

---

## ANALISIS KOROSI PADUAN ZIRLO-Mo DALAM MEDIA NaCl MENGUNAKAN METODE POLARISASI

Maman Kartaman Ajiriyanto, Dian Anggraini, Rosika Kriswarini  
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN  
Kawasan Puspiptek Serpong Gd.20, Tangerang Selatan, Banten 15314  
e-mail: makar@batan.go.id

(Naskah diterima: 13-09-2017, Naskah direvisi: 25-10-2017, Naskah Disetujui: 27-10-2017)

### ABSTRAK

**ANALISIS KOROSI PADUAN ZIRLO-Mo DALAM MEDIA NaCl MENGGUNAKAN METODE POLARISASI.** Paduan zirlo-Mo merupakan jenis paduan logam zirkonium yang dapat dikembangkan menjadi bahan kelongsong reaktor pendingin air ringan. Parameter penting yang harus diketahui sebagai bahan kelongsong adalah sifat ketahanan korosi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui ketahanan korosi paduan zirlo-Mo dalam media NaCl dengan variasi konsentrasi 0,03; 0,3 dan 3 % dan dibandingkan dengan ketahanan korosi paduan zircaloy-2 dan *zircaloy-4* pada media yang sama. Sampel uji dibuat berbentuk disk kemudian dimounting dan dipreparasi metalografi meliputi pengamplasan menggunakan kertas SiC dengan ukuran 500 sampai 1200 grit secara bertahap. Laju korosi zirlo-Mo dianalisis menggunakan metode polarisasi menggunakan alat Potensiostat. Keunggulan metode tahanan polarisasi adalah waktu pengujian korosi relatif lebih cepat dibandingkan dengan metode perubahan berat, selain itu metode ini dapat menentukan laju korosi yang sangat rendah yaitu kurang dari 0,1 mpy. Pengujian lain yang dilakukan untuk mendukung analisis laju korosi adalah pengujian kekerasan mikro dengan *Microhardness Tester* dan pengamatan mikrostruktur menggunakan Mikroskop optik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa paduan zirlo-Mo, zircaloy-2 dan zircaloy-4 secara keseluruhan memiliki laju korosi sangat rendah yaitu kurang dari 1 mpy. Laju korosi paduan zircaloy-2 dan zircaloy-4 dan zirlo-Mo pada media NaCl 3 % berturut-turut adalah 0,006; 0,007 and 0,590 mpy. Laju korosi paduan zirlo-Mo adalah relatif paling tinggi, hal ini disebabkan karena paduan zirlo-Mo mempunyai struktur *lath martensit* atau *accicular* yang memiliki kekerasan tinggi. Struktur *lath martensit* dan kekerasan tinggi sangat rentan terhadap korosi. Nilai kekerasan paduan zircaloy-2, zircaloy-4 dan zirlo-Mo berturut-turut adalah 194,79; 227,95 and 360,05 HV. Adanya larutan padat Mo dan matrik Zr- $\alpha$  serta struktur *martensite* atau *accicular* pada paduan zirlo-Mo mengakibatkan kekerasan paduan menjadi tinggi.

**Kata kunci:** laju korosi, tahanan polarisasi, paduan zirlo-Mo, mikrostruktur, kekerasan mikro

## **ABSTRACT**

**CORROSION ANALYSIS OF ZIRLO-Mo IN NaCl MEDIUM BY POLARIZATION METHOD.** *Zirlo-Mo is a zirconium type of alloy, which is developed as cladding material for light water reactor. As cladding material, the important parameter to be characterized is its corrosion resistance properties. The goal of this research is to study the corrosion resistance of zirlo-Mo in NaCl medium with varied concentration of 0,03; 0,3; and 3 %, and compare it to the those of zircaloy-2 dan zircaloy-4 in the same medium. Samples were mounted into disk form and metallographically prepared, i.e. treatment with abrassive paper of 500 to 1200 grit SiC. The analysis of zirlo-Mo corrosion rate was performed by polarization method with a potentiostat. The advantage of this polarization resistance method is that it takes shorter testing time if compared to weight gain method, and it can be applied to analysis at low corrossion rate of below 0,1 mpy. Other tests were also done to support the corrosion rate analysis such as microhardness test with microhardness tester and microstructure examination with optical microscope. The tests results show that in general zirlo-Mo, zircaloy-2 and zircaloy-4 possess very low corrossion rate, i.e. below 1 mpy. The corrosion rate of zircaloy-2, zircaloy-4 and zirlo-Mo in NaCl 3 % medium are 0,006; 0,007 and 0,590 mpy respectively. The corrosion rate of zirlo-Mo is relatively the highest due to its lath martensit or accicular structure, which has high hardness value. The lath martensit structure and high hardness properties make zirlo-Mo highly susceptible to corrosion. Hardness test results show that the hardness value of zircaloy-2, zircaloy-4 and zirlo-Mo are 194,79; 227,95 and 360,05 HV respectively. The existance of solid solution of Mo and Zr- $\alpha$  as well as the martensit or accicular structure of zirlo-Mo result in high hardness value of the alloy.*

