

ANALISIS MIKROSTRUKTUR DAN KIMIA TERHADAP HASIL KOROSI PADA INGOT AlFeNiMg

Anwar Muchsin, Futichah

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Batan

Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan 15314

E-mail: anwar_muchsin@ymail.com

(Naskah diterima: 23 April 2013, disetujui: 26 Mei 2013)

ABSTRAK

ANALISIS MIKROSTRUKTUR DAN KIMIA TERHADAP HASIL KOROSI PADA INGOT AlFeNiMg. Mikrostruktur dan komposisi kimia sangat berpengaruh terhadap ketahanan korosi paduan aluminium. Dalam penelitian ini telah dilakukan analisis mikrostruktur dan komposisi kimia pada hasil korosi ingot AlFeNiMg. Bahan yang digunakan adalah ingot paduan AlFeNi yang telah ditambah dengan Mg, dengan komposisi unsur pepadu 1% berat Fe, 1% berat Ni dan 1% berat Mg. Ingot dipanaskan dalam tungku pada temperatur 500°C selama 1 jam kemudian didinginkan dengan cepat dalam air dan dianil pada temperatur 500°C selama 1,5 jam. Paduan AlFeNiMg hasil perlakuan panas selanjutnya dilakukan uji korosi dalam autoclave dengan variasi temperatur 75°C, 125°C, 175°C dan waktu uji 9 hari (216 jam), 18 hari (432 jam) dan 27 hari (648 jam). Sampel hasil uji korosi dilakukan uji metalografi (mikroskop optik, SEM) serta analisis komposisi kimia menggunakan alat SEM-EDS. Hasil analisis mikrostruktur menunjukkan bahwa pada temperatur uji korosi 75°C, 125°C dan 175°C dengan rentang waktu 216 – 648 jam terjadi peningkatan lapisan oksida (korosi) mengikuti korelasi parabolik, dengan persamaan masing-masing $h = 0,008 x^{0,8846}$ untuk temperatur uji 75°C; $h = 1 x 10^{-6}t^2 - 0,0007t + 4,1$ untuk temperatur uji 125°C dan $h = -2 x 10^{-5}t^2 + 0,0227t + 2,3$ untuk temperatur uji 175°C, dengan h adalah tebal lapisan dalam μm dan t adalah waktu uji korosi dalam jam. Temperatur uji korosi 125°C dengan rentang waktu 216 – 648 jam pada paduan menunjukkan sifat paduan AlFeNiMg yang stabil dengan terbentuknya lapis lindung oksida di permukaan logam sangat kompak dan bisa berfungsi sebagai penghambat proses korosi selanjutnya. Dari hasil analisis kimia diperoleh informasi bahwa unsur Fe dan Ni pada logam paduan AlFeNiMg, lebih cenderung membentuk senyawa fasa kedua Al_9FeNi , Al_3Fe dan Al_3Ni . Sedangkan unsur Mg dan Al membentuk senyawa oksida dan hidroksida, dan peran unsur Mg lebih besar dalam membentuk lapis lindung oksida yang stabil, homogen, padat dan kompak.

Kata kunci: Paduan Al, AlFeNiMg, Kimia mikro, Lapis lindung oksida logam.

ABSTRACT

MICROSTRUCTURE AND CHEMICAL ANALYSIS OF CORROSION ON AlFeNiMg INGOT. *Microstructure and chemical composition affect the corrosion resistance of aluminum alloys. In this study an analysis was done on the microstructure and chemical composition of corrosion resulted on AlFeNiMg ingot. The material used in this research is AlFeNi alloy ingot that has been*

