

PENGARUH KADAR Ni TERHADAP SIFAT KEKERASAN, LAJU KOROSI DAN STABILITAS PANAS BAHAN STRUKTUR BERBASIS ALUMINIUM

M. Husna Al Hasa

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir- BATAN
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang

ABSTRAK

PENGARUH KADAR Ni TERHADAP SIFAT KEKERASAN, LAJU KOROSI DAN STABILITAS PANAS BAHAN STRUKTUR BERBASIS ALUMINIUM. Pengembangan bahan struktur *cladding* berbasis aluminium dilakukan dengan memvariasikan kadar unsur Ni yang dapat mengakibatkan perubahan sifat logam terutama sifat mekanik, sifat fisik dan sifat termal. Penelitian dan pengembangan bahan struktur ini bertujuan untuk mendapatkan bahan yang memiliki sifat mekanik dan ketahanan korosi yang relatif baik. Pengujian sifat kekerasan bahan struktur berbasis aluminium AlFeNi dilakukan dengan menggunakan metoda Vicker. Pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan metalografik-optikal. Pengukuran laju korosi dilakukan dengan potentiostat. Analisis sifat termal dilakukan berdasarkan pola sifat kapasitas panas bahan. Hasil pengujian sifat kekerasan menunjukkan paduan AlFeNi dengan kadar 2Fe1Ni, 2Fe2Ni, 2Fe3Ni dan 2Fe4Ni masing-masing berkisar 50HV, 53 HV, 58HV dan 64HV. Sifat kekerasan paduan AlFeNi menunjukkan peningkatan dengan meningkatnya unsur pepadu Ni dalam paduan. Hasil pengamatan metalografik-optikal memperlihatkan mikrostruktur paduan mengalami perubahan seiring dengan meningkatnya kadar Ni dalam paduan. Mikrostruktur dengan kadar 2Fe1Ni, 2Fe2Ni, 2Fe3Ni dan 2Fe4Ni memperlihatkan struktur butir berbentuk dendrit yang cenderung mengecil. Hasil pengamatan dengan potentiostat menunjukkan laju korosi paduan aluminium 2Fe1Ni berkisar 0,064 mpy, 2Fe2Ni berkisar 0,16 mpy, 2Fe3Ni berkisar 0,39 mpy dan 2Fe4Ni berkisar 0,96 mpy. Laju korosi paduan AlFeNi cenderung meningkat dengan meningkatnya kadar Ni dalam paduan. Hasil analisis pola sifat kapasitas panas aluminium dan paduan aluminium pada berbagai temperatur hingga mencapai pada 400 °C menggunakan *differential scanning calorimetry* memperlihatkan kecenderungan perubahan pola yang relatif sama. sifat termal paduan AlFeNi relatif stabil dan cenderung relatif sama dengan pola sifat termal Al. Sifat termal paduan AlFeNi tampak tidak mengalami perubahan yang berarti meskipun pada temperatur yang lebih tinggi hingga pada temperatur 240 °C.

Kata kunci : Pengaruh Ni, kekerasan, laju korosi, stabilitas panas.

ABSTRACT

EFFECT OF Ni CONTENT ON THE HARDNESS, CORROSION RATE AND HEAT STABILITY OF CLADDING STRUCTURE MATERIAL WITH AN ALUMINUM BASE ALLOY. *The development of cladding structure material with an aluminum base alloy was performed by variation of Ni content in the alloy. Various of Ni content in alloy will generates material properties changes in mechanical, physical and thermal. The investigation and development of cladding structure material was studied in order to get materials which have good mechanical properties and corrosion resistance. The*

examination of the hardness of AlFeNi structure materials was observed using Vickers method. The microstructure observation was performed by optical metallography. The corrosion rate measurement was done by the potentiostat. The thermal analysis was done based on specific heat pattern. The hardness examination results of AlFeNi alloy with 1%, 2%, 3%, 4%wt Ni contents were respectively about 50 HV, 53 HV, 58 HV and 64 HV. The hardness of AlFeNi alloy showed improvement with increasing Ni content in the alloy. Result of optical metallographic observation showed microstructure of AlFeNi alloy change along with the increasing of Ni content in the alloy. Microstructure of the AlFeNi alloy with 1%, 2%, 3% and 4%wt Ni contents showed that grain structure was dendritic formed inclined smaller. The corrosion rate observation result of the AlFeNi alloy with 2%, 3% and 4%wt Ni contents were about 0.064 mpy, 0,16 mpy, 0,39 mpy and 0,96 mpy. The corrosion rate of AlFeNi alloy showed tend to increase with increasing of Ni content in the alloy. The specific heat analysis result of the aluminium and aluminium alloy at the variation temperature up to 400°C showed tendency of specific heat pattern changes were relatively the same. Thermal properties of AlFeNi alloy was relatively stable and its pattern relatively the same with the aluminum. The AlFeNi alloy without any thermal properties changes although at the higher temperature up to 240 °C.

