

Kompatibilitas Paduan Zirkonium Pada Cairan Logam Berat Lead-Bismuth Eutectic (Abu Khalid Rivai)

Akreditasi LIPI Nomor : 395/D/2012

Tanggal 24 April 2012

KOMPATIBILITAS PADUAN ZIRKONIUM PADA CAIRAN LOGAM BERAT *LEAD-BISMUTH EUTECTIC*

Abu Khalid Rivai¹, Bernandus Bandriyana¹, Annette Heinzl² dan Fabian Lang²

¹*Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) - BATAN*

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang Selatan

²*Pulsed Power and Microwave Technology, Karlsruhe Institute of Technology Germany*

Bau 421 Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, D-76344 Eggenstein, Germany

e-mail: rivai.abukhalid@batan.go.id

Diterima: 10 April 2012

Diperbaiki: 1 Agustus 2012

Disetujui: 10 September 2012

ABSTRAK

KOMPATIBILITAS PADUAN ZIRKONIUM PADA CAIRAN LOGAM BERAT *LEAD-BISMUTH EUTECTIC*. Cairan *Lead Bismuth Eutectic (LBE)* merupakan pendingin salah satu kandidat utama reaktor masa depan di dunia (*Generation IV reactors*) yaitu *Lead alloy-cooled Fast Reactor (LFR)* sekaligus merupakan material target spalasi untuk *Accelerator Driven Transmutation System (ADS)*. Cairan ini memiliki berbagai keunggulan dari segi netronik, termalhidrolik maupun sifat yang inert terhadap air dan udara. Namun cairan *LBE* ini bersifat korosif pada logam-logam yang menjadi penyusun material kelongsong bahan bakar dan struktur reaktor. Oleh karena itu pengembangan material kelongsong bahan bakar dan struktur reaktor dalam lingkungan *LBE* merupakan salah satu kunci utama dalam pengembangan *LFR* dan *ADS*. Telah dikembangkan paduan zirkonium yaitu *ZrNbMoGe* di Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN)-BATAN. Dalam rangka untuk mengeksplorasi karakteristik paduan zirkonium ini dilakukan investigasi kompatibilitas bahan paduan zirkonium *ZrNbMoGe* di dalam lingkungan cairan *LBE* dengan menggunakan fasilitas *aparatus COSTA* di *Pulsed Power and Microwave Technology-Karlsruhe Institute of Technology Germany*. Pengujian dilakukan pada suhu 550 °C dengan konsentrasi oksigen 1 x 10⁻⁶ %berat selama 312 jam. Hasil pengujian memperlihatkan jejak pembentukan lapisan oksida zirkonium di atas permukaan sampel yang kemudian terlepas. Hal ini menunjukkan bahwa dalam waktu yang relatif singkat paduan zirkonium telah mengkonsumsi cukup banyak oksigen di dalam cairan *LBE* dengan membentuk lapisan oksida zirkonium di atas permukaan sampel. Namun pembentukan lapisan oksida zirkonium yang cepat dan relatif tebal di atas permukaan sampel ini menyebabkan dalam waktu relatif singkat lapisan oksida ini terlepas dari permukaan bahan. Oleh sebab itu paduan zirkonium ini tidak kompatibel dengan cairan logam berat *LBE* yang digunakan dalam sistem reaktor nuklir.

Kata kunci: *Lead-bismuth eutectic, LFR, ADS, Korosi, Paduan zirkonium, Oksida zirkonium*

ABSTRACT

COMPATIBILITY OF A ZIRCALOY IN LEAD-BISMUTH EUTECTIC HEAVY LIQUID METAL.

Liquid Lead-Bismuth Eutectic (LBE) is a coolant of one of main candidates for the future nuclear reactor in the world (Generation IV reactors) i.e. LFR (Lead alloy-cooled Fast Reactor), and also a spallation target material for ADS (Accelerator Driven Transmutation System). The liquid has several advantages from neutronic, thermal-hydraulic, and inert characteristic with water and air. Nevertheless, the liquid LBE has the corrosive characteristic to metals as constituent materials of fuel cladding and structural of the reactors. Therefore, development of fuel cladding and structural materials in lead-bismuth eutectic environment is one of key issues for the deployment of LFR and ADS. A zirconium alloy material i.e. *ZrNbMoGe* has been developed in the Center for Technology of Nuclear Industry Materials (PTBIN)-BATAN. In order to explore the characteristics of the zircaloy, investigation of compatibility of *ZrNbMoGe* in liquid LBE has been done using *COSTA* apparatus facility at *Pulsed Power and Microwave Technology, Karlsruhe Institute of Technology Germany*. The test was done at 550 °C of temperature with an oxygen concentration of 1x10⁻⁶ wt.% for 312 hours. The result showed the trace of zirconium oxide formation on the surface of the sample. This phenomenon revealed that in a relatively short time the zirconium alloy consumed a lot of oxygen in liquid LBE to form zirconium oxide on the surface of the sample. However, the zirconium oxide was spalled off from the surface of the sample because of fast formation with relatively thick of the zirconium oxide. Therefore, the zircaloy is not compatible with lead-bismuth eutectic heavy liquid metal that is used in the nuclear reactor system.

