

Kesan Pemendapan Elektrofosis Gam Arab terhadap Halaju Kakisan pada Aluminium 5052 (Electrophoresis Deposition Arabic Gum Effect on Aluminium 5052 Reduce Corrosion)

I GUSTI AYU ARWATI, EDY HERIANTO MAJLAN*, WAN RAMLI WAN DAUD, LOH KEE SHYUAN, KHUZAIMAH BINTI ARIFIN, TEUKU HUSAINI, SAGIR ALVA & NABILAH AFIQAH MOHD RADZUAN

ABSTRAK

Plat dwikutub adalah salah satu komponen utama sel fuel membran pertukaran proton (PEMFC). Aloi aluminium (Al5052) merupakan salah satu logam yang digunakan sebagai plat dwikutub kerana mempunyai kekonduksian yang tinggi dan ringan. Namun, sistem PEMFC yang berasid (pH3-6) adalah mudah untuk bahan Al5052 mengalami kakisan sehingga dapat mengurangkan prestasi PEMFC. Oleh itu, bagi mengurangkan halaju kakisan yang berlaku, kajian ini menggunakan perencat hijau gam Arab dengan kaedah pemendapan elektrofosis (EPD). Kesan kakisan plat Al5052 bersalut 0.5 gL⁻¹ gam Arab di dalam larutan sulfurik asid diuji menggunakan kaedah elektrokimia dan ujian morfologi. Hasil ujian morfologi permukaan Al5052 yang bersalut gam Arab terlihat lebih halus dan homogen berbanding permukaan yang tidak disalut serta hasil keratan rentas ketebalan salutan adalah antara 7.5 µm sehingga 8.8 µm. Kesan peningkatan suhu (30°C sehingga 90°C) terhadap nilai rintangan hubungan antara muka (ICR) pada Al5052 yang tidak bersalut akan menurun daripada 11.8552 sehingga 9.9042 mΩ cm² manakala yang bersalutkan gam Arab mempunyai nilai daripada 13.3497 sehingga 11.812 mΩ cm². Keputusan menunjukkan bahawa gam Arab dapat memberikan perlindungan terhadap permukaan logam yang apabila pengujian menggunakan kaedah polarisasi linear tafel dalam larutan 0.5 M H₂SO₄ (pH4) menunjukkan nilai ketumpatan arus kakisan (I_{corr}) semakin menurun daripada 0.00264 kepada 0.00012 µA cm⁻². Selain itu, halaju kakisan turut menurun daripada 3.06×10^{-5} mpy kepada 1.61×10^{-6} mpy setelah disalut gam Arab. Kesimpulannya, gam Arab dan kaedah salutan EPD boleh digunakan bagi mengurangkan halaju kakisan pada plat Al5052, supaya jangka hayat bahan ini lebih panjang dan boleh mencapai piawai yang ditetapkan oleh DOE untuk plat dwikutub.

Kata kunci: Aluminium 5052; ketumpatan arus kakisan; pemendapan elektrofosis; perencat hijau gam arab; plat dwikutub; rintangan hubungan antara muka

ABSTRACT

Bipolar plates are one of the main components of proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). Aluminum alloy (Al5052) is one of the metals used as a bipolar plate because it has a high conductivity, light weight. However, the acidic PEMFC system (pH3-6) is easy for Al5052 ingredients to experience corrosion so as to reduce PEMFC achievement. Therefore, in order to reduce the prevailing sidewalks, this study used a green Arabic gum inhibitor with an electrophoresis deposition (EPD). The impression of a 0.5 gL⁻¹ Arabic gum-coated Al5052 plate sidewalk in the sulphuric acid solution was tested using an electrochemical method and a morphological test. The surface morphology of Al5052 coated with Arabic gum appeared to be smoother and homogeneous compared to uncoated surface and the cross section of the coating thickness was between 7.5 µm and 8.8 µm. Effect of temperature increase (30°C - 90°C) on the interfacial contact resistance (ICR) value of the uncoated Al5052 will decrease from 11.8552 to 9.9042 mΩ cm² where the Arabic gum coated has a value of 13,3497 to 11,812 mΩ cm². The results showed that Arabic gum can provide protection against metal surfaces where the test using linear tafel polarization technique in 0.5 M H₂SO₄ (pH4) solution with corrosion current value (I_{corr}) decreased from 0.00264 to 0.00012 µA cm⁻². Despite that, the corrosion rate reduced from 3.06×10^{-5} mpy to 1.61×10^{-6} mpy as being coted with Arabic gum. It can be concluded that Arabic gum and coating techniques with EPD can be used to reduce corrosion on the Al5052 plate, therefore, the life span of this material is longer and may reach the targets set by the DOE for bipolar plates.

