

## 污泥性質對薄膜生物反應槽積垢特性之研究

莊順興，朝陽科技大學環境工程與管理系(所)副教授  
林博焜，朝陽科技大學環境工程與管理所碩士  
戴家川，朝陽科技大學環境工程與管理所研究生

### 摘要

本研究主要是利用經由連續批式活性污泥法(Sequencing batch reactor, SBR)系統馴養穩定之污泥，置入不織布薄膜生物反應槽(Membrane Bioreactor, MBR)中，探討不同污泥停留時間(Sludge Retention Time, SRT)之活性污泥積垢特性與不同污泥組成對阻抗之貢獻。

本研究所使用之不織布薄膜其平均孔徑均為 $14\ \mu\text{m}$ ，大於一般MBR程序薄膜之孔徑。SBR馴養穩定之條件為SRT 15、30、60天。探討不同污泥之積垢特性前，先對薄膜進行清水及污泥混合液通量實驗，以了解不織布薄膜生物反應槽之基本特性。積垢特性之實驗乃以SBR系統馴養穩定之COD負荷為控制條件，控制MBR系統每小時內出流55分鐘及反洗5分鐘。實驗完成後，以薄膜最後狀態所得之阻抗為總阻抗( $R_t$ )，再分別以上層液及其濾液進行12小時之阻抗實驗，應用Bae and Tak(2005)所提出之積垢理論加以計算，求得活性污泥中懸浮固體、膠體及溶質之阻抗所佔之比例。

積垢實驗中，隨著SRT之增加，系統所能長期操作之時間則越短。SRT 15、30、60天之穩定過濾時間分別為81、32及12小時。實驗中發現，SRT 15天之污泥積垢後，系統通量下降之速度比SRT 30及60天快，由於操作中膠體於薄膜形成膠體積垢之速度較慢，因此，當膠體層於薄膜上明顯形成後，不可逆之積垢發生造成系統通量快速下降。SRT 30及60天之污泥於初期過濾時，懸浮固體對薄膜貢獻大部份之積垢，操作至後期，膠體造成之影響則高於懸浮固體，由此判斷，膠體在本積垢實驗中，扮演了一個相當重要的角色。

關鍵字：薄膜生物反應槽(Membrane bioreactor, MBR)、連續批式活性污泥法(Sequencing batch reactor, SBR)、污泥停留時間(Sludge retention time, SRT)、薄膜積垢(Membrane fouling)、薄膜阻抗(Membrane resistance)

## 一、前言

近年來，台灣地區因面臨水資源不足、開發新水源不易及水質污染日漸嚴重等情況下，以利用再生水作為替代水源之重要性則日顯重要，而各項淨水技術中，以薄膜處理更具發展潛力(Smith *et al.*, 1969)。傳統生物程序之處理已行之多年，但其受限於有機負荷、沈澱池體積、污泥產生量、污泥沉降性等因素之影響，而導致無法有效的提升處理水水質，因此由傳統活性污泥程序與薄膜技術所結合之薄膜生物反應程序(Membrane bioreactor, MBR)愈來愈受到注意與重視。

MBR程序中，可利用薄膜作一阻隔將生物膠羽留在反應槽內以得到乾淨之出流水，但MBR系統在廢水處理程序上所面臨的問題則是薄膜的阻塞，薄膜阻塞增加了MBR程序的成本，因為其必須清洗及更換薄膜。因此，不同研究相繼被探討以減少MBR系統中薄膜的阻塞。

MBR的混合液中包括了微生物以及其代謝物，其對於阻塞之影響不像一般水質參數容易掌握，最主要的原因在於生物污泥組成成分極為多樣化，造成其阻塞機制比傳統薄膜分離程序更加的複雜，因此許多研究都嘗試去定量以及由活性污泥不同組成去探討其阻塞原因(Wisniewski *et al.*, 1998; Defrance *et al.*, 2000; Bouhabila *et al.*, 2001)，但目前尚未有一致性之共識。