augmented by Mg with alloying elements composition of 1 wt% Fe, 1 wt% Ni and 1 wt% Mg. Ingot was heated at a temperature of 500 °C for 1 hour and cooled quickly in water and annealed at a temperature of 500 °C for 1.5 hours. The heat treated AlFeNiMg alloy was further corrosion tested with an autoclave at a temperature variation of 75 °C, 125 °C, 175 °C for 9 days (216 hours), 18 days (432 hours) and 27 days (648 hours) respectively. The corrosion result was prepared for metallographic examination (optical microscopy, SEM) and chemical composition analysis using SEM - EDS. The microstructure examination shows that the corrosion test temperature of 75 °C, 125 °C and 175 °C with a time span of 216-648 hours results in an increase in the oxide layer (corrosion, following a parabolic correlation: $h = 0.008 x^{0.8846}t$ for the corrosion temperature of 75 °C, $h = 1 \times 10^{-6}t^2 - 0.0007t + 4.1$ for the corrosion temperature of 125 °C and $h = -2 \times 10^{-5}t^2 + 0.0227t + 2.3$ for the corrosion temperature of 175 °C, where h is the layer thickness in μm and t is corrosion test time in hour. It is also studied that the corrosion test temperature of 125 °C with a time span of 216-648 hours exhibits stable properties of the AlFeNiMg alloy, which is protected by oxide layer on the surface. The layer is very compact and can serve as a barrier against further corrosion process. The chemical analysis shows that the elements of Fe and Ni in AlFeNiMg alloy are more likely to form Al_3FeNi of the second phase, Al_3Fe and Al_3Ni . The Mg and Al elements, on the other hand, tend to form Mg and Al oxides and hydroxides. Magnesium appears to have greater role in the formation of homogeneous, dense and compact protecting layers of stable oxides.

Keywords: Al Alloy, AlFeNiMg, micro chemistry, protecting metal oxide layer.

PENDAHULUAN

Aluminium adalah logam kedua setelah besi yang banyak digunakan di berbagai bidang industri di seluruh dunia. Biasanya aluminium ini ditambahkan unsur padamu agar kekuatannya meningkat sesuai dengan penggunaannya. Aluminium sangat luas digunakan pada industri antara lain adalah industri konstruksi, rumah tangga, arsitektur, transportasi terutama *automotive* dan pesawat terbang, kapal laut, pesawat luar angkasa serta industri nuklir. Penggunaan paduan aluminium dalam industri nuklir adalah untuk komponen struktur pada berbagai reaktor nuklir khususnya reaktor riset. Komponen struktur bahan bakar nuklir pada reaktor riset digunakan sebagai kelongsong (*cladding*) bahan bakar^[1]. Paduan aluminium seperti paduan AlFeNi telah banyak dilakukan pengkajian untuk digunakan sebagai kelongsong bahan bakar tipe pelat pada reaktor riset oleh beberapa negara di dunia. Hasil kajian menunjukkan bahwa paduan aluminium AlFeNi mempunyai sifat mekanik

dan ketahanan korosi yang relatif baik. Logam Fe dan Ni merupakan unsur padamu yang ditambahkan pada logam aluminium dengan tujuan untuk memperbaiki sifat mekaniknya. Dalam paduan Al-Fe-Ni, logam Fe dan Ni membentuk fasa intermetalik seperti Al_3FeNi , Al_3Fe dan Al_3Ni ^[2,3]. Fasa-fasa ini memberikan pengaruh terhadap peningkatan kekuatan dan kekerasan pada paduan. Untuk meningkatkan ketahanan korosinya biasa ditambahkan logam Mg pada proses pembuatan paduan AlFeNi tersebut sehingga terbentuk paduan AlFeNiMg. Fasa yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh unsur dan kadar padamu yang digunakan dalam paduan.

Salah satu reaktor yang akan menggunakan paduan ini sebagai kelongsong bahan bakarnya adalah reaktor uji material Jules Horowitz Reactor (JHR) yang sekarang sedang dibangun di Cadarache Perancis. Material AlFeNi harus memberikan unjuk kerja yang optimal dalam melindungi bahan bakar jenis UMo 8 gU/cm³ (*curved fuel plate*). Beberapa unjuk kerja

material kelongsong AlFeNi yang harus dipenuhi adalah ketahanan terhadap pengaruh neutron cepat dan termal pada saat irradiasi di reaktor, serta ketahanan terhadap temperatur tinggi. Peningkatan temperatur bahan bakar akan berdampak pada integritas bahan bakar dengan AlFeNi sebagai kelongsong, sehingga laju korosi dan penurunan sifat-sifat mekanik kelongsong AlFeNi harus diketahui karena fenomena ini memicu terjadinya kerusakan pada kelongsong bahan bakar. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan kajian mengenai bagaimana mekanisme terjadinya korosi pada paduan AlFeNi di luar reaktor (*out-pile*) maupun di dalam reaktor (*in-pile*) melalui uji pasca irradiasi^[3,4]. Beberapa model yang memprediksi pembentukan lapisan oksida yang dilakukan dalam kondisi *out-pile* maupun *in-pile* tes. Hal ini semua bermuara pada pencarian hubungan empiris antara ketebalan lapisan oksida dengan waktu uji. Sering terjadi keterbatasan dalam kisaran waktu uji sehingga sulit dilakukan ekstrapolasi serta penelaahan mekanisme perubahan sifat fisis dan kimianya.

