

國立臺灣大學工學院環境工程學研究所



碩士論文

Graduate Institute of Environmental Engineering
College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

都市污水厭氧生物處理之研究
—探討醣類、蛋白質及脂質的降解

Anaerobic Biotechnology for Domestic Wastewater Treatment
—Explore the Degradation of Sugars, Proteins and Lipids

吳榮哲

Jong-Che WU

指導教授：林正芳 博士

Advisor : Cheng-Fang LIN, Ph.D.

中華民國 108 年 1 月

Jan, 2019



國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書



都市污水厭氧生物處理之研究
—探討醣類、蛋白質及脂質的降解

Anaerobic Biotechnology for Domestic Wastewater Treatment
—Explore the Degradation of Sugars, Proteins and Lipids

本論文係吳榮哲君(學號 P05541202)在國立臺灣大學環境工程學研究所完成之碩士學位論文，於民國 108 年 1 月 3 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

論文審查委員：

李建賢

李建賢博士
臺北市政府工務局衛生下水道工程處
處長

吳忠信

吳忠信教授
高雄科技大學化學工程與材料工程學系
教授兼系主任

吳萬益

吳萬益博士
惠民實業股份有限公司
總經理

林正芳

林正芳教授
國立台灣大學環境工程學研究所
教授兼所長

指導教授： 林正芳

所長： 林正芳

致謝



畢業，這是人生中一段意外又難得的航程，彷彿時空回到了三十年前，感覺有點不太真實。

感謝林正芳老師這兩年半的指導，讓我重新學習到研究學問的方法，也對問題的分析、探討有了新的認知，在面對問題上注入了新的思考邏輯跟方向，調整並找出更妥適的解決方法。

感謝惠民實業的吳萬益總經理，吳總是我的老闆，也是我進入台大環工所以及串起我與老師及研究群這段緣分的推手，更擔任了我論文口試委員，我的畢業，是吳總促成，所以衷心的感謝吳總。

感謝迪化污水處理廠的夥伴們，承暉廠長、冠前、文昇、善業、紫因，已經離職的詩淵、真題，謝謝你們兩年來宅配污水到府的服務、資料的彙整，讓我的實驗跟論文可以順利完成。

感謝知穎跟昶威兩位在職班同學的互相扶持，謝謝你們在課業上的協助，讓我可以輕鬆快樂的完成作業；謝謝淑惠，幫我快速又準確的畫完圖，當然啦，也要謝謝化麟把老婆的時間借給我。

感謝研究群所有夥伴們的相知相惜，尤其是虹瑤、昶瑞跟子揚在實驗跟論文上的大力協助，也謝謝鈞偉、明祺、吳寬的幫忙，相信我們的緣分不是結束，而是一個開始。

最後，要謝謝我的家人，老婆、女兒、兒子，尤其是老婆，假日還陪我上實驗室照顧模組，謝謝你們的支持。

感謝這意外航路上相伴的所有人，相逢自是有緣，也只是個開端，祝福所有人順利、平安。

吳榮哲 謹致於
國立台灣大學環境工程學研究所
中華民國 108 年 1 月

摘要



本研究以固定厭氧生物反應模組，採取以全實廠污水連續進流的方式進行試驗，操作溫度設定為 25°C，並以水力停留時間(HRT)16、12、8 及 6 小時等四個階段檢測分析處理成果，檢測結果為化學需氧量(TCOD)的總平均去除率為 76.5%，各階段的平均去除率，HRT=16 小時之平均去除率為 75.5%、HRT=12 小時之平均去除率為 76.3%、HRT=8 小時之平均去除率為 78.7%，HRT=6 小時之平均去除率則為 74.6%。

在 HRT=6 小時及突增負荷的操作條件下，出流水 TCOD 平均值為 62 mg/L(最大值 77 mg/L，最小值 49 mg/L)，均符合放流水化學需氧量(COD)之排放標準(100 mg/L)，顯示厭氧固定生物反應系統對突增負荷的穩定度及低水力停留時間(HRT)的處理能效，可滿足現階段都市污水處理的需求，而以厭氧固定生物反應系統處理，不需持續性曝氣且廢棄污泥量極低，可節省電費及污泥清理費用甚為可觀。

從醣類、蛋白質及脂質這三種都市污水中主要有機成分的檢測結果顯示，醣類及蛋白質的削減率在何種水力停留時間的操作條件下均可達 80% 以上，脂質則僅維持在 40%~60% 之間，顯見脂質的去除效能是固定厭氧生物處理的限制因子，如何利用醣類、蛋白質及脂質的共降解效應以提高脂質的降解效率，是提升厭氧固定生物處理系統的整體效能的重要課題。

關鍵字：都市污水、厭氧固定生物、醣類、蛋白質、脂質

ABSTRACT



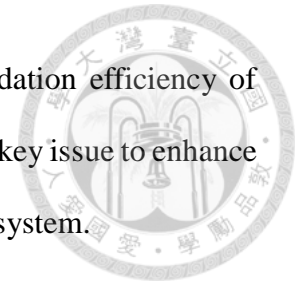
This research, the fixed anaerobic biological treatment module was used to test the continuous influent of the whole domestic wastewater. The operating temperature was set to 25 °C, and the results were analyzed in four phases of hydraulic retention time (HRT) at 16, 12, 8 and 6 hours.

The results showed that the total average removal rate of chemical oxygen demand (TCOD) was 76.5% and for the average removal rate of each phase, the average removal rate at HRT of 16 hours was 75.5%, 76.3% at HRT of 12 hours, 78.7% at HRT of 8 hours and 74.6% at HRT of 6 hours.

At HRT of 6 hours and the operating condition of sudden load increase, the average TCOD of effluent was 62 mg/L (maximum 77 mg/L and minimum 49 mg/L), which was consistent with the emission standards for chemical oxygen demand of the discharged water (COD, 100mg/L), showing the stability of the fixed anaerobic biological treatment system for sudden load increase and low hydraulic retention time (HRT) that satisfied the current demand of domestic wastewater treatment via the fixed anaerobic biological treatment system. Such system does not require continuous aeration and the production of waste sludge is extremely low, which conserves electricity and tremendously reduces the sludge disposal cost.

The analytic results of major organic components in three types of domestic wastewater, such as sugars, proteins and lipids, showed that the reduction rate of sugars and proteins could achieve more than 80% under the operating condition of any hydraulic retention time, where the level of lipids could only be maintained between 40% and 60%. It was obvious that the removal efficiency of lipids was the limiting factor for the fixed

anaerobic biological treatment system. The improvement to degradation efficiency of lipids in the co-degradation effect of sugars, proteins and lipids is the key issue to enhance the overall effectiveness of the fixed anaerobic biological treatment system.



Keywords : Domestic wastewater, Anaerobic biological treatment, Carbohydrate, Sugar, Protein, Lipid.

目錄



口試委員審定書	I
致謝	II
摘要	III
ABSTRACT	IV
目錄	1
圖目錄	3
表目錄	4
第一章 前言	5
1.1 研究緣起	5
1.2 研究目的及項目	6
第二章 文獻回顧	8
2.1 台灣都市污水處理現況	8
2.1.1 都市污水處理廠分布	10
2.1.2 都市進流污水水質	12
2.2 厭氧生物處理	13
2.3 都市污水中的有機成分	15
2.4 厭氧生物處理醣類、蛋白質及脂質	18
第三章 實驗方法與材料	20
3.1 實驗內容與架構	20
3.2 實驗方法與流程	22
3.3 進流水來源及水質	24
3.4 水質分析方法	26
3.4.1 化學需氧量(COD).....	26
3.4.2 三成分分析-醣類(蔥酮法).....	27
3.4.3 三成分分析-蛋白質(莫瑞法).....	28
3.4.4 三成分分析-脂質(紅外線分析法).....	29

3.5 實驗材料與設備	31
3.5.1 實驗藥品	31
3.5.2 實驗設備	32
3.6 效能評估	33
3.6.1 去除率	33
3.6.2 進流有機負荷率	33
3.6.3 單位反應槽體積削減率	34
3.6.4 單位質量(微生物)削減率	34
第四章 結果與討論	35
4.1 化學需氧量(COD)檢測結果	35
4.1.1 檢測數據	35
4.1.2 化學需氧量(COD)去除率	37
4.1.3 進流有機物(COD)負荷率	39
4.1.4 單位反應槽體積 COD 削減率	42
4.1.5 單位質量(微生物)對 COD 削減率	44
4.2 三成分(醣類、蛋白質、脂質)檢測結果	46
4.2.1 檢測數據	46
4.2.2 三成分去除率	47
4.2.3 進流有機物(三成分)負荷率	49
4.2.4 單位反應槽體積(三成分)削減率	50
4.2.5 單位質量(微生物)對三成分削減率	52
4.3 討論	53
第五章 結論與建議	58
5.1 結論	58
5.2 建議	59
參考文獻	60



圖目錄



圖 2-1 都市污水處理廠處理等級	9
圖 2-2 都市污水處理流程圖	10
圖 2-3 都市污水處理廠處理規模統計圖	12
圖 2-4 厭氧反應流程圖	14
圖 3-1 研究架構及實驗內容	21
圖 3-2 實驗流程圖	22
圖 3-3 厭氧固定生物反應系統	23
圖 3-4 醣類檢量線	28
圖 3-5 蛋白質檢量線	29
圖 3-6 脂質檢量線	30
圖 4-1 化學需氧量(COD)檢測結果	37
圖 4-2 化學需氧量(COD)去除率	37
圖 4-3 進流化學需氧量(COD)負荷率	39
圖 4-4 化學需氧量 TCOD 負荷率與去除率	41
圖 4-5 化學需氧量 SCOD 負荷率與去除率	41
圖 4-6 生化需氧量單位反應槽體積削減率	43
圖 4-7 單位微生物質量削減率	44
圖 4-8 三成分(醣類、蛋白質、脂質)檢測結果	46
圖 4-9 三成分(醣類、蛋白質、脂質)去除率	48
圖 4-10 醣類、蛋白質及脂質之進流負荷率	50
圖 4-11 蛋白質及脂質之單位反應槽體積削減率	51
圖 4-12 醣類、蛋白質及脂質之單位質量(微生物)削減率	53
圖 4-13 迪化污水處理廠歷年用電量	57



表目錄

表 2-1 全國各縣市公共污水下水道普及率統計表	8
表 2-2 都市污水處理廠及處理水量統計表	11
表 2-3 各種不性質之廢(污)水組成物質	16
表 2-4 都市污水成分分析	17
表 4-1 化學需氧量(COD)檢測結果	36
表 4-2 化學需氧量(COD)去除率	38
表 4-3 進流化學需氧量(COD)負荷率	40
表 4-4 單位反應槽體積生化需氧量削減率	42
表 4-5 單位微生物質量削減率	45
表 4-6 三成分(醣類、蛋白質、脂質)檢測結果	47
表 4-7 醣類、蛋白質、脂質)去除率	48
表 4-8 醣類蛋白質及脂質進流負荷率	49
表 4-9 蛋白質及脂質之單位反應槽體積削減率	51
表 4-10 醣類、蛋白質及脂質之單位質量(微生物)削減率	52
表 4-11 活性污泥法之種類及設計參數	57

第一章 前言



1.1 研究緣起

隨著都市化的腳步，衛生下水道建設日益受到重視，用戶接管率節節升高，都市污水處理量及水質也跟著向上攀升，排入自然環境(溪流、河川、大海及大氣等)的污染物質也越來越大，而為了處理大量的都市污水，都市污水處理廠陸續興建、營運，消耗的能源(電力、自來水等)當然也隨著增加，也因此，都市污水處理廠處理成效的優劣，除了影響環境衛生、人體健康以外，對自然環境負荷的增加、生態的衝擊等都將造成極大的影響，而減少能源的消耗、降低對環境資源的取用，以實現永續環境的目標，也將是現代化都市污水處理廠的最重要課題。

傳統都市污水處理程序以好氧性生物處理為主軸，如活性污泥法、接觸曝氣法、RBC、階梯式曝氣法、SBR.....等，主要係其設計條件簡單，操作維護容易，但好氧系統對 $\text{NH}_4\text{-N}$ 之處理成效有限，因此其後則導入部分厭氧處理概念以提升 $\text{NH}_4\text{-N}$ 之去除效率，如 TNCU、AO、 A_2O等，惟此類以好氧生物為主之處理系統，需每日 24 小時不間段供應氧氣給曝氣系統，以維持一定數量(濃度)之微生物，此時，不論採用何種機械設備(如表面曝氣機、曝氣攪拌機、噴射式曝氣機、魯氏鼓風機、離心式鼓風機.....等)供氧，均需耗用極大之電力，單就此一部分而言(僅考慮曝氣機，不考慮其他如泵等設備)，其耗用之電力即約占整座污水處理廠耗用電力之三分之一(甚至超過)，在電力能源短缺的今天，如能有效節電，將會是一大助益。

厭氧生物處理雖可解決耗電問題，但因其水力停留時間(HRT)較長，用地面積大，操作條件較為複雜，易受進流污水水質影響(如水溫、有機成分的變化等)，導致處理成本增加；而近年來固定生物處理技術的研發，則改善了前述的缺點，使操

作維護作業簡單化、減少水質突增變化對處理程序的影響、產生的污泥量少，且可有效的去除碳氮，大幅提高都市污水厭氧生物處理的可行性。

另一項可能影響都市污水厭氧生物處理效能的因子則是都市污水的成分，醣類、脂質及蛋白質是其中主要的有機物質，約佔都市污水中有機成分的一半以上，且各種成分之降解效率有極大差異，依 Fang et al. (2000)研究結果，在厭氧生物處理程序中，蛋白質與脂質在低水力停留時間時，較難以轉換成甲烷氣，且若厭氧反應之中間產物，如長鏈脂肪酸、胺基酸等之濃度過高，將對酸生成菌、氫生成菌以及甲烷生成菌造成抑制，進而影響整體反應之產氣效率。

本研究將以全實廠都市污水進行固定厭氧生物處理程序測試，除探討其除碳效能外，並將檢測及觀察其中醣類、脂質及蛋白質之濃度變化，期為厭氧生物處理都市污水尋找出更有利之操作環境。


1.2 研究目的及項目

本研究於實驗室設置以固定生物技術為核心的厭氧反應系統，並以實際都市污水進行馴化，待反應系統穩定後，分別以不同的水力停留時間(16 小時、12 小時、8 小時及 6 小時)進行測試反應系統成效，並探討反應系統於不同停留時間下的去除效能，找出此厭氧固定生物反應系統應用於實際污水廠之最佳操作 HRT 及可行性。

為減少能源消耗及貼近實際污水處理場的操作條件，本研究將反應系統之操作環境設定為 $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，另為使操作成效之比較更務實，本研究以採取單一污水水處理廠相同地點之污水作為反應系統之進流污水。

研究項目有：

- (1) 厭氧固定生物反應系統處理都市污水之 COD 進、出流濃度檢測及去除效能評估。

- 
- (2) 比較厭氧固定生物反應系統在 HRT=16 小時、HRT=12 小時、HRT=8 小時及 HRT=6 小時的條件下處理都市污水的成效。
- (3) 比較厭氧固定生物反應系統在 HRT=12 小時、HRT=8 小時及 HRT=6 小時的條件下處理都市污水時進、出流污水中所含醣類、脂質及蛋白質成分的濃度變化及去除效能評估。



第二章 文獻回顧

2.1 台灣都市污水處理現況

台灣地區於西元 1958 年籌建中興新村時，興建第一個分流式下水道系統及污水處理廠後，至 1968 年台北市闢建雨水下水道系統開始，下水道才正式開始走向雨污分流制，其後公共污水下水道普及率漸有成長，截至 2018 年 11 月止，全國公共污水下水道普及率為 33.56%(詳表 2-1)，其中又以台北市的普及率 78.07% 為最高，連江縣、新北市、高雄市及金門縣則分居 2~5 名，其普及率分別為 71.84%、58.75%、42.63%、34.49%，且澎湖縣目前仍無公共下水道設施，普及率為 0。

表 2-1 全國各縣市公共污水下水道普及率統計表

縣市別	普及率	縣市別	普及率
新北市	58.75%	嘉義縣	8.20%
台北市	78.07%	屏東縣	12.86%
桃園市	11.19%	台東縣	0.57%
台中市	17.51%	花蓮縣	32.85%
台南市	18.97%	澎湖縣	0.00%
高雄市	42.63%	基隆市	33.74%
宜蘭縣	30.31%	新竹市	17.19%
新竹縣	17.17%	嘉義市	0.55%
苗栗縣	16.86%	雲林縣	4.53%
彰化縣	1.04%	金門縣	34.49%
南投縣	4.47%	連江縣	71.84%

註：全國公共污水下水道普及率為 33.56%，資料截止日期為 2018 年 11 月 30 日
資料來源：內政部營建署

2018 年第四季全國公共污水處理廠資料管理系統的統計資料顯示，全國(不含連江縣)共有 80 座都市污水處理廠(水資源回收中心)，扣除仍在施工或設計中的案場後，實際已在運轉的共有 65 座，總實際處理水量為 2,788,641 CMD，僅約佔運轉中之污水處理廠總設計處理水量(4,406,535 CMD)之 63.28%，其中，實際處理水量低於設計處理水量 50% 者計 44 座，佔運轉中案場總數將近 70%，因此總體而言，仍有相當大的處理餘裕量。

依全國公共污水處理廠資料管理系統的統計資料顯示，全國(不含連江縣)80 座都市污水處理廠中，設計處理流程為初級處理(僅經沉澱池後即予排放)共有 4 座(5.19%)，二級處理流程有 62 座(76.63%)，屬三級處理流程者則有 14 座(18.18%)，各級別分布整理如圖 2-1；二、三級處理流程多採用好氧生物處理流程或好氧/缺氧/厭氧並存之生物處理流程，其特色為均須每日 24 小供應氧氣給微生物進行分解有機物使用，因此，污水處理廠大部分的能耗均於此流程產生；圖 2-2 為都市污水處理廠普遍採用之處理流程圖。都市污水處理廠處理等級

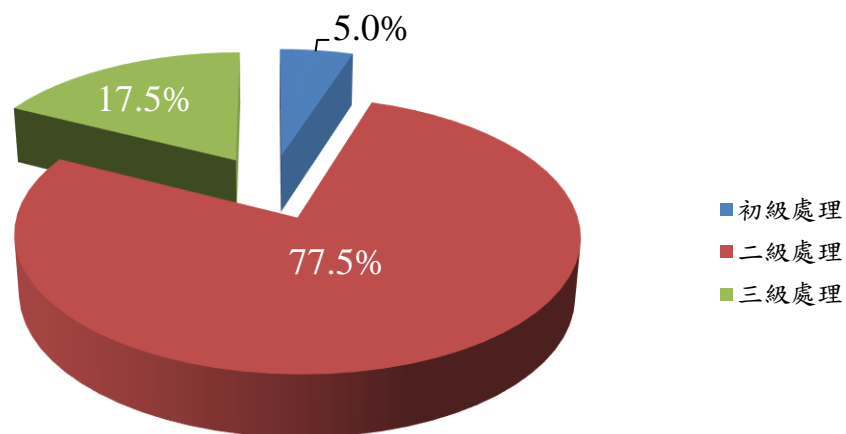


圖 2-1 都市污水處理廠處理等級

(整理自全國公共污水處理廠資料管理系統)

