

## KARAKTERISASI SIFAT MEKANIK DAN MIKROSTRUKTUR PADUAN INTERMETALIK AlFeNi SEBAGAI BAHAN KELONGSONG BAHAN BAKAR

M.Husna Al Hasa  
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN  
Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang 15314

### ABSTRAK

#### KARAKTERISASI SIFAT MEKANIK DAN MIKROSTRUKTUR PADUAN INTERMETALIK AlFeNi SEBAGAI BAHAN KELONGSONG BAHAN BAKAR.

Paduan AlFeNi sebagai bahan kelongsong digunakan untuk membungkus bahan bakar reaktor riset. Pemaduan AlFeNi dilakukan dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik. Analisis sifat mekanik paduan dilakukan dengan pengujian kekerasan menggunakan metode Vicker. Pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan analisis metalografi dan mikroskop optik. Analisis besaran butir menggunakan metode DASS. Analisis fasa dilakukan berdasarkan topografi mikrostruktur, pola difraksi sinar-X dan diagram kesetimbangan fasa. Hasil pengukuran sifat kekerasan paduan AlFeNi dengan kadar 1; 1,5; dan 2,5%Fe masing-masing berkisar 36,3; 39,3 ; dan 57,7 HV. Sifat kekerasan paduan AlFeNi menunjukkan peningkatan dengan kenaikan unsur pepadu Fe dalam paduan. Hasil pengamatan metalografi-optikal memperlihatkan struktur butiran berbentuk dendrit dan cenderung mengalami perubahan seiring dengan meningkatnya kadar Fe dalam paduan. Mikrostruktur butir paduan dengan kadar 2,5%Fe–0,5%Ni memperlihatkan cenderung mengarah ke bentuk struktur butir dendrit yang memanjang dan teridentifikasi sebagai fasa  $\kappa$  dan  $\tau$ . Pembentukan fasa  $\kappa$  dan  $\tau$  cenderung meningkat dengan kadar Fe semakin tinggi. Hasil analisis struktur butir menunjukkan besaran struktur butir dendrit meningkat mencapai 18,6  $\mu\text{m}$  pada 2,5% Fe.

KATA KUNCI: Paduan AlFeNi, Kelongsong, DAS, Metalografi optik, Mikrostruktur

### ABSTRACT

#### CHARACTERIZATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF AlFeNi INTERMETALLIC ALLOY AS FUEL CLADDING MATERIAL.

The AlFeNi alloy for cladding material was used to contain research reactor fuel. The alloying of AlFeNi was performed employing fusion method in arc furnace. The analysis of the mechanical properties of AlFeNi was carried out using Vickers method. The microstructure observation was performed by optical metallography. The analysis of grain size utilized DASS method. The phase analysis was done based on microstructure topography, X-ray diffraction pattern and equilibrium phase diagram. The hardness measurement results of AlFeNi alloys with 1%, 1,5 %, and 2,5%Fe were subsequently 36,3; 39,3; and 57,7 HV. The hardness of AlFeNi alloy showed improvement with the increase of Fe content in the alloy. Optical metallographic observation result indicated that the grain structure was dendritic in form and tended to change with increasing Fe content in the alloy. The grain microstructure of AlFeNi alloy with 2,5%Fe–0,5%Ni showed grain structure of long dendritic form, which was identified as  $\kappa$  and  $\tau$  phases. The formation of  $\kappa$  and  $\tau$  phases in AlFeNi alloy had a tendency to increase with increasing Fe content. The grain structure analysis indicated that the dendrite grain structure increased up to 18,6  $\mu\text{m}$  at 2,5% Fe.

FREE TERMS: AlFeNi alloy, Cladding, DASS, Optical metallography, Microstructure

## I. PENDAHULUAN

Pengembangan bahan bakar maju berdensitas tinggi, seperti bahan bakar silisida dan molibdenum dilakukan untuk meningkatkan muatan uranium yang relatif tinggi. Peningkatan muatan uranium mengakibatkan jumlah bahan bakar meningkat dan akan berdampak terhadap sifat kekerasan bahan bakar (*fuel core*). Sifat kekerasan bahan bakar cenderung meningkat dan mengakibatkan perbedaan kekerasan semakin tinggi antara kelongsong (*cladding*) dengan bahan bakar. Perbedaan kekerasan tersebut dapat berpotensi terhadap kegagalan proses fabrikasi elemen bakar, seperti penumpukan bahan bakar pada sisi ujung kelongsong. Keadaan ini dikenal dengan istilah *dog-boning*. Kenaikan tingkat muat uranium akan berdampak pula terhadap perbandingan jumlah bahan bakar dan matrik. Jumlah bahan bakar semakin tinggi dan matriknya semakin menurun. Kondisi ini memungkinkan pada saat proses pengerolan akan terjadi *dog-boning* di daerah ujung pelat elemen bakar. Sebagai akibatnya, kelongsong pada daerah *dog-boning* menjadi relatif tipis dan uranium di dalam *meat* relatif tidak homogen. Selain itu, terdapat pula potensi untuk terjadinya penyebaran *meat* yang melebar ke arah sisi kelongsong sehingga ukuran lebar *meat* di dalam pelat kelongsong tidak sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan. Kondisi ini dapat diatasi antara lain dengan mengurangi perbedaan sifat kekerasan antara *fuel core* dan kelongsong. Sifat kekerasan kelongsong dapat ditingkatkan melalui pengembangan bahan struktur guna mengimbangi sifat kekerasan bahan bakar. Sifat kekerasan bahan struktur kelongsong diharapkan dapat ditingkatkan lebih tinggi daripada sifat kekerasan paduan AlMg<sub>2</sub>, yaitu di atas 50 HV.