Di dalam pengoperasian JHR digunakan air hasil deionisasi (*Deionized water*) atau air bebas mineral sebagai pendingin kelongsong AlFeNiMg^[3]. Oleh karena itu dalam penelitian ini akan dilakukan uji korosi dalam air murni (bebas mineral) terhadap paduan AlFeNi yang telah ditambah unsur Mg. Selanjutnya dilakukan analisis struktur mikro dan kimia pada daerah yang terkorosi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh informasi mengenai mikrostruktur dan unsur apa saja yang memberikan kontribusi dalam pembentukan korosi atau lapis lindung oksida pada permukaan paduan AlFeNiMg.

Parameter pengujian dalam penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan temperatur dengan waktu uji korosi terhadap ingot paduan AlFeNiMg (Al-1%Fe-1%Ni-1%Mg) dalam air murni. Aluminium yang digunakan adalah

aluminium murni 99,9% ditambah unsur pemadu Fe, Ni dan Mg masing-masing 1% berat/berat. Paduan ini dilebur pada tungku busur listrik dengan pengulangan peleburan sebanyak 4 kali pada kuat arus 110 amper, kemudian dilakukan uji korosi dalam air bebas mineral menggunakan alat *autoclave*. Efek yang diamati dari hasil uji korosi AlFeNi adalah laju korosi serta mikrostrukturnya dengan alat mikroskop optik dan mikroskop elektron (SEM) serta untuk menganalisis komposisi kimia pada daerah yang terkorosi digunakan alat SEM-EDS (*Scanning Electron Microscopy- Energy dispersive Spectrometry*).

TATA KERJA

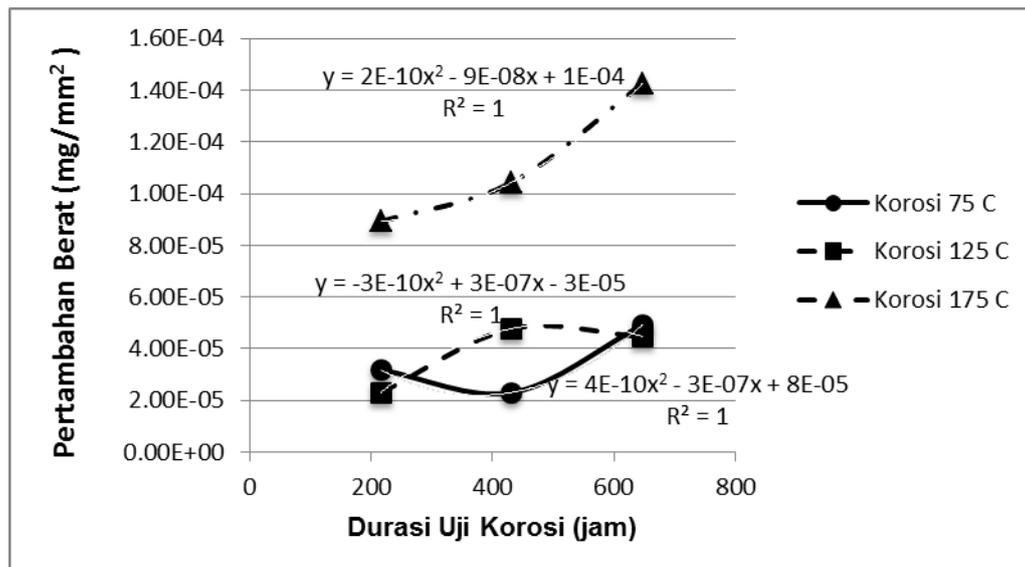
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah ingot paduan AlFeNi yang ditambah dengan Mg. Bahan dasar paduan adalah aluminium murni yang ditambah dengan unsur pemadu 1% berat Fe, 1% berat Ni dan 1% berat Mg. Sebelum dilakukan uji korosi, ingot paduan AlFeNiMg dipanaskan dalam tungku pada temperatur 500°C selama 1 jam kemudian didinginkan dengan cepat dalam air (*quenching*) dan dianil pada temperatur 500°C selama 1,5 jam. Paduan ALFeNiMg hasil perlakuan panas selanjutnya dipotong menjadi 10 bagian dan seluruh permukaan potongan digerinda secara bertahap. Ukuran kekasaran kertas gerinda yang digunakan adalah grit #600 dan #1000. Sampel hasil proses gerinda kemudian dicuci, dikeringkan, diukur luas permukaannya dan ditimbang. Proses selanjutnya adalah uji korosi paduan AlFeNiMg dengan menggunakan *autoclave*. Parameter uji korosi yang digunakan adalah temperatur dengan variasi 75 °C, 125 °C, 175 °C dan waktu uji masing-masing 9 hari (216 jam), 18 hari (432 jam) dan 27 hari (648 jam). Sampel hasil uji korosi kemudian dilakukan uji metalografi (mikroskop optik, SEM) dan pengukuran berat serta tebal lapisan permukaan korosi. Daerah korosi juga

