



KARAKTERISTIK LAPISAN *HOT DIP ALUMINIZING* PADA BAJA TAHAN KARAT MARTENSITIK 13Cr

Mikhael Kevin^a, Mochammad Syaiful Anwar^{b,*}, Alfirano^a, Efendi Mabru^b

^aTeknik Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Jenderal Sudirman Km 03 Cilegon, Banten, Indonesia 42435

^bPusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI
Gedung 470 Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan, Indonesia 15343

*E-mail: moch026@lipi.go.id

Masuk tanggal : 3-10-2019, revisi tanggal : 06-10-2019, diterima untuk diterbitkan tanggal 24-11-2019

Abstrak

Pada material aplikasi suhu tinggi, pelapisan permukaan merupakan hal penting dalam memberikan ketahanan oksidasi dan korosi temperatur tinggi, ketahanan erosi dan abrasi. *Hot dip Aluminizing* merupakan metode alternatif pelapisan yang dapat digunakan, karena lebih murah dari pada CVD (*chemical vapour deposition*), *pack cementation*, *plasma coating*. Persiapan permukaan, komposisi lelehan Al dan Al – Si, dan parameter proses seperti temperatur dan waktu pencelupan berpengaruh terhadap ketebalan, komposisi dan struktur mikro lapisan. Baja dilapisi lelehan Al murni, Al – 5% Si, Al - 11% Si, dan Al – 15% Si pada temperatur dan waktu celup yang bervariasi. Unsur Si memberikan pengaruh terhadap perubahan morfologi antara substrat dengan *interface* intermetalik dan mencegah kemungkinan terjadinya konsentrasi tegangan akibat morfologi *finger-like*. Pada waktu pencelupan yang sama sebesar 3 menit dari 4 variasi komposisi *coating* yang berbeda, ketebalan lapisan *coating* terbesar adalah sampel Al – 15% Si dengan temperatur 800 °C, sedangkan ketebalan lapisan intermetalik terbesar adalah sampel Al murni dengan temperatur 861 °C dengan nilai ketebalan masing-masing sebesar 480 µm dan 46,8 µm.

Kata Kunci: Baja tahan karat martensitik, *aluminizing*, intermetalik, Fe-Al, Fe-Al-Si, lapisan

Abstract

The high-temperature materials, the surface coating, is important to provide oxidation and corrosion resistance, erosion, and abrasion resistance. Hot-dip aluminizing is an alternative coating method that can be used, because it is cheaper than CVD (chemical vapour deposition), pack cementation, plasma coating. Surface preparation, the coating composition of Al and Al-Si, temperature and immersion time effect coating thickness, composition and microstructure of the coating. The steel coated by pure Al molten, Al - 5% Si, Al - 11% Si, and Al - 15% Si at varying temperatures and dip durations. An element of Si influences morphological changes between the substrate and the intermetallic interface and prevents the possibility of concentration stress due to finger-like morphology. At the same immersion time of 3 minutes from four different coating composition variations, the thickness of the most substantial coating is Al - 15% Si with a temperature of 800 °C, while the thickness of the most substantial intermetallic layer is pure Al samples with a temperature of 861 °C with a thickness of 480µm and 46.8 µm.

Keywords: *Martensitic stainless steel, aluminizing, intermetallic, Fe-Al, Fe-Al-Si, coating*

1. PENDAHULUAN

Turbin uap banyak digunakan untuk pembangkit tenaga listrik dengan menggunakan bahan bakar batubara, solar, atau tenaga nuklir. Material untuk sudu turbin uap umumnya adalah baja tahan karat martensitik, karena memiliki kombinasi kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan

korosi yang sangat baik. Ketahanan aus, *fatigue*, dan korosi adalah sifat yang harus dimiliki di dalam material sudu turbin uap. Namun fenomena kegagalan masih terjadi pada sudu turbin uap. Beberapa cara untuk memperkecil kegagalan pada material sudu turbin adalah proses *alloying* dilanjutkan dengan *heat*

treatment, mempertahankan kondisi dalam tahap normal tanpa perubahan beban, lingkungan korosif rendah, dan stabilisasi temperatur [1].

