

DOI: doi.org/10.21009/03.SNF2020.01.FA.11

EFEK PENAMBAHAN ALUMINIUM TERHADAP KETAHANAN OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI PADUAN LOGAM FERROSILICON-MAGNESIUM

Lusita^{1, a)}, Bambang Hermanto^{2, b)}, Anggara Budi Susila^{1, c)}, Toto Sudiro^{2, d)}

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Rawamangun, Jakarta Timur, DKI Jakarta, Indonesia, 13220

²Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Kompleks Puspiptek Gedung 440-442, Serpong, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia, 15314

Email: ^{a)}lusitaachmad18@gmail.com, ^{b)}bhe.hermanto@gmail.com, ^{c)}anggorobs1960@yahoo.com
^{d)}toto011@lipi.go.id

Abstrak

Paduan Fe-Si-Mg-Al dengan variasi komposisi ferrosilicon-magnesium dan Al yaitu [A] 100(Fe-Si-Mg); [B] 97,79(Fe-Si-Mg)-2,21Al; [C] 94,79(Fe-Si-Mg)-5,27Al; dan [D] 89,16(Fe-Si-Mg)-10,84Al telah disintesa menggunakan teknik metalurgi serbuk. Struktur dan ketahanan oksidasi dari paduan logam Fe-Si-Mg-Al dengan atau tanpa penambahan Al dipelajari menggunakan X-ray Diffractometer (XRD) untuk mengetahui fasa yang terbentuk, Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM-EDS) untuk menganalisa morfologi dan sebaran elemen serta komposisi paduan, dan uji oksidasi dilakukan di dalam muffle furnace pada temperatur 800°C untuk mengevaluasi ketahanan oksidasi paduan logam pada suhu tinggi. Hasil XRD dan SEM-EDS menunjukkan bahwa paduan logam Fe-Si-Mg-Al telah berhasil disintesa. Sebelum oksidasi, paduan ini tersusun atas fasa Si, FeSi, α -FeSi₂, dan β -FeSi₂, sedangkan setelah oksidasi paduan terdiri dari fasa Si, FeSi, α -FeSi₂, β -FeSi₂, Fe₂O₃ dan lapisan SiO₂ bergantung pada komposisi masing-masing paduan logam. Setiap komposisi menunjukkan ketahanan oksidasi yang berbeda. Ketahanan oksidasi paduan logam Fe-Si-Mg cenderung meningkat dengan penambahan Al dengan nilai optimum adalah 2,2%at.

Kata-kata kunci: paduan logam, Fe-Si-Mg-Al, metalurgi serbuk, oksidasi.

Abstract

Fe-Si-Mg-Al alloys with composition variation of ferrosilicon-magnesium and Al such as 100(Fe-Si-Mg), 97.79(Fe-Si-Mg)-2.21Al, 94.79(Fe-Si-Mg)-5.27Al, and 89.16(Fe-Si-Mg)-10.84Al were prepared using a powder metallurgy techniques. The structure and oxidation resistance of the Fe-Si-Mg-Al alloys with or without the Al addition were studied using X-ray Diffractometer (XRD) to determine the phases formed, Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM-EDS) to determine morphology, element distribution and composition, and oxidation test was carried out in muffle furnace at 800°C for 8 cycles to determine the high temperature oxidation resistance of the Fe-Si-Mg-Al alloys. The results of XRD and SEM-EDS show that the Fe-Si-Mg alloys were successfully synthesized. The Fe-Si-Mg-Al alloy before oxidation consists of Si, FeSi, α -FeSi₂, dan β -FeSi₂ phases, whereas after oxidation new phases of Fe₂O₃ and SiO₂ scale are formed. Each composition shows different oxidation resistance. The oxidation resistance of Fe-Si-Mg alloys increases with the optimum aluminum concentration which is about 2,2at%.

Keywords: alloys, Fe-Si-Mg-Al, powder metallurgy, oxidation.

PENDAHULUAN

Dalam bidang industri, bahan logam yang memiliki ketahanan pada suhu tinggi sangat dibutuhkan [1]. Pesatnya perkembangan teknologi khususnya di bidang pembangkit energi yang beroperasi pada suhu tinggi membutuhkan material yang kuat secara mekanik dan tahan akan degradasi lingkungan pada suhu tinggi [2], [3], [4]. Sifat ketahanan oksidasi adalah salah satu aspek yang paling penting untuk setiap bahan ketika digunakan untuk kondisi tersebut. Umumnya, suatu material atau paduan harus memiliki kemampuan untuk membentuk lapisan oksida pelindung pada permukaan terluar yang berfungsi sebagai pembatas terhadap lingkungan atmosfernya [5].