diamati komposisi kimianya secara kualitatif dan semi kuantitatif dengan menggunakan alat SEM-EDS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Laju korosi

Data hasil uji korosi pada cuplikan ingot AlFeNiMg dalam media air murni pada temperatur 75 °C, 125 °C dan 175 °C dengan variasi waktu 216 jam, 432 jam dan 648 jam, selanjutnya dibuat grafik yang menggambarkan laju korosi paduan AlFeNiMg dalam media air murni dengan temperatur uji yang berbeda seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Laju korosi ingot AlFeNiMg dalam media air murni^[5].

Hasil uji korosi pada temperatur 75 °C terjadi peningkatan lapisan oksida terus menerus dalam rentang waktu 200 – 650 jam tetapi sangat lambat dan dalam jumlah sangat kecil. Pada temperatur uji korosi 125 °C, laju korosi terlihat meningkat dalam rentang waktu 200 – 400 jam, selanjutnya cenderung stabil setelah waktu uji 400 jam hal ini menunjukkan lapisan oksida yang terbentuk telah mampu menghambat proses korosi selanjutnya (pasivasi). Kondisi laju korosi pada temperatur uji korosi 175 °C menunjukkan karakter ketahanan korosi paduan sangat berbeda, yakni tampak bahwa laju korosi sedikit meningkat dalam rentang waktu 200 – 400 jam dan meningkat tajam setelah melewati 400 jam. Dari ketiga kondisi uji korosi yaitu pada temperatur 75 °C, 125 °C dan 175 °C menunjukkan bahwa ketiganya mengikuti fenomena laju korosi secara parabolik.

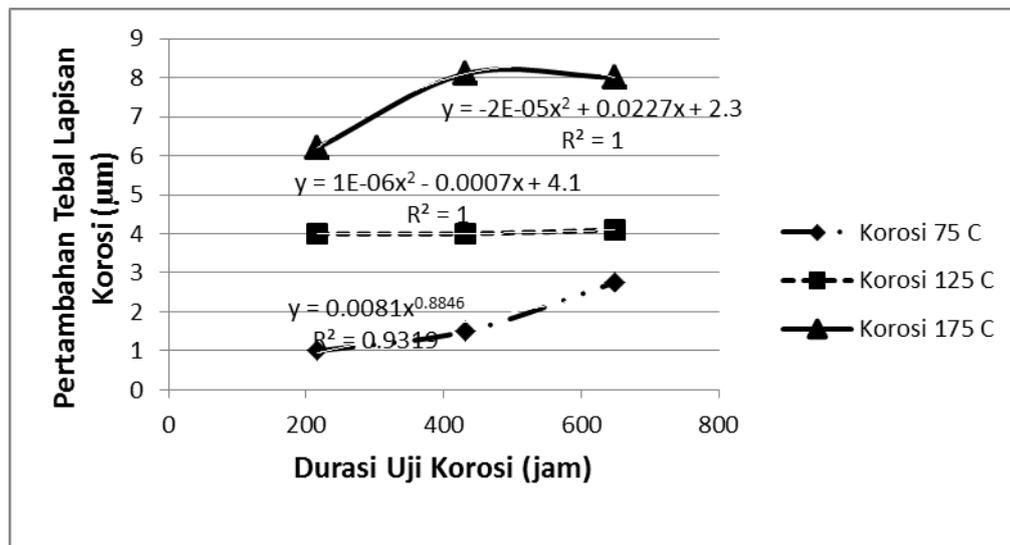
Berdasarkan Gambar 1 dapat diketahui bahwa paduan AlFeNiMg mampu digunakan dalam reaktor riset dalam waktu yang lama dengan temperatur pendingin paling tinggi rata-rata 125°C. Hal ini didukung oleh hasil penelitian sebelumnya yang menyimpulkan bahwa laju korosi paduan AlFeNi relative rendah dan stabil pada temperatur 75°C dan 125°C^[5].

