

PENGARUH KANDUNGAN Fe DAN Mo TERHADAP KETAHANAN KOROSI INGOT PADUAN ZIRLO-Mo DALAM MEDIA UAP AIR JENUH

Sungkono⁽¹⁾, Futichah⁽¹⁾

1. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN) – BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan 15314

E-Mail: sungkhana@gmail.com

(Naskah diterima: 05-09-2011, disetujui: 30-09-2011)

ABSTRAK

PENGARUH KANDUNGAN Fe dan Mo TERHADAP KETAHANAN KOROSI INGOT PADUAN ZIRLO-Mo DALAM MEDIA UAP AIR JENUH. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi reaktor PWR maju adalah menaikkan fraksi bakar dari bahan bakarnya. Hal ini menyebabkan waktu pemakaian elemen bakar di dalam teras reaktor nuklir semakin lama, sehingga memungkinkan terjadinya penurunan sifat mekanik dan ketahanan korosi material kelongsongnya. Oleh karena itu perlu dikembangkan material baru yang mempunyai ketahanan korosi dan ketangguhan lebih tinggi dibandingkan zircaloy-4, diantaranya Zirlo. Pada penelitian ini telah dibuat ingot paduan Zirlo-Mo dengan bahan baku *sponge* Zr, serta serbuk Nb, Sn, Fe, dan Mo, menggunakan tungku peleburan vakum. Tujuan penelitian adalah mempelajari ketahanan korosi ingot paduan Zirlo-Mo dalam media uap air jenuh. Metoda yang digunakan adalah uji korosi dengan metoda gravimetri dan pengamatan lapisan oksida dengan mikroskop optik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketahanan korosi terbaik untuk ingot paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe adalah paduan Zirlo-1,0% Mo, sedangkan untuk ingot paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% berat Fe adalah paduan Zirlo-0,5% Mo. Ketahanan korosi paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% dan 1,0% berat Fe dipengaruhi oleh unsur Mo dan Fe.

Kata kunci : ketahanan korosi, lapisan oksida, ingot, paduan Zirlo-Mo.

ABSTRACT

EFFECT OF Fe AND Mo CONTENTS OF CORROSION RESISTANCE ON INGOT OF ZIRLO-Mo ALLOYS IN SATURATED STEAM. One way to improve the efficiency of fuel element for advanced PWR reactor is to increase burnup of the fuel. Increasing the burnup causes the fuel life time will be longer in the nuclear reactor core, thus allowing the reduction of mechanical properties and corrosion resistance of cladding materials. It is therefore necessary to develop new materials that have a corrosion resistance and toughness higher than Zircaloy-4, including Zirlo. In this research ingot of Zirlo – Mo alloys with raw materials of Zr sponge, and Nb, Sn, Fe, and Mo powders has been made using vacuum melting furnace. The objective of this research is to study corrosion resistance on ingot of Zirlo-Mo alloys in saturated steam. The methods employed was corrosion test using the gravimetric method and the observation of the oxide layer using an optical microscope. The results of the study show that the best corrosion resistance for ingot of Zirlo-Mo alloys with

1.0 wt% Fe is Zirlo-1.0% Mo alloy, while for ingot Zirlo-Mo alloys with 0.1 wt% Fe is Zirlo-0.5% Mo alloy. The corrosion resistance of ingot of Zr-Mo alloys with 0.1% and 1.0 wt% Fe influenced by Mo and Fe elements.

Key word : corrosion resistance, oxide layer, ingot, Zirlo-Mo alloy.

PENDAHULUAN

Paduan berbasis zirkonium dapat digunakan sebagai bahan kelongsong elemen bakar nuklir reaktor daya untuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) karena mempunyai sifat fisis, mekanik, neutronik, dan ketahanan korosi yang baik. Kelongsong bahan bakar bertindak sebagai *security barrier* guna mencegah terlepasnya bahan radioaktif ke pendingin. Pada saat ini paduan berbasis zirkonium yang digunakan sebagai material kelongsong adalah zircaloy-4 untuk reaktor daya tipe PWR (*Pressurized Water Reactor*), zircaloy-2 untuk tipe BWR (*Boiling Water Reactor*), dan Zr-2,5Nb untuk tipe GCR (*Gas Cooled Reactor*)^[1].

Para peneliti di negara-negara maju telah melakukan berbagai inovasi untuk meningkatkan efisiensi reaktor daya tipe PWR. Salah satu solusi yang dikembangkan adalah meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar di dalam teras reaktor, yaitu dengan cara menaikkan fraksi bakar (*burn up*) hingga 47 GWd/ton^[2]. Hal ini menyebabkan waktu pemakaian elemen bakar di dalam teras reaktor semakin lama. Kondisi tersebut berdampak pada kemungkinan terjadinya penurunan sifat mekanik dan ketahanan korosi material kelongsong dari elemen bakar nuklir. Oleh karena itu, perlu dikembangkan material baru yang mempunyai ketahanan korosi dan ketangguhan lebih tinggi dibandingkan zircaloy-4 untuk dapat digunakan sebagai kelongsong elemen bakar reaktor PWR maju^[2,3]. Salah satu kandidat material kelongsong yang saat ini dikembangkan adalah Zirlo yaitu paduan berbasis zirkonium dengan unsur pepadu utama 1,0% niobium, 1,0% timah putih, dan 0,2% berat besi. Dari

berbagai literatur diketahui bahwa Zirlo mempunyai keunggulan yaitu laju korosi rendah, sifat *creep* pada kondisi iradiasi baik, daya tahan mekanik baik pada kondisi fraksi bakar tinggi. Zirlo juga mempunyai ketahanan korosi tinggi dalam lingkungan air dengan lithium^[4,5].