Bahan logam memiliki peran penting dan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi termal, produktivitas dan biaya operasional [6]. Beberapa faktor juga harus dipertimbangkan untuk memilih bahan yang tepat demi memperbaiki efisiensinya serta memperpanjang usia pemakaian dengan biaya minimum. Faktor-faktor tersebut termasuk sifat mekanik, ketahanan oksidasi temperatur tinggi, penggunaan atau fabrikasi komponen, dan ketersediaan material [7].

Logam dengan kadar kemurnian tinggi apabila dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan material pembangkit, akan membutuhkan biaya yang cukup tinggi, sehingga diperlukan pengembangan bahan alternatif untuk menghasilkan material dengan performa yang sama atau lebih baik dengan bahan yang lebih ekonomis dan teknik yang lebih sederhana. Beberapa kriteria material yang diharapkan, untuk aplikasi komponen pembangkit diantaranya adalah material yang dikembangkan harus memiliki sifat mekanik yang baik dan tahan oksidasi pada temperatur tinggi. Banyak penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan ketahanan oksidasi pada logam atau paduan, seperti penambahan *alloying element* atau pelapisan.

Dalam pengembangan paduan logam, pemilihan bahan dan pemilihan komposisi paduan menjadi suatu hal yang sangat penting. Bahan yang memiliki peranan penting untuk meningkatkan ketahanan oksidasi pada suhu tinggi salah satunya adalah Aluminium (Al) yang dapat berperan sebagai sumber pembentukan lapisan protektif Al_2O_3 [8]. Elemen Fe yang umumnya sebagai matriks dipadukan dengan elemen lain seperti Si [9], [10], [11] atau Mg [8], [11], [12], [13] dalam membentuk suatu paduan, dimana elemen Si dapat berperan meningkatkan kekerasan [8] dan juga untuk membentuk lapisan pelindung SiO_2 [14], dan Mg dapat berperan untuk meningkatkan ketahanan korosi [15].

Untuk mensintesa paduan logam, penggabungan dua atau lebih unsur material yang berbeda dapat dilakukan dengan metode metalurgi serbuk, dimana bahan baku dikompaksi dan dapat disinter pada keadaan vakum atau *inert atmosphere*. Kelebihan teknik metalurgi serbuk ialah mudah diaplikasikan baik dalam skala laboratorium maupun industri [19].

Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan sintesa paduan logam menggunakan bahan lump Ferrosilicon-magnesium dan Aluminium dengan teknik metalurgi serbuk dan sintering konvensional pada temperatur 1000°C. Efek penambahan Al terhadap paduan logam Fe-Si-Mg dipelajari menggunakan XRD untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk, dan SEM-EDS untuk menganalisa struktur, sebaran dan komposisi elemen paduan, serta pengujian oksidasi dilakukan untuk mengetahui tingkat ketahanan oksidasinya paduan logam pada temperatur tinggi.

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *lump* Ferrosilicon-magnesium (Fe-Si-Mg) dengan komposisi seperti ditunjukkan pada Tabel 1. yang telah dihaluskan menggunakan *shaker-mill* dengan ukuran partikel < 74 μm dan serbuk Al (MTIKorea, 99.9%) dengan ukuran partikelnya < 30 μm .

TABEL 1. Komposisi *lump* Fe-Si-Mg

Elemen	Fe	Si	Mg	Lainnya
at (%)	32,31	57,29	8,99	1,41

Preparasi Sampel dan Proses Pemaduan

Preparasi pencampuran serbuk dilakukan dengan teknik *mechanical alloying*. Serbuk *lump* Fe-Si-Mg dan Al, ditimbang sesuai dengan komposisi seperti ditunjukkan pada TABEL 2. dan dicampur secara basah (*wet mixing*) dengan bola *milling* dan *shaker-mill* selama 2 jam dengan perbandingan massa serbuk dengan massa bola-bola *milling* yaitu 1:5.

TABEL 2. Variasi komposisi serbuk yang digunakan

Kode sampel	Rasio (%at)	
	Fe-Si-Mg	Al
A	100 %	0 %
B	97,79 %	2,21 %
C	94,73 %	5,27 %
D	89,16 %	10,84 %

Serbuk yang telah dipadukan selanjutnya dikeringkan pada suhu kamar dengan diletakkan pada cawan petri dan ditutup dengan *Aluminium-foil* yang telah dilubangi. Setelah proses pengeringan selesai, serbuk Fe-Si-Mg-Al ditimbang sebanyak 1,25 gram, kemudian dicetak menggunakan alat kompaksi dengan tekanan 8 ton, waktu penahanan selama 3 menit, dan kemudian sampel dikeluarkan dari cetakan. Selanjutnya hasil kompaksi (*green-compact*) diletakkan dengan cawan keramik dan diberikan perlakuan panas atau *sintering* di dalam tungku *tubular* pada temperatur 1000 °C pada kondisi vakum bertekanan 5.10^{-1} mBar/Tor, dengan *heating-rate* 5 °C/menit, waktu penahanan 2 jam, dan *cooling-rate* secara alami.