Keywords: *Lead-bismuth eutectic, LFR, ADS, Corrosion, Zirconium alloy, Zirconium oxide*

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi di dunia yang semakin meningkat membutuhkan sumber-sumber energi yang berkesinambungan termasuk energi nuklir. Salah satu tipe reaktor nuklir daya yang gencar diteliti dan dikembangkan di dunia adalah reaktor berpendingin cairan logam berat *Heavy Liquid Metal (HLM)* yang khususnya dikembangkan untuk jenis reaktor neutron cepat (*fast reactor*). Reaktor jenis ini dikenal dengan nama *Liquid Metal-cooled Fast Reactor (LMFR)*. Diantara cairan logam berat yang diteliti dan dikembangkan, salah satu kandidat utamanya adalah cairan logam berat *Lead-Bismuth Eutectic (LBE)*. Cairan logam berat LBE dikembangkan untuk pendingin pada jenis reaktor *Lead alloy-cooled Fast Reactor (LFR)* yang merupakan salah satu kandidat reaktor masa depan di dunia yaitu reaktor generasi IV (*Generation IV reactors*) [1].

Keunggulan cairan logam berat LBE sebagai pendingin reaktor terutama dari sisi neutronik, termal hidrolik dan tidak bersifat eksplosif jika berinteraksi dengan udara dan air [1,2]. Cairan LBE sebagai logam berat memungkinkan reaktor jenis LFR ini memanfaatkan uranium alam dan membakar limbah radioaktif secara optimal karena penggunaan neutron cepat (*fast neutrons*) dalam operasinya. Lebih lanjut lagi, dalam kurun waktu dua dasawarsa terakhir penelitian cairan logam berat LBE semakin gencar dilakukan di dunia terkait dengan pengembangan teknologi *Accelerator Driven Transmutation System (ADS)* yang didesain menggunakan cairan LBE sebagai target spalasi selain fungsinya sebagai pendingin (*coolant*) ADS [2].

Sampai saat ini cairan logam berat LBE yang diajukan, diteliti, serta digunakan berbagai negara di dunia untuk sistem reaktor nuklir adalah paduan 44.5 % berat Pb dan 55.5 % berat Bi. Hal ini karena dengan komposisi paduan tersebut maka material LBE memiliki titik leleh paling rendah yaitu 124,5 °C sehingga memudahkan untuk pengoperasian reaktor. Sebagai pembanding, titik leleh logam Pb adalah 327,5 °C dan titik leleh logam Bi adalah 271,3 °C. Adapun titik didih material logam berat LBE ini cukup tinggi yaitu 1.670 °C sehingga sangat baik dari sisi keselamatan reaktor. Sesuai dengan karakteristik cairan logam berat LBE yang titik lelehnya rendah maka paduan ini disebut *eutectic* yang berasal dari bahasa Yunani yaitu "*eutektos*" yang berarti mudah meleleh.

Isu utama dalam pengembangan LFR dan ADS di dunia sampai saat ini adalah pengembangan bahan yang tahan korosi di lingkungan cairan LBE [3-5]. Cairan LBE memiliki karakteristik bersifat korosif terhadap logam-logam khususnya nikel (Ni), besi (Fe) dan krom (Cr) karena menyebabkan unsur-unsur logam tersebut mengalami disolusi ke dalam cairan logam berat LBE [3-5]. Sedangkan logam-logam Ni, Fe, dan Cr ini merupakan unsur-unsur penyusun baja yang merupakan

kandidat utama untuk material kelongsong dan struktur LMFR. Oleh karena itu pengembangan material kelongsong bahan bakar dan struktur reaktor dalam lingkungan LBE merupakan salah satu kunci utama dalam pengembangan LFR dan ADS.

