

Sains Malaysiana 40(11)(2011): 1271–1276

Penyingkiran Boron daripada Larutan Akuas Menggunakan Penjerap Komposit Berasaskan Karbon-Mineral

(Boron Removal from Aqueous Solutions using Composite Adsorbent Based on Carbon-Mineral)

NOR HASLEDA MAMAT @ ALIAS, AZHAR ABDUL HALIM*,
MUHAMMAD IKRAM A WAHAB

ABSTRAK

Penyingkiran boron dalam larutan akuas secara penjerapan telah dikaji dengan menggunakan penjerap komposit yang menggabungkan zeolit, batu kapur, karbon teraktif dan buangan arang sekam padi. Parameter optimum seperti pH, masa sentuhan optimum dan dos bahan penjerap dikaji. Kajian isoterma penjerapan dan kinetik penjerapan turut dijalankan. Hasil penyelidikan menunjukkan penyingkiran boron paling optimum berlaku pada pH5 dan masa sentuhan optimum ialah pada minit ke 120. Dos optimum bagi penyingkiran boron dalam larutan akuas ialah pada dos 280 g/L dan penyingkiran yang dapat dilakukan ialah sebanyak 50.49%. Dalam kajian isoterma, model isoterma Langmuir dan Freundlich telah diaplikasikan dan hasil kajian membuktikan bahawa kajian isoterma penjerapan adalah mematuhi model isoterma Langmuir ($R^2 = 0.8792$). Nilai kapasiti penjerapan maksimum (q_m) yang diperolehi daripada model isoterma Langmuir adalah 1.8985 mg/g. Kajian kinetik penjerapan dijalankan untuk mengetahui mekanisme proses penjerapan dan hasil kajian menunjukkan kadar kinetik bagi penjerapan boron ini adalah mematuhi model kinetik tertib kedua. Pekali korelasi yang diperolehi untuk model kinetik tertib kedua ini adalah 0.9929. Ini mencadangkan bahawa kinetik penjerapan boron adalah dipengaruhi oleh proses kimia.

Kata kunci: Bahan penjerap karbon-mineral; boron; penjerapan

ABSTRACT

Boron removal from aqueous solutions by adsorption was investigated using composite adsorbent that combine zeolite, limestone, activated carbon and rice husk charcoal waste. In this study, the optimum parameters such as pH, optimal contact time and adsorbent dosage were observed. In addition, adsorption isotherm studies and adsorption kinetics were made. In this study, the maximum boron removal was obtained at pH5 and the optimum contact time was 120 min. The optimal dose of composite adsorbent to remove boron in aqueous solutions is about 280 g/L which can remove about 50.49%. In the isotherm studies, Langmuir and Freundlich isotherm models were applied and it was determined that the experimental data conformed to Langmuir isotherm model ($R^2 = 0.8792$). The adsorption capacity (q_m) obtained from Langmuir isotherm model was 1.8985 mg/g. Kinetics studies were performed to understand the mechanistic steps of the adsorption process and the rate kinetics for the adsorption of boron was best fitted with the second-order kinetic model. The correlation coefficients obtained for second-order kinetic model was 0.9929. It is suggested that the boron adsorption is likely influenced by the chemical process.

Keywords: Adsorption; boron; carbon-mineral adsorbents

PENGENALAN

Boron adalah sebatian berwarna hitam atau coklat yang wujud di muka bumi secara semula jadi. Ia biasanya bergabung dengan oksigen dan unsur semula jadi yang lain untuk membentuk sebatian yang berbeza iaitu borat. Borat juga boleh didapati di lautan, sedimen batuan, arang dan juga sebahagian tanah. Sebatian borat dan mineral yang utama termasuklah asid borik, garam borat, *colemanite* dan *ulexite* (ATSDR 2007). Dalam air semula jadi, kepekatan boron adalah lebih rendah daripada 1 mg/L. Walau bagaimanapun, di lautan kepekatan boron mencapai 5 mg/L. Kepekatan boron yang melebihi 3 mg/L akan menyebabkan kesan akumulasi di dalam tanah dan

seterusnya meningkatkan kesan toksisiti kepada hidupan akuatik (ATSDR 2007). Had parameter bagi effluen yang mengandungi boron untuk Piawai A ialah 1.0 mg/L manakala untuk Piawai B ialah 4.0 mg/L (DOE 1995).

