

## Isoterma dan Kinetik Penjerapan Boron oleh Batu Kapur Sebagai Penjerap Berkos Rendah

(Isotherm and Kinetic Adsorption of Boron onto Limestone  
As a Low-cost Adsorbent)

A.A. HALIM\* & MOHD FIRHAD AHMAD

### ABSTRAK

Kajian ini dijalankan untuk menentukan isoterma dan kinetik penjerapan bahan pencemar boron daripada air sisa sintetik menggunakan batu kapur sebagai bahan penjerap berkos rendah. Penjerapan boron berlaku secara optimum pada julat pH 6-8, masa sentuhan pada 90 min dan dos batu kapur 240 g/L yang penyingkirannya mencapai 40%. Isoterma penjerapan lebih diwakili oleh model Freundlich ( $R^2 = 0.91$ ) berbanding model Langmuir ( $R^2 = 0.78$ ) yang menunjukkan penjerapan secara multilapisan adalah dominan. Kajian kinetik penjerapan menunjukkan penjerapan boron ke atas batu kapur mematuhi dengan baik model penjerapan pseudo-tertib pertama ( $R^2 = 0.93$ ), pseudo-tertib kedua ( $R^2 = 0.987$ ), Elovich ( $R^2 = 0.931$ ) dan Intrapartikel ( $R^2 = 0.960$ ). Mekanisme penjerapan secara kimia adalah dominan berdasarkan nilai  $R^2$  yang paling tinggi bagi model pseudo-tertib kedua.

**Kata kunci:** Batu kapur; penjerapan; penyingkiran boron

### ABSTRACT

This study was performed to determine isotherm and kinetic adsorption of boron from synthetic wastewater using limestone as a low cost adsorbent. Boron adsorption was performed at optimum condition at pH range of 6-8, contact time of 90 min and limestone dosage of 240 g/L where the boron removal was achieved at 40%. Adsorption isotherm of boron on limestone was more representative by Freundlich model ( $R^2 = 0.91$ ) rather than Langmuir model ( $R^2 = 0.78$ ) indicated that multilayer adsorption was dominance. The kinetic study indicated that the adsorption of boron on limestone well obeyed pseudo-first order model ( $R^2 = 0.780$ ), pseudo-second order ( $R^2 = 0.987$ ), Elovich ( $R^2 = 0.931$ ) and Intra-particle model ( $R^2 = 0.960$ ). Chemically adsorption mechanisms were dominant in this study based on the highest  $R^2$  for pseudo-second order model.

**Keywords:** Adsorption; boron removal; limestone

### PENDAHULUAN

Boron dan produk sebatianannya telah diguna pakai dalam pelbagai aplikasi industri (Morales et al. 2000). Boron digunakan secara meluas dalam industri penghasilan gelas, digunakan sebagai pemadam api, penghasilan produk berasaskan kulit, dalam bahan fotografi, dalam pengawet kayu dan pestisid, bahan pembakar bertenaga tinggi dan di dalam sabun serta bahan pencuci (WHO 1998). Boron dilepaskan ke persekitaran daripada industri yang menghasilkan atau menggunakannya terutamanya daripada pembuatan gelas. Ia turut dilepaskan daripada fasiliti pembakaran kayu dan arang batu. Boron juga dilepaskan dari pusat olahan air sisa dan sisa enapcemar. Walau bagaimanapun sejumlah signifikan boron terbebas ke persekitaran melalui sumber semula jadi seperti gunung berapi dan semburan laut.

Boron bawaan air mungkin akan diserap oleh tanah dan sedimen. Tindak balas jerapan-nyahjerapan dijangka satu-satunya mekanisme yang signifikan mempengaruhi nasib boron dalam air (Rai 1986). Kadar penyerapan boron

bergantung kepada pH air dan kepekatan boron dalam larutan. Penyerapan paling tinggi berlaku pada pH 7.5-9.0 (Keren et al. 1981). Mance et al. (1988) menyatakan boron merupakan kandungan air laut yang signifikan dengan purata kepekatan boron sebanyak 4.5 mg/kg. Boron mampu memberi kesan kepada kesihatan manusia. Litovitz et al. (1988) menyatakan bahawa potensi dos yang menyebabkan kematian adalah biasanya 3-6 g bagi bayi dan 15-20 g bagi orang dewasa. Ketoksikan boron dimanifestasi dengan simptom seperti *disorder* sawan bertumpu biasa atau alternatif, keradangan, gangguan gastrointestinal, lesi kulit terluar contohnya *erythema* pada seluruh badan, *excoriation* punggug dan *desquamation* (WHO 1998).