Sampai saat ini terus dikembangkan berbagai kandidat bahan kelongsong bahan bakar dan struktur reaktor untuk LFR dan ADS oleh banyak peneliti di dunia [3-7]. Bahan-bahan yang dikembangkan tersebut adalah baja krom tinggi feritik-martensitik dan austenitik yang juga dipadu dengan silikon dan aluminium, keramik, logam refraktori serta rekayasa permukaan (*surface treatment*) dengan melapisi permukaan baja menggunakan aluminium [3-7]. Berkaitan dengan pengembangan bahan kelongsong untuk reaktor nuklir, telah dikembangkan paduan zirkonium yaitu ZrNbMoGe di Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN)-BATAN [8,9]. Tujuan utama pengembangan bahan ini adalah untuk bahan kelongsong dan struktur reaktor berpendingin air ringan yaitu *Pressurized Water Reactor (PWR)* dan *Boiling Water Reactor (BWR)*.

Dalam rangka untuk mengeksplorasi karakteristik paduan zirkonium ini dilakukan investigasi kompatibilitas bahan paduan zirkonium ZrNbMoGe di dalam lingkungan cairan LBE. Selain itu, paduan ZrNbMoGe ini dipilih sebagai bahan pembanding dengan material baja yang merupakan kandidat material kelongsong dan struktur LFR maupun ADS. Pengujian korosi dilakukan dengan menggunakan fasilitas *aparatus COSTA* di *Pulsed Power and Microwave Technology-Karlsruhe Institute of Technology Germany*.

METODE PERCOBAAN

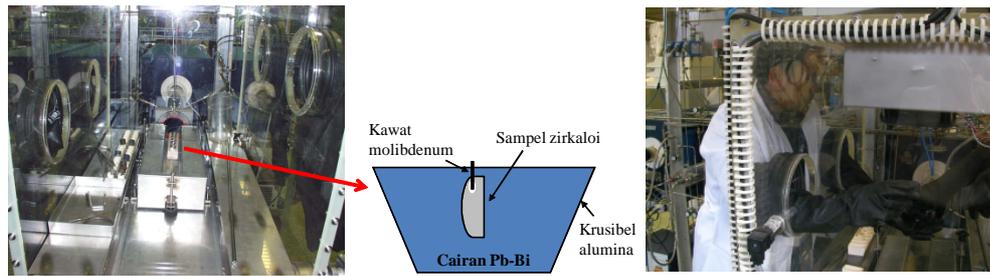
Peralatan Uji Korosi Logam Berat *Lead-Bismuth Eutectic*

peralatan uji korosi cairan logam berat *lead-bismuth eutectic* yang digunakan adalah tipe statik (*stagnant*). Gambar peralatan uji korosi beserta *exchange glove box* dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabung reaksi pada peralatan uji korosi ini terbuat dari bahan *quartz* berbentuk silinder. Sebelum pengujian,



Gambar 1. Peralatan uji korosi cairan *lead-bismuth eutectic* dan *exchange glove box*.



Gambar 2. Peralatan dan bahan uji korosi di dalam exchange glove box serta cara penempatan krusibel dari exchange glove box ke aparatus

tabung reaksi yang di dalamnya telah ditempatkan krusibel berisi logam berat LBE dikondisikan terlebih dahulu agar sesuai dengan suhu dan kadar konsentrasi yang diinginkan. Pengaturan kadar konsentrasi oksigen dilakukan dengan injeksi gas Ar dan Ar+5% H_2 secara berkesinambungan. Gas hidrogen yang digunakan untuk mengatur kadar oksigen adalah 5% yang relatif cukup kadarnya untuk penelitian ini dan aman dari kemungkinan eksplosif. Gas campuran Ar dan Ar+5% H_2 dialirkan ke tabung air untuk menghasilkan uap air. Kontrol kandungan oksigen di dalam cairan LBE dilakukan dengan mengatur *partial pressure* (tekanan parsial) p_{H_2}/p_{H_2O} . Di dalam tabung reaksi ditempatkan sebuah sensor oksigen untuk mengukur konsentrasi oksigen selama uji korosi berlangsung. Setelah kondisi tercapai, tabung reaksi pada *aparatus* uji korosi disambungkan dengan *exchange glove box* yang telah di-vakum untuk menempatkan sampel uji ke dalam krusibel yang telah berisi cairan logam berat LBE seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Pengkondisian vakum pada *exchange glove box* ini dilakukan agar ketika penempatan sampel uji ke dalam krusibel tidak akan mengubah kadar oksigen yang sudah dikondisikan sebelumnya. Penempatan sampel ini dilakukan dengan mengeluarkan krusibel yang berisi cairan logam berat LBE dari tabung reaksi ke *exchange glove box*. Kemudian krusibel yang telah berisi sampel yang dibenamkan di dalam cairan logam berat LBE tersebut dimasukkan kembali ke dalam tabung reaksi untuk pengujian korosi sesuai waktu uji yang diinginkan.

