

## 低濃度廢水厭氧處理可行性評估

邱創汎\* 游惠宋\* 彭明鏡\* 劉有清\*\*

### 摘要

本文針對厭氧處理應用於低濃度之可行性，首先從經濟面及技術面加以分析，隨後以國外的成功案例說明其優點。經濟分析結果顯示，厭氧處理只要其體積去除量達到 $1 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ 以上，其整體效益就會優於目前常用的好氧處理技術。技術分析結果顯示，無論是微生物分解速率或是現有之處理槽設計技術，要達到 $1 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ 的體積去除量並無困難。國外案例也顯示，實廠操作並無困難。使用厭氧處理槽串聯好氧處理槽，將成為低濃度廢水處理的新技術走向。

#### 【關鍵字】

1. 厌氧處理(anaerobic treatment)
2. 低濃度廢水(low strength wastewater)
3. 生物處理(biological treatment)
4. 經濟評估(cost analysis)
5. 都市污水(domestic wastewater)

---

\* 工業技術研究院化學工業研究所研究員

\*\* 工業技術研究院化學工業研究所助理研究員

## 一、前　　言

厭氧處理程序除效率高之外，也具有節省能源、減少污泥產生量的優點，與全球推廣中的“綠色製程”追求的理念不謀而合，加上厭氧程序相關技術也日益成熟，所以無論在國內或國外，厭氧技術都已逐漸普及到各種工業廢水的處理。但是截至目前為止，大部份的應用案例，仍侷限於高濃度有機廢水( $COD > 2,000 \text{ mg/L}$ )的處理，在低濃度廢水處理方面，雖然國外已有許多研究報告及案例陸續發表，但國內實廠應用經驗仍少。本文主要從經濟面及技術面分析厭氧技術應用於低濃度的可行性，隨後以國外案例說明低濃度廢水厭氧處理的優點。

## 二、經濟評估

目前對於低濃度的有機廢水，除少部份使用純粹物化處理外，主要採用好氧生物處理法為主，或以物化處理搭配好氧生物處理。表1列舉好氧處理及厭氧處理在動力需求、處理槽造價、生物污泥產生量方面的相關數值，作為比較。

表1 好氧及厭氧系統之比較

項目	好氧處理		厭氧處理	
	範圍	一般值	範圍	一般值
動力需求(曝氣動力) kWh/kg COD Removal	0.5~1.5	1	0	0
動力需求 kWh/m <sup>3</sup> (其它如廢水輸送等)	0.05~0.3	0.2	0.05~0.3	0.2
生物污泥產生量 kgSS/kgCOD removal	0.2~0.5	0.5	0.05~0.1	0.08
處理系統造價 <sup>(註1)</sup> NT\$ 10,000/m <sup>3</sup>	0.5~2.0	1	0.8~2.0	1
註1：好氧系統包含曝氣系統及終沉池，厭氧系統包含氣體收集及排放設備				

以好氧生物處理程序最常用的活性污泥法或接觸氧化法為例，這兩種方法每單位體積處理槽體造價約為NT\$ 5,000~15,000/m<sup>3</sup>，每單位體積處理槽每天可去除的

有機物(體積去除量)約為 $0.5\sim 1.5 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ ，以 $0.8 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ 最普遍，而好氧處理每去除 $1 \text{ kgCOD}$ 約產生 $0.2\sim 0.5 \text{ kgSS}$ ，需要曝氣動力約 $1 \text{ kWh}$ 。厭氧處理槽造價與好氧處理槽造價相當，因此厭氧系統若能達到與好氧系統相同的體積去除能力，則其初設成本與佔地面積會與好氧處理相當。但在操作成本方面，厭氧系統因為不需要曝氣動力，所需的動力費用約只有好氧的 $1/5$ ，厭氧產生的污泥量約只有好氧處理的 $1/10\sim 1/5$  ( $0.05\sim 0.1 \text{ kgSS/kgCODr}$ )，污泥處理費用也相對降低，此外有些厭氧處理操作中需添加大量碳酸鹼度以維持系統pH值穩定，此項藥劑費用往往是厭氧操作成本中的主要項目，但是處理低濃度廢水時，因為系統水力停留時間短，所以槽內pH變化可藉由監測進、出流水pH值加以掌握，一旦發現pH值下降，只要利用氫氧化鈉調整即可，所以鹼度的添加與否，不像處理高濃度廢水般的關鍵。厭氧系統起動微生物馴養期間，需比較密切的監測，但一旦起動完成，例行的操作反而比好氧處理簡單，無需外加人力。所以無論是由動力、藥劑、污泥處理、操作人力等各方面比較，厭氧處理都會比好氧處理節省。也就是說，若以現有好氧處理作為比較的標的，厭氧處理只要體積去除量達到 $0.8 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ 即具有相當強的競爭力，若能高於 $1 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ ，就會有絕對的優勢。