Tambahan pula, menurut Benson et al. (1984), sistem loji olahan konvensional yang sedia ada kurang berkesan dalam penyingkiran boron. Terdapat pelbagai kaedah yang boleh digunakan untuk penyingkiran boron dalam air sisa dan larutan akueus seperti penggumpalan-pemendakan (Halim et al. 2012a), osmosis songsang, elektrodialisis, pengestrakan bahan terlarut, filtrasi membran (Kavak &

Ozturk 2005), penjerapan (Alias et al. 2011; Halim et al. 2013) dan elektrokoagulasi (Halim et al. 2012b). Antara kaedah-kaedah ini, penjerapan adalah yang paling berguna dan murah pada kepekatan boron yang rendah (Yilmaz et al. 2006).

Batu kapur telah digunakan dalam industri sebagai bahan penjerap terutamanya dalam proses penyahsulfuran disebabkan keberkesannya dan kosnya yang murah. Oleh itu, beberapa kajian telah dijalankan dengan menggunakan batu kapur sebagai bahan penjerap. Penggunaan batu kapur didapati berkesan sebagai media penjerap untuk menyingkirkan logam daripada air sisa dan sisa industri (Aziz 1997). Selain itu batu kapur juga pernah digunakan bersama karbon teraktif untuk menyingkirkan ammonia daripada larut lesapan (Hamidi et al. 2004). Kajian yang telah dijalankan mendapati sebanyak 40% ammoniakal nitrogen dapat disingkirkan. Ini menunjukkan bahawa batu kapur mempunyai potensi untuk digunakan sebagai bahan penjerap. Penggunaan batu kapur dalam penyediaan bahan penjerap komposit untuk menyingkirkan boron daripada larutan akueus juga pernah dilaporkan (Alias et al. 2011). Oleh itu kajian ini telah dijalankan untuk menentukan isoterma dan kinetik penjerapan boron oleh batu kapur yang boleh dikelaskan sebagai bahan penjerap kos rendah.

## BAHAN DAN KAEDAH

### UJIAN XRF BATU KAPUR

Komposisi kimia yang terdapat dalam batu kapur ditentukan dengan kaedah pendaflour sinar-x (XRF) (Jadual 1). Alat XRF model Rigaku RIX3000 telah digunakan untuk tujuan tersebut. Sampel disediakan dengan mengisarkan 0.6 g sampel dan diayak menggunakan saiz ayak kurang daripada 75 mm. Hasil kisanan tadi kemudiannya dicampur dengan 6.0 g campuran fluks dan dileburkan dalam unit pelebur (Model Classie Fluxy). Serpihan kaca yang dihasilkan kemudian dianalisis menggunakan unit XRF.

### UJI KAJI PENJERAPAN KELOMPOK

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 10

g batu kapur 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 *Carmin* (4500-B) pada jarak gelombang 605 nm (APHA 2005).

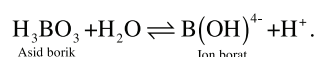
Parameter optimum melihat kepada kesan pH, dos bahan penjerap dan masa sentuhan optimum. Kesan pH terhadap keberkesanan penyingkiran boron dikaji dengan melaras pH larutan boron iaitu pada pH2 hingga pH13 menggunakan larutan HCl dan larutan NaOH pada suhu 25°C. Masa sentuhan optimum ditentukan dengan mengawal masa goncangan bagi setiap kelalang kon iaitu 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90 dan 120 min. Kesemua kelalang kon kemudian digoncang menggunakan penggoncang orbit dengan kelajuan 200 rpm. Bagi kesan dos bahan penjerap, satu siri kelalang kon yang mengandungi jisim batu kapur sebanyak 2, 4, 6, 8, 10, 12 dan 14 g disediakan. Isoterma dan kinetik penjerapan dapat ditentukan menggunakan data daripada parameter dos dan masa sentuhan.

## HASIL DAN PERBINCANGAN

### KESAN PH

Julat parameter pH yang telah dikaji ialah daripada 2 hingga 14. Ini menunjukkan kajian yang telah dilakukan meliputi keadaan berasid dan beralkali. Rajah 1 menunjukkan bahawa peratus penyingkiran boron meningkat sejajar dengan peningkatan nilai pH hingga pada suatu nilai optimum, selepas itu peningkatan nilai pH yang berterusan akan menyebabkan peratus penyingkiran boron menjadi semakin berkurangan. Julat pH optimum untuk penjerapan boron ke atas batu kapur yang diperolehi adalah antara pH6 hingga 8. Keputusan yang diperolehi hampir setanding dengan kajian penjerapan boron dalam tanah dan sedimen iaitu paling tinggi pada julat pH7.5-9 (Keren et al. 1981).

