

STUDI X-RAY DIFFRACTOMETRY PADA STRUKTUR COATING ALUMINIUM YANG DIPREPARASI DENGAN METODE MECHANICAL ALLOYING

Nita Rosita^{1,2}, Toto Sudiro², Didik Aryanto² dan Mahardika Prasetya Aji¹

¹Jurusan Fisika, FMIPA Universitas Negeri Semarang
Gunungpati, Semarang 50229, Jawa Tengah

²High Temperature Materials Research Group, Pusat Penelitian Fisika - LIPI
Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang Selatan
E-mail: didik_phys@yahoo.co.id

Diterima: 5 Agustus 2015

Diperbaiki: 1 September 2015

Disetujui: 28 September 2015

ABSTRAK

STUDI X-RAY DIFFRACTOMETRY PADA STRUKTUR COATING ALUMINIUM YANG DIPREPARASI DENGAN METODE MECHANICAL ALLOYING. Coating aluminium (Al) telah berhasil dideposisikan pada permukaan baja karbon rendah (*low carbon steel*) dengan menggunakan metode pemaduan mekanik (*mechanical alloying*). Setelah dideposisikan, coating aluminium diannealing di dalam *vacuum furnace* pada suhu 600 °C, 700 °C dan 800 °C dengan kondisi vakum sekitar 5,6 Pa. Transformasi fasa dan perubahan struktur pada coating aluminium sebagai fungsi suhu *annealing* dipelajari dengan menggunakan teknik difraksi sinar-X (*XRD*). Puncak difraksi Al(111) dari hasil karakterisasi *XRD* mengindikasikan bahwa coating aluminium telah terdepositasi pada permukaan *low carbon steel*. Selain itu, hasil *XRD* juga menunjukkan transformasi fasa dan perubahan struktur coating aluminium sebagai efek suhu *annealing*. Hal itu ditandai dengan munculnya fasa $Al_{3,2}Fe$, Fe_3Al , dan $Fe_{0,8}Al_{0,2}$ pada pola difraksi *XRD* setelah *diannealing*. Peningkatan suhu *annealing* menyebabkan penurunan *d-spacing*, parameter kisi dan konstanta kisi kristal $Fe_{0,8}Al_{0,2}$ (110), namun terjadi peningkatan pada regangan kisi dan kerapatan dislokasi. Evolusi pada struktur coating terjadi karena difusi aluminium ke dalam *low carbon steel*.

Kata kunci: Mechanical alloying, Coating, XRD, Struktur, Annealing

ABSTRACT

X-RAY DIFFRACTOMETRY STUDY ON STRUCTURE OF ALUMINUM COATING PREPARED BY A MECHANICAL ALLOYING METHOD. Aluminum (Al) coating was successfully deposited on the surface of low carbon steel by using a mechanical alloying method. After coating deposition, the aluminum coating was annealed in vacuum furnace of 5.6 Pa at elevated temperatures of 600 °C, 700 °C and 800 °C. Phase transformation and structure changes in aluminum coating at varying curing temperatures were studied by means of X-ray diffraction (XRD). The presence of Al (111) diffraction peak from the results of XRD characterization indicates that Al coating was deposited on the surface of low carbon steel. On the other hand, the results of XRD characterization show the phase transformation and structure changes of Al coating due to the effect of annealing temperature. It was indicated by the presence of diffraction peaks of $Al_{3,2}Fe$, Fe_3Al , dan $Fe_{0,8}Al_{0,2}$ after annealing. An increase in annealing temperature leads to decrease in *d-spacing*, lattice parameter, and lattice constant $Fe_{0,8}Al_{0,2}$ (110). However, the lattice strain and dislocation density are likely to increase. Structure coating evolution occurred due to the diffusion of aluminum to the substrate of low carbon steel.

