

INVESTIGASI KETAHANAN KOROSI BAJA AISI 316 PADA CAIRAN LOGAM BERAT Pb-Bi EUTEKTIK 550°C SELAMA 312 JAM

Abu Khalid Rivai¹, Annette Heinzel² dan Fabian Lang²

¹Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir-BATAN, Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang Selatan, 15314
Telp: 021-756-2860 ext. 4024; Fax: 021-756-0926

²Pulsed Power and Microwave Technology - Karlsruhe Institute of Technology Germany
Email: rivai.abukhalid@batan.go.id

ABSTRAK

INVESTIGASI KETAHANAN KOROSI BAJA AISI 316 PADA CAIRAN LOGAM BERAT Pb-Bi EUTEKTIK 550°C SELAMA 312 JAM. Pb-Bi eutektik merupakan pendingin salah satu kandidat utama reaktor masa depan di dunia (Generation IV reactors) yaitu LFR (Lead alloy-cooled Fast Reactor) sekaligus merupakan material target spalasi untuk ADS (Accelerator Driven Transmutation System). Pengembangan jenis sistem reaktor nuklir ini bertemu dengan sifat cairan Pb-Bi eutektik yang 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 Pb-Bi eutektik khususnya pada temperatur tinggi merupakan isu utama dalam pengembangan LFR dan ADS. Telah dilakukan uji korosi material baja AISI 316 dalam cairan Pb-Bi eutektik pada temperatur 550°C. Uji korosi ini dilakukan selama 312 jam dengan konsentrasi oksigen 1×10^{-6} % berat. Hasil uji korosi menunjukkan bahwa tidak ada penetrasi Pb-Bi yang terjadi ke dalam matriks spesimen AISI 316. Lebih lanjut lagi, telah terbentuk lapisan oksida besi pada permukaan luar dan lapisan oksida krom pada lapisan dalam yang melindungi spesimen baja AISI316 dari serangan korosi dan disolusi Pb-Bi.

Kata kunci: Pb-Bi, korosi, baja AISI 316, LFR, ADS

ABSTRACT

INVESTIGATION ON CORROSION RESISTANCE OF AISI316 STEEL IN MOLTEN HEAVY METALS Pb-Bi EUTECTIC AT 550°C FOR 312 HOURS. Pb-Bi eutectic 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 development of these nuclear reactor systems meets with the corrosive characteristic of molten Pb-Bi to metals as constituent materials of fuel cladding and structural of the reactors. Therefore, development of fuel cladding and structural materials in Pb-Bi eutectic environment especially at high temperature is a critical issue for the deployment of LFR and ADS. Corrosion test of AISI 316 steel in molten Pb-Bi eutectic at 550°C has been carried out. The test was done for 312 hours with an oxygen concentration of 1×10^{-6} wt%. The corrosion test result showed that no penetration of Pb-Bi into the matrix of the specimen occurred. Furthermore, an iron oxide outer-layer and an chrom oxide inner-layer on the surface of the specimen were formed which protected the AISI 316 steel specimen from corrosion and dissolution attack of Pb-Bi.

Keywords: Pb-Bi, corrosion, AISI 316 steel, LFR, ADS

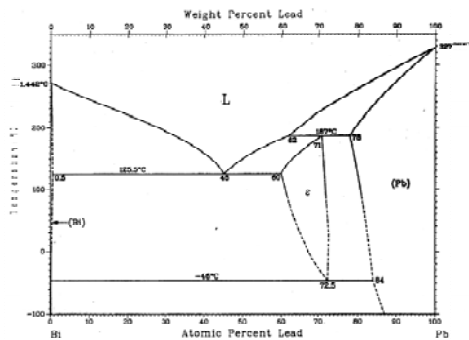
PENDAHULUAN

Cairan logam berat Pb-Bi eutektik merupakan pendingin pada jenis reaktor LFR (*Lead alloy-cooled Fast Reactor*) yang merupakan salah satu kandidat reaktor masa depan di dunia (reaktor generasi IV) ^(1,2) dan sekaligus sebagai material target spalasi pada ADS (*Accelerator Driven Transmutation System*) ⁽²⁾. Cairan logam berat Pb-Bi eutektik sebagai pendingin reaktor memiliki keunggulan dari sisi neutronik, termal hidrolik dan tidak bersifat eksplosif jika berinteraksi dengan udara dan air ^(1,2). Penggunaan cairan logam berat Pb-Bi eutektik ini memungkinkan reaktor jenis LFR ini memanfaatkan uranium alam serta membakar limbah radioaktif secara optimal karena penggunaan neutron cepat (*fast neutrons*) dalam