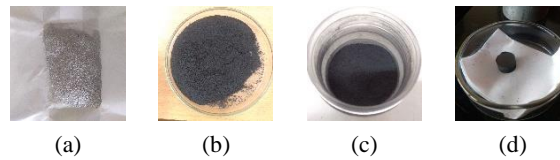
Uji oksidasi dilakukan melalui proses pemanasan pada suhu 800°C selama 8 siklus, dimana setiap siklus terdiri dari 20 jam pemanasan di dalam tungku *muffle* dan 4 jam pendinginan di udara ruang. Setelah proses pendinginan, paduan Fe-Si-Mg-Al ditimbang perubahan massanya dengan cara mengukur selisih massa setelah pengujian pada setiap siklus dikurangi dengan massa paduan awal dibagi dengan luas permukaan paduan mula-mula.

Karakterisasi Sampel

XRD tipe Rigaku Smartlab (radiasi Cu-K α dan $\lambda = 1,541862\text{\AA}$) digunakan untuk mengkarakterisasi fasa yang terbentuk pada paduan Fe-Si-Mg-Al. Sebelum analisa morfologi paduan secara *cross-section* pada paduan sebelum dan sesudah oksidasi, paduan Fe-Si-Mg-Al di-*mounting* dengan resin, dipotong, dan diampelas menggunakan kertas SiC sampai grit 5000, dan dipoles akhir menggunakan kain DP-Nap. Analisa morfologi *cross-section*, persebaran elemen dan analisa komposisi tiap paduan Fe-Si-Mg-Al dilakukan dengan menggunakan SEM-EDS (SEM Hitachi SU3500-EDX Horiba). Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah persebaran elemen pada paduan homogen dan untuk mengidentifikasi terbentuknya lapisan pelindung pada paduan setelah oksidasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

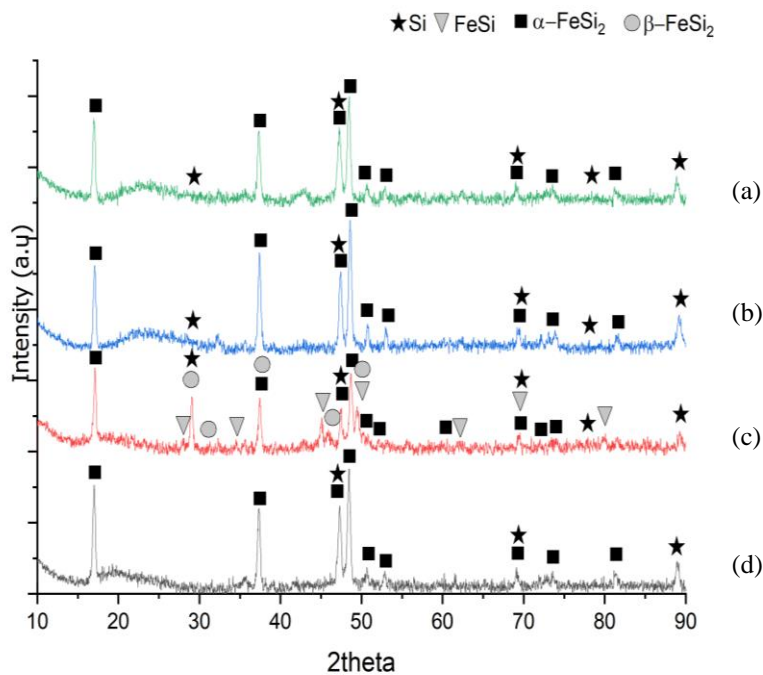
Sintesa paduan logam Fe-Si-Mg-Al telah berhasil dilakukan dengan teknik metalurgi serbuk dan dapat ditunjukkan pada Gambar 1(a) dan 1(b). Proses sintesa serbuk menggunakan *shaker-mill* selama 2 jam. Gambar 1(a) menunjukkan bahan awal serbuk Al sebelum pemaduan, 1(b) serbuk Fe-Si-Mg dari bahan *lump* setelah proses penghalusan dengan *shaker-mill* selama 2 jam, 1(c) serbuk hasil pemaduan serbuk Fe-Si-Mg dan Al dengan *shaker-mill* selama 2 jam. Pada GAMBAR 1(d) dapat dilihat bahwa *green-compact* paduan Fe-Si-Mg-Al, telah disintesa dengan baik.



GAMBAR 1. Bahan (a) serbuk Al, (b) serbuk lump Fe-Si-Mg, (c) campuran serbuk Fe-Si-Mg-Al, dan (d) paduan *green-compact* Fe-Si-Mg-Al.