Pengembangan bahan struktur kelongsong sebagai material alternatif terutama dilakukan terhadap bahan struktur berbasis paduan aluminium<sup>[1]</sup>. Pengembangan bahan struktur kelongsong berbasis aluminium, seperti paduan AlFeNi<sup>[2]</sup> telah dilakukan oleh berbagai pihak di dunia seiring dengan pengembangan bahan bakar maju berdensitas tinggi. Pengembangan bahan bakar maju berdensitas tinggi dilakukan searah dengan program RERTR yang berorientasi kepada penggunaan uranium pengayaan rendah<sup>[3,4]</sup>. Hal ini merupakan suatu konsekuensi negara produksi dan pengguna bahan bakar untuk mengikuti program konversi pemakaian uranium dari pengayaan tinggi ke pengayaan rendah. Beberapa negara di dunia seperti Perancis telah melakukan pengembangan bahan struktur paduan AlFeNi sebagai kelongsong bahan bakar berdensitas tinggi. Selain itu, beberapa negara Eropa lainnya telah pula melakukan pengkajian penggunaan AlFeNi sebagai kelongsong bahan bakar<sup>[5]</sup>. Kajian tersebut menunjukkan bahwa paduan AlFeNi memiliki sifat mekanik dan ketahanan korosi yang relatif baik<sup>[5,6]</sup>. Sifat mekanik seperti kekuatan dan kekerasan merupakan suatu persyaratan bahan kelongsong yang sangat diperlukan. Bahan kelongsong harus memiliki kekuatan yang memadai untuk mengungkung bahan bakar terutama selama keberadaannya di dalam reaktor. Kekuatan sebagai sifat mekanik suatu logam sangat ditentukan oleh jenis dan kadar unsur paduan. Sifat mekanik dan mikrostruktur paduan AlFeNi sangat dipengaruhi oleh penambahan kadar Fe dan Ni. Kadar Fe dan Ni yang semakin tinggi akan memberikan dampak terhadap peningkatan sifat mekanik. Jumlah kadar Fe dan Ni dalam paduan akan berpengaruh pula terhadap perubahan mikrostruktur yang akan berdampak juga terhadap perubahan sifat kekerasan bahan kelongsong.

Penelitian ini akan mengkaji lebih jauh tentang penggunaan paduan AlFeNi sebagai kelongsong alternatif pembungkus bahan bakar berdensitas tinggi di masa mendatang. Pada tahap awal eksperimen dilakukan pemaduan AlFeNi dengan komposisi yang bervariasi menggunakan metode peleburan diikuti karakterisasi sifat paduannya. Sifat kekerasan, topografi mikrostruktur, struktur fasa dan ukuran struktur butir dendrit paduan AlFeNi masing-masing akan diamati

menggunakan metode Vicker, mikroskop optik, pola difraksi sinar-X dan metode DASS (*Dendrite Arm Spacing Secondary*).

## II. TEORI

Penguatan logam yang berdampak terhadap peningkatan sifat mekanik dapat terjadi melalui berbagai cara, antara lain dengan mekanisme penguatan regangan (*strain hardening*), larutan-padat (*solid-solution*), fasa kedua, presipitasi, dispersi, penghalusan butir dan tekstur<sup>[7]</sup>. Penguatan melalui mekanisme penguatan regangan dapat terjadi terhadap semua logam akibat proses deformasi plastis yang menyebabkan terjadinya peningkatan kerapatan dislokasi. Dislokasi yang semakin rapat mengakibatkan dislokasi itu sendiri semakin sukar bergerak sehingga bahan menjadi semakin kuat atau keras. Penguatan melalui mekanisme larutan-padat terjadi akibat adanya atom-atom asing yang larutan-padat baik secara substitusi maupun interstisi. Atom asing yang larutan-padat tersebut dapat berupa unsur pepaduan dalam bentuk paduan maupun inklusi berupa atom pengotor. Kelarutan atom-atom asing ini dalam bentuk larutan-padat mengakibatkan timbulnya medan tegangan yang berdampak terhadap pergerakan dislokasi. Pergerakan dislokasi semakin sukar dengan timbulnya medan tegangan sehingga mengakibatkan logam menjadi lebih kuat atau keras.