**Keywords:** *corrosion rate, polarization method, Zirlo-Mo alloy.*

## PENDAHULUAN

Paduan zirkonium telah banyak digunakan sebagai bahan struktur untuk bahan bakar nuklir jenis *Light Water Reactor*, (LWR), *Pressurized Water Reactor* (PWR) dan untuk *Boiling Water Reactor* (BWR). Pemilihan zirkonium memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai kelongsong bahan bakar karena mempunyai serapan neutron rendah, sifat mekanik memadai dan ketahanan korosi relatif baik pada temperatur tinggi[1]. Logam zirkonium sangat reaktif dan memiliki potensial bebas -1,53 Volt terhadap standar hidrogen (SHE) pada temperatur 25 °C[2]. Selain itu, zirkonium memiliki afinitas terhadap oksigen sangat tinggi sehingga pada lingkungan yang mengandung oksigen dapat membentuk lapisan pasif yang sangat protektif dan dapat melindungi dari serangan korosi dan mekanik. Lapisan tersebut tahan hingga temperatur 3500 °C. Pada reaktor jenis LWR dan PWR, *zircaloy* digunakan sebagai tabung kelongsong bahan bakar nuklir dengan temperatur kelongsong 349 °C, untuk BWR hingga temperatur 390 °C[3]. PWR adalah suatu reaktor pembangkit tenaga listrik yang memiliki bejana tekan dengan tekanan hingga 16 Mpa. Temperatur *inlet* dan *outlet* pada air pendingin adalah 290 °C dan 325 °C. Tekanan tinggi dari bejana diatur dengan *pressurizer* sehingga air pendingin dalam reaktor masih dalam fasa cair atau tidak mendidih. Sementara itu, reaktor tipe BWR hanya memiliki pendingin primer dengan tekanan lebih rendah yaitu sekitar 7 MPa. Pada tekanan tersebut air pendingin dapat menguap atau mendidih dan selanjutnya uap tersebut digunakan sebagai penggerak turbin. Temperatur *inlet* dan *outlet* reaktor BWR adalah 215 °C dan 285 °C, sehingga paduan *zircaloy-4* yang digunakan harus memiliki sifat mekanis, ketahanan korosi dan neutronik yang baik[4]. *Zircaloy-4* yang digunakan sebagai bahan kelongsong selama berada dalam kondisi operasi reaktor nuklir berpotensi

mengalami penurunan sifat mekanik yang disebabkan oleh oksidasi atau korosi, penyerapan hidrogen dan pengaruh iradiasi neutron. Upaya yang dilakukan untuk meningkatkan ketahanan dan integritas bahan kelongsong terus dilakukan guna mengantisipasi peningkatan *burn up* (derajat bahan bakar) selama iradiasi didalam reaktor. Peningkatan derajat bakar bahan bakar sampai 60000 MWD/TU dan temperatur operasi PWR yang tinggi menyebabkan lapisan oksida yang terbentuk sangat tebal sekitar 130 mikron pada kelongsong *zircaloy*, sehingga harus dilakukan penggantian bahan bakar (*refueling*) sebelum bahan bakar tersebut mencapai derajat bakar yang diinginkan[5].

Penelitian terkait karakterisasi korosi untuk bahan kelongsong sudah banyak dilakukan baik sifat korosi berdasarkan perubahan berat menggunakan *autoclave* pada temperatur dan tekanan tinggi maupun menggunakan teknik elektrokimia pada temperatur dan tekanan normal. Peneliti Yuant Tiandho, dkk mengatakan bahwa salah satu kandidat material kelongsong yang saat ini dikembangkan adalah zirlo-Mo yaitu paduan berbasis zirkonium dengan unsur pepadu utama seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia dari paduan Zirlo-Mo[6]

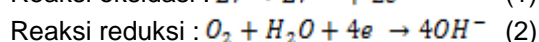
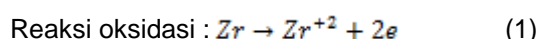
Unsur	Konsentrasi (% berat)
Niobium	1,0
Timah putih	1,0
Besi	0,2
Mo	0 – 1
Zirkonium	<i>base utama</i>

Dari berbagai pustaka diketahui bahwa paduan zirlo mempunyai beberapa keunggulan antara lain mempunyai laju korosi rendah, sifat *creep* pada kondisi iradiasi baik, daya tahan mekanik baik pada kondisi derajat bakar tinggi. Zirlo juga

mempunyai ketahanan korosi tinggi dalam lingkungan air dengan lithium[7]. Pengujian korosi menggunakan *autoclave* pada temperatur 360 °C dan tekanan 10 bar menunjukkan hasil bahwa paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb memiliki ketahanan oksidasi paling baik (pertambahan berat paling kecil) dibandingkan dengan zircaloy-4 konvensional dan paduan berbasis zirkonium yang lain. Paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu mempunyai ketahanan oksidasi yang relatif sama dengan paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb[8]. Pengujian korosi dalam media NaCl dengan konsentrasi 0,17-3,5 % menghasilkan arus korosi paduan zircaloy-2 dan zircaloy-4 sangat kecil yaitu kurang dari 1 mpy (*mile per years*)[9].

Paduan zirlo-Mo merupakan kandidat yang dapat digunakan sebagai bahan kelongsong reaktor jenis LWR. Usaha untuk meningkatkan sifat mekaniknya perlu dilakukan modifikasi komposisi atau pengembangan dengan cara menambahkan unsur Mo ke dalam bahan tersebut[10].

Analisis korosi paduan zirkonium dengan metode Tafel atau elektrokimia lainnya dapat dilakukan lebih cepat dibanding metode perubahan berat. Modifikasi jenis paduan atau unsur pepadu yang dilakukan seperti pada paduan Zirlo-Mo dapat dianalisis perilaku korosinya dengan metode Tafel sebelum dilakukan penelitian lebih lanjut menggunakan *autoclave* pada temperatur dan tekanan tinggi. Paduan zirkonium termasuk paduan zirlo-Mo ketika berada dalam medium air akan mengalami reaksi akibat interaksi dengan lingkungannya. Reaksi yang terjadi adalah reaksi oksidasi dan reduksi dengan mengikuti persamaan (1) dan (2) sebagai berikut[11].



