

# 工業廢水薄膜過濾處理模廠研究

吳勇興\* 焦士榮\*\*

## 摘要

沉浸式超過濾 (UF) 薄膜具有低操作壓力、不易阻塞與可結合生物程序作為薄膜生物反應器 (MBR) 等特點，是薄膜應用於廢水處理之重要程序之一。本研究針對可能影響沉浸式薄膜效能之各項操作因子進行模廠探討研究，以掌握沉浸式薄膜程序之完整設計參數。研究結果顯示雖然增加透膜壓差 (TMP) 可增加薄膜產水通量 (q)，但是試驗結果亦顯示隨著 TMP 上升，薄膜滲透率 (k) 會隨之下降，表示會增加薄膜過濾阻力 (R)，因此可能會增加薄膜藥洗頻率。提高曝氣量確實能提高產水通量，但是須注意曝氣動能是沉浸式薄膜程序操作成本之主要來源，不宜設定過高。懸浮固體物 (SS) 濃度效應受限於進流水水質變異性高不易控制，但是由試驗結果仍可總結較高的 SS 會造成產水通量的下降，因此恐怕不宜一味追求 MBR 之高污泥操作濃度。一般咸認間歇性的濾液反沖洗操作有助於延緩薄膜阻塞速率，本研究試驗結果亦顯示此舉可提升薄膜產水通量。

關鍵字：沉浸式超過濾薄膜 (Submerged UF Membrane)、透膜壓差 (Transmembrane Pressure, TMP)、通量 (Flux)、曝氣量 (Aeration)、反沖洗 (Backwash)、薄膜滲透率 (Permeability)

## 一、前言

沉浸式薄膜之應用漸趨普及，用途涵蓋民生污水與工業廢水處理與回用，可作為過濾程序使用，亦可搭配生物曝氣程序成為沉浸式薄膜生物反應槽 (Submerged Membrane Bioreactor, SMBR)，具有占地面積小，出流水懸浮固體幾乎完成去除，又有過濾消毒，且能搭配逆滲透 (RO) 系統做廢污水回收之特色；不過，缺點是初設成本高，薄膜阻塞不易控制，而且由於經常操作於高污泥濃度，因此容易受氧傳限制 (Hillis, 2000)。

薄膜系統的操作水量與薄膜阻塞息息相關，

通常須藉由清洗策略延緩阻塞效應。清洗方式可以間歇性釋壓方式維持曝氣之機械式清洗方式，當停止產水後，薄膜內部壓力會被釋放，沉積在薄膜上之污泥餅容易被向上的氣液混合流體沖離薄膜表面 (吳等人, 2006)。亦可採用濾液進行週期式反沖洗，經由濾液反向通過薄膜沖洗膜孔內部，將膜內與薄膜表面阻塞物一同洗出。在反沖洗過程中，也常加以次氯酸鈉、檸檬酸或者氫氧化鈉加強反沖洗效果，其中尤以次氯酸鈉最常用。因為薄膜在長時間操作下，膜表面常有生物膜附著其上，導致產水通量下降，以低濃度次氯酸鈉做週期性反沖洗可以有效減少生物膜附著情況 (Baker, 2004；華, 2003；顧與何,

\* 中興工程顧問社環境工程研究中心研究員

\*\* 中興工程顧問社環境工程研究中心專家

2002)。亦可採用提高曝氣量的方式減緩薄膜阻塞，不同的曝氣量會對濾餅有不同的移除效果，且會有一臨界值存在，增大曝氣量使掃流速度增加，濾餅不易在薄膜表面穩定形成（Ueda et al., 1996；Chang et al., 2002）。浸泡藥洗方式則可強力去除薄膜阻塞物，當薄膜阻塞情況已經發生，並且無法以維護性清洗方式恢復產水通量，則可以使用高濃度次氯酸鈉浸泡方式去除膜孔內的阻塞物（顧與何，2002；吳等人，2006）。