Keywords: Mechanical alloying, Coating, XRD, Structure, Annealing

PENDAHULUAN

Material logam seperti besi dan baja banyak dimanfaatkan pada industri perkapalan, permesinan, turbin-turbin gas, dan mesin pembangkit daya/energi. Sebagian besar material logam tersebut diaplikasikan pada lingkungan yang bersuhu tinggi. Namun, logam dan paduannya (*alloy*) cenderung bereaksi dengan oksigen pada suhu tinggi. Hal tersebut menyebabkan pembentukan lapisan oksida pada permukaan material tersebut. Jika lapisan oksida yang terbentuk tidak protektif, umur pakai (*life-time*) komponen dapat menjadi lebih pendek dan daya tahan komponen terhadap degradasi lingkungan menurun. Peningkatan ketahanan logam terhadap oksidasi telah dilakukan melalui *alloy enrichment* dan *coating*. Pada teknologi *alloy enrichment*, ketahanan logam terhadap oksidasi dapat ditingkatkan, namun sering berdampak pada penurunan sifat mekanik. Modifikasi permukaan logam dengan *coating* menjadi teknik yang menjanjikan untuk meningkatkan ketahanan oksidasi dengan tetap menjaga sifat mekanik logam.

Berbagai strategi dalam teknologi *coating* telah dikembangkan untuk melindungi struktur logam dari oksidasi [1-3]. Material yang digunakan sebagai bahan *coating* juga terus diteliti dan dikembangkan [2-4]. Pemilihan material *coating* didasarkan pada sifatnya yang dapat menahan oksidasi. Alumunium merupakan material memiliki sifat mekanik yang baik, densitas rendah dan dapat memberikan ketahanan terhadap oksidasi pada temperatur tinggi dengan membentuk lapisan oksida ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) [5,6] serta harganya murah. Hal tersebut menjadikan alumunium sangat potensial digunakan sebagai *coating* karena dapat berlaku sebagai sumber alumunium untuk pembentukan lapisan protektif oksida, alumina. *Coating* alumunium telah dikembangkan dan diaplikasikan pada pelapisan baja kapal [6], pelapisan logam Gd pada *magnetic refrigerant* [4], dan pelapisan anoda TiO_2 untuk meningkatkan efisiensi sel surya [7]. Pada lingkungan laut, *coating* alumunium telah terbukti menjadi satu dari sistem perlindungan korosi yang paling ekonomis. *Coating* alumunium pada substrat besi dan baja sangat menarik karena dapat terbentuk senyawa Fe-Al, yang mana memiliki sifat mekanik yang baik, densitas yang rendah dan memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi dan oksidasi [6]. Beberapa teknik telah digunakan dalam teknologi *coating*, diantaranya *hot dipping* [2], *thermal spraying* [8], *Chemical Vapour Deposition (CVD)* [9] and *cold spraying* [10]. Pada beberapa tahun terakhir dikembangkan *coating* dengan menggunakan metode *mechanical alloying* [11,12].

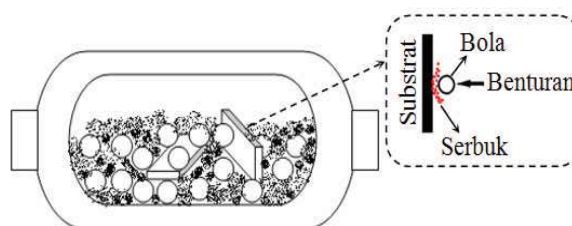
Mechanical alloying telah dikembangkan untuk meningkatkan sifat permukaan dari material, memperpanjang masa kerja bagian-bagian mesin dan mengeksplotasi potensi laten bahan [12]. Metode ini dapat diaplikasikan secara luas untuk sintesis serbuk

komposit yang berbeda. Dalam beberapa tahun terakhir, metode *mechanical alloying* digunakan untuk melapisi objek [11,12]. Proses *mechanical alloying* dapat membuat struktur multikomponen tebal dengan kemampuan ikat yang tinggi pada substrat yang berbeda [12]. Romankov et al [13] menunjukkan metode *mechanical alloying* dapat digunakan untuk memfabrikasi *coating* Ti-Al. Metode ini juga digunakan untuk mendeposisikan *intermetallic* Fe-Al pada permukaan baja [14]. Hingga saat ini, penelitian *coating* dengan metode *mechanical alloying* masih berfokus pada perubahan fasa selama proses *milling* [12,14].

Belum ada penelitian yang mempelajari efek panas tambahan (*annealing*) setelah proses *coating* dengan menggunakan metode *mechanical alloying*. Pada proses *coating*, perlakuan *annealing* diperlukan untuk memperbaiki kualitas struktur *coating*, dimana biasanya dilakukan pada suhu dibawah *melting point* [15]. Tujuan pada studi ini adalah mendeposisikan *coating* alumunium pada substrat *low carbon steel* dengan metode *mechanical alloying*. Selanjutnya, mempelajari efek *annealing* pada suhu di atas *melting point* alumunium dengan menggunakan teknik *XRD*.