Key words : Ni influence, hardness, corossion velocity, heat stability.

PENDAHULUAN

Penelitian dan pengembangan bahan struktur *cladding* untuk bahan bakar reaktor riset terus dilakukan oleh berbagai pihak didunia seiring dengan pengembangan bahan bakar maju berdensitas tinggi. Pengembangan bahan struktur *cladding* ini diharapkan akan mendapatkan paduan logam yang memiliki kekuatan dan ketahan korosi yang relatif baik. Bahan struktur *cladding* yang berfungsi sebagai pengungkung gas hasil fisi harus memiliki sifat mekanik yang memadai, ketahanan korosi, stabilitas panas dan sifat penghantar panas yang relatif baik. Sifat mekanik *cladding* bahan bakar reaktor riset diharapkan memiliki kekerasan diatas 50 HV dan laju korosi yang serendah mungkin. Bahan struktur *cladding* yang relatif mendekati kriteria sebagaimana tersebut di atas, antara lain logam paduan berbasis aluminium^[1]. Paduan logam berbasis aluminium yang berpotensi untuk digunakan sebagai *cladding* bahan bakar berdensitas tinggi antara lain, seperti paduan logam AlFeNi^[2]. Pengembangan bahan bakar maju berdensitas tinggi dilakukan untuk mengkonversi pemakaian uranium pengayaan tinggi ke pemakaian uranium pengayaan rendah searah dengan program RERTR (*Reduced Enrichment*

for Research and Test Reactors)^[3,4]. Berbagai pihak di dunia telah mengembangkan bahan bakar berdensitas tinggi dengan menggunakan bahan struktur *cladding* paduan AlFeNi^[5]. Hasil penelitian yang telah dilakukan oleh berbagai pihak menunjukkan bahwa paduan AlFeNi memiliki sifat mekanik dan ketahanan korosi yang relatif lebih baik^[5,6]. Penelitian ini akan melakukan kajian secara eksperimen tentang pengaruh kadar Ni terhadap sifat mekanik, laju korosi dan stabilitas panas paduan AlFeNi.

Raynor dan Mondolfo menjelaskan melalui diagram fasa sistem biner dan *ternary* Al-Fe-Ni^[7,8] bahwa komposisi paduan akan berpengaruh terhadap pembentukan senyawa fasa yang akan berdampak pada sifat bahan terutama sifat mekanik, fisik dan termal. Sifat mekanik bahan cenderung akan semakin meningkat dengan semakin bertambah kadar komposisi paduan. Komposisi paduan akan memberikan kontribusi terhadap perubahan mikrostruktur fasa logam. Bentuk dan besar mikrostruktur butir akan sangat berkaitan dengan perubahan sifat mekanik terutama kekuatan dan kekerasan bahan. Penelitian ini dilakukan berdasarkan eksperimen bertujuan untuk mendapatkan paduan logam berbasis

