

## PERUBAHAN KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO AKIBAT PROSES ROL DAN LAS PADA PADUAN ZR-NB-MO-GE UNTUK MATERIAL KELONGSONG PLTN

**B. Bandriyana, Agus Hadi Ismoyo dan Parikin**

*Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir - BATAN*

*Kawasan Puspiptek, Serpong*

*Email : bandriyana2005@yahoo.com*

### ABSTRAK

**PERUBAHAN KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO AKIBAT PROSES ROL DAN LAS PADA PADUAN ZR-NB-MO-GE UNTUK MATERIAL KELONGSONG PLTN.** Proses rol dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik ingot paduan yang diperoleh dari sintesis peleburan Zr-Nb-Mo-Ge. Pelat hasil proses rol kemudian dilas untuk analisis sifat sambungan las pada proses fabrikasi kelongsong. Pengaruh proses rol dan las dievaluasi dengan membandingkan perubahan kekerasan dan struktur mikro bahan paduan zirkonium dengan komposisi prosen berat 97,5Zr-1Nb-1Mo-0,5Ge. Pengerolan dilakukan dengan proses rol panas pada suhu 850°C dan 900°C dan reduksi 5 % tiap langkah. Pengelasan dengan las TIG menggunakan arus 50 mA dengan sambungan tumpu. Hasil pengujian menunjukkan kekerasan ingot akibat pengerolan meningkat dari 95 VHN menjadi 205 VHN, dan ukuran butir semakin kecil mengikuti arah pengerolan. Hasil pengelasan menunjukkan kekerasan yang paling tinggi di daerah HAZ (Heat Affected Zone), dengan kekerasan 203 VHN, sedangkan di daerah las terlihat adanya porus dan belum homogen.

*Kata kunci : kelongsong, Zr-Nb-Mo-Ge, rol-las, kekerasan, struktur mikro*

### ABSTRACT

**CHANGE OF HARDNESS AND MICROSTRUCTURE DUE TO THE ROLLING AND WELDING PROCESS OF THE ZR-NB-MO-GE ALLOY USED FOR NPP CLADDING MATERIAL.** Rolling process was performed to improve the mechanical properties of ingot resulting from the melting process of Zr-Nb-Mo-Ge alloy. Welding process of the sheet resulted from the rolling process was done to analyze the properties of welded joint in cladding manufacturing. Effect of rolling and welding process were evaluated by comparing the changes in hardness and microstructures of the zircalloy with a composition of 97,5Zr-1Nb-1Mo-0,5Ge w%. The rolling process was carried out by the hot rolling process at temperature of 850°C and 900°C and reduction thickness of 5 % for each step. The welding process was done by the TIG welding using butt joint method with the welded current of 50 mA. Result of the test showed that the hardness of ingot increase from 95 VHN into 250 VHN, and the grain size was smaller along the rolling direction. Result of welding shows that the highest hardness value occurred in the Heat Affected Zone (HAZ) area, with the hardness value of 203 VHN, and porous and non homogeneous structures are observed in the welding area.

*Key words : TIG welding , welded joint, zirconium pipe, strength, microstructure*

### PENDAHULUAN

Kelongsong merupakan bagian penting dalam bahan bakar PLTN yang berfungsi untuk mengungkung hasil produk fisi. Salah satu masalah yang perlu dikembangkan dalam program fabrikasi kelongsong adalah bagaimana memperoleh material paduan yang memenuhi persyaratan untuk kelongsong. Hal ini penting, karena bahan kelongsong termasuk bahan strategis yang harus diimpor dengan harga mahal dan proses pengadaannya cukup sulit. Bahan kelongsong harus memenuhi persyaratan yang berkaitan dengan kekuatan, ketahanan korosi dan kemampuan fabrikasi, serta persyaratan neutronik dan efek radiasi serta persyaratan ekonomi<sup>(1)</sup>.