雖然沉浸式薄膜程序之應用實廠案例甚多，實驗室研究也很多，但是文獻上卻甚少針對可能影響實廠效能之各項操作因子進行完整之模廠研究。本研究即針對可能影響沉浸式薄膜效能之各項操作因子，如透膜壓差（Transmembrane Pressure, TMP）、曝氣量、SS 濃度、濾液與反沖洗（Backwash）等效應，進行模廠探討研究，以掌握沉浸式薄膜程序之完整設計參數。

## 二、研究方法

沉浸式超過濾（UF）薄膜具有低操作壓力、不易阻塞與可結合生物程序作為薄膜生物反應器（MBR）等特點，是薄膜應用於廢水處理之重要程序之一。本研究針對可能影響沉浸式薄膜效能之各項操作因子進行模廠探討研究，以掌握沉浸式薄膜程序之完整設計參數。為了避免生物功能與薄膜功能交互影響，造成研究主題過於複雜，未能獲得明確結論，本研究將主要探討方向設定為薄膜之處理效能。

本研究為了探討薄膜系統在模廠測試的各項操作參數之效應，採用將透膜壓差（TMP）維持於固定值之恆壓操作條件，以觀察產水通量之逐時變化。雖然影響薄膜過濾效能之主要參數包含：透膜壓差、薄膜曝氣量、污泥濃度與濾液反沖洗間歇性產水操作等，但是由於模廠操作係採

用實廠廢水連續進流之條件，其污泥操作濃度容易受進流水質懸浮固體物（SS）濃度不穩定之影響而難以控制，因此本研究僅針對上述其他三項操作參數分別進行下列模廠控制試驗，至於 SS 的效應則採用與其他參數併同觀察的分析方式探討。

試驗一：變動透膜壓差試驗，固定曝氣量，並固定採用薄膜連續產水模式。

試驗二：變動曝氣量，固定透膜壓差，並固定採用薄膜連續產水模式。

試驗三：固定透膜壓差與曝氣量，並採用間歇性濾液反沖洗產水模式。

在試驗過程中，除了針對沉浸式 UF 薄膜系統之過濾效能進行連續監測之外，也同時對系統之進流水、薄膜槽內與濾液出水進行水質監測，包含 COD、SS 與 SDI<sub>15</sub>，以探討沉浸式薄膜系統之薄膜產水效能與水質處理效能。

## 三、試驗設備與流程

本研究採用產水量約 24 CMD 規模，薄膜面積 30 m<sup>2</sup> 之沉浸式 UF 薄膜模廠系統進行各項相關操作參數探討，設備流程如圖 1 所示。模廠進流水為某工業區綜合性廢水經二級處理後之浮除出水，首先引入一容量 0.5 m<sup>3</sup> 原水桶中，再以進水泵抽入容量 4 m<sup>3</sup> 之曝氣槽中，繼而由循環泵送至容量 0.75 m<sup>3</sup> 之薄膜槽。薄膜槽上層設有溢流口，可維持薄膜槽與曝氣槽間之污泥迴流，另於底部設有排泥口。薄膜槽內設有單產水頭之中空絲 UF 薄膜，薄膜孔徑 0.05 μm，薄膜濾液經產水泵以負壓產水方式出水至容量 0.2 m<sup>3</sup> 之清水桶。清水桶濾液可由反洗泵抽取，直接反沖洗薄膜，亦可搭配加藥系統進行加藥反沖洗，其中加藥系統可視薄膜阻塞類型之不同採用次氯酸鈉或有機酸進行藥洗。