METODE PERCOBAAN

Bahan yang digunakan sebagai substrat adalah pelat *low carbon steel* dengan dimensi $10 \times 8 \times 3 \text{ mm}^3$. Sebelum proses *coating*, semua substrat dihaluskan/*polish* secara mekanik dan dibersihkan dengan aseton dalam *ultrasonic cleaner*. Komersial serbuk alumunium (99,14% produk Kanto Chemical Co., INC) digunakan sebagai *raw material* untuk fabrikasi *coating*. Serbuk alumunium dan dua buah plat *low carbon steel* dimasukkan ke dalam 125 mL botol *grinding* panjang dengan bola *grinding stainless-steel* ($\phi = 4 \text{ mm}$). Perbandingan berat bola dan serbuk adalah 10:1. Ilustrasi skema dari proses ditunjukkan pada Gambar 1. Proses *Mechanical Alloying* dilakukan selama 1 jam dengan alat *high speed shaker mill* buatan Pusat Penelitian Fisika LIPI dengan frekuensi osilasi 700/menit. *Low carbon steel* yang sudah terlapisi alumunium (seperti ditunjukkan pada Gambar 2) selanjutnya di*annealing* pada suhu 600, 700, dan 800 °C di dalam *vacuum furnace* Zhenzhou Brother Type XD-1400S. Sampel di*annealing* selama 2 jam pada tekanan vakum 5,6 Pa. Setelah di*annealing*, sampel didinginkan sampai suhu ruang pada kondisi

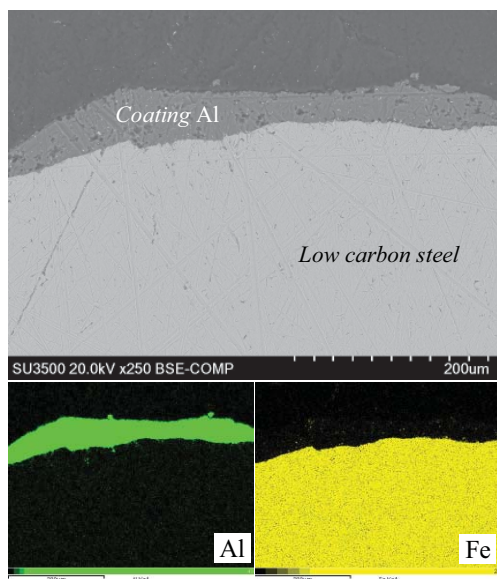


Gambar 1. Ilustrasi skema dari metode *mechanical alloying*.

vakum. Transformasi fasa dan perubahan struktur dari sample dipelajari dengan menggunakan XRD produk Rigaku Smart Lab dengan target Cu-K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *Energy Dispersive X-Ray (EDX) mapping* unsur pada penampang lintang *coating* aluminium ditunjukkan pada Gambar 2. Terlihat jelas pada Gambar 2, substrat *low carbon steel* telah terlapis aluminium. *Coating* aluminium memiliki permukaan kasar dan tebal yang tidak seragam, dimana ketebalannya sekitar 20-40 μm . Pada Gambar 2 juga tidak terlihat retakan atau *crack* pada daerah *interface coating* aluminium. Hal ini mengindikasikan terjadinya ikatan yang kuat antara *coating* aluminium dan substrat *low carbon steel*. Hasil ini menegaskan penelitian sebelumnya [11-14], dimana material yang *dicoating* dengan proses *mechanical alloying* memiliki kemampuan ikat yang tinggi pada substrat. Tumbukan antara bola-serbuk-substrat menyebabkan serbuk aluminium melekat dengan kuat pada permukaan *low carbon steel*. Tumbukan tersebut terjadi selama proses *mechanical alloying*, sehingga pada akhir proses terbentuk lapisan aluminium pada seluruh permukaan *low carbon steel*.