Berdasarkan persyaratan bahan kelongsong dan program pengoperasian PLTN tipe PWR, PTBIN-BATAN melakukan pengembangan

sintesis paduan zirkonium Zr-Nb-Mo-Ge untuk bahan kelongsong. Komposisi paduan dirancang untuk menghasilkan bahan alternatif dengan kekerasan dan kekuatan yang tinggi, ketahanan korosi yang baik dan dapat dilakukan pengerjaan dengan permesinan, rol dan las. Penelitian ini terus dikembangkan dengan variasi komposisi untuk menghasilkan sifat paduan yang optimal dan perbaikan sifat mekanik melalui proses rol. Hasil sintesis ingot dengan peleburan pada tungku busur listrik yang dikungkung gas argon menunjukkan paduan yang homogen dengan kekerasan tinggi sekitar 205 VHN akibat terbentuknya presipitat Zr<sub>3</sub>Ge yang mempunyai kekerasan tinggi<sup>(2)</sup>. Kekerasan ini semakin tinggi untuk kandungan atom Ge yang makin besar, tetapi penambahan atom Ge menyebabkan paduan semakin getas. Oleh karena itu dikembangkan paduan dengan atom Ge kecil, dilanjutkan dengan proses rol yang optimal

untuk memperbaiki sifat mekanik paduan dan sifat mampu las yang baik untuk keperluan fabrikasi.

Proses rol diperlukan dalam pengolahan ingot untuk menghilangkan segregasi dan meningkatkan sifat mekanik paduan dengan memperbaiki struktur mikro. Pengerolan merupakan proses perubahan bentuk suatu bahan dengan memberikan deformasi plastis untuk mengubah bentuk dan sifat bahan. Proses rol panas (*Hot rolling*) yang dilakukan pada suhu di atas suhu rekristalisasi bahan dapat menipiskan pelat dengan reduksi pengerolan dan memperbaiki struktur mikro ingot hasil pengecoran menjadi struktur yang lebih homogen<sup>(3)</sup>. Selain itu rol panas juga dapat menyeragamkan struktur dan distribusi kadar unsur paduan yang tidak homogen akibat segregasi saat pembekuan. Faktor suhu dan reduksi pengerolan akan menentukan hasil dan sifat paduan yang dihasilkan dalam proses rol panas.

Untuk fabrikasi kelongsong diperlukan proses pengelasan untuk penyambungan tutup kelongsong bahan bakar. Oleh karena itu sifat mampu las dari paduan perlu diteliti untuk menjamin keselamatan pada daerah pengelasan. Proses las TIG yang digunakan untuk pengelasan paduan zirkonium pada kelongsong merupakan proses pengelasan dimana busur listrik tercipta antara elektrode tungsten yang tidak terumpan dan benda kerja. Dalam proses pengelasan terjadi siklus termal dengan proses pemanasan dan pendinginan di daerah las yang menyebabkan perubahan metalurgi yang rumit, deformasi dan tegangan termal ataupun cacat pada logam las. Perubahan yang penting adalah perubahan struktur mikro yang akan menentukan sifat mekanis sambungan las. Secara umum terdapat 3 daerah sambungan las, yaitu: daerah pengelasan (*fusion zone*), daerah terpengaruh panas (*heat affected zone, HAZ*), dan daerah tidak terpengaruh panas (*unaffected zone*).<sup>(4)</sup> Dalam pengelasan TIG besar arus dan waktu pengelasan merupakan faktor penting yang mempengaruhi struktur mikro yang terbentuk serta kekuatan mekanik dari sambungan las yang dihasilkan. Oleh karena itu penelitian struktur mikro dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik sambungan las, perlu dilakukan untuk optimasi proses las dan evaluasi sifat bahan.

Dalam makalah ini dibahas tentang pengaruh proses rol dan las pada paduan zirkonium Zr-Nb-Mo-Ge hasil sintesis lokal, khususnya perubahan kekerasan dan struktur mikronya. Komposisi paduan ditentukan dalam prosentase berat masing-masing unsur sebesar 97,5% Zr, 1 % Nb, 1 % Mo dan 0,5% Ge yang mampu menghasilkan bahan dengan kekerasan dan kekuatan tinggi tetapi masih getas.<sup>(5)</sup> Untuk perbaikan rol diuji dengan proses suhu rol tinggi dan proses homogenisasi. Perubahan kekerasan dan

struktur mikro setelah proses rol dan las merupakan data masukan awal yang akan digunakan untuk karakterisasi lanjut dan optimasi proses dalam pengembangan bahan alternatif untuk kelongsong PLTN-tipe PWR.

