

# Urania

## Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



### PENGARUH PENAMBAHAN LARUTAN $H_3BO_3$ DAN $LiOH$ TERHADAP PERILAKU KOROSI MATERIAL KELONGSONG ZIRCALOY-2 DALAM MEDIA AIR BEBAS MINERAL

Fajar Al Afghani<sup>1</sup>, Erwan Hermawan<sup>2</sup>, Anditania Sari Dwi Putri<sup>1</sup>, Ely Nurlaili<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN  
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314

<sup>2</sup>Direktorat Perumusan Kebijakan Riset, Teknologi, dan Inovasi – BRIN  
Gedung B.J. Habibie, Jl. M. H. Thamrin N0.8, DKI Jakarta 10340  
faja020@brin.go.id

(Naskah diterima: 10–01–2022, Naskah direvisi: 28–01–2022, Naskah disetujui: 10–02–2022)

#### ABSTRAK

**PENGARUH PENAMBAHAN LARUTAN  $H_3BO_3$  DAN  $LiOH$  TERHADAP PERILAKU KOROSI MATERIAL KELONGSONG ZIRCALOY-2 DALAM MEDIA AIR BEBAS MINERAL.** Pendingin primer pada reaktor tipe PHWR dikendalikan secara kimia dengan penambahan asam borat dan  $LiOH$  untuk mengantisipasi korosi pada kelongsong bahan bakar yang menggunakan material *zircaloy-2* (Zr-2.) Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan larutan  $H_3BO_3$  dan  $LiOH$  terhadap jenis dan laju korosi material kelongsong bahan bakar Zr-2 dalam media air bebas mineral. Penambahan bahan  $H_3BO_3$  dan  $LiOH$  pada pendingin reaktor PHWR adalah untuk pengendalian secara kimia. Uji korosi dilakukan pada temperatur kamar untuk menghilangkan pengaruh temperatur tinggi dan tekanan pada proses elektrokimia. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan laju korosi material Zr-2 di dalam media air bebas mineral dengan penambahan  $H_3BO_3$  dan  $LiOH$  dengan variasi konsentrasi. Hasil pengamatan, laju korosi Zr-2 menggunakan metode Tafel pada dalam media air bebas mineral dengan penambahan  $H_3BO_3$  pada konsentrasi 10 ppm, 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm dan 2000 ppm diperoleh laju korosi masing masing  $17,29 \times 10^{-3}$  mpy,  $18,51 \times 10^{-3}$  mpy,  $20,82 \times 10^{-3}$  mpy,  $22,71 \times 10^{-3}$  mpy dan  $23,29 \times 10^{-3}$  mpy. Setelah air bebas mineral, kemudian ditambahkan  $H_3BO_3$  sebesar 2000 ppm dan  $LiOH$  dengan konsentrasi 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm, 4 ppm. Hasil analisis menunjukkan bahwa dengan penambahan  $H_3BO_3$  dan  $LiOH$  diperoleh laju korosi semakin menurun secara berurutan yaitu  $22,71 \times 10^{-3}$  mpy,  $21,88 \times 10^{-3}$  mpy,  $21,41 \times 10^{-3}$  mpy,  $21,39 \times 10^{-3}$  mpy, dan penambahan  $LiOH$  5 ppm menyebabkan laju korosi meningkat menjadi  $21,45 \times 10^{-3}$  mpy. Hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa penambahan  $LiOH$  dan  $H_3BO_3$  berpengaruh terhadap laju korosi material *zircaloy-2* dalam media air bebas mineral. Semakin tinggi konsentrasi  $H_3BO_3$  yang ditambahkan menyebabkan laju korosi semakin meningkat, sedangkan dengan penambahan  $LiOH$  menyebabkan laju korosi semakin menurun hingga konsentrasi 4 ppm Namun dengan penambahan  $LiOH$  pada konsentrasi 5 ppm menyebabkan laju korosi meningkat sehingga dapat disimpulkan bahwa konsentrasi optimum penambahan  $LiOH$  adalah 4 ppm.