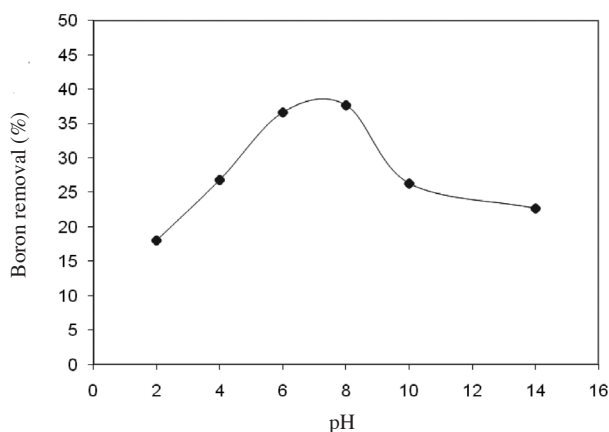
Peningkatan peratus penyingkiran dengan peningkatan pH adalah disebabkan perubahan keadaan atau sifat boron dalam larutan akueus. Keadaan ini dapat diterangkan melalui persamaan kimia seperti berikut:



Pada keadaan berasid atau pH yang rendah, spesies boron yang dominan ialah asid borik yang mempunyai aktiviti elektrik dan afiniti yang rendah (Camacho & Soto 2006). Hal ini sejajar dengan keputusan kajian yang diperolehi dengan peningkatan pH meningkatkan

JADUAL 1. Komposisi batu kapur berdasarkan analisis XRF

Komposisi	Peratusan
C	20
CaO	75
SiO <sub>2</sub>	3.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.1
Lain-lain	0.5



RAJAH 1. Kesan pH terhadap penyingkiran boron menggunakan batu kapur

kecenderungan boron hadir dalam larutan akueus dalam bentuk ion borat. Oleh itu penjerapan boleh berlaku dengan lebih mudah kerana aktiviti elektrik telah meningkat memandangkan sifat ion borat yang bercas.

Namun begitu peningkatan nilai pH selepas 8 mendapati bahawa aktiviti penjerapan menjadi semakin berkurangan. Peningkatan pH meningkatkan kepekatan ion hidroksil ( $\text{OH}^-$ ) menyebabkan wujud persaingan kepada ion borat terhadap tapak jerapan dan mengurangkan penjerapan boron (Camacho & Soto 2006).

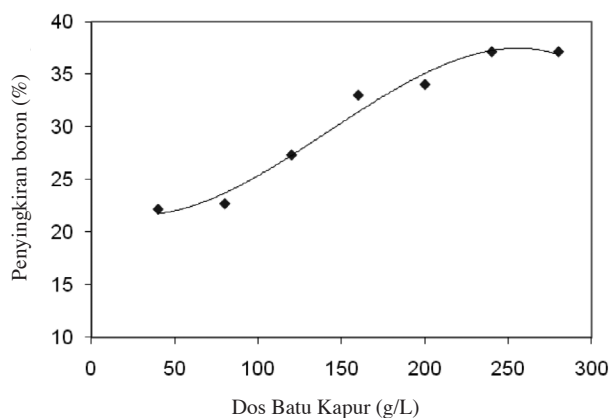
#### KESAN DOS BATU KAPUR

Julat parameter dos serbuk batu kapur yang telah dikaji ialah daripada 2 hingga 14 g per 50 mL larutan boron. Rajah 2 menunjukkan bahawa peratus penyingkiran boron meningkat sejajar dengan penambahan dos serbuk batu kapur. Rajah 2 menunjukkan penjerapan meningkat apabila semakin banyak dos serbuk batu kapur yang digunakan. Hal ini bertepatan dengan teori penjerapan yang menunjukkan pertambahan serbuk batu kapur telah mewujudkan tapak jerapan yang lebih banyak. Di tapak jerapan pada permukaan batu kapur inilah proses

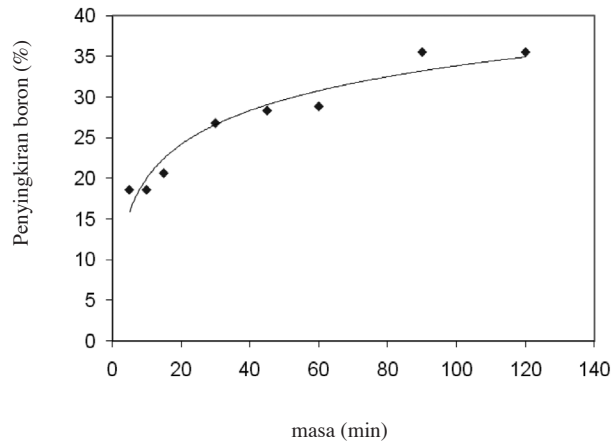
penjerapan boron berlaku. Namun begitu, peningkatan penyingkiran boron tidaklah berlaku secara linear tetapi semakin tinggi dos penyingkirannya semakin menghampiri malar iaitu seperti mengikuti corak logaritma. Ini kerana kapasiti penjerapannya telah berkurang berdasarkan kapasiti penjerapan,  $q$  (mg/g) iaitu jisim boron yang terjerap per jisim penjerap (Kavak 2009).

