

ANALISIS PENGARUH PROSES Pengerolan DAN PENEMPAAN PANAS PADA SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADUAN ZrNbMoGe

A.H. Ismoyo, Parikin, Bandriyana

Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail: agus_hismoyo@batan.go.id

(Naskah diterima: 24-12-2013 , disetujui: 27-01-2014)

ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH PROSES Pengerolan DAN PENEMPAAN PANAS PADA SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADUAN ZrNbMoGe. Penelitian kombinasi teknik pembentukan bahan dengan proses pengerolan dan penempaan dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik paduan ZrNbMoGe yang dirancang untuk bahan kelongsong bahan bakar PLTN. Pengaruh proses pengerolan dan penempaan terhadap perubahan kekerasan dianalisis dengan pengujian struktur mikro dan struktur kristal ingot hasil peleburan. Pengujian dilakukan pada paduan dengan komposisi (% berat) 97% Zr, 0,5% Mo, 2% Nb dan 0,5% Ge hasil peleburan dengan tungku busur listrik. Proses pengerolan panas dilakukan pada 900 °C dan proses penempaan panas pada temperatur 950 °C. Pengamatan sifat mekanik dilakukan dengan uji kekerasan mikro Vickers, uji struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik, sedangkan struktur kristal diamati dengan uji difraktometer sinar-X. Hasil uji kekerasan sebelum proses pengerolan dan penempaan adalah 141,21 HV, setelah pengerolan panas kekerasannya meningkat menjadi 210,47 HV dan setelah proses penempaan panas kekerasannya adalah 365,75 HV. Data struktur mikro menunjukkan peristiwa pengorientasian arah kristal (texturing) terlihat jelas akibat pengaruh proses-proses pengerolan dan penempaan panas. Pola difraksi memperlihatkan kecenderungan preferred orientation dominan mengarah ke bidang refleksi (10 $\bar{1}$ 1) yang teridentifikasi melalui peningkatan cacahan dari sekitar 2500 *counts* menjadi sekitar 3000 *counts*. Disimpulkan bahwa proses pengerolan dan penempaan panas mampu mengubah sifat mekanik (kekerasan dan tekstur) dan struktur mikro bahan.

Kata kunci: penempaan panas, pengerolan panas, kekerasan, struktur mikro, struktur kristal dan paduan ZrNbMoGe.

ABSTRACT

ANALYSIS OF HOT ROLLING AND HOT FORGING EFFECTS ON MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF ZrNbMoGe ALLOY. Research on formation technique by a combined method of rolling and forging has been carried out in order to improve the mechanical properties of ZrNbMoGe alloy to be used as fuel cladding in NPP (Nuclear Power Plant) application. The effects of rolling and forging were analyzed several tests. The tests were conducted for zirconium alloy specimen with a composition of (in % wt.) 97% Zr, 0,5% Mo, 2% Nb

and 0,5% Ge, where the specimen was melted with an arc-furnace. The hot rolling and forging were conducted at 900 °C and 950 °C respectively. Hardness test was carried out by using a microhardness testing machine, while microstructure examination and crystal structure analysis were conducted with an optical microscope and an X-ray diffractometer. The results show that the hardness of the alloy increase from 141.21 HV (starting material) to 210.47 HV (hot rolled material) and 365.75 HV (hot forged material). Texturing phenomenon is clearly figured on the microstructure due to hot rolling and forging process. Analysis by diffractogram also indicates that the hot rolling and forging process has influence on the crystal orientation of dominant preferred direction in the reflection plane of (10 $\bar{1}$ 1), recorded from the rise of intensity counting from about 2500 to 3000. In summary, hot forging and rolling process can change the mechanical properties (hardness and texture) and microstructure of materials.

