

# 生物薄膜與逆滲透程序應用於 TFT-LCD 製程廢水處理與回收再利用

陳廷光\*、倪振鴻\*\*、陳重男\*\*\*

## 摘 要

水為薄膜液晶螢幕(thin film transistor liquid crystal display, TFT-LCD)製造業所不可或缺之重要元素，製程中舉凡清洗、冷卻及蝕刻等均需使用大量水作為媒介，然而台灣近年來水資源嚴重缺乏且新增水源開發不易，隨著 TFT-LCD 製造業快速發展，水資源需求與日遽增情況下，廢水回收再利用技術開發也越顯重要，除此之外，廢水回收再利用技術之長期操作效能更是技術成功之關鍵。

TFT-LCD 製程將產生不同性質之廢水，一般可分為氟系、酸鹼無機廢水、有機廢水及生活污水等，其中有機廢水因含有高強度有機氮及硫類物質造成處理不易，但有機廢水約佔總廢水量 1/3 以上，故尋求一穩定且具效能之有機廢水處理回收技術，實為達成 TFT-LCD 製造業水資源有效利用及回收之重要研究目標。

【關鍵字】1.TFT-LCD 2.生物薄膜程序 3.逆滲透 4.回收再利用

---

\*綠太環境科技股份有限公司研發部經理

\*\*綠太環境科技股份有限公司總經理

\*\*\*交通大學環境工程研究所教授

## 一、前 言

近年來，薄膜液晶螢幕(thin film transistor liquid crystal display, TFT-LCD) 製造業於台灣蓬勃發展，主要因 TFT-LCD 面板具有許多優點，使 TFT-LCD 面板需求量日益增加，隨著產能持續擴充相對亦產生大量製程廢水，目前部分已運轉之製造廠因多位於工業區或科學園區，放流水質均受區內污水廠保護，製程廢水毋須處理至放流水標準而較不受重視，然而隨著新廠持續增建需要，廠址需移至其它地區，加上台灣地區因水資源嚴重缺乏、新水源取得困難，工業製程廢水更需依法令要求提高回收率，因此如何有效處理並回收再利用 TFT-LCD 製程廢水至不同水質，如：冷卻水塔用水、間接冷卻用水、生活用水、鍋爐用水與其他用水等，甚至進一步提昇回收水水質符合回用至純水系統之標準，可謂國內 TFT-LCD 製造業當前提高營運競爭力之重要課題，也惟有合適且長期穩定操作之處理回收技術才能使處理水符合更嚴格之放流水質及回收標準，以達到節約用水與水資源再生利用之環保政策目標。

TFT-LCD 製程廢水依性質可分為氟系、酸鹼無機廢水、有機廢水及生活污水等。相較於氟系及酸鹼無機廢水，有機廢水因含有二甲基亞楓(dimethyl sulphoxide, DMSO,  $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$ )、乙醇胺(ethanolamine,  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{ONH}_2)$ )及氫氧化四甲基銨(tetra-methyl ammonium hydroxide, TMAH,  $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ )等高強度有機氮、硫類物質，目前多面臨無法有效處理之困境。此外，因有機廢水約佔總廢水量 1/3 以上，若欲達成水資源再生及法令要求提高回收率之目標，有機廢水回收再利用將勢在必行。面對未來每日 200,000 噸以上之有機廢水，惟有積極開發研究合適之有機廢水處理及回收再利用技術，才能保護水資源並降低產業設置成本，增加產業競爭力。

近十年來，生物薄膜程序(membrane bioreactor, MBR)為一創新與極具發展潛力之有機廢水處理技術，藉由薄膜有效固液分離之性質，不僅可大幅提昇廢水處理效率及生物操作穩定性外，更適用於生物不易分解、污染物濃度高或污染物負荷變化大之工業廢水上，更因其處理水之高級水質易於回用之優點，使其日趨受到重視，目前國內僅有少部份學術探討及實際應用，實值得積極研究與推廣。逆滲透程序(reverse osmosis, RO)則具有去除微量不純物與污染物功能，常應用於飲用水、純水

及廢水回用等用途，雖然逆滲透程序應用於廢水回收用途時可大幅提昇回收利用價值，然而飼流水水質對逆滲透程序之長期操作成本及設備維護費用影響甚鉅，故本研究以台灣首座結合沈浸式生物薄膜程序及逆滲透程序處理廠處理並回收 TFT-LCD 製程有機廢水為研究對象，除探討廢水處理效能與回收再利用可行性外，並針對廢水廠長期操作經驗及成本效益作一分析探討，期藉由首座處理廠之長期操作經驗累積以提供一操作穩定、符合經濟效益之廢(污)水回收再利用技術，亦能作為國內日後水污染防治技術提昇之參考，以有效紓解台灣水資源不足之困境。