Analisis mikrostruktur lapisan oksida

Perubahan tebal lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan logam paduan AlFeNiMg setelah dilakukan uji korosi dapat dilihat pada Gambar 2 dan lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan logam paduan AlFeNiMg ditunjukkan pada Gambar 3. Pada Gambar 2. secara umum terlihat bahwa pertumbuhan lapisan oksida semakin

meningkat seiring dengan peningkatan temperatur uji korosi. Pada temperatur uji korosi 75°C, 125°C dan 175°C dengan rentang waktu 216 – 648 jam terjadi peningkatan tebal lapisan korosi mengikuti korelasi parabolik dengan persamaan masing-masing $h = 0,008 x^{0,8846}$ untuk temperatur uji 75°C; $h = 1 \times 10^{-6}t^2 - 0,0007t + 4,1$ untuk temperatur uji 125°C dan $h = -2 \times 10^{-5}t^2 + 0,0227t + 2,3$ untuk temperatur uji 175°C, dengan h adalah tebal lapisan (µm) dan t adalah waktu uji korosi (jam). Mikrostruktur lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan logam AlFeNi hasil uji korosi pada temperatur 75°C dan 125°C ditunjukkan pada Gambar 3.b dan 3.c. Dari Gambar 3.b dan 3.c diperoleh informasi adanya struktur yang kompak dan halus. Pada temperatur uji korosi 125°C peningkatan tebal lapisan korosi cenderung rendah dan dapat dikatakan stabil setelah melewati rentang waktu korosi 200 jam. Hal ini disebabkan oleh lapisan oksida yang terbentuk dipermukaan logam sangat kompak dan berfungsi sebagai lapisan

pelindung atau passivasi yang dapat menghambat proses korosi selanjutnya. Berbeda dengan hasil uji korosi pada temperatur 175°C, terjadi sedikit penurunan tebal lapisan oksida yang terbentuk pada rentang waktu 200 hingga 400 jam. Hal ini menunjukkan terjadinya fenomena proses pengelupasan lapis lindung oksida atau terjadinya persaingan proses pembentukan dan pengelupasan lapis lindung oksida. Peristiwa ini dapat diperkuat oleh tampilan mikrostrukturnya seperti pada Gambar 3.d, yang tampak bahwa lapis lindung yang terbentuk setelah rentang waktu 200 hingga 400 jam terjadi penurunan tebal lapisan yang menunjukkan adanya fenomena pengelupasan. Pengelupasan terjadi karena lapisan oksida yang terbentuk tidak homogen dan tidak padat atau tidak kompak. Hal ini memungkinkan terjadinya proses persaingan antara pengelupasan dan pembentukan lapisan oksida setelah melewati rentang waktu uji korosi 400 jam atau setelah melewati waktu uji 18 hari.



Gambar 2. Korelasi antara pertambahan tebal lapisan oksida pada permukaan logam paduan AlFeNiMg terhadap durasi uji korosi dalam media air murni pada temperatur 75 °C, 125 °C dan 175 °C .



a. Perpaduan awal AlFeNiMg (warna terang) sebelum dilakukan uji korosi.



b. Lapisan hasil korosi pada temperatur 75 °C-18 hari (432 jam).



c. Lapisan hasil korosi pada temperatur 125 °C-18 hari (432 jam)



d. Lapisan hasil korosi pada temperatur 175 °C-18 hari (432 jam)

Gambar 3. Mikrostruktur paduan logam AlFeNiMg sebelum dan sesudah uji korosi dengan pembesaran 400x.

