



## KARAKTERISASI STRUKTUR COATING Fe-25Al YANG DIFABRIKASI DENGAN METODE PADUAN MEKANIK

**Khoirun Nisa<sup>1,b</sup>, Didik Aryanto<sup>a\*</sup>, Toto Sudiro<sup>a</sup>, Perdamean Sebayang<sup>a</sup>, Mahardika P. Aji<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>High Temperature Materials and Coating Research Group, Pusat Penelitian Fisika-LIPI  
Gedung 440-442, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia

<sup>b</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang  
Gunungpati, Semarang 50229 Jawa Tengah, Indonesia  
E-Mail: \*didi027@lipi.go.id

Masuk Tanggal : 13-06-2016, revisi tanggal : 31-08-2016, diterima untuk diterbitkan tanggal 31-08-2016

### Intisari

*Coating Fe-25Al telah dipreparasi di atas substrat baja karbon rendah dengan menggunakan metode paduan mekanik. Struktur dari coating Fe-25Al sebelum dan setelah diberi perlakuan panas pada 600 °C, 700 °C, dan 800 °C dipelajari dengan menggunakan karakterisasi XRD (X-ray diffraction), SEM (scanning electron microscopy) dan EDX (energy disperse X-ray) untuk mengetahui morfologi dari penampang melintang coating Fe-25Al setelah proses paduan mekanik. Hasil dari SEM, EDX dan XRD menunjukkan bahwa Fe-25Al telah terdeposisi seragam pada substrat baja karbon rendah. Coating Fe-25Al yang terbentuk memiliki fasa solid solution Fe(Al). Perlakuan panas menyebabkan perubahan fasa pada coating Fe-25Al, dimana terbentuk fasa Fe<sub>3</sub>Al dengan orientasi bidang (110), (200) dan (211). Proses difusi optimum terjadi pada suhu 600 °C yang ditunjukkan dengan peningkatan ukuran butir, diikuti dengan berkurangnya densitas dislokasi dan regangan kisi. Meningkatnya suhu pada perlakuan panas menyebabkan perubahan parameter struktur seperti parameter kisi, ukuran kristal, regangan kisi dan kerapatan dislokasi. Dalam pekerjaan ini, perlakuan panas pada coating Fe-25Al mempengaruhi perubahan cacat kristal seperti batas butir, kekosongan dan dislokasi. Hal tersebut berakibat pada perubahan regangan kisi dan ukuran kristal dari coating Fe-25Al.*

**Kata Kunci:** Coating Fe-25Al, SEM, XRD, Ukuran kristal, Dislokasi

### Abstract

*Fe-25Al coating has been prepared on low carbon steel substrate by using a mechanical alloying technique. Structure of Fe-25Al coating before and after heat treatment at 600, 700, and 800 °C was studied by using XRD (x-ray diffraction) characterization. SEM (scanning electron microscopy) and EDX (energy disperse x-ray) were used to identified the morphology of cross-section of Fe-25Al coating after mechanical alloying process. The result of SEM, EDX and XRD showed that the Fe-25Al deposited uniformly on low carbon steel. The Fe-25Al coating formation has a solid solution Fe(Al) phase. Heat treatment caused the changing in the phase of Fe-25Al coating, where the Fe<sub>3</sub>Al phase with orientation of (110), (200) and (211) plane was formed. The optimum of diffusion process was occurs at temperature of 600 °C which was indicated by the increasing in the crystalline size and followed by the decreasing in the dislocation density and lattice strain. Increasing temperature on the heat treatment caused the changing in the structure parameter, such as lattice parameter, crystalline size, lattice strain and dislocation density. In this work, heat treatment on the Fe-25Al coating influenced the changing in crystal defect such as grain boundaries, vacancy and dislocation. It affected the changes of lattice strain and crystalline size of Fe-25Al coating.*

**Keywords:** Fe-25Al coating, SEM, XRD, Crystalline size, Dislocation

## 1. PENDAHULUAN

Baja karbon rendah memiliki peranan penting dalam aplikasi struktural karena biaya

yang lebih rendah daripada *high-alloy steels*<sup>[1]</sup> dan sifat mekaniknya yang baik<sup>[2]</sup>. Namun, baja karbon rendah tidak dapat digunakan

untuk aplikasi ketahanan oksidasi, khususnya di lingkungan oksidasi pada suhu tinggi. Hal tersebut menjadi salah satu faktor yang membatasi untuk aplikasi yang lebih luas. Banyak penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi baja karbon rendah, khususnya penerapan logam lainnya di permukaan (*coating*). Bahan yang biasa digunakan sebagai *coating* pada permukaan baja karbon rendah adalah aluminium (Al)<sup>[3-4]</sup>, karena dapat membentuk lapisan alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yang memiliki ketahanan korosi sangat baik<sup>[1]</sup>.