## 二、實驗方法

### 2.1 廢水水質特性

薄膜液晶螢幕製造業因製程中需使用大量之二甲基亞楓(dimethyl sulphoxide, DMSO,  $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$ )、乙醇胺(ethanolamine, MEA,  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{ONH}_2)$ )、氫氧化四甲基銨(tetra-methyl ammonium hydroxide, TMAH,  $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ )及異丙醇(isopropyl alcohol, IPA,  $\text{CH}_3\text{CHOCH}_3$ )等有機物質作為現像液(developer)、剝離液(stripper)及清洗溶劑(rinse)，故有機廢水中含有高強度有機氮及硫類物質(製程有機廢水水質如表 1)。由長期之水樣分析中可知，廢水之 TKN/COD 比值約為 0.166-0.200，遠超過一般活性污泥程序所需之營養比值(0.05)，為具代表性之高氮工業廢水，若未經妥善處理放流將造成水體優氧化。一般設計以生物除氮程序以期能去除水中氮類物質，但常因污泥沉降性不佳使污泥停留時間控制不易，或因氨氮濃度過高造成硝化作用及脫氮作用抑制，使氮類物質未能有效去除，故需積極開發研究合適之 TFT-LCD 製程有機廢水處理程序。

表 1 薄膜液晶螢幕(TFT-LCD)製造業製程有機廢水水質

項目	剝離液	現像液	清洗溶液	平均值
主要成份	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> SO (DMSO)	(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> NOH (TMAH)	CH <sub>3</sub> CHOHCH <sub>3</sub> (IPA)	----
	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ONH <sub>2</sub> (MEA)			
pH	9-11	10-13	10-11	10-11
SS (mg/L)	<10	<10	<10	<10
COD (mg/L)	800-1,200	400-600	600-1,700	800-1,500
TKN (mg/L)	90-200	100-120	60-90	100-200
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	0-10	2-10	0.1-10	2
NO <sub>x</sub> -N (mg/L)	0.1-0.4	0.0-0.3	0.1-1.3	0.2

## 2.2 沈浸式生物薄膜廢水處理廠流程及設備

本研究之沈浸式生物薄膜程序處理廠處理流程如圖 1 所示，為能有效去除氮類物質故於流程上設計使用四段之無氧、好氧、無氧、好氧生物除氮程序，氮氮於好氧槽中進行硝化作用，並持續迴流好氧槽混合液至無氧槽進行脫氮作用，最後段之好氧槽中則設置沈浸式超過濾(UF)薄膜系統以進行最終固液分離(薄膜系統參考圖 2)。處理廠設計處理水量為 1,270 噸/天，使用之超過濾薄膜為 ZENON ZeeWeed®500a 之中空管狀薄膜，共使用 6 組匣式膜組(cassette)(共 48 組單一膜組(element))(參考圖 3)，薄膜總表面積為 2,160m<sup>2</sup>，薄膜孔徑 0.036 μm，薄膜出流水則直接作為逆滲透(RO)系統之飼流水。

圖 2 為沈浸式薄膜系統之操作流程圖，主要分為薄膜(membrane)、真空抽水幫浦(permeate pump)、反沖洗(backpulse)與加藥(chemical addition)、鼓風(air injection)與排泥(waste sludge)等系統。薄膜直接安裝於最終曝氣池內藉由真空抽水幫浦(permeate pumps)吸取廢水過濾，正常操作壓力僅為 2~8psi，乾淨之過濾水可先貯存至反沖洗水貯桶(backpulse tank)，定時利用過濾水進行反沖洗程序，全程操作均為

全自動膜壓(TMP)與流量(flux)控制，以確保系統操作穩定性。一般而言薄膜操作最擔心之問題在於堵塞，薄膜系統預防堵塞預防之方式茲說明如下：

### 2.2.1 空氣沖洗(air scour)

薄膜底部設有空氣曝氣系統，主要利用氣泡向上剪力與薄膜左右擺動震盪力使得污泥不易附著，減少膜面濃度極化(concentration polarization)現象以降低堵塞機會。同時可作為活性污泥所需之氧源。

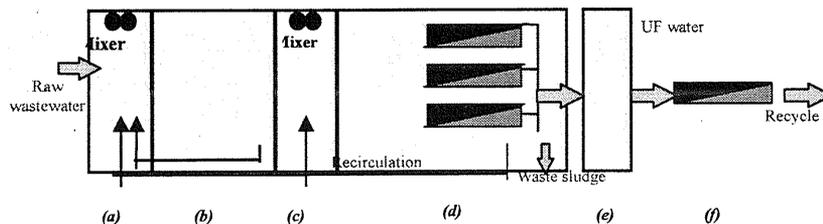
### 2.2.2 反沖洗(backpulse)