**Kata kunci:** *zircaloy-2*, laju korosi,  $H_3BO_3$ ,  $LiOH$ , kelongsong.

## **ABSTRACT**

**EFFECT OF  $H_3BO_3$  AND LiOH ON CORROSION BEHAVIOR OF ZIRCALOY-2 CLADDING IN DEMINERALIZED WATER.** *The primary coolant of the PHWR type reactor is controlled chemically by the addition of boric acid and LiOH to anticipate corrosion of the cladding material of Zr-2. This study aimed to analyze the effect of  $H_3BO_3$  and LiOH solutions on the type and rate of of zircaloy-2 (Zr-2) corrosion in demineralized water. The corrosion test was carried out at room temperature to eliminate the influence of high temperature and pressure on the electrochemical process. In this study, the corrosion rate of Zr-2 was observed in a demineralized water solution with varying concentrations of  $H_3BO_3$  and LiOH. The observation was done using Tafel method, where the addition of  $H_3BO_3$  at concentrations of 10 ppm, 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm and 2000 ppm resulted in corrosion rate of  $17.29 \times 10^{-3}$  mpy,  $18.51 \times 10^{-3}$  mpy,  $20.82 \times 10^{-3}$  mpy,  $22.71 \times 10^{-3}$  mpy and  $23.29 \times 10^{-3}$  mpy, respectively. The addition of 2000 ppm of  $H_3BO_3$  and LiOH with varied concentrations of 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm, 4 ppm results in decreasing of corrosion rate sequentially, namely  $22.71 \times 10^{-3}$  mpy,  $21.88 \times 10^{-3}$  mpy,  $21.41 \times 10^{-3}$  mpy,  $21.39 \times 10^{-3}$  mpy, whereas the addition of 5 ppm LiOH causes the corrosion rate to increase to  $21.45 \times 10^{-3}$  mpy. It can be concluded that the addition of LiOH and  $H_3BO_3$  affects the corrosion rate of zircaloy-2 in demineralized water. Higher concentration of  $H_3BO_3$  causes the corrosion rate to increase; meanwhile, the addition of LiOH causes the corrosion rate to decrease to a concentration of 4 ppm. However, the addition of LiOH at a concentration of 5 ppm causes the corrosion rate to increase.*

**Keywords:** zircaloy-2, corrosion rate,  $H_3BO_3$ , LiOH, cladding.

Pengaruh Penambahan Larutan  $H_3BO_3$  dan LiOH Terhadap Perilaku Korosi Material Kelongsong *Zircaloy-2* dalam Media Air Bebas Mineral (Fajar Al Afghani, Erwan Hermawan, Anditania Sari Dwi Putri, Ely Nurlaily)

## PENDAHULUAN

*Zircaloy-2* (Zr-2) adalah paduan logam yang terdiri dari metal *zirconium* sebagai komponen utama dengan beberapa unsur metal lainnya yaitu Sn, Fe dan Ni yang dapat digunakan sebagai bahan kelongsong elemen bakar nuklir[1–5]. *Zircaloy-2* dapat digunakan sebagai bahan kelongsong dan tutup ujung pada elemen bakar reaktor nuklir serta pipa pendingin primer untuk *Pressurized Heavy Water Reactor* (PHWR) karena memiliki kemampuan ketahanan terhadap korosi di kondisi air demineralisasi (demineral). *Zircaloy-2* yang digunakan sebagai kelongsong elemen bakar nuklir maupun pipa pendingin primer harus memenuhi standar *chemical grade* dan *nuclear grade* yaitu harus tahan korosi suhu tinggi dan tampang lintang serapan neutronnya rendah[6–7].

Pendingin primer pada reaktor tipe PHWR dikendalikan secara kimia dengan penambahan asam borat dan LiOH untuk mengantisipasi korosi pada kelongsong bahan bakar yang menggunakan material Zr-2. Boron dalam bentuk asam borat ditambahkan sebagai *chemical shim* untuk mengendalikan neutron. Asam borat menyebabkan penurunan pH air pendingin menjadi 6,8 – 6,9 [8–9] dan berdampak buruk terhadap integritas struktur dan keselamatan karena rentan terhadap korosi selama pengoperasian reaktor, sehingga perlu ditambahkan LiOH untuk menaikkan pH dengan rentang 7,3–7,4. Penelitian sebelumnya menyimpulkan bahwa penambahan LiOH yang berlebih dapat meningkatkan laju korosi pipa pendingin primer[10–11]. Reaksi kimia yang terjadi selama proses korosi dalam lingkungan air adalah  $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$ . Konsentrasi litium dalam pendingin biasanya berkisar dari 0,2 hingga 2,5 ppm ( $3 \times 10^{-5}$  hingga  $3 \times 10^{-4}$  molal LiOH[9]. Litium dapat mempengaruhi laju korosi paduan *zirconium*. Peningkatan konsentrasi litium hidroksida >50 hingga 100 ppm Li, menyebabkan laju korosi meningkat Hal tersebut di sebabkan karena ion  $Li^+$  menggeser struktur kristal *zirconium* sehingga menyebabkan pori membesar dan mudah untuk terjadi reaksi korosi pada permukaan Zr-2[10]. Oleh karena itu diperlukan optimalisasi penambahan LiOH sehingga tidak menaikkan karakteristik laju korosi untuk material pipa pendingin primer berbasis Zr-2.