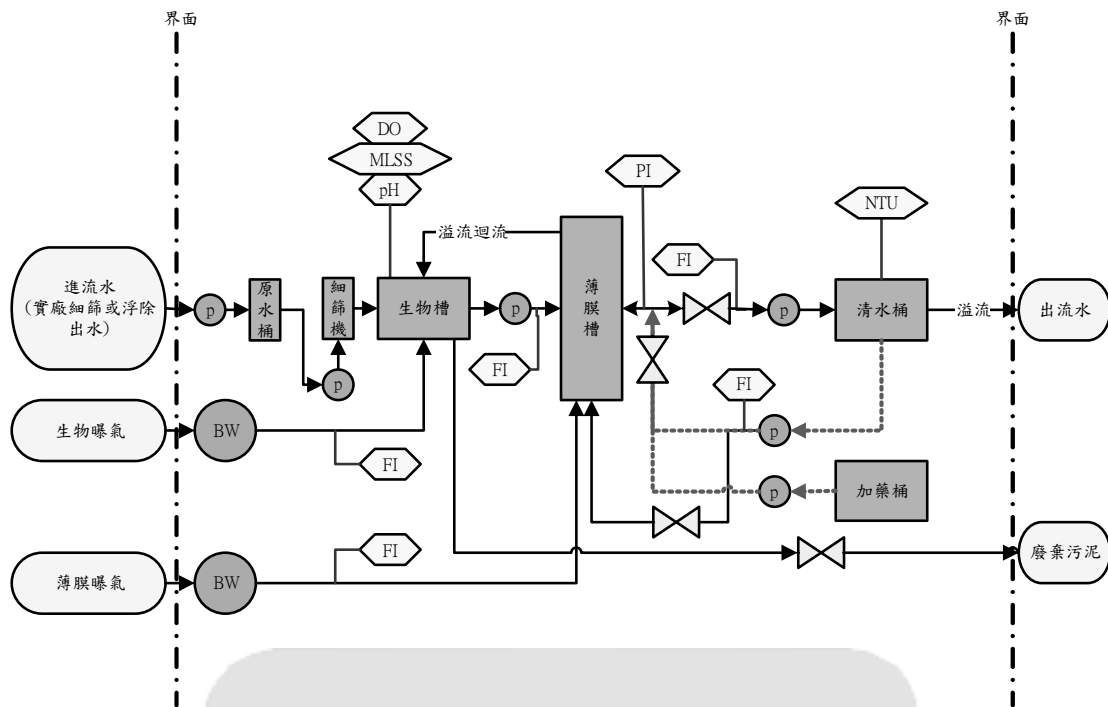


圖 1 本研究沉浸式 UF 薄膜模廠流程示意圖

#### 四、結果與討論

##### (一) 壓力效應

本研究沉浸式 UF 模廠在固定曝氣量為 120 NL/min 以及無滲液反沖洗之連續產水條件下，調整透膜壓差 (TMP) 從 1 psi 到 5 psi，以探討 TMP 對薄膜產水效能之影響。圖 2 所示為各 TMP 下之產水通量 (q) 與薄膜滲透率 (k) 逐時平均值之變化趨勢，圖中亦同時顯示污泥濃度 (SS) 之變化情形。由圖中可見當 TMP 不大於 2 psi 時，所得 q 值較為穩定，隨著過濾時間延長未見明顯下降情形；反觀 TMP 為 3 與 5 psi 時，兩者之第二小時平均 q 值均明顯較第一小時下降許多，顯示高 TMP 容易造成薄膜快速阻塞。由圖 2 所示之 k 值變化則更進一步顯示，當 TMP 由 1 psi 上升至 2 psi，k 值已經明顯下降，表示薄膜阻塞情形已經變得較為嚴重。

由於本研究為模廠連續操作，進流水水質隨時都在變化，因此較難控制 SS 於固定值。在比

較不同 TMP 之效應時，應同時注意 SS 可能造成之干擾。由圖 2 可見，隨著所操作的 TMP 上升，恰巧 SS 亦隨之上升。由於一般認為 SS 的上升會導致 q 值的下降，而圖 2 又顯示，當 TMP 上升造成 q 值上升的同時，SS 值也是上升的，表示目前顯示之 TMP 上升造成 q 值上升效應，可能有部分被 SS 效應所遮蔽，亦即實際上 TMP 本身對 q 的影響可能會比目前所得效應更高。

