

PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP SIFAT BAHAN PADUAN ALUMINIUM FERRO NIKEL

Maman Kartaman, M.Husna Al Hasa, Ahmad Paid

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314

E-mail: makar@batan.go.id

(Naskah diterima:22 April 2013, disetujui: 24 Mei 2013)

ABSTRAK

PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP SIFAT BAHAN PADUAN ALUMINIUM FERRO NIKEL.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap struktur fasa, sifat kekerasan paduan aluminium sebagai cladding bahan bakar. Paduan aluminium AlFeNi hasil sintesis dengan kadar 1% Fe dan 1% Ni dikenai pemanasan pada temperatur 450 °C, 500 °C dan 550 °C. Pemanasan pada temperatur tersebut dapat berdampak terhadap perubahan struktur fasa, sifat kekerasan dan termal. Pengujian sifat kekerasan paduan AlFeNi dilakukan dengan menggunakan metoda Vicker. Analisis struktur fasa dilakukan berdasarkan pola difraksi sinar x dan diagram fasa. Pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan metalografik-optikal dan *scanning electron microscope*, SEM. Analisis unsur senyawa fasa diamati dengan *electron dispersif x-ray spectrophotometer*, EDS. Hasil pengukuran sifat kekerasan menunjukkan paduan AlFeNi dengan pemanasan pada 450 °C, 500 °C dan 550 °C masing-masing berkisar 45 HV, 45 HV dan 35 HV. Sifat kekerasan paduan AlFeNi dengan unsur pemadu 1%Fe dan 1%Ni menunjukkan relatif stabil hingga pada temperatur 500 °C dan cenderung menurun pada 550 °C. Hasil analisis pola difraksi menunjukkan hanya terjadi pembentukan satu buah fasa pada temperatur 450 °C dan 500 °C. Pola difraksi sinar x memperlihatkan kecenderungan pembentukan fasa θ (FeAl_3) pada temperatur 450 °C dan 500 °C, sedangkan pada temperatur 550 °C hanya teridentifikasi fasa α (Al). Hasil pengamatan metalografik-optikal memperlihatkan mikrostruktur paduan mengalami perubahan seiring dengan meningkatnya temperatur pemanasan terutama pada temperatur 550 °C. Mikrostruktur hasil pengamatan SEM memperlihatkan struktur butir berbentuk granular dan pada batas butir berbentuk serat-jarum yang tumbuh memanjang. Hasil analisis EDS mengidentifikasi pada daerah batas butir terkandung unsur senyawa logam Al, Fe dan Ni yang berpotensi membentuk senyawa fasa logam, seperti fasa θ .

Kata kunci: paduan aluminium, *Cladding*, elemen bakar nuklir, temperatur.

ABSTRACT

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE PROPERTIES OF ALUMINUM FERRO NICKEL ALLOY. This study is aimed to determine the effect of temperature on the phase structure and hardness properties of aluminum alloy as nuclear fuel cladding. The AlFeNi aluminum alloy that was synthesized with Fe content of 1% and Ni content of 1% was heat treated at a temperature of 450 °C, 500 °C and 550 °C. Examination of AlFeNi alloy hardness was done by Vicker method.

Phase structure analysis was performed by x-ray diffraction pattern and phase diagram. Microstructure examination was performed with optical and scanning electron microscope (SEM). Elemental analysis phase compounds were observed by electron dispersive x-ray spectrophotometer (EDS). The hardness test shows that the hardness of AlFeNi alloy over heating at 450 °C, 500°C and 550°C is around 45 HV, 45 HV and 35 HV respectively. AlFeNi alloy hardness with alloying elements of 1% Fe and 1% Ni is found to be relatively stable at temperatures up to 500 °C and the stability tends to decrease at 550 °C. The diffraction pattern analysis indicates only the formation of a single phase at a temperature of 450 °C and 500 °C. The x-ray diffraction pattern shows that the phase formation has a tendency of θ ($FeAl_3$) at a temperature of 450 °C and 500 °C, while at 550 °C only α (Al) phase is identified. The metallographic-optical observation shows that the alloy microstructure changes with increasing heating temperature, particularly at 550 °C. The SEM microstructure observation shows granular shaped grain structure and the grain boundary in the shape of fiber needles growing lengthwise. The EDS analysis indicates that the grain boundary region contains elements of Al, Fe and Ni, which have a potential to form metal phase compounds such as θ phase.