Penelitian sebelumnya berupa kajian optimasi penambahan larutan LiOH menyimpulkan penambahan larutan LiOH di atas 2,2 ppm menaikkan laju korosi secara signifikan[12]. Namun belum dilakukan secara langsung di laboratorium. Selain itu telah dilakukan penelitian pengaruh penambahan Asam borat dengan rentang 50 – 4000 ppm terhadap korosi Zr-2 dengan hasil semakin tinggi konsentrasi asam borat maka akan semakin meningkatkan laju korosi Zr-2 pada temperatur 25 °C[11,13]. Namun penelitian tersebut belum menambahkan kombinasi dengan penambahan lithium hidroksida sesuai dengan rentang yang ada di kimia air PHWR. Oleh karena itu, Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan larutan  $H_3BO_3$  dan LiOH terhadap jenis dan laju korosi material kelongsong bahan bakar paduan *zirconium*, yaitu Zr-2 dalam media air bebas mineral sehingga dapat menentukan dosis optimum penambahan Lithium hidroksida.

## METODOLOGI

Spesimen Zr-2 yang telah disiapkan dengan komposisi kimia seperti pada Tabel 1 dipotong dengan ketebalan 5 mm. Spesimen hasil pemotongan selanjutnya *dimounting* dengan resin epoxy di dalam pipa dengan diameter  $\frac{3}{4}$  in dan dihubungkan dengan kabel sehingga arus dapat mencapai spesimen. Permukaan spesimen dipreparasi metalografi meliputi pengampelasan menggunakan kertas SiC dengan grit 500, 800, dan 1200 secara bertahap. Setelah itu spesimen dibersihkan menggunakan air bebas mineral dan etanol, kemudian dikeringkan menggunakan *dryer*.

Tabel 1. Komposisi major dari *zircaloy-2*

Unsur	berat (%)
Zr	95,5
Sn	1.2-1.7
Fe	0.07-0.20
Cr	0.05-0.15
Ni	0.03-0.08

Sebelum dilakukan pengujian korosi, spesimen dikarakterisasi menggunakan difraktometer sinar-X (*Empyrean-Panalytical*) dengan radiasi Co K $\alpha$ . Sampel Zr-2 dipindai dalam rentang  $2\theta$  dari 20°-80° dengan kecepatan pemindaian 0,20°/s untuk mengetahui fasa yang terbentuk sebelum dan setelah korosi, kemudian analisis dilanjutkan

dengan penggunaan mikroskop optik untuk mengidentifikasi jenis korosi yang terbentuk.

Perilaku korosi dievaluasi dengan uji elektrokimia: metode pengukuran polarisasi potensi dinamik (PDP) dan spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS) menggunakan potensiostat Gamry (Referensi 600). Pengukuran dilakukan pada masing-masing kombinasi larutan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Pengujian elektrokimia terhadap spesimen Zr-2 dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 2. Variasi penambahan larutan  $H_3BO_3$  dan ion  $Li^+$  pada  $LiOH$

Komposisi Larutan	Penambah larutan	
	$H_3BO_3$ (ppm)	ion $Li^+$ (ppm)
Air Demineralisasi 100 mL	0	0
	10	0
	100	0
	500	0
	1000	0
	2000	0
	2000	1
	2000	2
	2000	3
	2000	4
2000	5	