### 三、技術分析

從前段經濟分析結果顯示，厭氧技術是否適合處理低濃度廢水，必需由其應用於低濃度廢水時，其體積去除量是否能高於 $1 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ 而定。若廢水成份可被厭氧分解，依已有的厭氧處理槽操作經驗，達到此一目標並不困難。

過去認為厭氧無法適用於低濃度廢水，主要是基於三種考量，首先是有人推測，在低醋酸濃度的環境下，熱力學平衡不利醋酸甲烷菌進行甲烷化反應，所以即使延長停留時間，也無法增加其去除效果；其次是認為厭氧微生物在低基質濃度的環境下，其反應速率會明顯降低，以致於失去實用價值；另外則是認為處理低濃度廢水時，處理槽性能無法維持穩定，因為厭氧微生物增殖速率緩慢，厭氧處理低濃度廢水時，處理槽水力停留時間只有數小時，在這種情形下，微生物的流失量會高於微生物的增殖量，所以處理槽經過一段期間操作後，性能會逐漸降低，終至完全失效。前兩個因素可以由學理上加以釐清，污泥流失問題則可經由處理槽的改良進行突破。

### 3.1 热力學上的限制

微生物分解有機物主要目的之一是由其中獲得能量，以維持其生命現象。有人推測當廢水濃度降低時，有機物酸化之後產生的醋酸濃度相對降低，但是厭氧槽中溶解性的甲烷及二氧化碳濃度卻不論進流水有機物濃度的高低，只要處理槽內有沼氣開始產生，其氣相分壓都會在0.5 atm 附近，所以當廢水濃度低到某一程度時，醋酸分解成甲烷的反應，便可能變成非但無法產生能量，反而需要輸入能量，所以厭氧處理槽的出流水COD濃度永遠無法低到如好氧處理一般程度。

反應能否產出能量可以由反應前後的自由能變化來預估。在標準狀態之下，醋酸分解成甲烷及二氧化碳的自由能變化( $DG^\circ$ )為-31.0 KJ/mole (Malina and Pohland, 1992, p6)，若以厭氧處理槽中 $CO_2$ 及 $CH_4$ 的分壓各約為0.5 atm 粗略估計，醋酸濃度必需低於0.05 mg/L以下時，甲烷化反應的反應平衡才會逆轉(由有利於產物生成，轉變成不利於產物生成)。一般厭氧處理槽醋酸濃度多在10 mg/L以上，其平衡仍是趨向於產物生成，也就是熱力學平衡實際上是不會構成厭氧應用於低濃度廢水的障礙。

### 3.2 微生物活性

厭氧處理系統中，包括至少三種以上微生物共同合作。若廢水中的污染物為溶解態，則在一般情況下，甲烷化是整體反應的速率決定步驟，一般厭氧處理槽的操作維護也以甲烷菌活性作為指標。Fukuzaki(1990)等人的研究報告指出，若環境中的分子態的醋酸濃度(醋酸甲烷菌的直接基質)低於特定的下限值(threshold)，則醋酸甲烷菌無法行正常的甲烷化作用。此一下限值隨不同甲烷菌種類而有所不同，以pH 7.0的環境下為例，*Methanosarcina barkeri*的醋酸下限值約為130 mg/L，而另一種可能是*Methanothrix spp.*的甲烷菌下限值則為1~3 mg/L。現有的厭氧系統主要用於處理高濃度廢水，處理槽出流水生物可分解的COD濃度往往高達數百mg/L或甚至上千，揮發酸濃度也在100 mg/L以上，所以菌相上以適應於高基質濃度的*Methanosarcina*為主，若以此類污泥作為植種，評估低濃度廢水厭氧處理的反應速率，自然無法得到好的結果。若是能培養以*Methanothrix*為主的微生物群，則該菌在低基質濃度下仍能正常作用，出流水COD便能有效降低。