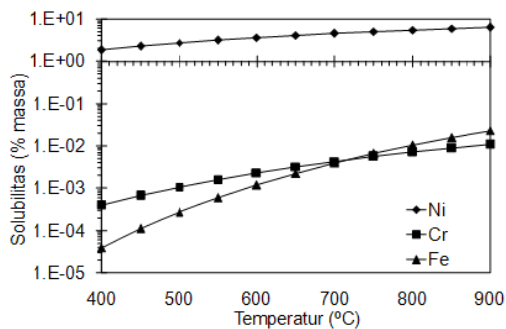
operasinya. Selain itu penelitian cairan logam berat Pb-Bi eutektik semakin gencar dilakukan di dunia terkait dengan pengembangan teknologi ADS yang didesain menggunakan Pb-Bi eutektik sebagai target spalasi ⁽²⁾. Pb-Bi eutektik yang digunakan adalah paduan 44.5% berat Pb dan 55.5% berat Bi. Pb-Bi eutektik ini memiliki titik leleh cukup rendah yaitu 125°C sehingga paduan ini disebut eutektik yang berasal dari bahasa Yunani “eutektos” yang berarti mudah meleleh. Adapun titik didih Pb-Bi eutektik ini cukup tinggi yaitu 1670°C. Gambar 1 menunjukkan diagram fasa paduan Pb dan Bi ⁽³⁾.

Isu utama dalam pengembangan LFR dan ADS di dunia sampai saat ini adalah pengembangan bahan yang tahan korosi di lingkungan Pb-Bi eutektik ^(3,4,5). Pb-Bi memiliki karakteristik bersifat korosif terhadap baja karena menyebabkan unsur-unsur metal terutama nikel, krom dan besi

mengalami disolusi ke dalam cairan Pb-Bi [3,4,5]. Solubilitas metal penyusun dasar baja Fe, Cr, dan Ni dalam cairan Pb-Bi eutektik pada temperatur 400-900°C ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram Fasa Pb-Bi



Gambar 2. Profil solubilitas metal nikel, kromium dan besi dalam Pb-Bi eutektik ⁽⁶⁾

Gambar 2. memperlihatkan bahwa solubilitas logam-logam Ni, Cr dan Fe cukup tinggi pada cairan Pb-Bi eutektik. Solubilitas logam-logam tersebut meningkat dengan meningkatnya temperatur Pb-Bi. Kebalikan dengan sifat alami cairan Pb-Bi eutektik yang korosif pada temperatur tinggi, reaktor LFR di dunia saat ini didesain beroperasi pada temperatur minimal 550°C agar dapat memiliki tingkat efisiensi yang cukup untuk mencapai nilai ekonomis yang bersaing dengan jenis reaktor nuklir lainnya. Dapat dianalisis juga bahwa unsur nikel merupakan logam yang paling tinggi solubilitasnya diantara logam-logam penyusun baja lainnya. Namun disisi lain nikel merupakan salah satu unsur utama pada baja austenitik seperti baja 316 (SS 316) yang merupakan salah satu kandidat material kelongsong bahan bakar dan struktur reaktor berpendingin logam berat ⁽⁷⁾. Berhubungan dengan hal tersebut maka tujuan pada penelitian ini adalah untuk menyelidiki ketahanan korosi baja jenis 316 yaitu AISI 316 dalam cairan Pb-Bi eutektik pada temperatur 550°C selama 312 jam. Uji korosi selama tiga ratusan jam ini ditujukan untuk memperoleh pemahaman mengenai perilaku korosi baja AISI 316 pada saat awal kondisi reaktor beroperasi.

TATAKERJA

Bahan

Bahan yang diuji korosi dalam percobaan ini adalah baja AISI 316. Komposisi kimia bahan baja uji korosi ini dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini. Baja jenis 316 ini banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti untuk *heat exchanger*, alat-alat laboratorium dan salah satu kandidat material reaktor berpendingin logam berat.