Sehingga kini, tiada kaedah lazim dan mudah untuk menyingkirkan boron dalam air sisa. Boron disifatkan sebagai sangat larut dalam air (Yilmaz et al. 2005). Kaedah rawatan secara konvensional dan secara biologi tidak mampu untuk menyingkirkan boron dalam larutan akuas dan air sisa. Antara kaedah utama yang terlibat dalam penyingkiran boron ialah kaedah penggumpalan-pengelompokan (Yilmaz et al. 2007), kaedah penjerapan (Cengelogu et al. 2007), kaedah pertukaran ion (Badruk

et al. 1999) dan kaedah membran termasuklah analisis Donnan, elektrodialisis serta osmosis songsang. Kaedah-kaedah yang digunakan ini memerlukan kos yang tinggi untuk dilaksanakan. Kaedah osmosis songsang pula bergantung kepada keadaan membran dan juga memerlukan kos yang tinggi (Smith et al. 1995).

Penjerapan merupakan salah satu teknik yang kerap digunakan untuk penyingkiran bahan pencemar pada kepekatan yang rendah. Ia diaplikasikan untuk rawatan air sisa pada kos yang lebih rendah (Ozturk & Kavak 2005). Penjerapan merujuk kepada keupayaan sesetengah pepejal untuk memekatkan bahan tertentu secara terpilih dari larutan ke atas permukaannya.

Sejak kebelakangan ini, banyak tumpuan diberikan terhadap penyediaan bahan-bahan penjerap komposit. Media penjerap komposit disediakan bukan sahaja untuk memperbaiki ciri-ciri dan keupayaan penjerapan, tetapi juga untuk menghasilkan bahan penjerap yang lebih murah dari segi kos bahan mentah dan boleh digunakan berkali-kali selepas menjalani proses regenerasi (Leboda 1992a, 1993b, 1993c).

Dalam kajian ini, bahan penjerap yang digunakan ialah media komposit berkos rendah yang merupakan hasil gabungan daripada empat jenis bahan penjerap iaitu karbon teraktif, zeolit, batu kapur dan buangan arang sekam padi. Batu kapur dan buangan arang sekam padi dipilih bagi menggantikan sebahagian daripada peratusan zeolit dan karbon teraktif dalam penjerap komposit untuk mengurangkan kos bahan mentah (Azhar et al. 2010). Objektif kajian ini ialah untuk menyingkirkan boron dalam larutan akuas menggunakan penjerap komposit berkos rendah. Penggunaan media komposit dalam penyingkiran boron dijangka mampu mengatasi masalah kos tinggi dalam rawatan air sisa. Sekiranya kadar penjerapan media komposit terhadap boron adalah tinggi, maka penggunaan media komposit dianggap mampu untuk menyingkirkan boron dalam air sisa.

KAEDAH KAJIAN

Uji kaji penjerapan kelompok dimulakan dengan penentuan parameter optimum, diikuti dengan isoterma penjerapan dan kajian kinetik penjerapan. Keadaan optimum bagi uji kaji kelompok ditentukan dengan menimbang sebanyak 5 g media komposit dan dimasukkan ke dalam kelalang kon yang mengandungi 50 mL larutan boron. Kemudian, siri kelalang kon tadi ditutup dengan parafilm bagi mengelakkan evaporasi larutan berlaku. Seterusnya, digoncang dengan menggunakan alat penggoncang orbital pada 200 rpm selama 2 jam. Kemudian, kesemua siri kelalang kon yang mengandungi larutan boron dituras dengan menggunakan kertas turas bersaiz 50 mm diameter dan diikuti dengan kaedah turasan yang menggunakan pam turas dan membran turas nilon bersaiz 0.45 μm . Kepekatan boron ditentukan secara spektrofotometrik dengan kaedah *Carmine* (4500-B) pada jarak gelombang 605 nm (APHA 2005).