Kombinasi temperatur tinggi dengan lingkungan yang terkontaminasi dengan sulfur, vanadium, Na_2SO_4 yang akan bertindak sebagai sulfida memerlukan perhatian khusus terhadap fenomena korosi temperatur tinggi. Bentuk korosi ini bisa merusak material pada laju yang sangat cepat. Korosi ini merusak bagian panas tempat lapisan oksida pelindung material sudu dan akan membentuk deposit kromium dan sulfida, yang akan mengurangi kandungan Cr pada material sudu dan akan mengurangi ketahanan korosinya [2].

Pada material untuk aplikasi suhu tinggi, ketahanan terhadap oksidasi dan korosi temperatur tinggi, ketahanan erosi dan abrasi merupakan hal penting dalam pembuatannya. Pelapisan *aluminizing* merupakan salah satu pelapisan yang menghasilkan Al_2O_3 sehingga dapat melindungi baja dari temperatur tinggi hingga $\pm 1000^\circ\text{C}$ [3].

Hot dip Aluminizing merupakan salah satu metode pelapisan *aluminizing* baja dengan cara mencelupkan baja di dalam lelehan logam aluminium sehingga aluminium berdifusi ke substrat baja dan terbentuk lapisan intermetalik *aluminide*. Lapisan intermetalik tersebut menentukan besar kecilnya ketahanan terhadap temperatur tinggi. Perlakuan permukaan, komposisi lelehan Al dan Al – Si, dan parameter proses seperti temperatur dan waktu pencelupan berpengaruh terhadap terbentuknya lapisan intermetalik [4].

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan proses *cladding* melalui proses rolling panas, *pack cementation*, CVD (*chemical vapour deposition*) untuk menghasilkan paduan intermetalik Fe-Al [5]-[6], namun proses-proses tersebut relatif mahal. Penelitian ini bertujuan untuk mengarakterisasi lapisan *hot dip aluminizing* pada baja tahan karat martensitik 13Cr serta mengobservasi pengaruh penambahan unsur Si terhadap terbentuknya lapisan intermetalik Fe-Al pada *interface* lapisan aluminium dan substrat baja

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Proses *hot dip aluminizing* dilakukan dengan preparasi penghalusan permukaan sampel menggunakan amplas 100, 400, dan 800#. Kemudian sampel dilakukan *rinsing* menggunakan larutan 15% H_2SO_4 dan pembilasan dengan air mengalir sebelum dilakukan pencelupan di dalam *crucible*. Spesimen tersebut dikaitkan menggunakan

kawat nikel untuk memudahkan proses pencelupan di dalam *crucible*. *Crucible* yang digunakan untuk proses pelelehan paduan Aluminium harus memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi. Komposisi paduan aluminium *coating* yang digunakan adalah Al Murni, Al - 5%Si, Al - 11%Si, dan Al - 15%Si. Masing-masing komposisi tersebut ditempatkan di dalam *crucible* dan dipanaskan pada temperatur 700 sampai 800 °C di dalam *muffle furnace* dengan waktu pencelupan yaitu 1, 3, dan 5 menit. Sampel baja yang telah terlapiasi oleh lapisan paduan aluminium dilakukan pengamatan SEM-EDS (*scanning electron microscopy - energy dispersive spectroscopy*) untuk mengetahui morfologi permukaan dan ketebalan lapisan serta komposisi kimia hasil pelapisan *hot dip aluminizing* pada baja martensitik *stainless steel* 13Cr dengan unsur *coating* Al murni dan paduan Al - Si dengan variasi kandungan Al dan Si yang berbeda.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Komposisi Kimia Coating Hasil Hot Dip Aluminizing

Analisa komposisi kimia *coating* hasil *hot dip aluminizing* menggunakan EDS dan kemungkinan senyawa yang terbentuk ditunjukkan pada Tabel 1. Pada sampel A, B, D, G, dan H kemungkinan tidak terbentuk senyawa logam karena belum sempatnya terjadi difusi atom dari substrat ke arah lapisan Al, atau juga karena terlepasnya lapisan intermetalik dari substrat baja saat melakukan *fine cutting* saat preparasi untuk pengujian SEM-EDS (*scanning electron microscopy - energy dispersive spectroscopy*).

