

# MODIFIKASI STRUKTUR PERMUKAAN ALUMINIUM DENGAN BUBUK BESI MENGGUNAKAN METODA *MECHANICAL ALLOYING*

Agus Sukarto Wismogroho<sup>1)</sup>, Pius Sebleku<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Pusat Penelitian Fisika - LIPI  
Gdg. 440 Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan  
E-mail : agus046@lipi.go.id

<sup>2)</sup>Pusat Penelitian Metalurgi LIPI  
Kawasan Puspiptek Serpong Tangerang Selatan Banten

Masuk tanggal : 20-09-2013, revisi tanggal : 01-11-2013, diterima untuk diterbitkan tanggal : 18-11-2013

## Intisari

**MODIFIKASI STRUKTUR PERMUKAAN ALUMINIUM DENGAN BUBUK BESI MENGGUNAKAN METODA *MECHANICAL ALLOYING*.** Pada penelitian ini telah dilakukan studi mengenai modifikasi struktur permukaan pelat aluminium dengan bubuk besi menggunakan metoda *mechanical alloying* (MA) yang bertujuan untuk dapat memperoleh lapisan paduan antara aluminium dari pelat dengan bubuk besi yang digunakan. Pelat aluminium, bubuk besi dan bola-bola *milling* dimasukkan ke dalam bejana *milling* untuk dilakukan proses MA. Jumlah bubuk besi yang digunakan divariasikan sebanyak 2 dan 10 gram. Lama MA dilakukan sampai 10 jam. Hasil proses MA menunjukkan bahwa lapisan partikel dari bubuk besi dapat diperoleh di permukaan pelat aluminium. Struktur pelapisan yang terbentuk berupa struktur *lamellar* yang merupakan gabungan antara partikel besi dengan aluminium yang mengalami deformasi memipih karena proses penumbukan yang berulang. Sejalan dengan MA, partikel besi semakin masuk ke dalam permukaan aluminium, sedangkan bagian dari aluminium terdorong keluar sehingga membentuk pemaduan antara keduanya. Pada proses MA dengan bubuk besi 2 gram, diperoleh fasa FeAl selama lebih dari 2 jam. Sedangkan pada proses MA dengan bubuk besi 10 gram, belum diperoleh fasa baru meskipun telah dilakukan MA selama 10 jam. Pembentukan lapisan Fe-Al, pembentukan paduan dan lama pembentukannya sangat dipengaruhi oleh banyaknya bubuk besi yang digunakan dalam proses MA. Ketebalan lapisan optimal berkisar 100  $\mu\text{m}$ , dengan lapisan yang terlihat memiliki kepadatan tinggi dan ikatan yang baik.

*Kata kunci : Mechanical alloying, FeAl, Aluminium pelat, Pelapisan, Modifikasi permukaan*

## Abstract

***SURFACE MODIFICATION OF ALUMINUM PLATE WITH IRON POWDER USING MECHANICAL ALLOYING METHOD.*** In this research, a study on the modification of the surface structure of the aluminum plate with iron powder using the mechanical alloying (MA) method was conducted. This process aims to obtain a coating layer of alloy between aluminum plates with iron powder used. Aluminum plates, iron powder and milling balls inserted into the milling vessel for the MA process. The amount of iron powder used was 2 and 10 grams. MA was done up to 10 hours. MA results showed that the coating layer of iron particles can be obtained on the surface of the aluminum plate. The microstructure of the coating layers formed a lamellar structure between Al and Fe. With increasing MA time, the iron particles entered the surface of the aluminum plate, while aluminum was pushed out that made the compound or mixing between Fe and Al. In the MA process with 2 grams iron powder, the FeAl phase was obtained after MA for more than 2 hours. While in the process of MA with 10 grams iron powder, a new phase wasn't observed even though after MA for 10 hours. The coating layers formation of the mixing Fe-Al, the Fe-Al alloy and the formation time were strongly influenced by the amount of iron powder used in the MA process. The optimal coating thickness was about 100 $\mu\text{m}$ , with apparently had a high density and a good bond.

*Keywords : Mechanical alloying, FeAl, Aluminum plate, Coating, Surface modification*

## PENDAHULUAN

Material aluminium dan paduannya banyak digunakan untuk berbagai kebutuhan sebagai material struktur dari peralatan, permesinan, transportasi, industri maupun konstruksi. Akhir-akhir ini peningkatan kekerasan permukaan, ketahanan terhadap korosi, ketahanan terhadap sulfidasi dan untuk meningkatkan durabilitas penggunaannya menjadi tuntutan terhadap material tersebut agar lebih fungsional dan ekonomis. Oleh karena itu, berbagai metoda rekayasa teknologi terutama untuk modifikasi permukaan material telah dikembangkan, seperti *electro deposition*<sup>[1]</sup>, *thermal spray coating*<sup>[2-3]</sup>, *polymer coating*<sup>[4]</sup> dan *sol-gel*<sup>[5]</sup>.