薄膜系統具有全自動反洗之功能，於一定操作時間後由膜管內向外進行反沖洗，一般為操作 30~40 分鐘反洗 15~30 秒。

### 2.2.3 藥洗系統(chemical soak)

薄膜定期維護或堵塞至無法以反沖洗控制時，則可使用藥液浸洗，一般藥洗頻率為 2~6 月。

逆滲透(RO)系統之逆滲透膜為使用 Dow Chemical 特殊抗垢膜管，尺寸為 8,040，共 90 支，設計處理水量為 1,500 噸/天，回收水量為 1,200 噸/天，回收率可達 80%(參考圖 4)。



a:anoxic tank(1); b:aerobic tank(1);c:anoxic tank(2);d:membrane tank; e:UF water tank; f:RO

圖 1 沈浸式生物薄膜(MBR)與逆滲透(RO)實廠流程圖

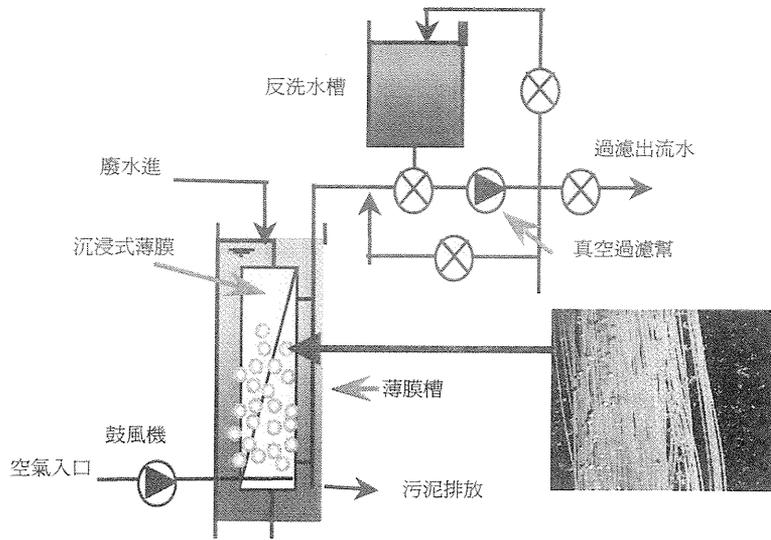


圖 2 浸式薄膜系統操作流程圖

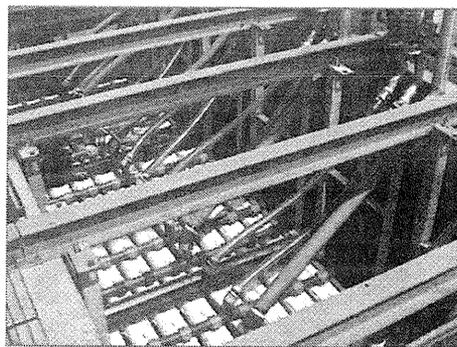
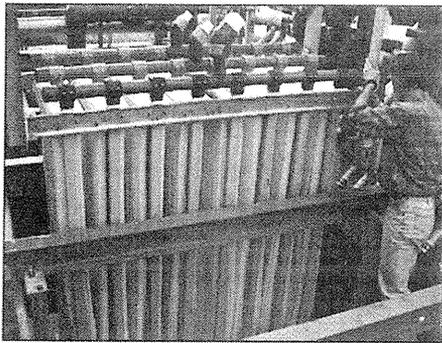


