

PENINGKATAN SIFAT MEKANIK BAHAN STRUKTUR PADUAN ALUMINIUM FERRO NIKEL DENGAN PENGUATAN FASA KEDUA DAN STRUKTUR BUTIR

M.Husna Al Hasa

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan Puspptek, Serpong Tangerang

ABSTRAK

PENINGKATAN SIFAT MEKANIK BAHAN STRUKTUR PADUAN ALUMINIUM FERRO NIKEL DENGAN PENGUATAN FASA KEDUA DAN STRUKTUR BUTIR. Pengembangan paduan logam aluminium AlFeNi sebagai bahan struktur cladding bahan bakar dilakukan sebagai antisipasi pengembangan bahan bakar reaktor riset berdensitas tinggi guna mengimbangi sifat kekerasan bahan bakar. Paduan AlFeNi diperoleh melalui proses sintesis dengan metode kompaksi dan peleburan. Proses sintesis ini diharapkan menghasilkan peningkatan sifat mekanik paduan logam AlFeNi. Karakterisasi sifat mekanik, mikrostruktur dan identifikasi fasa dilakukan terhadap spesimen hasil sintesis. Pengujian sifat mekanik dilakukan dengan pengukuran kekerasan paduan menggunakan metode Vicker. Analisis mikrostruktur dilakukan dengan menggunakan metalografi-optikal. Analisis fasa dilakukan berdasarkan pola difraksi sinar x dan diagram kesetimbangan fasa. Hasil pengukuran kekerasan paduan AlFeNi dengan kadar 1,5%Fe, 2%Fe dan 3%Fe masing-masing berkisar 45 HV, 50 HV dan 59HV. Hasil analisis mikrostruktur memperlihatkan struktur butir berbentuk dendrit dan cenderung mengalami perubahan seiring dengan meningkatnya kadar Fe dalam paduan. Mikrostruktur butir dengan kadar 1,5%Fe, 2%Fe dan 3%Fe memperlihatkan struktur butir berbentuk dendrit yang cenderung mengecil dengan semakin tinggi kadar Fe dalam paduan. Hasil analisis pola difraksi sinar x memperlihatkan kecenderungan pembentukan fasa θ (FeAl_3) pada paduan AlFeNi dengan kadar 2%Fe dan fasa τ (FeNiAl_9) dengan kadar 3%Fe. Sifat kekerasan paduan AlFeNi relatif semakin meningkat seiring dengan meningkatnya unsur pepadu Fe dalam paduan.

Kata kunci: Paduan AlFeNi, kelongsong, kekerasan

ABSTRACT

MECHANICAL PROPERTIES ENHANCED OF THE NICKEL FERRO ALUMINUM ALLOY WITH SECOND PHASE REINFORCEMENT AND GRAIN STRUCTURE. Development of AlFeNi alloy for fuel cladding structure material was done as anticipation of the high density fuel development for research reactor to balance the fuel hardness. The AlFeNi alloy was got to pass synthesis process with method of compact and fusion. This synthesis was supposed will increase mechanical properties of the AlFeNi alloy. The characterization of mechanical properties, microstructure and phase identification was done towards spesimen synthesis result. Mechanical properties testing was conducted with measurement of alloy hardness by using Vicker tester. The microstructure analysis was performed by using optical metallography. The phase analysis was done based on x-ray diffraction pattern and phase equilibrium diagram. The hardness measurement result of the AlFeNi alloy with 1,5%Fe, 2%Fe and 3%Fe was about 45 HV, 50 HV and 59 HV. The microstructure analysis result showed grain structure was dendrite formed and tend to change along with the

increasing of Fe content in alloy. The grain microstructure with 1,5%Fe, 2%Fe and 3%Fe showed grain structure was dendrite formed inclined smaller with degree excelsior Fe content in the aalloy. The result of x-ray diffraction pattern analyst shows formation inclination the θ phasa ($FeAl_3$) in AlFeNi alloy with 2%Fe and phase ($FeNiAl_9$) with 3%Fe. The hardness of AlFeNi alloy was relatively more increase along with the increasing of Fe content in blend.

Keywords: AlFeNi alloy, cladding, hardness.