#### MASA SENTUHAN

Rajah 3 menunjukkan bahawa proses penjerapan semakin meningkat apabila masa goncangan ditambah. Pertambahan masa goncangan akan menambahkan masa sentuhan antara boron dengan permukaan bahan penjerap dalam larutan akueus. Oleh itu, lebih banyak boron dapat dijerap. Namun begitu, penjerapan tidak banyak berubah setelah melepasi satu titik masa yang menjadi nilai optimum bagi kajian parameter ini iaitu pada masa 90 min. Hal ini disebabkan tapak jerapan yang aktif di permukaan batu kapur telah menjadi terhad dan tidak dapat lagi mengikat boron yang hadir dalam larutan akueus. Oleh itu, penjerapan menjadi tidak signifikan lagi selepas nilai optimum tersebut.



RAJAH 2. Kesan dos bahan penjerap batu kapur penyingkiran boron



RAJAH 3. Masa sentuhan penjerapan boron ke atas batu kapur

#### 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 berhubung kait 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 kepekatan 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:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m C_e},$$

dengan  $q_e$  adalah kapasiti penjerapan pada keseimbangan,  $q_m$  kapasiti penjerapan maksimum,  $K_L$  pekali Langmuir dan  $C_e$  adalah kepekatan boron dalam larutan akueus pada keseimbangan.

Model isoterma penjerapan Freundlich adalah pendekatan empirikal bagi bahan penjerap yang permukaannya sangat tidak sekata dan mengambil kira 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 yang sangat tinggi kerana ia tidak memenuhi keperluan Hukum Henry (Meghea et al. 1998). Rajah 4(a) menunjukkan plot bagi model penjerapan Langmuir dengan nilai  $R^2$  bersamaan dengan 0.7847. Nilai pemalar penjerapan Langmuir  $K_L$  dan kapasiti penjerapan monolapisan,  $q_m$  adalah seperti tersenarai dalam Jadual 2.

Persamaan bagi model isoterma penjerapan Freundlich adalah seperti berikut:

$$q_e = K_F C_e^{1/n}.$$

JADUAL 2. Nilai pemalar isoterma penjerapan Freundlich dan Langmuir

Freundlich	
$R^2$	0.911
$K_F$	4.15432E-05
$n$	0.30979894
Langmuir	
$R^2$	0.7847
$K_L$	0.059267856
$q_m$	0.022378874

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

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e,$$

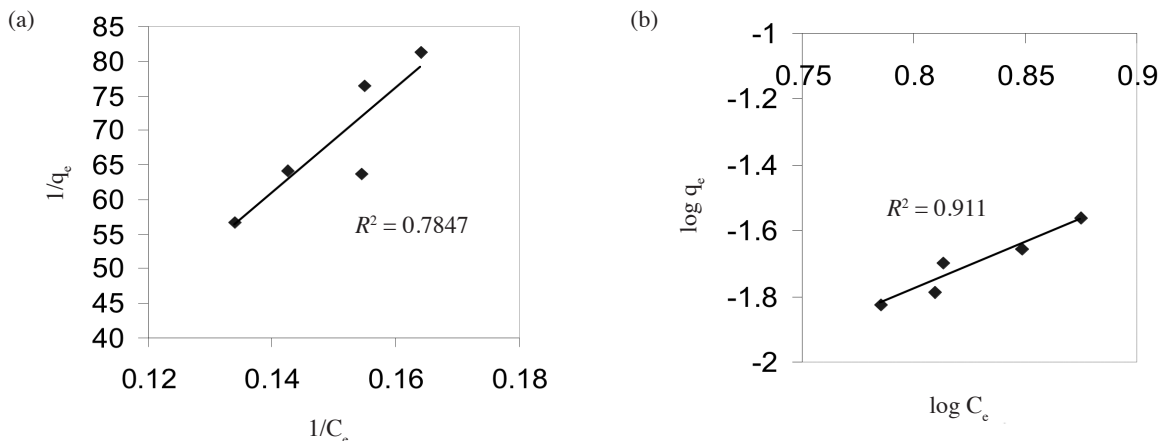
dengan  $q_e$  adalah kapasiti penjerapan pada keseimbangan,  $K_F$  pekali Freundlich,  $C_e$  kepekatan boron dalam larutan akueus pada keseimbangan dan nilai  $n$  menggambarkan keamatan penjerapan.

