

SINTESA DAN KARAKTERISASI PADUAN ZrNbMoGe UNTUK MATERIAL KELONGSONG BAHAN BAKAR NUKLIR

Iman Kuntoro, B.Bandriyana
Pusat Teknologi Bahan Industri Nukir-BATAN

Diterima editor 17 Desember 2010
Disetujui untuk publikasi 16 Februari 2011

ABSTRAK

SINTESA DAN KARAKTERISASI PADUAN ZrNbMoGe UNTUK MATERIAL KELONGSONG BAHAN BAKAR NUKLIR. Sintesa paduan ZrNbMoGe untuk material kelongsong dilakukan dengan proses peleburan dan pengerolan panas untuk menghasilkan pelat tipis dengan ketebalan 1,4 mm. Proses peleburan dilakukan dengan melebur unsur pepadu ZrNbMoGe dalam dapur busur listrik dengan komposisi (prosen berat) 97,5% Zr, 1% Nb, 1% Mo dan 0,5% Ge. Proses pengerolan panas dilakukan pada temperatur 800 °C dan 850 °C dengan rasio reduksi 5 % untuk tiap langkah. Hasil karakterisasi menunjukkan kekerasan ingot dan pelat paduan ZrNbMoGe masing-masing sebesar 199 VHR dan 188 VHR, lebih tinggi dibandingkan kekerasan bahan kelongsong Zirkaloi-4. Peningkatan kekerasan diperkirakan terjadi akibat terbentuknya presipitat keras Zr_3Ge dalam ingot selama proses peleburan, yang telah diamati dari hasil uji presipitat dengan SEM-EDX dan uji XRD. Hasil uji korosi dalam lingkungan air aqua bidistillate menunjukkan laju korosi yang cukup rendah sebesar 0,0457 MPY, sedangkan hasil uji oksidasi suhu tinggi pada temperatur 800 °C selama 36 jam memberikan pertambahan berat sebesar 0,0959 mg/cm², mendekati harga pertambahan berat untuk bahan Zirkaloi-4 sebesar 0,1105 mg/cm².

Kata kunci : sintesa, zirkonium, kelongsong, rol.

ABSTRACT

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZrNbMoGe ALLOY FOR NUCLEAR FUEL ELEMENT CLADDING MATERIAL. Synthesis of ZrNbMoGe alloy used for nuclear fuel cladding material was performed by melting and hot rolling processes to produce thin plates of 1.4 mm thickness. The melting process was done by melting the elements of ZrNbMoGe alloy using an arc melting furnace with compositions (weight percentage) of 97.5% Zr, 1% Nb, 1% Mo and 0.5% Ge. The hot rolling process was done at temperatures of 800 °C and 850 °C with reduction ratios of 5% for each step. Result of the characterizations showed that the hardness of ingot and plate of ZrNbMoGe alloy were 199 VHR and 188 VHR respectively. These are higher than the hardness of the cladding material of Zirkaloi-4. Increasing of hardness was believed due to the formation of hard precipitates of Zr_3Ge in the ingot during the melting process which was observed by precipitate analysis using SEM-EDX and XRD tests. The corrosion tests in deminwater environment showed relatively low corrosion rate of 0.0457 MPY, while the high temperature oxidation test at 800 °C for 36 hours gave additional weight of 0.0959 mg/cm², similar to that of zirkaloi-4 at 0.1105 mg/cm².

Keywords : synthesis, zirconium, cladding, roll.

PENDAHULUAN

Dalam rangka penguasaan teknologi bahan bakar nuklir untuk mendukung operasi PLTN, diperlukan usaha desain dan pembuatan kelongsong bahan bakar nuklir. Salah satu masalah penting yang perlu dikuasai dalam program pembuatan kelongsong adalah bagaimana memperoleh bahan alternatif yang memenuhi persyaratan untuk kelongsong. Hal ini penting karena bahan kelongsong yang saat ini banyak digunakan adalah bahan paduan zirkonium komersial yang merupakan bahan impor yang mahal, susah dalam pengadaan dan tidak dapat diproduksi sendiri karena sudah mempunyai hak patent.

Oleh karena itu untuk mengurangi ketergantungan pengadaan bahan kelongsong dan penghematan biaya pembuatan kelongsong, perlu dikembangkan penelitian untuk memperoleh bahan kelongsong yang mampu dibuat dalam negeri. Material untuk kelongsong bahan bakar PLTN harus memenuhi persyaratan yang berkaitan dengan kekuatan, ketahanan korosi dan kemampuan fabrikasi, serta persyaratan untuk tampang lintang serapan neutron dan persyaratan ekonomi [1]. Berdasarkan data spesifikasi bahan kelongsong, persyaratan bahan kelongsong tersebut dapat dipenuhi dengan menggunakan paduan berbasis zirkonium dengan kandungan unsur zirkonium minimum 95% berat.

Salah satu bahan yang diteliti dan dikembangkan oleh PTBIN-BATAN untuk material kelongsong bahan bakar adalah paduan zirkonium dengan penambahan unsur Germanium (Ge), Niobium (Nb) dan Molibdenum (Mo). Komposisi paduan zirkonium ZrNbMoGe ini dirancang untuk menghasilkan bahan alternatif dengan beberapa keunggulan yang kompetitif, diantaranya adalah kekerasan dan kekuatan yang tinggi, ketahanan korosi yang baik dan dapat dilakukan pengerjaan dengan permesinan, rol dan las.