Keywords: hot forging, hot rolling, hardness, microstructure, crystal structure, ZrNbMoGe

PENDAHULUAN

Penelitian dan pengembangan bahan kelongsong bahan bakar nuklir merupakan salah satu isu penting dalam mendukung penguasaan teknologi pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Penelitian bahan kelongsong di PSTBM-BATAN disusun dalam program pengembangan sintesis bahan struktur reaktor, khususnya pengembangan paduan zirkonium sebagai bahan kelongsong. Untuk penelitian bahan kelongsong telah dikembangkan paduan ZrNbMoGe yang menghasilkan paduan dengan kekuatan dan ketahanan korosi tinggi. Pemilihan paduan didasarkan pada pembentukan presipitat keras Zr-Ge dalam proses sintesis untuk meningkatkan sifat mekanik. Disamping itu kombinasi Nb dan Mo dirancang untuk peningkatan ketahanan korosi dan sifat mampu bentuk paduan^[1].

Salah satu masalah penting dalam pengembangan bahan untuk kelongsong adalah kemampuan bahan untuk diolah dalam proses fabrikasi. Proses yang telah dilakukan dan menjadi acuan adalah fabrikasi kelongsong zirkaloi-4 dengan metode *Western*^[2]. Dalam proses ini pembentukan bahan dengan penempaan dan pengerolan merupakan langkah penting yang perlu dilakukan dan perlu diteliti untuk menemukan parameter yang optimal. Proses pengerolan dilakukan untuk

meningkatkan kekerasan dan kekuatan melalui perubahan bentuk butiran yang semakin pipih akibat perlakuan deformasi pada bahan. Untuk paduan ZrNbMoGe, proses pengerolan akan semakin meningkatkan kekuatan dengan perubahan butir yang semakin pipih dan pemerataan presipitat Zr₃Ge. Disamping itu proses pengerolan diperlukan dalam pengolahan ingot untuk menghilangkan segregasi^[3]. Proses penempaan akan memperbaiki struktur mikro dengan pemadatan dan pengecilan butiran sehingga meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan. Proses pengerolan dan penempaan dalam fabrikasi kelongsong dari zirkaloi-4^[4] dilakukan dengan kombinasi perlakuan penempaan, pengerolan panas dan pengerolan dingin dengan beberapa pengaturan proses perlakuan panas. Pengerolan panas dilakukan pada temperatur sekitar 700 °C, sedangkan proses penempaan pada temperatur 900 °C. Untuk bahan paduan Zr-3%Nb-1%Sn yang digunakan untuk bahan kelongsong tahan korosi tinggi, proses penempaan pada temperatur 800 °C dilanjutkan pengerolan panas pada temperatur sekitar 1065 °C dan kemudian diproses pengerolan dingin pada temperatur sekitar 600 °C mampu menghasilkan penambahan kekuatan, ketahanan fatik dan ketahanan korosi^[5].

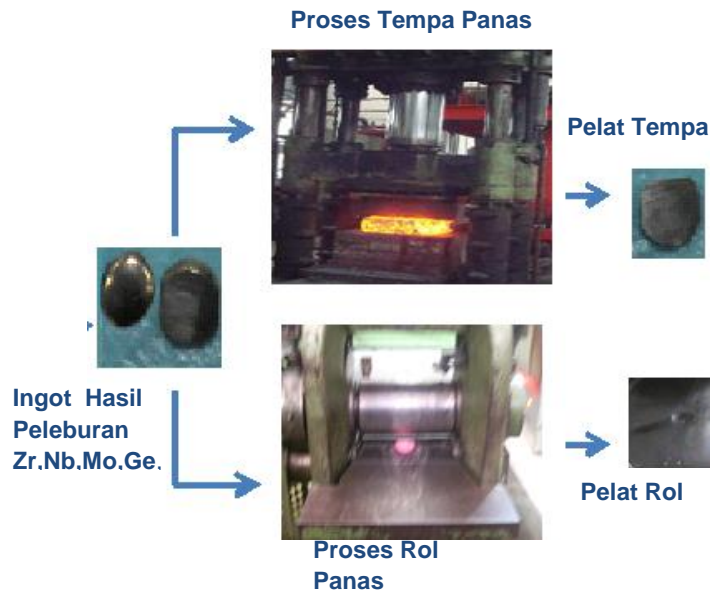
Untuk kepentingan proses fabrikasi dan peningkatan kekuatan, perlu dianalisis proses pengerolan dan penempaan dengan parameter proses yang tepat untuk menghasilkan sifat mekanik paduan zirkonium yang unggul^[5]. Pembahasan dalam makalah ini difokuskan pada hasil penelitian yang berkaitan dengan sifat mampu bentuk paduan ZrNbMoGe dengan meneliti sifat dan karakteristik bahan paduan saat mengalami perlakuan penempaan dan pengerolan. Sasaran yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah diperolehnya bahan paduan ZrNbMoGe untuk bahan kelongsong beserta data sifat mampu penempaan dan mampu pengerolan sehingga dapat dilanjutkan / dikembangkan menuju proses fabrikasi. Adapun hasil yang diperoleh dalam proses penempaan dan pengerolan, dipengaruhi oleh komposisi dan teknologi proses penempaan dan pengerolan, meliputi temperatur penempaan dan pengerolan, angka reduksi, serta beban penempaan dan pengerolan. Parameter dan besaran tersebut akan menentukan struktur mikro, struktur kristal dan sifat mekanik yang merupakan masalah penting dalam analisis metalurgi. Proses penguatan bahan *via* peleburan paduan dan proses penempaan dan pengerolan melalui penguatan presipitasi menjadi persoalan penting dalam penelitian ini^[6-7]. Dengan meneliti perubahan struktur mikro dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan ketahanan korosinya diharapkan diperoleh data masukan untuk menghasilkan bahan paduan dengan sifat mekanik yang optimal. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui sifat mekanik, strukturmikro dan struktur kristal kandidat bahan kelongsong elemen bakar nuklir.

