

SINTESIS PADUAN ALUMINIUM FERRO NIKEL SEBAGAI BAHAN STRUKTUR *CLADDING* ELEMEN BAKAR NUKLIR

M.Husna Al Hasa, Anwar Muchsin, Futichah, Ahmad Paid, Hadi Djaya

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314

E-mail: mhalhasa@yahoo.com

ABSTRAK

SINTESIS PADUAN ALUMINIUM FERRO NIKEL SEBAGAI BAHAN STRUKTUR *CLADDING* ELEMEN BAKAR NUKLIR. Pengkajian paduan logam berbasis aluminium ini dilakukan untuk pengembangan *cladding* bahan bakar densitas tinggi reaktor riset. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui struktur fasa, sifat kekerasan, sifat termal dan laju korosi bahan struktur *cladding* setelah perlakuan panas. Paduan AlFeNi hasil sintesis dengan kadar 1%Fe dan 1%Ni dikenai pemanasan pada temperatur 500 °C. Pemanasan pada temperatur tersebut dapat berdampak terhadap struktur fasa, kekerasan dan sifat termal. Paduan AlFeNi hasil perlakuan panas dilakukan proses deformasi termo-mekanik dengan perolan panas. Selain itu, paduan AlFeNi hasil perlakuan panas dikenai proses uji korosi menggunakan *autoclave* pada temperatur 75°C, 125°C dan 175°C dengan variasi waktu 216 jam, 432 jam dan 648 jam. Analisis struktur fasa dilakukan berdasarkan pola difraksi sinar x. Pengukuran kekerasan paduan AlFeNi dilakukan dengan menggunakan metoda Vicker. Kapasitas panas diukur menggunakan *differential scanning calorimetry*, DSC. Pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan metalografik-optikal dan SEM. Analisis unsur senyawa fasa diamati dengan EDS. Laju korosi dianalisis secara metoda gravimetri. Hasil analisis pola difraksi menunjukkan hanya terjadi pembentukan satu buah fasa pada temperatur 500°C. Pola difraksi sinar x memperlihatkan kecenderungan pembentukan fasa θ (FeAl_3) pada temperatur 500°C. Hasil pengukuran sifat kekerasan menunjukkan paduan AlFeNi pada pemanasan 500 °C sebesar 45 HV dan setelah mengalami deformasi termo-mekanik meningkat menjadi 51 HV. Hasil analisis kapasitas panas menunjukkan nilai kapasitas panas paduan AlFeNi cenderung relatif stabil hingga temperatur 450°C. Hasil pengamatan metalografik-optikal memperlihatkan mikrostruktur paduan AlFeNi cenderung berbentuk struktur butir granular. Hasil pengamatan dengan SEM memperlihatkan mikrostruktur butir mengalami pertumbuhan terutama pada daerah batas butir. Pertumbuhan pada daerah batas butir tersebut diidentifikasi sebagai pembentukan senyawa fasa Θ (FeAl_3). Paduan AlFeNi cenderung lebih tahan terhadap pengaruh panas dan memungkinkan sifat termal paduan AlFeNi relatif stabil. Laju korosi cenderung meningkat pada temperatur relatif tinggi pada 175°C setelah waktu 400 jam.

Kata kunci: Sintesis, Paduan AlFeNi, Bahan struktur, *Cladding*, Elemen bakar nuklir

ABSTRACT

SYNTHESIS OF ALUMINUM FERRO NICKEL ALLOYS AS *CLADDING* STRUCTURE MATERIAL FOR NUCLEAR FUEL ELEMENT. Study of aluminum-based alloy was done for the development of high density fuel cladding for research reactor. This research aims to know the phase structure, the hardness and thermal properties and corrosion rate of fuel cladding after heat-treatment. AlFeNi alloy

