

Pengaruh Unsur Padu Mo dan Proses Fabrikasi Terhadap Kekerasan Plat Zirlo-Mo

Yuant Tiandho¹, Posman Manurung¹ dan Futichah²

¹Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung, Lampung

²Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional, Banten

Email: posman65@unila.ac.id

Diterima 20 Desember 2012, direvisi 10 Januari 2013

Abstrak. Paduan zirlo-Mo merupakan kandidat material kelongsong bahan bakar nuklir generasi baru. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan Mo dan proses fabrikasi yang dilakukan terhadap kekerasan plat zirlo-Mo. Zirlo-Mo yang dibuat memiliki komposisi Zr-1%Sn-1%Nb-0,1%Fe dengan variasi Mo sebesar 0,3%; 0,4%; dan 0,5%. Fabrikasi yang dilakukan meliputi peleburan, β -quenching, pengerolan panas, anil 760°C, pengerolan dingin 1,5 mm, anil 650°C, pengerolan dingin 1 mm, serta anil 500°C. Melalui uji kekerasan dengan *microhardness Vickers tester* diketahui bahwa penambahan unsur padu Mo dapat meningkatkan kekerasan paduan zirlo-Mo. Proses fabrikasi memiliki pengaruh yang besar terhadap kekerasan zirlo-Mo. Peningkatan kekerasan dapat dicapai dengan melakukan proses β -quenching dan pengerolan. Sedangkan proses anil bersifat menurunkan kekerasan paduan. Kekerasan tertinggi dicapai pada proses rol panas untuk sampel ZM-0,5 dengan nilai kekerasan 3,6 GPa sedangkan kekerasan terendah dicapai pada ZM-0 pasca peleburan dengan nilai kekerasan 1,6 GPa.

Kata Kunci: *zircaloy*, zirlo-Mo, β -quenching, pengerolan, anil, dan kekerasan.

PENDAHULUAN

Paduan zirkonium (*zircaloy*) telah digunakan secara luas sebagai kelongsong bahan bakar nuklir (Miller, 1957). Hal ini dikarenakan paduan tersebut memiliki tampang serap neutron yang rendah sekitar 0,18 barn (Brady, et al., 2002), kekerasan yang baik, serta tahan terhadap korosi pada temperatur tinggi (Mardon, et al., 2000).

Zirlo adalah *zircaloy* generasi baru dengan sifat yang sangat unggul. Ketahanan korosinya lebih tinggi 58% dibandingkan *zircaloy-4* (Teodoro, et al., 2007). Berdasarkan karakteristik tersebut maka paduan zirlo berpotensi untuk dikembangkan

seiring dengan adanya tendensi peningkatan temperatur dalam teras reaktor air bertekanan (*pressurized water reactor*).

Salah satu langkah yang mungkin dapat dilakukan dalam proses pengembangan zirlo adalah dengan menambahkan molibdenum (Mo) sehingga terbentuk paduan zirlo-Mo. Alasan penambahan ini karena Mo mampu meningkatkan ketahanan korosi (Lee & Hwang, 2003), distribusi fasa dan homogenitas (Sabol, et al., 2000), serta kekerasan (Sugondo, 2005) dari *zircaloy* yang telah ada sebelumnya. Peningkatan karakteristik tersebut dapat dicapai karena Mo di dalam zirkonium (Zr) dapat membentuk senyawa intermetalik antara Zr dengan Mo.

Untuk mengetahui karakteristik zirlo-Mo yang akan digunakan sebagai kelongsong

*Corresponding author:

E-mail: posman65@unila.ac.id

bahan bakar nuklir dibutuhkan studi awal mengenai karakteristik plat zirlo-Mo. Proses fabrikasi yang akan dilakukan dalam pembuatan plat zirlo-Mo merujuk kepada proses fabrikasi dalam pembuatan plat zirlo yang terdiri dari proses peleburan, β -*quenching*, pengerolan, dan anil (Foster dkk., 1993).

Proses peleburan dilakukan dengan menggunakan tungku busur listrik pada arus 150 A (Susanto, 2010). Fabrikasi dilanjutkan dengan proses β -*quenching* yang bertujuan untuk memperoleh fasa β -Zr karena kelarutannya lebih tinggi dibandingkan fasa α -Zr. Seperti pada logam lainnya, β -*quenching* dalam *zircaloy* akan memicu terjadinya proses pelarutan padat lewat jenuh (*supersaturated*) dan peningkatan kekerasan (Chaidir dkk., 2008).