## TATA KERJA

Secara garis besar penelitian dilakukan dengan membuat sampel uji berupa ingot hasil peleburan, kemudian dilakukan proses rol untuk membentuk pelat dan dilakukan pengelasan pada pelat hasil pengerolan. Sintesis peleburan sampel paduan Zr-Nb-Mo-Ge dibuat dari paduan unsur zirkonium berupa *sponge* kemurnian 99,99 %, niobium (Nb) berupa kawat kemurnian 99,93 %, Molibdenum dan Germanium berupa *sponge* kemurnian 99,90% dari Aldrich. Sampel dibuat dengan komposisi prosen berat 97,5Zr-1Nb-1Mo-0,5Ge dengan penimbangan menggunakan timbangan mikro dengan ketelitian 10<sup>-4</sup> gram.

Selanjutnya dilakukan karakterisasi dengan uji kekerasan dan uji struktur mikro untuk ingot, pelat hasil rol dan pada sambungan las. Analisis dilakukan dengan membandingkan data hasil uji untuk ingot sebelum dan setelah proses rol dan las. Secara lebih detail tata kerja dari proses peleburan dan pengelasan dilakukan sebagai berikut:

### Peleburan Sampel

Peleburan dilakukan dengan memasukkan unsur paduan dalam cawan kemudian dipanaskan sampai suhu 1850°C disertai penyemburan gas argon untuk pelindung oksidasi. Untuk membuat homogen dilakukan peleburan ulang dengan membalik ingot yang terbentuk sampai 5 kali mengacu pada proses peleburan sebelumnya<sup>(5)</sup>. Selanjutnya cawan dibiarkan dalam dapur sampai mendingin pada suhu kamar dan ingot hasil peleburan dapat diambil. Hasil peleburan berupa ingot paduan kemudian dikarakterisasi dan dilanjutkan dengan proses pengerolan untuk pembentukan pelat tipis.

### Proses Pengerolan

Pengerolan dilakukan di laboratorium metalurgi ITB-Bandung menggunakan metode rol panas dengan variasi suhu pengerolan dan sebelumnya dilakukan proses homogenisasi sampel. Ingot paduan Zr-Nb-Mo-Ge hasil peleburan dipanaskan dalam dapur pemanas sampai suhu 850, 900 dan 1000°C dan selanjutnya dimasukkan dalam mesin rol. Proses pengerolan dilakukan dalam beberapa langkah dengan reduksi 5 % setiap langkah. Ilustrasi proses pengerolan panas dengan ingot dan mesin rol yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1.

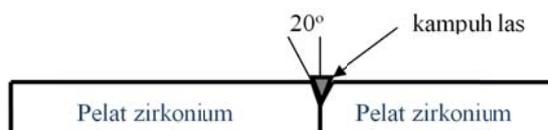
## Mesin rol panas



Gambar 1. Proses rol panas.

### Proses Pengelasan

Pengelasan untuk lembaran pelat hasil rol 850°C menggunakan las TIG dengan arus 15 dan 20 A pada tegangan 9,5 Volt dengan kecepatan 2 cm/menit. Sketsa sampel pengelasan dengan posisi kampuh penyambungan untuk sambungan tumpu ditunjukkan pada Gambar 2. Sebelum pengelasan pelat tebal 4 mm dibentuk kampuh dengan kemiringan 20° untuk pengelasan sistem tumpu dengan adopsi teknik las untuk zirkaloi.<sup>(6)</sup> Preparasi sampel dengan pembersihan, etsa alkohol dan ultrasonik.



Gambar 2. Pengelasan dengan kampuh V- las tumpu.