TATA KERJA

Bahan yang digunakan pada studi untuk sintesis pembuatan paduan ZrNbMoGe

adalah bahan kimia dari produksi ALDRICH dengan kemurnian untuk Zr 99,96% bentuk *sponge*, Mo dan Ge 99,98 % bentuk *sponge*, Nb berbentuk kawat dengan kemurnian 99,98 % sedangkan komposisi paduan (% berat) 97% Zr, 0,5% Mo, 2% Nb dan 0,5% Ge Penelitian dilakukan dengan alur proses: penimbangan bahan murni yang dilanjutkan dengan proses sintesis peleburan menggunakan tungku busur listrik dan kemudian di penempaan dan juga di pengerolan seperti ditunjukkan dalam skema alur proses pada Gambar 1. Hasil peleburan dengan tanur busur listrik untuk paduan dengan komposisi berat 97% Zr, 0,5% Mo, 2% Nb dan 0,5% Ge, adalah ingot paduan dengan bentuk dan ukuran ingot adalah lempengan bola diameter 25-30 mm, tebal 8-12 mm dengan berat 25-30 gram. Dalam peleburan ini ingot diusahakan berbentuk pipih untuk keperluan karakterisasi dan proses pengerolan. Ingot hasil peleburan setelah dilakukan pembersihan kemudian diperiksa visual dan disiapkan untuk karakterisasi dan untuk proses pengerolan.

Proses pengerolan dilakukan dengan rol panas dan pemanasan pada temperatur 900 °C. Selanjutnya ingot panas dimasukkan pada mesin pengerolan dengan reduksi 10 % ketebalan. Sampel kemudian dilakukan pengerolan kembali hingga diperoleh pelat dengan ketebalan sekitar 2 mm dengan pengulangan pemanasan dan reduksi ketebalan. Untuk perlindungan oksidasi dilakukan pengaliran gas argon selama pemanasan di tungku dan pemindahan sampel ke mesin pengerolan. Proses penempaan panas dilakukan pada temperatur 950 °C di laboratorium metalurgi LIPI, sedangkan proses pengerolan panas ingot hasil peleburan dilakukan di laboratorium metalurgi-ITB.