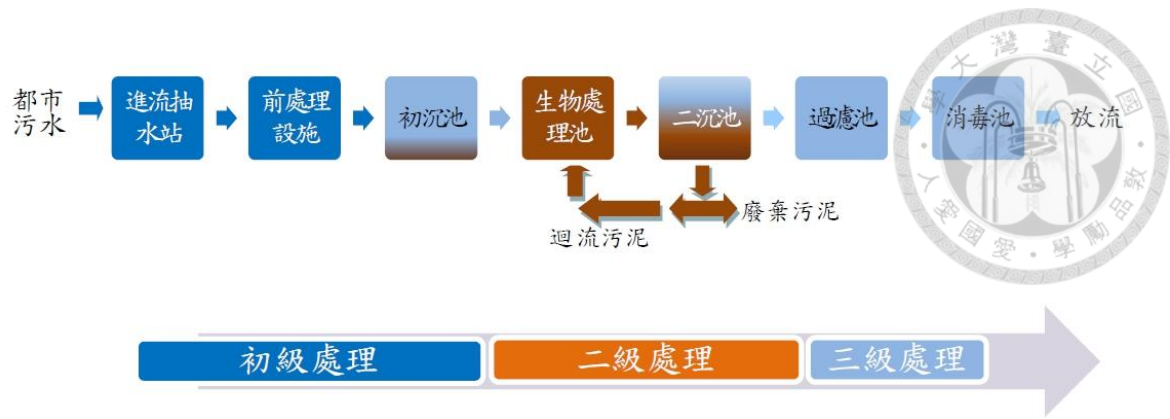


圖 2-2 都市污水處理流程圖

在處理效能部分，全國(不含連江縣)二級以上都市污水處理廠平均放流水水質 BOD₅、COD 及 SS 約為 6.5 mg/L、23.1 mg/L 及 6.2 mg/L，其平均去除率則分別達到 85.6%、82.5% 及 90%。

2.1.1 都市污水處理廠分布

截至 2018 年第四季為止，全國(不含連江縣)都市污水處理廠及處理水量如表 2-2 所示(統計自全國公共污水處理廠資料管理系統)，其中，因迪化污水處理廠及八里污水處理廠為台北市、新北市及基隆市之共用系統，因此如併計其處理量，則北北基區之總設計處理水量將高達 2,303,400 CMD，應與本區域為全國最先建置污水下水道系統及人口高度集中有關。

表 2-2 都市污水處理廠及處理水量統計表

縣市別	總數	設計處理水量		實際處理水量	
		CMD	運轉中	CMD	
台北市	2	740,000	2	528,690	
新北市	7	1,462,900	6	1,138,914	
基隆市	2	100,500	2	18,403	
宜蘭縣	2	60,000	2	49,352	
新竹縣	2	81,000	2	22,895	
桃園市	7	135,785	6	45,635	
花蓮縣	1	50,000	1	41,515	
新竹市	1	30,000	1	21,072	
苗栗縣	5	63,540	4	13,395	
台中市	9	305,385	8	112,501	
彰化縣	2	21,200	1	2,095	
南投縣	5	30,700	4	2,724	
雲林縣	3	27,100	1	6,516	
嘉義縣	4	32,950	3	6,211	
嘉義市	1	12,000	1	-	
台南市	7	268,500	6	137,147	
高雄市	7	1,220,600	6	595,345	
屏東縣	4	60,600	3	40,201	
金門縣	5	9,383	5	5,035	
澎湖縣	2	0	0	0	
台東縣	2	17,400	1	995	
合計	80	4,729,543	65	2,788,641	

(統計自全國公共污水處理廠資料管理系統)

倘以都市污水處理廠之處理規模(設計處理水量)區分(如圖 2-3)，小廠(日處理量不足 500 CMD 者)及大廠(日處理量高於 100,000 CMD 者)所占比例均不足 10%，小廠多設置於偏遠地區或景點，大廠則設置於人口稠密區，處理規模比例最高者為中型廠(日處理量 5,001~30,000 CMD)，應與鄉村逐漸都市化之趨勢有關。

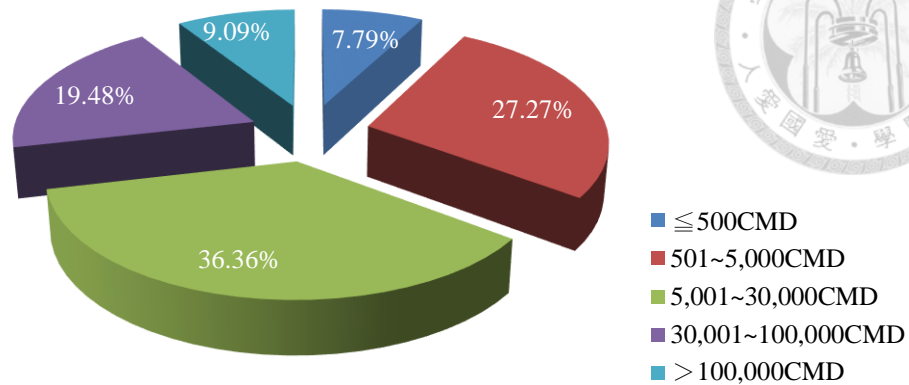


圖 2-3 都市污水處理廠處理規模統計圖
(整理自全國公共污水處理廠資料管理系統)

2.1.2 都市進流污水水質

早期都市污水處理廠均以 $BOD_5 = 250 \text{ mg/L}$ 及 $SS = 250 \text{ mg/L}$ 作為進流污水水質之設計標準，處理水量則以每人每日產生 250 L 或自來水使用量之 80% 估算，惟因各污水處理廠之實際運轉數據均顯示進流污水之水質及水量均遠低於設計值，因此近年已將進流水質設計標準降低為 $BOD_5 = 180 \text{ mg/L}$ 及 $SS = 180 \text{ mg/L}$ ，處理水量則以每人每日產生 200~225 L 污水作為估算基準。

依全國公共污水處理廠資料管理系統的統計資料顯示，全國都市污水處理廠(部分案廠未上傳登錄)在 2017 年平均進流水質 BOD_5 約為 99.7 mg/L (COD 約為 201 mg/L)，最高值為台中市臺中港特定區水資源回收中心的 302 mg/L (COD 為 593 mg/L)，最低值為新北市坪林污水處理廠的 7 mg/L (COD 為 65 mg/L)；另全國平均進流 SS 約為 115.6 mg/L ，最高值為台中市福田水資源回收中心的 478 mg/L ，最低值則為高雄市中區污水處理廠的 24 mg/L ；，其中，因台中市臺中港特定區水資源回收中心所處理之污水包括設立於該特定區內之工廠排水，因此其進流 BOD_5 高於平均值逾 3 倍，而台中市福田水資源回收

中心則因進流水之採樣點位於全廠回流水匯集點後方，因此進流 SS 高於平均值逾 4 倍。

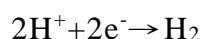


2.2 厭氧生物處理

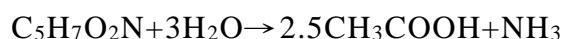
厭氧生物處理係利用在沒有氧氣環境中生存的厭氧菌(微生物)所進行的代謝作用，將污水中的有機物質降解，以達到水質淨化的目的，厭氧消化反應則是厭氧生物的作用過程，主要分為：(1)水解(Hydrolysis)、(2)酸化(Acidogenesis)、(3)甲烷化(Methanogenesis) 三個階段，如圖 2-4 所示(Abdelgadir et al., 2014)。

厭氧消化反應的第一步驟稱為「水解反應」，其反應機制為污水中的主要有機成分--醣類、蛋白質、脂質等大分子，透過胞外酵素的水解作用後分解成小分子，如單糖、胺基酸等；經過水解作用後，大分子及不可溶的有機物分解成較小、可溶的有機物，並藉由細胞膜上特殊蛋白質的傳輸而進出細胞膜，以作為發酵作用的能量來源；在水解化過程中，醣類的降解速率最快，蛋白質與脂質則相對較為緩慢，因此整體水解反應的速率將由水中蛋白質及脂質含量的多寡決定。

厭氧消化反應的第二個步驟稱為「酸化反應」，在厭氧環境中，酸生成菌會將經水解後的小分子有機物進一步氧化成揮發性脂肪酸(Volatile fatty acid, VFA)，如甲酸、乙酸、丙酸、丁酸等，並將有機物作為電子接受者以降解 COD，最終產物則以乙酸為主；然而因不同的反應環境及條件，優勢菌種將隨之變化，各種產物的濃度當然也不盡相同；其中氫氣化反應就是由一部分具有特殊酵素系統的厭氧菌將小分子有機物分解成乙酸、二氧化碳及氫氣等產物所產生的反應，特性為能將氫離子作為電子接受者而生成氫氣，其反應式為：

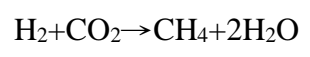


酸化反應最終代謝產物為甲酸、乙酸、二氧化碳與氫氣等，反應式如下：





厭氧消化反應的最後步驟稱為「甲烷化」，甲烷化主要由兩種甲烷菌群進行作用，其一為以二氧化碳作為碳源，並經代謝後將二氧化碳作為電子接受者，進而產生甲烷(即將氫氣氧化以獲得能量)之甲烷菌，其反應式如下：



另一種甲烷菌則為將乙酸氧化以生成甲烷，並藉以獲得能量者，其反應式為：

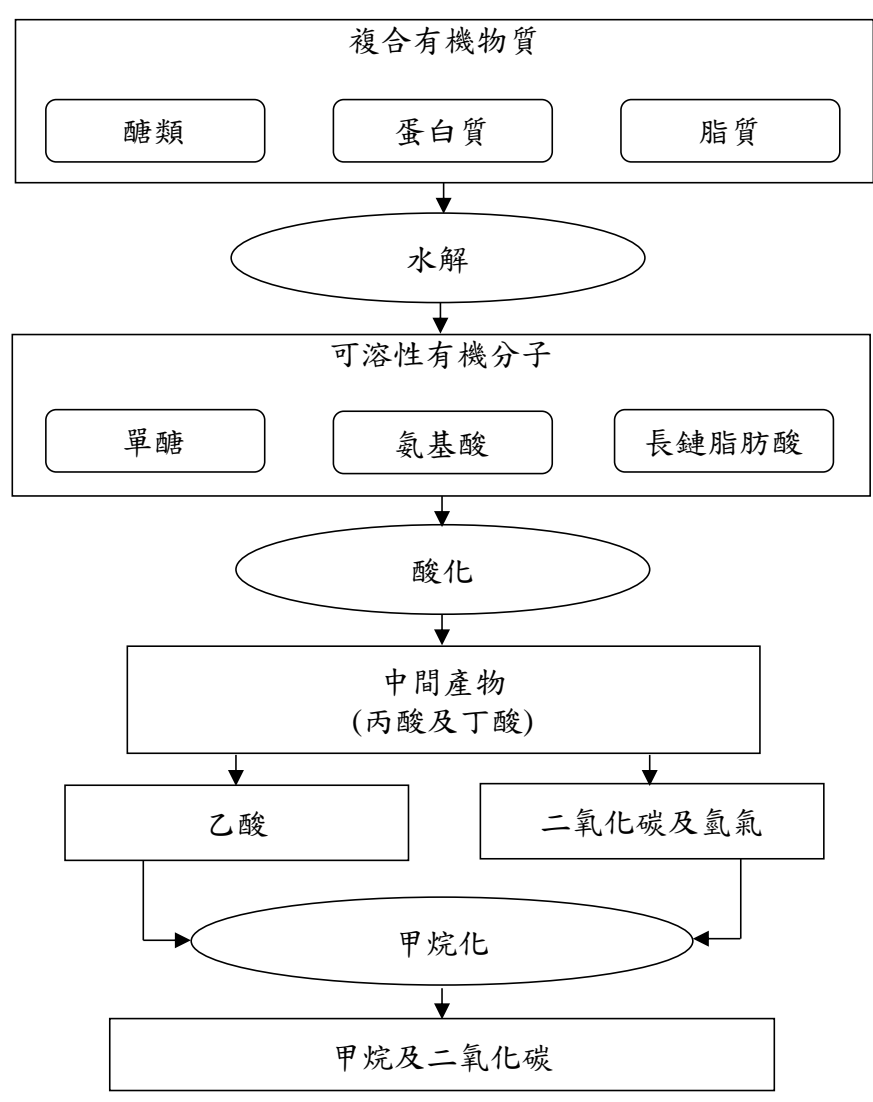
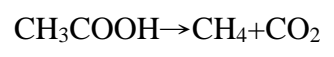


圖 2-4 厭氧反應流程圖
(整理自 Abdelgadir et al., 2014)



2.3 都市污水中的有機成分

都市污水是由於人類一般日常生活及其相關活動所產生，如餐飲、廁所排泄物(糞、尿等)、洗衣、洗碗、洗澡及移動(如觀光)等，尤其近年來飼養寵物大行其道、因此行為而衍生的寵物清洗、糞糞、尿等，所產生的固體與液體的廢棄物質，都透過用戶接管而進入下水道系統終，並經由污水下水道管網及抽水站的傳輸，最終來到污水處理廠進行處理後排放入承受水體(如河川、溪流及海洋等)。

一般都市污水廠處理流程，包括前處理(攔污機、沉砂池、初級池)、生物處理系統，將懸浮固體物、溶解性有機物質等去除，再經由二沉池進行固(微生物)液(處理水)分離，並確保處理水達排放標準後予以消毒排放，以減少對承受水體及環境之危害。

都市污水中的有機成分主要由碳、氫、氧三種元素組合而成，經污水處理廠的處理流程，將有機的大分子透過水解作用變成諸多不同種類的小分子，如：澱粉、纖維素、木質素等經水解作用變成雙糖，再形成溶解性單糖；蛋白質則須經由特定水解酵素水解後分解成胺基酸及胺基酸；脂質則經脂肪酶水解作用分解成甘油及脂肪酸。

由於都市污水的來源眾多且成分複雜，有機分子種類繁多，因此其化學特性及組成比例將影響污水處理廠的處理成效，尤其在生物處理系統，更是影響成敗的關鍵指標，如：脂質的不親水性(與水不互溶)及黏滯性，會集結成浮渣而衍生問題，另其水解所產生的長鏈脂肪酸(Long chain fatty acids, LCFA)，會抑制微生物的生長而使生物系統成效不彰。

生物系統市都市市污水處理廠的核心程序，若其處理成效不彰將使出流水質不穩定，甚至病媒孳生而造成環境衛生上的問題，而究其根源，實乃經由人類的多樣性活動所產生複雜的污水特性所造成。

Liu et al. (2000)的研究指出，都市污水由有機物與無機物組成，而相較於其他廢污水，其組成複雜及多樣，如醣類、脂質、蛋白質、腐殖酸、表面活性劑、酚及其他新興污染物質等都在研究中被檢出(如表 2-3)，也印證了都市污水組成的高複雜程度。

表 2-3 各種不性質之廢(污)水組成物質

物質名稱	都市污水	工業廢水	商業廢水	農業廢水	地表逕流
醣類	◎	◎	◎	-	-
脂質	◎	-	◎	-	-
腐殖酸	◎	◎	◎	◎	◎
長鏈脂肪酸	◎	-	-	-	-
農藥	-	-	-	◎	-
酚類	-	◎	-	-	-
蛋白質	◎	◎	◎	-	-
表面活性劑	◎	◎	◎	-	-
揮發性有機化合物	◎	◎	◎	-	-
鹼度	◎	-	-	-	◎
氯化物	◎	◎	-	-	◎
重金屬	-	◎	-	-	-
氮	◎	◎	-	◎	-
磷	◎	◎	◎	-	◎
硫	◎	◎	◎	-	-
硫化氫	◎	-	◎	-	-
甲烷氣	◎	-	-	-	-
有毒有機物	-	◎	-	-	-
新興污染物	◎	-	-	-	-

◎表”檢出”

資料來源：Liu et al., 2000

在許多對都市污水成分的研究中，雖其成分複雜多樣，但其中以醣類、脂質及蛋白質為其主要有機物組成，表 2-4 為丹麥及美國對都市污水的成分分析 (Raunkjaer et al., 1994；Sophonsiri et al., 2004)，從表中可發現醣類、脂質及蛋白質共約佔總體 COD 之比例為 44.3%~77.0%，另在 Naris et al (1978) 的研究中更顯示，在美國的兩個不同污水處理廠裡，主要的化學成分為醣類與蛋白質，亦發現在污水中有揮發酸的存在，推斷應是污水在到達污水處理廠以前，污水在密閉的下水道管線中的停留時間過長所造成，而揮發酸中以乙酸最多，丙酸則次之。

表 2-4 都市污水成分分析

地區	COD (mg/L)	醣類 (COD %)	脂質 (COD %)	蛋白質 (COD %)	其他 (COD%)	參考文獻
Aalborg west		4.06 - 28.7	23.6 - 32.8	21.5 - 25.4	-	
Hjallerup	180 - 480	2.4 - 6.3	8.25 - 34.3	15.9 - 25.9	-	
Aalborg east		3.4 - 11.5	6.05 - 30.03	17.8 - 35.1	-	Raunkjaer et al (1994) 丹麥，初沉前
Aabybro		3.78 - 10.78	39.6 - 41.32	20.07 - 24.91	-	
平均		18	31	28	23	
Urbana-Champaign Sanitary District Northeast Plant	309	5.7	26.6	12	55.7	Sophonsiri et al (2004) 美國，初沉前



2.4 厭氧生物處理醣類、蛋白質及脂質

厭氧處理的過程其實相當複雜，在厭氧生物處理系統中包括甲烷化反應中的甲烷菌及產生酸化反應的酸生成菌。其中酸生成菌在反應過程中會將小分子有機物氧化成揮發性脂肪酸(Volatile fatty acid, VFA，如甲、乙、丙、丁酸等)，然而隨著環境條件的不同，菌種也產生變化而有不同，不同菌種的利用及反應型態自然也不盡相同，因此所產生的揮發物質種類與濃度當然大異其趣，這些揮發物質的種類與濃度終將影響到甲烷氣的產氣效果及整體處理成效。

揮發酸在整個厭氧生物處理系統中是一種即時的指標，在反應異常時，可能使揮發酸突然增加，使甲烷菌受到抑制而活性不佳，無法有效將揮發酸(VFAs)轉換成甲烷 (Wang et al., 2009)。因此，當醣類、蛋白質與脂質在厭氧生物處理程序中產生過多量的中間產物時，即可能使系統反應失衡，以致產生過多的揮發酸(VFAs)，進而導致酸生成菌及甲烷菌的活性受到抑制，降低整個系統的處理成效。

