

---

## FENOMENA KOROSI ZIRKALOY-2 DAN ZIRKALOY-4 DALAM MEDIA LARUTAN NaCl SECARA ELEKTROKIMIA

Dian.A, Maman K.A, Rosika K, Yanlinastuti  
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN  
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314  
e-mail: ad\_09@ymail.com

(Naskah diterima : 21-08-2015, Naskah direvisi: 16-09-2015, Naskah disetujui: 23-09-2015)

### ABSTRAK

**FENOMENA KOROSI ZIRKALOY-2 DAN ZIRKALOY-4 DALAM MEDIA LARUTAN NaCl SECARA ELEKTROKIMIA.** Zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 digunakan sebagai bahan kelongsong pada elemen bahan bakar reaktor daya BWR (*Boiling Water Reactor*) dan PWR (*Pressurized Water Reactor*). Selama penggunaannya dalam kolam penyimpanan bahan bakar bekas kemungkinan kelongsong berinteraksi dengan air laut (*sea water*), dalam hal kondisi abnormal. Ion klorida yang terdapat dalam air laut memiliki potensi penyebab terjadinya korosi pada bahan kelongsong. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui fenomena korosi zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 dalam media NaCl melalui penentuan parameter korosi dengan teknik tahanan polarisasi, Tafel dan potensiodinamik. Sampel berupa potongan bahan zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 dengan dimensi 1x1 cm dilakukan proses *mounting* dan disolder dengan kawat tembaga, kemudian permukaan sampel dipoles menggunakan amplas 1200 grit. Uji korosi dilakukan dalam sel korosi yang dilengkapi dengan elektrode standar (*saturated calomel*), elektroda penyangga (grafit) dan elektroda kerja (sampel). Media pelarut yang digunakan adalah larutan NaCl dengan konsentrasi 3,5 %; 0,35 % dan 0,175 %. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya ion Cl<sup>-</sup> pada daerah konsentrasi NaCl 0,175 % sampai dengan 3,5 % tidak mempengaruhi pola mekanisme korosi. Jenis korosi pada daerah potensial  $\pm 250$  mV terhadap  $E_{corr}$  adalah korosi merata dalam bentuk oksida ZrO<sub>2</sub>. Laju korosi zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 pada konsentrasi NaCl 3,5 % diperoleh masing-masing sebesar  $6,39 \times 10^{-3}$  dan  $7,40 \times 10^{-3}$  mpy. Fenomena korosi yang diamati dengan teknik potensiodinamik ( $\pm 1000$  mV terhadap  $E_{corr}$ ) menunjukkan bahwa zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 mengalami pasivasi dan korosi *pitting*. Potensial *pitting* zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 diperoleh masing-masing sebesar -452,8 mV dan -182,8 mV.

**Kata kunci:** Korosi, zirkaloy-2 dan zirkaloy-4, media larutan NaCl, elektrokimia, teknik polarisasi

---

## ABSTRACT

**CORROSION PHENOMENA OF ZIRKALOY-2 AND ZIRKALOY-4 IN NaCl SOLUTION MEDIUM BY ELECTROCHEMICALLY.** Zircaloy-2 and zircaloy-4 are used as cladding material in Light Water Reactor, (LWR), Boiling Water Reactor (BWR) and Pressurezid Water Reactor (PWR). During its use in the spent fuel pool may interact between the cladding and seawater in case of abnormal condition. Chloride ion which contained in seawater has the potential for being corrosion in cladding material. The aim of this work was knowing zircaloy-2 and zircaloy-4 corrosion phenomena in NaCl medium by corrosion parameter determination with polarization resistance technique, tafel, and potentiodynamic. Samples are zircaloy-2 and zircaloy-4 pieces material with 1x1 cm dimension. The samples are mounting and soldered with copper wire, then the sample surface are polished by 1200 grade grinding paper. Corrosion test was done with corrosion cell that was completed by electrode standard (saturated calomel), electrode buffer (grafit) and work electrode (sample). Solvent medium was NaCl solution with concentration 3.5 %; 0.35 %; and 0.175 %. The result showed that ion  $Cl^-$  contained in NaCl which were concentration area from 0.175 % to 3.5 % did not affect corrosion mechanism. The corrosion type in potential range  $\pm 250$  mV to  $E_{corr}$  was uniform corrosion in  $ZrO_2$  oxide form. Zircaloy-2 and zircaloy-4 corrosion rate in 3.5 % NaCl concentration were obtained  $6.39 \times 10^{-3}$  and  $7.40 \times 10^{-3}$  mpy respectively. Corrosion phenomenon which was observed by potentiodynamic technique ( $\pm 1000$  mV to  $E_{corr}$ ) showed that zircaloy-2 and zircaloy-4 underwent passivation and pitting corrosion. Pitting potential zircaloy-2 and zircaloy-4 were obtained -452.8 mV and -182.8 mV severally.