Bahan Uji Korosi

Bahan yang diuji korosi dalam percobaan ini adalah paduan zirkonium ZrNbMoGe. Bahan ini dikembangkan di Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN)-BATAN [8,9]. Adapun komposisi kimia bahan baja uji korosi ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Cara Kerja

Pengujian korosi dilakukan pada suhu 550 °C dengan konsentrasi oksigen 1×10^{-6} %berat. dan waktu pengujian ini dilakukan selama 312 jam. Uji korosi ditujukan untuk memperoleh pemahaman mengenai perilaku korosi paduan ZrNbMoGe pada saat awal

Tabel 1. Komposisi kimia bahan uji (% berat)

Zr	Nb	Mo	Ge
97,5	1	1	0,5

Tabel 2. Kondisi percobaan uji korosi

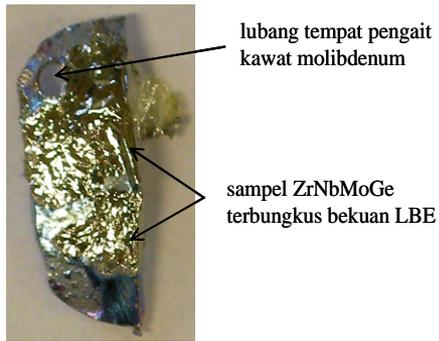
Parameter	Keterangan
Jenis Logam Cair	Lead-bismuth <i>eutectic</i>
Temperatur Cairan (°C)	550
Konsentrasi Oksigen (%berat)	1×10^{-6}
Waktu Uji Korosi (jam)	312
Bahan Uji	Paduan zirkonium: ZrNbMoGe

kondisi reaktor beroperasi. Nilai konsentrasi oksigen 1×10^{-6} %berat menunjukkan bahwa kondisi oksigen di dalam cairan logam LBE ini jauh di bawah nilai potensial oksigen pembentukan oksida timbal sehingga menekan pembentukan kerak oksida timbal pada cairan LBE. Selain itu nilai kadar oksigen ini banyak diajukan oleh banyak penelitian [3] karena nilai konsentrasi oksigen ini di atas nilai potensial oksigen pembentukan oksida besi (*magnetite* = Fe_3O_4) oksida krom (*spinel* = Cr_2O_3) sehingga jika bahan yang digunakannya adalah baja maka diharapkan terbentuk lapisan-lapisan oksida tersebut sebagai lapisan protektor dari serangan korosi.

Perilaku korosi dari bahan uji dianalisis menggunakan *Optical Microscope (OM)*, *Scanning Electron Microscope (SEM)* yang dikombinasikan dengan *Energy Dispersive X-Ray Microanalysis (EDX)* dan *X-Ray Diffraction (XRD)*. Sebelum analisis tersebut, sampel ZrNbMoGe yang sudah diuji di dalam cairan LBE tersebut dipotong di tengah, dimasukkan ke dalam resin plastik cair hingga resin tersebut membeku dan mengeras kemudian dipoles permukaannya (*polishing*) menggunakan mesin grinda dengan butiran permata polikristal. Adapun bagian potongan lain sampel uji yang akan diuji dengan XRD dibenamkan ke dalam cairan gliserin pada suhu 200 °C untuk melepaskan bekuan LBE yang menempel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3 menunjukkan foto sampel ZrNbMoGe setelah uji korosi. Dapat terlihat bahwa hampir seluruh