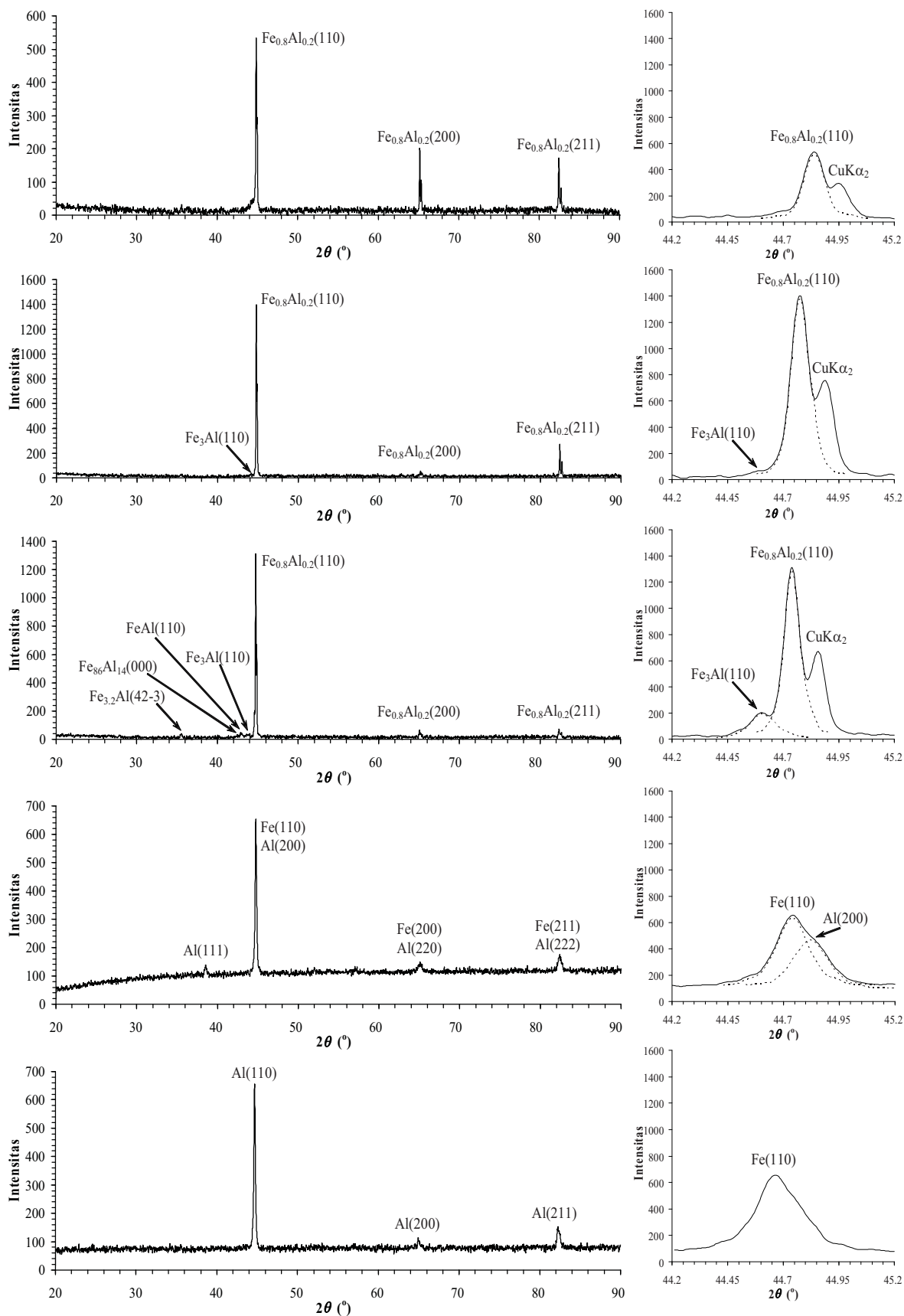
Gambar 2. Morfologi penampang lintang dan *Energy Dispersive X-ray (EDX) mapping* unsur dari *coating* aluminium pada substrat *low carbon steel*.

Gambar 3 menunjukkan pola XRD dari *low carbon steel*, *coating Al*, *coating Al* yang *diannealing* pada suhu 600 $^{\circ}\text{C}$, 700 $^{\circ}\text{C}$, dan 800 $^{\circ}\text{C}$. Setelah proses *mechanical alloying* dengan *High Energy Milling (HEM)* selama 1 jam terlihat intensitas puncak Al (111) yang rendah. Hal itu menegaskan hasil SEM dan EDX, dimana substrat *low carbon steel* telah *tercoating* dengan aluminium. Selain itu, terbentuknya *coating* aluminium juga ditandai dengan pergeseran puncak