Analisis kimia lapisan oksida

Dari Gambar 4 dapat diketahui mikrostruktur dan komposisi kimia dari hasil korosi, matriks dan senyawa fasa kedua yang terbentuk pada paduan AlFeNiMg. Komposisi kimia yang dianalisis dengan SEM-EDS dapat dilihat pada Tabel 1. Gambar 4a, c dan e menunjukkan bahwa tampak matriks α -Al menempati posisi yang dominan dalam paduan AlFeNiMg karena aluminium merupakan bahan utama dalam pembuatan paduan ini. Pada masing-masing gambar tersebut terlihat juga adanya lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan logam paduan AlFeNiMg. Hasil analisis EDS, diperoleh komposisi matriks α -Al

seperti pada Gambar 4.b atau yang tercantum dalam Tabel 1 kolom 2. Terlihat bahwa unsur oksigen sudah berdifusi ke bagian bawah dari lapisan lindung oksida yang terbentuk pada permukaan paduan dengan komposisi 2,72% berat.

Gambar 4.c menunjukkan adanya koloni senyawa fasa kedua yang terbentuk di antara lautan matriks α -Al dalam paduan AlFeNiMg. Pustaka [3] menyebutkan bahwa senyawa fasa kedua yang terbentuk adalah Al_9FeNi , Al_3Fe dan Al_3Ni dan dalam penelitian ini senyawa tersebut juga terbentuk pada paduan AlFeNiMg. Hal ini dapat dibuktikan dari hasil analisis SEM-EDS seperti pada Gambar 4d atau dalam

Tabel 1 kolom 3. Tampak adanya unsur pemadu dalam paduan AlFeNiMg yaitu Fe, Ni dan tentu saja juga Al sebagai unsur utama yang membentuk senyawa Al_9FeNi , Al_3Fe dan Al_3Ni . Unsur oksigen juga terlihat sudah berdifusi ke dalam koloni senyawa fasa kedua ini dengan komposisi 6,75% berat. Oksigen yang berdifusi ke dalam koloni senyawa Al_9FeNi , Al_3Fe dan Al_3Ni lebih tinggi dari pada oksigen yang berdifusi ke dalam matriks α -Al. Unsur pemadu Mg juga tampak lebih banyak di koloni senyawa fasa kedua. Munculnya Mg di sini berperan mengikat O_2 membentuk senyawa MgO mengingat unsur Mg mempunyai afinitas terhadap O_2 lebih tinggi dari pada Al dan lebih rendah dari pada Fe dan Ni, akan tetapi Fe dan Ni tidak bersenyawa dengan O_2 tetapi lebih cenderung dan stabil membentuk senyawa dengan Al dalam bentuk senyawa fasa kedua. Sehingga oksida yang berada di dalam koloni senyawa fasa kedua ini diikat oleh Mg dan Al, yang mengakibatkan komposisi oksigen dalam koloni senyawa kedua ini lebih tinggi dari pada komposisi oksigen dalam matriks α -Al.

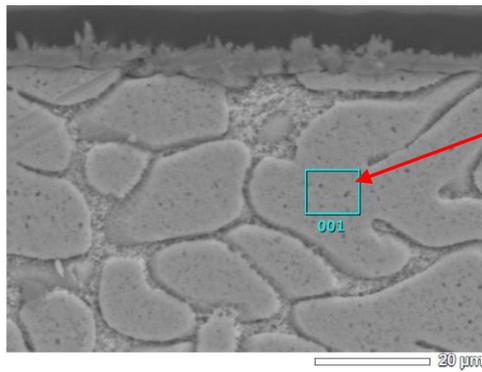
Gambar 4.e menunjukkan mikrostruktur yang terbentuk pada permukaan logam paduan AlFeNiMg adalah lapisan oksida. Pustaka^[3] menguraikan bahwa lapisan oksida yang terbentuk terbagi menjadi dua bagian yaitu oksida bagian luar (*outer oxide*) dan oksida bagian dalam (*inner oxide*). Lapisan oksida bagian luar bersifat porous (*large porosity*) yang disusun oleh kristal Al-hidroksida *bayerite* $Al(OH)_3$ yang