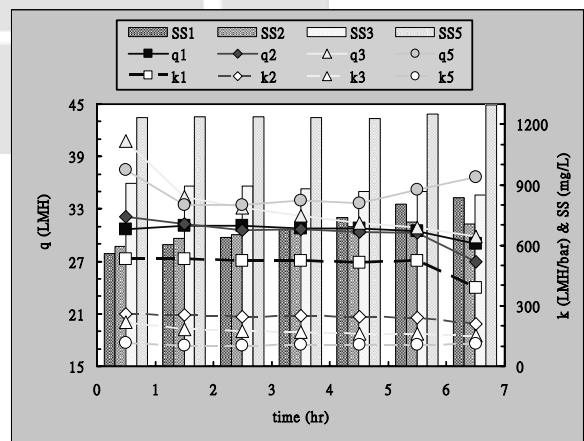


圖 2 薄膜系統在不同透膜壓差下之操作效能逐時變化圖

圖 3 所示為彙整圖 2 之總平均值所得結果。圖中顯示 q 值隨 TMP 變大而增加，平均 q 值由 27 LMH 上升到 33 LMH；而其相對應之 SS 濃度由 359 mg/L 上升至 670 mg/L。由圖 3 亦可見，雖然在操作壓力在 1 psi 與 2 psi 下，SS 濃度相差不大，但是平均 k 值差異卻超過 2 倍，分別為 501 LMH/bar 及 244 LMH/bar；而當 TMP 提升到 5 psi 時，k 值更相差至 5 倍，顯見提高 TMP 雖然可以提升 q 值，但是高 TMP 也容易加速導致薄膜阻塞。

### (二) 曝氣量影響

薄膜表面之掃流速度會影響阻塞物成長的速度，通常掃流速度的增加可以直接增大薄膜表面物理沖刷程度，使濾餅比較不容易附著於薄膜表面。本研究在固定 TMP 於 2 psi 下，控制在 120 ~ 160 NL/min 之不同曝氣量下，進行薄膜連續產水，所得之產水通量、懸浮固體濃度與薄膜滲透率結果如圖 4 所示。由圖中可顯見初始產水通量隨著曝氣量之增加而增加，但是當曝氣量控制於 130 NL/min 時，產水通量有逐時下降之趨勢，這應該是因為在此條件下，SS 濃度遠高於其他兩個曝氣條件。不過，基本上曝氣量 130 NL/min 之產水通量仍高於曝氣量為 120 NL/min。

為方便比較曝氣量之影響效應，本研究進一步將圖 4 之產水通量、SS 濃度與滲透率之平均值彙整於圖 5。由圖 5 可見，當曝氣量由 120 NL/min 增加到 160 NL/min 時，平均薄膜滲透率由 244 LMH/bar 逐漸上升至 299 LMH/bar，此結果可驗證經由曝氣量增大能增加氣液流對薄膜表面之掃流作用，使濾餅不易形成，減緩薄膜表面上阻塞現象，因而增加薄膜滲透率。不過，由圖 5 同樣可觀察到 SS 濃度的增加會削減曝氣量之貢獻，在相同透膜壓差，曝氣量分別控制於 120 及 130 NL/min，SS 濃度各為 667 mg/L 與 1,430 mg/L 之下，雖然前者之薄膜滲透率高於後者，但是差異較少，研判係因 SS 較高所造成。

