

PENINGKATAN KETAHANAN KOROSI ZIRCALOY-4 MELALUI PEMADU TIMAH, TEMBAGA DAN NIOBIUM

Sugondo

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN
Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten
e-mail: sugondo@batan.go.id
(Diterima 20-4-2011, disetujui 27-06-2011)

ABSTRAK

PENINGKATAN KETAHANAN KOROSI ZIRCALOY-4 MELALUI PEMADU TIMAH, TEMBAGA DAN NIOBIUM. Penelitian ini bertujuan untuk: pertama mengetahui pengaruh Sn terhadap mikrostruktur, kekerasan, dan ketahanan terhadap korosi Zircaloy-4; kedua mengetahui pengaruh substitusi Sn dengan Cu, dan penambahan Nb terhadap mikrostruktur, kekerasan dan ketahanan terhadap korosi Zircaloy-4. Ingot dibuat dengan tungku busur listrik dalam kondisi gas argon. Spesimen dianil pada suhu 1050 °C (daerah β) dalam atmosfer gas argon selama 30 menit kemudian dicelup cepat ke dalam air (pencelupan cepat- β / β -*quenching*). Setelah itu, penganilan dilakukan pada suhu 720 °C selama 90 menit dalam atmosfer gas argon untuk mengurangi kekerasan spesimen agar tidak terjadi kerusakan pada mesin rol pada saat pengerolan, kemudian dilanjutkan dengan pengerolan dingin 10% pada suhu 300 °C. Penganilan akhir dilakukan pada suhu 700 °C selama 60 menit dalam atmosfer gas argon. Diperoleh hasil sebagai berikut: Penambahan Cu sebanyak 0,1% lebih dari cukup untuk menggantikan penurunan kekerasan akibat penurunan Sn dari 1,5 menjadi 0%. Sementara, penambahan Nb menyebabkan penurunan kekerasan. Ketahanan korosi Zircaloy-4 dapat ditingkatkan melalui substitusi Sn dengan Cu serta penambahan Nb, dengan sifat mekanik (kekerasan) yang sama. Komposisi paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb memiliki kekerasan dan ketahanan terhadap oksidasi optimum.

KATA KUNCI: korosi, zircaloy-4, pepadu timah, pepadu niobium, pepadu tembaga, anil, celup cepat, pengerolan, Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb, presipitat, kekerasan mikro, struktur mikro.

ABSTRACT

INCREASING CORROSION RESISTANCE ZIRCALOY-4 THROUGH TIN, COPPER AND NIOBIUM ALLOYING. *The objectives of this research are (1) to know the effect of Sn on microstructure, hardness, and corrosion resistance of Zircaloy-4, and (2) to know the effect of substitution of Sn with Cu, and addition of Nb on microstructure, hardness, and corrosion resistance of zircaloy-4. The ingot was prepared by an electrical spark furnace in argon gas condition. The specimen was annealed at 1050 °C (β -region) in argon gas for 30 minutes then β -queched in water. After that, annealing was done at 720 °C for 90 minutes in argon gas for reducing specimen hardness in order to prevent the rolling*

machine not broken when it was rolling, and then to be continued with 10% cold rolling at a temperature of 300 °C. Final annealing was performed at 700 °C for 60 minutes in argon gas atmosphere. It was found that Cu addition as much as 0.1% was more than enough to overcome hardness decrease as an effect of Sn elimination from 1.5% to 0%. Meanwhile, Nb addition caused the hardness decrease. Corrosion resistance of Zircaloy-4 was increased by Sn substitution with Cu and Nb addition with the same mechanical properties. The alloy composition of Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb had optimum hardness and corrosion resistance.

FREE TERMS: corrosion, zircaloy-4, tin alloying, niobium alloying, copper alloying, aneal, quenching, rolling, Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb, precipitate, microhardness, mstructure.

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Paduan zirkonium (Zicaloy) adalah bahan yang paling utama digunakan dalam industri nuklir. Dalam reaktor nuklir, Zircaloy diperlukan sebagai pelindung bahan bakar dari pendingin, pengungkung gas hasil fisi, pemindah panas, dan bahan struktur. Dengan demikian maka Zircaloy harus mempunyai sifat mekanik yang baik, tahan korosi, dan serapan neutron rendah. Sebagai contoh, Zircaloy-2 digunakan untuk reaktor air didih (BWR) dan Zircaloy-4 digunakan untuk reaktor air bertekanan (PWR) dengan suhu kelongsong 349 °C untuk PWR dan 390 °C untuk BWR^[1].