of synthesis with 1%Fe and 1%Ni was subjected to heat-treatment at 500°C. Mentioned temperatures heating will effect the phase structure, hardness and thermal. AlFeNi alloy of heat-treatment was carried out deformation process by hot rolling. In addition, AlFeNi alloy of heat-treatment was subjected to corrosion test by using autoclave at 75°C, 125°C and 175°C with varying time of 216, 432 and 648 hours. The phase structure analysis was done based on x-ray diffraction pattern. The hardness of AlFeNi alloy was measurumed by using Vicker methode. Heat capacity was measurumed by differential scanning calorimetry. The microstructure observation was performed by optical metallography and SEM. Phase compounds element Analysis was observed with EDS. Corrosion rate was analyzed with gravimetric method. Results of diffraction pattern analysis indicated the formation of phase compound at 500 °C. X-ray diffraction pattern showed tendency of the formation of θ (FeAl_3) phase at 500°C. The hardness measurement results of AlFeNi alloy with heating at 500 °C was about 45 HV and after hot-rolling deformation increased to 51 HV. Results of heat-capacity analysis showed tend to relative stable up to 450 °C. Optical metallographic observation result showed the microstructure tend to grain structure was granular formed. The observation by SEM shows the microstructure of grain growth especially at the grain boundary region. Growth in the grain boundary region has been identified as compound formation of θ (FeAl_3) phase. AlFeNi alloys tend to be more resistant to heat effect and allow the thermal properties of AlFeNi alloys relatively stable. Corrosion rate tends to increase at a relatively high temperature at 175°C after time 400 hours.

Keywords: Synthesis, AlFeNi alloy, Structure material, Cladding , Nuclear fuel element

PENDAHULUAN

Paduan logam berbasis aluminium telah digunakan pada berbagai industri, seperti industri transportasi terutama *automotive* dan pesawat terbang. Selain itu, paduan aluminium digunakan pula untuk berbagai komponen struktur pada instalasi nuklir terutama digunakan sebagai *cladding* bahan bakar [1]. Paduan aluminium yang berfungsi sebagai *cladding* bahan bakar dalam proses fabrikasi dan iradiasi akan mengalami proses deformasi dan pemanasan. Selama proses fabrikasi yang melibatkan pemanasan pada temperatur tinggi dan proses iradiasi memungkinkan *cladding* pengungkung bahan bakar akan mengalami perubahan sifat bahan. terutama struktur fasa. Selain itu, kondisi tersebut memungkinkan pula mempengaruhi sifat kekuatan/kekerasan, sifat termal dan sifat fisis [1]. Perubahan struktur fasa dan transformasi fasa memungkinkan akan berdampak terhadap sifat kekerasan, sifat termal dan korosi yang cenderung meningkat atau menurun. Kondisi ini dapat diketahui dengan melakukan proses perlakuan panas dan

perlakuan korosi dalam *autoclave* berisi fluida bertemperatur tinggi terhadap bahan *cladding* berbasis aluminium. Perlakuan panas pada temperatur tinggi memungkinkan akan memacu terjadi reaksi senyawa logam intermetalik Al dengan Fe dan Ni melalui proses difusi [2,3]. Proses difusi dalam perlakuan panas tersebut memungkinkan akan menghasilkan senyawa logam berupa fasa θ , fasa κ , fasa τ dan fasa lainnya [4]. Fasa θ (FeAl_3) mulai terbentuk pada daerah komposisi 0,04-37 % berat Fe di bawah temperatur 652 °C [5]. Fasa θ ini merupakan hasil transformasi dari pemaduan Al dan Fe yang mengikuti reaksi fasa *eutectic*, yaitu $L \rightarrow \alpha + \theta$. Kadar Fe dalam paduan melebihi batas larut padat di atas 0,04% cenderung akan membentuk fasa θ [6,7]. Fasa κ mulai terbentuk pada daerah komposisi 0,04-42 % berat Ni di bawah temperatur 640 °C. Fasa κ ini merupakan hasil transformasi dari pemaduan Al dan Ni yang mengikuti reaksi fasa *eutectic*, yaitu: $L \rightarrow \alpha + \kappa$. Apabila kadar Ni dalam paduan melebihi batas larut padat di atas 0,04 % akan terbentuk fasa κ (NiAl_3). Besarnya fasa κ sangat

