



DEPOSISI LAPISAN Fe-Si-Al-Mg PADA BAJA KARBON DENGAN TEKNIK PEMADUAN MEKANIK

Lusita^b, Riser Fahdiran^b, Toto Sudiro^a, Bambang Hermanto^{a,*}

^aPusat Penelitian Fisika - LIPI

Gedung 440-442 Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang Selatan, Indonesia 15310

^bProgram Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Jakarta
Rawamangun, Jakarta Timur, Indonesia 13220

*E-mail: bhe.hermanto@gmail.com

Masuk Tanggal : 15-04-2019, revisi tanggal : 25-06-2019, diterima untuk diterbitkan tanggal 28-06-2019

Intisari

Lapisan Fe-Si-Al-Mg dengan variasi berat fero silikon, Mg dan Al yaitu 50(Fe-Si)-37,5Al-12,5Mg, 50(Fe-Si)-25Al-25Mg, dan 50(Fe-Si)-12,5Al-37,5Mg telah dipreparasi pada substrat baja karbon rendah dengan menggunakan teknik pemaduan mekanik. Struktur dari lapisan Fe-Si-Al-Mg dipelajari menggunakan XRD (*x-ray diffractometer*) untuk mengetahui fasa yang terbentuk dan OM (*optical microscopy*) untuk mengetahui ketebalan lapisan yang didapatkan. Hasil XRD dan OM menunjukkan bahwa lapisan Fe-Si-Al-Mg telah berhasil dideposisikan pada substrat baja karbon rendah. Lapisan Fe-Si-Al-Mg yang terbentuk memiliki fasa intermetalik FeSi₂, Mg₂Si dan Al_{0,7}Fe₃Si_{0,47}. Setiap komposisi menunjukkan ketebalan lapisan yang berbeda. Ketebalan lapisan cenderung menurun dengan meningkatnya konsentrasi magnesium dan berkurangnya konsentrasi aluminium.

Kata Kunci: Lapisan Fe-Si-Al-Mg, pemaduan mekanik, fasa, ketebalan

Abstract

Fe-Si-Al-Mg coatings by weight variation of ferrosilicon, Mg, and Al as 50(Fe-Si)-37.5Al-12.5Mg, 50(Fe-Si)-25Al-25Mg, dan 50(Fe-Si)-12.5Al-37.5Mg have been prepared on low carbon steel substrate using the mechanical alloying technique. The coatings were studied using XRD (x-ray diffractometer) to comprehend the phase formed on the substrate and OM (optical microscopy) to measure the coating thickness. Based on XRD and OM characterization, Fe-Si-Al-Mg coatings were successfully deposited on the low carbon steel substrate. Fe-Si-Al-Mg layers are composed by intermetallic phases of FeSi₂, Mg₂Si, and Al_{0,7}Fe₃Si_{0,47}. Each composition shows different coating thickness that tends to decreases with the increase of magnesium concentration and the reduction of aluminum concentration.

Keywords: Fe-Si-Al-Mg layer, mechanical alloying, phase, thickness

1. PENDAHULUAN

Baja karbon rendah memiliki peran penting dalam aplikasi struktural karena harganya yang relatif lebih murah dibandingkan dengan paduan logam lainnya dan memiliki sifat mekanik yang baik serta mudah diproduksi dan dibentuk [1]-[2]. Namun, ketahanan yang rendah terhadap oksidasi pada suhu tinggi menjadi kelemahan material baja karbon rendah sehingga diperlukan teknik khusus untuk memperbaiki ketahanan tersebut. Ketahanan yang rendah terhadap oksidasi pada suhu tinggi juga menjadi salah satu faktor yang

membatasi penggunaan baja karbon rendah pada aplikasi yang lebih luas. Banyak penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan ketahanan korosi dan oksidasi pada baja karbon rendah, khususnya penerapan lapisan logam pada permukaan baja karbon atau biasa disebut dengan pelapisan (*coating*). Salah satu bahan yang dapat digunakan untuk melapisi baja karbon rendah adalah aluminium (Al), karena memiliki ketahanan oksidasi korosi yang baik dengan membentuk oksida protektif Al₂O₃ [1]-[2]. Bahan lain yang memiliki potensi sebagai bahan pelapis adalah Si. Unsur tersebut dapat

bereaksi dengan oksigen pada suhu tinggi membentuk SiO₂ yang bersifat protektif [3]. Diharapkan dengan adanya lapisan pelindung dapat meningkatkan ketahanan korosi dan oksidasi terhadap degradasi lingkungan. Pada penelitian lain, penambahan unsur Mg dapat meningkatkan ketahanan korosi pada paduan Zn-Mg. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Prosek, dkk. [4] ketahanan korosi meningkat dengan bertambahnya kandungan unsur Mg pada paduan.

