baik, dan plastisitas yang besar, sehingga dapat berfungsi sebagai bahan struktural dalam paduan. Beberapa paduan berbasis Zr telah diteliti dan dikembangkan sebelumnya, seperti Zr-12Nb-4Sn [4], Zr-4Mo-4Sn [5], dan Zr-Mo-Ti [6]. Namun, hingga saat ini belum banyak dikembangkan paduan Zr dengan penambahan unsur yttrium.

Yttrium telah terbukti dapat meningkatkan ketahanan korosi pada paduan Zr-Ti-Cu-Al [7] dan Zr-Al-Ni-Cu [8]. Selain itu, penambahan yttrium pada paduan Zr juga dapat mengurangi porositas, meningkatkan densitas, kekuatan lentur, serta kekuatan tekan, sehingga sangat cocok untuk aplikasi biomedis. Di Indonesia, pengolahan pasir zirkon cukup melimpah dan berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan utama dalam paduan zirkonium. Selain itu, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) juga telah melakukan penelitian untuk memisahkan yttrium dari yttrium oksida serta dari limbah penambangan timah.

Hal-hal tersebut mendorong dilakukannya penelitian untuk mengembangkan paduan biomaterial berbasis zirkonium dengan penambahan unsur yttrium, yang dipadukan dengan molibdenum dan titanium. Paduan zirkonium yang dikembangkan untuk biomaterial harus memiliki kekuatan mekanik tinggi dan toleransi yang baik terhadap lingkungan cairan jaringan tubuh.

Untuk menguji sifat kekuatan mekanik dan daya tahan paduan zirkonium sebagai bahan bioimplant, dapat dilakukan pengujian kekerasan, tarik, dan tekan. Pengujian ini penting dilakukan untuk memperoleh biomaterial yang memiliki sifat mekanik mendekati karakteristik tulang manusia, sehingga dapat meminimalkan perbedaan sifat yang dapat menimbulkan efek ketidaknyamanan bagi pengguna biomaterial.

METODOLOGI

Preparasi Sampel

Ingot paduan Zr-6Mo-4Ti-xY, dengan $x = 0, 1, \text{ dan } 3 \text{ \%wt}$, dibuat menggunakan tungku *arc melting* dengan perhitungan stoikiometrik. Semua unsur dalam paduan menggunakan bahan dengan tingkat kemurnian 99,99%. Proses peleburan dilakukan sebanyak lima kali pengulangan dengan aliran gas argon berkualitas tinggi untuk menghasilkan paduan yang homogen serta mencegah terbentuknya oksida. Peleburan dilakukan selama 120 detik dengan arus 150 A dan tegangan 230 V.

Karakterisasi Mekanik

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan alat uji kekerasan mikro SHIMADZU HSV-310 dengan beban 192,8 kgF pada permukaan ingot paduan setelah dibelah menjadi dua bagian. Untuk pengujian tarik, seluruh sampel menggunakan spesimen berukuran mikro yang dipotong menggunakan *wire cutting* dan mengikuti standar ASTM E8-04 serta DIN EN 2002-001:2006-11. Pengujian kompresi mengacu pada standar ASTM E9-09 dan dilakukan menggunakan mesin uji SHIMADZU AGS-X *axial servohydraulic* dengan kapasitas 10 kN dan kecepatan tekan rata-rata 1 mm/menit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi Paduan