Isoterma penjerapan Freundlich tidak memberi maklumat mengenai kapasiti penjerapan monolapisan dan ini membezakan antara isoterma penjerapan Freundlich dengan isoterma penjerapan Langmuir (Aksu & Gonen 2004). Rajah 4(b) menunjukkan plot penjerapan boron ke atas batu kapur dengan menggunakan model Freundlich. Nilai  $R^2$  bagi model ini jauh lebih baik ( $R^2 = 0.911$ ) berbanding model Langmuir ( $R^2 = 0.7847$ ). Dengan ini adalah dicadangkan bahawa penjerapan boron ke atas permukaan batu kapur berlaku secara multilapisan. Nilai pemalar  $n < 1$  ( $n \approx 0.31$ ) menggambarkan penjerapan yang baik hanya berlaku pada julat kepekatan yang tinggi tetapi kurang baik pada julat kepekatan yang rendah (Lu 1985).

#### KINETIK DAN MEKANISME PENJERAPAN

Tindak balas kinetik secara umumnya adalah seperti berikut:

$$\text{Kadar} = k(\text{batu kapur})^x(\text{boron})^y.$$



RAJAH 4. Isoterma penjerapan boron ke atas batu kapur menggunakan (a) model Langmuir dan (b) model Freundlich

Bagi tindak balas penjerapan dalam larutan akueus, boron dikatakan bertindak balas dengan batu kapur yang menyebabkan berlaku perubahan kepekatan kedua-dua bahan tersebut. Jika tindak balas yang berlaku ialah secara fizikal maka persamaan kadar permulaan tindak balas adalah seperti berikut:

$$\text{Kadar} = k_1(\text{batu kapur})(\text{boron}).$$

Tindak balas ini ialah tindak balas tertib kedua, namun begitu jika kepekatan batu kapur terlalu tinggi berbanding boron dan perubahan kepekatan batu kapur yang sedikit tidak memberi kesan kepada kadar tindak balas sebaliknya kadar tindak balas bergantung hanya kepada perubahan kepekatan boron. Maka kepekatan batu kapur boleh dianggap sebagai pemalar atau pseudo pemalar dengan persamaannya ditulis seperti berikut:

$$\text{Kadar} = k_1'(\text{boron}).$$

Kadar tindak balas kini telah diturunkan kepada tertib pertama atau dikenali sebagai pseudo-tertib pertama. Model tindak balas tertib pertama bagi proses penjerapan boleh dinyatakan sebagai:

$$dq_t/dt = k_1(q_e - q_t).$$

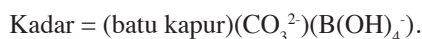
Persamaan berikut diterbitkan dalam satu bentuk persamaan garis lurus seperti berikut:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t.$$

Nilai  $q_e$  adalah kapasiti penjerapan pada keseimbangan, manakala  $q_t$  pula adalah kapasiti penjerapan pada masa  $t$  dan  $k_1$  adalah pemalar kadar pseudo-tertib pertama. Nilai  $q_e$  dan  $k_1$  boleh ditentukan daripada pintasan paksi-y dan kecerunan graf  $\ln(q_e - q_t)$  melawan masa penjerapan,  $t$ .

Jika penjerapan berlaku secara kimia, maka tindak balas berlaku di permukaan batu kapur dengan terdapatnya tapak-tapak aktif spesifik yang melibatkan daya valens.

Batu kapur mempunyai ion karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) yang mampu mengalami tindak balas penukaran dengan ion borat ( $\text{B}(\text{OH})_4^-$ ). Persamaan kadar tindak balas untuk penjerapan secara kimia adalah seperti berikut:



Oleh kerana  $k(\text{batu kapur}) = \text{pemalar pseudo}, k'$ , maka persamaan di atas yang kelihatan tertib ketiga telah menjadi pseudo-tertib kedua:

$$\text{Kadar} = k'(\text{CO}_3^{2-})(\text{B}(\text{OH})_4^-).$$

Kuantiti ion borat yang dijerap adalah sama dengan kuantiti ion karbonat dinyahjerap maka boleh dianggap  $(\text{CO}_3^{2-}) = (\text{B}(\text{OH})_4^-)$ . Dengan ini persamaan kadar tindak balas telah menjadi:

$$\text{Kadar} = k_2'(\text{B}(\text{OH})_4^-)^2.$$

Tindak balas ini telah menjadi pseudo-tertib kedua dan ditulis sebagai persamaan seperti berikut:

$$dq_t/dt = k_2(q_e - q_t)^2.$$

Persamaan di atas diubah membentuk satu persamaan garis lurus menjadi seperti berikut:

$$t/q_t = 1/k_2 q_e^2 + 1/q_e(t).$$

dengan  $k_2$  adalah pemalar kadar pseudo-tertib kedua. Nilai  $q_e$  dan  $k_2$  boleh ditentukan dengan mendapatkan pintasan paksi-y dan kecerunan graf  $t/q_t$  melawan masa penjerapan,  $t$ .