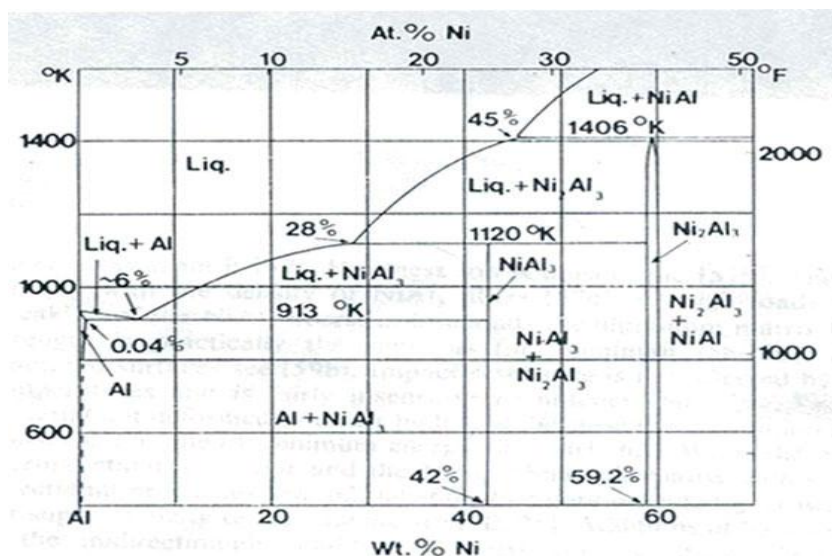
aluminium sebagai *cladding* bahan bakar reaktor riset yang memiliki kekuatan dan ketahanan korosi yang relatif baik.

TEORI

Reaksi fasa eutektik aluminium dengan nikel seperti ditunjukkan pada Gambar 1, mulai terjadi pada temperatur 640 °C dengan kadar nikel sekitar 6% berat dan batas larut padat Ni dalam fasa α (Al) maksimum 0,04 %. Temperatur di bawah 847 °C pada daerah komposisi 42 % Ni akan terbentuk fasa κ (NiAl_3) seluruhnya. Temperatur di atas 640 °C hingga 847 °C dengan komposisi Ni di atas 6 % dan di bawah 42% terbentuk fasa $L+\kappa$. Apabila kadar Ni dalam paduan melebihi batas larut padat di atas 0,04 % akan terbentuk fasa κ (NiAl_3). Fasa κ mulai terbentuk pada daerah komposisi 0,04-42 % berat Ni di bawah temperatur 640 °C. Fasa κ ini merupakan hasil transformasi dari pepaduan Al dan Ni yang mengikuti reaksi fasa *eutectic*, yaitu $L \rightarrow \alpha+\kappa$. Besarnya fasa κ sangat dipengaruhi oleh tingkat prosentase kadar Ni dalam paduan. Kadar Ni semakin tinggi mengakibatkan

semakin memperbesar jumlah fasa κ dalam paduan. Temperatur di bawah 847 °C pada daerah komposisi di atas 42 % dan di bawah 59,2 % Ni terbentuk fasa $\text{NiAl}_3 + \text{Ni}_2\text{Al}_3$. Pada temperatur dibawah 1133 °C dengan komposisi antara di atas 59,2 % hingga 60 % Ni terjadi pembentukan fasa Ni_2Al_3 seluruhnya. Pada daerah komposisi di atas 60 % Ni akan terbentuk fasa $\text{Ni}_2\text{Al}_3 + \text{NiAl}$.

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 . Fasa $\alpha+\theta$ mulai terbentuk pada daerah komposisi 0,04-37 % berat Fe di bawah temperatur 652 °C. Fasa $\alpha+\theta$ ini merupakan hasil transformasi dari pepaduan Al dan Fe yang mengikuti reaksi fasa *eutectic*, yaitu $L \rightarrow \alpha+\theta$. Besarnya fasa α dan θ sangat dipengaruhi oleh kadar Fe sebagai unsur pepadu. Kadar Fe yang semakin tinggi mengakibatkan semakin memperbesar jumlah fasa θ dalam paduan.



Gambar 1. Diagram fasa biner Al-Ni [8]