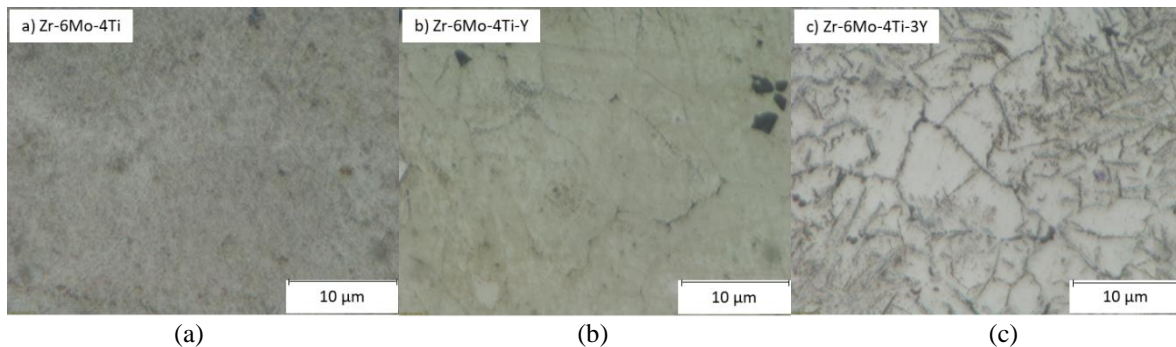
Pada penelitian ini, berhasil dibuat paduan Zr-6Mo-4Ti-xY, dengan $x = 0, 1, \text{ dan } 3 \text{ \%wt}$, menggunakan metode peleburan *arc melting*. Komposisi masing-masing paduan dalam persen berat adalah sebagai berikut: 90:6:4:0, 89:6:4:1, dan 87:6:4:3 untuk paduan Zr-6Mo-4Ti, Zr-6Mo-4Ti-Y, dan Zr-6Mo-4Ti-3Y, seperti yang ditampilkan pada Tabel 1. Penelitian ini difokuskan pada produksi larutan padat berbasis zirkonium, karena komposisi paduan didominasi oleh unsur Zr.

Tabel 1. Komposisi Paduan Material Spesimen Uji

Spesimen Uji	Paduan Material							
	Zr		Mo		Ti		Y	
	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%
Zr-6Mo-4Ti	27,0	90	1,8	6	1,2	4	0	0
Zr-6Mo-4Ti-1Y	26,7	89	1,8	6	1,2	4	0,3	1
Zr-6Mo-4Ti-3Y	26,1	87	1,8	6	1,2	4	0,9	3

Pengamatan Mikrostruktur

Gambar 1 menunjukkan hasil pengamatan mikrostruktur paduan Zr-6Mo-4Ti-xY, dengan x = 0, 1, dan 3 %wt, menggunakan mikroskop optik. Terlihat bahwa penambahan unsur yttrium memberikan pengaruh yang signifikan terhadap ukuran butir paduan. Pada Gambar 1a hingga 1c, terlihat bahwa ukuran butir mengalami penyusutan, dari sekitar 30–40 μm menjadi 1–10 μm . Selain itu, batas butir tampak semakin jelas seiring dengan meningkatnya kandungan yttrium dalam paduan.



Gambar 1. Hasil pengamatan optik mikrostruktur paduan biomaterial berbasis Zr, Zr-6Mo-4Ti-xY; a) x = 0; b) x = 1; c) x = 3 %wt

Sifat Mekanik

Hasil pengujian kekerasan paduan Zr-6Mo-4Ti-xY, dengan x = 0, 1, dan 3 %wt, ditampilkan pada Tabel 2. Dari data tersebut, terlihat bahwa terdapat pengaruh yang signifikan terhadap sifat kekerasan paduan akibat penambahan unsur yttrium. Nilai kekerasan paduan mengalami penurunan seiring meningkatnya kandungan yttrium, yaitu sebesar 407,19 HV untuk paduan Zr-6Mo-4Ti, 361,91 HV untuk paduan Zr-6Mo-4Ti-Y, dan 327,05 HV untuk paduan Zr-6Mo-4Ti-3Y. Standar deviasi masing-masing paduan berturut-turut adalah 15,15; 12,94; dan 7,18. Penurunan nilai kekerasan ini sejalan dengan hasil pengamatan ukuran butir yang mengecil, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Pengujian Tarik

Sampel uji tarik yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2. Panjang total spesimen adalah 27 mm, dengan lebar 5 mm. Panjang *gauge length* adalah 10 mm dengan radius lengkungan 1,5 mm, dan lebar daerah tarikan sebesar 2 mm. Proses pemotongan dilakukan menggunakan teknik *wire cutting* dalam kondisi terendam air, dengan tujuan menjaga suhu tetap rendah selama proses pemotongan agar deformasi termal dan perubahan struktur mikro pada paduan dapat diminimalkan.