**Keywords:** Corrosion, zircaloy-2 and zircaloy-4, NaCl solvent medium, electrochemical, polarization technique.

## PENDAHULUAN

Zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 digunakan sebagai bahan kelongsong dan struktur pada elemen bahan bakar reaktor daya *Boiling Water Reactor* (BWR) dan *Pressurized Water Reactor* (PWR). Selama penggunaannya dalam kolam penyimpanan (*fuel storage*) bahan bakar bekas, kelongsong zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 kemungkinan berinteraksi dengan air laut (*sea water*) pada saat keadaan abnormal yaitu pada kondisi sistem pendingin kolam penyimpanan mengalami kegagalan fungsi, seperti yang dialami reaktor Fukushima Daichi<sup>[1]</sup>. Ion klorida dalam kandungan air laut (NaCl 3,5 %) adalah salah satu ion agresif, yang memiliki potensi penyebab terjadinya korosi pada bahan kelongsong dan hal ini dapat mengakibatkan kegagalan fungsi kelongsong dalam mencegah lepasnya radioaktif hasil fisi keluar ke lingkungan. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dipelajari proses korosi zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 dengan adanya ion Cl<sup>-</sup> dengan tujuan untuk mengetahui fenomena korosi melalui penentuan parameter korosi dengan teknik tahan polarisasi, Tafel dan potensiodinamik. sebagai dasar dalam memahami karakteristik kelongsong dengan adanya ion agresif Cl<sup>-</sup>.

Paduan zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 memiliki sifat ketahanan korosi tinggi dan sifat mekanik yang baik. Keandalan paduan zirkaloy terhadap korosi disebabkan karena terbentuknya lapisan oksida ZrO<sub>2</sub> pada permukaan logam, sehingga dapat melindungi logam dari korosi<sup>[2]</sup>. Pustaka<sup>[3]</sup> menyatakan bahwa ion – ion seperti florida, khlorida dan bromida dalam larutan akan teradsorpsi pada permukaan lapisan oksida, ZrO<sub>2</sub> pada temperatur tinggi. Ion khlorida akan memberikan efek cacat secara lokal dan pengaruhnya lebih besar dari ion florida tetapi lebih rendah dari bromida. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa zirkaloy-2 akan mengalami *Stress Corrosion Cracking* (SCC) dalam larutan klorida pada

polarisasi di sekitar potensial kritis *pitting* ( $E_{pitt}$ ) dan dalam larutan NaCl temperatur tinggi 373 K akan mengalami korosi dengan tipe *pitting*<sup>[4]</sup>, juga dialami pada media NaOH + H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>. Sementara itu, telah diperoleh pula adanya radiasi alpha, beta dan gamma yang akan menyebabkan korosi *pitting* pada kelongsong zirkaloy-2 karena radiasi tersebut dapat mengurai H<sub>2</sub>O menjadi oksida seperti H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dan OH. Ion Cl<sup>-</sup> dalam media larutan NaCl akan bereaksi dengan oksidan menghasilkan ClO<sub>2</sub><sup>-</sup> dan ClO<sub>3</sub>, yang menyebabkan korosi *pitting* pada zirkaloy-2. Zirkaloy-4 rentan terhadap larutan halida seperti yang telah diteliti sebelumnya bahwa zirkaloy-4 akan mengalami *Stress Corrosion Cracking* (SCC) dalam larutan NaCl, KBr dan KI<sup>[5]</sup>. Faktor lain yang memicu terjadinya korosi adalah perlakuan panas yang menunjukkan semakin tinggi dan semakin lama waktu perlakuan panas akan meningkatkan laju korosi merata dan *pitting*.

Hal di atas menunjukkan bahwa kondisi media larutan NaCl dengan induksi faktor luar seperti temperatur, radiasi dan perlakuan mekanik berpotensi untuk meningkatkan terjadinya korosi pada paduan zirkaloy. Oleh karena itu diperlukan uji korosi pada bahan zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 tanpa proses perlakuan dan tanpa menggunakan parameter luar seperti temperatur, radiasi dan hanya menggunakan parameter kondisi media larutan NaCl. Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan sebagai data pembandingan dalam melengkapi data karakterisasi bahan paduan berbasis zirkonium sebagai bahan kelongsong bahan bakar nuklir, khususnya uji korosi.