Penguatan atau penguatan dapat pula terjadi melalui mekanisme fasa kedua karena timbulnya senyawa fasa paduan. Pembentukan senyawa fasa kedua dalam paduan terjadi karena penambahan unsur paduan yang melampaui batas larutan-padat. Senyawa fasa yang terbentuk bersifat relatif keras dan pergerakan dislokasi cenderung akan terhambat oleh fasa kedua tersebut. Pergerakan dislokasi yang terhambat oleh senyawa fasa kedua akan memperkuat dan memperkeras logam.

Penguatan logam dapat juga ditingkatkan dengan proses presipitasi yaitu penguatan 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 sehingga mengakibatkan semakin meningkatnya kekuatan atau kekerasan. Penguatan 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 larutan-padat dalam satu fasa yang relatif homogen. Fasa yang relatif homogen tersebut kemudian didinginkan secara cepat sehingga membentuk fasa larutan-padat super jenuh. Fasa larutan-padat super jenuh tersebut kemudian mengalami *aging* sehingga terbentuk presipitat berupa partikel endapan fasa kedua yang halus dan tersebar merata yang mengakibatkan bahan menjadi keras. Penguatan presipitasi ini akan menurun kekuatannya bila mengalami suhu *overaging*. Penguatan logam tanpa pengaruh suhu *overaging* dapat dilakukan dengan metode dispersi. Penguatan dispersi merupakan penguatan melalui proses memasukkan partikel-partikel dispersi dalam bentuk serbuk yang tercampur secara homogen. Partikel dispersi yang digunakan merupakan partikel yang sama sekali tidak larut dalam matriknya. Campuran serbuk logam tersebut dikenai proses kompaksi dan *sintering* dengan suhu pemanasan sampai mendekati titik cair logam matrik sehingga mengakibatkan terjadi ikatan yang kuat. Partikel dispersi tersebut merupakan rintangan bagi gerakan dislokasi dan semakin banyak partikel akan semakin banyak terjadinya dislokasi. Dislokasi yang semakin banyak mengakibatkan dislokasi semakin rapat dan semakin sulit bergerak sehingga bahan akan semakin keras. Penguatan dengan cara penghalusan butir (*grain refining*) terjadi melalui struktur butir. Butir logam merupakan kumpulan sel-satuan yang berorientasi sama. Polikristal memiliki butir-butir yang orientasinya berbeda satu dengan yang lain. Pada saat deformasi terjadi, dislokasi akan bergerak pada bidang *slip* dan berusaha

mencapai permukaan luar. Oleh karena orientasi setiap butir berbeda dengan yang lain, orientasi bidang *slip* pada butir-butir juga akan berbeda-beda. Sebagai akibatnya pergerakan dislokasi akan terhambat. Gerakan dislokasi yang akan menyeberangi batas butir memerlukan tegangan yang lebih besar sehingga dengan demikian batas butir akan menjadi penghalang dan penghambat gerakan dislokasi. Struktur butir memiliki batas-batas butir yang merupakan rintangan bagi pergerakan dislokasi. Butir yang 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. Penguatan tekstur merupakan peningkatan kekuatan atau kekerasan melalui orientasi kristal. Logam yang ditingkatkan kekuatannya diusahakan kristalnya memiliki orientasi tertentu. Pembentukan kristal logam agar sel-satuan memiliki orientasi yang mendekati arah tertentu dapat dilakukan dengan cara deformasi plastis, seperti dengan proses pengerolan.

Ukuran dan bentuk struktur butir akan sangat berpengaruh terhadap karakter sifat bahan terutama kekuatan, kekerasan dan ketangguhan. Ukuran struktur butir dendrit dapat ditentukan dengan menggunakan metode *Dendrite Arm Spacing Secondary* (DASS)<sup>[8]</sup>. Penentuan besar butir dendrit dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$d = \left( \frac{l_1}{n_1 - 1} + \frac{l_2}{n_2 - 1} + \dots + \frac{l_i}{n_i - 1} \right) / m$$

dimana:  $d$  = ukuran dendrit ( $\mu\text{m}$ )  
 $l$  = panjang garis (mm)  
 $n$  = jumlah batas dendrit yang terkena garis  
 $m$  = jumlah garis yang dibuat.