1. 醣類

醣類在厭氧生物處理過程中，可非常快速的水解並轉換成揮發酸(VFAs)，再快速的轉換成 CH_4 與 CO_2 ，相較於蛋白質與脂質，醣類可以最短的時間完成反應；因此已有諸多利用醣類快速降解的特性與其他有機物進行共降解的研究，試圖藉此提高其他較難降解的有機物的降解效率，例如在 Elbeshbishy and Nakhla (2012)的研究中，即以 5 組不同比例的蛋白質混合醣類進行共降解試驗，結果顯示以 20%的蛋白質與 80%的醣類共降解，較僅有蛋白質單獨降解時，其甲烷產率較高，因此水中醣類與蛋白質、脂質間的不同比例所產生的共降解效應，將有助於提升厭氧生物處理系統的整體效能。



2. 蛋白質

倘在都市污水處理廠以較短的水力停留時間操作可能會造成蛋白質水解不完全的現象；在 Breure et al (1986)的研究中，當水力停留時間為 30 分鐘時，僅 84%蛋白質被水解成胺基酸，水解後的胺基酸也僅 85%會酸化成揮發酸，進一步研究則發現蛋白質反應緩慢的原因為蛋白質的比基質利用率低於醣類，且生物利用蛋白質的生物係數也低於醣類；另外，當以蛋白質作為厭氧反應的基質時，造成污泥結構發生改變，在低水力停留時間下，污泥會被沖出反應槽而使反應槽的微生物數量降低。

3. 脂質

脂質在化學結構上具有較多的碳量，因此，相較於蛋白質與醣類在厭氧生物處理上會有較高的甲烷產量；理論上，1 公克的三酸甘油脂會轉換成 1.081 公克的甲烷量；但脂質的比基質利用率差，在 Petruy and Lettinga (1997)的研究中，含油脂量高的乳製品廢水在水解、酸化及甲烷化的試驗結果顯示：在反應進行 26 天後，只有 22%有機物轉換成甲烷氣；Cirne et al., (2007)的研究結果也指出，當脂質在水體中的含量超過 31%時，甲烷的產氣率有明顯的下降趨勢，因此，脂質的含量，會是甲烷菌活性的限制因子。也因此，為了解決脂質在降解上的困境，在處理諸如食品業、畜牧業等脂質含量高的廢水時，通常會添加醣類或蛋白質，藉由共降解效應來使脂質在降解的過程中能反應完整，並提高甲烷的產氣量(Cirne et al., 2007；Wang et al., 2016)。

第三章 實驗方法與材料



3.1 實驗內容與架構

一般實驗室建立模組進行厭氧生物處理污水時，均採用合成污水作為進流污水，其優點為水質穩定、進流基質高、可依研究目的調整及控制進流水質，做各種不同情境、比例組合，多樣化及深入探討各種可能樣態，利於獲得完整之數據及資訊，可供探討及了解厭氧消化對污水中主要成分之降解機制。

台灣地區都市污水係由家戶接管後透過污水下水道管網及抽水站集中至污水處理廠進行處理，由於污水下水道管網橫跨區域相當寬廣，拉長了管線長度，且因通常都以收集區域之最大量設計管線口徑，導致管中流速過低產生沉積現象，因此污水處理廠之進流污水基質均遠低於設計質(如迪化污水處理廠原設計進流 BOD_5 為 180 mg/L，但實際平均進流值僅約 90~100 mg/L，已造成污水處理廠操作上之極大困擾。

目前台灣地區之都市污水處理廠大多採用好氧或好/兼/缺氧混合生物處理，由於需不間斷提供微生物所需氧分及迴流生物污泥，必須耗費大量電能源來達成目的，又因需廢棄部分生物污泥來維持微生物的活力，必須再耗費其他能源及人/物力，都使得操作維護費用居高不下，因此，以厭氧方式來處理都市污水便成為眾多單位、學者及專業人士研究之重點。

厭氧處理不須曝氣、可節能、產生之甲烷可轉換為能量提供使用，而採用固定生物技術的驗氧處理不須迴流污泥，可有效提升 SRT，且操作上更為容易，因此本研究以固定生物厭氧反應模組進行，而為了更貼近實際污水處理廠之操作條件，全程採用實廠污水作為模組之進流污水，並在 25°C 的環境下運轉，以期研究成果可提供實廠操作上之參考。

基於此，本研究擬定研究架構及實驗內容如圖 3-1。



本研究之實驗內容包括：水力停留時間(HRT)之調整、研究模組之整體 COD 去除效能之檢測、進/出流之三成分(醣類蛋白質及脂質)之檢測分析及成果評估。

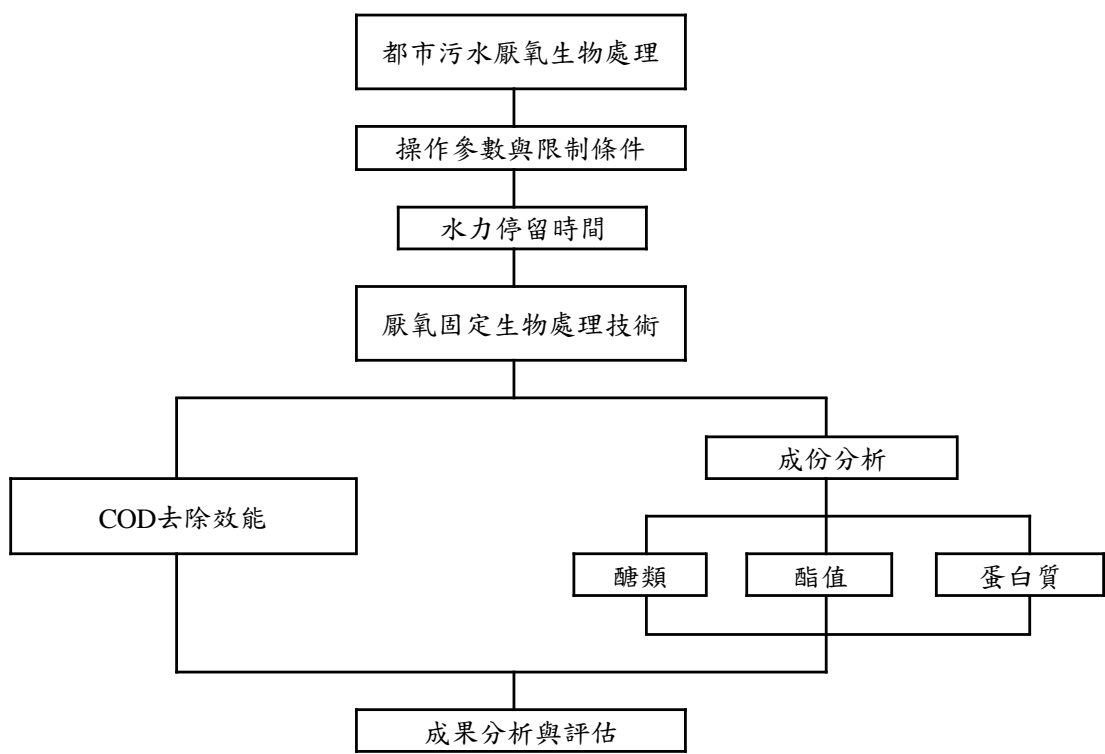


圖 3-1 研究架構及實驗內容



3.2 實驗方法與流程

以實驗室既有之厭氧固定生物反應系統進行，設置進流污水貯存槽，透過蠕動泵調整流速，將污水以連續進水方式進入反應槽處理，並以水力停留時間(HRT)16小時、12小時、8小時及6小時四個階段進行試驗，反應槽溫度設定為恆溫 25°C，實驗流程及各階段檢測項目如圖 3-2。

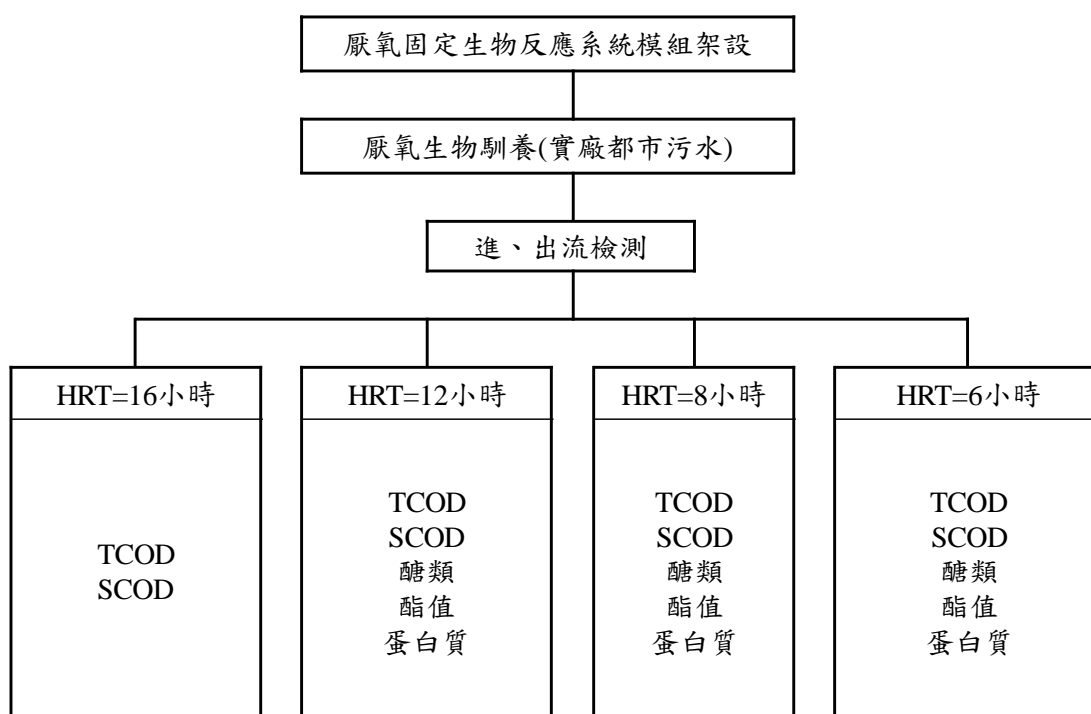


圖 3-2 實驗流程圖

厭氧固定生物反應系統如圖 3-3 所示，其組成包括進流水貯存槽、進流蠕動泵、厭氧固定生物反應槽、出流水觀測管及出流水貯存槽等。

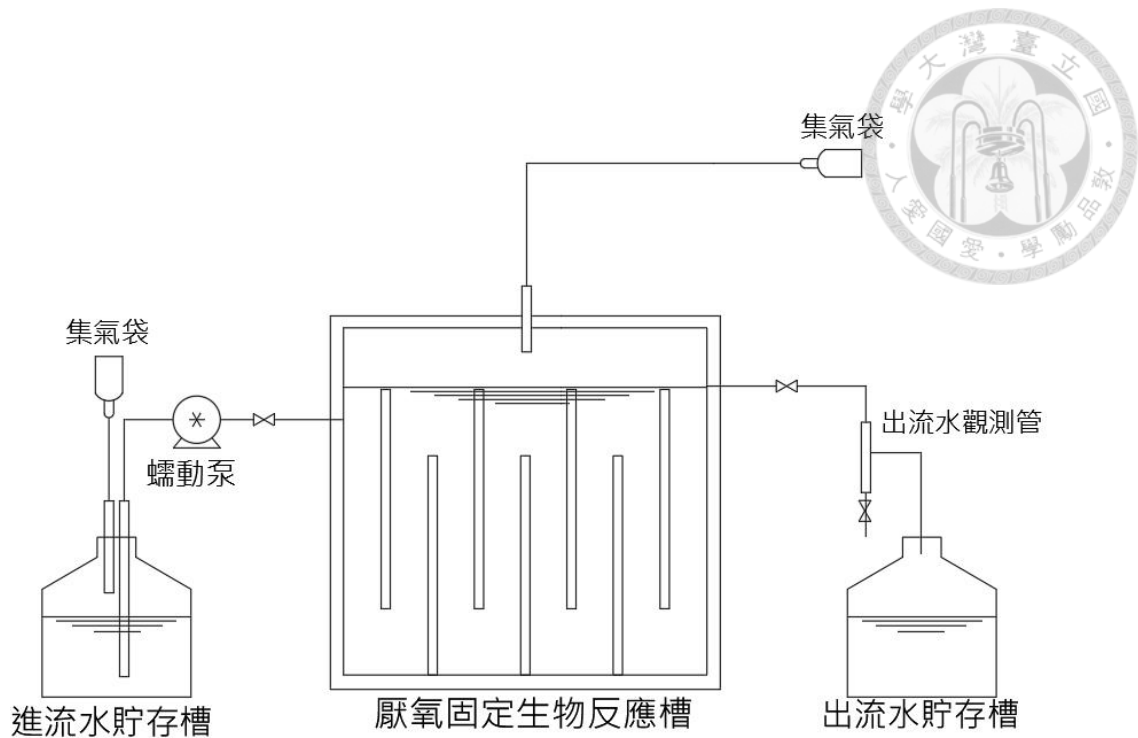


圖 3-3 厭氧固定生物反應系統

厭氧固定生物反應槽為密閉、隔板式，採壓克力材質，外觀尺寸為 30 cmL ×20 cmW×40 cmH)，總體積為 24 L，固定生物平板共 11 片，總有效反應體積為 15.6 L，生物質量為 42.4 g/L，操作溫度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 。

由於本研究模組(厭氧固定生物反應系統)已穩定運轉逾 1 年，因此不需進行啟動程序，僅需於實驗開始時先行以實廠污水馴養反應槽內微生物，由水力停留時間 24 小時開時逐步調整至 16 小時後開始進行本研究之實驗流程。

實驗進行後，每日由出流水觀測管觀察出水狀況、清理出水管以避免管線堵塞，出水狀況無異常則依各階段檢測項目及數量進行採樣。

各階段完成，變更水力停留時間以漸進式調整流量進行，調整期間以 1~3 天為原則，調整到位後每日採樣檢測出流水 TCOD，待出流水 TCOD 穩定後(原則以連續 3 天之測值判斷)，再進行階段性檢測項目之採樣作業。



3.3 進流水來源及水質

本研究以採取單一污水水處理廠相同地點之污水作為反應系統之進流污水，考量實驗用水水源取得之方便性，且更具有都市污水之代表性，本研究採用接管普及率最高之台北市迪化污水處理廠初沉池出流水作為研究模組之進流水，依實際需求定期由迪化污水處理廠初沉池出流渠道取水，並以桶裝方式運送至實驗室，未即時使用部分則暫存於實驗室冰箱內。

迪化污水處理廠原於 1979 年 7 月啟用，為初級處理廠，每日負責處理台北市除民生社區外之都市污水 25 萬噸(250,000 CMD)，配合環保署 1998 年 1 月 1 日起實施新排放標準，於 1998 年 4 月停廠改建並提升為二級處理廠，於 2006 年完工後重新啟用，設計處理污水量增為 500,000 CMD，採半地下化設計，其上方約 4 公頃土地興建迪化休閒運動公園，設置兒童遊樂場、溜冰場、壘球場、籃球場、網球場等設施，供民眾無償使用。

迪化污水處理廠為全國規模最大的二級污水處理廠，採用雙層式沈澱池設計(初沉池及二沉池均是)、深槽階段曝氣二級生物處理流程，並設有三級處理水回收再利用設備(10,000 CMD)，可供作廠區沖洗、植栽澆灌使用，並提供民間免費取用(植栽、街道沖洗等)。

迪化污水處理廠自 2006 年啟用以來，歷年來平均進流水水質 BOD₅ 約為 101 mg/L (COD 約為 195 mg/L)，SS 則約為 97 mg/L；平均放流水水質 BOD₅ 約為 10 mg/L (COD 約為 29 mg/L)，SS 約為 14 mg/L；進流水水量則約為 430,000 CMD~450,000 CMD。

迪化污水處理廠歷年來進、放流水水質如表 3-1 及表 3-2。

表 3-1 迪化污水處理廠歷年進流水水質

項目	透視度	水溫	溶氧	pH	BOD ₅	COD	SS	氨氮	硝酸鹽 氮	亞硝酸 鹽氮	有機氮	總磷	大腸桿菌群 數	總油脂
日期	cm	°C	mg/L		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	CFU/100ml	mg/L
96年	10.4	24.1	4.1	7	58.5	135.7	67.1	11.12	0.19	0.03	6.94	1.523	7.80×10 ⁶	4.2
97年	9.1	24.1	4	7.1	93.6	160.6	97.1	12.35	0.15	0.03	7.66	2.579	1.10×10 ⁷	5.4
98年	7.4	24.4	3.4	7.2	70.7	147.8	85.9	13.61	0.16	0.03	8.38	2.936	1.20×10 ⁷	9.5
99年	5.4	24	2.9	7.2	120.9	210.9	122.1	16.2	0.1	0.02	7.89	3.262	1.90×10 ⁷	15.2
100年	5.3	23.6	2.9	7.2	189.6	283	139.5	16.73	0.35	0.06	7.48	3.804	1.70×10 ⁷	20
101年	6.9	23.8	2.4	7.2	149.9	254.9	108.8	15.64	0.4	0.41	10.63	3.171	1.20×10 ⁷	15.5
102年	9.6	23.6	3.1	7.2	81.2	157.4	78	14.16	0.7	0.1	13.49	2.909	5.60×10 ⁶	11.9
103年	9.3	23.3	3.6	7.3	90.4	188.3	89.7	16.6	0.38	0.06	11.93	2.977	6.80×10 ⁶	12.9
104年	9.5	23.8	3.8	7.3	85.5	172.9	86.4	18.68	0.14	0.06	9.94	3.67	6.40×10 ⁶	12.2
105年	10.2	23.9	3.4	7.2	88.7	180	85.3	17.56	0.23	0.03	9.23	2.114	7.00×10 ⁶	12.4
106年	7.4	22.5	3.3	7.1	85.8	207	88.8	19.32	0.23	0.09	9.33	2.815	5.58×10 ⁶	12.6
107年	6.6	22.4	3.2	6.9	100.1	238.4	115.6	17.39	0.25	0.03	7.67	3.023	5.15×10 ⁶	14.6
歷年平均值	8.1	23.6	3.3	7.2	101.2	194.7	97	15.78	0.27	0.08	9.21	2.899	9.61×10 ⁶	12.2