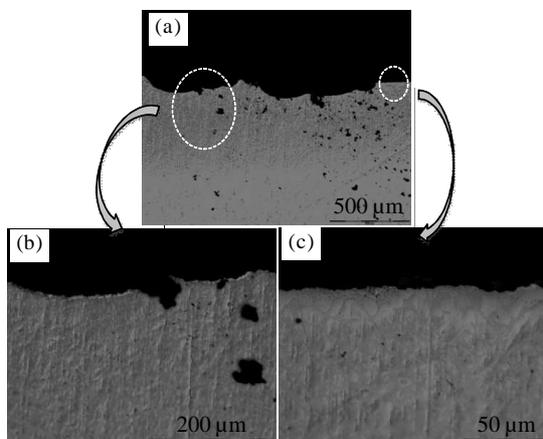


Gambar 3. Foto spesimen uji ZrNbMoGe sesudah uji korosi

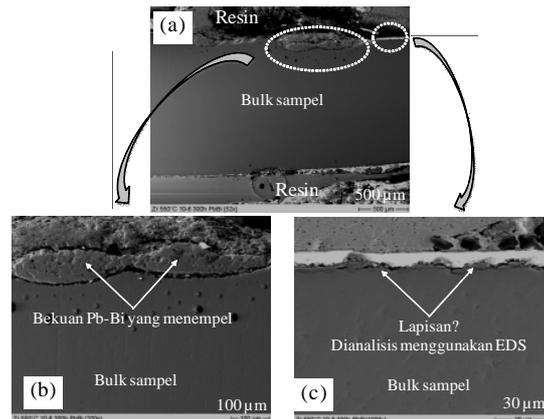
bagian sampel tersebut tertutupi oleh bekuan *LBE*. Dari warnanya yang kekuning-kuningan kemungkinan telah terbentuk oksida *LBE* yang terjadi sesaat pada waktu pengambilan sampel setelah pengujian korosi. Sampel uji korosi tersebut yang kemudian dipotong di tengah untuk analisis struktur mikro tampak lintang sampel lebih lanjut akan tertutupi oleh bekuan *LBE* yang menempel di bagian pinggir. Sisi positif dari hal ini adalah terhindarnya resiko terlepas lapisan tipis oksida yang mungkin terbentuk dari permukaan akibat preparasi seperti pemotongan (*cutting*) dan *polishing*.

Analisis Mikroskop Optik

Gambar 4 menunjukkan foto hasil pengamatan mikroskop optik sampel sesudah uji korosi. Dapat dianalisis dari mikrofoto ini bahwa setelah pengujian korosi pada cairan *LBE* terjadi proses korosi pada permukaan sampel ZrNbMoGe. Tampak bahwa secara umum pada permukaan sampel terbentuk korosi *pitting* yang relatif dangkal. Hal ini menunjukkan telah terlepasnya bagian permukaan sampel uji ke cairan *LBE* selama pengujian korosi. Namun, pada bagian tertentu tampak permukaan yang rata dengan lapisan tipis terbentuk di atas permukaan sampel seperti ditunjukkan pada Gambar 4(c). Pada bagian tersebut tidak tampak jejak terlepasnya bagian permukaan sampel uji ke cairan *LBE*.



Gambar 4. Foto mikroskop optik sampel uji dengan dua gambar di bawah adalah perbesaran dari dua lingkaran pada gambar di atasnya



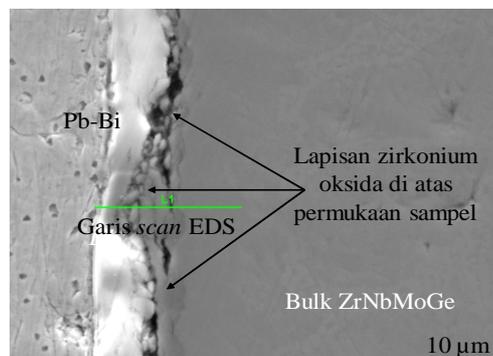
Gambar 5. Foto SEM sampel sampel uji dengan dua gambar di bawah adalah perbesaran dari dua lingkaran pada gambar di atasnya

Diprediksi bahwa tidak terlepasnya bagian permukaan sampel uji ke cairan *LBE* tertahan oleh lapisan tipis yang terbentuk di atas permukaan sampel. Analisis lebih lanjut dari fenomena ini dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)*.

