


國立交通大學
環境工程研究所
碩士論文

污泥停留時間對薄膜生物反應槽中
胞外聚合物形成與積垢速率之影響

Effects of Sludge Retention Time (SRT) on
Extracellular Polymeric Substances (EPS) Production
and Fouling Rate in Membrane Bioreactor



研 究 生：於維芬

指導教授：林志高

中華民國 九十九 年 十 一 月

污泥停留時間對薄膜生物反應槽中

胞外聚合物形成與積垢速率之影響

研究生：於維芬

指導教授：林志高 博士

國立交通大學環境工程研究所

摘要

近年因環保意識高漲，永續發展與經營成為各產業追求之目標，又由於高科技產業製程須使用大量水資源，故其廢水之處理與排放備受重視。本研究利用薄膜生物反應技術，處理高科技廠低碳高氮廢水，以了解不同污泥停留時間 (SRT, 12、20、30 天) 對其處理效率之影響。本研究採沉浸式 MBR 系統，使用中空纖維型式之 PVDF 疏水膜進行。分析其進出流水質、胞外聚合物濃度、計算其積垢速率，最後以 SPSS 統計軟體進行相關性分析，以得其間之相關性。由結果顯示，SRT 控制在 20 天時，對 BOD₅、COD、NH₄⁺ 等水質項目處理效果最佳 (分別為 98、91、98%)；此外，當 SRT 增加，反應槽中胞外聚合物之總量增加，且因 F/M 下降，導致微生物代謝時所產生之碳水化合物降低，又因細胞死亡而釋出之蛋白質上升，而使胞外聚合物中蛋白質與碳水化合物之比值 (Protein/Carbohydrate, P/C) 上升；且根據計算之結果，P/C 與積垢速率皆隨 SRT 延長而上升。據 SPSS 軟體之統計結果顯示：SRT 控制在 12 天時，薄膜之積垢速率與附著性之 EPS 有較顯著之相關性，即碳水化合物之皮爾森指數 (Pearson, *P*) 為 0.752，而在 SRT 延長至 20 及 30 天時，積垢速率則改為與溶解性之胞外聚合物有顯著之相關性 (碳水化合物及蛋白質之 *P* 於 SRT 20 天及 30 天時，分別為 0.812、0.748，0.638、0.603)；又若將不同 SRT 下之 P/C 與積垢速率做比較，則可發現隨 SRT 增長，P/C 與積垢速率皆上升，推測反應槽中 EPS 總量及其 P/C 比對薄膜積垢速率之上升皆有影響。

關鍵字：薄膜生物反應槽 (MBR)、胞外聚合物 (EPS)、積垢速率 (FR)

Effects of Sludge Retention Time (SRT) on Extracellular Polymeric Substances (EPS) Production and Fouling Rate in Membrane Bioreactor

Student: Wei-Fen Yu

Advisor: Dr. Jih-Gaw Lin

Abstract

Recently, creating environmental consciousness and sustainable development have become a part of global issue. At the same time, high-tech industrial processes are inevitable, which require huge quantity of water resources. To adopt sustainable approach in these industries, wastewater treatment/reuse has been one of the major research areas. The purpose of this study is to evaluate the effect of different sludge retention times (SRTs), i.e. 12, 20 and 30 d, on the performance of membrane bioreactor (MBR) in treating the high-tech industrial wastewater with low C/N. The submerged lab-scale MBR system and a hollow fiber, PVDF and hydrophobic membrane were used to carry out the experiment. The performance of the MBR under various SRTs was determined based on the water quality, extracellular polymeric substances (EPS) concentration and fouling rate (FR) of the MBR. The correlations between EPS and FR were estimated by using the statistical software. The experimental results showed the maximum efficiency of the MBR under 20 d SRT where the average BOD₅, COD and NH₄⁺ removal efficiencies were reached 98, 91 and 98%, respectively. Moreover, the increase in the SRT of the system leads to the proportionate increase in the total EPS and protein concentrations as a result of cell lysis in the reactor. In contrast, decrease in carbohydrate concentration was observed with the increase in SRT. This phenomenon leads to the increase of protein/carbohydrate ratio (P/C). On the other hand, the results of statistical analysis reveal that there is a significant correlation is observed between FR and soluble EPS when the SRT was prolonged to 20 and 30 d. Overall, it can be concluded that the FR is increased as a result of increase in the P/C, and the increased SRT is responsible for the increases of P/C and FR.

Keywords: Membrane bioreactor (MBR); Extracellular polymeric substances (EPS); Fouling rate (FR)

致謝

兩年多之研究所生涯，終將結束，學生生涯亦將告一段落，對未來生活之懵懂，著實令人不安，遙想初進校園時的心情，亦是如此吧。

此份論文的完成，首要感謝的便是我的指導老師—林志高教授，不時指點我論文的方向及討論實驗的結果，使我獲益匪淺。在老師細心的指導與幫助下，除對 MBR 之領域有更深的認識，亦學習到做研究所需之嚴謹態度，對此篇論文的完成與未來之生活，都有很大的影響。

接著要感謝我的口試委員，游勝傑老師、張家源老師及張維欽老師，因為你們的指導，讓我發現本論文可再深入探討之處，亦讓我瞭解本篇論文不足之處及可改進之方向，對我幫助頗大。

本論文的完成，亦需感謝水礦的羅先生、呂先生及徐先生，中欣行的張先生、曾先生及巡廠人員，因為有你們的幫忙，使本研究能順利進行。

在這兩年多的日子裡，感謝研究室裡的所有人，陪我難過與歡笑，聽我訴苦及一起到處遊玩，因為有你們，讓這些日子顯得多采多姿。在此要感謝黃學聰學長及鄭曉芬學姐，謝謝你們在我實驗需幫忙之際伸出援手；感謝王董、理安及紹謙學長，謝謝你們的建議與幫忙；感謝我的同學依璇、紘瑩、彥均、心渝、聖然…等，謝謝你們讓我的研究生活不致乏味；謝謝學弟妹珮芸、茜茹、怡君、維倫、南維、信翰等，謝謝你們的幫忙，讓我可以專注於研究不致分心；此外亦要感謝實驗室的助理如虹，所辦的助理黃小姐、鍾小姐及陳小姐，不辭勞苦的幫忙我們處理許多行政及報帳事務。由於大家的幫忙，讓我可以順利完成學業。

最後要感謝我的雙親，因忙於研究，故鮮少回家，與家人相處的時間亦不多，感謝您們在這段期間的支持、體諒與包容，讓我順利完成學業。另外還有許多曾幫助過我的朋友，因大家的幫助，我才能有今天的成果。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親。

維芬

2010. 11. 30.

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
致謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	VIII
第一章 前言	1
1-1 研究緣起	1
1-2 研究目的	2
1-3 研究架構	2
第二章 文獻回顧	3
2-1 科學工業園區廢水.....	3
2-1-1 各科學工業園區污水廠簡介.....	3
2-1-2 高科技產業廢水特性.....	5
2-1-3 園區污水廠進流水質	5
2-2 薄膜生物反應系統 (Membrane Bio-Reactor, MBR)	8
2-2-1 MBR 系統之種類.....	8
2-2-2 MBR 之應用	10
2-2-3 薄膜特性與分類.....	11
2-2-4 薄膜單元操作問題.....	15
2-3 薄膜積垢因子.....	17
2-3-1 污水性質比較.....	17

2-3-2 薄膜通量	18
2-3-3 曝氣量	19
2-3-4 污泥停留時間 (Sludge Retention Time, SRT).....	20
2-4 胞外聚合物 (Extracellular Polymeric Substances, EPS).....	22
2-4-1 胞外聚合物成分及種類	23
2-4-2 萃取及分析方法	24
第三章 材料與方法	26
3-1 薄膜生物反應槽之設置	26
3-1-1 薄膜通量	27
3-1-2 薄膜單元操作與維護	27
3-1-3 污泥馴養	28
3-1-4 實驗操作參數	28
3-2 採樣與分析	29
3-2-1 EPS 之萃取	30
3-2-2 蛋白質分析方法	31
3-2-3 碳水化合物分析方法	32
3-3 實驗設備	33
第四章 結果與討論	34
4-1 水質處理效果	34
4-2 薄膜積垢速率分析	39
4-3 胞外聚合物產量	42
4-4 相關性分析	46
第五章 結論與建議	53
5-1 結論	53



5-2 建議	54
第六章 參考文獻	55



圖目錄

圖 1-1 研究架構圖.....	2
圖 2-1 科學工業園區污水廠污水處理流程示意圖.....	3
圖 2-2 依薄膜用途分類之 MBR 系統.....	8
圖 2-3 側流式與沉浸式 MBR 系統.....	9
圖 2-4 薄膜過濾形式：(A) DEAD-END；(B) CROSS-FLOW	11
圖 2-5 各類薄膜可分離物質範圍.....	12
圖 2-6 薄膜阻塞機制.....	15
圖 2-7 臨界通量下不同通量之 TMP 變化	19
圖 3-1 MBR 反應槽.....	26
圖 3-2 EPS 萃取步驟.....	30
圖 3-3 蛋白質定量流程.....	31
圖 3-4 碳水化合物測定流程.....	32
圖 4-1 操作期間反應槽之 pH 變化.....	34
圖 4-2 進出流水 SS 濃度	35
圖 4-3 反應槽中 MLSS 及 MLVSS 之變化	36
圖 4-4 不同 SRT 下進出流水值變化：(A) BOD ₅ ；(B) COD；(C) NH ₄ ⁺	37
圖 4-5 不同 SRT 下 MLSS、FR 及 P/C 變化.....	40
圖 4-6 不同 SRT 下反應槽中 EPS 濃度變化.....	43
圖 4-7 反應槽中 EPS 總量隨 SRT 之變化.....	44

表目錄

表 2-1 各科學工業園區污水廠營運操作彙整表.....	4
表 2-2 新竹科學工業園區下水道可容納排入之水質指標	6
表 2-3 廢污水性質比較.....	7
表 2-4 全球 MBR 系統之應用範疇統計.....	10
表 2-5 不同膜組型態之比較.....	13
表 2-6 常用薄膜材料優缺點比較.....	14
表 2-7 MBR 積垢因子.....	17
表 2-8 不同處理水之 C/N 比與 SRT.....	18
表 2-9 不同文獻中 SRT 與薄膜積垢及 EPS 產量之關係.....	22
表 2-10 各萃取法之結果比較.....	24
表 2-11 蛋白質定量法比較表.....	25
表 3-1 進流水質範圍.....	26
表 3-2 薄膜材質與特性.....	27
表 3-3 實驗條件與參數.....	29
表 3-4 採樣分析項目與頻率.....	29
表 4-1 進、出流水質檢驗結果.....	38
表 4-2 文獻中不同進流 C/N、MLSS 及 FR 之比較.....	41
表 4-3 反應槽中 EPS 濃度.....	42
表 4-4 不同 SRT 下反應槽中 EPS 總量與積垢速率之變化.....	44
表 4-5 SRT 12 天之相關性分析結果.....	47
表 4-6 SRT 20 天之相關性分析結果.....	48
表 4-7 SRT 30 天之相關性分析結果.....	49
表 4-8 SRT 12 天各因子與 EPS 總量之相關性結果.....	50

表 4-9 SRT 20 天各因子與 EPS 總量之相關性結果.....	51
表 4-10 SRT 30 天各因子與 EPS 總量之相關性結果.....	52



第一章 前言

1-1 研究緣起

我國自民國 69 年於新竹設立第一座科學園區，至今近三十年，除成功引進國外技術與人才、帶動國內產業轉型、技術提升外，更使我國高科技產業揚名國際，並有「台灣矽谷」之美稱。而由於高科技產業製程中常須用到大量水資源，故其廢水之處理與排放備受重視。

近年來，環保意識高漲，永續發展與經營儼然成為各產業追求之目標。由於高科技產業之製程特殊，廢水性質與一般都市污水不同，據檢測結果可知：高科技廢水具低碳高氮之特性，其 C/N 僅約 1.2，遠低於都市污水之 4-5，為性質特殊之廢水。

薄膜生物技術 (Membrane Bio-Reactor, MBR)，結合傳統活性污泥法與薄膜分離技術，除利用薄膜單元取代傳統終沉池，大幅減少佔地面積外，更可藉薄膜單元去除廢水中之細菌及部分難降解有機物，使出流水質較傳統生物處理佳，為未來水處理技術之潮流；然於 MBR 系統操作時，因負壓抽水，使反應槽中物質附著於膜面，形成積垢，除影響薄膜單元之操作及出水量外，易導致操作成本上升，故如何減緩膜面物質之附著及累積，為操作薄膜單元時備受重視之課題。

薄膜積垢為 MBR 操作過程中不可避免之現象，可藉適當之操作，以減緩其累積之速度，如：將薄膜出水量控制在臨界通量之下、採間歇抽水、定時反洗等；此外，亦有文獻指出：薄膜積垢與反應槽中污泥性質有關，如：污泥濃度 (MLSS)、膠體物質濃度、胞外物質、顆粒大小等；而在眾多影響薄膜積垢之因子中，又以膠體物質之影響最為顯著。膠體物質之主要成分為胞外物質，為微生物於生長代謝時所產生之物質，可分為溶解性微生物產物 (SMP) 及胞外聚合物 (EPS)，皆由碳水化合物、蛋白質、脂質及核酸所組成，其中又以碳水化合物及蛋白質為主要成分，與薄膜積垢息息相關。

目前已知 EPS 與薄膜之積垢有密切之關係，且許多文獻亦指出污泥停留時間 (SRT)、曝氣強度、污泥濃度 (MLSS) 等對反應槽中 EPS 皆有影響，然多數研究所使用之進流水多為合成廢水、都市污水或一般工業廢水；本研究將以高科技業之實廠廢水為原水，改變反應槽之 SRT，以了解高科

技產業之低 C/N 廢水對 MBR 反應槽中 EPS 之影響，並與不同文獻比較，比較其對薄膜積垢速率之影響。

1-2 研究目的

本研究之目的可分為以下項目：

1. 建立 MBR 模廠，了解 MBR 系統是否適於處理科技產業之廢水，並使出流水質達法規標準。
2. 改變 SRT，檢測各階段反應槽中污泥之基本性質及 EPS 濃度，以了解在不同 SRT 下，EPS 與薄膜積垢之相關性。
3. 與文獻比較，了解進流水質對 MBR 系統中 EPS 及膜積垢之關係。

1-3 研究架構

本研究之架構略可以圖 1-1 表示，首先建立 MBR 反應槽，以園區實廠廢水進行馴養及試驗，藉改變 SRT 了解其對反應槽中污泥之影響，同時計算薄膜積垢之速率，以了解其相關性；此外亦同時對進、出流水質做檢測，以確保反應槽為穩定操作之狀態。

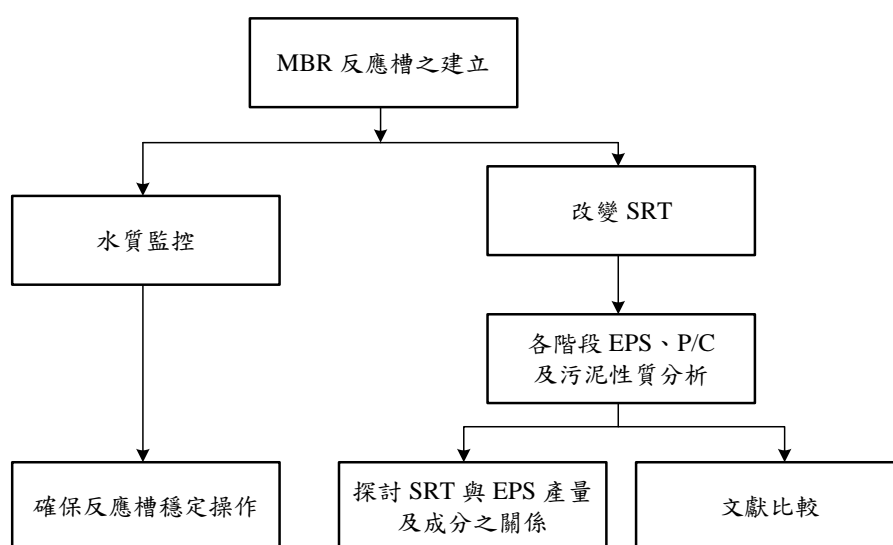


圖 1-1 研究架構圖

第二章 文獻回顧

2-1 科學工業園區廢水

2-1-1 各科學工業園區污水廠簡介

我國共有三座科學園區：新竹科學工業園區、南部科學工業園區及中部科學園區，分別成立於民國 67、84 及 92 年，隸屬行政院國科會，為我國高科技產業之發展基地，並扮演促使台灣產業升級及提升經濟之角色。

三座科學園區由於開發時間、引進目標產業與開發方式不盡相同，故污水處理廠之營運與操作狀況各異，將各科學園區營運中污水廠之操作成效彙整如表 2-1 所示，可知放流水質皆可符合標準。

目前園區污水廠之處理法皆以生物處理（活性污泥法或接觸曝氣法）為主，有效去除廢水中之有機物，後再搭配化學處理之二級處理程序，以節省加藥量，而為確保 SS 之有效去除，於放流前再加以過濾單元處理；其處理流程如圖 2-1 所示。