Bahan yang sesuai untuk digunakan sebagai kelongsong harus memenuhi 3 kategori sebagai berikut: (1) sifat nuklir meliputi tampang lintang serapan neutron; (2) sifat metalurgi dan sifat fisik meliputi (a) kekuatan (*strength*) dan ketahanan terhadap *creep*, (b) ketahanan terhadap korosi, (c) kemampuan fabrikasi, (d) konduktivitas termal, (e) kecocokan (*compatibility*) dengan teras reaktor, dan (f) stabilitas terhadap radiasi tinggi; dan (3) pertimbangan ekonomi meliputi (a) ketersediaan dan (b) biaya^[2].

Tetapi, adanya kecenderungan untuk meningkatkan derajat bakar bahan bakar (*fuel burnup*) dengan pendingin yang mengandung Li dengan konsentrasi yang tinggi pada PWR, maka perlu dilakukan peningkatan ketahanan terhadap oksidasi dari kelongsong bahan bakar^[3]. Hal yang sama juga dikemukakan bahwa peningkatan derajat bakar bahan bakar (sampai 60 000 MWD/TU)^[4] dan suhu operasi PWR yang tinggi (sampai 349 °C) menyebabkan oksida yang terbentuk sangat tebal (~130 µm) pada kelongsong, sehingga harus dilakukan penggantian bahan bakar sebelum bahan bakar tersebut mencapai derajat bakar yang diinginkan, sehingga memberikan kerugian ekonomi. Pengembangan

paduan zirkonium yang memiliki ketahanan terhadap oksidasi yang lebih baik dari paduan zirkonium yang ada sekarang selain menguntungkan secara ekonomi juga meningkatkan keselamatan reaktor karena akan mengurangi jumlah kegagalan kelongsong pada saat terjadi transien dan LOCA (*lost of coolant accident*).

Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa ketahanan terhadap korosi Zircaloy-4 dapat ditingkatkan dengan menurunkan kandungan Sn (timah)^[5]. Dilaporkan bahwa penurunan kandungan Sn dapat menyebabkan penurunan kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) dan kekuatan luluh (*yield strength*) dari Zircaloy-4. Penurunan kekuatan tarik maksimum dan kekuatan luluh Zircaloy-4 akibat penurunan kandungan Sn dapat diperbaiki dengan penambahan Cu (tembaga)^[6]. Kandungan Cu sebanyak 0,1% mampu menggantikan kekuatan luluh dan kekuatan tarik maksimum Zircaloy-4 akibat penurunan kandungan Sn dari 1,0% menjadi 0. Dilaporkan pula bahwa paduan berbasis zirkonium dengan penambahan sedikit Nb (sekitar 0,05–0,2%) menunjukkan ketahanan terhadap korosi yang lebih baik dibandingkan dengan paduan berbasis zirkonium tanpa penambahan Nb (Niobium)^[7].

Berdasarkan hasil-hasil penelitian tersebut, perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh substitusi Sn dengan Cu, dan penambahan Nb pada kekerasan dan ketahanan terhadap oksidasi Zircaloy-4. Penelitian ini bertujuan untuk: Pertama mengetahui pengaruh Sn terhadap mikrostruktur, kekerasan, dan ketahanan terhadap oksidasi Zircaloy-4. Kedua mengetahui pengaruh substitusi Sn dengan Cu, dan penambahan Nb terhadap mikrostruktur, kekerasan dan ketahanan terhadap oksidasi Zircaloy-4. Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah diperoleh unsur-unsur pemadu yang optimum, sehingga didapatkan kelongsong bahan bakar yang memiliki ketahanan terhadap oksidasi yang lebih baik dibandingkan Zircaloy-4 konvensional dengan sifat mekanik yang sama.