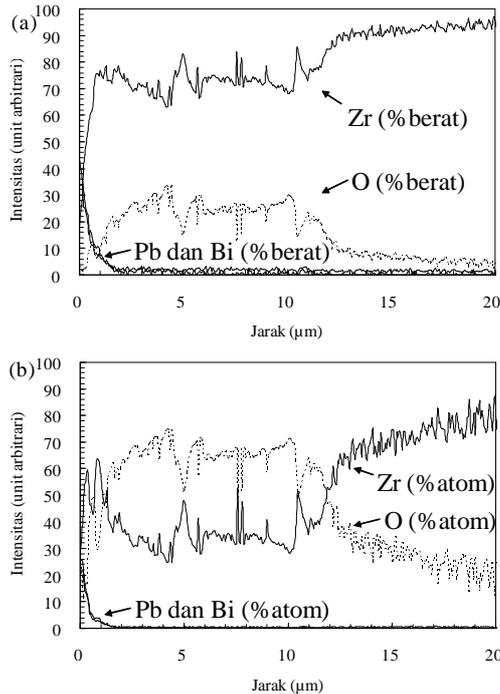
Analisis SEM-EDS

Gambar 5 menunjukkan foto SEM tampak lintang sampel uji dengan Gambar 5(b) dan Gambar 5(c) merupakan perbesaran dari tanda lingkaran pada Gambar 5(a). Tampak jelas bahwa bekuan *LBE* telah mengisi daerah permukaan sampel uji yang terlepas ke cairan *LBE* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5(b). Hal ini menunjukkan telah terjadi penetrasi *LBE* ke dalam matriks sampel uji ZrNbMoGe selama pengujian korosi. Gambar 5(c) menunjukkan dengan jelas lapisan tipis yang terbentuk di atas permukaan sampel uji. Tampak bahwa lapisan tipis ini tidak rata dengan penetrasi *LBE* pada beberapa bagian.

Gambar 6 menunjukkan foto SEM tampak lintang sampel uji dari perbesaran Gambar 5(c) dengan fokus pada lapisan tipis yang terbentuk di atas permukaan sampel. Tampak jelas bahwa jejak lapisan tipis yang terbentuk ini memiliki ketebalan sekitar 3 µm



Gambar 6. Foto SEM perbesaran dari Gambar 5 dengan fokus pada lapisan yang terbentuk di atas permukaan sampel uji



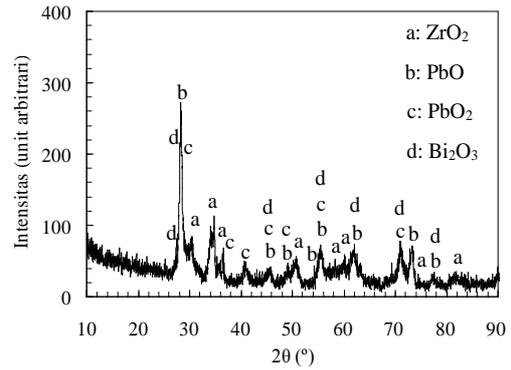
Gambar 7. Analisis atomik EDS dengan linescan ditunjukkan pada Gambar 6 sampel uji ZrNbMoGe : (a). persen berat dan (b). persen atom

hingga 10 μm. Terlihat tanda-tanda keretakan pada lapisan tipis yang terbentuk ini serta jejak terlepasnya sebagian lapisan tipis ini ke cairan LBE. Tampak juga bahwa pada beberapa bagian permukaan lapisan tipis telah terjadi penetrasi LBE.

Gambar 7 menunjukkan analisis atomik EDS dengan garis analisis ditunjukkan pada Gambar 6. Gambar 7(a) menunjukkan analisis persen berat dan Gambar 7(b) menunjukkan analisis persen atom. Tampak bahwa lapisan tipis ini terdiri dari unsur zirkonium (Zr) dan oksigen (O). Hasil analisis memperlihatkan bahwa puncak oksigen terbentuk dengan kedalaman sekitar 10 μm yang menunjukkan ketebalan lapisan oksida yang dianalisis. Dari hasil karakterisasi EDS pada Gambar 7(a) dan Gambar 7(b) ini dapat dianalisis bahwa lapisan yang terbentuk di atas permukaan sampel uji ZrNbMoGe selama uji korosi adalah lapisan oksida zirkonium. Diprediksi dari analisis persen atom yang ditunjukkan pada Gambar 7(b) bahwa lapisan oksida zirkonium yang terbentuk adalah ZrO₂. Hasil analisis EDS pada Gambar 7 juga menunjukkan bahwa tidak terjadi penetrasi atom Pb-Bi ke dalam matriks sampel uji ZrNbMoGe selama pengujian korosi.