## METODOLOGI

Fenomena korosi zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 dalam media larutan NaCl pada berbagai konsentrasi ion Cl<sup>-</sup> (3,5 %; 0,35 %, 0,175 %) diamati dengan menggunakan teknik Tafel dan Potensiodinamik. Cuplikan berbentuk persegi dengan dimensi 1x1 cm dibuat daripotong pelat zirkaloy-2 dan

zirkaloy-4, yang dimounting menggunakan campuran resin dan *hardener*. Proses *mounting* sampel zirkaloy dilakukan untuk mempermudah penanganan sampel berukuran kecil. Langkah selanjutnya dilakukan proses penyolderan untuk menghubungkan sampel dengan kabel, yang terhubung dengan alat potensiostat. Proses selanjutnya sampel zirkaloy diampas dengan menggunakan kertas amplas 1200 grit agar diperoleh permukaan yang rata dan halus. Permukaan sampel zirkaloy kemudian dibersihkan dengan menggunakan alkohol dalam *ultrasonic cleaner* selama 5 menit dan air demineral, dibiarkan sampai kering di udara. Proses korosi dilakukan dalam sel korosi yang dilengkapi *Saturated Calomel Electrode (SCE)* sebagai *reference electrode* dan dua buah elektrode penyangga berupa grafit yang ditempatkan secara simetri terhadap elektrode kerja yang berupa cuplikan zirkaloy-2 dan zirkaloy-4. Larutan media proses korosi adalah larutan NaCl 3,5 %; 0,35 % dan 0,175 %, masing-masing sebanyak 600 mL untuk setiap proses korosi yang dilakukan pada temperatur kamar.

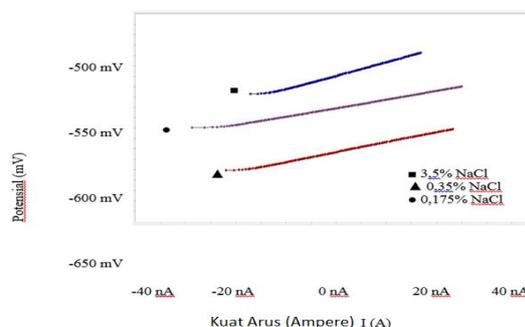
Proses korosi diawali dengan memonitor *Open Circuit Potential (OCP)* sampai mencapai keadaan OCP yang stabil, dengan ditunjukkan oleh nilai potensial (mV) yang konstan terhadap waktu. Setelah keadaan OCP stabil, proses uji korosi dilanjutkan untuk penentuan parameter korosi menggunakan teknik polarisasi, yang terdiri dari *polarization resistance*, tafel dan potensiodinamik. Metode *Polarization resistance* dilakukan pada rentang potensial sebesar  $\pm 10$  mV dengan kecepatan *scanning* 0,125 mV/s, sedangkan Tafel dan potensiodinamik pada daerah potensial masing-masing pada  $\pm 250$  mV dan  $\pm 1000$  mV terhadap  $E_{corr}$  dengan kecepatan 0,5 dan 0,1 mV/detik. Morfologi permukaan sampel zirkaloy yang telah mengalami proses korosi diamati dengan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200 kali. Analisis kualitatif dan kuantitatif unsur –

unsur logam paduan (Sn, Fe, Cr, Ni) dalam bahan zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 dilakukan dengan menggunakan spektrometer X-Ray *Fluorescence (XRF)*.

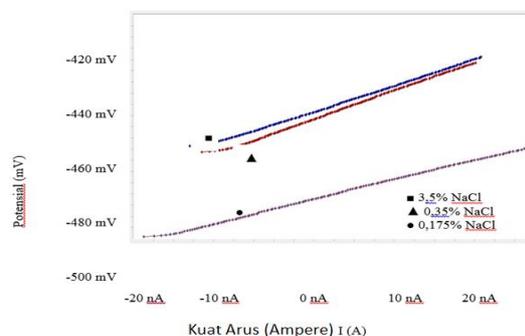
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil *scanning OCP* pada zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 menunjukkan bahwa kondisi stabil sistem zirkaloy dengan media larutan NaCl (3,5 %; 0,35 % dan 0,175 %) tercapai dalam waktu 8 jam dari saat pencelupan sampel dalam sel korosi. Nilai potensial korosi,  $E_{corr}$ , yang diperoleh dalam kisaran antara -500 mV sampai dengan -600 mV.

Pengujian korosi sampel zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 dengan menggunakan teknik tahanan polarisasi ( $R_p$ ) dilakukan untuk mengetahui ketahanan sampel ketika diberi potensial luar sebesar  $\pm 10$  mV kepada elektrode kerja. Hasil *scanning* potensial dengan rentang  $\pm 10$  mV dari  $E_{corr}$  memberikan perubahan arus seperti yang terlihat pada Gambar 1. Kemiringan (*slope*) kurva linier yang terbentuk dari hubungan potensial dan arus digunakan untuk mengetahui nilai tahanan polarisasi ( $R_p$ ).