### III. TATA KERJA

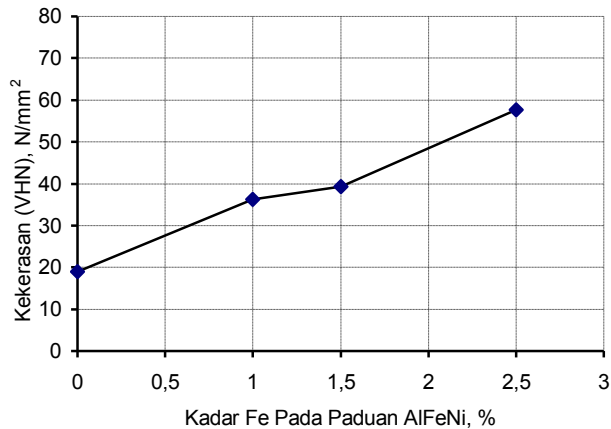
Bahan berupa logam aluminium, besi dan nikel berbentuk serbuk. Bahan dasar aluminium dipadukan dengan unsur padu utama Fe dan Ni. Pemaduan dilakukan bervariasi berdasarkan persentase kadar berat unsur padu, yaitu (1,0%Fe-0,5%Ni), (1,5%Fe-0,5%Ni) dan (2,5%Fe-0,5%Ni) dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik. Proses peleburan dilakukan setelah didahului proses pemadatan serbuk AlFeNi dengan tekanan bervariasi sekitar 300 – 350 kN. Tekanan ditingkatkan seiring dengan meningkatnya kadar komposisi paduan. Peleburan lempengan AlFeNi hasil pemadatan dilakukan berulang hingga terjadi pencairan dan pemaduan yang homogen berbentuk *ingot*. *Ingot* paduan AlFeNi hasil peleburan sebelum dikenai pengujian sifat mekanik dan uji metalografi terlebih dahulu permukaannya dibersihkan dan dihaluskan. Permukaan spesimen AlFeNi diratakan dengan penggerindaan dan dipoles secara bertahap menggunakan mesin poles. Spesimen AlFeNi hasil poles kemudian dietsa menggunakan larutan etsa Keller untuk memunculkan mikrostruktur fasa. Larutan etsa Keller terdiri dari 2,5 ml HNO<sub>3</sub>; 1,5 ml HCl; 1 ml HF; dan 95 ml H<sub>2</sub>O. Pengaruh penambahan unsur padu dalam paduan AlFeNi dengan (1,0%Fe-0,5%Ni), (1,5%Fe-0,5%Ni), dan (2,5%Fe-0,5%Ni) diamati dari sifat mekanik, mikrostruktur dan struktur fasa paduan. Pengamatan sifat mekanik dilakukan dengan uji kekerasan menggunakan metode Vicker. Analisis mikrostruktur paduan AlFeNi dilakukan menggunakan mikroskop optik. Pembentukan fasa paduan dianalisis melalui topografi mikrostruktur, pola difraksi

sinar-X dan diagram kesetimbangan fasa. Besaran butir struktur dendrit dianalisis dengan metode DASS.

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengamatan yang dilakukan pada paduan AlFeNi berupa pengukuran kekerasan, metalografi-optik dan besaran butir dendrit ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 1, 2 dan 3. Gambar 1 memperlihatkan hasil pengukuran kekerasan ingot paduan AlFeNi pada berbagai konsentrasi Fe dimana kekerasan paduan AlFeNi relatif semakin meningkat seiring dengan semakin meningkatnya kadar paduan dan mencapai kekerasan 57,7 HV dengan konsentrasi 2,5%Fe–0,5%Ni. Hal ini terjadi karena paduan AlFeNi mengalami penguatan larut-padat mencapai sekitar 0,05% kadar Fe dan Ni<sup>[9]</sup> ke dalam struktur fasa  $\alpha$ -Al. Penguatan larut-padat pada struktur fasa  $\alpha$ -Al terjadi secara substitusi dengan menempati kisi sel-satuan fcc. Proses larut-padat atom Fe dan Ni ke dalam kisi struktur fasa  $\alpha$ -Al cenderung mengakibatkan terjadinya distorsi parameter kisi yang berakibat menimbulkan medan tegangan di sekitar atom yang larut. Kondisi seperti ini semakin berpotensi menghambat gerakan dislokasi yang mengarah pada penguatan bahan. Kekerasan paduan AlFeNi semakin meningkat pada konsentrasi 2,5% Fe karena pada konsentrasi ini kemungkinan pembentukan fasa kedua semakin meningkat dari hasil reaksi antara Fe dan Ni dengan Al membentuk senyawa fasa FeAl<sub>3</sub>, FeNiAl<sub>9</sub> dan NiAl<sub>3</sub><sup>[10,11]</sup>. Senyawa fasa yang terbentuk dalam paduan ini berkontribusi pula merintang gerakan dislokasi yang berdampak pada peningkatan kekerasan bahan.

