

## Analisis Keberkesanan Benziltriethylamonium Klorida sebagai Perencat Kakisan bagi Perlindungan Keluli Karbon

(Efficiency Analysis of Benzyltriethylammonium Chloride as Corrosion Inhibitor for Carbon Steel Protection)

MOHD NAZRI IDRIS\*, ABDUL RAZAK DAUD & NORINSAN KAMIL OTHMAN

### ABSTRAK

*Keberkesanan perencatan benziltriethylamonium klorida (BK) terhadap perlindungan kakisan keluli karbon di dalam 1 M asid asetik telah dianalisis dengan menggunakan kaedah ujian kehilangan berat. Matlamat kajian adalah untuk menilai tahap kecekapan perencatan BK berdasarkan perubahan nilai kepekatan perencat berkenaan dan suhu. Analisis kehilangan berat menunjukkan kadar kakisan keluli karbon berjaya dikurangkan dengan penggunaan kepekatan BK yang lebih tinggi dan nilai kecekapan perencatan BK mencapai sehingga 70%. Namun kadar kakisan didapati meningkat selari dengan peningkatan suhu. Analisis termodinamik mendapati perencatan BK berjaya mengurangkan proses pelarutan ion-ion logam melalui pembentukan lapisan filem nipis pada permukaan keluli karbon. Analisis juga menunjukkan sebatian BK berupaya menyerap pada permukaan keluli karbon melalui kedua-dua kaedah penyerapan fizikal dan kimia. Proses penyerapan BK pada permukaan keluli karbon didapati lebih menjurus kepada model isoterma penyerapan Langmuir. Analisis morfologi menggunakan mikroskop imbasan elektron turut mengesahkan berlakunya perencatan BK pada tapak permukaan keluli karbon. Keseluruhan kajian mendapati sebatian BK berupaya melindungi keluli karbon daripada mengalami kakisan di dalam medium asid asetik.*

*Kata kunci: Kecekapan perencatan; keluli karbon; penyerapan; perencat kakisan*

### ABSTRACT

*Inhibition efficiency of benzyltriethylammonium chloride (BK) for carbon steel protection in 1 M acetic acid has been analyzed by weight loss method. The objective of this study was to evaluate the inhibition efficiency of BK by varying the concentration and temperature. Weight loss analysis showed that corrosion rate of carbon steel was successfully reduced as the inhibitor concentration increased and the inhibition efficiency up to 70% has been achieved. Meanwhile, the corrosion rate increased with the rise of temperature. Analysis of thermodynamic indicated that this inhibitor had a potential to reduce the dissolution process of metallic ions by forming a thin film layer on the steel surface. It was proven that BK is able to adsorb on the carbon steel surface by both physisorption and chemisorption processes. The adsorption process was seen to follow Langmuir adsorption isotherm. Morphology analysis by scanning electron microscope also confirmed that inhibition process occurred at the surface of carbon steel. This study showed that BK is capable of protecting carbon steel from actively corrode in acetic acid.*

*Keywords: Adsorption; carbon steel; corrosion inhibitor; inhibition efficiency*

### PENGENALAN

Keluli karbon banyak digunakan dalam industri berasaskan petroleum, pembinaan tangki simpanan dan petrokimia. Antara permasalahan utama penggunaan keluli ini adalah kakisan yang disebabkan oleh medium berasid. Larutan berasid seperti HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan asid asetik lazim digunakan dalam proses pencelup-asidan untuk menyingkirkan kerak dan karat pada keluli karbon terutamanya dalam industri pemprosesan (Elsentriecy et al. 2007; Sartor et al. 2009). Dalam perusahaan petroleum, asid asetik digunakan sebagai agen pengelat bagi proses perawatan rangsangan di dalam paip keluli dan sebagai larutan pemudah bagi pembersihan permukaan keluli (Portier et al. 2007; Zhu et al. 2011). Penggunaan bahan perencat bagi menghalang kakisan pada keluli yang melibatkan penggunaan medium berasid merupakan kaedah yang paling praktikal. Bahan

perencat organik yang terdiri daripada atom yang berelektronegatif tinggi seperti nitrogen, sulfur, fosforus dan oksigen serta sebatian dengan kumpulan bercincin aromatik didapati amat berkesan bagi perencatan kakisan (Akrouf et al. 2012; Tang et al. 2013).