Gambar 1a. Kurva Polarisasi Paduan zirkaloy-2



Gambar 1b. Kurva Polarisasi Paduan zirkaloy-4

Nilai tahanan polarisasi selanjutnya digunakan untuk menentukan kerapatan arus,  $I_{corr}$  dengan menggunakan persamaan Stern-Geary<sup>[6]</sup> sebagai berikut:

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3Rp(\beta_a + \beta_c)}$$

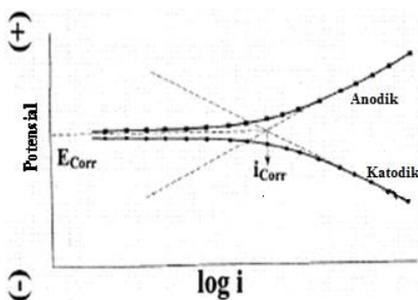
dengan,

- $I_{corr}$  = kerapatan arus korosi, (nA)
- $Rp$  = tahanan polarisasi
- $\beta_{anodik}$  = koefisien kurva anodik (0,12 mV)
- $\beta_{katodik}$  = koefisien kurva katodik (0,12 mV)

Tabel 1. Data tahanan korosi ( $Rp$ ) dan arus korosi ( $I_{corr}$ ) zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 pada berbagai konsentrasi Cl<sup>-</sup>.

| Konsentrasi NaCl (%) | zirkaloy-2  |                 | zirkaloy-4  |                 |
|----------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
|                      | Rp (Ω, Ohm) | $I_{corr}$ (nA) | Rp (Ω, Ohm) | $I_{corr}$ (nA) |
| 3,500                | 1,324       | 34,710          | 1,460       | 38,590          |
| 0,350                | 0,984       | 45,000          | 1,117       | 24,800          |
| 0,175                | 0,820       | 74,840          | 1,611       | 19,660          |

Hasil pengukuran dengan teknik polarisasi Tafel diperoleh kurva polarisasi yang memiliki dua cabang kurva yaitu kurva katodik dan kurva anodik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pola diagram Katodik dan Anodik<sup>[7]</sup>

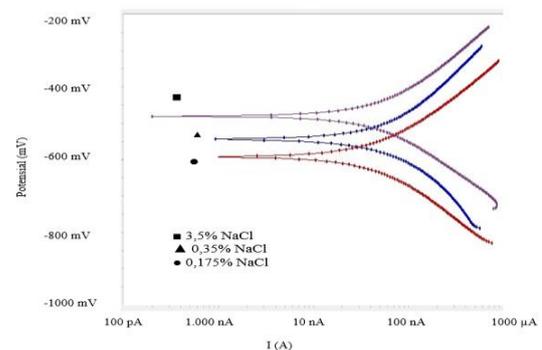
Gambar 2 menunjukkan bahwa kurva katodik menggambarkan fenomena reaksi reduksi dalam larutan NaCl dengan memindahkan sejumlah elektron dari logam, sedangkan kurva anodik menggambarkan reaksi oksidasi pada logam dengan pelepasan sejumlah elektron. Tafel plot merupakan bagian linier dari kurva polarisasi log current (log i) katodik dan anodik. Kurva polarisasi menggambarkan fenomena korosi berdasarkan hubungan potensial (mV) dan

Nilai  $I_{corr}$  ditentukan dari nilai  $Rp$  yang diperoleh dari hasil olahan software e-Chem kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan Stern-Geary. Data  $Rp$  dan  $I_{corr}$  yang diperoleh tertuang pada dalam Tabel 1.

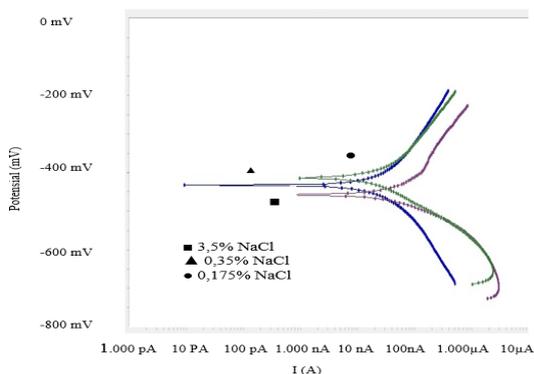
Parameter korosi dapat juga diketahui melalui teknik polarisasi Tafel dengan memberi potensial pada elektoda kerja dalam rentang pengukuran ± 250 mV terhadap  $E_{corr}$ .

kerapatan arus (A). Laju korosi pada kurva polarisasi dinyatakan dengan adanya parameter korosi yaitu  $E_{corr}$ ,  $I_{corr}$ ,  $\beta_{anodik}$  dan  $\beta_{katodik}$ , yang diperoleh dari ekstrapolasi garis linier pada daerah katodik dan anodik.