TATAKERJA

Pengembangan bahan struktur berbasis aluminium dilakukan dengan memvariasikan kadar unsur Ni yang dapat mengakibatkan perubahan sifat logam terutama sifat mekanik, sifat fisik dan sifat termal. Bahan dasar Aluminium dipadukan melalui proses sintesis dengan unsur padu Ferro dan Nikel berdasarkan persentase kadar berat unsur padu, yaitu 2%Fe1%Ni, 2%Fe2%Ni, 2%Fe3%Ni dan 2%Fe4%Ni. Paduan dilakukan bertahap dengan cara proses penekanan mekanik dan peleburan dalam suasana gas *inert*. Peleburan dilakukan secara berulang untuk menghasilkan paduan yang relatif homogen. Proses paduan menghasilkan paduan AlFeNi dalam bentuk *ingot*. *Ingot* paduan AlFeNi sebagai spesimen uji terlebih dahulu permukaannya dibersihkan dan dihaluskan menggunakan mesin gerinda dan poles serta etsa. Pengetsaan dilakukan dengan mencelupkan spesimen ke dalam larutan etsa Keller yang terdiri dari 2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO₃ dan 90 mL H₂O. *Ingot* paduan AlFeNi hasil poles dan etsa dilakukan pengamatan dan pengujian. Pengujian sifat kekerasan bahan struktur berbasis paduan aluminium AlFeNi dilakukan dengan menggunakan metoda Vickers. Pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan metalografi menggunakan mikroskop-optik. Pengukuran laju korosi paduan AlFeNi dilakukan dengan menggunakan potensiostat dan stabilitas termal dianalisis berdasarkan pola sifat kapasitas panas bahan hasil pengukuran dengan *differential scanning calorimetry*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan kekerasan terhadap paduan AlFeNi pada berbagai konsentrasi paduan dilakukan dengan menggunakan metoda Vickers seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Pengamatan mikrostruktur paduan AlFeNi secara metalografi-optik ditunjukkan

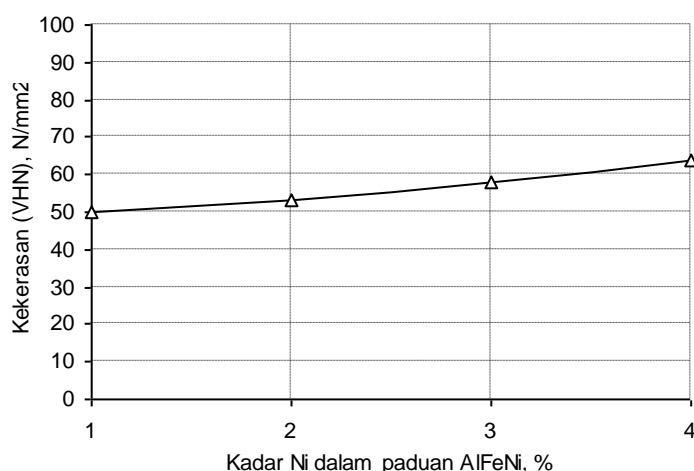
pada Gambar 3. Pengukuran laju korosi paduan AlFeNi dengan potensiostat ditunjukkan pada Gambar 4. Analisis sifat termal paduan AlFeNi berdasarkan perubahan pola kapasitas panas ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 2 memperlihatkan variasi sifat kekerasan paduan AlFeNi hasil paduan dengan berbagai konsentrasi Ni. Sifat kekerasan paduan AlFeNi cenderung meningkat dengan semakin tinggi kadar Ni dalam paduan. Sifat kekerasan paduan AlFeNi mencapai 64 HV dengan konsentrasi (2%Fe, 4%Ni). Hal ini terjadi karena paduan AlFeNi mengalami penguatan larut-padat hingga mencapai sekitar 0,05% kadar Fe dan Ni^[8] ke dalam struktur fasa α -Al. Penguatan larut-padat pada struktur fasa α -Al terjadi secara substitusi dengan menempati kisi sel-satuan FCC (*Face Centered Cubic*). Proses larut-padat atom Fe dan Ni ke dalam kisi struktur fasa α -Al cenderung mengakibatkan terjadinya distorsi parameter kisi yang berakibat menimbulkan medan tegangan disekitar atom yang larut. Kondisi seperti ini semakin berpotensi menghambat gerakan dislokasi yang mengarah kepada penguatan bahan. Kekerasan paduan AlFeNi dengan kadar (2%Fe,4%Ni) relatif tinggi karena pada konsentrasi ini dimungkinkan terbentuknya beberapa fasa hasil reaksi antara Al dengan Fe dan Ni membentuk senyawa fasa θ (FeAl₃), κ (NiAl₃) dan τ (FeNiAl₉)^[8,9]. Senyawa fasa yang terbentuk dalam paduan ini berkontribusi pula merintanggi gerakan dislokasi, yang berdampak terhadap peningkatan kekerasan bahan.