Gambar 1. Pengujian elektrokimia spesimen Zr-2

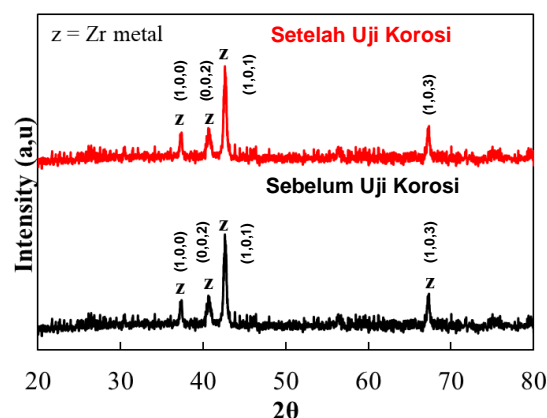
Skema pengujian elektrokimia, sel korosi dirangkai pada labu leher 5 menggunakan 3 elektroda, yaitu elektroda kerja (sampel), elektroda referensi (elektroda kalomel jenuh), dan elektroda lawan (grafit). Pengukuran potensi dinamik dilakukan pada rentang tegangan  $-0,4$  V hingga  $-0,9$  V pada laju pemindaian  $5$  mV/s. Pengukuran EIS dilakukan pada rentang frekuensi  $0,2 - 10000$  Hz dan tahanan AC  $10$  mV rms.

Hasil uji elektrokimia kemudian dievaluasi dan dianalisis menggunakan software *Gamry E-Chem EIS300* dan melalui Tafel fit sehingga diperoleh hasil laju korosi (*corrosion rate*).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### a. Identifikasi fasa dan mikrostruktur

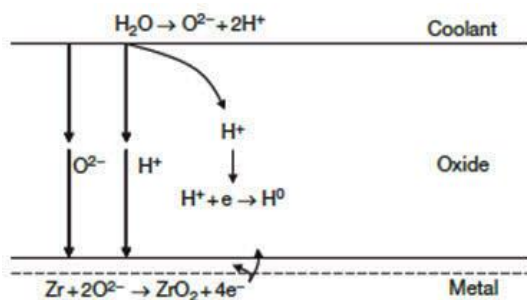
Hasil identifikasi fasa menggunakan software *match* sebelum dan setelah pengujian korosi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Identifikasi fasa spesimen Zr-2 sebelum dan sesudah uji korosi

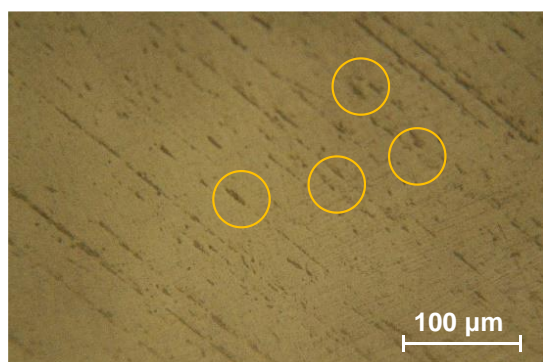
Analisis XRD menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan fasa setelah dilakukan uji korosi pada material Zr-2. Fasa paling dominan yang ada pada paduan Zr-2 adalah fasa logam *zirconium*. Hal ini sekaligus memverifikasi komposisi kimia Zr-2 yang terdapat pada Tabel 1 yaitu persentase logam *zirconium* sebesar  $95,5\%$  adalah unsur paling dominan pada paduan Zr-2. Waktu yang singkat saat pengujian korosi mempengaruhi senyawa logam *zirconium* sehingga tidak terjadi perubahan fasa. Selain itu, mekanisme reaksi korosi yang terjadi antara ion  $Li^+$  dengan paduan *zirconium* karena kekosongan anion dalam oksida yang disebabkan oleh substitusi *zirconium* oleh litium dalam kisi *zirconium*[14]. Mekanisme pertumbuhan kristal yang dimodifikasi dan diinduksi oleh pembentukan gugus O-Li permukaan menghambat pertumbuhan diametris dan kolumnar dari kristal oksida[5]. Kristal oksida tersebut mempercepat proses korosi *zirconium* menjadi  $ZrO_2$  karena konsentrasi oksigen yang terperangkap di kisi kristal *zirconium* meningkat. Mekanisme reaksi korosi Zr-2 sebagai berikut seperti pada gambar 3.

