

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 膨脹顆粒污泥床處理抑制性基質之水動力及反應動力

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-168-007-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：崑山科技大學環境工程系

計畫主持人：周信賢

計畫參與人員：鄭景鴻

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 10 月 25 日

# 膨脹顆粒污泥床處理抑制性基質之水動力及反應動力

## 中文摘要

以出流水迴流操控之膨脹顆粒污泥床(expanded granular sludge bed, EGSB)反應器處理抑制性酚基質，在體積負荷率(volumetric loading rate, VLR) 4.0~12.2 kg COD/m<sup>3</sup>-d 下，EGSB 反應器中污泥顆粒平均粒徑( $d_p$ )隨著 VLR 及表面流速( $u_s = 0.5、3.0、6.0、9.0$  m/h)之增加而增大( $d_p$  變化範圍 0.88~2.35 mm)。在 VLR 4.0~10.6 kg COD/m<sup>3</sup>-d 下，四組 EGSB 反應器 COD 去除率皆達 97.2% 以上，VLR 增加到 12.2 kg COD/m<sup>3</sup>-d 時， $u_s$  為 0.5、3.0 m/h 之兩組反應器仍能正常操作(污泥量 = 116.8、120.3 g; COD 去除率 = 99.0、99.0%)，惟  $u_s$  為 6.0、9.0 m/h 之兩組反應器之污泥量(110.8、104.7 g)則明顯少於前者(即  $u_s$  為 0.5、3.0 m/h 者)，後者流失之污泥顆粒粒徑分別為 1.39~4.28 mm ( $d_p = 2.90$  mm)及 1.93~4.72 mm ( $d_p = 3.12$  mm)，致 COD 去除率分別下降為 65.3、63.3%。由質傳參數值( $\phi^2 = 4.7\sim 37.8$ 、 $Bi = 2.2\sim 17.7$ 、 $\eta = 0.64\sim 1.12$ )可知，EGSB 反應器污泥顆粒外部質傳阻抗對基質去除速率之影響不大，但污泥顆粒內部之質傳阻抗對基質去除速率之影響則相當大，且內部質傳阻抗隨著 VLR、 $u_s$  之增加而增大。EGSB 反應器流況趨於完全混合，由動力模式模擬所得 EGSB 反應器酚去除率與實驗值之誤差在  $\pm 7\%$  範圍內。

**關鍵字：**膨脹顆粒污泥床、表面流速、顆粒特性、質傳阻抗、動力模式

## ABSTRACT

With effluent-recycled expanded granular sludge bed (EGSB) reactors were used to treat an inhibitory substrate phenol, when the volumetric loading rates (VLR) of the EGSB reactors were maintained at 4.0–12.2 kg COD/m<sup>3</sup>-d, the average granule size ( $d_p$ ; a variation range of 0.88 to 2.35 mm) increased with increasing VLR and  $u_s$ . At the VLRs of 4.0–10.6 kg COD/m<sup>3</sup>-d, the four EGSB reactors were found very efficient for the removal of COD (greater than 97.2%). With a further increase of VLR to 12.2 kg COD/m<sup>3</sup>-d, the two EGSB reactors with  $u_s$  of 0.5 and 3.0 can still be operated properly (biomass = 116.8 and 120.3 g; COD removal = 99.0 and 99.0%). However, the biomass of the two EGSB reactors with  $u_s$  of 6.0 and 9.0 m/h (biomass = 110.8 and 104.7 g) obviously decreased, compared with the two EGSB reactors with  $u_s$  of 0.5 and 3.0 m/h. The granule size measured from the wash-out biomass for the two EGSB reactors with  $u_s$  of 6.0 and 9.0 m/h were 1.39–4.28 mm ( $d_p = 2.90$  mm) and 1.93–4.72 mm ( $d_p = 3.12$  mm), respectively. Thus, the COD removal efficiencies of the two EGSB reactors with  $u_s$  of 6.0 and 9.0 m/h dropped markedly to 65.3 and 63.3%, respectively. According to mass-transfer parameter values ( $\phi^2 = 4.7\sim 37.8$ ,  $Bi = 2.2\sim 17.7$ ,  $\eta = 0.64\sim 1.12$ ), the external mass transfer resistance of the granule in the EGSB reactor only imposed a slight effect on overall substrate removal rate. In contrast, the internal mass transfer resistance of the granule enforced a strong effect on overall substrate removal rate; the internal mass transfer resistance increased with VLR and  $u_s$ . By using the proposed kinetic model, the calculated phenol removal efficiencies of the EGSB reactors were only  $\pm 7\%$  deviated from the experimental results.