整理自迪化污水處理廠歷年年報及月報

表 3-2 迪化污水處理廠歷年放流水水質

項目	透視度	水溫	溶氧	pH	BOD ₅	COD	SS	氨氮	硝酸鹽 氮	亞硝酸 鹽氮	有機氮	總磷	大腸桿菌 群數	總油 脂	餘氯
日期	cm	°C	mg/L		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	CFU/100ml	mg/L	mg/L
96年	21.9	25	4	6.4	7.6	48.2	22.1	3.87	4.4	0.09	4	1.943	4.30×10 ³	2.1	21.9
97年	26.3	25	3.5	6.5	9.7	36.6	18.4	2.98	3.44	0.12	6.6	1.68	1.40×10 ²	1.4	26.3
98年	29.9	24.7	2.6	6.7	8.3	22.2	12.5	2.16	2.74	0.05	3.86	1.193	2.40×10 ²	1.3	29.9
99年	30	24.5	1.9	6.7	10.1	22.9	10.9	3.25	2.03	0.06	2.74	0.825	6.80×10 ³	1.4	30
100年	30	24.3	1.8	6.9	10.5	24.5	11.7	4.99	1.02	0.2	3.14	1.022	2.30×10 ³	1.1	30
101年	30	24.4	4.4	6.6	9.4	19.5	9.4	2.32	4.06	0.15	3.55	0.86	3.30×10 ³	1.3	30
102年	30	24.2	6.6	6.8	9.4	20.7	10.2	1.96	2.96	0.11	3.86	1	1.90×10 ³	1.5	30
103年	30	23.8	6.5	6.9	9.3	23.9	11.1	3.65	2.48	0.21	3.85	1.068	8.20×10 ³	1.5	30
104年	30	24.3	5.1	7	9.2	29.2	12.7	4.18	0.54	0.3	3.69	2.085	3.40×10 ³	1.5	30
105年	30	24.4	5.4	6.9	9.7	35.1	15	4.08	0.55	0.27	3.77	1.173	4.40×10 ³	1.4	30
106年	29.9	23.3	5.4	6.8	10	31.3	13.4	5.14	0.6	0.3	3.8	1.4	5.78×10 ³	1.6	29.9
107年	28.6	22.7	5.2	6.6	10.6	31.4	14.9	5.38	0.2	0.02	3.4	1.7	5.35×10 ³	1.7	28.6
歷年平均值	28.9	24.2	4.4	6.7	9.5	28.8	13.5	3.66	2.09	0.16	3.86	1.329	3.84×10 ³	1.5	28.9

整理自迪化污水處理廠歷年年報及月報



3.4 水質分析方法

在「厭氧生物處理都市污水：醣類、脂質與蛋白質定量定性分析研究(陳昶瑞, 2017)」中，為了釐清都市污水中主要有機組成所探討的醣類、脂質與蛋白質等三成分之定量定性分析方法，在醣類總量的檢測分析部分，比對「蔥酮法」與「還原糖法」，其檢測試驗結果顯示蔥酮法與還原糖法主要差別在於蔥酮法對多糖檢測後之測值準確度高，且對污水添加回收率明顯優於還原糖法；因此建議以「蔥酮法」作為總醣類之定量分析方法較為適合。

在蛋白質的檢測分析部分則比對「莫瑞法」與「凱氏定氮法」，其中凱氏定氮法在試驗過程中，因 10 mg/L 的查核平均回收率與信噪比(S/N)無法符合品管要求(即凱氏定氮法之分析極限範圍將高於 10 mg/L，不符都市污水中蛋白質的檢測需求)，因此建議以「莫瑞法」作為總蛋白質之定量分析方法較為適合。

在脂質的檢測分析部分比對「紅外線分析法」與「重量萃取法」，其中因重量萃取法在試驗 10、30 mg/L 的查核樣品均存在低回收問題，顯示重量萃取法之極限範圍遠將高於紅外線分析法，因此建議以「紅外線分析法」作為總脂質之定量分析方法較為適合。

本研究對都市污水中的三成分(醣類、脂質與蛋白質)檢測分析方法即採用在「厭氧生物處理都市污水：醣類、脂質與蛋白質定量定性分析研究(陳昶瑞, 2017)」中之「蔥酮法」、「莫瑞法」及「紅外線分析法」。

3.4.1 化學需氧量(COD)

本研究以 HACH DR 3900 水質分析儀(Spectrophotometer)量測化學需氧量(COD)，DR 3900 可量測之 COD 濃度範圍有 15~150 mg/L、及 100~1000 mg/L 兩種。其原理為將待測水樣加入含過量重鉻酸根離子($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)及硫酸、銀離子、汞離子的混合溶液試劑瓶中。其中橙色的二鉻酸根離子會將水樣中之有機物

氧化形成綠色的 Cr(III)，而硫酸的作用是形成酸性的反應環境，銀離子為催化劑，汞則用來中和水樣中氯化物之干擾。當 COD 濃度為 15~150 mg/L 時，DR 3900 是以波長 440 nm 之光線測量試劑瓶中剩餘之 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 濃度，COD 濃度為 100~1000 mg/L 時，則以波長 600 nm 之光線測量試劑瓶中生成之 Cr(III) 濃度。

TCOD 之分析步驟為：直接將 2 mL 待測水樣加入試劑瓶中；SCOD 則先以 0.45 μm 之濾膜過濾後，取過濾後水樣 2 mL 加入加入試劑瓶中；搖晃加入水樣後的試劑瓶使其充分混合後，置入 150°C 之加熱器中加熱 2 小時，並冷卻至室溫後，以 HACH DR 3900 水質分析儀進行檢驗分析。

3.4.2 三成分分析-醣類(蔥酮法)

本研究在醣類的檢測分析方法上採用蔥酮法(Morris, 1948)。

蔥酮法的使用最早來自於 Morris (1948)，後經諸多學者的研究改進，使蔥酮法能在短時間內分析許多的樣品，且在耗用的藥劑上更少；蔥酮法的原理是水樣醣類經水解成單糖，再與蔥酮進行縮合作用，合成藍綠色聚合物，再以其進行比色定量。

實驗步驟為：先秤取 0.2 g 蔥酮與 100 mL 濃硫酸混合，配製成蔥酮試劑備用，再將 1 mL 的待測水樣與 4 mL 的蔥酮試劑混合，將混合後的試管以渦流加熱器在 100 °C 的溫度加熱 15 分鐘後冷卻至室溫後，以 UV 吸收光譜儀在波長 620 nm 下測量其吸光值。

另需以葡萄糖標準品建立檢量線，以推算待測水樣中的醣類濃度，圖 3-4 為本研究建立之醣類檢量線。

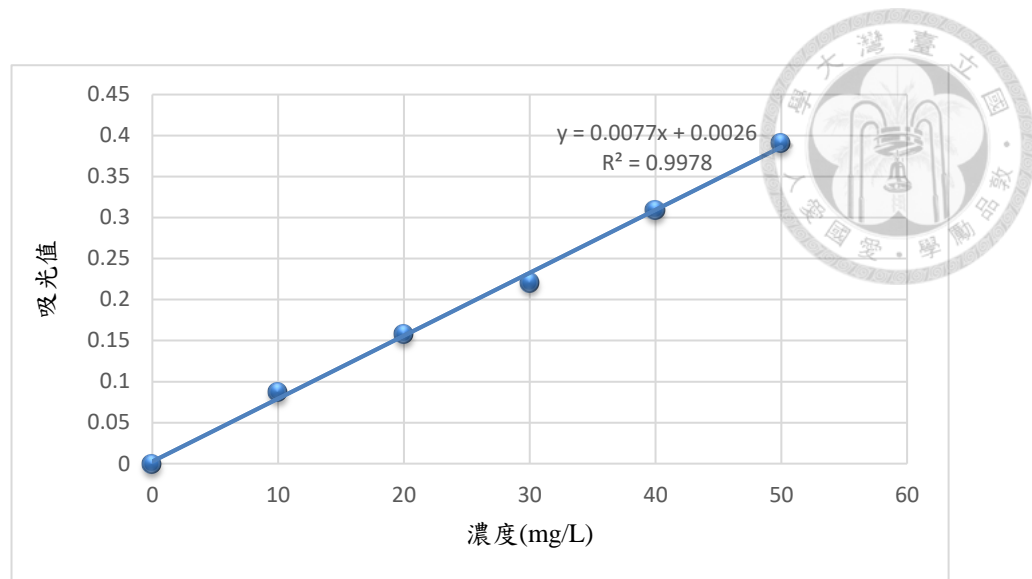


圖 3-4 醣類檢量線

3.4.3 三成分分析-蛋白質(莫瑞法)

本研究在蛋白質的檢測分析方法上採用莫瑞法(Lowry, 1951)。

莫瑞法是由 Lowry 於 1951 年所建立，被廣泛用於生物化學領域及廢(污)水中的蛋白質檢測，幾經改良後，其檢測所需時間較凱氏定氮法縮短許多。

莫瑞法的檢測原理主要依據兩種化學反應，其一為利用混合試劑將蛋白質水解產生的胨肽鍵與鹼性銅離子反應形成雙縮脲(稱為雙縮脲反應(Biuret reaction))；其二為再加入福林-酚試劑，與雙縮脲出現呈色效果。

實驗步驟為：先配製 Modified Lowry 混合溶液與福林-酚試劑備用後。取 0.2 mL 待測水樣與 1 mL Modified Lowry 混合溶液攪拌後靜置 10 分鐘後，續添加 0.1 mL 福林-酚試劑，再混合均勻後靜置 1 小時，以 UV 吸收光譜儀在波長 750 nm 下偵測其吸光值。

Modified Lowry 混合溶液的配製方法為：(1) A 試劑：配製 2% 的 Na_2CO_3 後加入 0.1 N 的 NaOH，(2) B 試劑：配製 1% 的 $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$ ，(3) C 試劑：配

製 0.5% 的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ，(4)將 A、B、C 三試劑混合後，即為 Modified Lowry 混合溶液。

福林-酚試劑的配製方法為：將 2 N 的 Folin-酚試劑與 H_2O 以 1:1 比例混合即可。

另需以牛血清(BSA)標準液建立檢量線，以推算待測水樣中的蛋白質濃度，圖 3-5 為本研究建立之蛋白質檢量線。

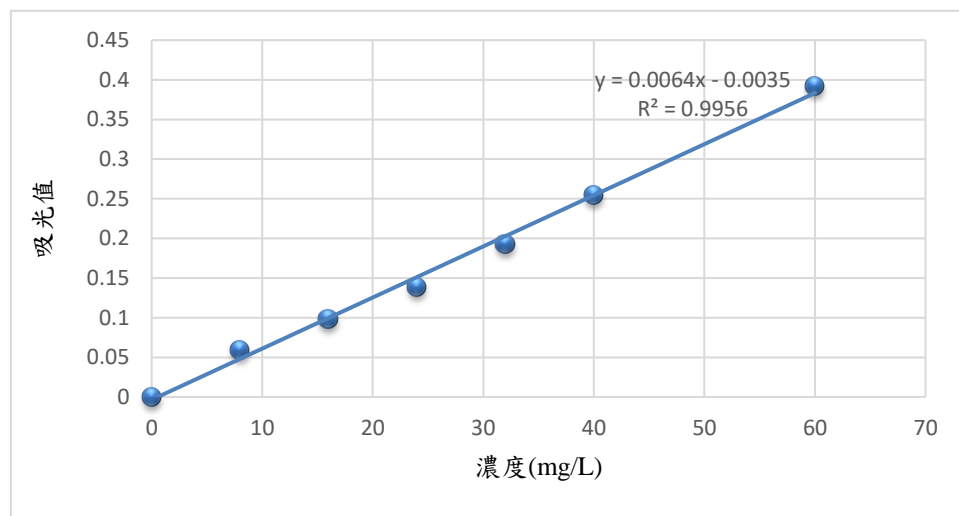


圖 3-5 蛋白質檢量線

3.4.4 三成分分析-脂質(紅外線分析法)

本研究在脂質的檢測分析方法上採用紅外線分析法(APHA, 2012)。

在國際公告的脂質檢測分析方法中，紅外線分析法是近期發展出來的快速檢測方法，準確度更高，且檢測的極限範圍可降低至 0.5~1 mg/L，在分析時因顧及水體中的總碳氫鍵結，必須以萃取溶劑萃取油脂後，再以傅立葉紅外線分析儀(FT-IR)進行檢測。

實驗步驟為：取待測水樣 50 mL 置入試管中，加入 15 mL 的四氯乙烯，震盪數分鐘後靜置使其分層後，撈取其中之有機層，以經 105°C 烘乾後的硫酸

鈉予以去水後，再將水樣以玻璃纖維加上漏斗過濾，重複萃取 3 次後，稀釋至 50 mL，以傅立葉紅外線分析儀(FT-IR)進行檢測分析，分析時，先掃描 2900~3100 cm^{-1} 之波段以建立基線，再觀察 C-H 族群的波峰後換算面積值進行定量， CH_2 產生的吸光訊號約落在 2930 cm^{-1} ， CH_3 則約落在 2960 cm^{-1} 。

另需以辛酸與異戊酸混合成之總石油氫化合物標準液建立檢量線，以推算待測水樣中的脂質濃度，圖 3-6 為本研究建立之脂質檢量線。

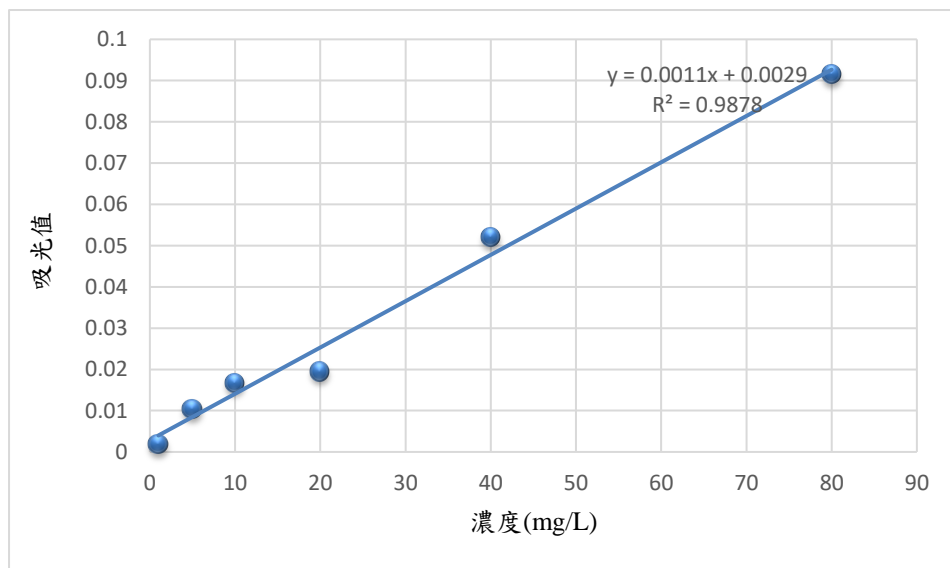


圖 3-6 脂質檢量線



3.5 實驗材料與設備

3.5.1 實驗藥品

化學需氧量(COD)的檢測除需購置含過量重鉻酸根離子($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)及硫酸、銀離子、汞離子的混合溶液試劑瓶外，並不需額外的藥品；蔥酮法(醣類檢測方法)使用之化學藥品為蔥酮試劑；莫瑞法(蛋白質檢測方法)使用的化學藥品包括 Modified Lowry 混合溶液與福林-酚試劑，另須以 BSA 作為蛋白質標準品配製成 100 mg/L 標準儲備液(須冷藏保存)；紅外線分析法(脂質檢測法)使用的化學藥品為四氯乙烯，另須以辛酸與異辛烷作為碳氫化合物標準品(配製方式為：取 0.055 mL 辛酸與 0.072 mL 異辛烷並用四氯乙烯定量至 100 mL 後，再以四氯乙烯溶劑稀釋至 100 mg/L，須冷藏保存)，相關藥品規格與廠牌整理如表 3-3。

表 3-3 實驗用藥品一覽表

檢測項目	檢測方法	化學藥品	藥品/廠牌
醣類	蔥酮法	蔥酮試劑	蔥酮(Anthrone) 97% /美國 Sigma-Aldrich
		混合試劑 Folin-酚試劑	1. 酒石酸鉀鈉(Potassium sodium tartrate, $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、硫酸銅(Copper(II) sulfate, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、碳酸鈉(Sodium carbonate, Na_2CO_3)/日本 Nacalai tesque
蛋白質	莫瑞法	BSA 標準品	2. 氫氧化鈉(Sodium hydroxide, NaOH)/德國 Merck 3. 福林-酚試劑(Folin & Ciocalten Phenol Reagent)與 BSA (Bovine serum albumin)標準品/美國 Thermo scientific
		四氯乙烯 碳氫化合物 標準品	四氯乙烯 (Tetrachloroethylene, C_2Cl_4), $\geq 99.5\%$ 、辛酸(Octanoic acid, $\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2$) 與異辛烷(2,2,4-Trimethylpentane, C_8H_{18}) GC 等級/ 美國 Sigma-Aldrich
脂質	紅外線分 析法		



3.5.2 實驗設備

1. 過濾器材

化學需氧量(SCOD)檢測及三成分(醣類、蛋白質及脂質)檢測前須使用之濾膜孔徑為 0.45 μm ，直徑 47 mm 之醋酸纖維材質搭配過濾器(KP-47S, ADVANTEC MFS., Japan)將待側水樣過濾。

2. HACH DR 3900 水質分析儀

DR 3900 水質分析儀，用於檢測化學需氧量(TCOD、SCOD)，量測波長範圍為 340nm~900nm，波長準確度為 $\pm 1\text{nm}$ ，解析度為 1nm。

3. 分光光度計(UV-3100 Spectrophotometer)

分光光度計(UV-3100 Spectrophotometer)，用於醣類之蔥酮法及蛋白質之莫瑞法，藉由呈色試劑的添加，使待測水樣中的目標物呈色並量測其吸光值，以換算成碳水化合物及蛋白質的濃度。

4. 傅立葉轉換紅外光譜(FT-IR)

傅立葉轉換紅外光譜儀(FT-IR)，用於檢測脂質，觀察溶於四氯乙烯溶劑中的總石油碳氫化合物之 CH_2 與 CH_3 中 C-H 鍵結之吸光值，並以 C-H 族群的波峰後換算面積值來進行定量。

傅立葉轉換紅外光分析儀(FT-IR)之相關資料及設定參數如下：

(1)儀器型號：PerkinElmer Frontier IR/NIR spectrometer (PerkinElmer, Inc., Shelton, CT USA) in mid-IR mode。

(2)實驗室溫度：25 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$

(3)配件：檢測脂質用之定量配件(Oil In Water Analysis Kit)、Quartz/Matched pair 10 mm，英國 Specac 公司。

(3)快速掃瞄資料收集：設定每秒鐘至少可進行 50 次掃瞄。

(4)樣品測量範圍：3200-2700 cm^{-1} 。



3.6 效能評估

為探討研究模組處理效能，本研究將針對各有機成分之去除率、有機負荷率、單位體積削減率及單位微生物質量削減率進行評估，並與實廠(TNCU 處理程序，Taiwan National Central University)之處理成效比對，探討兩者間之處理差異。