Pengaruh Penambahan Larutan H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> dan LiOH Terhadap Perilaku Korosi Material Kelongsong *Zircaloy-2* dalam Media Air Bebas Mineral (Fajar Al Afghani, Erwan Hermawan, Anditania Sari Dwi Putri, Ely Nurlaily)



Gambar 3. Mekanisme reaksi korosi Zr-2

Hasil analisis mikrostruktur Zr-2 menggunakan mikroskop optik setelah dilakukan pengujian korosi dalam media air bebas mineral yang ditambahkan asam borat sebesar 2000 ppm dan LiOH sebesar 5 ppm ditunjukkan pada Gambar 4.



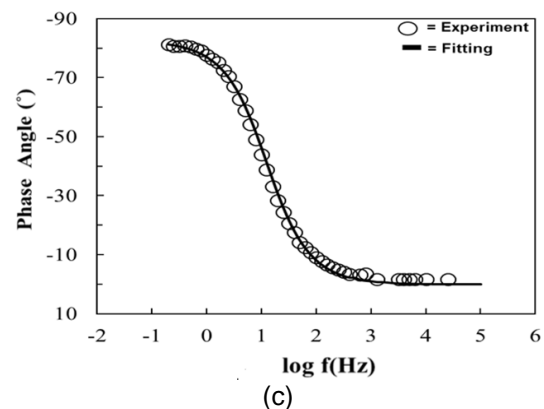
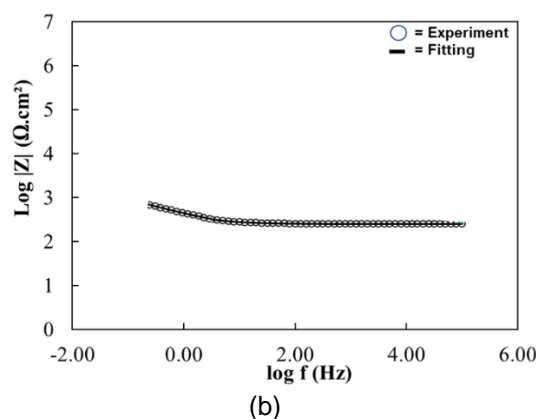
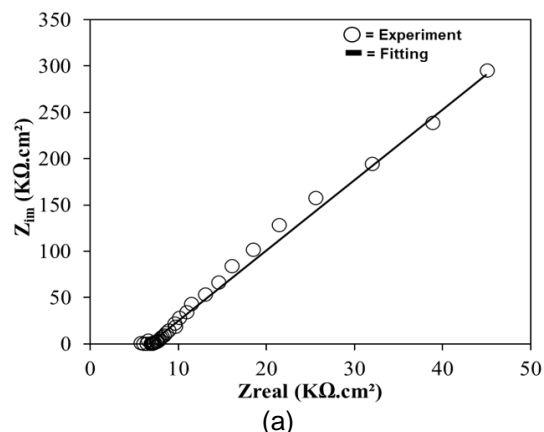
○ = Produk Korosi ZrO<sub>2</sub>

Gambar 4. Mikrostruktur Zr-2 setelah uji korosi pada media air bebas mineral.

Gambar 4 menunjukkan terdapat produk korosi yang menyebar pada permukaan spesimen Zr-2. Hal ini mengindikasikan bahwa jenis korosi yang terjadi pada paduan Zr-2 adalah korosi seragam. Hasil ini berbeda dengan yang didapatkan oleh Kandil yang mana terjadi korosi *pitting* pada paduan *zirconium* yaitu Zr-4[15]. Korosi seragam yang terjadi pada Zr-2 disebabkan karena *compactness* atau kepadatan unsur *zirconium* pada paduan Zr-2 yang tinggi[16].

**b. Evaluasi Elektrokimia**

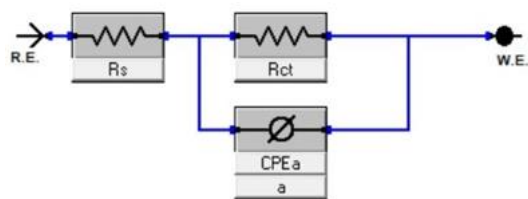
Hasil analisis korosi dengan *electrochemical impedance spectroscopy (EIS)* diperoleh 3 kurva yaitu kurva Nyquist, bode magnitude dan sudut fasa seperti ditunjukkan pada Gambar 5.a hingga 5.c.