Pada sistem material aluminium, paduan antara aluminium dan besi membentuk paduan *iron aluminide*, seperti FeAl, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, Fe<sub>3</sub>Al dan FeAl<sub>2</sub><sup>[6]</sup>. Paduan FeAl dan Fe<sub>3</sub>Al menunjukkan kombinasi sifat liat pada suhu ruang dan memiliki ketahanan terhadap *creep* pada suhu tinggi dibandingkan paduan yang lainnya<sup>[7]</sup>. Paduan tersebut memiliki karakteristik ketahanan korosi dan sulfidasi yang tinggi dengan karakteristik mekanik yang baik, menjadikan salah satu alternatif material untuk digunakan pada industri kimia dan energi fosil. Namun demikian, pada pelapisan metoda konvensional seperti *hot-dip coating* dan *pack cementation* menghasilkan struktur paduan Fe-Al yang beragam<sup>[8]</sup>.

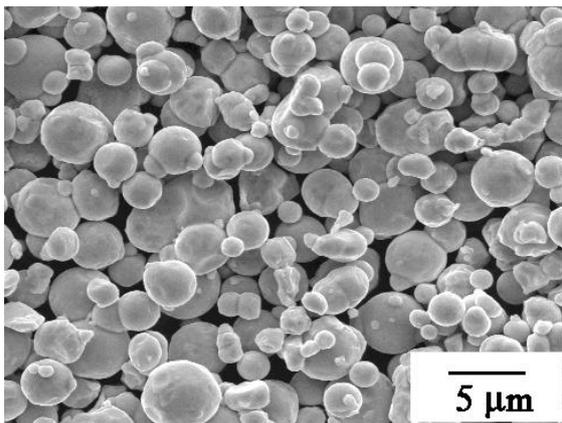
Di lain sisi, *mechanical alloying* (MA) atau pepaduan mekanik merupakan metoda pembentukan paduan melalui metoda metastabil. Pada metoda ini, paduan material sulit terbentuk, struktur *amorphous*, struktur nano material, paduan super jenuh dapat diperoleh. Akhir –akhir ini, MA juga dipelajari untuk dapat diaplikasikan dalam proses pelapisan. Pada proses MA, deformasi, deformasi plastis, penghancuran dan pengelasan dingin dari bubuk yang digunakan menghasilkan suatu lapisan. Beberapa pelapisan, seperti

pelapisan paduan Ti-Al pada keramik zirconia<sup>[9]</sup>, pelapisan PbO, CuO dan WO pada aluminium<sup>[10]</sup>, dan pelapisan Fe-Al pada pelat baja<sup>[11]</sup> telah dipelajari dan menunjukkan adanya potensi yang baik. Namun demikian, informasi lebih detil dan mekanisme mengenai pelapisan sebagai modifikasi permukaan material terutama pada aluminium belum banyak dipelajari. Pada penelitian ini dipelajari modifikasi permukaan aluminium ketika dilakukan MA bersama dengan bubuk besi. Selain itu, dijelaskan juga perubahan struktur fasa dan evolusi morfologinya untuk mempelajari mekanisme pembentukannya.

## PROSEDUR PERCOBAAN

Sebagai material awal, digunakan bubuk besi (Fe) dengan kemurnian 99,5 wt.%, partikel berbentuk bulat, berukuran ± 5µm dan dengan mikrostruktur yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sebagai material yang dimodifikasi, digunakan pelat aluminium dengan kemurnian 99,7%, berbentuk silinder dengan diameter 15 mm dan tebal 10 mm. Permukaan dari aluminium pelat dihaluskan dengan kertas pasir ukuran #800 yang dilanjutkan dengan pencucian menggunakan etanol dan pembersih ultrasonik. MA dilakukan dengan menggunakan *planetary ball milling*. Bola *milling* yang digunakan adalah bola besi baja dengan ukuran diameter 5 mm dan 10 mm dengan perbandingan 10:1. Total bola yang digunakan adalah 230 gram. Plat aluminium, serbuk besi dan bola *milling* dimasukkan ke dalam vial dengan volume 500 ml dan diputar dengan kecepatan putaran 250 rpm dalam kondisi gas argon. Sebuk besi divariasikan sebanyak 2 dan 10 gram. MA dilakukan selama 0,75; 2; 5 dan 10 jam. Sampel pelat alumina hasil MA yang diperoleh dipotong dan dihaluskan bagian penampangnya dengan kertas pasir #1500 dilanjutkan dengan alumina bubuk #2000 yang dilanjutkan dengan pencucian menggunakan etanol dan pembersih ultrasonik.