Senyawa logam yang kemungkinan terbentuk pada *coating* setelah proses *hot dip aluminizing* antara lain Fe_2AlSi_7 , $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Si}$, FeAl_3Si , Fe_3Al , FeAl_2 yang ditemukan pada sampel C, E, F, I, J, K, L, M, N, dan O.

Tabel 1. Senyawa yang mungkin terbentuk pada lapisan *coating* hasil *hot dip aluminizing*

Sampel	Komposisi (%at.)				Kemungkinan senyawa yang terbentuk
	Fe	Al	Si	Cr	
A	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-
C	19,35	9,88	65,13	5,65	Fe_2AlSi_7
D	-	-	-	-	-
E	65,83	16,83	5,46	11,15	Fe_3Al
F	30,95	43,18	20,18	5,47	$\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Si}$
G	-	-	-	-	-
H	-	-	-	-	-
I	58,61	20,35	10,22	10,15	Fe_3Al
J	27,6	67,91	-	4,48	FeAl_3
K	31,98	62,81	-	5,21	FeAl_2
L	20,03	67,26	8,75	3,96	FeAl_3
M	25,1	59,08	6,2	3,99	FeAl_2
N	15,83	58,34	16,03	2,68	$\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Si}$
O	21,15	58,52	12,73	2,56	$\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Si}$

Senyawa logam yang kemungkinan terbentuk seperti FeAl_2 dan FeAl_3 memiliki kandungan Al tinggi yang kemungkinan dapat menyebabkan ikatan Fe-Al relatif sedikit terbentuk di lapisan *intermetallic* sehingga unsur Al yang tidak terikat oleh Fe akan teroksidasi membentuk Al_2O_3 yang memiliki sifat getas. Sebaliknya, Fe_3Al dengan kandungan Fe yang tinggi menunjukkan ketahanan aus, ketahanan oksidasi dan korosi yang relatif baik. Hal ini kemungkinan dapat disebabkan karena ikatan kuat Fe-Al terbentuk di lapisan *intermetallic* yang kaya akan kandungan Fe. Oleh karena itu yang lebih disukai adalah pertumbuhan lapisan Fe_3Al yang bisa meningkatkan ketangguhan, ketahanan oksidasi dan kekuatan antarmuka dari baja *aluminized* [7]. Penambahan unsur Si ke dalam bahan *coating* Al dapat menghalangi pertumbuhan senyawa logam $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Si}$ dalam proses *hot-dip aluminizing*, sehingga tidak terbentuk morfologi *finger-like*. Kinetika pertumbuhan senyawa ini dikendalikan oleh proses difusi, yakni proses difusi atom Al melewati batas lapisan $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Si}$. Unsur Si juga dapat mengubah kondisi difusi senyawa $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Si}$ dan mengurangi pertumbuhan *solid state*. Unsur Si menempati kekosongan (*vacancy*) di dalam senyawa $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Si}$ yang menyebabkan Al berdifusi untuk mempercepat pertumbuhan senyawa ini [4], [7].

Penambahan Si ke dalam campuran *coating bath* mempercepat kecepatan pengayaan Fe di dalam leburan Fe-bebas Al, lalu Fe ini menyatu dengan Al bebas dan membentuk senyawa baru yang akan mengurangi difusi atom Al ke substrat baja serta mengurangi pertumbuhan senyawa logam. Meskipun komposisi senyawa Fe-Al lebih tinggi daripada $\text{Fe}_x\text{Si}_y\text{Al}_z$, ketebalan lapisan Fe-Al yang terbentuk tidak terpengaruh oleh temperatur *bath*. Ketebalan *interlayer* berkurang signifikan ketika kandungan Si di dalam campuran *coating* mencapai 6 % berat [8].