Gambar 5. Plot Nyquist (a); bode magnitude (b) dan bode phase (c)

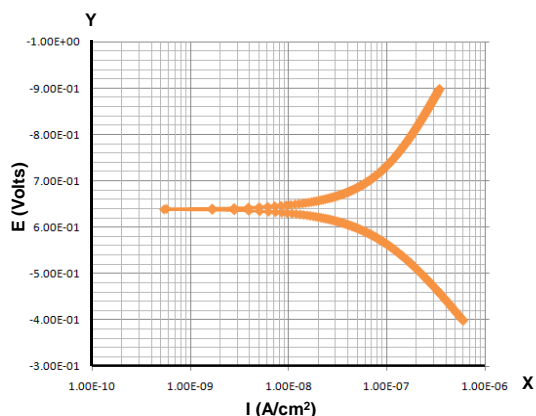
Gambar 5 (a), (b), dan (c) menunjukkan kurva nyquist, bode impedansi, dan bode sudut fasa spesimen Zr-2 pada media air bebas mineral dengan penambahan 2000 ppm asam borat dan 5 ppm ion Li+. Kurva terdiri dari 2 jenis data, yaitu data eksperimen berupa data titik dan data fitting yang berupa garis. Gambar 5(a) adalah kurva Nyquist berbentuk linier yang menunjukkan fenomena kapasitif dengan adanya tetapan tertentu yang disebut *Constant Phase element (CPE)*. Hasil *fitting*

menunjukkan model dengan CPE bukan kapasitor *faraday* (Cf) dikarenakan permukaan yang tidak rata. Gambar 5(b) adalah kurva bode impedansi menunjukkan impedansi total terhadap frekuensi. Gambar 5(c) adalah kurva bode sudut fasa menjelaskan sudut antara data-data pada kurva nyquist dengan sumbu Z<sub>real</sub>=0, yang menunjukkan sifat kapasitif/induktif suatu lapisan. Jika berada di antara sudut 0 < θ ≤ -90° maka sifat lapisan pada frekuensi tersebut semakin kapasitif dan jika berada di antara sudut 0 < θ ≤ 90° maka semakin induktif. Kurva bode phase menunjukkan bahwa Zr-2 terdapat puncak di sudut 0° pada frekuensi tinggi, yang menunjukkan adanya sifat induktif atau peristiwa korosi. Hasil kurva yang didapat lebih lanjut dilakukan *fitting* sehingga diperoleh model elektrokimia yang ekuivalen seperti pada Gambar 6.

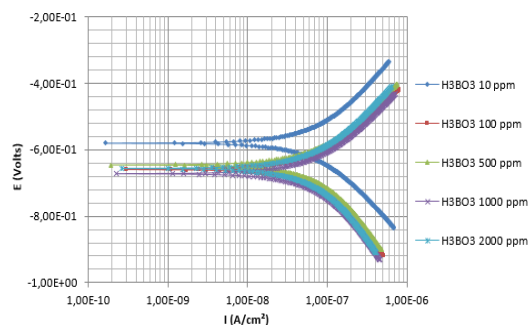


Gambar 6. Model rangkaian ekuivalen Zr-2

Hasil yang didapatkan dari pengujian polarisasi potensiodinamik berupa potensial (V) dan densitas arus (A/cm<sup>2</sup>). Gambar 7 adalah hasil pengujian polarisasi potensiodinamik *zircaloy-2* pada larutan air bebas mineral tanpa penambahan H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> dan Gambar 8 adalah *zircaloy-2* pada larutan air bebas mineral dengan konsentrasi penambahan H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> yang berbeda.