spektrum XRD ke sudut yang lebih besar dan bertambah lebar *Full Width Half Maximum (FWHM)*. Berdasarkan hasil XRD pada Gambar 3, proses *coating* aluminium dengan metode *mechanical alloying* selama 1 jam tidak menyebabkan reaksi antara aluminium dan substrat *low carbon steel*. Hasil ini sesuai dengan hasil EDX mapping unsur pada Gambar 2. Detail observasi puncak XRD di Gambar 3 menunjukkan unsur aluminium masih berdiri sendiri. Hal ini ditandai dengan puncak difraksi aluminium yang berimpit dengan puncak substrat *low carbon steel*. Pola XRD dari permukaan *coating* aluminium setelah *diannealing* pada suhu 600 $^{\circ}\text{C}$, 700 $^{\circ}\text{C}$ dan 800 $^{\circ}\text{C}$ menunjukkan puncak Al(111) hilang dan muncul puncak-puncak yang lain. Hal tersebut dikarenakan atom aluminium menyisip ke dalam kisi Fe. Hasil karakterisasi XRD pada *coating* aluminium yang *diannealing* pada suhu 600 $^{\circ}\text{C}$ menunjukkan terjadinya transformasi fasa, dimana muncul puncak difraksi senyawa $\text{Fe}_{3,2}\text{Al}$, $\text{Al}_{86}\text{Fe}_{14}$, FeAl , Fe_3Al , dan $\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2}$.

Pola difraksi XRD juga menunjukkan perubahan yang sangat signifikan ketika suhu *annealing* ditingkatkan menjadi 700 $^{\circ}\text{C}$, dimana hanya terdapat puncak difraksi Fe_3Al dan $\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2}$, serta tidak terdapat puncak difraksi yang lain. Hasil yang berbeda ditunjukkan ketika suhu *annealing* ditingkatkan menjadi 800 $^{\circ}\text{C}$, intensitas difraksi $\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2}$ menurun diikuti dengan pergeseran puncak difraksi. Perbedaan pola difraksi pada *coating* aluminium setelah *diannealing* pada suhu yang berbeda disebabkan perbedaan laju difusi aluminium ke dalam substrat *low carbon steel*. Hal ini dikarenakan *melting point* aluminium (660,3 $^{\circ}\text{C}$) lebih rendah dari *melting point* *low carbon steel* (1538 $^{\circ}\text{C}$). Hasil penelitian Shen et al. [16] menunjukkan terjadinya difusi aluminium ke dalam substrat Fe, ketika *diannealing* pada suhu 610 $^{\circ}\text{C}$.

Peningkatan suhu *annealing* di atas *melting point* Al mempengaruhi laju difusi atom aluminium ke dalam substrat *low carbon steel*. Hal itu ditandai dengan perubahan fasa pada permukaan *coating* aluminium setelah *diannealing* selain fasa dominan $\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2}$. Pada suhu *annealing* 600 $^{\circ}\text{C}$, terbentuk fasa FeAl , $\text{Al}_{86}\text{Fe}_{14}$ dan Fe_3Al , sedangkan pada suhu *annealing* 700 $^{\circ}\text{C}$ terbentuk Fe_3Al . Hasil yang berbeda ditunjukkan pada suhu *annealing* 800 $^{\circ}\text{C}$, dimana hanya terdapat fasa $\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2}$ dan tidak terdapat fasa lainnya. Hasil tersebut mengindikasikan laju difusi aluminium meningkat dengan meningkatnya suhu *annealing* dari 600 $^{\circ}\text{C}$ hingga 700 $^{\circ}\text{C}$. Namun pada suhu 800 $^{\circ}\text{C}$ hanya sebagian *coating* aluminium yang berdifusi dan sebagian lagi diyakini menguap. Hal ini dikarenakan suhu *annealing* yang jauh lebih tinggi dari *melting point* aluminium. Peningkatan suhu *annealing* dari 600 $^{\circ}\text{C}$ hingga 700 $^{\circ}\text{C}$ meningkatkan energi aktivasi dari atom aluminium dan substrat, sehingga mempengaruhi pergerakan atom untuk berdifusi lebih dalam dari permukaan substrat. Hukum Fick's tentang difusi mengatakan bahwa laju difusi dipengaruhi oleh koefisien difusi dan gradien