Setelah proses MA, sampel diambil dan dianalisa X-ray difraksi (XRD) untuk mengetahui perubahan struktur fasa permukaan pelat aluminium. Gambar *scanning electron microscopy* (SEM) dari penampang sampel diambil untuk mengetahui evolusi morfologi mikrostrukturnya. Untuk mengetahui komposisi dari lapisan digunakan *energy dispersive X-ray* (EDX). Pengukuran ketebalan lapisan di area penampang lapisan dilakukan pada beberapa gambar hasil analisa SEM yang diperoleh dan diambil rata-ratanya.



**Gambar 1.** SEM dari serbuk besi yang digunakan

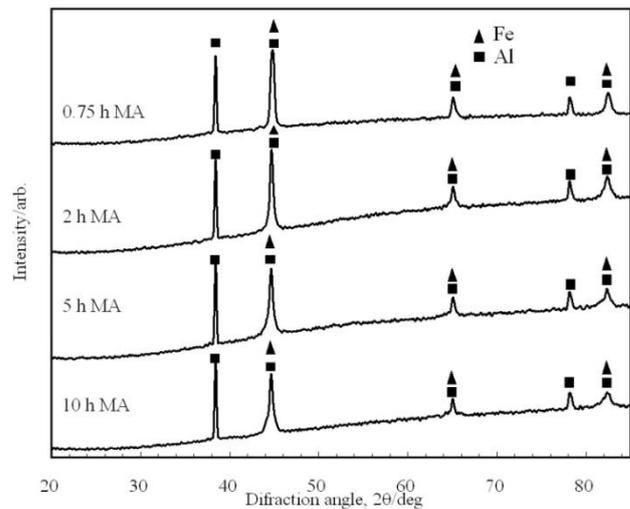
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Perubahan Struktur Fasa Selama MA

Permukaan sampel aluminium hasil MA bersama dengan bubuk besi sebesar 10 gram dianalisa menggunakan XRD. Hasil analisa ditunjukkan pada Gambar 2. Pada hasil XRD diperoleh 2 fasa yaitu fasa Al dan Fe. Fasa Al diperoleh dari material aluminium pelat material dasar dan fasa Fe diperoleh dari bubuk besi yang digunakan untuk pelapisan. Hal ini menunjukkan bahwa pada permukaan sampel aluminium telah terbentuk lapisan besi yang menempel karena proses MA sejak awal.

Fasa Al dan Fe berhimpitan di beberapa sudutnya. Pada fasa Al, lebar puncak untuk semua waktu MA tidak menunjukkan adanya perubahan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa Al yang mengalami

MA tidak menunjukkan adanya banyak perubahan strukturnya, yang mungkin disebabkan karena posisinya yang ada di bawah lapisan bubuk besi atau analisa XRD yang dilakukan lebih banyak memberikan informasi pada lapisan aluminium sebagai material dasar yang belum mengalami perubahan karena MA.



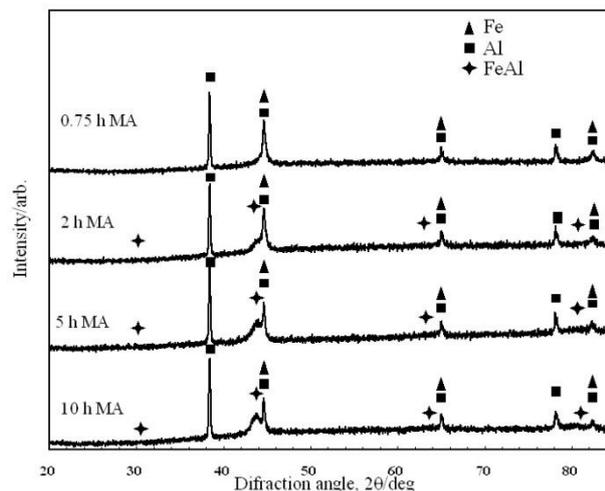
**Gambar 2.** Hasil XRD permukaan sampel aluminium yang di MA dengan bubuk besi 10 gram selama 0,75; 2; 5 dan 10 jam

Hasil analisa XRD dari fasa Fe untuk semua puncak terlihat berhimpitan dengan fasa Al (Gambar 2). Namun demikian, apabila dibandingkan dengan fasa Al yang tidak berhimpitan dengan fasa Fe dimana lebar puncaknya tidak mengalami perubahan, maka perubahan lebar puncak pada fasa yang berhimpitan antara Al dan Fe adalah kontribusi dari fasa Fe. Pelebaran puncak yang disertai penurunan intensitas ini menunjukkan terjadinya perubahan struktur dari fasa Fe berupa pengecilan butir kristal bubuk besi yang mengecil karena terjadinya penumbukan bola-bola *milling* pada proses MA.