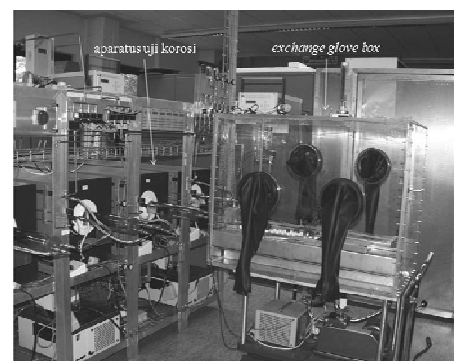
Tabel 1. Komposisi kimia bahan uji (% berat)

Fe	Balance
Cr	16,5-18,5
Ni	10,5-13,5
Mo	2,0-2,5
Ti	0,70
C	0,08

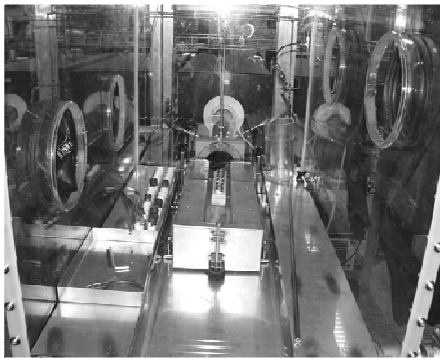
Alat

Aparatus uji korosi cairan Pb-Bi eutektik yang digunakan adalah tipe statik (*stagnant*). Gambar aparatus uji korosi beserta *exchange glove box* dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabung reaksi pada aparatus uji korosi ini terbuat dari bahan quartz berbentuk silinder. Selama pengujian dilakukan 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 Pb-Bi eutektik 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. Sampel uji ditempatkan di dalam sebuah krusibel yang telah berisi cairan Pb-Bi eutektik.



Gambar 3. Gambar aparatus uji korosi cairan Pb-Bi eutektik dan *exchange glove box*



Gambar 4. Susunan peralatan di dalam *exchange glove box*

Cara Kerja

Pengkondisian aparatus uji korosi dilakukan sebelum uji korosi yaitu pengkondisian temperatur dan kadar konsentrasi oksigen dengan cairan Pb-Bi di dalam krusibel keramik sudah ditempatkan di dalam tabung reaksi. Setelah kedua parameter tercapai sampel uji yaitu baja AISI 316 dimasukkan ke dalam krusibel melalui *exchange glove box* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. *Exchange glove box* ini di-vakum terlebih dahulu sebelum dihubungkan ke tabung reaksi. Hal ini dilakukan agar ketika penempatan sampel uji ke dalam krusibel tidak akan mengubah kadar oksigen yang sudah dikondisikan sebelumnya. Konsentrasi oksigen dalam percobaan ini adalah 1×10^{-6} %berat. Nilai konsentrasi oksigen ini di atas nilai potensial oksigen pembentukan oksida besi (*magnetite*: Fe_3O_4) oksida krom (*spinel*: Cr_2O_3) sehingga diharapkan terbentuk lapisan-lapisan oksida tersebut sebagai lapisan protektor dari serangan korosi. Lebih lanjut lagi, nilai konsentrasi oksigen ini masih jauh di bawah nilai potensial oksigen pembentukan oksida timbal (PbO) sehingga menekan pembentukan kerak oksida timbal pada cairan Pb-Bi eutektik.

Tabel 2. Kondisi percobaan uji korosi

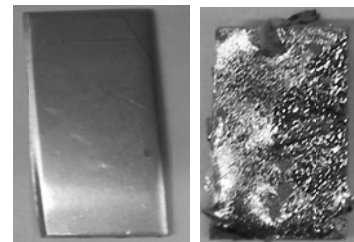
Parameter	Keterangan
Jenis Logam Cair	Pb-Bi eutektik
Temperatur Cairan (°C)	550
Konsentrasi O ₂ (%berat)	1×10^{-6}
Waktu Uji Korosi (jam)	312
Bahan Uji	Baja AISI 316

Perilaku korosi dari bahan uji dianalisis menggunakan *Optical Microscope* (OM) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM)-*Energy Dispersive X-Ray Microanalysis* (EDX). Sebelum analisis tersebut, spesimen baja AISI 316 yang sudah diuji di dalam cairan Pb-Bi pada temperatur 550°C selama 312 jam tersebut dipotong di tengah, dimasukkan kedalam resin plastik cair hingga resin tersebut membeku dan mengeras kemudian dipoles