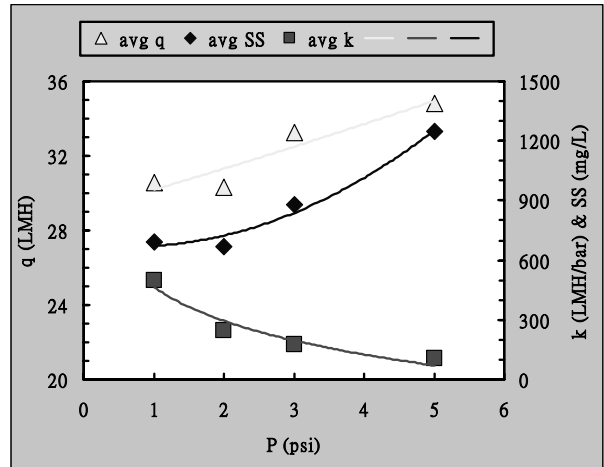


圖 3 薄膜系統在不同透膜壓差下之平均操作效能比較圖

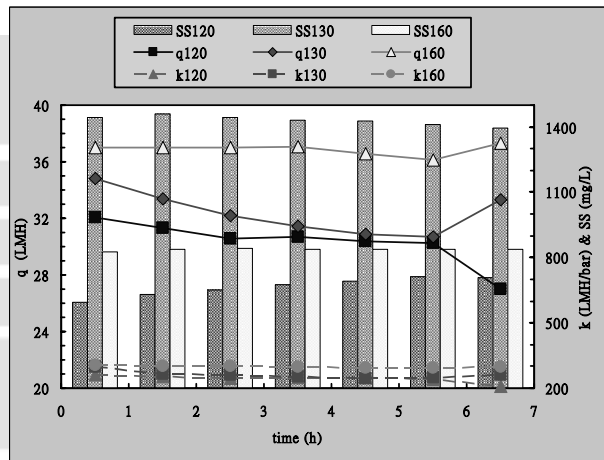


圖 4 薄膜系統在不同曝氣量下之操作效能逐時變化圖

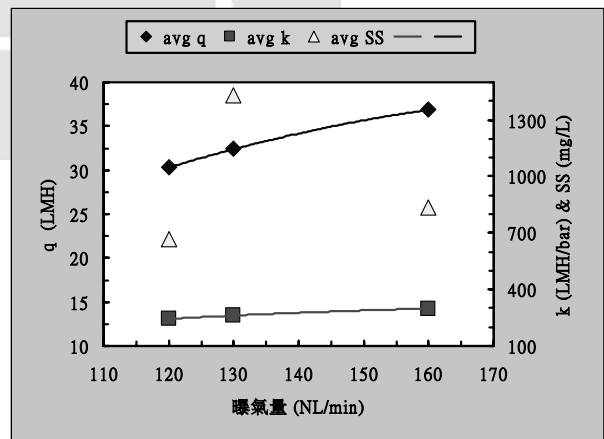


圖 5 薄膜系統在不同曝氣量下之平均操作效能比較圖

### (三) 濾液反沖洗效應

薄膜在長期運轉下，通量會隨時間逐漸下降，起因於顆粒狀物質沉積或吸附於薄膜表面，甚或堵塞於膜孔內，薄膜阻力因而變大，相對的產水通量也會降低，因此薄膜的清洗是相當重要的。本研究針對間歇性薄膜濾液反沖洗效能進行探討，在 TMP 控制於 2 psi，曝氣量控制於 120 NL/min 之下，採用間歇性產水週期 10 min 反沖洗 30 sec 與連續產水之操作結果比對分析。由圖 6 可見，當操作壓力同樣維持在 2 psi 下，連續產水操作時產水通量約為 30 LMH，但是間歇性產水操作時產水通量則上升至 35 LMH。不過，圖 6 似乎亦顯示此產水通量之上升可能是因為當間歇性操作時，正好其 SS 濃度亦低於連續操作時甚多。就此懷疑，本研究選定間歇性反沖洗操作於另一時段與連續操作具有相近 SS 濃度之操作結果比較分析於圖 7。圖中依然顯示間歇性操作得以維持較高之產水通量，因此可推論間歇性反沖洗操作不但可以有效提升產水通量，也能減弱 SS 濃度提高可能造成之通量下降效應。