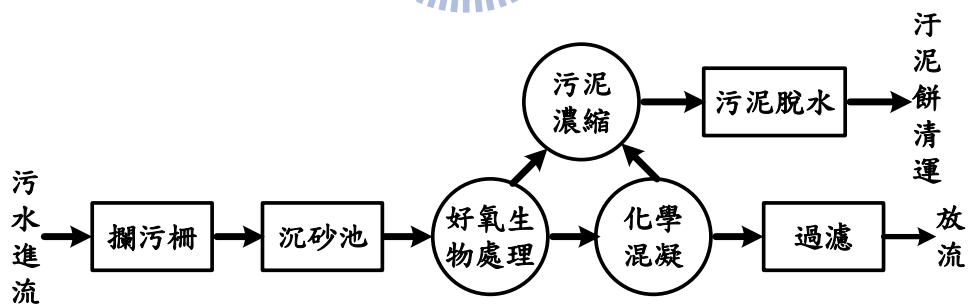


圖 2-1 科學工業園區污水廠污水處理流程示意圖

表 2-1 各科學工業園區污水廠營運操作彙整表

園區\項目	最大處理量 (CMD)	目前處理量 (CMD)	平均進流水質 (mg/L)	平均放流水質 (mg/L)	放流水標準 (mg/L)
竹科 新竹園區	185,000	106,883	BOD ₅ =50.6 COD=169.0 SS=131.0	BOD ₅ =6.4 COD=21.4 SS=4.6	
竹科 竹南園區	20,000	11,654	BOD ₅ =25.9 COD=97.9 SS=11.1	BOD ₅ =9.0 COD=37.5 SS=ND	
竹科 龍潭園區	6,500	228	BOD ₅ =21.6 COD=54.0 SS=30.0	BOD ₅ =4.4 COD=14.7 SS=4.5	BOD ₅ <30 COD<100
中科 台中園區	64,000	31,388	BOD ₅ =61.0 COD=109.9 SS=92.5	BOD ₅ =7.6 COD=22.7 SS=14.5	SS<30
南科 台南園區	90,000	66,512	BOD ₅ =116.0 COD=202.0 SS=88.0	BOD ₅ =2.4 COD=36.6 SS=4.0	
南科 高雄園區	45,000	1,382	BOD ₅ =17.2 COD=21.3 SS=16.9	BOD ₅ =3.2 COD=11.4 SS=2.0	
備註	1. 資料來源為環保署水污染源管制資料管理系統 (統計時間:96 年 1-6 月) 2. 中科台中園區設計最大處理量為二期擴建完成之規模				

(歐陽嶠暉等，2008)

2-1-2 高科技產業廢水特性

目前國內科技業主要可分為六大產業：積體電路產業、電腦及周邊產業、通訊產業、光電產業、精密機械業及生物科技產業等，然因製程不同，產出廢水之特性亦相差頗大，茲分別介紹如下：

1. 積體電路產業：以生產晶片、晶圓製品為主，亦包含產品之測試及封裝，製程中常使用有機溶劑，所產生之廢水中常含酸鹼、氟、銅及研磨廢水等。
2. 電腦及周邊產業：主要為生產電腦產品、網路設備之產業，常使用酸鹼及有機溶劑，故所產生之廢水常含酸鹼、鎳及研磨廢水等。
3. 通訊產業：生產與通訊有關之周邊配備，其製程廢水中常含有酸鹼、氟、砷等物質。
4. 光電產業：生產晶片、二極體、液晶螢幕、太陽電池等多種產品之開發、研究與生產，排出含酸鹼、氟、研磨廢水、有機物、砷、銅、鉻等物質之廢水。
5. 精密機械業：生產自動控制設備、精密儀器之元件與設備，此外亦開發系統軟體，所產生之廢水以一般生活污水為主。
6. 生物科技產業：生產疫苗、檢驗及醫療器材，並從事生技產品之研發與製造，其製程廢水常含酸鹼、有機廢水等物質。

2-1-3 園區污水廠進流水質

如表 2-1 所示，目前之處理流程已可將有機物有效去除並達法規標準，然為達成永續發展及提升產業形象之目的，氮、磷之去除已然成為廢水處理之趨勢，環保署未來亦將針對放流水中之氮磷做管制，故如何處理廢水中之氮、磷為未來園區廢水處理之重點。

園區內污染源可分為事業污染源（即進駐園區之事業單位所排放之廢污水）及一般污染源（家庭、服務及研究機構所排放之廢污水），然根據「科學工業園區污水處理及污水下水道使用管理辦法」規定：園區事業單位應將所產生之廢污水先行處理至符合園區污水下水道之納管標準（如

表 2-2) 後，方可排入園區污水下水道系統，足見園區污水廠進流水質受相當之規範。

園區廢水中之氮、磷成分主要來自半導體業及光電產業之清洗製程程序，常伴隨大量之廢水產生，可行之處理方法有：製程改善、原物料替代、源頭管制及污水廠處理等，如表 2 之工業園區下水道納管標準所示，並無氮磷之限制，故污水廠之進流水中常含大量之氮磷，使有機物與氮磷之比值 (C/N、C/P) 偏低，為未來污水廠處理之重點。

表 2-2 新竹科學工業園區下水道可容納排入之水質指標

項目	最大容許限值	項目	最大容許限值
水溫	35 °C	鋅	5.0 mg/L
氫離子濃度	5 ~ 10	總鉻	2.0 mg/L
生化需氧量	300 mg/L	溶解性錳	10.0 mg/L
化學需氧量	500 mg/L	氰化物	1.0 mg/L
懸浮固體	300 mg/L	氰化物	15.0 mg/L
陰離子界面活性劑	10.0 mg/L	硫化物	1.0 mg/L
油脂 (正己烷抽出物)	25.0 mg/L	硼	1.0 mg/L
酚類	1.0 mg/L	甲醛	3.0 mg/L
銀	0.5 mg/L	硝酸鹽氮	50 mg/L
砷	0.5 mg/L	總有機磷劑	0.5 mg/L
鎘	0.03 mg/L	總氨基甲酸鹽	0.5 mg/L
六價鉻	0.5 mg/L	有機汞	N.D.
銅	3.0 mg/L	多氯聯苯	N.D.
溶解性鐵	10.0 mg/L	有毒物質	N.D.
總汞	0.005 mg/L	易燃或爆炸物質	N.D.
鎳	1.0 mg/L	放射性物質	完全禁止
鉛	1.0 mg/L		大於 1 毫米孔徑所
硒	0.5 mg/L	動物羽毛	篩出之動物與毛不 可超出 85 mg/L

本研究以受園區下水道納管標準規範後之廢水為進流，其中所含之重金屬及有害毒性物質濃度頗低，且根據調查結果顯示：園區污水處理廠進流水質之碳、氮、磷比能符合 100:5:1 之比例，為適合生物處理之廢水，唯 C/N 較一般都市污水低（如表 2-3），此亦為本研究之重點。

表 2-3 廢污水性質比較

水質項目 (mg/L)	園區廢水	一般都市污水
BOD ₅	25 - 69	200
COD	30 - 100	300
NH ₃ -N	30 - 70	25
PO ₄ ³⁻ -P	3 - 25	4



2-2 薄膜生物反應系統 (Membrane Bio-Reactor, MBR)

薄膜生物反應系統為一新穎之水處理技術，其結合了傳統的活性污泥法與新興的薄膜處理技術，利用薄膜之過濾原理，能有效取代傳統終沉池固液分離之功能，並得到優於傳統程序之出流水質。與傳統生物處理程序相比，薄膜生物反應系統具有幾項優點：(1) 穩定且良好之出流水質；(2) 佔地面積小；(3) 能承受較高之有機負荷；(4) 污泥產量較低…等，為近幾年來備受重視之技術 (Huang *et al.*, 2000; Visvanathan *et al.*, 2008)。

然 MBR 系統於操作時並非全無問題，如購買薄膜單元之成本、薄膜之阻塞及清洗問題、操作動力費等，皆為導致 MBR 系統成本提高之因素。其中在薄膜阻塞之問題上，因利用負壓抽水，使薄膜之積垢成為一不可避免之現象，將影響出流之水質與水量，故如何減緩薄膜之積垢，儼然成為眾多研究之焦點。

2-2-1 MBR 系統之種類

MBR 系統可依薄膜單元之功能，分為三種：固液分離程序、氧傳程序、交換（萃取）程序，如圖 2-2 所示，可依不同之目的選擇適當之 MBR 系統；而在廢污水之處理中，又以固液分離程序（圖 2-2 (a)）最廣為應用，利用薄膜單元可完全阻絕固體物之特性，將污泥顆粒攔阻於反應槽內，得以取代傳統生物處理法中之終沉池，並得到較佳之出流水質。

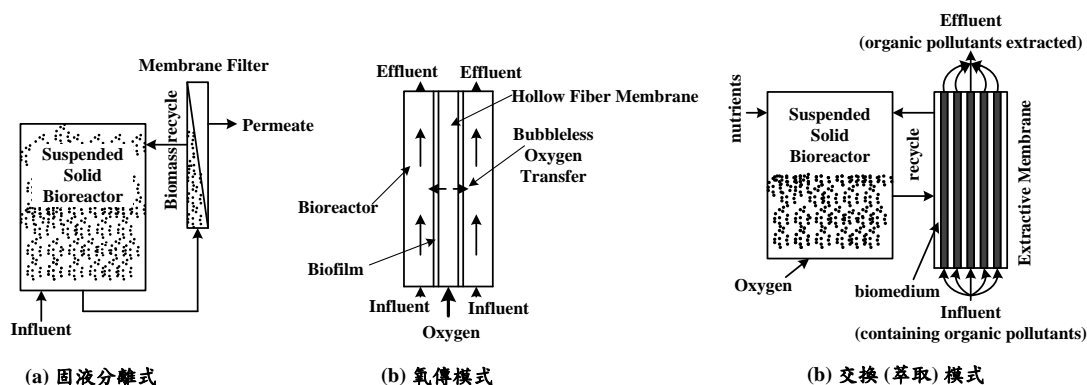


圖 2-2 依薄膜用途分類之 MBR 系統

於固液分離程序中，若依薄膜單元與生物反應槽之相對位置，則可將 MBR 系統又分作旁流式或側流式 (Side-Stream) 及沉浸式 (Submerged) 兩類，如圖 2-3 所示 (Stephenson *et al.*, 2000)：側流式之 MBR 系統，薄膜為位於生物反應槽外之一獨立單元，污泥利用泵浦經薄膜過濾後，迴流至反應槽中，過濾後之處理水則由另一端出流；沉浸式之 MBR 系統中，薄膜單元直接浸沒於生物反應槽中，由泵浦經薄膜抽出處理水，利用薄膜之過濾功能，將污泥截留於反應槽中。

薄膜單元位置之不同，將導致操作上的差異：於側流式系統中，抽水及迴流皆須使用泵浦，故動力費用將比沉浸式系統高；此外，沉浸式系統於操作時，可利用位於薄膜單元下方之曝氣盤，於曝氣時產生之上升氣流與水流，減緩薄膜表面之積垢現象 (Ueda *et al.*, 1996)。

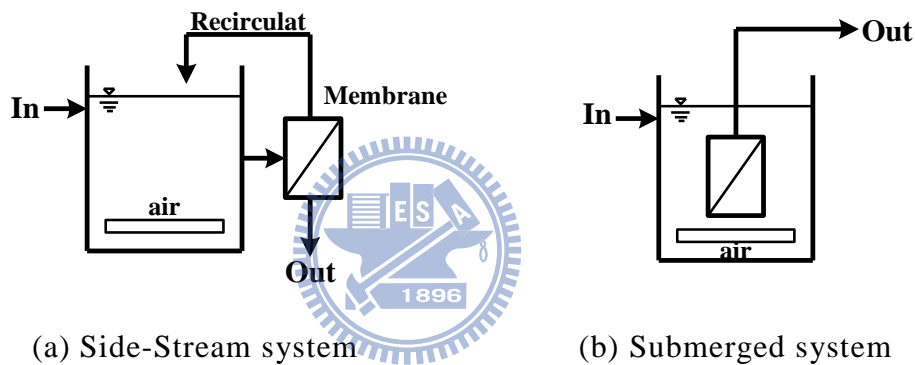


圖 2-3 側流式與沉浸式 MBR 系統

2-2-2 MBR 之應用

根據 Stephenson *et al.* 在 2000 年之調查數字顯示，全世界有超過五百座 MBR 廠正在操作，其中約有 55% 採沉浸式系統操作；而在 Yang *et al.* (2006) 中指出全球有超過 2200 座 MBR 廠已設置運轉或陸續興建當中。而 Atkinson. (2006) 的報告更指出：該年 MBR 之市場有約 2.1 億美金，並以每年平均 10% 以上之速度成長，並推估於 2010 年將達到 3.6 億美金。由以上資料顯示，MBR 為全球水處理之趨勢，且增加快速；由范姜仁茂等 (2009) 的研究顯示，現階段 MBR 常見之處理容量約為 190-1900 CMD，且設置以美國、日本、南韓、英國、德國最為積極。

MBR 系統之應用範圍很廣，除都市污水之處理外，亦可用於工業廢水、垃圾滲出水等之處理，表 2-4 即為全球 MBR 應用範疇之統計 (Stephenson *et al.*, 2000)，由表可看出工業廢水為廣泛應用 MBR 處理之項目；而由 MBR 之特點，亦可看出該程序除可解決園區污水廠佔地不足之窘境，在地狹人稠之台灣地區亦有良好的發展潛力。

表 2-4 全球 MBR 系統之應用範疇統計

Type of wastewater	Approximate % of total MBRs
Industrial	27
In-building	24
Domestic	27
Municipal	12
Landfill leachate	9

2-2-3 薄膜特性與分類

薄膜過濾可依水流與膜面之角度分為截流式過濾或死端過濾 (dead-end or full-flow) 及掃流式過濾 (cross-flow) 兩種，如圖 2-4 所示，圖 2-4 (a) 為 dead-end 形式，特色為進流水與膜表面垂直、由水流所造成之阻力較小，但膜面上之積垢物常導致總阻力上升，並使通量下降，故較適用於固體物含量較少之水源；圖 2-4 (b) 為 cross-flow 形式，特色為進流水與薄膜表面平行，且較 dead-end 多了一股與膜面平行之 retentate 水流，雖會造成部分阻力，但可有效去除膜表面之積垢物，降低整體操作壓力，適於處理固體物含量高之源水 (Stephenson *et al.*, 2000; Judd, 2006)。

一般而言，微過濾 (MF) 與超過濾 (UF) 常為 cross-flow 形式，且由圖 2-4 中可看出 cross-flow 形式之積垢阻力 (R_c) 及通量將隨操作時間之延長，逐漸穩定；然 dead-end 形式則否，且積垢阻力之上升與通量之下降遠較 cross-flow 形式變化大，在操作上亦較不符合經濟效益，故在選用薄膜處理廢水時，多半採用 cross-flow 之形式，除可維持較高之通量及較小之阻力外，亦可順帶清除膜面上之積垢物 (Cheryan, 1998)。

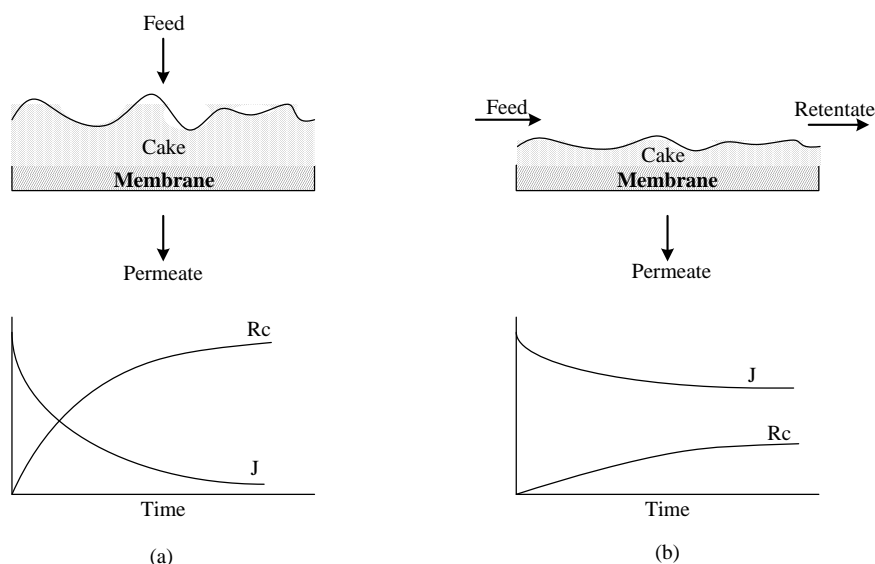


圖 2-4 薄膜過濾形式：(a) dead-end；(b) cross-flow

薄膜種類繁多，可用不同依據加以分類，如：孔徑、外型、材質等，為常見之分類方式。

(一) 以薄膜孔徑分類

膜分離技術為利用不同物質在透膜速率上之差異，達到分離之目的，可依膜孔徑之大小分為微過濾 (micro-filtration, MF)、超過濾 (ultra-filtration, UF)、奈米過濾 (nano-filtration, NF) 及逆滲透 (reverse osmosis, RO) 等，以膜兩側之壓力差為固液分離之驅動力。

一般而言，MF 膜孔徑約 0.1-10 μm ，主要用於去除水中之懸浮物質；UF 膜孔徑約 0.01-1 μm ，可去除水中之膠體物質與溶解性之大分子物質；此外，MF 及 UF 膜亦可去除部分水中之細菌及病毒，可取代傳統之砂濾單元，故常應用於工業廢水之處理。NF 主要為去除水中二價之陽離子，RO 則可有效截留水分子外所有之物質，由於 NF 及 RO 膜之孔徑過小、易阻塞，且操作維護成本過高，故多半僅於海水淡化、家用小型濾水器或特殊製程用水所用。各類薄膜孔徑與可分離物質之大小關係如圖 2-5 所示 (Stephenson *et al.*, 2000)。


Membrane							
Size		Inionic	Molecular	Macromolecular	Microparticle	Macro-particle	
	μm	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10
	Da	200		20000	500000		
Size of common materials		<div>Na⁺ · Cl⁻</div> <div>Pb²⁺</div> <div>NO₃⁻</div> <div>Anionics</div> <div>Trihalomethane</div>	<div>Pesticide · Organic Materials</div> <div>Colloids</div> <div>Humic Acid</div> <div>Virus</div> <div>Polio Virus</div> <div>Hepatitis A Virus</div>	<div>Influenza Virus</div> <div>Clays</div>	<div>Cholera Vibrio</div> <div>Coliform</div> <div>Cryptosporidium</div>	<div>Algae · Mud</div> <div>Silts</div>	
Application		Sea Water Desalination	Brackish Water Desalination		Drinking Water		
		Wastewater treatment			Wastewater treatment		

圖 2-5 各類薄膜可分離物質範圍

(二) 以薄膜外型做分類

薄膜之型態主要可分為四類：平板式 (Flat Plate, FP)、管柱式 (Tubular)、螺旋式 (Spiral Wound, SW) 及中空纖維式 (Hollow Fiber, HF)。在使用上，平板膜之能量消耗低且易於拆除清洗，但填充密度低、所需佔地面積大；管柱式薄膜較不易為懸浮固體物阻塞且可承受之壓力高，但單位薄膜面積所占空間大、壓損高、操作成本高；螺旋式薄膜之填充密度高、壓損小，但不易清洗，故不適於處理高濁度之原水；中空纖維式薄膜之填充密度高、比表面積大且易於反洗，但視材質而異，易受水中髮絲及堅硬物質損壞。上述四類膜組之比較如表 2-5 所示 (Stephenson *et al.*, 2000)。