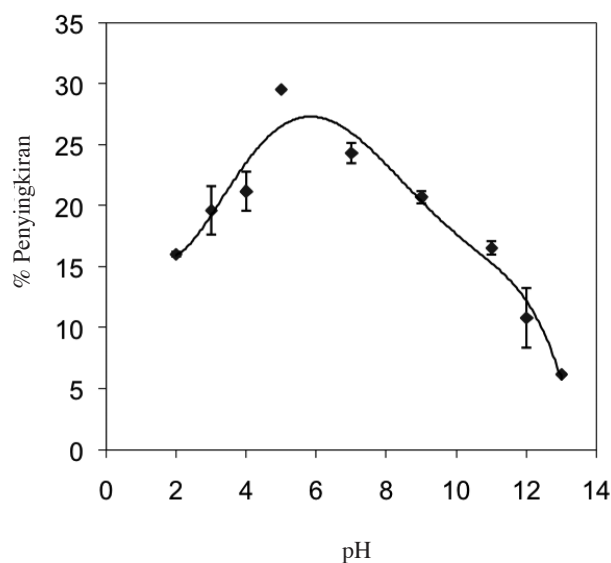
Parameter optimum melihat kepada kesan pH, dos bahan penjerap dan sentuhan masa optimum. Kesan pH terhadap keberkesanan penyingkiran boron dikaji dengan melaraskan pH larutan boron iaitu pada pH2 hingga pH13 menggunakan larutan HCl dan larutan NaOH pada suhu 25°C. Masa sentuhan optimum mewakili sela masa 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 dan 150 min. Bagi kesan dos bahan penjerap, satu siri kelalang kon yang mengandungi media komposit sebanyak 0.5, 1, 2, 5, 6, 8, 10, 12 dan 14 g disediakan.

Isoterma penjerapan boleh ditentukan sama ada dengan mempelbagaikan jisim bahan penjerap untuk satu siri isipadu dan kepekatan larutan boron yang tetap atau mempelbagaikan kepekatan larutan boron tetapi isipadunya masih tetap sama dengan satu siri jisim media penjerap yang berbeza. Kajian kinetik penjerapan dilakukan dengan penentuan masa goncangan untuk sela masa 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 dan 150 min.

HASIL DAN PERBINCANGAN

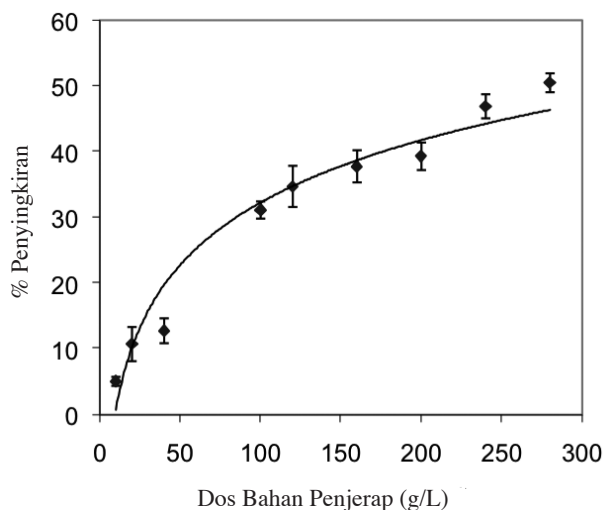
PARAMETER OPTIMUM

Rajah 1 menunjukkan pH optimum bagi penyingkiran boron yang menggunakan media komposit sebagai bahan penjerap. Hasil kajian menunjukkan penyingkiran boron yang paling optimum ialah pada pH5. Dalam keadaan berasid, cas positif akan menjadi dominan pada permukaan tapak bahan penjerap. Tarikan elektrostatik wujud di antara permukaan bahan penjerap yang bercas positif dengan cas negatif daripada larutan dijerap, $\text{B}(\text{OH})_4^-$ (Ozturk & Kavak 2005). Penyingkiran boron rendah dalam keadaan berkalkali. Apabila pH ditingkatkan, tapak permukaan bahan penjerap menjadi semakin negatif dan tidak lagi sesuai lagi untuk menjerap ion $\text{B}(\text{OH})_4^-$ yang dominan dalam larutan (Karahana et al. 2005).