3.6.1 去除率

1. 化學需氧量(COD)

$$\text{化學需氧量(COD)去除率(\%)} = \frac{\text{進流 COD} - \text{出流 COD}}{\text{進流 COD}} \times 100\%$$

2. 醣類

$$\text{醣類去除率(\%)} = \frac{\text{進流醣類濃度} - \text{出流醣類濃度}}{\text{進流醣類濃度}} \times 100\%$$

3. 蛋白質

$$\text{蛋白質去除率(\%)} = \frac{\text{進流蛋白質濃度} - \text{出流蛋白質濃度}}{\text{進流蛋白質濃度}} \times 100\%$$

4. 脂質

$$\text{脂質去除率(\%)} = \frac{\text{進流脂質濃度} - \text{出流脂質濃度}}{\text{進流脂質濃度}} \times 100\%$$

3.6.2 進流有機負荷率

$$\begin{aligned} \text{有機負荷率 } L_n &= \frac{\text{進流有機物}}{\text{反應槽體積}} \\ &= \frac{\text{反應槽流量 } Q(\text{m}^3/\text{hr}) \times \text{進流有機物濃度}(\text{mg}/\text{L})}{\text{反應槽體積 } V(\text{m}^3)} \\ &= \frac{\text{進流有機物濃度}(\text{mg}/\text{L})}{\text{水力停留時間 HRT}(\text{hr})} \\ &= \frac{\text{進流有機物濃度}(\text{mg}/\text{L}) \times 10^{-6} \text{kg}/\text{mg} \times 10^3 \text{L}/\text{m}^3}{\text{水力停留時間 HRT}(\text{hr}) \times \frac{1 \text{day}}{24 \text{hr}}} \\ &= \frac{24 \times 10^{-3} \times C_{\text{inf}}}{\text{HRT}} \quad \text{kg}/\text{m}^3/\text{day} \end{aligned}$$



3.6.3 單位反應槽體積削減率

$$\begin{aligned} \text{單位體積削減率 } T_r &= \frac{\text{流量 } Q(\text{m}^3/\text{hr}) \times (\text{進流有機物濃度} - \text{出流有機物濃度})(\text{mg/L})}{\text{反應槽體積 } V(\text{m}^3)} \\ &= \frac{(C_{\text{inf}} - C_{\text{eff}})(\text{mg/L}) \times 10^{-6} \text{kg/mg} \times 10^3 \text{L/m}^3}{\text{水力停留時間 } \text{HRT}(\text{hr}) \times \frac{1 \text{day}}{24 \text{hr}}} \\ &= \frac{24 \times 10^{-3} \times (C_{\text{inf}} - C_{\text{eff}})}{\text{HRT}} \quad \text{kg/m}^3/\text{day} \end{aligned}$$

3.6.4 單位質量(微生物)削減率

$$\begin{aligned} \text{單位質量(微生物)削減率 } S_r &= \frac{\text{有機物削減量}}{\text{微生物總量}} \\ &= \frac{\text{反應槽體積 } V(\text{m}^3) \times (\text{進流有機物濃度} - \text{出流有機物濃度})(\text{mg/L})}{\text{微生物濃度}(\text{mg/L}) \times \text{反應槽體積 } V(\text{m}^3)} \\ &= \frac{C_{\text{inf}} - C_{\text{eff}}}{\text{微生物濃度}} \quad \text{mg 有機物/mg 微生物} \\ &= \frac{C_{\text{inf}} - C_{\text{eff}}}{\text{微生物濃度}} \quad \text{kg 有機物/kg 微生物} \end{aligned}$$

第四章 結果與討論



4.1 化學需氧量(COD)檢測結果

化學需氧量(COD)之檢測較生化需氧量(BOD₅)簡便快速，因此普遍被污水處理廠作為處理效能之綜合及簡易評估手段，用以評估污水處理廠之綜合處理效能，進而檢討並調整操作參數。

4.1.1 檢測數據

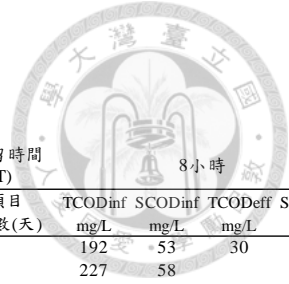
實驗分別以水力停留時間(HRT)16、12、8、6小時操作，檢測進流(inf)、出流(eff)之 TCOD 及 SCOD。

本研究係以全實廠(迪化污水處理廠)污水(初沉池出流水)進行，其水質受用戶端尖離峰排出、收集系統(下水道、截流站、抽水站等)及前處理設施(沉砂池、撈污機及初沉沉等)之效能等多重因素影響，進流水水質較不穩定且無法掌控，從檢測數據中可發現在研究模組操作期間內進流污水平均 TCOD 為 261 mg/L，最大值為 331 mg/L，最小值為 158 mg/L；SCOD 則變化幅度較小，其平均值為 81 mg/L，最大值為 144 mg/L，最小值為 47 mg/L。

出流水質則呈現穩定趨勢，TCOD 平均值為 59.5 mg/L，最大值為 96 mg/L，最小值為 23 mg/L；SCOD 平均值為 31.1 mg/L，最大值為 57 mg/L，最小值為 14 mg/L(進、出流水質之化學需氧量檢測結果彙整如表 4-1 及圖 4-1)。

對於研究模組之整體效能，雖進流水質較不穩定，但出流水質則相對平穩，顯示模組運作相當穩定，受進流水質之變化影響不大。

表 4-1 化學需氧量(COD)檢測結果



水力停留時間 (HRT) 16小時					水力停留時間 (HRT) 12小時					水力停留時間 (HRT) 8小時					
檢測項目	TCODinf	SCODinf	TCODeff	SCODeff	檢測項目	TCODinf	SCODinf	TCODeff	SCODeff	檢測項目	TCODinf	SCODinf	TCODeff	SCODeff	
操作天數(天)	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	操作天數(天)	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	操作天數(天)	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
1	270	130	77	51	22	263	54	37	24	58	192	53	30	23	
2	299	137	88	34	23	265	72	55	31	59	227	58			
3	277	107	69	51	24	296	86	80	33	60	233	60	47	29	
4	283	111	84	54	25	292	76	53	35	61	214	52	33	25	
5	274	108	79	42	26	278	87	48	22	62	294	104	58	32	
6	291	114	86	56	27	301	106	80	32	63	275	95	44	38	
7	251	144	91	47	28	273	83	38	31	64	255	87	50	35	
8	297	104	53	41	29	277	71	56	21	65	236	74	46	31	
9	295	127	38	27	30	282	96			66	261	86	61	47	
10	310	140	47	25	31	288	96	63	44	67					
11			50	27	32	277	78	57	28	68	241	65	48	26	
12	331	115	48	25	33	272	56			69	280	71	48	33	
13			46	24	34	302	93	63	36	70	303	131	66	36	
14			59	36	35	286	85	52	48	71	283	114	57	43	
15			23	22	36	275	72	76	57	72	158	47	46	15	
16			26	25	37	256	74	62	33	73	249	76	63	18	
17	235	55	36	22	38	267	67	60	39	74	247	90	77	21	
18	254	65	96	37	39	248	72	51	35	75	215	86	52	16	
19	265	60	92	34	40	254	60	86	37	76	215	88	50	18	
20	241	53			41	256	69	96	33	平均值	243	80	52	29	
21	247	47	29	15	42	254	56	80	37	最大值	303	131	77	47	
平均值	276	101	61	35	43	251	62	85	27	最小值	158	47	30	15	
最大值	331	144	96	56	44	241	62	73	14	水力停留時間 (HRT) 6小時					
最小值	235	47	23	15	45	256	61	60	29	檢測項目	TCODinf	SCODinf	TCODeff	SCODeff	
操作期間(第1~86天)					46	190	59	39	21	47					
TCODinf SCODinf TCODeff SCODeff					47				43	48	236	64	57	28	28
mg/L mg/L mg/L mg/L					48	236	64	57	28	49	254	72	66	35	35
平均值	261	81	60	31	49	254	72	66	35	50	233	68	59	37	37
最大值	331	144	96	57	51	273	72	60	35	51	273	72	60	35	35
最小值	158	47	23	14	52	292	78	70	38	52	292	78	70	38	38
					53	312	86	79	41	53	312	86	79	41	41
					54	270	78	57	33	54	270	78	57	33	33
					55	251	80	63	29	55	251	80	63	29	29
					56	231	82	59	37	56	231	82	59	37	37
					57	266	68	50	33	57	266	68	50	33	33
					平均值	266	74	62	33	平均值	247	76	62	19	19
					最大值	312	106	96	57	最大值	331	96	77	39	39
					最小值	190	54	37	14	最小值	206	60	49	14	14

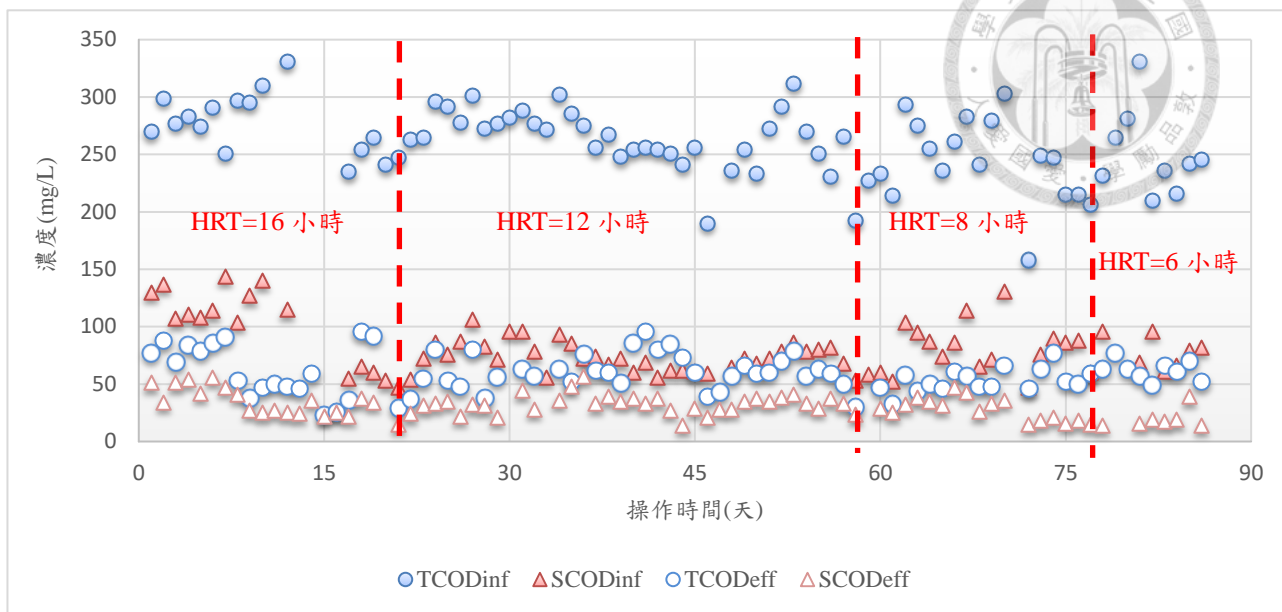


圖 4-1 化學需氧量(COD)檢測結果

4.1.2 化學需氧量(COD)去除率

在去除率部分，TCOD 的去除率普遍較 SCOD 的去除率為高，但在 HRT=6 小時的操作條件下，TCOD 及 SCOD 的去除率則相當接近(如表 4-2)，總平均去除率，TCOD 約為 76.5%(最大值 88.3%，最小值 62.2%)，SCOD 則約為 64.5%(最大值 85.4%，最小值 50.6%)，表 4-2 及圖 4-2 為化學需氧量(COD)去除率之彙整結果。

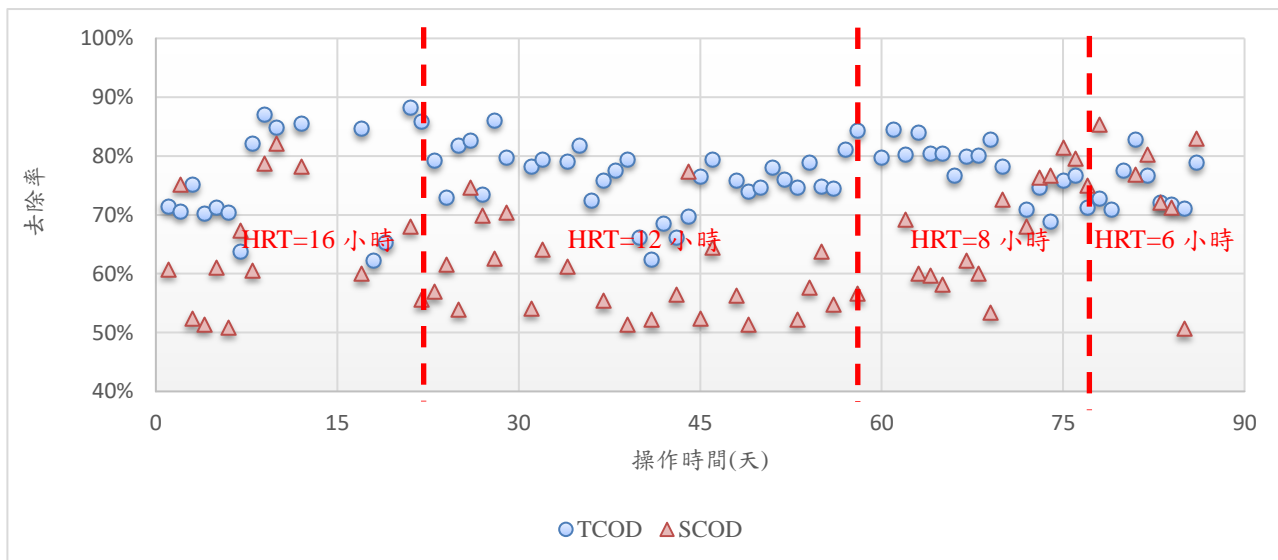


圖 4-2 化學需氧量(COD)去除率



4.1.3 進流有機物(COD)負荷率

COD 負荷率代表單位體積時間的進流 COD 量，以 $\text{kg}/\text{m}^3/\text{day}$ 為其單位，表 4-3 及圖 4-3 為模組進流化學需氧量(COD)負荷率，在 $\text{HRT}=8$ 小時及 $\text{HRT}=6$ 小時，TCOD 之進流負荷明顯有大幅上升之趨勢，但 SCOD 進流負荷則較平穩，僅略有上升，此現象可能與進流污水來源之前處理效能有關(經查證該時段正逢迪化污水處理廠初沉池大舉清池，投入運轉池數較少，因此沉降效果較差)。

另將化學需氧量(COD)負荷率與 COD 去除率比較(如圖 4-4 及圖 4-5)，TCOD 的部分，TCOD 負荷率越高，其去除率則越低，但以 SCOD 觀之，則無此趨勢。

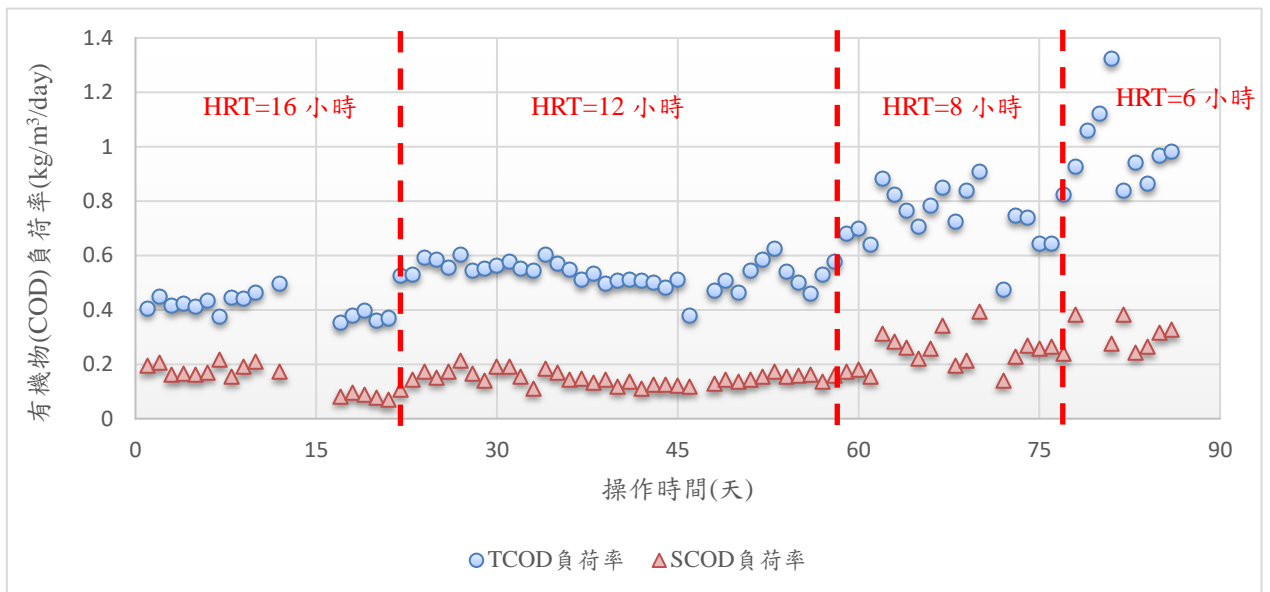


圖 4-3 進流化學需氧量(COD)負荷率

表 4-3 進流化學需氧量(COD)負荷率



水力停留時間(HRT) 16小時			水力停留時間(HRT) 12小時			水力停留時間(HRT) 8小時		
項目	TCOD負荷率	SCOD負荷率	檢測項目	TCOD負荷率	SCOD負荷率	檢測項目	TCOD負荷率	SCOD負荷率
操作天數(天)	kg/m ³ /day	kg/m ³ /day	操作天數(天)	kg/m ³ /day	kg/m ³ /day	操作天數(天)	kg/m ³ /day	kg/m ³ /day
1	0.4465	0.1950	22	0.5581	0.1080	58	0.7278	0.1590
2	0.5358	0.2055	23	0.5023	0.1440	59	0.5961	0.1740
3	0.4912	0.1605	24	0.4688	0.1720	60	0.7264	0.1800
4	0.6028	0.1665	25	0.4577	0.1520	61	0.7033	0.1560
5	0.5805	0.1620	26	0.4666	0.1740	62	0.6555	0.3120
6	0.4605	0.1710	27	0.5459	0.2120	63	0.6131	0.2850
7	0.3977	0.2160	28	0.6140	0.1660	64	0.6675	0.2610
8	0.3781	0.1560	29	0.7033	0.1420	65	0.5467	0.2220
9	0.5358	0.1905	30	0.3460	0.1920	66	0.4912	0.2580
10	0.3745	0.2100	31	0.3349	0.1920	67	0.4200	0.3420
11	0.6006		32	0.4577	0.1560	68	0.6583	0.1950
12	0.6028	0.1725	33	0.5805	0.1120	69	0.4870	0.2130
13	0.6698		34	0.4688	0.1860	70	0.5235	0.3930
14	0.7153		35	0.3014	0.1700	71	0.7549	
15	0.6452		36	0.5336	0.1440	72	0.7049	0.1410
16	0.6943		37	0.3260	0.1480	73	0.6698	0.2280
17	0.4019	0.0825	38	0.7033	0.1340	74	0.5598	0.2700
18	0.5562	0.0975	39	0.6608	0.1440	75	0.5380	0.2580
19	0.5916	0.0900	40	0.7256	0.1200	76	0.6039	0.2640
20	0.7055	0.0795	41	0.7144	0.1380	平均值	0.6130	0.2395
21	0.5637	0.0705	42	0.4666	0.1120	最大值	0.7549	0.3930
平均值	0.5500	0.1516	43	0.6140	0.1240	最小值	0.4200	0.1410
最大值	0.7153	0.2160	44	0.6698	0.1240			
最小值	0.3745	0.0705	45	0.6558	0.1220			
			46	0.6234	0.1180	水力停留時間(HRT) 6小時		
			47	0.6120		檢測項目	TCOD負荷率	SCOD負荷率
			48	0.5358	0.1280	操作天數(天)	kg/m ³ /day	kg/m ³ /day
			49	0.4504	0.1440	77	0.8930	0.2400
			50	0.6357	0.1360	78	0.6938	0.3840
			51	0.6474	0.1440	79	0.4200	
			52	0.6028	0.1560	80	0.7044	
			53	0.5470	0.1720	81	0.5542	0.2760
			54	0.6809	0.1560	82	0.5115	0.3840
			55	0.6234	0.1600	83	0.5601	0.2440
			56	0.6631	0.1640	84	0.5740	0.2640
			57	0.6921	0.1360	85	0.6006	0.3160
						86	0.7049	0.3280
			操作期間(第1~86天)			平均值	0.6217	0.3045
			TCOD負荷率			最大值	0.8930	0.3840
			kg/m ³ /day			最小值	0.4200	0.2400
			SCOD負荷率					
			kg/m ³ /day					
平均值	0.5768	0.1867	平均值	0.5608	0.1486			
最大值	0.8930	0.3930	最大值	0.7256	0.2120			
最小值	0.3014	0.0705	最小值	0.3014	0.1080			