### Karakterisasi

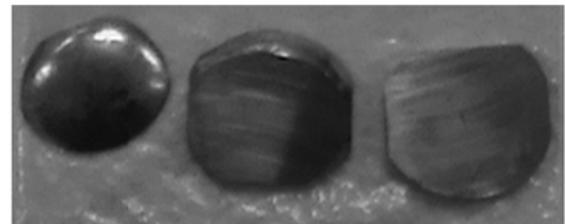
Uji struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 400x dan uji SEM-EDS untuk identifikasi presipitat. Sebelum dilakukan pengujian sampel dipreparasi dengan urutan: pemotongan sampel, *mounting*, penggerindaan, pemolesan, pengetsaan. Uji kekerasan dilakukan dengan mengikuti prosedur ASTM untuk kekerasan Vickers dari bahan-bahan logam dengan menggunakan beban berkisar 1 – 1000 gram dan kedalaman penetrasi di bawah 1 mm.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Struktur Mikro Ingot Paduan

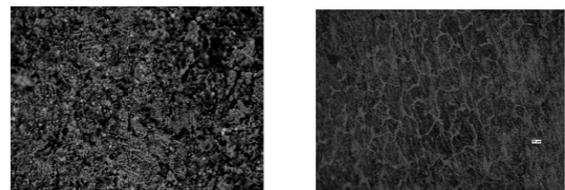
Hasil sintesis paduan Zr-Nb-Mo-Ge berupa ingot dengan berat sekitar 25 gram, ditunjukkan dalam Gambar 3. Secara visual ingot tampak membentuk paduan yang padat seperti hasil

peleburan dengan dengan sedikit terjadi oksidasi pada permukaan.



Gambar 3. Ingot paduan hasil peleburan.

Struktur mikro zirkonium murni dan ingot paduan pada Gambar 4 menunjukkan hasil yang sama dengan pengujian sebelumnya, terlihat dalam bentuk dendrit dengan pola 2 dimensi, butir berbentuk *equiaxial* dengan ukuran relatif sama.<sup>(5)</sup> Hal ini menunjukkan tidak terjadi rekristalisasi dalam proses, sebab hasil peleburan didinginkan menuju udara luar tanpa terjadi pendinginan cepat. Unsur pemadu dalam proses peleburan berdifusi dan melakukan proses substitusi atom dalam kisi kristal zirkonium.

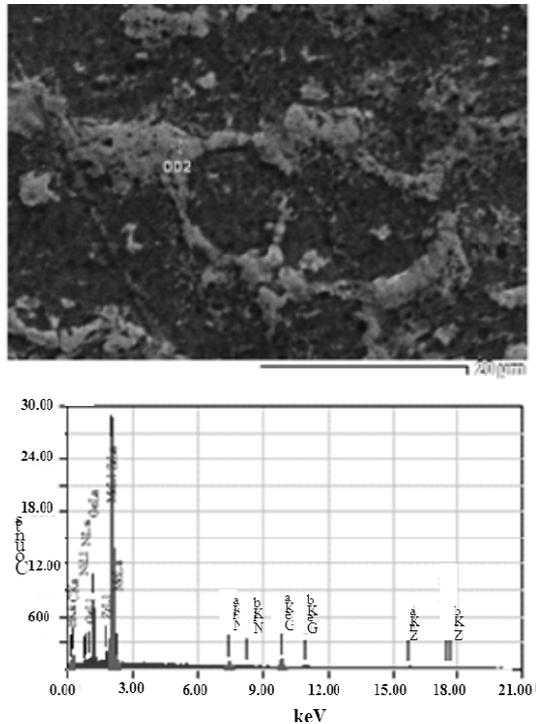


Gambar 4. Struktur mikro zirkonium dan paduan Zr-Nb-Mo-Ge.

Struktur mikro dan spektrum EDS paduan Zr-Nb-Mo-Ge dilakukan untuk daerah matrik dan batas butir. Berdasarkan perbandingan tinggi puncak pada spektrum hasil uji EDS untuk daerah batas butir ditemukan 62,71% Zr, 12,88% Ge seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

Analisis hasil uji XRD dengan sampel kandungan Ge 2% pada proses peleburan sebelumnya,<sup>(2)</sup> disimpulkan terbentuk presipitat Zr<sub>3</sub>Ge yang keras pada hasil sintesis paduan.

Berdasarkan hasil analisis dan prosentase unsur hasil EDS ini diperoleh indikasi terbentuknya fasa Zr-Ge di batas butir. Presipitat Zr-Ge ini diperkirakan menjadi faktor peningkatan kekerasan dan kekuatan paduan dan perlu didistribusikan merata melalui proses rol sehingga paduan menjadi kuat dan homogen.