Gambar 2 memperlihatkan pula bahwa pada konsentrasi di atas 1% Ni tampak terjadi kenaikan kekerasan dengan semakin meningkatnya kandungan Ni, yaitu dari 50 HV pada 1%Ni menjadi 53 HV pada 2% Ni, 58 HV pada 3%Ni dan 64 HV pada 4% Ni. Peningkatan kekerasan ini menunjukkan bahwa jumlah kadar Ni dalam paduan sangat

berpengaruh terhadap perubahan sifat mekanik. Kondisi ini dimungkinkan karena adanya pertumbuhan fasa kedua yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya prosentase kadar Ni. Peningkatan fasa kedua yang semakin tinggi akan berdampak terhadap peningkatan kekerasan karena kehadiran fasa kedua tersebut berpotensi merintangangi pergerakan dislokasi.

Pergerakan dislokasi semakin menjadi lebih sukar dengan semakin bertambah banyak pembentukan fasa kedua. Selain itu, struktur butir yang cenderung mengecil, seperti ditunjukkan pada Gambar 3 mengakibatkan butir dan batas butir semakin banyak. Batas butir yang semakin banyak akan berkontribusi meningkatkan kekuatan atau kekerasan. Hal ini karena batas butir merupakan sumber dislokasi yang juga sebagai penghambat gerakan dislokasi.



Gambar 2. Variasi kekerasan paduan AlFeNi terhadap peningkatan kadar Ni

Mikrostruktur paduan AlFeNi dengan kadar (2%Fe 1% Ni), 2%Fe 2% Ni), (2%Fe 3% Ni) dan (2%Fe 4% Ni) diperlihatkan pada Gambar 3. Gambar 3a memperlihatkan struktur butir paduan AlFeNi cenderung berbentuk dendrit dan diduga mulai terbentuk senyawa fasa θ , κ dan τ . Pembentukan fasa tersebut diawali pada batas butir karena energi pada daerah batas butir relatif tinggi daripada di daerah butir sehingga menyebabkan daerah batas butir menjadi lebih reaktif daripada di butir. Energi pada batas butir relatif tinggi karena batas butir adalah daerah yang sangat tidak stabil dan batas butir merupakan daerah pertemuan kristal-kristal atom dengan orientasi yang berbeda atau acak. Fasa yang terbentuk

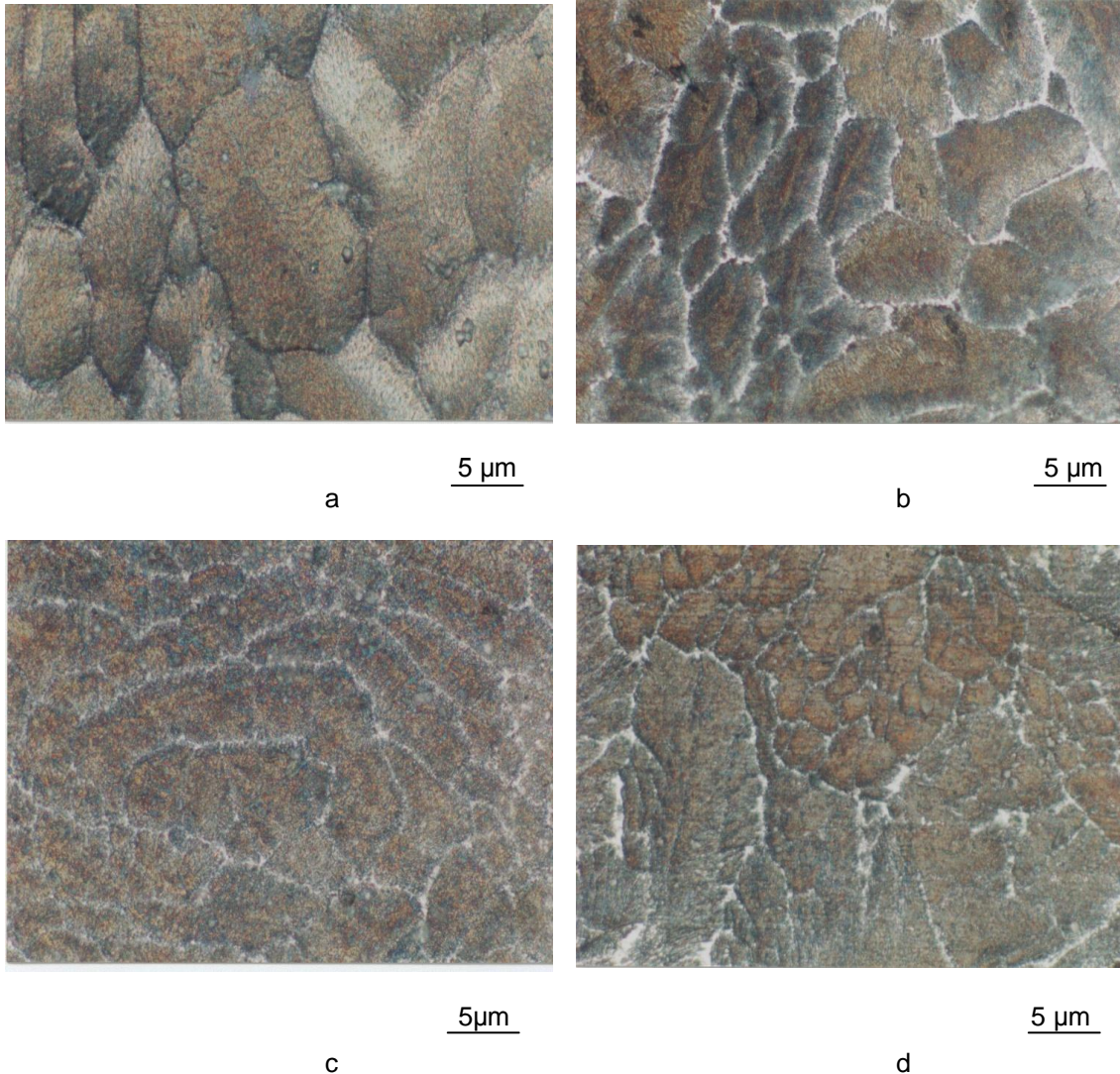
pada paduan AlFeNi merupakan rejeksi dari larutan padat aluminium bila kadar Fe atau Ni yang terkandung dalam paduan tersebut melebihi kemampuan larut-padat fasa α -Al.