Selain Al dan Si, banyak penelitian yang mengembangkan lapisan pada baja karbon rendah dengan menggunakan kombinasi unsur besi (Fe) dan aluminium (Al), yang diharapkan dapat membentuk fasa intermetalik Fe-Al karena memiliki sifat yang baik untuk diaplikasikan sebagai pelapis pada suhu tinggi. Hal ini karena intermetalik Fe-Al memiliki densitas yang rendah, kekuatan spesifik tinggi, kekakuan yang tinggi, suhu lebur tinggi, konduktivitas termal tinggi, serta ketahanan oksidasi dan korosi yang sangat baik [2]. Umumnya ada banyak metode pelapisan pada logam, seperti *electroplating* [5], *hot dipping* [6]-[7], *thermal spray* [8], teknik pemaduan mekanik [1]-[2], [9]-[10], dan metode lainnya. Pemaduan mekanik merupakan suatu proses pencampuran dan penghalusan serbuk-serbuk dengan bola-bola berenergi tinggi untuk mendapatkan serbuk yang homogen [2], [11]. Pelapisan dengan teknik pemaduan mekanik menggunakan prinsip tumbukan antara bola-bola *milling* dengan serbuk pada permukaan substrat yang menyebabkan terbentuk lapisan pada permukaan substrat. Prosesnya mudah, biaya rendah, dan efisiensi waktu menjadi keunggulan metode ini dibandingkan metode lainnya yang biayanya jauh lebih tinggi pada skala laboratorium [2], [9].

Secara umum propertis suatu material dipengaruhi oleh banyak faktor seperti komposisi, parameter proses, perlakuan panas, suhu, dan lingkungan oksidasi jika digunakan untuk aplikasi suhu tinggi. Pada penelitian ini, dikembangkan lapisan Fe-Si-Al-Mg pada baja karbon rendah dengan memvariasikan konsentrasi Mg dan Al yang dipadukan dengan Fe-Si pada permukaan baja karbon rendah dengan menggunakan teknik pemaduan mekanik. Lebih lanjut variasi komposisi ini guna mendapatkan aplikasi pelapis yang homogen baik mikrostruktur maupun fasanya, sehingga berpotensi untuk diaplikasikan pada suhu tinggi.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

2.1. Preparasi Sampel dan Pelapisan

Substrat yang digunakan pada penelitian ini adalah baja karbon rendah tipe ST41, seperti ditunjukkan pada Gambar 1(a). Substrat dari lembaran pelat dipotong berbentuk persegi dengan ukuran rata-rata (10 x 10 x 3) mm. Kemudian, substrat dipoles menggunakan kertas SiC dari ukuran 350 sampai 1200 grit. Substrat dipoles untuk membersihkan dari pengotor, menghaluskan permukaan dan merapikan bentuknya, seperti Gambar 1(b). Selanjutnya, ujung-ujung pada substrat dibuat tumpul untuk menghindari penggumpalan serbuk pada saat proses pemaduan mekanik. Selain itu, substrat dibersihkan dari pengotor menggunakan *ultrasonic cleaner* selama 10 menit.

Tahapan preparasi paduan serbuk dimulai dengan menghaluskan bongkahan fero silikon menggunakan mortar, kemudian serbuk yang halus dipilah menggunakan alat saring. Serbuk selanjutnya dihaluskan lebih lanjut dengan *shaker-mill* menggunakan pelarut selama 30 menit. Serbuk hasil *milling* selanjutnya dikeringkan pada suhu ruang di dalam cawan petri dan ditutupi dengan aluminium foil yang dilubangi. Pada penelitian ini dikembangkan tiga jenis lapisan dengan memvariasikan komposisi bahan Al (MTIKorea, 99,9%) dan Mg (Merck, 98,5%) pada baja karbon rendah seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi pelapis Fe-Si-Al-Mg dalam persentase berat