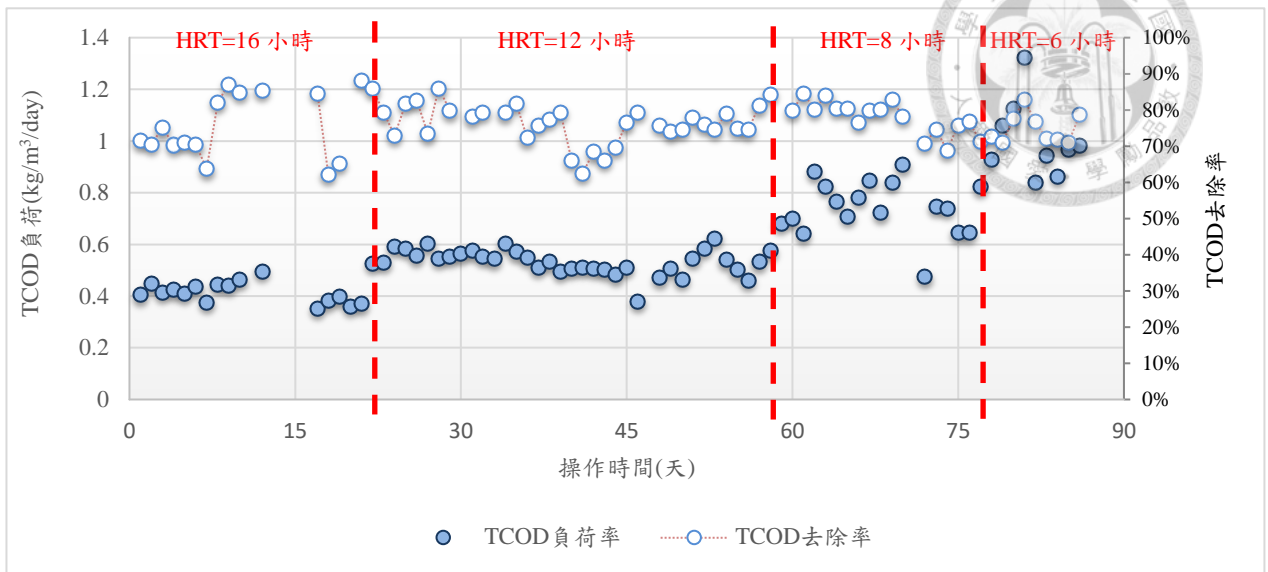


圖 4-4 化學需氧量 TCOD 負荷率與去除率

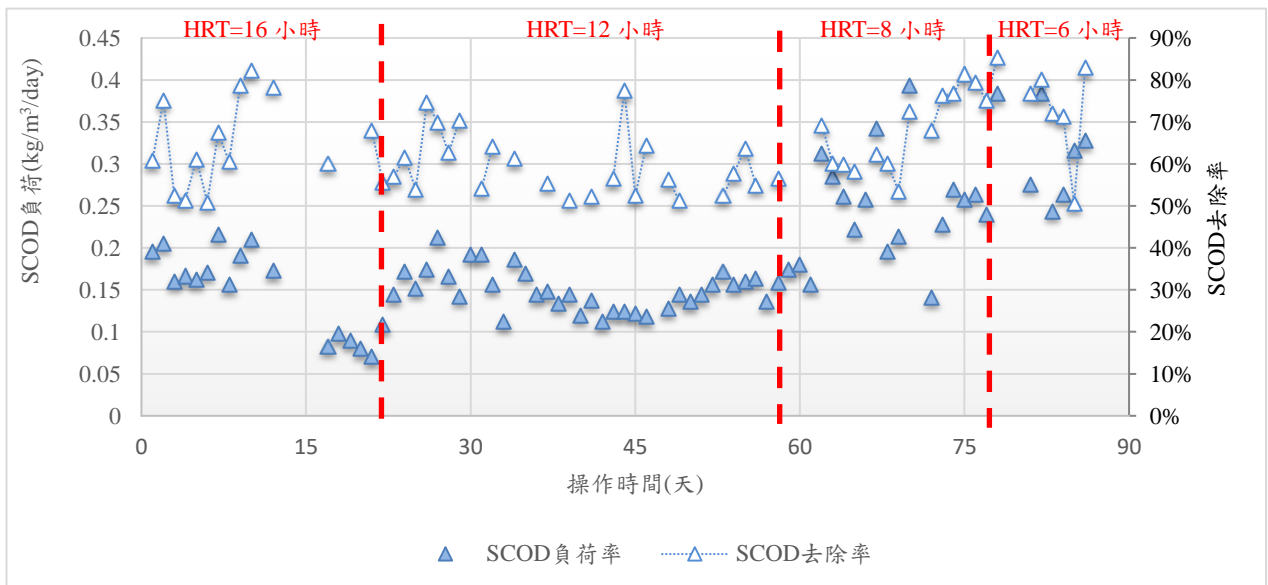


圖 4-5 化學需氧量 SCOD 負荷率與去除率

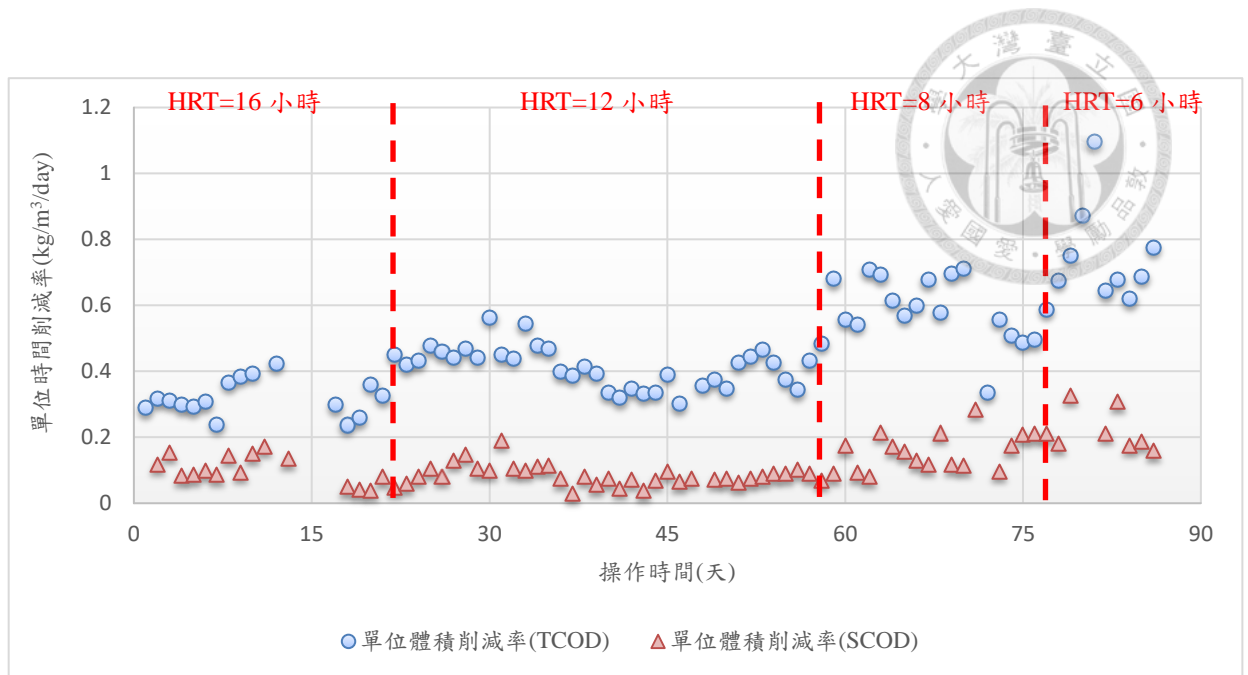


圖 4-6 生化需氧量單位反應槽體積削減率

TCOD 的單位體積削減率平均值約 $0.475 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，最大值約 $1.096 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，最小值約 $0.237 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ；SCOD 的單位體積削減率平均值約 $0.12 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，最大值約 $0.328 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，最小值約 $0.03 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ；由圖 4-6 觀察，TCOD 的單位體積削減率在 HRT=16 小時及 HRT=12 小時的操作條件下尚稱平穩，但在 HRT=8 小時及 HRT=6 小時的操作條件下大幅上升，此趨勢與圖 4-3 中 TCOD 負荷率相當接近，由此可見研究模組在進流水質突增負荷的不利條件下，系統仍可穩定且有效的運作。



4.1.5 單位質量(微生物)對 COD 削減率

厭氧微生物是整個系統的運作中心，單位質量(微生物)削減率可比較不同厭氧系統的處理效能及穩定程度，更可作為調整系統效能的關鍵指標。

本研究模組反應槽總體積為 24 L，總有效反應體積為 15.6 L，微生物質量為 42.4 g/L，在厭氧反應的過程中，微生物質量隨其生長及代謝狀況而波動，並非為定值，因研究模組之反應槽為密閉式，且未設有微生物採樣口，本研究於實驗進行中無法實際檢測微生物質量之變化情形，因此於計算單位微生物質量對化學需氧量(COD)之削減率時，僅能以微生物質量之初始值(即 42.4 g/L)進行，結果整理如表 4-5 及圖 4-7，其中單位微生物質量對 TCOD 之削減率平均值約 0.0048 mg-COD/mg-微生物，最大值約 0.0067 mg-COD/mg-微生物，最小值約為 0.0026 mg-COD/mg-微生物；對 SCOD 之削減率平均值約 0.0012 mg-COD/mg-微生物，最大值約 0.0027 mg-COD/mg-微生物，最小值約為 0.0004 mg-COD/mg-微生物。

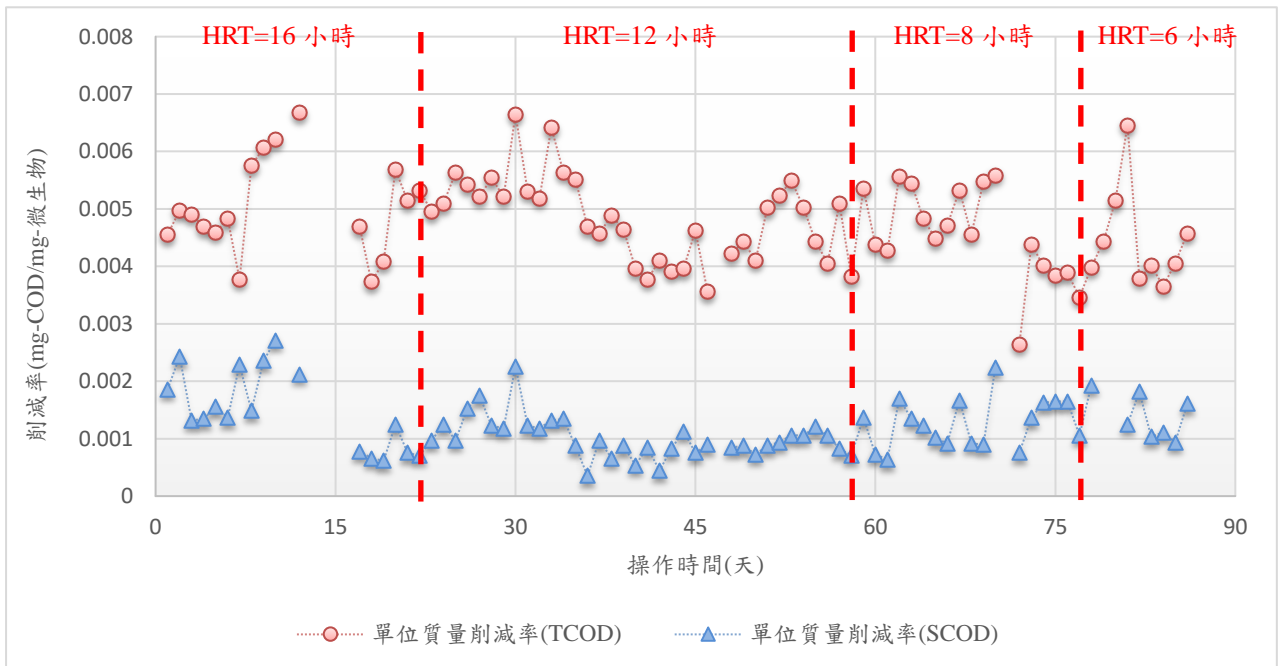


圖 4-7 單位微生物質量削減率



4.2 三成分(醣類、蛋白質、脂質)檢測結果

4.2.1 檢測數據

由於都市污水成分中，以醣類之降解速度最快，蛋白質次之，而脂質則需最長時間始得降解，而降解速率的不同是否在厭氧生物處理都市污水的過程中造成影響，致使處理效能停滯，也是本研究所要探討的課題之一。

在圖 4-2 中，當 HRT=6 小時，TCOD 及 SCOD 的去除率曲線相當接近，兩者之最大值均超過 85%，但最小值則僅約 50%，最大值及最小值之差距相當大，為探討其中是否有相關成分降解不易，本研究以 HRT=12 小時、HRT=8 小時及 HRT=6 小時採樣檢測分析水樣中之醣類、蛋白質及脂質成分，結果如表 4-6 及圖 4-8。

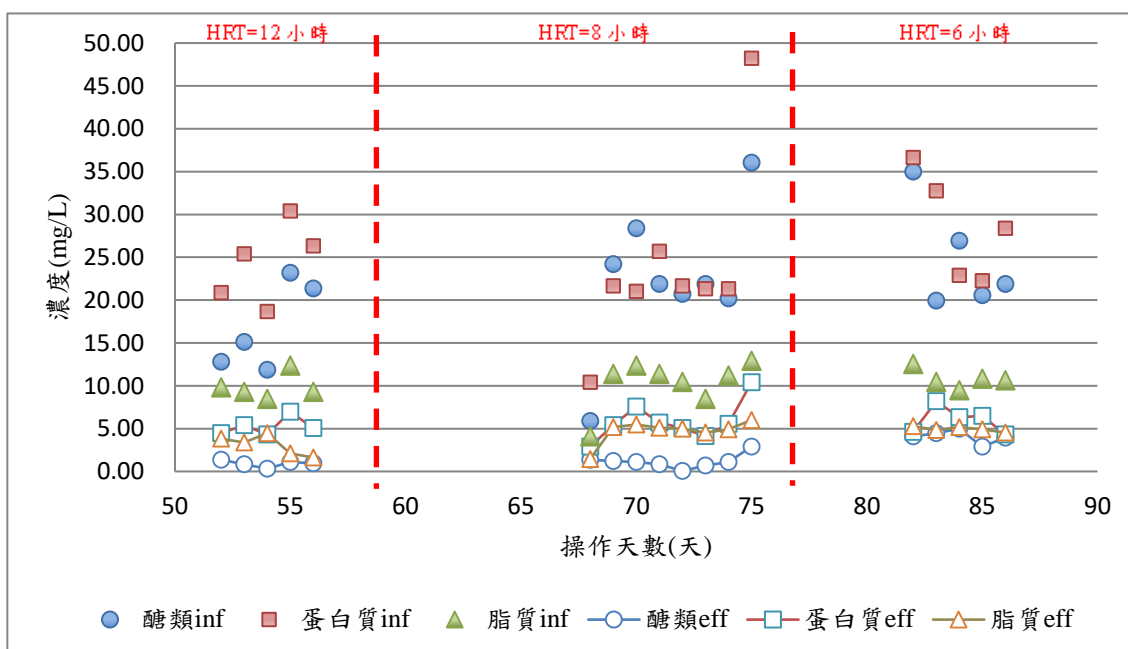


圖 4-8 三成分(醣類、蛋白質、脂質)檢測結果

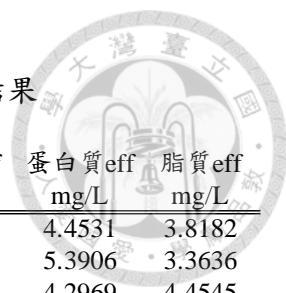


表 4-6 三成分(醣類、蛋白質、脂質)檢測結果

HRT	檢測項目 操作天數(天)	醣類inf mg/L	蛋白質inf mg/L	脂質inf mg/L	醣類eff mg/L	蛋白質eff mg/L	脂質eff mg/L
12小時	52	12.7792	20.8594	9.8182	1.3506	4.4531	3.8182
	53	15.1169	25.3906	9.2727	0.8312	5.3906	3.3636
	54	11.8701	18.6719	8.4545	0.3117	4.2969	4.4545
	55	23.1688	30.3906	12.3636	1.0909	6.9531	2.0909
	56	21.3506	26.3281	9.2727	0.9610	5.0781	1.6364
	平均值	16.8571	24.3281	9.8364	0.9091	5.2344	3.0727
	最大值	23.1688	30.3906	12.3636	1.3506	6.9531	4.4545
	最小值	11.8701	18.6719	8.4545	0.3117	4.2969	1.6364
8小時	68	5.8961	10.3906	4.0909	1.3506	2.8906	1.4545
	69	24.2078	21.6406	11.3636	1.2208	5.3906	5.1818
	70	28.3636	21.0156	12.3636	1.0909	7.5781	5.4545
	71	21.8701	25.7031	11.3636	0.8312	5.7031	5.0909
	72	20.7013	21.6406	10.4545	0.0519	5.0781	5.0000
	73	21.8701	21.3281	8.4545	0.7013	4.1406	4.5455
	74	20.1818	21.3281	11.1818	1.0909	5.5469	4.9091
	75	36.0260	48.2031	12.9091	2.9091	10.3906	6.0000
	平均值	22.3896	23.9063	10.2727	1.1558	5.8398	4.7045
	最大值	36.0260	48.2031	12.9091	2.9091	10.3906	6.0000
最小值	5.8961	10.3906	4.0909	0.0519	2.8906	1.4545	
6小時	82	34.9870	36.6406	12.5455	4.0779	4.6094	5.2727
	83	19.9221	32.7344	10.4545	4.4675	8.2031	4.8182
	84	26.9351	22.8906	9.4545	4.9870	6.3281	5.1818
	85	20.5714	22.2656	10.8182	2.9091	6.4844	4.9091
	86	21.8701	28.3594	10.6364	3.9481	4.2969	4.5455
	平均值	24.8571	28.5781	10.7818	4.0779	5.9844	4.9455
	最大值	34.9870	36.6406	12.5455	4.9870	8.2031	5.2727
	最小值	19.9221	22.2656	9.4545	2.9091	4.2969	4.5455
平均值	21.5382	25.3212	10.2929	1.8990	5.7118	4.3182	
最大值	36.0260	48.2031	12.9091	4.9870	10.3906	6.0000	
最小值	5.8961	10.3906	4.0909	0.0519	2.8906	1.4545	