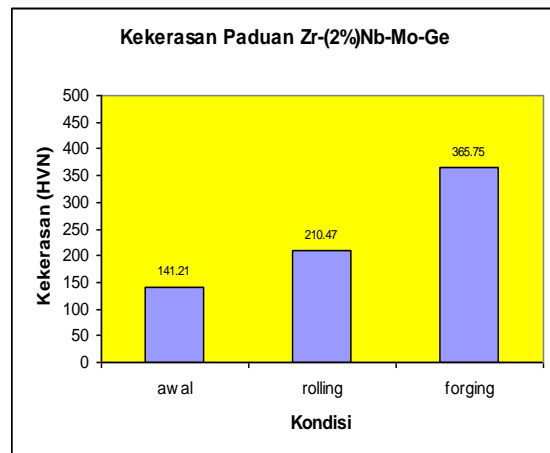


Gambar 1. Skema proses peleburan, penempaan dan pengerolan paduan ZrNbMoGe

Karakterisasi sampel ingot yaitu pelat hasil pengerolan dan penempaan dilakukan dengan pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan SEM-EDS, struktur kristal dengan XRD dan sifat mekanik dengan alat uji kekerasan. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Vickers skala mikro untuk sampel hasil sintesis, hasil penempaan dan pengerolan paduan ZrNbMoGe pada posisi di dalam dan pada batas butir, dilakukan di laboratorium PSTBM-BATAN.

Uji struktur mikro dilakukan dengan pengamatan menggunakan mikroskop optik untuk melihat besar, bentuk dan distribusi dari butir diamati dengan perbesaran 100 kali. Pengamatan dilakukan pada sampel hasil peleburan paduan ZrNbMoGe, setelah proses pengerolan dan setelah proses penempaan di laboratorium PSTBM-BATAN. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan alat Mikroskop Optik dan EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), sedangkan pengujian struktur kristal menggunakan alat XRD (*X-Ray Diffractometer*). Pengamatan struktur mikro melalui beberapa tahap preparasi: *cutting, grinding, polishing* dan *etching*. Etsa

yakni proses mencelupkan permukaan spesimen selama 60-90 detik dalam campuran (40%HF, 60%H₂O) dengan (70%HNO₃, 30%H₂O), dalam fraksi setimbang dan temperatur ruang. Uji *energy dispersive spectroscopy*; EDS dilakukan pada daerah matrik dan batas butir serta beberapa titik pengamatan untuk uji komposisi unsur serta pengamatan presipitat.



Gambar 2. Kekerasan paduan ZrNbMoGe hasil perlakuan pengerolan dan penempaan.

Pengambilan pola difraksi dilakukan dengan spesifikasi alat uji *X-ray Diffraction* dengan parameter pengukuran sebagai berikut:

Jangkauan pengukuran dari sudut $2\theta = 10^\circ$ hingga 75° , langkah pencacahan $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$. Pengolahan data difraksi sampel zirkonium dan paduan ZrNbMoGe untuk mengetahui jenis fasa dan presipitat yang terbentuk dalam paduan, dilakukan menggunakan *software Rietveld Analysis* (RIETAN).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara visual ingot tampak membentuk paduan yang padat dengan sedikit terjadi oksidasi pada permukaan menunjukkan bahan paduan hasil peleburan cukup homogen. Pada peleburan dengan sintesa paduan, terjadi penurunan energi bebas Gibbs dari masing-masing unsur untuk membentuk suatu fasa tertentu dalam paduan. Pada kondisi ini baik unsur Nb dan Mo pada temperatur sekitar 1800°C telah meleleh dan berdifusi ke dalam matrik zirkonium membentuk fasa baru, meskipun titik leleh Nb dan Mo di atas temperatur 2000°C . Titik leleh bahan pemadu Nb dan Mo dalam data unsur menunjukkan terjadinya peleburan unsur secara ideal jika dilebur sendiri tanpa penambahan atom lain.