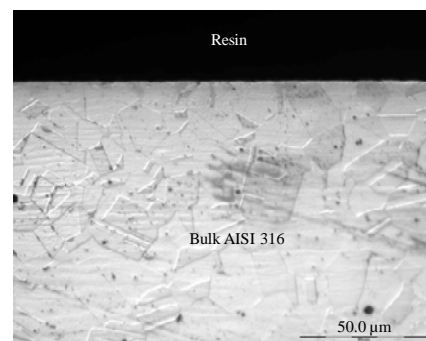
permukaannya (*polishing*) menggunakan mesin grinda dengan butiran permata polikristal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

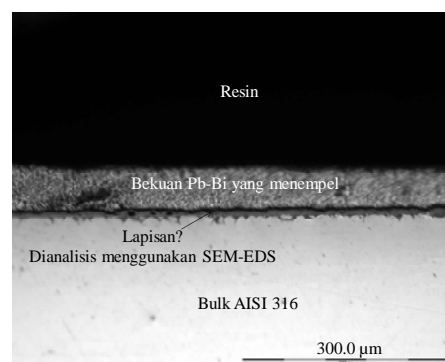
Gambar 5 menunjukkan foto spesimen AISI 316 sebelum dan setelah uji korosi. Dapat terlihat bahwa sebagian besar dari sampel tertutupi oleh bekuan Pb-Bi. Sampel uji korosi tersebut kemudian dipotong di tengah untuk analisis mikrostruktur lebih lanjut. Tampang lintang sampel akan tertutupi oleh bekuan Pb-Bi 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*.



Gambar 5. Foto spesimen baja AISI 316 sebelum dan sesudah uji korosi



(a)

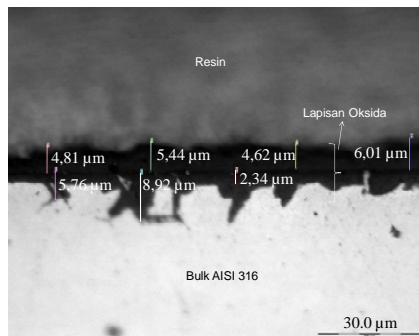


(b)

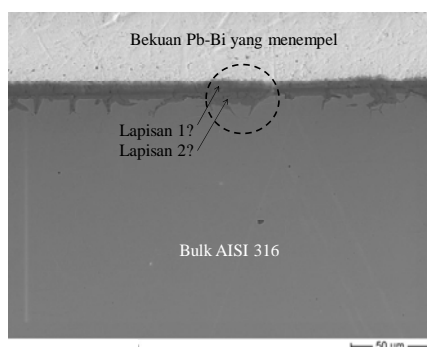
Gambar 6. Mikrograf mikroskop optik sampel (a) sebelum uji dan (b) setelah Uji korosi

Gambar 6. menunjukkan mikrograf mikroskop optik sampel sebelum uji korosi dan sesudah uji korosi. Dapat dianalisis dari kedua

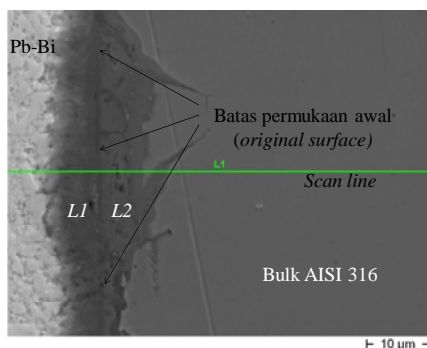
mikrograf ini bahwa setelah pengujian korosi pada cairan Pb-Bi eutektik dengan temperatur 550°C selama 312 jam dan konsentrasi oksigen 1×10^{-6} %berat maka terbentuk lapisan di atas permukaan sampel.