4.2.2 三成分去除率

表 4-7 及圖 4-9 為三成分(醣類、蛋白質、脂質)去除率計算結果，在 HRT=12 小時及 HRT=8 小時的操作條件下，醣類的去除率可達 90%，在 HRT=6 小時的操作條件下，其去除率雖有下降，但仍可維持在 80% 以上；蛋白質的去除率則在三種 HRT 的操作條件下，均可維持在 80% 左右；脂質的去除率則約在 60% 以下，且隨著 HRT 的減少而有下降的趨勢。

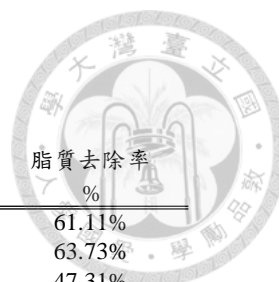


表 4-7 醣類、蛋白質、脂質)去除率

HRT	項目 操作天數(天)	醣類去除率 %	蛋白質去除率 %	脂質去除率 %
12小時	52	89.43%	78.65%	61.11%
	53	94.50%	78.77%	63.73%
	54	97.37%	76.99%	47.31%
	55	95.29%	77.12%	83.09%
	56	95.50%	80.71%	82.35%
	平均值	94.42%	78.45%	67.52%
	最大值	97.37%	80.71%	83.09%
	最小值	89.43%	76.99%	47.31%
8小時	68	77.09%	72.18%	64.44%
	69	94.96%	75.09%	54.40%
	70	96.15%	63.94%	55.88%
	71	96.20%	77.81%	55.20%
	72	99.75%	76.53%	52.17%
	73	96.79%	80.59%	46.24%
	74	94.59%	73.99%	56.10%
	75	91.93%	78.44%	53.52%
6小時	82	88.34%	87.42%	57.97%
	83	77.57%	74.94%	53.91%
	84	81.49%	72.35%	45.19%
	85	85.86%	70.88%	54.62%
	86	81.95%	84.85%	57.26%
	平均值	83.04%	78.09%	53.79%
	最大值	88.34%	87.42%	57.97%
	最小值	77.57%	70.88%	45.19%
平均值		90.82%	76.74%	58.03%
最大值		99.75%	87.42%	83.09%
最小值		77.09%	63.94%	45.19%

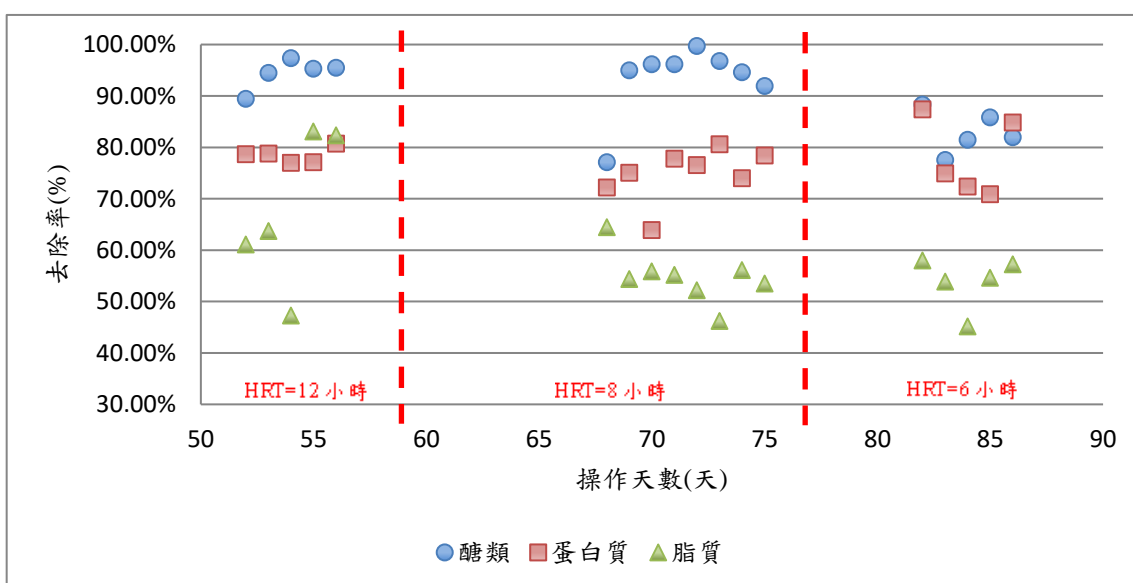


圖 4-9 三成分(醣類、蛋白質、脂質)去除率



4.2.3 進流有機物(三成分)負荷率

觀察進流三成分負荷，在 HRT=12 小時的階段，三成分之組成較為穩定，但在 HRT=8 小時及 HRT=6 小時的階段，醣類及蛋白質的組成則顯得紊亂，也凸顯出實廠污水組成成分的複雜程度，更增添了模組系統的處理難度。

依實際檢測結果計算三成分的進流負荷率，整理結果如表 4-8 及圖 4-10。

表 4-8 醣類蛋白質及脂質進流負荷率

HRT	項目 操作天數(天)	醣類 kg/m ³ /day	蛋白質 kg/m ³ /day	脂質 kg/m ³ /day
12小時	52	0.0256	0.0417	0.0196
	53	0.0302	0.0508	0.0185
	54	0.0237	0.0373	0.0169
	55	0.0463	0.0608	0.0247
	56	0.0427	0.0527	0.0185
	平均值	0.0337	0.0487	0.0197
	最大值	0.0463	0.0608	0.0247
	最小值	0.0237	0.0373	0.0169
8小時	68	0.0177	0.0312	0.0123
	69	0.0726	0.0649	0.0341
	70	0.0851	0.0630	0.0371
	71	0.0656	0.0771	0.0341
	72	0.0621	0.0649	0.0314
	73	0.0875	0.0853	0.0338
	74	0.0807	0.0853	0.0447
	75	0.1441	0.1928	0.0516
	平均值	0.0769	0.0831	0.0349
	最大值	0.1441	0.1928	0.0516
最小值	0.0177	0.0312	0.0123	
6小時	82	0.1399	0.1466	0.0502
	83	0.0797	0.1309	0.0418
	84	0.1077	0.0916	0.0378
	85	0.0823	0.0891	0.0433
	86	0.0875	0.1134	0.0425
	平均值	0.0994	0.1143	0.0431
	最大值	0.1399	0.1466	0.0502
	最小值	0.0797	0.0891	0.0378
	平均值	0.0712	0.0822	0.0329
	最大值	0.1441	0.1928	0.0516
	最小值	0.0177	0.0312	0.0123

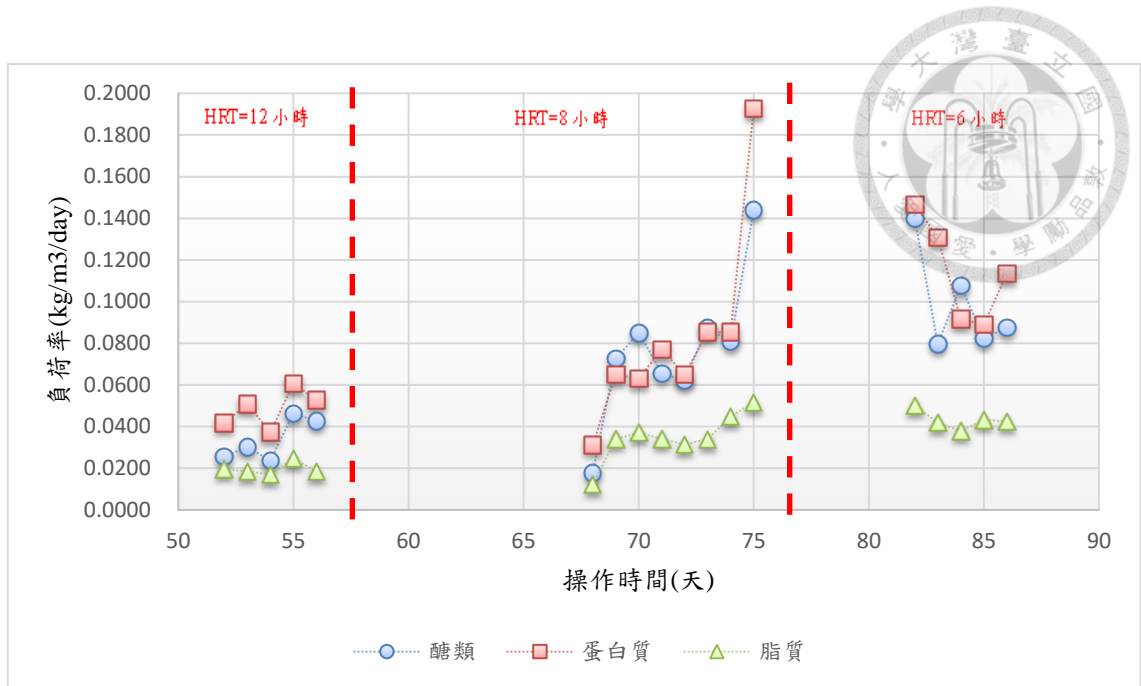


圖 4-10 醣類、蛋白質及脂質之進流負荷率

4.2.4 單位反應槽體積(三成分)削減率

以單位體積削減率來看研究模組對三成分的處理效能，系統對醣類及蛋白質的單位體積削減率的平均值均約為 $0.06 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，但對脂質的削減率平均值則約 $0.02 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，僅約為醣類及脂質削減率之 $1/3$ ，顯示厭氧系統對脂質的降解效能或機制是否存在瓶頸仍有待研究。

將三成分的單位體積削減率分別計算後，整理如表 4-9 及圖 4-11，從結果中可發現脂質之削減率並未因 HRT 之改變而有明顯變化。



表 4-9 蛋白質及脂質之單位反應槽體積削減率

HRT	項目 操作天數(天)	醣類 kg/m ³ /day	蛋白質 kg/m ³ /day	脂質 kg/m ³ /day
12小時	52	0.0229	0.0328	0.0120
	53	0.0286	0.0400	0.0118
	54	0.0231	0.0288	0.0080
	55	0.0442	0.0469	0.0205
	56	0.0408	0.0425	0.0153
	平均值	0.0319	0.0382	0.0135
	最大值	0.0442	0.0469	0.0205
	最小值	0.0229	0.0288	0.0080
8小時	68	0.0136	0.0225	0.0079
	69	0.0690	0.0488	0.0185
	70	0.0818	0.0403	0.0207
	71	0.0631	0.0600	0.0188
	72	0.0619	0.0497	0.0164
	73	0.0847	0.0688	0.0156
	74	0.0764	0.0631	0.0251
	75	0.1325	0.1513	0.0276
平均值	0.0729	0.0630	0.0188	
最大值	0.1325	0.1513	0.0276	
最小值	0.0136	0.0225	0.0079	
6小時	82	0.1236	0.1281	0.0291
	83	0.0618	0.0981	0.0225
	84	0.0878	0.0663	0.0171
	85	0.0706	0.0631	0.0236
	86	0.0717	0.0963	0.0244
	平均值	0.0831	0.0904	0.0233
	最大值	0.1236	0.1281	0.0291
	最小值	0.0618	0.0631	0.0171
平均值		0.0643	0.0637	0.0186
最大值		0.1325	0.1513	0.0291
最小值		0.0136	0.0225	0.0079

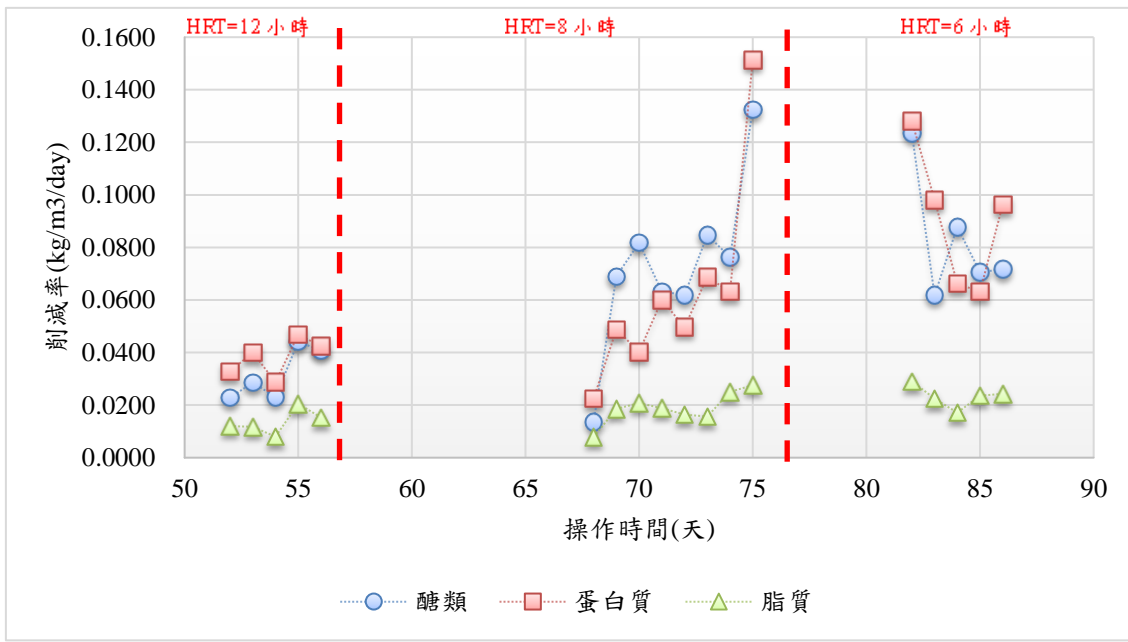


圖 4-11 蛋白質及脂質之單位反應槽體積削減率



4.2.5 單位質量(微生物)對三成分削減率

單位微生物質量對醣類蛋白質及脂質的削減率仍以醣類及蛋白質較高，平均值約為 0.00046 mg/mg-微生物，超過對脂質之平均削減率 0.00014 mg/mg 微生物之 3 倍，表 4-10 彙整了計算結果，圖 4-12 則依計算結果繪製醣類、蛋白質及脂質之單位質量(微生物)削減率，以結果來看，厭氧微生物對三成分(醣類蛋白質脂質)之單位質量削減率，因 HRT 之改變而產生變化之趨勢均不明顯。

表 4- 10 醣類、蛋白質及脂質之單位質量(微生物)削減率

HRT	項目	醣類	蛋白質	脂質
	操作天數(天)	Kg/Kg-微生物	Kg/Kg-微生物	Kg/Kg-微生物
12小時	52	0.00027	0.00039	0.00014
	53	0.00034	0.00047	0.00014
	54	0.00027	0.00034	0.00009
	55	0.00052	0.00055	0.00024
	56	0.00048	0.00050	0.00018
	平均值	0.00038	0.00045	0.00016
	最大值	0.00052	0.00055	0.00024
	最小值	0.00027	0.00034	0.00009
8小時	68	0.00011	0.00018	0.00006
	69	0.00054	0.00038	0.00015
	70	0.00064	0.00032	0.00016
	71	0.00050	0.00047	0.00015
	72	0.00049	0.00039	0.00013
	73	0.00050	0.00041	0.00009
	74	0.00045	0.00037	0.00015
	75	0.00078	0.00089	0.00016
6小時	82	0.00073	0.00076	0.00017
	83	0.00036	0.00058	0.00013
	84	0.00052	0.00039	0.00010
	85	0.00042	0.00037	0.00014
	86	0.00042	0.00057	0.00014
	平均值	0.00049	0.00053	0.00014
	最大值	0.00073	0.00076	0.00017
	最小值	0.00036	0.00037	0.00010
	平均值	0.00046	0.00046	0.00014
	最大值	0.00078	0.00089	0.00024
	最小值	0.00011	0.00018	0.00006