Pada beberapa dekade terakhir, kombinasi unsur besi (Fe) dan Al telah diaplikasikan dalam teknologi *coating*. Kombinasi Fe-Al diharapkan dapat membentuk intermetalik Fe-Al untuk diaplikasikan sebagai *coating* pada suhu tinggi. Pabrikasi dan karakteristik *coating* intermetalik berbasis Fe-Al menggunakan berbagai teknik telah banyak dipelajari<sup>[5-9]</sup>. Hal ini karena densitas rendah, kekuatan spesifik tinggi, kekakuan spesifik tinggi, suhu lebur tinggi, konduktivitas termal tinggi, serta ketahanan oksidasi dan korosi yang sangat baik<sup>[10]</sup>. Meskipun demikian, intermetalik Fe-Al memiliki kelemahan seperti keuletan rendah pada suhu kamar, kesulitan pengolahan dan kekuatan *creep* rendah di atas suhu 600 °C<sup>[11]</sup>. Hal tersebut membatasi aplikasi dari intermetalik Fe-Al. Penelitian yang dilakukan oleh Průša et al.,<sup>[12]</sup> menunjukkan bahwa pengurangan ukuran butir dalam rentang nanometer dapat meningkatkan sifat mekanik dan fisik. Dengan demikian, pengurangan ukuran butir ke sub-mikrometer atau nano-kristal pada material awal *coating* sangat diperlukan untuk meningkatkan sifat mekanik dan fisiknya.

Paduan mekanik adalah salah satu teknik *top-down* yang digunakan untuk mengurangi ukuran butir dari material. Teknik ini merupakan teknik yang sederhana dan efisien untuk membuat serbuk ultra halus dan seragam dalam ukuran nano. Teknik paduan mekanik telah digunakan untuk persiapan intermetalik, *solid solution* dan fasa amorf dari serbuk dalam proses pembuatan paduan<sup>[13-16]</sup>. Beberapa tahun terakhir ini, teknik paduan mekanik digunakan untuk membuat *coating* pada berbagai substrat logam<sup>[1,2,17-19]</sup>. Bagaimanapun, belum ada pekerjaan yang melaporkan tentang pabrikasi *coating* intermetalik Fe-25Al dengan material awal unsur Fe dan Al serta efek dari perlakuan panas. Pada artikel ini, *coating* intermetalik Fe-25Al difabrikasi dengan menggunakan teknik

paduan mekanik dan dipelajari efek perlakuan panas terhadap struktur *coating* Fe-25Al.

## 2. PROSEDUR PERCOBAAN

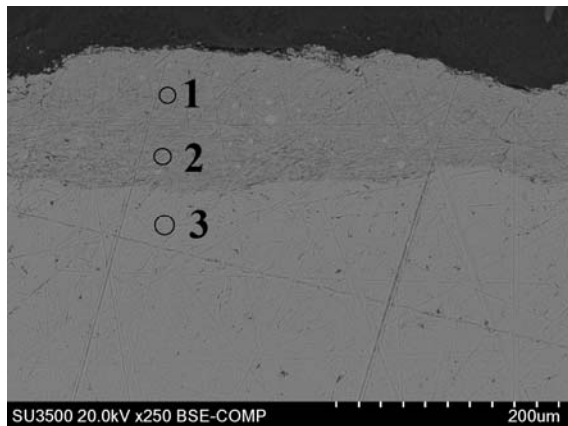
Komersial serbuk Fe (kemurnian 99,5%) dan Al (kemurnian 99,5%) digunakan sebagai material awal untuk pabrikasi *coating* intermetalik Fe-25Al. Pelat baja karbon rendah dengan dimensi 10×8×3 mm<sup>3</sup> digunakan sebagai substrat. Sebelum proses *coating* dengan menggunakan teknik paduan mekanik, substrat dipoles secara mekanik menggunakan kertas SiC sampai tingkat No.1200. Selanjutnya, dibersihkan dengan standar pembersihan yang bertujuan untuk menghilangkan pengotor dari permukaan substrat dan setelah itu dikeringkan dengan semprotan udara.