由於中空纖維膜有單價低、有效過濾面積大、處理單位成本低，可進行反洗以減少薄膜積垢、延長操作時間等操作優勢，且常應用於沉浸式 MBR 中，故本研究採用中空纖維式之薄膜進行操作。

表 2-5 不同膜組型態之比較

Configuration	Cost	Area/Volume ratio (m ² /m ³)	Back-flushable	Application
Flat Plate	High	400-600	No	ED, UF, RO
Tubular	Very high	20-30	No	UF, NF, high TSS water
Spiral Wound	Low	800-1000	No	RO, NF, UF
Hollow Fiber	Very low	5000-40000	Yes	MF, RO

(三) 以薄膜材質做分類

製作薄膜的材料主要分為兩種：聚合物（常見有：CA、PP、PS、PTFE、PVDF 等）及無機物（如：玻璃纖維、陶瓷纖維等），然無機膜因材料特性之原故，其延展性較差、易脆，常因外力而損壞；而常見之製膜聚合物有醋酸纖維 (Cellulose acetate, CA)、聚丙烯 (Polypropylene, PP) 及聚氟化亞乙烯 (Polyvinylidene Fluoride, PVDF)

等，各材質特性如表 2-6 所列 (Stephenson *et al.*, 2000)。由於 PVDF 材料具高度之抗污染性、耐磨性及抗化學性，且材料強度高，為降低實驗時因更換膜片所造成之影響，遂本研究採用 PVDF 膜進行試驗。

表 2-6 常用薄膜材料優缺點比較

Polymer	Advantage	Disadvantage
Cellulose Acetate	Inexpensive Chlorine resistant	Poor thermal, chemical and mechanical stability
Polypropylene	Chemically resistant	Hydrophobic unless surface treated
Polysulphone	pH resistant, Solvent cast	Poor resistant to hydrocarbons
PTFE	Very hydrophobic, Excellent organic resistant, Excellent chemical stability	Too hydrophobic, Expensive
Polyvinylidene-fluoride	Good thermal, chemical and mechanical resistant Stability	Expensive

理想之薄膜應具備有：有效過濾面積大、操作所需動能低、單位成本低、便於清洗、通量大、選擇性高等條件，然上述之理想條件卻礙於技術之發展，多半相互矛盾，如：薄膜孔徑大，通量大，則選擇性低；有效過濾面積越大，則清洗越困難等。故而發展出不同型態之薄膜，以不同之操作優勢供不同目的使用。

2-2-4 薄膜單元操作問題

薄膜單元於操作期間，常遇阻塞（積垢）、通量下降及透膜壓力上升、清洗與反洗等問題，為 MBR 之操作帶來變數，並因此造成操作成本增加。

薄膜阻塞之機制有許多種，主要分為四類：完全阻塞（Complete blocking）、部分阻塞（Intermediate blocking）、孔內或內部阻塞（Standard blocking）及濾餅（Cake filtration），如圖 2-6 所示，其中孔內阻塞及濾餅之形成，多半由膠體物質或蛋白質過濾所引起，易導致通量下降及透膜壓力上升（Judd *et al.*, 2006）。

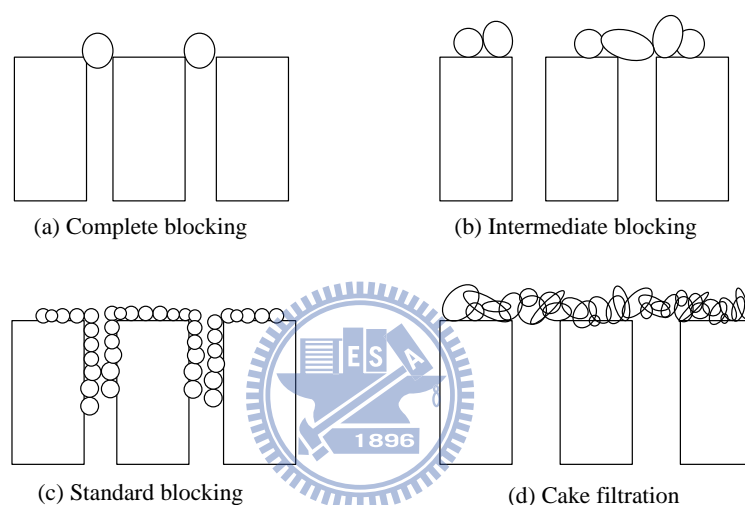


圖 2-6 薄膜阻塞機制

薄膜單元於操作時，常隨操作時間增加而產生積垢，使透膜壓力上升，故需適時清洗，以維持系統操作之穩定。薄膜之清洗可分為物理清洗及化學清洗兩種，物理清洗如：表面沖洗及刷洗、間歇抽水、以水流作逆向操作（反洗）等，可用於去除膜面或薄膜孔洞中之可逆積垢（reversible foulant），操作簡單，花費時間少（數分鐘內即可完成），但通量回復之效果較差；化學清洗則為利用化學藥劑浸泡，以去除不可逆積垢（irreversible foulant），所需時間較長（視各膜片供應商之建議），操作後有藥劑廢棄之問題，然通量回復之效果亦遠較物理清洗佳（Judd *et al.*, 2006）。

清洗薄膜之時機應視操作通量及透膜壓力之變化而定，過於頻繁之清洗，將導致操作成本上升；但如超出薄膜可承受之壓力變化後才進行清洗，則效果將變差，並易使薄膜之壽命減短、成本上升，故一般建議於平時定期做物理清洗，待透膜壓力達臨界點時再進行化學清洗。然薄膜於長期使用及反覆清洗後，初始通量及藥洗間隔皆將下降，故如何利用適當之清洗方式，以延長薄膜操作壽命，為 MBR 操作及設計之重要考量因子。本研究將結合兩種清潔方法，除平時利用水流之擾動去除膜面積垢外，亦定期以清水作逆向之反洗、去除可逆之積垢，並於壓力達臨界時，利用化學藥品作浸泡，去除不可逆之積垢，以維持操作之穩定。



2-3 薄膜積垢因子

薄膜之積垢，主要受水質特性、薄膜特性與控制參數所影響，此外，當 MBR 操作異常時，亦會因污泥性質之不穩定而影響薄膜之積垢。表 2-7 為影響薄膜積垢因子之整理表（范姜仁茂等，2009）。

表 2-7 MBR 積垢因子

影響因子	因子類型	影響因子	因子類型
水質特性	SS 濃度 有機質疏水性	控制參數	通量 溫度 MLSS
薄膜特性	親疏水性 帶電性 孔隙 粗糙度		曝氣強度 CFV HRT SRT
薄膜類型	模組 材質		
顆粒特性	膠羽大小	污泥異常	膨化 膠凝不佳

本研究將針對科技產業之廢水進行研究，以了解不同 SRT 下，其污泥性質（如：污泥濃度、胞外聚合物等）(Sperandio *et al.*, 2006) 對薄膜積垢之影響，其相關影響因子將於本章節作介紹。

2-3-1 污水性質比較

表 2-8 為不同文獻中，處理水之 C/N 比與操作 SRT 之整理，可看出多數廢水之 C/N 多大於 4，然國內高科技產業之廢水皆有低 C/N 之傾向，以本研究所使用之廢水為例，其 C/N 比僅約 1.2，遠低於多數文獻之廢水，足見國內科技產業廢水性質之特殊。

表 2-8 不同處理水之 C/N 比與 SRT

Wastewater	C/N	SRT	Reference
Synthetic	17.4	12	Guglielmi <i>et al.</i> (2007)
Municipal	4.8	-	Kimura <i>et al.</i> (2005)
Municipal	12.7	2-10	Trussell <i>et al.</i> (2006)
Textile	40.6	25	Yigit <i>et al.</i> (2009)
Petrochemical	12-13	25	Qin <i>et al.</i> (2007)
高科技產業廢水	1.2	12-30	This study

2-3-2 薄膜通量

單位時間通過薄膜之物質體積即為通量，常以 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$ (m/s) 或 LMH ($\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$) 表示。一般在 MBR 反應槽中，薄膜通量常控制在臨界通量 (Critical Flux) 以下，以延長薄膜單元之壽命，並減緩積垢物質之累積。

臨界通量之定義為：在 MF 或 UF 程序中，如薄膜通量小於該值，則薄膜表面所累積之積垢物質，不會隨操作時間增加；反之，則積垢現象明顯。此外，亦有較狹義之說法：當操作通量小於臨界通量時（即次臨界通量，Sub-critical flux），因膜面不產生積垢、不會造成通量之減損，故該操作通量等於清水通量；然於實際操作中，清水通量往往大於薄膜在反應槽中之通量，故有另一較廣義之定義：當操作通量小於臨界通量時，能有效避免薄膜積垢、減緩通量下降，但該操作通量並不等於清水通量 (Judd, 2006)。

薄膜於次臨界通量下，雖可有效減緩薄膜積垢、延長薄膜之使用時間，但通量之大小亦會影響其 TMP 上升之速度，如 Cho and Fane (2002) 之研究（圖 2-7）：即使操作通量小於臨界通量，但 TMP 上升之速度亦會隨著通量之增加而加快，故如何選擇最適當之通量，則應視薄膜之性質而定。

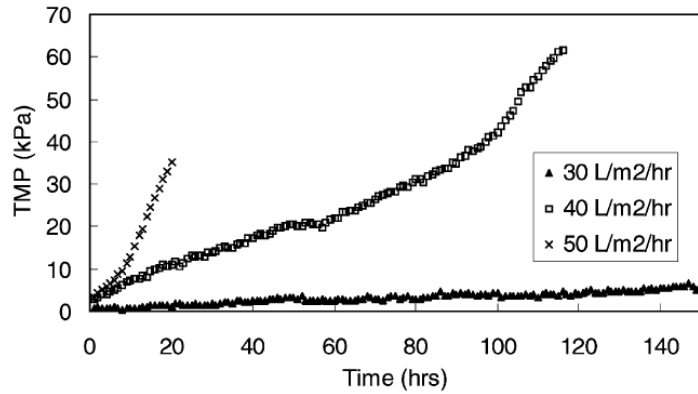


圖 2-7 臨界通量下不同通量之 TMP 變化

2-3-3 曝氣量

一般好氧生物處理程序，皆將反應槽中溶氧控制在 2 mg/L 以上，以提供微生物反應所需之氧氣。然在 MBR 反應槽中，曝氣量之控制除提供溶氧外，亦有混合及控制膜面積垢之用途。此外，Kim *et al.* (2006) 亦指出，當反應槽中溶氧過低或不足時，將使薄膜易於阻塞，足可見曝氣量與溶氧對 MBR 之重要。

據文獻指出：過大之曝氣量對薄膜積垢之去除無顯著影響，如何取得最適宜之曝氣量，則應視反應槽之設計及操作而定。如 Ueda *et al.* (1996) 之研究顯示：曝氣量為 $0.7 \text{ m}^3/\text{min}$ 時，為最具經濟效益之曝氣量，除能有效減緩薄膜壓力之上升外，亦能提供最大之膜面剪力，減緩積垢之發生，如曝氣量過大，對薄膜積垢之去除無顯著影響，過小則無法有效控制膜面之積垢累積。足見曝氣量之控制對 MBR 之重要。

利用曝氣減緩薄膜之積垢，較薄膜之清洗更為簡便，成本亦較低廉，故曝氣量之控制亦為 MBR 操作時重要之因子。

2-3-4 污泥停留時間 (Sludge Retention Time, SRT)

薄膜積垢為 MBR 於操作時一重要之課題，常導致操作費用增加，故為薄膜研究之重點。已知污泥停留時間 (SRT) 為影響污泥性質之重要因素，且薄膜積垢受污泥性質影響頗深，故 SRT 與薄膜積垢間關係之研究備受重視。

然針對 SRT 對薄膜積垢影響之研究結果，有兩派不同意見，部分文獻指出：薄膜之積垢會隨 SRT 之增加而更趨嚴重，並導致積垢物量增加及反應槽中混合液黏度上升，如 Lee *et al.*(2003) 之研究：隨著 SRT 增加 (20、40、60 天)，薄膜積垢之阻力亦增加，Han *et al.*(2005) 亦有相同之研究結果；若欲以曝氣所產之氣泡或液體擾動藉以減緩積垢情形，則須提高曝氣量或增加攪拌程度，但會使操作成本提高。而另一方面，在 Ng *et al.*(2006) 之研究結果顯示：比較 SRT 為 3、5、10 及 20 天之 MBR 操作結果，發現 SRT 越短，其薄膜積垢情形越嚴重，與 Ahmed *et al.*(2007) 之研究結果相同，且 Ke and Junxin (2009) 亦顯示，TMP 上升之速率隨 SRT 增長而變慢。故 SRT 與薄膜積垢間之關係無一定論。

不同 SRT 將導致反應槽中微生物生長狀態改變，影響反應槽中之污泥性質及胞外聚合物產量與成分，使薄膜積垢狀態有所不同，以下分述 SRT 與其間之關係：

1. SRT 與反應槽污泥性質

影響薄膜積垢之污泥性質包含 MLSS 濃度及污泥黏度等，且皆受 SRT 之影響。當 SRT 上升時，反應槽中 MLSS 濃度將隨排泥量之減少而上升，此為 MBR 技術減少污泥產量之優點之一，然據研究指出：當 MLSS 小於 6 g/L 時，對薄膜積垢之影響非常小；當 MLSS 介於 8-12 g/L 時，對薄膜積垢無影響；但當 MLSS 超過 15 g/L 後，其造成積垢之影響大增 (Rosenberger *et al.*, 2005)；又 MLSS 之濃度與反應槽中污泥之黏度亦有關係，當黏度上升，將導致積垢增加 (Khongnakorn *et al.*, 2007)，亦將使反應槽中氧傳效率降低，致使薄膜積垢速率上升 (Meng *et al.*, 2009)，故應避免操作於過長之 SRT 或過高之 MLSS。

一般 MBR 系統多操作在較長之 SRT 下，以減少污泥產量、降低污泥處理成本，並使反應槽可承受之有機負荷範圍加大；此外，較長之 SRT 可使反應槽中污泥濃度增加，提高處理效率。然於長 SRT 下，

因排泥量少，使活性較低之微生物長期滯留於反應槽中，將導致污泥整體活性及 F/M 下降 (Ke and Junxin, 2009)，影響微生物之代謝。

由眾多文獻顯示：MBR 反應槽應操作在適當之 SRT，除使污泥產量降至最低外，亦須確保微生物在反應槽中穩定成長、避免積垢之生成 (Le-Clech *et al.*, 2006)，而不同反應槽所示和之 SRT 則應視各反應槽之不同操作條件及環境而有所不同。

2. SRT 與胞外聚合物

胞外聚合物中以溶解性物質對薄膜之積垢影響較大，為微生物生長、代謝所產生，故其產量與微生物之活性有關。

Ng *et al.*(2006) 之研究報告指出：當 SRT 短 (3 d) 時，反應槽中微生物多處於對數生長期，污泥活性高、產量大，產生之溶解性 EPS 多，導致薄膜積垢嚴重；而在 SRT 長 (20 d) 時，微生物多處於內呼吸期，污泥活性低、產量小，產生之溶解性 EPS 較少，故對薄膜積垢之影響較小，在 Ke and Junxin (2009) 之研究中亦有類似之結果。然 Lee *et al.*(2003) 比較不同 SRT (20、40、60 天) 下之胞外物質含量後指出，不同 SRT 對 EPS 之總量無明顯之影響，但隨 SRT 增長，EPS 中之蛋白質所佔之比例將逐漸上升。

Ng *et al.*(2005) 中，將 MBR 反應槽之 SRT 分別控制在 0.25、0.5、2.5 及 5 天，比較不同之短 SRT 對胞外物質分泌之影響，顯示：胞外物質之產量隨 SRT 之減短而減少，與 SRT 較長之研究結果相異。

將上述知結果略為歸納整理後如表 2-9 所示，可看出 SRT 與薄膜積垢之現象略可以 SRT 20 天為一分界，當 SRT 小於 20 天時，隨 SRT 增長，積垢現象將逐漸降低；而 SRT 超過 20 天後，積垢現象則隨 SRT 延長而更趨嚴重。另一方面，SRT 與反應槽中胞外物質產量之關係，則略可以 SRT 5 天為一界線，當 SRT 極短 (<5 d) 時，胞外物質之產量將隨 SRT 延長而增加；而當 SRT 較長時，胞外物質產量則隨著 SRT 增加而下降，或先上升、後下降。

表 2-9 不同文獻中 SRT 與薄膜積垢及 EPS 產量之關係

SRT (d)	MLSS (g/L)	TMP or FR 與 SRT 之關係	EPS 產量與 SRT 之關係	Reference
20	2.8 ^a	SRT↑⇒fouling resistance↑	SRT 20 至 40 d⇒EPS↑; SRT 40 至 60⇒EPS↓(些微)	Lee <i>et al.</i> (2003)
40	4.4 ^a			
60	5.5 ^a			
30	7	SRT↑⇒fouling rate ↑	--	Han <i>et al.</i> (2005)
50	10			
70	14			
100	18			
0.25	346 ± 26 ^c	--	SRT↑⇒EPS↑	Ng and Hermanowicz (2005) ^b
0.5	591 ± 46 ^c			
	329 ± 28 ^d			
2.5	2418 ± 76 ^c			
5	2299 ± 160 ^d	SRT↑⇒fouling rate↓	SRT↑⇒EPS↓	Ng <i>et al.</i> (2006)
3	4.48 ± 0.79			
5	7.4 ± 0.78			
10	13.04 ± 1.13			
20	21.9 ± 0.95	SRT↑⇒filtration resistance↓	SRT↑⇒EPS↓	Ke and Junxin (2009)
10	2 ± 0.6			
40	5.6 ± 1.5			
Infinity	7.4 ± 2			

^a 單位為 g VSS/L ; ^b MLSS 濃度以 mg/L 式 ; ^c HRT=3 h ; ^d HRT=6 h

2-4 胞外聚合物 (Extracellular Polymeric Substances, EPS)