Sifat korosi paduan termasuk bahan zirlo-Mo merupakan persyaratan utama yang harus dipenuhi sebagai bahan

kelongsong reaktor pendingin air ringan. Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk menganalisis ketahanan korosi bahan adalah dengan metode elektrokimia. Pengujian korosi elektrokimia dapat dilakukan dengan teknik tahanan polarisasi dan Tafel. Metode tahanan polarisasi adalah metode uji korosi adalah tidak merusak karena menggunakan rentang potensial rendah yang dilakukan pada potensial -25 mV sampai +25 mV terhadap potensial korosi bebas ( $E_{\text{ocp}}$ ), sedangkan untuk metode Tafel adalah metode uji korosi dengan cara merusak karena dilakukan pada rentang potensial -250 mV sampai 250 mV terhadap potensial bebas ( $E_{\text{ocp}}$ ). Hasil pengujian uji korosi menggunakan metode Tafel diperoleh hubungan antara potensial dengan rapat arus ( $I_{\text{corr}}$ ,  $\mu\text{A}$ ), kemudian rapat arus tersebut dievaluasi menjadi besaran laju korosi (CR, mpy).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan korosi zirlo-Mo, *zircaloy-2* dan *zircaloy-4* serta zirkonium murni menggunakan metode Tafel atau elektrokimia. Metode Tafel memiliki keunggulan karena pengukurannya lebih cepat dibanding metode perubahan berat. Penggunaan metode Tafel juga dapat menentukan laju korosi secara kualitatif maupun kuantitatif. Jenis korosi yang terjadi pada logam dan paduannya seperti korosi merata, korosi batas butir, korosi celah dan korosi sumuran dapat diidentifikasi melalui pengujian korosi elektrokimia. Keunggulan lain dari metode ini adalah dapat mengukur laju korosi suatu logam yang memiliki ketahanan korosi sangat rendah (<0,1 mpy), dimana dengan metode perubahan berat relatif sulit untuk menentukan laju korosi yang sangat rendah.

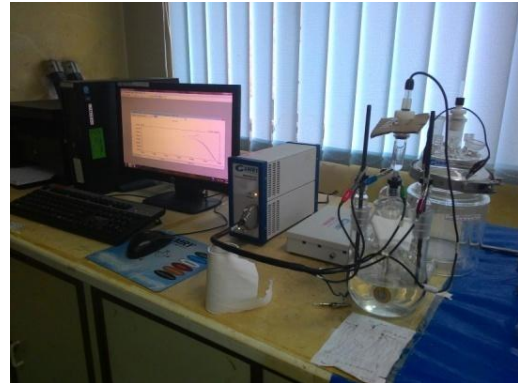
## METODOLOGI

Bahan yang digunakan adalah paduan zirkonium yaitu zirlo-Mo (*as-cast*), *zircaloy-2* dan *zircaloy-4* serta zirkonium murni. Paduan zirlo-Mo dibuat dengan

peleburan berulang sebanyak 3 kali menggunakan busur listrik, hal ini dilakukan untuk mendapatkan komposisi kimia ingot zirlo-Mo yang homogen. Ingot zirlo-Mo kemudian dirol dengan tingkat pengerolan tertentu untuk mengetahui pengaruh deformasi terhadap perilaku korosi zirlo-Mo pada media air. Perilaku korosi paduan zirlo-Mo dibandingkan dengan paduan *zircaloy-2* dan *zircaloy-4*. Paduan zirlo-Mo hasil peleburan (*as-cast*), zirlo-Mo hasil perolan (*as-rolled*), *zircaloy-2* dan *zircaloy-4* (*as-recieved*) dipreparasi menjadi spesimen uji korosi berbentuk disk dengan ketebalan 3 mm menggunakan alat potong minitom. Sampel berbentuk *disc* kemudian disambung dengan kawat tembaga agar terkoneksi dengan aliran listrik. Sampel uji dimounting sehingga permukaan sampel kontak dengan larutan media NaCl, kemudian dipreparasi metalografi meliputi pengamplasan menggunakan kertas SiC dengan ukuran amplas 500 sampai 1200 grit secara bertahap.

Uji korosi dilakukan dengan menggunakan metode polarisasi Tafel pada rentang tegangan antara -250 mV sampai dengan 250 mV dengan *scanning rate* sekitar 0,5–1 mV/s dalam media larutan NaCl dengan variasi konsentrasi 3 %, 0,3 %, dan 0,03 % menggunakan *Potensiostat reference* 600. Sel korosi terdiri dari sel tiga elektroda masing-masing elektroda kerja (sampel), elektroda standar (*saturated calomel electrode*) dan elektroda pembanding (grafit). Sel korosi dan alat uji

korosi elektrokimia tersusun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sel uji korosi metode tahanan polarisasi/elektrokimia

Hasil uji korosi kemudian dievaluasi dan dianalisis menggunakan *software* Gamry E-Chem DC 105 sehingga diperoleh arus korosi ( $I_{corr}$ ,  $\mu\text{Amper}$ ) dan laju korosi (CR) dengan satuan *mile per years* (mpy). Pengujian lain yang dilakukan untuk mendukung hasil uji korosi adalah pengujian komposisi kimia secara kualitatif menggunakan XRF, uji kekerasan mikro dengan *microhardness*, dan pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### a. Analisis komposisi kimia