Antara perencat organik yang berpotensi sebagai perencat kakisan adalah daripada sebatian kuarterner amonium. Sebatian ini mudah untuk disintesis dengan penggunaan bahan mentah yang relatifnya murah, di samping keupayaannya untuk membentuk dan menyediakan tapak awan elektron pada cincin aromatik atau daripada kehadiran atom berelektronegatif yang tinggi seperti nitrogen dan oksigen serta sebatian berantai panjang, merupakan faktor utama keupayaan perencatan yang baik bagi bahan kuarterner amonium (Shokry et al. 1998). Popova et al. (2011) membuktikan

dengan penggunaan sebatian kuaterner amonium yang mengandungi pelbagai struktur bercincin aromatik berupaya memberikan sifat perencatan yang baik terhadap keluli karbon di dalam larutan HCl dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Ini membuktikan struktur molekul kimia yang berlainan amat berperanan dalam meningkatkan sifat perencatan yang baik. Al-Sabagh et al. (2011) menunjukkan bentuk dan panjang sesuatu rantaian akil turut berperanan penting terhadap kecekapan perencatan keluli karbon. Selain itu penggunaan N-akil kuaternari amonium juga menunjukkan sifat penjerapan yang baik terhadap perlindungan kakisan pada keluli nirkarat feritik di dalam medium H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Fuchs-Godec 2006). Sebatian kuaternari amonium berupaya membentuk lapisan filem nipis pada permukaan logam bagi menghalang pelarutan ion logam dan pertukaran cas daripada berlaku (Foss et al. 2010).

Dalam kajian ini, sebatian BK telah dikaji keupayaannya terhadap perlindungan kakisan keluli karbon di dalam 1 M asid asetik. Penggunaan bahan ini dengan kehadiran kumpulan aromatik benzil serta rantaian tiga kumpulan etil yang bertindak sebagai kumpulan hidrofilik pendek masih belum dieksplotasi sepenuhnya di dalam medium asid asetik. Fokus kajian adalah dengan penggunaan kepekatan BK dan suhu pengoperasian yang berbeza melalui analisis ujian kehilangan berat dan pengesanan analisis morfologi permukaan.

#### BAHAN DAN KAEDAH

Komposisi keluli karbon (wt. %) yang digunakan dalam kajian ini terdiri daripada 0.26 C, 0.47 Mn, 0.43 Si, 0.01 P, 0.02 Ni, 0.02 Cu, 0.13 Al dan bakinya adalah Fe. Keluli karbon dipotong secara mekanik kepada kepingan dengan saiz 12×10×5 mm. Sebatian BK diperolehi daripada Sigma Aldrich Sdn. Bhd. Kepekatan BK dalam kajian ini ditetapkan daripada 1.0 hingga 15.0 mM. Asid asetik dengan kepekatan 99% dilarutkan kepada 1 M dengan menggunakan air suling. Medium larutan ujian sebanyak 200 mL disediakan untuk setiap ujian.

Bagi uji kaji kehilangan berat, sampel digilap menggunakan kertas emeri daripada grit 240 hingga 1200. Untuk setiap peringkat gilapan, sampel dibersihkan dan dibilas dengan menggunakan air suling serta aseton. Suhu uji kaji ditetapkan pada 25, 40 dan 55°C dengan tempoh rendaman selama enam jam. Sampel kemudiannya dikeluarkan dan dibersihkan berdasar tatacara piawaian ASTM G1-03. Semua sampel diukur dan ditimbang sebelum dan selepas dimasukkan di dalam medium larutan. Semua uji kaji diulang sebanyak tiga kali dan nilai purata ditentukan. Kadar kakisan ( $C_r$ ) dengan dan tanpa penggunaan BK ditentukan berdasarkan (1);

$$C_r = \Delta W / At, \quad (1)$$

dengan  $\Delta W$  adalah purata kehilangan berat bagi sampel keluli karbon;  $A$  adalah jumlah luas permukaan; dan  $t$  adalah tempoh rendaman. Nilai litupan permukaan ( $\theta$ ) ditentukan melalui (2);