胞外物質為生物反應系統中，微生物細胞外之物質，包含有微生物生長代謝所產生之酵素與聚合物、懸浮顆粒物質及進流基質中所含之其他物質。由微生物所產生，與薄膜積垢有關之物質可通稱之為胞外聚合物 (Extracellular Polymeric Substances, EPS)，因其具有利於微生物附著、形成生物膜之特性，故被視為造成薄膜積垢之重要原因之一。

2-4-1 胞外聚合物成分及種類

胞外聚合物 (Extracellular Polymeric Substances, EPS) 為微生物因生長、代謝、水解等作用而產生於細胞外部之物質；此外，環境中有機物質之水解及其過程中所產生之中間產物，亦為 EPS 之來源。EPS 常附著於微生物之表面，形成一保護膜，利於微生物吸附環境中可利用之物質，使之可在高細胞濃度之環境下生存；此外，亦有助於微生物之聚集及膠羽之形成、附於固體表面形成生物膜等功能 (Laspidou and Rittmann, 2002)。薄膜之積垢為生物反應槽中各類物質於膜面上沉積所造成，因 EPS 利於微生物附著、形成生物膜之特性，故為造成薄膜積垢之重要因子。

Laspidou and Rittmann (2002) 整理了許多文獻對 EPS 之解釋，主要可將 EPS 分為兩類：附著性 (Bound) 及溶解性 (Soluble)。其中，附著性 EPS 泛指生物表面所附著之莢膜、膜鞘、有機物質及聚合物…等；而溶解性 EPS 則為溶解性之大分子物質、膠體物質 (未附著於細胞表面) 及生物代謝所產生之黏稠膠狀物質…等。而溶解性之 EPS 在 Namkung and Rittmann (1986) 一文中又另將之定義為溶解性生物產物 (SMP)。

溶解性生物產物 (Soluble Microbial Products, SMP) 為微生物於去除廢水中有機物之過程中所產生之溶解性有機物質之總稱，亦包含微生物水解所產生之物質，其成分包含：胞外酵素、多醣類、蛋白質、核酸…等，其生物分解性差 (張維欽等，2008)；且在 Noguera *et al.* (1994) 中亦定義 SMP 之來源純為微生物代謝與水解，而不包含複雜物質降解之中間產物。在 Nielsen *et al.* (1997) 則提到，溶解性 EPS 泛指有機物之水解產物及中間產物、微生物生長及代謝所產生之溶解性物質；意即 Soluble EPS 之定義較 SMP 為廣義，包含 SMP 與微生物利用環境基質所產生之溶解性物質。

換而言之，當一生物系統之進流基質中，未含有溶解性之有機物，且生物水解產物與其降解過程中之中間產物完全不同時，則該系統中之 SMP 與 Soluble EPS 為相同，反之則否 (Laspidou *et al.*, 2002)。

EPS 之主要成分為多種多醣類，為主要之分析項目，此外，亦含有蛋白質、核酸及多種聚合物，近來發現 EPS 中蛋白質含量亦頗高，故碳水化合物與蛋白質之分析遂成為近年來 EPS 研究之重點 (Nielsen *et al.*, 1997)。

由於本研究之進流基質為經初級處理過之實廠原水，且影響薄膜生物反應槽中薄膜積垢之因子包含進流基質及微生物之產物，故本研究將以 Bound EPS 及定義較廣之 Soluble EPS 作為反應槽中胞外物質之分類，並分別進行主要物質：碳水化合物及蛋白質之定量，觀察其對積垢之影響。

2-4-2 萃取及分析方法

Soluble EPS 及 Bound EPS 之萃取法有許多種，無一特定之標準方法，文獻常提之萃取法包括陽離子交換法、加熱法、離心法、甲醛-NaOH 法及 EDTA 等，其中以加熱法最易操作，但因高溫常使蛋白質變質，影響後續之分析，故較少使用；以甲醛-NaOH 萃取效率最高，最廣為使用。在 Liu and Fang (2002) 中利用五種不同之萃取法，萃取三種不同之污泥，並比較各萃取法之效率，結果如表 2-10 所示，以甲醛-NaOH 法之萃取效率最好，故本研究選用甲醛-NaOH 法進行兩種 EPS 之萃取。

表 2-10 各萃取法之結果比較

Extraction	Aerobic (mg/g-VS)	Acidogenic (mg/g-VS)	Methanogenic (mg/g-VS)
Formaldehyde-NaOH	164.9 ± 3.9	179.0 ± 3.2	102.1 ± 1.5
EDTA	146.8 ± 1.1	104.9 ± 0.7	73.2 ± 0.5
Formaldehyde-Ultrasound	77.9 ± 1.1	100.0 ± 0.3	36.8 ± 0.8
Cation exchange resin	57.8 ± 1.0	58.4 ± 1.1	30.1 ± 0.9
Formaldehyde	49.7 ± 1.2	56.9 ± 1.2	32.5 ± 0.4
Control	25.7 ± 0.3	36.9 ± 0.6	15.8 ± 0.2

蛋白質定量方法有許多種，如 Biuret、Lowry、Bradford…等，各有優缺點，如表 2-11 之比較，其中 Lowry 法為 Biuret 法之衍伸，故靈敏度較高。由於園區廢水中含有陰離子界面活性劑，故不適用 Bradford 法分析。本研究將採用 Lowry 法做為蛋白質定量之分析方法。而在 EPS 中之多醣類定量分析，以碳水化合物為主，將採用酚-硫法做為定量分析之方法。

表 2-11 蛋白質定量法比較表

Method	Sensitivity	Operation time	Interference
Biuret	1 ~ 20 mg	20 ~ 30 min	Tris, Ammonia, Glycerol...
Lowry	~ 5 μ g	40 ~ 60 min	Tris, EDTA, cationic detergent
Bradford	~ 1 μ g	~ 15 min	Detergent, Acids/Bases buffers



第三章 材料與方法

3-1 薄膜生物反應槽之設置

本研究採用實驗室小規模之薄膜生物反應系統，如圖 3-1 所示，利用本實驗室在園區設立之 MBR 模廠污泥作為植種源，以經預處理系統（攔污、沉砂）之出流水做為進流，其進流水質如表 3-1 所示。

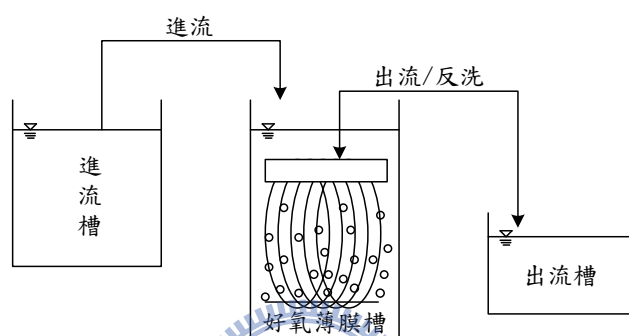


圖 3-1 MBR 反應槽

表 3-1 進流水質範圍

項目	範圍值 (mg/L)
SS	24.5 - 133
BOD ₅	25 - 69
COD	30 - 100
pH	6.82 - 7.42
NH ₄ ⁺	30 - 70
PO ₄ ³⁻ -P	3 - 25

3-1-1 薄膜通量

將實驗所使用之薄膜依據膜片供應商之使用說明，先行浸泡後，始進行臨界通量及清水通量之測試。然因受限於反應槽設備及機械操作，無法做臨界通量之測試，故參考膜片供應商所提供之最佳操作出水量，選擇 10-15 LMH 為操作通量。

3-1-2 薄膜單元操作與維護

本研究使用新加坡美能材料科技有限公司 (Memstar Technology Ltd.) 所提供之疏水性 PVDF 中空纖維膜，其相關特性如表 3-2 所列。

表 3-2 薄膜材質與特性

材質	PVDF
有效面積 (m^2)	1
建議通量 (LMH)	15 - 20
孔徑 (μm)	< 0.1
膜絲內/外徑 (mm)	0.6/1.2
建議操作壓力 (kPa)	10 - 50
建議操作 pH	1 - 10

薄膜單元於操作時為負壓抽水，故膜面常為微生物或污泥所覆，造成透膜壓力 (TMP) 之上升及出水通量 (Flux) 之下降，故須定期清洗，以維持出流水質，並延長薄膜之使用壽命。

本研究所使用之清洗方式分為三種：

- (1) 利用曝氣之氣泡經薄膜表面時所產生之剪力去除膜面之附著物；
- (2) 以自來水做逆向之反洗，去除薄膜孔洞內累積之物質；
- (3) 利用次氯酸鈉做化學浸泡；

(1)、(2) 皆為物理之清洗作用，前項為利用曝氣管所釋出之氣泡，提供反應槽內微生物代謝所需，並提升反應槽中之紊流程度，間接提高膜面之剪力，達去除膜面積垢物質之目的；(2) 則利用 PLC 做自動控制，薄膜單元每出水 10 分鐘，即靜置反洗 1 分鐘。以上清洗方式皆利用自動控制系統每日定時間歇操作。

本研究依據膜片供應商所提供之建議操作壓力值，選擇 30 kPa 為薄膜藥洗之時機，將薄膜取出以次氯酸鈉浸泡 30 分鐘，以去除物理清洗無法去除之積垢物質；此外，於每階段改變操作條件時，皆進行藥洗，並記錄薄膜阻力之變化，避免因操作時間增加而造成結果之誤判。

3-1-3 污泥馴養

本實驗以經 MBR pilot 馴養過之污泥為植種源，並以與後續實驗相同之污泥停留時間及水力停留時間馴養，每階段皆操作三倍之 SRT，確保反應槽中污泥達穩定後，方以達穩定時之檢測結果做後續討論，避免馴養階段之不穩定影響統計結果。

因薄膜單元可有效截留反應槽中之污泥，故 SRT 僅需由不同之排泥量（反應槽體積/SRT）控制；又由於植種污泥中含硝化菌，且科技業廢水中所含氮量較高，故於馴養及實驗進行時，反應槽中 pH 常因硝化作用而下降，故利用自動監控系統，不定時添加碳酸氫鈉以調整其酸鹼值，以利污泥之生長。

3-1-4 實驗操作參數

本研究僅使用單一之好氧薄膜反應槽進行，其體積約 145 L，實驗進行時水力停留時間（HRT）控制在 3-5 小時，曝氣量約 210 L/h，以維持反應槽中微生物所需之溶氧（>2 mg/L），通量則控制低於建議值，並以不同之排泥量（反應槽體積/SRT）控制三種不同之 SRT（12、20 及 30 天），研究相關之操作參數如表 3-3 所示。

表 3-3 實驗條件與參數

實驗條件與參數			
反應槽體積 (L)	146.6		
HRT (h)	3 - 5		
SRT (d)	12	20	30
曝氣量 (L/h)	210		
薄膜通量 (LMH)	10 - 15		

3-2 採樣與分析

本研究除定期分析進出流水質，以了解生物反應槽之處理效果外，亦分析 SMP 與 EPS 等所含之蛋白質與碳水化合物，以了解不同污泥停留時間對微生物之影響；此外，亦每日監測 TMP，以探討各因子間之相關性。本研究水質分析所使用之方法皆為環檢所公告之標準方法，蛋白質與碳水化合物分析方法則分別於後續詳述，詳細分析頻率如表 3-4 所示。

表 3-4 採樣分析項目與頻率

分析項目	進流	出流	反應槽中	分析項目	進流	出流	反應槽中
Turbidity	-	3	-	Alk	3	3	-
MLSS	-	-	3	NH ₃ -N	3	3	-
MLVSS	-	-	3	NO ₃ ⁻ -N	3	3	-
BOD ₅	3	3	-	NO ₂ ⁻ -N	3	3	-
COD	3	3	-	PO ₄ ³⁻ -P	3	3	-
Protein	-	-	3	Carbohydrate	-	-	3

*採樣與分析頻率單位皆為：times/week

3-2-1 EPS 之萃取

本研究主要調查好氧槽中微生物所分泌之 EPS (包含 Bound 及 Soluble)，並分析其蛋白質與碳水化合物之含量，以瞭解其與薄膜機構間之關係。

首先取適量污泥以 9,000 g 離心 20 分鐘，其上澄液經 0.22 μm 濾紙過濾去除微生物細胞後，即為 Soluble EPS；離心後之底部污泥則利用去離子水淘洗數次後，以 9,000g 離心 20 分鐘，除卻上澄液、並加入 2% 之甲醛 15 mL，並於 4°C 下靜置 1 h，再加入 1.2 M 之 NaOH 5 mL，再放置於 4°C 下靜置 3 h，最後再以 20,000g 離心 20 分鐘、0.22 μm 濾紙過濾，所得之濾液即為 Bound EPS，詳細之萃取方式如圖 3-2 所示 (Ji. and Zhou., 2006)。

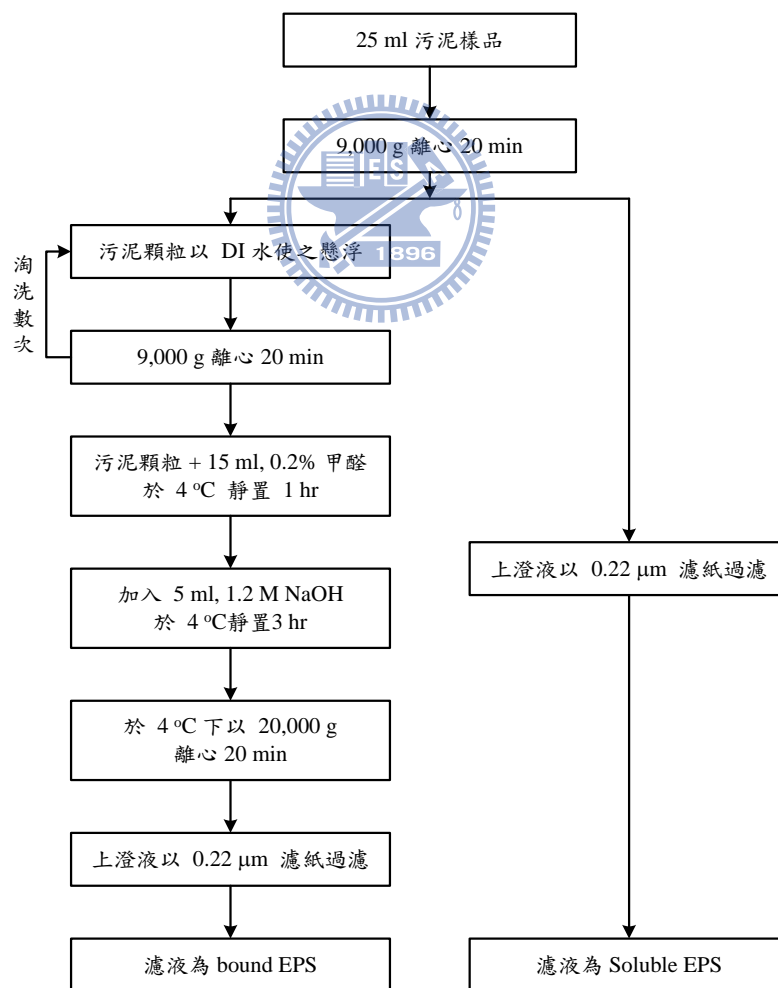


圖 3-2 EPS 萃取步驟

3-2-2 蛋白質分析方法

本研究以 Lowry's Method 分析 EPS 中所含之蛋白質含量，此方法於檢測時易受硫酸銨、鉀、鎂離子…等之干擾，然根據園區下水道納管標準，園區污水中未含該檢測方法之干擾項目，故以該方法檢測之。

僅需取 0.2 mL 之樣品，加入分析試劑後，依圖 3-3 之流程操作，最後於 660 nm 測其相光值，帶入檢量線後即可得知樣品之濃度；然檢量線標準品於配製時，須注意最大濃度不可超過 1 mg/mL。

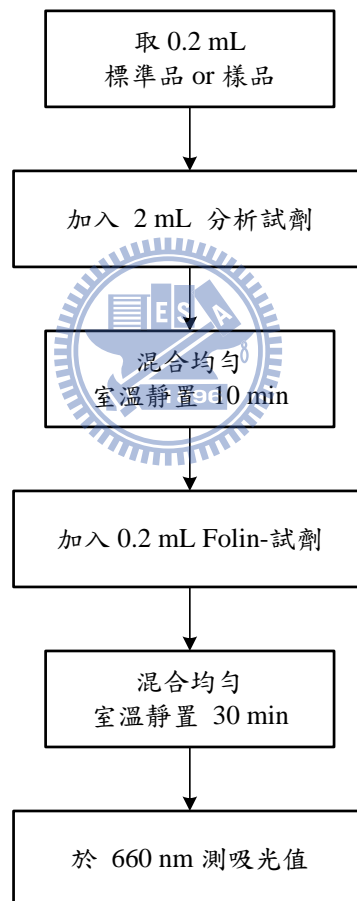


圖 3-3 蛋白質定量流程

3-2-3 碳水化合物分析方法

本研究中採用檢測碳水化合物之方法為酚-硫法 (Phenol-Sulfuric Method)，為利用糖類在高溫酸性環境下產生與苯酚形成橘黃色之醛類，以檢測樣品中碳水化合物之含量。

樣品分析僅需 1 mL，加入 1 mL、5% 之酚溶液，於 5-20 秒間快速加入 5 mL 之濃硫酸，靜置 10-20 分鐘，冷卻至室溫，於 488 nm 下測其吸光度；此方法以葡萄糖為標準溶液，配置 0-0.2 g/L 濃度之溶液，以與樣品相同之方法製作檢量線，以計算樣品之濃度。分析流程如圖 3-4 所示。

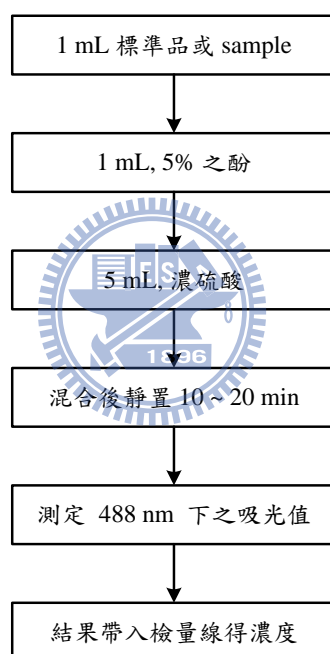


圖 3-4 碳水化合物測定流程

3-3 實驗設備

1. 分光光度計：HITACHI U-3010 。
2. COD 加熱器：DENG YNG 。
3. 電子天平：Sartorius BP-221S 。
4. 高溫烘箱：CHANNEL DV602、Nabertherm 。
5. 冷凍離心機：Himac CR 22G 。
6. 濁度計：LaMotte 2020e 。
7. DO meter：InoLab Oxi730 。
8. pH meter：SUNTEX SP-2200 。