PENDAHULUAN

Paduan logam aluminium sudah digunakan secara luas dalam berabagai bidang sebagai komponen struktur pendukung dan utama pada kegiatan kontruksi dan industri, baik industri transportasi maupun instalasi nuklir. Pada instalasi nuklir paduan aluminium digunakan sebagai bahan struktur komponen reaktor dan bahan bakar terutama untuk *cladding* bahan bakar. *Cladding* bahan bakar berbasis aluminium telah dikembangkan oleh berbagai negara di dunia seiring dengan pengembangan bahan bakar maju berdensitas tinggi. Pengembangan bahan struktur aluminium sebagai *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 guna mengimbangi sifat kekerasan bahan bakar densitas tinggi. Paduan aluminium yang berpotensi untuk digunakan sebagai *cladding* bahan bakar berdensitas tinggi dimasa mendatang, antara lain, AlMgNi dan AlFeNi^[1]. Pengembangan bahan bakar maju berdensitas tinggi berorientasi kepada penggunaan uranium pengkayaan rendah sesuai dengan program RERTR (*Reduced Enrichment for research and test Reactors*)^[2,3]. Program ini bertujuan untuk mengkonversi pemakaian uranium dari pengayaan tinggi ke pengayaan rendah dan semua negara yang terikat dengan perjanjian NPT (*Non Proliferation Treaty*) telah menindaklanjuti program ini. Perancis telah mengembangkan bahan bakar berdensitas tingi dengan menggunakan bahan struktur kelongsong

paduan AlFeNi dan beberapa negara Eropa lainnya telah pula melakukan pengkajian penggunaan AlFeNi sebagai *cladding* bahan bakar^[4]. Penelitian yang dilakukan oleh beberapa negara, seperti Perancis menginformasikan bahwa paduan logam AlFeNi memiliki sifat mekanik dan ketahanan korosi yang relatif baik^[4,5]. Penelitian ini akan melakukan karakterisasi sifat paduan logam AlFeNi hasil eksperimen proses sintesis dengan metode metalurgi serbuk dan peleberun. Proses sintesis ini akan memberikan dampak peningkatan terhadap sifat logam terutama sifat mekanik. Proses sintesis dengan melakukan pemaduan tiga unsur logam Al, Fe dan Ni diharapkan akan meningkatkan sifat logam, seperti sifat kekuatan dan kekerasan. Menurut Dieter^[6] menyatakan bahwa penguatan sifat logam dapat ditingkatkan melalui beberapa mekanisme, antara lain dengan mekanisme pengerasan regangan (*strain hardening*), larut padat (*solid solution*), dan pembentukan fasa kedua (*second phase*). Pada penelitian 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. Pembentukan fasa dalam paduan sangat dipengaruhi oleh komposisi paduan dan suhu titik cair logam^[7]. Pembentukan fasa akan berpengaruh pula terhadap sifat kekerasan bahan. Sifat kekerasan bahan cenderung akan semakin meningkat dengan semakin bertambah kadar unsur paduan atau komposisi. Komposisi paduan juga akan memberikan kontribusi

terhadap perubahan mikrostruktur butir logam. Bentuk dan besaran mikrostruktur butir akan sangat berkaitan dengan perubahan sifat mekanik terutama kekuatan dan kekerasan bahan.

TEORI

Menurut Mondolfo^[7] dan Raynor^[8] bahwa reaksi fasa eutektik paduan aluminium dan besi mulai terjadi pada suhu 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 suhu 652 °C. Fasa $\alpha+\theta$ mulai terbentuk pada daerah komposisi 0,04-37 % berat Fe di bawah suhu 652 °C. Fasa $\alpha+\theta$ ini merupakan hasil transformasi dari pemaduan 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 pemadu. Kadar Fe semakin tinggi mengakibatkan semakin memperbesar jumlah fasa θ dalam paduan. Sementara itu, reaksi fasa eutektik aluminium dengan nikel mulai terjadi pada suhu 640 °C dengan kadar nikel sekitar 6% berat dan batas larut padat Ni dalam fasa α (Al) maksimum 0,04 %. Suhu di bawah 1147 °C pada daerah komposisi 37-40 % Fe terbentuk fasa θ seluruhnya, yaitu FeAl₃. Suhu di atas 652 °C hingga 1147 °C dengan komposisi Fe di atas 1,8 % dan di bawah 37% terbentuk fasa $L+\theta$. Apabila kadar Ni dalam paduan melebihi batas larut padat di atas 0,04 % memungkinkan terbentuknya fasa κ (NiAl₃). Fasa κ mulai terbentuk pada daerah komposisi 0,04-42 % berat Ni di bawah suhu 640 °C. Fasa κ ini merupakan hasil transformasi dari pemaduan 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. Mondolfo melalui diagram kesetimbangan fasa sistem *ternary* Al-Fe-Ni