(Fe-Si)	Al	Mg
50 %	37,5 %	12,5 %
50 %	25,0 %	25,0 %
50 %	12,5 %	37,5 %

Preparasi awal pelapisan baja karbon rendah dilakukan dengan membersihkan bola-bola *milling* pada cawan dengan cairan metanol selama 15 menit menggunakan *shaker-mill*. *Vial* dan bola-bola *milling* yang telah dibersihkan kemudian dikeringkan dengan *dryer*. Sebelum pencampuran dengan *milling*, serbuk fero silikon, Al, dan Mg ditimbang dan diaduk merata. *Milling* serbuk dilakukan selama 30 menit menggunakan *shaker-mill* dengan perbandingan massa bola-bola *milling* dengan massa serbuk yaitu 10:1. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan paduan serbuk yang homogen berupa serbuk Fe-Si-Al-Mg.

Serbuk-serbuk yang telah dicampur selanjutnya dilakukan *milling* selama 4 jam bersama substrat baja karbon rendah yang telah dibersihkan. Pada tahap ini, diperoleh substrat baja karbon rendah yang telah terlapisi oleh serbuk Fe-Si-Al-Mg, seperti ditunjukkan pada Gambar 1(c).

2.2 Karakterisasi Sampel

XRD tipe Rigaku Smartlab dengan target Cu-K α ($\lambda = 1,541862 \text{ \AA}$) digunakan untuk mengetahui fasa-fasa yang terbentuk pada lapisan Fe-Si-Al-Mg dan mengetahui pengaruh variasi komposisi terhadap ukuran kristal dan regangan kisi. Pada penelitian ini digunakan persamaan *Scherrer* untuk menghitung ukuran kristal, seperti ditunjukkan pada persamaan 1 [11].

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

Sedangkan, regangan kisi dihitung menggunakan persamaan 2.

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (2)$$

dengan D sebagai ukuran kristal (nm), λ sebagai panjang gelombang CuK α ($\lambda=1,541862 \text{ \AA}$), θ sebagai sudut Bragg, β sebagai FWHM (*full width at half maximum*) berdasarkan puncak yang didapatkan pada sudut pola difraksi XRD (*x-ray diffraction*), dan ε sebagai regangan kisi (%).

Baja karbon rendah yang telah dilapisi Fe-Si-Al-Mg dicor atau dimonting dengan resin, kemudian dipotong dan diampelas terlebih dahulu sebelum dilakukan analisa morfologi lapisan dengan OM (*optical microscopy*) secara *cross-section*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah substrat telah terlapisi dan seberapa tebal lapisan yang telah terbentuk.

3. HASIL DAN PERCOBAAN

Lapisan fero silikon-alumunium-magnesium telah berhasil dideposisikan pada baja karbon rendah dengan teknik pemaduan mekanik menggunakan *shaker-mill* selama 4 jam. Gambar 1(a) menunjukkan substrat sebelum dipoles, sedangkan Gambar 1(b) dan 1(c) menunjukkan hasil substrat baja karbon rendah sebelum dan sesudah proses pelapisan. Dapat dilihat pada Gambar 1(c) bahwa seluruh permukaan substrat terlapisi dengan baik.

Pemaduan mekanik menyebabkan terjadinya pengelasan dingin (*cold welding*) dari

tumbukan antara substrat, serbuk dan bola-bola *milling*. Pada saat pemaduan, proses pengelasan terus berulang sehingga serbuk tumpang tindih dan menghasilkan lapisan pada substrat [2], [9], [11]-[12]. Selama 4 jam proses pemaduan mekanik terjadi proses interdifusi dan pembentukan fasa paduan dari unsur-unsur penyusunnya. Untuk mengetahui struktur lapisan yang terbentuk setelah pemaduan mekanik dilakukan karakterisasi XRD dan OM.



Gambar 1. (a) Substrat baja karbon rendah sebelum dipoles, (b) Substrat baja karbon rendah setelah dipoles dan dibentuk (c) Substrat baja karbon rendah setelah dilapisi

3.1 Identifikasi Fasa Fe-Si-Al-Mg

Gambar 2 menunjukkan pola difraksi dari sampel A [50(Fe-Si)-37,5Al-12,5Mg], B [50(Fe-Si)-25Al-25Mg], C [50(Fe-Si)-12,5Al-37,5Mg] setelah dilakukan *milling* selama 4 jam menggunakan *shaker-mill*.