dipengaruhi oleh tingkat prosentase kadar Ni dalam paduan. Kadar Ni semakin tinggi mengakibatkan semakin memperbesar jumlah fasa κ dalam paduan. Reaksi fasa eutektik paduan aluminium dan besi mulai terjadi pada temperatur 652 °C dengan kadar 1,8 % Fe dan membentuk fasa padat $\alpha+\theta$ yaitu Al+FeAl₃. Fasa α memiliki batas kemampuan larut padat (*solid solubility*) Fe dalam fasa α (Al) sampai maksimum 0,04%Fe pada temperatur 652 °C. Paduan logam AlFeNi memiliki struktur politropik dan anisotropik, yaitu struktur monoklinik dan ortorombik. Kekuatan dan ketahanan korosi bahan struktur AlFeNi sangat dipengaruhi oleh pembentukan struktur fasa dalam paduan. Pembentukan fasa sangat dipengaruhi oleh unsur pepadu dan kadar pepadu dalam paduan. Pembentukan fasa dalam paduan logam dapat terbentuk apabila komposisinya terdiri dari dua unsur atau lebih dan memiliki perbedaan jari-jari atom sehingga membentuk larutan padat sebagai salah satu fasa. Selain itu, fasa yang terbentuk memiliki sifat, ukuran kisi dan struktur kristal serta titik cair yang berbeda. Unsur Al, Fe dan Ni mempunyai ukuran atom, jarak antaratom dan juga bentuk struktur kristal yang berbeda. Logam Al memiliki struktur kristal berbentuk selsatuan FCC dengan parameter kisi berukuran 4,0496 Å dan jarak antaratom 2,8635 Å. Logam Fe memiliki struktur kristal BCC dengan parameter kisi berukuran 2,8664 Å dan jarak antaratom 2,4823 Å, sedangkan logam Ni memiliki selsatuan FCC dengan ukuran kisi 3,52338 Å dan jarak antaratom 2,4919 Å^[4]. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan sifat struktur fasa, kekerasan, sifat termal dan laju korosi *cladding* bahan bakar. Data hasil penelitian ini diharapkan akan bermanfaat sebagai data dukung untuk pengembangan bahan struktur *cladding* bahan bakar reaktor riset.

TATA KERJA

Bahan dalam bentuk serbuk logam aluminium, Fero dan nikel ditimbang dengan kadar yang telah ditentukan menggunakan

neraca digital yang memiliki tingkat akurasi tinggi. Serbuk aluminium, fero dan nikel hasil timbang kemudian dilakukan pencampuran menggunakan *mixing machine* selama lima menit dengan putaran 1800 rpm sehingga diperoleh serbuk yang relatif homogen. Campuran serbuk aluminium dengan unsur pepadu 1% Fe 1%Ni hasil homogenisasi kemudian dikompaksi menggunakan alat pengepresan. Pengepresan serbuk dengan gaya sebesar 350 KN menghasilkan spesimen berbentuk lempengan. Spesimen hasil presan tersebut kemudian dilakukan sintesis menggunakan tungku lebur dalam kondisi gas *inert*. Proses sintesis ini menghasilkan paduan AlFeNi dalam bentuk *ingot*. Spesimen Ingot AlFeNi dikenakan perlakuan panas pada temperatur 500°C dengan waktu pemanasan selama 1,5 jam. *Ingot* AlFeNi hasil perlakuan panas pada temperatur tersebut di atas kemudian dilakukan analisis, pengujian, pengamatan, dan pengukuran. Analisis struktur fasa paduan AlFeNi dilakukan berdasarkan pola difraksi sinar x menggunakan difraktometer sinar x. Perubahan fasa dimati menggunakan *differential thermal analysis*, DTA. Analisis kapasitas panas diukur menggunakan *differential scanning calorimetry*, DSC. Pengukuran kekerasan sepesimen AlFeNi dilakukan dengan menggunakan metoda Vicker. Pengamatan topografi mikrostruktur dilakukan secara metalografi-optik dan SEM. Analisis unsur senyawa logam diamati dengan EDS dan analisis korosi dilakukan berdasarkan metoda gravimetri.

