

Kesan Pemendapan Elektrofosis Gam Arab Terhadap Kakisan SS316 L dalam Persekitaran Asid

(Effect of Arabic Gum Electrophoresis Desposition on Corrosion of SS316L in Acidic)

I Gusti Ayu Arwati ^{a,c}, Edy Herianto Majlan ^{a,*}, Wan Ramli Wan Daud ^{a,b}, Khuzaimah Binti Arifin ^a, Teuku Husaini ^a, Nabilah Afiqah Mohd Radzuan ^a

^a Fuel Cell Institute

^b Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering & Built Environment
Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia.

Sagir Alva ^c

^c Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering
Mercu Buana University, Indonesia

ABSTRACT

Stainless steel 316L (SS316L) has the potential to be used as a bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs). SS316L has good electrical conductivity and passivity, but if used in acidic environments (pH 3-6), passivity will be changed and cause corrosion. In this study, green inhibitor with an electrophoresis desposition (EPD) technique was used to reduce the corrosion of SS316L plates. The results of the scanning electron microscope (SEM) analysis show that the SS316L surface is smoother and thicker, with a thickness of between 4.9 – 8.9 μm . Testing using linear polarization Tafel method in 0.5 M H_2SO_4 medium, found that the corrosion current value (I_{corr}) decreased with the presence of the coating i.e. from 18.484 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ to 0.859 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, SS316L corrosion rate without coating is 0.7172 mpy, whereas SS316L coated with arabic gum has a lower corrosion rate of 0.033 mpy. From this study, the finding of this study showed that arabic gum with EPD coating technique can provide corrosion protection against the surface of SS316L.

Keywords: Corrosion; Bipolar plate; Stainless steel 316L (SS316L); Arabic gum; Electrophoresis disposition.

ABSTRAK

Keluli tahan karat jenis 316L (SS316L) adalah satu logam yang berpotensi untuk digunakan sebagai plat dwikutub bagi sel fuel membran pertukaran proton (PEMFC). SS316L memiliki sifat kekonduksian elektrik dan kapasitan yang baik, namun jika digunakan pada sekitaran asid (pH 3-6), sifat pelarutan SS316L akan menyebabkan mudah terhakis. Dalam kajian ini, salutan perencat kakisan hijau gam arab dengan kaedah pemendapan elektrofosis (EPD) digunakan untuk mengurangkan kakisan plat SS316L. Hasil analisis scanning electron microscope (SEM) menunjukkan permukaan SS316L lebih halus dan tebal, dengan ketebalan salutan antara 4.9 - 8.9 μm . Pengujian menggunakan kaedah polarisasi linear Tafel dalam media 0.5 M H_2SO_4 mendapati nilai arus kakisan (I_{corr}) semakin menurun dengan adanya salutan iaitu dari 18.484 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ menjadi 0.859 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Kadar kakisan SS316L tanpa salutan adalah 0.7172 mpy, manakala SS316L yang disalut dengan gam arab mempunyai kadar kakisan yang lebih rendah iaitu 0.033 mpy. Dari kajian ini, keputusan menunjukkan bahawa gam arab dengan salutan EPD dapat memberikan perlindungan kakisan terhadap permukaan SS316L.

Kata kunci: Kakisan; Plat dwikutub; Keluli tahan karat SS316L; Gam arab; Pemendapan elektrofosis

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. Pembangunan teknologi yang pesat PEMFC ini membolehkannya digunakan dalam pelbagai aplikasi, memandangkan keupayaannya yang bebas daripada pencemaran karbon dioksida (CO_2), serta suhu operasi sekitar 60°C hingga 100°C. PEMFC terdiri daripada beberapa komponen yang mana salah satu komponen terpenting adalah plat dwikutub (Antunes et al. 2011; Guerrero et al. 2015).

Salah satu bahan plat dwikutub logam yang memiliki sifat mekanik dan konduktiviti yang baik adalah keluli tahan karat 316L (SS316L).