1.2. Pengaruh Penambahan Tembaga (Cu)

Cu termasuk penstabil fase- β . Diagram fase Cu-Zr diberikan pada Gambar L1.4 pada Lampiran 1. Dinyatakan bahwa presipitat yang ditemukan pada Zircaloy-4 dengan adanya penambahan Cu adalah (1) $Zr(Fe,Cr)_2$, (2) $Zr(Fe,Cr,Cu)_2$, dan (3) $Zr(Cu)_2$. Presipitat $Zr(Fe,Cr)_2$ diketahui merupakan fase Laves dengan struktur heksagonal C14. Presipitat $Zr(Fe,Cr,Cu)_2$ juga memiliki struktur heksagonal C14, sementara $Zr(Cu)_2$ ditemukan memiliki struktur tetragonal. Secara umum, paduan zirkonium dengan kandungan Cu yang lebih tinggi menunjukkan presipitat yang lebih besar dan fraksi luas yang lebih tinggi^[3]. Pengaruh Cu pada presipitat adalah untuk membentuk presipitat

biner $Zr(Cu)_2$ atau untuk menggantikan Fe atau Cr pada presipitat $Zr(Fe,Cr)_2$ sehingga meningkatkan ukuran dan fraksi luas presipitat^[3].

Dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh Cu pada sifat tarik dan untuk menemukan kandungan Cu optimum yang dapat menggantikan penurunan kekuatan sehubungan dengan pengurangan kandungan Sn yang diketahui memperbaiki ketahanan terhadap oksidasi. Pengaruh Cu dalam meningkatkan kekuatan tarik maksimum lebih besar jika dibandingkan dengan pengaruh Sn^[6]. Kandungan Cu sebanyak 0,1% mampu menggantikan penurunan kekuatan luluh dan kekuatan tarik maksimum Zircaloy-4 akibat penurunan kandungan Sn dari 1,0 menjadi 0%. Kelarutan Cu pada suhu kamar dihitung sekitar $5 \times 10^{-47}\%$, yang berarti bahwa kandungan Cu sebanyak 0,1% jauh di atas batas kelarutan Cu pada suhu kamar. Peningkatan kekuatan dengan bertambahnya kandungan Cu diyakini disebabkan oleh pengaruh pengerasan presipitasi oleh Cu^[6].

Dilaporkan bahwa pada *autoclave* berisi air bebas mineral pada suhu 360 °C dan tekanan 180 bar selama 100 hari, pertambahan berat paduan Zr-1,5Sn-0,2Cr-0,1Fe-xCu meningkat dengan bertambahnya kandungan Cu dari 0,1 ke 0,5%. Peningkatan ini disebabkan oleh menurunnya hambatan listrik dengan bertambahnya kandungan Cu. Adanya fraksi volum presipitat dalam jumlah besar tampaknya menyediakan jalur untuk perpindahan elektron sehingga meningkatkan hantaran elektron dan laju oksidasi. Walaupun demikian, spesimen yang tidak mengandung Cu menunjukkan pertambahan berat yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan spesimen dengan kandungan Cu 0,1%. Hal yang sama juga ditunjukkan pada paduan Zr-1,0Sn-0,2Cr-0,1Fe-xCu. Pertambahan berat minimum akibat oksidasi didapatkan pada kandungan Cu 0,1%. Penambahan Cu kurang dari 0,2% dapat memperbaiki ketahanan terhadap oksidasi paduan zirkonium.

1.3. Pengaruh Penambahan Niobium (Nb)

Pada konsentrasi Nb 0,1-0,5% ditemukan Zr-Nb pada matriks, sedangkan pada konsentrasi lebih besar dari 0,5% ditemukan Zr-Nb pada presipitat^[8]. Namun dilaporkan bahwa Nb pada konsentrasi 0,1% juga ditemukan pada presipitat. Ditemukan juga presipitat $Zr(Cr, Fe, Nb)_2$ dengan struktur kristal heksagonal pada spesimen 0,5Sn-0,1Fe-0,2Cr-0,1Nb.

Ketahanan terhadap korosi Zircaloy-4 dapat ditingkatkan dengan penambahan unsur pepadu seperti Nb. Dikemukakan bahwa penambahan sedikit Nb (sekitar 0,05-0,2%) dapat mengurangi pertambahan berat (*weight gain*) sampai tingkat yang signifikan, sementara penambahan Nb lebih besar

dari 0,2% dapat meningkatkan pertambahan berat. Hasil ini diperoleh pada pengujian menggunakan *autoclave* berisi uap air pada suhu 300 °C dan tekanan 10,3 MPa selama 300 hari. Hal yang sama juga diperoleh bahwa penambahan Nb meningkatkan ketahanan terhadap korosi^[7].