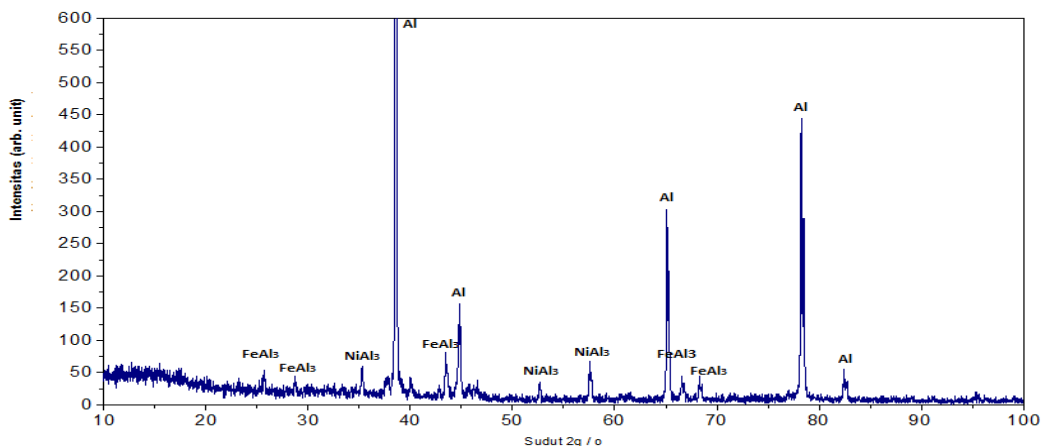
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan struktur fasa berdasarkan analisis pola difraksi sinar x ditunjukkan pada Gambar 1. Pengukuran sifat kekerasan paduan AlFeNi dengan metoda Vicker diperlihatkan pada Gambar 2. Analisis sifat termal berdasarkan nilai panas jenis hasil pengukuran DSC ditunjukkan pada Gambar 3. Pengamatan mikrostruktur paduan AlFeNi secara metalografi-optik dan SEM ditunjukkan

pada Gambar 4 dan 5. Analisis unsur senyawa fasa pada daerah batas butir dilakukan dengan EDS ditunjukkan pada Gambar 6. Analisis laju korosi dilakukan secara metoda gravimetri ditunjukkan pada Gambar 7.

Gambar 1 memperlihatkan pola difraksi paduan AlFeNi hasil sintesis dan perlakuan panas pada temperatur 500°C yang menghasilkan puncak-puncak fasa α , θ dan κ . Puncak fasa α untuk masing-masing bidang hkl berada pada sudut difraksi 2θ antara 35°-83°. Puncak fasa θ untuk masing-masing bidang hkl berada pada sudut difraksi 2θ antara 21°-78°. Puncak fasa κ untuk masing-masing bidang hkl berada pada sudut 2θ antara 22°-52°. Berdasarkan persamaan BRAGG dan PDF [Anonym,PDF, 2008] dengan panjang gelombang (λ_{Cu})=1,542 menunjukkan bahwa puncak fasa α berada pada sudut 2θ sebesar 39°, 45°, 65°, 78°, 83° dan 99° pada masing-masing bidang hkl, yaitu 111, 200, 220, 311, 222 dan 400. Puncak fasa θ berada pada sudut 2θ sebesar 22°, 26°, 41°, 43°, 44°, 47°, 64°, 66° dan 78°. Puncak fasa κ berada pada sudut 2θ sebesar 22°, 24°, 25°, 29°, 35°, 36°, 37°, 41°, 43°, 45°, 46°, 47° dan 52°. Gambar 1 memperlihatkan pola difraksi paduan AlFeNi hasil sintesis dan perlakuan panas yang menghasilkan puncak-puncak fasa α pada sudut 2θ berkisar antara