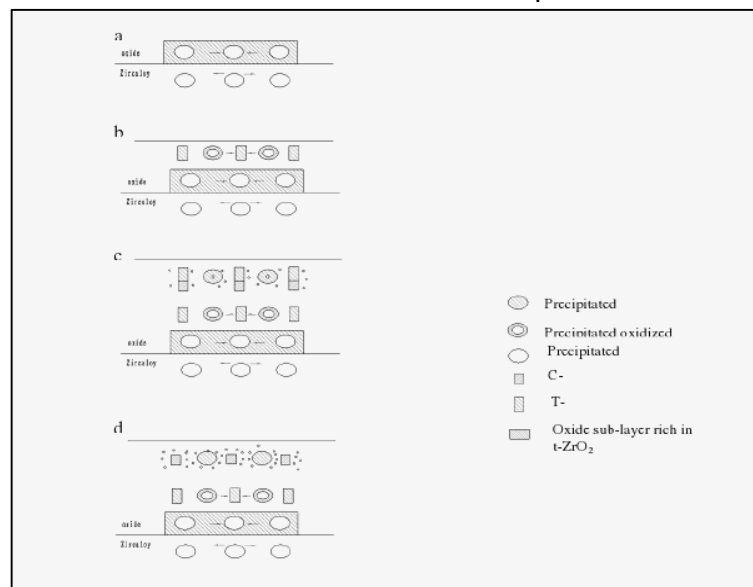
Dalam rangka meningkatkan kompetensi bidang teknologi pembuatan paduan berbasis zirkonium, telah dibuat ingot paduan Zirlo-Mo dengan Fe sebesar 0,1 dan 1,0% berat serta Mo sebesar 0 – 1% berat. Ingot paduan Zirlo-Mo dibuat dari campuran sponge Zr, serta serbuk Nb, Sn, Fe, dan Mo dengan persentase berat tertentu, dipres, kemudian dilebur dalam tungku peleburan vakum. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari ketahanan korosi ingot paduan Zirlo-Mo dalam media uap air jenuh. Hipotesa yang diajukan adalah unsur pepadu utama yaitu Fe dan Mo mempengaruhi laju korosi dan pertumbuhan oksida di permukaan paduan Zirlo-Mo.

TEORI

Perilaku korosi paduan zirkonium, seperti Zr-Mo dalam media uap air jenuh awalnya terjadi pertumbuhan oksida kemudian oksidanya mengalami pengelupasan atau rontok, dan selanjutnya terjadi pertumbuhan oksida kembali di lokasi oksida yang rontok atau terkelupas sebelumnya. Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa lapisan oksida yang pertama kali terbentuk akan membuat level tegangan tinggi karena adanya perbedaan volume antara oksida dan logam. Hal ini akan memberikan tegangan tekan pada oksida dan tegangan tarik pada logam. Selain itu, unsur-

unsur pepadu dalam matriks zirkonium akan mengambil peran dalam reaksi oksidasi. Tegangan tekan lokal dan kekosongan oksigen yang dihasilkan oleh reaksi oksidasi memberikan dampak pada stabilisasi t-ZrO₂. Presipitat memainkan peran penting dalam peningkatan tegangan pada lapisan oksida. Pada saat matriks zirkonium teroksidasi, presipitat tidak teroksidasi pada waktu yang sama dengan unsur pepadu dari paduan zirkonium. Presipitat-presipitat bergabung di dalam oksida sebagai presipitat intermetalik.

Zirkonium yang memiliki reaktivitas tinggi terhadap oksigen teroksidasi lebih dahulu. Oleh karena Fe, Cr, dan Nb membentuk presipitat sehingga memiliki kelarutan rendah dalam ZrO₂, maka hanya sejumlah kecil yang larut padat ke dalam ZrO₂. Kondisi ini memungkinkan untuk menstabilkan fase tetragonal dengan kekosongan yang terbentuk di kisi kristal ZrO₂. Hal ini memberikan dampak terhadap atom-atom zirkonium sehingga tidak dapat berdifusi ke arah antar muka presipitat/ oksida.



Gambar 1. Mekanisme korosi paduan zirkonium^[6].

Pada saat zirkonium teroksidasi menjadi ZrO₂, maka akan timbul tekanan yang disebabkan oleh adanya beda volume antara presipitat awal dan yang baru terbentuk, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Oksida zirkonium, t-ZrO₂ distabilkan oleh tegangan tekan dan kekosongan. Selanjutnya, Nb teroksidasi, hal ini membuat konsentrasi kekosongan bertambah tinggi dan membentuk kluster kekosongan. Sementara itu t-ZrO₂ akan bertransformasi ke c-ZrO₂ guna meminimalkan energi sistem. Adanya pengembangan volume cukup besar akibat oksidasi Nb akan mempercepat proses

pembentukan retak dan pembebasan tegangan tekan sehingga terjadi transisi kinetika, sesuai dengan akhir oksidasi presipitat. Pada saat ini, konsentrasi kekosongan oksigen dalam lapisan oksida maksimum dan presipitat tidak akan menimbulkan tekanan lokal tambahan pada oksida. Hal ini dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena dimana volume c-ZrO₂ meningkat setelah transisi korosi. Proses pengintian c-ZrO₂ terjadi selama transformasi t-ZrO₂ ke m-ZrO₂. Dengan proses korosi, kuantitas t-ZrO₂ menurun. Sementara itu, c-ZrO₂ distabilkan oleh

kekosongan yang dihasilkan oleh oksidasi Nb. Secara keseluruhan, ada penurunan fraksi t-ZrO₂ terhadap volume keseluruhan oksida. Relaksasi tegangan yang terjadi menyebabkan retak dan porositas pada lapisan oksida. Retak dan porositas menurunkan sifat pelindung dari lapisan oksida, dan mempercepat serangan korosi berikutnya. Transisi kinetika berkaitan dengan pembebasan tegangan sisa, sedangkan tegangan tekan lebih tinggi pada lapisan oksida berhubungan dengan ketahanan korosi yang lebih baik.

Selama transisi kinetika di bagian luar oksida, t-ZrO₂ tidak mengalami fase transformasi ke m-ZrO₂. Oksida t-ZrO₂ kemungkinan produk oksidasi zirkonium yang membentuk presipitat dan secara kimiawi stabil dengan adanya Fe-Mo-Nb dalam kisi kristal. Dengan demikian t-ZrO₂ distabilkan oleh tegangan tekan, sedangkan c-ZrO₂ distabilkan oleh kekosongan yang merupakan produk oksidasi Nb^[6].