Diagram batang (*bar chart*) data uji kekerasan paduan dengan komposisi berat 97% Zr, 0,5% Mo, 2% Nb dan 0,5% Ge ditunjukkan pada Gambar 2. Sebelum proses pengerolan dan penempaan kekerasan paduan adalah 141,21 HV, setelah dibentuk dengan metode pengerolan panas kekerasannya adalah 210, 47 HV dan setelah diproses penempaan panas kekerasannya adalah sebesar 365,75 HV. Efek pembentukan bahan melalui metode pengerolan panas maupun melalui proses penempaan panas dapat meningkatkan sifat kekerasan (*precipitation hardening*) bahan paduan. Hal ini terjadi oleh sebab setelah proses pengerolan dan penempaan panas tersebut, bahan semakin tipis dan selama itu pula terjadi proses pendingin cepat (*quenching*) atau *artificial ageing* yang mengakibatkan tumbuhnya presipitat Zr-Ge dan Zr-Mo di sekitar batas butir. Fenomena presipitasi ini dapat menghambat pergerakan dislokasi (*slip plane*) oleh karena semakin banyaknya batas butir setelah proses pengerolan panas maupun proses penempaan panas. Kedua proses ini mampu menumbuhkan presipitat di sekitar batas butir (*grain boundary*), secara fisis metalurgi akan memperbanyak/menambah batas butir, yang menghalangi pergerakan dislokasi dalam bahan.

Tabel 1. EDS sampel paduan ZrNbMoGe.

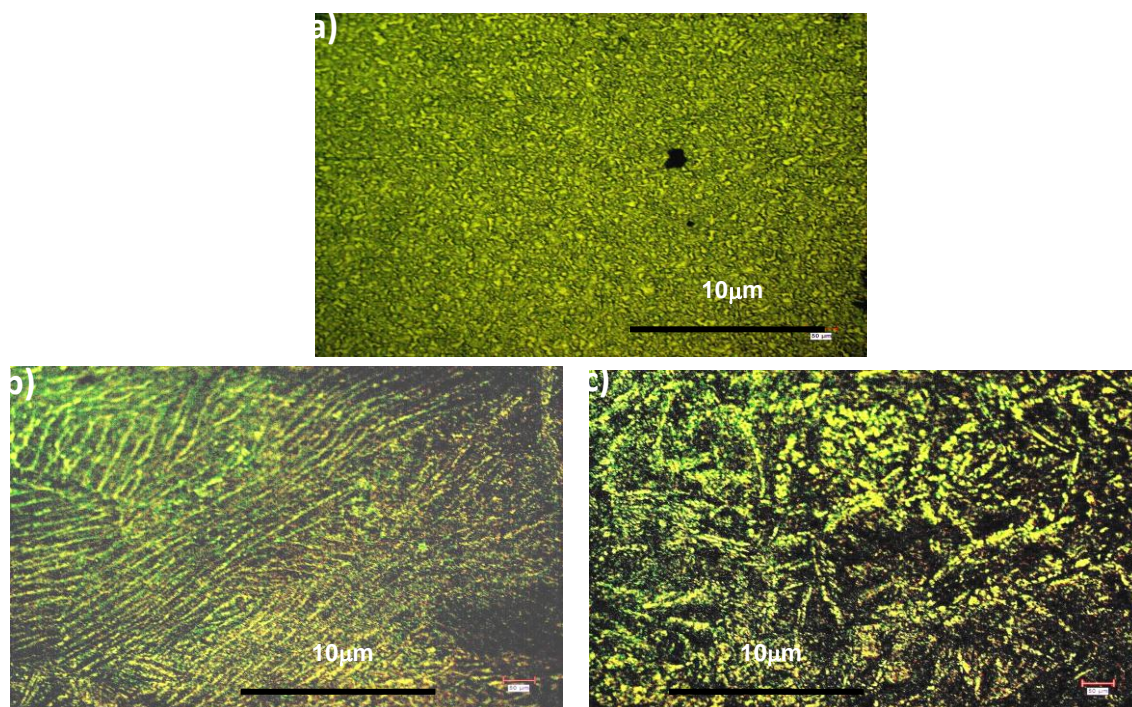
Unsur	% Berat			Presipitat
	Ingot	Pengerolan	Penempaan	
Ge	18,90	12,88	10,10	Zr ₃ Ge, ~ZrMo ₂
Zr	75,90	62,71	77,49	
Mo	2,65	1,11	2,62	