Ketahanan terhadap proses kakisan yang rendah adalah masalah bagi penggunaan SS316L sebagai plat dwikutub pada PEMFC (Hedayati et al. 2016; Kamarudin et al. 2009). Nilai ketahanan kakisan yang ditetapkan oleh Jabatan Tenaga Amerika (US DOE) adalah pada ketumpatan arus (I_{corr}) kurang daripada 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Secara umumnya sifat kakisan bahan logam adalah tinggi (Roszilah et al. 2008). Oleh yang demikian, beberapa pendekatan telah diambil oleh pengkaji terdahulu antaranya adalah dengan menggunakan

kaedah salutan (Dadfar et al. 2016; Lee et al. 2009; Tawfik et al. 2007; Umoren et al. 2008). Penentuan bagi pemilihan bahan dan kaedah salutan adalah sangat penting kerana ia akan mempengaruhi sifat lapisan pasif yang terbentuk pada permukaan logam. Salah satu kaedah salutan yang popular digunakan adalah kaedah pemendapan wap fizikal atau dikenali sebagai *Pengendapan Wap Physical* (PVD). Hasil pengujian salutan dengan kaedah PVD mendapati masih terdapat beberapa lubang kakisan yang terbentuk (*pitting corrosion*) (Huang et al. 2016). Keadaan ini membuktikan bahawa kegagalan salutan ini berpunca daripada keadaan salutan yang tidak sekata pada permukaan logam.

Perencat kakisan berunsur kromat juga sering digunakan sebagai penghambat kakisan pada logam. Namun, kekurangan kaedah ini adalah bahan yang digunakan bersifat toksik yang boleh membahayakan pengguna dan alam sekitar. Oleh itu, jenis perencat hijau kakisan terbiodegradasi merupakan salah satu pilihan untuk mengatasi masalah ini (Patni et al. 2013; Peter & Sanjay 2015; Sangeetha et al. 2011).

Penggunaan perencat hijau kakisan pada logam mengandungi beberapa sebatian organik antaranya adalah oksigen (O), nitrogen (N), fosforus (P) dan sulfur (S) yang berupaya membentuk lapisan pasif (Rani & Basu 2012). Salah satu perencat hijau kakisan iaitu gam arab mula digunakan dalam kajian terkini (Kesavan et al. 2012; Umoren et al. 2008; Umoren & Eduok 2016).

Selain daripada pemilihan bahan perencat hijau, kaedah bagi melakukan salutan juga amat penting. Terdapat beberapa jenis kaedah yang boleh digunakan bagi menyalut permukaan logam antaranya adalah melalui kaedah pemendapan elektroforesis (EPD). Kaedah ini adalah lebih selamat dan mudah untuk dilakukan berbanding dengan kaedah salutan konvensional yang lain, antaranya seperti pemendapan wap fizikal, pemendapan wap kimia, dan penyemburan (Feng et al. 2013; Garcia & Smit 2006; Pech-Rodríguez et al. 2014). Proses EPD menghasilkan molekul yang melarut dalam larutan akueus atau organik yang dipindahkan ke elektrod yang dikenakan di bawah tindakan medan elektrik terpakai (Antonelli et al. 2013). Kaedah EPD bertujuan untuk mencapai salutan yang sekata pada permukaan logam, kepekatan larutan yang dipakai, voltan dan arus juga merupakan faktor lain yang perlu diambil kira. Kebaikan EPD adalah ia menawarkan pembentukan sebatian kompleks keupayaan bagi memperoleh ketebalan salutan yang lebih tepat (Raddaha et al. 2014).

Oleh itu, kajian ini menekankan penggunaan bahan gam arab menggunakan kaedah EPD pada permukaan logam jenis SS316L yang mampu meningkatkan sifat kakisan serta prestasi keseluruhan plat dwi-kutub.

METODOLOGI KAJIAN

Logam yang digunakan dalam kajian ini adalah plat SS316L. Ciri bahan diperolehi dari hasil pengujian oleh PT. Sucofindo, Indonesia (ASTM, E.353-2006) adalah sebagai berikut: (0.312

wt.% Ag; 0.089 wt.% Al; 0.033 wt.% Bi; 0.093 wt.% Cd; 17.86 wt.% Cr; 0.281 wt.% Cu; 1.385 wt.% Mn; 2.059 wt.% Mo; 10.836 wt.% Ni; 0.027 wt.% P; 0.218 wt.% Pb; 0.021 wt.% Sn; 0.080 wt.% V; 0.066 wt.% Zn; 0.290 wt.% Si; 0.030 wt.% C; 0.010 wt.% S; < 0.001 wt.% Cd; < 0.001 wt.% Sb dan 66 wt.% Fe). Manakala, bagi bahan salutan yang digunakan adalah perencat kakisan hijau gam arab yang berasal daripada pokok akasia (Sigma chemical). Seterusnya, ujian kakisan bagi kajian ini dijalankan menggunakan larutan Sulfurik asid (H_2SO_4) dengan kepekatan sebanyak 98%.