Hasil analisis kimia *zirconium* murni, *zircaloy-2*, *zircaloy-4* dan paduan zirlo-Mo secara kualitatif menggunakan XRF diperoleh unsur unsur pepaduan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi unsur pepaduan dalam paduan secara kualitatif

Sampel uji	Intensitas				
	Fe	Sn	Ni	Nb	Mo
Zirkonium murni	632	466	321	-	-
Zircaloy-2	1009	1982	846	-	-
Zircaloy-4	1481	2039	-	-	-
Zirlo-Mo	6638	1195	321	23021	64

Hasil analisis komposisi kimia diketahui bahwa paduan zirlo-Mo selain mengandung unsur Fe, Sn dan Ni, juga mengandung

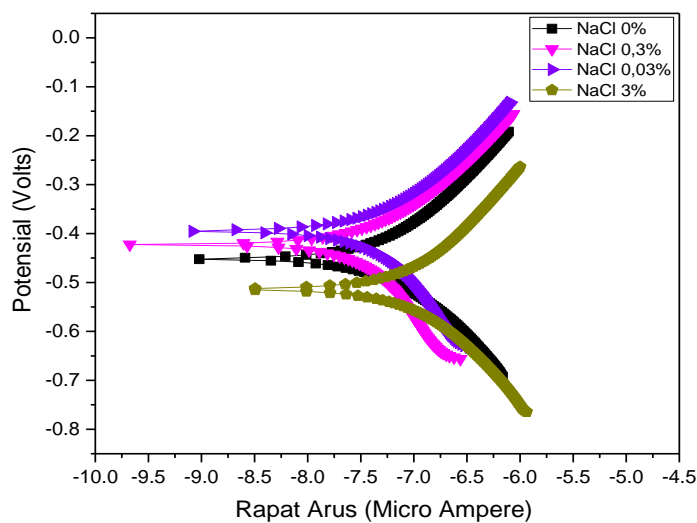
unsur Nb dan Mo. Adanya unsur Nb dan Mo dalam paduan zirlo-Mo bertujuan untuk meningkatkan kekuatan mekanik dengan

mekanisme penghalusan butir dan juga meningkatkan ketahanan korosi pada suhu tinggi.

### b. Analisis uji korosi

Hasil uji korosi menggunakan Potensiostat diperoleh kurva polarisasi anodik-katodik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 sampai dengan 6. Dari Gambar 2 diketahui bahwa pada rentang potensial dibawah  $E_{ocp}$  mulai dari -250 mV sampai potensial korosi bebasnya ( $E_{ocp}$ ) terjadi reaksi reduksi dengan adanya penurunan rapat arus, sedangkan pada rentang potensial bebas hingga +250 mV terjadi reaksi oksidasi yang ditandai dengan kenaikan rapat arus korosi. Bertambahnya konsentrasi NaCl menghasilkan kurva polarisasi bergeser ke arah kanan atau ke

arah rapat arus tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa rapat arus yang tinggi berbanding lurus dengan laju korosi yang tinggi. Sementara itu, meningkatnya konsentrasi NaCl sebagai media dari 0,03 % menjadi 3 % menyebabkan laju korosi juga semakin meningkat, hal ini disebabkan meningkatnya konsentrasi NaCl menyebabkan ion  $Cl^-$  menjadi lebih besar sehingga larutan menjadi reaktif dan mudah terkorosi. Pada scan tegangan dibawah  $E_{ocp}$  terjadi reaksi reduksi yang menunjukkan bahwa semakin tinggi tegangan menyebabkan arus korosi menurun dan ketika potensial dinaikkan hingga diatas  $E_{ocp}$  arus korosi meningkat yang memperlihatkan terjadinya mekanisme oksidasi pada permukaan bahan seperti yang terjadi pada Gambar 2.

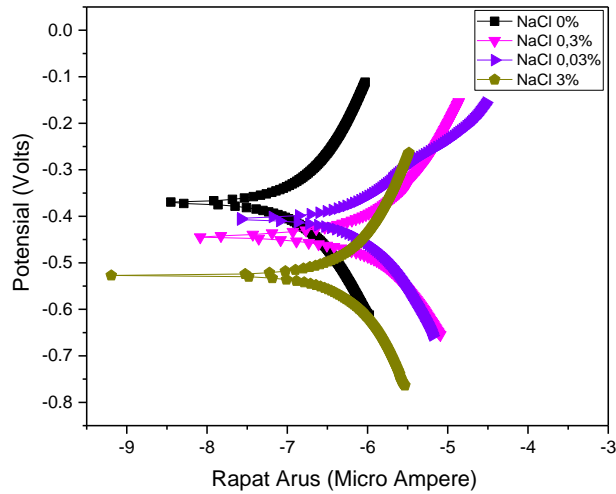


Gambar 2. Kurva polarisasi Tafel zirkonium murni dalam larutan variasi konsentrasi NaCl.

Kurva polarisasi sampel Zr murni pada media NaCl 3 % bergeser ke arah bawah dan kanan. Fenomena ini menunjukkan laju korosi sampel Zr murni pada larutan tersebut diperoleh paling besar yaitu 0,09 mpy. Hal ini dimungkinkan karena pada konsentrasi NaCl 3% paduan *zircaloy* yang terlarut semakin besar dan juga adanya ion  $Cl^-$  yang tinggi mudah merusak lapisan

oksida ( $ZrO_2$ ) yang terbentuk pada permukaan[11].