menjelaskan bahwa mulai pada suhu 640 °C secara bersamaan dapat terjadi reaksi fasa yang membentuk fasa τ (FeNiAl₉). Hal ini dimungkinkan bila kadar Ni dan Fe memiliki jumlah yang besar dalam paduan. Menurut Dieter^[6], kekuatan logam dapat ditingkatkan melalui pemaduan dengan satu atau beberapa unsur pemadu. Penambahan unsur paduan dapat menghasilkan kondisi atom yang larut padat ataupun menghasilkan senyawa fasa yang membentuk fasa kedua. Penguatan dengan fasa kedua dapat ditingkatkan lagi dengan mengupayakan agar fasa kedua yang terjadi berbentuk halus dan tersebar merata. Penguatan melalui mekanisme larut padat (*solid solution*) terjadi akibat adanya atom-atom asing yang larut padat baik secara substitusi maupun interstisi. Atom asing yang larut padat tersebut dapat berupa unsur pemadu dalam bentuk paduan maupun inklusi berupa atom pengotor. Kelarutan atom-atom asing dalam bentuk larut padat mengakibatkan timbulnya medan tegangan disekitar atom yang larut dan kondisi ini akan berdampak terhadap pergerakan dislokasi. Dislokasi yang memiliki medan tegangan disekitarnya akan terhambat gerakannya bila melewati atom-atom yang larut padat tersebut. Pergerakan dislokasi semakin sukar dengan timbulnya medan tegangan sehingga mengakibatkan logam menjadi lebih kuat atau keras. Penguatan atau pengerasan dapat terjadi pula melalui mekanisme fasa kedua karena timbulnya senyawa fasa paduan. Pembentukan senyawa fasa kedua dalam paduan terjadi karena penambahan unsur paduan yang melampaui batas larut padat. Senyawa fasa yang terbentuk bersifat relatif keras dan pergerakan dislokasi cenderung akan terhambat oleh pembentukan fasa kedua tersebut. Pergerakan dislokasi yang terhambat oleh senyawa fasa kedua akan mengakibatkan memperkuat dan memperkeras logam. Penguatan dengan fasa kedua dapat ditingkatkan lagi dengan metode presipitasi yang mampu menghasilkan fasa kedua yang halus. Pengerasan presipitasi merupakan pengerasan melalui partikel endapan fasa

kedua yang halus dan menyebar. Distribusi presipitat dalam bentuk partikel endapan fasa kedua ini menimbulkan tegangan dalam (*internal stress*). Tegangan yang ditimbulkan semakin besar akan mengakibatkan semakin meningkat kekuatan atau kekerasan. Pengerasan presipitasi ini terjadi melalui proses perlakuan panas, *quenching* dan *aging*. Paduan logam dalam bentuk dua fasa atau lebih dipanaskan pada suhu tertentu sehingga senyawa fasa tersebut akan larut-padat dalam satu fasa yang relatif homogen. Fasa yang relatif homogen tersebut kemudian didinginkan secara cepat sehingga membentuk fasa larut padat super jenuh. Fasa larut padat super jenuh tersebut kemudian di *aging* sehingga terbentuk presipitat berupa partikel endapan fasa kedua yang halus dan tersebar merata yang mengakibatkan bahan menjadi keras. Menurut Dieter [6], penguatan logam dapat ditingkatkan pula melalui struktur butir. Penguatan dengan cara penghalusan butir (*grain refining*), yaitu terjadi melalui bentuk dan ukuran butir. Struktur butir memiliki batas-batas butir dan batas butir merupakan rintangan bagi pergerakan dislokasi. Butir semakin halus cenderung akan semakin memperbanyak batas butir. Batas butir yang banyak akan mengakibatkan gerakan dislokasi semakin sukar karena semakin banyak rintangan. Penghalusan butir dapat dilakukan melalui proses pembekuan dan proses rekristalisasi. Butir logam merupakan kumpulan sel-satuan yang berorientasi sama. Polikristal memiliki butir-butir yang orientasinya berbeda satu dengan yang lain. Pada saat deformasi, dislokasi akan bergerak pada bidang slip dan berusaha mencapai permukaan luar. Oleh karena orientasi setiap butir berbeda dengan yang lain sehingga orientasi bidang slip pada butir-butir juga akan berbeda-beda. Sebagai akibatnya pergerakan dislokasi akan terhambat dan terintangi. Gerakan dislokasi yang akan menyeberangi batas butir memerlukan tegangan yang lebih besar sehingga dengan demikian batas butir akan menjadi penghalang dan penghambat gerakan dislokasi.