PENYEDIAAN BAHAN

Bahan logam yang digunakan dalam kajian ini SS316L, komposisi bahan pada jadual 1 bersaiz 2.5 cm x 2.5 cm dengan tebal 3 mm. Permukaan logam digilap menggunakan mesin pengilap mekanikal dengan kertas pasir bergred 800 dan 1500, selanjutnya dibersihkan dengan air destilasi dan aseton.

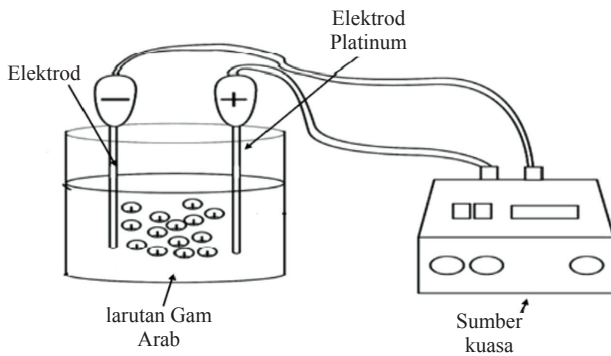
JADUAL 1. Komposisi bahan S316L

Komponen	%
Silver (Si)	0.3
Copper (Cu)	0.3
Chromium (Cr)	17.3
Manganese (Mn)	1.4
Molybdenum (Mo)	2.1
Nikel (Ni)	10.8
Lead (Pb)	0.2
Zink (Zn)	0.1
Silicon (Si)	0.3
Iron (Fe)	Seimbang

Penyediaan permukaan logam yang sempurna adalah penting bagi membolehkan proses penyalutan dengan kaedah EPD dilakukan dengan sempurna (rangkaian alat EPD seperti pada Rajah 1). Gam arab yang digunakan adalah sebanyak 0.5 gram yang dilarutkan bersama air destilasi sebanyak 1000 mililiter. Seterusnya ujian kakisan dilakukan dengan menggunakan larutan sulfurik asid (H_2SO_4) dengan kepekatan 0.5 M.

PENCIRIAN BAHAN

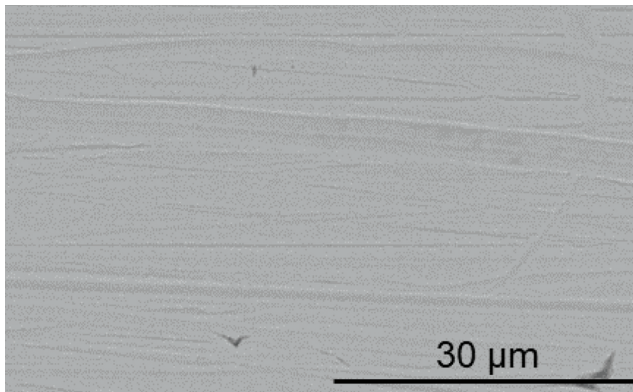
Ujian morfologi dilakukan kajian menggunakan alatan SEM, TM 3000, Hitachi, pada pembesaran 3000X. Untuk menyokong kakisan pada logam tanpa dan dengan salutan gam arab dengan kaedah polarisasi linear Tafel dengan menggunakan alatan potensiostat (Autolab, metrom model) yang dilengkapi dengan sel polarisasi.