Keywords: Aluminium 5052; bipolar plates; corrosion current density; electrophoresis deposition; green inhibitor arabic gum; interfacial contact resistance

PENGENALAN

Sel fuel membran pertukaran proton (PEMFC) merupakan salah satu daripada alat tenaga alternatif yang sedang dibangunkan dalam usaha bagi mengurangkan

kebergantungan kepada bahan bakar fosil (Antunes et al. 2011; Herman et al. 2005). Pembangunan teknologi PEMFC yang pesat ini membolehkannya digunakan dalam pelbagai aplikasi, memandangkan keupayaannya yang

bebas daripada pencemaran karbon dioksida (CO₂), serta suhu operasi sekitar 60°C hingga 100°C (Antunes et al. 2010; Mehta et al. 2003). PEMFC terdiri daripada beberapa komponen dengan salah satu komponen terpenting adalah plat dwikutub.

Plat dwikutub kebanyakannya diperbuat daripada bahan berunsur grafit, bahan komposit dan bahan berunsur logam (De Olivera et al. 2012; Shahrhan Karim et al. 2012). Walaupun bahan berunsur grafit dan bahan komposit tahan terhadap kakisan namun, ia mempunyai sifat kekonduksian elektrik yang lebih rendah jika dibandingkan dengan bahan logam. Nilai ketahanan kakisan pada plat dwikutub berdasarkan sasaran Jabatan Tenaga Amerika (US-DOE), haruslah mempunyai ketumpatan arus (I_{corr}) kurang daripada 1 $\mu\text{A cm}^{-2}$ dan nilai rintangan hubungan antara muka (ICR) kurang daripada 20 $\text{m}\Omega \text{cm}^2$ (Asri et al. 2017). Sifat ini hanya dapat dimiliki oleh logam seperti, logam tahan karat, aluminium dan titanium. Oleh itu, bahan logam ini sering diguna pakai sebagai bahan bagi plat dwikutub PEMFC (Antunes et al. 2011; Asri et al. 2016; Herman et al. 2005).

Logam Al5052 merupakan logam terbaik untuk plat dwikutub memandangkan ia ringan, murah, mudah diperolehi serta mudah diubah suai mengikut kesesuaian penggunaan (Hou 2011; Mohd Radzuan et al. 2017). Namun begitu, memandangkan sifat halaju kakisan bahan yang tinggi, beberapa pendekatan telah diambil antaranya adalah dengan menggunakan kaedah penyalutan (Dadfar et al. 2016; Umoren et al. 2008b; Tawfik et al. 2007). Kriteria pemilihan bahan dan teknik salutan adalah sangat penting kerana akan mempengaruhi sifat pasif yang terbentuk pada permukaan logam (Yang et al. 2010). Contoh bahan salutan yang bersifat konduktif antaranya adalah salutan logam menggunakan logam nitrida dan logam karbida (Mehta & Cooper 2003; Tawfik et al. 2007; Woodman et al. 1999). Antara salah satu kaedah salutan yang popular digunakan adalah kaedah pemendapan wap fizikal (PVD). Namun, hasil ujian ke atas salutan pada permukaan logam dengan analisis morfologi menggunakan alatan mikroskopi elektron imbasan (SEM) menunjukkan terdapat beberapa lubang kakisan terbentuk (Huang et al. 2016). Keadaan ini membuktikan bahawa kegagalan salutan ini berpunca daripada keadaan salutan yang tidak rata pada permukaan logam.

Kawalan terhadap kakisan bahan logam amatlah penting sebagai salah satu bahan yang boleh diguna pakai untuk mengurangkan kakisan adalah dengan menggunakan perencat. Salutan pada permukaan logam menghalang pembebasan ion logam serta mengekang kakisan berlaku dalam tempoh masa yang singkat (Ameh 2014; Ameh et al. 2012). Perencat kromat sering digunakan sebagai perencat kakisan pada logam. Namun, sifatnya mengekang penggunaan yang bertoksik serta membahayakan pengguna dan alam sekitar. Oleh itu, jenis perencat hijau terbiodegradasi merupakan alternatif masa kini yang merupakan kunci kepada pembangunan teknologi (Patni et al. 2013; Peter & Sanjay 2015; Sangeetha et al. 2011). Penggunaan perencat hijau sebagai bahan alternatif yang