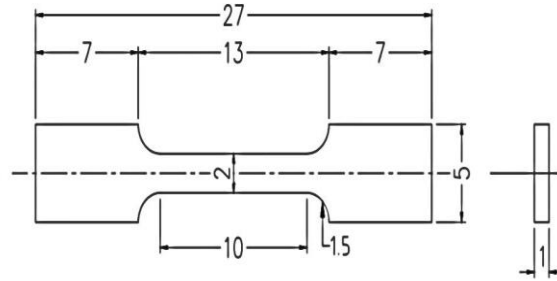
Tabel 2. Hasil Uji Kekerasan Paduan

No	Sampel	D1 (μm)	D2 (μm)	D (μm)	Aktual HV	Rata-Rata HV	STDEV
1	Zr-6Mo-4Ti	31.28	29.49	30.385	387.17	407.19	15.15
		29.31	29.93	29.620	407.42		
		28.43	29.89	29.160	420.38		
		28.01	29.85	28.930	427.09		
		29.97	30.28	30.125	393.88		
2	Zr-6Mo-4Ti-Y	32.81	31.4	32.105	346.79	361.91	12.94
		30.56	30.39	30.475	384.88		
		30.78	32.32	31.550	359.10		
		31.96	30.64	31.300	364.86		
		32.67	30.89	31.780	353.92		
3	Zr-6Mo-4Ti-3Y	34.27	32.91	33.590	316.81	327.05	7.18
		32.83	32.17	32.500	338.42		

No	Sampel	D1 (μm)	D2 (μm)	D (μm)	Aktual HV	Rata-Rata HV	STDEV
		32.19	33.67	32.930	329.63		
		33.47	32.61	33.040	327.44		
		33.38	33.16	33.270	322.93		

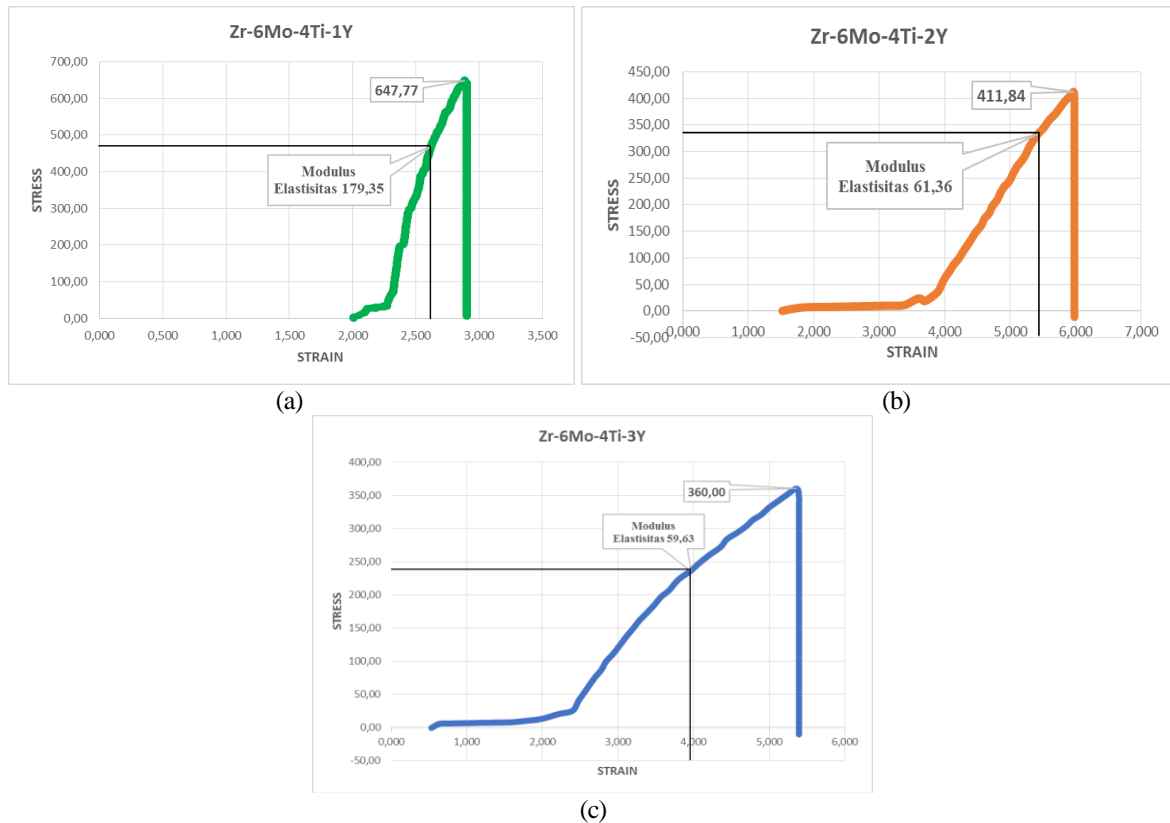
Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan sebanyak tiga kali untuk masing-masing paduan, dengan kecepatan penarikan sebesar 0,01 mm/menit.