Gambar 3. Pola Difraksi XRD dari (a) substrat low carbon steel, (b) coating Al, coating Al diannealing pada suhu (c) 600 °C, (d) 700 °C, dan (e) 800°C.

konsentrasi. Koefisien difusi sendiri sangat bergantung pada suhu, seperti ditunjukkan pada persamaan 1 [17],

$$D = D_0 \times e^{-E_A/RT} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

- D = Koefisien difusi
- D_0 = Konstanta difusi yang tidak bergantung pada suhu
- E_A = Energi aktivasi
- R = Konstanta gas ideal
- T = Suhu mutlak

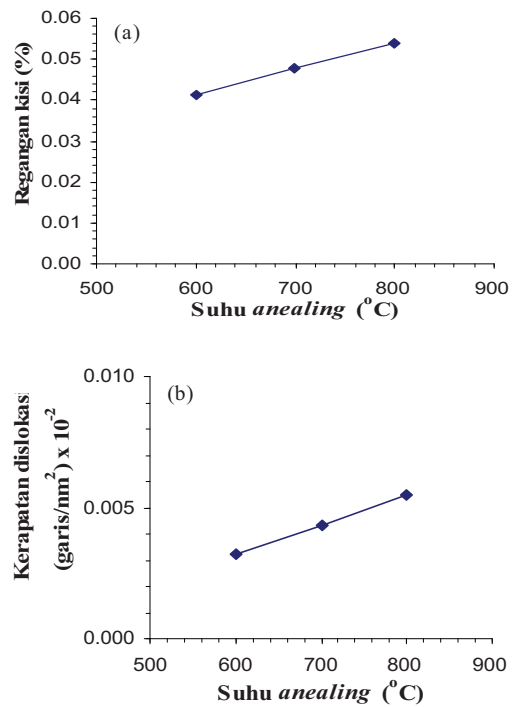
Selain itu, koefisien difusi juga tergantung pada mekanisme difusi, struktur kristal, konsentrasi dari spesies difusi dan cacat kristal. Ukuran partikel dan ukuran kristal aluminium yang semakin kecil karena proses *mechanical alloying* mempermudah proses difusi aluminium ketika di *annealing*. Partikel yang lebih kecil menyebabkan berkurangnya distorsi dari kisi sehingga lebih mudah berdifusi daripada partikel yang besar. Struktur polikristal aluminium dan besi juga mempercepat proses difusi sepanjang batas butir.

Tabel 1. Parameter karakteristik *d-spacing*, *FWHM*, ukuran kristal dan konstanta kisi (*a*) dari puncak difraksi $Fe_{0,8}Al_{0,2}$.

Suhu	2θ	<i>d-spacing</i> (Å)	<i>FWHM</i>	<i>Crystalline size</i> (Å)	<i>a</i> (Å)
600	44,74	2,0239	0,068	22,06738	2,86465
700	44,78	2,0223	0,079	18,99743	2,86222
800	44,84	2,0196	0,089	16,86653	2,85859

Detail observasi dari profil puncak $Fe_{0,8}Al_{0,2}$ (110) juga ditunjukkan pada Gambar 3. Intensitas puncak $CuK\alpha_2$ terlihat pada semua *coating* aluminium setelah di *annealing*. Disamping itu, puncak difraksi $Fe_{0,8}Al_{0,2}$ (110) bergeser ke arah sudut 2θ yang besar dan terjadi perubahan intensitas difraksi. Hasil tersebut mengindikasikan terjadinya perubahan struktur akibat reaksi antara *coating* aluminium dan substrat *low carbon steel*. Tabel 1 menunjukkan *d-spacing*, *FWHM*, ukuran kristal, dan konstanta kisi dari fasa $Fe_{0,8}Al_{0,2}$ (110).

Terlihat jelas, *d-spacing* dan konstanta kisi berkurang dengan meningkatnya suhu *annealing*. Ketika suhu *annealing* tinggi, terjadi rekristalisasi dan pemulihan yang cepat [16], hal itu dikarenakan jarak migrasi lebih besar sehingga mudah terjadi difusi pada batas butir. Proses difusi tersebut mengakibatkan konstanta kisi berkurang. Namun, *FWHM* dari puncak difraksi bertambah lebar dengan berkurangnya *d-spacing*, konstanta kisi dan ukuran kristal. Regangan kisi dan kerapatan dislokasi diyakini sebagai penyebab bertambah lebar *FWHM*. Substitusi antara atom aluminium dan besi yang memiliki jari-jari ion yang berbeda (jari-jari ion aluminium lebih kecil dari jari-jari ion besi) mengakibatkan terjadinya regangan kisi dan dislokasi.