$$\theta = 1 - C_r' / C_r, \quad (2)$$

dengan  $C_r'$  dan  $C_r$  masing-masing adalah kadar kakisan keluli karbon dengan dan tanpa kehadiran BK. Nilai kecekapan perencatan ( $IE\%$ ) seterusnya dihitung menggunakan (3);

$$IE\% = 100(1 - C_r' / C_r). \quad (3)$$

Analisis morfologi pada permukaan keluli karbon daripada uji kaji kehilangan berat turut dijalankan dengan menggunakan mikroskop imbasan elektron model Hitachi TM3000.

#### HASIL DAN PERBINCANGAN

Analisis kehilangan berat bagi penentuan kadar kakisan keluli karbon dan kecekapan perencatan BK, masing-masing ditunjukkan dalam Rajah 1(a) dan 1(b). Keputusan menunjukkan kadar kakisan pada semua suhu berkurang dengan peningkatan kepekatan BK. Penurunan yang ketara dicatatkan pada penggunaan suhu 55°C iaitu sebanyak 0.473 mg/cm<sup>2</sup>.h bagi kepekatan BK 15 mM, berbanding 0.723 mg/cm<sup>2</sup>.h pada larutan kawalan bagi suhu yang sama. Penurunan kadar kakisan dengan peningkatan kepekatan BK masing-masing pada suhu 25 dan 40°C mencatatkan nilai sekitar 0.04 hingga 0.10 dan 0.20 hingga 0.30 mg/cm<sup>2</sup>.h berbanding nilai kawalan.

Keadaan ini menyebabkan kecekapan perencatan meningkat dengan peningkatan kepekatan BK. Rajah 1(b) menunjukkan nilai kecekapan perencatan BK sebanyak 70% telah dicapai dengan penggunaan 15 mM BK pada suhu 40°C. Peningkatan kepekatan menyebabkan molekul BK berupaya untuk meningkatkan tahap penjerapannya pada tapak permukaan keluli karbon bagi mewujudkan lapisan filem nipis. Keadaan ini dapat diperhatikan dengan meningkatnya nilai litupan permukaan dengan penambahan kepekatan dan seterusnya meningkatkan kecekapan BK sebagai perencat. Kehadiran molekul BK pada tapak aktif berupaya untuk menyingkirkan molekul air dan mengambil alih penjerapan pada permukaan keluli karbon. Proses tindak balas ini dapat dijelaskan melalui (4);



dengan  $BK_{(sol)}$  dan  $BK_{(ads)}$  masing-masing merujuk kepada molekul BK di dalam larutan dan yang terjerap pada permukaan keluli karbon.  $H_2O_{(ads)}$  adalah molekul air yang terjerap pada permukaan keluli karbon dan  $x$  merujuk kepada saiz pecahan molekul air yang diambil alih molekul BK. Pembentukan lapisan filem nipis pada permukaan keluli berupaya menghalang molekul air dan medium asid asetik daripada terus berinteraksi dengan permukaan keluli (Idris et al. 2013). Seterusnya proses pelarutan ion logam dapat direncatkan.

Rajah 1(a) turut menunjukkan kadar kakisan meningkat dengan peningkatan suhu dari 25 hingga 55°C.