Keywords: aluminum alloy, cladding, nuclear fuel element, temperature.

PENDAHULUAN

Paduan aluminium telah digunakan untuk berbagai komponen struktur pada instalasi nuklir terutama sebagai bahan struktur *cladding* elemen bakar^[1]. Bahan struktur *cladding* berbasis aluminium telah dikembangkan oleh Indonesia dan berbagai negara di dunia seiring dengan pengembangan bahan bakar berdensitas tinggi. Pengembangan paduan aluminium sebagai bahan struktur *cladding* dilakukan karena paduan aluminium memenuhi persyaratan yang diinginkan. Pengembangan bahan struktur *cladding* ini diharapkan akan mendapatkan paduan logam yang memiliki kekuatan yang relatif lebih baik, sifat termal dan ketahanan korosi yang relatif tinggi. Sifat kekuatan dapat ditingkatkan dengan beberapa mekanisme, antara lain melalui proses sintesis. Proses sintesis ini akan memberikan dampak peningkatan terhadap sifat logam terutama sifat mekanik. Proses sintesis dengan melakukan pepaduan tiga unsur logam Al, Fe dan Ni diharapkan akan meningkatkan sifat logam, seperti sifat kekuatan dan kekerasan. Sifat logam dapat meningkat melalui mekanisme pengerasan regangan (*strain hardening*), larut padat (*solid solution*), dan pembentukan fasa kedua

(*second phase*). Pada proses sintesis ini dengan memadukan unsur logam Al dengan Fe dan Ni diharapkan sifat mekanik paduan logam akan mengalami peningkatan. Peningkatan sifat mekanik terutama sifat kekerasan paduan logam dimungkinkan terjadi melalui mekanisme larut padat dan pembentukan fasa kedua serta mikrostruktur butir. Selain itu, paduan aluminium yang berfungsi sebagai *cladding* bahan bakar dalam proses fabrikasinya akan mengalami proses deformasi dan pemanasan. Selama proses fabrikasi yang melibatkan pemanasan pada temperatur tinggi memungkinkan *cladding* sebagai pengungkuh bahan bakar akan mengalami perubahan sifat bahan terutama struktur fasa. Selain itu, kondisi tersebut memungkinkan pula mempengaruhi sifat kekuatan/kekerasan, sifat termal dan transformasi fasa^[2]. Perubahan struktur fasa dan transformasi fasa memungkinkan akan berdampak terhadap sifat kekerasan dan sifat termal yang cenderung meningkat atau menurun. Kondisi ini dapat diketahui dengan melakukan proses perlakuan panas 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^[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 paduan 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]. Fasa κ mulai terbentuk pada daerah komposisi 0,04-42% berat Ni di bawah temperatur 640 °C. Fasa κ ini merupakan hasil transformasi dari paduan 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). Besar 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 $\text{Al} + \text{FeAl}_3$. 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 pemuatan dan kadar pemuatan 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 strukturkristal 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 dan sifat termal AlFeNi sebagai bahan struktur *cladding*. Data hasil penelitian ini diharapkan akan bermanfaat sebagai data dukung untuk pengembangan bahan struktur *cladding* elemen bakar nuklir.