Sudut puncak utama fasa Al ( $38,46^\circ$ ) tidak mengalami pergeseran titik puncaknya, sedangkan fasa Fe mengalami sedikit pergeseran sudut  $2\theta$  ke arah kiri dari  $44,89^\circ$  pada MA selama 0,75 jam menjadi  $44,69^\circ$  pada MA selama 10 jam. Demikian juga pelebaran puncak yang terjadi pada fasa Fe berupa pelebaran

simetris pada MA sampai selama 2 jam, dan menjadi pelebaran tidak simetris pada MA selama 5 jam ke atas. Hal ini menunjukkan bahwa struktur kristal Fe mulai mengalami deformasi plastis setelah MA selama 2 jam dimana kisi-kisi kristal Fe mengalami pelebaran. Hal ini dimungkinkan mulai masuknya atom Al ke dalam kristal Fe.

Hasil analisa XRD dari permukaan sampel aluminium hasil MA bersama dengan bubuk besi sebesar 2 gram ditunjukkan pada Gambar 3. Pada hasil XRD diperoleh 3 fasa yaitu fasa Al, Fe dan FeAl. Fasa Al tidak menunjukkan perubahan puncaknya. Fasa Fe menunjukkan adanya perubahan pelebaran puncak dan ketinggian intensitasnya. Pada MA selama 2 jam, terlihat adanya puncak baru pada sudut  $2\theta$  sebesar  $\pm 44^\circ$ . Puncak ini semakin jelas pada waktu MA lebih lanjut. Hal ini menunjukkan munculnya fasa baru sebagai hasil dari proses MA. Posisi puncak tersebut menunjukkan kecocokan fasa FeAl dibandingkan dengan fasa  $Fe_3Al$  dan  $Fe_2Al_5$  yang memiliki posisi mendekati fasa FeAl. Hal ini menunjukkan bahwa dengan proses MA dari pelat aluminium dengan jumlah bubuk besi yang lebih sedikit dapat menghasilkan fasa baru FeAl pada permukaan pelat aluminium. Namun demikian, tidak semua puncak dari fasa FeAl muncul secara jelas. Hal ini menunjukkan bahwa pemaduan antara besi dengan aluminium belum menghasilkan struktur kristal yang sempurna atau masih dalam kondisi metastabil. Munculnya fasa baru pada MA dengan pengurangan jumlah bubuk besi menunjukkan adanya efek peningkatan intensitas penumbukan bola-bola *milling* yang pada akhirnya mendapatkan pemaduan antara besi dengan aluminium pada permukaan pelat aluminium pada waktu MA yang lebih singkat.