Hasil scanning potensial pada rentang ± 250 mV terhadap  $E_{corr}$  pada sistem korosi zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 dalam larutan NaCl pada berbagai konsentrasi ditunjukkan pada Gambar 3. Kurva polarisasi zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 pada daerah katodik dengan potensial dibawah  $E_{corr}$  maupun daerah anodik dengan rentang potensial diatas  $E_{corr}$  menunjukkan pola yang hampir sama untuk masing-masing konsentrasi Cl<sup>-</sup>.



Gambar 3a. Kurva Tafel zirkaloy-2



Gambar 3b. Kuva Tafel zirkaloy-4

Fenomena ini menunjukkan bahwa konsentrasi ion Cl<sup>-</sup> dalam kisaran konsentrasi 3,5 %; 0,35 %, 0,175 % NaCl tidak memberi efek yang signifikan terhadap mekanisme proses korosi zirkaloy-2 dan zirkaloy-4. Kurva anodik, yang dimulai dari potensial korosi, E<sub>corr</sub> sampai maksimum potensial

pengukuran disebut daerah aktif. Pada daerah aktif, sampel zirkaloy sebagai anoda mengalami proses reaksi oksidasi dan menghasilkan ZrO<sub>2</sub> yang menyebabkan terjadinya korosi merata (*uniform corrosion*) dengan laju korosi seperti yang tertuang pada Tabel 2. Korosi merata merupakan tipe korosi yang tidak berbahaya karena produk korosi berupa lapisan film oksida ZrO<sub>2</sub>, yang meliputi seluruh permukaan sampel sebagai lapisan pelindung logam terhadap korosi selanjutnya. Hasil analisis dengan Tafel plot pada zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 menggunakan *software E-Chem* untuk mendapatkan nilai parameter korosi, yang hasilnya tercantum pada Tabel 2.

Tabel 2. Data parameter korosi zirkaloy-2 dan zirkaloy-4

| Sampel            | E <sub>corr</sub> (mV) | β <sub>katodik</sub>   | β <sub>anodik</sub>     | I <sub>corr</sub> (nA) | C <sub>R</sub> (mpy)   |
|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Zirkaloy-2</b> |                        |                        |                         |                        |                        |
| NaCl 3,500 %      | -539                   | 221,4×10 <sup>-3</sup> | 203,5×10 <sup>-3</sup>  | 56,4                   | 6,390×10 <sup>-3</sup> |
| NaCl 0,350 %      | -592                   | 202,5×10 <sup>-3</sup> | 206,8×10 <sup>-3</sup>  | 48,6                   | 3,613×10 <sup>-3</sup> |
| NaCl 0,175 %      | -544                   | 325,0×10 <sup>-3</sup> | 250,1×10 <sup>-3</sup>  | 82,5                   | 6,134×10 <sup>-3</sup> |
| <b>Zirkaloy-4</b> |                        |                        |                         |                        |                        |
| NaCl 3,500 %      | -438                   | 282,6×10 <sup>-3</sup> | 240,10×10 <sup>-3</sup> | 48,10                  | 7,400×10 <sup>-3</sup> |
| NaCl 0,350 %      | -458                   | 229,1×10 <sup>-3</sup> | 209,06×10 <sup>-3</sup> | 68,00                  | 9,890×10 <sup>-3</sup> |
| NaCl 0,175 %      | -414                   | 165,2×10 <sup>-3</sup> | 103,60×10 <sup>-3</sup> | 34,70                  | 5,049×10 <sup>-3</sup> |

Nilai kerapatan arus korosi (I<sub>corr</sub>) zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 untuk setiap konsentrasi NaCl diperoleh sangat rendah, terutama pada konsentrasi larutan NaCl 0,35 % untuk zirkaloy-2 dan 0,175 % untuk zirkaloy-4. Hal ini disebabkan oleh faktor sistematis dari fluktuasi hasil pengukuran. Berdasarkan standar kategori korosi dengan mengacu pada *National Association of Corrosion Engineers (NACE, 1985)* nilai laju korosi tersebut termasuk dalam kategori aman (*out standing*) karena berada di bawah nilai 1 mpy<sup>[8]</sup>.

Hasil analisis laju korosi zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 secara garis besar terlihat ada sedikit perbedaan. Hal ini dimungkinkan karena adanya perbedaan komposisi kimia secara kualitatif dan kuantitatif dari unsur

pemadu yang terkandung dalam zirkaloy-2 dan zirkaloy-4. Berdasarkan hasil analisis komposisi kimia dengan menggunakan spektrometer XRF diperoleh hasil seperti yang tertuang pada Tabel 3.