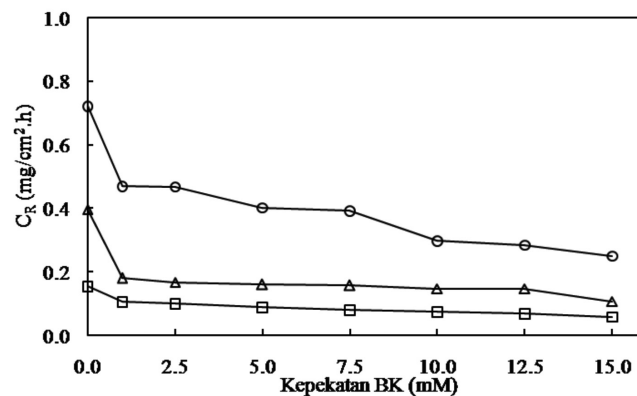
Nilai peningkatan didapati sangat ketara pada suhu 55°C. Keadaan ini berlaku pada semua penggunaan kepekatan BK. Berdasarkan Rajah 1(b), penggunaan suhu pada 40°C didapati berjaya memberikan nilai kecekapan perencatan BK yang optimum pada permukaan keluli. Sebaliknya, tahap kecekapan perencatan BK pada suhu 55°C kembali menyusut pada semua kepekatan yang digunakan. Peningkatan kadar kakisan keluli karbon dan penurunan kecekapan perencatan BK pada suhu 55°C ini disebabkan oleh aktiviti penyahjerapan molekul BK pada permukaan keluli karbon. Aktiviti penyahjerapan ini boleh terjadi akibat daripada aktiviti penjerapan BK yang berlaku secara fizikal pada tapak permukaan keluli. Penjerapan secara fizikal berlaku akibat daya tarikan daya elektrostatik atau Van der Waals yang wujud antara cas yang berlainan pada tapak permukaan antara molekul BK dan keluli karbon. Dengan kenaikan suhu, molekul BK mendapat cukup tenaga untuk dinyahjerap dan menggalakkan tindak balas kakisan berlaku.

Secara termodinamik, kesan suhu terhadap pengaruh perencatan molekul BK dapat dinilai melalui penentuan tenaga pengaktifan tindak balas ( $E_a$ ), menggunakan persamaan Arrhenius (5);

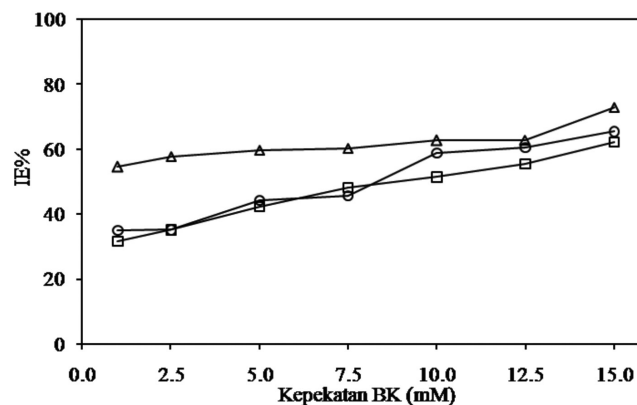
$$\ln C_r = \ln A - E_a/RT, \quad (5)$$

dengan  $C_r$  adalah kadar kakisan;  $A$  adalah faktor frekuensi Arrhenius;  $R$  adalah pemalar gas dan  $T$  adalah suhu mutlak.

Berdasarkan plot regresi lurus  $\ln C_r$  melawan  $1/T$ , nilai  $E_a$  dapat ditentukan. Rajah 2 menunjukkan graf persamaan Arrhenius yang dianalisis, manakala Jadual 1 menunjukkan data  $E_a$  yang dikira. Keputusan mendapati nilai  $E_a$  dengan kehadiran BK menyusut berbanding  $E_a$  larutan kawalan. Nilai  $E_a$  yang lebih rendah atau menghampiri nilai  $E_a$  kawalan menunjukkan wujudnya mekanisme penjerapan BK secara kimia pada permukaan keluli karbon (Behpour et al. 2010). Keadaan ini boleh disebabkan oleh berlakunya peningkatan pada nilai litupan permukaan dan langkah penentuan kadar bagi pelarutan logam daripada keluli karbon telah bertukar kepada peresapan ion melalui lapisan filem nipis bahan perencat dan hasil kakisan yang terbentuk (Behpour et al. 2010). Pada pembentukan darjah pelitupan BK yang tinggi, proses pertama iaitu kadar kakisan pada permukaan keluli karbon tidak menjadi peranan utama atau kadar kakisan yang berlaku adalah minimum. Sebaliknya,