Makalah ini membahas hasil penelitian pembuatan paduan ZrNbMoGe dengan menguraikan proses pembuatan dan hasil karakterisasinya. Proses pembuatan paduan dilakukan dengan metode peleburan untuk menghasilkan ingot dan dilanjutkan dengan proses pengerolan untuk menghasilkan lembaran tipis sebagai bahan pembuatan kelongsong. Untuk menguji serta analisis hasil proses pembuatan ingot dan proses pengerolan dilakukan karakterisasi dan pengujian. Untuk evaluasi penelitian, data pengujian paduan dibandingkan dengan karakteristik bahan kelongsong paduan komersial zirkaloi-4 yang digunakan dalam PLTN tipe PWR. Karakterisasi dilakukan dengan uji struktur mikro, uji sifat mekanik dan uji ketahanan korosi, sedang untuk uji ketahanan *creep* serta efek radiasi pada bahan paduan belum dilakukan. Hasil penelitian diharapkan memberikan masukan untuk parameter operasi proses peleburan dan pengerolan serta menghasilkan data teknik spesifikasi bahan paduan yang dihasilkan untuk mendukung program penyediaan bahan kelongsong secara mandiri.

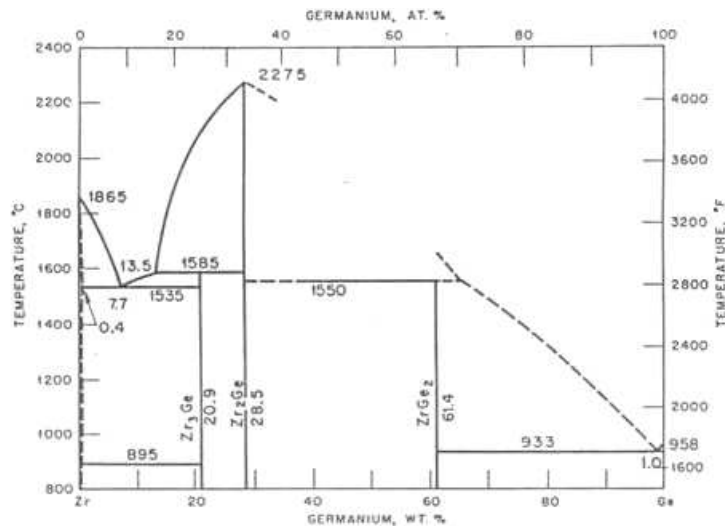
DASAR TEORI

Paduan Zirkonium Untuk Bahan Kelongsong.

Hasil dan kualitas paduan zirkonium untuk bahan kelongsong ditentukan oleh jenis dan pengaturan komposisi unsur paduan. Pemilihan jenis dan komposisi unsur pepaduan harus memperhatikan sifat unsur terutama besarnya nilai serapan penampang neutron dan kekuatannya. Logam dasar dengan penampang makroskopis neutron kecil yang banyak ditambahkan untuk bahan kelongsong dalam paduan zirkonium komersial Zirkaloi-2 dan Zirkaloi-4 adalah Fe, Ni, Sn, Cr dan O [2]. Disamping itu bahan paduan Zr-Nb juga sudah terkarakterisasi dengan baik untuk digunakan pada reaktor jenis CANDU.

Pembuatan paduan ZrNbMoGe dirancang berdasarkan metode interstisi dari unsur Mo dan pembentukan presipitat fasa Zr-Mo dan Zr-Ge melalui sintesis peleburan.

Berdasarkan hasil penelitian diketahui bahwa penambahan unsur Mo antara 0,3 % sampai dengan 1,3% berat ke dalam paduan berbasis zirkonium dapat menghasilkan sifat mekanik yang tinggi dengan memperhalus ukuran butir [3]. Penambahan molibdenum akan membentuk senyawa intermetalik dengan zirconium ($ZrMo_2$) dan meningkatkan ketahanan korosi dengan pembentukan lapisan oksida. Unsur Ge dapat menambah sifat *rigid* (kaku) bentuk makro kelongsong karena terbentuknya presipitat $Zr(x)Ge(y)$ [3]. Berdasarkan diagram fasa Zr-Ge pada Gambar 1, penambahan unsur Ge dibawah 5% berat akan menghasilkan fasa Zr_3Ge sebagai presipitat keras sehingga meningkatkan kekerasan dan kekuatan paduan [4].



Gambar 1. Diagram fasa paduan Zr-Ge

Penambahan unsur niobium akan memperbaiki sifat mekanik untuk mampu bentuk bahan paduan yang diperlukan dalam proses fabrikasi kelongsong bahan bakar nuklir.