Tabel 3. Data konsentrasi unsur pemadu dalam zirkaloy-2 dan zirkaloy-4.

| Unsur Pemadu | Konsentrasi (%) |            |
|--------------|-----------------|------------|
|              | Zirkaloy-2      | Zirkaloy-4 |
| Sn           | 1, 357          | 1, 0663    |
| Fe           | 0, 174          | 0, 1548    |
| Cr           | 0, 045          | 0, 0817    |
| Ni           | 0, 069          | -          |

Dalam kisaran konsentrasi di atas, unsur pemadu Sn mampu larut padat dalam bentuk fasa alpha dengan matrik Zr. Unsur Fe, Cr dan Ni mempunyai daya kelarutan rendah dalam matrik Zr dapat membentuk

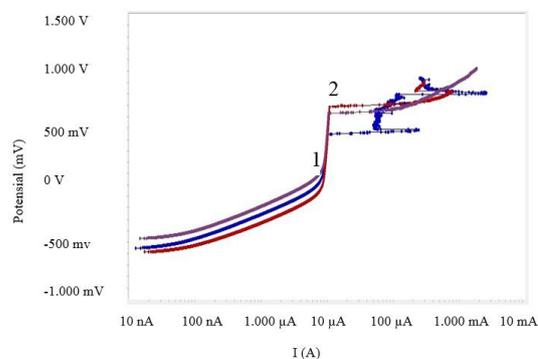
fasa beta dengan presipitat dalam ikatan  $Zr_2(Fe, Ni)$  dan  $Zr(Fe, Cr)_2$  dalam paduan zirkaloy-2 dan presipitat  $Zr(Fe, Cr)_2$  dalam paduan zirkaloy-4<sup>[9,10,11]</sup>. Besar ukuran dan distribusi presipitat dalam matrik Zr merupakan salah faktor yang berpengaruh pada laju korosi zirkaloy<sup>[12]</sup>. Hal ini disebabkan karena adanya presipitat pada batas butir dan akan menghasilkan perbedaan potensial dalam matrik Zr. Fenomena ini merupakan salah satu faktor pemicu untuk terjadinya korosi. Selain itu dimungkinkan juga terjadi sejumlah reaksi akibat adanya presipitat pada batas butir dan pengurangan pada unsur Zr, Sn, Ni, Fe dan Cr pada permukaan paduan tersebut.

Perilaku aktif-pasif zirkaloy dalam suatu media dapat diketahui dengan cara melakukan pengukuran potensiodinamik dengan memberikan potensial luar sekitar 1000 mV terhadap  $E_{corr}$  dan kecepatan *scanning* sebesar 1 mV dengan tujuan untuk mengetahui adanya korosi *pitting* pada lapisan film oksida oleh ion  $Cl^-$ . Hasil pengukuran potensiodinamik zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 ditunjukkan pada Gambar 4.

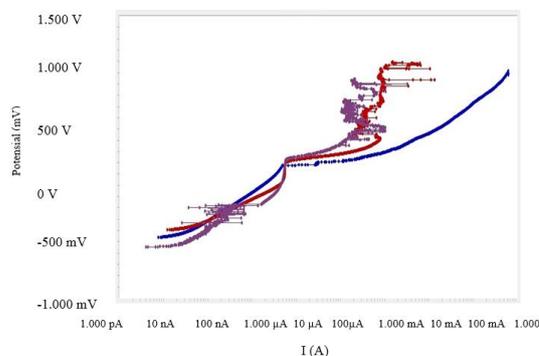
Gambar 4 menunjukkan bahwa hasil pengukuran potensiodinamik berupa kurva hubungan potensial (mV) dengan kerapatan arus (mA). Setelah terjadi reaksi reduksi – oksidasi, terbentuk daerah pasivasi, yang ditunjukkan oleh arus yang konstan pada kenaikan potensial. Rentang daerah pasivasi pada zirkaloy-2 cukup besar yaitu dimulai dari potensial 79,94 mV pada posisi 1 hingga 452,8 mV pada posisi 2, sedangkan rentang daerah pasivasi untuk zirkaloy-4 sangat kecil. Pembentukan lapisan pasif pada bahan zirkaloy-2 cukup stabil dibanding zirkaloy-4. Hal ini disebabkan oleh adanya unsur pemadu nikel (Ni) pada zirkaloy-2 yang dapat meningkatkan ketahanan korosi. Pustaka<sup>[13]</sup> menjelaskan pula bahwa penambahan unsur Ni ke dalam paduan zirkaloy dapat mendorong peningkatan ketahanan korosi.

Hal yang sama telah diperoleh oleh peneliti sebelumnya<sup>[2]</sup> bahwa penambahan

unsur Ni dapat meningkatkan ketahanan korosi khususnya terhadap korosi *nodular corrosion (un-uniform oxide thickness)*, namun dapat meningkatkan kecepatan penangkapan hidrogen.