TATA KERJA

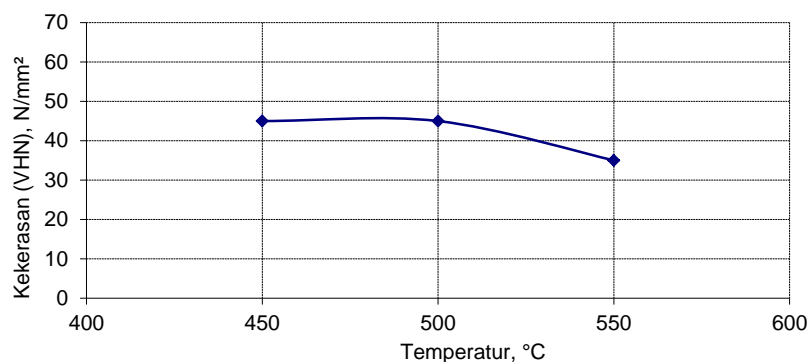
Pengembangan paduan aluminium dilakukan melalui proses sintesis dengan memadukan dua atau tiga unsur pemuatan dengan unsur utama aluminium. Perhitungan berat bahan dilakukan berdasarkan kadar komposisi 1% Fe dan 1% Ni. Kemudian logam aluminium, fero dan nikel ditimbang dengan kadar yang telah ditentukan menggunakan neraca digital. Berat serbuk fero dan nikel dengan logam aluminium masing-masing disesuaikan berdasarkan komposisi paduan eutektik. Campuran logam komposisi paduan eutektik ini diproses melalui teknik peleburan pada temperatur di atas temperatur titik eutektik sehingga menghasilkan paduan logam AlFe dan AlNi. Proses peleburan logam aluminium dengan paduan AlFe dan AlNi dilakukan pada temperatur 800 °C dengan komposisi yang telah diperhitungkan. Proses peleburan ini menghasilkan paduan AlFeNi dalam bentuk pelat. Spesimen pelat AlFeNi dikenakan perlakuan panas pada temperatur 450 °C, 500 °C dan 550 °C dengan waktu pemanasan selama 3 jam. Pelat AlFeNi hasil perlakuan panas pada temperatur tersebut di atas kemudian dilakukan analisis, pengujian, pengamatan, dan pengukuran. Pengukuran kekerasan spesimen AlFeNi dilakukan dengan menggunakan metoda Vicker. Analisis struktur fasa paduan AlFeNi

dilakukan berdasarkan pola difraksi sinar x menggunakan difraktometer sinar x. Pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan metalografik-optikal dan SEM. Analisis unsur senyawa logam diamati dengan EDS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran sifat kekerasan paduan AlFeNi dengan metoda Vicker pada variasi temperatur pemanasan diperlihatkan pada Gambar 1. Pengamatan struktur fasa berdasarkan analisis pola difraksi sinar x ditunjukkan pada Gambar 2. Pengamatan mikrostruktur paduan AlFeNi secara metalografi-optik ditunjukkan pada Gambar 3. Pengamatan topografi struktur butir dengan SEM dan analisis unsur senyawa fasa pada daerah batas butir dengan EDS ditunjukkan pada Gambar 4. Sifat kekerasan paduan AlFeNi pada temperatur perlakuan panas ditunjukkan pada Gambar 1. Sifat kekerasan mengalami perubahan yang cenderung menurun terutama pada temperatur 550 °C. Penurunan sifat kekerasan pada temperatur 550 °C terutama akibat tidak adanya kontribusi fasa kedua karena pada temperatur tersebut terjadi penguraian fasa θ . Fasa kedua berupa senyawa FeAl_3 dimungkinkan terurai ke keadaan semula larut ke dalam fasa α . Hal ini teridentifikasi pada pola difraksi