本研究乃控制不同污泥於相同之操作條件下，探討其積垢形成之原因，以求得 MBR 系統中不同污泥性質對薄膜積垢之影響。

## 二、實驗設備與方法

### 2.1 實驗設備

本研究之 MBR 模型廠如圖 1 所示，其為由壓克力板所組立之單槽長方柱狀反應槽，模型廠規格為長 30 cm，寬 10 cm，高 45 cm，設備包括曝氣設備及監控設備(pH sensor、ORP sensor、DO sensor、液位計、pressure gauge、Flow monitor)，另包含一片孔徑為 14  $\mu\text{m}$  之不織布薄膜，作為污泥分離之用。

### 2.2 實驗方法

#### 1 清水及污泥混合液通量實驗

清水通量實驗乃將薄膜置於裝滿清水之 MBR 模廠中，利用正壓力趨動之方式操作，控制系統於不同壓力條件下(0.25、0.5、1.0、1.5...10 kPa)，每分鐘監測固定壓力下出流通量之情形；污泥混合液通量實驗乃取四組壓力為控制條件(0.5、2、4、8 kPa)，分別進行不同污泥濃度(500、1000、2000、4000、8000 mg/L)之實驗，污泥來源為台中福田污水處理場曝氣池，以階梯通量之實驗方法操作，於 30 分鐘內每分鐘監測通量之變化，以掌握通量受污泥濃度影響之變動特性。

#### 2 SBR 馴養

本研究所植種之污泥乃取自台中市福田污水處理廠之曝氣池，取回之活性污泥置入 SBR 系統中。SBR 系統之操作設定為 HRT 16 小時、曝氣強度 1.5 L/min、基質 COD 濃度 300 mg/L，控制 SRT 為 15、30 及 60 天之條件下馴養。

馴養初期，MLSS 約於 5000 mg/L 左右，隨著操作時間之延長 MLSS 有明顯下降之趨勢，待其馴養穩定之後，由於穩定之排泥，微生物之生長速率及死亡速率達到平衡，因此 MLSS 濃度曲線變化趨於平緩，穩定後 SRT 15、30 及 60 天條件下其 MLSS 濃度分別約為 1800、2600 及 3700 mg/L。污泥馴養完成後，放流水中 SS 濃度均低於 10 mg/L。

本系統之馴養乃以 COD 濃度代表進流基質在反應槽中之變化以及出流水有機物之變化，進流基質以醋酸鈉為主要來源，基質 COD 濃度皆穩定控制於 300 mg/L 左右，馴養穩定後，出流水 COD 濃度之變化逐漸趨於平穩，其 COD 值約於 10 mg/L 左右。

### 3 薄膜積垢阻抗實驗

薄膜之積垢特性，本實驗乃是根據薄膜之通量變化來進行評估，利用經 SBR 系統馴養穩定之污泥置入 MBR 系統中進行通量實驗，系統操作之初始通量主要是根據 SBR 系統之 COD 負荷換算而得，實驗以控制槽內正壓力 5 kPa 及曝氣量 3 L/min 進行，MBR 操作過程中以 55 分鐘出流(出水量 20.8 ml/min)，5 分鐘反洗(反洗水量 125 ml/min)為控制條件。完成 MBR 程序通量實驗後，採 Bae and Tak(2005)之定義，即活性污泥之阻力等於懸浮固體、膠體以及溶質阻力的總和，依圖 2 之概念進行實驗，以 MBR 實驗最後狀態所得之阻抗為總阻抗( $R_t$ )，再分別以上層液及其濾液進行為時 12 小時之阻抗實驗，實驗後可得上層液( $R_{sup}$ )及溶質( $R_{sol}$ )之阻抗，而所得之阻抗值依方程式(2.1)、(2.2)、(2.3)之計算，可分別求得活性污泥中懸浮固體、膠體及溶質之阻抗所佔之比例，以了解不同 SRT 之操作下對於積垢之影響特性。