Proses Rol Paduan Zirkonium

Pengerolan merupakan proses perubahan bentuk suatu bahan dengan cara memberikan deformasi plastis yang bertujuan untuk mengubah bentuk dan sifat bahan. Dalam proses ini besarnya deformasi yang dapat diberikan selain tergantung pada sifat-sifat bahan juga tergantung pada proses deformasi yang dilakukan. Proses rol panas (*hot rolling*) adalah proses pengerolan yang dilakukan pada suhu di atas suhu rekristalisasi dan deformasi berlangsung pada daerah rekristalisasi. Rekristalisasi yang terus menerus menyebabkan tidak adanya pengerasan regangan sehingga logam tetap relatif lunak selama proses rol panas. Proses rol panas dilakukan untuk menipiskan pelat dengan reduksi pengerolan yang cukup besar dan untuk memperbaiki strukturmikro hasil pengecoran menjadi struktur yang lebih homogen [5]. Selain itu rol panas juga dapat menyeragamkan struktur dan distribusi kadar unsur pepaduan yang tidak homogen akibat segregasi saat pembekuan. Parameter proses pengerolan dapat dipakai untuk mengontrol sifat pelat yang dihasilkan. Proses deformasi dapat mengarahkan ke suatu orientasi tertentu dari butir-butir logam yang acak pada pelat. Karena selama pengerolan terjadi pula rekristalisasi, maka tekstur yang terbentuk juga

dipengaruhi rekristalisasi, sehingga derajat deformasi dan temperatur pengerolan mampu mempengaruhi tekstur kristalografi.

METODE DAN TATA KERJA

Penelitian dilakukan dengan langkah dan tahapan kegiatan yang meliputi proses sintesis dengan peleburan, proses pengerolan ingot hasil peleburan dan proses karakterisasi bahan.

Proses Peleburan Dan Pengerolan

Sebelum peleburan dilakukan penimbangan unsur-unsur paduan Zr, Nb, Mo dan Ge menggunakan neraca mikro sesuai dengan komposisi paduan. Komposisi untuk paduan ditentukan dalam prosentase berat masing-masing unsur 97,5% Zr, 1 % Nb, 1 % Mo dan 0,5% Ge. Berat total tiap sampel 25 gram, disesuaikan dengan kapasitas cawan cetakan. Proses peleburan dilakukan dengan peralatan tungku busur listrik di PTNBR-BATAN Bandung yang mampu beroperasi sampai dengan temperatur 2000 °C. Unsur paduan Zr, Mo, dan Ge berupa *sponge* dan unsur Nb berupa kawat dengan kemurnian diatas 99,9 % dimasukkan dalam cawan cetakan. Selanjutnya dilakukan proses peleburan dengan elektrode tungsten diameter 2 cm dengan arus sebesar 50 A. Peleburan terjadi pada cawan cetakan yang dikungkung dengan atmosfer gas argon pada tekanan 0,2 MPa dan didinginkan dengan sistem aliran air dari *chiller*. Setelah bahan melebur seluruhnya, pemanasan dihentikan kemudian bahan paduan dibiarkan membeku kembali sampai dingin. Untuk menghasilkan ingot dengan paduan unsur yang homogen, bahan paduan yang telah dingin dibalik (*flapping*) dan dilakukan peleburan kembali sampai 5 kali.

Proses pengerolan dilakukan di bagian laboratorium metalurgi ITB-Bandung menggunakan metode rol panas dengan variasi suhu pengerolan. Ingot paduan ZrNbMoGe hasil peleburan dipanaskan dalam dapur pemanas sampai suhu 800 dan 850 °C dan selanjutnya dimasukkan dalam mesin rol. Proses pengerolan dilakukan dalam beberapa langkah dengan reduksi 5% sampai diperoleh ketebalan 1,4 mm.

Karakterisasi Dan Pengujian

Karakterisasi dilakukan pada ingot hasil peleburan dan pada pelat tipis hasil pengerolan dengan uji sifat mekanik, uji struktur mikro dan presipitat dan uji korosi.

- **Karakterisasi ingot hasil peleburan**

Pengujian sifat mekanik dengan uji kekerasan dilakukan dengan metode Vickers skala mikro untuk sampel paduan dan sampel spon zirkonium murni pada posisi di matrik dan batas butir, dilakukan di laboratorium PTBIN-BATAN. Uji struktur mikro dilakukan dengan pengamatan menggunakan mikroskop optik untuk melihat bentuk dan ukuran butir diamati dengan perbesaran 400x. Pengamatan dilakukan pada sampel zirkonium bentuk spon (*sponge*), dan sampel hasil peleburan, dilakukan di laboratorium Pusat Teknologi Bahan Industri (PTBIN)-BATAN. Uji presipitat dilakukan dengan uji SEM- EDX pada daerah matrik dan batas butir untuk analisis presipitat yang terjadi. Uji XRD dilakukan dengan pengukuran pola difraksi untuk jangkauan sudut 2θ dari 30° - 75°, untuk analisis dilakukan berdasarkan pengolahan menggunakan program Rietveld Analysis .

Pengujian korosi kering dilakukan dengan uji oksidasi suhu tinggi 800 °C untuk simulasi ketahanan kelongsong bagian luar pada operasi PLTN, dan untuk mengetahui perubahan struktur dan terbentuknya lapisan oksida. Pengujian dilakukan selama waktu 36 jam di laboratorium PTBIN dengan alat uji tungku oksidasi suhu tinggi. Laju korosi ditentukan dengan mengukur perbedaan berat sampel sebelum dan sesudah pengujian. Untuk pengujian korosi basah dilakukan di Lab Korosi PTBIN dengan teknik Poln Resistance dengan tegangan -40 mV sampai 40 mV dalam media air aqua bidistilasi. Sampel paduan dipreparasi dengan bentuk lempeng tipis berbentuk lingkaran dengan luas sekitar 1 cm², selanjutnya diletakkan pada pemegang sampel dan dirakit ke dalam tabung uji.