圖 3 浸式薄膜設備外觀與構造

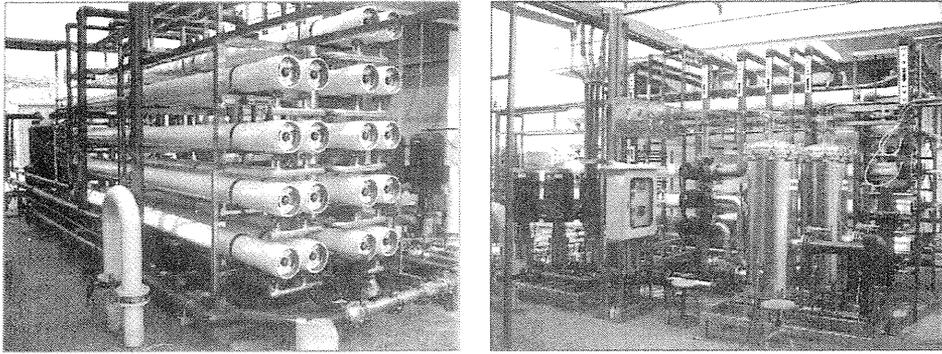


圖 4 逆滲透設備外觀與構造

### 三、實驗結果與討論

#### 3.1 沈浸式生物薄膜系統

沈浸式生物薄膜程序處理廠運轉至今近三年，由表 2 之處理水質中可知，雖然 TFT-LCD 有機廢水濃度常隨製程影響而有所變化，因沈浸式薄膜有效固液分離性質可控制各槽 MLSS 於 8,000~12,000mg/L 之高濃度，系統可承受較高之 COD 體積負荷變化(0.46~1.5 kgCOD/m<sup>3</sup>d·1)，不僅處理水質維持穩定，其平均處理水質之 COD、TOC 及 BOD 分別可達 35.2 mg/L、20.2 mg/L 及 6.5 mg/L 以下，COD 平均去除效率均可達 97% 以上，除此之外，利用薄膜取代沈澱池使生物污泥不因操作狀況或微生物異常而隨出流水流出，處理水中幾乎沒有 SS 存在，除大幅增加處理水回收再利用之可行性，更使生物處理程序之穩定性大大提高。此外，污泥停留時間因薄膜系統有效攔阻生物污泥於槽中而能有效控制(SRT>30 天)，除使生物除氮程序之硝化、脫氮作用充分發揮而有效去除原廢水之高氮物質，系統之總氮(T-N) 平均去除率平均可達 71.5%，更因較長之污泥停留時間使污泥處於內呼吸期而減少污泥增生量(污泥增生係數 0.27 Kg SS/Kg COD)，有效降低廢棄污泥之操作及運

轉成本。

於長時間操作下，薄膜效能為生物薄膜程序穩定性之重點，薄膜經定時反沖洗程序(製水 15 分鐘，反沖洗 30 秒)與藥洗程序(次氯酸鈉清洗，每三個月一次)操作下，平均薄膜流量(flow rate)約維持於 50m/hr，平均薄膜通量(flux)約維持於 21.5lmh，平均透膜壓力(TMP)亦維持於 8~12Kpa 間(圖 5)，距最大容許透膜壓力(55Kpa)仍有相當大之差距，並不因長時期操作而降低薄膜之效能，充分說明沈浸式薄膜系統之穩定性。

表 2 原廢水與各程序處理水之長期操作水質

項目	原廢水	MBR 處理水		RO 處理水
	平均值	平均值	去除率(%)	平均值
Temperature (°C)	28	28	—	30
pH	10.8	7.0	—	7.2
SS (mg/L)	<10	b.d.(<0)	—	b.d.(<0)
COD (mg/L)	1,300	35.2	97.2	b.d.(<5)
TOC (mg/L)	700	20.2	97.1	2.2
BOD (mg/L)	560	6.5	98.8	—
T-N (mg/L)	120	34.2	71.5	—
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	1.8	15.2	—	2.7
NO <sub>x</sub> -N (mg/L)	0.1	18.5	—	—
Conductivity(μ s/cm)	420	2,192		55
SDI	—	2.3	—	

### 3.2 逆滲透系統

TFT-LCD 製程有機廢水經沈浸式生物薄膜程序之處理水質已優於一般高級處理水質，可適用於一般沖廁、景觀及灑水用水，若欲進一步回用至冷卻或製程用水則仍因處理水 COD、TOC 及導電度過高而不適用，故於流程上再利用逆滲透系統

以期提昇處理水回收價值。由表 2 中可知，經逆滲透系統處理之處理水 COD 均低於偵測極限(<5 mg/L)，TOC 小於 2.5 mg/L，NH<sub>3</sub>-N 小於 2.7 mg/L(如表 2)，而平均導電度值則約為 55  $\mu$ S/cm(如圖 6 所示)，其處理水質已相當接近自來水質，目前已回收至冷卻水塔系統，若再經合適之後段處理應可考慮回收至製程用水。此外由圖 7 逆滲透系統預濾器壓力差及逆滲透膜組壓力變化可知，除設備異常狀況發生外(9/28~10/30)，因生物薄膜程序之處理水平均 SDI<sub>15</sub> 均小於 3，以此處理水作為逆滲透系統飼流水，不僅使逆滲透系統預濾器濾心阻塞更換頻率減少(平均 6~8 星期更換一次)，更有效降低逆滲透膜組阻塞發生及減少藥洗次數(平均 4~6 星期藥洗一次)。圖 8 為沉浸式生物薄膜程序處理廠處理回收 TFT-LCD 製程有機廢水各處理單元水質外觀之比較，由此可看出處理程序之優越與穩定性。