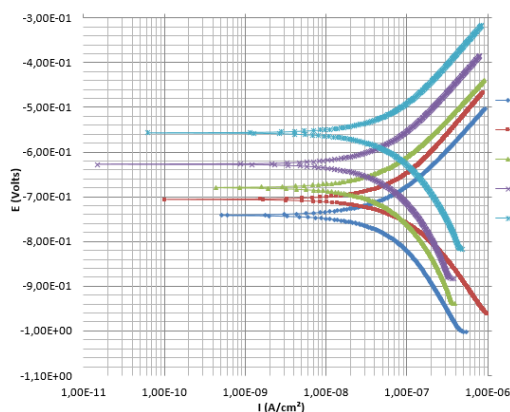


Gambar 7. Kurva polarisasi potensiodinamik Zr-2 dalam media air bebas mineral



Gambar 8. Kurva polarisasi potensiodinamik Zr-2 dalam air bebas mineral dengan penambahan H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> berbagai konsentrasi.

Reaksi kimia yang terjadi selama proses korosi dalam lingkungan air adalah  $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$ . Pada Gambar. 7 dapat dilihat bahwa dengan rentang variasi yang lebar diperoleh pengukuran laju korosi dengan peningkatan yang tidak signifikan. Hal ini disebabkan selama korosi *zircaloy-2* berlangsung dalam media air, lapisan *oxide film* melindungi paduan *zirconium* dari lingkungan. Setelah penambahan H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 2000 ppm, larutan air bebas mineral ditambahkan lagi dengan LiOH 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm, 4 ppm dan 5 ppm sehingga didapat kurva polarisasi potensiodinamik seperti pada Gambar 9.



Gambar 9. Kurva polarisasi potensiodinamik *Zircaloy-2* dalam air bebas mineral + H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 2000 ppm dan variasi LiOH

Setelah grafik Tafel terbentuk maka dapat menentukan laju korosi dengan pengeplotan terhadap grafik menggunakan aplikasi *Gamry Echem Analyst*. Besarnya laju korosi *zircaloy-2* variasi penambahan larutan H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> dan ion Li<sup>+</sup> ditunjukkan pada Tabel 3. Dari hasil laju korosi tersebut diketahui bahwa

Pengaruh Penambahan Larutan  $H_3BO_3$  dan LiOH Terhadap Perilaku Korosi Material Kelongsong *Zircaloy-2* dalam Media Air Bebas Mineral (Fajar Al Afghani, Erwan Hermawan, Anditania Sari Dwi Putri, Ely Nurlaily)

peningkatan konsentrasi LiOH dapat menurunkan laju korosi pada *Zircaloy-2*. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan ion Litium pada larutan LiOH dapat menurunkan resiko korosi, tetapi pada konsentrasi di atas 4 ppm resiko korosi akan meningkat. Pada konsentrasi LiOH 1-4 ppm ion  $Li^+$  berfungsi untuk menghalangi oksigen bereaksi dengan logam *zirconium*, namun setelah melewati 4 ppm  $Li^+$  bereaksi dengan ion  $O^{2-}$  membentuk ikatan O-Li yang akan merusak atau menyebabkan korosi terhadap logam *zirconium*[3,16].

Tabel 3. Data laju korosi *zircaloy-2* dengan variasi larutan.

Larutan	Penambah larutan		Laju Korosi ( $10^{-3}$ mpy)
	$H_3BO_3$ (ppm)	ion $Li^+$ (ppm)	
Air Demineral 100 mL	0	0	15,03
	10	0	17,29
	100	0	18,51
	500	0	20,82
	1000	0	22,71
	2000	0	23,29
	2000	1	22,71
	2000	2	21,88
	2000	3	21,41
	2000	4	21,39