Hasil karakterisasi XRD sebelum uji oksidasi

GAMBAR 2 menunjukkan pola difraksi XRD pada paduan logam Fe-Si-Mg-Al dengan variasi komposisi berbeda yang terdiri dari sampel [A] 100(Fe-Si-Mg), [B] 97,79(Fe-Si-Mg)-2,21Al, [C] 94,79(Fe-Si-Mg)-5,27Al, dan [D] 89,16(Fe-Si-Mg)-10,84Al.

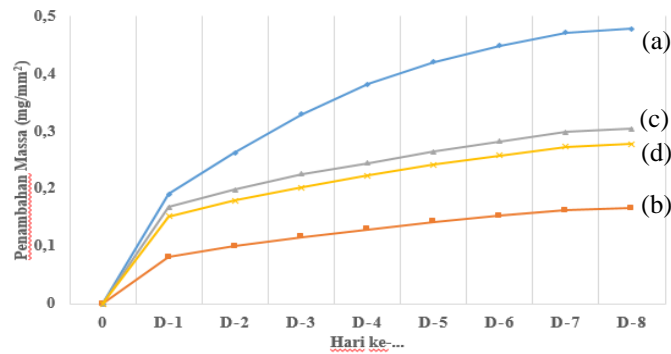


GAMBAR 2. Pola difraksi XRD paduan Fe-Si-Mg-Al sebelum uji oksidasi: (a) Paduan [A], (b) paduan [B], (c) paduan [C], dan (d) paduan [D].

Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa fasa yang terdeteksi bergantung pada komposisi masing-masing paduan. Fasa FeSi_2 yang terdeteksi memiliki struktur kristal tertragonal $\alpha\text{-FeSi}_2$ dan/atau *orthorhombic* $\beta\text{-FeSi}_2$ [16], [17]. Dari hasil di atas, paduan logam A, B, C dan D tanpa atau dengan penambahan Al tersusun atas $\alpha\text{-FeSi}_2$ dan Si, namun pada paduan logam C terdeteksi fasa lain yaitu FeSi dan $\beta\text{-FeSi}_2$. Hal ini dimungkinkan dipengaruhi oleh solubility limit Al di dalam Fe-Si-Mg. Sehingga terdeteksi fasa baru pada paduan logam 94,79(Fe-Si-Mg) dengan penambahan 5,27 % at Al.

Hasil Uji Ketahanan Oksidasi pada Temperatur 800°C

GAMBAR 3 menunjukkan kurva hasil uji ketahanan oksidasi paduan logam Fe-Si-Mg-Al pada temperatur 800°C selama 8 siklus.

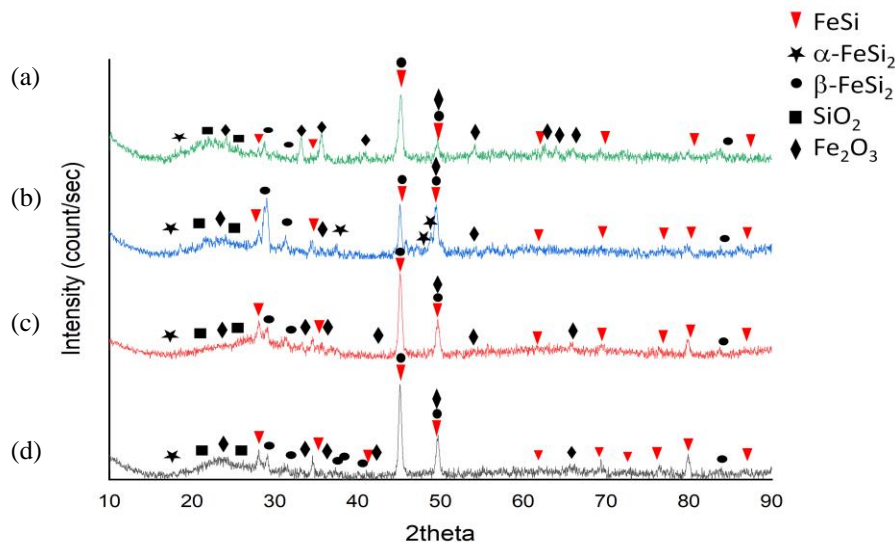


GAMBAR 3. Grafik penambahan massa persatuan luas permukaan sampel paduan Fe-Si-Mg-Al: (a) Paduan [A], (b) Paduan [B], (c) Paduan [C], dan (d) Paduan [D] setelah perlakuan uji oksidasi pada suhu 800°C selama 8 siklus

Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa terjadi penambahan massa pada setiap siklusnya. Paduan [A] memiliki penambahan massa paling tinggi diantara paduan logam yang lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa Paduan [A] memiliki ketahanan oksidasi yang paling rendah dibandingkan dengan paduan logam [B], [C] dan [D]. Penambahan Al dapat meningkatkan ketahanan oksidasi paduan logam Fe-Si-Mg bergantung pada konsentrasi masing-masing paduan. Pertambahan massa persatuan luas yang paling kecil terjadi pada paduan logam [B] yang mengindikasikan bahwa paduan tersebut memiliki ketahanan oksidasi yang paling baik dengan konsentrasi elemen Al sebanyak 2,21% at.