Dilaporkan bahwa kekuatan tarik meningkat dengan naiknya kandungan Nb sampai 0,5%, tetapi hampir tidak menunjukkan peningkatan yang nyata dengan penambahan Nb lebih lanjut. Kejenuhan pada kekuatan pada konsentrasi lebih besar dari 0,5% diduga berkaitan dengan pengendapan Nb. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa Nb pada konsentrasi lebih besar dari 0,5% ditemukan pada presipitat. Mereka juga menemukan bahwa peningkatan kekuatan akibat penambahan Nb tidak cukup untuk menggantikan penurunan kekuatan akibat pengurangan kandungan Sn.

II. TATA KERJA

Unsur-unsur pepadu dicampur dengan zirkonium sesuai komposisi (Tabel-1) yang diinginkan lalu dikompaksi, sehingga bentuknya menjadi seperti koin. Koin ini kemudian dilebur pada tungku peleburan busur menggunakan elektroda tungsten (*non-consumable*) dalam atmosfer gas argon dengan melakukan pengulangan peleburan (*remelted*) sebanyak 3 kali, pengulangan ini bertujuan untuk meningkatkan homogenitas spesimen. Ingot berbentuk kancing (*button type*) hasil proses peleburan busur dihilangkan bagian atasnya menggunakan mesin pemotong, kemudian digerinda dengan kertas abrasif grit 180 dan 320 sehingga bentuknya menjadi rata. Lalu, spesimen dilubangi untuk mempermudah penanganan pada proses-proses selanjutnya. Spesimen dianil pada suhu 1050 °C (daerah β) dalam atmosfer gas argon selama 30 menit kemudian dicelup cepat ke dalam air (pencelupan cepat- β). Setelah itu, penganilan dilakukan pada suhu 720 °C selama 90 menit dalam atmosfer gas argon untuk mengurangi kekerasan spesimen agar tidak terjadi kerusakan pada mesin rol pada saat pengerolan, kemudian dilanjutkan dengan pengerolan dingin 10% pada suhu 300 °C. Penganilan akhir dilakukan pada suhu 700 °C selama 60 menit dalam atmosfer gas argon.

Tabel 1. Komposisi kimia spesimen (dalam %berat).

No spesimen	Unsur pepadu				
	Sn	Fe	Cr	Cu	Nb
1	1,5	0,2	0,1	0	0
2	0	0,2	0,1	0	0
3	0	0,2	0,1	0,1	0
4	0	0,2	0,1	0,1	0,1
5	0	0	0	0,1	0,1
6	Zirkonium murni				
7	Zircaloy-4 konvensional				
Sisanya presentase seimbang dengan zirkonium (%)					

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Mikrostruktur

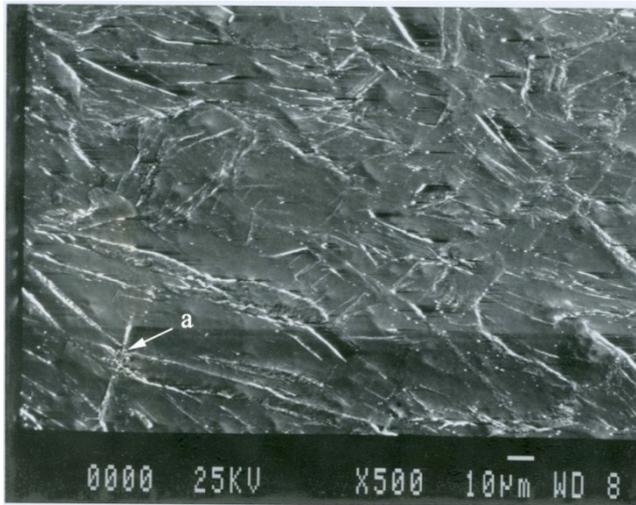
Mikrograf SEM zirkonium murni spesimen 6 (Gambar 1) memperlihatkan perubahan yang signifikan pada struktur *basket-weave* pada substrat logam. Perubahan ini menunjukkan pertumbuhan butir rekristalisasi. Gambar 1 juga menunjukkan bahwa lamela α pada zirkonium murni memiliki karakteristik yang berbeda dengan lamela α pada paduan zirkonium, yaitu pada spesimen ini batas lamela tidak dihiasi oleh presipitat. Ditunjukkan mikrostruktur substrat logam pada oksida, terlihat perubahan yang signifikan pada struktur *basket-weave* pada gambar-1, tanda (a) adalah plat yang saling berpotongan satu sama lain (struktur *basket-weave*).