*Coating* intermetalik Fe-25Al difabrikasi dengan menggunakan *high speed shaker mill* dengan frekuensi osilasi 700/min. Langkah pertama, serbuk Fe (75 at.%) dan Al (25 at.%) dimasukkan ke dalam 125 mL *vial grinding* dengan bola *grinding stainless-steel* (Ø= 4 mm). Perbandingan berat bola dan serbuk adalah 10:1. Setelah itu, serbuk dicampur-aduk dengan teknik paduan mekanik selama 1 jam. Selanjutnya, beberapa plat baja karbon rendah dimasukkan ke dalam *vial grinding* tersebut dan dilakukan *milling* selama 1 jam. *Coating* intermetalik Fe-25Al selanjutnya dianiling pada suhu 600 °C, 700 °C, dan 800 °C di dalam pemanas vakum Zhenzhou Brother Type XD-1400S. Sampel diberi perlakuan panas selama 2 jam pada tekanan vakum 5,6 Pa. Transformasi fasa dan perubahan struktur dari *coating* intermetalik Fe-Al dipelajari dengan menggunakan XRD produk Rigaku Smart Lab dengan target Cu-K<sub>α</sub> (λ=1.5406 Å). Struktur parameter seperti koefisien tekstur, ukuran kristal, regangan kisi dan kerapatan dislokasi dihitung dari data XRD (*x-ray diffraction*). Morfologi penampang lintang dan distribusi unsur pada *coating* Fe-25Al setelah proses paduan mekanik dipelajari dengan menggunakan SEM (*scanning electron microscopy*) yang terintegrasi dengan EDX (*energy disperse x-ray*) produk Hitachi High-Tech Co. Ltd, Japan.

## 3. HASIL DAN DISKUSI

Gambar 1 menunjukkan citra SEM dari struktur penampang lintang *coating* Fe-25Al di atas substrat baja karbon rendah. Terlihat jelas bahwa *coating* Fe-25Al telah terdeposisi di atas permukaan baja karbon rendah. *Coating* Fe-

25Al memiliki struktur padat dengan permukaan yang tidak rata. Pengelasan dingin (*cold welding*) antara partikel Fe-25Al dan substrat baja karbon rendah setelah tumbukan bola yang berulang-ulang menyebabkan pada pembentukan lapisan *coating* <sup>[1]</sup>.



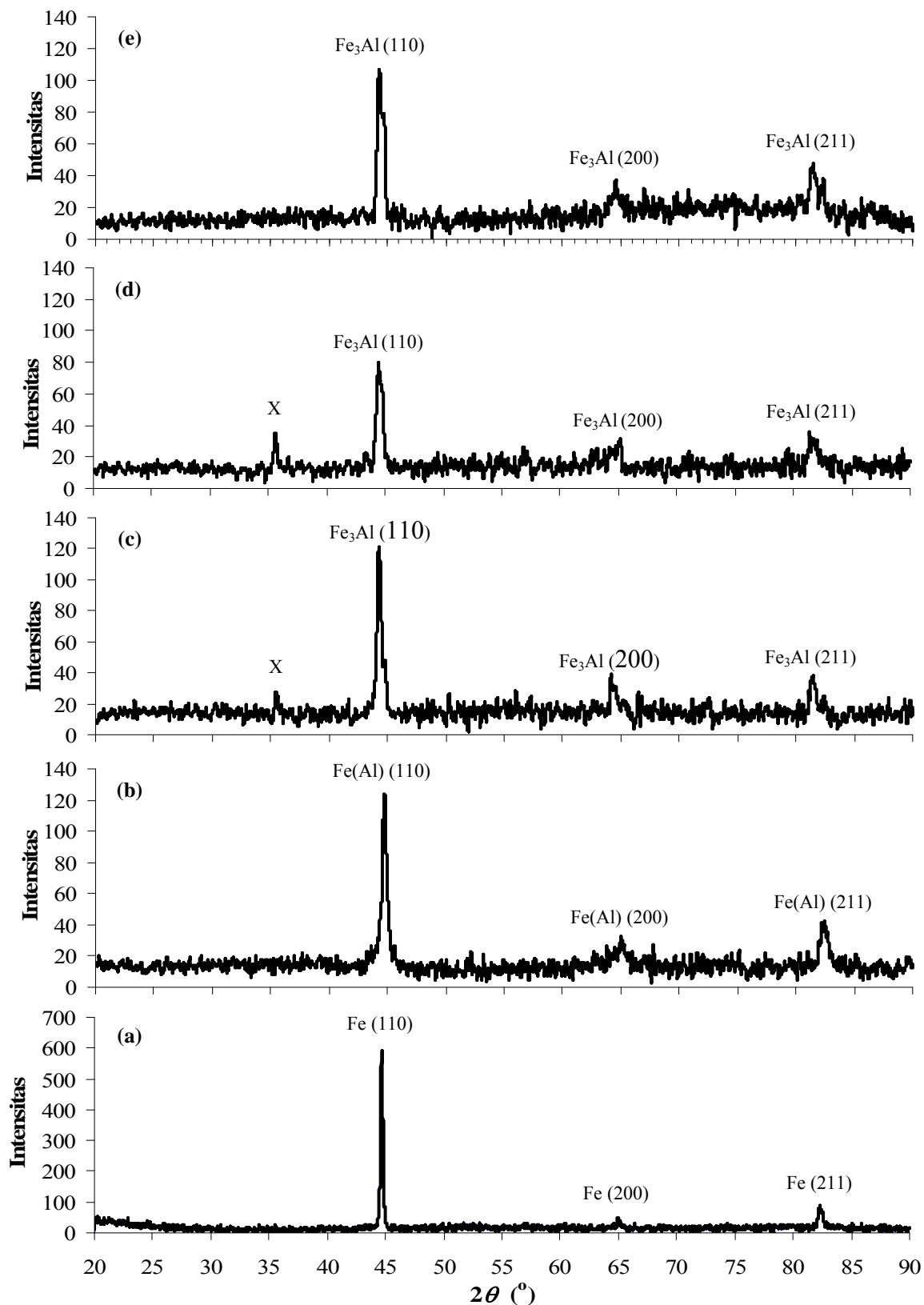
Gambar 1. Citra SEM dari penampang lintang *coating* Fe-25Al di atas baja karbon rendah