第四章 結果與討論

微生物之胞外物質為影響薄膜積垢之因素，且與反應槽中之污泥濃度、停留時間等有關，故本研究將反應槽操作於不同 SRT 下，以了解其間之關係。本章節將針對反應槽中 MLSS、MLVSS、TMP、EPS 及積垢速率等進行討論，並利用 SPSS 統計軟體做相關性分析，與文獻比較，進以了解科技產業性質特殊之廢水對 MBR 之影響。

4-1 水質處理效果

本研究之 MBR 反應槽有效體積為 145 L，HRT 平均約為 4 h，控制 SRT 在 12、20 及 30 天，分別操作 36、60 及 90 天，比較其進出流水質，以了解不同 SRT 對出流水質之影響。

為避免硝化作用改變反應槽中 pH，影響微生物之生長與代謝，遂利用自動控制設備，以 NaHCO_3 適時調整 pH，圖 4-1 為研究期間反應槽中 pH 之變化情況，可知於實驗期間，反應槽內皆維持在適合多數微生物生長之中性環境。

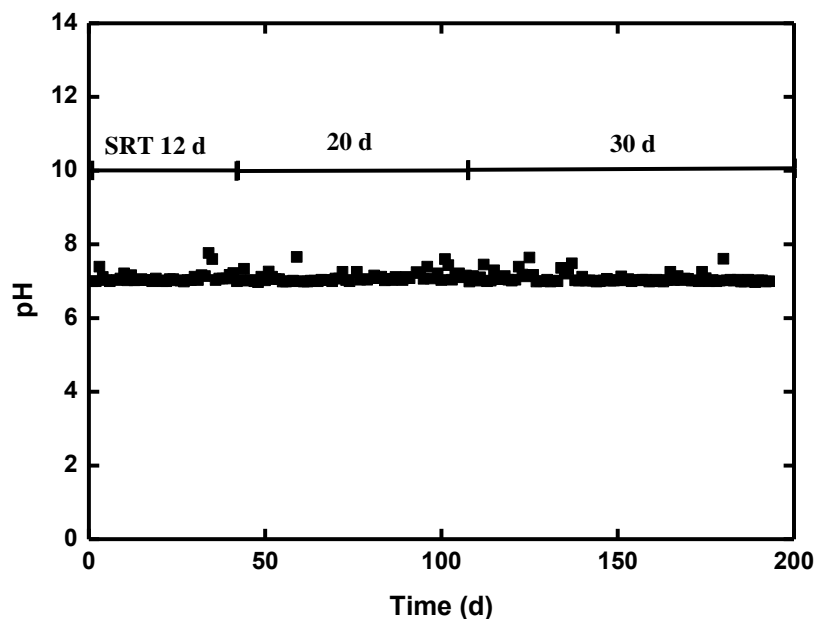


圖 4-1 操作期間反應槽之 pH 變化

圖 4-2 為本研究期間進出流水中 SS 之濃度變化，由於本研究採用之進流為實廠廢水，故 SS 變化頗大，然經 MBR 處理後，其出流濃度皆小於 1 mg/L，低於放流水標準，即便在不同 SRT 操作下，其出流水中之 SS 皆可達放流水標準，足證明薄膜能有效攔截反應槽中之固體物。

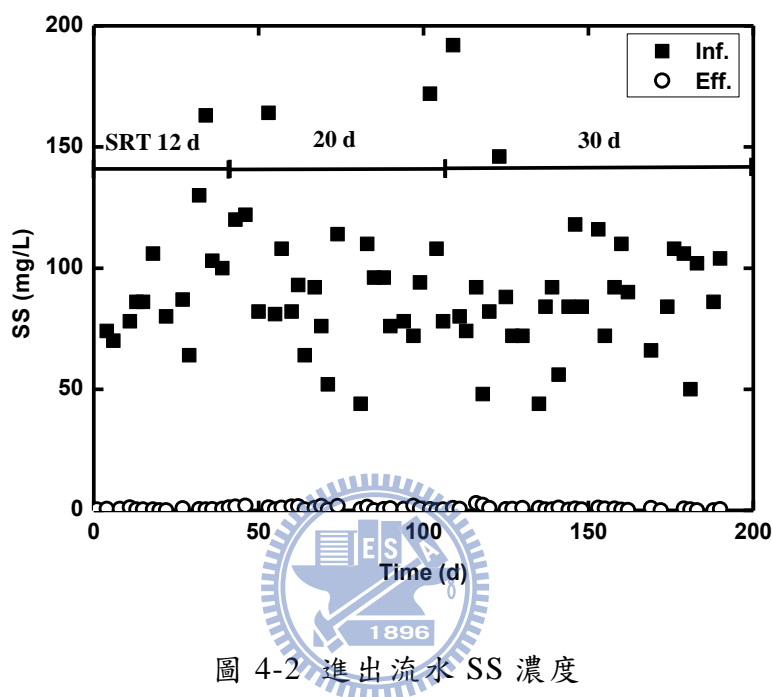


圖 4-2 進出流水 SS 濃度

圖 4-3 為不同 SRT 操作下，反應槽中 MLSS 及 MLVSS 之變化情形。然因由圖 4-2 可看出進流水中之 SS 濃度頗高，故隨 SRT 增加、排泥量減少，SS 於反應槽中累積，使 MLSS 濃度上升；而 MLVSS 濃度亦因 SRT 延長、排泥量減少，而有所增加，並於不同之 SRT 下達穩定狀態。由圖中亦可看出，在不同 SRT 之操作下，雖 MLSS 及 MLVSS 之濃度皆隨 SRT 延長而增加，但反應槽中 MLVSS 與 MLSS 之比值僅維持在 0.3 左右。

本研究於實驗期間，檢測 MBR 系統對科技廢水中 BOD₅、COD 及 NH₄⁺ 之處理效果，圖 4-4 中分別顯示各項目於進出流水中之變化，雖實廠之進流水質變化較大，然經 MBR 系統於不同 SRT 操作處理後，其出流水質皆可符合目前之放流水標準，可知改變反應槽之 SRT 對基本水質項目之處理無顯著影響。唯因本研究僅採單一好氧槽進行，故無脫氮及除磷之效果，若需因應未來可能之總氮、總磷管制，則須改變本 MBR 單元之操作程序

或增加其他單元，以達未來管制之標準。

由圖 4-4 可知 MBR 系統對高科技業低 C/N 廢水有良好之處理效果，且不受 SRT 改變之影響。如進一步將進、出流水質予以表格化後，如表 4-1 所示，顯示在不同 SRT 操作下，經薄膜處理後之出流水中之濁度皆小於 1 NTU，可知薄膜於試驗期間皆為正常操作；此外，在一般水質項目如 BOD₅、COD 及 NH₄⁺之處理效率皆可達 85% 以上，其中又以 SRT 控制在 20 天時之處理效率最高，分別可達 91、98、98%。

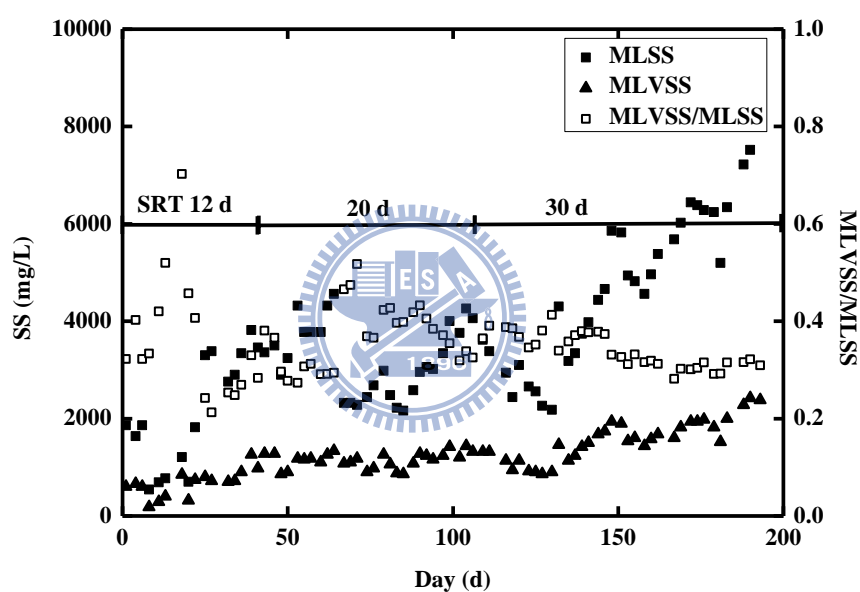


圖 4-3 反應槽中 MLSS 及 MLVSS 之變化

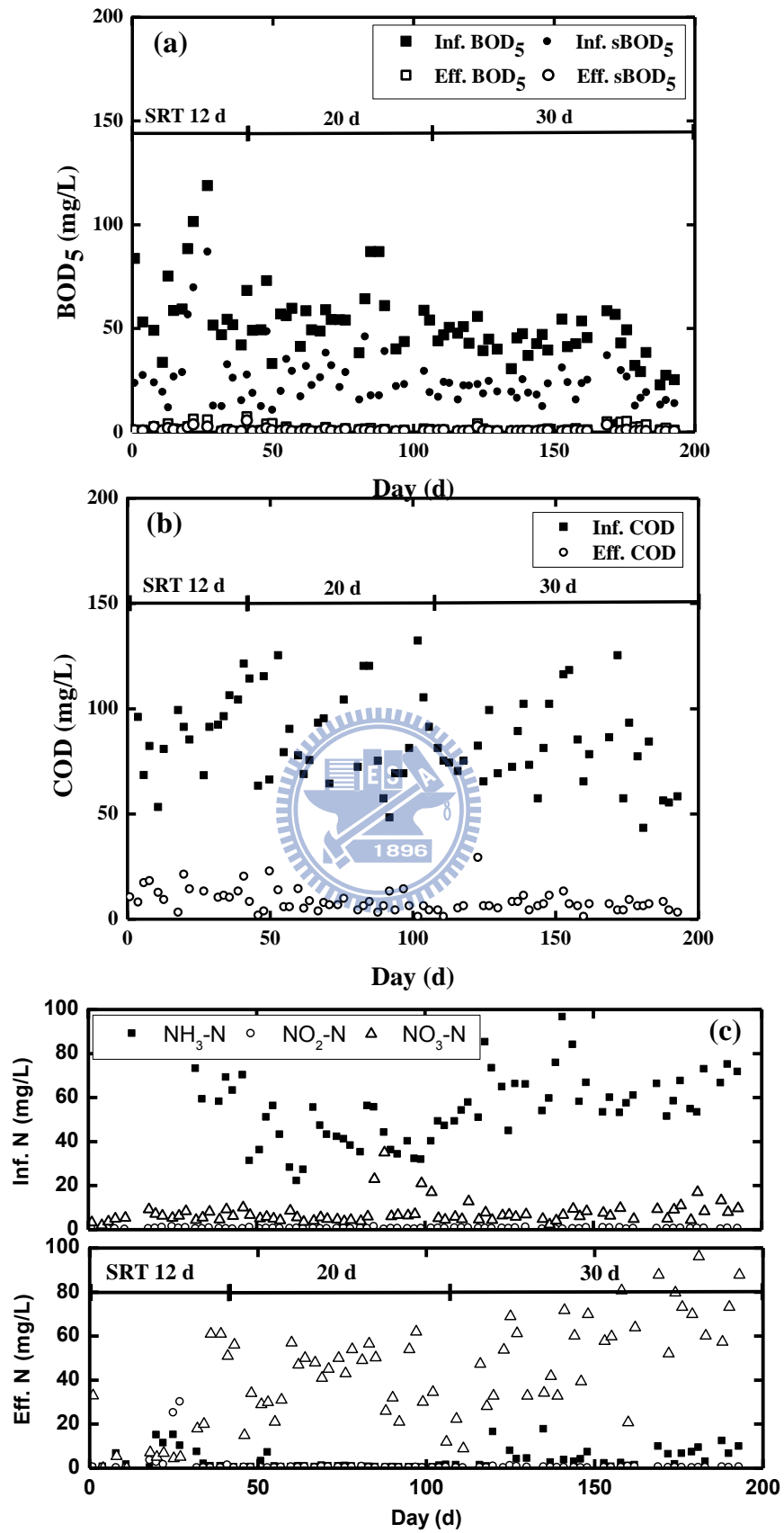
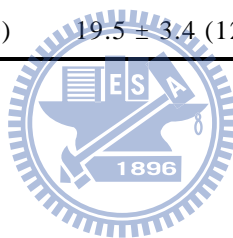


圖 4-4 不同 SRT 下進出流水值變化：(a) BOD₅；(b) COD；(c) NH₄⁺

表 4-1 進、出流水質檢驗結果

項目	濃度 (mg/L)*			
	進流	出流		
		12 d	20 d	30 d
pH	7.1 ± 0.85 (66)	7.1 ± 0.2 (12)	7.2 ± 0.2 (26)	7.1 ± 0.2 (31)
SS	102 ± 61 (68)	0.49 ± 0.3 (14)	1.2 ± 0.6 (26)	0.8 ± 1.2 (31)
VSS	41 ± 17 (68)	0.27 ± 0.26 (14)	0.7 ± 0.4 (26)	0.5 ± 0.3 (31)
Turbidity (NTU)	46.2 ± 24.4 (70)	0.2 ± 0.1 (14)	0.2 ± 0.3 (26)	0.14 ± 0.2 (31)
Alk	145 ± 31 (65)	104 ± 30 (10)	114 ± 23 (26)	116 ± 23 (31)
COD	84 ± 21 (69)	11 ± 5 (14)	7 ± 5 (26)	6 ± 3 (30)
BOD ₅	51 ± 17 (68)	1.8 ± 1.8 (14)	0.9 ± 1 (26)	1.2 ± 1.4 (30)
NH ₄ ⁺	49 ± 21 (72)	5.8 ± 5.8 (12)	0.8 ± 1.3 (26)	6.7 ± 6.4 (30)
PO ₄ ³⁻	20 ± 5 (70)	19.5 ± 3.4 (12)	15 ± 6 (26)	20 ± 5 (30)

*avg. ± std. (n)



4-2 薄膜積垢速率分析

本研究先以常用之 Darcy's law (式(1)) 計算薄膜之過濾阻力，再以式(2) 計算薄膜之積垢速率 (Fouling rate, FR)：

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R} \quad (1)$$

$$FR = \frac{R_2 - R_1}{\Delta t} \quad (2)$$

其中 J 為通量 ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$)， ΔP 為 TMP 變化量 (Pa)， μ 為黏度 (Pa s)， R 為薄膜抽水之阻力 (m^{-1})， Δt 為抽水時間 (d)，FR 為積垢速率 ($1/\text{m}/\text{d}$)。

圖 4-5 為本研究中不同 SRT 下 MLSS、FR 及 P/C 之變化，可明顯看出 MLSS、FR 及 P/C 皆隨 SRT 上升而增加。其中 MLSS 濃度係由於薄膜良好之固體截留能力，隨 SRT 上升、排泥量減少，反應槽中固體物累積而使 MLSS 濃度增加。

於本研究之結果中，可觀察出 FR 隨 MLSS 濃度增加而上升，故可推測 MLSS 濃度之累積對薄膜積垢速率有不良之影響；然於 Le-Clech *et al.*(2006) 中卻指出 MLSS 非影響薄膜積垢之主要因子，且 Rosenberger *et al.*(2005) 更指出：僅在 MLSS 濃度高於 15 g/L 時對薄膜之積垢方有顯著之影響。有此截然不同之結果，推測與進流水不同之性質有關，表 4-2 整理不同文獻中，進流水 C/N、MLSS 及 FR 之比較，可發現：當 C/N 小於 5 時，即便 MLSS 濃度未高於 15 g/L，其 FR 皆明顯較 C/N 大 (>5) 之文獻高，故推測進流水中 C/N 比越小，對薄膜積垢之不良影響便越大。

由文獻可知，當採用低 C/N 比之進流水時，MBR 系統中多半有硝化作用進行，故推測可能因不同之菌相 (硝化菌)，導致微生物特性不同，或其所分泌之胞外物質有不同之特性，進而導致較高之積垢速率產生。

高科技產業之廢水除有低 C/N 之特性外，尚包含大量研磨廢水，使廢水中含大量之奈米懸浮粒子，造成頗高之 TDS 濃度，由於本研究無檢測進出流水中 TDS 之濃度，故無法得知 TDS 對薄膜積垢之影響，但根據污水廠之檢測，可知於本研究進行期間，所使用之進流水中 TDS 含量約 $1873.3 \pm 512.9 \text{ mg/L}$ ，為 SS 的 18 倍多，故推測 TDS 亦可能為影響薄膜積垢速率上升之因素。

據文獻指出，MBR 反應槽中之污泥粒徑大小會隨 SRT 增長而下降，亦為影響積垢速率之因子。故推測因 SRT 之增長，反應槽中污泥粒徑下降，造成膜孔內部之阻塞趨於嚴重，難以藉反洗或循環水流清除，使積垢速率上升；然因未測量污泥之粒徑，故無法切卻得知其關聯性，如未來仍繼續進行相關之研究，建議可檢測污泥之粒徑，加以釐清其間之關係。