Lapisan Fe-Si-Al-Mg yang melapisi baja karbon rendah terlihat mengalami perubahan puncak (*peak*). Pada komposisi sampel A tersusun beberapa fasa yang terbentuk, yaitu FeSi₂, Al_{0,7}Fe₃Si_{0,47}, Si, dan Al sedangkan komposisi sampel B dan C terbentuk fasa FeSi₂, Al_{0,7}Fe₃Si_{0,47}, Si, Al, dan Mg₂Si. Tabel 2, menunjukkan beberapa puncak yang diobservasi. Intensitas puncak FeSi₂ pada sudut difraksi $2\theta = 17^\circ$ cenderung tetap seiring penurunan konsentrasi Al. Intensitas puncak Mg₂Si pada sudut difraksi $2\theta = 24^\circ$ mengalami kenaikan puncak seiring dengan bertambahnya konsentrasi Mg. Hal ini menunjukkan bahwa Mg lebih reaktif terhadap unsur Si dibanding dengan Al ketika proses pemaduan mekanik. Di samping itu, dapat dilihat bahwa intensitas puncak Si pada sudut difraksi $2\theta = 28^\circ$ mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya Mg dan berkurangnya konsentrasi Al. Intensitas puncak Al pada sudut difraksi $2\theta = 65^\circ$ mengalami penurunan intensitas seiring dengan penurunan konsentrasi Al. Al bersama dengan fero silikon membentuk fasa baru Al_{0,7}Fe₃Si_{0,47}, sehingga perbedaan komposisi unsur pembentuk dapat mengubah parameter kisi dan puncak difraksi.

Tabel 2 menunjukkan ukuran kristal dan regangan kisi dari fasa yang telah terbentuk

pada lapisan Fe-Si-Al-Mg dengan variasi konsentrasi. Ukuran kristal dan regangan kisi fasa $FeSi_2$, $Al_{0,7}Fe_3Si_{0,47}$, Al dan Si bervariasi bergantung pada komposisinya, sedangkan ukuran kristal Mg_2Si berbanding terbalik dengan regangan kisi Mg_2Si seiring penambahan unsur Mg.

Menurut Suryanarayana [11], ukuran butir dalam skala nano telah diobservasi pada beberapa jenis material seperti logam murni, intermetalik, dan paduan yang dibuat menggunakan pemaduan mekanik. Secara umum, selama proses pemaduan mekanik di dalam vial terjadi deformasi mekanik pada serbuk, partikel dan kristal sehingga menimbulkan kenaikan regangan kisi yang menurunkan tinggi puncak difraksi. Regangan pada ukuran atom meningkat seiring meningkatnya kerapatan dislokasi, dimana pada kerapatan dislokasi tertentu terjadi disintegrasi kristal menjadi sub-sub butir yang terpisah oleh batas butir dengan sudut kecil. Hal ini berakibat menurunnya regangan kisi [11].

Tabel 2. Ukuran kristalit dan regangan kisi variasi sampel

Sampel	Fasa	2θ	Ukuran kristalit	Regangan kisi
		(deg)	(nm)	(%)
A	$FeSi_2$	17,19	23,65	0,98
	-	-	-	-
	Si	28,38	19,07	0,74
	$Al_{0,7}Fe_3Si_{0,47}$	44,57	12,64	0,72
	Al	65,01	10,36	0,62
B	$FeSi_2$	17,23	21,73	1,07
	Mg_2Si	24,15	11,45	1,44
	Si	28,45	16,08	0,88
	$Al_{0,7}Fe_3Si_{0,47}$	44,65	18,68	0,49
	Al	65,01	4,96	1,30
C	$FeSi_2$	17,22	23,65	0,98
	Mg_2Si	24,30	11,14	1,48
	Si	28,36	17,45	0,81
	$Al_{0,7}Fe_3Si_{0,47}$	44,59	18,28	0,50
	Al	65,00	15,71	0,41

3.2 Karakterisasi Morfologi dengan *Optical Microscope*

Gambar 3 menunjukkan hasil OM dari sampel A [50(Fe-Si)-37,5Al-12,5Mg], B [50(Fe-Si)-25Al-25Mg], C [50(Fe-Si)-12,5Al-37,5Mg] setelah pemaduan mekanik selama 4 jam menggunakan *shaker-mill*.