Gambar 3 memperlihatkan kurva polarisasi paduan zirkon-molibdenum dalam media NaCl pada berbagai konsentrasi. Bentuk kurva polarisasi relatif sama dengan Gambar 2 yaitu terjadinya mekanisme reduksi dan oksidasi pada permukaan sampel.

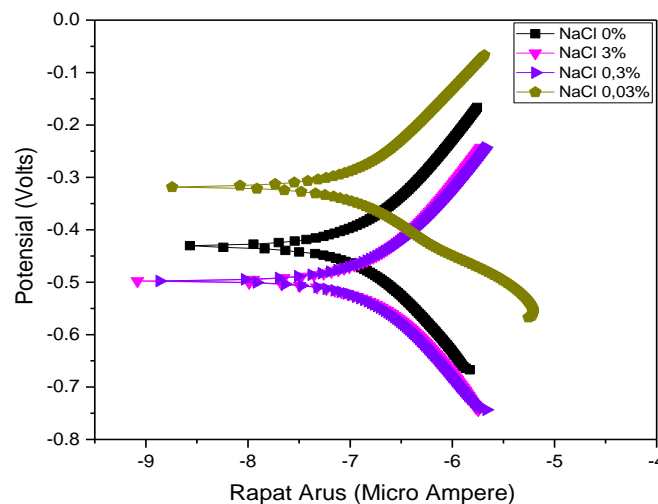


Gambar 3. Kurva polarisasi Tafel paduan zirlo-Mo dalam larutan NaCl variasi konsentrasi

Gambar 3 menunjukkan bahwa laju korosi semakin tinggi apabila konsentrasi NaCl semakin tinggi, pada konsentrasi NaCl 3 % laju korosinya mencapai 0,590 mpy seperti yang dirangkum pada Tabel 3. Hal ini disebabkan karena konsentrasi NaCl makin tinggi maka kemampuan larutan dalam melarutkan paduan zirlo-Mo juga semakin tinggi. Pembentukan lapisan oksida pada permukaan paduan ingot zirlo-Mo mudah terlepas dengan adanya ion Cl<sup>-</sup> terutama pada konsentrasi NaCl 3 %. Hasil ini didukung oleh penelitian lain yang menyatakan bahwa laju korosi paduan zirlo-

Mo dalam media air jenuh pada temperatur 300 °C terjadi pembentukan lapisan oksida pada zirkonium menyebabkan penurunan laju korosi pada rentang waktu selama 24 jam hingga 36 jam, namun pada waktu 48 jam terjadi peningkatan laju korosi yang diakibatkan pecahnya lapisan oksida yang terbentuk[12].

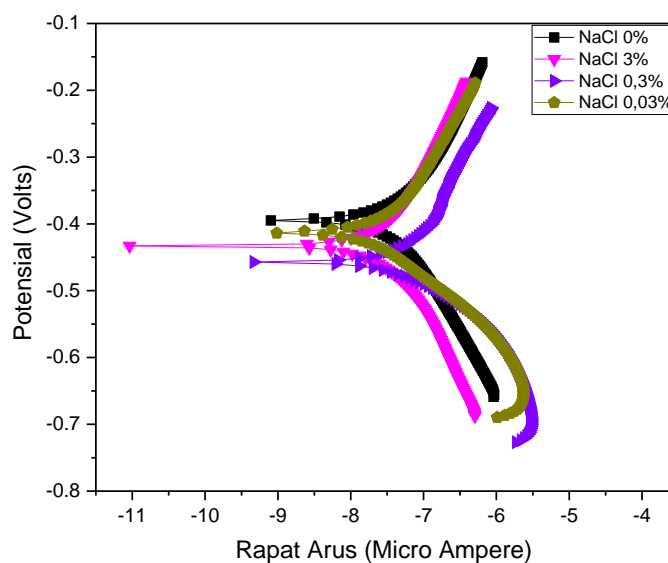
Gambar 4 merupakan kurva polarisasi *zircaloy-2* terhadap rapat arus pada media NaCl dengan konsentrasi 0; 0,03; 0,3 dan 3 %. Laju korosi *zircaloy-2* menunjukkan kecenderungan yang sama seperti pada logam Zr murni dan zirlo-Mo.



Gambar 4. Kurva polarisasi Tafel paduan *zircaloy-2* dalam larutan NaCl variasi konsentrasi

Gambar 4 menunjukkan bahwa konsentrasi NaCl semakin tinggi menyebabkan laju korosi semakin tinggi. Hal disebabkan karena pada konsentrasi NaCl tinggi logam yang terlarut juga makin besar. Namun, pada paduan *zircaloy-2* perubahan laju korosi tidak signifikan seperti yang terjadi pada logam zirkonium murni dan zirlo-Mo. Pada *zircaloy-2* terdapat unsur Ni yang lebih besar yang menyebabkan lebih

sulit larut dalam NaCl sehingga laju korosi relatif rendah. Laju korosi *zircaloy-2* pada berbagai konsentrasi NaCl 0; 0,03; 0,3 dan 3 % diperoleh berturut-turut sebesar 0,004; 0,004; 0,006 dan 0,006 mpy seperti terlihat pada Tabel 3. Data laju korosi yang diperoleh dapat dinyatakan bahwa variasi konsentrasi NaCl sebagai media tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap laju korosi *zircaloy-2*.