Mikrostruktur paduan AlFeNi dengan kadar 2%Fe,2%Ni yang ditunjukkan pada Gambar 3b memperlihatkan kecenderungan perubahan struktur butir membentuk dendrit yang memanjang. Kondisi ini dimungkinkan karena terjadi pertumbuhan struktur butir fasa θ , κ dan τ yang cenderung semakin meningkat. Peningkatan pembentukan struktur butir dendrit ini terjadi karena jumlah kadar unsur Ni dalam paduan semakin meningkat. Sebagai akibatnya unsur Ni yang bereaksi dengan Al membentuk senyawa,

NiAl_3 , FeNiAl_9 yang cenderung semakin bertambah. Kondisi ini ditandai dengan perubahan struktur butir dendrit yang semakin meningkat, seperti diperlihatkan pada Gambar 3 b dan 3c.

Mikrostruktur paduan AlFeNi dengan kadar 2%Fe,3%Ni dan 2%Fe,4%Ni yang ditunjukkan pada Gambar 3c dan 3d

memperlihatkan bahwa struktur butir dendrit bertransformasi membentuk struktur butir yang relatif lebih kecil. Mikrostruktur butir pada Gambar 3c dan 3d cenderung tidak mengalami perubahan dendrit yang relatif besar dibandingkan dengan struktur butir dendrit yang ditunjukkan pada Gambar 3b.