Pengerolan merupakan proses utama yang berujuan untuk menipiskan paduan logam. Namun, pengerolan juga dapat meningkatkan kekerasan *zircaloy* melalui mekanisme pengerasan regang (Bandriyana dkk., 2008). Sedangkan proses anil berfungsi untuk menghilangkan tegangan sisa akibat ketidakseragaman deformasi plastis yang muncul pada perlakuan mekanis. Adanya tegangan sisa dalam bahan akan memicu atau mempercepat terjadinya korosi (Sugondo & Futichah, 2007). Dengan demikian proses anil perlu dilakukan pada zirlo-Mo pasca pengerolan.

Pada penelitian ini akan diteliti pengaruh penambahan unsur padamu Mo dan proses

fabrikasi yang dilakukan terhadap kekerasan plat zirlo-Mo. Untuk uji kekerasan tersebut dilakukan dengan menggunakan *micro hardness Vickers tester*.

METODE PENELITIAN

Sebelum dilakukan proses fabrikasi zirlo-Mo terlebih dahulu dilakukan penimbangan bahan dengan neraca digital. Bahan-bahan yang digunakan terdiri dari Zr (99%), Sn (99,89%), Nb (99,85%), Fe (99,99%), serta Mo (99%) merek Aldrich yang berbentuk *granule*. Komposisi tiap sampel dalam penelitian ini disajikan dalam **Tabel 1**.

Selanjutnya dilakukan proses peleburan dengan menggunakan tungku busur listrik yang teraliri gas argon. Arus dalam peleburan adalah 150 A. Untuk mencapai homogenitas yang tinggi maka dilakukan proses peleburan ulang (*re-melting*) sebanyak 5 kali pada tiap sampel.

Proses β -*quenching* dilakukan pada temperatur 980°C dalam kondisi argon selama 2 jam. Apabila proses *holding* telah mencapai 2 jam kemudian sampel beserta *chamber* yang berisi argon didinginkan secara cepat di dalam air.

Tebal hasil pengerolan adalah 2 mm. Pengerolan dingin dilakukan pada temperatur kamar dan terdiri dari 2 tahap. Pada tahap pertama ketebalannya adalah 1,5 mm sedangkan pada tahap kedua ketebalannya adalah 1 mm.

Tabel 1 Komposisi kandungan bahan dalam sampel zirlo-Mo

Kode Sampel		Kandungan Unsur Utama dan Padamu				
		Zr	Sn	Nb	Fe	Mo
ZM-0	%berat	97,9	1	1	0,1	0
	Massa (gr)	14,685	0,15	0,15	0,015	0
ZM-0,3	%berat	97,6	1	1,	0,1	0,3
	Massa (gr)	14,64	0,15	0,15	0,015	0,045
ZM-0,4	%berat	97,5	1	1	0,1	0,4
	Massa (gr)	14,625	0,15	0,15	0,015	0,06
ZM-0,5	%berat	97,4	1	1	0,1	0,5
	Massa (gr)	14,61	0,15	0,15	0,015	0,075

Proses anil dilakukan dalam 3 tahap yaitu masing-masing dilakukan pasca pengerolan. Anil pertama pada temperatur 760°C, kedua pada 650°C, dan ketiga pada 500°C. Seluruh proses anil berada dalam kondisi argon untuk menghindari oksidasi.

Selanjutnya sampel diuji kekerasannya dengan menggunakan *microhardness Vickers tester*. Preparasi uji kekerasan terdiri dari pemotongan, pembungkaihan, penggerindaan dari grit 180 sampai 2000, pemolesan dengan pasta alumina, pencucian dengan ultrasonik, serta pengetsaan dengan larutan etsa yang terdiri dari 45 ml aquades, HNO₃ sebanyak 45 ml, dan HF 10% sebanyak 10 ml. Kekerasan sampel dihitung dengan persamaan 1 (Evans & Charles, 1976):

$$HV = 0,0018544 \times \frac{P}{D^2} \quad (1)$$

dengan *HV* = nilai kekerasan Vickers (GPa), *P* = beban (N), *D* = diagonal rerata (mm).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam melakukan uji kekerasan dengan *microhardness Vickers tester* digunakan beban sebesar 981 mN. Diagonal hasil jejakan yang terukur kemudian digunakan

untuk menghitung kekerasan dengan persamaan 1 dan hasilnya terdapat dalam **Tabel 2**.