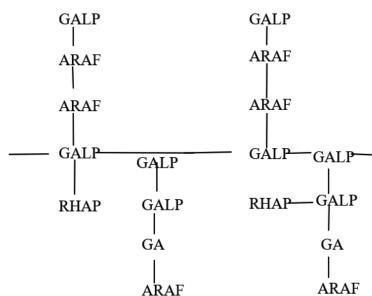
dapat mengurangkan kakisan pada logam mengandungi beberapa sebatian organik. Antaranya adalah Oksigen (O), Nitrogen (N), Fosforus (P) dan Sulfur (S) yang berupaya membentuk lapisan filem pasif (Rani & Basu 2012). Berdasarkan penerangan tersebut, kajian ini menjurus kepada penggunaan bahan gam Arab perencat hijau yang mampu meningkatkan kesan penyerapan pada permukaan logam (Othman et al. 2012). Gam Arab perencat hijau sering digunakan sebagai satu bahan salutan dan kini ia diterapkan dalam pembangunan bahan plat dwikutub bagi aplikasi sel fuel memandangkan keupayaannya untuk mengekang kakisan di samping mengalirkan arus elektrik (Babu et al. 2018). Terdapat beberapa jenis kaedah yang biasa digunakan untuk salutan pada permukaan logam antaranya adalah melalui kaedah pemendapan EPD. Kajian menggunakan EPD ini adalah lebih selamat dan mudah untuk digunakan jika dibandingkan dengan kaedah salutan lain seperti pemendapan wap fizikal, pemendapan wap kimia dan penyemburan (Feng et al. 2013; Garcia & Smit 2006; Pech-Rodriguez et al. 2014). Proses EPD menghasilkan molekul yang melarut dalam larutan akueus atau organik yang dipindahkan ke elektrod apabila dialirkan arus elektrik (Antonelli et al. 2013; Garcia et al. 2006; Pech et al. 2014; Peter & Sanjay 2015; Raddaha et al. 2014). Bagi mencapai deposit struktur zarah elektroforetik yang seragam mengikut ia bergantung kepada jumlah kepekatan larutan, pH dan kekonduksian gam Arab. Kaedah EPD ini menawarkan hasil salutan yang sekata, alatan yang mudah diperolehi, serta ketebalan yang mudah dikawal berdasarkan kesesuaian aplikasi (Raddaha et al. 2014). Oleh itu, kajian ini menekankan penggunaan bahan gam Arab menggunakan kaedah EPD pada permukaan logam Al5052 yang mampu meningkatkan sifat rintangan dan kakisan serta meningkatkan prestasi keseluruhan plat dwikutub.

BAHAN DAN KAEDAH

PROSES PENYALUTAN SECARA ELEKTROFORESIS

Logam yang digunakan dalam kajian ini adalah plat Al5052 yang terdiri daripada unsur logam dengan komposisi seperti, 0.45 wt. % Si, 0.45 wt. % Fe, 0.1 wt. % Cu, 0.1 wt. % Mn, 2.2 wt. % Mg, 0.15 wt. % Cr, 0.1 wt. % Zn dan 96.45% (Al) (Chiang et al. 2014). Bahan salutan yang digunakan adalah gam Arab perencat hijau berasal daripada pokok akasia (G9752-500G) yang diperolehi daripada Sigma Chemical (St Louis, MO). Bahan gam Arab ini terdiri daripada struktur rantaian polisakarida seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 dan pencirian bahan gam Arab dalam Jadual 1. Struktur rantaian polisakarida ini terdiri daripada unsur D-galaktopiranosa (GALP) yang dihubungkan dengan L-Arabo-furanose (ARAF), L-Rhamnopyranose (RHAP) dan asid D-Glucuronic (GA).