Dinyatakan bahwa presipitat yang ditemukan pada Zircaloy-4 dengan adanya penambahan Cu adalah (1) $Zr(Fe,Cr)_2$, (2) $Zr(Fe,Cr,Cu)_2$, dan (3) $Zr(Cu)_2$ ^[6]. Pada penelitian ini, Cu juga ditemukan pada presipitat (Tabel 2).

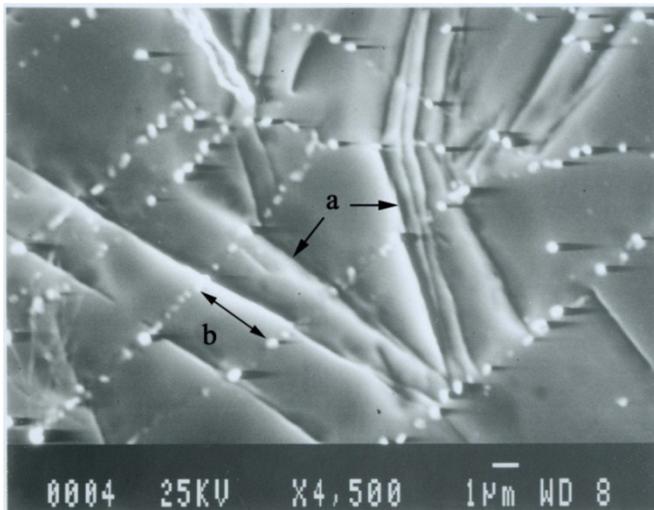
Mikrograf SEM spesimen 3 dan 5 (Gambar 2 dan 3) menunjukkan adanya alur (*groove*) pada permukaan spesimen. Ditunjukkan pada Gambar 2, tanda (a) adalah cacat permukaan, dan tanda (b) adalah batas lamela struktur *basket-weave* dengan presipitat terletak pada batas lamela. Gambar 3 menunjukkan presipitat kurang efektif dalam menghambat pergerakan batas

butir, tanda (a) adalah pertemuan antara tiga batas butir, tanda (b) adalah cacat permukaan.

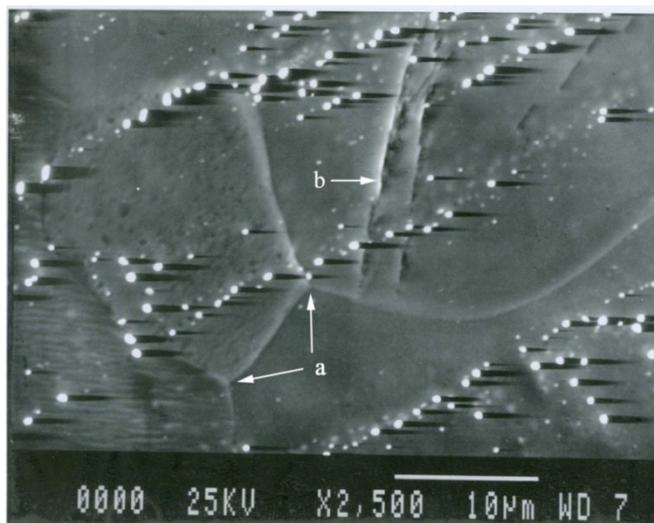
Berdasarkan hasil perhitungan ZAF pada spesimen 4, alur diketahui memiliki komposisi sama dengan komposisi matrik logam (Tabel 2). Disimpulkan bahwa alur yang terbentuk pada permukaan spesimen tersebut merupakan cacat permukaan (*surface flaw*).



Gambar 1. Mikrograf SEM zirkonium murni.



Gambar 2. Mikrograf SEM paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu.



Gambar 3. Mikrograf SEM paduan Zr-0,1Cu-0,1Nb.

Tabel 2. Perhitungan ZAF untuk berbagai lokasi pada Gambar 3.

Notasi	Lokasi	%Berat				
		Zr	Nb	Cr	Fe	Cu
a	Matriks	94,17	5,63	0,11	0,09	-
		93,86	6,06	0,08	-	-
b	Cacat permukaan	93,40	6,44	0,16	-	-
c	Batas butir	92,65	6,16	0,18	-	1,02
		90,42	6,16	0,93	1,60	0,89
	Seluruh permukaan	93,52	6,06	0,12	0,31	-

Pada Tabel 2 terlihat bahwa kandungan unsur di berbagai lokasi umumnya berbeda dengan jumlah unsur yang ditambahkan pada spesimen 4. Perbedaan ini timbul karena informasi komposisi yang diperoleh dengan EDS bersifat kualitatif (dan semi-kuantitatif). Sementara program koreksi untuk analisis kuantitatif menghasilkan kesalahan 10-100%.