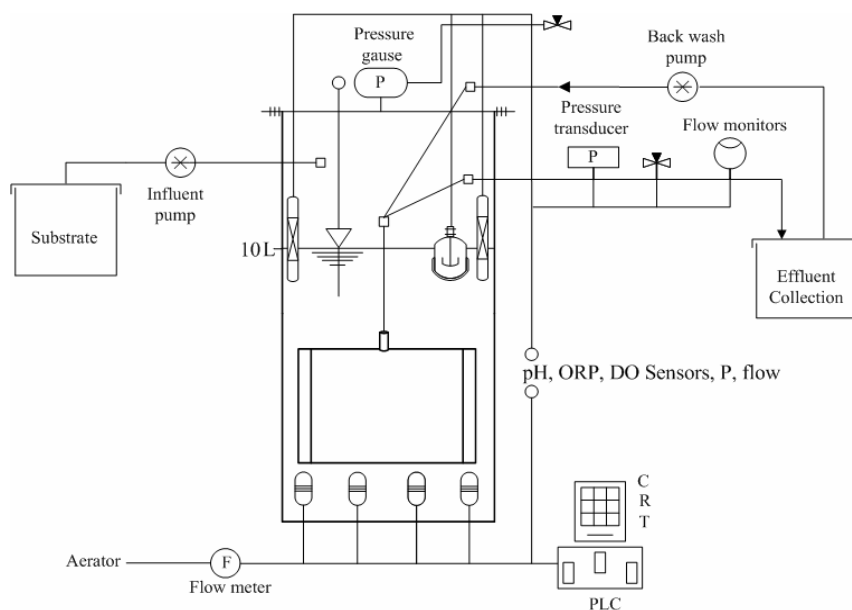


圖 1. MBR 模型廠示意圖

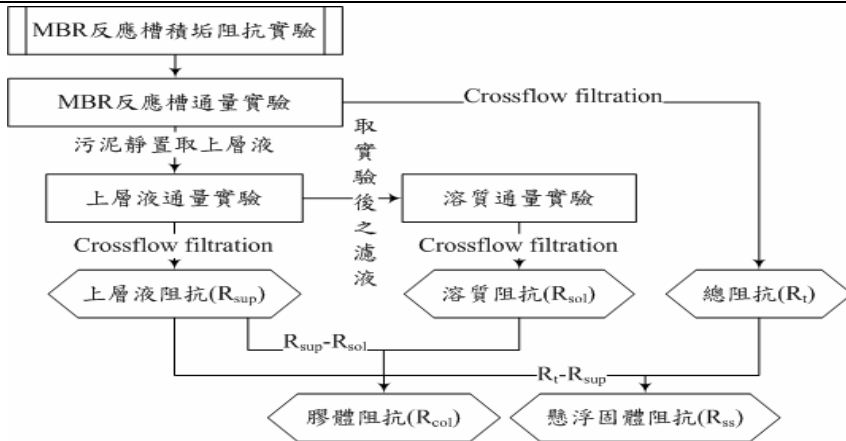


圖 2. 阻抗實驗之流程圖

$$R_{AS} = R_{ss} + R_{col} + R_{sol} \dots \dots \dots (式 2.1)$$

$$R_{col} + R_{sol} = \Delta P_T / \eta J_{sup} \dots \dots \dots (式 2.2)$$

$$R_{sol} = \Delta P_T / \eta J_{sol} \dots \dots \dots (式 2.3)$$

### 三、結果與討論

#### 3.1 清水實驗通量之變化特性

清水實驗主要是於反應槽中，利用壓力趨動之方式控制不同壓力，並以階梯通量法於 30 分鐘內每分鐘觀測通量變化之情形，目的在於了解不織布薄膜生物反應槽系統壓力與薄膜通量之相關性。

由圖 3 所示，14 μm 之不織布薄膜其通量隨著每單位壓力之提升而增加，通量與壓力間呈現一良好線性關係，由於利用清水進行操作，孔徑越大其阻力越小相對通量就會越高，操作至 10 kPa 時其通量為 1060 L/m<sup>2</sup>.hr。

#### 3.2 污泥混合液實驗通量之變化特性

污泥混合液實驗主要是於反應槽中置入不同濃度之污泥，並控制不同壓力以階梯通量法評估其通量變化，實驗乃於 30 分鐘內每分鐘監測薄膜通量變化之情形，其目的在於了解不織布薄膜 Non-Woven 14 μm 之操作特性。下圖 4 與圖 5 乃就不織布薄膜之最低濃度及最高濃度做一說明。