Gambar 7. Mikrograf mikroskop optik sampel setelah uji korosi



(a)



(b)

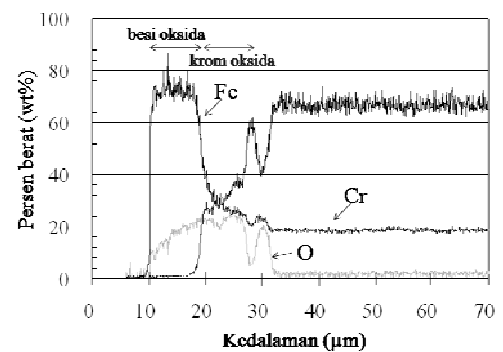
Gambar 8. Mikrograf SEM sampel AISI 316 dengan gambar (b) merupakan perbesaran gambar (a) di area tanda lingkaran putus-putus

Adapun untuk mikrograf mikroskop optik untuk perbesaran lebih tinggi ditunjukkan pada Gambar 7. Mikrograf ini menunjukkan lebih jelas pembentukan dua lapisan di atas permukaan sampel. Dapat dianalisis bahwa ketebalan lapisan atas adalah $\sim 4.6 - 6 \mu\text{m}$ sedangkan lapisan bawah memiliki ketebalan yang lebih heterogen dibanding lapisan atas yaitu $\sim 2.3 - 8.9 \mu\text{m}$. Lebih detail mengenai kandungan lapisan-lapisan ini lebih lanjut

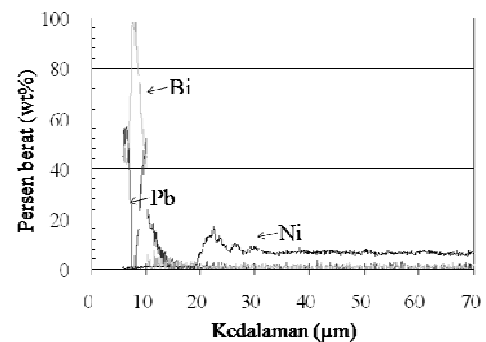
di lakukan analisis metalografi menggunakan SEM-EDS.

Gambar 8 menunjukkan mikrograf SEM tampang lintang sampel dengan gambar (b) merupakan perbesaran dari gambar (a). Tampak jelas terbentuknya dua lapisan di atas permukaan sampel. Lebih lanjut lagi, Gambar 8 (b) dengan jelas menunjukkan batas awal permukaan sampel (*original surface*).

Tampak bahwa lapisan dalam membentuk akar curam ke dalam matriks sampel. Mikrograf SEM ini menunjukkan bahwa kedua lapisan tipis tersebut menempel dengan baik pada permukaan sampel baja AISI 316 tanpa ada penetrasi Pb-Bi maupun keretakan pada strukturnya.



(a)

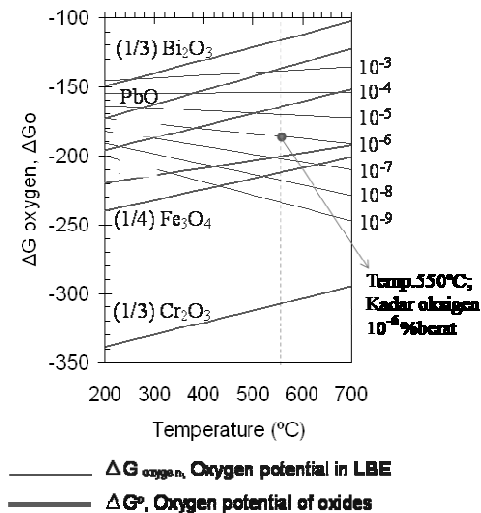


(b)

Gambar 9. Analisis atomik EDS sampel AISI 316 (a) Fe, Cr, O dan (b) Pb, Bi, Ni

Gambar 9 menunjukkan analisis atomik EDS dengan garis analisis ditunjukkan pada Gambar 8. Hasil analisis Gambar 9 (a) menunjukkan bahwa lapisan luar yang terbentuk adalah lapisan oksida besi. Terlihat puncak atom Fe dan O pada kedalaman sekitar 10-20 μm . Dari hasil karakterisasi EDS pada Gambar 9 (a) juga dapat dianalisis bahwa lapisan yang terbentuk pada lapisan dalam adalah oksida krom. Terlihat puncak atom Cr dan O pada kedalaman sekitar 20-30 μm . Hasil analisis ini menunjukkan bahwa dengan pengujian korosi pada cairan Pb-Bi eutektik 550°C dengan kadar oksigen 1×10^{-6} selama 312 jam terbentuk lapisan luar besi oksida dan lapisan dalam