TATA KERJA

Penelitian ini menggunakan bahan berupa logam aluminium, ferro dan nikel berbentuk serbuk. Bahan dasar aluminium dipadukan dengan unsur pepadu utama Fe dan Ni. Pemaduan AlFeNi dilakukan berdasarkan persentase kadar berat unsur pepadu, yaitu (1,5%Fe, 1%Ni), (2%Fe, 1%Ni), dan (3 %Fe, 1%Ni) dengan metode metalurgi serbuk dan peleburan menggunakan alat kompaksi dan tungku busur listrik. Proses kompaksi serbuk Al, Fe dan Ni dilakukan secara mekanik dengan tekanan sekitar 350-400 KN. Penekanan ditingkatkan seiring dengan meningkatnya kadar komposisi paduan. Proses kompaksi menghasilkan lempengan berukuran tebal 0,5 mm dan berdiameter sekitar 15 mm. Peleburan lempengan paduan AlFeNi dilakukan secara berulang hingga 4 kali pelelehan dan setiap kali peleburan ditahan sekitar 5 menit. Peleburan lempengan paduan AlFeNi menghasilkan *ingot* berbentuk setengah lingkaran berdiameter sekitar 10 mm. *Ingot* paduan AlFeNi hasil sintesis sebagai spesimen uji terlebih dahulu permukaannya dibersihkan dan dihaluskan. Permukaan spesimen AlFeNi diratakan dengan penggerindaan dan dipoles secara bertahap menggunakan mesin poles. Spesimen AlFeNi hasil poles kemudian permukaannya dietsa menggunakan larutan etsa tertentu untuk memunculkan mikrostruktur fasa. Pengetsaan dilakukan dengan mencelupkan spesimen ke dalam larutan etsa dengan memperhatikan ketepatan waktu etsa. Pengamatan sifat mekanik dilakukan dengan uji kekerasan menggunakan metoda Vicker dan mikrostruktur paduan AlFeNi diamati menggunakan mikroskop optik. Besaran struktur butir dianalisis menggunakan metode DAS. Struktur fasa paduan AlFeNi di analisis melalui pola difraksi sinar x dan diagram kesetimbangan fasa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan sifat mekanik terhadap paduan AlFeNi pada berbagai konsentrasi paduan dengan metoda Vicker diperlihatkan pada Gambar 1. Pengamatan mikrostruktur paduan AlFeNi secara mtalografi-optik ditunjuk-kan pada Gambar 2. Pengukuran besaran struktur butir dendrit paduan Al-Fe-Ni dengan metode *Dendrite Arm Spacing Secondary*(DASS) ditunjukkan pada Gambar 3. Analisis struktur fasa paduan AlFeNi berdasarkan pola difraksi sinar x ditunjukkan pada Gambar 4.

Gambar 1 memperlihatkan variasi sifat kekerasan paduan AlFeNi hasil pemaduan dengan berbagai konsentrasi Fe. Sifat keke-
rasan paduan AlFeNi cenderung meningkat dengan semakin tinggi kadar Fe dalam paduan. Sifat kekerasan paduan AlFeNi mencapai 59 HV dengan konsentrasi (3%Fe, 1%Ni). Hal ini terjadi karena paduan AlFeNi mengalami penguatan larut-padat hingga mencapai sekitar 0,05% kadar Fe dan Ni^[7,8] 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 (3%Fe,1%Ni) relatif tinggi karena pada konsentrasi ini dimungkinkan terbentuk-nya beberapa fasa hasil reaksi antara Al dengan Fe dan Ni membentuk senyawa fasa θ (FeAl_3), κ (NiAl_3) dan τ (FeNiAl_9)^[8,9]. Senyawa fasa yang terbentuk dalam paduan ini berkontribusi pula merintanggi gerakan dislokasi, yang berdampak terhadap peningkatan kekerasan bahan.

Gambar 1 memperlihatkan pula bahwa pada konsentrasi di atas 1,5% Fe tampak

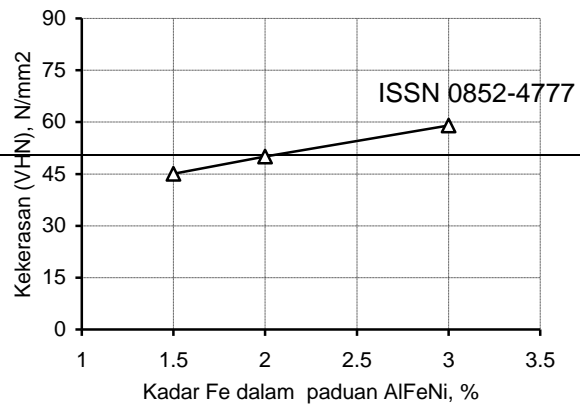
terjadi kenaikan kekerasan dengan semakin meningkatnya kandungan Fe, yaitu dari 45 HV pada 1,5%Fe menjadi 50 HV pada 2% Fe dan 59 HV pada 3% Fe. Kondisi ini dimungkinkan karena adanya pertumbuhan fasa kedua yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya prosentase kadar Fe. Peningkatan fasa kedua yang semakin tinggi akan berdampak terhadap peningkatan kekerasan karena kehadiran fasa kedua tersebut berpotensi merintanggi pergerakan dislokasi. Pembentukan fasa kedua ini ditandai dengan perubahan struktur butir yang sebagian besar telah mengarah menjadi bentuk struktur butir dendrit pipih memanjang, seperti ditunjukkan pada Gambar 2 b dan 2 c.

Struktur butir fasa mengalami perubahan dari bentuk dendrit yang relatif kecil pada Gambar 2a menjadi bentuk butir dendrit yang relatif besar yang memanjang seperti ditunjukkan pada Gambar 2b dan 2c. Hal ini dimungkinkan karena sebagian fasa α -Al bertransformasi menjadi fasa θ , κ dan τ . Fasa θ berupa senyawa FeAl_3 , dan τ (FeNiAl_9) yang berselsatuan *monoclinic* dan fasa κ (NiAl_3) berselsatuan *orthorhombic* yang bersifat relatif lebih keras dari fasa α -Al.