Bahan logam Al5052 berukuran 2.5 cm × 2.5 cm × 3 mm, sebelum penyalutan permukaan logam dibersihkan dengan menggunakan mesin pengilap mekanikal (model *Mecapol press*) bersama kertas pasir bergred 800 dan



RAJAH 1. Struktur rantaian polisakarida bagi gam Arab

JADUAL 1. Pencirian bahan asal gam Arab

Kebolehlarutan	1 g/2 mL air
Jumlah abu	< 4 %
Ketidaktelapan asid	< 0.5 %

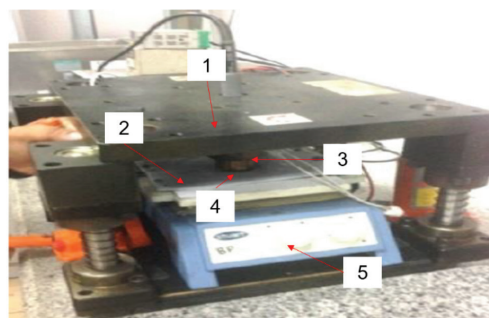
1500. Seterusnya, permukaan logam dibersihkan dengan menggunakan cecair aseton agar permukaan logam bebas daripada kotoran. Penyediaan permukaan logam yang sempurna adalah penting bagi membolehkan penyalutan yang sekata dilakukan. Sebanyak 0.5 g (0.05 vol.%) gam Arab yang dilarutkan bersama dengan 1000 mL air suling. Kemudian larutan gam Arab tersebut ditempatkan di atas pemanas (60°C) dan dicampurkan menggunakan pengaduk magnet selama 30 minit sehingga adunan menjadi sekata. Larutan kemudiannya dibiarkan menyejuk pada suhu bilik sebelum digunakan untuk menyalut bahan logam aloi Al5052. Seterusnya, bagi penyediaan larutan ujian kakisan, bahan larutan 0.5 M H₂SO₄ telah digunakan. Bahan gam Arab disalutkan pada permukaan bahan logam Al5052 menggunakan kaedah pemendapan elektroforesis (EPD) pada nilai voltan 25V dan arus sebanyak 0.01A selama 30 minit (Besra & Liu 2008; Bhakat et al. 2018; Mokhtar 2016).

PENCIRIAN BAHAN

Analisis morfologi dilakukan dengan menggunakan alatan mikroskopi elektron imbasan (SEM), model TM 3000, Hitachi, pada pembesaran 500×. Seterusnya, pengujian rintangan hubungan antara muka (ICR) dilakukan dengan menggunakan alat pengujian keberaliran elektrik rentas satah pada tekanan sebanyak 140 Ncm⁻², arus elektrik antara 0.1 A sehingga 1 A, suhu operasi yang divariasikan iaitu 30°C, 50°C, 70°C dan 90°C dalam Rajah 2. Bagi menyokong analisis morfologi yang dijalankan, ujian kakisan logam asal dan logam disaluti gam Arab menggunakan kaedah elektrokimia dan analisis polarisasi linear tafel dengan mesin potensiostat (*Auto lab*).

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

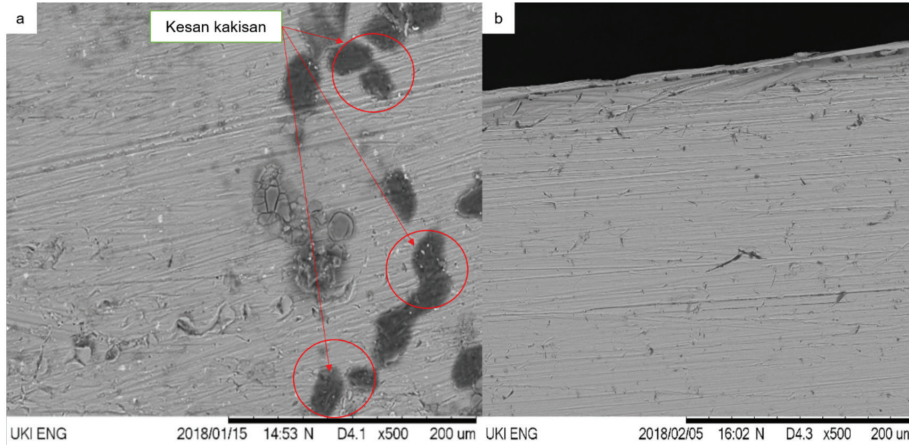
Bagi melihat perbandingan antara bahan asal dan juga bahan yang telah disaluti gam Arab, analisis morfologi dijalankan.