Gambar 5. Kurva polarisasi Tafel paduan *zircaloy-4* dalam larutan NaCl variasi konsentrasi

Kurva polarisasi paduan *zircaloy-4* pada media NaCl dengan variasi konsentrasi 0; 0,03; 0,3 dan 3% seperti yang terlihat pada Gambar 5. Laju korosi *zircaloy-4* diperoleh berturut-turut sebesar 0,009; 0,005; 0,009 dan 0,007 mpy dan mekanisme korosi yang terjadi pada *zircaloy-4* relatif sama dengan *zircaloy-2*. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi konsentrasi NaCl tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap laju korosi *zircaloy-4*. Konsentrasi NaCl hingga 3 % belum mampu merusak lapisan oksida  $ZrO_2$  yang berperan sebagai barrier antara logam dengan lingkungannya pada permukaan *zircaloy-4*.

Fenomena korosi yang terjadi pada zirkonium murni; zirlo-Mo, *zircaloy-2* dan *zircaloy-4* dalam media NaCl variasi

konsentrasi 0; 0,03; 0,3 dan 3% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, 3, 4, 5 kemudian dievaluasi dan dituangkan pada Tabel 3.

Tabel 3 menunjukkan bahwa laju korosi zirkonium murni, zirlo-Mo, *zircaloy-2* dan *zircaloy-4* dalam media NaCl dengan konsentrasi 3% diperoleh hasil bahwa paduan *zircaloy-2* mempunyai laju korosi paling rendah. Paduan zirlo-Mo mempunyai laju korosi paling tinggi bila dibandingkan dengan zirkonium murni, *zircaloy-2* dan *zircaloy-4* dengan laju korosi berturut-turut sebesar 0,006; 0,007 dan 0,590 mpy. Tingginya laju korosi paduan zirlo-Mo dimungkinkan karena kondisi perlakuan yang berbeda dengan zirkonium murni, *zircaloy-2* dan *zircaloy-4*. Paduan zirlo-Mo



yang digunakan sebagai sampel uji korosi pada penelitian dibuat melalui proses peleburan menjadi ingot zirlo-Mo (*as-cast*), sedangkan penggunaan zircaloy-2 dan zircaloy-4 bentuk *tube* dalam kondisi

*annealed*. Fenomena proses ini memberikan dampak berbeda terhadap ketahanan korosi, karena ketahanan korosi sampel *as-cast* lebih tinggi dibanding kondisi *annealed*.

Table 3. Laju korosi paduan *zircaloy* dalam NaCl konsentrasi 0-3% dengan metode Tafel

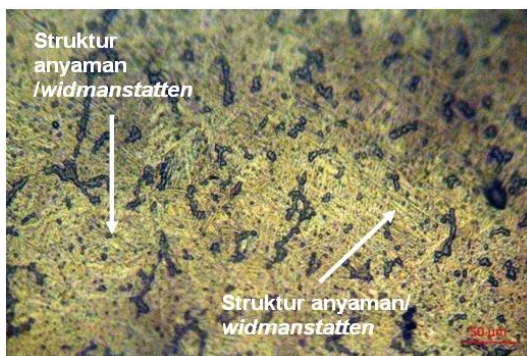
No.	Jenis Sampel	Media uji korosi	Tafel	
			I corr ( $\mu$ A)	CR (mpy)
1	Zr murni	Aquades	0,0598	0,0018
		NaCl 3%	0,1310	0,0932
		NaCl 0,3%	0,0736	0,0524
		NaCl 0,03%	0,0618	0,0440
2	Zirlo-Mo	Aquades	0,3140	0,1933
		NaCl 3%	0,9600	0,5903
		NaCl 0,3%	0,2960	0,1819
		NaCl 0,03%	0,8650	0,5320
3	<i>Zircaloy-2</i>	Aquades	0,1640	0,0049
		NaCl 3%	0,2020	0,0061
		NaCl 0,3%	0,2000	0,0060
		NaCl 0,03%	0,1560	0,0047
4	<i>Zircaloy-4</i>	Aquades	0,0629	0,0091
		NaCl 3%	0,0491	0,0071
		NaCl 0,3%	0,0680	0,0099
		NaCl 0,03%	0,0347	0,0050

Sementara itu, adanya perbedaan komposisi kimia pada sampel zirlo-Mo, Zr-2 dan Zr-4 tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan laju korosi dibanding pengaruh kondisi perlakuan. Sampel zirlo-Mo kondisi ingot mempunyai struktur relatif tidak homogen dan adanya tegangan sisa akibat solidifikasi sehingga ketahanan korosinya lebih rendah. Sementara itu, pada sampel zircaloy-2 dan zircaloy-4 dalam kondisi *annealed* mempunyai struktur lebih homogen dan bebas tegangan sisa sehingga ketahanan korosinya lebih baik. Hal ini didukung oleh hasil penelitian lainnya yang menggunakan *autoclave* pada temperatur dan tekanan tinggi menunjukkan bahwa penambahan unsur Mo hingga 0,5% dapat meningkatkan laju korosi[10].

