

國立臺灣大學生物資源暨農學院生物產業機電工程學系



碩士論文

Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

葉菜廢棄物與豬糞中溫厭氧共消化之研究

Mesophilic Anaerobic Co-Digestion of Vegetable

Wastes and Swine Manure

林雨潛

Yu-Shan Lin

指導教授：周楚洋 博士

Advisor: Chu-Yang Chou, Ph.D.

中華民國 105 年 7 月

July, 2016



誌謝

從大三進入 404 實驗室，這五年來承蒙老師周楚洋博士及實驗室學長姐們的指導，才能有如今的成長。謝謝周老師無論何時總是溫厚寬容，有著無盡耐心諄諄教導。感謝口試委員李允中博士及蘇忠楨博士給予的諸多建議及提點。

謝謝 Angel、小小、容伊學姊亦師亦友的指導，在論文、實驗及做人的道理上都讓我獲益良多；謝謝渝豐、佳倫、嘉臨學長姊帶來的歡樂時光；謝謝秀靜陪我度過青春的研究生活，一起修課、為實驗奮鬥，一起吃早、午、晚餐，一起出遊，有妳陪伴的這兩年，充實又美好。謝謝富彥、耕齡、詠傑，出差做粗活總是有賴你們的幫助。謝謝可靠負責的學妹依君，這一年交接的大小事都張羅的非常完美，感謝妳的各種大力協助。謝謝士豪學長的可靠，謝謝韓吉的可愛與療癒。

謝謝台大國農中心的交換學生承辦人 Alison 和 Jack、法國里爾高等農業學院 (ISA Lille) 的承辦人 Thanh Ly LE MINH 及導師 Julien Castelin 在交換期間的幫助。謝謝杰霖分享的交換經驗及線上即時救援，也謝謝庚融在交換期間的關照。

謝謝好同學、好玩伴兼每日飯友的菡庭、家瑋、阿剛、榕修、靜偉、毛毛、阿錡、思閔、阿毛、子毅、醬料，研究所的三年因為有你們的陪伴，我過得非常愉快。謝謝室友靖亞陪我度過碩一的風風雨雨、溫馨又可愛的宿舍時光。謝謝好友臻怡的陪伴與支持。謝謝溫暖的特級好玩伴兼男友執中，不論生活有多麼刮風下雨都能逗我發笑，時時提醒我另一種開心認真生活在當下的哲學。

最後，感謝老天爺把我安排在這個美好無比的家庭，有可以分擔心事的弟弟和可靠堅強的父母，在生活及心理上支持我、看顧我，讓我能沒有後顧之憂的做選擇、心無旁騖的學習、沒有壓力的生活，即使在很多不那麼贊同我的決定的時刻，仍然願意讓我去嘗試，並在一旁守護，讓我有機會經驗那些不一樣的風景。

謝謝這麼多幸運來到我的生命裡，希望我也能努力地使別人得到這些幸運。讓這個世界、讓台灣的环境因為我的存在而有更多一點好的改變。

中文摘要



本研究以豬糞與葉菜廢棄物進行中溫($37\pm 1^\circ\text{C}$)厭氧共消化的實驗,探討生產甲烷氣的最佳操作條件及混合比例。研究分成兩部分的實驗,實驗一為豬糞消化後之沼液與葉菜廢棄物的共消化試驗,探討豬糞在不同水力停留時間(HRT 分別為 12 天、10 天及 8 天)的初次消化後,觀察其出流液(沼液)在補充適當碳源的條件下進行二次厭氧消化是否可以有效提升其產氣效率。初次消化進流豬糞的總固形物(Total solids, TS)調製在 5%,二次消化的葉菜廢棄物 TS 則調製在 4%,共消化試驗的混合碳氮比(C/N)皆調配為 30:1。實驗二為豬糞與葉菜廢棄物的共消化,探討在 HRT 5 天的高有機負荷時,不同豬糞(SM)與葉菜廢棄物(VW)混合比例(SM:VW 分別為 1:0、4:1、3:1、2:1 及 1:1)的產氣效率以及葉菜廢棄物可添加的上限,實驗二所有進流基質包含豬糞及葉菜廢棄物的 TS 皆控制在 5%的濃度。

實驗一的實驗結果顯示在進流中混入 30%之葉菜廢棄物(即 HRT 12 天)時,可明顯相對提升有機物之去除率(COD 增加 5.5%, TS 7.81%, VS 15.77%)及氣體產率(GPR 增加 0.26 L/L/day, MPR 0.12 L CH₄/L/day)。實驗二結果顯示在 HRT 5 天,純以豬糞為進流基質 (SM:VW 為 1:0) 時有最好的產氣效率, GPR、MPR 及甲烷比例分別為 1.70 L/L/day、1.06 L CH₄/L/day 及 61.90%, COD、TS、VS 的去除率則為 16.27%、14.40%及 12.14%。若添加葉菜廢棄物進行共消化,則以豬糞和葉菜廢棄物混合比 4:1 為最佳, GPR、MPR 及甲烷比例分別為 1.49 L/L/day、0.77 L

CH₄/L/day 及 51.33%，COD、TS、VS 的去除率則為 16.95%、13.27%及 11.73%。

而本實驗進流之葉菜廢棄物佔比的極限為 33%，即豬糞和葉菜混合比 2:1，此時之

甲烷產率仍有 0.54 L CH₄/L/day，COD 去除率則為 13.85%；超過此混合比時，會

造成反應槽的抑制現象，不過在加入鹼(Sodium bicarbonate)調整進流及反應槽 pH

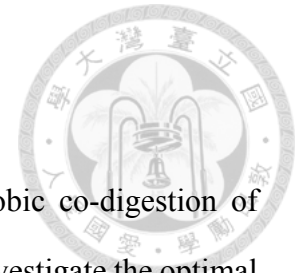
值後，可提高葉菜佔比最大至 50%。綜合以上結果以及與其他共消化的研究比較，

本研究在進流高濃度的固形物以及較高的有機負荷下，可成功地進行共消化，並達

到極佳的產氣效果。

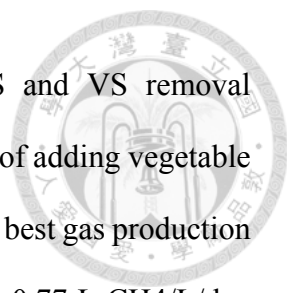
關鍵字：厭氧共消化、豬糞、葉菜廢棄物、甲烷、廢水處理

Abstract



In this study, the experiment of mesophilic ($37\pm 1^\circ\text{C}$) anaerobic co-digestion of swine manure (SM) and vegetable wastes (VW) was conducted to investigate the optimal operational condition and mixing ratio. The whole study includes two experiments. The first experiment was the co-digestion of digestate (the effluent of the primary digestion of swine manure) and vegetable wastes. This experiment was to evaluate if the gas production of digestate in the secondary digestion could be improved effectively after the supplement of proper carbon source under different hydraulic retention times (HRT) of 8, 10 and 12 days. The influent of the primary digestion was 5% TS swine manure, while the vegetable wastes used in the secondary digestion was controlled at 4% TS. Also, the carbon to nitrogen ratio (C/N) of feed mixture of co-digestion was prepared and controlled at around 30:1. The second experiment was the co-digestion of swine manure and vegetable wastes. This experiment was to evaluate the gas production and the limit of adding vegetable wastes at different mixing ratios of 1:0, 4:1, 3:1, 2:1 and 1:1 (SM:VW) under a relative high organic loading rate of 5-day HRT. The influent substrates including both swine manure and vegetable wastes were prepared at around 5% TS before mixing and feeding.

The results of the first experiment showed that in test of adding 30% of vegetable wastes to the primary digestate as feeding mixture (12-day HRT) could improve the COD, TS and VS removal efficiencies of 5.5%, 7.81% and 15.77%, respectively, and also improve the gas production rate (GPR) and methane production rate (MPR) of 0.26 L/L/day and 0.12 L CH_4 /L/day, respectively. The results of the second experiment showed, at 5-day HRT, the test of using 100% swine manure (SM:VW is 1:0) had the best gas production performance with GPR, MPR and methane content of 1.70 L/L/day,

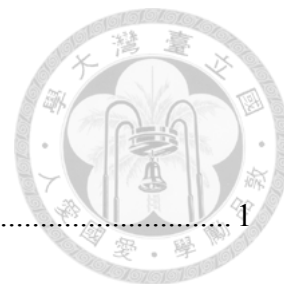


1.06 L CH₄/L/day and 61.90%, respectively, and the COD, TS and VS removal efficiencies of 16.27%, 14.40% and 12.14%, respectively. In respect of adding vegetable wastes for co-digestion, the test of 4:1 (SM:VW) mixing ratio had the best gas production performance with GPR, MPR and methane content of 1.49 L/L/day, 0.77 L CH₄/L/day and 51.33%, respectively, and the COD, TS and VS removal efficiencies of 16.95%, 13.27% and 11.73%, respectively.

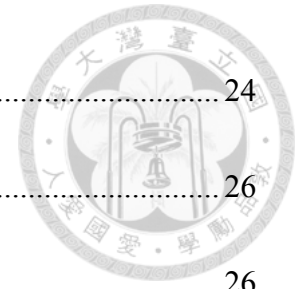
The results also showed to maintain the system working, the highest proportion of the vegetable wastes could be added was 33%, i.e. SM:VW of 2:1. The MPR of 0.54 L CH₄/L/day and TS removal efficiency of 10.87% was observed during this testing period. Beyond this adding ratio of vegetable waste, imbalance of reactor would be occurred due to inhibition. To suppress the inhibition effect, addition of alkali (Sodium bicarbonate) to adjust the pH value of influent and reactor, the proportion of vegetable wastes could then lift up to 50%. In conclusion, the anaerobic co-digestion of swine manure and vegetable wastes with high solids concentration influent and organic loading rate was successfully proved, and a high gas production could be achieved in this study.