Selain itu, presipitat yang terlalu kecil akan cepat teroksidasi, sehingga dapat menyebabkan terjadinya penurunan periode pra-transisi. Di sisi lain, presipitat besar membutuhkan banyak waktu untuk teroksidasi, tetapi kurang efektif dalam menstabilkan t-ZrO₂. Sebuah kompromi dalam ukuran endapan akan mengoptimalkan ketahanan korosi paduan zirkonium.

TATA KERJA

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah ingot paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% dan 1,0% berat Fe serta 0 – 1% berat Mo; air bebas mineral; kertas ampelas; resin *acryfic* dan pengeras; pasta intan, dan bahan etsa. Peralatan yang digunakan dalam penelitian adalah mesin potong *accutom*, *autoclave*, peralatan metalografi, neraca *sartorius*, dan mikroskop optik.

Metoda yang digunakan dalam penelitian adalah uji korosi paduan Zirlo-Mo menggunakan metoda gravimetri^[7], sedangkan pengamatan mikrostruktur spesimen pasca uji korosi menggunakan mikroskop optik. Ingot paduan Zirlo-Mo sebagai spesimen uji korosi dipotong menggunakan mesin *accutom* untuk mendapatkan ukuran tertentu. Permukaan spesimen hasil pemotongan diratakan menggunakan mesin gerinda dengan kertas ampelas grit 600. Spesimen tersebut kemudian diukur dimensinya untuk menghitung luas permukaannya. Permukaan spesimen uji di *degreasing*, dikeringkan, kemudian dilakukan penimbangan berat awal spesimen, W_0 dan pengukuran dimensi spesimen untuk menghitung luas permukaannya, A . Proses uji korosi dilakukan dalam *autoclave* menggunakan media air bebas mineral ($pH = 7,15$; $k_L = 0,6 \mu S/cm$). Temperatur air dipertahankan pada 300 °C dan waktu pengujian spesimen berda Dalam *autoclave* bervariasi, yaitu 24, 36, 48 jam. Spesimen hasil uji korosi dalam *autoclave* dikeringkan dan ditimbang, W_1 . Pengukuran beda berat $\Delta W = W_1 - W_0$ dilakukan dengan menggunakan timbangan terhadap spsimen sebelum dan sesudah uji koorisi. Pengamatan lapisan permukaan terkorosi dianalisis melalui mikrostruktur menggunakan mikroskop-optik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Laju korosi

Data hasil pengujian korosi terhadap ingot paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe dan 0 – 1,0% berat Mo (kode AS), serta 0,1 % berat Fe dan 0 – 1% berat Mo (kode BS) dalam media uap air jenuh pada temperatur 300 °C dengan rentang waktu 24 – 48 jam diperlihatkan pada Tabel 1. Selanjutnya dari data Tabel 1 dibuat grafik yang menggambarkan hubungan antara laju korosi paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe

(Gambar 2). Hubungan antara laju korosi paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe dalam media uap air jenuh pada temperatur 300 °C ditunjukkan pada Gambar 3.

Gambar 2 memperlihatkan bahwa untuk ingot paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe, laju korosi meningkat hingga pada waktu 24 jam kemudian menurun dari 24 ke 36 jam dan kemudian naik dari 36 ke 48 jam. Fenomena laju korosi ini terjadi pada paduan Zirlo-Mo dengan 0 – 0,7% berat Mo, sedangkan paduan Zirlo-1,0% Mo laju korosinya menurun dalam rentang 24 – 48 jam. Kondisi laju korosi paduan Zirlo-Mo dengan 0 – 0,7% berat Mo terjadi penurunan disebabkan dalam rentang 24 – 36 jam

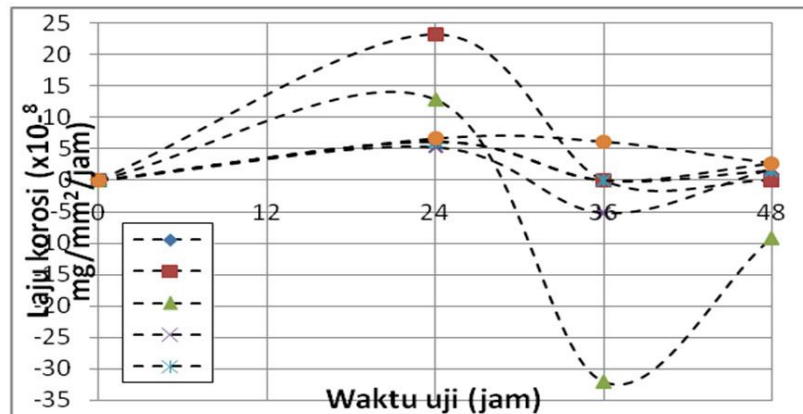
lapisan oksida yang terbentuk telah mencapai tebal kritisnya dan kemudian lapisan oksida rontok. Fenomena laju korosi serupa juga terjadi pada paduan Zirlo-1,0% Mo dalam rentang 24 – 48 jam. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa secara umum lapisan oksida yang terbentuk belum kompak dan mudah rontok sehingga kehilangan fungsinya sebagai lapis lindung terhadap permukaan paduan Zirlo-Mo. Berdasarkan Gambar 2, laju korosi paduan Zirlo-1,0% Mo relatif lebih stabil dibandingkan paduan Zirlo-Mo dengan 0 – 0,7% berat Mo. Dengan demikian paduan Zirlo-1,0% Mo mempunyai ketahanan korosi lebih baik dibandingkan paduan Zirlo-Mo dengan 0 – 0,7% berat Mo.

Tabel 1. Data uji korosi paduan Zirlo-Mo dalam media uap air jenuh pada temperatur 300 °C.