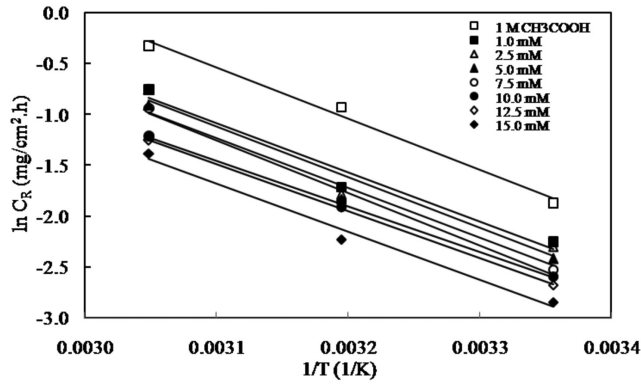


(a)



(b)

RAJAH 1. Analisis (a) kadar kakisan keluli karbon dan (b) kecekapan perencatan BK dalam 1 M asid asetik dengan kepekatan BK yang berbeza pada suhu (□) 25, (Δ) 40 dan (○) 55°C



RAJAH 2. Plot Arrhenius keluli karbon dalam 1 M asid asetik tanpa dan dengan kehadiran BK

JADUAL 1. Parameter pengaktifan keluli karbon dengan dan tanpa kehadiran BK

Kepekatan BK (mM)	$E_a$ (kJ/mol)	$\Delta H$ (kJ/mol)	$\Delta S$ (J/mol.K)
0.0	96.62	39.36	-128.0
1.0	92.65	37.63	-138.0
2.5	95.80	39.00	-133.9
5.0	93.74	38.11	-137.7
7.5	98.88	40.34	-130.9
10.0	86.07	34.77	-149.9
12.5	88.84	35.98	-146.4
15.0	90.61	36.75	-145.6

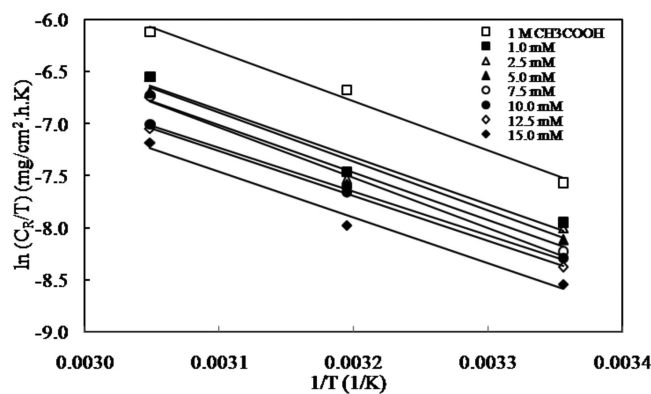
mekanisme kakisan ini disebabkan oleh tindak balas langsung antara molekul BK dengan permukaan logam. Keadaan yang sama turut dijelaskan oleh Riggs dan Hurd (1967). Dalam keadaan ini nilai  $E_a$  dengan kehadiran BK boleh menjadi lebih rendah berbanding nilai  $E_a$  kawalan.

Kesan suhu juga diperhatikan melalui analisis perubahan entalpi ( $\Delta H$ ) dan entropi ( $\Delta S$ ). Nilai-nilai ini ditentukan melalui persamaan perubahan keadaan seperti (6);

$$C_r = (RT/Nh)exp(\Delta S/R)exp(-\Delta H/RT), \quad (6)$$

dengan  $C_r$  adalah kadar kakisan;  $R$  adalah pemalar gas;  $T$  adalah suhu mutlak;  $N$  adalah nombor Avogadro; dan  $h$  adalah pemalar Plank. Plot antara  $\ln(C_r/T)$  melawan  $1/T$  memberikan garis regresi lurus dengan kecerunan  $-\Delta H/R$  dan pintasan  $(\ln(R/Nh)+\Delta S/R)$ . Keputusan ini ditunjukkan dalam Rajah 3.

Keseluruhan data analisis ini dipamerkan dalam Jadual 1. Analisis perubahan keadaan menunjukkan semua nilai entalpi yang diperolehi bernilai positif dan ini mengesahkan tindak balas kakisan keluli berlaku secara endotermik. Nilai entropi juga adalah rendah dan bernilai negatif.



RAJAH 3. Perubahan keadaan keluli karbon dalam 1 M asid asetik tanpa dan dengan kehadiran BK

Nilai entropi yang rendah menunjukkan tahap perawakan molekul daripada keluli karbon berkurang akibat peningkatan kepekatan BK. Keadaan ini mengesahkan proses penyerapan molekul BK berlaku pada permukaan keluli karbon.