Elemen	keV	Mass %	Atom %
Ge	9,874	12,88	6,51
Zr	2,042	62,71	25,2
Mo	2,293	1,11	0,42

Gambar 5. Hasil uji SEM-EDS paduan Zr-Nb-Mo-Ge di batas butir.

### Kekerasan Ingot

Pengujian dilakukan dengan uji kekerasan Vickers skala mikro untuk sampel zirkonium *sponge* dan sampel paduan dengan prosen berat 97,5 Zr-1Nb-1Mo-0,5Ge. Hasil uji kekerasan untuk daerah matrik dan pada batas butir disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian kekerasan

Kode Sampel	Penjejakan	Kekerasan Vickers	Rata-rata VHN	Keterangan
Zr-nurni	1.	90,92	92,31	Beban penjejakan = 200 gr Waktu penjejakan = 15 detik
	2.	93,43		
	3.	92,32		
	4.	92,57		
Zr-Nb-Mo-Ge Dalam butir	1.	199,98	201,69	Beban penjejakan = 200 gr Waktu penjejakan = 15 detik
	2.	203,98		
	3.	201,32		
	4.	201,48		
Zr-Nb-Mo-Ge Batas butir	1.	250,67	245,86	Beban penjejakan = 200 gr Waktu penjejakan = 15 detik
	2.	246,35		
	3.	230,21		
	4.	256,22		

Dari hasil pengujian diperoleh kekerasan paduan zirkaloi untuk *sponge* sekitar 92 VHN dan meningkat pada daerah dalam butir maupun di batas butirmya. Di daerah batas butir kekerasan

meningkat tajam sekitar 245 VHN yang diperkirakan akibat adanya presipitat keras yang terbentuk dalam proses sintesis. Dengan tidak berubahnya struktur mikro, maka kemungkinan terjadinya peningkatan kekerasan adalah akibat adanya presipitasi pada batas butir yang menghambat pergerakan dislokasi. Nilai kekerasan paduan ini cukup tinggi dibandingkan dengan kekerasan paduan zirkaloi -4. Peningkatan kekerasan juga meningkatkan kekuatan paduan sekitar 650 MPa yang cukup baik untuk material kelongsong.<sup>(3)</sup> Masalah yang ditemui adalah peningkatan kekerasan ini menyebabkan bahan menjadi getas yang mempersulit proses fabrikasi.

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan.

Kode Sampel	Penjejakan	Kekerasan Vickers	Rata-rata VHN	Keterangan
Zr-nurni	1	90,92	92,31	Beban penjejakan = 200 gr Waktu penjejakan = 15 detik
	2	93,43		
	3	92,32		
	4	92,57		
Zr-Nb-Mo-Ge Dalam butir	1	199,98	201,69	Beban penjejakan = 200 gr Waktu penjejakan = 15 detik
	2	203,98		
	3	201,32		
	4	201,48		
Zr-Nb-Mo-Ge Batas butir	1	250,67	245,86	Beban penjejakan = 200 gr Waktu penjejakan = 15 detik
	2	246,35		
	3	230,21		
	4	256,22		

### Hasil Pengerolan

Hasil fisik struktur makro pengerolan disajikan dalam Gambar 6 sebagai berikut.



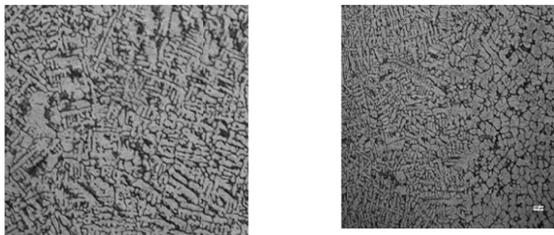
Gambar 6. Pelat hasil rol panas ingot Zr-Nb-Mo-Ge.