3.2. Pengamatan SEM pada Coating Hasil Hot Dip Aluminizing

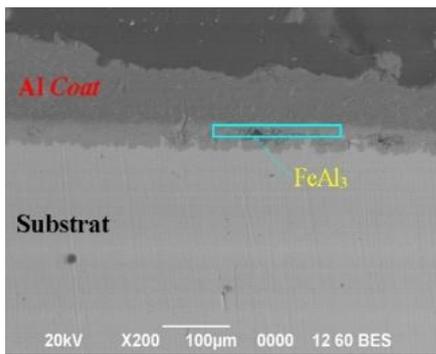
Hasil pengamatan SEM dari senyawa logam masing-masing sampel menunjukkan adanya morfologi *finger-like*, permukaan intermetalik yang mengarah ke lapisan *coating*. Hal ini terjadi karena pertumbuhan senyawa Fe_xAl_y yang tumbuh ke arah tempat terjadinya proses difusi. Pada Gambar 1 menunjukkan hasil pengamatan SEM secara potongan melintang dari baja 13Cr yang dicelup dalam lelehan Al pada temperatur 761 dan 861 °C selama 3 menit. Lapisan *coating* yang terbentuk di antara permukaan Al-*coating* dan baja terlihat cenderung tidak merata pada

bagian antar-mukanya. Morfologi dari lapisan tersebut seperti *finger-like*, hal itu dikarenakan pertumbuhan senyawa Fe_xAl_y ke arah terjadinya difusi dan menyebabkan terjadinya nukleasi *aluminide* kristal di bidang kristal tertentu pada substrat baja. Morfologi ini sangat tidak menguntungkan karena sifat ketahanan aus dan kestabilan termalnya yang buruk, dimana pada aplikasi turbin hal ini dapat menyebabkan retak saat penggunaannya karena terjadinya konsentrasi tegangan pada antar-muka yang tidak rata dan halus [7]-[8].

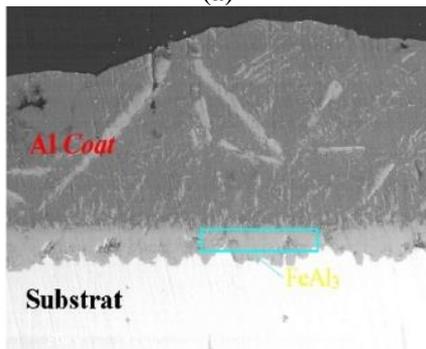
Pada Gambar 2 menunjukkan hasil pengamatan SEM secara potongan melintang (*cross-section*) pada baja 13Cr yang dicelup dalam lelehan Al-Si pada temperatur 739 dan 839 °C. Lapisan yang terbentuk di antara permukaan Al-*coating* dan baja cenderung merata pada bagian antar-mukanya. Struktur mikro tersebut memiliki morfologi planar. Hal itu kemungkinan karena semakin besar Si yang ditambahkan di dalam *bath* maka semakin halus morfologi *finger-like* yang dihasilkan. Pada temperatur 739 °C terdapat lapisan intermetalik namun tidak merata, mungkin disebabkan akibat kurangnya temperatur dan waktu untuk melakukan reaksi antara Fe dan *coating*. Pada temperatur 839 °C terdapat lapisan intermetalik yang lebih merata, mungkin disebabkan akibat cukupnya temperatur dan waktu untuk melakukan reaksi antara Fe dan *coating* [8]. Lapisan (*coating*) hasil dari proses *hot dip aluminizing* umumnya dipengaruhi oleh temperatur dan waktu pencelupan. Semakin tinggi temperatur maka semakin rendah kekentalan (*viscosity*) cairan *coating*. Semakin lama waktu pencelupan maka semakin tinggi kekentalan cairan *coating* yang kemungkinan dapat mengakibatkan terjadinya aglomerasi di dalam cairan *coating*.