Gambar 1 memperlihatkan bahwa sifat kekerasan paduan AlFeNi sangat dipengaruhi oleh peningkatan kadar Fe. Peningkatan kadar Fe dalam paduan berdampak terhadap perubahan sifat kekerasan dari 36,3 HV pada 1% Fe menjadi 39,3 HV pada 1,5% Fe, dan mencapai 57,7 HV pada 2,5%Fe. Perubahan sifat kekerasan ini dimungkinkan karena adanya pertumbuhan fasa kedua yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya persentase kadar Fe. Peningkatan fasa kedua yang semakin tinggi akan berdampak pula terhadap peningkatan sifat kekerasan karena kehadiran fasa kedua tersebut berpotensi merintang pergerakan dislokasi. Pembentukan fasa kedua ini ditandai dengan perubahan struktur butir dendrit berbentuk granular menjadi bentuk struktur butir dendrit yang cenderung mengecil, seperti ditunjukkan pada Gambar 2(a) dan 2(b). Kondisi struktur butir dendrit yang relatif kecil memungkinkan memberi dampak terhadap peningkatan penguatan logam. Hal ini karena pada struktur butir yang lebih kecil relatif lebih banyak butir dendrit dan dengan demikian akan memperbanyak batas butir. Batas butir yang semakin banyak akan semakin memperbesar peranannya terhadap penghambatan pergerakan dislokasi karena batas butir merupakan rintangan terhadap gerakan dislokasi<sup>[7]</sup>. Struktur butir fasa mengalami perubahan dari struktur butir dendrit berbentuk granular pada Gambar 2(a) dan 2(b) menjadi struktur butir dendrit yang memanjang seperti ditunjukkan pada Gambar 2(c). Perubahan struktur butir ini terjadi karena sebagian fasa  $\alpha$ -Al dengan sel-satuan kubus mengalami transformasi menjadi fasa  $\theta$  dan  $\kappa$ . Fasa  $\theta$  berupa FeAl<sub>3</sub> dengan sel-satuan monoklinik dan fasa  $\kappa$  berupa senyawa NiAl<sub>3</sub> dengan sel-satuan ortorombik. Fasa ini bersifat relatif lebih keras dibandingkan fasa  $\alpha$ -Al.



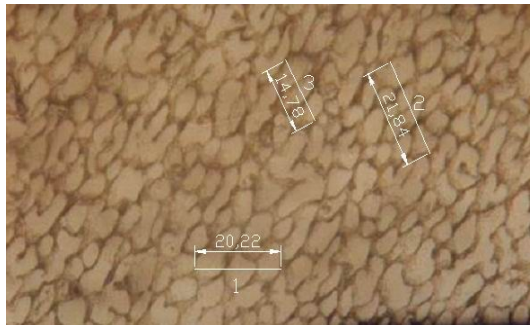
Gambar 1. Sifat kekerasan paduan AlFeNi terhadap pengaruh kadar Fe dalam paduan

Mikrostruktur paduan AlFeNi dengan kadar (1,0%Fe-0,5%Ni), (1,5%Fe-0,5%Ni) dan (2,5%Fe-0,5%Ni) ditunjukkan pada Gambar 2. Gambar 2(a) memperlihatkan mikrostruktur paduan AlFeNi dengan struktur butir berbentuk granular. Struktur butir ini memiliki fasa  $\alpha$  (Al) yang relatif lebih dominan dan fasa kedua yang berbentuk dendrit relatif lebih sedikit. Kadar Fe dan Ni dalam paduan masih relatif rendah dan kondisi larut-padat cenderung masih relatif dominan. Pembentukan fasa kedua pada paduan AlFeNi merupakan rejeksi dari larutan padat aluminium bila kadar Fe atau Ni yang terkandung dalam paduan tersebut melebihi kemampuan larut-padat fasa  $\alpha$ -Al. Pembentukan fasa kedua atau senyawa fasa baru 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.

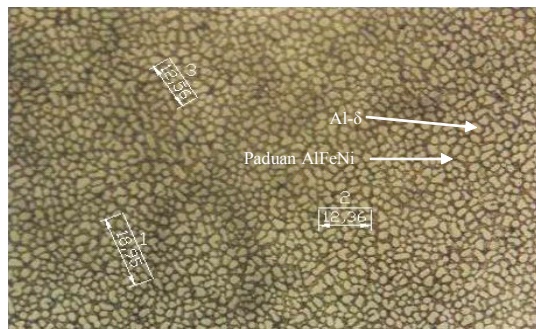
Gambar 2(b) memperlihatkan mikrostruktur paduan AlFeNi dengan kadar 1,5%Fe-0,5%Ni berbentuk struktur butir granular yang relatif kecil daripada mikrostruktur pada Gambar 2(a). Hal ini dimungkinkan karena kadar Fe dalam paduan semakin meningkat yang cenderung memacu terjadinya perubahan dan transformasi fasa. Fasa  $\alpha$  mulai bertransformasi membentuk fasa  $\tau$  dan  $\kappa$  seiring dengan peningkatan kadar Fe. Pembentukan fasa  $\alpha$  (Al) akan berpengaruh sejalan dengan pembentukan fasa  $\tau$  (FeNiAl<sub>9</sub>) dan  $\kappa$  (NiAl<sub>3</sub>) berbentuk dendrit yang cenderung meningkat. Pembentukan fasa tersebut dipacu akibat kadar unsur Fe melebihi batas larut-padat sehingga bereaksi dengan Al membentuk senyawa fasa baru atau fasa kedua. Transformasi fasa tersebut berdampak pula terhadap perubahan struktur butir dendrit yang semakin banyak dan kecil.