Kode Sampel	$\Delta W/A$ ($\times 10^{-8}$ mg/mm ²)			CR ($\times 10^{-8}$ mg/mm ² /jam)		
	24 jam	36 jam	48 jam	24 jam	36 jam	48 jam
AS1	146,62	0	127,06	6,11	0	2,65
AS2	557,30	0	0	23,22	0	0
AS3	309,21	- 1.156,30	- 443,30	12,88	- 32,12	- 9,23
AS4	127,29	- 184,65	88,34	5,30	- 5,13	1,84
AS5	145,36	0	74,08	6,05	0	1,54
AS6	158,91	220,64	131,00	6,62	6,13	2,73
BS1	361,48	- 11.715,72	4.293,50	15,06	- 325,44	89,45
BS2	- 146,62	1.082,35	4.996,35	- 6,11	- 30,06	104,09
BS3	322,97	- 16.164,82	4.891,55	13,46	- 449,02	101,91
BS4	261,93	3.593,51	598,12	10,91	99,82	12,46
BS5	176,13	18.907,18	- 445,49	7,34	525,20	- 9,28
BS6	157,24	- 9.003,75	16.810,88	6,55	- 250,10	350,22

Keterangan :

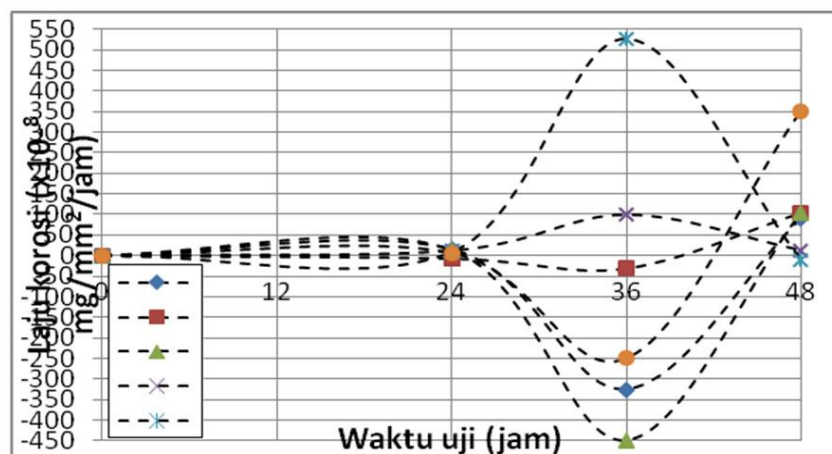
AS1 : Zirlo tanpa Mo dengan 1,0% berat Fe; AS2 : Zirlo dengan 0,1% Mo dan 1,0% berat Fe;
 AS3 : Zirlo dengan 0,3% Mo dan 1,0% berat Fe; AS4 : Zirlo dengan 0,5% Mo dan 1,0% berat Fe;
 AS5 : Zirlo dengan 0,7% Mo dan 1,0% berat Fe; AS6 : Zirlo dengan 1,0% Mo dan 1,0% berat Fe;
 BS1 : Zirlo tanpa Mo dengan 0,1% berat Fe; BS2 : Zirlo dengan 0,1% Mo dan 0,1% berat Fe;
 BS3 : Zirlo dengan 0,3% Mo dan 0,1% berat Fe; BS4 : Zirlo dengan 0,5% Mo dan 0,1% berat Fe;
 BS5 : Zirlo dengan 0,7% Mo dan 0,1% berat Fe; BS6 : Zirlo dengan 1,0% Mo dan 0,1% berat Fe.



Gambar 2. Laju korosi paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe dalam media uap air jenuh pada temperatur 300°C

Gambar 3 memperlihatkan bahwa paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% berat Fe cenderung laju korosi menurun dari 24 ke 36 jam dan kemudian naik dari 36 ke 48 jam. Fenomena tersebut terjadi pada paduan Zirlo-Mo dengan 0 – 0,3% berat Mo dan Zirlo-1,0% Mo. Lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan paduan Zirlo-Mo dengan 0 – 0,3% berat Mo dan Zirlo-1% Mo dalam rentang 24 – 36 jam kemungkinan telah mencapai tebal kritisnya dan kemudian rontok. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa secara umum lapisan oksida yang terbentuk

belum kompak sehingga mudah rontok dan kehilangan fungsinya sebagai lapis lindung. Sementara itu, paduan Zirlo dengan 0,5 – 0,7% berat Mo, laju korosinya naik dalam rentang 24 – 48 jam. Hal ini disebabkan lapisan oksida yang terbentuk kompak dan berfungsi sebagai lapisan pelindung terhadap permukaan paduan Zirlo-Mo. Dengan demikian ketahanan korosi paduan Zirlo dengan 0,5 – 0,7% berat Mo lebih baik dibandingkan paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% berat Fe lainnya.



Gambar 3. Laju korosi paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% berat Fe dalam media uap air jenuh pada temperatur 300 °C.

Berdasarkan Gambar 2 dan 3 terlihat bahwa untuk kandungan 0 – 1,0% Mo, paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe lebih tahan korosi dibandingkan paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% berat Fe dalam lingkungan uap air jenuh pada temperatur 300 °C. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kandungan Fe dalam Zirlo-Mo lebih besar dan akan berdampak terhadap penurunan laju korosi paduan. Hal ini berkaitan dengan kebolehan yang lebih besar terjadinya pembentukan presipitat $ZrFe_2$ yang stabil^[7]. Pada paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe terlihat adanya kecenderungan semakin besar kandungan Mo dalam paduan memberikan dampak laju korosi semakin tinggi yang ditandai dengan persaingan antara pembentukan dan pengelupasan lapisan oksida. Selain itu, semakin besar kandungan Mo dalam paduan menyebabkan semakin besar ketidakhomogenan struktur dalam paduan Zirlo-Mo. Oleh karena itu, ingot paduan Zirlo-Mo harus dihomogenisasi dengan perlakuan panas yang tepat agar diperoleh mikrostruktur dengan butir ekuiaksial yang homogen. Hal ini dilakukan untuk meminimalkan tegangan sisa yang terjadi pada lapisan oksida sehingga lapisan oksida yang terbentuk padat dan kompak dan tidak mudah oksigen berpenetrasi masuk ke dalam logam paduan Zirlo-Mo.