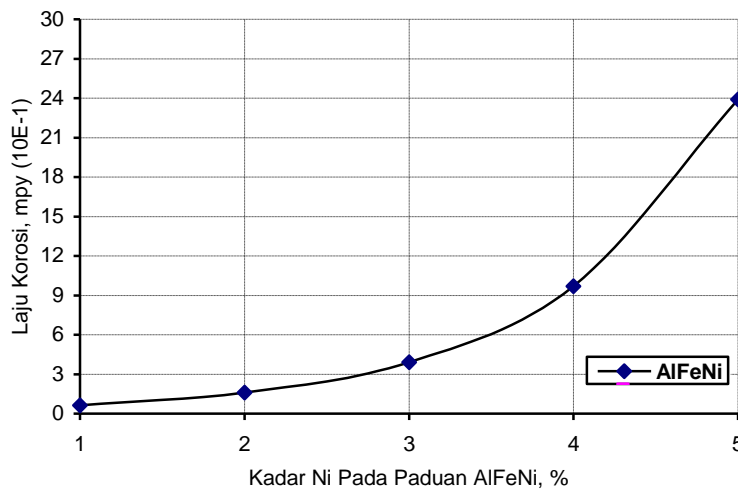
Gambar 3. Mikrostruktur paduan AlFeNi

Gambar 4 memperlihatkan laju korosi paduan AlFeNi hasil pepaduan dengan berbagai konsentrasi Ni. Laju korosi cenderung meningkat dengan kadar Ni semakin tinggi. Laju korosi paduan AlFeNi dengan kadar 1 % Ni sebesar 0,064 mpy, 2%

Ni sebesar 0,16 mpy, 3% Ni sebesar 0,39 mpy dan dengan kadar 4 % Ni sebesar 0,96 mpy. Laju korosi paduan AlFeNi dengan kadar 2 % Fe 1% Ni relatif lebih rendah dan cenderung meningkat dengan kadar Ni semakin besar. Kecenderungan peningkatan

laju korosi dengan kadar Ni yang semakin tinggi dimungkinkan karena peningkatan energi potensial. Hal ini dimungkinkan karena percepatan korosi terjadi akibat adanya beda potensial. Beda potensial semakin besar memungkinkan akan semakin memacu proses korosi. Selain itu, penambahan Ni dalam paduan dapat menyebabkan bertambahnya jumlah partikel Ni yang mendorong pembentukan senyawa fasa.

Pembentukan senyawa fasa tersebut dapat meningkatkan berat atom dan densitas. Hal ini dapat mempengaruhi rapat arus yang memungkinkan memacu laju korosi semakin meningkat. laju korosi dapat meningkat pula bila antara anoda dan katoda terdapat selisih energi bebas.



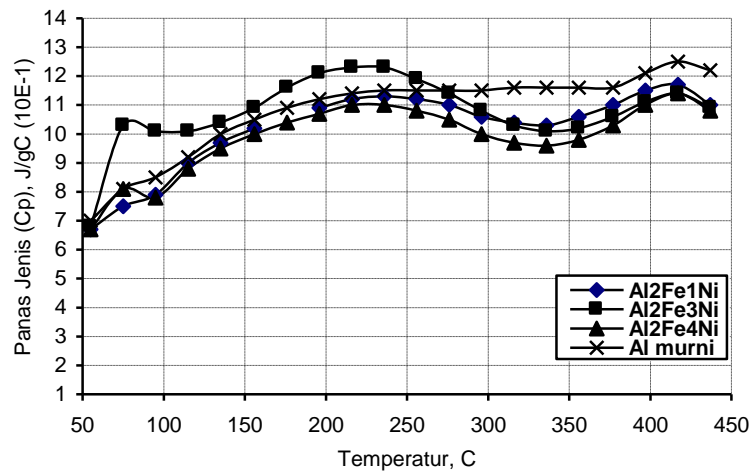
Gambar 4. Pengaruh kadar Ni paduan AlFeNi terhadap laju korosi

Gambar 5 memperlihatkan variasi kapasitas panas Al murni dan Al paduan pada berbagai temperatur. Berdasarkan pustaka [10] menjelaskan bahwa kapasitas panas paduan AlFeNi relatif stabil hingga mencapai kadar 4% Ni. Kapasitas panas paduan Al₂Fe₁Ni, Al₂Fe₃Ni dan Al₂Fe₄Ni yang diperlihatkan pada Gambar 5 cenderung mengikuti pola kapasitas panas Al murni. Hal ini menunjukkan bahwa sifat termal paduan AlFeNi relatif stabil dan cenderung relatif sama dengan pola sifat termal Al. Sifat termal paduan AlFeNi tampak tidak mengalami perubahan yang berarti meskipun pada temperatur yang lebih tinggi hingga pada temperatur 240 °C. Gambar 5 memperlihatkan pula nilai kapasitas panas paduan AlFeNi dan Al-murni cenderung meningkat seiring kenaikan temperatur hingga