如圖 4 所示，14 μm 之不織布膜於濃度 500 mg/L 之條件下，0.5 kPa 時顯示其通量於操作時間內均未有明顯下降之現象，表示污泥在此階段對薄膜未造成明顯之影響，而隨著操作壓力提高於 2、4、8 kPa 時，14 μm 不織布膜通量持續下降，最終穩定之通量下降比例分別為 4%、13%、18%，由此顯示，14 μm 之不織布薄膜之通量僅呈現小幅度之下降，表示操作時間內污泥尚未對薄膜造成顯著之影響。圖 5 為 14 μm 不織布薄膜操作於高濃度 8000 mg/L 之通量變化，0.5 kPa 之操作顯示，其通量下降 50%，表示高濃度之條件於低壓力之操作下就已明顯呈現積垢之情形，而隨著逐漸增加之壓力，其通量下降之比例分別為 76%、79%、80%，於高濃度條件下，14 μm 不織布膜通量下降之比例則由 50% 增加至 80%，由此可之，高壓力之操作下其積垢之程度更加明顯。

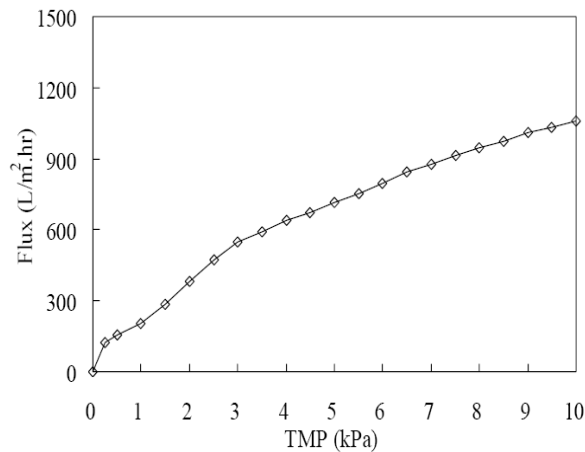


圖 3. Non-Woven 14 μm 之清水通量變化

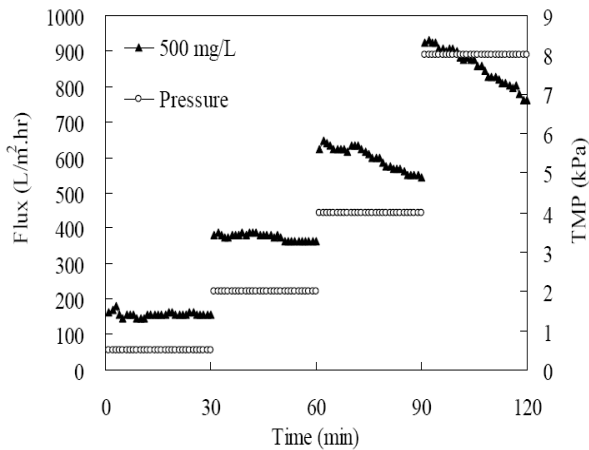


圖 4. Non-Woven 14 μm 之污泥混合液通量變化-500 mg/L

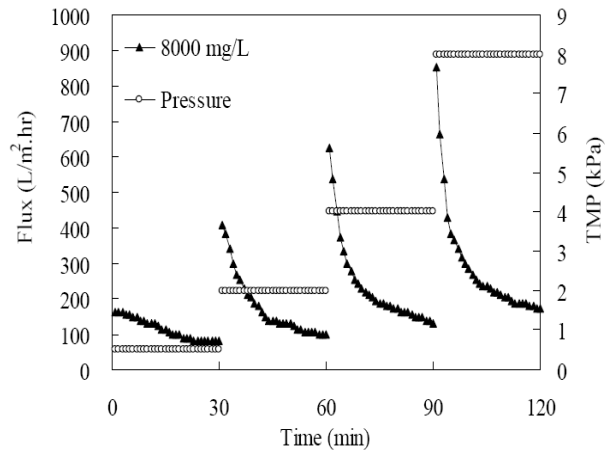


圖 5. Non-Woven 14 μm 之污泥混合液通量變化-8000 mg/L

### 3.3 不同 SRT 污泥條件下之通量變化

實驗中所使用之薄膜為不織布膜，平均孔徑為 14 μm，其比一般微孔性薄膜 (0.05 μm-5 μm) 大了數倍以上，但其過濾後之出流水仍能達到相當良好之去除率 (莊等, 2007)。實驗之設定乃於一個小時內過濾 55 分鐘以及反洗 5 分鐘，圖形顯示為反洗前及反洗後之通量，之後並以阻抗圖搭配說明以了解污泥成分於積垢中之貢獻。