事實上從微生物動力學的觀點，微生物在低濃度下是否仍能保有高活性，與微生物對該基質的親和力(Monod constant, 或half-saturation constant,  $K_s$ )有關。根據Henze and Harremoes的整理，文獻上報導的甲烷菌的最大比生長速率(maximum

specific growth rate,  $M_{max}$ )隨培養條件不同，範圍涵蓋  $0.08 \sim 3.4 \text{ day}^{-1}$ ，而以  $0.1 \sim 0.4 \text{ day}^{-1}$  最常見，微生物產率 ( $Y$ ) 則涵蓋  $0.02 \sim 0.28 \text{ kgVSS/kgCOD}$ ，以  $0.05 \text{ kgVSS/kgCOD}$  最常見，基質飽和常數  $K_s$  則由  $2 \sim 3,900 \text{ mg-HAc/L}$  都有。報告指出，*Methanothrix* 及 *Methanosarcina* 的  $K_s$  值分別為  $30$  及  $200 \text{ mg HAc/L}$  (van Haandel and Lettinga, 1994, p.37)。

基於下列假設，可以求出在不同體積去除量下，厭氧處理槽內所需要的醋酸甲烷菌的數量：

1. 假設厭氧處理系統水力流態趨近於一個完全混合型態的反應槽(CSTR)，所以其出流水醋酸濃度，等於槽內醋酸濃度。
2. 假設厭氧槽內醋酸甲烷菌以 *Methanothrix* 為主，且其動力學參數為  $M_{max} = 0.1 \text{ day}^{-1}$ ， $K_s = 30 \text{ mg HAc/L}$ ， $Y=0.05 \text{ kgVSS/kgHAc}$ 。
3. 假設厭氧系統中，約有  $30\sim50\%$  的 COD 在酸化過程中即被去除(部份有機物分解之後產生能量或部份合成酸化菌菌體，也有 COD 隨儲存於酸化產生的氫氣中)，剩下  $50\sim70\%$  的 COD 經醋酸甲烷菌轉化成甲烷，換言之，若厭氧處理槽去除量為  $1 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ ，則單位體積內醋酸甲烷菌的活性至少要在  $0.5 \text{ kgHAc/m}^3/\text{day}$  以上。

利用以上假設所求出不同去除量下，處理槽內醋酸甲烷菌的數量其結果如圖 1 所示。一般厭氧出流水 COD 約  $1,000 \sim 2,000 \text{ mg/L}$ ，其中醋酸濃度約  $100 \sim 200 \text{ mg HAc/L}$ ，所以若要求厭氧出流水 COD 降低至  $300 \text{ mg/L}$  以下，則依等比例計算其對應之醋酸濃度約為  $30 \text{ mgHAc/L}$ 。圖 1 中的數量是一個最低量，也就是說，若要求出流水中醋酸濃度低於  $30 \text{ mg/L}$  以下，且處理槽仍維持  $1 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$  的去除量，由圖 1 得知，其醋酸甲烷菌濃度至少要在  $500 \text{ mgVSS/L}$  以上。接下來的問題則是，處理槽內要維持  $500 \text{ mgVSS/L}$  以上具有活性之醋酸甲烷菌是否困難？目前並無文獻報導厭氧污泥中具活性之甲烷菌佔總污泥量之比例為何？根據理論推測，醋酸甲烷菌在總污泥量中的比例，應該和基值的特性有關。若以醋酸進行醋酸甲烷菌的純菌培養時其活性可以高達  $2.6 \sim 11.6 \text{ kgCOD/kgVSS/day}$  (Malina and Pohland, 1992, p.23)，但實際由厭氧處理槽中取出污泥測量其甲烷最大產氣量一般只有  $0.5\sim2 \text{ kgCOD/kgVSS/day}$ ，依此經驗估計，處理複雜有機物時，具活性之醋酸甲烷菌約佔總污泥量的  $5\sim20\%$ 。若以甲烷菌佔總污泥量的  $10\%$  為例，則槽內總污泥濃度要在  $5,000 \text{ mg}$

VSS/L以上，其對應之甲烷菌濃度就會在500 mgVSS/L以上。若假設VSS/SS比值為0.75，也就是說處理槽內平均污泥濃度在6,600 mgSS/L以上，微生物反應速率即可滿足系統去除量1 kgCOD/m<sup>3</sup>/day需求。對於設計良好的厭氧處理槽而言，這是不難達到的。