**Keywords:** expanded granular sludge bed, superficial velocity, granule characteristics, mass transfer, kinetic model.

## 一、前言與研究目的

膨脹顆粒污泥床(EGSB)反應器為上流式厭氣污泥床(UASB)反應器的一種改良型式，憑藉著處理水迴流操作方式，提高反應器之表面流速，使部份污泥顆粒達流體化，促進污泥顆粒與液相基質的混合接觸，有利於液相基質傳輸到污泥顆粒(de Man et al., 1988; Kato et al., 1994)。此外，藉由出流水迴流操作提高表面流速，可降低反應器進流端之基質濃度，有利於抑制性基質(如酚)(Jih et al., 2003)或毒性基質(如甲醛)(Zoutberg and Frankin, 1996)之降解。

EGSB 反應器在總基質降解過程(overall substrate removal)，除了厭氣微生物之生化反應外，因顆粒化污泥所造成之質傳阻抗亦應加以考慮，反應物(基質)先從液相經擴散液層傳輸至污泥顆粒之表面(外部質傳)，隨後，基質於污泥顆粒內部擴散(內部質傳)並進行基質降解反應(Wu and Hickey, 1997)。大部分學者(Jih et al., 2003; Huang et al., 2003; Chou and Huang, 2005)皆以效益因子(effectiveness factor,  $\eta$ )描述質傳阻抗之影響，Thiele modulus ( $\phi$ )與 Biot number (Bi)則可分別被用來描述反應速率與擴散速率之比值及外質傳速率與內質傳速率之比值(Chou and Huang, 2005)。

本研究除了建立 EGSB 反應器動力模式外，亦以 EGSB 反應器處理含抑制性酚基質之合成廢水，以出流水迴流操控不同表面流速，並改變體積負荷率進行試驗，以獲得 EGSB 反應器於穩定操作狀態下之實驗數據，同時於穩定操作狀態下，自 EGSB 反應器內取出污泥顆粒混合液，分析污泥顆粒特性。此外，本研究亦以獨立批次實驗測定酚厭氣降解之 intrinsic 動力常數，最後以 EGSB 反應器動力模式探討 EGSB 反應器中之基質質傳現象，並驗證模式之適用性。

## 二、EGSB 反應器動力模式

當 EGSB 反應器達到穩定操作狀態時，酚基質在污泥顆粒內之質通量梯度恰等於基質在污泥顆粒內之被利用率，以半飽和常數( $K_s$ )及污泥顆粒半徑( $R$ )分別為特性濃度參數及特性長度參數，無因次化後可表示為：

$$\frac{1}{r^{*2}} \frac{d}{dr^*} \left( r^{*2} \frac{dS_f^*}{dr^*} \right) = \frac{\phi^2 S_f^*}{1 + S_f^* + \alpha S_f^{*2}} \quad (1)$$

$$\phi^2 = kX_f R^2 / D_f K_s \quad (2)$$

$$\alpha = K_s / K_i \quad (3)$$

$$\frac{dS_f^*}{dr^*} = 0 \quad \text{at } r^* = 0 \text{ (the center of granule)} \quad (4)$$

$$\frac{dS_f^*}{dr^*} = \text{Bi} (S_b^* - S_s^*) \quad \text{at } r^* = 1 \text{ (the surface of granule)} \quad (5)$$

$$\text{Bi} = D_w R / D_f L \quad (6)$$

式(6)中擴散液層厚( $L$ )為水力條件與 EGSB 反應器之函數(Hines and Maddox, 1985)：

$$L = 1.1 D_w u_s^{-1} \text{Sc}^{2/3} \text{Re}^{0.51} \quad (7)$$

為比較質傳阻抗對 overall reaction process 之影響，乃定義效益因子為 apparent reaction rate 對無質傳阻抗 intrinsic reaction rate 之比值(Grady et al., 1999; Jih et al., 2003)。