terbentuk dan stabil pada temperatur 70 °C dan *boehmite* $AlOOH$ yang terbentuk dan stabil pada temperatur 165 ° – 250 °C. Ukuran kristal lapisan oksida bagian luar jauh lebih besar dari lapisan bagian dalam. Lapisan oksida bagian dalam bersifat *amorphous* yang terdiri dari campuran senyawa Al dan Mg oksida dan hidroksida. Lapisan bagian dalam inilah yang merupakan lapis lindung yang stabil, homogen, padat dan kompak. Pada gambar 4.e, pembagian dua lapisan oksida kurang jelas, namun lapisan bagian dalam masih bisa diidentifikasi atau ditunjukkan oleh adanya koloni senyawa oksida/hidroksida dari Al/Mg dengan adanya warna atau noktah putih. Noktah putih menunjukkan bahwa bagian tersebut mempunyai densitas yang lebih tinggi dari pada bagian gelap seperti di tepi atau permukaan logam, bagian ini menunjukkan keberadaan oksida dan hidroksida Al dan Mg. Pada Gambar 4.f atau dalam Tabel 1 kolom 4 tampak bahwa unsur yang dominan adalah Al dan O, karena posisi pengukuran atau pengambilan data EDS adalah dibagian lapisan luar (*outer oxide*) sehingga senyawa yang terbentuk kemungkinan besar adalah *bayerit* $Al(OH)_3$ dan *boehmit* $AlOOH$.

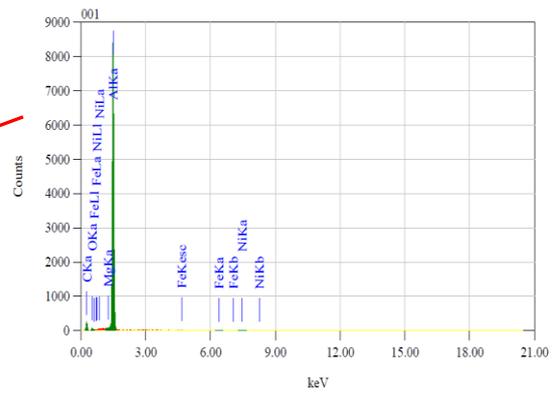
Dari ketiga posisi pengambilan SEM-EDS keberadaan unsur C juga cukup besar, kemungkinan ini adalah bawaan dari bahan yang digunakan (impuritas) atau terkontaminasi saat proses peleburan, dan dalam penelitian ini belum dianalisis pengaruh keberadaan impuritas unsur C terhadap paduan.

Tabel 1. Komposisi kimia hasil uji korosi paduan AlFeNiMg.

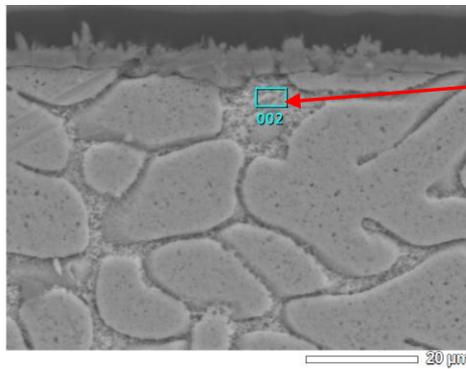
UNSUR	Mikrostruktur Matriks (% berat)	Mikrostruktur Senyawa/ fasa kedua (% berat)	Mikrostruktur Lapisan Oksida (% berat)
C	34,39	39,07	29,29
O	2,72	6,75	38,72
Mg	0,23	0,28	0,19
Al	62,63	50,69	30,96
Fe	0,01	1,48	0,45
Ni	0,02	1,73	0,39
TOTAL	100,00	100,00	100,00