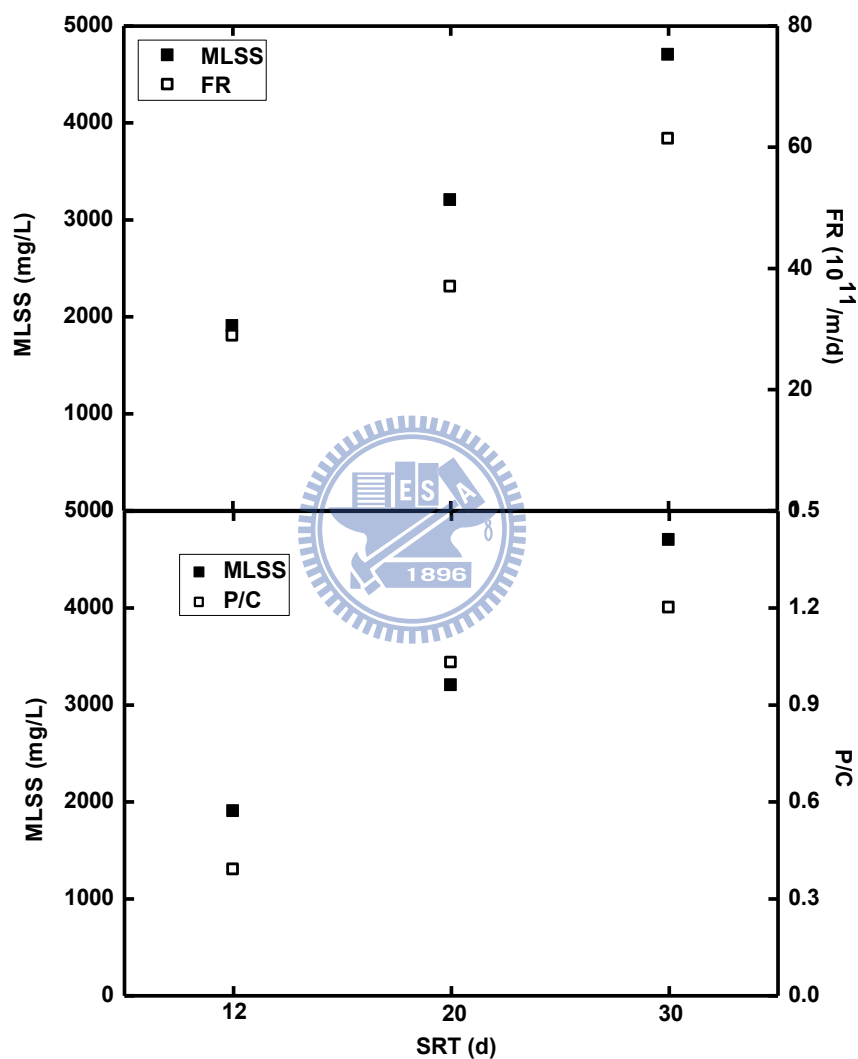


圖 4-5 不同 SRT 下 MLSS、FR 及 P/C 變化

表 4-2 文獻中不同進流 C/N、MLSS 及 FR 之比較

Influent Category	C/N	MLSS (mg/L)	FR (10^{11} /m/d)	Reference
Domestic sewer	4.7	2000-7400	100-250	Ke and Junxin (2009)
Synthetic wastewater	6.1-7.1	16000	0.724	Liu <i>et al.</i> (2005)
Municipal wastewater	7.7	8000	2.3	Grelier <i>et al.</i> (2006)
Industrial wastewater	1.24	1900-4700	28.8-61.35	This study



4-3 胞外聚合物產量

表 4-3 為不同 SRT 下反應槽中胞外聚合物之濃度，為與文獻做比較，且避免受 SS 影響，故將 EPS 濃度以 MLVSS 單位化後，方進行比較。

表 4-3 反應槽中 EPS 濃度

SRT (d)	MLVSS (mg/L)	Soluble ^a		Bound ^a		P/C	FR ^b
		Carbohydrates	Proteins	Carbohydrates	Proteins		
12	840	12.24 ± 7.55	13.78 ± 12.19	124.55 ± 22.6	53.55 ± 15.99	0.39	28.80
20	1150	13.59 ± 3.27	22.76 ± 7.56	164.10 ± 41.82	160.07 ± 49.40	1.03	36.91
30	1560	14.10 ± 3.16	16.92 ± 6.12	133.07 ± 32.73	160.40 ± 12.03	1.20	61.35

^a mg/g MLVSS ; ^b 10¹¹/m/d



當 SRT 由 12 天增長至 20 天時，反應槽中各項胞外物質濃度皆上升，然當 SRT 再延長至 30 天時，EPS 之產量則下降，圖 4-6 係將 EPS 分為碳水化合物及蛋白質兩類（包含溶解性及附著性兩類 EPS）所繪製。Ng and Hermanowicz (2005) 提到：在極短之 SRT 下，微生物之生長速度大於 EPS 產生之速度，故顯每單位之微生物所產之 EPS 之濃度低，然於長 SRT 時，微生物進入內呼吸期，生長速度慢，進而使每單位微生物所產之 EPS 濃度高。此與本研究中 SRT 由 12 天增加至 20 天之現象相符。由於本研究僅檢測反應槽中混合液之 EPS 濃度，當 SRT 由 20 天增加至 30 天時，推測因 EPS 附於膜絲上，造成積垢速率增加，使反應槽中可測得之 EPS 濃度下降。

此外，在 Lee *et al.* (2003) 之結果中顯示：將 SRT 由 20 天延長至 40 天時，EPS 產量增加，然 SRT 由 40 天增為 60 天後，其 EPS 產量則有些微降低，並解釋碳水化合物為微生物在生長代謝過程中，為特殊目的而製造產生，蛋白質則主要留在微生物體內，除細胞主動釋出或細胞死亡、水解，方出現於反應槽中，當 SRT 長時，因 F/M 下降，微生物可利用之碳

源減少，除導致生物膠羽中所含之碳水化合物降低，亦使微生物處於內呼吸期，水解死亡之細胞增加，反應槽中蛋白質增加，與本研究之結果類似。

另一方面，Ng *et al.* (2006) 對長 SRT 操作下反應槽中 EPS 濃度減少有不同之解釋：微生物進入內呼吸期，細胞水解量增加，釋出大量之胞外物質，此些被釋放於反應槽中之 EPS 對微生物而言為另一種可利用之物質，可能因微生物之再利用而減少。

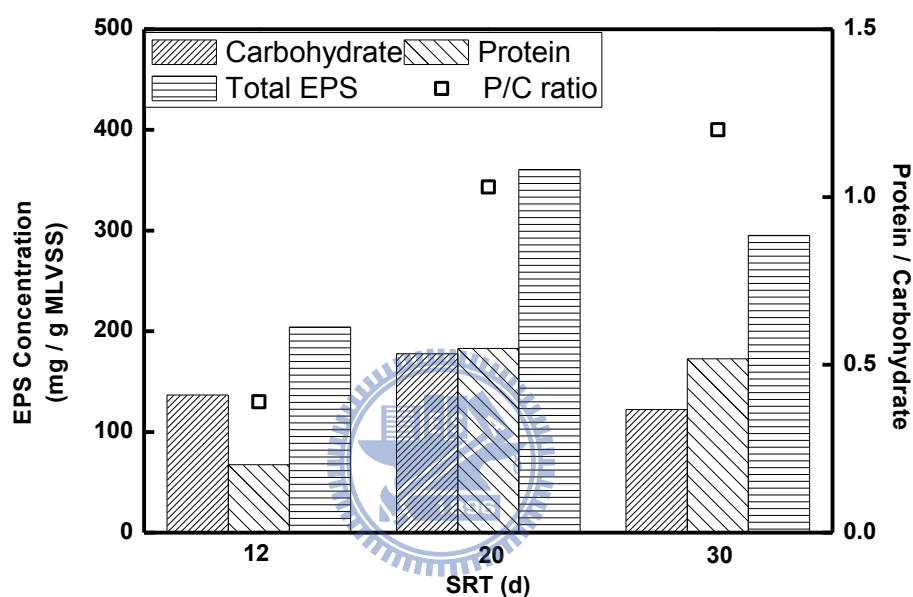


圖 4-6 不同 SRT 下反應槽中 EPS 濃度變化

然薄膜之積垢係應與反應槽中所含之總 EPS 有關，故若不考慮每單位微生物所產之 EPS 量，而改以反應槽中所含之 EPS 總量做比較，詳細數據則如表 4-4 所示，又將其分做碳水化合物及蛋白質兩類後，繪成圖 4-7，其可從中發現 EPS 之總量係隨 SRT 之延長而增加，其中又以蛋白質增加之幅度最大，故推測蛋白質可能影響薄膜之積垢；此外，觀察反應槽中 EPS 之總量與積垢速率後，可推測薄膜之積垢受反應槽中 EPS 之總量影響頗深，即隨 SRT 延長，反應槽中微生物所釋出之 EPS 總量增加，所造成之積垢情況亦越嚴重（積垢速率上升）。

表 4-4 不同 SRT 下反應槽中 EPS 總量與積垢速率之變化

SRT (d)	MLVSS (mg/L)	Soluble ^a		Bound ^a		P/C	FR ^b
		Carbohydrates	Proteins	Carbohydrates	Proteins		
12	840	0.997 ± 0.47	0.79 ± 0.17	15.59 ± 3.26	5.92 ± 1.44	0.40	28.80
20	1150	1.93 ± 0.89	3.15 ± 1.64	25.60 ± 3.96	21.53 ± 1.76	0.90	36.91
30	1560	2.46 ± 0.81	3.19 ± 1.18	23.63 ± 5.94	33.62 ± 9.21	1.41	61.35

^a gram ; ^b 10¹¹/m/d

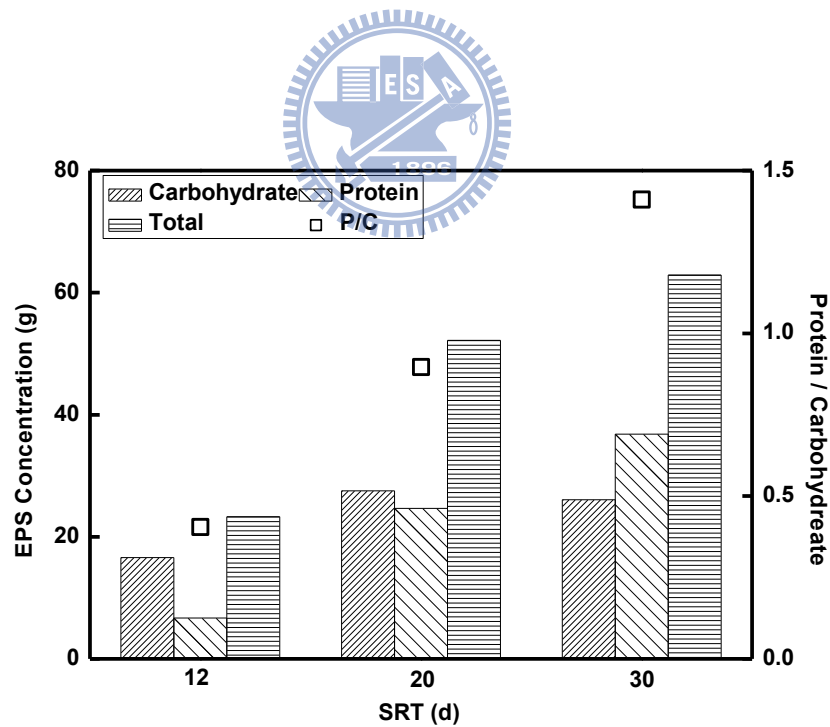


圖 4-7 反應槽中 EPS 總量隨 SRT 之變化

由上述圖表可知各階段蛋白質與碳水化合物之比值 (P/C)，明顯看出：隨 SRT 之增加，EPS 中蛋白質所佔比例顯著上升，由 12 天之 0.39 上升至 20 天之 1.03、30 天之 1.20 (以 mg/g MLVSS 為單位計算時)，與 Ke and Junxin (2009) 於 SRT 10 天之 0.59 至 40 天之 0.75 最後到無廢棄污泥之 0.73，及 Ng *et al.* (2006) 操作 SRT 在 3、5、10、20 天之 P/C 分別為 1.16、1.27、1.30、1.57 之趨勢相同。可推論：EPS 中所含蛋白質比例將隨 SRT 增長而上升。

另一方面，Li *et al.* (2008) 提到微生物之表面帶負電，而 EPS 中之蛋白質表面帶正電、碳水化合物帶負電，故當 EPS 中蛋白質濃度增加時，可中和微生物表面之電荷，利於反應槽中微生物形成膠羽，並附著於固體表面。又 Liao *et al.* (2001) 指出：SRT 僅影響反應槽中 EPS 成分之變化，而與總量無關，且隨 SRT 上升，EPS 中蛋白質所佔比例增加，反應槽中污泥疏水性增加，且污泥表面所帶之電荷小。Yu *et al.* (2005) 指出當 P/C 上升，污泥將呈疏水性，使反應槽中污泥易於附著於疏水性之薄膜，導致積垢情形嚴重。由以上之論述，有理解釋本研究之結果，且由表 4-3、4-4 所示，隨 SRT 上升，P/C 及 FR 皆上升，足顯示 P/C 與 FR 有密切之關係。

然蛋白質種類繁多，於本研究之反應槽中之蛋白質其表面是否皆帶正電；又反應槽中之污泥性質是否真隨蛋白質之含量上升而增加其疏水性；因本研究皆對其有所檢測，故反應槽中污泥性質之變化是否確如文獻所言，仍待進一步實驗確認。

4-4 相關性分析

由 4-3 節可看出胞外聚合物之產量對積垢速率有一定之影響，故進而計算其間之相關性。本研究係利用統計軟體 SPSS (Statistics Package for Social Science) 做各變數間之相關性分析，其所得相關係數 P (Pearson coefficient) 即表示兩變數間之相關性，以下為相關係數之基本性質：

$$P > 0 \Rightarrow \text{正相關}$$

$$-1 \leq P \leq 1$$

$$||P|| \rightarrow 1 \Rightarrow \text{相關性高}$$

$$P < 0 \Rightarrow \text{負相關}$$

$$P = \pm 1 \Rightarrow \text{完全正(負)相關}$$

$$0.7 \leq ||P|| \leq 1 \Rightarrow \text{高度相關}$$

$$0.3 \leq ||P|| \leq 0.7 \Rightarrow \text{中度相關}$$

$$||P|| = 0 \Rightarrow \text{零相關}$$

然不同之統計資料經系統分析後，所得之相關係數可能因背景資料之不同，數值大小與相關範圍值亦有所不同，仍需視各因子間之顯著性而定。

將不同 SRT 下之 MLSS、MLVSS、EPS (mg/g MLVSS) 及 FR 等因子做相關性分析後，結果如表 4-5、4-6、4-7 所示。當 SRT 操作在 12 天時，除 MLSS 與 MLVSS 有高度正相關外，MLVSS 與各胞外聚合物項目幾乎皆呈現程度不等之負相關，其中又以附著性之碳水化合物最為明顯；在積垢速率上，則與附著性之胞外聚合物有顯著之正相關性，其與碳水化合物、蛋白質及總附著性 EPS 之 P 分別為 0.786、0.707 及 0.900，如表 4-5 所示，此與 Wang *et al.*(2009) 之研究結果：附著性 EPS 與積垢速率有明顯之相關性 ($P=0.826$) 相符，可證實 EPS 為影響薄膜積垢之重要因子之一。

表 4-5 SRT 12 天之相關性分析結果

SRT 12 d		MLSS	MLVSS	FR	Soluble C	Soluble P	Soluble EPS	Bound C	Bound P	Bound EPS	EPS C	EPS P
MLSS	Pearson 相關	1	0.841**	-0.212	0.033	-0.653	-0.308	-0.658*	-0.749**	-0.626	-0.554	-0.521
	顯著性 (雙尾)		0.001	0.556	0.933	0.057	0.420	0.028	0.008	0.053	0.096	0.101
	個數	12	12	10	9	9	9	11	11	10	10	11
MLVSS	Pearson 相關	0.841**	1	-0.465	0.211	-0.682*	-0.433	-0.756**	-0.813**	-0.720*	-0.687*	-0.555
	顯著性 (雙尾)	0.001		0.175	0.587	0.043	0.245	0.007	0.002	0.019	0.028	0.076
	個數	12	12	10	9	9	9	11	11	10	10	11
FR	Pearson 相關	-0.212	-0.465	1	-0.868**	0.621	0.275	0.786**	0.707**	0.900**	0.785*	0.674*
	顯著性 (雙尾)	0.556	0.175		0.005	0.101	0.511	0.007	0.022	0.001	0.012	0.033
	個數	10	10	19	8	8	8	10	10	9	9	10
Soluble C	Pearson 相關	0.033	0.211	-0.868**	1	0.132	0.832*	-0.367	-0.404	-0.394	-0.313	-0.212
	顯著性 (雙尾)	0.933	0.587	0.005		0.778	0.020	0.332	0.246	0.334	0.412	0.585
	個數	9	9	8	10	7	7	9	10	8	9	9
Soluble P	Pearson 相關	-0.653	-0.682*	0.621	0.132	1	0.718*	0.801**	0.554	0.765**	0.601	0.670*
	顯著性 (雙尾)	0.057	0.043	0.101	0.778		0.019	0.005	0.121	0.010	0.087	0.048
	個數	9	9	8	7	10	10	10	9	10	9	9
Soluble EPS	Pearson 相關	-0.308	-0.433	0.275	0.832*	0.718*	1	0.422	0.152	0.410	0.246	0.454
	顯著性 (雙尾)	0.420	0.245	0.511	0.020	0.019		0.225	0.696	0.239	0.524	0.220
	個數	9	9	8	7	10	10	10	9	10	9	9
Bound C	Pearson 相關	-0.658*	-0.756**	0.786**	-0.367	0.801**	0.422	1	0.909**	0.995**	0.997**	0.925**
	顯著性 (雙尾)	0.028	0.007	0.007	0.332	0.005	0.225		0.000	0.000	0.000	0.000
	個數	11	11	10	9	10	10	12	11	11	11	11
Bound P	Pearson 相關	-0.749**	-0.813**	0.707*	-0.404	0.554	0.152	0.909**	1	0.933**	0.942**	0.956**
	顯著性 (雙尾)	0.008	0.002	0.022	0.246	0.121	0.696	0.000		0.000	0.000	0.000
	個數	11	11	10	10	9	9	11	12	10	10	11
Bound EPS	Pearson 相關	-0.626	-0.720*	0.900**	-0.394	0.765**	0.410	0.995**	0.933**	1	0.992**	0.956**
	顯著性 (雙尾)	0.053	0.019	0.001	0.334	0.010	0.239	0.000	0.000		0.000	0.000
	個數	10	10	9	8	10	10	11	10	11	10	10
EPS C	Pearson 相關	-0.554	-0.687*	0.785*	-0.313	0.601	0.246	0.997**	0.942**	0.992**	1	0.909**
	顯著性 (雙尾)	0.096	0.028	0.012	0.412	0.087	0.524	0.000	0.000	0.000		0.000
	個數	10	10	9	9	9	9	11	10	10	11	10
EPS P	Pearson 相關	-0.521	-0.555	0.647*	-0.212	0.670*	0.454	0.925**	0.956**	0.956**	0.909**	1
	顯著性 (雙尾)	0.101	0.076	0.033	0.585	0.048	0.220	0.000	0.000	0.000	0.000	
	個數	11	11	10	9	9	9	11	11	10	10	12