$$\eta = \frac{\phi^2 \int_0^1 \frac{S_f^*}{1 + S_f^* + \alpha S_f^{*2}} r^{*2} dr^*}{\phi^2 \int_0^1 \frac{S_b^*}{1 + S_b^* + \alpha S_b^{*2}} r^{*2} dr^*} = \frac{3(1 + S_b^* + \alpha S_b^{*2})}{\phi^2 S_b^*} \left( \frac{dS_f^*}{dr^*} \Big|_{r^*=1} \right) \quad (8)$$

### 三、實驗設備與方法

#### 1 EGSB 反應器處理抑制性酚基質試程之操作

本研究使用之 EGSB 反應器材質為雙層式透明壓克力，內層為反應區(6 cm (L) × 6 cm (W) × 105 cm (H)；有效體積 3.78 L)，外層為循環之保溫水層，反應器上半部為氣液固分離器。EGSB 反應器藉出流水迴流操控表面流速分別為 0.5、3.0、6.0、9.0 m/h，並藉循環保溫水層使反應器維持於 35°C。EGSB 反應器每一試程都至少操作三個月，且每星期分析兩次進、出流水之 pH、酚、COD 及 VFAs，若兩星期內四項參數之測值變化在 5% 以內，則視 EGSB 反應器已達穩定狀態。

#### 2 酚厭氣降解(混合菌)之 intrinsic 動力常數之測定

由已達穩定狀態操作下之 EGSB 反應器取出適量污泥顆粒混合液，並置入有效體積 500 mL 之血清瓶中且置入數個 glass beads，隨即將血清瓶放在恆溫振盪器(100 rpm)振盪，將污泥顆粒破碎成 dispersed sludge，再進行酚厭氣降解批次實驗。於批次降解過程中陸續取樣分析反應器中液相酚之殘餘濃度直至降解完成，此期間並測定血清瓶內懸浮污泥濃度(X)至少四次，最後再以非線性迴歸(Levenberg-Marquardt algorithm)求取酚厭氣降解之 intrinsic 動力常數。

#### 3 污泥顆粒粒徑分析

本研究以影像分析測定污泥顆粒粒徑分佈，影像分析設備包括：影像取得設備(Bischke, Canada, Model CCD-5024 N)；影像顯示(Brillhante, Germany, Model 1409)；影像處理與分析軟硬體(Matrox Inspector version 2.1 for Windows NT, Personal Computer)。

#### 4 水質分析

COD、酚、VSS 皆依據美國 APHA (1998)之標準方法(Standard Methods)。VFAs 採用氣相層析儀：Young Lin Instrument, Model Acme 6000M GC；檢出器：FID (230°C)；層析管：Nukol capillary column, 0.53 mm ID × 15 m。

### 四、結果與討論

#### 1. EGSB 反應器之處理效率

四組 EGSB 反應器(Reactor A、B、C、D)分別採處理水迴流操作方式，控制四種不同表面流速( $u_s$  分別為 0.5、3.0、6.0 及 9.0 m/h)，體積負荷率 4.0~12.2 kg COD/m<sup>3</sup>-d 下所得之穩定操作結果示於表 1。在體積負荷率 4.0、6.6、10.6 kg COD/m<sup>3</sup>-d 之操作條件下，四組 EGSB 反應器中之生物質量(biomass)皆隨著體積負荷率之增加而增加且變異不大(40.1~44.6、66.3~69.4、104.8~108.5 g)，COD 去除率皆達 97.2% 以上；惟在體積負荷率 12.2 kg COD/m<sup>3</sup>-d(試程 4)時，表面流速 6.0 及 9.0 m/h 之兩組反應器(C4、D4)之污泥量(110.8、104.7 g)明顯小於表面流速 0.5 及 3.0 m/h 之兩組反應器(A4、B4) (污泥量 116.8、120.3 g)，