- **Karakterisasi pelat paduan hasil pengerolan**

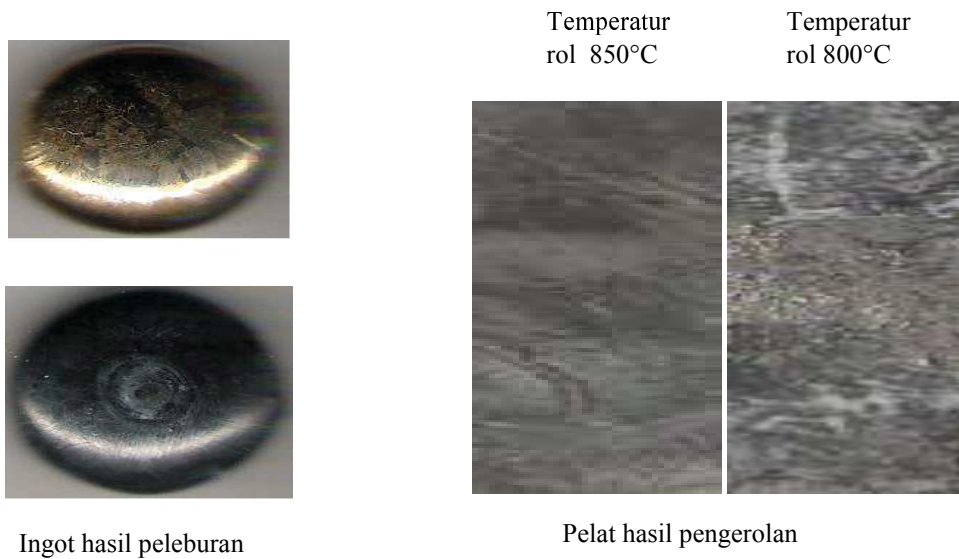
Uji sifat mekanik pelat hasil pengerolan dilakukan dengan uji kekerasan dan uji tarik. Uji kekerasan dengan metode skala Vickers dilakukan dengan prosedur seperti pada pengukuran ingot hasil peleburan. Untuk uji tarik dilakukan dengan uji tarik sampel skala mikro dengan standar JIS Z2201 di Laboratorium Uji Material, Teknik Metalurgi Universitas Indonesia. Uji struktur mikro dengan mikroskop optik dilakukan seperti pengujian ingot hasil peleburan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur Mikro Ingot

Dari peleburan dapat dihasilkan ingot dengan bentuk dan ukuran lempengan diameter 25-50 mm, tebal 8 -12 mm. Secara visual ingot tampak membentuk paduan homogen yang padat dengan perubahan warna dipermukaan yang menunjukkan masih terjadi oksidasi pada sampel. Ingot hasil peleburan setelah dilakukan pembersihan kemudian dikarakterisasi dengan pengukuran kekerasan dan struktur mikro. Struktur mikro sampel paduan 97,5% Zr, 1% Mo, 1% Nb, 0,5% Ge hasil pengujian dengan mikroskop optik dengan perbesaran 400 x, ditunjukkan pada Gambar 2 ditampilkan bersama struktur mikro unsur zirkonium murni.

Struktur mikro zirkonium murni dan paduan terlihat dalam bentuk dendrit dengan pola 2 dimensi, butir berbentuk *equiaxial* dengan ukuran relatif sama. Hal ini menunjukkan tidak terjadi rekristalisasi dalam proses pengecoran, sebab hasil cor didinginkan menuju udara luar tanpa terjadi pendinginan cepat. Unsur pepadu dalam proses peleburan berdifusi dan melakukan proses substitusi atom dalam kisi kristal zirkonium. Pada proses ini penambahan kekerasan dan kekuatan paduan dapat terjadi akibat terbentuk fasa presipitat baru Zr-Ge seperti ditunjukkan dalam diagram fasa pada Gambar 1. Dari struktur mikro paduan Zr-Nb-MoGe tidak dapat diamati adanya presipitat baik dalam matrik atau dalam batas butir sehingga perlu dilakukan pengujian dengan SEM dan EDS.



Gambar 2. Ingot dan pelat hasil peleburan dan pengerolan paduan zirkonium

Struktur Mikro Pelat Hasil Pengerolan

Pengerolan ingot paduan zirkonium dengan rol panas pada temperatur 800°C dan 850°C menghasilkan pelat tipis dengan ketebalan 1,4 mm. Struktur mikro sampel pelat paduan Zr-Nb-Mo-Ge hasil rol panas 800°C dan 850°C ditunjukkan pada Gambar 3 dengan bentuk, ukuran dan distribusi butir yang sama. Perbedaan temperatur rol dari 800°C dengan temperatur rol 850°C tidak menghasilkan perubahan butiran dalam struktur mikro. Tetapi jika dibandingkan dengan struktur mikro ingot, bentuk butiran setelah pengerolan terlihat lebih pipih dan homogen dengan orientasi searah dengan arah pengerolan



Ingot hasil peleburan, 400x

Hasil rol 800 °C, 400x

Hasil rol 850 °C, 400x

Gambar 3. Struktur mikro hasil mikroskop optik

Pengerolan dilakukan untuk mengubah struktur mikro dan meningkatkan kekuatan paduan dan akan diuji dengan pengujian tarik. Untuk temperatur rol 800 °C dan 850 °C yang berada diatas titik rekristalisasi paduan zirkonium maka deformasi berlangsung pada daerah rekristalisasi yang menyebabkan tidak ada pengerasan regangan. Perubahan porositas dan pemerataan presipitat akibat pengerolan tidak dapat diamati dalam struktur mikro hasil uji dengan mikroskop optik. Untuk optimalisasi hasil proses rol, akan dilanjutkan dengan penelitian distribusi presipitat dengan uji SEM-EDS dan uji dengan difraksi neutron.