Mikrostruktur paduan AlFeNi hasil sintesis dengan kadar (1,5%Fe, 1 %Ni), (2%Fe,1%Ni) dan (3 %Fe, 1%Ni) diperlihatkan pada Gambar 2. Gambar 2a memperlihatkan struktur butir paduan AlFeNi cenderung berbentuk dendrit dan diduga telah terbentuk senyawa fasa FeAl_3 (θ). 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

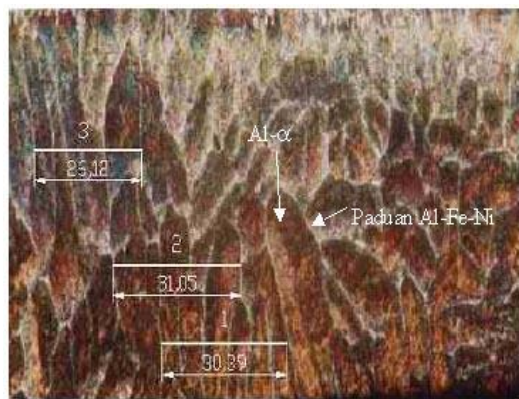
yang terkandung dalam paduan tersebut melebihi kemampuan larut-padat fasa α -Al.

Mikrostruktur paduan AlFeNi dengan kadar 2%Fe,1%Ni yang ditunjukkan pada Gambar 2b memperlihatkan pertumbuhan struktur butir fasa θ yang cenderung semakin meningkat. Gambar 2b memperlihatkan kecenderungan perubahan struktur butir membentuk dendrit yang memanjang. Perubahan fasa dalam bentuk struktur butir dendrit ini diperkirakan terjadi seluruhnya, seperti diperlihatkan pada Gambar 2b. Peningkatan pembentukan struktur butir dendrit ini terjadi karena jumlah kadar unsur Fe dalam paduan semakin meningkat. Sebagai akibatnya unsur Fe yang bereaksi dengan Al membentuk senyawa $FeAl_3$ yang cenderung semakin bertambah. Kondisi ini ditandai dengan pertumbuhan struktur butir dendrit fasa θ yang semakin besar, seperti diperlihatkan pada Gambar 2 b dan pola difraksi sinar x Gambar 4.

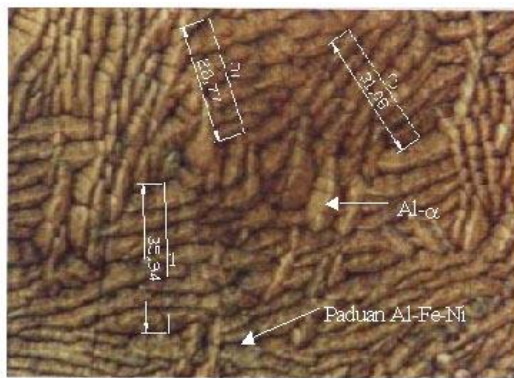


Gambar 1. Kurva variasi kekerasan paduan AlFeNi terhadap peningkatan kadar Fe

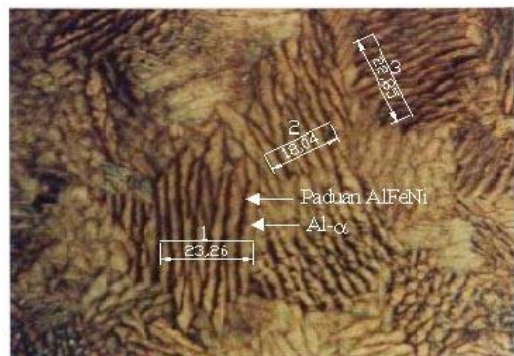
Mikrostruktur paduan AlFeNi dengan kadar 3%Fe,1%Ni yang ditunjukkan pada Gambar 2c memperlihatkan bahwa struktur butir dendrit relatif membesar dan bertransformasi membentuk struktur butir pipih memanjang. Struktur butir fasa κ dan τ semakin meningkat seperti tampak secara jelas dalam bentuk struktur butir dendrit pipih memanjang pada Gambar 2 c dan seperti ditunjukkan pada pola difraksi sinar x Gambar 4b. Struktur butir dendrit pada Gambar 2c relatif lebih besar daripada struktur butir dendrit yang ditunjukkan pada Gambar 2b. Pembesaran butir tersebut dimungkinkan karena dipacu oleh kadar Fe yang semakin tinggi dan suhu pemanasan yang berdampak terhadap peningkatan energi dalam paduan. Energi dalam paduan yang tinggi memacu percepatan pertumbuhan butir sehingga butir dendrit yang terbentuk semakin memanjang dan relatif membesar. Struktur butir fasa κ dalam bentuk dendrit yang memanjang tersebut relatif lebih dominan pada mikrostruktur 3%Fe,1%Ni seperti tampak pada Gambar 2c.