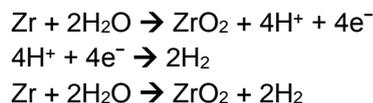


Gambar 4a. Kurva Potensio-dinamik zirkaloy-2



Gambar 4b. Kurva Potensio-dinamik zirkaloy-4

Pasivasi adalah hilangnya reaksi korosi akibat terbentuknya lapisan pasif,  $ZrO_2$  pada seluruh permukaan logam. Terbentuknya lapisan pasif  $ZrO_2$  menyebabkan meningkatnya ketahanan korosi<sup>[14]</sup>. Pada kondisi pasivasi arus korosi relatif tetap meskipun tegangan kerja dinaikkan. Fenomena pembentukan lapisan  $ZrO_2$ <sup>[7]</sup> mengikuti reaksi sebagai berikut:



Lapisan pasivasi dapat menghalangi terjadinya proses korosi lebih lanjut, namun dengan adanya peningkatan potensial sampai melampaui daerah pasivasi akan menyebabkan zirkaloy aktif kembali. Hal ini mengakibatkan lapisan pelindung  $ZrO_2$  rusak dan menyebabkan zirkaloy berinteraksi dengan ion  $Cl^-$  sebagai media. Fenomena

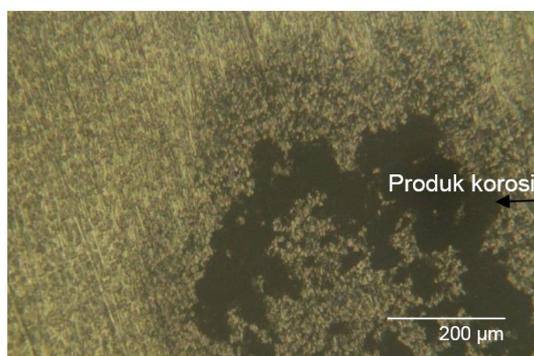
ini dikenal dengan korosi *pitting* (sumuran) dan dapat mulai terjadi pada potensial saat rapat arus mulai meningkat. Nilai  $E_{pitting}$  zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data potensial *pitting*,  $E_{pitting}$

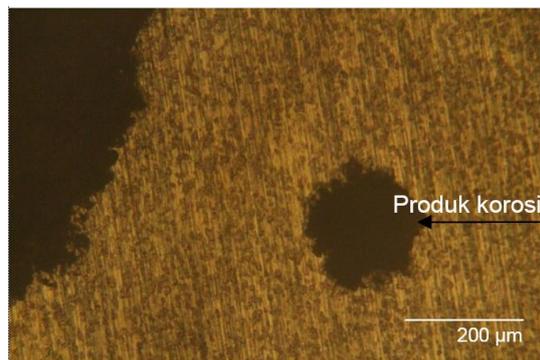
| Sampel     | $E_{pitting}$ (mV) |                |                |
|------------|--------------------|----------------|----------------|
|            | NaCl<br>3,5 %      | NaCl<br>0,35 % | NaCl<br>0,75 % |
| Zirkaloy-2 | 452,8              | 699,8          | 638,0          |
| Zirkaloy-4 | 182,8              | 211,9          | 234,7          |

Tabel 4 menunjukkan nilai  $E_{pitting}$  Zirkaloy-2 lebih tinggi dari  $E_{pitting}$  zirkaloy-4, hal ini menggambarkan bahwa ketahanan korosi zirkaloy-2 lebih baik dari pada zirkaloy-4 terhadap agresi ion  $Cl^-$ .

Morfologi permukaan zirkaloy-2 dan zirkaloy-4, yang telah mengalami proses korosi dengan metode potensiodinamik pada kisaran potensial  $\pm 1000$  mV terhadap  $E_{corr}$  ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil tersebut diperoleh dari pengamatan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200 kali. Gambar 5 menunjukkan bahwa korosi yang terjadi baik pada bahan zirkaloy-2 maupun zirkaloy-4 adalah jenis korosi *pitting*. Paduan zirkonium mempunyai potensi korosi *pitting* yang cukup besar, terutama akibat adanya ion agresif seperti ion  $Cl^-$ . Takafumi Motooka<sup>[1]</sup> menyatakan bahwa semakin tinggi kadar ion  $Cl^-$  maka potensial *pitting* makin rendah atau dengan kata lain bahan tersebut mudah mengalami korosi *pitting* pada konsentrasi ion  $Cl^-$  tinggi.