Pada Gambar 3 menunjukkan hasil pengamatan SEM secara *cross-sectional* baja 13Cr yang dicelup dalam lelehan Al - Si pada temperatur 700 dan 800 °C. Lapisan yang terbentuk di antara permukaan Al-*coating* dan baja terlihat cenderung tidak merata. Lapisan tersebut tidak memiliki morfologi *finger-like*, hal itu dikarenakan semakin besar Si yang ditambahkan pada campuran *coating* maka semakin halus morfologi *finger-like*. Pada temperatur 700 °C menunjukkan lapisan yang terbentuk di antara permukaan aluminium hasil *coating* dan baja sangat tipis. Hal ini kemungkinan disebabkan karena penambahan unsur Si 15 % berat di dalam campuran *coating* dapat menurunkan proses difusi Al ke dalam substrat baja. Hal yang sama terjadi pada baja

yang telah mengalami proses *hot dip aluminizing* pada temperatur 800 °C [9].

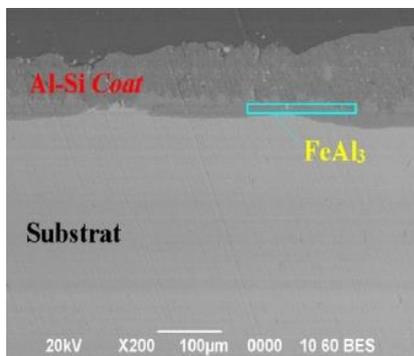


(a)

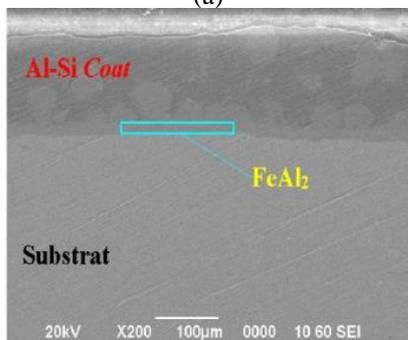


(b)

Gambar 1. Struktur mikro lapisan aluminizing dengan komposisi Al murni pada temperatur (°C); (a) 761, dan (b) 861 selama 3 menit



(a)



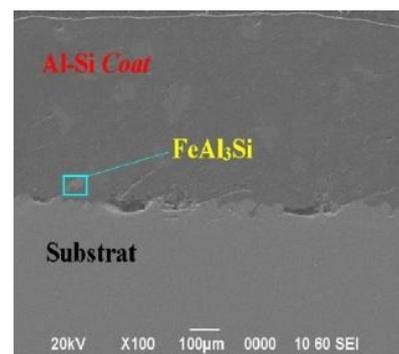
(b)

Gambar 2. Struktur mikro lapisan dengan SEM pada komposisi Al-5% Si selama 3 menit pada temperatur (°C); (a) 739, dan (b) 839

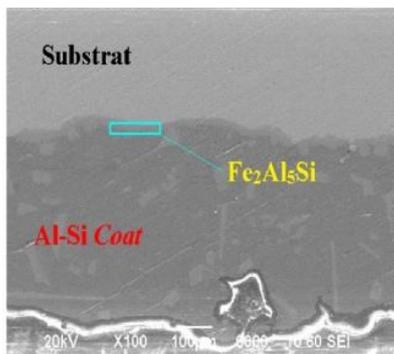
3.3. Ketebalan Lapisan *Coating* Aluminium

Ketebalan lapisan yang menempel pada substrat baja telah diamati menggunakan SEM. Salah satu yang mempengaruhi ketebalan lapisan adalah komposisi kimia lelehan paduan. Elemen paduan yang dapat mengubah ketebalan lapisan secara signifikan adalah Si. Oleh karena itu *hot dip aluminizing* ini dilakukan dengan mereaksikan baja tahan karat martensitik dengan Al murni dan paduan Al dengan Si. Unsur Si dapat mengurangi ketebalan lapisan tengah yang getas serta meningkatkan kekuatan lapisan. Silikon yang ditambahkan ke dalam lelehan aluminium akan mengurangi ketebalan lapisan paduan, dimana atom Si akan menempati kekosongan pada fasa $\eta(\text{Al}_5\text{Fe}_2)$. Si di dalam sistem Fe - Al akan mengurangi laju difusi atom Al dalam matriks Fe dan akan mengurangi laju pembentukan karena mengentalkan lapisan antar-logam getas yang terbentuk di permukaan lapisan logam [8].