Gambar 4. Regangan kisi dan kerapatan dislokasi dari $Fe_{0,8}Al_{0,2}$ sebagai fungsi suhu *annealing*.

Peningkatan regangan kisi dan kerapatan dislokasi sebagai fungsi suhu *annealing* ditunjukkan pada Gambar 4. Terlihat jelas, regangan kisi meningkat dengan bertambahnya suhu *annealing*. Hasil yang diperoleh dalam studi ini berbeda dengan hasil penelitian sebelumnya, dimana peningkatan suhu *annealing* (250-650 °C) akan mengurangi regangan kisi dan dislokasi [16]. Pada studi ini, suhu *annealing* lebih besar dari *melting point* aluminium, sehingga peningkatan regangan kisi diyakini karena pengaruh perbedaan koefisien ekspansi panas yang cukup besar antara unsur Al dan Fe, dimana koefisien ekspansi panas untuk Al dan Fe yaitu $22,9 \times 10^{-6} K^{-1}$ dan $11,9 \times 10^{-6} K^{-1}$ [18]. Perbedaan tersebut menghasilkan stress pada batas partikel/matrik, dan menyebabkan kerapatan dislokasi tinggi. Seperti ditunjukkan oleh Yu et al., [19] pada tumpukan Al/Ti/Al, perbedaan koefisien ekspansi termal yang besar menghasilkan *stress* pada batas partikel mengakibatkan peningkatan kerapatan dislokasi. Secara teori peningkatan regangan kisi berpengaruh terhadap peningkatan kerapatan dislokasi. Hubungan antara regangan kisi dan kerapatan dislokasi secara matematis dituliskan pada persamaan (2) [19],

$$\rho_g = (bl)^{-1} \varepsilon \dots\dots\dots (2)$$

dimana:

- ρ_g = Total pembentukan kerapatan dislokasi,
- b = Vektor Burgers, l rata-rata bagian bebas untuk pergerakan dislokasi
- ε = Regangan kisi

Kerapatan dislokasi perlu untuk diketahui dalam struktur material. Hal tersebut dikarenakan kerapatan dislokasi merupakan variabel kritis pada material yang menunjukkan mobilitas dislokasi, kekuatan dan elastisitas material.

KESIMPULAN

Hasil morfologi penampang lintang, *Energy Dispersive X-Ray (EDX) mapping* unsur dan *X-Ray Diffraction (XRD)* memperlihatkan bahwa aluminium telah berhasil dideposisi pada substrat *low carbon steel*. Perubahan struktur dan transformasi fasa terjadi pada *coating* aluminium sebagai efek suhu *annealing*. Difusi aluminium ke dalam substrat *low carbon steel* terjadi pada suhu *annealing* 600 °C hingga 700 °C dan *coating* aluminium sebagian menguap ketika di *annealing* pada suhu 800 °C. Kajian *XRD* dalam proses *coating* pada permukaan logam sangat penting untuk dilakukan. Hal tersebut terkait dengan informasi struktur hasil *coating* dan secara tidak langsung memberikan prediksi sifat mekanik dari material *coating* yang digunakan untuk melapisi permukaan logam.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih, penulis sampaikan kepada Group Penelitian *High Temperature materials and coating*-Pusat Penelitian Fisika (P2F) LIPI yang telah memfasilitasi sarana dan prasarana dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR ACUAN