### (四) 薄膜系統水質處理效能

本研究針對薄膜系統之進水、薄膜槽內與濾液出水，進行連續 2.5 月之 COD 與 SS 水質監測，結果如圖 8 與 9 所示。由圖 8 可見進流水 COD 濃度範圍為 62 ~ 254 mg/L，中位數為 112 mg/L；薄膜槽內 COD 濃度範圍依試驗期間不同測試目的控制於 114 ~ 1,096 mg/L，中位數為 496 mg/L；濾液出水水質則相當良好，COD 範圍為 11 ~ 35 mg/L，中位數為 19 mg/L，遠低於放流水排放標準 100 mg/L。若以進出水質 COD 之中位數推估，COD 去除率可達 83%。在 SS 方面，由圖 9 可見進流水 SS 濃度範圍為 20 ~ 308 mg/L，中位數為 106 mg/L，此結果顯示其變化幅度與進水 COD 相近。若尋求兩者關聯可得線性相關，表示 SS 貢獻甚多 COD，而且由圖 9 可

見濾液出水 SS 多低於 1 mg/L，因此針對此廢水特性，即使在所採用之沉浸式薄膜系統處理中沒有微生物作用，僅藉由薄膜濾除 SS 亦可達甚高的 COD 去除率。

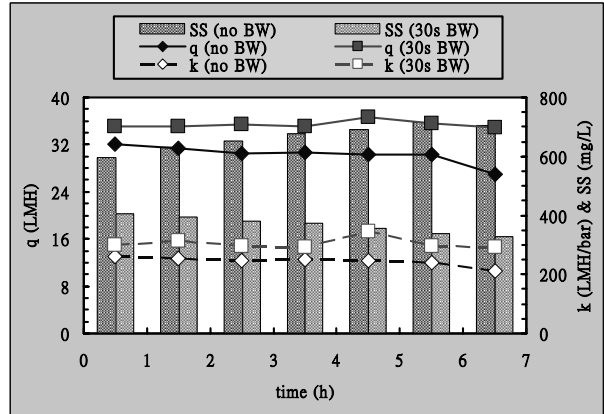


圖 6 薄膜系統在不同污泥濃度下比較有無反沖洗對操作效能之影響

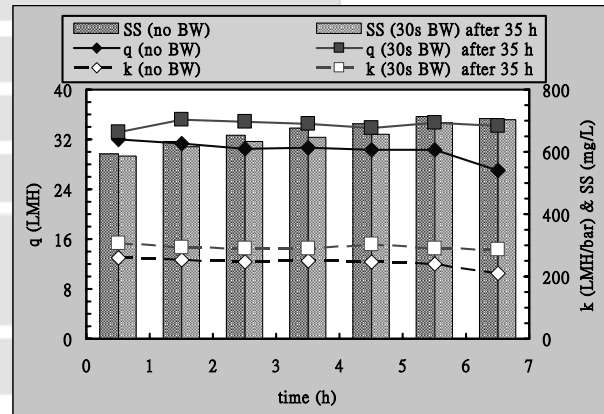


圖 7 薄膜系統在污泥濃度相近下比較有無反沖洗對操作效能之影響

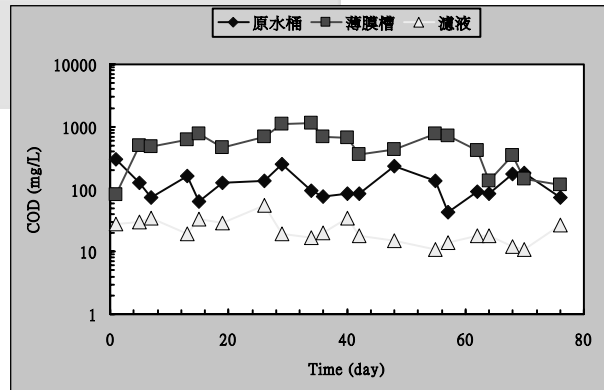


圖 8 薄膜系統進流水、薄膜槽內與濾液出水之 COD 水質逐時變化圖

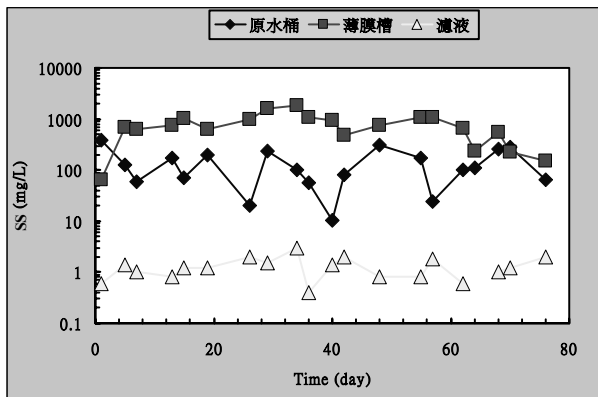


圖 9 薄膜系統進流水、薄膜槽內與濾液出水之 SS 水質逐時變化圖

由前述各薄膜操作參數對產水效能之探討可知，試驗期間之 SS 操作範圍對於其他操作參數具有相當程度之影響，因此須知前述所得之結果係基於，如圖 9 所示，薄膜槽內 SS 濃度範圍為 144 ~ 1,610 mg/L，中位數為 714 mg/L 之測試條件所得，在應用上不宜過度解釋，以免導致產水效能不如預期。

本研究亦針對薄膜濾液進行 6 次淤泥密度指數 (SDI<sub>15</sub>) 分析，結果測值均低於 3。由於一般對於 RO 進水條件之要求僅需 SDI<sub>15</sub> < 5，因此研判此沉浸式 UF 薄膜系統出水水質，可直接採用 RO 進行廢水回收，以應用於工業製程或其他高級回收用途。

## 五、結論與建議

本研究採用 24 CMD 規模沉浸式 UF 薄膜模廠系統，針對綜合性工業廢水二級處理之浮除出水進行回收處理，獲得下列結論：