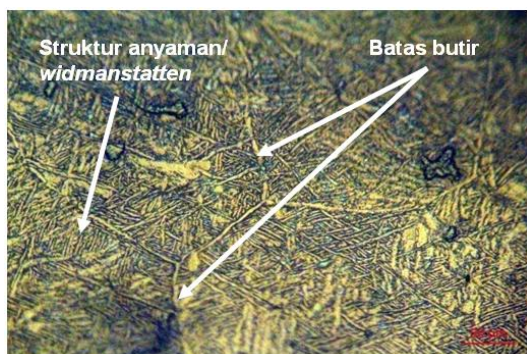
### c. Analisis mikrostruktur

Hasil uji korosi paduan zirlo-Mo didukung oleh data mikrostruktur. Data pengamatan mikrostruktur paduan zirlo-Mo (*as-cast*) ditunjukkan pada Gambar 6 dan mikrostruktur paduan zirlo-Mo (*as-rolled*) ditunjukkan pada Gambar 7. Gambar 6 terlihat bahwa secara umum mikrostruktur paduan zirlo-Mo mempunyai struktur *lath martensite* yang keras. Transformasi struktur dari fasa  $\beta$  ke fasa  $\alpha$  menghasilkan dua struktur yaitu struktur martensit dan *widmanstatten*. Struktur martensit diperoleh jika kecepatan pendinginan lebih besar dari 1700 °C/s dan terbentuk melalui mekanisme geser. Ciri khas dari struktur tersebut adalah bentuknya *accicular* dan metastabil. Pada paduan zirlo-Mo hasil peleburan atau *as-cast* dan hasil pengerolan terlihat struktur

jarum-jarum. Struktur yang ada adalah struktur *accicular* atau jarum-jarum seperti ditunjukkan dengan tanda panah pada Gambar 6. Sampel hasil pengerolan yang ditunjukkan pada Gambar 7 mempunyai struktur relatif sama yaitu struktur *accicular* dengan ukuran lebih besar. Analisis mikrostruktur juga menghasilkan struktur berbentuk *Widmanstätten* pada ingot ingot paduan zirlo-Mo yaitu pola mikrostruktur berupa anyaman yang disebut *lamellar*[13]. Bentuk dan ukuran mikrostruktur ini mempengaruhi sifat kekerasan paduan dan juga berpotensi mempengaruhi ketahanan korosi.



Gambar 6. Mikrostruktur Zirlo-Mo (*as-cast*) dengan perbesaran 250 kali

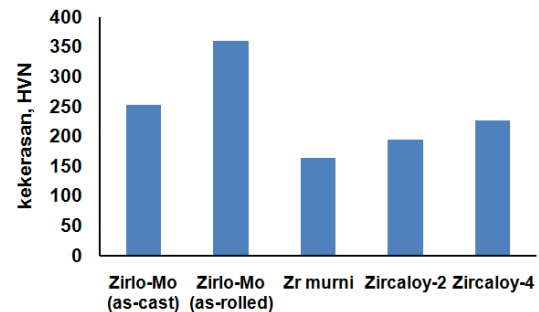


Gambar 7. Mikrostruktur paduan zirlo-Mo (*as-rolled*) dengan perbesaran 250 kali.

#### d. Analisis kekerasan mikro

Analisis kekerasan mikro paduan berbasis zirkonium dilakukan menggunakan uji kekerasan Vickers dengan beban indentasi 100 gF, dan waktu indentasi 10-15

detik. Hasil uji kekerasan mikro paduan zirlo-Mo (*as-cast*), zirlo-Mo (*as-rolled*), *zircaloy-2* dan *zircaloy-4* ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kekerasan mikro beberapa jenis paduan *zircaloy*

Kekerasan paduan zirlo-Mo (*as-rolled*) diperoleh paling tinggi dibandingkan dengan paduan lainnya. Hal ini disebabkan karena keberadaan unsur Mo yang larut padat pada kisi kristal matriks, selain itu unsur Mo juga berperan sebagai penghalus butir. Struktur berbutir yang halus memiliki kekerasan tinggi. Tingginya kekerasan paduan zirlo-Mo sesuai dengan mikrostruktur yang dihasilkan yaitu struktur *lath martensite* yang keras. Pada paduan zirlo-Mo yang telah mengalami pengerolan menghasilkan kekerasan paling tinggi yaitu 360,05 HV. Hal ini disebabkan karena adanya *strain hardening* akibat pengerolan. Mekanisme penguatan pada bahan diantaranya adalah larutan padat dengan substitusi atau intertisi dan juga terbentuknya fasa kedua atau presipitat  $ZrMo_2$ [14]. Mekanisme ini terjadi pada bahan paduan *zircaloy-2* dan *zircaloy-4* dimana unsur-unsur pepadunya seperti Sn, Fe, Cr dan Ni membentuk larutan padat, senyawa intermetalik dan fasa kedua yang dapat meningkatkan nilai kekerasan paduan. Sementara itu, pada zirkonium murni tidak mengalami mekanisme seperti itu sehingga mempunyai nilai kekerasan paling kecil yaitu sekitar 163,49 HV. Sifat mikrostruktur dan kekerasan paduan sangat berpengaruh kepada laju korosi. Paduan zirlo-Mo yang dibuat dengan proses peleburan busur listrik menghasilkan struktur martensit atau

*accicular* dan mempunyai nilai kekerasan relatif tinggi sehingga menghasilkan laju korosi lebih tinggi dibanding paduan zircaloy-2 dan zircaloy-4. Struktur martensit merupakan struktur sangat keras dan menghasikan tegangan sisa akibat terjadinya transformasi fasa  $\beta$  ke  $\alpha$ , sedangkan paduan zircaloy-2 dan zircaloy-4 mempunyai struktur ekuiaksial yang memiliki kekerasan relatif lebih rendah[1].