Keywords: anaerobic co-digestion, swine manure, vegetable wastes, methane, wastewater treatment

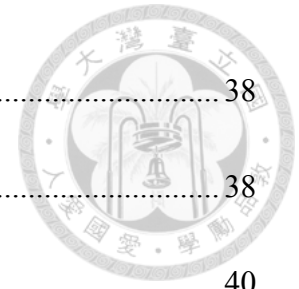
目錄



誌謝.....	1
中文摘要.....	2
Abstract.....	4
目錄.....	6
圖目錄.....	10
表目錄.....	11
第一章 前言及研究目的.....	13
第二章 文獻探討.....	15
2.1 葉菜廢棄物.....	15
2.1.1 台灣蔬菜生產概況.....	15
2.1.2 台灣果菜市場廢棄物處理概況.....	16
2.2 豬糞.....	17
2.3 厭氧醱酵.....	21
2.3.1 背景與發展.....	21
2.3.2 原理.....	22
2.3.3 優勢.....	22
2.3.4 共消化.....	22



2.3.5 碳氮比.....	24
第三章 材料與方法.....	26
3.1 研究流程.....	26
3.1.1 實驗一操作及起始條件.....	28
3.1.2 實驗二操作及起始條件.....	29
3.2 實驗材料.....	31
3.2.1 厭氧污泥.....	31
3.2.2 進流基質.....	31
3.3 實驗設備.....	31
3.3.1 反應槽主體.....	33
3.3.2 氣體收集與量測裝置.....	34
3.4 分析方法.....	35
3.4.1 pH 測定.....	35
3.4.2 化學需氧量測定.....	36
3.4.3 總固形物測定.....	36
3.4.4 揮發性固形物測定.....	37
3.4.5 總有機碳(TOC).....	37
3.4.6 總凱氏氮(TKN).....	37



3.4.7 甲烷含量測定.....	38
3.5 統計方法.....	38
第四章 結果與討論.....	40
4.1 實驗一：沼液與葉菜廢棄物之共消化.....	40
4.1.1 R1 反應槽之進出流數值及產氣分析.....	42
4.1.2 R2 槽之進出流數值及產氣分析.....	49
4.1.3 R3 槽之進出流數值及產氣分析.....	55
4.1.4 R2、R3 反應槽綜合比較.....	61
4.2 實驗二：豬糞與葉菜廢棄物之共消化.....	65
4.2.1 Test 4 – 未添加葉菜廢棄物之進出流數值及產氣分析.....	67
4.2.2 Test 5 – Test 7 之進出流數值與產氣分析.....	73
4.2.3 Test 4 – Test 7 之綜合比較.....	80
4.4 未添加葉菜廢棄物試驗的比較.....	84
4.5 文獻比較.....	85
第五章 結論與建議.....	87
5.1 結論.....	87
5.2 建議.....	88
參考文獻.....	89

附錄.....

93



圖目錄



圖 3-1 研究流程	27
圖 3-2 實驗一整體系統配置圖	32
圖 3-3 實驗二系統配置圖	33
圖 3-4 反應槽主體與保溫設備示意圖	34
圖 4-1 R1 槽進出流之水質變化及產氣率變化圖	43
圖 4-2 R2 槽進出流之水質變化及產氣率變化圖	50
圖 4-3 R3 槽進出流之水質變及產氣率變化圖	56
圖 4-4 R2、R3 槽之有機物去除率及產氣率綜合比較圖	63
圖 4-5 A1 及 A2 槽進出流之水質變化及產氣率變化圖	71
圖 4-6 B1 及 B2 槽進出流之水質變化及產氣率變化圖	72
圖 4-7 T4、T5、T6、T7 之綜合比	82



表目錄

表 2-1 2015 年前六大養豬縣養豬頭數、場數 (財團法人中央畜產會, 2015)	18
表 2-2 2015 年養豬場飼養規模 (財團法人中央畜產會, 2015)	19
表 3-1 實驗一之反應槽操作條件	28
表 3-2 實驗一之反應槽起始條件	29
表 3-3 實驗二反應槽操作條件	30
表 3-4 實驗二反應槽起始條件	30
表 3-5 水質分析項目及方法	35
表 4-1 厭氧污泥及基質之性質分析	40
表 4-2 實驗一反應槽操作參數	41
表 4-3 R1 反應槽各階段試驗有機負荷率.....	45
表 4-4 R1 反應槽各階段試驗之進出流 pH、COD	46
表 4-5 R1 反應槽各階段試驗之進出流 TS、VS.....	47
表 4-6 R1 反應槽各試驗之沼氣產率、甲烷濃度及產率、單位基質甲烷產率.....	48
表 4-7 R2 反應槽各階段試驗有機負荷率.....	52
表 4-8 R2 反應槽各階段試驗之進出流水質.....	52
表 4-9 R2 反應槽各階段試驗之進出流水質.....	53

表 4-10 R2 反應槽試驗之沼氣產率、甲烷濃度及產率、單位基質甲烷產率.....	54
表 4-11 R3 反應槽各階段試驗有機負荷率.....	57
表 4-12 R3 反應槽各階段試驗之進出流水質.....	58
表 4-13 R3 反應槽各階段試驗之進出流水質.....	59
表 4-14 R3 反應槽試驗之沼氣產率、甲烷濃度及產率、單位基質甲烷產率.....	60
表 4-15 R2、R3 反應槽之比較.....	64
表 4-16 實驗二起動時厭氧污泥及基質性質分析.....	66
表 4-17 實驗二反應槽操作條件.....	66
表 4-18 Test 4 試驗之進出流水質.....	68
表 4-19 Test 4 試驗之進出流水質.....	69
表 4-20 Test 4 試驗之沼氣產率、甲烷濃度及產率、單位基質甲烷產率.....	70
表 4-21 T5、T6、T7 反應槽有機負荷率.....	73
表 4-22 T5、T6、T7 各階段試驗之進出流 pH、COD.....	75
表 4-23 T5、T6、T7 各階段試驗之進出流 TS、VS.....	77
表 4-24 T5、T6、T7 之沼氣產率、甲烷濃度及產率、單位基質甲烷產率.....	79
表 4-25 T4 至 T7 四試驗之各項分析數值比較.....	83
表 4-26 HRT 為 12、10、8、5 天之比較.....	84
表 4-27 本研究結果與其他文獻之比較.....	86

第一章 前言及研究目的



如何處理廢棄物，對土地非常有限的台灣來說，一直都是個棘手且重要的課題。台灣 2014 年約產生 479 萬噸農業廢棄物，其中農產廢棄物佔 230 萬噸、畜產廢棄物則有 227 萬噸（行政院主計總處，2015）。透過厭氧發酵處理農牧業有機廢棄物，不僅能減少廢棄物處理的問題，還能產製沼氣作為生質能源，近年來一直都是政府鼓勵推行之項目。

在畜產廢棄物的處理部分，台灣目前在養頭數超過 200 頭豬之畜牧場，依《水污染防治法》規定設有污水處理設備者共 4000 多戶，農委會於 2016 年五月公佈之下半年預計推動之施政重點便包含再推動 100 戶豬場裝配沼氣發電（立法院公報處，2016），顯示政策趨勢為在台灣畜產業界逐步推展厭氧發酵產製沼氣之技術。

而在農產廢棄物的處理部分，厭氧發酵仍有技術上的障礙待改善。據行政院農業委員會出版之《103 年農業統計要覽》中統計，台灣於 2014 年生產之蔬菜量有 270 萬噸，其中 90 萬噸為葉菜類（Leaf vegetable）。而單就果菜市場的統計，近年來台灣每年至少產生 14 萬噸以上之果菜廢棄物（徐仙達等，2008），以焚化方式處理雖然可以紓解掩埋場用地的困境，然而果菜廢棄物含水量高，熱值低，並非良好熱源（郭寶育，2001），需額外添加輔助燃料，焚化成本較高，較無能源利用的效率。含水量高的特性也不適合作為造粒與焙燒的料源，較適合回收進行生物發酵（行政院環境保護署環境檢驗所，2012）。



因此本研究之目的為探討台灣厭氧醱酵處理葉菜廢棄物的幾種不同可能性，為台灣農業廢棄物之再利用方式開拓新選項，嘗試在已發展成熟且已有推行成效之豬糞厭氧處理中加入葉菜廢棄物進行共消化。

本研究分為兩項實驗，一項實驗在探討已經過初步厭氧處理但仍含有豐富氮含量，其有機物濃度未達放流標準之出流水，經第二次再處理時，若額外添加葉菜廢棄物作為補充碳源再度進行厭氧處理，是否可有效提升有機物去除率及甲烷產率。

另一項實驗探討豬糞在水力停留時間短、有機負荷率高之條件下，加入不同比例之葉菜廢棄物進行厭氧處理，監測有機物去除率及甲烷產率之變化趨勢，並探討葉菜廢棄物可加入的極限。

第二章 文獻探討



2.1 葉菜廢棄物

2.1.1 台灣蔬菜生產概況

依農業統計年報公佈之數據計算，2014年台灣蔬菜之種植面積總計為14.7萬公頃，總產量282萬噸。主要產地為雲林縣、彰化縣、嘉義縣及屏東縣，分別負擔生產總產量之28.7%、12.7%、7.7%、7.5%之蔬菜（行政院農委會，2015）。依臺北農產運銷公司之運銷統計年報公佈之統計數字計算，甘藍及包心白菜為2015年主要蔬菜成交量最高之前兩名，分別佔前10名成交量之37%、13%（臺北農產運銷公司，2015）。

國內甘藍（又稱高麗菜，Cabbage）之種植面積有七千多公頃，產量為37.6萬公噸，自2005年起十年內之種植面積減少了12%，然而產量增加20%。2015年主要產地為雲林縣、宜蘭縣及彰化縣，分別貢獻26.6%、20%、14%之產量。

包心白菜（又稱結球白菜，Chinese cabbage）之種植面積共兩千多公頃，產量為8.1萬公噸，十年內減少了43%之種植面積，產量亦減少25%。2015年主要產地為雲林縣、彰化縣及宜蘭縣，分別貢獻47.9%、25.7%、10.5%之產量（行政院農委會，2015）。



2.1.2 台灣果菜市場廢棄物處理概況

台灣果菜批發市場，每年廢棄物總量為 17 萬噸，其中蔬菜、果皮等有機廢棄物比例約佔 71.5%~89.5%，約為 13 萬噸，佔總交易量之六成。

果菜市場主要廢棄物為包心白菜及甘藍之外葉、其次依序為茭白筍（竹筍）之外殼、短期葉菜類（如小白菜、油菜、青江白菜等）之莖葉、瓜類（如西瓜）之果體。甘藍及包心白菜自農政機關推動果菜分級包裝後規定以紙箱裝運，只能保留三片外葉以在運送時保護菜體，在零批及零售市場多只帶一片外葉或不帶外葉交易，因此外葉多在批發市場去除，而批發市場中甘藍及包心白菜為主要交易菜種（盛，2008），甘藍及包心白菜佔 2015 年臺北市第一、二果菜批發市場主要蔬菜交易量之 50%（臺北農產運銷公司，2015），其外葉也因此佔果菜批發市場廢棄物之大宗。