Penentuan mekanisme penyerapan BK pada permukaan keluli karbon turut ditentukan melalui beberapa model penyerapan isoterma. Keputusan analisis menunjukkan penyerapan BK pada permukaan keluli karbon lebih menjurus kepada penyerapan isoterma Langmuir dengan nilai pemalar regresi, ( $R^2$ ) yang lebih menghampiri uniti. Model penyerapan isoterma Langmuir ditentukan melalui (7);

$$C/\theta = 1/K_{ads} + C, \quad (7)$$

dengan  $C$  adalah kepekatan BK;  $\theta$  adalah litupan permukaan; dan  $K_{ads}$  adalah pemalar penyerapan Langmuir. Rajah 4 menunjukkan plot penyerapan isoterma Langmuir bagi penyerapan BK pada permukaan keluli karbon. Nilai pemalar penyerapan isoterma Langmuir pada suhu 25, 40 dan 55°C masing-masing adalah 0.298, 0.894, dan 0.283  $\text{mM}^{-1}$ . Nilai pemalar penyerapan yang tinggi pada suhu 40°C menunjukkan molekul BK menyerap dengan sangat baik pada permukaan keluli karbon.

Tenaga bebas penyerapan ( $\Delta G$ ) bagi molekul BK pada permukaan keluli boleh ditentukan dengan menggunakan (8);

$$\Delta G = -RT \ln(55.5K_{ads}), \quad (8)$$

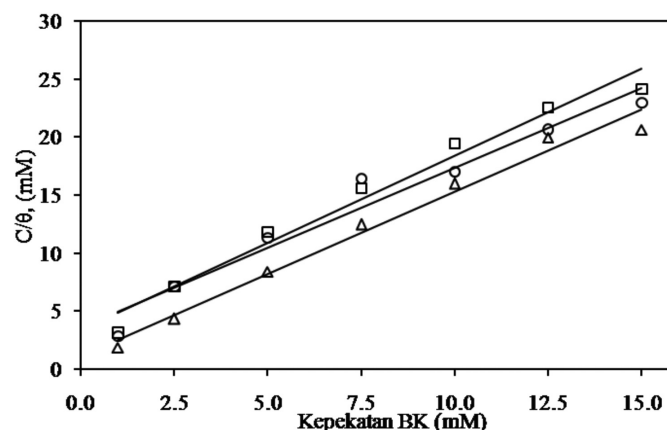
dengan  $R$  adalah pemalar gas;  $T$  adalah suhu mutlak; dan nilai pemalar 55.5 merujuk kepada kepekatan air dalam larutan yang digunakan. Nilai  $\Delta G$  yang dihitung adalah -24.07, -28.13 dan -26.36 kJ/mol masing-masing bagi suhu 25, 40 dan 55°C. Keseluruhan nilai ini adalah negatif. Keadaan ini menunjukkan tindak balas penyerapan berlaku secara spontan dan nilai yang lebih besar menunjukkan tahap kestabilan penyerapan yang tinggi berlaku pada

permukaan keluli. Nilai  $\Delta G$  juga menunjukkan molekul BK berupaya menyerap secara fizikal dan juga kimia pada permukaan keluli dengan nilai  $\Delta G$  keseluruhannya berada dalam lingkungan julat -20 hingga -40 kJ/mol. Sekiranya nilai ini kurang daripada -20 kJ/mol (lebih positif), hanya penyerapan fizikal sahaja yang akan berlaku. Sebaliknya, penyerapan secara kimia sepenuhnya berlaku apabila nilai  $\Delta G$  lebih besar daripada -40 kJ/mol (Fuchs-Godec 2006). Keputusan ini didapati setara dengan hasil analisis termodinamik.