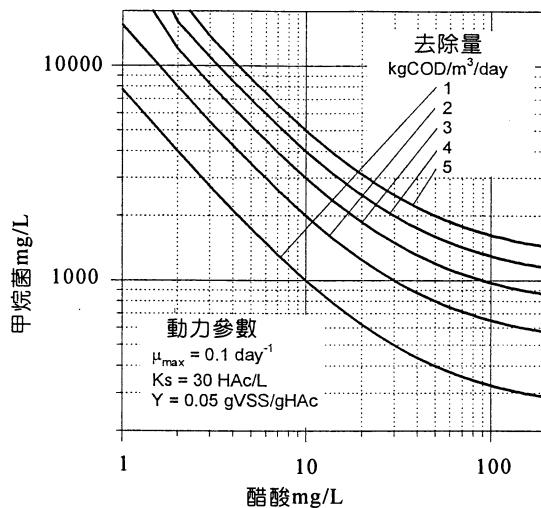


圖1 在處理槽去除能力1kgCOD/m<sup>3</sup>/day的條件下，槽內（出流水）醋酸濃度與甲烷菌濃度之對應關係

#### 四、處理槽設計

厭氧程序的低污泥產率，從廢棄污泥處理的觀點而言，是一項優點。但是若是以處理低濃度廢水的角度來看，就成為處理槽設計的最大難題。如前段計算結果顯示，若厭氧處理槽要維持高品質出流水(低COD值)且處理槽仍有1 kgCOD/m<sup>3</sup>/day的去除能力，則其槽內污泥濃度必需在6,600 mgSS/L以上。

一個處理系統要長久穩定操作，其微生物的增殖與排除(廢棄污泥加上隨出流水流失)，必需達到平衡，也就是：

$$Q(X_i + X_g) \geq QX_e + Q_wX_w$$

其中：

Q：處理槽進流量，m<sup>3</sup>/day

$Q_w$ ：處理槽排泥量， $\text{m}^3/\text{day}$

$X_i$ ：進流水中微生物濃度， $\text{mg SS/L}$

$X_g$ ：微生物增殖量， $\text{mg SS/L}$

$X_e$ ：出流水中微生物濃度， $\text{mg SS/L}$

$X_w$ ：廢棄污泥中微生物濃度， $\text{mg SS/L}$

微生物增殖量，可以由污泥產率及處理槽去除的污染物量來估算：

$$X_g = Y \cdot (COD_i - COD_e)$$

若以厭氧微生物增殖率  $Y = 0.075 \text{ kgSS/kgCOD}$  為基準，假設處理槽進流水中不含微生物，處理槽也不排泥，以進流  $COD_i = 1,000 \text{ mg/L}$ ，去除率 50% ( $COD_e = 500 \text{ mg/L}$ ) 為例，則出流水中微生物濃度超過  $37.5 \text{ mgSS/L}$ ，處理槽就有微生物流失的危機。此項條件看似嚴苛，事實上，由於一般厭氧微生物沉降性非常好，只要設計適當，污泥流失問題是可以控制的。Lettinga and Pol (1986) 報告顆粒化污泥可承受高達  $10 \text{ m/h}$  的上流速率；在低負荷的情況下 ( $5 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$  以下)，非顆粒化污泥則可以承受高達  $1.5 \text{ m/h}$  的上流速率，而仍維持 UASB 槽內  $20,000 \sim 40,000 \text{ mgSS/L}$  的膠羽污泥濃度。化工所的經驗也顯示，非顆粒化污泥可以承受  $1 \text{ m/h}$  以上的水力上流速率。若以處理槽水深  $6 \text{ m}$  為例，非顆粒化污泥的最短水力停留時間約為  $6 \text{ hrs}$ ，在此水力停留時間下，即使進流水濃度只有  $500 \text{ mg/L}$ ，厭氧處理槽去除率只有 60%，處理槽體積去除量仍有  $1.2 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ ，在經濟上仍有相當優勢。