Gambar 2(c) memperlihatkan mikrostruktur paduan AlFeNi dengan kadar 2,5%Fe-0,5%Ni cenderung mengalami pertumbuhan struktur butir. Kecenderungan perubahan struktur butir dari struktur dendrit berbentuk granular mengarah ke bentuk dendrit yang memanjang. Perubahan struktur butir denrit ini terjadi karena jumlah kadar unsur Fe dalam

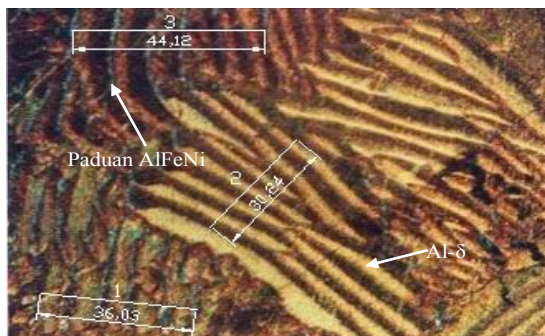
paduan semakin meningkat. Peningkatan kadar Fe ini mendorong memacu terjadinya perubahan struktur butir sebagai akibat pembentukan fasa kedua, seperti pembentukan fasa  $\theta$  ( $\text{FeAl}_3$ ) dan fasa  $\tau$  ( $\text{FeNiAl}_9$ ). Pembentukan fasa tersebut di atas sebagai akibat dari rejeksi unsur Fe yang bereaksi dengan Al membentuk senyawa fasa. Kondisi ini ditandai dengan pertumbuhan struktur butir dendrit fasa  $\theta$  dan  $\tau$  yang semakin besar, seperti diperlihatkan pada Gambar 2(b).



Gambar 2 (a). Mikrostruktur paduan Al–1%Fe–0,5%Ni



Gambar 2 (b). Mikrostruktur paduan Al–1,5%Fe–0,5%Ni



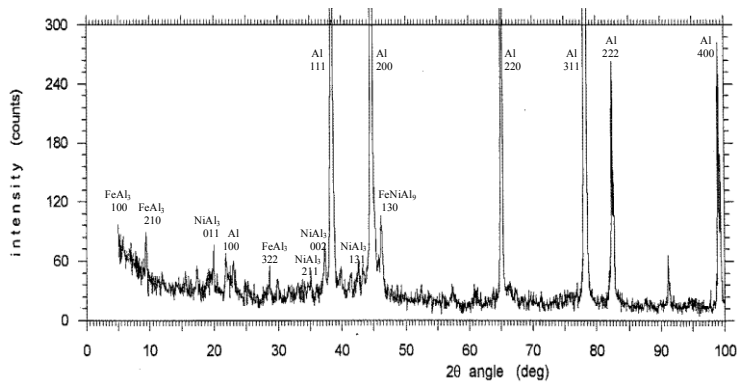
Gambar 2 (c). Mikrostruktur paduan Al–2,5%Fe–0,5%Ni

Gambar 3 memperlihatkan pola difraksi paduan AlFeNi hasil peleburan dengan kadar 1,5% Fe dan 2,5% Fe yang menghasilkan puncak-puncak fasa  $\alpha$ ,  $\theta$ ,  $\kappa$  dan  $\tau$ . Puncak fasa  $\alpha$  untuk masing-masing bidang hkl berada pada sudut difraksi  $2\theta$  antara  $22^\circ - 99^\circ$ . Puncak fasa  $\theta$  untuk masing-masing bidang hkl berada pada sudut difraksi  $2\theta$  antara  $10^\circ - 54^\circ$ . Puncak fasa  $\kappa$  untuk masing-masing bidang hkl berada pada sudut  $2\theta$  antara  $20^\circ - 47^\circ$ , sedangkan puncak fasa  $\tau$  untuk masing-masing bidang hkl berada pada sudut difraksi  $2\theta$  antara  $5^\circ - 65^\circ$ .