krom besi diatas permukaan baja AISI 316. Pada Gambar 9 (b) terlihat bahwa secara umum atom Pb-Bi tidak menembus ke dalam lapisan luar oksida besi. Namun kalau dianalisis lebih lanjut dari Gambar 9 (b) terlihat atom Pb sedikit masuk ke dalam lapisan oksida besi di kedalaman 10-11 μm . Tampak bahwa lapisan oksida yang bersifat sedikit poros dapat ditembus sedikit oleh atom Pb pada bagian permukaannya. Dari Gambar 9 (b) juga dapat dianalisis bahwa atom Ni yang memiliki sifat solubilitas yang tinggi di dalam Pb-Bi tidak mengalami disolusi ke dalam Pb-Bi. Namun dapat dianalisis lebih lanjut dari Gambar 9 (b) bahwa atom Ni memiliki puncak disekitar kedalam 20-30 μm . Hal ini berarti bahwa atom-atom Ni bergerak dari matriks baja AISI 316 ke arah Pb-Bi dan terkumpul di lapisan oksida krom. Atom-atom Ni dalam pengujian korosi yang selama 312 jam ini tampak tertahan di lapisan oksida krom dan tidak ditemukan sampai ke lapisan oksida besi. Dari hasil ini ada kecenderungan bahwa untuk sementara dalam waktu relatif pendek atom-atom Ni dapat ditahan solubilitasnya oleh lapisan oksida krom.



Gambar 10. Diagram Ellingham untuk potensial pembentukan oksida-oksida

Uji korosi baja AISI 316 dalam penelitian ini telah dilakukan pada kadar konsentrasi oksigen 1×10^{-6} %berat di dalam cairan Pb-Bi eutektik dengan temperatur 550°C. Dari Gambar 10. yang menunjukkan diagram Ellingham untuk potensial pembentukan oksida-oksida dapat dianalisis bahwa kondisi uji korosi ini berada diatas nilai potensial oksigen untuk pembentukan oksida besi (*magnetite*: Fe_3O_4) dan (*spinnel*: Cr_2O_3). Hasil percobaan menunjukkan bahwa telah terbentuk dua lapisan di atas permukaan sampel yaitu lapisan oksida besi pada lapisan luar dan lapisan oksida krom pada lapisan dalam. Dari analisis diagram Ellingham ini dapat diprediksi bahwa lapisan oksida besi yang terbentuk terutama adalah lapisan *magnetite*

(Fe_3O_4) dan lapisan oksida krom yang terbentuk terutama adalah lapisan *spinel* (Cr_2O_3).

Terkait dengan penelitian ketahanan korosi baja AISI 316 di dalam cairan Pb-Bi eutektik beberapa peneliti telah melaporkannya. C. Fazio, dkk⁽⁸⁾ melaporkan bahwa telah terbentuk lapisan tipis oksida sekitar 2-4 μm yang mengandung unsur-unsur Fe, Cr dan O di atas permukaan sampel AISI 316L setelah diuji korosi pada cairan Pb-Bi kondisi statik dengan temperatur 476°C selama 1200 jam. Dalam laporan tersebut juga dijelaskan bahwa terjadi pengkayaan/peningkatan unsur Ni di daerah batas permukaan antara lapisan oksida dan matriks sampel AISI 316L. Benamiti, dkk.⁽⁹⁾ melaporkan bahwa sampel baja AISI 316L yang diuji pada cairan Pb-Bi eutektik statik temperatur 550°C dengan kadar oksigen 1.17×10^{-3} %berat selama 1500 jam menunjukkan terbentuknya lapisan tipis yang utamanya mengandung Fe dan O dengan sedikit kandungan Cr dan Ni. Namun lebih lanjut dalam laporan tersebut dijelaskan bahwa untuk pengujian korosi selama 3000 jam terjadi penetrasi Pb-Bi ke dalam matriks dengan dibarengi disolusi (pelarutan) unsur-unsur Ni, Cr dan Fe. Dalam penelitian ini ditunjukkan terjadinya pembentukan lapisan oksida di atas permukaan sampel AISI 316 yaitu lapisan oksida besi dan lapisan oksida krom. Lapisan-lapisan ini menempel dengan baik pada permukaan sampel. Namun pengujian yang dilakukan ini relatif singkat yaitu tiga ratusan jam dengan tujuan untuk meneliti perilaku ketahanan korosi baja AISI 316 pada awal operasi reaktor. Hal ini menunjukkan bahwa untuk waktu yang relatif singkat baja AISI 316 memiliki ketahanan korosi yang baik dengan terbentuknya lapisan pelindung yaitu lapisan oksida besi dan lapisan oksida krom yang melindungi bahan dari serangan korosi-disolusi Pb-Bi. Namun indikasi terjadinya disolusi (pelarutan) nikel ditemukan pada baja AISI 316 ini walaupun untuk waktu interaksi dengan cairan Pb-Bi yang relatif singkat. Dapat diprediksi dari hal tersebut dan laporan-laporan sebelumnya bahwa serangan korosi-disolusi Pb-Bi dapat menembus matriks baja AISI 316 untuk waktu interaksi dengan Pb-Bi yang lebih lama.