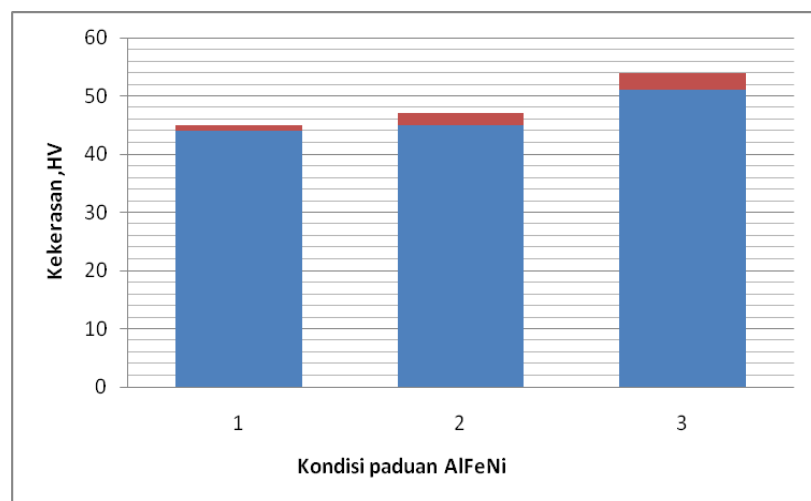
39°, 45°, 65°, 78°, 82° dan puncak fasa θ pada sudut 2θ berkisar antara 26°, 28° dan 44°, 66°, 68° sedangkan puncak fasa κ pada sudut 2θ berkisar 35, 52°. Besaran sudut 2θ untuk puncak fasa α , θ dan κ pada pola difraksi Gambar 1 cenderung mendekati sama dengan besaran sudut 2θ pada PDF dan hasil perhitungan dengan persamaan BRAGG. Sementara itu, fasa α dan θ menunjukkan lebih dari 3 puncak, sedangkan fasa κ hanya memiliki 3 puncak. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur fasa yang terbentuk merupakan fasa α , θ dan κ . Fasa α merupakan aluminium(Al), fasa θ adalah senyawa $FeAl_3$ dan fasa κ merupakan senyawa $NiAl_3$. Pembentukan fasa θ dan κ ini merupakan proses reaksi antara Fe dan aluminium yang terjadi akibat rejeksi dari larutan padat aluminium yang melebihi kemampuan larut-padat dalam struktur fasa α . Rejeksi ini terjadi karena kelarutan atom Fe dan Ni dalam struktur fasa α telah melampaui batas yang diizinkan, yaitu melebihi di atas 0,04% Fe dan 0,04% Ni [6] sehingga aluminium bereaksi mengikat Fe dan Ni membentuk senyawa $FeAl_3$ serta $NiAl_3$.



Gambar 1. Pola difraksi sinar x paduan AlFeNi pada temperatur pemanasan 500°C

Sifat kekerasan paduan AlFeNi setelah mengalami perlakuan termo-mekanik ditunjukkan pada Gambar 2. Sifat kekerasan cenderung relatif stabil tidak mengalami perubahan yang berarti setelah mengalami perlakuan panas pada temperatur 500 °C. Kondisi ini dimungkinkan karena pemanasan selama waktu 1,5 jam pada temperatur 500°C belum mengakibatkan terjadinya perubahan sifat mekanik yang besar. Hal ini menunjukkan bahwa paduan AlFeNi masih dalam keadaan proses *recovery* dan belum mengalami dominasi proses rekristalisasi atau *grain growth*. Sifat kekerasan paduan Aluminium hasil sintesis dalam bentuk paduan AlFeNi sekitar 45 HV. Sifat kekerasan paduan AlFeNi cenderung relatif tinggi karena diakibatkan oleh pembentukan senyawa logam. Pembentukan senyawa logam ini diperlihatkan oleh data hasil analisis pola difraksi sinar x pada Gambar 1. Senyawa logam dalam bentuk fasa kedua, seperti fasa

θ (FeAl_3) cenderung akan memberi kontribusi menghambat pergerakan dislokasi. Pergerakan dislokasi yang terhambat oleh senyawa fasa kedua akan mengakibatkan memperkuat dan memperkeras logam. Kondisi ini dapat dijelaskan bahwa pembentukan senyawa logam dalam bentuk fasa kedua akan mempengaruhi sifat logam yang cenderung akan meningkatkan sifat mekaniknya. Sementara itu, paduan AlFeNi setelah mengalami deformasi perolatan menunjukkan terjadi peningkatan sifat kekerasan menjadi 51 HV. Hal ini dimungkinkan karena terjadi peningkatan kerapatan dislokasi akibat proses *strain hardening*.



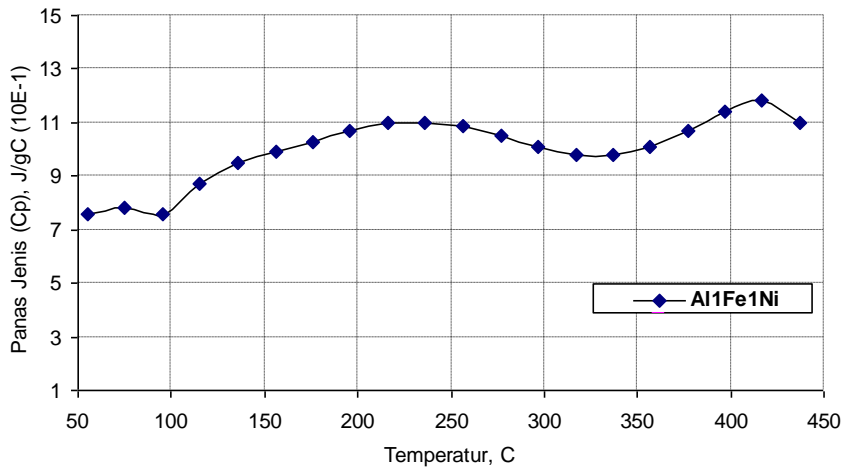
Gambar 2. Sifat kekerasan paduan AlFeNi pada kondisi TPP (1), PP (2) dan HR (3). TPP=tanpa perlakuan panas, PP=Perlakuan panas, HR=*hot rolling*.