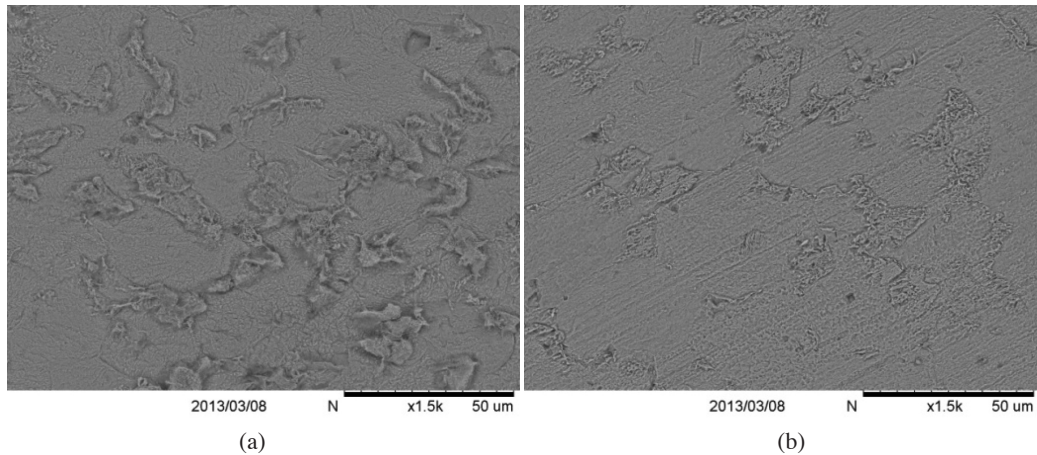
Analisis permukaan menggunakan mikroskop imbasan elektron dilakukan bagi mengenal pasti kesan perencatan BK pada morfologi permukaan keluli karbon. Rajah 5(a) menunjukkan mikrograf permukaan keluli karbon selepas direndam dalam 1 M asid asetik selama enam jam tanpa penggunaan BK. Mikrograf menunjukkan permukaan keluli telah mengalami kesusnahan yang ketara disebabkan ketiadaan BK. Manakala Rajah 5(b) menunjukkan imej keluli karbon yang direndam dengan parameter yang sama tetapi dengan kehadiran 5 mM BK. Analisis mendapati permukaan keluli dapat dilindungi dan tiada kesusnahan yang ketara didapati berlaku akibat daripada kehadiran perencat BK. Keadaan ini menunjukkan penyerapan filem nipis perencat BK pada permukaan keluli karbon berupaya memberi perlindungan yang baik bagi mengurangkan tindak balas kakisan.

#### KESIMPULAN

Dalam kajian ini, bahan perencat BK berupaya menunjukkan sifat-sifat penyerapan yang baik bagi melindungi kakisan pada permukaan keluli karbon di dalam 1 M asid asetik. Keupayaan penyerapan amat dipengaruhi oleh nilai kepekatan BK dan suhu. Pembentukan lapisan filem nipis pada permukaan keluli karbon disahkan berlaku dengan tahap kecekapan perencatan mencapai 70%. Keupayaan perencatan ini turut disokong oleh analisis morfologi pada permukaan keluli karbon. Penyerapan BK pada permukaan keluli



RAJAH 4. Analisis penyerapan isoterma Langmuir pada suhu (□) 25, (Δ) 40 dan (○) 55°C



RAJAH 5. Analisis SEM keluli karbon dalam 1 M asid asetik (a) tanpa dan (b) dengan 5 mM BK

karbon didapati berlaku secara penjerapan fizikal dan kimia melalui mekanisme penjerapan isoterma Langmuir.

#### PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Kementerian Pelajaran Malaysia dan Universiti Kebangsaan Malaysia atas sokongan dana melalui geran penyelidikan ERGS/1/2012/STGS05/UKM/02/2. Salah seorang penulis juga ingin merakamkan penghargaan kepada Universiti Sains Malaysia atas kemudahan cuti belajar yang diberikan di bawah Rancangan Pendidikan Tinggi Kakitangan Akademik (RPTKA).