Gambar 4(a) dan 4(b) menunjukkan ketebalan lapisan atas dan tengah yang terbentuk akibat reaksi antara substrat baja dengan paduan Al - 11% Si *-coating*. Pada Gambar 4(a) dapat dilihat bahwa ketebalan lapisan atas paling tebal terdapat pada temperatur celup 850 °C sebesar 388,04 µm dan ketebalan lapisan atas paling tipis terdapat pada temperatur celup 650 °C sebesar 105,8 µm. Ketebalan lapisan meningkat seiring bertambahnya temperatur dan waktu celup. Hal ini sama seperti yang dilakukan pada penelitian sebelumnya dimana terjadi peningkatan ketebalan lapisan saat waktu pencelupannya ditingkatkan [9].

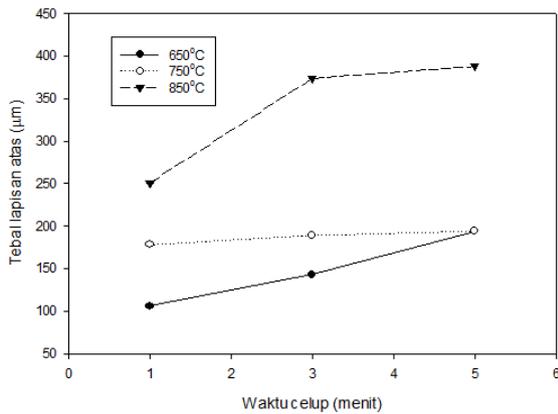


(a)

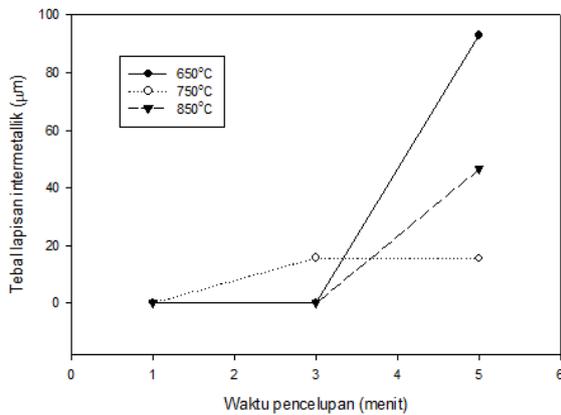


(b)

Gambar 3. Struktur mikro lapisan dengan SEM pada komposisi Al -15% Si selama 3 menit pada temperatur (°C); (a) 700, dan (b) 800



(a)

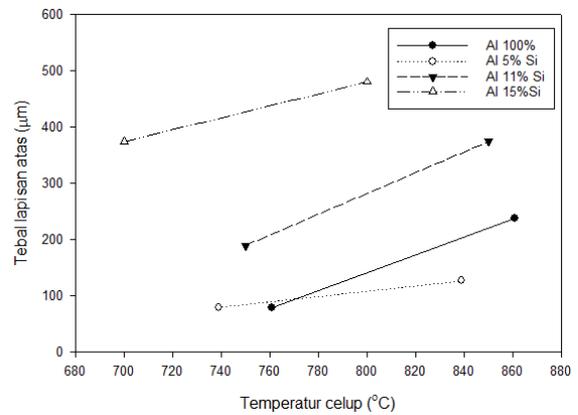


(b)

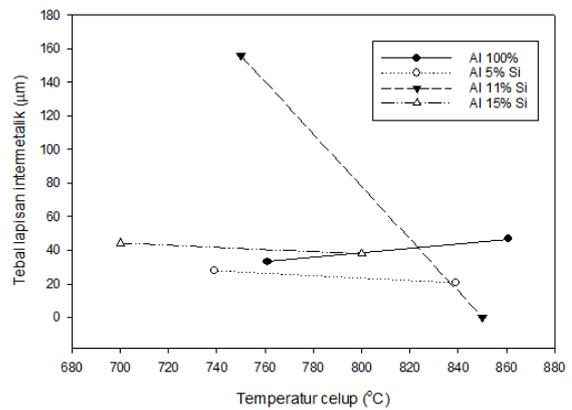
Gambar 4. Ketebalan lapisan (a) lapisan atas, (b) lapisan tengah hasil *hot dip aluminizing* dengan komposisi Al - 11% Si selama 1,3 dan 5 menit