3.2. Kekerasan

Tabel 3 memperlihatkan kekerasan mikro masing-masing spesimen pada bagian transversal sebelum uji korosi. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa kekerasan mikro paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu paling tinggi, diikuti oleh paduan Zr-1,5Sn-0,2Fe-0,1Cr, paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb, dan paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr. Pada penelitian ini, zirkonium murni memiliki kekerasan mikro yang lebih besar dibandingkan dengan paduan Zr-0,1Cu-0,1Nb dan Zircaloy-4 konvensional. Sementara itu, kekerasan mikro yang paling rendah ditunjukkan oleh Zircaloy-4 konvensional.

Kekerasan spesimen pada bagian transversal sebelum uji korosi diberikan pada Tabel 3. Urutan kekerasan dari masing-masing spesimen pada bagian transversal sebelum uji oksidasi adalah sebagai berikut: 3>1>4>2>6>5>7.

Telah diketahui bahwa penurunan kandungan Sn dapat menyebabkan penurunan sifat mekanik dari Zircaloy-4^[9]. Pada penelitian ini, penghilangan kandungan Sn juga menyebabkan penurunan pada sifat mekanik. Kekerasan spesimen 2 (tanpa kandungan Sn) adalah 199 HV₁₀₀ lebih rendah jika dibandingkan spesimen 1 (Zircaloy-4) yaitu 221 HV₁₀₀.

Ditemukan bahwa pengaruh Cu dalam meningkatkan kekuatan tarik maksimum lebih besar jika dibandingkan dengan pengaruh Sn^[6]. Kandungan Cu sebanyak 0,1% mampu menggantikan penurunan kekuatan luluh dan kekuatan tarik maksimum Zircaloy-4 akibat penurunan kandungan Sn dari 1,0 menjadi 0%. Dilaporkan bahwa kekuatan tarik maksimum paduan 0,2Cr-0,1Fe-0,1Nb-xSn-Zr meningkat dari 384 MPa menjadi 463 MPa, sementara kekuatan tarik maksimum spesimen dengan rasio Fe/Cr = 2 meningkat dari 484 MPa menjadi 593 MPa dengan bertambahnya kandungan Cu dari 0 menjadi 0,1%. Selain itu, dikemukakan pula bahwa Cu meningkatkan sifat mekanik paduan berbasis zirkonium dengan pengerasan presipitasi. Pada penelitian ini, penambahan Cu sebanyak 0,1% dapat menggantikan penurunan kekerasan akibat penurunan kandungan Sn dari 1,5 menjadi 0%. Kekerasan spesimen 2 meningkat dari 199 HV₁₀₀ menjadi 237 HV₁₀₀ dengan penambahan Cu. Pada penelitian ini, Cu juga ditemukan pada presipitat (Tabel 2). Dengan demikian, disimpulkan bahwa peningkatan kekerasan pada spesimen dengan penambahan Cu (spesimen 3) disebabkan oleh pengerasan presipitasi.

Tabel 3. Kekerasan mikro masing-masing spesimen pada bagian transversal sebelum uji korosi.

Spesimen	Paduan	N	Bilangan Kekerasan Vickers (VHN)
1	Zr-1,5Sn-0,2Fe-0,1Cr	1	221
2	Zr-0,2Fe-0,1Cr	1	199
3	Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu	1	237
4	Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb	1	217
5	Zr-0,1Cu-0,1Nb	1	168
6	Zr murni	1	185
7	Zircaloy-4 konvensional	1	160

N adalah banyaknya penekanan

Sifat mekanik paduan berbasis zirkonium dapat ditingkatkan dengan penambahan Nb. Pada penelitian ini, penambahan Nb pada paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu (spesimen 3) menyebabkan penurunan kekerasan. Kekerasan spesimen 3 turun dari 237 HV₁₀₀ menjadi 217 HV₁₀₀ dengan penambahan Nb^[7].