(一) 本研究試驗結果顯示隨著透膜壓差增加產水通量會明顯增加，但是薄膜滲透率卻會明顯降低，因此本研究建議可以採行較高操作壓差以獲得較高之產水通量，但是必須同時注

意藥洗頻率將因而提高，所以必須先設定一可接受之藥洗頻率，再依此選定適當之操作壓差。

- (二) 本研究試驗結果顯示曝氣量的增加可以有效改善產水通量的表現，因此本研究建議可以儘量操作於較高之曝氣量以減緩薄膜阻塞速率，但是曝氣量增加也同時會增加操作電量，因此將受操作成本考量之限制。
- (三) 本研究試驗結果顯示於懸浮固體濃度上升會導致產水通量下降，但是可藉由提高曝氣量與採行間歇性濾液反沖洗操作模式以提升產水效能。
- (四) 本研究驗證採用沉浸式 UF 薄膜進一步處理工業廢水二級處理單元出流水，可獲得穩定之 COD 與 SS 出流水質相當穩定，而且 SDI<sub>15</sub> 小於 3，因此非常適合搭配 RO 程序應用於工業區廢水再生區內廠商回用。

## 參考文獻

- 吳勇興、焦士榮、烏春梅、林哲昌、鍾裕仁 (2006) 延長釋壓操作時間對薄膜生物反應器阻塞影響之研究，中華民國環境工程學會廢水處理技術研討會
- 華耀祖 (2003) 超濾技術與應用，化學工業出版社，北京
- 顧國雄、何義亮 (2002) 膜生物反應器—在污水處理中的研究與應用，化學工業出版社，北京
- Baker, R. W. (2004) Membrane Technology and Applications, 2nd Ed., John Wiley & Sons Ltd. Publishing, UK
- Chang, S., A. G. Fane (2002) Filtration of Biomass with Laboratory-Scale Submerged Hollow Fiber Modules-Effect of Operating Conditions and Module Configuration, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Vol. 77, p.1030
- Hillis, P. (2000) Membrane Technology in Water and Wastewater Treatment, Royal Society of Chemistry Special Publishing, UK
- Ueda, T., K. Hata., Y. Kikuoka and O. Seino (1996) Effect of Aeration on Suction Pressure in a Submerged Membrane Bioreactor, Water Research, Vol.31, p.489