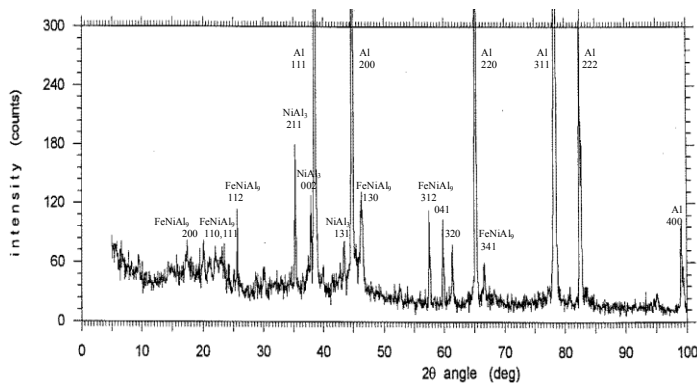
Gambar 3(a) memperlihatkan pola difraksi paduan AlFeNi hasil peleburan yang menghasilkan puncak-puncak fasa  $\alpha$  pada sudut  $2\theta$  yang berkisar antara  $22^\circ - 99^\circ$  pada bidang {hkl} (100), (111), (200), (220), (311), (222) dan (400). Puncak fasa  $\theta$  pada sudut  $2\theta$  berkisar antara  $10^\circ - 54^\circ$  pada bidang {hkl} (100), (210) dan (322), sedangkan puncak fasa  $\kappa$  pada sudut  $2\theta$  berkisar antara  $20^\circ - 47^\circ$  pada bidang {hkl} (011), (211), (022) dan (131). Sementara puncak fasa  $\tau$  hanya ada satu pada sudut  $2\theta$  berkisar  $47^\circ$  pada bidang (130). Gambar 3(b) memperlihatkan pola difraksi dengan puncak fasa  $\alpha$  pada bidang {hkl} (111), (200), (220), (311), (222) dan (400). Puncak fasa  $\tau$  pada sudut  $2\theta$  berkisar antara  $5^\circ - 65^\circ$  yang terdapat pada bidang {hkl} (200), (110), (111), (112), (130), (312), (041), (320) dan (341), sedangkan puncak fasa  $\kappa$  terdapat pada bidang {hkl} (211), (002) dan (131). Sementara itu, Gambar 3(b) tidak memperlihatkan adanya puncak fasa  $\theta$ . Pola difraksi paduan AlFeNi dengan kadar 1,5% Fe pada Gambar 3(a) menunjukkan adanya 3 fasa, yaitu fasa  $\alpha$ ,  $\theta$  dan  $\kappa$ . Hal ini diperlihatkan dengan terbentuknya pada pola difraksi 7 puncak fasa  $\alpha$ , 3 puncak fasa  $\theta$  dan 3 puncak fasa  $\kappa$ . Sementara itu, pola difraksi paduan AlFeNi dengan kadar 2,5% Fe yang ditunjukkan pada Gambar 3(b) menunjukkan terbentuknya 3 fasa, yaitu fasa  $\alpha$ ,  $\tau$  dan  $\kappa$ . Hal ini tampak pada pola difraksi dengan terbentuknya 6 puncak fasa  $\alpha$ , 9 puncak fasa  $\tau$  dan 3 puncak fasa  $\kappa$ .

Puncak fasa  $\kappa$  pada bidang {hkl} (211), (002) dan (131) relatif lebih tinggi intensitasnya daripada intensitas puncak fasa  $\kappa$  pada Gambar 3(a). Demikian pula intensitas puncak fasa  $\tau$  pada bidang (130) cenderung meningkat, seperti ditunjukkan pada Gambar 3(b). Gambar 3(b) memperlihatkan pula timbulnya puncak baru, yaitu pada sudut  $2\theta = 18^\circ$  bidang (hkl) (200), sudut  $2\theta = 21^\circ$  bidang (hkl) (110), sudut  $2\theta = 23^\circ$  bidang (hkl) (111), sudut  $2\theta = 26^\circ$  bidang (hkl) (112), sudut  $2\theta = 57^\circ$  bidang (hkl) (312), sudut  $2\theta = 60^\circ$  bidang (hkl) (041), sudut  $2\theta = 62^\circ$  bidang (hkl) (320) dan sudut  $2\theta = 72^\circ$  bidang (hkl) (341). Ke delapan puncak tersebut pada Gambar 3(b) tumbuh semakin jelas dan pola difraksi ini diidentifikasi sebagai puncak fasa  $\tau$  (FeNiAl<sub>9</sub>). Selain itu, Gambar 3(b) memperlihatkan beberapa puncak tumbuh semakin tinggi dan semakin jelas, seperti pada bidang (hkl) (211), bidang (hkl) (002) dan bidang (hkl) (131). Ketiga puncak tersebut merupakan bagian dari puncak pola difraksi fasa  $\kappa$  (NiAl<sub>3</sub>). Fasa  $\kappa$  dan  $\tau$  cenderung meningkat pada kadar 2,5% Fe yang ditandai dengan lebih tingginya intensitas dan semakin banyak puncak pola difraksi yang terbentuk.