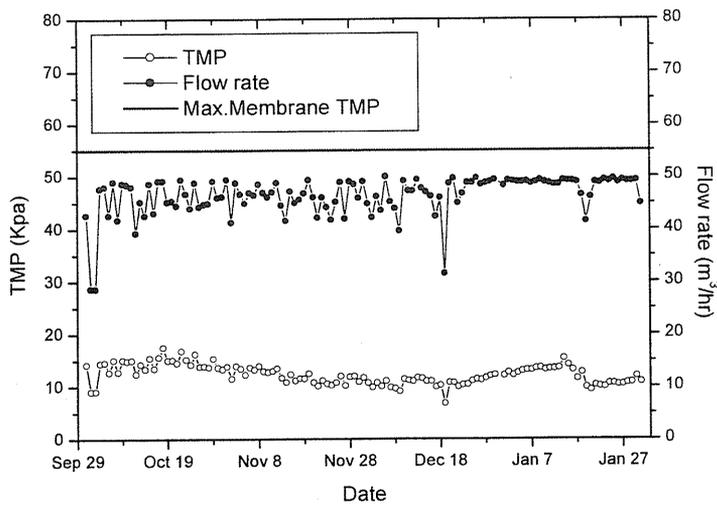


圖 5 薄膜系統透膜壓力及流量變化

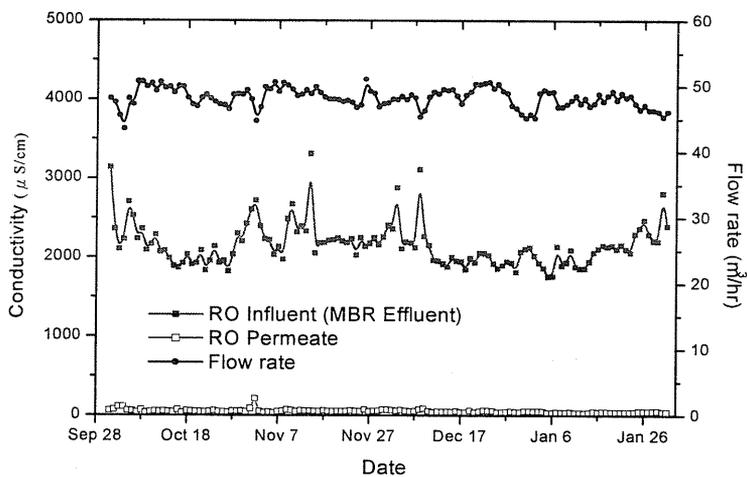


圖 6 逆滲透系統飼流水與出流水之導電度變化

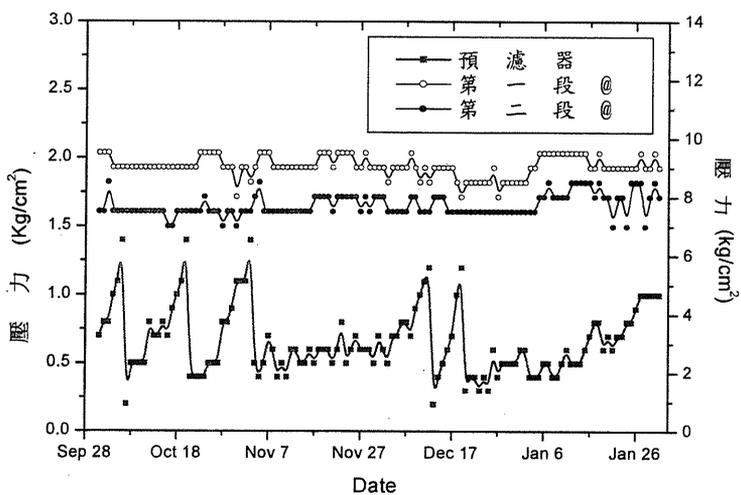


圖 7 逆滲透系統預濾器壓力差及各段逆滲透膜組壓力變化

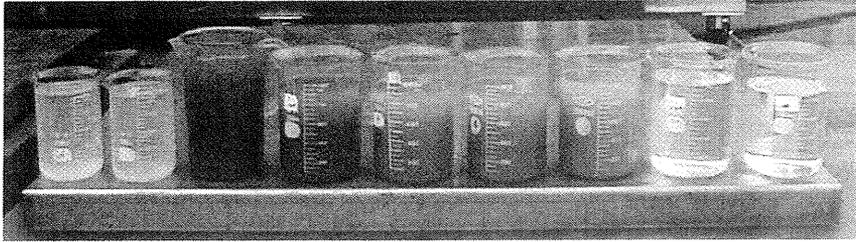


圖 8 各處理單元水質外觀之比較：(由左至右)原廢水、pH 調整槽、無氧槽(1)、曝氣槽(1)、硝化槽、無氧槽(2)、薄膜槽、薄膜處理水、逆滲透處理水

### 3.3 操作成本分析

由圖 9 中可看出，生物薄膜程序處理廠平均日處理水量約為 885.3 噸，平均日用電量約為 3,733Kw-hr，估計處理每噸廢水所需之總電力費約為 7.5 元，若單就薄膜設備部份操作成本而言，平均日用電量約為 660 Kw-hr (包含薄膜真空抽水幫浦、薄膜槽鼓風機、反沖洗與循環攪拌等動力)，估計處理每噸廢水所需之薄膜設備電力費僅約為 1.3 元，並不因使用薄膜取代沈澱池而大幅增加電力成本，若再加上化學藥品費及污泥清運費，生物薄膜程序處理廠平均操作成本僅約為 11.7 元/噸(如表 3 所示)。

逆滲透程序部份，由於以沉浸式薄膜設備為前處理，處理水質甚佳(COD 與 SS)，大大降低預濾濾心更換頻率與逆滲透膜藥洗成本。以每天回收 1,200 噸廢水為例，電力約消耗 1,150 Kw-hr /天(包含逆滲透加壓幫浦、逆滲透高壓幫浦、加藥幫浦與藥洗幫浦等動力)，回收每噸廢水所需之總電力費約為 1.7 元。加上化學藥品與耗材平均約 0.9 元/噸，平均每噸回收水操作費僅 2.6 元。