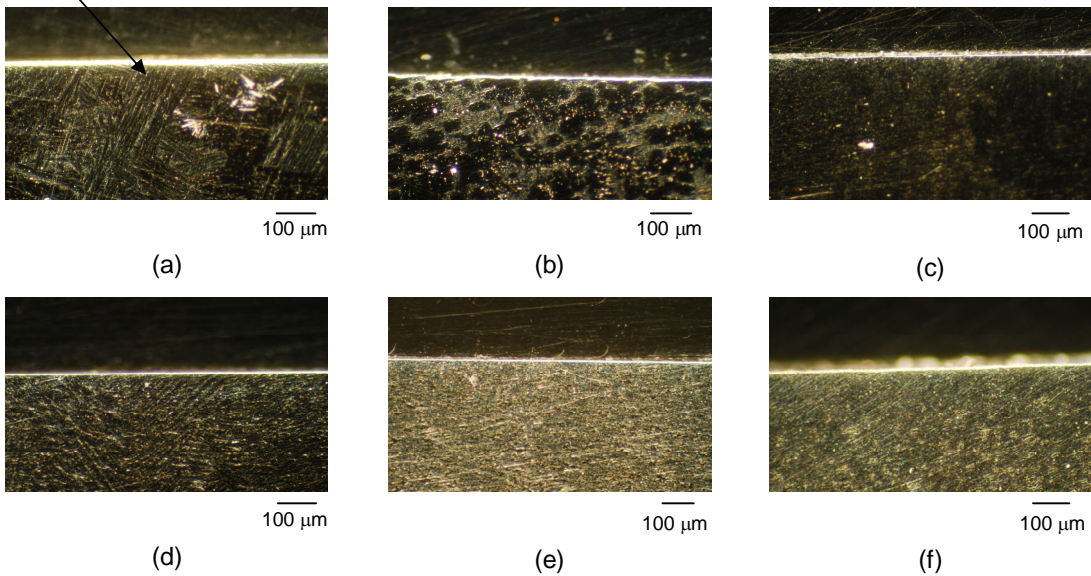
2. Lapisan oksida

Lapisan oksida yang terbentuk di permukaan logam paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe ditunjukkan pada Gambar 4, 5, dan 6. Selain itu, Gambar 7, 8, dan 9 memperlihatkan lapisan oksida yang

terbentuk di permukaan logam paduan Zirlo-Mo dengan komposisi 0,1% berat Fe.

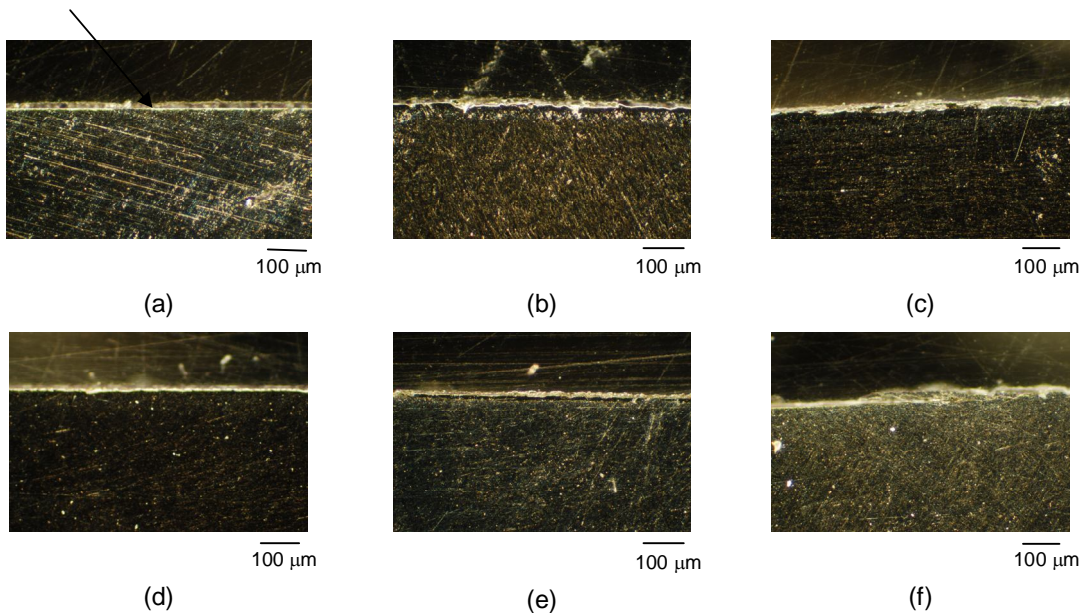
Gambar 4, 5 dan 6 memperlihatkan lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan paduan Zirlo-Mo dengan 0 – 1,0% berat Mo dan 1,0% berat Fe dalam media uap air jenuh pada temperatur 300°C selama 24 - 48 jam. Gambar 3 terlihat lapisan oksida tipis pada permukaan paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe pasca uji korosi (300 °C, 24 jam) mempunyai morfologi struktur permukaan lapisan oksida relatif halus. Kondisi ini menunjukkan terjadinya pertumbuhan oksida pada permukaan paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe. Gambar 5 menunjukkan adanya kecenderungan serupa yaitu lapisan oksida terkelupas dan rontok setelah melewati tebal kritisnya ($t = 36$ jam), seperti terlihat pada morfologi struktur di permukaan ingot paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe pasca uji korosi (300 °C, 36 jam). Gambar 6 memperlihatkan terjadinya pertumbuhan oksida kembali di permukaan paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe pasca uji korosi (300 °C, 48 jam). Dengan demikian terjadi persaingan antara pertumbuhan dan pengelupasan lapisan oksida. Lapisan oksida yang terkelupas dan rontok terlihat dari bentuk permukaan oksida yang tak beraturan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa secara umum lapisan oksida yang terbentuk belum kompak sehingga mudah rontok. Ditinjau dari bentuk permukaan oksida, paduan Zirlo-1% Mo merupakan yang terbaik karena lapisan oksida yang terbentuk relatif kompak dibandingkan paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe yang lainnya.