Pada Gambar 1 juga terlihat daerah antarmuka antara substrat dan lapisan *coating* tidak terdapat cacat atau retakan. Hasil ini mengindikasikan bahwa lapisan *coating* dan substrat memiliki ikatan yang kuat. Transformasi atom Fe-25Al dari antarmuka ke dalam permukaan baja karbon rendah sebagai efek tumbukan (*mechanical interdiffusion*)<sup>[20]</sup> diyakini sebagai penyebab ikatan yang baik di daerah antarmuka antara *coating* dan substrat. Pengamatan lebih detail dari hasil SEM yang dikombinasi dengan hasil EDX menunjukkan bahwa lapisan *coating* memiliki rata-rata komposisi unsur Fe dan Al masing-masing sekitar 75 dan 25 atomik persen.

Tabel 1. Komposisi unsur dari analisis EDX pada *coating* Fe-25Al di atas baja karbon rendah

Posisi titik	Persen atomik (at.%)	
	Fe	Al
1	76,69	23,31
2	70,36	29,64
3	100	0

Hasil ini mengindikasikan bahwa *coating* yang terdeposisi memiliki komposisi sesuai dengan komposisi serbuk awal yaitu 75% atom Fe dan 25% atom Al. Gambar 2 menunjukkan pola XRD yang mengilustrasikan perubahan struktur sebagai efek dari perlakuan panas selama 2 jam dengan suhu 600 °C, 700 °C dan 800 °C. Pada Gambar 2(a) juga ditunjukkan pola XRD dari pelat baja karbon rendah sebagai pembanding. Terlihat jelas pada Gambar 2(a), pelat baja karbon rendah memiliki puncak difraksi yang tajam dengan puncak sempit. Setelah perlakuan paduan mekanik, puncak baja karbon rendah bergeser sedikit ke sudut yang lebih besar (seperti ditunjukkan pada Gambar 2(b)). Selain itu, puncak difraksinya menjadi lebar dan berkurang intensitasnya. Hal ini mengindikasikan bahwa *coating* Fe-25Al telah terdeposisi pada permukaan (seperti ditunjukkan pada hasil karakterisasi SEM) dan terbentuknya Fe(Al) solid solution. Pencampuran serbuk Fe-25Al dengan teknik paduan mekanik sebelum proses *milling* menyebabkan atom Al *dissolved* di dalam kisi Fe<sup>[15]</sup>, sehingga pada akhir proses paduan mekanik menghasilkan *coating* Fe(Al) solid solution. Hasil XRD dari *coating* Fe-25Al setelah diberi perlakuan panas 600 °C, 700 °C dan 800 °C (Gambar 2(c)-2(e)) menunjukkan terbentuknya fasa Fe<sub>3</sub>Al yang ditandai dengan puncak difraksi sudut 2θ sekitar 44,3°; 64,6° dan 81,3°. Sudut-sudut tersebut secara berurutan menunjukkan orientasi kristal (110), (200) dan (211). Pada *coating* Fe-25Al setelah diberi perlakuan panas 600 °C dan 700 °C terdapat puncak yang tidak teridentifikasi di sekitar sudut 35,4°, namun puncak tersebut tidak muncul pada perlakuan panas 800 °C. Berdasarkan hasil XRD, semua sampel *coating* Fe-25Al setelah diberi perlakuan panas (600-800 °C) membentuk fasa Fe<sub>3</sub>Al dengan struktur kubik.