Pada pengerolan dengan suhu 1000°C, diharapkan diperoleh pelat dengan cacat retak semakin kecil. Hasil yang diperoleh pelat yang teroksidasi seperti terlihat dalam Gambar 6 dengan tanda terang atau putih. Oksidasi pada suhu tinggi ini ternyata sangat cepat dan secara visual tampak menurunkan kualitas bahan pelat. Hal yang hampir sama teramati pada pengerolan dengan suhu 900°C dan reduksi tetap sebesar 5%. Selanjutnya untuk hasil optimal saat ini diperoleh dengan proses rol panas tetap 850°C, tetapi dilakukan pengolahan panas pada sampel untuk homogenisasi sehingga

tidak pecah waktu dirol. Homogenisasi dilakukan pada sampel dengan pemanasan sampai 800°C kemudian ditunggu sampai 8 jam dilingkupi gas argon. Dalam pengerolan ini diperoleh pelat dengan ketebalan 2 – 4 mm dan kualitas cukup baik dengan cacat yang kecil. Homogenitas pelat cukup baik berdasarkan pengamatan visual tidak tampak adanya cacat retak.

### Struktur Mikro dan Kekerasan Pelat Hasil Pengerolan

Gambar 7 menunjukkan struktur mikro pelat hasil pengerolan pada suhu 850 oC yang dilingkup dengan gas argon. Struktur mikro diamati dari pengukuran dengan optikperbesaran 400x. Tampak dalam struktur mikro ini butir yang mengarah pada arah pengerolan, lebih kecil dan pipih dibandingkan dengan butir pada struktur mikro ingot di Gambar 4.

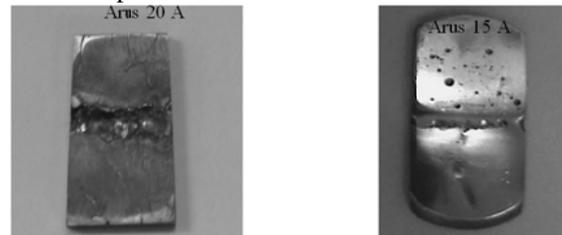


Gambar 7. Struktur mikro pelat hasil pengerolan panas suhu 850 oC.

Pada butir yang semakin pipih ini kekerasan pelat mencapai sekitar 230 VHN pada matrik, yang menunjukkan peningkatan kekerasan pada butir dibandingkan dengan kekerasan ingot seperti disajikan pada Tabel 1. Pada pengujian kekerasan hasil rol dengan temperatur 850°C diperoleh kekerasan sekitar 230 VHN, sedangkan untuk suhu rol 900°C dan 1000°C diperoleh kekerasan masing-masing sekitar 210 dan 195 VHN. Dari hasil pengujian ini diperoleh peningkatan sifat mekanik paduan setelah mengalami proses rol panas yang dipengaruhi oleh komposisi dan suhu pengerolan. Peningkatan kekerasan diperkirakan terjadi akibat perubahan struktur mikro terutama bentuk dan besar butir akibat deformasi dari pengerolan. Pada suhu pengerolan di atas 850°C, oksidasi berjalan cepat sehingga kualitas hasil menurun, sedangkan untuk suhu rol yang lebih kecil, ingot dapat pecah dan retak. Hasil rol suhu 850°C menunjukkan bentuk fisik yang cukup baik. Kekerasan pelat yang dihasilkan juga cukup baik untuk digunakan sebagai bahan kelongsong, tetapi perlu diuji tarik untuk mengetahui besarnya kekuatan dan keuletan bahan. Uji SEM-EDS juga perlu dilakukan untuk melihat penyebaran dan homogenitas presipitat. Uji dan penelitian ini akan dilanjutkan pada tahap penelitian berikutnya.

### Hasil Pengelasan

Pengelasan di BATAN Teknologi menggunakan las TIG dengan arus 15 dan 20 A, sampel las adalah pelat tebal 4 mm hasil rol panas 850°C. Pengelasan dilakukan tanpa filler dengan sistem pelat berjajar, diperoleh hasil las yang lebih baik untuk arus sebesar 15 A. Bentuk fisis sambungan las ditunjukkan pada Gambar 8. Dari pengamatan secara visual, hasil las masih menunjukkan banyak rongga dan porus dan perlu dilakukan perbaikan.



Gambar 8. Pengelasan pelat paduan Zr-Nb-Mo-Ge.