Lapisan oksida

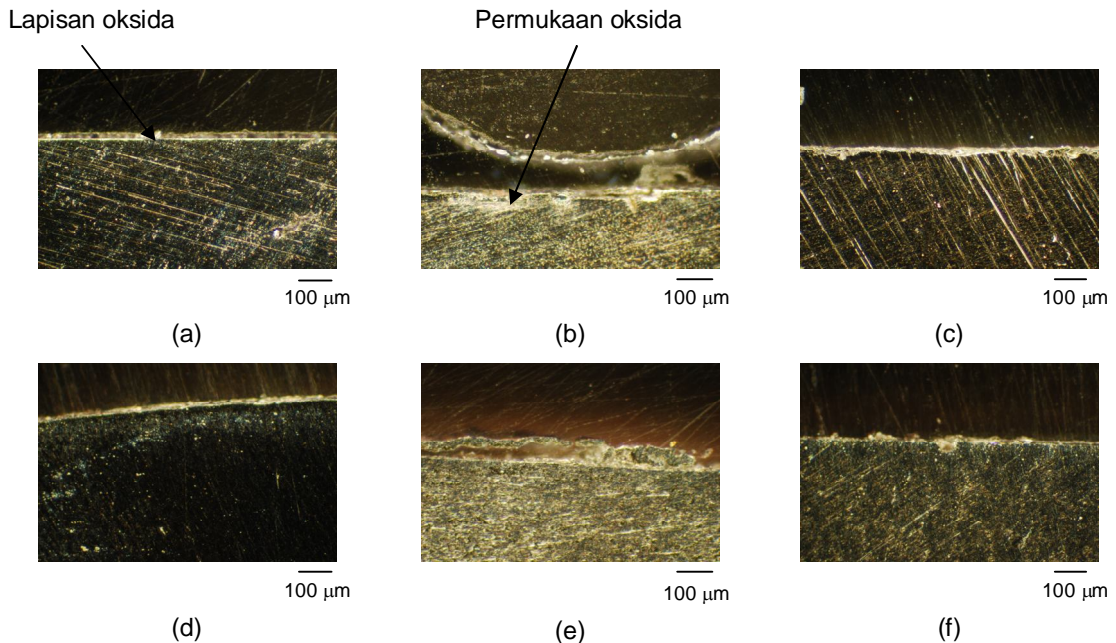


Gambar 4. Mikrograf lapisan oksida logam paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe pasca uji korosi dalam media uap air jenuh pada temperatur 300 °C selama 24 jam. (a) Zirlo tanpa Mo; (b) Zirlo-0,1%Mo; (c) Zirlo-0,3% Mo; (d) Zirlo-0,5% Mo; (e) Zirlo-0,7% Mo; (f) Zirlo-1% Mo

Lapisan oksida



Gambar 5. Mikrograf lapisan oksida logam paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe pasca uji korosi dalam media uap air jenuh pada temperatur 300 °C selama 36 jam. (a) Zirlo tanpa Mo; (b) Zirlo-0,1%Mo; (c) Zirlo-0,3% Mo; (d) Zirlo-0,5% Mo; (e) Zirlo-0,7% Mo; (f) Zirlo-1% Mo

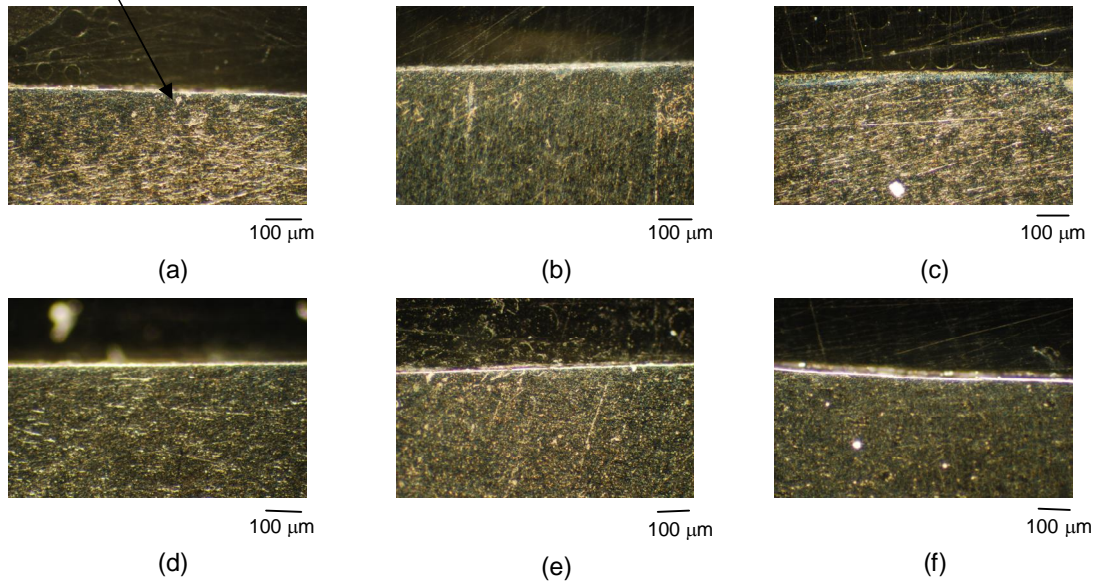


Gambar 6 Mikrograf lapisan oksida logam paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe pasca uji korosi dalam media uap air jenuh pada temperatur 300 °C selama 48 jam.
(a) Zirlo tanpa Mo; (b) Zirlo-0,1%Mo; (c) Zirlo-0,3% Mo; (d) Zirlo-0,5% Mo;
(e) Zirlo-0,7% Mo; (f) Zirlo-1% Mo

Gambar 7, 8 dan 9 memperlihatkan lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan paduan Zirlo-Mo dengan 0 – 1,0% berat Mo dan 0,1% berat Fe dalam media uap air jenuh pada temperatur 300°C selama 24 - 48 jam. Pada Gambar 7, 8 dan 9 tersebut terlihat adanya kecenderungan serupa yaitu umumnya terjadi pertumbuhan lapisan oksida kecuali untuk paduan Zirlo-0,1% Mo yang telah mengalami pengelupasan oksida ($t = 24$ jam) kemudian terkelupas dan rontok setelah melewati tebal kritisnya, kecuali paduan Zirlo-0,5% Mo dan Zirlo-0,7% Mo yang mengalami pertumbuhan oksida ($t = 36$ jam), selanjutnya terjadi pertumbuhan oksida kembali, kecuali paduan Zirlo-0,5% Mo