農產廢棄物中，59%之廢棄物就地翻耕掩埋，12%以堆肥處理，7.4%以作物栽培覆蓋處理，5.4%作為育苗栽培介質，3.8 作為禽畜舍墊料，2.9%以焚燒、掩埋處理，2.7%作為倉庫墊料，2.2%以加工製成飼料處理（行政院主計總處，2015）。而台灣果菜廢棄物多採掩埋、焚化及堆肥等三種方式處理。

2000 年台灣地區之果菜批發市場有 63 家，其中 35%為農會或合作社所設立，65%多由地方政府或農會所成立之公司經營，屬事業單位。批發市場所產生之廢棄物，大部份皆運至當地垃圾衛生掩埋場掩埋。由於果菜廢棄物比重低、體積龐大，影響現有掩埋場容量至鉅，果菜廢棄物以掩埋法處理非長久之計。



若採焚化方式處理，短期雖可抒解掩埋場困境，但果菜廢棄物含水量高，以能源效率來看，不甚經濟。

而果菜廢棄物若直接以堆肥處理，其高含水率與副資材之混合無法達到合理之體積配比，採高溫脫水亦耗大量能源；採擠壓、滾壓方式，則須另行處理滲出水，加上碳氮比遠低於一般堆肥之適宜操作條件，如添加碳氮比高之副資材加以混合調整，副資材可能含有不易被微生物分解成分，將延長堆肥所需時間及腐熟度不足。然近來由於掩埋場與焚化廠用地取得困難，促使堆肥技術不斷改進，將果菜廢棄物納入禽畜堆肥場共同堆肥處理為一方向，除可改善果菜廢棄物直接堆肥之技術瓶頸及處置問題，又能充分利用禽畜堆肥場的投資設備及閒置空間(郭，2001)。

2.2 豬糞

全球整體的溫室氣體(GHG)排放中，約有 20%的溫室氣體來自畜牧業(Watson et al., 1996)。其中，每年畜牧業所產生的甲烷量占全球甲烷排放量的 50%。

台灣主要飼養之禽畜中，養豬業為產值最高的單一產業，占畜牧業整體產值 46.4%。2015 年底統計，台灣在養豬總頭數為 549.6 萬頭，由於環保要求日益嚴格，相關單位加強取締違反環保法規之養豬戶，因此較 2014 年減少了 4.9 萬頭，減幅為 0.9%。歷年台灣的畜產自給率，豬肉之自給率一直都是最高的，自 2006 年以來，自給率皆未低於 89.0%，而牛、羊、禽類，自 2007 年至 2014 年之平均分別為 5.8%、



9.0%、85.5%。2015 年前六大養豬縣養豬頭數及場數如表 2-1 所示，雲林縣在養頭數最多，佔全台灣之 25.99%。2015 年養豬場飼養規模如表 2-2 所示，台灣目前在養豬頭數超過 200 頭以上之畜牧場共有 4,147 場（財團法人中央畜產會，2015）。

表 2-1 2015 年前六大養豬縣養豬頭數、場數（財團法人中央畜產會，2015）

地區	養豬頭數		養豬場數	
	(頭)	所佔比例(%)	(場)	所佔比例(%)
雲林縣	1,425,499	25.99	1,219	15.73
屏東縣	1,271,666	23.19	1,822	23.51
彰化縣	773,151	9.65	748	9.65
台南縣	569,031	10.38	703	9.07
高雄縣	292,390	5.33	558	7.20
嘉義縣	374,366	6.83	292	3.77
前六大縣合計	4,706,103	85.81	5,342	68.92
台灣全國合計	5,484,053	100	7,751	100



表 2-2 2015 年養豬場飼養規模 (財團法人中央畜產會, 2015)

規模別 (頭數)	養豬場數		養豬頭數	
	場數 (場)	百分比 (%)	頭數 (頭)	百分比 (%)
1-99	2,592	33.97	76,222	1.39
100-199	892	11.69	132,708	2.42
200-299	480	6.29	117,772	2.15
300-499	628	8.23	248,496	4.53
500-999	1,477	19.36	1,111,737	20.27
1000-1999	1,081	14.17	1,488,411	27.14
2000-4999	353	4.63	1,038,871	18.94
5000 以上	128	1.68	1,269,836	23.16
總計 Total	7,631	100.00	5,484,053	100.00

台灣 2014 年的畜產廢棄物為 227 萬噸，佔農業廢棄物之 47%。畜產廢棄物中，95%之廢棄物以堆肥方式處理，3.5%作為化製原料，另有 1.2%之畜牧廢棄物未獲妥善處理，約有 2.8 萬噸 (行政院主計總處, 2015)。

自 1974 年訂定水污染防治法以來，台灣一直以廢污水方式管制畜牧糞尿廢水之排放，畜牧業者設置三段式畜牧廢水處理系統，主要處理步驟依序為固液分離、厭氧處理及活性污泥處理。先以固液分離機分離固態廢棄物與液態廢棄物。固態廢棄物經堆肥醱酵製成堆肥，液態廢棄物則繼續流入厭氧槽和活性污泥槽處理。厭氧醱酵去除廢水中的有機物時產生的沼氣，由厭氧槽上方覆蓋的紅泥膠皮收集。

依《水污染防治法》規定，位於自來水水質水量保護區之飼養豬 10 頭以上



豬場、非位於自來水水質水量保護區之飼養豬 20 頭以上豬場，皆須受水污染防治法之規範。目前在養頭數超過 200 頭豬之畜牧場，廢水量 50(公噸/日)以下者須提簡易排放許可文件、廢水量 50(公噸/日)以上者須提排放許可證且經技師簽證、廢水量 100(公噸/日)以上者須設置乙級專責人員；飼養豬超過 2000 頭以上者須在營運前提水污染防治措施計劃。畜牧業者若想將沼液排放到農田灌溉，須先經農委會個案核准、向地方環保局申請變更水污染防治措施、請技師重新評估及現場稽查等手續，過程繁瑣，使許多農民選擇直接處理後排放，既捨棄糞肥灌溉之效益，又成為中南部河川的一大污染源。

水污染防治措施及檢測申報管理辦法於 2006 年發布，歷經 4 次修正，推動設置水質水量自動監測設施，即時監控放流水品質，2015 年十一月再次修正發布後，推動畜牧糞尿資源化管理畜牧糞尿沼渣、沼液可供農田肥分使用，不排入地面水體。環保署之新修「水污染防治措施及檢測申報管理辦法」，擬訂畜牧糞尿厭氧發酵後作為農地肥分使用專章，規定畜牧業者若要將畜牧糞尿作為農地肥分使用，須符合以下規定：(1) 豬糞尿經厭氧發酵須達 10 日以上、牛糞尿須達 5 日以上，(2) 定期排出沼液、沼渣，(3) 厭氧發酵設施須設置沼氣收集之紅泥膠皮，(4) 合作之農地場址須簽訂合約書或出具同意書，(5) 除以灌溉水混合溝灌與漫灌外，應於施灌 1 小時內完全滲入土壤，沼液不可滯留於農地表面，(6) 需設有遇雨暫停施灌期間可儲存沼液之足夠緩衝容量，(7) 申請沼渣沼液作為農地



肥分使用計畫，經農政機關審查。(全量施灌，未排放到地面水體者，不需再另申請水污染防治措施計畫及排放許可證。) 環保署公布之施政目標包含 2016 年實施畜牧糞尿作為農田肥分達 15 場 (行政院環保署，2015)。

2.3 厭氧醱酵

2.3.1 背景與發展

厭氧處理技術應用在廢水處理的領域，已發展超過一世紀，在有機廢棄物處理的領域中成功建立起良好的技術系統，讓我們能以低廉的成本將有機廢棄物轉換成沼氣作為再生能源使用，近來的研究傾向於將此技術應用於各種有機廢棄物及能源作物上。過去幾年，也有許多研究致力於改善處理效率，主要著重在三個面向：

(1) 分析加入不同基質共消化，調整碳氮比及對利用效率的影響，(2) 醱酵前對基質進行前處理，以改變物理或化學性質，使其更易於被微生物分解利用，以及(3) 對厭氧處理程序模擬的數學模型建立，以便於預測共消化的處理效果，藉此調整基質到最佳的混和比例。目前之研究結果皆顯示混合不同有機廢棄物可使得營養更均衡，前處理也使有機固體廢棄物更易於被微生物分解，數學模型也能成功地預測何者為最佳之基質混合條件以及該基質須採取之最佳前處理方式 (Esposito et al., 2012)。



2.3.2 原理

厭氧醱酵之過程複雜，主要可分為水解、酸化、醋酸化以及甲烷化四大步驟(McCarty, 1964 ; Seadi et al., 2008)。廢水先經由水解菌水解，再由酸化菌降解成乙酸、丙酸、丁酸以及少量的氫氣與二氧化碳，進一步由不同種類之甲烷生成菌消化產出甲烷與二氧化碳氣體，產生之甲烷約有 72%來自醋酸的轉換，而 28%來自氫氣的轉換(McCarty and Smith, 1986)。

2.3.3 優勢

廚餘或食品加工廠的廢棄物、家畜排泄物跟下水道污泥等生物質廢棄物，都含有大量水分，部分含纖維素、半纖維素、木質素、蛋白質、脂肪等成分，若以燃燒等技術處理此類濕式生物質，需消耗大量能源去除水分，使產出之能量小於消耗之能量，因此濕式材料較適合以厭氧醱酵方式處理(本間等，2013)。除了可作為再生能源使用的沼氣外，厭氧醱酵的附加價值還有它的副產物「沼液」，沼液的營養成分高，因此能夠直接施灌回農地作肥料使用，或加工製成堆肥。(Esposito et al., 2012)。

2.3.4 共消化

由於厭氧處理為一生物性的程序，非常容易受到環境及操作條件的影響，例如溫度、酸鹼度、營養成分、碳氮比、碳磷比、是否存在抑制劑、基質的性質、微量



元素、顆粒大小等等。因此近年來興起許多同時混合處理不同固體、液體廢棄物的研究，一般稱為共消化。

Fujita et al. (1980) 在玉米秸桿與豬糞之厭氧共消化研究中，動物糞便之氮含量偏高，其 C/N 比落在 7.4，遠低於厭氧發酵之理想值 25-35 之範圍，因此在該研究中添加含碳量高的農作廢棄物如秸桿（玉米收穫後留下的葉和莖），將碳氮比調整至理想範圍，自此開始了共消化的相關研究（詳細數據見附錄 1-1）。