目前有許多進行中的研究，使用物理或化學方法，企圖縮短厭氧處理槽停留時間並維持處理槽內高污泥濃度，其中包括使用薄膜分離微生物及出流水、使用人為固定化技術提高污泥濃度、開發高比表面積之新生物擔體等方式，但大多仍因成本太高或處理槽不易維護，仍侷限於小規模的應用。其中荷蘭 de Man 等人 (1988) 利用顆粒化污泥所設計的顆粒化污泥膨脹床 (Expanded Granular Sludge Bed, EGSB) 及利用 PU 泡綿作為生物擔體設計而成的厭氧流動床，這兩種處理槽因為因其構造簡單，並未增加成本，所以研發成功及推廣的機會頗大。

所謂 EGSB 其實可以歸類為流體化床處理槽的一種。EGSB 是利用厭氧污泥顆粒一旦形成之後，即使變換環境及改變基質，其污泥顆粒仍能長時間維持完整。由於顆粒化污泥沉降性非常好，所以處理槽高度可以高達  $10 \text{ m}$  以上，處理槽水力停留時間可以短到  $1 \text{ hr}$  仍能正常操作。

厭氧流動床則是利用泡綿具有多孔性，可供附著或截留大量微生物的特性，填充於厭氧處理槽內，並以固定床或流體化床方式操作，由於泡綿顆粒之尺寸可以人為決定，並以篩網截留於處理槽內，所以理論上其水力停留時間並無下限。在國外已有成功的案例，國內則由工研院化工所進行研究開發。此項技術開發完成後，可以大幅提高厭氧應用於低濃度廢水的可行性。

## 五、案例介紹

厭氧處理低濃度廢水已有許多成功的案例，本文中介紹三個國外案例及國內工研院化工所研究結果以供參考。

### 5.1 案例一、以UASB處理啤酒廠廢水

在酒品生產中，啤酒廠的廢水濃度約只有 $1,000\sim 2,000\text{ mgCOD/L}$ ，相對於米酒釀造廢水約 $20,000\sim 40,000\text{ mg/L}$ ，是屬於低濃度的廢水。目前國內啤酒廠主要是以活性污泥處理為主。根據經驗，因為啤酒廢水中的有機物大多是容易分解的碳水化合物或小分子有機物，此類廢水使用活性污泥處理時，常會有污泥膨化的困擾。

表2是荷蘭以UASB處理啤酒廠廢水的長期操作性能報告，由於廢水非常容易厭氧分解，所以雖然廢水濃度只有 $1,000\sim 1,500\text{ mgCOD/L}$ ，處理槽仍然有 $75\sim 80\%$ 的去除率。該系統起動時植入已顆粒化之污泥，經長期操作後，污泥量並無增加，但其污泥仍維持良好之顆粒化型態。該啤酒廠原有好氧活性污泥系統污泥膨化的困擾，在加設厭氧系統後就不再發生。經厭氧、好氧串聯處理後，其最後的排放水BOD只有 $5\text{ mg/L}$ 。

若以此案例厭氧處理之資料為基準，依照國內之情況進行厭氧串聯好氧及完全好氧處理之評估比較，兩個流程所需設備規格計算如表3。兩方案所需之初設費用、動力需求、處理場佔地及操作人力則列於表4，由評估結果顯示，採用厭氧處理在此案例具有明顯的優勢。

### 5.2 案例二、厭氧濾床處理低濃度肉品加工廢水

肉品加工廠廢水主要來自清洗桌面及機台。日間隨著工作人員用水的情形，廢水間斷且不定時排出，在下班前因為要清洗所有機台及工作區域，會有大量廢水一次排出。案例中的工廠平均排水量約 $100\text{ m}^3/\text{day}$ ，原廢水BOD約 $2,600\text{ mg/L}$ ，與員

工生活污水混合後，經過除油、過篩，就進入兩座並聯的上流式厭氧濾床，濾床總體積 $250\text{ m}^3$ ，內部填充直徑 $4\sim 8\text{ cm}$ 的石塊，其孔隙度約為40%，所以處理槽孔隙體積計算，水力停留時間約為1天。廢水經前處理之後，其COD降低為 $1,878\text{ mg/L}$ ，經過厭氧濾床之後，出流水COD分別為 $427$ 及 $460\text{ mg/L}$ ，其去除率為76%，體積去除量為 $1.4\text{ kg COD/m}^3/\text{day}$ 。此案例說明，即使是一個構造簡單的厭氧濾床，仍然能夠輕易的達到 $1.0\text{ kg COD /m}^3/\text{day}$ 體積去除量。

表2 荷蘭UASB處理啤酒廠廢水案例(Pol and Lettinga, 1986)