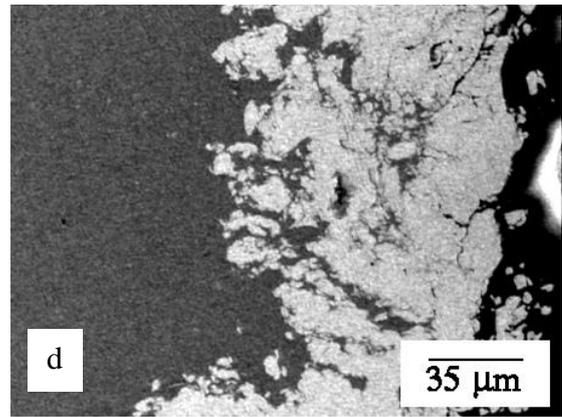
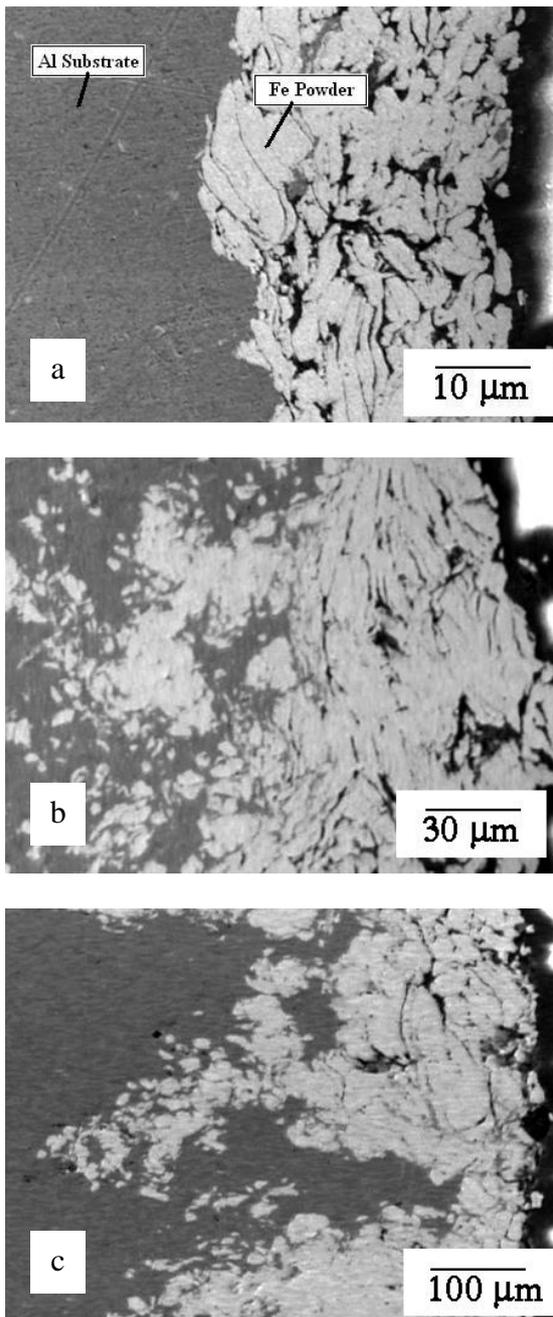
**Gambar 3.** Hasil XRD permukaan sampel aluminium yang di MA dengan bubuk besi 2 gram selama 0,75; 2; 5 dan 10 jam

### Evolusi Mikrostruktur Penampang Lapisan

Mikrostruktur dari penampang lapisan permukaan pelat aluminium dengan MA menggunakan bubuk besi 10 gram ditunjukkan pada Gambar 4. Bagian kiri di dalam gambar dengan warna gelap adalah pelat aluminium, bagian tengah dengan berwarna cerah adalah wilayah kaya kadar besi dan bagian kanan adalah wilayah kosong. Pada gambar tersebut diketahui bahwa sejak MA pada waktu 0,75 jam telah diperoleh lapisan bubuk besi pada permukaan pelat aluminium. Bubuk besi yang menempel masih menunjukkan bentuk partikel dari bubuk besi dengan ukuran berkisar  $5 \mu m$ . Diantara partikel terdapat celah gelap yang menunjukkan bahwa bubuk besi hanya menempel dengan lemah di permukaan pelat aluminium. Pada MA selama 2 jam, butir-butir bubuk besi di permukaan semakin memipih membentuk struktur *lamellar*. Sedangkan pada bagian dalamnya, partikel besi sudah semakin masuk ke dalam pelat aluminium. Hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya penumbukan bola-bola *milling* di permukaan pelat aluminium, bubuk besi mengalami deformasi dan sedikit demi sedikit masuk ke dalam

permukaan aluminium. Lapisan terlihat padat dan memiliki ikatan yang lebih baik.

Pada MA dengan waktu yang lebih lama, partikel besi semakin masuk ke dalam pelat aluminium. Bersamaan dengan masuknya partikel besi ke dalam permukaan, pelat aluminium juga menunjukkan adanya bagian dari aluminium yang bergerak keluar. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi pencampuran secara mikro di dalam permukaan pelat aluminium antara bubuk besi dan pelat aluminium.