Gambar 2. Ukuran spesimen untuk uji tarik

Hasil pengujian tarik paduan Zr-6Mo-4Ti-xY, dengan $x = 0, 1$, dan 3 wt , ditampilkan pada Gambar 3.

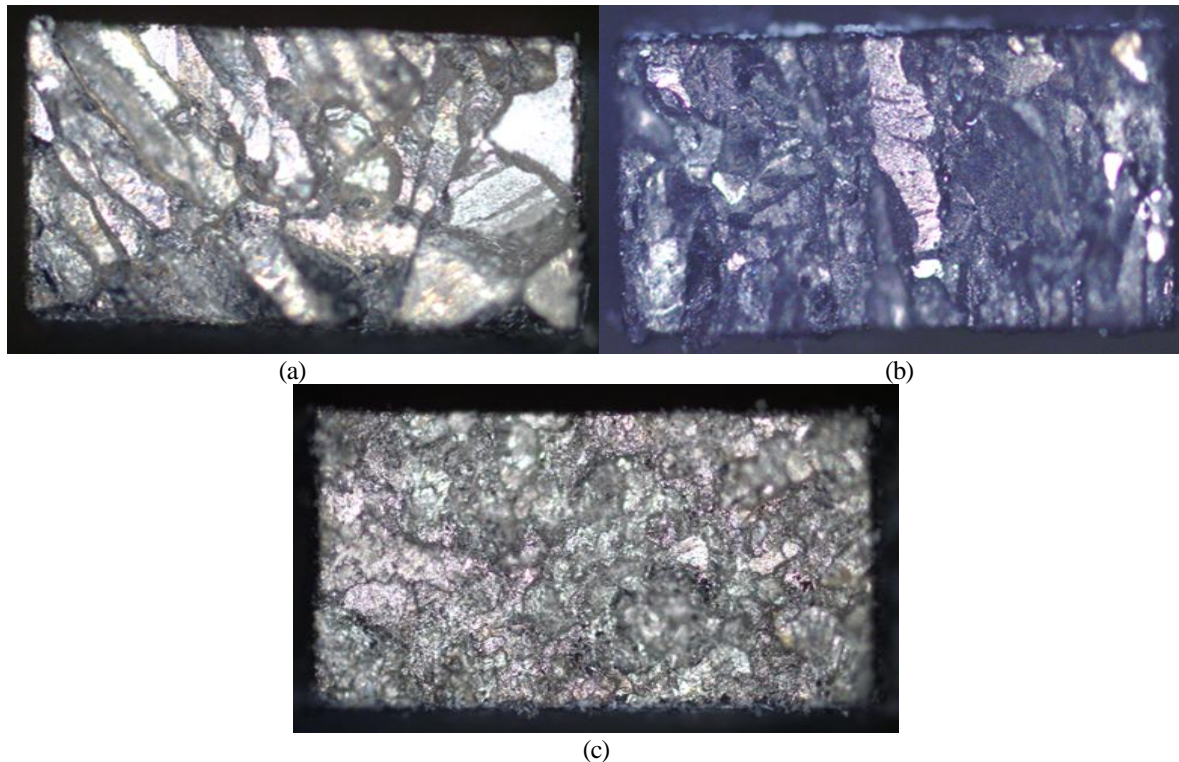


Gambar 3. Hasil uji tarik paduan biomaterial berbasis Zr, Zr-6Mo-4Ti-xY: a) $x = 0$; b) $x = 1$; c) $x = 3 \text{ wt}$

- Gambar 3a menunjukkan hasil uji tarik spesimen dengan paduan Zr-6Mo-4Ti-1Y, yang memiliki kekuatan *ultimate* sebesar 647,77 N/mm² dan modulus elastisitas 179,35 GPa.
- Gambar 3b menunjukkan hasil uji tarik untuk paduan Zr-6Mo-4Ti-2Y, dengan kekuatan *ultimate* 411,84 N/mm² dan modulus elastisitas 61,36 GPa.
- Gambar 3c memperlihatkan hasil uji pada paduan Zr-6Mo-4Ti-3Y, yang memiliki kekuatan *ultimate* 360,00 N/mm² dan modulus elastisitas 59,63 GPa.