如圖 6 所示，144 小時之操作期間，薄膜經由反洗均能回覆到起始設定之通量，直至約 81 個小時左右，通量才開始呈現逐步下降之趨勢。由於 SRT 15 天之污泥 MLSS 濃度較低，加上是控制於低通量之狀況下，推論在 81 個小時之操作期間，附著於膜面上的污泥並未嚴重到阻礙出流之狀況，而 81 個小時後，薄膜受到一定程度的積垢影響，因此通量慢慢下降，其中特別的地方就是反洗後之通量還能回覆到起始設定，雖說薄膜可能受到積垢，但反洗水則是以清水為主，所以可能反洗時水分子還能經由擠壓將膜面上積垢之污染物推擠出膜面。

圖 7 及 8 顯示，SRT 30 天與 60 天之污泥，其通量分別在約 32 以及 12 小時左右就已無法保持系統之起始設定，反洗後之通量均隨著時間慢慢的下降，因此判斷可能在此操作下產生不可逆之積垢，因此反洗時水分子僅能從可逆積垢之部分流出，當不可逆之積垢越嚴重，出流之通量則就越小。

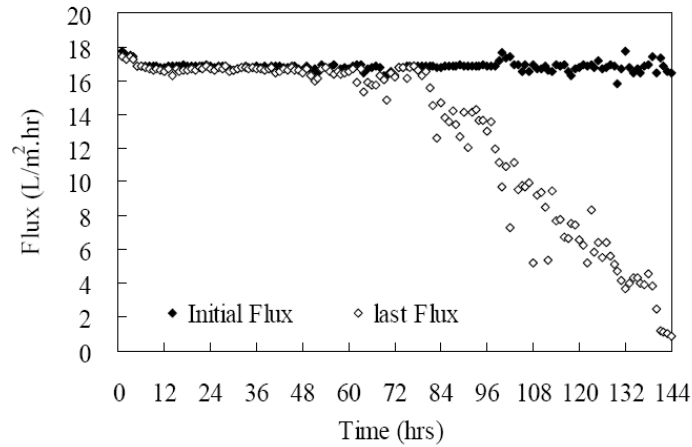


圖 6. SRT 15 天污泥條件下之積垢特性

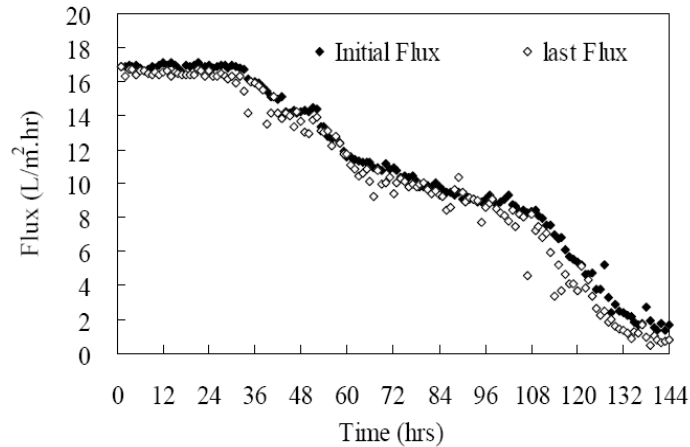


圖 7. SRT 30 天污泥條件下之積垢特性

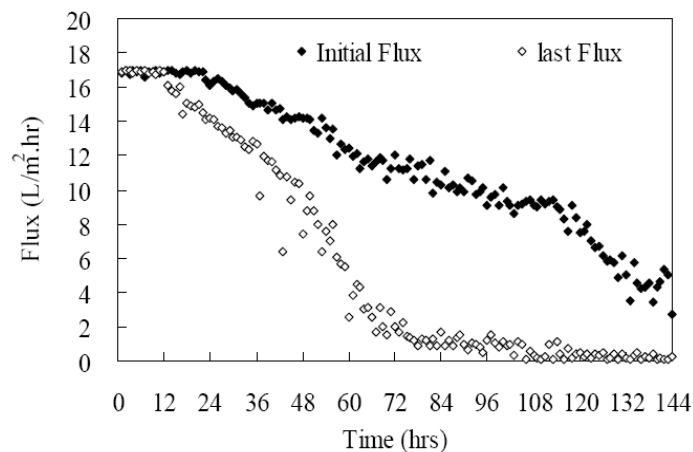


圖 8. SRT 60 天污泥條件下之積垢特性