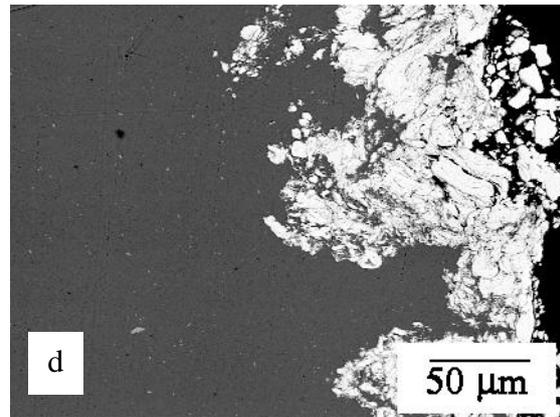
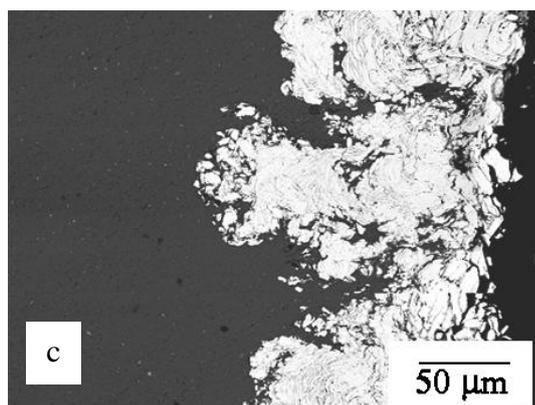
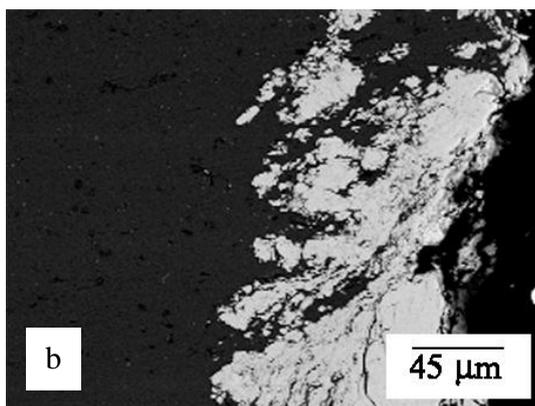
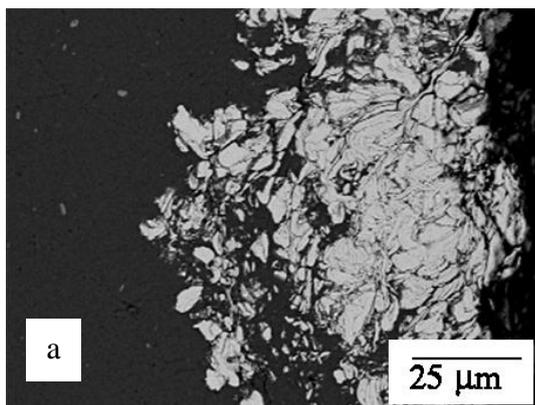


**Gambar 4.** Mikrostruktur penampang dari lapisan permukaan sampel aluminium yang di MA dengan bubuk besi 10 gram selama; (a). 0,75 jam, (b). 2 jam, (c). 5 jam, dan (d). 10 jam

Partikel dari serbuk besi yang menempel di permukaan pelat aluminium pada awalnya berbentuk bulat, yang kemudian mengalami deformasi menjadi pipih membentuk struktur *lamellar*. Pada waktu MA yang lebih lama, ukuran partikel semakin mengecil dan halus. Apabila dibandingkan dengan hasil XRD (Gambar 2), dapat diketahui bahwa puncak utama fasa Fe pada sudut berkisar  $44,5^\circ$  menunjukkan bahwa sejalan dengan penambahan waktu MA, diamati adanya penurunan puncak intensitas dan pelebaran puncak. Hal ini menunjukkan bahwa partikel Fe yang menempel pada permukaan pelat aluminium mengalami pengecilan butir kristal, namun belum mengalami perubahan fasa.

Mikrostruktur dari penampang lapisan permukaan pelat aluminium dengan MA menggunakan bubuk besi 2 gram ditunjukkan pada Gambar 5. Pada gambar tersebut diketahui bahwa sejak MA pada waktu 0,75 jam telah diperoleh lapisan bubuk besi pada permukaan pelat aluminium. Bubuk besi yang menempel telah masuk ke dalam permukaan pelat aluminium dan telah bercampur pada secara merata. Beberapa partikel masih terlihat dalam gumpalan besar. Pada MA selama 2 jam dan selanjutnya, pencampuran antara bubuk besi dan aluminium terlihat lebih intensif. Partikel besi terlihat lebih halus bercampur dengan

aluminium. Hasil analisa XRD (Gambar 3) menunjukkan bahwa pada tahap ini, paduan Al dan Fe telah membentuk fasa baru. Hal ini menunjukkan bahwa pencampuran kedua material tersebut mencapai tingkat atom, sehingga dapat membentuk fasa baru dalam kondisi padatan. Lapisan pepaduan antara pelat aluminium dan bubuk besi terlihat merata dan melekat kuat. Perbedaan pemberian jumlah bubuk besi di atas menunjukkan bahwa pembentukan lapisan Fe-Al, pembentukan paduan dan lama pembentukannya sangat dipengaruhi oleh banyaknya bubuk besi yang digunakan.