a



b



c

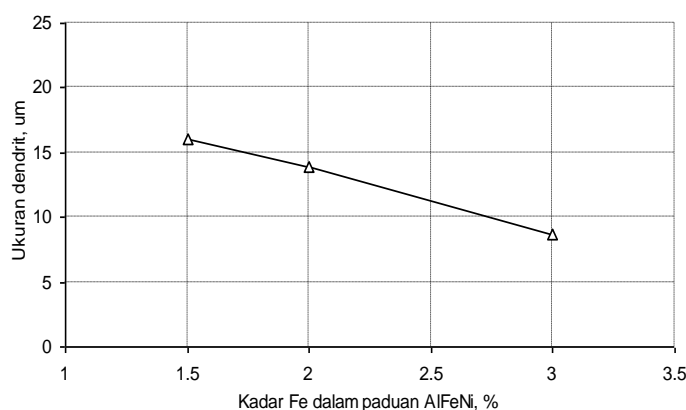
Gambar 2. Mikrostruktur paduan AlFeNi a) 1,5Fe1Ni dengan $l_1=30,39$ mm, $l_2=31,05$ mm, $l_3=26,12$ mm
b) 2Fe1Ni dengan $l_1=35,94$ mm, $l_2=28,77$ mm, $l_3=31,08$ mm
c) 3Fe1Ni dengan $l_1=23,26$ mm, $l_2=18,04$ mm, $l_3=22,85$ mm

Besaran struktur butir dendrit paduan Al-Fe-Ni hasil pengukuran menggunakan metode *Dendrite Arm Spacing Secondary*(DASS)^[10] menunjukkan bahwa struktur butir dendrit cenderung semakin mengecil dengan semakin meningkat kadar Fe dalam paduan. Hal ini dimungkinkan karena dari proses pencairan ke pembekuan, paduan AlFeNi mengalami difusi antar atom yang memacu terjadinya reaksi senyawa antarlogam dan pengintian butir. Pengintian butir ini sangat dipengaruhi oleh energi dan kecepatan reaksi fasa. Energi yang tinggi dan reaksi fasa yang meningkat yang dipengaruhi oleh kadar Fe yang semakin tinggi mengakibatkan pengintian butir relatif banyak. Pengintian butir yang relatif banyak mengakibatkan pembentukan butir menjadi semakin meningkat. Pengintian butir yang meningkat akan memacu pembentukan butir yang semakin mengecil dan relatif banyak. Gambar 3 memperlihatkan bahwa ukuran struktur butir dendrit paduan AlFeNi semakin menurun seiring dengan meningkatnya kadar unsur Fe dalam paduan. Peningkatan kadar Fe dari 1,5%Fe menjadi 2%Fe dan 3%Fe dalam paduan pada proses sintesis mengakibatkan pengaruh yang besar pula terhadap perubahan bentuk struktur butir dendrit yang cenderung semakin mengecil. Perubahan ukuran dan bentuk dendrit ini dimungkinkan terjadi karena adanya peningkatan kadar Fe dalam paduan. Atom Fe yang terkandung dalam paduan tersebut semakin meningkat yang melebihi kemampuan larut padat pada fasa α (Al). Kelebihan unsur Fe tersebut cenderung akan berdifusi dan bereaksi dengan unsur lain dalam paduan seperti Al dan Ni yang membentuk senyawa dan cenderung tumbuh melalui batas butir dendrit.