Gambar 2. Pola XRD dari (a) *low carbon steel*, (b) *coating* Fe-25Al sebelum diberi perlakuan panas, (c) *coating* Fe-25Al setelah diberi perlakuan panas pada 600 °C, (d) Pada 700 °C, dan (e) Pada 800 °C

Analisis lebih lanjut dari hasil XRD menunjukkan bahwa orientasi pertumbuhan kristal yang disukai adalah sepanjang bidang (200). Orientasi kristal yang disukai (*preferred orientations*) dari lapisan *coating* Fe-25Al

dievaluasi dengan koefisien tekstur (*TC*), yang dihitung menggunakan persamaan (1).

$$TC = \left( \frac{I_{(hkl)} / I_{r(hkl)}}{\left[ \frac{1}{n} \sum I_{(hkl)} / I_{r(hkl)} \right]} \right) \quad (1)$$

dimana,  $I_{(hkl)}$ ,  $n$ , dan  $I_{r(hkl)}$  secara berurutan adalah intensitas XRD dari pengukuran, jumlah refleksi dalam pola XRD dan intensitas dari referensi (ICDD-04-001-8564).

Tabel 2. Koefisien tekstur dan parameter kisi dari *coating* Fe-25Al

Suhu anil (°C)	Koefisien tekstur (TC)			Parameter kisi (a) Å		
	(110)	(200)	(211)	(110)	(200)	(211)
27	0,46	1,47	1,07	2,869	2,868	2,869
600	0,54	1,57	0,89	2,897	2,899	2,899
700	0,42	1,68	0,80	2,878	2,869	2,896
800	0,43	1,39	1,18	2,883	2,884	2,899

Detail hasil perhitungan disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan hasil tersebut, parameter kristal seperti ukuran kristal, regangan kisi dan kerapatan dislokasi dari lapisan *coating* Fe-25Al dihitung dari puncak difraksi (200). Sedangkan parameter kisi ( $a$ ) untuk struktur kubik ditentukan dengan persamaan (2)<sup>[21]</sup>, dan untuk masing-masing bidang orientasi ditampilkan pada tabel 2.

$$a = \frac{\lambda \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{2 \sin \theta} \quad (2)$$

dimana,  $\theta$  adalah sudut Bragg's dan ( $h k l$ ) adalah bidang orientasi kristal. Terlihat jelas nilai dari parameter kisi pada penelitian ini berubah dengan perubahan suhu pada perlakuan panas. Nilai rata-rata parameter kisi pada *coating* Fe-25Al sebelum dan sesudah perlakuan panas di atas 600 °C lebih kecil jika dibandingkan dengan nilai referensi ( $a = 2,895$  Å, ICDD-04-001-8564). Sedangkan, *coating* Fe-25Al setelah mendapat perlakuan panas 600 °C memiliki nilai rata-rata parameter kisi yang lebih besar dari referensi. Variasi nilai parameter kisi dikarenakan adanya cacat kisi (dislokasi) yang menyebabkan bidang regangan di perbatasan butir<sup>[22]</sup>. Selain itu, ketidakcocokan dalam volume atom mempengaruhi pada meningkat atau menurunnya parameter kisi<sup>[23]</sup>.

Ukuran kristal ( $D$ ) dari *coating* Fe-25Al diperkirakan dengan menerapkan persamaan Scherer (3)<sup>[24]</sup>

$$D = \frac{0.9 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3)$$

dimana  $\lambda$  adalah panjang gelombang dari XRD (1,5406 Å),  $\theta$  adalah sudut Bragg's dan  $\beta$  adalah lebar penuh dari setengah puncak maksimum (FWHM). Hasil perhitungan