#### RUJUKAN

- Akrout, H., Bousselmi, L., Maximovitch, S., Triki, E. & Dalard, F. 2012. Adsorption of corrosion inhibitors (SA, HEDP) using EQCM: Chloride effect and synergic behavior. *Journal of Materials Science* 47(23): 8085-8093.
- Al-Sabagh, A.M., Kandil, N.G., Ramadan, O., Amer, N.M., Mansour, R. & Khamis, E.A. 2011. Novel cationic surfactants from fatty acids and their corrosion inhibition efficiency for carbon steel pipelines in 1 M HCl. *Egyptian Journal of Petroleum* 20(2): 47-57.
- Behpour, M., Ghoreishi, S.M., Mohammadi, N., Soltani, N. & Salavati-Niasari, M. 2010. Investigation of some Schiff base compounds containing disulfide bond as HCl corrosion inhibitors for mild steel. *Corrosion Science* 52(12): 4046-4057.
- Elsentriecy, H.H., Azumi, K. & Konno, H. 2007. Effect of surface pretreatment by acid pickling on the density of stannate conversion coatings formed on AZ91 D magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology* 202(3): 532-537.
- Foss, M., Diplas, S. & Gulbrandsen, E. 2010. Mechanistic study of adsorption of cetyltrimethyl ammonium bromide on high purity iron using contact angle, polarization resistance and XPS. *Electrochimica Acta* 55(17): 4851-4857.
- Fuchs-Godec, R. 2006. The adsorption, CMC determination and corrosion inhibition of some N-alkyl quaternary ammonium salts on carbon steel surface in 2 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 280(13): 130-139.
- Idris, M.N., Daud, A.R., Othman, N.K. & Jalar, A. 2013. Corrosion control by benzyl triethylammonium chloride: Effects of temperature and its concentration. *International Journal of Engineering & Technology* 13(3): 47-51.
- Popova, A., Christov, M., Vasilev, A. & Zwetanova, A. 2011. Mono- and dicationic benzothiazolic quaternary ammonium bromides as mild steel corrosion inhibitors. Part I: Gravimetric and voltammetric results. *Corrosion Science* 53(2): 679-686.
- Portier, S., Andre, L. & Vuatez, F.D. 2007. *Review on Chemical Stimulation Techniques in Oil Industry and Applications to Geothermal Systems*. Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe Work Package 4: Drilling, stimulation and reservoir assessment Participant No 28: Deep Heat Mining Association – DHMA, Switzerland. pp. 1-32.
- Riggs, O.L. & Hurd, R.M. 1967. Temperature coefficient of corrosion inhibitor. *Corrosion (NACE)* 23: 252-258.
- Sartor, M., Buchloh, D., Rogener, F. & Reichardt, T. 2009. Removal of iron fluorides from spent mixed acid pickling solutions by cooling precipitation at extreme temperatures. *Chemical Engineering Journal* 153(1-3): 50-55.
- Shokry, H., Yuasa, M., Sekine, I., Issa, R.M., El-Baradie, H.Y. & Gomma, G.K. 1998. Corrosion inhibition of mild steel by Schiff base compounds in various aqueous solutions: Part I. *Corrosion Science* 40(12): 2173-2186.
- Tang, Y., Zhang, F., Hu, S., Cao, Z., Wu, Z. & Jing, W. 2013. Novel benzimidazole derivatives as corrosion inhibitors of mild steel in the acidic media. Part I: Gravimetric, electrochemical, SEM and XPS studies. *Corrosion Science* 74: 271-282.
- Zhu, S.D., Fu, A.Q., Miao, J., Yin, Z.F., Zhou, G.S. & Wei, J.F. 2011. Corrosion of N80 carbon steel in oil field formation water containing CO<sub>2</sub> in the absence and presence of acetic acid. *Corrosion Science* 53(10): 3156-3165.

Mohd Nazri Idris\*, Abdul Razak Daud & Norinsan Kamil Othman  
 Pusat Pengajian Fizik Gunaan  
 Fakulti Sains dan Teknologi  
 Universiti Kebangsaan Malaysia  
 43600 Bangi, Selangor Darul Ehsan  
 Malaysia

Mohd Nazri Idris\*  
Pusat Pengajian Kejuruteraan Bahan dan Sumber Mineral  
Kampus Kejuruteraan, Universiti Sains Malaysia  
14300 Nibong Tebal, Pulau Pinang  
Malaysia

\*Pengarang untuk surat menyurat; email: nazriselama@gmail.com

Diserahkan: 1 Julai 2014

Diterima: 1 Julai 2015