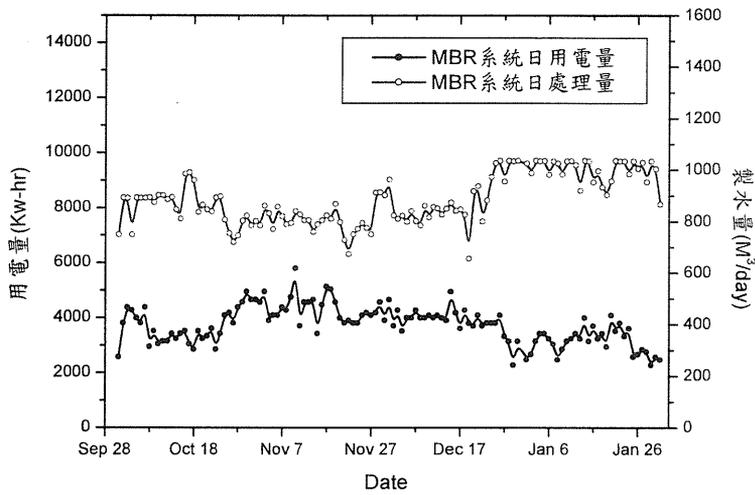


圖 9 生物薄膜程序處理廠每日用電量及處理量

表 3 各程序之操作成本分析

操作費用 (元/噸)	生物薄膜程序		逆滲透程序	全廠
	生物程序	薄膜程序		
電力	6.2	1.3	1.7	9.2
化學藥品及耗材	2.2	0.6	0.9	3.7
污泥清運	1.4		---	1.4
總費用	11.7		2.6	14.3

### 3.4 長期操作經驗

除積極開發 TFT-LCD 製程有機廢水回收再利用技術外，處理技術之長期操作結果與系統穩定性更是技術成功之關鍵。本研究之沈浸式生物薄膜程序處理廠自試

運轉至今已連續操作近三年，處理水質之穩定及優越已於上述結果中證明，但處理廠於長時間操作下產生之異常狀況則更值得作進一步研究與探討，以下就針對處理廠產生之異常情況作一敘述：

#### 1. 薄膜製水管線洩漏(2002/9/28~2002/10/30)

沈浸式薄膜系統於定期藥洗維護程序時(三個月一次)，因操作不慎造成薄膜製水 PVC 管線輕微破裂，造成生物污泥隨薄膜製水流出，雖然處理水 SS 濃度仍低於 3 mg/L，遠小於放流水標準以下，但處理水之 SDI<sub>15</sub> 已超出偵測極限無法測得，若以此處理水作為逆滲透系統之飼流水將造成預濾器阻塞快速(如圖 8 所示)，預濾器濾心更換頻率大幅縮短(約 2~3 天需更換一次濾心)，逆滲透模組藥洗頻率增加(約一星期藥洗一次)，不僅大幅增加逆滲透系統之操作運轉成本，更降低逆滲透系統之操作年限與穩定性，由此經驗可看出，若一般生物程序出流水僅經沈澱池、砂過濾處理而欲作為逆滲透系統飼流水進行回收利用，將大幅提高操作運轉及設備耗材成本。製水管線經修復後，系統已恢復正常。