Hasil karakterisasi XRD setelah uji oksidasi

GAMBAR 4 menunjukkan pola XRD pada paduan logam Fe-Si-Mg-Al dengan variasi komposisi berbeda setelah dioksidasi pada temperatur 800°C selama 8 siklus.



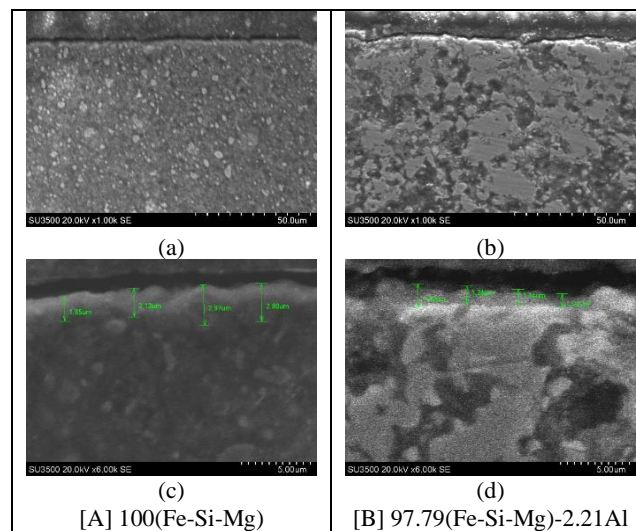
GAMBAR 4. Pola XRD paduan Fe-Si-Mg-Al: (a) Paduan [A], (b) Paduan [B], (c) Paduan [C], dan (d) Paduan [D] sebelum dan setelah perlakuan uji oksidasi pada temperatur 800°C selama 8 siklus.

Hasil analisa menunjukkan bahwa paduan Fe-Si-Mg tanpa atau dengan penambahan Al tersusun atas fase FeSi, α -FeSi₂, β -FeSi₂, SiO₂ dan Fe₂O₃. Seperti hasil analisa XRD pada paduan Fe-Si-Mg-Al sebelum uji oksidasi, diidentifikasi bahwa fasa FeSi, α -FeSi₂, dan β -FeSi₂ masih terdeteksi dalam paduan tersebut. Fasa baru yang terbentuk setelah oksidasi yaitu fasa Fe₂O₃ dan *crystalline*-SiO₂. Disamping itu, adanya peningkatan *background noise* pada kisaran sudut $2\theta \pm 17^\circ$ sampai dengan $\pm 27^\circ$ juga mengindikasikan adanya terbentuk SiO₂ dengan struktur amorf. SiO₂ yang terbentuk pada

lapisan terluar dapat berperan sebagai lapisan pelindung dari paduan [1], [5] ketika terpapar Oksigen pada temperatur tinggi dan mencegah difusi Oksigen ke dalam paduan. Menarik untuk didiskusikan, jika dibandingkan dengan hasil XRD sebelum oksidasi fasa α -FeSi₂ yang terbentuk lebih sedikit. Perubahan ini dimungkinkan disebabkan oleh reaksi oksidasi α -FeSi₂ dengan oksigen membentuk oksida Fe dan Si, seperti yang terdeteksi pada hasil analisa XRD di atas.

Hasil karakterisasi SEM-EDS setelah uji oksidasi

GAMBAR 5 menunjukkan gambar penampang lintang paduan logam [A] dan [B] setelah diuji oksidasi pada suhu 800°C yang diperoleh melalui karakterisasi SEM-EDS.

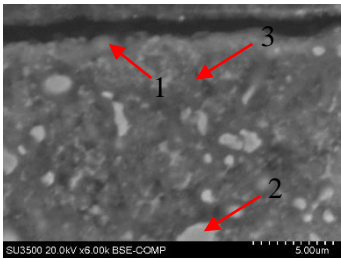


GAMBAR 5. Morfologi SEM paduan logam Fe-Si-Mg-Al: (a, c) paduan [A] dan (b, d) paduan [B] setelah uji ketahanan oksidasi pada temperatur 800°C selama 8 siklus.