## SIMPULAN

Metode polarisasi Tafel dapat digunakan untuk menentukan perilaku korosi paduan zircaloy dalam media NaCl dengan konsentrasi 0-3 %. Laju korosi paduan zircaloy-2, zircaloy-4 dan zirlo-Mo pada NaCl 3 % diperoleh berturut-turut sebesar 0,006; 0,007 dan 0,590 mpy. Paduan zirlo-Mo memiliki laju korosi paling tinggi karena kondisi perlakuan pada zirlo-Mo berbeda dengan sampel Zr-2 dan Zr-4. Sampel zirlo-Mo dalam kondisi *as-cast* dan *rolled* sedangkan sampel Zr-2 dan Zr-4 dalam kondisi *annealed* sehingga berpengaruh kepada ketahanan korosinya. Paduan zirlo-Mo mempunyai mikrostruktur *accicular* atau *lath martensite* yang keras dan cenderung rentan terhadap korosi dengan kekerasan mencapai 253,97 HV untuk kondisi *as-cast* dan 360,05 HV untuk kondisi *as-rolled*. Deformasi pada saat proses pengerolan mengakibatkan terjadinya proses pengerasan regangan atau *strain hardening* sehingga kekerasan zirlo-Mo kondisi *as-rolled* diperoleh paling tinggi dibanding jenis paduan yang lainnya termasuk zirlo-Mo kondisi *as-cast*. Komposisi kimia, karakter mikrostruktur dan kekerasan dari paduan Zr-Mo sangat mempengaruhi laju korosi Zr.

## SARAN

Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruh komposisi kimia paduan zirkonium terhadap laju korosi dengan kondisi sampel yang sama dengan homogenitas yang lebih baik. Selain itu,

perlu dilakukan analisis karakteristik lapisan pasif pada permukaan paduan zirkonium menggunakan teknik potensiodinamik atau *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS). Metode tersebut dapat menentukan kecenderungan paduan terhadap korosi pitting dan juga dapat menentukan ketahanan lapisan pasif  $ZrO_2$  yang terbentuk

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Bpk. Purwidi Kasino Putro sebagai penanggung jawab kegiatan DIPA 2016, serta ucapan terimakasih juga disampaikan kepada Ibu. Yanlinastuti, Setia Permana, Junaedi dan Yatno Dwi Agus Susanto, yang telah membantu dalam peleburan sampel, penyiapan larutan uji, preparasi metalografi, dan pengamatan mikrostruktur sehingga penelitian ini dapat berjalan lancar. Selain itu juga penulis ucapkan banyak terima kasih kepada Anditania Sari Dwi Putri dan Ely Nurlaily yang telah membantu pengujian korosi dengan metode polarisasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Pshenichnikov, J. Stuckert, M. Walter, "Microstructure and mechanical properties of *Zircaloy-4* cladding hydrogenated at temperatures typical for loss of coolant accident (LOCA) conditions. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 283, pp. 33-39, 2015.
- [2] P. Wang, "Corrosion behaviour of zirconium alloys in high temperature aqueous environment by electrochemical impedance spectroscopy," *dissertation*, University of Manchester, 2011.
- [3] Sugondo and A. Chaidir, Effect of annealed temperature on type and size second phase precipitate of Zr-1% Nb-1% Sn-1% Fe Alloys. *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, vol. 5, no. 1, 2013.

- 
- [4] NA. Type of Reactors. [cited 2017 october 17]; Available from: <http://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/reactor-types/>.
- [5] B. Cox, "Degradation of zirconium alloys in water-cooled nuclear reactors," *Proceedings of the Third International Symposium On Environmental Degradation of Materials In Nuclear Power Systems*, 1988.
- [6] H.H. Kim, J.H. Kim, J.Y. Moon, H.S Lee, J.J. Kim, Y.S. Chai, "High temperature oxidation behavior of Zircaloy-4 and zirlo in steam ambient. *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 26, no.9, pp. 827-832. 2010.
- [7] Sugondo, "Increasing Corrosion Resistance Zircaloy-4 Through Tin, Copper and Niobium Alloying". *Journal Teknologi Bahan Nuklir*, vol. 7, no. 1, 2011.
- [8] D. Anggraini, M.K. Ajiriyanto, R. Kriswarini, Yanlinastuti, "Fenomena korosi zirkaloy-2 dan zirkaloy-4 dalam medialarutan NaCl secara elektrokimia," *Jurnal Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 21 , no. 3, hal. 95 – 159, 2016.
- [9] J. Lee and S. Hwang, "Effect of Mo addition on the corrosion resistance of Zr-based alloy in water containing LiOH. *Journal of Nuclear Materials*, vol.321, no.2, pp. 238-248, 2003.
- [10] A.T. Motta, A. Couet, R.J. Comstock, "Corrosion of zirconium alloys used for nuclear fuel cladding," *Annual Review of Materials Research*, vol. 45, no. 1, pp. 311-343, 2015.
- [11] Sungkono, "Pengaruh kandungan Fe dan Mo terhadap ketahanan korosi ilngot paduan Zirlo-Mo dalam media uap air jenuh," *Jurnal Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 17, no. 3, pp.116 – 181, 2011.
- [12] Futichah, dkk., "Analisis mikrostruktur dan kekerasan ingot Zr-1%Sn-(0,1%;1%)Fe-1%Nb-(X%)Mo dengan variasi Mo," *Jurnal Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 20, no. 2, 2014.
- [13] H. Yang, J. Shen, Y. Matsukawa, Y. Satoh, S. Kano, Y.Li, *et al.*, "Effects of alloying elements (Sn, Nb, Cr, and Mo) on the mcrostructure and mechanical properties of zirconium alloys," *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 52, no. 9, pp. 1162-1173, 2015.