致使 COD 去除率分別下降為 65.3 及 63.3%，出流水中酚濃度分別達 563 及 590 mg/L。Wen et al. (1994)以 UASB 反應器處理酚廢水，經動力分析結果，液相酚濃度達 516 mg/L 以上時，將對反應器中之微生物造成抑制。

Table 1. Operating conditions and performance of expanded granular sludge bed reactors

Test run	$u_s$ (m/h)	$S_i^a$ (mg COD/L)	VLR <sup>b</sup> (kg COD/m <sup>3</sup> -d)	$H^c$ (cm)	$X_i^d$ (mg VSS/L)	Biomass (g)	Effluent			COD removal (%)
							$S_e^a$ (mg COD/L)	VFAs (mg/L)	VSS (mg/L)	
A1	0.5	1500 (630)	4.0	44	25320	40.1	40 (0.7)	2.3	36	97.3
B1	3.0	1500 (630)	4.0	54	22400	43.5	42 (0.6)	2.0	32	97.2
C1	6.0	1500 (630)	4.0	59	20260	43.0	28 (0.4)	1.5	30	98.1
D1	9.0	1500 (630)	4.0	61	20310	44.6	28 (0.4)	1.5	30	98.1
A2	0.5	2500 (1049)	6.6	52	36170	67.7	35 (0.6)	2.2	43	98.6
B2	3.0	2500 (1049)	6.6	56	32870	66.3	30 (0.5)	1.8	48	98.8
C2	6.0	2500 (1049)	6.6	62	30540	68.2	24 (0.3)	1.5	33	99.0
D2	9.0	2500 (1049)	6.6	64	30130	69.4	24 (0.4)	1.5	31	99.0
A3	0.5	4000 (1679)	10.6	65	44800	104.8	42 (0.3)	2.5	46	99.0
B3	3.0	4000 (1679)	10.6	66	44240	105.1	42 (0.4)	2.7	46	99.0
C3	6.0	4000 (1679)	10.6	71	42360	108.3	38 (0.3)	6.5	42	99.1
D3	9.0	4000 (1679)	10.6	73	41270	108.5	38 (0.2)	4.5	40	99.1
A4	0.5	4600 (1930)	12.2	72	45080	116.8	44 (0.4)	4.5	50	99.0
B4	3.0	4600 (1930)	12.2	74	45160	120.3	48 (1.0)	6.0	48	99.0
C4	6.0	4600 (1930)	12.2	72	42740	110.8	1595 (563)	181	84	65.3
D4	9.0	4600 (1930)	12.2	70	41560	104.7	1690 (590)	198	122	63.3

<sup>a</sup> The number indicated in parenthesis is based on phenol; <sup>b</sup> Volumetric loading rate =  $Q_i S_i / V_R$ ,  $V_R = 3.78$  L;

<sup>c</sup>  $H$  = sludge-bed height; <sup>d</sup>  $X_i$  = biomass concentration; Temp. = 35°C;  $Q_i = 10$  L/d.

## 2. EGSB 反應器污泥顆粒特性

表 2 為四組 EGSB 反應器(表面流速  $u_s = 0.5$ 、 $3.0$ 、 $6.0$  及  $9.0$  m/h)於穩定狀態時，反應器內污泥顆粒特性測定之結果。在表面流速  $0.5$ 、 $3.0$ 、 $6.0$  及  $9.0$  m/h 之操作條件下，EGSB 反應器污泥床內污泥顆粒比重介於  $1.03\sim 1.06$ ，變化不大。但 EGSB 反應器內污泥顆粒平均粒徑(weighted mean  $d_p$ )隨著表面流速( $u_s$ )之增加而增大，於體積負荷率  $4.0\sim 12.2$  kg COD/m<sup>3</sup>-d 時，四組 EGSB 反應器內 weighted mean  $d_p$  分別為  $0.88\sim 1.33$  mm ( $u_s = 0.5$  m/h)、 $1.03\sim 1.85$  mm ( $u_s = 3.0$  m/h)、 $1.38\sim 1.98$  mm ( $u_s = 6.0$  m/h)及  $1.66\sim 2.35$  mm ( $u_s = 9.0$  m/h)。