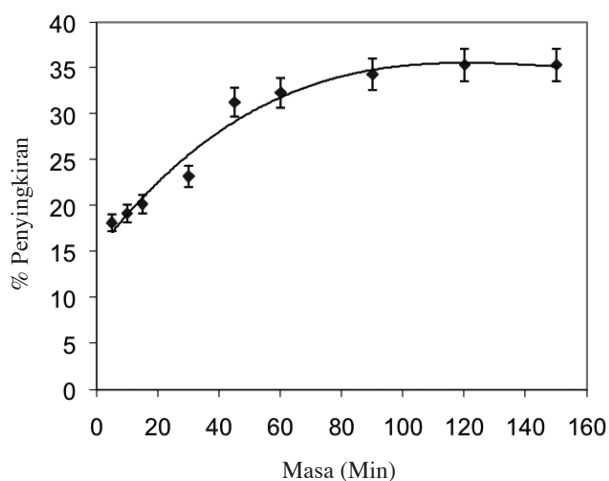
RAJAH 1. pH optimum bagi penyingkiran boron

Rajah 2 dengan jelas menunjukkan penyingkiran boron meningkat dengan peningkatan dos bahan penjerap. Semakin tinggi dos bahan penjerap, semakin besar luas permukaan tapak bahan penjerap yang sepadan untuk membantu penjerapan kerana berlakunya peningkatan pada tapak aktif bahan penjerap (Bhattacharya et al. 2007).



RAJAH 2. Kesan dos, m dalam unit g/L terhadap penyingkiran boron

Rajah 3 menunjukkan masa sentuhan optimum bagi penyingkiran boron. Dalam kajian ini, masa sentuhan ditetapkan dari sela masa 5 – 150 min. Masa sentuhan optimum bagi penyingkiran boron adalah pada minit ke 120 dan penyingkiran yang dapat dilakukan pada masa sentuhan ini ialah sebanyak 30.48%. Masa sentuhan optimum adalah masa yang diperlukan untuk proses penjerapan mencapai keseimbangan iaitu apabila tiada lagi perubahan kepekatan bahan dijerap selepas tempoh masa tertentu.



RAJAH 3. Masa optimum bagi penyingkiran boron

ISOTERMA PENJERAPAN

Isoterma penjerapan adalah plot keseimbangan kepekatan fasa pepejal (q_e) melawan kepekatan fasa cecair (C_e) yang selalunya dijelaskan dengan dua model iaitu model Langmuir dan Freundlich. Model isoterma penjerapan Langmuir berasaskan andaian bahawa penjerapan maksimum berhubungkait dengan monolapisan tepu molekul bahan dijerap di atas permukaan bahan penjerap. Model penjerapan Langmuir pada asalnya dibangunkan untuk menjelaskan penjerapan kimia secara individu dan boleh juga digunakan untuk penjerapan fizikal (monolapisan) yang julat kepekatannya rendah (Meghea et al. 1998).

Data penjerapan pada keadaan keseimbangan dianalisis dalam bentuk linear menggunakan isoterma penjerapan Langmuir dan Freundlich. Persamaan linear bagi model penjerapan Langmuir ialah:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m C_e} \quad (1)$$

Model isoterma penjerapan Freundlich adalah pendekatan empirikal bagi bahan penjerap yang permukaannya sangat tidak sekata dan mengambilkira pembentukan multilapisan pada permukaan bahan penjerap. Model ini boleh digunakan dalam sistem pelarut tunggal dengan julat kepekatan ditetapkan. Secara umumnya model ini sesuai untuk penjerapan bagi kepekatan sederhana dan tinggi dan kurang sesuai untuk kepekatan tinggi kerana ianya tidak memenuhi keperluan Hukum Henry (Meghea et al. 1998). Persamaan bagi model isoterma penjerapan Freundlich adalah seperti berikut:

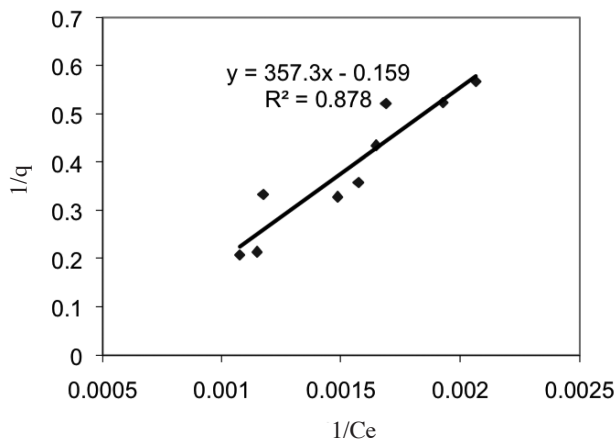
$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