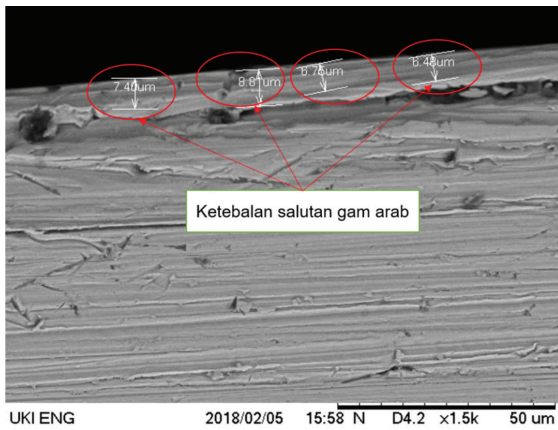
RAJAH 2. Alat pengujian rintangan hubungan antara muka (1) daya mampatan, (2) salutan emas plat (3) kertas karbon (4), logam uji dan (5) mesin pemanas

Rajah 3(a) menunjukkan analisis SEM dengan pembesaran 500× bagi plat logam Al5052 tanpa salutan gam Arab. Didapati adanya kawasan - kawasan yang telah teroksida kesan daripada kakisan yang berlaku memandangkan sifat semula jadi bahan aluminium tersebut sendiri. Keadaan ini seterusnya akan mengakibatkan prestasi sifat mekanik dan nilai keberaliran elektrik bahan. Namun, keadaan berbeza ditunjukkan oleh analisis SEM dalam Rajah 3(b) dengan tiada pengoksidaan terbentuk pada permukaan plat logam Al5052 setelah disaluti gam Arab, ini menunjukkan permukaan logam terhindar daripada berlakunya kakisan yang membantu meningkatkan prestasi keseluruhan plat dwikutub (Ameh et al. 2012). Salutan yang sempurna amat penting dalam memastikan permukaan tersalut secara sekata dan homogen oleh gam Arab (De Oliveira et al. 2012). Keputusan menunjukkan keratan rentas ketebalan salutan gam Arab iaitu antara 7.4 μm sehingga 8.8 μm yang ditunjukkan pada Rajah 4. Penemuan ini adalah seiring dengan kajian lepas dengan gam Arab dapat menurunkan kadar kakisan pada logam keluli lembut dengan kaedah perendaman (Othman et al. 2012). Kajian lepas menunjukkan ketebalan maksimum suatu salutan adalah 10 μm bagi memastikan rintangan kakisan yang baik diperoleh apabila simulasi sel fuel dijalankan (Wang et al. 2018).

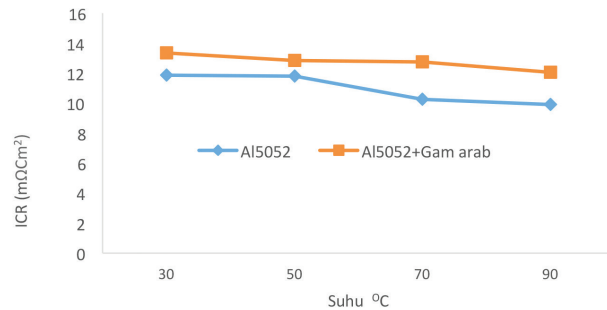
Bagi menilai kesan suhu terhadap kekonduksian plat Al5052, uji kaji ICR telah dijalankan dan keputusannya ditunjukkan dalam Rajah 5. Keputusan bagi plat Al5052 bahan asal menunjukkan nilai ICR semakin menurun dengan meningkatnya suhu iaitu antara 30°C sehingga 90°C yang memiliki nilai 11.8552 sehingga 9.9042 mΩ cm². Berbeza dengan plat yang disaluti gam Arab memiliki nilai ICR lebih tinggi pada suhu antara 30°C sehingga 90°C iaitu sebanyak 13.3497 sehingga 11.8120 mΩ cm². Fenomena yang sama turut diperoleh oleh pengkaji lepas yang disebabkan oleh nilai kepekatan gam Arab yang semakin berkurang pada suhu tinggi (Asri et al. 2016; Mokhtar 2016). Rintangan kakisan diramalkan tinggi dengan kehadiran salutan gam Arab (Mokhtar 2016; Umoren et al. 2008a). Ini adalah kerana nilai rintangan kakisan pada plat aluminium boleh dikaitkan dengan kesan penyerapan gam Arab kerana kehadiran unsur polar iaitu nitrogen (N), oksigen (O) dan



RAJAH 3. Imej SEM bagi (a) Plat logam Al5052 bahan asal dan (b) Plat logam Al5052 bahan disaluti gam Arab



RAJAH 4. Mikrograf SEM bagi keratan rentas ketebalan salutan gam Arab



RAJAH 5. Nilai ICR terhadap plat Al5052 pada suhu berbeza

fosforus (P) yang membentuk lapisan kompleks pada permukaan logam (Umoren et al. 2008b). Umumnya, jumlah arus elektrik yang mengalir melalui bahan yang memiliki rintangan besar adalah kecil. Ini membuktikan gam Arab mampu menghalang daripada berlakunya kakisan pada permukaan logam, seterusnya meningkatkan nilai ICR bagi plat Al5052. Nilai ICR yang diperolehi ini sesuai dengan target DOE iaitu kurang daripada 20 mΩ cm² (Syahram et al. 2012).