** . 在顯著水平為0.01時(雙尾)，相關顯著。

* . 在顯著水平為0.05時(雙尾)，相關顯著。

(EPS 濃度以 mg/g MLVSS 計算)

當 SRT 由 12 天延長至 20 天後，可發現各因子間之相關性有顯著之變化，除 MLSS 與 MLVSS 及 MLVSS 與各 EPS 項目之正相關與負相關性依舊存在外，積垢速率原與附著性胞外聚合物之正相關性已然消失，轉為與溶解性碳水化合物有顯著之正相關 ($P=0.715$)，如表 4-6 所示，與 Farquharson and Zhou (2010) 之研究結果 (FR 與 SMP 之 R^2 為 0.806) 相同；且 Zhang *et al.*(2006) 亦在分析膜上之積垢物後，指出膜面之積垢物中以碳水化合物為主要之成分。

表 4-6 SRT 20 天之相關性分析結果

SRT 20 d		MLSS	MLVSS	FR	Soluble C	Soluble P	Soluble EPS	Bound C	Bound P	Bound EPS	EPS C	EPS P
MLSS	Pearson 相關	1	0.826**	-0.357	0.197	-0.274	0.097	-0.715**	-0.453	-0.587*	-0.699*	-0.407
	顯著性 (雙尾)		0.000	0.175	0.538	0.389	0.752	0.003	0.120	0.035	0.004	0.168
	個數	19	19	16	12	12	13	15	13	13	15	13
MLVSS	Pearson 相關	0.826**	1	-0.182	0.157	-0.510	-0.251	-0.856**	-0.570*	-0.756**	-0.869**	-0.555*
	顯著性 (雙尾)	0.000		0.500	0.626	0.091	0.408	0.000	0.042	0.003	0.000	0.049
	個數	19	19	16	12	12	13	15	13	13	15	13
FR	Pearson 相關	-0.357	-0.182	1	0.715*	0.644	0.286	-0.286	-0.251	-0.236	-0.267	-0.221
	顯著性 (雙尾)	0.175	0.500		0.030	0.061	0.422	0.368	0.485	0.511	0.402	0.540
	個數	16	16	36	9	9	10	12	10	10	12	10
Soluble C	Pearson 相關	0.197	0.157	0.715*	1	0.519	0.560	-0.160	-0.308	-0.274	-0.068	-0.233
	顯著性 (雙尾)	0.538	0.626	0.030		0.102	0.058	0.620	0.330	0.389	0.833	0.466
	個數	12	12	9	12	11	12	12	12	12	12	12
Soluble P	Pearson 相關	-0.274	-0.510	0.644	0.519	1	0.879**	0.254	0.219	0.253	0.298	0.345
	顯著性 (雙尾)	0.389	0.091	0.061	0.102		0.000	0.426	0.494	0.428	0.346	0.272
	個數	12	12	9	11	12	12	12	12	12	12	12
Soluble EPS	Pearson 相關	0.097	-0.251	0.286	0.560	0.879**	1	0.272	0.332	0.341	0.344	0.441
	顯著性 (雙尾)	0.752	0.408	0.422	0.058	0.000		0.368	0.268	0.254	0.250	0.132
	個數	13	13	10	12	12	13	13	13	13	13	13
Bound C	Pearson 相關	-0.715**	-0.856**	-0.286	-0.160	0.254	0.272	1	0.614*	0.851**	0.989**	0.590*
	顯著性 (雙尾)	0.003	0.000	0.368	0.620	0.426	0.368		0.025	0.000	0.000	0.034
	個數	15	15	12	12	12	13	15	13	13	15	13
Bound P	Pearson 相關	-0.453	-0.570*	-0.251	-0.308	0.219	0.332	0.614*	1	0.937**	0.563*	0.991**
	顯著性 (雙尾)	0.120	0.042	0.485	0.330	0.494	0.268	0.025		0.000	0.045	0.000
	個數	13	13	10	12	12	13	13	13	13	13	13
Bound EPS	Pearson 相關	-0.587*	-0.756*	-0.236	-0.274	0.253	0.341	0.851**	0.937**	1	0.813**	0.921**
	顯著性 (雙尾)	0.035	0.003	0.511	0.389	0.428	0.254	0.000	0.000		0.001	0.000
	個數	13	13	10	12	12	13	13	13	13	13	13
EPS C	Pearson 相關	-0.699**	-0.869**	-0.267	-0.068	0.298	0.344	0.989**	0.563*	0.813**	1	0.546
	顯著性 (雙尾)	0.004	0.000	0.402	0.833	0.346	0.250	0.000	0.045	0.001		0.053
	個數	15	15	12	12	12	13	15	13	13	15	13
EPS P	Pearson 相關	-0.407	-0.555*	-0.221	-0.233	0.345	0.441	0.590*	0.991**	0.921**	0.546	1
	顯著性 (雙尾)	0.168	0.049	0.540	0.466	0.272	0.132	0.034	0.000	0.000	0.053	
	個數	13	13	10	12	12	13	13	13	13	13	13

** . 在顯著水準為0.01時(雙尾)，相關顯著。

* . 在顯著水準為0.05時(雙尾)，相關顯著。

(EPS 濃度以 mg/g MLVSS 計算)

反應槽操作於 SRT 30 天後，積垢速率除與溶解性碳水化合物有顯著之正相關外 ($P=0.639$)，與總溶解性 EPS 亦有顯著之正相關 ($P=0.737$)，其中與溶解性蛋白質之相關性為 0.494；此外，積垢速率與附著性 EPS 之相關性皆由 SRT 20 天之負相關轉為程度不等之正相關 (如表 4-7)。

表 4-7 SRT 30 天之相關性分析結果

SRT 30 d		MLSS	MLVSS	FR	Soluble C	Soluble P	Soluble EPS	Bound C	Bound P	Bound EPS	EPS C	EPS P
MLSS	Pearson 相關	1	0.975**	-0.018	-0.766**	-0.549*	-0.718**	-0.697**	-0.049	-0.570*	-0.571**	-0.343
	顯著性 (雙尾)		0.000	0.919	0.001	0.012	0.003	0.001	0.821	0.021	0.001	0.128
	個數	34	34	33	16	20	15	18	24	16	16	21
MLVSS	Pearson 相關	0.975**	1	-0.013	-0.732**	-0.569**	-0.687**	-0.744**	-0.035	-0.642**	-0.821**	-0.301
	顯著性 (雙尾)	0.000		0.944	0.001	0.009	0.005	0.000	0.870	0.007	0.000	0.184
	個數	34	34	33	16	20	15	18	24	16	16	21
FR	Pearson 相關	-0.018	-0.013	1	0.639*	0.494*	0.737**	0.333	0.268	0.444	0.617*	0.408
	顯著性 (雙尾)	0.919	0.944		0.010	0.032	0.003	0.191	0.216	0.097	0.014	0.074
	個數	33	33	52	15	19	15	17	23	15	15	20
Soluble C	Pearson 相關	-0.766**	-0.732**	0.639*	1	0.675*	0.944**	0.305	0.216	0.574*	0.298	0.393
	顯著性 (雙尾)	0.001	0.001	0.010		0.020	0.000	0.335	0.439	0.040	0.403	0.206
	個數	16	16	15	16	15	15	15	15	15	10	15
Soluble P	Pearson 相關	-0.549*	-0.569*	0.494*	0.657*	1	0.957**	0.639*	0.436	0.462	0.597	0.525
	顯著性 (雙尾)	0.012	0.009	0.032	0.020		0.000	0.019	0.080	0.130	0.052	0.054
	個數	20	20	19	15	20	15	15	17	15	15	15
Soluble EPS	Pearson 相關	-0.718**	-0.687**	0.737**	0.944**	0.957**	1	0.523	0.236	0.620*	0.187	0.686*
	顯著性 (雙尾)	0.003	0.005	0.003	0.000	0.000		0.148	0.485	0.042	0.658	0.041
	個數	15	15	15	15	15	15	15	11	11	15	15
Bound C	Pearson 相關	-0.697**	-0.744**	0.333	0.305	0.639*	0.523	1	0.194	0.796**	0.993**	-0.098
	顯著性 (雙尾)	0.001	0.000	0.191	0.335	0.019	0.148		0.506	0.002	0.000	0.788
	個數	18	18	17	15	15	15	18	15	15	15	15
Bound P	Pearson 相關	-0.049	-0.035	0.268	0.216	0.436	0.236	0.194	1	0.350	0.295	0.878**
	顯著性 (雙尾)	0.821	0.870	0.216	0.439	0.080	0.485	0.506		0.220	0.353	0.000
	個數	24	24	23	15	17	11	15	24	15	15	19
Bound EPS	Pearson 相關	-0.570*	-0.642**	0.444	0.574*	0.462	0.620*	0.796**	0.350	1	0.717*	0.578*
	顯著性 (雙尾)	0.021	0.007	0.097	0.040	0.130	0.042	0.002	0.220		0.030	0.049
	個數	16	16	15	15	15	11	15	15	16	15	15
EPS C	Pearson 相關	-0.751**	-0.821**	0.617*	0.298	0.597	0.187	0.993**	0.295	0.717*	1	-0.211
	顯著性 (雙尾)	0.001	0.000	0.014	0.403	0.052	0.658	0.000	0.353	0.030		0.585
	個數	16	16	15	10	15	15	15	15	15	16	15
EPS P	Pearson 相關	-0.343	-0.301	0.408	0.393	0.525	0.686*	-0.098	0.878**	0.578*	-0.211	1
	顯著性 (雙尾)	0.128	0.184	0.074	0.206	0.054	0.041	0.788	0.000	0.049	0.585	
	個數	21	21	20	15	15	15	15	19	15	15	21

** . 在顯著水準為0.01時 (雙尾), 相關顯著。

* . 在顯著水準為0.05時 (雙尾), 相關顯著。

(EPS 濃度以 mg/g MLVSS 計算)

又若將不同 SRT 下之各因子與反應槽中 EPS 總量做相關性分析，則結果略有不同，其統計結果呈現於表 4-8、4-9、4-10 中，且相關性略有不同。由表 4-8 可看出，在 SRT 控制於 12 天時，積垢速率受附著性碳水化合物之影響較大 ($P=0.752$)，與溶解性之碳水化合物呈負相關，此結果與表 4-5 類似，唯與附著性蛋白質之相關性變為負相關。

當 SRT 控制在 20 天時，影響薄膜積垢速率之因子數增加，如表 4-9 所示，可發現以反應槽中 EPS 總量與 FR 所做之相關性分析結果中，溶解性之碳水化合物、蛋白質，附著性之碳水化合物、蛋白質等，皆對薄膜之

積垢有不良之影響，其 P 分別為 0.812、0.748、0.469 及 0.663，與表 4-6 相比，對薄膜積垢有不良影響之因子大量增加。

表 4-8 SRT 12 天各因子與 EPS 總量之相關性結果

SRT 12 d	MLSS	MLVSS	FR	Soluble C	Soluble P	Soluble EPS	Bound C	Bound P	Bound EPS	EPS C	EPS P
Pearson 相關	1	0.841**	-0.212	0.204	-0.182	0.044	-0.080	0.191	-0.041	-0.049	0.101
顯著性 (雙尾)		0.001	0.556	0.525	0.570	0.891	0.804	0.552	0.900	0.879	0.754
個數	12	12	10	9	9	9	11	11	10	10	11
Pearson 相關	0.841**	1	-0.465	0.271	-0.140	0.109	-0.141	0.404	-0.055	-0.098	0.333
顯著性 (雙尾)	0.001		0.175	0.395	0.665	0.737	0.663	0.193	0.866	0.761	0.290
個數	12	12	10	9	9	9	11	11	10	10	11
Pearson 相關	-0.212	-0.465	1	-0.626	0.088	-0.349	0.752*	-0.370	0.703*	0.689*	-0.329
顯著性 (雙尾)	0.556	0.175		0.053	0.808	0.322	0.012	0.293	0.023	0.027	0.353
個數	10	10	19	8	8	8	10	10	9	9	10
Pearson 相關	0.204	0.271	-0.626	1	0.552	0.916**	0.165	-0.276	0.111	0.299	-0.008
顯著性 (雙尾)	0.525	0.395	0.053		0.063	0.000	0.608	0.386	0.732	0.345	0.981
個數	9	9	8	10	7	7	9	10	8	9	9
Pearson 相關	-0.182	-0.140	0.088	0.552	1	0.841**	0.580*	-0.221	0.562	0.638*	0.261
顯著性 (雙尾)	0.570	0.665	0.808	0.063		0.001	0.048	0.490	0.057	0.025	0.412
個數	9	9	8	7	10	10	10	9	10	9	9
Pearson 相關	0.044	0.109	-0.349	0.916**	0.841**	1	0.387	-0.285	0.343	0.502	0.121
顯著性 (雙尾)	0.891	0.737	0.322	0.000	0.001		0.214	0.368	0.275	0.096	0.708
個數	9	9	8	7	10	10	10	9	10	9	9
Pearson 相關	-0.080	-0.141	0.752*	0.165	0.580*	0.387	1	-0.349	0.976**	0.991**	-0.067
顯著性 (雙尾)	0.804	0.663	0.012	0.608	0.048	0.214		0.266	0.000	0.000	0.836
個數	11	11	10	9	10	10	12	11	11	11	11
Pearson 相關	0.191	0.404	-0.370	-0.276	-0.221	-0.285	-0.349	1	-0.137	-0.376	0.884**
顯著性 (雙尾)	0.552	0.193	0.293	0.386	0.490	0.368	0.266		0.671	0.228	0.000
個數	11	11	10	10	9	9	11	12	10	10	11
Pearson 相關	-0.041	-0.055	0.703*	0.111	0.562	0.343	0.976**	-0.137	1	0.960**	0.135
顯著性 (雙尾)	0.900	0.866	0.023	0.732	0.057	0.275	0.000	0.671		0.000	0.677
個數	10	10	9	8	10	10	11	10	11	10	10
Pearson 相關	-0.049	-0.098	0.689*	0.299	0.638*	0.502	0.991**	-0.376	0.960**	1	-0.066
顯著性 (雙尾)	0.879	0.761	0.027	0.345	0.025	0.096	0.000	0.228	0.000		0.839
個數	10	10	9	9	9	9	11	10	10	11	10
Pearson 相關	0.101	0.333	-0.329	-0.008	0.261	0.121	-0.067	0.884**	0.135	-0.066	1
顯著性 (雙尾)	0.754	0.290	0.353	0.981	0.412	0.708	0.836	0.000	0.677	0.839	
個數	11	11	10	9	9	9	11	11	10	10	12

**. 在顯著水準為 0.01 時 (雙尾)，相關顯著。

*. 在顯著水準為 0.05 時 (雙尾)，相關顯著。

(EPS 總量以 mg 計算)

又 SRT 增長至 30 天後，如表 4-10 所示，薄膜之積垢速率依舊受反應槽中總溶解性之碳水化合物及蛋白質之影響， P 分別為 0.638 及 0.603；此外，亦受附著性之胞外聚合物影響 ($P=0.514$)，與表 4-7 之結果雷同。

表 4-9 SRT 20 天各因子與 EPS 總量之相關性結果

SRT 20 d		MLSS	MLVSS	FR	Soluble C	Soluble P	Soluble EPS	Bound C	Bound P	Bound EPS	EPS C	EPS P
MLSS	Pearson 相關	1	0.676**	-0.350	-0.385	-0.191	-0.296	-0.578**	-0.410	-0.342	-0.622*	-0.198
	顯著性 (雙尾)		0.000	0.094	0.216	0.478	0.192	0.005	0.115	0.119	0.041	0.610
	個數	19	19	16	12	12	13	15	13	13	15	13
MLVSS	Pearson 相關	0.676**	1	-0.029	0.243	0.127	0.114	-0.501*	-0.161	-0.257	-0.494	-0.094
	顯著性 (雙尾)	0.000		0.892	0.447	0.640	0.623	0.017	0.551	0.248	0.123	0.809
	個數	19	19	16	12	12	13	15	13	13	15	13
FR	Pearson 相關	-0.350	-0.029	1	0.812**	0.748**	0.677**	0.496*	0.663*	0.690**	0.626	0.599
	顯著性 (雙尾)	0.094	0.892		0.008	0.003	0.002	0.031	0.013	0.001	0.097	0.209
	個數	16	16	36	9	9	10	12	10	10	12	10
Soluble C	Pearson 相關	-0.385	0.243	0.812**	1	0.653	0.820**	0.534	0.926**	0.893**	0.615*	0.561
	顯著性 (雙尾)	0.216	0.447	0.008		0.112	0.001	0.091	0.000	0.000	0.044	0.247
	個數	12	12	9	12	11	12	12	12	12	12	12
Soluble P	Pearson 相關	-0.191	0.127	0.748**	0.653	1	0.864**	-0.140	-0.086	0.150	-0.060	0.065
	顯著性 (雙尾)	0.478	0.640	0.003	0.112		0.000	0.632	0.825	0.609	0.910	0.869
	個數	12	12	9	11	12	12	12	12	12	12	12
Soluble EPS	Pearson 相關	-0.296	0.114	0.677**	0.820**	0.864**	1	0.217	0.729**	0.559*	0.400	0.493
	顯著性 (雙尾)	0.192	0.623	0.002	0.001	0.000		0.372	0.003	0.013	0.222	0.177
	個數	13	13	10	12	12	13	13	13	13	13	13
Bound C	Pearson 相關	-0.578**	-0.501	0.496*	0.534	-0.140	0.217	1	0.537*	0.483*	0.995**	0.352
	顯著性 (雙尾)	0.005	0.017	0.031	0.091	0.632	0.372		0.032	0.023	0.000	0.352
	個數	15	15	12	12	12	13	15	13	13	15	13
Bound P	Pearson 相關	-0.410	-0.161	0.663*	0.926**	-0.086	0.729**	0.537*	1	0.968**	0.667*	0.989**
	顯著性 (雙尾)	0.115	0.551	0.013	0.000	0.825	0.003	0.032		0.000	0.025	0.000
	個數	13	13	10	12	12	13	13	13	13	13	13
Bound EPS	Pearson 相關	-0.342	-0.257	0.690**	0.893**	0.150	0.559*	0.483*	0.968**	1	0.826**	0.928**
	顯著性 (雙尾)	0.119	0.248	0.001	0.000	0.609	0.013	0.023	0.000		0.002	0.000
	個數	13	13	10	12	12	13	13	13	13	13	13
EPS C	Pearson 相關	-0.622*	-0.494	0.626	0.615*	-0.060	0.400	0.995**	0.667*	0.826**	1	0.700
	顯著性 (雙尾)	0.041	0.123	0.097	0.044	0.910	0.222	0.000	0.025	0.002		0.122
	個數	15	15	12	12	12	13	15	13	13	15	13
EPS P	Pearson 相關	-0.198	-0.094	0.599	0.561	0.065	0.493	0.352	0.989**	0.928**	0.700	1
	顯著性 (雙尾)	0.610	0.809	0.209	0.247	0.869	0.177	0.352	0.000	0.000	0.122	
	個數	13	13	10	12	12	13	13	13	13	13	13