1	廢水特性	
	Total COD	$1,000\sim 1,500\text{ mg/L}$
	Total BOD	$700 \sim 1,100\text{ mg/L}$
	Total N	$0.02\sim 0.03\text{ mg/L}$
	pH	$6\sim 10$
	Suspended solid COD	$200\sim 300\text{ mg/L}$
	Temperature	$20\sim 24^\circ\text{C}$
2	處理槽設計資料	
	均勻池體積	$1,500\text{ m}^3$
	UASB體積	$1,400\text{ m}^3$
	UASB高度	$6.5\text{ m}$
	設計負荷	$5\sim 10\text{ kg COD/m}^3/\text{day}$
3	設計公司	Paques BV
	運轉性能	
	體積負荷	$4.5\sim 7\text{ kg COD/m}^3/\text{day}$
	去除率	$75\sim 80\%$
4	甲烷產氣量	$0.25\text{ m}^3/\text{kg COD removed}$
	其它	
	厭氧系統造價	US\$ 800,000
	操作人力	包括既有之好氧處理，每天八小時。

表3 方案流程及設備計算表

項 目		計算基準
1	廢水特性	
	流量	6,000m <sup>3</sup> /day
	COD	1,500mg/L (9,000 kg COD/day)
	BOD	1,100mg/L (6,600 kgBOD/day)
	SS	100~150 mg/L
2	pH	6~10
	活性污泥處理	
	廢水均勻池	1,500m <sup>3</sup> (HRT = 6 hrs) 曝氣攪拌0.015m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> /min
	活性污泥槽	9,000m <sup>3</sup> (L × W × H = 30 × 30 × 5, 2 sets) 1 kgCOD/m <sup>3</sup> /day, 0.73 kgBOD/m <sup>3</sup> /day Removal = 95% MLSS = 3,000 mg/L MLVSS = 2,500mg/L (F/M = 0.3 gBOD/gVSS/day) Y = 0.2 kgSS/kgCOD Oxygen Requirement = 6,412kgO <sub>2</sub> /day(0.75kgO <sub>2</sub> /kgCOD removed)
	沉澱池	A = 400m <sup>2</sup> (15m/day) H = 3.5m V = 1,400m <sup>3</sup> (HRT = 5.6 hrs)
3	污泥濃縮槽	廢棄活性污泥171m <sup>3</sup> /day@10,000 mgSS/L V = 300m <sup>3</sup>
	污泥儲槽	濃縮之後活性污泥70m <sup>3</sup> /day@25,000 mgSS/L V = 200m <sup>3</sup>
	污泥脫水機	脫水能量250m <sup>3</sup> /day(@20,000mgSS/L), Operating 8 hrs/day
	厭氧UASB串聯活性污泥	
	廢水均勻酸化池	1,500m <sup>3</sup> (HRT = 6hrs) 機械攪拌0.008 kW/m <sup>3</sup>
3	UASB槽	1,800m <sup>3</sup> (L × W × H = 30 × 9.5 × 6.5) 5 kgCOD/m <sup>3</sup> /day Removal = 75% CODeff = 375mg/L (2,250 kgCOD/day)
	活性污泥槽	2,250m <sup>3</sup> (L × W × H = 30 × 15 × 5) 1 kgCOD/m <sup>3</sup> /day, 0.7 kgBOD/m <sup>3</sup> /day Removal = 80% MLSS = 3,000mg/L MLVSS = 2,500mg/L (F/M = 0.28 gBOD/gVSS/day) Y = 0.2 kgSS/kgCOD Oxygen Requirement = 1,350 kgO <sub>2</sub> /day(kgO <sub>2</sub> /kgCOD removed)
	沉澱池	A = 400m <sup>2</sup> (15 m/day) H = 3.5 m V = 1,400m <sup>3</sup> (HRT = 5.6 hrs)
	污泥濃縮槽	廢棄活性污泥36m <sup>3</sup> /day(10,000 mgSS/L) V = 100m <sup>3</sup>
	污泥儲槽	濃縮之後之活性污泥15 m <sup>3</sup> /day @ 25,000 mgSS/L 廢棄 UASB 污泥 8.5m <sup>3</sup> /day @40,000 mgSS/L V = 100m <sup>3</sup>
	污泥脫水機	脫水能量100m <sup>3</sup> /day @ 20,000mgSS/L, Operating 8 hrs/day