Persamaan ini boleh diterbitkan dalam bentuk linear dengan mengenakan logaritma seperti berikut:

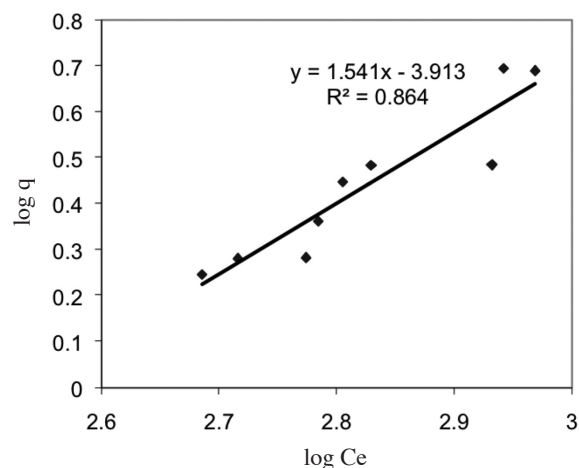
$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

Isoterma penjerapan Freundlich tidak memberi maklumat mengenai kapasiti penjerapan monolapisan dan ini membezakan antara isoterma penjerapan Freundlich dengan isoterma penjerapan Langmuir (Aksu et al. 2004).

Rajah 4 menunjukkan plot linear $1/q_e$ melawan $1/C_e$ bagi isoterma penjerapan Langmuir dengan nilai R^2 nya ialah 0.8792. Nilai pemalar K_L bagi uji kaji ini ialah 4.492×10^{-4} . Nilai q_m atau kapasiti penjerapan Langmuir adalah 1.8985 mg/g. Model isoterma penjerapan Langmuir berasaskan andaian bahawa setiap tapak mampu menjerap satu molekul dan semua tapak menjerap bahan larut dengan sekata untuk membentuk monolapisan (Erenturk & Malkoc 2006).



RAJAH 4. Model isoterma penjerapan Langmuir



RAJAH 5. Model isoterma penjerapan Freundlich

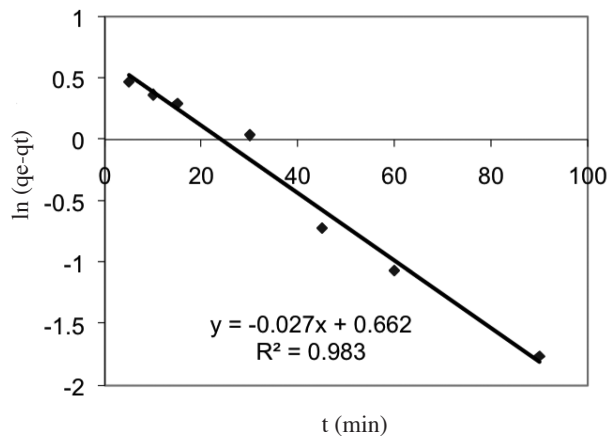
Plot linear $\log q_e$ melawan $\log C_e$ menunjukkan penjerapan boron ke atas media komposit bagi model Freundlich adalah setanding dengan model Langmuir dengan nilai R^2 mencapai 0.8639. Pemalar K_f bagi model penjerapan Freundlich menunjukkan kapasiti media penjerap untuk menjerap boron. Menurut Aziz et al. (1997), semakin tinggi nilai K_f semakin tinggi kapasiti penjerapan bahan penjerap terhadap larutan yang dijerap. Nilai pemalar-pemalar isoterma penjerapan bagi kedua-dua model diringkaskan dalam Jadual 1.