Gambar 4(b) menunjukkan ketebalan lapisan tengah yang terbentuk akibat reaksi antara substrat baja dengan paduan Al -11% Si-coating pada temperatur 650 – 850 °C selama 1 – 5 menit. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan tengah yang terbentuk lebih tipis penambahan unsur Si hingga 11 %berat di dalam lelehan Al dapat mengurangi pembentukan lapisan tengah [10]. Namun, hal tersebut tidak berlaku apabila temperatur lelehan Al sampai 850 °C dan lama pencelupan substrat baja di dalam lelehan Al selama 5 menit. Semakin tinggi temperatur dan

waktu pencelupan maka kemungkinan Al berdifusi ke substrat baja semakin tinggi [11]. Gambar 5 (a), dan 5(b) menunjukkan ketebalan lapisan atas dan tengah yang terbentuk akibat reaksi antara substrat baja dengan Al-coating, Al - 5% Si, Al - 11% Si dan Al - 15% Si-coating dengan waktu 3 menit.



(a)



(b)

Gambar 5. Ketebalan lapisan hasil *hot dip aluminizing* selama 3 menit dengan komposisi yang berbeda; (a) lapisan atas, (b) lapisan tengah

Pada Gambar 5(a) menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan Si dan temperatur lelehan Al maka ketebalan lapisan atas semakin tinggi. Sedangkan Gambar 5 (b) menunjukkan bahwa ketebalan lapisan tengah paling tinggi ditemukan pada komposisi Al-coating dengan penambahan silikon sampai 11 %berat pada temperatur celup 750 °C. Sedangkan ketebalan lapisan tengah paling kecil ditemukan pada komposisi Al-coating dengan penambahan silikon 11 % berat pada temperatur celup 850 °C. Hal ini berarti bahwa semakin banyak silikon di dalam lelehan Al tidak memberikan pengaruh terhadap terbentuknya ikatan antara substrat baja dengan lapisan aluminium sehingga menghasilkan lapisan tengah yang tipis [9]-[10]. Pada penelitian sebelumnya mengungkapkan bahwa lapisan tengah yang tebal akan mudah memunculkan retakan pada lapisan daripada

lapisan intermetalik yang tipis apabila sejumlah kecil regangan diterapkan pada lapisan Al [9], [11]. Oleh karena itu, lapisan *aluminizing* dengan penambahan Si 11% berat dengan temperatur celup 850 °C dan waktu celup selama 3 menit memberikan dampak terhadap ketahanan munculnya retak awal.

Berdasarkan hasil pengujian sebelumnya, tebal *coating* yang dihasilkan dari proses CVD pada temperatur 700 °C selama 4 jam sekitar 50 µm [12]. Hasil tersebut lebih rendah daripada tebal *coating aluminizing* dimana tebal *coating* nya bisa mencapai sekitar 400 µm dengan waktu sekitar 5 menit. Kemudian, *coating* dari proses *aluminizing* hampir sama karakteristiknya dengan *coating* dari proses plasma namun *coating aluminizing* lebih ekonomis daripada *coating* plasma. Sedangkan proses deposisi unsur *coating aluminizing* ke substrat lebih mudah daripada proses *coating pack cementation*[6].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan bahwa komposisi paduan lapisan Al, temperatur lelehan dan waktu pencelupan dapat mempengaruhi terbentuknya lapisan *aluminizing* pada substrat baja tahan karat martensitik 13Cr. Komposisi paduan yang memberikan efek positif ditemukan pada komposisi lapisan Al-11%Si. Pada komposisi lapisan tersebut dengan temperatur lelehan 850 °C dan waktu pencelupan 3 menit terbentuk lapisan tipis intermetalik FeAl₃ dan FeAl₂ yang memiliki sifat ketahanan terhadap munculnya retakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini adalah bagian dari penelitian tentang pengembangan material suhu tinggi untuk pembangkit listrik tenaga uap. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Metalurgi dan Material, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang telah mendanai kegiatan ini melalui Kompetensi Inti Tahun Anggaran 2018. Pada penelitian ini, Mikhael Kevin sebagai pelaksana penelitian, Mochammad Syaiful Anwar sebagai penyusun karya tulis ilmiah dan korespondensi penulis, Alfirano dan Efendi Maburri sebagai narasumber dan pembimbing penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. S. Anwar, S. Prifiharni, dan E. Maburri, "Optimizing heat treatment process of Fe-13Cr-3Mo-3Ni martensitic stainless steel," *Proceeding IOP Conference Series:*