Hasil di atas menunjukkan bahwa penambahan Al mempengaruhi struktur paduan Fe-Si-Mg. GAMBAR 5(a,b) menunjukkan bahwa masing-masing paduan logam [A] dan [B] terdapat daerah berwarna gelap yang umumnya merupakan pori atau oksida. Paduan [A] memiliki pori yang lebih kecil namun tersebar merata, sedangkan paduan [B] memiliki pori yang lebih sedikit, namun berukuran lebih besar dibandingkan dengan paduan [A]. Berdasarkan hasil analisa penampang lintang nampak bahwa ketebalan lapisan oksida yang terbentuk pada lapisan terluar setelah uji oksidasi bervariasi. Paduan logam [A] tanpa penambahan elemen Al, memiliki lapisan oksida dengan ketebalan antara 1,85 – 2,97 μm , sedangkan paduan [B] memiliki ketebalan lapisan bervariasi dari 1,01 – 1,32 μm . Hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan elemen Al hingga 2,21 wt%, paduan Fe-Si-Mg-Al memiliki lapisan oksida yang lebih tipis dan pertambahan massa persatuan luas permukaan yang paling kecil (GAMBAR 3). Sehingga, dapat disimpulkan bahwa lapisan yang terbentuk dapat berperan sebagai lapisan pelindung terhadap difusi oksigen ke dalam permukaan sampel.

Pada studi ini juga dilakukan analisa komposisi dengan SEM-EDS pada paduan logam [A] 100(Fe-Si-Mg) dan [B] 97.79(Fe-Si-Mg)-2.21Al dengan hasil masing-masing seperti ditunjukkan pada Tabel 3 dan 4. Berdasarkan gambar BSE-SEM, paduan logam [A] tersusun dari 3 warna yang berbeda, yaitu abu-abu (1), abu-abu keputihan (2), dan abu-abu kehitaman (3). Hasil analisa elemen pada titik (1), (2), dan (3) menunjukkan bahwa lokasi tersebut terdiri dari elemen-elemen Fe, Si, Al, Mg, dan O dengan konsentrasi yang berbeda.

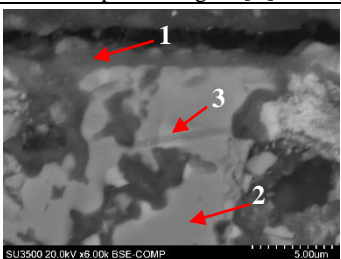
TABEL 3. Analisa point SEM-EDS paduan logam [A] 100(Fe-Si-Mg)



Analisa elemen paduan [A] 100(Fe-Si-Mg) dalam at%			
Elemen	1	2	3
O K	59,25	72,88	66,89
Mg K	7,67	3,16	7,18
Al K	3,66	1,46	4,72
Si K	20,27	20,33	15,40
Fe K	9,15	2,17	5,83
Total	100 %		

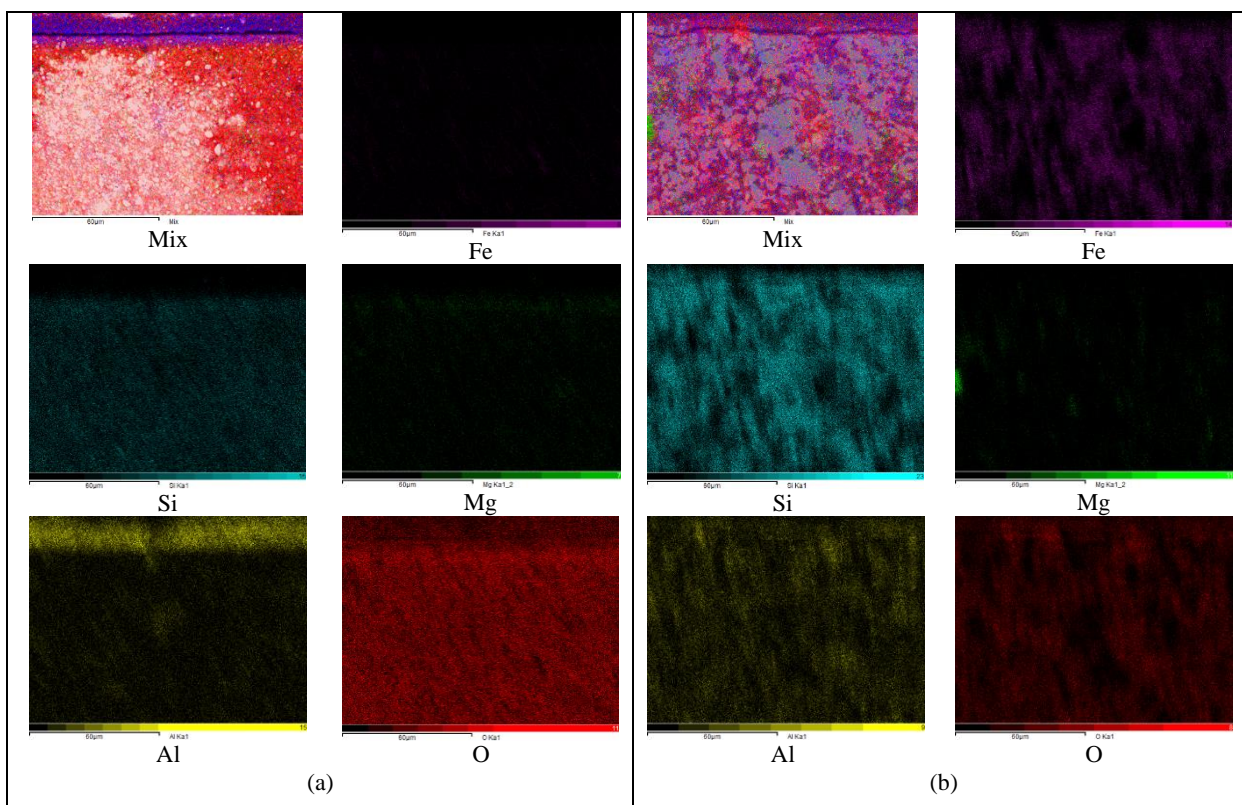
Pada paduan logam [B], morfologi permukaan dapat dibedakan menjadi 3 daerah dengan kontras warna yang berbeda yaitu, abu-abu kehitaman (1), abu-abu muda (2), dan abu-abu keputihan (3). Hasil analisa elemen pada daerah abu-abu kehitaman (1) terdiri dari elemen-elemen secara berurutan Fe, Si, Al, O (9,45%, 32,21%, 6,86%, 51,48%), demikian juga pada daerah ke (2) secara berturut-turut Fe, Si, O (27,84%, 58,92%, 13,24%) yang fase utamanya adalah fase $FeSi_2$ dan SiO_2 . Sedangkan, pada daerah ke (3), elemen-elemen secara berurutan Fe dan Si (31,62% dan 68,38%) yang merupakan fase $FeSi_2$. Hasil ini sesuai dengan hasil analisa fasa XRD seperti yang telah disebutkan sebelumnya.