ditunjukkan pada Gambar 3. Peningkatan ukuran kristal yang signifikan terjadi ketika *coating* Fe-25Al diberi perlakuan panas 600 °C. Mekanisme penghalusan dari mikrostruktur selama proses *milling* diatur oleh deformasi plastik dari partikel serbuk yang terdeposisi pada substrat, sehingga perlakuan panas pada lapisan *coating* Fe-25Al menyebabkan pertumbuhan butir. Sejumlah besar energi yang tersimpan pada batas butir ketika mendapat tambahan energi panas akan memudahkan penggabungan butir kecil menjadi butir ukuran besar<sup>[25]</sup>, yang berakibat pada peningkatan ukuran kristal. Hasil yang sama ditunjukkan pada perlakuan panas pada *coating* NiAl oleh Mohammadnezhad et al.<sup>[25]</sup>, proses difusi optimum terjadi pada suhu pemanasan 600 °C. Pada Gambar 3 juga ditunjukkan hasil yang sangat berbeda ketika *coating* Fe-25 Al diberikan perlakuan panas di atas 600 °C, dimana ukuran kristal tidak jauh berbeda dengan sebelum mendapat perlakuan panas. Hal ini belum diketahui penyebabnya secara pasti, namun mungkin disebabkan suhu yang diterapkan lebih tinggi dari titik leleh aluminium. Unsur aluminium dalam *coating* Fe-25Al diprediksi berdifusi lebih ke dalam substrat Fe. Hal tersebut menyebabkan cacat kisi yang mempengaruhi besar-kecilnya regangan kisi pada lapisan *coating* Fe-25Al.

Regangan kisi ( $\varepsilon$ ) pada *coating* Fe-25Al dihitung dengan menggunakan persamaan (4)

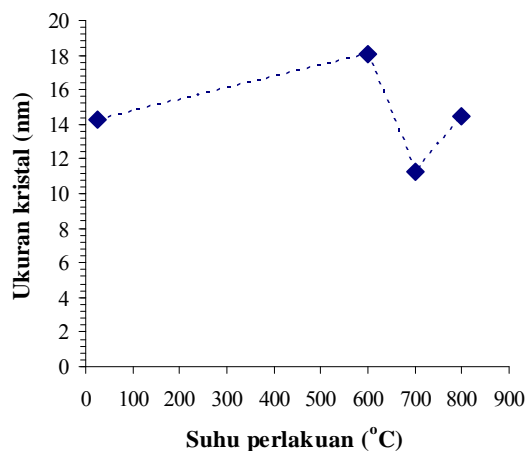
$$\varepsilon = \frac{\beta}{(4 \tan \theta)} \quad (4)$$

Regangan kisi mempengaruhi kerapatan dislokasi ( $\rho$ ), besarnya kerapatan dislokasi dapat diestimasi dari persamaan (5)<sup>[26-27]</sup>

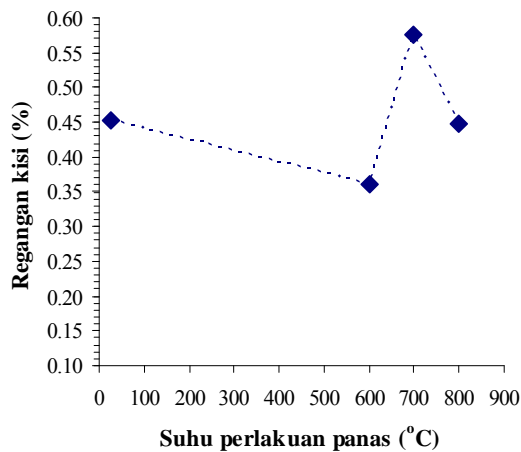
$$\rho = \frac{2\sqrt{3}}{D b} \varepsilon \quad (5)$$

dimana  $b$  adalah vector burgers, dan hubungan hasil regangan kisi dan kerapatan dislokasi terhadap suhu perlakuan panas ditunjukkan pada Gambar 3. Perlakuan panas 600 °C menyebabkan penurunan densitas dislokasi yang diikuti dengan berkurangnya regangan kisi. Sedangkan densitas dislokasi dan regangan kisi meningkat ketika suhu perlakuan panas 700 °C dan 800 °C. Selama perlakuan panas 600 °C, gerakan cacat kekosongan (produk selama *mechanical alloying*) di dalam kisi menyebabkan penataan kembali dari struktur dan berakibat pada berkurangnya jumlah cacat kisi<sup>[28]</sup>. Hal itu mengurangi regangan kisi. Namun berbeda ketika suhu perlakuan panas di

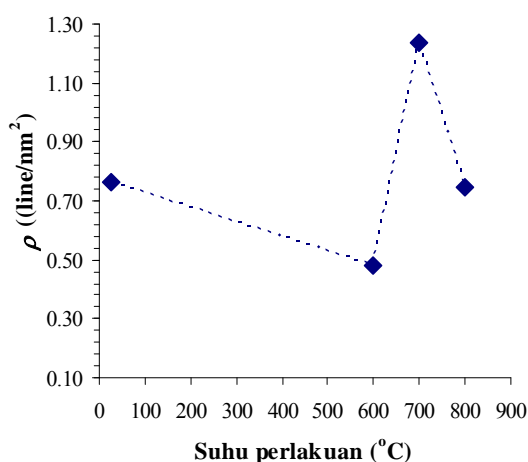
atas 600 °C, dimana diprediksi terjadi pergerakan unsur aluminium yang lebih ke dalam dan menyebabkan dislokasi dan cacat kisi yang lain. Hal tersebut ditunjukkan dengan meningkatnya regangan kisi (ditunjukkan pada Gambar 3).