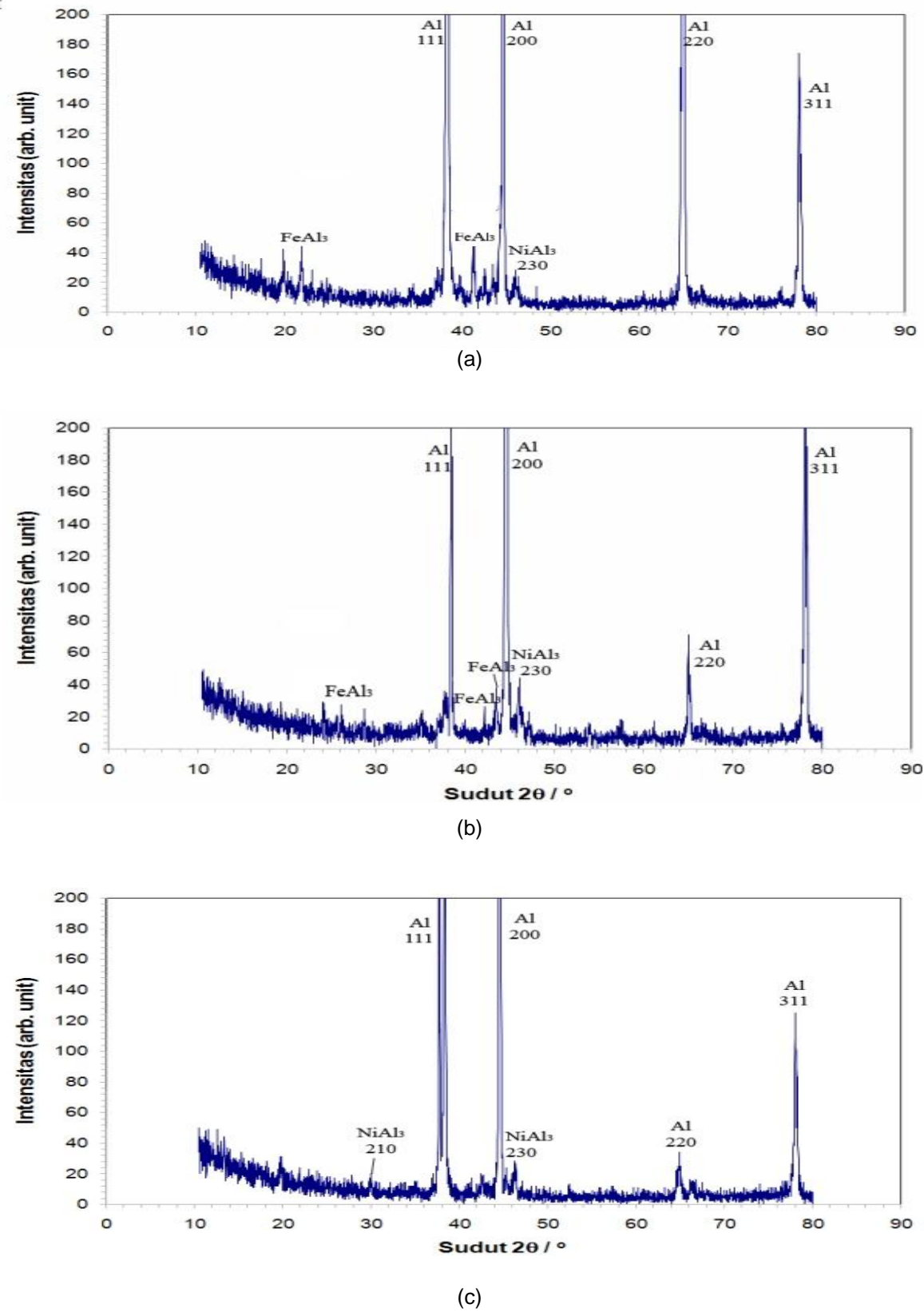
sinar x yang tidak memiliki puncak fasa θ seperti ditunjukkan pada Gambar 2c. Selain itu, penurunan sifat kekerasan ini dimungkinkan akibat dampak transformasi fasa terutama pada temperatur yang semakin tinggi. Transformasi fasa pada temperatur 550 °C dapat berdampak terhadap penurunan kerapatan dislokasi. Penurunan kerapatan dislokasi yang meningkat akan berdampak terhadap perubahan sifat kekerasan dan adanya perubahan fasa yang cenderung mengurangi rintangan pergerakan dislokasi. Pergerakan dislokasi relatif lebih mudah dengan semakin meningkat terjadinya perubahan fasa. Gambar 3 memperlihatkan pula struktur butir yang cenderung membesar dan berdampak terhadap batas butir. Hal ini memungkinkan batas butir akan semakin berkurang dan akan berpengaruh terhadap penurunan sifat kekerasan. Sementara itu, penurunan kekerasan pada temperatur 550 °C dapat dipacu oleh proses transformasi fasa yang cenderung mengarah kepada pembentukan satu fasa, yaitu fasa α , seperti ditunjukkan pada Gambar 2c. Proses transformasi fasa yang menghasilkan hanya satu fasa tersebut mengakibatkan potensi penghambat gerakan dislokasi menurun dan keadaan ini akan berdampak kepada penurunan kekuatan dan kekerasan bahan pula.