Analisis XRD

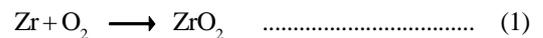
Gambar 8 menunjukkan analisis XRD sampel uji. Tampak bahwa hasil uji XRD menunjukkan terbentuknya zirkonium oksida (ZrO₂) diatas permukaan sampel uji. Selain terbentuknya ZrO₂ tampak juga adanya oksida LBE seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Oksida LBE yang terdeteksi ini merupakan bagian yang tetap



Gambar 8. Analisis XRD sampel setelah uji korosi

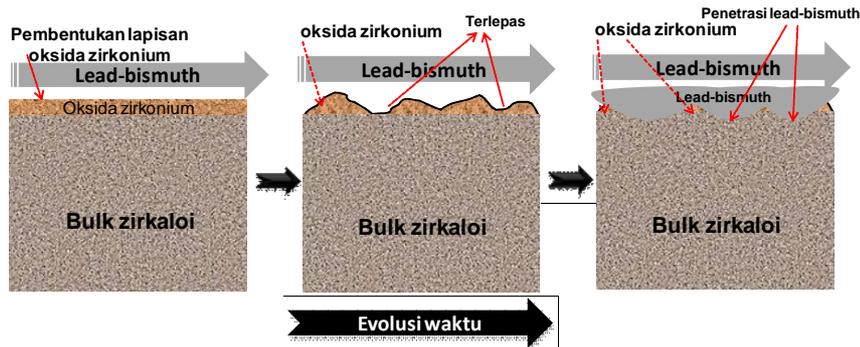
menempel di atas permukaan sampel uji walaupun sudah dibenamkan untuk dibersihkan di dalam cairan gliserin sebelum dilakukannya analisis XRD. Hasil analisis XRD ini menunjukkan bahwa selama pengujian korosi di dalam cairan LBE telah terbentuk lapisan zirkonium oksida (ZrO₂) di atas permukaan paduan ZrNbMoGe yang hal ini juga memperkuat analisis SEM-EDS.

Uji korosi paduan zirkonium ZrNbMoGe di dalam cairan LBE pada percobaan ini telah dilakukan dengan kadar konsentrasi oksigen 1 x 10⁻⁶ %berat dan suhu 550 °C. Hasil pengujian menunjukkan bahwa telah terbentuk lapisan oksida zirkonium (ZrO₂) di atas permukaan sampel uji. Namun, hasil analisis juga menunjukkan adanya bagian permukaan sampel uji yang terlepas ke cairan LBE dan penetrasi cairan LBE ke dalam bagian tersebut dan membentuk korosi pitting. Analisis fenomena korosi ini dideskripsikan pada Gambar 8. Skema yang ditunjukkan pada Gambar 8 ini menggambarkan bahwa pada saat awal interaksi paduan zirkonium dengan cairan LBE terjadi pembentukan lapisan oksida zirkonium. Adapun reaksi kimia pembentukan oksida tersebut, seperti ditunjukkan pada Persamaan (1).



Namun, zirkonium yang memiliki karakteristik mudah teroksidasi membentuk lapisan oksida zirkonium yang cukup tebal di atas permukaan paduan zirkonium dengan ketebalan > 10 μm. Bertambahnya waktu interaksi paduan zirkonium dengan cairan LBE menyebabkan lapisan oksida zirkonium bertambah tebal. Hal ini menyebabkan terjadinya keretakan pada lapisan oksida zirkonium yang terbentuk sehingga mudah terlepas. Selain itu interaksi lapisan oksida zirkonium yang cukup tebal tersebut dengan cairan berat LBE yang memiliki densitas tinggi (10 kali lipat densitas air) semakin mempercepat terlepasnya lapisan oksida zirkonium ke dalam cairan LBE. Terlepasnya sebagian besar lapisan oksida zirkonium ini menyebabkan mudahnya cairan LBE penetrasi ke dalam matriks paduan zirkonium.

Perilaku korosi paduan zirkonium di dalam cairan LBE juga telah dilaporkan oleh peneliti sebelumnya [10].



Gambar 8. Skema proses korosi paduan zirkonium ZrNbMoGe di dalam cairan LBE (konsentrasi oksigen = 1×10^{-6} %berat dan suhu LBE = 550 °C)

Dalam laporannya menyebutkan bahwa paduan zirkonium Zr-4 yang telah di pra-oksidasi sebelumnya telah mengalami pelepasan lapisan oksida zirkonium ke dalam cairan LBE pada suhu 650 °C. Selain itu diprediksi terjadinya disolusi unsur Zr ke dalam cairan LBE akibat karakteristik solubilitas zirkonium yang tinggi pada cairan LBE khususnya pada suhu tinggi [10]. Sejalan dengan penelitian tersebut, hasil penelitian perilaku korosi paduan zirkonium ZrNbMoGe yang telah dilakukan ini menunjukkan gambaran umum proses berkesinambungan terbentuk dan terlepasnya lapisan oksida zirkonium dengan dibarengi penetrasi LBE ke dalam matriks paduan zirkonium ZrNbMoGe.