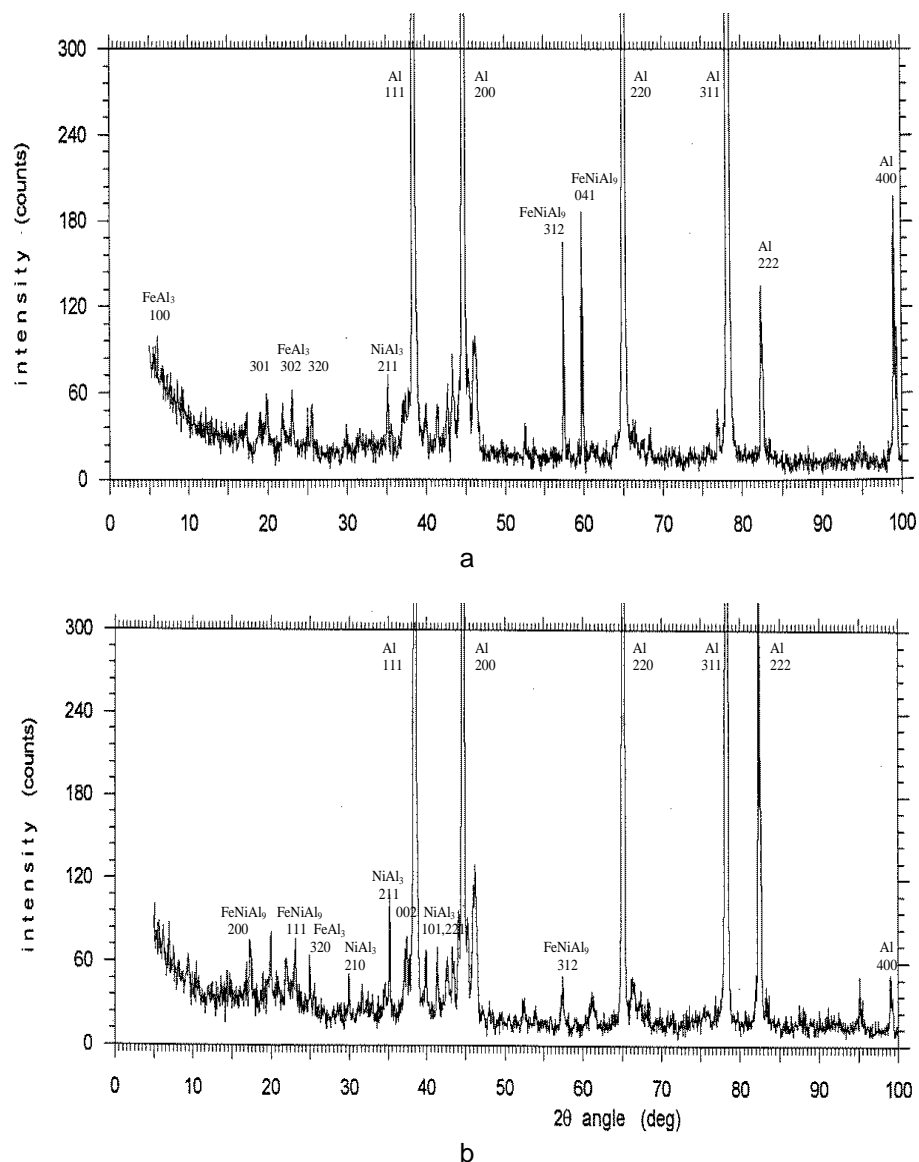
Gambar 4 memperlihatkan pola difraksi paduan Al-Fe-Ni yang menghasilkan puncak fasa, seperti terlihat puncak fasa Al, $FeAl_3$, $FeNiAl_9$ dan $NiAl_3$. Puncak fasa Al untuk masing-masing bidang hkl berada pada

sudut difraksi 22° - 98° , sedangkan untuk fasa FeNiAl_9 berada pada sudut difraksi 5° - 30° dan fasa NiAl_3 berada pada sudut difraksi 20° - 47° . JCPDS (*Joint Commitee on Powder Diffraction Standards*)^[11] menunjukkan bahwa puncak fasa Al berada pada sudut 2θ sebesar $21,94^{\circ}$, $38,50^{\circ}$, $44,76^{\circ}$, $65,16^{\circ}$, $78,18^{\circ}$, $82,52^{\circ}$, dan $99,02^{\circ}$ pada masing-masing bidang hkl yaitu 100, 111, 200, 220, 311, 222 dan 400. Puncak fasa FeNiAl_9 berada pada sudut $5,72^{\circ}$, $10,28^{\circ}$, $28,71^{\circ}$ pada masing-masing bidang hkl yaitu 002 dan 301 dan puncak fasa NiAl_3 berada pada sudut $37,48^{\circ}$ dan $45,34^{\circ}$. Peningkatan kadar Fe berpotensi memacu perubahan dan pembentukan fasa serta intensitas fasa, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Gambar 4.a menunjukkan bahwa pada pola difraksi terdapat puncak fasa α (Al) dengan bidang hkl 211, 200, 220, 311, 222 dan bidang hkl 400. Sementara itu, puncak fasa θ (FeAl_3) tampak pada bidang hkl 100, 301, 302 dan 320, sedangkan fasa τ (FeNiAl_9) terdapat dua puncak dengan bidang hkl 312 dan 041 dan fasa κ (NiAl_3) satu puncak dengan bidang hkl 211. Pola difraksi ini menunjukkan bahwa paduan AlFeNi dengan kadar $2\% \text{Fe}1\% \text{Ni}$ relatif lebih banyak didominasi oleh fasa α dan θ .