Pada **Tabel 2** terlihat bahwa kekerasan tertinggi mencapai 3,60 GPa dimiliki oleh sampel ZM-0,5 pasca rol panas dan kekerasan terendah dimiliki oleh sampel ZM-0 hasil peleburan dengan nilai kekerasan 1,60 GPa. Melalui pengujian tersebut tampak bahwa penambahan Mo dan fabrikasi yang dilakukan sangat menentukan kekerasan paduan zirlo-Mo.

Secara umum penambahan unsur pepadu Mo akan meningkatkan kekerasan zirlo-Mo. Peningkatan ini terjadi karena Mo mudah membentuk senyawa intermetalik antara Zr dengan Mo yang dapat menghambat gerak dislokasi selama penambahannya belum melebihi 1,5% berat (Sugondo, 2005). Terhambatnya pergerakan dislokasi ini menandakan kekerasan suatu bahan akan meningkat. Proses *β-quenching* dalam **Tabel 2** juga terlihat meningkatkan kekerasan paduan. Peningkatan ini diakibatkan oleh mekanisme pelarutan padat dan atau presipitasi yang terjadi pada *β-quenching*. Pada pelarutan padat akan timbul tegangan akibat adanya unsur pepadu dalam *base metal* yang menghambat pergerakan dislokasi. Berdasarkan hukum Hume-Rothery dalam paduan zirlo-Mo akan terjadi 2 jenis larut padat, yaitu secara substitusi dan interstisi. Larut padat substitusi akan terjadi apabila

Tabel 2 Nilai kekerasan sampel zirlo-Mo dengan kandungan Mo yang berbeda berdasarkan fabrikasinya. Beban indentor yang digunakan adalah 981 mN.

Proses Fabrikasi	Kandungan Unsur Utama dan Pepadu			
	ZM-0	ZM-0,3	ZM-0,4	ZM-0,5
Peleburan	1,60 ± 0,209	2,33 ± 0,365	2,50 ± 0,092	2,74 ± 0,156
<i>β-quenching</i>	1,83 ± 0,117	2,53 ± 0,146	2,55 ± 0,233	2,81 ± 0,112
Rol panas	3,17 ± 0,685	3,25 ± 0,128	3,51 ± 0,420	3,60 ± 0,257
Anil 760°C	2,36 ± 0,043	2,43 ± 0,128	2,53 ± 0,066	2,59 ± 0,000
Rol dingin 1	2,58 ± 0,056	2,66 ± 0,031	2,91 ± 0,046	3,14 ± 0,085
Anil 650°C	2,06 ± 0,122	2,32 ± 0,077	2,54 ± 0,131	2,76 ± 0,174
Rol dingin 2	2,87 ± 0,106	3,24 ± 0,099	3,39 ± 0,158	3,60 ± 0,000
Anil 500°C	2,57 ± 0,033	2,64 ± 0,051	2,70 ± 0,024	2,90 ± 0,086

perbedaan diameter atom pelarut dengan atom terlarut kurang dari 15% dan jika perbedaannya lebih dari 15% maka akan terjadi larut padat interstisi (Smith, 1996). Karena diameter atom Zr adalah 2,96 Å dan diameter atom Sn, Nb, dan Mo berkisar antara 2,74 – 2,90 Å maka kelarutan yang terjadi adalah substitusi. Sedangkan Fe yang memiliki diameter atom 2,56 Å akan terlarut secara interstisi (Moore, et al., 2010).

Pengerasan melalui presipitasi terjadi akibat adanya inti fasa kedua yang juga dapat menimbulkan tegangan dan menghambat pergerakan dislokasi. Inti fasa kedua dapat terbentuk karena pada pendinginan cepat mengakibatkan paduan berada dalam kondisi jenuh serta terjadi reaksi kimia secara spontan (Smith, 1996).