Hasil pengamatan sampel dengan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) yang tampak pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa pembentukan presipitat juga berkontribusi mempengaruhi sifat kekerasan bahan. Bahan ingot yang memiliki kekerasan sekitar 141,21 HVN ini sudah menga-

lami presipitasi akibat perlakuan temperatur (pendinginan) saat fabrikasi. Angka prosentase berat unsur Zr, Ge dan Mo menginformasikan fluktuasinya tidak jauh berbeda antara 1 % hingga 10 % berat. Identifikasi awal melaporkan bahwa presipitasi Zr-Ge dan Zr-Mo di batas butir kemungkinannya

cukup besar hampir mendekati 11 %^[5-7]. Pada proses pengerolan pembentukan presipitat Zr_3Ge (12,88 %wt. Ge) lebih banyak dibanding presipitat $ZrMo_2$ (1,11 %wt. Mo). Sifat kekerasan bahan didominasi oleh presipitat Zr_3Ge dengan presentase

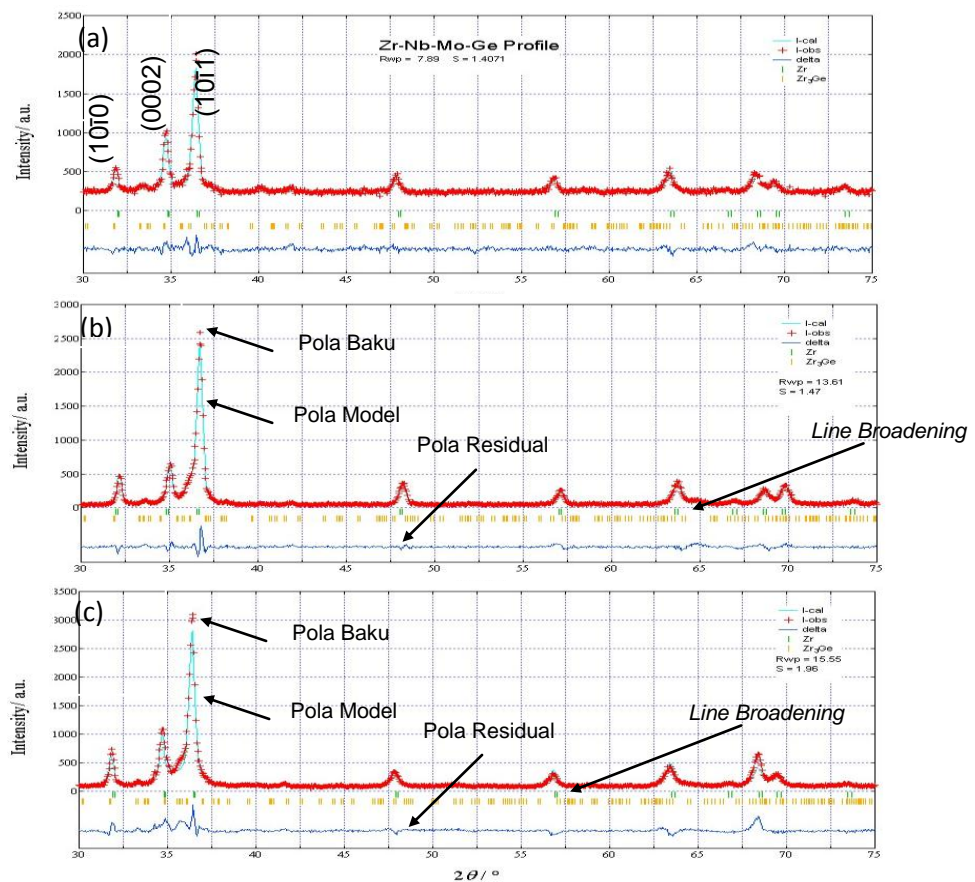
atomik Ge sebesar 6,51 % yang semakin tersebar merata. Sementara kuantitas presipitat $ZrMo_2$ masih sedikit, yang teridentifikasi dari prosentase atomik Mo hanya 0,42%.



Gambar 3. Struktur mikro paduan Zr-(2%)Nb-Mo-Ge hasil: (a) sebelum pengerolan dan penempaan, (b) setelah pengerolan (canai) dan (c) setelah penempaan (*forging*).