Hasil OM menunjukkan bahwa ketebalan lapisan rata-rata bergantung pada komposisi pelapis. Dengan meningkatnya konsentrasi Mg dan berkurangnya konsentrasi Al, ketebalan lapisan Fe-Si-Al-Mg menurun, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Lapisan yang dihasilkan dengan kondisi waktu *milling* yang sama, memperlihatkan adanya perbedaan ketebalan yang menunjukkan adanya pengaruh perbedaan komposisi unsur Mg dan Al. Penelitian yang dilakukan Gupta, dkk. [10], menunjukkan bahwa ketebalan lapisan dipengaruhi oleh waktu dan kecepatan putar *milling* [10]. Faktor lain yang dapat mempengaruhi ketebalan lapisan adalah densitas penyusun lapisan. Berdasarkan densitas unsur penyusunnya Fe ($7,866 \text{ g/cm}^3$), Mg ($1,74 \text{ g/cm}^3$), Al ($2,698 \text{ g/cm}^3$), dan Si ($2,33 \text{ g/cm}^3$) [13]. Hal ini sangat dimungkinkan bahwa variasi komposisi mempengaruhi ketebalan lapisan yang didapatkan. Secara teori, komposisi serbuk dengan densitas rendah menghasilkan lapisan yang lebih tebal, namun hal ini tidak terjadi pada penelitian ini. Penelitian lain yang dilakukan oleh Wu, dkk. [7], mempelajari efek penambahan Mg terhadap ketebalan lapisan galvalum menggunakan teknik *hot-dip coating* dengan mensubstitusikan Mg pada daerah Fe atau Al. Berdasarkan hasil estimasi energi ikatan dan kerapatan muatan antara Fe-Al dan Mg-Al menunjukkan bahwa penambahan Mg memiliki efek yang kecil terhadap ketebalan lapisan. Energi ikatan Mg-Al hampir sama dengan Fe-Al. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan atom Mg tidak efektif mencegah Al untuk membentuk ikatan metalik dengan Fe sehingga menghambat pertumbuhan Fe-Al [7].

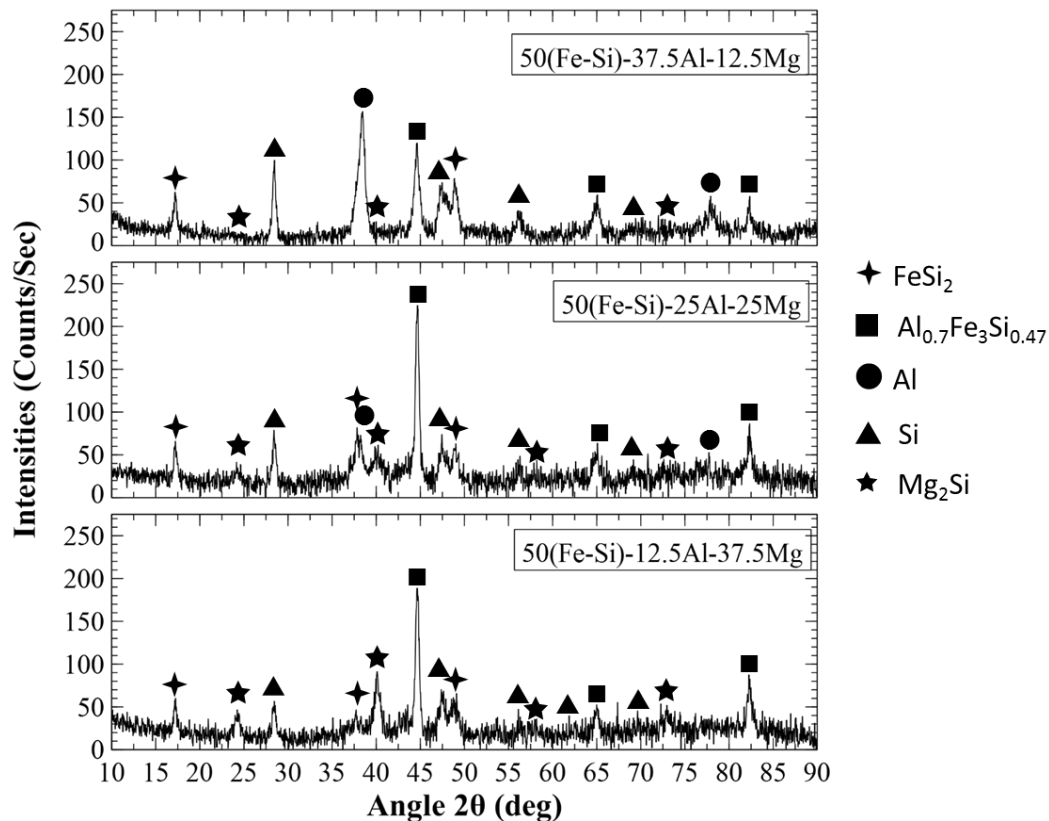
Tabel 3. Perbandingan ketebalan pelapisan Fe-Si-Al-Mg pada substrat baja karbon rendah