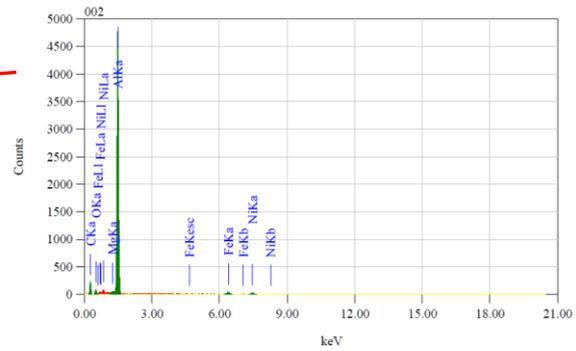
(a). Mikrostruktur matriks α -Al



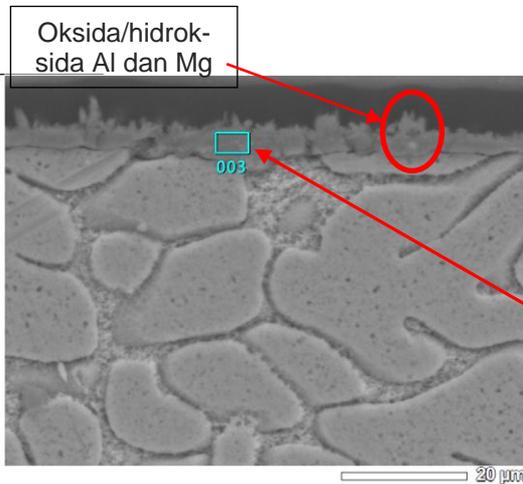
(b). Hasil uji SEM-EDS matriks α -Al



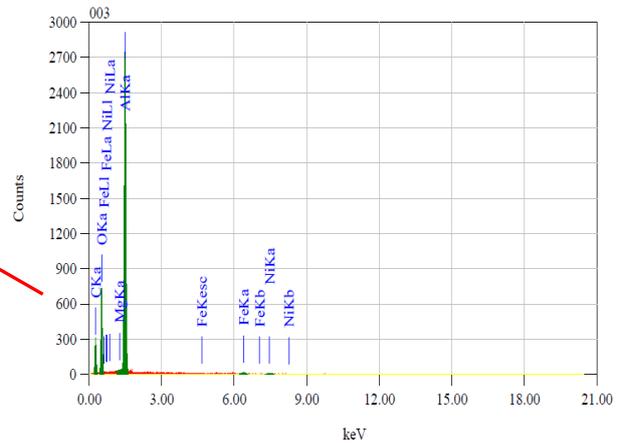
(c). Mikrostruktur senyawa Al



(d). Hasil uji SEM-EDS paduan Al



(e). Mikrostruktur lapis lindung oksida



(f). Hasil uji SEM-EDS lapis lindung oksida

Gambar 4. Mikrostruktur dan komposisi kimia paduan AlFeNiMg setelah uji korosi pada temperatur 175 °C selama 400 jam (18 hari) menggunakan SEM-EDS pembesaran 1500x.

SIMPULAN

Hasil analisis mikrostruktur paduan AlFeNiMg pada temperatur uji korosi 75°C, 125°C dan 175°C dengan rentang waktu 216-648 jam terjadi peningkatan tebal lapisan oksida (korosi) mengikuti korelasi parabolik. Pada temperatur uji korosi 125°C dengan rentang waktu 216-648 jam menunjukkan sifat paduan AlFeNiMg yang stabil dengan terbentuknya lapis lindung oksida di permukaan logam sangat kompak dan bisa berfungsi sebagai penghambat proses korosi selanjutnya. Dari hasil analisis kimia diperoleh informasi bahwa unsur Fe dan Ni lebih cenderung membentuk senyawa fasa kedua Al_9FeNi , Al_3Fe dan Al_3Ni . Sedangkan unsur Mg dan Al membentuk senyawa oksida dan hidroksida, dan peran unsur Mg lebih menonjol untuk membentuk lapis lindung oksida yang stabil, homogen, padat dan kompak.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Benjamin, M.M.A. (1995). Nuclear Reactor Materials and Applications. VNR Company Inc. USA, pages 295-299.
- [2]. M. Husna Al Hasa. (2007). Formasi Fasa Dan Mikrostruktur Bahan Struktur Paduan Aluminium Ferro-Nikel Hasil Proses Sintesis. Buletin Triwulan Daur Bahan Bakar Nuklir, Akreditasi No.71/ Akred-LIPI/ P2MB/ 5/ 2007, Vol.13 No.3 Juli 2007, hal. 99-107.
- [3]. M. Wintergerst, N. Dacheux, F. Datcharry, B. Kapusta. (2009). Corrosion of the AlFeNi Alloy Used for The Fuel Cladding in The Jules Horowitz Research Reactor. Journal of Nuclear Materials 393, p. 369-380.
- [4]. Y. Bergamaschi, Y. Bouilloux, P. Chantoin, B. Guigon, X. Bravo, C. Germain, M. Rommens, P. Tremodeux. Jules Horowitz Reactor, Basic Design, CEA Cadarache, Jules Horowitz Reactor Project 13115 St Paul lez Durance-France.
- [5]. M. Husna Al Hasa, Anwar Muchsin, Futichah, Ahmad Paid, Hadi Djaya. (2010). Sintesis Paduan Aluminium Fero Nikel Sebagai Bahan Struktur Cladding Elemen Bakar Nuklir. Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania, Akreditasi No. 71/ Akred-LIPI/ P2MBI/ 5/ 2007, Vol.16 No.2, hal. 47-55.