#### 2. 薄膜透膜壓力上昇(2003/2/26~2003/3/4)

由圖 10 中可看出，薄膜系統之透膜壓力(TMP)出現異常上昇情形，經追查確認原因後發現，為避免有機廢水濃度變化所產生之短暫生物污泥不適應泡沫，系統內各生物槽均設有消泡灑水設備，為有效利用再生水資源，消泡水使用無機廢水系統回收水，但因無機廢水處理流程以添加氯化鐵進行物化混凝處理，故回收水中含有微量鐵離子，薄膜系統於長期操作及使用消泡水情形下，薄膜表面逐漸產生橘紅色鐵化合物沈積(如圖 11 左)，故薄膜透膜壓力產生異常上昇，經使用草酸浸泡 24 小時之藥洗程序後，薄膜表面鐵化合物有效去除，薄膜表面亦回復為正常白色(如圖 12 右)，薄膜透膜壓力及膜通量也回復正常，由此經驗說明薄膜性能之穩定性，系統消泡水也改以污泥混合液以避免相同情形發生。

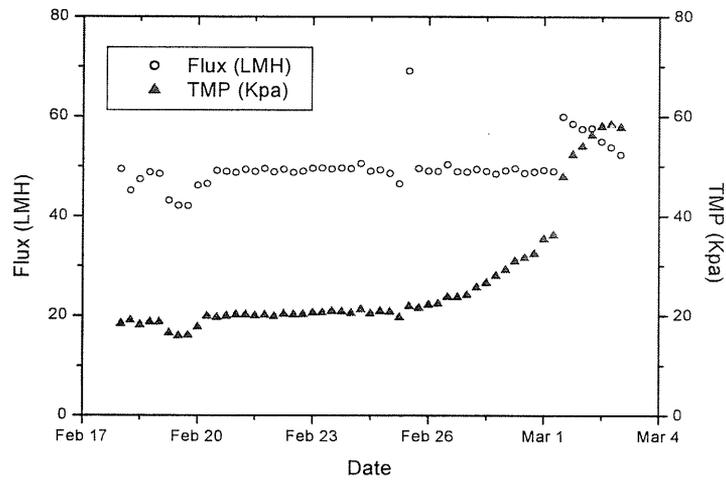


圖 10 薄膜系統透膜壓力(TMP)與膜通量(Flux)異常情形(2003/2/26~3/4)

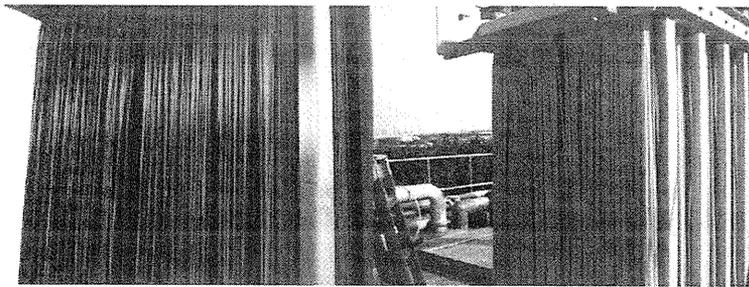


圖 11 (左)藥洗浸泡前，薄膜表面因鐵化合物沈積呈現橘紅色。(右)薄膜藥洗浸泡 24 小時後，表面回復正常白色。

## 四、結論與建議

國內水資源缺乏問題日益嚴重且新增水源開發不易常造成水源短缺進而影響生活品質與經濟發展，政府政策為避免此種窘況發生更應時勢所趨，已從水資源的開發逐漸思考至水回收再利用之可行性，如此將可有效紓解水資源不足之困境。由本研究之國內第一座沈浸式生物薄膜程序廢水處理廠處理 TFT-LCD 製程有機廢水回收再利用之長期操作經驗可知，此程序為一未來為極具發展潛力的技術，茲將長期操作經驗及系統優點整理結論如下：

### 1. 提昇氮營養物質及難分解有機物之去除效率

生物薄膜程序能有效控制污泥停留時間及提高生物處理單元之 MLSS 濃度，將有利於硝化菌之生長而提高生物除氮程序效能。相同的，對於生物難分解有機物而言，延長污泥停留時間及提高 MLSS 濃度，將有效增加微生物對有機物質利用效率，對於一些生長速率緩慢之特定微生物，亦能提供一適當之生長時間，改善生物程序對營養源及難分解有機物之去除效率。