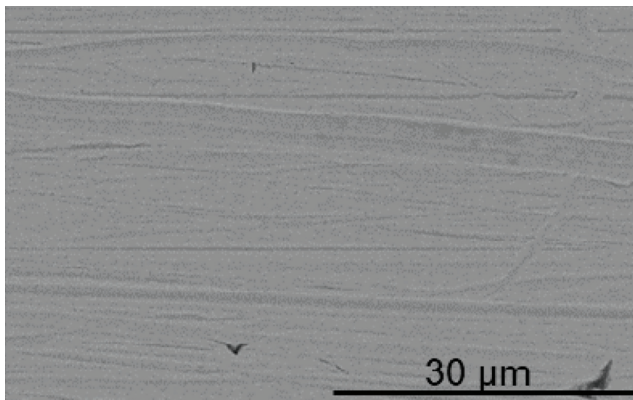
RAJAH 1. Ilustrasi alat pemendapan electroforesis (EPD)

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

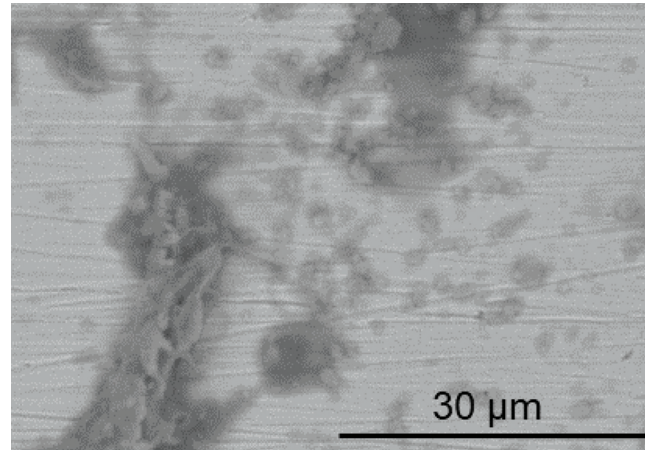
Analisis morfologi imej SEM dengan saiz pembesaran 3000X bagi plat logam SS316L untuk melihat perbandingan diantara bahan asal dan juga bahan yang telah disaluti gam arab. Rajah 2(a) menunjukkan imej SEM tanpa salutan gam arab yang mana permukaan logam adalah tidak sekata dan kasar. Rajah 2 (b) menunjukkan imej SEM permukaan plat logam SS316L hasil analisa selepas melalui persekitaran berasid tanpa salutan gam arab terlihat pada permukaan terjadi kerosakan dan warnanya lebih hitam selanjutnya Rajah 2 (c) keberkesanan gam arab yang tersalut pada logam selepas persekitaran asid yang mana kelihatan permukaan logam tidak rosak dikeranakan adanya film pasif pada permukaan logam.



(a)



(b)

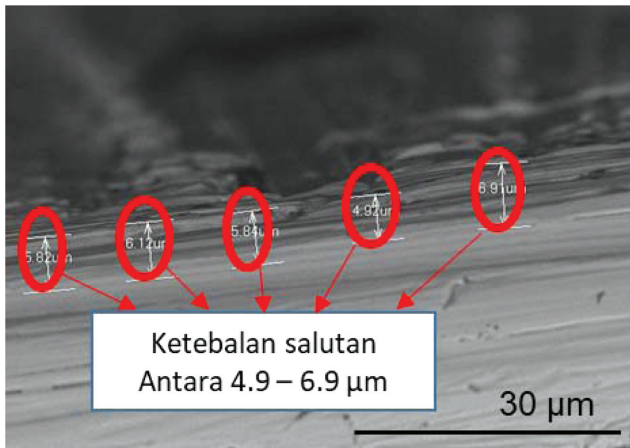


(c)

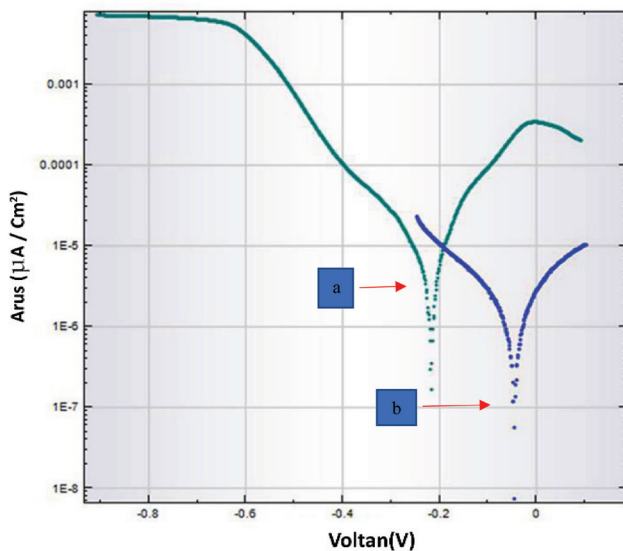
RAJAH 2. Imej SEM bagi plat SS316L; (a) tanpa salutan gam arab dan (b) selepas melalui uji persekitaran asid dan (c) disalut gam arab selepas melalui uji persekitaran asid