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. (a) Ukuran kristal, (b) Regangan kisi, dan (c) Kerapatan dislokasi dari *coating* Fe-25Al sebagai fungsi suhu perlakuan panas

Peningkatan kerapatan dari cacat kisi seperti batas butir, kekosongan dan dislokasi mempengaruhi peningkatan regangan kisi<sup>[25]</sup>.

#### 4. KESIMPULAN

Karakterisasi struktur dengan menggunakan SEM dan XRD telah dilakukan pada *coating* Fe-25Al yang dideposisikan di atas baja karbon rendah dengan metode paduan mekanik. Hasil SEM dari penampang lintang menunjukkan bahwa lapisan *coating* Fe-25Al telah terdepositasi pada permukaan baja karbon rendah. *Coating* Fe-25Al memiliki ikatan yang baik dengan substrat dan unsur Fe dan Al terdistribusi secara homogen. Hasil tersebut dikuatkan dengan hasil karakterisasi XRD, dimana setelah proses *milling* terbentuk lapisan *coating* dengan fasa *solid solution* Fe(25Al) dan distribusi komposisi yang seragam. Perlakuan panas pada *coating* Fe-25Al menyebabkan perubahan fasa dari *solid solution* Fe(Al) menjadi fasa Fe<sub>3</sub>Al. Analisis lanjut dari data XRD menunjukkan peningkatan suhu pada perlakuan panas mengakibatkan perubahan parameter kristal seperti parameter kisi, ukuran kristal, regangan kisi dan kerapatan dislokasi. Berdasarkan hasil penelitian ini, perlakuan panas dengan suhu yang tepat sangat diperlukan untuk mengurangi cacat kristal (batas butir, kekosongan dan dislokasi) pada *coating* Fe-25Al dengan menggunakan metode paduan mekanik.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

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 PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] T. Sudiro, P. Sebayang, D. Aryanto, A. I. J. Hia, and K. Sebayang, "Structure and hardness characteristics of 50Cr-50Al coating prepared by a mechanical alloying technique: effects of heat treatment temperature," *Teknologi Indonesia*, vol. 38, pp. 156-162, 2015.
- [3] N. Rosita, T. Sudiro, D. Aryanto dan M. P. Aji, "Studi x-ray diffractometry pada