** . 在顯著水準為 0.01 時 (雙尾)，相關顯著。

* . 在顯著水準為 0.05 時 (雙尾)，相關顯著。

(EPS 總量以 mg 計算)

本研究相關性分析之結果，隨不同之 EPS 單位而略有不同，然與各文獻比較後，可知薄膜積垢速率與 EPS 有關，與 Nagaoka *et al.*(1996) 及 Yun *et al.*(2006) 之結論相同；因認為薄膜之積垢速率應與反應槽中 EPS 之總量有關，故以 mg EPS 為單位之分析結果下結論：當 SRT 較短時 (12 天)，薄膜積垢受附著性碳水化合物之影響較深；SRT 延長至 20 天時，溶解性胞外聚合物 (包含碳水化合物及蛋白質) 對積垢速率之影響漸增，且附著性胞外聚合物 (碳水化合物、蛋白質) 對薄膜積垢之影響依舊存在；然 SRT 延長至 30 天後，積垢速率僅受溶解性之胞外聚合物 (碳水化合物、蛋白質) 影響，附著性物質之影響已然消失。

隨 SRT 之延長，溶解性 EPS 為影響薄膜積垢之主要物質，此結果與 Poele and Graaf (2005) 之 SMP 為造成積垢之主要物質之結果相符。又 SPSS 之結果顯示：在短 SRT 時 (12 天)，附著性之 EPS 對薄膜積垢速率之影響較大，然隨著 SRT 之上升，其對積垢速率之影響會降低，且積垢速率隨 SRT 延長而上升，故推測隨附著性 EPS 之增加，可能影響反應槽中生物膠羽之型態，進而影響薄膜之積垢，對 FR 無直接之影響，然因本研究並無檢測不同 SRT 下之膠羽性質，故無法得知其間之關聯。

表 4-10 SRT 30 天各因子與 EPS 總量之相關性結果

SRT 30 d	MLSS	MLVSS	FR	Soluble C	Soluble P	Soluble EPS	Bound C	Bound P	Bound EPS	EPS C	EPS P
Pearson 相關	1	0.975**	-0.300	-0.051	0.007	-0.378	0.233	0.831**	0.052	0.340	0.413
顯著性 (雙尾)		0.000	0.089	0.869	0.978	0.225	0.423	0.000	0.837	0.456	0.309
個數	34	34	33	16	20	15	18	24	16	16	21
Pearson 相關	0.975**	1	-0.297	0.033	0.026	-0.286	0.180	0.907**	0.069	0.371	0.587
顯著性 (雙尾)	0.000		0.093	0.914	0.923	0.367	0.538	0.000	0.785	0.413	0.126
個數	34	34	33	16	20	15	18	24	16	16	21
Pearson 相關	-0.300	-0.297	1	0.638*	0.603*	0.778**	0.464	0.452	0.514*	0.522	0.656
顯著性 (雙尾)	0.089	0.093		0.026	0.017	0.005	0.110	0.140	0.035	0.288	0.109
個數	33	33	52	15	19	15	17	23	15	15	20
Pearson 相關	-0.051	0.033	0.638*	1	0.781*	0.646*	0.843*	0.755	0.565	0.871*	0.446
顯著性 (雙尾)	0.869	0.914	0.026		0.022	0.032	0.017	0.083	0.145	0.011	0.452
個數	16	16	15	16	15	15	15	15	15	10	15
Pearson 相關	0.007	0.026	0.603*	0.781*	1	0.891**	0.660	0.581	0.265	0.643	0.535
顯著性 (雙尾)	0.978	0.923	0.017	0.022		0.001	0.053	0.172	0.459	0.242	0.171
個數	20	20	19	15	20	15	15	17	15	15	15
Pearson 相關	-0.378	-0.286	0.778**	0.646*	0.891**	1	0.451	0.985*	0.767*	0.408	0.628
顯著性 (雙尾)	0.225	0.367	0.005	0.032	0.001		0.310	0.015	0.044	0.422	0.257
個數	15	15	15	15	15	15	15	11	11	15	15
Pearson 相關	0.233	0.180	0.464	0.843*	0.660	0.451	1	0.759*	0.382	0.999**	0.932*
顯著性 (雙尾)	0.423	0.538	0.110	0.017	0.053	0.310		0.029	0.197	0.000	0.021
個數	18	18	17	15	15	15	18	15	15	15	15
Pearson 相關	0.831**	0.907**	0.452	0.755	0.581	0.985*	0.759*	1	0.755**	0.794	0.997**
顯著性 (雙尾)	0.000	0.000	0.140	0.083	0.172	0.015	0.029		0.003	0.206	0.000
個數	24	24	23	15	17	11	15	24	15	15	19
Pearson 相關	0.052	0.069	0.514*	0.565	0.265	0.767*	0.382	0.755**	1	0.528	0.842*
顯著性 (雙尾)	0.837	0.785	0.035	0.145	0.459	0.044	0.197	0.003		0.282	0.017
個數	16	16	15	15	15	11	15	15	16	15	15
Pearson 相關	0.340	0.371	0.522	0.871*	0.643	0.408	0.998**	0.794	0.528	1	0.999*
顯著性 (雙尾)	0.456	0.413	0.288	0.011	0.242	0.422	0.000	0.206	0.282		0.014
個數	16	16	15	10	15	15	15	15	15	16	15
Pearson 相關	0.413	0.587	0.656	0.446	0.535	0.628	0.932*	0.997**	0.842	0.999*	1
顯著性 (雙尾)	0.309	0.126	0.109	0.452	0.171	0.257	0.021	0.000	0.017	0.014	
個數	21	21	20	15	15	15	15	19	15	15	21

** . 在顯著水準為 0.01 時 (雙尾)，相關顯著。
 * . 在顯著水準為 0.05 時 (雙尾)，相關顯著。

(EPS 總量以 mg 計算)

第五章 結論與建議

5-1 結論

1. 本研究以沉浸式 MBR 系統處理高科技業低 C/N 廢水，顯示在不同 SRT (12、20、30 天) 下皆可有效處理廢水中之污染物 (BOD_5 、COD、 NH_4^+ 等)，其中又以 SRT 控制在 20 天時之處理效率最高 (分別可達 98、91、98%)，而廢水中之 SS 經薄膜過濾後皆可達濁度小於 1 NTU 之出流。
2. 薄膜之積垢速率受反應槽中 EPS 之總量影響頗深，隨反應槽中胞外物質增加，薄膜之積垢越嚴重。以 mg EPS/g MLVSS 為單位，僅顯示不同 SRT 下微生物之生長狀態及單位胞外物質產量，無法切確說明其與積垢速率間之關係。
3. 當 SRT 由 12 天延長至 20 天時，反應槽中單位微生物所產之 EPS 濃度上升，然至 SRT 30 天時卻降低，推測與反應槽中微生物之生長型態有關，此外亦可能因反應槽中可用物質降低，而被微生物再利用所導致。
4. 隨 SRT 增長，反應槽中 EPS 總量上升，導致積垢速率上升；而 EPS 之 P/C 比隨 SRT 增加而上升，推測亦為使積垢速率快速上升之原因之一。
5. 無論 EPS 以何種單位進行相關性分析，其結果相似：於短 SRT 時 (12 天)，積垢速率受附著性 EPS 之影響較大；而當 SRT 延長 (20、30 天)，則改以反應槽中溶解性 EPS 對薄膜積垢之影響較大，推測此一現象與反應槽中微生物之生長、代謝或膠羽型態有關。。

5-2 建議

1. 本研究僅採單一好氧單元進行，無脫硝作用，為因應未來放流水之總氮限制，可增加厭氧或兼氧單元，以了藉科技業之低 C/N 廢水對脫硝作用是否有所限制；亦可對去除廢水中之磷做探討。
2. 可針對不同 SRT 下之污泥粒徑做分析，以了解污泥粒徑與反應槽中 EPS 含量與膜積垢間之關係。
3. 可分析不同 SRT 下膜表面之積垢物成分，以了解膜面積垢物與反應槽中 EPS 之組成是否相同。
4. 本研究因模廠配置問題，故以自來水進行反洗，未來模廠之設計應使用薄膜出流水進行反洗，避免自來水中之不明物質影響薄膜之操作。
5. 影響薄膜積垢之因子繁多，因高科技業之廢水含大量 TDS，故未來可加測出流水中之 TDS，以釐清 TDS 對薄膜積垢之影響。此外，亦可檢測出流水中之 EPS 之含量，以了解 EPS 與薄膜及積垢間之關係。
6. 蛋白質種類繁多，其帶電性不一，雖文獻中指出蛋白質帶正電，但不一定代表本研究反應槽中之蛋白質電性，可針對反應槽中蛋白質做定性與定量之分析，以證實蛋白質對積垢之影響，此外亦可針對污泥之親疏水性與薄膜間之交互關係做進一步之討論。
7. 未來可使用不同進流水質，比較反應槽中之微生物種類、型態、胞外聚合物產量等，加以了解微生物之菌相對薄膜積垢之影響。

第六章 參考文獻

- Ahmed, Z.; Cho, J.; Lim, B.R.; Song, K.G. and Ahn, K.H. (2007) Effects of sludge retention time on membrane fouling and microbial community structure in a membrane bioreactor. *Journal of membrane science* 287, 211-218.
- Atkinson, S. (2006) Research studies predict strong growth for MBR markets. *Membrane technology*, 8-10.
- Cheryan, M. (1998) Ultrafiltration and microfiltration handbook (Second edition). CRC press.
- Cho, B.D. and Fane, A.G. (2002) Fouling transients in nominally sub-critical flux operation of a membrane bioreactor. *Journal of membrane science* 209, 391-403.
- Farquharson, A. and Zhou, H. (2010) Relationships of activated sludge characteristics to fouling rate and critical flux in membrane bioreactors for wastewater treatment. *Chemosphere* 79, 149-155.
- Grelier, P.; Rosenberger, S. and Tazi-Pain, A. (2006) Influence of sludge retention time on membrane bioreactor hydraulic performance. *Desalination* 192, 10-17.
- Han, S.S.; Tak, T.M.; Bae, T.H. and Jang, G.G. (2005) Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system. *Process biochemistry* 40, 2393-2400.
- Huang, X.; Liu, R.; Wang, C.; Chen, L. and Qian Y. (2000) Study on hydraulic characteristics in a submerged membrane bioreactor process. *Process biochemistry* 36, 249-254.
- Ji, L. and Zhou J. (2006) Influence of aeration on membrane polymers and membrane fouling in submerged membrane bioreactors. *Journal of membrane science* 276, 168-177.
- Jinsong, Z.; Chuan, C.H.; Jiti, Z. and Fane A.G. (2006) Effect of sludge

- retention time on membrane bio-fouling intensity in a submerged membrane bioreactor. *Separation science and technology* 41, 1313-1329.
- Judd, S. (2006) The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment. ELSEVIER Publishing.
- Ke, O. and Junxin, L. (2009) Effect of sludge retention time on sludge characteristics and membrane fouling of membrane bioreactor. *Journal of environmental sciences* 21, 1329-1335.
- Khongnakorn, W.; Wisniewski, C.; Pottier, L. and Vachoud, L. (2007) Physical properties of activated sludge in a submerged membrane bioreactor and relation with membrane fouling. *Separation and purification technology* 55, 125-131.
- Kim, H.Y.; Yeon, K.M.; Lee, C.H.; Lee, S. and Swaminathan, T. (2006) Biofilm structure and extracellular polymeric substances in low and high dissolved oxygen membrane bioreactors. *Separation science and technology* 41, 1213-1230.
- Kimura, K.; Yamato, N.; Yamamura, H. and Watanabe, Y. (2005) Membrane fouling in pilot-scale membrane bioreactors (MBRs) treating municipal wastewater. *Environmental science and technology* 39, 6293-6299.
- Lapidou, C.S. and Rittmann, B.E. (2002) A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass. *Water research* 36, 2711-2720.
- Lee, W.; Kang, S. and Shin, H. (2003) Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors. *Journal of membrane science* 216, 217-227.
- Le-Clech, P.; Chen, V. and Fane, T.A.G. (2006) Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of membrane science* 284, 17-53.
- Li, X.F.; Li, Y.J.; Liu, H.; Hua, Z.Z.; Du, G.C. and Chen, J. (2008) Correlation between extracellular polymeric substances and aerobic biogranulation in membrane bioreactor. *Separation and purification*

technology 59, 26-33.

- Liao, B.Q.; Allen, D.G.; Droppo, I.G.; Leppard, G.G. and Liss, S.N. (2001) Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability. *Water research* 35, 339-350.
- Liu, H. and Fang, H.H.P. (2002) Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludge. *Journal of biotechnology* 95, 249-256.
- Liu, R.; Huang, X.; Xi, J. and Qian, Y. (2005) Microbial behavior in a membrane bioreactor with complete sludge retention. *Process biochemistry* 40, 3165-3170.
- Meng, F.; Chae, S.; Drews, A.; Kraume, M.; Shin, H. and Yang, F. (2009) Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material. *Water research* 43, 1489-1512.
- Nagaoka, H.; Ueda, S. and Miya, A. (1996) Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process. *Water science technology* 34, 165-172.
- Ng, H.Y. and Hermanowicz, S.W. (2005) Membrane bioreactor operation at short solids retention times: performance and biomass characteristics. *Water research* 39, 981-992.
- Ng, H.Y.; Tan, T.W. and Ong, S.L. (2006) Membrane fouling of submerged membrane bioreactors: impact of mean cell residence time and the contributing factors. *Environmental science and technology* 40, 2706-2713.
- Nielsen, P.H.; Jahn, A. and Palmgren, R. (1997) Conceptual model for production and composition of exopolymers in biofilms. *Water science technology* 36, 11-19.
- Poele, S. and Graaf, J. (2005) Enzymatic cleaning in ultrafiltration of wastewater treatment plant effluent. *Desalination* 179, 73-81.
- Qin, J.J.; Oo, M.H.; Tao, G. and Kekre, K.A. (2007) Feasibility study on petrochemical wastewater treatment and reuse using submerged MBR. *Journal of membrane science* 293, 161-166.

- Rosenberger, S.; Evenblij, H.; te Poele, S.; Wintgens, T. and Laabs, C. (2005) The importance of liquid phase analyses to understand fouling in membrane assisted activated sludge processes – six case studies of different European research groups. *Journal of membrane science* 263, 113-126.
- Sperandio, M.; Masse, A. and Cabassud, C. (2006) Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time. *Water research* 40, 2405-2415.
- Stephenson, T.; Judd, S.; Jefferson, B. and Brindle, K. (2000) Membrane bioreactors for wastewater treatment. IWA Publishing.
- Trussell, R.S.; Merlo, R.P.; Hermanowicz, S.W. and Jendins, D. (2006) The effect of organic loading on process performance and membrane fouling in a submerged membrane bioreactor treating municipal wastewater. *Water research* 40, 2675-2683.
- Ueda, T.; Hata, K.; Kikuoka, Y. and Seino, O. (1996) Effects of aeration on suction pressure in a submerged membrane bioreactor. *Water research* 31, 3, 489-494.
- Visvanathan, C. and Khan, S.J. (2008) Influence of mechanical mixing intensity on a biofilm structure and permeability in a membrane bioreactor. *Desalination* 231, 253-267.
- Wang, Z.; Wu, Z. and Tang, S. (2009) Extracellular polymeric substance (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Water research* 43, 2504-2512.
- Yang, W.; Cicek, N. and Ilg, J. (2006) State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America. *Journal of membrane science* 270, 201-211.
- Yigit, N.O.; Uzal, N.; Koseoglu, H.; Harman, I.; Yukseler, H.; Yetis, U.; Civelekoglu, G. and Kitis, M. (2009) Treatment of a denim producing textile industry wastewater using pilot-scale membrane bioreactor.

Desalination 240, 143-150.

Yu, H.Y.; Xie, Y.J.; Hu, M.X.; Wang, J.L.; Wang, S.Y. and Xu, Z.K. (2005) Surface modification of polypropylene microporous membrane to improve its antifouling property in MBR: CO₂ plasma treatment. *Journal of membrane science* 254, 219-227.

Yun, M.A.; Yeon, K.M.; Park, J.S.; Lee, C.H.; Chun, J. and Lim, D.J. (2006) Characterization of biofilm structure and its effect on membrane permeability in MBR for dye wastewater treatment. *Water research* 40, 45-52.

張維欽，莊順興，羅時斌，陳建衡 (2008) 生物處理系統之溶解性微生物產物探討。工業污染防治，105 期，39-56。

歐陽嶠暉，莊順興，曾淳錚 (2008) 科學園區污水處理之展望。中華技術，78 期，42-49。

范姜仁茂，莊連春，曾迪華，廖述良，游勝傑，梁德明 (2009) 薄膜生物反應器 (MBR) 於廢水處理之技術評析。工業污染防治，109 期，49-96。