Salutan yang homogen adalah penting untuk memastikan permukaan tersalut secara sekata oleh gam arab untuk meningkatkan sifat ketahanan daripada kakisan bahan plat dwikutub (Oliveira et al. 2012). Seterusnya, kajian terperinci terhadap ketebalan salutan gam arab ditunjukkan dalam Rajah 3. Kajian mendapati, keratan rentas ketebalan yang sekata diperoleh iaitu diantara 4.9 μm sehingga 6.9 μm . Hasil kajian ini menyatakan gam arab yang mengandungi unsur O,N dan P boleh terserap pada permukaan logam. Kaitan ketebalan salutan boleh mengurangkan kadar kakisan kerana ada filem pasif pada permukaan logam.

Kesan perencat hijau kakisan pada plat SS316L tanpa salutan dan dengan salutan gam arab menggunakan kaedah EPD dengan waktu 30 minit (25 V, 0.01 A) di dalam medium 0.5 M H_2SO_4 . Pertambahan salutan film pasif pada permukaan logam, ditunjukkan oleh keputusan ujian polarisasi linear Tafel, seperti yang terlihat pada Rajah 4. Rajah 4 menunjukkan peningkatan nilai keupayaan voltan dari -223.18 mV sehingga -103.34 mV. Penurunan nilai kakisan ditunjukkan dengan menurunnya arus kakisan (I_{corr}) dari 18.484 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ menjadi 0.859 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Kadar kakisan (CR) didapati turut menurun dari 0.7172 mpy menjadi 0.033 mpy. Penurunan nilai arus kakisa dan kadar kakisan menunjukkan bahawa kesan gum arab pada permukaan logam SS316L dengan menggunakan salutan kaedah EPD dapat menghasilkan salutan yang terserap secara homogen.



RAJAH 3. Imej SEM keratan rentas ketebalan salutan gam arab



RAJAH 4. Keputusan ujian polarisasi linear tafel bagi (a) plat SS316L tanpa gam arab dan (b) SS316L dengan salutan gam arab 0.5 gram /L

KESIMPULAN

Keputusan dalam kajian ini menunjukkan bahawa ; Perencat hijau gum arab dan kaedah salutan EPD boleh digunakan untuk menurunkan kadar daripada kakisan plat SS316 L. Plat yang tersalut gam arab memiliki kerapatan arus kakisan (I_{corr}) dengan nilai $0.859 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ sesuai dengan matlamat yang ditetapkan oleh DOE untuk plat dwikutub PEMFC harus lebih kecil dari $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

PENGHARGAAN

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

RUJUKAN

- Ahmed, L. & Hamza, B. 2016. Inhibition effect of gum arabic on the corrosion of carbon steel in HCl medium. *7th African Conference on Non Destructive Testing ACNDT 2016 & the 5th International Conference on NDT and Materials Industry and Alloys (IC-WNDT-MI)*
- 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.
- Antonelli, E., Silva, R. S., Bernardi, M. I. B. & Hernandez, A. C. 2013. Electrophoretic deposition of BaTi_{0.85}Zr_{0.15}O₃ nanopowders. *Materials Research* 16(6): 1344-1349.
- Antunes, R. A., 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.
- 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): 9135-9148.
- 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. ScienceDirect 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.
- Feng, K., Li, Z., Sun, H., Yu, L., Cai, X., Wu, Y. & Chu, P. K. 2013. Short communication 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.
- Guerrero, N., Cisneros, M., Gervasio, D., Francisco, J. & Robles, P. 2015. Approaches to polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) and their cost. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52: 897-906.