- struktur coating aluminium yang dipreparasi dengan metode mechanical alloying,” *Jurnal Sains Materi Indonesia*, Vol. 17, hal. 15-21, Okt. 2015.
- [4] F. Ahnia, and B. Demri, “Evaluation of aluminium coatings in simulated marine environment,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 220, pp. 232-236, Apr. 2013.
- [5] N. Cinca, S. Dosta, and J. M. Guilemany, “Nanoscale characterization of FeAl-HVOF coatings,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, pp. 967-973, Nov. 2010.
- [6] A. Senderowski, Z. Bojar, W. Wołczyński, A. Pawłowski, “Microstructure characterization of D-gun sprayed Fe–Al intermetallic coatings,” *Intermetallics*, vol. 18, pp. 1405-1409, Jul. 2010.
- [7] G.-J. Yang, H.-T. Wang, C.-J. Li, C.-X. Li, “Effect of annealing on the microstructure and erosion performance of cold-sprayed FeAl intermetallic coatings,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, pp. 5502-5509, Sept. 2011.
- [8] N. Takata, M. Nishimoto, S. Kobayashi, and M. Takeyama, “Morphology and formation of Fe-Al intermetallic layers on iron hot-dipped in Al-Mg-Si alloy melt,” *Intermetallics*, vol. 54, pp. 136-142, Nov. 2014.
- [9] A. Song, S. Dong, H. Liao, and C. Coddet, “Microstructure and wear resistance of FeAl/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> intermetallic composite coating prepared by atmospheric plasma spraying,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 268, pp. 24-29, Apr. 2015.
- [10] P. Novák, M. Zelinková, J. Šerák, A. Michalcová, M. Novák, and D. Vojtěch, “Oxidation resistance of SHS Fe–Al–Si alloys at 800 °C in air,” *Intermetallics*, vol. 19, pp. 1306-1312, September 2011.
- [11] H.-Q. Yang, Z.-J. Yao, X.-X. Luo, Z.-L. Zhang, and Y. Chen, “Effect of Nb addition on structure and mechanical properties of FeAl coating,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 270, pp. 221-226, May 2015.
- [12] F. Průša, D. Vojtěch, M. Bláhová, A. Michalcová, T. F. Kubatík, and J. Čížek, “Structure and mechanical properties of Al–Si–Fe alloys prepared by short-term mechanical alloying and spark plasma sintering,” *Materials and Design*, vol. 75, pp. 65-75, Jun. 2015.
- [13] X. Cheng, Y. Ouyang, H. Shi, X. Zhong, Y. Du, and X. Tao, “Nano-amorphous (FeAl)<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub> alloys prepared by mechanical alloying,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 421, pp. 314-318, Sept. 2006.
- [14] M. Krasnowski, and T. Kulik, “Nanocrystalline FeAl intermetallic produced by mechanical alloying followed by hot-pressing consolidation,” *Intermetallics*, vol. 15, pp. 201-205, Feb. 2007.
- [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. Novák, T. Kubatík, J. Vystřil, R. Hendrych, J. Kríz, J. Mlynár, and D. Vojtěch, “Powder metallurgy preparation of Al-Cu-Fe quasi crystals using mechanical alloying and Spark Plasma Sintering,” *Intermetallics*, vol. 52, pp. 131-137, Sept. 2014.
- [17] M. Mohammadnezhad, M. Shamanian, and M. H. Enayati, “Formation of nanostructured NiAl coating on carbon steel by using mechanical alloying,” *Applied Surface Science*, vol. 263, pp. 730-736, Dec. 2012.
- [18] 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.
- [19] A. Chen, J. Zhang, C. Duan, X. Feng, and Y. Shen, “Investigation of Cr-Al composite coatings fabricated on pure Ti substrate via mechanical alloying method: effects of Cr-Al ratio and milling time on coating, and oxidation behavior of coating,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 660, pp. 208-219, Marc. 2016.
- [20] S. K. Pabi, D. Das, T. K. Mahapatra, and I. Manna, “Mathematical modelling of the mechanical alloying kinetics,” *Acta Materialia*, vol. 46, pp. 3501-3510, Jun. 1998.
- [21] Sh. E. Haghghi, K. Janghorban, and S. Izadi, “Structural evolution of Fe-50at.%Al powders during mechanical alloying and subsequent annealing

- processes,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 495, pp. 260-264, Apr. 2010.
- [22] M. Rodriguez, F. Plazaola, J. S. Garitaonandia, J. A. Jimenez, and E. Apiñaniz, “Influence of volume and Fe local environment on magnetic properties on Fe rich FeAl alloys,” *Intermetallics*, vol. 24, pp. 38-49, May 2012.
- [23] M. Krifa, M. Mhadhbi, L. Escoda, J. Saurina, J.J. Suñol, N. Llorca-Isern, C. Artieda-Guzmán, and M. Khitouni, “Phase transformations during mechanical alloying of Fe–30% Al–20% Cu,” *Powder Technology*, vol. 246, pp. 117-124, Sept. 2013.
- [24] Q. Zhao, Z. Shao, C. Liu, M. Jiang, X. Li, R. Zevenhoven, and H. Saxén, “Preparation of Cu–Cr alloy powder by mechanical alloying,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 607, pp. 118-124, Sept. 2014.
- [25] M. Mohammadnezhad, M. Shamanian, M. H. Enayati, and M. Salehi, “Influence of annealing temperature on the structure and properties of the nanograined NiAl intermetallic coatings produced by using mechanical alloying,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 217, pp. 64-69, Feb. 2013.
- [26] M. Slimi, M. Azabou, L. Escoda, J.J. Suñol, and M. Khitouni, “Structural and microstructural properties of nanocrystalline Cu–Fe–Ni powders produced by mechanical alloying,” *Powder Technology*, vol. 266, pp. 262-267, Nov. 2014.
- [27] S. Mula, D. Setman, K. Youssef, R.O. Scattergood, and C. C Koch, “Structural evolution of  $\text{Cu}_{(1-x)}\text{Y}_x$  alloys prepared by mechanical alloying: Their thermal stability and mechanical properties,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 627, pp. 108-116, Apr. 2015.
- [28] M. Mhadhbi, J. J. Suñol, and M. Khitouni, “Influence of heat treatments on the structure of FeAl powders mixture obtained by mechanical alloying,” *Physics Procedia*, vol. 40, pp. 38-44, 2013.