表4 兩種方案綜合比較

項 目	活性污泥	UASB串聯活性污泥
初設費用	12,000萬元	8,000 萬元
動力需求	8,000 kWh	4,000 kWh
污泥餅產量(10%固含量)	17 Ton/day	7 Ton/day
佔地	3,900 m <sup>2</sup>	2,200 m <sup>2</sup>
直接操作人力	三人輪班進行例行操作及分析 一人於日間負責污泥脫水	同活性污泥

### 5.3 案例三：厭氧處理都市污水

都市污水可以說是最具代表性的低濃度廢水。其來源除家庭生活廢水之外，在許多國家，都市污水也包含部份小型工廠的廢水；其成份除家庭廚房、廁所之天然性有機物之外，排水也包括家庭中使用的各類合成化學藥品；其有機物的形態包括溶解性、非溶解性(懸浮微粒)及介乎其間的膠羽物質。由於都市污水量大而且共通性高，對環工業而言，是一個非常具有潛力的市場，所以早就有許多學者及工程公司從事厭氧程序處理都市污水的研究，其中有許多經驗也可應用於低濃度工業廢水的處理。

1983年，荷蘭的Wageningen農業大學的Lettinga教授在荷蘭政府的贊助下，與荷蘭工程顧問公司、哥倫比亞的政府及大學的配合下，在哥倫比亞西部約百萬人的都市Cali進行一系列大規模、長期的研究工作，以探討厭氧處理是否適用於低濃度的都市污水。

該研究總共進行5.5年。主要的實驗設備是一座64 m<sup>3</sup>的上流式厭氧污泥處理槽(UASB)。研究使用的廢水來自Cali的下水道，經過沉砂池之後，沒有經過初沉池，就直接進入UASB。進入UASB的平均水質及溫度列於表5。

厭氧處理槽的植種及起動往往是整體操作中，最困難的一環，對UASB而言，起動期間最重要的目標就是設法以最快的速度累積微生物量。根據該研究的經驗顯示，UASB處理都市污水時，由於從下水道進流的污水中，已含有大量的厭氧微生物，所以即使不植種，也能在數週內累積足夠的微生物量。

表5 厭氧處理都市污水研究期間水質

項 目	季 節		
	全年平均	乾 季	雨 季
COD <sub>total</sub> , mg/L	267	300	200
COD <sub>filled</sub> , mg/L	112	130	90
BOD, mg/L	95	95	95
TSS, mg/L	215	189	156
VSS, mg/L	108	106	73
TKN, mg/L	17	18.7	14.3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N, mg/L	11	13.6	9.1
T-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , mg/L	1.3	0.7	0.8
T, °C	25.2	25	14.4
Ash content		35~5% TSS	

反應槽起動之後，總COD的去除率可以達到約60%。運轉到第36週時，處理槽中已充滿污泥，並不時從槽中溢流而出。由於UASB排出的污泥沉降性非常好，其SVI值只有10~20 mL/g，只要簡易的沉澱設備即可去除，所以若以進流的總COD及出流的溶解性COD為基準，計算系統(UASB串接沉澱池)的COD去除率，其性能不亞於好氧處理系統。在HRT 4~8小時的條件下，COD去除率為80-83%，即使是HRT 2.4小時的超負荷條件下，COD去除率仍有73%，可謂性能良好。

經過一段期間的穩定操作之後(HRT = 6 hrs)，測量並估算處理槽中總微生物量約有2,500kgTSS(800kgVSS)，換算平均污泥濃度約為39 kg TSS/m<sup>3</sup>。污泥床高度會隨水力負荷高低而變化，在研究期間，模廠UASB曾經停止進料三星期，結果在停止進料的二天後，污泥床高度就從高於2 m壓密到1.4 m，壓密後的污泥床微生物濃度高達120 kg/m<sup>3</sup>，一週之後污泥濃度更壓密至150 kg/m<sup>3</sup>。重新進料之後，污泥床從0.8 m在兩天內膨脹至1.6 m，一週之後膨脹至約2 m，略低於停止進料之前的高度。厭氧系統一旦起動之後，可以隨時停止進料，停止進料期間無需特別的維護，重新再進料時，系統可以在很短的期間內恢復原有的性能。