Alvarez and Lidén (2008) 以玻利維亞牛豬屠宰場廢棄物、牛豬糞便與果菜廢棄物之厭氧共消化研究中，表示這類基質混合後進行共消化之結果皆優於單獨進行發酵處理之數值，在有機負荷率（Organic loading rate ,OLR）達 1.3 g VS/L/day 時，VS 之去除率可達 50%~65%，甲烷產量（Methane yield）可達 0.3 L/g VS added（詳細數據請見附錄 1-2）。

Kafle et al. (2013) 之蘋果廢棄物與豬糞厭氧共消化研究中顯示，在 HRT 為 30 天的條件下，當蘋果在共消化的含量由 25% 增至 33%（以 VS 為基準），OLR 為 1.6 g VS/L/day 時，沼氣產量會有正面的影響，Methane yield 為 0.19 L CH₄/g COD added，但由 33% 再增至 50% 時，則會因為揮發酸的快速累積而出現負面的協同作用，Methane yield 降至 0.05 L CH₄/g COD added（詳細數據見附錄 1-3）。

Mazareli et al. (2016) 在葉菜廢棄物與豬糞共消化之不同混合比研究中表示，在共消化實驗中增加葉菜廢棄物比例及 OLR 大大的提升了反應槽的緩衝能力，避



免了揮發酸累積造成的抑制甲烷菌作用，使可溶性 COD 的去除率達 85%，揮發性懸浮固體的去除率達 90%，在豬糞與葉菜廢棄物達 70:30 之混合比時有最佳之甲烷產率 1.08 L CH₄/L/day，同時 COD 之去除率可達 70%（詳細數據見附錄 1-4）。

共消化程序的優點包含：(1) 增進營養份（例：碳、氮等）的平衡；(2) 改善顆粒之沉降、懸浮、酸化等狀況；(3) 可能增加沼氣產量；(4) 增加可回收處理之廢棄物種類；(5) 額外之養分回收（例：土壤改良劑）；(6) 增加生物可分解之有機物的比例；(7) 提供緩衝之容量以穩定系統；(8) 可調整水分含量及酸鹼值；(9) 可以稀釋潛在的抑制物質、毒性物質；(10) 加強微生物間的協同作用。而共消化之限制則包括：(1) 增加出流沼液之有機物含量；(2) 可能需經額外前處理；(3) 增加混合所需注意的事項；(4) 可能增加沼液處理的複雜性；(5) 可能降低沼氣產量及產率；(6) 須增加衛生要求及規範；(7) 須增加沼液用於土地利用時之限制以減少土地污染之風險；(8) 沼液灌溉土地之執行細節需要與合作之農戶磨合(Braun, 2002; Mata-Alvarez et al., 2000)。

2.3.5 碳氮比

厭氧醱酵中，有機物中的碳氮比為一極為重要的影響因子。不適合的碳氮比會抑制醱酵反應，為了改善碳氮比，通常會混合其他有機物進行共消化。其最大的優點在於讓有機負荷率有較大的緩衝空間(Khalid et al., 2011)。對含碳量高的農業廢



棄物而言，共消化被認為是其中較符合成本考量的一種方式，加入含氮量高的物質如動物糞便與含碳量高的農業廢棄物混合，平衡碳氮比，有助於增加產氣率 (Comino et al., 2010)。

蛋白質含量較高的廢棄物代表含氮量高，這類廢棄物的有機質含量及生化需氧量(BOD)都較高，但碳氮比(C/N ratio)則偏低。動物廢棄物有高濃度的氨氮，通常被視為抑制厭氧反應的一個影響因子。植物廢棄物有很高的碳氮比，範圍自 173 到 1000 以上都有。在共消化程序中，富含蛋白質的廢棄物可提供一良好的緩衝能力，及多樣性的營養成分，而含碳量高的廢棄物則可平衡碳氮比，降低氨氮產生抑制作用的可能(Esposito et al., 2012)。

早期研究碳氮比的文獻中表示 C/N ratio 介在 25~35，應是進行厭氧發酵之最佳狀態(Scharer and Moo-Young, 1979)。在 Wang (2009)的研究中指出在豬糞中加入 46%的麥稈進行共消化，可增加 10%的甲烷產量。在 Wu et al. (2010)的研究中，豬糞中加入含碳量高的農業廢棄物如玉米穗軸、燕麥稈、稻稈會明顯增加沼氣產氣率，該實驗調整碳氮比至 16、20 及 25，其中碳氮比為 25 時可達到最大的沼氣產率。此外 Hawkes (1980)的研究也發現碳氮比介在 20 與 30 間時，有最好的處理效果；而 Sievers and Brune (1978)的研究則表示碳氮比 16 是最佳的操作條件。

第三章 材料與方法

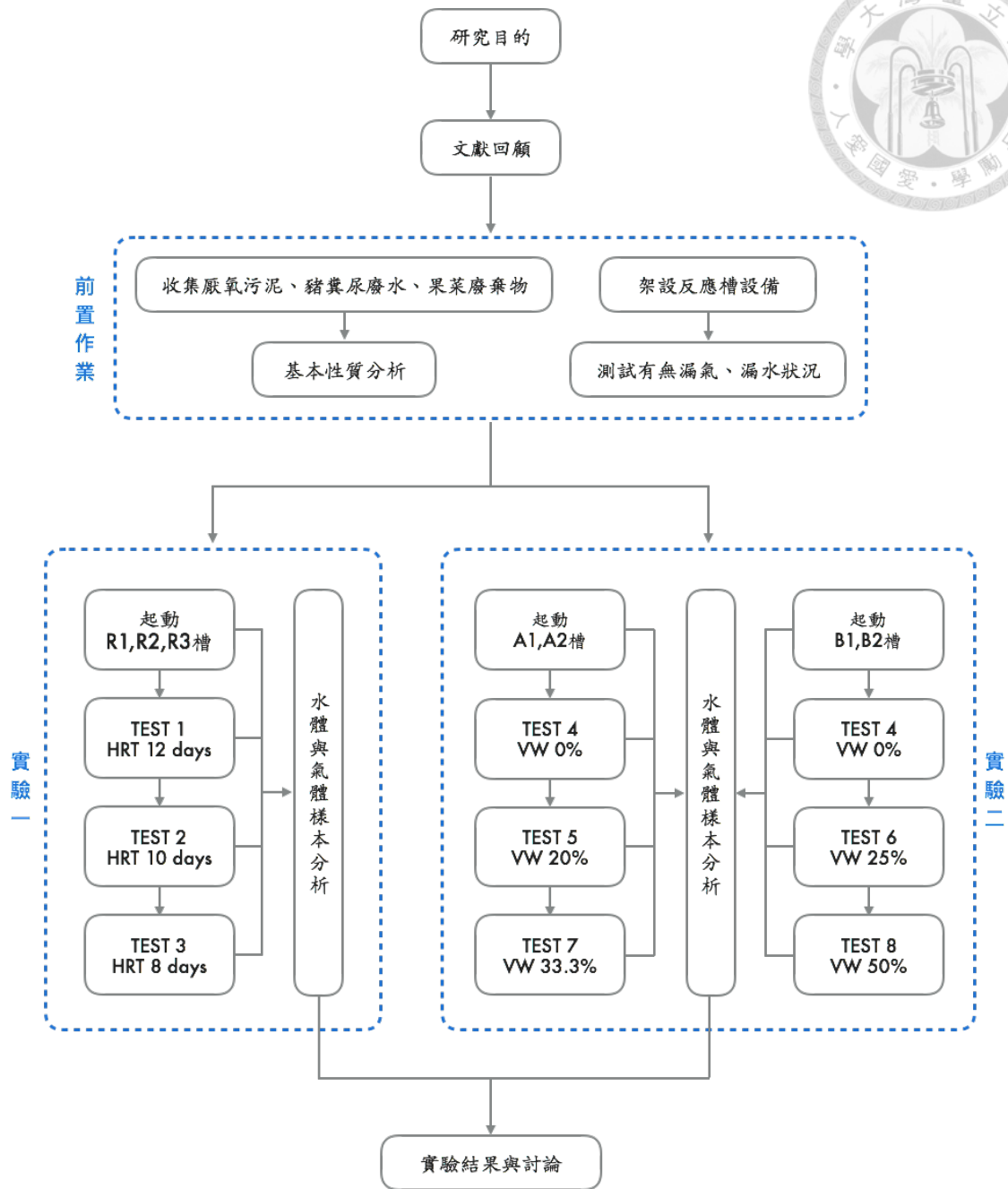


3.1 研究流程

本研究以豬糞與葉菜廢棄物，進行中溫厭氧共消化的實驗，以探討生產甲烷氣的最佳操作條件及混合比例。

研究流程如圖 3-1 所示，整個研究分成兩部分的實驗。實驗一為沼液與葉菜廢棄物的共消化，探討豬糞經不同水力停留時間(HRT 分別為 12 天、10 天及 8 天)處理後，其含氮量仍十分充裕的出流液在補充適當碳源的條件下進行二次厭氧醱酵處理，觀察是否可以有效提升其產氣效率。實驗二為豬糞與葉菜廢棄物的共消化，探討在水力停留時間較短的條件下(HRT 5 天)，豬糞與葉菜廢棄物在何種混合比例條件下進行共消化，能獲得最佳產氣效率。

實驗一及實驗二之反應槽皆採半連續式操作，每天進出流一次。



VW：葉菜廢棄物 (Vegetable wastes)

圖 3-1 研究流程



3.1.1 實驗一操作及起始條件

實驗一反應槽操作條件如表 3-1 所示，依 HRT 分成三組試驗進行——Test 1、Test 2、Test 3 之 HRT 分別為 12 天、10 天、8 天。操作包含三個反應槽 R1、R2、R3，其工作體積分別為 6 L、2.5 L、2.5 L。R1 反應槽之進流為 TS 5% 之豬糞，為探討其處理後之出流廢水，在補充額外碳源後產氣效率的改變情形，此試驗將 R2 及 R3 反應槽設計為對照組——R2 之進流為 100% 沼液，而 R3 之進流為沼液與葉菜廢棄物依碳氮比 3:1 比例混合之廢水。