JADUAL 1. Nilai-nilai pemalar dan R^2 bagi Model Langmuir dan Model Freundlich

| Pemalar | Nilai Pemalar |
|---|-------------------------|
| Model Langmuir | |
| q_m (mg/g) | 1.8985 |
| K_L (L/mg) | 4.492×10^{-4} |
| R^2 | 0.8792 |
| Model Freundlich | |
| n | 0.6247 |
| K_f mg g ⁻¹ (gm ⁻³) ⁿ | 8.3888×10^{-5} |
| R^2 | 0.8639 |

KINETIK PENJERAPAN

Rajah 5 menunjukkan plot linear $\ln (q_e - q_t)$ melawan t (minit) bagi penjerapan boron. Nilai R^2 yang diperoleh ialah 0.9830. Pemalar q_e bagi model kinetik pseudo tertib pertama ini mewakili jumlah bahan yang dijerap oleh penjerap pada masa keseimbangan. Nilai q_e bagi model kinetik tertib pertama ialah 1.9389 mg/g. Rajah 6 menunjukkan plot linear bagi model kinetik pseudo tertib kedua dengan nilai R^2 nya ialah 0.9929. Penjerapan boron ke atas media komposit lebih mematuhi model kinetik pseudo tertib kedua apabila nilai R^2 bagi model kinetik pseudo tertib kedua adalah lebih tinggi berbanding nilai R^2 bagi model lain. Nilai q_e bagi model kinetik pseudo tertib kedua ialah 2.9403 mg/g manakala nilai pemalar



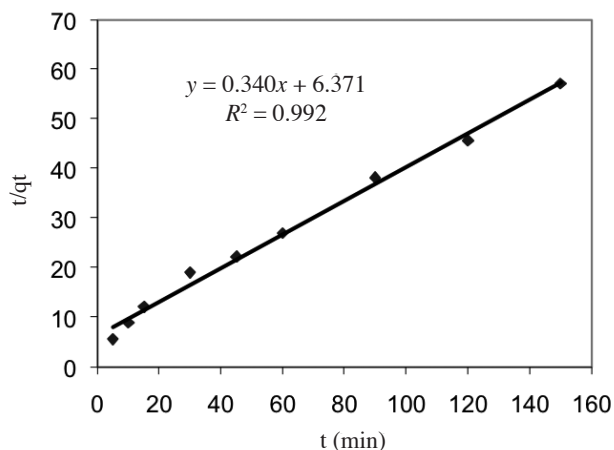
RAJAH 6. Kinetik penjerapan pseudo tertib pertama

k_2 bagi model kinetik pseudo tertib kedua ialah 0.0182 g/ mg minit.

Rajah 7 menunjukkan plot linear q_t melawan $\ln t$ bagi model Elovich. Nilai R^2 bagi model Elovich ialah 0.9573. Nilai q_e bagi model Elovich ialah 2.7262 mg/g. Nilai pemalar α dan β bagi model Elovich masing-masing adalah 1.4597 mg/g min dan 1.8622 mg/g. Rajah 9 menunjukkan plot linear $\log R$ melawan $\log t$ bagi model intra-partikel. Nilai R^2 bagi model intra-partikel ialah 0.9709. Nilai q_e ialah 2.2808 mg/g. Terdapat empat buah model yang menerangkan mengenai kinetik penjerapan iaitu model kinetik pseudo tertib pertama, kinetik pseudo tertib kedua, Elovich dan intra-partikel. Model kinetik tertib pertama bagi proses penjerapan boleh dinyatakan seperti persamaan di bawah:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t. \tag{4}$$

Nilai q_e dan k_1 masing-masing boleh ditentukan daripada pintasan paksi-y dan kecerunan graf linear $\ln (q_e - q_t)$ melawan masa penjerapan, t . Pemalar q_e (mg/g) dan q_t (mg/g) adalah jumlah boron yang terjerap



RAJAH 7. Kinetik penjerapan pseudo tertib kedua

pada permukaan bahan penjerap masing-masing pada keseimbangan dan pada masa t . k_1 adalah pemalar kadar (min^{-1}) bagi model kinetik pseudo tertib pertama (Erenturk & Malkoc 2006). Tindak balas kinetik pseudo tertib kedua boleh dijelaskan seperti persamaan linear seperti di bawah ini, dengan k_2 adalah pemalar kadar bagi tindak balas penjerapan, pemalar q_e dan q_t masing-masing ialah mewakili amaun penjerapan boron pada keseimbangan dan pada masa t :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} (t). \quad (5)$$

Persamaan Elovich (Thomas & Thomas 1997) telah digunakan untuk menerangkan kinetik pseudo tertib kedua yang mengandaikan permukaan pepejal sebenar adalah heterogenus dari segi tenaganya (Nacera & Aicha 2005). Bentuk linear persamaan Elovich boleh diterbitkan sebagai:

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t. \quad (6)$$

Persamaan intra-partikel boleh ditulis sebagai $q_t = k_i t^{0.5} + c$, dengan q ialah peratus penjerapan larutan (mg/g per min), k_i ialah pemalar kadar pembauran intra-partikel ($1/\text{min}$) dan c ialah pemalar. Pemalar t pula mewakili sentuhan masa (minit). Hasil kajian kinetik penjerapan menunjukkan penjerapan boron ke atas media komposit adalah mematuhi model kinetik pseudo tertib kedua apabila ia memberikan nilai R^2 yang lebih tinggi iaitu $R^2 = 0.9929$ berbanding nilai R^2 bagi model-model yang lain. Ozturk dan Kavak (2005) mencadangkan bahawa penjerapan boron berlaku secara penjerapan kimia. Bahan penjerap komposit telah menunjukkan ciri penjerapan secara kimia, sesuai dengan sifat bahan-bahan mentah yang membentuknya serta mematuhi model kinetik pseudo tertib kedua. Penjerapan kimia berlaku apabila bahan dijerap bertindak balas dengan permukaan bahan penjerap untuk membentuk ikatan kovalen atau ikatan ionik. Nilai bagi pemalar-pemalar kinetik penjerapan diringkaskan dalam Jadual 2.

KESIMPULAN

Kajian parameter optimum menunjukkan keadaan optimum bagi penyingkiran boron menggunakan media komposit adalah pada pH5 dan dos optimum ialah pada 280g/L. Masa sentuhan optimum bagi penyingkiran boron adalah pada minit ke-120. Kajian isoterma penjerapan melibatkan dua buah model iaitu model Langmuir dan model Freundlich. Kajian isoterma penjerapan yang telah dijalankan menunjukkan bahawa penyingkiran boron menggunakan media komposit sebagai bahan penjerap adalah mematuhi model Langmuir apabila nilai ($R^2 = 0.8792$) adalah lebih tinggi berbanding nilai R^2 bagi model Freundlich ($R^2 = 0.8639$). Nilai kapasiti penjerapan maksimum (q_m) yang diperoleh daripada model isoterma Langmuir adalah 1.8985 mg/g. Kajian perbandingan kinetik penjerapan telah dijalankan dan hasil kajian membuktikan kinetik penjerapan adalah mematuhi model kinetik tertib kedua apabila nilai R^2 bagi model

JADUAL 2. Nilai-nilai pemalar dan R^2 bagi model kinetik pseudo tertib pertama, model pseudo kinetik tertib kedua, Elovich dan intra-partikel

| Model Kinetik Penjerapan | Pemalar | Nilai Pemalar | R^2 |
|--------------------------|-----------------------------------|---------------|--------|
| Kinetik tertib pertama | q_e (mg/g) | 1.9389 | 0.9830 |
| | k_1 (min^{-1}) | 0.0274 | |
| Kinetik tertib kedua | q_e (mg/g) | 2.9403 | 0.9929 |
| | k_2 (g/mg min) | 0.0182 | |
| Elovich | $\ln \alpha\beta$ | 0.2892 | 0.9573 |
| | q_e (mg/g) | 2.7262 | |
| | β (g/mg) | 1.8622 | |
| | α (mg/g min) | 1.4597 | |
| Intra-partikel | α | 0.2868 | 0.9709 |
| | $\log R$ | 1.4806 | |
| | q_e (mg/g) | 2.2808 | |
| | R (mg/g) | 30.2421 | |
| | k_i (mg/g $\text{min}^{-1/2}$) | 7.6613 | |

kinetik tertib kedua ialah 0.9929. Keputusan daripada kajian isoterma dan kinetik penjerapan ini mencadangkan bahawa mekanisme penjerapan boron di atas permukaan media komposit cenderung berlaku secara kimia melalui penukaran ion.

PENGHARGAAN

Penghargaan ditujukan kepada Program Kesihatan Persekitaran, Fakulti Sains Kesihatan Bersekutu di atas penyediaan kemudahan sepanjang kajian dijalankan.