由表 2 亦可知，EGSB 反應器中之污泥顆粒平均粒徑( $d_p$ )隨體積負荷率之增加而增大(當  $u_s = 0.5$  m/h 時，體積負荷率  $4.0$ 、 $6.6$ 、 $10.6$  及  $12.2$  kg COD/m<sup>3</sup>-d 之 weighted mean  $d_p$  分別為  $0.88$ 、 $1.01$ 、 $1.27$  及  $1.33$  mm；當  $u_s = 3.0$ 、 $6.0$  及  $9.0$  m/h 時， $d_p$  亦有相同增大之趨勢)，且污泥床下層之  $d_p$  為最大，其次為中層者，而上層者為最小。污泥顆粒生物密度( $X_f$ )亦隨體積負荷率之增加而增大。在體積負荷率為  $12.2$  kg COD/m<sup>3</sup>-d 時，表面流速  $6.0$  及  $9.0$  m/h 之兩組反應器(C4、D4)皆發生污泥顆粒流失現象。圖 1 為該兩組反應器流失污泥顆粒之粒徑分佈圖，流失污泥顆粒之粒徑分別為  $1.39\sim 4.28$  mm (平均為  $2.90$  mm)及  $1.93\sim 4.72$  mm (平

均為 3.12 mm)。體積負荷率及表面流速的增加均會增大污泥顆粒粒徑，雖然較大之污泥顆粒粒徑通常會因重力而沈降於反應器污泥床區，惟太大的污泥顆粒因不利於基質於污泥顆粒內之質傳，會造成污泥中空現象，且太大的表面流速亦較易流失污泥顆粒，Alphenaar et al. (1993)亦指出，因質傳阻抗之限制，污泥顆粒內部可能形成中空狀。

Table 2. Granule characteristics of expanded granular sludge bed reactors

Test run	VLR <sup>a</sup> (kg COD/m <sup>3</sup> -d)	$u_s$ (m/h)	Granule's sp. gr. (-)	$d_p$ (mm)				$X_f^b$ (mg VSS/L)
				Lower	Middle	Upper	Weighted mean	
A1	4.0	0.5	1.06	0.97	0.79		0.88	125100
B1	4.0	3.0	1.04	1.23	0.95	0.81	1.03	119400
C1	4.0	6.0	1.05	1.97	1.05	0.97	1.38	113700
D1	4.0	9.0	1.03	2.06	1.67	1.23	1.66	122500
A2	6.6	0.5	1.05	1.12	0.98	0.89	1.01	136300
B2	6.6	3.0	1.04	1.69	1.25	0.99	1.34	135200
C2	6.6	6.0	1.04	2.14	1.89	1.45	1.82	123400
D2	6.6	9.0	1.04	2.36	2.29	1.92	2.18	124600
A3	10.6	0.5	1.05	1.59	1.15	1.07	1.27	146800
B3	10.6	3.0	1.04	2.01	1.88	1.57	1.81	146100
C3	10.6	6.0	1.05	2.20	2.06	1.77	1.98	142000
D3	10.6	9.0	1.04	2.51	2.41	2.02	2.27	142200
A4	12.2	0.5	1.05	1.62	1.17	1.09	1.29	147300
B4	12.2	3.0	1.05	2.03	1.88	1.57	1.83	147200
C4	12.2	6.0	1.04	2.21	2.03	1.72	1.98	142500
D4	12.2	9.0	1.04	2.51	2.48	2.03	2.35	142200

<sup>a</sup> Volumetric loading rate =  $Q_i S_i / V_R$ ,  $V_R = 3.78$  L; <sup>b</sup>  $X_f$  = Microbial density.

### 3. 酚厭氣降解之 Intrinsic 動力常數

在酚厭氣降解之批次實驗中，加入之酚基質起始濃度分別為 60、150 及 450 mg phenol/L(進行三次酚厭氣降解批次實驗)，於降解過程中陸續取樣分析液相中酚之殘餘濃度直至降解完成，由圖 2 可知，在酚基質起始濃度分別為 60、150 及 450 mg phenol/L 時，intrinsic  $k$  值分別為 0.37、0.38 及 0.48 mg phenol/mg VSS-d，intrinsic  $K_s$  值分別為 21、19 及 35 mg phenol/L，intrinsic  $K_i$  值則分別為 350、312 及 292 mg phenol/L。將此三組動力常數取其平均後可得 intrinsic  $k$ 、 $K_s$  及  $K_i$  之值分別為  $0.41 \pm 0.06$  mg phenol/mg VSS-d、 $25 \pm 8.7$  mg phenol/L 及  $318 \pm 29$  mg phenol/L。