Persamaan Elovich telah digunakan untuk menerangkan kinetik tertib kedua (Thomas & Thomas 1997). Model ini mengandaikan bahawa permukaan bahan penjerap adalah heterogen daripada segi tenaganya. Persamaan model elovich adalah seperti berikut:

$$dq_t/dt = \alpha e^{-\beta q_t}.$$

Persamaan Elovich diterbitkan dalam satu bentuk persamaan garis lurus seperti berikut (Nacera & Bensmaili 2005):

$$q_t = 1/\beta \ln(\alpha\beta) + 1/\beta \ln t,$$

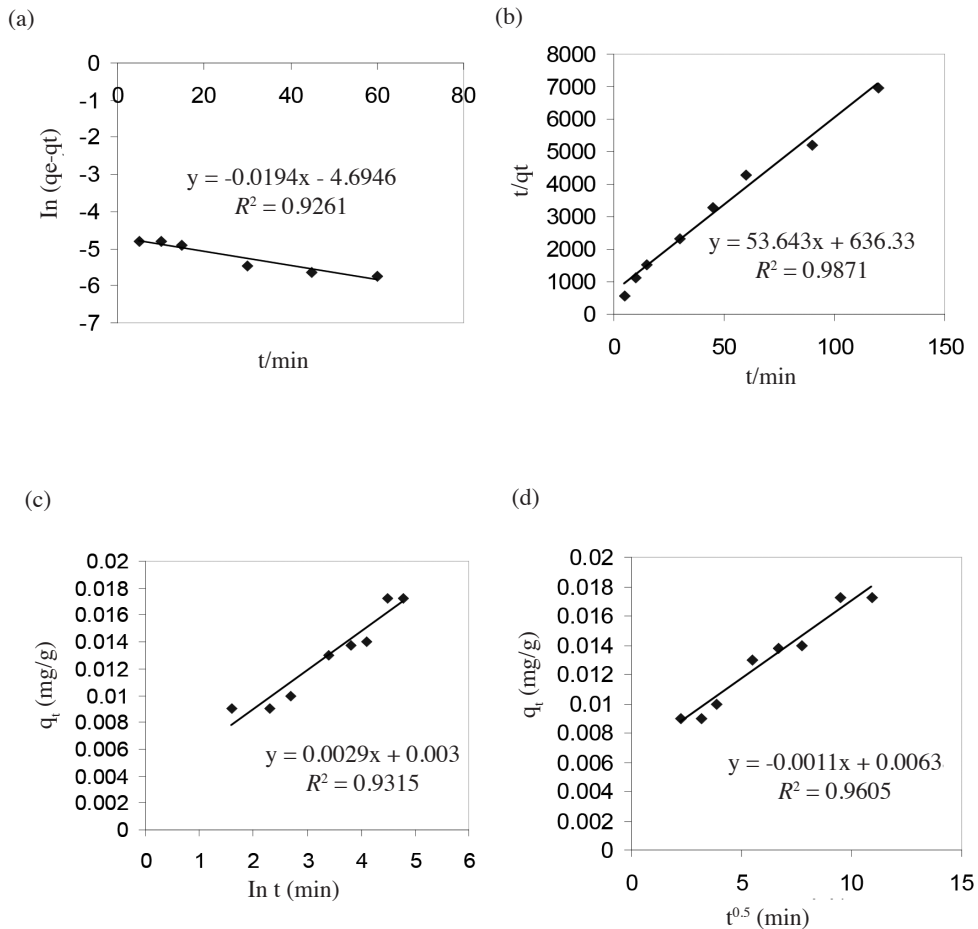
dengan  $\alpha$  merujuk kepada kadar awal (mg/g min) dan  $\beta$  litupan permukaan dan tenaga pengaktifan bagi penjerapan kimia (g/mg). Nilai pemalar dicari dengan mendapatkan pintasan paksi-y dan kecerunan graf garis lurus. Untuk interpretasi data kinetik eksperimen, daripada pandangan mekanistik, jangkaan langkah penentu kadar adalah penting. Langkah penentu kadar dalam sistem penjerapan kelompok boleh ditentukan daripada ciri bahan penjerap dan bahan larut.