Hasil Uji Kekerasan

Uji kekerasan Vickers skala mikro dilakukan pada zirkonium *sponge*, ingot hasil peleburan dengan variasi komposisi unsur Ge dan pada pelat hasil rol dengan temperatur 800 dan 850 °C. Hasil uji kekerasan dengan beban penjejakan 200 gr waktu penjejakan 15 detik dan dilakukan penjejakan pada 5 titik disajikan pada Tabel 1.

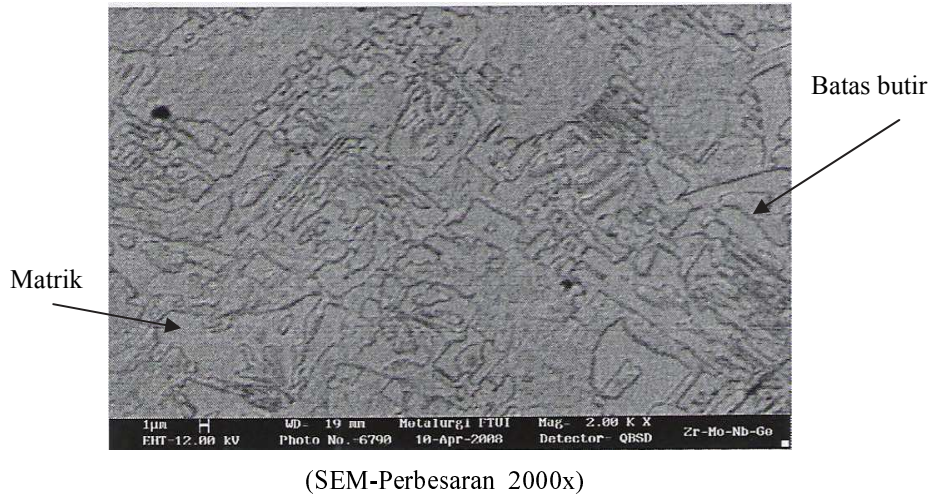
Tabel 1. Hasil pengujian kekerasan

Sampel	Kekerasan (VHR)
Zirkonium <i>sponge</i>	92,03
Ingot zirkonium hasil peleburan	199,12
Pelat hasil rol panas, temperatur 800°C	188,54
Pelat hasil rol panas, temperatur 850°C	184,76
Material tabung zirkaloi-4	186,78

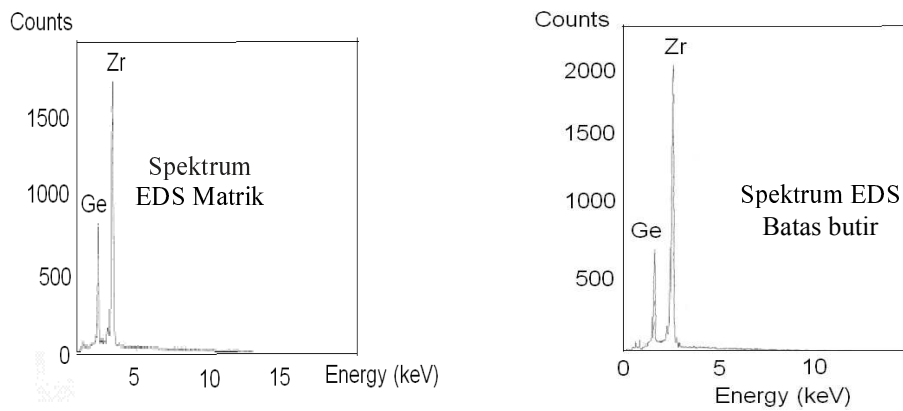
Terlihat bahwa ada peningkatan kekerasan matrik paduan ZrNbMoGe dibandingkan dengan kekerasan zirkonium murni. Kekerasan paduan ZrNbMoGe yang dihasilkan sebesar 199,12 VHR, lebih tinggi dibandingkan dengan kekerasan paduan zirkaloi-4 yang menunjukkan kekerasan sebesar 186,78 VHR. Hasil penelitian untuk kekerasan paduan dengan variasi unsur Ge menunjukkan bahwa penambahan kandungan unsur 3% Ge dalam paduan menyebabkan kenaikan kekerasan menjadi 301 VHR [7]. Dari Tabel 1 terlihat kekerasan paduan setelah di rol menurun dibandingkan dengan kekerasan ingot paduan meskipun masih lebih tinggi dibandingkan dengan kekerasan zirkonium *sponge*. Penurunan kekerasan terjadi karena pengerolan panas diatas temperatur rekristalisasi menyebabkan bahan paduan lebih lunak ketika pemanasan, sedangkan perubahan struktur tidak terjadi karena proses rekristalisasi. Untuk pengerolan dengan temperatur 800 dan 850°C, faktor temperatur tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam peningkatan kekerasan. Kekerasan pelat yang dihasilkan dari proses rol panas ini sudah mendekati kekerasan dari paduan Zirkaloi-4 dan memenuhi persyaratan kekerasan bahan kelongsong.