TABEL 4. Analisa point SEM-EDS paduan logam [B] 97.79(Fe-Si-Mg)-2.21Al dalam at%



Analisa elemen paduan [B] 97.79(Fe-Si-Mg)-2.21Al dalam at%			
Elemen	1	2	3
O K	51,48	13,24	-
Mg K	-	-	-
Al K	6,86	-	-
Si K	32,21	58,92	68,38
Fe K	9,45	27,84	31,62
Total	100 %		

Sebaran elemen-elemen pada penampang lintang paduan logam Fe-Si-Mg-Al setelah uji oksidasi ditunjukkan pada GAMBAR 6. Elemen O terlihat jelas tersebar merata terutama pada paduan logam A pada area yang diobservasi. Hal ini menunjukkan bahwa oksidasi internal telah terjadi pada bagian dalam paduan logam tersebut. Oksigen dapat berdifusi dengan mudah ke dalam paduan logam melalui pori atau retak yang terdapat pada paduan logam tersebut. Karena elemen Si memiliki sifat afinitas yang tinggi terhadap oksigen, Si dapat mengikat oksigen dengan mudah yang berdifusi melalui pori atau retak, yang berdampak pada terjadinya oksidasi internal. Difusi atau bereaksinya Si dengan oksigen, meninggalkan tempat mulanya yang menyebabkan terbentuknya *vacancy* atau pori baru pada paduan logam tersebut.



GAMBAR 6. Analisa *Mapping* EDS pada paduan logam Fe-Si-Mg-Al dengan variasi komposisi: (a) [A] 100(Fe-Si-Mg) dan (b) [B] 97.79(Fe-Si-Mg)-2.21Al (dalam at%) setelah uji ketahanan oksidasi pada temperature 800°C selama 8 siklus.

KESIMPULAN

Sintesa paduan Fe-Si-Mg-Al dengan teknik metalurgi serbuk telah berhasil dilakukan. Berdasarkan hasil yang didapat, paduan Fe-Si-Mg-Al pada saat sebelum oksidasi tersusun atas fasa Si, FeSi, α -FeSi₂, dan/atau β -FeSi₂ bergantung pada komposisi paduannya. Hasil analisa mikrostruktur juga menunjukkan bahwa penambahan Al mempengaruhi struktur morfologi paduan, sejumlah pori dan oksida terbentuk pada permukaan sampel Fe-Si-Mg. Ketahanan oksidasi paduan Fe-Si-Mg meningkat dengan penambahan Al, dengan ketahanan oksidasi paling optimal dicapai melalui penambahan 2,21 %at Al. Berdasarkan hasil analisa XRD diketahui bahwa setelah oksidasi, paduan logam Fe-Si-Mg-Al membentuk fasa SiO₂ dan Fe₂O₃. Disamping itu, uji oksidasi juga mempengaruhi perubahan struktur kristal fasa FeSi₂ dari tetragonal menjadi *orthorhombic*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Kegiatan penelitian ini dibiayai dari “Kegiatan Tematik P2 Fisika-LIPI 2018”. Ucapan terima kasih, penulis sampaikan kepada Pusat Penelitian Fisika-LIPI yang telah memfasilitasi sarana dan prasarana dalam pelaksanaan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] K. Kurokawa *et al.*, “High-temperature corrosion resistance of SiO₂-forming materials,” *Corrosion Reviews*, vol. 36, no. 1, pp. 65-74, Feb 2018, doi: 10.1515/correv-2017-0069.
- [2] G. W. Meetham dan M. H. Van de Voorde, “Requirements of High Temperature Materials,” dalam *Materials for High Temperature Engineering Applications*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 19–34, 2000.