Selanjutnya pada Jadual 2 dan Rajah 6 didapati data hasil kajian membuktikan kesan perbandingan laju kakisan untuk plat Al5052 tanpa salutan dan dengan salutan 0.5 g L⁻¹ gam larutan 0,5 M H₂SO₄. Keputusan menunjukkan peningkatan salutan filem pasif pada permukaan logam

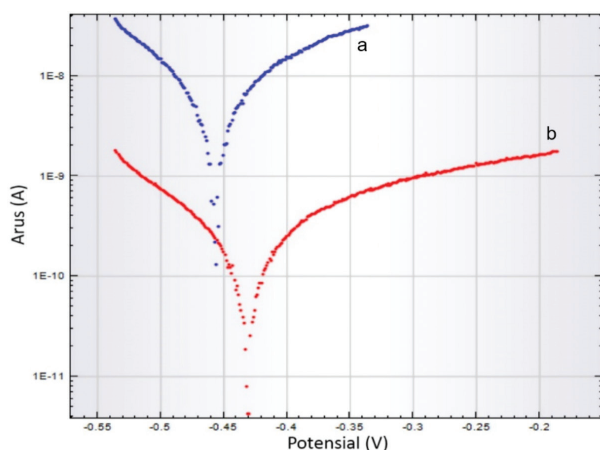
Al5052 kerana kesan daripada perencat hijau gam Arab yang ditandai dengan ketumpatan arus kakisan (I_{corr}) menurun daripada 0.00264 menjadi 0.00012 $\mu\text{A cm}^{-2}$. Hal ini sesuai dengan sasaran DOE yang memiliki I_{corr} adalah kurang daripada 1 $\mu\text{A/cm}^2$. Selain itu, hasil analisis kadar kakisan turut ditentukan berdasarkan luas kakisan pada permukaan logam per tahun (*mils per year*, mpy). Jadual 2 menunjukkan kadar kakisan logam menurun daripada 3.06×10^{-5} mpy kepada 1.61×10^{-6} mpy apabila menggunakan kaedah polarisasi linear tafel. Perihal ini menunjukkan bahawa, kesan gam Arab pada permukaan logam Al5052 dengan menggunakan salutan kaedah EPD dapat menghasilkan salutan yang sekata dan hasil salutan yang stabil.

KESIMPULAN

Keputusan menunjukkan bahawa dengan kepekatan perencat hijau gam Arab sebanyak 0.5 gL⁻¹ dan

JADUAL 2. Ujian kakisan Al5053 bahan asal dan bahan yang disaluti gam Arab 0.5 gL⁻¹ menggunakan kaedah EPD pada nilai voltan 25V dan arus sebanyak 0.01A selama 30 minit

Bahan	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	βa (mV/dec)	βc (mV/dec)	Halaju kakisan (mpy)
Al5052	-454.29	0.00264	59.52	55.94	3.06×10^{-5}
Al5052+gam Arab	-427.17	0.00012	98.75	99.55	1.61×10^{-6}



RAJAH 6. Keputusan ujian polarisasi linear tafel plat Al5053 bagi (a) Bahan asal dan (b) Bahan disaluti gam Arab 0.5 gL⁻¹ menggunakan kaedah EPD pada nilai voltan 25V dan arus sebanyak 0.01A selama 30 minit

menggunakan kaedah salutan EPD boleh mengurangkan kakisan plat Al5052 serta memanjangkan jangka hayat bahan. Pencirian bahan mendapati logam Al5052 yang telah disaluti gam Arab boleh mencapai piawai yang ditetapkan oleh DOE untuk plat dwikutub PEMFC iaitu nilai ICR sebanyak 13.3497 sehingga 11.8120 mΩ cm² dan I_{Corr} 0.00012 μA cm⁻².

PENGHARGAAN

Penghargaan diberikan kepada Kementerian Pelajaran Tinggi Malaysia yang membiayai kajian melalui geran penyelidikan LRGS/2013/UKM-UKM/TP-01 dan Universiti Kebangsaan Malaysia GUP-2016-044.