Uji Fasa Dan Presipitat

Analisis fasa dan presipitat yang terjadi dalam paduan 97,5% Zr, 1 % Nb, 1 % Mo dan 0,5% Ge dilakukan dengan pengujian SEM-EDS dan uji XRD. Struktur mikro hasil pengamatan dengan SEM dan spektrum hasil pengamatan EDS pada daerah matrik dan batas butir untuk penentuan komposisi paduan disajikan pada Gambar 4.



(SEM-Perbesaran 2000x)



Gambar 4. Hasil uji SEM-EDS dan spektrum paduan ZrNbMoGe

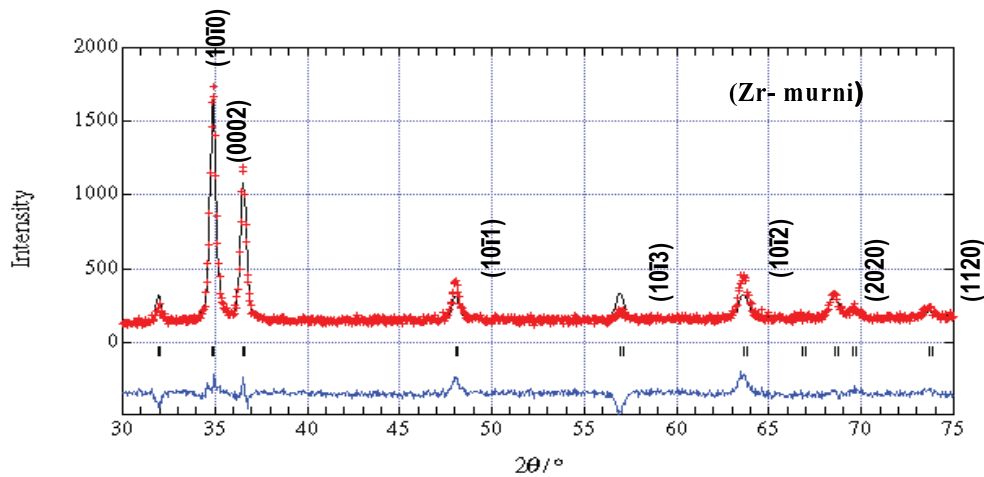
Berdasarkan perbandingan tinggi puncak pada spektrum hasil uji EDS untuk daerah matriks diperoleh kandungan 38% Zr, 62% Ge, sedangkan untuk daerah batas butir ditemukan 25% Zr, 75% Ge. Hasil ini menunjukkan ada indikasi terbentuknya fasa Zr_3Ge sesuai dengan diagram fasa Zr-Ge pada Gambar 2. Untuk komposisi Zr 98% berat dan Ge 2% berat, diagram fasa menunjukkan fasa presipitasi yang terbentuk didominasi oleh fasa Zr_3Ge , dan fasa presipitat lain belum terbentuk. Pengaruh unsur Mo dalam paduan sebesar 1% berat, memberi kontribusi pembentukan fasa presipitat $ZrMo_2$ yang juga dapat dideteksi dari hasil uji presipitat dengan SEM-EDS [12].

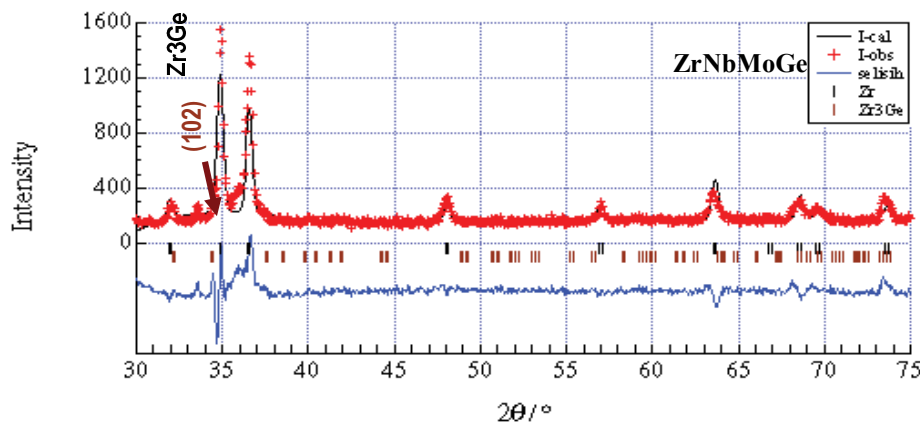
Disamping pengujian SEM-EDS untuk menentukan jenis fasa dan presipitat dilakukan analisis dengan uji XRD. Analisis didasarkan pada data uji XRD untuk sampel zirkonium dan paduan Zr-Nb-Mo-Ge sebagai perbandingan, selanjutnya dilakukan analisa struktur umum (RIETAN) dengan program penghalusan struktur Rietveld model 2 fasa. Setelah memberikan masukan parameter awal untuk struktur dari data kristalografi untuk zirkonium murni dan presipitat Zr_3Ge , diperoleh hasil penghalusan XRD seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter hasil penghalusan XRD