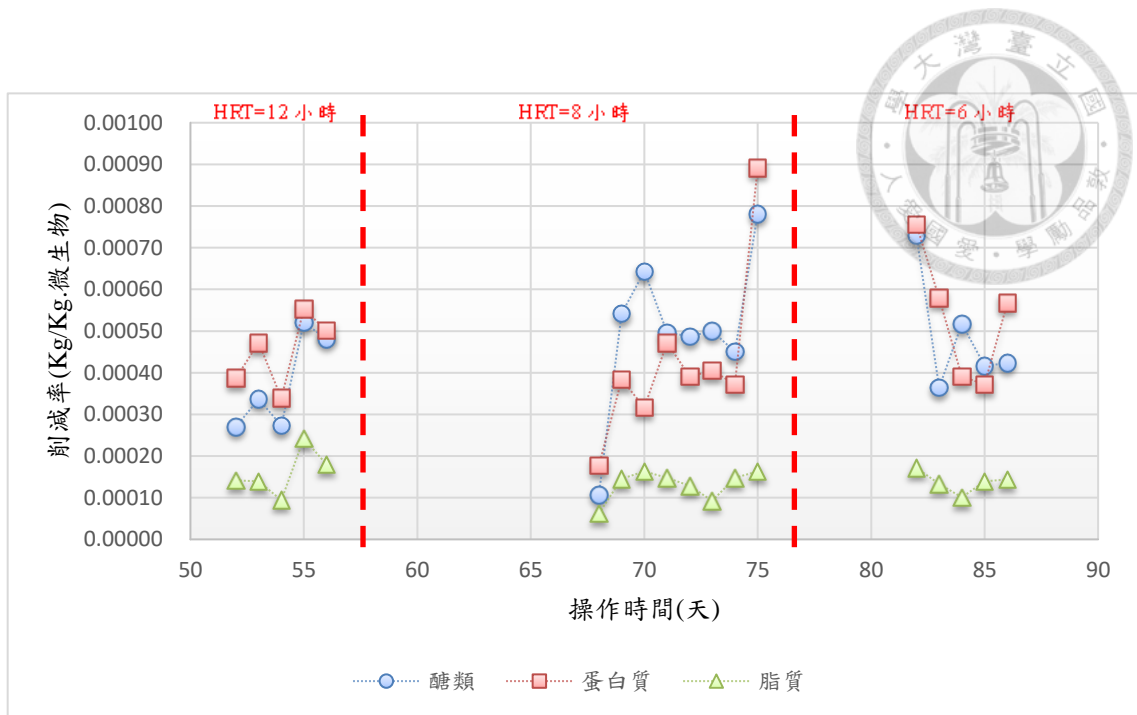


圖 4-12 醣類、蛋白質及脂質之單位質量(微生物)削減率


4.3 討論

本研究以全實廠(迪化污水處理廠)都市污水(初沉池出水)作為進流污水進行厭氧生物處理，操作環境則訂為 25°C，在最貼近實務及最節能的條件下，評估實際都市污水以固定厭氧生物處理之成效，並探討都市污水中主要有機成分(醣類蛋白質及脂質)的降解情形，以提供都市污水處理實務之參考。

1. 進流水質與有機物負荷

研究模組之進流水採用迪化污水處理廠之初沉池出水，在實驗期間(107年6月~107年9月)，平均 TCOD 為 261 mg/L，最大值为 331 mg/L，最小值为 158 mg/L；平均 SCOD 為 81 mg/L，最大值为 144 mg/L，最小值为 47 mg/L。

觀察進流水質的變化，TCOD 起伏變化較大，較不穩定，SCOD 則呈平穩趨勢，但以進流負荷率(kg-COD/m³/day)來看，在 HRT=16 小時及 HRT=12 小時的階段，TCOD 及 SCOD 的進流負荷都相當平穩，但在 HRT=8 小時及 HRT=6 小時的階段則有上揚的趨勢，尤其是 HRT=6 小時的階段，TCOD 的進流負荷



率波動大，有突增負荷的現象，總平均進流 TCOD 負荷率(表 4-3 及圖 4-3)為 $0.5768 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，HRT=16 小時之平均值為 $0.55 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，HRT=12 小時之平均值為 $0.5608 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，HRT=8 小時之平均值為 $0.613 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，HRT=6 小時之平均值則為 $0.6217 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ (最大值為 $0.893 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，最小值為 $0.42 \text{ kg/m}^3/\text{day}$)。


在進流水中的醣類及蛋白質的含量均有上揚趨勢，尤其在 HRT=8 小時及 HRT=6 小時階段的變動幅度更大，相較之下，脂質進流濃度則較為平穩，維持在 10 mg/L 上下；平均進流濃度(表 4-6 及圖 4-8)醣類為 21.5 mg/L (HRT=12 小時為 16.9 mg/L ，HRT=8 小時為 22.4 mg/L ，HRT=6 小時則為 24.9 mg/L)，蛋白質平均進流濃度為 25.3 mg/L (HRT=12 小時為 24.3 mg/L ，HRT=8 小時為 23.9 mg/L ，HRT=6 小時則為 28.5 mg/L)，脂質平均進流濃度為 10.3 mg/L (HRT=12 小時為 9.8 mg/L ，HRT=8 小時為 10.3 mg/L ，HRT=6 小時則為 10.8 mg/L)。

三成分的進流負荷率(表 4-8 及圖 4-10)顯示，在 HRT=8 小時及 HRT=6 小時階段，三成分的進流負荷率均較 HRT=12 小時為高，且醣類及蛋白質的進流負荷率變化大，由此可判斷在 HRT=6 小時階段的 TCOD 進流突增負荷現象主要是由醣類及蛋白質所造成。

2. 單位反應槽體積削減率及單位質量削減率

TCOD 的單位反應槽體積削減率平均值約 $0.475 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，SCOD 的單位反應槽體積削減率平均值約 $0.12 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，對醣類及蛋白質的單位體積削減率平均值均約為 $0.06 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ ，對脂質的削減率平均值則僅約 $0.02 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ 。

單位微生物質量對 TCOD 之削減率平均值約 $0.0048 \text{ mg-COD/mg-微生物}$ ，對 SCOD 之削減率平均值約 $0.0012 \text{ mg-COD/mg-微生物}$ ，對醣類及蛋白質之平均值約為 $0.00046 \text{ mg/mg-微生物}$ ，對脂質之平均削減率則為 $0.00014 \text{ mg/mg-微生物}$ 。



從單位反應槽體積削減率及單位質量削減率二者來看，對脂質之削減率均為最低，而且差距達3~30倍之多，脂質之難以降解，確實為都市污水處理廠操作實務上之一大困擾，不論是好氧生物或厭氧生物均為都市污水處理的關鍵因子。

3. 去除率及整體效能

單就去除率來看，研究模組的運作已相當穩定，在水力停留時間的轉換之間並不需太多時間使系統達穩定狀態，受水力停留時間的影響並不明顯(除了HRT=6小時對SCOD的去除率較高外)，總平均去除率(表4-2及圖4-2)，TCOD約為76.5%(最大值88.3%，最小值62.2%)，SCOD去除率波動則較大，平均去除率為64.5%(最大值85.4%，最小值50.6%)。

在三成分的部分，醣類及蛋白質在HRT=12小時及HRT=8小時的條件下均能維持較高的去率，在HRT=6小時，則二者之去除率則均微幅下降；對脂質的去除率則不論是HRT=12小時、8小時或6小時的條件下，均僅維持在40~60%之間。

從出流水濃度觀察(表4-1)，出流水的平均TCOD為60 mg/L(HRT=16小時為61 mg/L，HRT=12小時為62 mg/L，HRT=8小時為52 mg/L，HRT=6小時則為62 mg/L)，且最大值為96 mg/L，均符合放流水排放標準，尤其在HRT=6小時，在進流突增負荷的情況下，仍能平穩的維持出流水水質(最大值77 mg/L，最小值49 mg/L)，由此結果來看，對比於傳統活性污泥法之設計水力停留時間為6~8小時及階梯曝氣法之4~6小時(表4-11)，其所需反應槽體積相仿，但研究模組採用厭氧固定生物反應系統在耗電及廢棄污泥處理這兩個項目上將佔有絕大優勢，以台北市迪化污水處理廠為例：自96年正式營運以來，歷年每月平均用電量約在4,000,000度~5,000,000度間(詳圖4-13)，其中以供應生物系統所需氧量之離心式鼓風機之耗電量占最大宗，其離心式鼓風機共3台(2,000Hp/台)，原則上採2用1備方式運轉，推估其鼓風機每月用電量=2×2,000

$\times 0.75 \times 24 \times 30 = 2,160,000$ 度，佔全廠用電之比例逾 50%，倘改以厭氧固定生物反應系統處理，因不需持續性曝氣，可節省之電費甚為可觀。

在本研究中，出流水脂質含量平均值為 4.3 mg/L，最大值為 6 mg/L，最小值為 1.5 mg/L，雖仍低於放流水排放標準(油脂，10 mg/L)，但其去除效率不佳終將是厭氧固定生物反應系統的一大課題，也將影響整體都市污水處理之成效。



表 4- 11 活性污泥法之種類及設計參數

處理方式	負荷比 (Kg BOD/ Kg MLSS · Day)	混合液懸 浮固體濃 度 (MLSS) (mg/L)	反應槽 水深 (m)	水力停 留時間 (HRT) (hr)	污泥停留 時間 (ASRT) (day)	迴流污泥率 (%)	反應槽形狀
標準活 性污泥 法	0.2~0.4	1,500~ 2,000	4~6	6~8	3~6	25~50	柱塞流式、 完全混合式
階梯曝 氣法	0.2~0.4	1,000~ 1,500 (最終 池槽)	4~6	4~6	3~6	50~100	多段柱塞流式
延長曝 氣法	0.05~0.10	3,000~ 4,000	4~6	16~24	13~50	100~200	柱塞流式、 完全混合式
氧化渠 法	0.03~0.05	3,000~ 4,000	2~5	24~36	8~50	120~200	繞流式完全混合形 無初級沉澱池 完全混合式
分批式 活性污 泥法 (SBR)	0.2~0.4 (高負荷型)	1,500~ 2,000 (高負 荷型)	4~5	24~48	—	排水比 1/6~1/3 (高負荷型)	完全混合式
	0.03~0.05 (低負荷型)	2,000~ 3,000 (低負 荷型)				排水比 1/4~1/2 (低負荷型)	
深層曝 氣法	0.2~0.4	1,500~ 2,000	10~12	6~8	—	50~100	圓形、柱塞流式、 完全混合式
活性污 泥膜濾 法 (MBR)	低 (依 MLSS 而定)	8,000~ 15,000	依膜材 而定	3~6	長 (依 MLSS 而定)	無	柱塞流式、 完全混合式

註：本表整理自「下水道施設計畫·設計指針及解說」2009 日本下水道協會

資料來源：內政部營建署「污水下水道工程設計指針與解說」

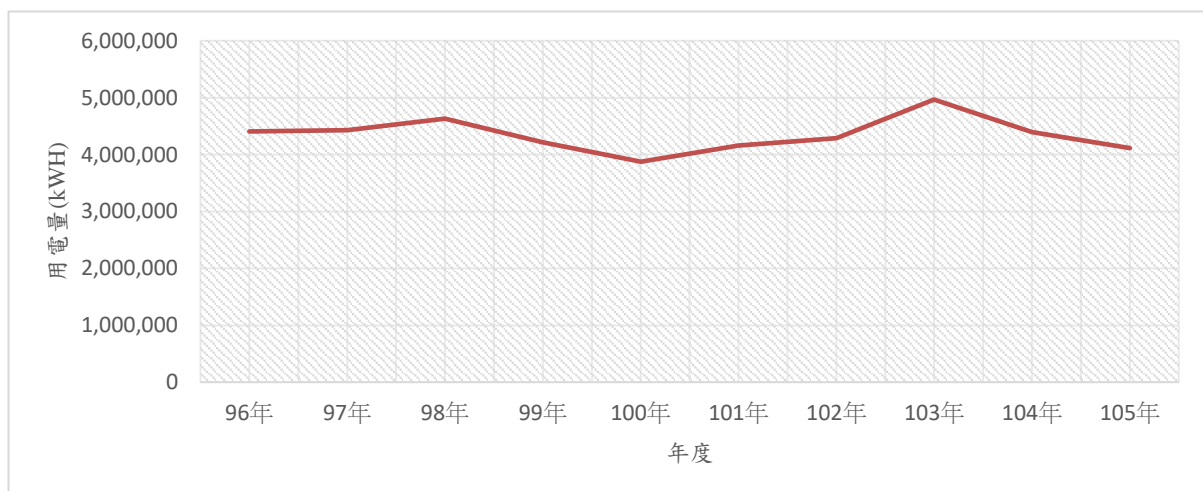


圖 4- 13 迪化污水處理廠歷年用電量

(整理自迪化污水處理廠歷年年報及月報)

第五章 結論與建議



本研究以全實廠都市污水進行模組試驗，其進流污水基值較低(化學需氧量介於 108 mg/L~365 mg/L 之間)、水質成分複雜且較不穩定，對厭氧系統確實是一大難題，而為了更貼近實廠之操作條件，研究採取低溫(25°C)運轉，以避免必須額外添加外來能源進行加溫，期在不提高操作維護費用(甚至降低)及減省能源的前提下，提升都市污水之處理效能。

5.1 結論

- 1.研究模組在 HRT=6 小時且有突增負荷的情形下，TCOD 平均去除率為 74.6%(最大值 82.8%，最小值為 70.9%)，雖低於總平均去除率，也遠低於標準活性污泥法之 85%~95%(內政部營建署「下水道工程設施標準」)，但出流水 TCOD 平均值為 62 mg/L(最大值 77 mg/L，最小值 49 mg/L)，則均符合放流水化學需氧量(COD)之排放標準(100 mg/L)，顯示厭氧固定生物反應系統對突增負荷的穩定度及低水力停留時間(HRT)的處理能效，在實務的應用上，可匹敵於傳統活性污泥法(HRT=6~8 小時)及階梯曝氣法(HRT=4~6 小時)。
- 2.研究模組對脂質之平均去除率 58.03%、單位體積削減率研究模組之平均值為 0.0186 kg/m³/day，出流水脂質含量平均值為 4.3 mg/L(最大值 6 mg/L，最小值 1.5 mg/L)，雖仍低於放流水排放標準(油脂，10 mg/L)，但相較於醣類及蛋白質之高去除率，脂質之低去除效率，是造成整體處理效能無法提升的最大障礙。
- 3.單位微生物質量對 TCOD 之削減率平均值約 0.0048 Kg-COD/Kg-微生物，對醣類及蛋白質的削減率平均值約為 0.00046 Kg/Kg-微生物，對脂質之平均削減率則僅有 0.00014 Kg/Kg-微生物，因此，提高單位體積之微生物質量，應可提高有機物質的削減率，有助於提升系統之整體成效。



5.2 建議

1. 模組體積較小，受外部因素影響較大(如進流水添加、HRT 調整、出流水阻塞.....等)，建議可洽詢規模較小且生物系統為兩池以上設計之實廠，將其中一池整建為固定厭氧生物模組進行實廠測試，可更準確、更深入進行研究。
2. 本研究缺少對三成分(醣類、蛋白質及脂質)共降解及相互影響之探討，倘能進一步尋得共降解之機制，應可解決都市污水處理之瓶頸。
3. 現今都市污水處理廠均只檢驗生化需氧量(BOD₅)及化學需氧量(COD)，倘能以適度頻率加測醣類、蛋白質及脂質含量，將有助於瞭解、甚至調整降解(如共降解)機制，以提升整體都市污水的處理成效。

參考文獻



- Abdelgadir, A., Chen, X., Liu, J., Xie, X., Zhang, J., Zhang, K., & Liu, N. (2014). Characteristics, process parameters, and inner components of anaerobic bioreactors. (BioMed research international)
- Breure, A., Mooijman, K., & Andel, J. v. (1986). Protein degradation in anaerobic digestion: influence of volatile fatty acids and carbohydrates on hydrolysis and acidogenic fermentation of gelatin. *Applied microbiology and biotechnology*, 24(5), 426-431)
- Chunghoon Shin, Perry L. McCarty, Jeonghwan Kim, Jaeho Bae (2014). Pilot-scale temperate-climate treatment of domestic wastewater with a staged anaerobic fluidized membrane bioreactor (SAF-MBR).
- Cirne, D., Paloumet, X., Björnsson, L., Alves, M., & Mattiasson, B. (2007). Anaerobic digestion of lipid-rich waste—effects of lipid concentration. (*Renewable energy*, 32(6), 965-975)
- Elbeshbishy, E., & Nakhla, G. (2012). Batch anaerobic co-digestion of proteins and carbohydrates. (*Bioresource technology*, 116, 170-178)
- Herbert H. P. Fang, Member, ASCE, and H. Q. Yu (2000). Effect of HRT on mesophilic acidogenesis of dairy wastewater.



Liu, D. H., & Lipták, B. G. (2000).

Wastewater treatment.

Man-hong Huang, Yong-mei Li, Guo-wei Gu (2010).

Chemical composition of organic matters in domestic wastewater.

Pei-Hsun Wu, Kok Kwang Ng, Pui-Kwan Andy Hong, Ping-Yi Yang, Cheng-Fang Lin (2017).

Treatment of low-strength wastewater at mesophilic and psychrophilic conditions using immobilized anaerobic biomass.

Perry L. McCarty, Jaeho Bae, and Jeonghwan Kim (2011).

Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer—Can This be Achieved?

Raunkjaer, K., Hvitved-Jacobsen, T., & Nielsen, P. H. (1994).

Measurement of pools of protein, carbohydrate and lipid in domestic wastewater. (Water Research, 28(2), 251-262)

R. H. Yoo, J. H. Kim, P. L. McCarty and J. H. Bae (2014).

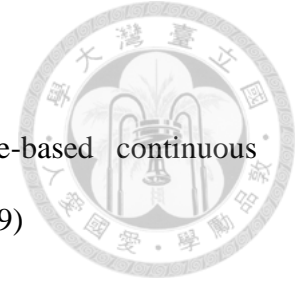
Effect of temperature on the treatment of domestic wastewater with a staged anaerobic fluidized membrane bioreactor.

Rihye Yoo a, Jeonghwan Kim a, Perry L. McCarty, Jaeho Bae (2012).

Anaerobic treatment of municipal wastewater with a staged anaerobic fluidized membrane bioreactor (SAF-MBR) system.

Sophonsiri, C., & Morgenroth, E. (2004).

Chemical composition associated with different particle size fractions in municipal, industrial, and agricultural wastewaters. (Chemosphere, 55(5), 691-703)



Wang, H., Fotidis, I. A., & Angelidaki, I. (2016).

Ammonia–LCFA synergetic co-inhibition effect in manure-based continuous biomethanation process. (Bioresource Technology, 209, 282-289)

Xiaodi Yue, Yoong Keat Kelvin Koh, How Yong Ng (2015).

Effects of dissolved organic matters (DOMs) on membrane fouling in anaerobic ceramic membrane bioreactors (AnCMBRs) treating domestic wastewater.

Zhi Huang, Say L. Ong, How Y. Ng (2011).

Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment : Effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling.

Zhi Huang, Say L. Ong, How Y. Ng (2013).

Performance of submerged anaerobic membrane bioreactor at different SRTs for domestic wastewater treatment.

田俊彥 (2016)。

厭氧固定生物技術處理低強度合成污水：水力停留時間與進流濃度之影響。
(國立台灣大學工學院環境工程研究所碩士論文)

陳昶瑞(2017)。

厭氧生物處理都市污水：醣類、脂質與蛋白質定量定性分析研究。(國立台灣大學工學院環境工程研究所碩士論文)

內政部營建署(2009)。

下水道工程設施標準。

內政部營建署(2016)。

污水下水道工程設計指針與解說。