Kondisi ini menunjukkan bahwa pada paduan AlFeNi dengan kadar $2\% \text{Fe}1\% \text{Ni}$ ini mengidentifikasi terdapat 2 buah fasa, yaitu fasa α dan θ . Gambar 4b memperlihatkan bahwa pada pola difraksi terdapat puncak-puncak fasa α , fasa κ , dan fasa τ pada masing-masing sudut 2θ dengan bidang hkl tertentu. Fasa α (Al) memiliki enam puncak yang terdapat pada sudut 2θ dengan bidang hkl 111, 200, 220, 311, 222 dan 400. Sementara itu, pada sudut 2θ yang lain terdapat tiga puncak fasa τ (FeNiAl_9) dengan bidang hkl 200, 111, 312 dan tiga puncak fasa κ (NiAl_3) dengan bidang hkl 210, 211 dan 101. Fasa θ (FeAl_3) terdapat satu puncak dengan bidang hkl 320. Pola difraksi ini menunjukkan bahwa paduan AlFeNi dengan kadar $3\% \text{Fe}1\% \text{Ni}$ cenderung didominasi oleh fasa α , κ , dan τ . Kondisi ini mengidentifikasi bahwa pada paduan AlFeNi berkadar $3\% \text{Fe}1\% \text{Ni}$ memiliki 3 buah fasa, yaitu α , κ , dan τ . Hal ini menunjukkan pula bahwa dengan kadar Fe yang semakin tinggi dalam paduan mengakibatkan semakin memacu dan memperbesar terjadinya pembentukan fasa τ yang berselsatuan *monoclinic*.



Gambar 3. Variasi ukuran butir dendrit dengan peningkatan kadar Fe dalam paduan



Gambar 4. Pola difraksi sinar-x paduan AlFeNi a) 2Fe 1Ni. b) Al 3Fe 1Ni

SIMPULAN

Peningkatan kadar Fe dalam paduan sangat berpengaruh terhadap perubahan sifat kekerasan. Sifat kekerasan paduan logam AlFeNi semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kadar Fe dalam paduan. Sifat kekerasan paduan AlFeNi hasil sintesis dengan kadar 3%Fe mencapai sekitar 59 HV relatif tinggi daripada kadar 1,5%Fe dan 2%Fe, yaitu 45 HV dan 50 HV. Perubahan sifat kekerasan paduan AlFeNi memperlihatkan hubungan keterkaitan dengan

perubahan mikrostruktur yang mengalami peningkatan kadar Fe. Mikrostruktur paduan logam AlFeNi hasil sintesis berbentuk struktur dendrit dan besaran struktur butir dendrit semakin mengecil dengan semakin tinggi kadar Fe. Kadar Fe yang semakin tinggi dalam paduan mengakibatkan semakin memacu dan memperbesar terjadinya pembentukan fasa τ yang berselsatuan *monoclinic*. Kadar Fe yang relatif rendah cenderung membentuk fasa θ yang lebih besar dan kadar Fe yang semakin tinggi cenderung semakin meningkatkan pembentukan fasa τ .

Fasa θ (FeAl_3) dan τ (FeNiAl_9) dengan kadar 2%Fe serta fasa κ (NiAl_3) dan τ (FeNiAl_9) dengan kadar 3%Fe berkontribusi terhadap peningkatan sifat kekerasan paduan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami menyampaikan ucapan terimakasih kepada segenap pihak yang telah membantu kelancaran pelaksanaan penelitian ini baik dalam bentuk bantuan pendanaan, fasilitas maupun dukungan moril sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan. Terutama kami menyampaikan terimakasih kepada Bapak Ir.Sudarmadi, M.Sc., sebagai Kepala PTBN yang senantiasa memberikan dorongan semangat, motivasi dan pendanaan beserta fasilitas. Termakasih pula kami sampaikan kepada Bapak Drs. Bambang Purwadi sebagai Direktur PT.Batan Teknologi yang mengizinkan kami menggunakan bahan untuk eksperimen. Kami tidak lupa pula menyampaikan terimakasih untuk pihak institusi PTBIN yang menyediakan jasa pengukuran difraksi sina-x.

DAFTAR PUSTAKA

1. FANJAS, Y., (1991), *Status of LEU Fuels At CERCA*, <http://www.anl.gov>.
2. 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.
3. 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.
4. BALLAGNY, A., *Situation of technological Irradiation Reactors A Progress Report On The Jules Horowitz Reactor Project*, <http://www.anl.gov>.
5. BALLAGNY, A., *Main Technical of The Jules Horowitz Reactor Project to Achieve High Flux Performances and High Safety Level*. <http://www.anl.gov>.
6. DIETER, G.E., *Mechanical Metallurgy*, Second edition, McGraw-Hill, Newyork, 1981.
7. MONDOLFO, L.F, (1976), *Aluminium Alloys, Structure and Properties*, London, hal. 532-532
8. RAYNOR, G.V., RIVLIN, G.V., *Phase Equilibria in iron Ternary Alloy*, New york, The institute of Metals, 1988, 110
9. PETZOW, G., EFFENBERG, G., (1992), *Ternary Alloy AlFeNi*, Vol.15, Germany: ASM, International,
10. HAKKA, *Manual Dendrite Arm Spacing*, DASMeasure. <http://www.tech.nite.go.jp/enzen2>
11. Anonim, JCPDS (*Joint Commitee on Powder Diffraction Standards*)