Variasi panas jenis paduan AlFeNi pada berbagai temperatur ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai panas jenis paduan AlFeNi relatif lebih

tinggi dan cenderung semakin meningkat seiring kenaikan temperatur mulai 50°C hingga 450°C yang diperlihatkan pada Gambar 4. Hal ini

menunjukkan bahwa kenaikan temperatur paduan AlFeNi relatif lebih lambat dan lama. Keadaan ini menunjukkan bahwa paduan AlFeNi relatif lebih tahan terhadap pengaruh panas dan memungkinkan sifat termal paduan AlFeNi relatif lebih stabil. Sifat termal paduan AlFeNi tampak tidak mengalami perubahan yang berarti meskipun pada temperatur yang lebih tinggi hingga pada temperatur 250 °C. Nilai panas jenis paduan AlFeNi cenderung menurun pada temperatur diatas 250 °C hingga 325 °C dan diatas temperatur tersebut nilai panas jenis meningkat kembali. Keadaan

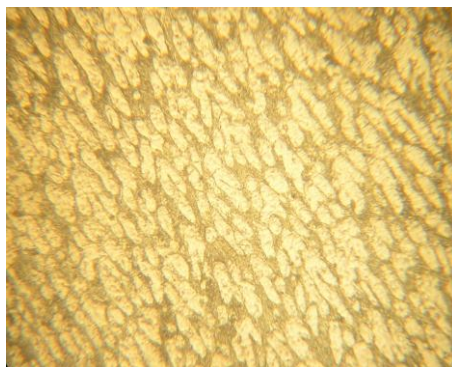
ini dimungkinkan karena di atas temperatur 325 °C menunjukkan bahwa terjadi perubahan kondisi sifat paduan yang diakibatkan oleh adanya senyawa fasa.



Gambar 3. Variasi panas jenis paduan AlFeNi terhadap perubahan temperatur

Mikrostruktur paduan AlFeNi dengan kadar 1%Fe 1% Ni hasil perlakuan panas diperlihatkan pada Gambar 4. Gambar 4 memperlihatkan paduan AlFeNi hasil perlakuan panas pada temperatur 500°C dengan struktur butir dendrit yang cenderung berbentuk granular dengan struktur fasa terdiri dari fasa α dan θ . Fasa yang terbentuk pada paduan AlFeNi merupakan rejeksi dari larutan padat aluminium bila kadar Fe atau Ni yang terkandung dalam paduan tersebut melebihi kemampuan larut-padat fasa α -Al. Mikrostruktur paduan AlFeNi yang tampak pada Gambar 4 memperlihatkan kecenderungan perubahan struktur butir yang

bertransformasi membentuk struktur butir yang memanjang. Kondisi ini dimungkinkan karena dipacu oleh terjadinya proses transformasi fasa yang mengarah ke struktur fasa θ dan κ yang cenderung membentuk dua fasa, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Pembentukan struktur fasa yang dipacu oleh energi pada temperatur relatif tinggi ini akan berdampak pada struktur butir, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