**Gambar 5.** Mikrostruktur penampang dari lapisan permukaan sampel aluminium yang di MA dengan bubuk besi 2 gram selama; (a). 0,75 jam, (b).2 jam, (c). 5 jam, dan (d). 10 jam

Tabel 1 menunjukkan hasil analisa EDX di permukaan lapisan hasil MA menggunakan bubuk besi 2 gram selama 2 dan 10 jam. Pada hasil analisa menunjukkan bahwa pada waktu MA selama 2 jam, sudah mulai terjadi adanya pencampuran antara Al dan Fe dengan kadar Al kurang dari 10 at.%. Sedangkan pada waktu MA selama 10 jam, kadar Al meningkat di atas 24 at.% dan mencapai 56 at.%. Pada perbandingan komposisi tersebut, fasa yang paling mungkin muncul setelah MA selama 10 jam adalah FeAl<sup>[6]</sup>. Hal ini sesuai dengan hasil analisa XRD yang menunjukkan bahwa fasa yang mungkin terbentuk adalah fasa FeAl.

**Tabel 1.** Hasil analisa EDX dari permukaan lapisan

Sampel	Al (at.%)	Fe (at.%)
Fe (2 gr, MA 2 jam)	9,32	90,68
	3,54	96,46
	6,41	93,59
Fe (2 gr, MA 10 jam)	56,33	43,67
	24,47	75,53
	51,17	48,83

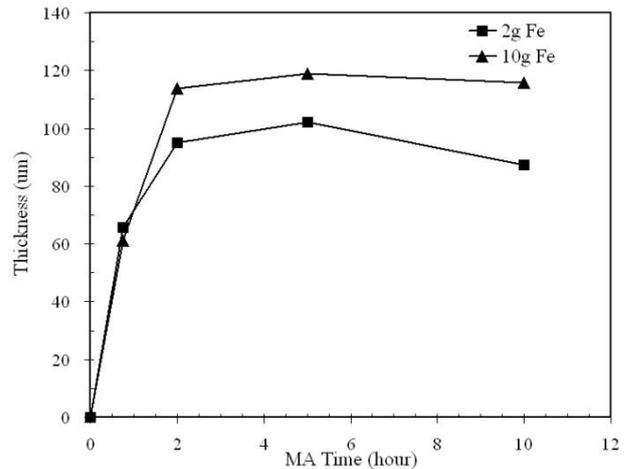
### Tebal Lapisan

Tebal lapisan rata-rata dari hasil MA untuk bubuk besi sebanyak 2 gram dan 10 gram ditunjukkan pada Gambar 6. Perubahan tebal lapisan untuk kedua variasi menunjukkan kecenderungan yang

serupa. MA pada tahap awal menghasilkan ketebalan pelapisan yang cepat, namun setelah dalam waktu tertentu, ketebalan optimum akan tercapai. Keduanya memiliki ketebalan berkisar pada 100  $\mu\text{m}$ , meskipun menggunakan jumlah bubuk yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa apabila bubuk besi digunakan secara berlebih, maka akan berefek pada proses pelapisan yang kurang intensif dan sisa bubuk yang tertinggal setelah MA. Penentuan jumlah bubuk yang optimal merupakan salah satu faktor yang penting.

Pada MA dengan bubuk besi 2 gram, setelah MA selama 5 jam, terlihat kecenderungan penurunan ketebalan lapisan yang diperoleh. Apabila dibandingkan dengan hasil SEM dari mikrostrukturnya pada Gambar 4(d), terlihat bahwa pada bagian luar terdapat pecahan partikel yang terlepas dari permukaan lapisan. Hal ini menunjukkan bahwa pecahan partikel tersebut dimungkinkan adalah pemecahan dari paduan antara besi dengan aluminium yang telah membentuk paduan FeAl. Akan tetapi karena mengalami benturan bola-bola *milling* secara berkelanjutan mengakibatkan terjadinya perontokan. Hal ini menunjukkan bahwa lama proses MA yang optimal untuk pembentukan lapisan sebagai modifikasi permukaan pelat aluminium ditentukan dari lama pembentukan fasa FeAl.