實驗一之反應槽起始條件如表 3-2 所示，將豬糞及厭氧污泥以體積比 3:2 之比例混合起動。

表 3-1 實驗一之反應槽操作條件

	Working Volume (L)	Substrate	HRT (days)		
			Test 1	Test 2	Test 3
R1	6	TS 5% SM	12	10	8
R2	2.5	R1 digestate	12	10	8
R3	2.5	R1 digestate + TS 4% VW	12	10	8

SM：豬糞 (Swine manure)

VW：葉菜廢水 (Vegetable wastes)

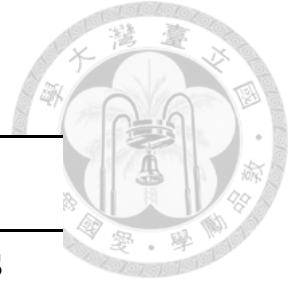


表 3-2 實驗一之反應槽起始條件

	Working Volume (L)	HRT (days)	Start - up
R1	6	12	3.6 L SM + 2.4 L AS
R2	2.5	12	1.5 L SM + 1 L AS
R3	2.5	12	1.5 L SM + 1 L AS

SM：豬糞 (Swine manure)

AS：厭氧污泥 (Anaerobic sludge)

3.1.2 實驗二操作及起始條件

實驗二為探討在水力停留時間較短的條件下(HRT 5 天)，豬糞與葉菜廢棄物在何種混合比例條件下進行共消化，能獲得最佳產氣效率。

實驗二共操作 4 個反應槽，分成 A、B 兩組同時進行，實驗採二重複，反應槽操作條件如表 3-3。A 組包含 A1 及 A2，進行 Test 4、Test 5、Test 7 之試驗，其豬糞與葉菜體積比分別為 1:0、4:1 及 2:1；B 組包含 B1 及 B2，進行 Test 4、Test 6、Test 8 之試驗，其豬糞與葉菜體積比分別為 1:0、3:1 及 1:1。

每項試驗都會持續操作至甲烷濃度及甲烷產率趨於穩定並保持穩定達 3 個 HRT 時才會進入下一項試驗。Test 4 為起動試驗，觀察四個槽之甲烷產率都達一穩定數值且彼此之數值接近，表示系統皆已調整完畢並呈現穩定狀態時，A 組及 B 組才開始進行 Test 5 及 Test 6 試驗。

實驗二之反應槽起始條件如表 3-4 所示，將豬糞及厭氧污泥以體積比 3:2 之比例混合起動。

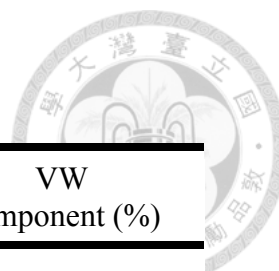


表 3-3 實驗二反應槽操作條件

Test	Test notation	Feed mixing ratio SM:VW	VW component (%)
Test 4	T4-A1	1:0	0%
	T4-A2	1:0	0%
	T4-B1	1:0	0%
	T4-B2	1:0	0%
Test 5	T5-A1	4:1	20%
	T5-A2	4:1	20%
Test 6	T6-B1	3:1	25%
	T6-B2	3:1	25%
Test 7	T7-A1	2:1	33.3%
	T7-A2	2:1	33.3%
Test 8	T8-B1	1:1	50%
	T8-B2	1:1	50%

SM：豬糞 (Swine manure)

VW：蔬菜廢棄物 (Vegetable wastes)

表 3-4 實驗二反應槽起始條件

Working Volume (L)	HRT (days)	Start - up
3	5	1.8 L SM + 1.2 L AS

SM：豬糞 (Swine manure)

AS: 厭氧污泥 (Anaerobic Sludge)



3.2 實驗材料

3.2.1 厭氧污泥

實驗中所使用的厭氧污泥是取自苗栗民間豬場內三段式廢水處理系統中之污泥儲存池之底泥，經過基本成分測定後，用以做為厭氧反應槽之菌種。

3.2.2 進流基質

實驗中所使用之豬糞取自以人工收集乾豬糞之苗栗民間豬場，加水攪拌均勻後量測其 TS 濃度，再依所得數值調整至 TS 濃度為 5%，分裝儲存於-20°C 冰櫃，待使用前再移至 4°C 冰箱退冰。

實驗中所使用之葉菜廢棄物取自臺北市第一果菜批發市場，以重量比 9:1 之比例混合甘藍菜(Cabbage)及結球白菜(Chinese Cabbage)廢棄物，並加水以果汁機打成泥狀，量測其 TS 濃度，分裝儲存於-20°C 冰櫃，實驗前再移至 4°C 冰箱退冰，並調整成所需濃度。

3.3 實驗設備

實驗一之整體系統配置如圖 3-1 所示，R1、R2、R3 為反應槽主體，進、出流以蠕動幫浦(System model NO. 7553-80, Masterflex®, Cole-Parmer Instrument Co., IL, USA) 控制，出流液每兩天採樣一次進行各項水質分析，氣體產量則每兩天記錄一



次。R1 出流之沼液將取部分做為樣本分析使用，部分做為 R2 之進流，部分與葉菜廢棄物依碳氮比 3:1 之比例混合做為 R3 之進流。

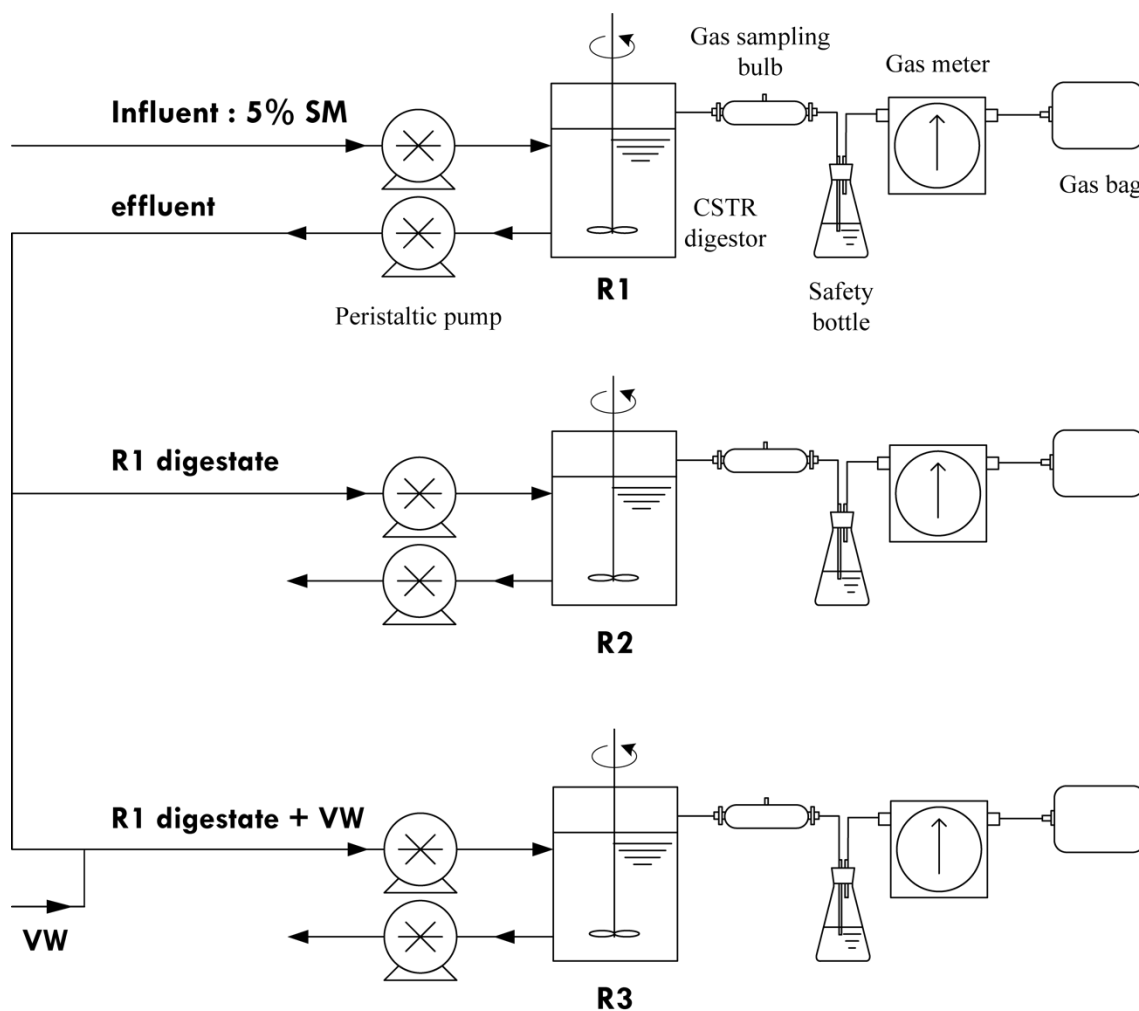


圖 3-2 實驗一整體系統配置圖



實驗二包含四個反應槽 A1、A2、B1、B2，其個別系統配置如圖 3-3 所示，

在反應槽主體外，配置進出流幫浦、氣體收集與量測裝置。

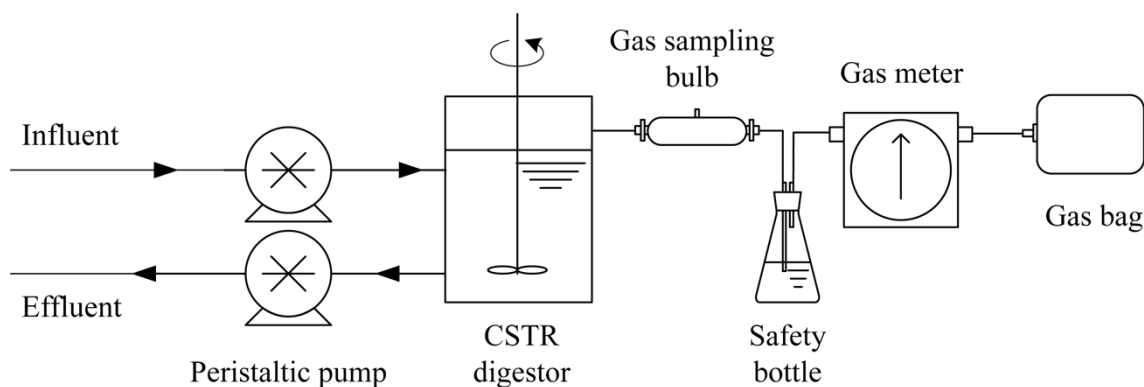


圖 3-3 實驗二系統配置圖

3.3.1 反應槽主體

實驗一之 R1 反應槽為總體積 7 L 之連續攪拌反應槽(Continuous flow stirred-tank reactor, CSTR)，實際有效工作體積(Working volume)為 6 L。除 R1 外，其餘反應槽 R2、R3、A1、A2、B1、B2 皆為總體積為 5 L 之 CSTR，實際有效工作體積分別為 2.5 L、2.5 L、3 L、3 L、3 L、3 L。槽體為圓柱狀，以雙層壓克力製成，中軸為配備三片攪拌扇葉之不鏽鋼轉軸。槽體外壁皆環繞有一圈保溫層，先於恆溫式水浴槽中將水溫控制在 $37 \pm 1^\circ\text{C}$ ，再以沈水馬達將保溫水循環送入反應槽保溫層，使反應槽維持在恆溫狀態，如圖 3-4 所示。