Bahan yang dijerap diangkut dari fasa larutan ke permukaan partikel bahan penjerap dalam beberapa langkah. Keseluruhan proses penjerapan mungkin dikawal sama ada satu atau lebih langkah seperti pembauran luaran, pembauran liang, pembauran permukaan atau kombinasi lebih daripada satu langkah. Kebarangkalian pembauran intra partikel diketahui dengan menggunakan model intra partikel. Persamaan pembauran intra partikel ialah:

$$q_t = K_i t^{0.5} + c,$$

dengan  $c$  adalah pintasan paksi-y manakala  $K_i$  adalah pemalar pembauran intra partikel (mg/g min<sup>1/2</sup>). Plot linear untuk model pseudo-tertib pertama, pseudo-tertib kedua, Elovich dan Intrapartikel ditunjukkan dalam Rajah 5 dan nilai pemalar yang diperoleh dari plot tersebut tersenarai dalam Jadual 3.

Secara keseluruhannya penjerapan boron ke atas permukaan batu kapur mematuhi kesemua model kinetik penjerapan dengan nilai  $R^2 > 0.9$ . Walau bagaimanapun, didapati bahawa  $R^2$  pseudo-tertib pertama adalah yang paling rendah iaitu 0.9261 manakala  $R^2$  pseudo-tertib kedua adalah yang paling tinggi iaitu 0.9871 berbanding dengan model penjerapan yang lain. Namun begitu, model kinetik Elovich dan Intra partikel turut menunjukkan nilai korelasi yang agak kuat iaitu  $R^2 = 0.931$  dan 0.960. Model kinetik pseudo-tertib kedua mempunyai nilai  $R^2$  yang paling tinggi menunjukkan penjerapan lebih cenderung berlaku secara kimia. Kecenderungan ini menandakan penjerapan melibatkan daya ikatan melalui perkongsian atau penukaran ion antara bahan dijerap dengan bahan penjerap (Wang et al. 2006). Nilai korelasi pseudo-tertib pertama berkemungkinan lebih rendah kerana ia hanya sah untuk tindak balas yang singkat (Cheung et al. 2000).



RAJAH 5. Kinetik penjerapan boron ke atas batu kapur berdasarkan model (a) pseudo-tertib pertama, (b) pseudo-tertib kedua, (c) Elovich dan (d) Intrapartikel

JADUAL 3. Nilai pemalar-pemalar kinetik penjerapan boron ke atas batu kapur

Persamaan kinetik	Pemalar	$R^2$
Pseudo-tertib pertama	$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0.348
	$q_c$ (mg/g)	0.86
Pseudo-tertib kedua	$K_2$ (g/mg min)	4.543
	$q_c$ (mg/g)	0.0186
Elovich	$\alpha$ (mg/g min)	$8.96 \times 10^{-3}$
	$\beta$ (g/mg)	500
Intra partikel	$K_i$ (mg/g $\text{min}^{0.5}$ )	0.001
	$c$	0.006

## KESIMPULAN

Dalam kajian ini batu kapur digunakan sebagai bahan penjerap bagi menjerap boron dalam larutan akuus. Parameter optimum bagi pH untuk penyingkiran boron yang diperolehi ialah pada julat pH6-8, manakala masa goncangan ialah selama 90 min. Kajian isoterma penjerapan menunjukkan bahawa model isoterma Freundlich lebih mewakili penjerapan boron ke atas batu kapur berbanding model Langmuir berdasarkan nilai  $R^2$  yang lebih tinggi. Ini mencadangkan bahawa penjerapan lebih cenderung berlaku secara multilapisan. Kinetik penjerapan pula dapat diterangkan menggunakan model pseudo-tertib kedua yang mempunyai nilai  $R^2$  paling tinggi iaitu 0.987 berbanding dengan model kinetik lain yang menunjukkan mekanisme penjerapan lebih cenderung berlaku secara kimia.