3.3. Ketahanan Korosi

Pertambahan berat spesimen setelah uji oksidasi ditunjukkan pada Tabel 4. Pada penelitian ini, paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb memiliki ketahanan terhadap 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 menunjukkan ketahanan terhadap oksidasi yang relatif sama dengan paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb. Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa pertambahan berat kedua paduan tersebut hanya berbeda sedikit.

Tabel 4. Pertambahan berat spesimen setelah uji oksidasi dalam air bebas mineral pada suhu 360 °C dan tekanan 10 bar selama 70 jam.

Spesimen	Paduan	Luas Permukaan (mm ²)	Berat (g)		Pertambahan Berat (mg/dm ²)
			Sebelum uji oksidasi	Sesudah uji oksidasi	
1	Zr-1,5Sn-0,2Fe-0,1Cr	758,3855	4,8887	4,8909	29,0090
2	Zr-0,2Fe-0,1Cr	774,0578	5,7000	5,702	25,8379
3	Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu	681,3913	4,2959	4,2961	2,9352
4	Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb	755,5680	5,3682	5,3684	2,6470
5	Zr-0,1Cu-0,1Nb	758,9899	4,5117	4,5135	23,7157
6	Zr murni	346,8400	1,5730	1,5767	106,6774
7	Zircaloy-4 konvensional	498,2446	1,7720	1,7732	24,0846

Ketahanan terhadap korosi menurun secara nyata pada paduan Zr-0,1Cu-0,1Nb, diikuti oleh Zircaloy-4 konvensional, paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr, dan paduan Zr-1,5Sn-0,2Fe-0,1Cr. Sementara ketahanan terhadap oksidasi yang paling buruk diperlihatkan oleh zirkonium murni.

Urutan pertambahan berat spesimen setelah uji oksidasi adalah sebagai berikut: 6>1>2>7>5>3>4. Seperti yang dapat dilihat, perbedaan pertambahan berat antara spesimen 1, 2, 5, dan 7, serta spesimen 3 dan 4 tidak menunjukkan perbedaan yang besar, terutama perbedaan pertambahan berat antara spesimen 3 dan 4. Hal ini terjadi karena rendahnya tekanan pada saat uji oksidasi (10 bar) dan waktu uji oksidasi yang tidak lama (70 jam).

Walaupun demikian, dikemukakan bahwa pada PWR semua faktor (seperti peningkatan suhu logam dengan bertambahnya ketebalan lapisan oksida yang diakibatkan oleh fluks panas dan rendahnya konduktivitas ZrO₂, adanya LiOH, perubahan kimia air pada reaktor karena adanya maloperasi, dan lain-lain) yang berpengaruh terhadap ketebalan oksida bekerja secara bersamaan, dan cenderung saling meningkatkan laju korosi, sehingga tidak ada jalan lain untuk mempertahankan operasi reaktor selain menekan pertumbuhan oksida sejak awal operasi.

Telah diketahui bahwa ketahanan terhadap oksidasi Zircaloy-4 dapat diperbaiki dengan menurunkan kandungan Sn. Pada penelitian ini, penurunan kandungan Sn dari 1,5 menjadi 0% juga menunjukkan hasil yang sama. Pertambahan berat paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr (specimen 2) lebih rendah dibandingkan paduan Zr-1,5Sn-0,2Fe-0,1Cr (spesimen 1).

Penambahan Cu kurang dari 0,2% dapat memperbaiki ketahanan terhadap oksidasi paduan zirkonium. Hal yang sama juga diperoleh pada penelitian ini, yaitu penambahan Cu pada spesimen 2 menghasilkan ketahanan terhadap oksidasi yang lebih baik. Juga bahwa penambahan sedikit Nb (sekitar 0,05-0,2%) mengurangi pertambahan berat (*weight gain*) Zircaloy-4 sampai tingkat yang signifikan^[7]. Pada penelitian ini, spesimen dengan penambahan Nb (spesimen 4) juga menunjukkan ketahanan terhadap oksidasi yang lebih baik dibandingkan spesimen yang sama tanpa kandungan Nb (spesimen 3). Walaupun demikian, penambahan Cu dan Nb saja tanpa adanya kandungan Fe dan Cr (spesimen 5) menurunkan ketahanan terhadap oksidasi. Pertambahan berat spesimen 5 meningkat secara signifikan dengan penghilangan kandungan Fe dan Cr.