pada 240 °C. Pada temperatur di atas 240 °C nilai kapasitas panas cenderung menurun dan kemudian di atas temperatur 340 °C nilai kapasitas panas meningkat hingga pada temperatur 420 °C. Kapasitas panas paduan Al₂Fe₁Ni dan Al₂Fe₄Ni relatif lebih rendah daripada Al murni. Pada temperatur diatas 250°C hingga 350 °C nilai kapasitas panas paduan AlFeNi cenderung menurun, sedangkan kapasitas panas Al murni relatif masih stabil hingga temperatur 375 °C. Kapasitas panas paduan Al₂Fe₃Ni relatif lebih tinggi daripada Al murni hingga pada temperatur 275 °C. Pada temperatur diatas 275 °C kapasitas panas paduan Al₂Fe₃Ni cenderung menurun hingga temperatur 350 °C dan relatif lebih rendah dari pada kapasitas panas Al-murni. Kondisi di atas terutama pada

temperatur di atas 240 °C terjadi penurunan kapasitas panas ketiga paduan AlFeNi. Hal ini dimungkinkan karena di atas temperatur

tersebut menunjukkan bahwa terjadi perubahan kondisi sifat paduan yang diakibatkan oleh adanya senyawa fasa.



Gambar 5. Variasi kapasitas panas Al dan paduan AlFeNi terhadap perubahan temperatur

SIMPULAN

Bahan struktur Paduan AlFeNi berbasis aluminium sebagai bahan *cladding* bahan bakar memiliki sifat mekanik yang cenderung meningkat dengan meningkatnya kadar Ni hingga mencapai 64 HV. Mikrostruktur paduan mengalami perubahan seiring dengan meningkatnya kadar Ni dalam paduan dengan memperlihatkan struktur butir berbentuk dendrit yang cenderung mengecil. Laju korosi paduan AlFeNi cenderung meningkat dengan meningkatnya kadar Ni dalam paduan mencapai 0,96 mpy. Sifat termal paduan AlFeNi relatif stabil dan cenderung relatif sama dengan pola sifat termal Al. Sifat termal paduan AlFeNi tampak tidak mengalami perubahan yang berarti meskipun pada temperatur yang lebih tinggi hingga pada temperatur 240 °C. Paduan AlFeNi dengan kadar 2%Fe, 1% Ni relatif lebih mendekati persyaratan *cladding* bahan bakar yang memiliki sifat kekerasan di atas 50 HV dan laju korosi yang relatif lebih rendah. Meskipun demikian masih perlu dikaji lebih lanjut dampak pengaruh iradiasi terhadap sifat bahan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami 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. Kami tidak lupa pula mengucapkan terima kasih kepada Kepala PTBN, dan direktur produksi PT. Batan Teknologi yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. BENJAMIN M.MA, (1983): *Nuclear Reactor Materials and Applications*, VNR Company Inc, USA, 282-297
2. FANJAS, Y., (1991): *Status of LEU Fuels At CERCA*, <http://www.anl.gov>.
3. TRAVELLI, A., (1996), *Status and Progress of The RERTR Program*, Proceedings, The 19 th International Meeting on Reduced Enrichment for Reseach and Test Reactors, Seoul, Korea, hal. 4-8.
4. DAVID, G.H.: *United States Policy Initiatives in Promoting The RERTR Program*, Proceedings, The 19 th

- International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test reactors, Seoul, Korea, hal. 14, 1996.
5. BALLAGNY, A.: *Situation of technological Irradiation Reactors A Progress Report On The Jules Horowitz Reactor Project.*, <http://www.anl.gov>.
 6. BALLAGNY, A.: *Main Technical of The Jules Horowitz Reactor Project to Achieve High Flux Performances and High Safety Level.* <http://www.anl.gov>.
 7. RAYNOR, GV., RIVLIN, GV.: Phase Equilibria in iron Ternary Alloy, New york, The institute of Metals, 1988, 110
 8. MONDOLFO, L.F, (1976): *Aluminium Alloys, Structure and Properties*, London, hal. 532-532.
 9. PETZOW, G., EFFENBERG, G., (1992), *Ternary Alloy AlFeNi*, Vol.15, Germany: ASM, International,
 10. ASLINA,BG, ALHASA, MH, MASRUKAN.: Analisis Sifat Termal Paduan AlFeNi Sebagai Kelongsong Paduan Bahan Bakar Reaktor Riset, Jurnal Teknologi Bahan Nuklir, vol.3.No.3, 2007, PTBN, BATAN.