Selain hal di atas, peningkatan kekerasan dalam β -quenching juga dapat dijelaskan oleh peristiwa penurunan ukuran butir yang umumnya terjadi pada proses pendinginan cepat. Adanya fasa kedua atau unsur asing yang terbentuk dalam proses ini akan menghambat pergerakan batas butir sehingga pertumbuhan butir pun semakin sulit. Hubungan antara ukuran butir dengan kekerasan suatu logam atau paduan diberikan dalam persamaan Hall-Petch (Agrawal, 2000):

$$\sigma_y = \sigma_{0y} + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

dengan, σ_y = kekerasan (Pa), σ_{0y} = konstanta (Pa), k = konstanta ($\text{N/m}^{3/2}$), dan d = ukuran butir (m). Sehingga melalui hubungan tersebut terlihat bahwa semakin rendah ukuran butir maka kekerasan suatu paduan akan semakin meningkat.

Pada **Tabel 2** terlihat bahwa seluruh proses pengerolan akan meningkatkan kekerasan zirlo-Mo. Peningkatan kekerasan ini dicapai melalui proses pengerasan regang akibat deformasi plastis (pengerolan) yang menyebabkan peningkatan kerapatan dislokasi sehingga dislokasi semakin sukar bergerak (Smith,

1996). Selain itu, dapat dilihat pula bahwa pengerolan panas dapat mencapai tingkat kekerasan tertinggi. Hal ini terjadi karena pengerolan panas dilakukan setelah β -quenching yang menghasilkan tegangan dalam paduan cukup tinggi dibandingkan dengan tegangan pada pengerolan dingin yang telah melalui proses anil. Sedangkan pengerolan tahap 2 memiliki kekerasan lebih tinggi dibandingkan kekerasan pada pengerolan dingin tahap 1. Tentu saja ini terjadi karena kerapatan dislokasi pada pengerolan dingin tahap 2 lebih tinggi dibandingkan kerapatan dislokasi pada pengerolan dingin tahap 1.

Dalam **Tabel 2** juga dapat diketahui bahwa perlakuan anil dapat menurunkan kekerasan paduan. Karena seperti pada tujuan awal, anil dilakukan untuk mengurangi tegangan sisa yang berefek terhadap penurunan kekerasan bahan. Hubungan empiris antara kekerasan dengan temperatur anil diberikan oleh persamaan (Dieter, 1968):

$$H = A \cdot e^{-B \cdot T} \quad (3)$$

dengan H adalah nilai kekerasan, A dan B adalah konstanta yang bergantung pada jenis material, dan T adalah temperatur anil.

Melalui hasil uji kekerasan dalam **Tabel 2** diketahui bahwa anil yang memiliki kekerasan terendah terjadi pada anil 650°C. Hasil ini sedikit berbeda dengan hubungan empiris antara kekerasan logam terhadap temperatur. Dari hubungan tersebut seharusnya semakin tinggi temperatur anil maka kekerasan akan semakin rendah. Penyimpangan ini kemungkinan disebabkan oleh proses yang dilakukan sebelum anil tersebut. Pada anil 760°C proses sebelumnya yang dilakukan adalah β -quenching dan rol panas yang menghasilkan tegangan sisa sangat tinggi. Berbeda dengan proses sebelum anil 650°C, yaitu proses pengerolan dingin dimana sebelumnya sampel telah dianil pada temperatur 760°C, sehingga tegangan sisa di dalamnya pun telah lebih rendah

dibandingkan sebelum anil 760°C. Namun demikian, masih tetap terbukti bahwa semakin tinggi temperatur anil yang digunakan maka semakin tinggi pula penurunan kekerasan dari paduan zirlo-Mo.

KESIMPULAN

Secara umum penambahan unsur pepadu Mo dalam paduan zirlo-Mo akan meningkatkan kekerasan. Proses fabrikasi sangat mempengaruhi kekerasan yang dimiliki oleh paduan zirlo-Mo. Peningkatan kekerasan dapat dicapai dengan melakukan proses β -quenching dan pengerolan. Sedangkan proses anil bersifat menurunkan kekerasan paduan karena digunakan untuk mengurangi tegangan sisa.