Hal ini karena terjadi kompetisi antara penyembuhan mandiri (*self healing*) paduan zirkonium akibat terbentuknya lapisan oksida zirkonium dan terlepasnya lapisan tersebut dengan dibarenginya penetrasi LBE. Dapat diprediksi bahwa untuk interaksi dalam jangka waktu panjang maka akan terjadi penipisan material paduan zirkonium akibat fenomena tersebut.

KESIMPULAN

Investigasi kompatibilitas paduan zirkonium ZrNbMoGe dalam cairan *Lead-Bismuth Eutectic* (LBE) pada suhu 550 °C dengan kadar konsentrasi oksigen 1×10^{-6} %berat selama 312 jam telah dilakukan. Hasil pengujian memperlihatkan jejak pembentukan lapisan oksida zirkonium di atas permukaan sampel yang kemudian terlepas. Hal ini menunjukkan bahwa dalam waktu yang relatif singkat paduan zirkonium telah mengkonsumsi cukup banyak oksigen di dalam cairan LBE dengan membentuk lapisan oksida zirkonium di atas permukaan sampel. Namun terjadi juga penetrasi dangkal LBE ke dalam matriks ZrNbMoGe.

Hal ini utamanya disebabkan oleh terlepasnya lapisan oksida zirkonium dari permukaan paduan zirkonium. Ini dikarenakan pembentukan lapisan oksida zirkonium yang cepat dan relatif tebal di atas permukaan sampel yang kemudian menyebabkan dalam waktu relatif singkat lapisan oksida tersebut terlepas dari permukaan bahan. Proses terbentuk dan terlepasnya

lapisan oksida zirkonium dengan dibarenginya penetrasi LBE yang berkesinambungan menyebabkan penipisan material paduan zirkonium ZrNbMoGe untuk interaksi dalam jangka waktu yang panjang. Fenomena ini menunjukkan bahwa paduan zirkonium ini tidak kompatibel dengan cairan logam berat LBE yang digunakan dalam sistem reaktor nuklir sehingga tidak cocok digunakan sebagai kelongsong bahan bakar dan struktur LFR dan ADS.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi yang telah mendanai program pemagangan riset terkait penelitian ini serta Dr. Georg Müller (*Deputy Director of KIT/IHM*) dan Dr. Alfons Weisenburger (*Group Leader of GESA-Gepulste Elektronen Strahl Anlage*) atas kesediaannya menerima kegiatan pemagangan riset penulis serta bantuan dan dukungannya selama kegiatan penelitian di *Institute for Pulsed Power and Microwave Technology-Karlsruhe Institute of Technology Germany*.

DAFTAR ACUAN

- [1]. U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, (2002)
- [2]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA)-TECDOC-1348, *Power Reactors and Sub-Critical Blanket Systems with Lead and Lead-Bismuth as Coolant and/or Target Material*, (2003)
- [3]. NEA-NUCLEAR ENERGY AGENCY, *Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-Hydraulics and Technologies*, OECD-NEA, (2007) 6195
- [4]. C. FAZIO, G. BENAMATI, C. MARTINI, G. PALOMBARINI, *Journal of Nuclear Materials*, **296** (2001) 243

- [5]. G. BENAMITI, C. FAZIO, H. PIANKOVA, A RUSANOV, *Journal of Nuclear Materials*, **301** (2002) 23
- [6]. A. K. RIVAI, M. TAKAHASHI, *Progress in Nuclear Energy*, **50** (2008) 560
- [7]. A. K. RIVAI, M. TAKAHASHI, *Journal of Nuclear Materials*, **398** (2010) 146
- [8]. B. BANDRIYANA, AGUS HADI ISMOYO dan PARIKIN, *Jurnal Sains Materi Indonesia, Edisi Khusus Desember 2008*, (2008) 93-98
- [9]. IMAN KUNTORO dan B. BANDRIYANA, *Journal Teknologi Reaktor Tri Dasa Mega*, **13** (1) (2011) 62-73
- [10]. ERIC P. LOEWEN, HANNAH J. YOUNT, KEVIN VOLK, ARVIND KUMAR, *Journal of Nuclear Materials*, **321** (2003) 269-280