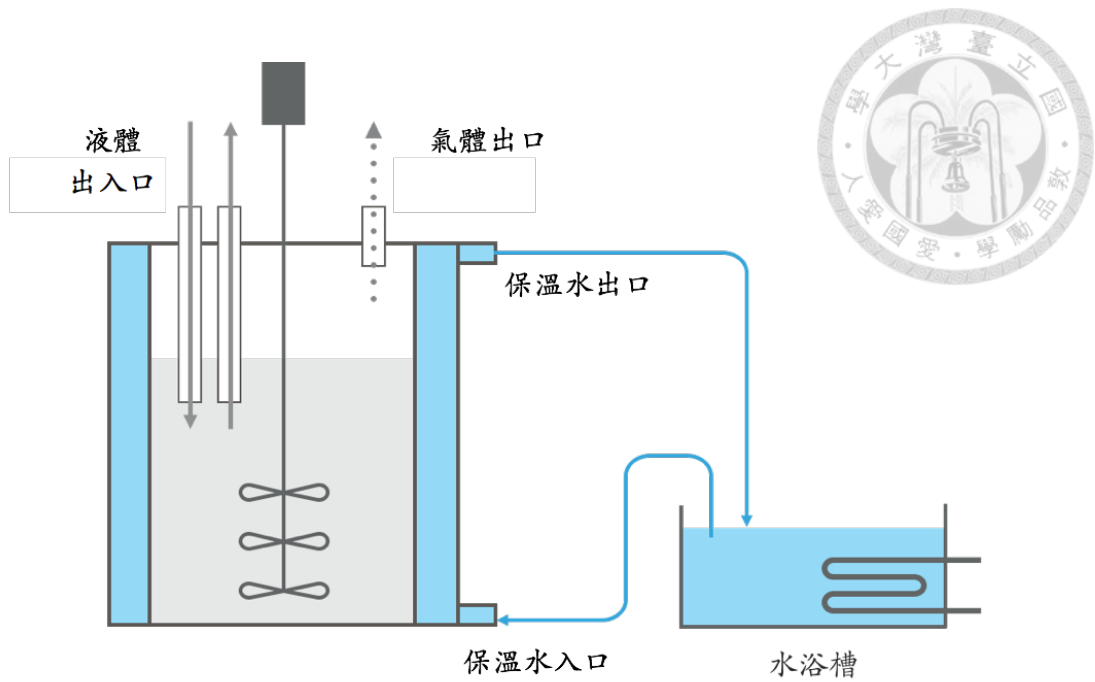


圖 3-4 反應槽主體與保溫設備示意圖

3.3.2 氣體收集與量測裝置

反應槽所產生的氣體以集氣袋(CAT. NO. 232-01, SKC Inc. USA) 收集，集氣袋與濕式氣體流量計(W-NK-0.5, Shinagawa Co., Tokyo, Japan)間利用管路及多向接頭連接，氣體通過氣體取樣瓶及安全瓶，再經過氣體流量計記錄累積產氣量，最後通入集氣袋收集，防止氣體溢失。每兩天紀錄流量計讀數以計算氣體產率(Gas production rate, GPR)，並以採樣針抽取取樣瓶(Gas sampling bulb)內氣體，以氣相層析儀 (Gas chromatograph, 中國層析-8700T, Taiwan) 作氣體之成份分析，測定甲烷濃度 (Methane content)。



3.4 分析方法

反應槽出流水各種水質項目之測定，分析方法參照 Standard Methods (APHA, 1992)，詳列於表 3-5。測量項目包含酸鹼度 pH、化學需氧量 (Chemical oxygen demand, COD)、總固型物 (Total solids, TS)、揮發性固型物 (Volatile solids, VS)。

實驗一的進流條件之一為碳氮比，採用之測定方法為總凱氏氮 (Total kjeldahl nitrogen, TKN) 及總有機碳 (Total organic carbon, TOC) 實驗方法說明於後。

表 3-5 水質分析項目及方法

Parameters	Method
COD	Standard methods - 5220C
TS	Standard methods - 2540C
VS	Standard methods - 2540E
TOC	Walkley – Black method
TKN	Macro – Kjeldahl method

3.4.1 pH 測定

進出流以 pH meter (PHB-9901, AI-ON Industrial Corp., USA) 測量其 pH 值。量測前先以 pH 4 和 pH 7 之標準緩衝液依序進行校正，校正完成後即可量測樣本的酸鹼值。



3.4.2 化學需氧量測定

水樣攪拌混合均勻後依一定倍率稀釋後，取 2.5 mL 放入密封管中，加入 1.5 mL COD digestion solution 和 3.5 mL 濃硫酸後密封，再放入 COD Reactor (HACH Co., USA) 加熱 2 小時後，靜置室溫下冷卻，以分光光度計 (DR/2000 direct reading spectrophotometer, HACH Co., USA) 測量，使用波長為 600 nm，先以空白試劑做零點校正，再放入樣品即可量測 COD 值。本實驗進行三重複試驗，利用進流和出流 COD 的差異即可計算出 COD 去除率，以檢測廢水處理效果。

3.4.3 總固形物測定

先將坩堝洗淨置入 550°C 高溫烤箱(MF40, Channel, Taiwan)中 30 分鐘，取出移至乾燥箱中冷卻秤重 (Tare, B)，再取 20 mL 之水樣加入坩堝，放置於 103°C 低溫烤箱(DCM45, Channel, Taiwan)中加熱，隔日取出放置於乾燥箱中冷卻至室溫後秤重(Tare+Dry, A)，然後進行計算。

總固形物濃度：

$$\text{TS, g/L} = (A - B) \times 1000/20 \quad (3-1)$$



3.4.4 揮發性固形物測定

將經過低溫烤箱加熱(103°C)後之樣本，放入 550°C 烤箱中加熱，2 小時後取出放置於乾燥箱中冷卻秤重 (Tare+Dry, C)，然後進行計算。

揮發性固形物濃度：

$$VS, \text{ g/L} = (A - C) \times 1000/20 \quad (3-2)$$

3.4.5 總有機碳(TOC)

精秤 0.1 g 樣品，置於 500 mL 錐形瓶，加入 10 mL 之 1N 重鉻酸鉀($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 溶液及 20 mL 硫酸並搖晃 30 秒使其充分均勻反應，靜置 30 分鐘後加入 150 mL 蒸餾水、10 mL 85% 磷酸(H_3PO_4)、0.2 g 氟化鈉(NaF)、30 滴二苯胺($\text{C}_6\text{H}_5\text{NHC}_6\text{H}_5$)指示劑，最後以 0.5 N 之硫酸亞鐵銨溶液($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)滴定。

3.4.6 總凱氏氮(TKN)

取 1 mL 樣品，置於消化管中，加入 10 mL 濃硫酸(H_2SO_4)，置於分解裝置上加熱 8 小時以上，待其液體顏色轉為透明澄清時始為分解完全，將溶液稀釋至 60 mL，取 30 mL 稀釋溶液及 40 mL 硼酸吸收劑進行蒸餾，所得硼酸吸收劑再以 0.01N 之鹽酸(HCl)反滴定。

將上述總有機碳含量與總凱氏氮含量相除即得碳氮比(C/N ratio)：

$$C/N = \text{TOC}/\text{TKN} \quad (3-3)$$



3.4.7 甲烷含量測定

出流前抽取取樣瓶中之氣體，測定甲烷(Methane, CH₄)之組成比例，以氣相層析儀(Gas chromatograph, 中國層析-8700T, Taiwan)測定 CH₄ 體積百分率組成。搭配熱導度檢測器(Thermal conductivity detector, TCD)與分析管柱 Porapaq Q (Supelco, Inc., MO, USA)進行氣體分析，操作時以氦氣(Helium)為乘載氣體(Carrier gas)，流速為 30 mL/min，檢測器溫度為 120 °C，注射口及管柱溫度分別為 110°C 及 75°C，再由積分軟體中的讀數與由已知成分的 CH₄ 標準氣體比較，即可得實驗所產生氣體中甲烷和二氧化碳之成分比例；標準氣體為 99.9999%之 CH₄ 及 99.999%之 CO₂ 所組成。甲烷濃度與產氣率相乘即得到甲烷產率(MPR, methane production rate)。

3.5 統計方法

本研究使用的統計軟體為 SAS (9.4 版)，使用之統計方法為變方分析法 (Analysis of variance, ANOVA) 及鄧氏新多變域測驗法 (Duncan's new multiple range test, DMRT)。

本研究以 ANOVA 測驗法比較各處理均值間是否有差異，若處理項實測 F 值未達 5%差異顯著水準，則右上角無標示*號，表示參試處理均值皆相等；若 F 值達到顯著水準，則表示參試處理間至少有一對處理均值不相等 (但不表示全部參試處理均值間皆不等)，標示一個*號表示 F 值達到 5%顯著水準，標示兩個**號表示 F 值達到 1%極顯著水準。

若 F 值達顯著水準，則進一步以 DMRT 新多變域測驗法比較，判斷哪些處理均值達到差異顯著水準。處理均值間無顯著差異者，在數值之右上方標示相同上標字母。多變域測驗法為 1955 年 Duncan 所提倡，為統計學上最普遍用於參試處理成對均值間差異比較法（沈明來，2010）。