Berdasarkan hasil uji kekerasan yang telah dilakukan, maka plat zirlo-Mo yang terbentuk dalam penelitian ini memiliki karakteristik yang baik. Namun masih dibutuhkan penelitian lebih lanjut mengenai karakteristik lain seperti ketahanan korosi, ketahanan radiasi, dan tampang serap neutron sebelum zirlo-Mo digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir dalam suatu reaktor nuklir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-Batan yang telah mendanai penelitian ini melalui program DIPA 2011.

DAFTAR PUSTAKA

Agrawal, B. K., (2000). *Introduction to Engineering Materials*. New Delhi: McGraw-Hill.

Bandriyana, B., Ismoyo, A. H. & Parikin, (2008). Proses Pengerolan dan Karakterisasi Paduan Zr-Nb-Mo-Ge untuk

Material Kelongsong Bahan Bakar Nuklir. *Jurnal Sains Materi Indonesia Edisi Khusus Desember*, pp. 93-98.

Brady, G. S., Clauser, H. R. & Vaccan, A., (2002). *Materials Handbook an Encyclopedia for Managers, Technical, Professional, Purchasing and Production Managers, Technicians, and Supervisors*. New York: Mc Graw Hill-Professional.

Chaidir, A., Agus, Y. D. & Pribadi, S., 2008. Pengaruh Pemanasan Paduan Zr-1%Nb-0,5%Sn-0,75%Fe terhadap Ketahanan Korosi dan Kekerasannya. *Prosiding Seminar Nasional ke-14 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Bandung 5 Nopember*, pp. 413-418.

Dieter, G. E., (1968). *Mechanical Metallurgy*. New York: McGraw hill.

Evans, A. G. & Charles, E. A., (1976). Fracture Toughness by Indentation. *J. Am. Ceram. Soc.*, 59(7-8), pp. 371-372.

Foster, J. P., Comstock, R. J., Worcester, S. A. & Sabol, G. P., (1993). *Method of Processing Zirlo Material for Light Water Reactor Applications*. United States of America, Patent No. 5,230,758.

Lee, J. H. & Hwang, S. K., (2003). Effect of Mo Addition on the Corrosion Resistance of Zr-Based Alloy in Water Containing LiOH. *Journal of Nuclear Materials*, Volume 321, pp. 238-248.

Mardon, J. P., Charquet, D. & Senevat, J., (2000). Influence of Composition and Fabrication Process in Out of Pile and in-Pile Properties of M5 Alloy. *Zirconium in the Nuclear Industry: 12th International Symposium, ASTM STP 1354*, pp. 505-522.

Miller, G. L., (1957). *Zirconium*. 2nd ed. London: Butterworths Scientific Publications.

Yuant Tiandho dkk : Pengaruh Unsur Pemasu Mo dan Proses Fabrikasi Terhadap Kekerasan Plat Zirlo-Mo

- Moore, J. W., Stanitski, C. L. & Jurs, P. C., (2010). *Principles of Chemistry the Molecular Science*. USA: Brooks/Cole.
- Sabol, G. P., Comstuck, R. J. & Nayak, U. P., (2000). Effect of Dilute Alloy Additions of Molybdenum, Niobium, and Vanadium on Zirconium Corrosion. *Zirconium in the Nuclear Industry: 12th International Symposium*, pp. 525-543.
- Smith, W. F., (1996). *Principles of Materials Science and Engineering*. 3 ed. USA: McGraw-Hill.
- Sugondo, (2005). Peranan Pemasu Sn, Fe, Cr, Nb, dan Mo dalam Zirkaloi. *Urania No. 41/Thn. XI/Januari*, pp. 6-12.
- Sugondo & Futichah, (2007). Pengaruh Perlakuan Panas pada Regangan dan Tegangan Sisa Paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe. *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, 3(2), pp. 61-73.
- Susanto, Y. D. A., (2010). Pembuatan Ingot Zirlo-Mo sebagai Kelongsong Bahan Bakar Reaktor Daya. *Hasil-Hasil Penelitian EBN Tahun 2010*, pp. 159-165.
- Teodoro, C. A. et al., (2007). Comparison of the Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Zirlo and Other Zirconium Alloy. *International Nuclear Atomic Conference 2007, Santos, SP, Brazil, September 30 - October 5*, pp. 1-6.