### 4. EGSB 反應器之質傳阻抗

本研究以效益因子( $\eta$ )、Thiele modulus ( $\phi$ )及 Biot number (Bi)探討基質質傳阻抗現象。由表 3 可知，隨著體積負荷率及表面流速之增加， $\phi^2$  值亦皆隨著增加，亦即基質於污泥顆粒內之質傳阻抗隨著體積負荷率之增加而增加，主要是因高體積負荷率及表面流速之 EGSB 反應器有較大污泥顆粒之故。同樣原因，Bi 值亦隨著體積負荷率及表面流速之增加而增加。在體積負荷率 4.0~10.6 kg COD/m<sup>3</sup>-d 下， $\eta$  值隨著體積負荷率之增加而減小，主要亦因體積

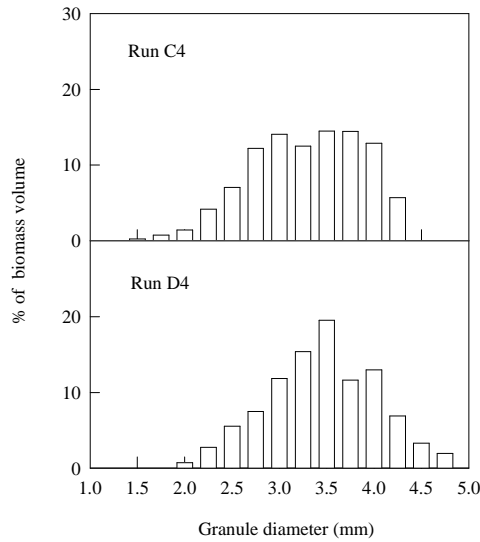


Figure 1. Granule size distribution of wash-out granules (Run C4 and D4).

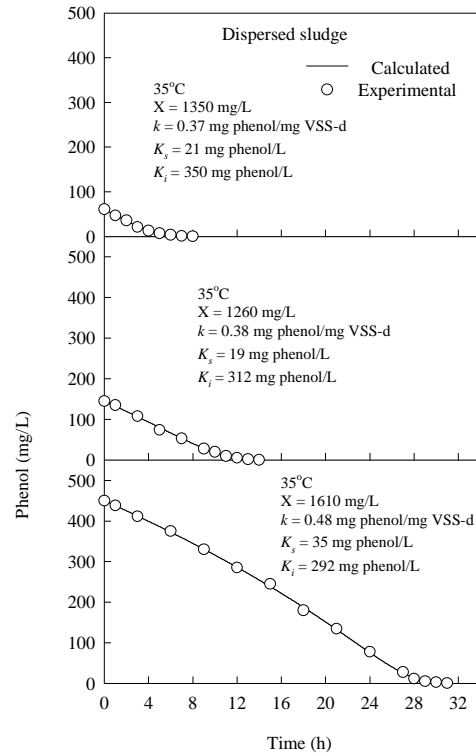


Figure 2. Estimation of intrinsic kinetic constants for phenol degradation in batch reactors.