Hasil pengujian tarik ini menunjukkan bahwa penambahan unsur yttrium memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan kekuatan *ultimate* paduan. Hal ini sejalan dengan analisis mikrostruktur paduan, di mana batas butir mengalami perubahan akibat penambahan yttrium. Selain itu, nilai regangan mengalami peningkatan dari **0,8%** menjadi

2,8% seiring bertambahnya kandungan yttrium. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan yttrium dapat meningkatkan elastisitas material, sehingga paduan menjadi lebih mampu mengalami deformasi plastis sebelum mengalami kegagalan.



Gambar 4. Hasil foto permukaan patahan spesimen uji tarik paduan biomaterial berbasis Zr, Zr-6Mo-4Ti-xY; a) $x = 0$; b) $x = 1$; c) $x = 3$ %wt (pengamatan menggunakan *Dino-Lite*)

Hasil pengamatan permukaan patahan dapat dilihat pada Gambar 4, yang diambil menggunakan alat *Dino-Lite*. Penampang patahan pada paduan Zr-6Mo-4Ti (Gambar 4a) tampak berbentuk seperti permukaan berbukit dan terlihat sangat jelas. Batas butir paduan tampak lebih besar dibandingkan dengan paduan lainnya. Pada patahan ini tidak terlihat adanya *necking*, yang mengonfirmasi nilai regangan yang sangat rendah.

Penampang patahan pada paduan Zr-6Mo-4Ti-1Y (Gambar 4b) menunjukkan ukuran batas butir yang lebih kecil dibandingkan paduan Zr-6Mo-4Ti. Sampel ini juga memiliki nilai regangan yang lebih besar, yang menunjukkan bahwa penambahan 1 %wt yttrium memberikan dampak positif terhadap sifat mekanik, khususnya dalam hal regangan material.

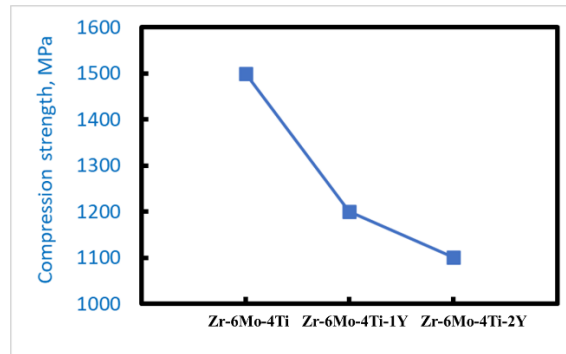
Sementara itu, penampang patahan pada paduan Zr-6Mo-4Ti-3Y (Gambar 4c) menunjukkan batas butir yang paling kecil di antara semua paduan. Hasil ini sejalan dengan nilai regangan yang juga lebih tinggi. Meskipun kekuatan luluh (*yield strength*) paduan ini lebih rendah, penambahan yttrium tetap memberikan efek positif berupa daerah regangan yang lebih luas, yang mengindikasikan peningkatan kemampuan deformasi plastis.

Uji Kompresi

Hasil pengujian kompresi ditampilkan pada Gambar 5. Dapat diamati bahwa terdapat pengaruh signifikan dari penambahan unsur yttrium terhadap penurunan nilai kekuatan tekan (kompresi) material. Nilai kekuatan tekan masing-masing paduan adalah sebagai berikut:

- Zr-6Mo-4Ti: 1295,40 MPa
- Zr-6Mo-4Ti-1Y: 1170,73 MPa
- Zr-6Mo-4Ti-3Y: 1116,87 MPa

Penurunan nilai kekuatan tekan ini sejalan dengan hasil pengamatan mikrostruktur dan pengujian tarik sebelumnya, yang menunjukkan bahwa penambahan unsur yttrium berkontribusi terhadap penurunan sifat mekanik paduan secara keseluruhan.



Gambar 5. Hasil uji kompresi paduan biomaterial berbasis zirkonium (Zr-6Mo-4Ti-xY) dengan variasi x = 0, 1, dan 3 %wt yttrium

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian mekanikal dan non-mekanikal terhadap paduan biomaterial berbasis zirkonium, Zr-6Mo-4Ti-xY (x = 0, 1, dan 3 %wt), dapat disimpulkan bahwa penambahan unsur yttrium memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan batas butir paduan. Penambahan yttrium menyebabkan penyusutan ukuran butir, yang berdampak langsung terhadap sifat mekanik paduan.