Sampel	Ge (%berat)	R _{wp} (%)	Zr	Zr ₃ Ge
Zr-murni	0,00	10,01	a = 3.233(1) b = 3.233(1) c = 5.146(5)	-
ZrNbMoGe- Zr ₃ Ge	1,02	15,95	a = 3.231(6) b = 3.231(6) c = 5.145(9)	a = 11.072(5) b = 11.072(5) c = 5.473(6)

Pola difraksi XRD Zr murni dan Zr-Nb-Mo-Ge yang telah dihaluskan dengan RIETAN disajikan pada Gambar 5. Hasil analisis kristal pada Gambar 5 mengindikasikan profil (model) cocok dengan data eksperimen bagi cuplikan dengan terbentuk fasa Zr₃Ge [12]. Hasil pengujian dengan menggunakan hamburan neutron yang dapat menghasilkan data analisis fasa lebih teliti dan digunakan untuk pembandingan juga menunjukkan terbentuknya fasa Zr₃Ge dan ZrMo₂ sebagai presipitat [8].





Gambar 5. Pola difraksi XRD Zr murni dan ZrNbMoGe yang telah dihaluskan dengan RIETAN

Hasil pengujian SEM-EDS dengan indikasi terbentuknya presipitat Zr-Ge dan pengujian XRD dengan pola difraksi yang terhaluskan menunjukkan terbentuknya presipitat Zr_3Ge di batas butir. Adanya presipitat Zr_3Ge meningkatkan kekerasan paduan Zr-Nb-Mo-Ge menjadi lebih tinggi dibanding kekerasan Zr murni seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Data pola difraksi pada Gambar 5 juga menunjukkan terjadinya pergeseran sudut difraksi yang mengindikasikan terjadinya proses substitusi unsur paduan dalam kisi kristal matrik. Fasa presipitat dan substitusi unsur pepaduan akan meningkatkan sifat mekanik, khususnya kekerasan dan ketangguhan bahan. Untuk mendapatkan hasil optimal dalam peningkatan kekuatan, ukuran presipitat keras Zr_3Ge dapat dibuat merata dengan melakukan proses pengerolan panas.

Hasil Uji Tarik

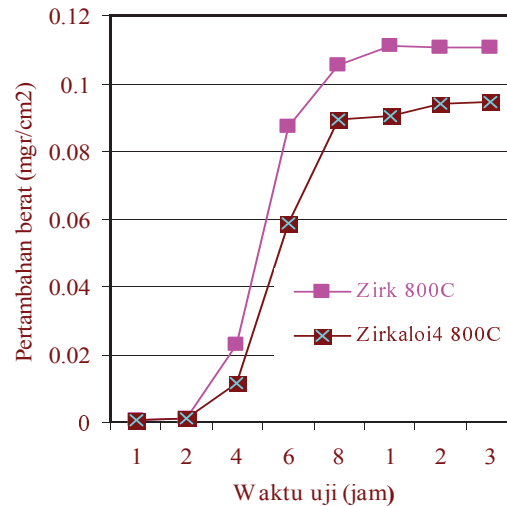
Dari pengujian diperoleh Kekuatan tarik pelat hasil rol dingin sebesar 94 kg/mm^2 , sedangkan untuk temperatur rol $850 \text{ }^\circ\text{C}$ sebesar 65 kg/mm^2 .

Hasil pengujian menunjukkan besarnya kekuatan tarik lebih tinggi dibandingkan dengan data kekuatan tarik untuk bahan zirkaloi sebesar 550 MPa atau 55 Kg/mm^2 [9]. Dari hasil perhitungan regangan untuk pelat hasil rol $600 \text{ }^\circ\text{C}$ pada tegangan patah diperoleh besarnya regangan kurang dari 2%, sedangkan untuk pelat hasil rol $850 \text{ }^\circ\text{C}$ besarnya regangan 5,5% [10]. Hasil ini menunjukkan temperatur rol yang tinggi akan mengurangi kekuatan pelat yang dihasilkan tetapi tingkat keuletan pelat yang dihasilkan dapat semakin meningkat. Berdasarkan sifat material pada umumnya, kekuatan paduan ZrNbMoGe dipengaruhi oleh kekerasan paduan. Dari hasil pengujian yang dilakukan, penambahan unsur germanium meningkatkan kekerasan tetapi menyebabkan bahan lebih getas dan menjadi masalah dalam fabrikasi [7]. Untuk keperluan pembuatan kelongsong pelat hasil rol dengan kandungan unsur germanium 0,5% ini cukup baik untuk pengerjaan permesinan dan pembungkakan pada kondisi panas.

Hasil Uji Korosi

Pengujian korosi kering dilakukan dengan uji oksidasi untuk waktu uji sampai dengan 36 jam pada suhu $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Data hasil uji untuk sampel ingot paduan dan bahan zirkaloi-4 berupa data pertambahan berat disajikan dalam kurva pada Gambar 6. Dari Gambar 6

terlihat total pertambahan berat untuk paduan ZrNbMoGe sebesar $0,11 \text{ mg/cm}^2$, lebih tinggi dibandingkan zirkaloi-4 sebesar $0,09 \text{ mg/cm}^2$ yang selanjutnya menunjukkan kecenderungan tidak terjadi pertambahan berat. Hasil uji ini menunjukkan ketahanan oksidasi zirkaloi-4 sedikit lebih baik dari pada paduan ZrNbMoGe. Data penelitian juga menunjukkan semakin besar kandungan unsur Ge dan proses anil dapat meningkatkan ketahanan korosi lebih baik [11].