Pada MA dengan bubuk besi 10 gram, meskipun paduan baru belum terbentuk, terlihat adanya kejenuhan pembentukan lapisan, sehingga setelah ketebalan lapisan mencapai nilai optimum, penempelan lebih lanjut sulit terjadi. Hal ini dimungkinkan karena dengan dilakukannya penumbukan secara berulang-ulang menghasilkan pengecilan butir kristal dan penambahan cacat kristal yang akhirnya meningkatkan kegetasan material, sehingga bubuk besi yang telah menempel mengalami perontokan kembali.



**Gambar 6.** Perubahan ketebalan lapisan pada permukaan pelat aluminium hasil MA

## KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan studi mengenai modifikasi struktur permukaan pelat aluminium dengan bubuk besi menggunakan metoda *mechanical alloying* yang bertujuan untuk memperoleh lapisan paduan antara aluminium dari pelat dengan bubuk besi yang digunakan.

Hasil proses MA menunjukkan bahwa lapisan partikel dari bubuk besi dapat diperoleh di permukaan pelat aluminium. Struktur pelapisan yang terbentuk berupa struktur *lamellar* yang merupakan gabungan antara partikel besi dengan aluminium. Sejalan dengan MA, partikel besi semakin masuk ke dalam permukaan aluminium, sedangkan bagian dari aluminium terdorong keluar sehingga membentuk pemaduan antara keduanya. Pada proses MA dengan bubuk 2 gram, diperoleh fasa FeAl setelah MA selama lebih dari 2 jam. Sedangkan pada proses MA dengan bubuk 10 gram, belum diperoleh fasa baru meskipun telah dilakukan MA selama 10 jam. Pembentukan lapisan Fe-Al, pembentukan paduan dan lama pembentukannya sangat dipengaruhi oleh banyaknya bubuk besi yang digunakan dalam proses MA. Lapisan terlihat padat dan memiliki ikatan yang baik. Ketebalan lapisan optimal berkisar 100  $\mu\text{m}$ , dengan kecenderungan terjadi

penurunan apabila dilakukan MA lebih lanjut setelah fasa Fe-Al terbentuk.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kepada kegiatan DIPA Pusat Penelitian Fisika – LIPI dan Kompetitif Pusat Penelitian Metalurgi – LIPI yang mendukung sebagian pembiayaan kegiatan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mei Li, Ya-Qin Yang, Liang Liu, Ji-Ming Hu, and Jian-Qing Zhang. 2010., „Electro-assisted preparation of dodecyltrimethoxysilane/TiO<sub>2</sub> composite films for corrosion protection of AA2024-T3 (aluminum alloy)”. *Electrochimica Acta.*: Vol. 55, pp. 3008-3014.
- [2] Gang Ji, Omar Elkedim, and Thierry Grosdidier. 2005., „Deposition and corrosion resistance of HVOF sprayed nanocrystalline iron aluminide coatings”. *Surface and Coatings Technology.*: Vol. 190, pp.406-416.
- [3] N. Cinca, and J.M. Guilemany. 2012., „Thermal spraying of transition metal aluminides: An overview”. *Intermetallics.*: Vol. 24, pp. 60-72.
- [4] M. Niknahad, S. Moradian, and S.M. Mirabedini. 2010., „The adhesion properties and corrosion performance of differently pretreated epoxy coatings on an aluminium alloy”. *Corrosion Science.*: Vol. 52, pp. 1948-1957.
- [5] Z. Feng, Y. Liu, G.E. Thompson, and P. Skeldon. 2010., „Sol-gel coatings for corrosion protection of 1050 aluminium alloy”. *Electrochimica Acta.*: Vol. 55, pp. 3518-3527.
- [6] ASM International. 1992. *ASM Handbook, Alloy Phase Diagram 3*. ASM International : pp 2.448.
- [7] N.S. Stoloff. 1998., „Iron aluminides: present status and future prospects”. *Materials Science and Engineering: A.*: Vol. 258, pp.1-14.
- [8] Shigeaki Kobayashi, and Takao Yakou. 2002., „Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment”. *Materials Science and Engineering: A.*: Vol. 338, pp. 44-53.
- [9] Keizo Kobayashi. 1995., „The Formation of Coating Film on Milling Balls for Mechanical Alloying”. *Materials Transactions JIM.*: Vol.36, pp.134-137.
- [10] Laszlo Takacs, and Aghasi R. Torosyan. 2007., „Surface mechanical alloying of an aluminum plate”. *Journal of Alloys and Compounds.*: 434-435, pp. 686-688.
- [11] Agus S. W., Heru I., Wahyu B. W., Alfian N., Nurul T. R., and Hidekazu S. 2009., „Iron aluminide Coating of Structural Steel by Mechanical Alloying Followed by Annealing”. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy.*: Vol. 56, pp. 427-432.