RUJUKAN

- Antonelli, E., Silva, R.S., Bernardi, M.I.B. & Hernandez, A.C. 2013. Electrophoretic deposition of BaTi_{0.85}Zr_{0.15}O₃ nano powders. *Materials Research* 16(6): 1344-1349.
- Antunes, R.A., de Oliveira, M.C.L., Ett, G. & Ett, V. 2011. Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of the main challenges to improve electrical performance. *Journal of Power Sources* 196(6): 2945-2961.
- Antunes, R.A., Oliveira, M.C.L., Ett, G. & Ett, V. 2010. Corrosion of metal bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(8): 3632-3647.
- Ameh, P.O. 2014. Inhibitory action of *Albizia zygia* gum on mild steel corrosion in acid medium. *African Journal of Pure and Applied Chemistry* 8(2): 37-46.
- Ameh, P.O., Magaji, L. & Salihu, T. 2012. Corrosion inhibition and adsorption behaviour for mild steel by *Ficus glumosa* gum in H₂SO₄ solution. *African Journal of Pure and Applied Chemistry* 6(7): 100-106.
- Asri, N.F., Husaini, T., Abdullah, A.R., Sulong, A.B., Ramli, W.D.W. & Majlan, E.H. 2017. Interfacial contact resistance for Ti-6Al-4V and SUS 316L plates as bipolar plates in PEMFC. *Journal of Mechanical Engineering, Electrical Engineering* 24(4): 1436-1442.
- Asri, N.F., Husaini, T., Sulong, A.B., Majlan, E.H. & Daud, W.R.W. 2016. Coating of stainless steel and titanium bipolar plates for anticorrosion in PEMFC: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* 42(14): 1-14.
- Babu, R.S., de-Barros, A.L.F., de-Almeida, M.M., da-Motta, S.D., Balamurugan, J. & Lee, J.H. 2018. Novel polyaniline/manganese hexacyanoferrate nanoparticles on carbon fiber as binder-free electrode for flexible supercapacitors. *Composites Part B: Engineering*. 143: 141-147.
- Besra, L. & Liu, M. 2006. A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). *Prog. Mater. Sci.* 52(1): 1-61.
- Bhakat, D., Barik, P. & Bhattacharjee, A. 2018. Electrical conductivity behavior of gum Arabic biopolymer-Fe₃O₄ nanocomposites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 112: 73-79.
- Chiang, T.Y., Ay-Su, Tsai, L.C., Sheu, H.H. & Lu, C.E. 2014. Corrosion resistance of 5052 Al-alloy with a Zirconia-rich conversion coating used in bipolar plates in PEMFCs. *International Journal of Electrochemical Science* 9(11): 5850-5863.
- Dadfar, M., Salehi, M., Golozar, M.A. & Trasatti, S. 2016. Surface modification of 304 stainless steels to improve corrosion behavior and interfacial contact resistance of bipolar plates. *International Journal of Hydrogen Energy* 41(46): 21375-21384.
- De Oliveira, M.C.L., Ett, G. & Antunes, R.A. 2012. Materials selection for bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells using the Ashby approach. *Journal of Power Sources* 206: 3-13.
- Feng, K., Li, Z., Sun, H., Yu, L., Cai, X., Wu, Y. & Chu, P.K. 2013. Short communication C/CrN multilayer coating for polymer electrolyte membrane fuel cell metallic bipolar plates. *Journal of Power Sources* 222: 351-358.
- García, M.A.L. & Smit, M.A. 2006. Study of electrodeposited polypyrrole coatings for the corrosion protection of stainless steel bipolar plates for the PEM fuel cell. *Journal of Power Sources* 158(1): 397-402.
- Hermann, A., Chaudhuri, T. & Spagnol, P. 2005. Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* 30(12): 1297-1302.
- Hou, K.H. 2011. Analysis on the corrosion behavior of Al-alloy bipolar plate and pH value of water product for the PEMFC. *International Conference on Environment Science and Engineering* 8: 313-317.
- Huang, N.B., Yu, H., Xu, L.S., Zhan, S., Sun, M. & Kirk, D.W. 2016. Corrosion kinetics of 316L stainless steel bipolar plate with chromiumcarbide coating in simulated PEMFC cathodic environment. *Results in Physics* 6: 730-736.
- Mehta, V. & Cooper, J. 2003. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *Journal of Power Sources* 114(1): 32-53.
- Radzuan, N.A.M., Zakaria, M.Y., Sulong, A.B. & Sahari, J. 2017. The effect of milled carbon fibre filler on electrical conductivity in highly conductive polymer composites. *Composites Part B: Engineering* 110: 153-160.
- Mokhtar, L. 2016. Electric conductivity of gum arabic from *Acacia senegal*. *International Journal of Science and Research* 5(2): 583-593.
- Othman, A., Abu-Dalo, M.A. & Al-Rawashdeh. 2012. Exudate gum from acacia trees as green corrosion inhibitor for mild steel in acidic media. *International Journal of Electrochemical Science* 7: 9303-9324.