### 3.4 MBR 系統不同 SRT 污泥條件下之阻抗特性

本實驗主要在於探討不同 SRT 污泥產生積垢後，活性污泥之組成中，懸浮固體、膠體以及溶質對於積垢之貢獻程度。由圖 9 所示，SRT 15 天之污泥於積垢期間，懸浮固體、膠體及溶質所貢獻之比例在系統當中均穩定，其中以懸浮固體居多、膠體次之，而最低的則是溶質，實驗結果顯示，SRT 15 天之污泥之所以能長期操作，除了其 MLSS 濃度較低外，最明顯之影響因子則為膠體，由於膠體積垢形成較慢，故通量還能維持，而當膠體積垢形成後通量則快速下降。

圖 10 及 11 較為不同，起初過濾時，系統以懸浮固體之貢獻較為顯著，隨著時間之增加膠體之比例則明顯的上升，而溶質在本實驗系統當中，基本上均無影響。由此可知，懸浮固體於初期操作時大量的附著於薄膜上，然後膠體再覆蓋於懸浮固體上形成膠體積垢，當系統反洗時，膠體積垢造成反洗上之困難，因此系統通量才會無法回覆。

下圖 12 乃以本實驗中，MBR 系統積垢現象之圖示說明，圖中顯示，操作初期，懸浮固體大量累積於薄面，此時膠體並未參與大部分阻塞，系統於起始操作時，曝氣狀況良好，因此濾餅能夠達到相當程度的掃除，隨著操作時間之增加，曝氣設備受到些許阻塞，影響了曝氣強度，導致水流掃流濾餅的能力將低，此時，積垢層漸厚下，膠體又重疊於懸浮固體上形成膠體層而造成不可逆積垢之現象越趨明顯，此時不但造成出流量降低，同時也造成反洗上之困難。