### Struktur Mikro dan Kekerasan Sambungan Las

Struktur mikro sambungan las hasil pengelasan di BATAN Teknologi ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Struktur mikro matrik, HAZ dan bagian lasan.

Dari struktur mikro terlihat bahwa hasil pengelasan belum baik, masih terdapat rongga dan porus. Pada pengujian struktur mikro sambungan las dengan uji SEM-EDS untuk bagian las diperoleh masa kandungan unsur Zr 79,24% dan Ge 0,7%. Data ini menunjukkan kemungkinan di dalam sambungan las juga terbentuk presipitat Zr-Ge sehingga struktur dan sifat mekaniknya berbeda. Pengamatan butir pada struktur mikro menunjukkan perubahan dan pertumbuhan butir pada daerah lasan lebih kecil. Pengukuran kekerasan pada sambungan las menghasilkan nilai kekerasan sebesar 214 VHN untuk daerah matrik logam, 221 VHN untuk daerah HAZ dan 240 VHN untuk daerah las. Kekerasan yang tinggi pada daerah las akibat pemanasan waktu proses las dan pendinginan mendadak setelah proses las selesai. Hasil las ini belum memenuhi persyaratan untuk fabrikasi bahan kelongsong. Perbaikan perlu dilakukan pada teknik pengelasannya, meliputi: preparasi sampel dan pembentukan kampuh, pemilihan arus, penggunaan

*filler* dan pengungkungan argon agar tidak terjadi oksidasi.

## KESIMPULAN

Proses rol panas paduan Zr-Nb-Mo-Ge pada suhu 850°C menghasilkan pelat tebal 1,5 - 4 mm dengan kualitas homogen dan tidak porus. Kekerasan pelat meningkat dari 215 menjadi 230 VHN setelah pengerolan dan memenuhi persyaratan kekerasan untuk kekerasan bahan kelongsong. Peningkatan kekerasan akibat perubahan dan pembentukan butir yang semakin pipih mengikuti arah pengerolan. Pengelasan TIG dengan arus 15 dan 20 A menghasilkan sambungan yang belum optimal dengan teramati adanya porus dan belum memenuhi kualitas sambungan bahan kelongsong. Struktur mikro dan kekerasan bahan paduan mengalami perubahan di sambungan las dengan kekerasan tertinggi ada di daerah HAZ sebesar 205 VHN.

## DAFTAR PUSTAKA

1. SUGONDO, SLAMET PRIBADI, JOKO KISWORO, YATNO, Sintesis paduan Zr-Sn-Mo untuk mendapatkan Bahan Baru Kelongsong Elemen Bakar Nuklir, PTBN-BATAN. Jurnal Teknik Bahan Nuklir Vol 1. No 1, Januari. (2005), 1-14.
2. A.H.ISMOYO, PARIKIN, B.BANDRIYANA, Analisis Struktur Mikro dan Kristal Paduan Zr-Nb-Mo-Ge, Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri-BATAN, Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir, Bandung 3 Juni 2009, ISSN :1858-3601.
3. B.BANDRIYANA, A.H.ISMOYO, PARIKIN, Proses Pengerolan dan Karakterisasi Paduan Zr-Nb-Mo-Ge untuk Material Kelongsong Bahan Bakar Nuklir, PTBIN-BATAN, Jurnal Sains Materi Indonesia, Edisi Khusus Desember (2008).
4. HARSONO WIRYOSUMARTO, Teknologi Pengelasan Logam, Pradnya Paramita, Jakarta, (1988).
5. A.H.ISMOYO, PARIKIN, B.BANDRIYANA, Sintesis Paduan Zr-Nb-Mo-Ge dengan Variasi Unsur Ge, Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional.,Jurnal Sains Materi Indonesia (Indonesian Journal of Materials Science), Vol. 10, No. 2, Februari (2009).
6. MARADU SIBARANI dan B.BANDRIYANA, Pengujian Struktur Mikro untuk Sambungan Las Zirkaloi pada Kelongsong Bahan Bakar Nuklir, Pusat Penelitian Metalurgi – LIPI.METALURGI, Majalah Ilmu & Teknologi Pusat Penelitian Metalurgi-LIPI, Volume 20 Nomor 1, Juni (2005).