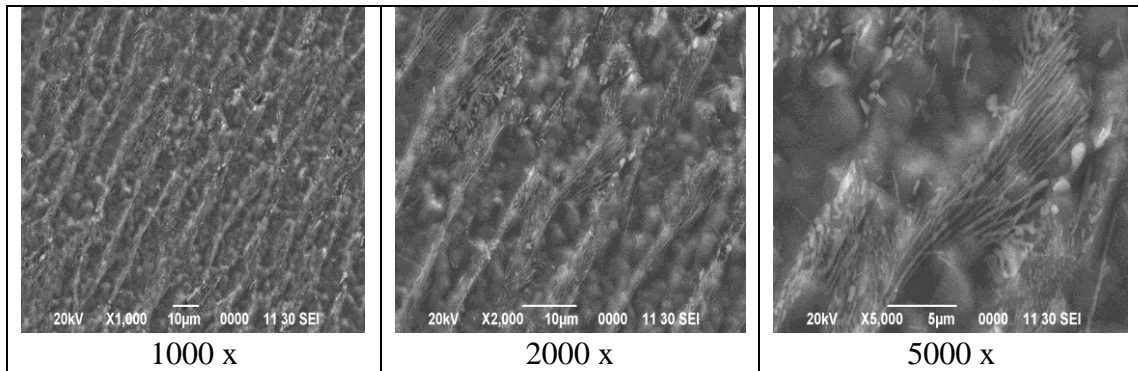
25 μ m

Gambar 4. Topografi mikrostruktur paduan AIFeNi dengan Mikroskop optik

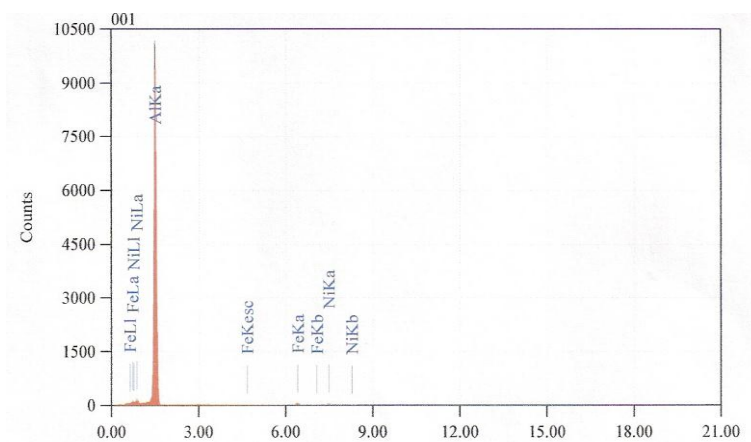
Topografi mikrostruktur hasil pengamatan dengan SEM ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar 5 memperlihatkan mikrostruktur dengan pembesaran 1.000 x, 2000 x dan 5.000 x yang diamati pada daerah titik tertentu. Gambar 5 a memperlihatkan struktur butir yang cenderung berwarna gelap dan terang. Daerah berwarna terang teridentifikasi sebagai fasa α dan daerah berwarna gelap diidentifikasi sebagai senyawa fasa logam. Sementara itu, pada pembesaran 2000x tampak daerah batas butir cenderung berwarna gelap dan berbentuk serat-jarum memanjang. Serat-jarum pada batas butir tampak tumbuh memanjang dan daerah batas butir ini merupakan awal pembentukan senyawa fasa logam. Senyawa fasa logam yang terbentuk dimungkinkan adalah fasa θ dan κ . Fasa θ dan κ ini merupakan senyawa logam FeAl_3 dan NiAl_3 . Hal ini sebagaimana diperoleh dari hasil analisis pola difraksi sinar-x yang diperlihatkan pada Gambar 1. Gambar mikrostruktur dengan pembesaran 5.000 x akan.

tampak lebih jelas bentuk topografinya dan bentuk serat-jarum seperti rambut tumbuh yang memanjang

Analisis kualitatif dan semi *kuantitatif* dengan EDS (*Electron Dispersif X-Ray Spectrophotometer*) terhadap paduan AIFeNi ditunjukkan pada Gambar 6. Analisis EDS daerah yang berbentuk serat-jarum pada mikrostruktur dengan pembesaran 5000x pada Gambar 6 menunjukkan terkandung unsur Al, Fe dan Ni. Analisis semi *kuantitatif* pada daerah titik tersebut memperlihatkan terdapat persentase Al sekitar 94,21%, Fe sebesar 3,13% dan Ni sejumlah 2,66%. Kondisi ini memungkinkan memacu terjadinya proses pembentukan senyawa logam membentuk fasa θ dan κ . Fasa θ dan κ diidentifikasi sebagai senyawa logam FeAl_3 dan NiAl_3 . Identifikasi senyawa logam ini juga didukung oleh data hasil analisis difraksi sinar x yang memperlihatkan adanya puncak pola difraksi senyawa logam FeAl_3 dan NiAl_3 , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