- Hedayati, A.S., Asghari, A.H., Alinoori, M. K. & Vuorinen, E. 2016. Effects of coating thickness on corrosion and contact resistance behavior of TiN coated AISI 316L as bipolar plates for PEMFC. *Iranian Journal of Hydrogen & Fuel Cell*. 2: 137-149.
- 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 Journal of Green Energy* 8: 313-317.
- Huang, N. B., Yu, H., Xu, L. S., Zhan, S., Sun, M. & Kirk, D. W. 2016b. Corrosion kinetics of 316L stainless steel bipolar plate with chromiumcarbide coating in simulated PEMFC cathodic environment, *Results in Physics* 6: 730-736.
- Kamarudin, S.K., Daud, W.R.W., Som, A.M. & Mohd Shahbudin. 2009. Conceptual Design of 5 kW PEM Fuel Cell. *Jurnal Kejuruteraan* 19: 43-54.
- Kesavan, D., Gopiraman, M. & Sulochana, N. 2012. Green Inhibitors for Corrosion of Metals: A Review. *Chemical Science Review and Letters* 1(1): 1-8.
- Lee, S. B., Cho, K. H., Lee, W. G. & Jang, H. 2009. Improved corrosion resistance and interfacial contact resistance of 316L stainless-steel for proton exchange membrane fuel cell bipolar plates by chromizing surface treatment, *Journal of Power Sources* 187: 318-323.
- Mehta, V., Cooper, J. 2003. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *Journal of Power Sources* 114(1): 32-53.
- Mokhtar, L. 2016. Electrical conductivity of gum arabic from acacia senegal, *International Journal of Science and Research* 5(2): 583-593.
- 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.
- 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.
- 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.
- Rani, B. E. A. & Basu, B. B. J. 2012. Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: An overview, *International Journal of Corrosion*. Article ID 380217.
- Roszilah, H., Khairul A., Nayan M., Kamarudin M.Y. & Marzuliani W.M. 2009. Penentuan tahap kakisan tetlang keluli menggunakan kaedah pengecilan amplitudo. *Jurnal Kejuruteraan* 21: 63-72.
- Sangeetha, M., Rajendran, S., Muthumegala, T. S. & Krishnaveni. 2011. Green corrosion inhibitors-An Overview. *Journal of Materials Protection* 52(1): 3-19.
- Tawfik, H., Huang Y. & Mahajan, D. 2007. Metal bipolar plates for PEM fuel cell-A review. *Journal of Power Sources* 163(2): 755-767.
- Umoren, S. A. 2008. Inhibition of aluminium and mild steel corrosion in acidic medium using Gum Arabic. *Cellulose* 15(5): 751-761.
- Umoren, S. A. & Eduok, U. M. 2016. Application of carbohydrate polymers as corrosion inhibitors for metal substrates in different media: A review. *Carbohydrate Polymers* 140: 314-341.
- Umoren, S. A., Obot, I. B. & Ebenso, E. E. 2008. 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. 2008. Eco-friendly inhibitors from naturally occurring exudate gums for aluminium corrosion inhibition in acidic medium. *Portugaliae Electrochimica Acta* 26(3): 267-282.
- 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. *American Electroplaters and surface Finisher Society. Proceeding* 6: 21-24,
- 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
 Fuel Cell Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia,
 43600 UKM Bangi, Selangor, Darul Ehsan, Malaysia.

Mechanical Engineering Departement, Faculty of Engineering,
 Mercu Buana University, Meruya Selatan, Kembangan,
 West Jakarta, 11650, Indonesia.

Wan Ramli Wan Daud
 Fuel Cell Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia,
 43600 UKM Bangi, Selangor, Darul Ehsan, Malaysia.

Jabatan Kejuruteraan Kimia dan Proses,
Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina,
Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia.

Khuzaimah Binti Arifin
Fuel Cell Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 UKM Bangi, Selangor, Darul Ehsan, Malaysia.

Teuku Husaini
Fuel Cell Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 UKM Bangi, selangor, Darul Ehsan, Malaysia.

Sagir Alva
Mechanical Engineering Departement, Faculty of Engineering,
Mercu Buana University, Meruya Selatan, Kembangan,
West Jakarta, 11650, Indonesia.

Nabilah Afiqah Mohd Radwan
Fuel cell Institute,
Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

*Edy Herianto Majlan
Fuel Cell Institute,
Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

*Corresponding author;
email: edy@ukm.edu.my, edyhm71@gmail.com

Received date: 5th April 2018
Accepted date: 13th September 2017
Online First date: 1st October 2018
Published date: 30th November 2018