## KESIMPULAN

Hasil mikrostruktur dan identifikasi spektrum XRD menunjukkan bahwa jenis korosi yang terjadi pada material kelongsong Zr-2 adalah korosi merata. Penambahan  $H_3BO_3$  berpengaruh terhadap karakteristik korosi material kelongsong *zircaloy-2* dalam air bebas mineral. Laju korosi *zircaloy-2* semakin meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi  $H_3BO_3$  dan dapat menurunkan laju korosi dengan penambahan ion Litium dengan konsentrasi 1-4 ppm dalam lingkungan air bebas mineral, namun laju korosi meningkat dengan penambahan ion Litium di atas 4 ppm sehingga disimpulkan konsentrasi optimum penambahan ion Litium adalah 4 ppm.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada Kepala Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif yang telah memfasilitasi penelitian ini melalui dana DIPA tahun Anggaran 2021.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Charit, "Accident tolerant nuclear fuels and cladding materials," *JOM*, vol. 70, no. 2, pp. 173–175, Feb. 2018, doi: 10.1007/s11837-017-2701-3.
- [2] Y. Wouters and L. Latu-Romain, "Corrosion in pressurized water," in *Encyclopedia of Interfacial Chemistry*, Elsevier, 2018, pp. 155–163. doi: 10.1016/B978-0-12-409547-2.13875-2.
- [3] A. T. Motta, A. Couet, and R. J. Comstock, "Corrosion of *zirconium* alloys used for nuclear fuel cladding," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 45, no. 1, pp. 311–343, Jul. 2015, doi: 10.1146/annurev-matsci-070214-020951.
- [4] Q. Auzoux *et al.*, "Hydride reorientation and its impact on ambient temperature mechanical properties of high burn-up irradiated and unirradiated recrystallized *Zircaloy-2* nuclear fuel cladding with an inner liner," *J. Nucl. Mater.*, vol. 494, pp. 114–126, 2017, doi: 10.1016/j.jnucmat.2017.07.022.
- [5] Y. Nemoto *et al.*, "Investigation of *zircaloy-2* oxidation model for SFP accident analysis," *J. Nucl. Mater.*, vol. 488, pp. 22–32, May 2017, doi: 10.1016/j.jnucmat.2017.03.004.
- [6] K. A. Kane, S. K. Lee, S. B. Bell, N. R. Brown, and B. A. Pint, "Burst behavior of nuclear grade FeCrAl and *Zircaloy-2* fuel cladding under simulated cyclic dryout conditions," *J. Nucl. Mater.*, vol. 539, p. 152256, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jnucmat.2020.152256.
- [7] L. Xu, Y. Xiao, A. van Sandwijk, Q. Xu, and Y. Yang, "Production of nuclear grade *zirconium*: A review," *J. Nucl. Mater.*, vol. 466, pp. 21–28, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jnucmat.2015.07.010.
- [8] S. Meng, Y. Yan, Y. Hu, Y. Hu, and T. Ruan, "Research of thermal hydraulic conditions effect on PWR CIPS risk," *Front. Energy Res.*, vol. 10, p. 823872, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.823872.
- [9] G. R. Sunaryo, "Boric acid radiolysis in primary coolant water of PWR at temperature of 250°C," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 19, no. 1, p. 11, 2017, doi: 10.17146/jpen.2017.19.1.3192.
- [10] S. Xie *et al.*, "The Distribution of Li ions in the oxide film formed on *zircaloy-4* corroded in lithiated water at 633 K," *Materials*, vol. 13, no. 4, p. 873, Feb. 2020, doi: 10.3390/ma13040873.

- [11] A. F. Waheed, A. Kame, and H. M. Hamed, "Effect of acidic and alkaline solutions on electrochemical corrosion of zircaloy-2," *Int. J. Adv. Sci. Tech. Res.*, vol. 6, no. 8, 2018, doi: 10.26808/rs.st.i8v6.01.
- [12] S. L. Butarbutar and G. R. Sunaryo, "Kajian terhadap pengaruh penambahan LiOH pada PWSCC komponen bejana tekan reaktor," in *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah – Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, Jul. 2011, p. 5.
- [13] A. F. Waheed, A.-H. Kandil, and H. Hamed, "Electrochemical corrosion of Zircaloy-2 under PWR water chemistry but at room temperature," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 94, pp. 168–174, 2016, doi: 10.1016/j.anucene.2016.02.030.
- [14] Febrianto, "Pengaruh asam borat dan lithium hidroksida terhadap korosi inconel 690tt sebagai tube pembangkit uap PWR," in *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2014*, Pontianak, pp. 475–480.
- [15] A. H. Kandil, A. A. F. Waheed, and H. M. T. Tawfik, "Water chemistry effect on corrosion of nuclear fuel cladding material, zircaloy-4 (Zr-4)," *Int J Adv Res*, vol. 2, no. 4, pp. 149–162, 2014.
- [16] G. Jiang, D. Xu, W. Yang, L. Liu, S. Guo, and S. Wang, "Incipient corrosion of FeCrAl alloys in  $H_3BO_3$ - and LiOH-containing pure water at 360 °C and 18.5 MPa," *J. Nucl. Mater.*, vol. 557, p. 153299, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jnucmat.2021.153299.