Sifat mekanik yang dimaksud mencakup kekerasan, kekuatan tarik, dan kekuatan tekan, yang semuanya mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya kandungan yttrium, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2, Gambar 3, dan Gambar 5. Penurunan kekerasan ini justru memberikan keuntungan dalam proses manufaktur dan meningkatkan kemampuan formabilitas paduan. Nilai kekerasan terendah ditemukan pada paduan Zr-6Mo-4Ti-3Y, yaitu sebesar 327,05 HV, yang mendekati nilai kekerasan baja SS 316L (272 ± 35 HV) [9], salah satu material yang umum digunakan sebagai biomaterial.

Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa kekuatan tarik paduan berada dalam rentang 360–648 MPa. Penambahan yttrium terbukti mampu menurunkan kekuatan tarik, sehingga paduan ini mendekati karakteristik tulang kortikal yang memiliki kekuatan tarik sekitar 78–151 MPa (sumbu longitudinal) dan 51–66 MPa (sumbu transversal) [10]. Nilai ini juga lebih rendah dibandingkan dengan paduan Ti-6Al-4V yang memiliki kekuatan tarik 720–950 MPa [11].

Sementara itu, hasil uji kompresi menunjukkan bahwa paduan Zr-6Mo-4Ti-xY memiliki kekuatan tekan dalam rentang 1100–1300 MPa, lebih tinggi dibandingkan dengan Ti-6Al-4V ($940,8 \pm 8,1$ MPa) [12], yang umum digunakan sebagai biomaterial pada sendi panggul (*hip joint*).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Moztarzadeh, "Biocompatibility of Implantable Materials Focused on Titanium Dental Implants," Charles University, 2017. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:139931756>
- [2] S. S. Sidhu, H. Singh, and M. A.-H. Gepreel, "A review on alloy design, biological response, and strengthening of β -titanium alloys as biomaterials," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 121, p. 111661, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111661>.
- [3] N. Eliaz, "Corrosion of Metallic Biomaterials: A Review," *Materials*, vol. 12, no. 3, p. 407, 2019. doi: 10.3390/ma12030407.
- [4] S. Guo *et al.*, "A novel metastable β -type Zr-12Nb-4Sn alloy with low Young's modulus and low magnetic susceptibility," *J. Alloys Compd.*, vol. 745, pp. 234–239, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.088>.
- [5] S. Guo *et al.*, "A metastable β -type Zr-4Mo-4Sn alloy with low cost, low Young's modulus and low magnetic susceptibility for biomedical applications," *J. Alloys Compd.*, vol. 754, pp. 232–237, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.279>.
- [6] L. Nie, Y. Zhan, H. Liu, and C. Tang, "Novel β -type Zr-Mo-Ti alloys for biological hard tissue replacements," *Mater. Des.*, vol. 53, pp. 8–12, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.008>.
- [7] K. Zhou, Y. Liu, S. Pang, and T. Zhang, "Formation and properties of centimeter-size Zr-Ti-Cu-Al-Y bulk metallic glasses as potential biomaterials," *J. Alloys Compd.*, vol. 656, pp. 389–394, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.254>.
- [8] L. Huang *et al.*, "Bio-corrosion study on zirconium-based bulk-metallic glasses," *Intermetallics*, vol. 17, no. 4, pp. 195–199, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2008.07.020>.
- [9] M. Ziętała *et al.*, "The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel

- fabricated using laser engineered net shaping,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 677, pp. 1–10, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.028>.
- [10] J. Kundu, F. Pati, J.-H. Shim, and D.-W. Cho, “10 - Rapid prototyping technology for bone regeneration,” R. B. T.-R. P. of B. Narayan, Ed., Woodhead Publishing, 2014, pp. 254–284. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857097217.254>.
- [11] C. V Haden, P. C. Collins, and D. G. Harlow, “Yield Strength Prediction of Titanium Alloys,” *JOM*, vol. 67, no. 6, pp. 1357–1361, 2015, doi: 10.1007/s11837-015-1436-2.
- [12] X. Yan *et al.*, “Effect of hot isostatic pressing (HIP) treatment on the compressive properties of Ti6Al4V lattice structure fabricated by selective laser melting,” *Mater. Lett.*, vol. 255, p. 126537, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126537>.