Zirkonium murni (spesimen 6) menunjukkan ketahanan terhadap oksidasi yang paling buruk di antara semua spesimen. Pertambahan berat spesimen ini jauh lebih besar dibandingkan spesimen-spesimen yang lain. Oksidasi zirkonium murni pada air bersuhu tinggi dapat menyebabkan oksidasi pemisahan (*breakaway oxidation*)^[10]. Hal tersebut dapat diatasi dengan penambahan unsur-unsur transisi seperti Fe, Cr dan Ni. penambahan unsur-unsur transisi seperti Fe, Cr, Cu dan Nb dapat memperbaiki sifat ketahanan terhadap oksidasi zirkonium murni.

Pada penelitian ini, pertambahan berat spesimen 7 (Zircaloy-4 konvensional) lebih rendah jika dibandingkan dengan spesimen 1 (Zircaloy-4 yang dibuat pada penelitian ini). Telah diketahui bahwa ketahanan terhadap korosi Zircaloy sangat dipengaruhi oleh perlakuan termo-mekanik. Dengan demikian, disimpulkan bahwa perbedaan pertambahan berat antara spesimen 7 dengan spesimen 1 disebabkan oleh perbedaan perlakuan termo-mekanik, dan perlakuan termo-mekanik yang biasa digunakan pada industri menghasilkan ketahanan terhadap oksidasi yang lebih baik dibandingkan dengan perlakuan termo-mekanik yang dilakukan pada penelitian ini.

IV. KESIMPULAN

1. Penambahan Cu sebanyak 0,1% sangat baik untuk menggantikan penurunan kekerasan akibat penurunan Sn dari 1,5 menjadi 0%. Sementara itu penambahan Nb menyebabkan penurunan kekerasan.
2. Ketahanan korosi Zircaloy-4 dapat ditingkatkan melalui substitusi Sn dengan Cu serta penambahan Nb, dengan sifat mekanik (kekerasan) yang sama.
3. Komposisi paduan Zr-0,2Fe-0,1Cr-0,1Cu-0,1Nb memiliki kekerasan dan ketahanan terhadap oksidasi optimum.

V. DAFTAR PUSTAKA

1. Lambert, J.D.B. & STRAIN R. (1985). Oxide Fuels, vol. 10 A, in, Materials Science and Technology, (p.121). Germany: VCH.
2. Pemsler, J.P., Cladding Materials in Nuclear Reactor Fuel Elements Metallurgy and Fabrication, (Kaufmann, A., Ed.), p.231. New York: John Wiley & Sons.
3. Hong, H.S., Moon, J.S., Kim, S.J., Lee, K.S. (2001). Investigation on the Oxidation Characteristics of Copper-added Modified Zircaloy-4 Alloys in Pressurized Water at 360 °C. Journal of Nuclear Materials, 297, 113-119.
4. Cox, B. (1988). Degradation of Zirconium Alloys in Water-Cooled Nuclear Reactors. The Metallurgical Society, Inc: Proceeding of the Third International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Pennsylvania, (pp.65-76).
5. Limbäck, M., Krammen, M.A., Rudling, P., Pati, S.R., Garde, A.M. (1994). Corrosion and Hydriding Performance of Zircaloy-2 and Zircaloy-4 Cladding Materials in PWRs. American Nuclear Society: Proceeding of ANS International Topical Meeting on Light Water Reactor Performance, West Palm Beach, La Grange Park, ILL (pp. 286-295).
6. Hong, H.S., Kim, H.S., Kim, S.J., Lee, K.S. (2000). Effects of Copper Addition on the Tensile Properties and Microstructures of Modified Zircaloy-4. Journal of Nuclear Materials, 280, 230-234.
7. Isobe, T. & Matsuo, Y. (1991). Development of Highly Corrosion Resistant Zirconium-Base Alloys, Zirconium in the Nuclear Industry: 9th International Symposium, Kobe, Japan, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, ASTM-STP 1132, 346-367.
8. Hong, H.S., Kim, S.J., Lee, K.S. (1996). Effects of Alloying Elements on the Tensile Properties and Oxidation Behaviour of Modified Zircaloy-4 in 360 °C water. Journal of Nuclear Materials, 238, 211-217.

9. -----, (1998). Waterside Corrosion of Zirconium Alloys in Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-996, Vienna: IAEA.
10. Cox, B. (2005). Some Thoughts on the Mechanisms of In-reactor Corrosion of Zirconium Alloys. *Journal of Nuclear Materials*, 336, 331-368.