第四章 結果與討論



4.1 實驗一：沼液與葉菜廢棄物之共消化

厭氧污泥及進料基質之性質分析如表 4-1 所示，豬糞之碳氮比(C/N ratio)為 30，葉菜廢棄物之碳氮比為 60。表 4-2 為實驗一的操作參數，第 0-19 天為起動期(Start-up)，第 20 天開始進入 HRT 為 12 天的試驗一(T1)，待數值穩定後，由第 24 天起算，維持 3 個 HRT 之穩定操作。第 60 天開始進入 HRT 為 10 天的試驗二(T2)，待數值穩定，由第 66 天起算，維持 3 個 HRT 穩定操作。第 100 天開始進入 HRT 為 8 天的試驗三(T3)，待數值穩定，由第 104 天起算，維持 3 個 HRT 之穩定操作，於第 130 天結束實驗一。

R2 槽之進流為 R1 槽之出流廢水，其於試驗一(T1-R2)、試驗二(T2-R2)、試驗三(T3-R2)之碳氮比分別為 17、23、26。為使 R3 槽之進流碳氮比維持在 30，將葉菜廢棄物加入沼液中混合，其所佔體積在試驗一(T1-R3)、試驗二(T2-R3)及試驗三(T3-R3)中分別為 30%、20%及 10%。

表 4-1 厭氧污泥及基質之性質分析

項目	厭氧污泥 AS	豬糞 SM	葉菜廢棄物 VW
pH	8.5	7.12	4.8
COD (g/L)	54.4	65.9	49.2
TS (g/L)	51.1	50.2	40.3
VS (g/L)	25.2	36.7	41.6
C/N ratio	-	30	60



表 4-2 實驗一反應槽操作參數

試驗	編號	HRT (days)	操作天數	Working Volume(L)	進流 C/N ratio	VW 所佔百分比
Start-up	ST	12	第 0 - 19 天	-	30	0%
Test 1	T1-R1	12	第 20-59 天	6	30	-
	T1-R2	12		2.5	17	-
	T1-R3	12		2.5	30	30%
Test 2	T2-R1	10	第 60-99 天	6	30	-
	T2-R2	10		2.5	23	-
	T2-R3	10		2.5	30	20%
Test 3	T3-R1	8	第 100 - 130 天	6	30	-
	T3-R2	8		2.5	26	-
	T3-R3	8		2.5	30	10%



4.1.1 R1 反應槽之進出流數值及產氣分析

R1 反應槽之工作體積為 6 L，進流為 TS 5%之豬糞(SM)。圖 4-1 所示為進出流水質—pH 值、COD、TS、VS、COD 去除率、TS 去除率、VS 去除率及產氣效率—沼氣產率(Gas production rate, GPR)、甲烷產率(Methane production rate, MPR)、甲烷濃度 (Methane content) 之變化。R1 槽各階段試驗之有機負荷率如表 4-3 所示，表 4-4~4-6 則為 R1 槽在不同試驗穩態階段 (Steady state) 的平均表現。

見圖 4-1 之起動期(ST)部分，各項數值在第 0 至第 8 天中變化最巨，第 10 天開始變化趨於平緩，觀察至第 20 天，顯示反應槽達穩定，可進入試驗一(T1)。

在判別醱酵槽是否穩定，pH 值的變化通常可視為指標性的數據，由於當酸的累積達一定量時便會抑制甲烷菌的反應，監控 pH 值便是實驗是否能順利進行的重點。由圖 4-1 可見，進流之 pH 值隨著實驗進行的時間愈長而有些微變動，由 T1 的 6.99 降至 T3 的 6.62，但反應槽出流之 pH 值除起動期(ST)有些微振盪外，其後之 T1 至 T3 皆維持相當穩定，標準差也在 0.03 以下，顯示反應槽運作良好。

本實驗的操作條件是將進流基質的 TS 濃度控制在 5%，由圖 4-1 中可見進流之 COD、TS、VS 皆保持平穩，表 4-4 及表 4-5 中的各項標準差也都在各平均值的 5%以下。

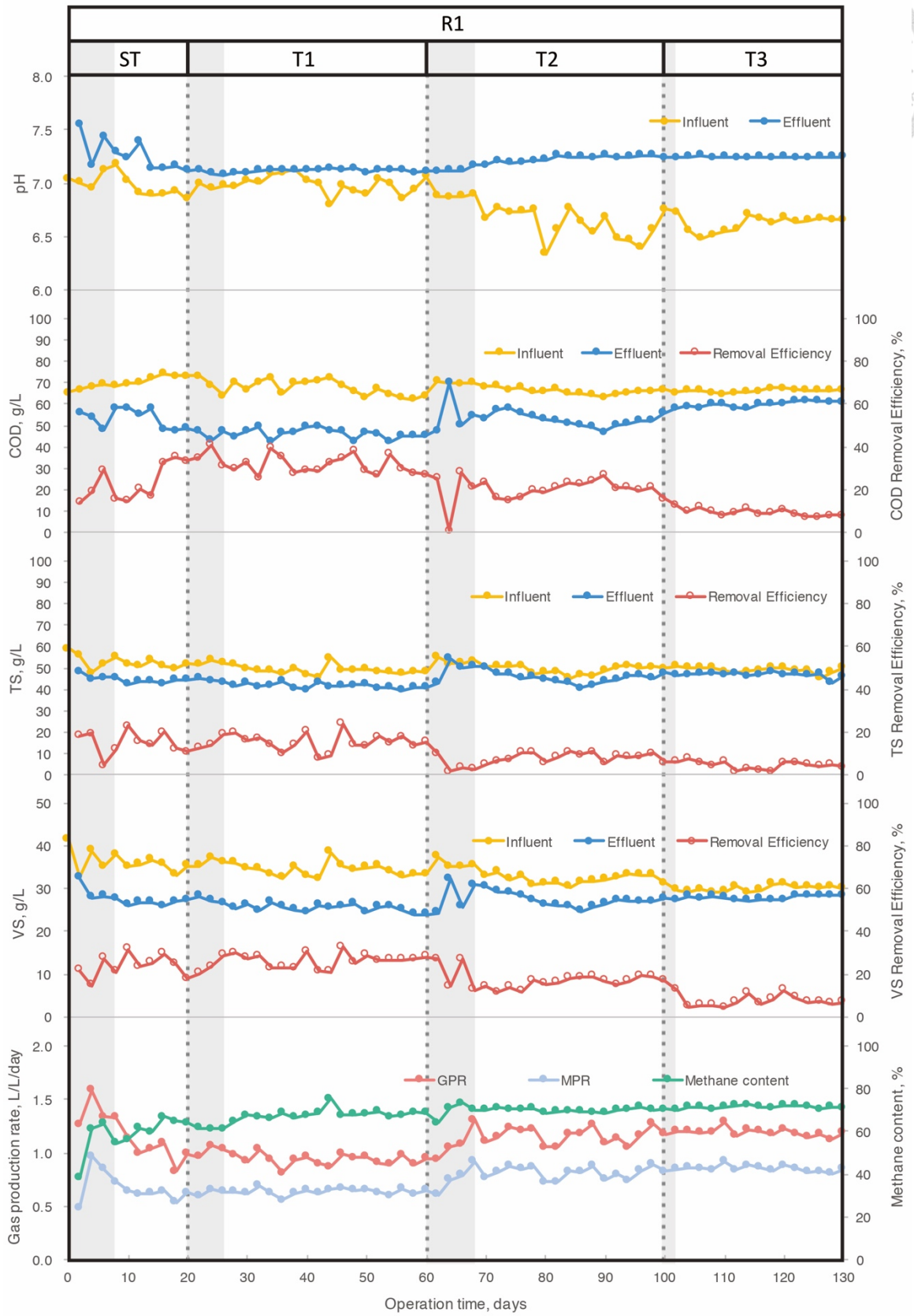


圖 4-1 R1 槽進出流之水質變化及產氣率變化圖



圖 4-1 中有機物的去除率隨著水力停留時間(HRT)的變小而下降，COD、TS、VS 的出流數值也隨之上升。在 HRT 為 12 天的 T1 期間，測得 COD、TS、VS 分別為 46.35 g/L、41.69 g/L 及 25.43 g/L，HRT 為 10 天的 T2 期間則分別升至 52.73 g/L、45.55 g/L 及 27.40 g/L，HRT 為 8 天的 T3 期間更上升至 60.13 g/L、46.87 g/L 及 27.84 g/L。因此其對應的去除率也隨之下降，經 DMRT 法檢定，顯示 T1、T2 及 T3 不同試驗之 COD、TS、VS 去除率皆有顯著差異，且其趨勢為 T1 之去除率大於 T2 之去除率，大於 T3 之去除率 — COD 之去除率自 T1 之 31.43% 降至 T2 之 20.83%，再降至 T3 之 9.32%；TS 去除率自 T1 之 15.59% 降至 T2 之 8.21%，再降至 T3 之 4.50%；VS 去除率自 T1 之 26.43% 降至 T2 之 15.82%，再降至 T3 之 7.11%。

由此可見沼液之有機物含量隨 HRT 縮短而上升，停留時間愈短，殘餘可利用之碳源愈豐富，測得碳氮比愈高，因此將之用作 R3 反應槽之進流使用時，額外補充之碳源需求也愈少。

隨 HRT 縮短、有機負荷率增加而上升的數值還有沼氣產率 (GPR)，由 T1 的 0.94 L/L/day 升至 T2 的 1.17 L/L/day，不過 T2 微幅升至 T3 的 1.19 L/L/day 則無顯著差異。甲烷濃度及沼氣產率也是逐漸上升之走勢，經 DMRT 法檢定，T1、T2、T3 期間之平均值皆有顯著差異，分別為 67.73%、70.01% 及 71.53%；甲烷產率自 T1 之 0.64 L CH₄/L/day 至 T2 之 0.82 L CH₄/L/day，再升至 T3 之 0.85 L CH₄/L/day。

另由表 4-4 發現 R1 在 HRT 為 10 天的 T2 試驗時有最佳的單位基質甲烷產率，分別為 0.12 L CH₄/g COD added 及 0.25 L CH₄/g VS added。



表 4-3 R1 反應槽各階段試驗有機負荷率

Test	HRT (Days)	COD loading rate (g COD/L/day)	VS loading rate (g VS/L/day)
ST-R1	12	5.95±0.19	2.97±0.13
T1-R1	12	5.62±0.28	2.87±0.13
T2-R1	10	6.64±0.18	3.24±0.13
T3-R1	8	8.30±0.10	3.75±0.09