- [3] T. Gao *et al.*, "Evolution of Fe-rich phases in Mg melt and a novel method for separating Al and Fe from Al-Si-Fe alloys," *Materials & Design*, vol. 134, pp. 71-80, Nov 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.08.029.
- [4] W. Gao, "Investigation of hollow bimetal oxide nanomaterial and their catalytic activity for selective oxidation of alcohol," *Molecular Catalysis*, vol. 448, pp. 63-70, Apr 2018, doi: 10.1016/j.mcat.2018.01.028.
- [5] T. Sudiro *et al.*, "A Comparative Study of High Temperature Corrosion of Al₂O₃, SiO₂ and Al₂O₃-SiO₂ Forming Alloys in a Na₂SO₄-NaCl Atmosphere," *Oxid Met*, vol. 80, no. 5-6, pp. 589-597, Des 2013, doi: 10.1007/s11085-013-93 98-7.
- [6] G. Gustafsson, T. Thorvaldsson dan G. L. Dunlop, "The influence of Fe and Cr on the microstructure of cast Al-Si-Mg alloys," *MTA*, vol. 17, no. 1, pp. 45-52, Jan 1986, doi: 10.1007/BF02644441.
- [7] Kelly *et al.*, "Material Selection Consideration for Thermal Process Equipment." U.S. Departement of Energy, 2004.
- [8] H. Tanihata *et al.*, "Effect of casting and homogenizing treatment conditions on the formation of Al-Fe-Si intermetallic compounds in 6063 Al-Mg-Si alloys," p. 2.
- [9] K. Kinoshita, K. Yamada dan H. Matsutera, "Reactive Ion Etching of Fe-Si-Al Alloy for Thin Film Head," p. 3.
- [10] S. Yoshida *et al.*, "Permeability and electromagnetic-interference characteristics of Fe-Si-Al alloy flakes-polymer composite," *Journal of Applied Physics*, vol. 85, no. 8, pp. 4636-4638, Apr 1999, doi: 10.1063/1.370432.
- [11] S. J. Andersen *et al.*, "The crystal structure of the B0 phase in Al-Mg-Si alloys," p. 16.
- [12] G. A. Edwards *et al.*, "The precipitation sequence in Al-Mg-Si alloys," *Acta Materialia*, vol. 46, no. 11, pp. 3893-3904, Jul 1998, doi: 10.1016/S1359-6454(98)00059-7.
- [13] Y. L. Liu, S. B. Kang, dan H. W. Kim, "The complex microstructures in an as-cast Al-Mg-Si alloy," *Materials Letters*, vol. 41, no. 6, hlm. 267-272, Des 1999, doi: 10.1016/S0167-577X(99)00141-X.
- [14] K. S. Park dan Y. Kim, "Processing of SiO₂ Protective Layer Using HMDS Precursor by Combustion CVD," *J. Nanosci. Nanotech*, vol. 11, no. 8, pp. 7265-7268, Agu 2011, doi: 10.1166/jnn.2011.4818.
- [15] I. O. Wilson, "Magnesium oxide as a high-temperature insulant," *IEE Proc. A Phys. Sci. Meas. Instrum. Manage. Educ. Rev. UK*, vol. 128, no. 3, p. 159, 1981, doi: 10.1049/ip-a-1.1981.0026.
- [16] S. Kumar dan K. A. Q. O'Reilly, "Influence of Al grain structure on Fe bearing intermetallics during DC casting of an Al-Mg-Si alloy," *Materials Characterization*, vol. 120, pp. 311-322, Okt 2016, doi: 10.1016/j.matchar.2016.09.017.
- [17] C. Kloc *et al.*, "Preparation and properties of FeSi, a-FeSi₂ and b-FeSi₂ single crystals," p. 4.
- [18] A. M. Nymark, "Oxidation of silicon powder in humid air," p. 122, Jun 2012.
- [19] M. H. Van de Voorde & W. Betteridge, "High-temperature materials and industrial applications," *EUR 8841 1983, Euro. Abstr. Sect. I*, vol. 22, no. 3, p. 22, 1991.