- [1]. J. Romanowska. "Aluminum diffusion in aluminide coatings deposited by the CVD method on pure nickel." *CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, vol. 44 pp. 114-118, March 2014.
- [2]. L. Lihong, S. Dejiu, Z. Jingwu, S. Jian, and L. Liang. "Evolution of micro-arc oxidation behaviours of the hot-dipping aluminum coatings on Q235 steel substrate." *Applied Surface Science*, vol. 257, pp. 4144-4150, Feb. 2011.
- [3]. P. Guo, Y. Shao, C. Zeng, M. Wu, and W. Li. "Oxidation characterization of FeAl coated 316 stainless steel interconnects by high energy micro arc alloying technique for SOFC." *Materials-Letter*, vol. 65, pp. 3180-3183, Oct. 2011.
- [4]. H.-Y. Wu, J. Liu, H-F. Zhao, Q. Jiang, Y. Xu, and J. Xu. "Effect of surface microstructure of aluminium coating on corrosion properties of magnetic refrigerant gadolinium." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 23, pp. 3280-3285, Nov. 2013.
- [5]. T. Sudiro, T. Sano, S. Kyo, O. Ishibahi, M. Nakamori, and K. Kurokawa. "A Comparative Study of High Temperature Corrosion of Al₂O₃, SiO₂ and Al₂O₃-SiO₂ Forming Alloys in a Na₂SO₄-NaCl Atmosphere." *Oxidation of Metals*, vol. 80, pp. 589-597, Dec. 2013.
- [6]. F. Ahnia, and B. Demri. "Evaluation of aluminum coatings in simulated marine environment." *Surface & Coatings Technology*, vol. 220, pp. 232-236, Apr. 2013.
- [7]. Y.-J. Liou, Y.J. Chen, B-R. Chen, L-M. Lee, and C-H. Huang. "XPS Study of Aluminum Coating on TiO₂ Anode of Dye-Sensitized Solar Cells." *Surface & Coatings Technology*, vol. 231, pp. 535-538, Sept. 2013.
- [8]. B. Torres, C. Taltavull, A.J. López, M. Campo, and J. Rams. "Al/SiCp and Al11Si/SiCp coatings on AZ91 magnesium alloy by HVOF." *Surface & Coatings Technology*, vol. 261, pp. 130-140, Jan. 2015
- [9]. J. Romanowska. "Aluminum diffusion in aluminide coatings deposited by the CVD method on pure nickel." *Calphad*, vol. 44, pp. 114-118, Marc. 2014.
- [10]. N. Cinca, A. List, F. Gärtner, J. M. Guilemany, and T. Klassen. "Influence of spraying parameters on cold gas spraying of iron aluminide intermetallics." *Surface & Coatings Technology*, vol. 268, pp. 99-107, Apr. 2015
- [11]. A. Canakci, F. Erdemir, T. Varol, and S. Ozkaya. "Formation of Fe-Al intermetallic coating on low-carbon steel by a novel mechanical alloying technique" *Powder Technology*, vol. 247, pp. 24-29, Oct. 2013.
- [12]. Y. Li, C. Chen, R. Deng, X. Feng, and Y. Shen. "Microstructure evolution of Cr coatings on Cu substrates prepared by mechanical alloying method." *Powder Technology*, vol. 268, pp. 165-172, Dec. 2014.
- [13]. S. Romankov, A. Mamaeva, S. D. Kaloshkin, and S.V. Komarov. "Pulsed plasma treatment of Ti-Al coatings produced by mechanical alloying method." *Materials Letters*, vol. 61, pp. 5288-5291, Dec. 2007.
- [14]. Z. L. Zhan, Y. D. He, D. R. Wang, and W. Gao. "Low-temperature processing of Fe-Al intermetallic coatings assisted by ball milling." *Intermetallics*, vol. 14, pp. 75-81, Jan. 2006
- [15]. M. Mhadhbi, M. Khitouni, L. Escoda, J. J. Sunol, and M. Dammak. "Microstructure evolution and mechanical properties of nanocrystalline FeAl obtained by mechanical alloying and cold consolidation." *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 509, pp. 3293-3298, Feb. 2011.
- [16]. P. Z. Shen, Y.H. He, H.Y. Gao, J. Zou, N.P. Xu, Y. Jiang, B.Y. Huang, and C.T. Liu. "Development of a New Graded-Porosity FeAl Alloy by Elemental Reactive Synthesis." *Desalination*, vol. 249, pp. 29-33, Nov. 2009.

- [17]. W. D. Callister. *Materials Science and Engineering An Introduction*. John Wiley & Sons: New York, 2007, pp. 114-124
- [18]. V. I. Dybkov. "Interaction of iron-nickel alloys with liquid aluminum." *J. Materials Science*, vol. 35, pp. 1729-1736, Apr. 2000.
- [19]. H. Yu, A. K. Tieu, C. Lu, and C. Kong. "Abnormally high residual dislocation density in pure aluminum after Al.Ti/Al laminate annealing for seven days." *Philosophical Magazine Letters: Structures and properties of condensed matter*, vol. 94, pp. 732-740, Dec. 2014.