Table 3. Mass transfer resistance parameter values

Test run	$u_s$ (m/h)	Volumetric loading rate (kg COD/m <sup>3</sup> -d)	$d_p$ (mm)	$L$ (mm)	$\phi^2$ (-)	Bi (-)	$\eta$ (-)
A1	0.5	4.0	0.88	0.25	4.7	2.2	0.77
B1	3.0	4.0	1.03	0.12	6.1	5.5	0.79
C1	6.0	4.0	1.38	0.10	10.4	8.7	0.75
D1	9.0	4.0	1.66	0.09	16.4	11.2	0.69
A2	0.5	6.6	1.01	0.23	6.8	2.7	0.74
B2	3.0	6.6	1.34	0.12	11.8	7.2	0.75
C2	6.0	6.6	1.82	0.10	19.9	11.8	0.69
D2	9.0	6.6	2.18	0.09	28.5	15.5	0.65
A3	0.5	10.6	1.27	0.24	11.5	3.3	0.70
B3	3.0	10.6	1.81	0.12	23.1	9.3	0.68
C3	6.0	10.6	1.98	0.09	27.0	13.5	0.66
D3	9.0	10.6	2.27	0.08	35.5	17.4	0.64
A4	0.5	12.2	1.33	0.25	11.8	3.3	0.70
B4	3.0	12.2	1.85	0.12	23.7	9.3	0.68
C4	6.0	12.2	1.98	0.09	27.0	13.5	1.08
D4	9.0	12.2	2.35	0.08	37.8	17.7	1.12

負荷率增加，造成污泥顆粒粒徑增大，增加質傳阻抗之故。但在體積負荷率  $12.2 \text{ kg COD/m}^3\text{-d}$  時，表面流速 6.0 及 9.0 m/h 之兩組反應器(C4、D4)之 $\eta$ 值反而增加，且值大於 1 (1.08~1.12)，意謂著 EGSB 反應器處理抑制性基質時，污泥顆粒之質傳阻抗會使污泥顆粒之 apparent 反應速率大於 intrinsic 反應速率。

綜上顯示 EGSB 反應器污泥顆粒對處理酚基質之質傳阻抗不可忽略，且質傳對 overall substrate removal 之限制因素因體積負荷率之增加(污泥顆粒粒徑增大)而更為重要，而其中內質傳阻抗之重要性大於外質傳阻抗。

#### 5. 動力模式之模擬及實驗驗證

EGSB 反應器動力模式模擬之酚去除率與實驗值之誤差在  $\pm 7\%$  範圍內，顯示本研究推導之 EGSB 反應器動力模式，頗適合用於模擬 EGSB 反應器處理抑制性基質之出流水質，本研究所建立之 EGSB 反應器動力模式可適用於 EGSB 反應器之功能設計。

### 四、結論

1. 四組 EGSB 反應器(表面流速  $u_s$  分別為 0.5、3.0、6.0 及 9.0 m/h)處理抑制性酚基質廢水，在水力停留時間 9.1 小時，溫度  $35^\circ\text{C}$ ，體積負荷率  $4.0\sim 10.6 \text{ kg COD/m}^3\text{-d}$  之操作條件下，四組 EGSB 反應器中之生物質量均隨著體積負荷率之增加而增加，COD 去除率皆可達 97.2% 以上。
2. 當體積負荷率提高到  $12.2 \text{ kg COD/m}^3\text{-d}$  時， $u_s$  為 0.5 及 3.0 m/h 之兩組反應器仍能正常操作，COD 去除率皆達 99.0%；而  $u_s$  為 6.0 及 9.0 m/h 之兩組反應器部分污泥顆粒因質傳阻抗之限制造成污泥顆粒中空而流失，致 COD 去除率分別下降為 65.3 及 63.3%。 $u_s$  為 6.0 及 9.0 m/h 兩組反應器流失之污泥顆粒粒徑分別為 1.39~4.28 mm (平均粒徑為 2.90 mm)及 1.93~4.72 mm (平均粒徑為 3.12 mm)。
3. EGSB 反應器中污泥顆粒平均粒徑( $d_p$ )皆隨著表面流速(0.5~9.0 m/h)及體積負荷率( $4.0\sim 12.2 \text{ kg COD/m}^3\text{-d}$ )之增加而增大( $d_p$  變化範圍 0.88~2.35 mm)；EGSB 反應器內污泥床中污泥顆粒粒徑大小之分佈情形，以污泥床下層之污泥顆粒為最大，且逐漸往上遞減。污泥顆粒比重則未受表面流速及體積負荷率之影響，其值介於 1.03~1.06。
4. 質傳參數值( $\phi^2 = 4.7\sim 37.8$ 、 $Bi = 2.2\sim 17.7$ )皆隨表面流速及體積負荷率之增加而增加，以處理水迴流操控之 EGSB 反應器，污泥顆粒外部質傳阻抗對基質去除速率之影響不大，惟污泥顆粒之內部質傳阻抗對基質去除速率之影響則相當大，且內部質傳阻抗隨著表面流速及體積負荷率之增加(污泥顆粒粒徑增大)而增加。
5. EGSB 反應器流況趨於完全混合，由動力模式模擬所得 EGSB 反應器酚去除率與實驗值之誤差在  $\pm 7\%$  範圍內，本研究所建立之 EGSB 反應器動力模式可適用於 EGSB 反應器之功能設計。