## 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.
- Alias, N.H.M., Halim, A.A. & Wahab, M.I.A. 2011. Boron removal from aqueous solutions using composite adsorbent based on carbon-mineral. *Sains Malaysiana* 40(11): 1271-1276.
- APHA. 2005. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. Edisi ke-21. Washington: American Public Health Association.
- Aziz, H.A. 1997. Heavy metals removal from water and wastewater using limestone filtration technique: A potential use for small and medium industries. *Journal Institution of Engineers Malaysia (IEM)* 3: 27-35.
- Benson, W.H., Birge, W.J. & Dorough, H.W. 1984. Absence of mutagenic activity of sodium borate (borax) and boric acid in the Salmonella preincubation test. *Environmental Toxicology Chemical* 3: 209-214.
- Camacho, E.M. & Soto, F.G. 2006. Boron removal by means of adsorption with magnesium oxide. *Separation and Purification Technology* 48(1): 36-44.
- Cheung, C.W., Porter, J.F. & McKay, G. 2000. Elovich equation and modified second-order equation for sorption of cadmium ions onto bone char. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 75: 963-970.
- Halim, A.A., Nor Alia Roslan, Nor Shamsiah Yaacob & Mohd. Talib Latif. 2013. Boron removal from aqueous solution using curcumin-impregnated activated carbon. *Sains Malaysiana* 42(9): 1293-1300.
- Halim, A.A., Abdul Fattah Abu Bakar, Megat Ahmad Kamal Megat Hanafiah & Haslizaidi Zakaria. 2012a. Boron removal from aqueous solutions using curcumin-aided electrocoagulation. *Middle-East Journal of Scientific Research* 11(5): 583-588.
- Halim, A.A., Nur Hanani Thaldiri, Normah Awang & Mohd Talib Latif. 2012b. Removing boron from an aqueous solution using turmeric extract-aided coagulation-flocculation. *American Journal of Environmental Sciences* 8(3): 322-327.
- Hamidi Abdul Aziz, Mohd Suffian Yusoff, Mohd Nordin Adlan, Nurul Hidayah Adnan & Salina Alias. 2004. Physico-chemical removal of ion from semi-aerobic landfill leachate by limestone filter. *Waste Management* 24: 353-358.
- Kavak, D. 2009. Removal of boron from aqueous solutions by batch adsorption on calcined alunite using experimental design. *Journal of Hazardous Materials* 163(1): 308-314.
- Kavak, D. & Öztürk, N. 2005. Adsorption of boron from aqueous solutions using fly ash: Batch and column studies. *Journal of Hazardous Material* 127: 81-88.
- Keren, R., Gas, t.R.G. & Bar-Yosef, B. 1981. Ph-dependent boron adsorption by Namontmorillonite. *Soil Science Society of America Journal* 45: 45-48.
- Litovitz, T.L., Klein-Schwartz, W., Oderda, G.M. & Schmitz, B.F. 1988. Clinical manifestations of toxicity in a series of 784 boric acid ingestions. *The American Journal of Emergency Medicine* 6: 209-213.
- Lu, J.C.S. 1985. Leachate from Municipal Landfill, Production and Management. Park Ridge: Noyes Pub.
- Mance, G., O'Donnell, A.R. & Smith, P.R. 1988. Proposed environmental quality standards for List II substances in water: Boron. Medmenham. Water Research Centre.
- Meghea, A., Rehner, H.H., Peleanu, I. & Mihalache, R. 1998. Test-fitting on adsorption isotherms of organic pollutants from waste waters on activated carbon. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 229: 105-110.
- Morales, G.V., Capretto, M.E., Fuentes, L.M. & Quiroga, O.D. 2000. Dissolution kinetics of hydroborocite in water saturated with carbon dioxide. *Hydrometallurgy* 58: 127-133.
- Nacera, Y. & Bensmaili, A. 2005. Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by clay-wood sawdust mixture. *Desalination* 185: 499-508.
- Rai, D. 1986. *Chemical Attenuation Rates, Coefficients, and Constants in Leachate Migration. Vol. 1: A Critical Review*. Report to Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, by Battelle Pacific Northwest Laboratories, Richland, WA.

- Thomas, J.M. & Thomas, W.J. 1997. *Principle and Practice of Heterogeneous Catalysis*. Weinheim: VCH.
- Wang, X., Xia, S., Chen, L., Zhao, J., Chovelon, J. & Nicole, J. 2006. Biosorption of cadmium(II) and lead(II) ions from aqueous solutions onto dried activated sludge. *Journal of Environmental Sciences* 18: 840-844.
- WHO. 1998. *Boron*. Geneva, World Health Organization, International Programme on Chemical Safety (Environmental Health Criteria monograph).
- Yilmaz, Kabay, N., Brjyak, M., Yuksel, M., Wolska, J. & Koltuniewicz, A. 2006. A submerged membrane-ion-exchange hybrid process for boron removal. *Desalination* 198: 310-315.

Pusat Pengajian Sains Sekitaran dan Sumber Alam  
Fakulti Sains dan Teknologi  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 Bangi, Selangor  
Malaysia

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: azharhalim@ukm.my

Diserahkan: 27 Januari 2012  
Diterima: 18 Julai 2013