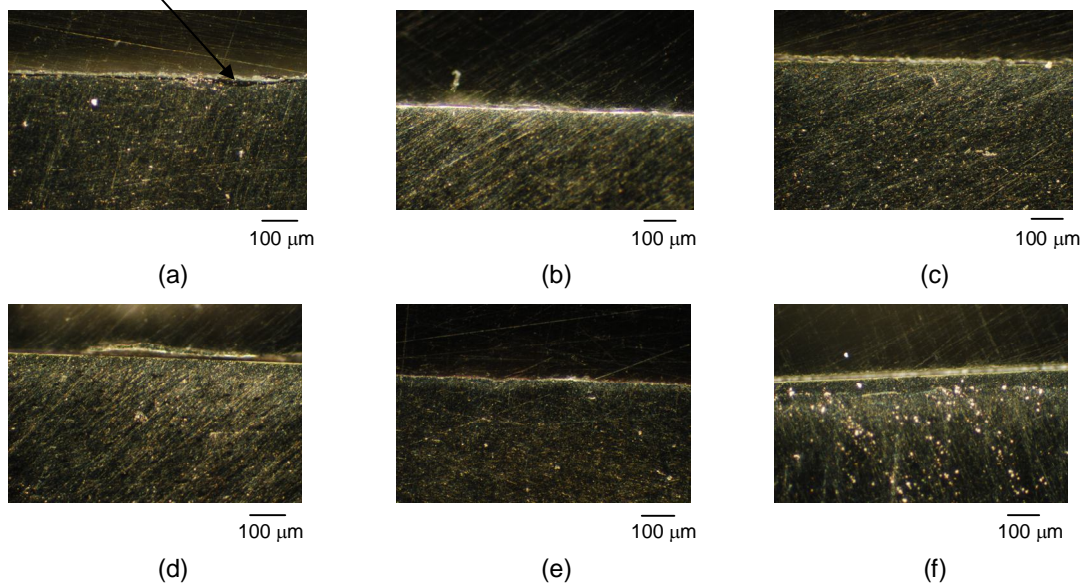
dan Zirlo-0,7% Mo yang mengalami pengelupasan oksida ($t = 48$ jam). Dengan demikian terjadi persaingan antara pertumbuhan dan pengelupasan lapisan oksida. Lapisan oksida yang terkelupas dan rontok terlihat dari bentuk permukaan oksida yang tak beraturan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa secara umum lapisan oksida yang terbentuk belum kompak sehingga mudah rontok. Ditinjau dari bentuk permukaan oksida, paduan Zirlo-0,5% Mo merupakan yang terbaik karena lapisan oksida yang terbentuk relatif kompak dibandingkan paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% berat Fe yang lainnya.

Lapisan oksida

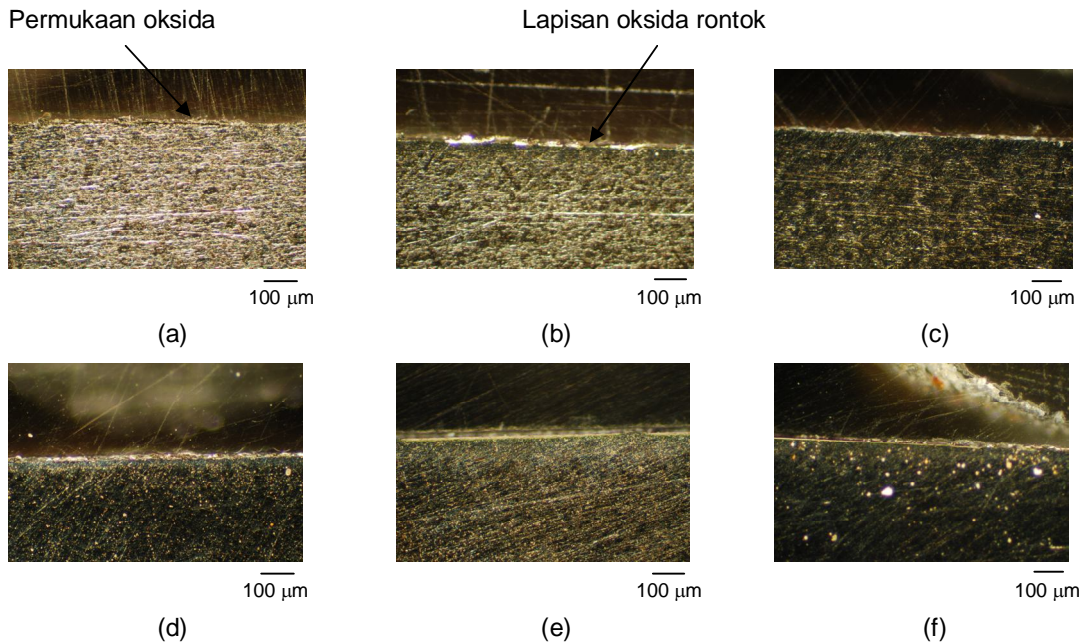


Gambar 7. Mikrograf lapisan oksida logam paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% berat Fe pasca uji korosi dalam media uap air jenuh pada temperatur 300 °C selama 24 jam. (a) Zirlo tanpa Mo; (b) Zirlo-0,1%Mo; (c) Zirlo-0,3% Mo; (d) Zirlo-0,5% Mo; (e) Zirlo-0,7% Mo; (f) Zirlo-1% Mo.

Lapisan oksida rontok



Gambar 8. Mikrograf lapisan oksida logam paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% berat Fe pasca uji korosi dalam media uap air jenuh pada temperatur 300 °C selama 36 jam. (a) Zirlo tanpa Mo; (b) Zirlo-0,1%Mo; (c) Zirlo-0,3% Mo; (d) Zirlo-0,5% Mo; (e) Zirlo-0,7% Mo; (f) Zirlo-1% Mo.