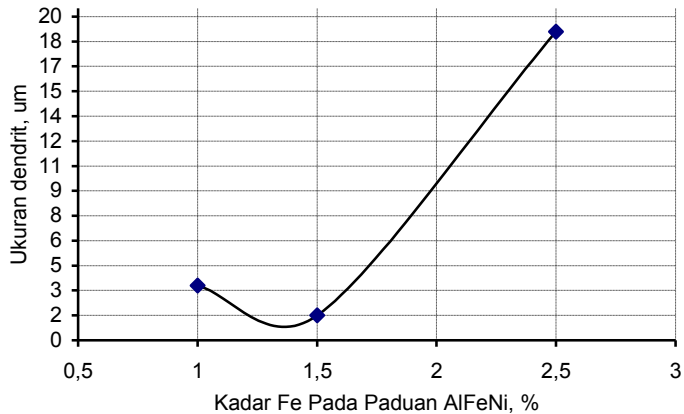


Gambar 3 (a). Pola difraksi sinar-X paduan Al-Fe-Ni (1,5%Fe–0,5%Ni)



Gambar 3 (b). Pola difraksi sinar-X paduan Al-Fe-Ni (2,5%Fe–0,5%Ni)

Gambar 4 memperlihatkan variasi besaran ukuran dendrit paduan Al-Fe-Ni hasil perhitungan menggunakan metode DASS. Ukuran dan bentuk dendrit mengalami perubahan seiring dengan peningkatan kadar unsur Fe dari 1; 1,5; dan 2,5% dengan unsur Ni tetap sebesar 0,5%. Gambar 4 menunjukkan ukuran dendrit meningkat dengan tajam hingga mencapai 18,6  $\mu\text{m}$  dan bentuk dendrit memanjang. Peningkatan ukuran dendrit tersebut terjadi karena adanya perubahan struktur butir dendrit dari bentuk granular ke bentuk struktur dendrit pipih memanjang. Kondisi ini kemungkinan terjadi akibat proses transformasi fasa  $\alpha$  dan  $\theta$  membentuk fasa  $\kappa$  dan  $\tau$  sehingga berdampak terhadap ukuran dan bentuk butir dendrit.



Gambar 4. Variasi ukuran butir dendrit terhadap peningkatan unsur Fe dalam paduan

## V. KESIMPULAN

Sifat mekanik seperti kekerasan bahan AlFeNi cenderung meningkat dengan kadar Fe dalam paduan yang semakin tinggi. Sifat kekerasan bahan mencapai 57,7 HV pada paduan aluminium dengan kadar 2,5%Fe–0,5%Ni. Mikrostruktur mengalami perubahan dengan semakin tinggi kadar paduan. Mikrostruktur butir dendrit berbentuk granular cenderung mengarah ke bentuk struktur butir dendrit yang memanjang. Transformasi fasa paduan AlFeNi yang terjadi mengarah ke bentuk fasa  $\kappa$  dan  $\tau$  dengan kadar 2,5%Fe–0,5%Ni. Pembentukan fasa  $\kappa$  dan  $\tau$  cenderung meningkat dengan kadar Fe semakin tinggi.

## VI. UCAPAN TERIMAKASIH

Kami menyampaikan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah ikut berpartisipasi membantu kelancaran kegiatan eksperimen baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga menghasilkan tulisan dalam bentuk makalah ini. Kami tidak lupa pula menyampaikan terima kasih kepada Kepala PTBN dan Direktur Produksi PT. BATAN Teknologi yang telah menyediakan fasilitas kegiatan penelitian ini.

## VII. DAFTAR PUSTAKA

1. BENJAMIN, M.M.A., “Nuclear Reactor Materials and Applications”, VNR Company Inc., USA., 1983, pp.282-297.
2. FANJAS, Y., “Status of LEU Fuels at CERCA”, <http://www.anl.gov>., 1991.
3. TRAVELLI, A., “Status and Progress of the RERTR Program”, Proceedings the 19<sup>th</sup> International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Seoul, Korea, 1996, pp.4-8.
4. DAVID, G.H., “United States Policy Initiatives in Promoting the RERTR Program”, Proceedings the 19<sup>th</sup> International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test reactors, Seoul, Korea, 1996, p.14.
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. DIETER, G.E., “Mechanical Metallurgy”, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill, New York, 1981.
8. HAKKA, “Manual Dendrite Arm Spacing”, DASS Measure, <http://www.tech.nite.go.jp/anzen2>.
9. MONDOLFO, L.F, “Aluminium Alloys, Structure and Properties”, London, 1976, pp.532-533.
10. RAYNOR, G.V., and RIVLIN, G.V., “Phase Equilibria in Iron Ternary Alloy”, The Institute of Metals, New York, 1988, p.110.
11. PETZOW, G., and EFFENBERG, G., “Ternary Alloy AlFeNi”, Vol.15, ASM International, Germany, 1992.