### 五、計畫成果自評

本計畫主要成果除了推導涵蓋有 intrinsic 動力、污泥顆粒特性參數、生物/物理參數之 EGSB 反應器動力模式外，另藉四組 EGSB 反應器(採迴流操控表面流速  $u_s = 0.5、3.0、6.0$  及 9.0 m/h)處理酚廢水，探討表面流速、體積負荷率對 EGSB 反應器之處理效率及反應器內



污泥顆粒特性之影響，另以獨立實驗求得酚厭氣降解動力常數，最後以 EGSB 反應器實際操作數據驗證動力模式，並由質傳參數( $\eta$ 、 $\phi$ 、 $Bi$ )，探討 EGSB 反應器污泥顆粒之基質質傳效應，釐清內、外質傳阻抗對基質去除速率之影響。本研究推導之動力模式適合用以預測 EGSB 反應器處理抑制性基質之出流水質，研究內容與原計畫預期完成之目標相符，研究成果頗具學術價值，已準備投稿國外學術期刊。

## 六、參考文獻

- Alphenaar, P. A., Pérez, M. C. and Lettinga, G, "The influence of substrate transport limitation on porosity and methanogenic activity of anaerobic sludge granules," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, Vol. 39, pp. 276-280 (1993).
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), and Water Environment Federation (WEF). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20th edition, American Public Health Association, Washington, D. C (1998).
- Chou, H. H. and Huang, J. S. "Role of mass transfer resistance in overall substrate removal rate in upflow anaerobic sludge bed reactors," *J. Envir. Eng. (ASCE)*, Vol. 131, pp. 548-556 (2005).
- Grady, C. P. L., Daigger, G. T. and Kim, H. C, *Biological wastewater treatment*, 2nd edition, revised and expanded, Marcel Dekker, Inc., New York. (1999).
- Hines, A. L. and Maddox, R. N, *Mass transfer fundamentals and applications*, Prentice-Hall, New Jersey. (1985).
- Huang, J. S., Jih, C. G., Lin, S. D. and Ting, W. H. "Process kinetics of UASB reactors treating non-inhibitory substrate," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, Vol. 78, pp. 762-772 (2003).
- Jih, C. G., Huang, J. S. and Huang, S. Y, "Process kinetics of UASB reactors treating inhibitory substrate," *Water Envir. Res.*, Vol. 75, pp. 5-14 (2003).
- Kato, M. T., Field, J. A., Kleerebezem, R. and Lettinga, G, "Treatment of low strength soluble wastewaters in UASB reactors," *J. Ferment. Bioengng.*, Vol. 77, pp. 679-686 (1994).
- de Man, A. W. A., van der Last, A. R. M. and Lettinga, G, "The use of EGSB and UASB anaerobic systems for low strength soluble and complex wastewaters at temperatures ranging from 8 to 30°C," *Adv. Water Pollut. Control*, Vol. 5, pp. 197-209 (1988).
- Wen, T. C., Cheng, S. S. and Lay, J. J, "A kinetic model of a recirculated upflow anaerobic sludge blanket treating phenolic wastewater," *Water Environ. Res.*, Vol. 66, pp. 794-799 (1994).
- Wu, M. M. and Hickey, R. F. "Dynamic model for UASB reactor including reactor hydraulics, reaction, and diffusion," *J. Envir. Eng. (ASCE)*, Vol. 123, pp. 244-252 (1997)
- Zoutberg, G. R. and Frankin, R, "Anaerobic treatment of chemical and brewery wastewater with a new type of anaerobic reactor; the BIOBED<sup>®</sup> EGSB reactor," *Water Sci. Technol.*, Vol. 34, pp. 375-381(1996).