### 2. 有效之固液分離

利用薄膜之固液分離特性，不僅可省卻沈澱池需考慮污泥重力沈降效果之困擾，還能得到更佳之水質。雖然生物槽中之污泥濃度 (MLSS) 高達 8,000~12,000mg/L，但經由薄膜過濾後，不僅放流水中懸浮固體物(SS)小於 1 mg/L，其濁度更可維持在 0.1NTU 以下。

### 3. 穩定與可回收之絕佳處理水質

生物薄膜程序處理後之放流水因其優良水質及  $SDI_{15} < 3$  之優點，不僅可直接回收利用於一般廁所沖洗水、澆灌用水或洗滌水，若於生物薄膜程序後加上逆滲透程序，更可提昇回收價值，為現今水資源逐漸短缺之台灣地區提供一開源節流之最佳方法，大大地增加處理水之回收再利用價值。

### 4. 操作穩定可靠，易於自動控制整合

生物薄膜處理程序之操作均可透過流量改變或壓力變化而有效監控，進一步可達到自動控制之目標，不僅避免生物程序中許多不確定之因素，如沈澱池效率會因溫度、風吹、污泥沈降性及入流水性質而時好時壞，對於放流水水質無法做一有效

之控制，另對於生物程序中常見之污泥異常現象，如污泥膨化、上浮等問題均可忽視，減少廢水處理程序上之問題與突發狀況。除了解決生物程序所面臨瓶頸外，更具可於高 MLSS 條件下操作、節省空間、減少污泥量、耐污染負荷變化與高級處理水質等優點。

期望藉由本研究之長期操作經驗，能提供作為國內水資源再生與循環再利用技術之重要參考。

## 五、參考文獻

1. Berthold et al. (1999), "Replacement of Secondary Clarification by Membrane Separation-Results with Tubular, plate and Hollow Fibre Modules.", *Wat. Sci. Tech.* Vol. 40, No. 4-5, pp.311-320.
2. Burica O., Strazar M. and Mahne I. (1996). Nitrogen removal from wastewater in a pilot plant operated in the recirculation anoxic-oxic activated sludge mode. *Wat. Sci. Tech.*, 33(12), 255-258.
3. Cicek, N., Franco, J.p., Suidan, M.T., Urbain, V. and Manem, J. (1999a), "Characterization and Comparison of a Membrane Bioreactor and a Conventional Activated-Sludge System in Treatment of Wastewater Containing High-Molecular-Weight Compounds." *Wat. Environ. Res.* 71, 64-70.
4. Cote P., Buisson H. and Praderie M. (1997). Immersed membrane activated sludge for the reuse of municipal wastewater. *Desalination*, 113, 189-196.
5. Irwin, J. (1990), "On-site wastewater reclamation and recycling.", *Wat. Env. Tech.*, pp.90-91.
6. Izumi K., Madokoro T. and Yamada Y. (1995) "The practical use of membrane process for domestic waste water treatment.", *Shigen Kankyo Taisaku*, 31(11), pp.923-930.
7. Larry D.B., Clifford W.R., "Biological process design for wastewater treatment.", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

8. Sillen L. G. (1965). Oxidation states of earth's ocean and atmosphere: a model calculation on earlier state: the myth of prebiotic soup. *Archiv Kemi Acta*, 24, 431-456.
9. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1993). 18th edn, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
10. Stephenson T., Judd S., Jefferson B. and Brindle K. (2000). Membrane bioreactors for wastewater treatment. IWA Publishing, London.
11. Suwa Y., Suzuki T., Toyohara H., Yamagishi T. and Urushigawa Y. (1992). Single-stage, single-sludge nitrogen removal by an activated-sludge process with cross-flow filtration. *Wat. Res.*, 26, 1149-1157.
12. Tom Stephenson, Simon Judd, Bruce Jefferson, Keith Brindle, (2000) "Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment.", IWA, London.
13. Tatsuki et al., (1997) "Effect of Aeration on Suction Pressure in a Submerged Membrane Bioreactor", *Wat. Environ. Res.* Vol. 31 , No. 3 , pp.489-494.
14. Thompson, D., Mourato, D., Penny, J. (1998) "Demonstration of the ZenoGem Process for municipal wastewater treatment.", WEF Annual Conference , Chicago .
15. Ueda T., Hata K. and Kikuoka Y. "Treatment of domestic sewage from rural settlements by a membrane bioreactor." *Wat. Sci. Tech.*, 34(9), pp.189-196.
16. Yamamoto K., Hiasa M., Mahmood T. and Matsuo T., (1989) "Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank.", *Wat. Sci. Tech.*, 21, pp.43-54.