Gambar 1. Sifat kekerasan paduan AlFeNi terhadap temperatur pemanasan.

Gambar 2 memperlihatkan pola difraksi paduan AlFeNi hasil sintesis dan perlakuan panas pada temperatur 450 °C, 500 °C dan 550 °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°-80°. 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^[7] 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° dan 47°. Gambar 2a 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° dan puncak fasa θ pada sudut 2θ berkisar antara 22°, 41° dan 44°, sedangkan puncak fasa κ pada sudut 2θ berkisar 46°. Besaran sudut 2θ untuk puncak fasa α , θ dan κ pada pola difraksi Gambar 2a cenderung mendekati sama dengan besaran sudut 2θ pada JCPDS dan hasil perhitungan dengan persamaan BRAGG. Sementara itu, fasa α dan θ menunjukkan lebih dari 3 puncak, sedangkan fasa κ hanya memiliki 1 puncak. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur fasa yang terbentuk merupakan fasa α dan θ . Fasa α merupakan aluminium (Al), fasa θ adalah senyawa FeAl₃ dan fasa κ merupakan senyawa NiAl₃. Pembentukan fasa θ 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 dalam struktur fasa α telah melampaui batas yang diizinkan, yaitu melebihi di atas 0,04% Fe^[6] sehingga aluminium bereaksi mengikat Fe membentuk senyawa FeAl₃. Gambar 2b memperlihatkan pola difraksi paduan AlFeNi hasil sintesis dan perlakuan panas pada temperatur 500°C yang menghasilkan puncak-puncak fasa α pada sudut 2θ berkisar antara 39°, 45°, 65°, 78°. Sementara itu, puncak fasa θ berkisar antara 26°, 43°, 44°, 46°, 47° dan puncak fasa κ pada sudut 2θ berkisar antara 43°, 46°, 47°. Pola difraksi paduan AlFeNi hasil perlakuan panas pada temperatur 500°C pada Gambar 2b menunjukkan terdapat tiga puncak fasa θ dan satu puncak fasa κ . Hal ini menunjukkan bahwa paduan AlFeNi hasil perlakuan panas pada temperatur 500°C hanya terbentuk fasa θ , sedangkan fasa κ belum terbentuk karena hanya memiliki satu puncak. Puncak fasa θ dan κ pada Gambar 2b dan 2a relatif sama tidak ada perbedaan yang berarti dan ini menunjukkan bahwa pada temperatur 500°C bahan tidak mengalami transformasi fasa dan pertumbuhan fasa. Gambar 2c memperlihatkan tidak terjadi pembentukan puncak fasa θ maupun puncak fasa κ dan hanya ada puncak fasa α . Dengan demikian, paduan AlFeNi hasil perlakuan panas pada temperatur 550°C hanya memiliki satu fasa, yaitu fasa α . Kondisi ini menunjukkan bahwa pada temperatur 550°C atau di atas temperatur tersebut telah terjadi proses transformasi fasa yang memungkinkan perubahan dari struktur dua fasa menjadi satu fasa.



Gambar 2. Pola difraksi sinar x paduan AlFeNi pada temperatur pemanasan (a) 450 °C, (b) 500 °C, (c) 550 °C.