Sedang hasil pengamatan EDS pada sampel penempaan yang disusun pada Tabel 1 juga, memperlihatkan bahwa presipitat Zr-Ge dan Zr-Mo bersama-sama berkontribusi pada kekerasan bahan. Presipitat Zr_3Ge semakin mengecil ukurannya (10,10 %wt. Ge) tetapi kuantitas presipitat $ZrMo_2$ semakin meningkat (2,62 % wt Mo) dibandingkan hasil proses pengerolan. Kombinasi kedua presipitat Zr-Mo dan Zr-Ge yang tersebar merata diseluruh bahan ini menyebabkan kekerasan bahan bertambah sebesar 100 HVN lebih dari 210,47 HVN pada sampel pengerolan menjadi 365,75 HVN pada sampel penempaan^[6].

Data struktur mikro menunjukkan bahwa paduan ZrNbMoGe pada Gambar 3a sebelum proses pengerolan dan penempaan berbentuk butir tampak ekuiaksial, setelah melalui proses pengerolan bentuk butir pipih dan terjadi jalur-jalur yang menyatakan arah pengerolan seperti tampak pada Gambar 3b, sedangkan setelah melalui proses penempaan (*forging*) bentuk butir semakin banyak dan agak melebar ke segala arah dan tidak membentuk jalur-jalur yang menyatakan arah tertentu seperti pada proses pengerolan seperti tampak pada Gambar 3.



Gambar 4. Pola difraksi sinar-X dan penghalusan paduan ZrNbMoGe (a) sebelum proses pengerolan-penempaan, (b) setelah proses pengerolan dan (c) setelah proses penempaan, menggunakan *X-ray diffraction* berpanjang gelombang 1,5405Å.

Pada Gambar 4 diperlihatkan pola difraksi bahan paduan ZrNbMoGe hasil pengukuran dengan *XRD-Shimadzu* bertarget $\text{Cu-K}\alpha$ dengan panjang gelombang sekitar 1,5405Å di PSTBM-BATAN Serpong. Daya penetrasi yang memadai dari berkas sinar-X mampu menampilkan profil *peak to background ratio* yang bagus. Perbedaan intensitas puncak difraksi sangat jelas dan tajam terlihat dalam gambar 4a-c, seperti jarum-jarum yang runcing. Meskipun dipangkal puncak hamburan terlihat melebar, oleh karena pengaruh fluoresensi bahan. Seluruh pola puncak difraksi didominasi oleh fasa zirkonium sebagai bahan matrik utama kelongsong. Tiga puncak utama pertama fasa dominan adalah puncak bidang (10 $\bar{1}$ 0), (0002) dan (10 $\bar{1}$ 1) terlihat berturut-turut pada sudut $2\theta = 32,08^\circ$,

$34,84^\circ$ dan $36,65^\circ$. Intensitas tertinggi sebesar 2.010 *counts/second (cps)* terlihat pada bidang (10 $\bar{1}$ 1) yang dimiliki oleh fasa zirkonium. Pola difraksi memperlihatkan ada dua fasa yang dominan yang terbentuk sebelum diperlakukan pengerolan dan penempaan, yaitu: fasa zirkonium (Zr) yang berstruktur heksagonal dan fasa Zr_3Ge yang berstruktur tetragonal. Sedang fasa ZrGe yang berstruktur ortorombik dan fasa ZrMo_2 yang berstruktur kubik, seperti yang telah dilaporkan oleh Bandriyana dkk.^[7].

Pada Gambar 4b dan 4c berturut-turut adalah pola difraksi sinar-X hasil pengerolan dan penempaan. Efek *rolling-forging* terlihat meningkatkan intensitas difraksi. Peningkatan diperlihatkan pada bidang refleksi (10 $\bar{1}$ 1) pada sudut $2\theta = 36,65^\circ$, dari sekitar 2500 *cps* menjadi sekitar 3000 *cps*.