- Patni, N., Agarwal, S. & Shah, P. 2013. Greener approach towards corrosion inhibition. *Chinese Journal of Engineering* 2013: 1-10.
- Pech-Rodríguez, W.J., González-Quijano, D., Vargas-Gutiérrez, G. & Rodríguez-Varela, F.J. 2014. Electrophoretic deposition of polypyrrole/Vulcan XC-72 corrosion protection coatings on SS-304 bipolar plates by asymmetric alternating current for PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 39(29): 16740-16749.
- Peter, A. & Sanjay, I.B.O. 2015. Use of natural gums as green corrosion inhibitors: An overview. *International Journal of Industrial Chemistry* 6(3): 153-164.
- Raddaha, N.S., Cordero-Arias, L., Cabanas-Polo, S., Virtanen, S., Roether, J.A. & Boccaccini, A.R. 2014. Electrophoretic deposition of chitosan/h-BN and chitosan/h-BN/TiO₂ composite coatings on stainless steel (316L) substrates. *Materials* 7(3): 1814-1829.
- Rani, B.E.A. & Basu, B.B.J. 2012. Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: An overview. *International Journal of Corrosion* 2012: Article ID 380217.
- Sangeetha, M., Rajendran, S., Muthumegala, T.S. & Krishnaveni. 2011. Green corrosion inhibitors - an overview. *Zastita Materijala* 52: 3.
- Shahram, K., Norman, F., Bronwyn, R. & Frank, R. 2012. A review of metallic bipolar plates for proton exchange membrane fuel cell: Materials and fabrication methods. *J. Advances in Materials Science* 2012: Article ID 828070.
- Tawfik, H., Hung, Y. & Mahajan, D. 2007. Metal bipolar plates for PEM fuel cell - A review. *Journal of Power Sources* 163(2): 755-767.
- Umoren, S.A., Obot, I.B. & Ebenso, E.E. 2008a. Corrosion inhibition of aluminium using exudate gum from *Pachylobus edulis* in the presence of halide ions in HCl. *E-Journal of Chemistry* 5(2): 355-364.
- Umoren, S.A., Obot, I.B., Ebenso, E.E. & Okafor, P.C. 2008b. Eco-friendly inhibitors from naturally occurring exudate gums for aluminium corrosion inhibition in acidic medium. *Portugaliae Electrochimica Acta* 26(3): 267-282.
- Wang, X.Z., Muneshwar, T.P., Fan, H.Q., Cadien, K. & Luo, J.L. 2018. Achieving ultrahigh corrosion resistance and conductive zirconium oxynitride coating on metal bipolar plates by plasma enhanced atomic layer deposition. *Journal of Power Sources* 397: 32-36.
- Woodman, A.S., Anderson, E.B., Jayne, K.D., Kimble, M.C. & Kimble, M.C. 1999. Development of corrosion-resistant coatings for fuel cell bipolar plates. *Physical Sciences* 978: 1-9.
- Yang, Y., Guo, L. & Liu, H. 2010. Corrosion characteristics of SS316L as bipolar plate material in PEMFC cathode environments with different acidities. *International Journal of Hydrogen Energy* 36(2): 1654-1663.

I Gusti Ayu Arwati, Edy Herianto Majlan*, Wan Ramli Wan Daud, Loh Kee Shyuan, Khuzaimah Binti Arifin, Teuku Husaini & Nabilah Afiqah Mohd Radzuan
 Institut Sel Fuel
 Universiti Kebangsaan Malaysia
 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
 Malaysia

Wan Ramli Wan Daud
 Pusat Penyelidikan Teknologi Proses Mampan
 Universiti Kebangsaan Malaysia
 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
 Malaysia

I Gusti Ayu Arwati & Sagir Alva
 Mechanical Engineering Department
 Engineering Faculty
 Mercu Buana University
 11650 Jakarta
 Indonesia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: edyhm71@gmail.com

Diserahkan: 9 Julai 2018
 Diterima: 29 September 2018