此案例說明，就算是在極低的基質濃度下，只要處理槽內有足夠的微生物量，使用厭氧處理仍能有非常好的效果。此案例也說明厭氧系統一旦起動完成後，其操

作會比好氧處理更有彈性。傳統好氧處理，若遇到工廠廢水中斷時，為維持好氧狀態，仍必需曝氣，若停止進料期間太長，微生物會自行消化，再進料時，必需數天至二週的培養才能恢復正常，厭氧處理就無需如此複雜的程序。

## 六、國內的研究

工研院化工所在經濟部科技專案支持下，目前正開發新型的生物擔體，該擔體主要由多孔性的PU泡綿組成。本研究使用該擔體組成的32 L厭氧處理槽，進行低濃度廢水處理實驗。實驗進流水COD濃度介於200~1,500 mg/L之間，HRT則介於2~8hrs，實驗總共進行185天，其結果如圖2所示。研究結果顯示，使用新型擔體的厭氧固定床處理低濃度廢水時，其體積去除量可以達到 $4 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ ，且處理槽在植種後約15天即可達到 $1 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ 的去除量，顯示此技術發展潛力極大。

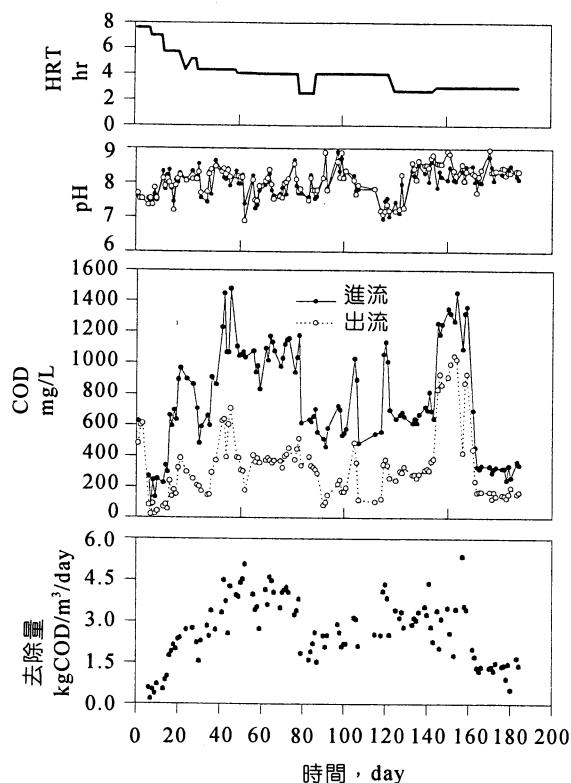


圖2 厭氧固定床處理低濃度廢水實驗結果

## 七、結論

長久以來，國內厭氧處理的推廣應用，都以中高濃度的廢水為主，但是由國外的報告顯示，厭氧處理可以應用於低濃度廢水，且經由厭氧串聯好氧處理的流程無論是從初設成本、操作費用、系統穩定度、出流水質等觀點比較，都會優於純粹好氧處理。國內目前普遍採用好氧處理，好氧產生的大量污泥已成為新的環保問題，本文提供另一種可能的選擇供國內業界參考。

## 參考文獻

- 1.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, Anaerobic Digestion Proceeding International Symposium, 197~209, 1988.
- 2.Fukuzaki, S., Nishio, N. and Nagai, S., Kinetics of the Methanogenic Fermentation of Acetate, Applied Environmental Microbiology, 56, 3158~3163, 1990.
- 3.Henze, M. and Harremoes, P., Anaerobic Treatment of Wastewater in Fixed Film Reactors - A Literature Review, Water Science and Technology, 15, 1~101, 1983.
- 4.Lettinga, G. and Pol, L. H., Advanced Reactor Design, Operation and Economy, Water Science and Technology, 18 (12), pp 99~108, 1986.
- 5.Malina, J. M. and Pohland, F. G., Design of Anaerobic Processes for the Treatment of Industrial and Municipal Wastes, Vol. 7 of Water Quality Management Librarym Edi. by Eckenfelder, W. W. et al., Technomic Publishing Company, Inc., USA, 1992.
- 6.Pol, L. H. and Lettinga, G., New Technologies for Anaerobic Wastewater Treatment, Water Science and Technology, 18 (12), pp 41~53, 1986.
- 7.van Haandel, A. C. and Lettinga, G., Anaerobic Sewage Treatment, John Wiley & Sons, Inc., NY, USA, 1994.