Sampel	(Fe-Si)	Al	Mg	Ketebalan
A	50%	37,5%	12,5%	81,6 μm
B	50%	25,0%	25,5%	51,2 μm
C	50%	12,5%	37,5%	26,3 μm

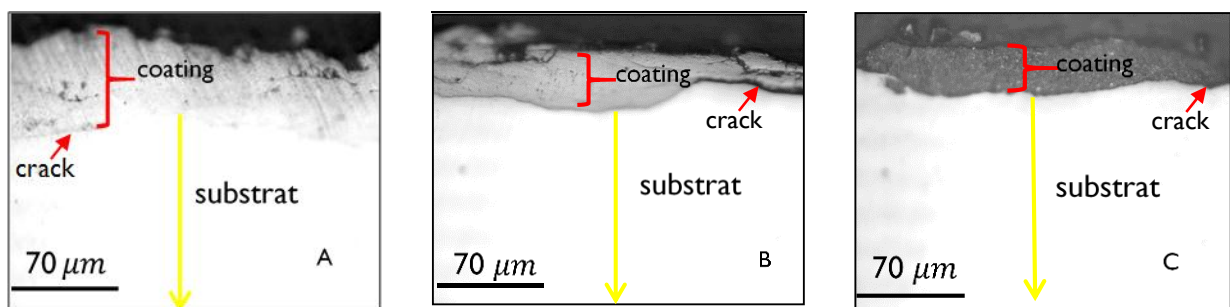
Berdasarkan Gambar 3, ketebalan lapisan pada sampel A lebih tebal dibandingkan dengan lapisan pada sampel B maupun C. Pada gambar OM, terlihat struktur lapisan pada sampel A lebih baik dibandingkan dengan struktur lapisan sampel B dan C. Struktur lapisan A nampak lebih homogen dan padat, walaupun terlihat garis *crack* di beberapa area lapisan dan permukaan substrat. Selain itu, pori pada lapisan sampel A lebih sedikit dibanding sampel B maupun C. Ditinjau dari segi kerekatan, lapisan pada sampel A lebih baik jika dibanding dengan lapisan pada sampel B dan C. Terlihat jelas pada gambar OM bahwa terdapat celah antara lapisan dengan substrat pada sampel B dan C. Menurunnya ketebalan

lapisan Fe-Si-Al-Mg dengan meningkatnya konsentrasi Mg dimungkinkan disebabkan oleh terbentuknya fasa intermetalik Mg_2Si , $FeSi_2$, dan $Al_{0,7}Fe_3Si_{0,47}$. Di samping itu, terbentuknya retak pada lapisan B dan C dimungkinkan oleh terbentuknya Mg_2Si yang bersifat getas (*brittle*) [14]-[15].

Kekasaran permukaan lintang sampel A, B, dan C bervariasi. Terlihat garis lekukan batas antara lapisan dengan substrat. Hal ini terjadi akibat impact atau tumbukan selama proses pemaduan mekanik antara bola-bola *milling* dengan substrat maupun substrat dengan dinding vial.



Gambar 2. Pola difraksi XRD lapisan Fe-Si-Al-Mg pada permukaan baja karbon rendah



Gambar 3. Penampang lintang lapisan Fe-Si-Al-Mg pada permukaan baja karbon rendah hasil observasi OM pada perbesaran 40x dengan variasi komposisi: (A) 50(Fe-Si)-37,5Al-12,5Mg, (B) 50(Fe-Si)-25Al-25Mg, (C) 50(Fe-Si)-12,5Al-37,5Mg

4. KESIMPULAN

Pelapisan dengan pemaduan mekanik telah dilakukan pada substrat baja karbon rendah ST41. Berdasarkan analisis data, struktur lapisan Fe-Si-Al-Mg tersusun atas fasa utama, yaitu $FeSi_2$, Si, Al, $Al_{0,7}Fe_3Si_{0,47}$, dan Mg_2Si . Ketebalan lapisan Fe-Si-Al-Mg menurun seiring berkurangnya kandungan unsur Al dan meningkatnya unsur Mg pada variasi komposisi

lapisan yaitu 81,6 μm untuk sampel A [50(Fe-Si)-37,5Al-12,5Mg], ketebalan 51,2 μm untuk sampel B [50(Fe-Si)-25Al-25Mg], dan ketebalan 26,3 μm untuk sampel C [50(Fe-Si)-12,5Al-37,5Mg].