Hal ini menunjukkan proses pengerolan dan penempaan dapat memperbanyak bidang hampur dalam butiran. Bidang-bidang ini mampu menjadikan kristal cenderung menuju pada orientasi dominan yang diinginkan (*preferred orientation*); yakni bidang (10 $\bar{1}$ 1). Fakta memperlihatkan bahwa memipih dan melebarnya butir (*grain*) setelah proses pengerolan maupun proses penempaan dapat mengakibatkan terjadinya pergeseran ke bidang (10 $\bar{1}$ 1). Hasil analisis difraksi ini sesuai dengan hasil pengamatan struktur mikro pada Gambar 3 (b-c), dimana dari pola isotropik (Gambar 3a) pada bahan awal. Setelah perlakuan pengerolan, butir kristalinitas terorientasi teratur (Gambar 3b) dan semakin bertambah ke suatu arah tertentu saat mengalami *forging* (Gambar 3c). Demikian pula hasil EDS yang memperlihatkan menurunnya persentase berat unsur bahan, akibat daerah pengukuran berubah membesar, dan ada bagian yang tidak terkungkung titik spot pengamatan lagi.

SIMPULAN

Dari hasil proses pengerolan dan penempaan dapat disimpulkan bahwa proses pengerolan panas temperatur 900 °C dan proses penempaan pada temperatur 950 °C menghasilkan pelat dengan peningkatan kekerasan melalui perbaikan struktur mikro sebagai berikut: Kekerasan bahan meningkat dari 114,21 HV (kondisi awal) menjadi 210,47 HV setelah proses pengerolan dan menjadi 365,73 HV setelah proses penempaan. Pembentukan presipitat Zr₃Ge dan ZrMO₂ meningkatkan sifat kekerasan bahan. Peristiwa *texturing*/pengorientasian arah kristal terlihat sangat jelas akibat pengaruh proses pengerolan dan penempaan. Pola difraksi memperlihatkan kecenderungan *preferred orientation* dominan mengarah ke bidang refleksi (10 $\bar{1}$ 1) yang terekam melalui peningkatan cacahan dari sekitar 2500 *counts/second* (*cps*) menjadi sekitar 3000 *counts/second* (*cps*). Proses penempaan dan pengerolan

panas mampu mengubah sifat mekanik (kekerasan dan tekstur) dan struktur mikro bahan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Dengan tulus hati penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada: Prof. Ir. Yuswono, M. Eng, APU atas fasilitas termomekanik dan diskusinya. Ka. PSTBM: Drs. Gunawan, M.Si., Ka. BSBM: Eddy Giri Rachman Putra, Ph.D. dan teknisi kelompok Bahan Reaktor Nuklir: Imam Wahyono, S.ST., Rohmad Salam, A.Md., Sumaryo, A.Md. dan Drs. Antonius Sitompul, M.Sc. serta semua pihak yang langsung/tak langsung terkait.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Sugondo (2005), Peranan Pemasu Sn, Fe, Cr, Nb, dan Mo dalam Zirkaloi, URANIA No 41/Thn.XI/Januari 2005 , PTBN-BATAN.
- [2]. Hans G. Weidinger (2005), Fabrication of Zirconium Alloy Cladding Tubes and Other Fuel Assembly Components for Water-Cooled Reactors, Workshop on Modeling and Quality Control for Advanced and Innovative Fuel Technologies, International Centre of Theoretical Physics, Trieste.
- [3]. Amstead B.H., Ostwald, Philips F. and Begeman (1987), Manufacturing Process, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [4]. Worcester S A., Dougherty J.P., Foster J.P. (1990), Zircaloy-4 processing for uniform and nodular corrosion resistance, CA 2038383 C, March-16.
- [5]. Curtis, R.E. and Dresler, G. (1974), Effect of Thermo mechanical Processing and Heat Treatment on the Properties of Zr-3Nb-1Sn Strip and

-
- Turbing, Zirconium in Nuclear Applications, ASTM STP 551, American Society for Testing and Bahans, pp.104-128.
- [6]. Ismoyo A.H., Parikin, Bandriyana B. (2009), *Sintesis* Paduan ZrNbMoGe dengan Variasi Unsur Ge, Jurnal Sains Materi Indonesia, 10, No. 2, hal.199-202.
- [7]. Bandriyana, Parikin, Ismoyo A.H. and Kuntoro I. (2009), Identification of the Precipitate Phase in the Synthesis of ZrNbMoGe Alloy, Proceedings the 7th ASEAN Microscopy Conference, ISBN 978-602-97444-1-5, pp. 13-20.