Materials Science and Engineering, pp. 202, 2017. Doi:10.1088/1757-899X/202/1/012037.

[2] A. I. Almazrouee, K. J. Al-Fadhlah, S. N. Alhajeri, dan S. Alfehaid, "High temperature corrosion of martensitic steel of reheater pipes in a desalination power plant," *Journal Engineering Failure Analysis*, vol. 85, pp. 89-96, 2018. Doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.12.003.

[3] V. A. Ravi, T. K. Nguyen, dan J. C. Nava, "Aluminizing of steel to improve high temperature corrosion resistance," *Book Thermochemical Surface Engineering of Steels*, Elsevier, pp. 751-767, 2017. Doi.org/10.1533/9780857096524.5.751.

[4] H. Azimae, M. Sarfaraz, M. Mirjalili, dan K. Aminian, "Effect of silicon and manganese on the kinetics and morphology of the intermetallic layer growth during hot-dip aluminizing," *Surface and Coatings Technology*, vol. 357, pp. 483-496, 2018. Doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.035.

[5] D. Wang, dan Z. Shi, "Aluminizing and oxidation treatment of 1Cr18Ni9 stainless steel." *Appl. Surf. Sci.*, vol. 227, no. 1, pp. 255-260, 2014. Doi.org/10.1016/j.apsusc.2003.11.076.

[6] H. Strakov, V. Papageorgiou, R. Bonetti, V. Lieberman, dan A. Scott, "Advanced chemical vapor aluminizing technology: Co-deposition process and doped aluminized coatings," *Proceedings of ASME Turbo Expo*, pp. 11-15, 2012. Doi.org/10.1115/GT2012-70135.

[7] G. H. Awan, "The morphology of coating-substrate interface in hot-dip-aluminized steels," Doctor Thesis, University of Engineering and Technology, 2001. <http://pr.hec.gov.pk/jspui/bitstream/123456789/16/1/86S.pdf>.

[8] H. R. Shahverdi, M. R. Ghomashchi, S. Shabestari, dan J. Hejazi, "Microstructural analysis of interfacial reaction between molten aluminium and solid iron," *Journal of Material Processing Technology*, vol. 124, pp. 345-352, 2002. Doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00225-X.

[9] B. Lemmens, H. Springer, M. Peeters, I. De Graeve, J. De Strycker, D. Raabe, dan K. Verbeken, "Deformation induced degradation of hot dip aluminized steel," *Material Science and Engineering A.*, vol. 710, pp. 385-391, 2018. Doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.094.

[10] B. Dangi, T. W. Brown, dan K. N. Kulkarni, "Effect of silicon, manganese and nickel

present in iron on the intermetallic growth at iron – aluminium alloy interface,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 769, pp. 777-787, 2018.
Doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.364.

- [11] B. Lemmens, H. Springer, M. Peeters, I. De Graeve, J. De Strycker, D. Raabe, dan K. Verbeken, “Effect of silicon on the microstructure and growth kinetics of intermetallic phases formed during hot-dip aluminizing of ferritic steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 319, pp. 104-109, 2017.
Doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.040.
- [12] J. L. M. Arevalo, F. J. P. Trujillo, dan S. I. C. Quintana, “Behaviour of aluminium coating by CVD-FBR in steam oxidation at 700°C,” *Journal Ciencia Tecnologia y Futuro*, vol. 5, pp. 75-84, 2014.