UCAPAN TERIMAKASIH

Kegiatan penelitian ini dibiayai dari “Kegiatan Unggulan 2018”. Ucapan terima kasih, penulis sampaikan kepada Grup Penelitian *High Resistant Materials* – Pusat Penelitian Fisika LIPI yang telah memfasilitasi sarana dan prasarana dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Sudiro, A. I. J. Hia, Ciswandi, D. Aryanto, B. Hermanto, A. S. Wismogroho, dan P. Sebayang, “High temperature cyclic oxidation resistance of 50Cr-50Al coatings mechanically alloyed on low carbon steel,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 732, pp. 655–665, Jan. 2018.
- [2] A. Canakci, F. Erdemir, T. Varol, dan 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.
- [3] K. Kurokawa, T. Sudiro, T. Sano, S. Kyo, O. Ishibashi, dan M. Nakamori, “High-temperature corrosion resistance of SiO₂-forming materials,” *Corrosion Reviews*, vol. 36, no. 1, pp. 65–74, Feb. 2018.
- [4] T. Prosek, A. Nazarov, U. Bexell, D. Thierry, dan J. Serak, “Corrosion mechanism of model zinc–magnesium alloys in atmospheric conditions,” *Corrosion Science*, vol. 50, no. 8, pp. 2216–2231, Aug. 2008.
- [5] Z. Ping, Y. He, C. Gu, dan T.Y. Zhang, “Mechanically assisted electroplating of Ni–P coatings on carbon steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 202, no. 24, pp. 6023–6028, Aug. 2008.
- [6] J. Tanaka, K. Ono, S. Hayashi, K. Ohsasa, dan T. Narita, “Effect of Mg and Si on the microstructure and corrosion behavior of Zn-Al hot dip coatings on low carbon steel,” *ISIJ International*, vol. 42, no. 1, pp. 80–85, 2002.
- [7] G. X. Wu, J. Y. Zhang, dan Q. Li, “Effects of Mg addition on thickness of galvalume coating: A first-principles study,” *Advanced Materials Research*, vol. 291–294, pp. 125–128, Jul. 2011.
- [8] V. R. S. Sá Brito, I. N. Bastos, dan H. R. M. Costa, “Corrosion resistance and characterization of metallic coatings deposited by thermal spray on carbon steel,” *Materials & Design*, vol. 41, pp. 282–288, Oct. 2012.
- [9] V. Zadorozhnyy, S. Kaloshkin, E. Kaevitser, dan S. Romankov, “Coating of metals with intermetallics by mechanical alloying,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 509, pp. S507–S509, Jun. 2011.
- [10] G. Gupta, K. Mondal, dan R. Balasubramaniam, “In situ nanocrystalline Fe–Si coating by mechanical alloying,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 482, no. 1–2, pp. 118–122, Aug. 2009.
- [11] C. Suryanarayana, “Mechanical alloying and milling,” *Progress in Materials Science*, p. 184, 2001.
- [12] L. Lu, M. O. Lai, dan Zhang, S, “Modeling of the mechanical-alloying process,” *Journal of Materials Processing Technology* 52(s 2–4):539–546. Doi 10.1016/0924-0136(94)01620-G.
- [13] O. K. Goldbeck, *IRON-Binary Phase Diagrams*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1982.
- [14] Q. C. Jiang, H. Y. Wang, Y. Wang, B. X. Ma, dan J. G. Wang, “Modification of Mg₂Si in Mg–Si alloys with yttrium,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 392, no. 1–2, pp. 130–135, Feb. 2005.
- [15] M. E. Moussa, M. A. Waly, dan A. M. El-Sheikh, “Effect of Ca addition on modification of primary Mg₂Si, hardness and wear behavior in Mg–Si hypereutectic alloys,” *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 2, no. 3, pp. 230–238, Sep. 2014.