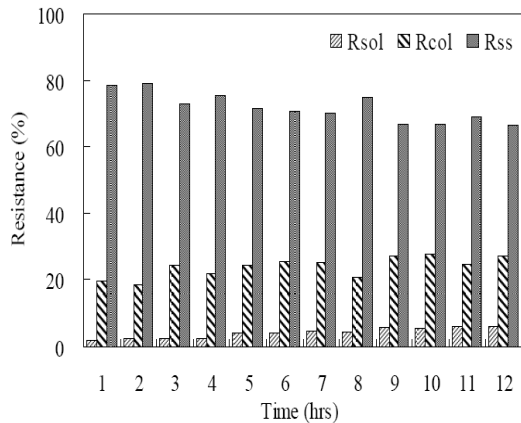


圖 9. SRT 15 天污泥之阻抗特性

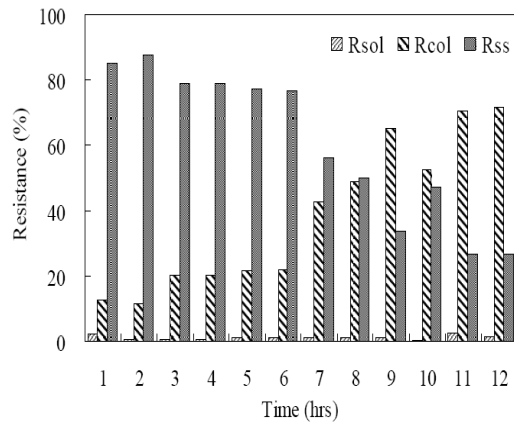


圖 10. SRT 30 天污泥之阻抗特性

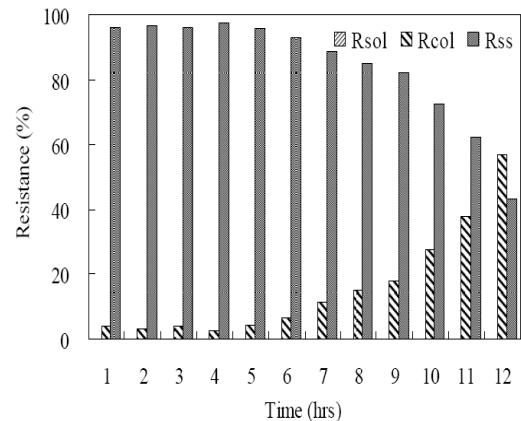
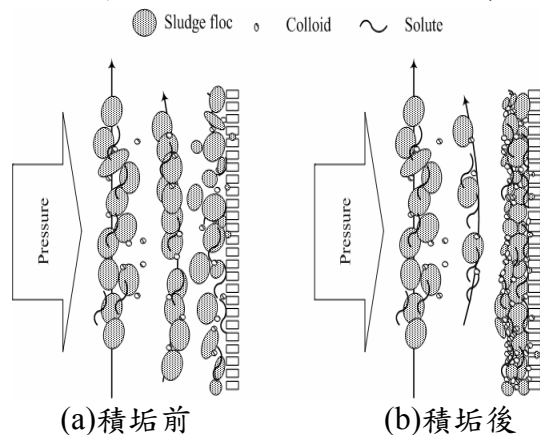


圖 11. SRT 60 天污泥之阻抗特性



(a)積垢前 (b)積垢後  
 圖 12. MBR 系統積垢示意圖

#### 四、結論

1. 清水通量之實驗中，不織布膜於低壓力趨動之操作下，就能達到相當高的通量，故對於薄膜之選擇，不織布膜為低壓力高通量操作之較佳選擇。
2. 操作於相同通量之情形下，以 SRT 15 天之污泥所能穩定操作之時間最長，SRT 30 天次之，SRT 60 天之操作時間最短，其所能穩定之操作時間分別為 81、32、12 小時。
3. 由阻抗實驗可得知，不同 SRT 污泥之過濾下，初期均以懸浮固體對積垢之影響最為明顯，三種 SRT 污泥條件下於初期所佔之比例均約為 80% 以上。
4. 隨著過濾時間之增加，膠體參與了作用導致膠體積垢形成，因此造成通量無法回復之情形，而溶質在本系統中之影響則極不明顯，所以本系統中，以懸浮固體及膠體對積垢之影響最為顯著

#### 五、參考文獻

1. Bae, T-H and Tak, T-M, Interpretation of fouling characteristics of ultrafiltration membranes during the filtration of membrane bioreactor mixed liquor, *J. Membr. Sci.* 264, 151-160, 2005.
2. Smith, C.V. and Gregorio, D.O., The use of ultrafiltration membranes for activated sludge separation. Proc 24rd Ind. *Waste Conf.*, Purdue University, Arbor Science, Ann Arbor, USA, 1300-1310, 1969.
3. Wisniewski, C and Grasmick, A., Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling, *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* 138, 403-411, 1998.
4. Bouhabila, E.H., Aim, R.B. and Buisson, H., Fouling characterization in membrane bioreactors, *Sep. Purif. Technol.* 22-23, 123-132, 2001.
5. Defrance, L., Jaffrin, M.Y., Gupta, B., Paullier, P. and Geaugey, V., Contribution of various constituents of activated sludge to membrane bioreactor fouling, *Bioresour. Technol.* 73, 105-112, 2000.
6. 阮文昌，『薄膜生物反應槽積垢特性之研究』，朝陽科技大學環境工程與管理系碩士論文，2003。
7. 林博焜，『污泥性質對薄膜生物反應槽積垢特性之研究』，朝陽科技大學環境工程與管理系碩士論文，2007。
8. 莊順興、林博焜、戴家川，“SBR與MBR系統處理水與污泥特性之研究”，第十七屆下水道與水環境再生協會研討會，台北，(2007)