Gambar 5a. Morfologi permukaan zirkaloy-2



Gambar 5b. Morfologi permukaan zirkaloy-4

## SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya ion  $Cl^-$  pada daerah konsentrasi NaCl 0,175 % sampai dengan 3,5 % tidak mempengaruhi pola mekanisme korosi zirkaloy-2 maupun zirkaloy-4. Jenis korosi pada daerah potensial  $\pm 250$  mV terhadap  $E_{corr}$  adalah korosi merata dalam bentuk  $ZrO_2$ . Laju korosi zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 pada konsentrasi NaCl 3,5 % diperoleh masing-masing sebesar  $6,39 \times 10^{-3}$  dan  $7,40 \times 10^{-3}$  mpy. Fenomena korosi yang diamati dengan menggunakan teknik potensiodinamik ( $\pm 1000$  mV terhadap  $E_{corr}$ ) menunjukkan hasil bahwa zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 mengalami pasivasi dan korosi dengan jenis *pitting*. Potensial *pitting* zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 pada media NaCl 3,5 % diperoleh masing-masing sebesar -452,8 mV dan -182,8 mV.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Junaedy, Setia Permana, Ely Nurlaily dan Anditania Sari Dwi Putri yang telah membantu dalam kegiatan preparasi sampel dan uji korosi sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Takafumi Motooka, Atsushi Komatsu, Takashi Tsukada and Masahiro Yamamoto, (2014), *Pitting Potential of Zircaloy-2 In Artificial Seawater Under*

- Gamma-Ray Irradiation*, Japan Atomic Energy Agency 2-4, Electrochemical Society.
- [2] Peng Wang, (2011), *Corrosion Behaviour of Zirconium Alloys in High Temperature Aqueous Environment by Electrochemical Impedance Spectroscopy*, The University of Manchester, Faculty of Physical Engineering and Physical Sciences.
- [3] Donald A Palmer, Michael L.Machesky et al, (2008), *Adsorption of Ions on Zirconium Oxides Surfaces from Aqueous Solution at High Temperature*, Chemical Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory, USA).
- [4] Gopala Venkateswara, (1999), *Pitting Corrosion of Zircalloy-2 in Chloride Media at 318-343 K*, International Conference of Nuclear Engineering, Tokyo, ICODE-7066.
- [5] S.B. Farina, G.S. duffa JR, Galved, (2011), *Stress Corrosion Crack of Zircalloy-4 in Halide Solution Effect Temperature*, Mat.Res., Vol.5 No.2.
- [6] Dian A, Maman Kartaman, Rosika K, Yanlinastuti, (2014), Analisis Fenomena Korosi Paduan AlMg<sub>2</sub> dan AlMgSi Menggunakan Metoda elektrokimia, Urania, Jurnal ilmiah Bahan Bakar Nuklir, Vol 20, No 3, hal 136-139, ISSN 0852-4777.
- [7] Hassnaa Hussein Abd El-Halin Mohamed, (2014), *Electrochemical Behaviour of Some Metals of Technologycal Importance in Aqueous Solutions*, Departement of Chemistry, Faculty of Science, Fayoum.
- [8] Andreas Y., Aprianto Prasetyo, (2012), Korosi Aluminium dalam Asam Sitrat, Jurnal Teknik Kimia Indonesia, Vol 11 No.2.
- [9] Sofia Gustafson, (2011), *Corrosion Properties of Aluminum Alloys and Surface Threatened Alloys in Tap Water*, Uppsala Universited.
- [10] D. Pecheur, F. Lefebvre, AT Motta, C Lewigna, (1992), *Precipitate in Evolution in Zircalloy-4–Oxide Layer*, Journal of Nuclear Material, 189, 318-322.
- [11] Yuji Hatano and Masayasu Sugisaki, (1996), *Oxidation Behaviour of Iron and Nickel in Zr(Fe, Ni) Precipitate in Zircaloy-2*, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.33 No.11.
- [12] Badhri Narayana Lalgudi, (2012), *Experimental Evaluation of Oxide Growth in Binary Zirconium Alloy along with Pure Zirconium and Zircaloy-2 By Steam Corrosion Testing*, Master of Science Thesis, Departement Physics, Royal Institute of Technology, Sweden.
- [13] Nicole M. Treeman, (2005), *Electrochemical Study of Corrosion Phenomena in Zirconium Alloys*, Departement of Nuclear Engineerings, Massachusetts Institute of Technology.
- [14] Masrukan, Agoeng Kadarjono, (2009), Pengaruh Penambahan Unsur Zr Terhadap Pembentukan Fase Pasca Perlakuan Korosi Pada Bahan Bakar Paduan U-Zr, Jurnal Teknologi Bahan Nuklir, Volume 5 No. 2, Juni 2009, hal. 88. No ISSN : ISSN 1907–263582 /Akred- LIPI/P2MBI/5/2007.