Topografi mikrostruktur paduan AlFeNi hasil perlakuan panas pada temperatur 450 °C, 500 °C dan 550 °C diperlihatkan pada Gambar 3. Gambar 3a dan b memperlihatkan struktur butir paduan AlFeNi 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 3c memperlihatkan kecenderungan perubahan struktur butir yang

memanjang dan bertransformasi membentuk struktur butir yang relatif lebih besar. Kondisi ini dimungkinkan karena dipacu oleh terjadinya proses transformasi fasa yang mengarah ke struktur fasa α dan cenderung hanya terbentuk satu fasa, seperti ditunjukkan pada pola difraksi sinar x Gambar 2c. Pembentukan struktur fasa yang dipacu oleh energi yang semakin meningkat pada temperatur relatif tinggi ini akan berdampak terhadap struktur butir.

Gambar 4 memperlihatkan topografi mikrostruktur dan spektrum EDS stoikiometrik hasil pengamatan dengan SEM.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. Mikrostruktur Paduan AlFeNi 1% Fe 1% Ni dengan mikroskop optik (a). 450 °C, (b). 500 °C,(c). 550 °C.

Gambar 4a dan 4b memperlihatkan topografi-mikrostruktur dengan pembesaran 2000 x dan 5000 x yang diamati pada daerah tertentu. Gambar 4.a tampak bahwa struktur butir cenderung berwarna gelap dan terang. Struktur butir yang daerah berwarna terang teridentifikasi sebagai fasa α dan daerah yang berwarna gelap cenderung mengidentifikasikan sebagai senyawa fasa

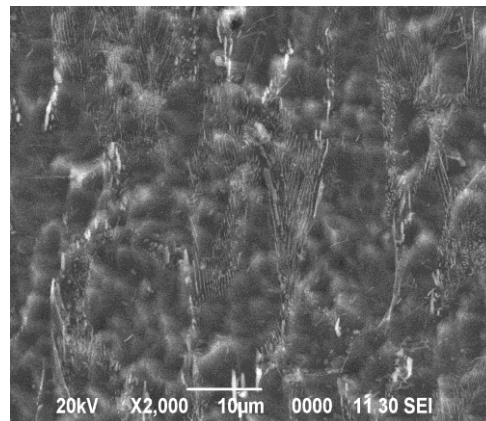
logam. Selain itu, pembesaran 2000x tampak lebih jelas daerah batas butir yang cenderung berwarna gelap dan berbentuk serat-jarum memanjang.

Serat-jarum pada batas butir tampak tumbuh memanjang dan pada daerah batas butir ini merupakan awal pembentukan senyawa fasa logam. Senyawa fasa logam

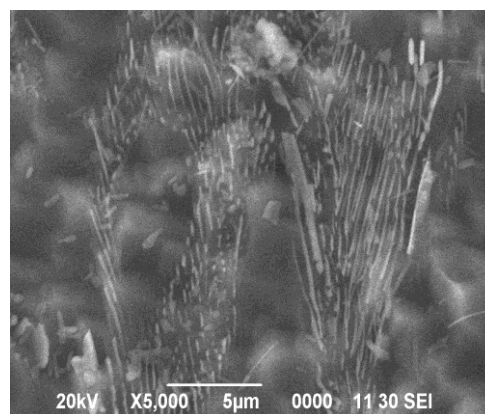
(Maman Kartaman, M. Husna Al Hasa, Ahmad Paid)

yang terbentuk dimungkinkan senyawa fasa θ dan κ . Fasa θ dan κ ini merupakan senyawa logam FeAl_3 dan NiAl_3 . Hal ini sebagaimana ditunjukkan pada pola difraksi sinar-x yang mengidentifikasi puncak fasa logam tersebut pada Gambar 2. Gambar 2.a dan 2.b mengidentifikasi bahwa senyawa fasa yang lebih dominan terbentuk dalam paduan aluminium ini adalah fasa θ dan α . Gambar mikrostruktur dengan pembesaran 5000 x akan tampak lebih jelas bentuk topografinya dan bentuk serat-jarum pada daerah batas butir seperti rambut yang tumbuh memanjang. Serat jarum yang tumbuh pada daerah batas butir tersebut merupakan senyawa logam yang terbentuk dari unsur pepaduan logam. Analisis EDS (*Electron Dispersif X-Ray Spectrophotometer*) pada daerah mikrostruktur pembesaran 5000x yang berbentuk serat-jarum memperlihatkan hasil