Gambar 6. Kurva hasil uji oksidasi suhu tinggi

Hasil Uji Korosi Basah

Dari uji korosi yang dilakukan diperoleh laju korosi dalam larutan air demin PTBIN untuk sampel paduan ZrNbMoGe sebesar $0,0457 \text{ MPY}$, dan untuk sampel zirkaloi-4 sebesar $0,0393 \text{ MPY}$. Pada larutan NaCl 0,5 M laju korosi sebesar $0,0742 \text{ MPY}$ dan untuk sampel zirkaloi 4 laju korosi sebesar $0,053 \text{ MPY}$. Hasil pengujian ini menunjukkan paduan ZrNbMoGe mempunyai laju korosi mendekati bahan zirkaloi-4 sehingga dari sifat ketahanan korosi bahan paduan cukup baik untuk alternatif bahan kelongsong

KESIMPULAN

Proses sintesis dengan peleburan dan pengerolan paduan zirkonium ZrNbMoGe menggunakan dapur busur listrik dapat menghasilkan ingot dan pelat tipis untuk alternatif bahan kelongsong PLTN. Hasil peleburan berupa ingot dengan komposisi prosen berat 97,5 % Zr, 1 % Nb, 1 % Mo 0,5% Ge, mempunyai kekerasan sekitar 199 VHR dan ketahanan korosi yang cukup baik, dengan struktur mikro mengandung presipitat Zr_3Ge sebagai faktor peningkatan kekerasan. Hasil pengerolan panas dengan temperatur rol 850°C menghasilkan pelat dengan ketebalan 1,4 mm dengan kekerasan mencapai 188 VHR dan kekuatan tarik 650 MPa. Sifat mekanik untuk kekerasan dan kekuatan serta ketahanan korosi paduan Zr-Nb-Mo-Ge sebagai bahan kelongsong PLTN mendekati sifat paduan zirkaloi-4.

DAFTAR PUSTAKA

1. Sugondo, Slamet Pribadi, Joko Kisworo, Yatno. Sintesis paduan Zr-Sn-Mo untuk mendapatkan Bahan Baru Kelongsong Elemen Bakar Nuklir. *Jurnal Teknik Bahan Nuklir*. 2005 Januari; 1:1-14.
2. Sugondo. Peranan Pemadu Sn, Fe, Cr, Nb, dan Mo dalam Zirkaloi. *URANIA*. 2005; 41:6-11.
3. Schmuck J. *The Properties of Zirconium and its Alloys for Chemical Engineering Application*. Ugene, France: CEZUS Centre de Recherches, 1995.
4. Helen M, Ondik, Howard F, Mc Murdie. *Phase diagrams for zirconium and zirconia systems*. USA: American Ceramic Society, 1998.
5. Jeong W.C. *Effect of hot-rolling temperature on microstructure and texture of an ultra-low carbon Ti-interstitial-free steel*. Korea: Catholic University of Daegu 330, 2007.
6. Martoyo, Nusin Samosir, Usman Sudjadi. Uji Kekerasan dan Pemeriksaan Mikrostruktur Zr-2 Dan Zr-4 Pra Iradiasi. *URANIA*. 2008; 1: 27-35.
7. Ismoyo A.H, Parikin, Bandriyana B. Sintesis Paduan Zr-Nb-Mo-Ge dengan Variasi Unsur Ge. *Jurnal Sains Materi Indonesia (Indonesian Journal of Materials Science)* 2009 Februari; 10: 199-202.
8. Parikin, Andika Fajar, Ismoyo A.H, Bandriyana, Kuntoro I. Neutron Diffraction Technique on the Structural Identification of Zr-Nb-Mo-Ge Alloy. In : Evvy Kartini. Chowdari B.V.R. Aziz Khan Jahya. Selvasekarapandian. Tutun Nugraha. Junichiro Mizusaki. Sudaryanto. Kennedy S.J. Heri Jodi, editors. *International Conference on Material Science and Technology; 2010 October 19-23 ; Serpong, Indonesia*. Jakarta: PTBIN-BATAN & MRS-INA; 2011. P. 91-97.
9. Maradu Sibarani, Bandriyana B. Pengujian Struktur Mikro untuk Sambungan Las Zirkaloi pada Kelongsong Bahan Bakar Nuklir. *METALURGI* 2005 Juni ; 20: 29-34.
10. Bandriyana B, Ismoyo A.H, Parikin. Proses Pengerolan dan Karakterisasi Paduan Zr-Nb-Mo-Ge untuk Material Kelongsong Bahan Bakar Nuklir. *Jurnal Sains Materi Indonesia (Indonesian Journal of Materials Science)* 2008 Desember ; Edisi Khusus Desember : 2008; 93-98.
11. Ismoyo A.H, Parikin, Bandriyana B, Kuntoro I. Uji Oksidasi Suhu Tinggi Paduan Zr-Nb-Mo-Ge untuk Kelongsong Bahan Bakar Nuklir. *Jurnal Sains Materi Indonesia* 2010 Juni ; 11: 195-201.