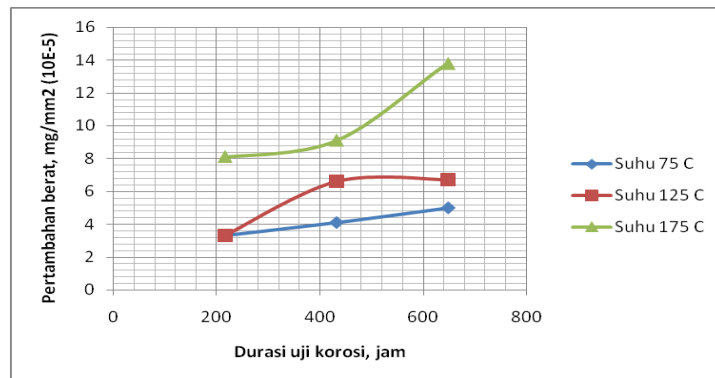
Gambar 5. Topografi mikrostruktur paduan AIFeNi dengan SEM



Gambar 6. Spektrum EDS paduan AIFeNi stoikiometrik

Gambar 7 memperlihatkan tingkat laju korosi paduan AIFeNi dalam fluida air bertemperatur tinggi pada 75°C, 125°C dan 175°C dengan variasi waktu 216 jam, 432 jam dan 648 jam. Gambar 7 memperlihatkan laju korosi paduan AIFeNi semakin meningkat dengan semakin tinggi temperatur fluida. Selain itu, laju korosi cenderung meningkat pula seiring dengan semakin lama waktu keberadaan paduan AIFeNi dalam fluida tersebut. Gambar 7

menunjukkan pada temperatur fluida 75°C laju korosi relatif rendah dan cenderung meningkat dengan semakin lama waktunya. Pada temperatur fluida 125 °C laju korosi meningkat dan relatif stabil setelah waktu 432 jam. Sementara itu, pada temperatur fluida 175 °C laju korosi relatif lebih meningkat daripada temperatur fluida 75°C dan 125 °C. Laju korosi paduan AIFeNi cenderung semakin tinggi dengan semakin lama waktu keberadaannya dalam fluida.



Gambar 7. Laju korosi paduan AlFeNi dalam fluida temperatur tinggi

SIMPULAN

Sifat mekanik dan termal paduan AlFeNi hasil sintesis dan perlakuan panas relatif stabil. Sifat kekerasan paduan AlFeNi cenderung meningkat setelah mengalami proses deformasi termo-mekanik mencapai 51 HV. Paduan AlFeNi relatif lebih tahan terhadap pengaruh panas dan memungkinkan sifat termal paduan AlFeNi relatif lebih stabil. Struktur fasa paduan AlFeNi relatif lebih didominasi oleh fasa α (Al) dan fasa θ (FeAl₃). Laju korosi paduan AlFeNi relatif rendah dan stabil pada temperatur 75°C dan 125 °C. Laju korosi cenderung meningkat pada temperatur relatif tinggi pada 175°C setelah waktu 400 jam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak atas bantuan dan dukungan terhadap kelancaran penelitian ini baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga menghasilkan tulisan dalam bentuk makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ALHASA, M.H., (2008), "Peningkatan Sifat mekanik Bahan Struktur Paduan Aluminium Fero Nikel Dengan Penguatan Fasa Kedua Dan Struktur Butir", Jurnal Ilmiah daur Bahan Bakar
- Nuklir, URANIA, Volume 14 No.1, hal.1-10.
- RAYNOR, G.V., RIVLIN, G.V., (1988), *Phase Equilibria in iron Ternary Alloy*, The institute of Metals, New york.
- PETZOW, G., EFFENBERG, G., (1992), *Ternary Alloy AlFeNi*, Vol.15, Germany: ASM, International.
- AL HASA, M.H., (2007), "Formasi fasa dan Mikrostruktur Bahan struktur Paduan Aluminium Fero-Nikel Hasil proses sintesis", Jurnal Ilmiah daur Bahan Bakar Nuklir, URANIA, Volume 13 No.3, hal.99-107.
- MONDOLFO, L.F, (1976), *Aluminium Alloys, Structure and Properties*, London, hal.532-533.
- Anonym, PDF Card, International Center For data Diffraction, 2008
- ASTM, American Society for testing and Materials, (1992), *Annual Book of ASTM Standards*. Section 3, Vol. 03.02. Philadelphia:ASTM.