RUJUKAN

- Aksu, Z. & Gonen, F. 2004. Biosorption of phenol by immobilized activated sludge in a continuous packed bed: prediction of breakthrough curves. *Process Biochemical* 39(3): 599-613.
- APHA. 2005. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. Ed. ke-21. Washington: American Public Health Association.
- ATSDR. 2007. *Toxicological Profile for Boron*. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease.
- Azhar Abdul Halim, Hamidi Abdul Aziz, Megat Azmi Megat Johari & Kamar Shah Ariffin. 2010. Comparison study of ammonia and COD adsorption on zeolite, activated carbon and composite materials in landfill leachate treatment. *Desalination* 262(1-3): 31-35.
- Aziz, H.A. 1997. Heavy metals removal from water and wastewater using limestone filtration technique: a potential use for small and medium industries. *Journal of the Institution of Engineers Malaysia (IEM)* (3): 27-35.
- Badruk, M., Kabay, N., Demircioglu, M., Mordogan, H. & Ipekoglu, U. 1999. Removal of boron from wastewater of geothermal power plant by selective ion-exchange resins part II. Column sorption-elution studies. *Separation and Purification Technology* 34(15): 2981-2995.
- Bhattacharya, A.K., Mandal, S.N. & Das, S.K. 2007. Adsorption of Zn (II) from aqueous solution by using different adsorbents. *Chemical Engineering Journal* 21(5): 43-51.
- Cangeloglu, Y., Tor, A., Arslan, G., Ersoz, M. & Gezgin, S. 2007. Removal of boron from from aqueous solution by using neutralized red mud. *Journal of Hazardous Material* 142: 412-417.
- DOE. 1995. *Environmental Quality Act 1974 and Regulations, Details on Environmental Quality Act 1974 and Regulations Amendments From 1980 to January 1995*. MDC Publishers Printers Sdn. Bhd.
- Erenturk, S. & Malkoc, E. 2006. Removal of lead (ii) by adsorption onto *Viscum album* L: effect of temperature and equilibrium isotherm analysis. *Applied Surface Sciences* 253(10): 4727-4733.
- Karahan, S., Yurdakoc, M., Seki, Y. & Yurdakoc, K. 2005. Removal of boron from aqueous solution by clays and modified clays. *Journal of Colloid and Interfere Science* 293: 36-42.
- Leboda, R. 1992a. Effect of silica gel quantity on the course of hydrothermal treatment in an autoclave. *Mater. Chem. Phys.* 31(3): 243-255.
- Leboda, R. 1993b. Carbon-mineral adsorbents-surface properties and methods of their modification. *Mater. Chem. Phys.* 34(2): 123-141.
- Leboda, R. 1993c. Effect of silica gel quantity on the course of hydrothermal treatment in an autoclave. *Mater. Chem. Phys.* (3): 243-255.
- Meghea, A., Rehner, H.H., Peleanu, I. & Mihalache, R. 1998. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 229: 105-110.
- Nacera, Y. & Aicha, B. 2005. Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by clay-wood sawdust mixture. *Desalination* 185: 499-508.
- Ozturk, N. & Kavak, D. 2005. Adsorption of boron from aqueous solutions using fly ash: batch and column studies. *Journal of Hazardous Material* 127: 81-88.
- Smith, B.M., Todd, P. & Bowmann, C.N. 1995. *Separation Science Technology* 20: 3849.
- Thomas, J.M. & Thomas, W.J. 1997. *Principle and Practice of Heterogeneous Catalysis*. Weinheim: VCH.
- Yilmaz, A.E., Boncukcuoglu, R. & Kocakerim, M.M. 2005. Adsorption of Boron-containing wastewater by ion exchange in a continuous reactor. *Journal of Hazardous Material* 117(3): 221-226.
- Yilmaz, A.E., Boncukcuoglu, R. & Kocakerim, M.M. 2007. An empirical model for parameters affecting energy consumption in boron removal from boron-containing wastewater by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Material* 144: 101-107.

Program Kesihatan Persekitaran
Fakulti Sains Kesihatan Bersekutu
Universiti Kebangsaan Malaysia
Jalan Raja Muda Abdul Aziz
50300 Kuala Lumpur, Malaysia

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

Diserahkan: 10 Disember 2009
Diterima: 17 Januari 2011