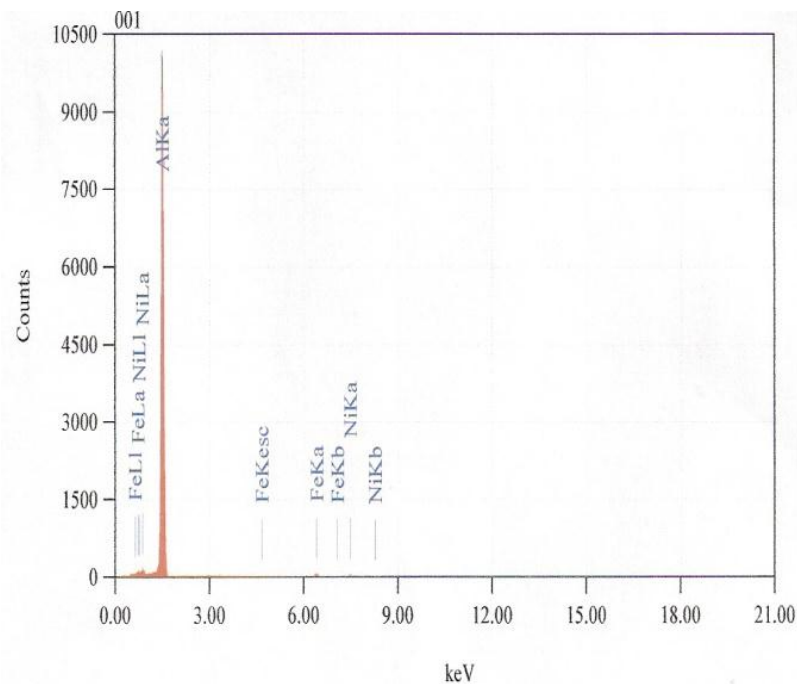
identifikasinya pada Gambar 4c. Gambar 4c mengidentifikasi bahwa pada daerah tersebut terkandung unsur senyawa logam paduan AlFeNi , yaitu Al, Fe dan Ni. Analisis semi kuantitatif pada daerah titik tersebut menunjukkan terdapat persentase Al sekitar 93,61%, Fe sebesar 3,15% dan Ni sebesar 3,23%. Kondisi 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 2. Meskipun demikian senyawa logam yang relatif dominan terbentuk adalah fasa θ .



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Topografi mikrostruktur paduan AlFeNi dengan SEM (a) pembesaran 2000X, (b) pembesaran 5000X dan (c) Spektrum EDS paduan AlFeNi.

SIMPULAN

Sifat kekerasan paduan AlFeNi cenderung menurun Pada temperatur 550 °C seiring dengan terjadinya transformasi fasa. Struktur fasa paduan AlFeNi mengalami perubahan akibat perlakuan panas pada temperatur 550 °C. Pada temperatur 550 °C terjadi transformasi fasa paduan AlFeNi membentuk satu fasa, yaitu fasa α . Struktur fasa paduan AlFeNi relatif stabil pada temperatur 450 °C dan 500 °C dalam bentuk dua fasa, yaitu fasa α (Al) dan fasa θ (FeAl_3).

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Al Hasa, 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.
- [2]. Raynor, G.V., Rivlin, G.V. (1988). Phase Equilibria in iron Ternary Alloy. The institute of Metals, New york.
- [3]. Petzow, G., Effenberg, G. (1992). Ternary Alloy AlFeNi. Vol.15, Germany: ASM, International.
- [4]. 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.
- [5]. Mondolfo, L.F. (1979). Aluminium Alloys, Structure and Properties. p.283-285, Buterworths, London.
- [6]. Anonim. (1992). American Society for testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards. Section 3, Vol. 03.02. Philadelphia: ASTM.
- [7]. Anonym. (2008). PDF Card, International Center For data Diffraction.