KESIMPULAN

Investigasi ketahanan korosi baja AISI 316 dengan dibenamkan dalam cairan Pb-Bi eutektik pada temperatur 550°C dengan kadar konsentrasi oksigen 1×10^{-6} %berat selama 312 jam telah dilakukan. Telah terbentuk lapisan oksida besi dan lapisan oksida krom yang diprediksi merupakan *magnetite* (Fe_3O_4) dan *spinnel* (Cr_2O_3). Lapisan-lapisan ini menunjukkan kemampuan menahan serangan korosi dari Pb-Bi dan mencegah terjadinya disolusi (pelarutan) atom-atom metal dari baja AISI 316 tersebut ke Pb-Bi. Hasil uji korosi ini

menunjukkan bahwa untuk interaksi dalam waktu relatif singkat yaitu tiga ratusan jam maka baja AISI 316 memiliki ketahanan korosi yang cukup baik dari serangan Pb-Bi karena pembentukan lapisan-lapisan pelindung yaitu oksida besi dan oksida krom di atas permukaan material tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih 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 PUSTAKA

1. U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, "A technology roadmap for Generation IV nuclear energy systems", U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, (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, 6195, (2007).
4. A. K. Rivai, M. Takahashi, Progress in Nuclear Energy, Vol. 50, Page 560, (2008).
5. A. K. Rivai, M. Takahashi, Journal of Nuclear Materials, Vol. 398, Page 146, (2010).
6. A. K. Rivai, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, hal 35-43, Yogyakarta 19 Juli, (2011).
7. Waltar, A.E, and Reynolds A.B., Fast Breeder Reactors, Pergamon Press, (1981).
8. C. Fazio, G. Benamati, C. Martini, G. Palombarini, Journal of Nuclear Materials, Vol. 296, Page 243, (2001).

9. G. Benamati, C. Fazio, H. Piankova, A. Rusanov, Journal of Nuclear Materials, Vol. 301, Page 23, (2002).

TANYAJAWAB

Suyamto

- Mengapa dalam judul dicantumkan angka 550°C dan 312 jam. Apa bedanya misalkan 551°C dan 310 jam?
- Pertumbuhan energi listrik dari PLTN (dari dunia) setahu saya justru turun, tolong dikomentari

Abu Khalid Rivai

- Angka tersebut menunjukkan percobaan ini untuk menguji bahan tersebut untuk sistem LFR yang secara umum disajikan didunia yaitu temperatur kelongsong 550°C. Kemudian angka 312 jam adalah untuk menegaskan bahwa perilaku ketahanan korosi yang diuji adalah untuk waktu relatif singkat yaitu tiga ratusan jam.
- Dari data yang diperoleh menunjukkan bahwa kebutuhan energi listrik akumulatif dari PLTN di dunia meningkat, mungkin saja negara-negara tertentu menurun tetapi data menunjukkan secara umum di dunia meningkat (akumulatif).

Tjipto

- Pada temperatur 550°C pada SS 316 akan terjadi peristiwa sensitisasi sehingga Cr cenderung bersenyawa dengan C menjadi CrC. Konsentrasi pembentukan potensial laju Cr₂O₃, mohon penjelasan.

Abu Khalid Rivai

- Pada temperatur 550°C dalam percobaan ini kondisi konsentrasi oksigen dikontrol dengan berada pada diatas potensial oksigen besi oksida dan potensial oksigen krom oksida sesuai dengan prediksi terbentuk lapisan-lapisan tersebut. Juga konsentrasi oksigen tersebut relatif kecil jauh di bawah potensial oksigen timbal oksida. Dalam percobaan ini tidak terdeteksi adanya pembentukan CrC pada bahan tersebut.