Gambar 9. Mikrograf lapisan oksida logam paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% berat Fe pasca uji korosi dalam media uap air jenuh pada temperatur 300 °C selama 48 jam.
(a) Zirlo tanpa Mo; (b) Zirlo-0,1%Mo; (c) Zirlo-0,3% Mo; (d) Zirlo-0,5% Mo;
(e) Zirlo-0,7% Mo; (f) Zirlo-1% Mo

Berdasarkan Gambar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 diketahui bahwa lapisan oksida yang terbentuk di permukaan paduan Zirlo-Mo awalnya kompak kemudian terkelupas dan rontok dan selanjutnya terjadi pertumbuhan oksida. Di sisi lain, lapisan oksida yang terbentuk di permukaan ingot paduan Zirlo-Mo adalah ZrO_2 yang mempunyai nisbah Pilling-Bedworth (R) sebesar 1,56^[6] sehingga lapisan oksida yang terbentuk bersifat protektif. Senyawa ZrO_2 mempunyai konduktivitas termal rendah sehingga dengan bertambah tebalnya lapisan oksida dan menurunnya konduktivitas termal logam ke air maka temperatur antarmuka logam-oksida bertambah tinggi. Kondisi tersebut menyebabkan terjadinya penumpukan panas pada antar muka oksida-logam sehingga akan menaikkan tegangan tekan pada sistem oksida-logam^[7,8]. Hal ini berdampak pada kemungkinan terkelupas dan rontoknya lapisan oksida dan merupakan pemicu serangan korosi lokal berikutnya terhadap

permukaan ingot paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% dan 1,0% berat Fe.

Berdasarkan Gambar 4, 5, 6, 7, 8 dan 9 pengaruh Mo terhadap ketahanan korosi paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% dan 1% berat Fe belum nampak, karena pengujian korosinya dilakukan terhadap ingot leburan. Ingot paduan Zirlo-Mo leburan mempunyai struktur butiran tidak seragam sehingga tegangan sisanya tinggi. Untuk mengetahui pengaruh unsur Mo dan Fe terhadap perilaku korosi paduan Zirlo-Mo sebaiknya ingot leburan tersebut dilakupanaskan pada temperatur di bawah temperatur rekristalisasi dengan waktu penahanan tertentu dengan tujuan untuk mendapatkan struktur paduan Zirlo-Mo yang homogen dan ketahanan korosinya tinggi.

Perilaku korosi ingot paduan Zr-Mo dengan 0,1 dan 1% berat Fe menunjukkan kecenderungan serupa yaitu awalnya terjadi pertumbuhan oksida kemudian pengelupasan

oksida atau rontok, dan selanjutnya pertumbuhan oksida kembali di lokasi oksida yang rontok atau terkelupas sebelumnya. Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa lapisan oksida yang pertama kali terbentuk akan membuat level tegangan tinggi karena adanya perbedaan volume antara oksida dan logam. Hal ini akan memberikan tegangan tekan pada oksida dan tegangan tarik pada logam. Tegangan tekan lokal dan kekosongan oksigen yang dihasilkan oleh reaksi oksidasi memberikan dampak pada stabilisasi t-ZrO₂. Dengan proses korosi, terjadi penurunan fraksi t-ZrO₂ terhadap volume keseluruhan oksida. Relaksasi tegangan yang terjadi menyebabkan retak dan porositas pada lapisan oksida. Retak dan porositas menurunkan sifat pelindung dari lapisan oksida, dan mempercepat serangan korosi berikutnya^[6].

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan dan pengkajian data disimpulkan bahwa laju korosi paduan Zirlo-Mo dengan 0 – 0,7% berat Mo dan 1,0% berat Fe, cenderung naik hingga waktu uji 24 jam, kemudian menurun antara 24 sampai 36 jam, dan selanjutnya naik kembali setelah 36 jam, sedangkan laju korosi paduan Zirlo-1,0% Mo menurun dalam rentang 24 – 48 jam.

Laju korosi paduan Zirlo-Mo dengan 0 – 0,3% berat Mo, Zirlo-1,0% Mo dan 0,1% berat Fe cenderung naik hingga waktu uji 24 jam, kemudian menurun antara 24 sampai 36 jam dan selanjutnya naik kembali setelah 36 jam, sedangkan laju korosi paduan Zirlo dengan 0,5 – 0,7% berat Mo cenderung naik dalam rentang waktu 24 – 48 jam.

Ketahanan korosi terbaik untuk paduan Zirlo-Mo dengan 1,0% berat Fe adalah paduan Zirlo-1% Mo, sedangkan untuk paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% berat Fe adalah paduan Zirlo-0,5% Mo. Ketahanan korosi paduan Zirlo-Mo dengan 0,1% dan 1% berat Fe dipengaruhi oleh unsur Mo dan Fe.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dedy Haryadi, Edi Indarto, Isfandi, Slamet Pribadi, dan Yatno Dwi Agus Susanto, yang telah membantu pembuatan ingot Zirlo-Mo, preparasi sampel, pengamatan metalografi, dan pengujian korosi, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. COHEN, P., (1985), "Water Coolant Technology of Power Reactors", American Nuclear Society, Illinois.
- [2]. MEYER, M.K., (2007), "High Burnup Fuel", GCEP Fission Workshop, INL, p. 5.
- [3]. RUDLING, P., R. ADAMSON, B. COX, F. GARZAROLLI, and A. STRASSER, (2008), "High Burnup Fuel Issues", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 40, No. 1, p. 1-8.
- [4]. ANONYMOUS, (2004), "Zirlo Cladding and Components", Westinghouse Electric Co., Pittsburgh.
- [5]. KIM, H.H., J.H. KIM, J. Y. MOON, H.S. LEE, J.J. KIM and Y.S. CHAI, (2010), "High-temperature Oxidation Behavior of Zircaloy-4 and Zirlo in Steam Ambient", J. Mater. Sci. Technology, p. 827 – 832.
- [6]. HAIXIA, Z., (2009), "Study of Mechanism of New Zircaloys (PhD Thesis)", Universite de Grenoble and X'ian Jiaotong University.
- [7]. ANONYMOUS, "Aqueous Corrosion Testing of Samples of Zirconium and Zirconium Alloys", ASTM G2M-06.
- [8]. TEODORO, C.A., J.E.R da SILVA, L.A.A. TERREMOTO, M. CASTANHEIRA, A.T e SILVA, G. LUCKI and M. de A. DANNY, (2007), "Comparison of The Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Zirlo and Other Zirconium Alloys", INAC 2007, Santos, ISBN: 978-85-99141-02-1,