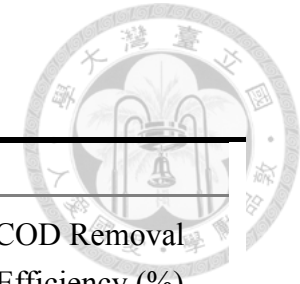


表 4-4 R1 反應槽各階段試驗之進出流 pH、COD

Test	HRT (Days)	pH		COD (g/L)		COD Removal Efficiency (%)
		Influent	Effluent	Influent	Effluent	
ST-R1	12	6.97±0.11	7.23±0.10	71.35±2.27	54.34±4.93	22.89±9.03
T1-R1	12	6.99±0.08	7.12±0.02	67.44±3.41	46.35±2.31	31.43±4.14 ^a
T2-R1	10	6.63±0.15	7.23±0.03	66.37±1.77	52.73±2.98	20.83±3.10 ^b
T3-R1	8	6.62±0.07	7.25±0.01	66.39±0.81	60.13±1.26	9.32±1.43 ^c

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。



表 4-5 R1 反應槽各階段試驗之進出流 TS、VS

Test	HRT (Days)	TS (g/L)			VS (g/L)		
		Influent	Effluent	TS Removal Efficiency (%)	Influent	Effluent	VS Removal Efficiency (%)
ST-R1	12	52.12±1.89	43.89±1.20	16.22±4.40	35.67±1.60	26.66±0.68	25.82±3.94
T1-R1	12	49.15±2.10	41.69±5.73	15.59±4.09 ^a	34.40±1.55	25.43±0.86	26.43±3.28 ^a
T2-R1	10	49.51±2.20	45.55±2.73	8.21±2.47 ^b	32.40±1.28	27.40±1.75	15.82±2.59 ^b
T3-R1	8	49.04±1.39	46.87±1.20	4.50±1.79 ^c	30.01±0.70	27.84±0.51	7.11±2.33 ^c

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。



表 4-6 R1 反應槽各試驗之沼氣產率、甲烷濃度及產率、單位基質甲烷產率

Test	HRT (Days)	GPR (L/L/day)	Methane content (CH ₄ %)	MPR (L CH ₄ /L/day)	Methane yield - COD (L CH ₄ /g COD added)	Methane yield - VS (L CH ₄ /g VS added)
ST-R1	12	1.07±0.17	60.73±4.82	0.63±0.06	0.11±0.01	0.21±0.01
T1-R1	12	0.94±0.06 ^b	67.73±2.69 ^c	0.64±0.03 ^c	0.11±0.01 ^b	0.22±0.01 ^b
T2-R1	10	1.17±0.08 ^a	70.01±0.78 ^b	0.82±0.06 ^b	0.12±0.01 ^a	0.25±0.02 ^a
T3-R1	8	1.19±0.04 ^a	71.53±0.66 ^a	0.85±0.03 ^a	0.10±0.004 ^c	0.23±0.01 ^b

GPR: Gas production rate, MPR: Methane production rate

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。



4.1.2 R2 槽之進出流數值及產氣分析

R2 反應槽之工作體積為 2.5L，進流為 100% 之 R1 出流沼液，作為 R3 反應槽（沼液與葉菜廢棄物之共消化）之對照組，各階段試驗之有機負荷率如表 4-7 所示，進出流水各項水質分析數值及產氣效率之變化則如圖 4-2 及表 4-8~4-10 所示。

R2 反應槽自起動第 3 天開始，始將 R1 沼液作為進流使用，變化最明顯之數值為 pH 及沼氣產率，待其走勢趨穩，自第 10 天起算，維持穩定 10 天，至第 20 天觀察反應槽環境判斷達穩定，始進入試驗一(T1)。

進流沼液之 pH 值穩定，R2 之出流廢水亦沒有明顯變化，其於 T1 之 7.18 至 T3 之 7.41 的微幅上升，推測應是反應槽長時間穩定的操作，已形成適合甲烷生成菌生長的环境。

隨著水力停留時間(HRT)縮短，R1 槽之有機物去除率下降，出流有機物含量隨著增加，碳氮比提高，以此作為進流之 R2 反應槽，其 COD、TS、VS 數值皆隨之上升，自 T1 的 37.63 g/L、39.47 g/L、22.88 g/L 升至 T2 的 42.46 g/L、41.96 g/L、22.91 g/L，再升至 T3 的 52.01 g/L、44.54 g/L、23.73 g/L。

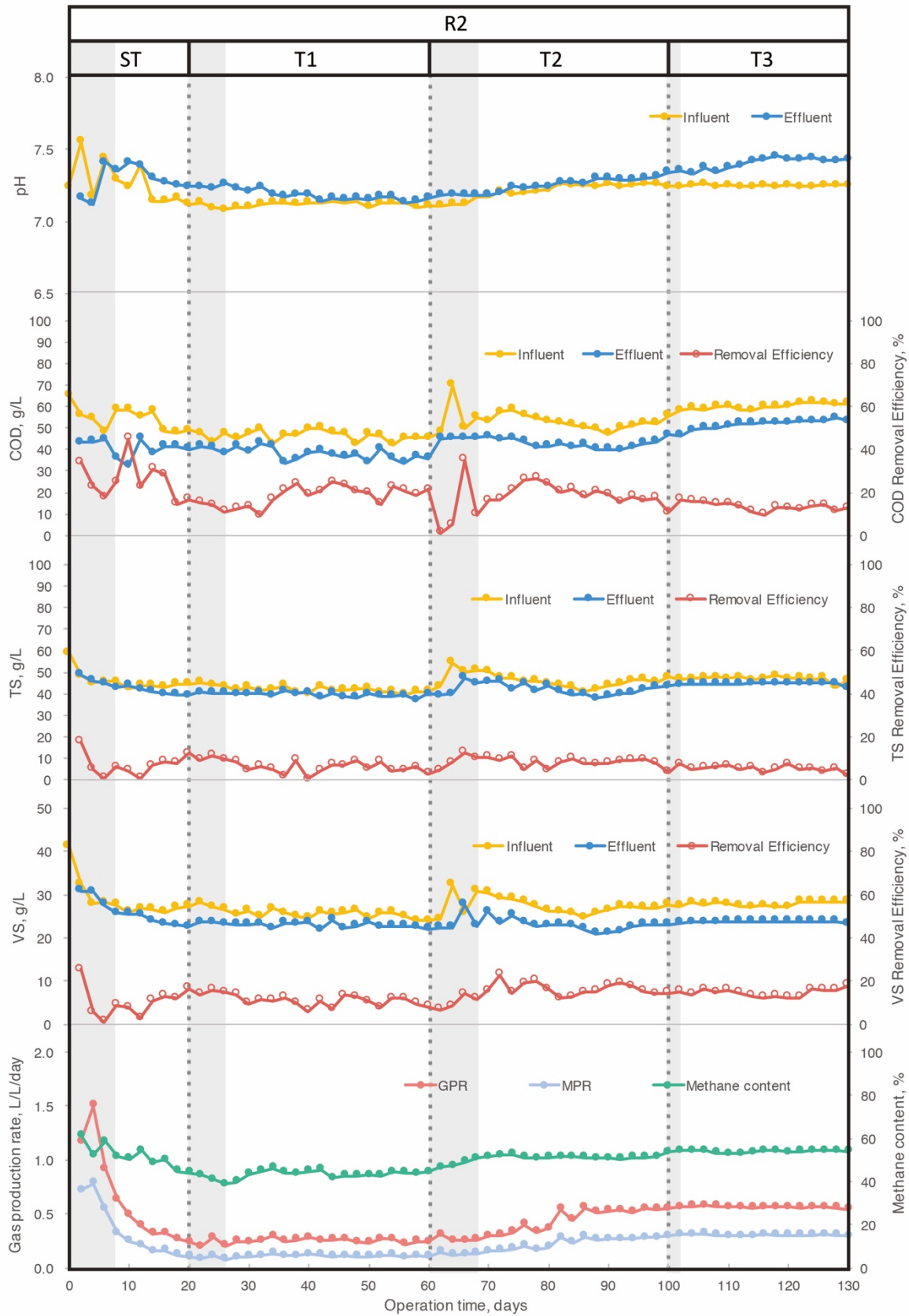



圖 4-2 R2 槽進出流之水質變化及產氣率變化圖



其去除率之走勢則不相同，由 T1 經 T2 至 T3 之變化，COD 自 18.56% 些微上升至 19.13% 後，驟降至 13.18%，經 DMRT 法檢定，T1 及 T2 無顯著差異，與 T3 則有顯著差異；TS 亦是自 5.69% 升至 8.47%^a 後降至 5.01%，經 DMRT 法檢定，T1 及 T3 無顯著差異，與 T2 則有顯著差異；VS 部分由 T1 轉至 T2 時經 DMRT 法檢定有顯著增加，由 10.58% 升為 16.02%，至 T3 時則無顯著差異，僅些微下降至 14.49%。由此推測，在第二階段之處理上，HRT 10 天應為較適合厭氧菌分解有機物之處理條件。

在產氣的部分，沼氣產率、甲烷濃度皆有上升之走勢，經 DMRT 法檢定，T1、T2 及 T3 三試驗之結果彼此皆有顯著差異。沼氣產率由 T1 之 0.25 L/L/day 升至 T2 之 0.44 L/L/day，再升至 T3 之 0.56 L/L/day。甲烷濃度也有微幅上升，在 T1、T2、T3 期間之平均值分別為 43.30%、51.24%、53.80%。因沼氣產率及甲烷濃度皆上升，自然甲烷產率也隨之上升，自 T1 之 0.11 L CH₄/L/day 至 T2 之 0.22 L CH₄/L/day，再升至 T3 之 0.30 L CH₄/L/day。

由單位 COD 及單位 VS 之甲烷產率變化，由表 4-10 發現 R2 在 T2 及 T3 時無顯著差異，與 T1 相比皆有較佳的單位基質甲烷產率，其單位 COD 之甲烷產率分別為 0.042 L CH₄/g COD added 及 0.040 L CH₄/g COD added；單位 VS 之甲烷產率則分別為 0.08 L CH₄/g VS added 及 0.09 L CH₄/g VS added。



表 4-7 R2 反應槽各階段試驗有機負荷率

Test	HRT (Days)	COD loading rate (g COD/L/day)	VS loading rate (g VS/L/day)
ST-R2	12	4.53±0.41	2.22±0.06
T1-R2	12	3.86±0.19	2.12±0.07
T2-R2	10	5.27±0.30	2.74±0.17
T3-R2	8	7.52±0.16	3.48±0.06

表 4-8 R2 反應槽各階段試驗之進出流水質

Test	HRT (Days)	pH		COD (g/L)		
		Influent	Effluent	Influent	Effluent	COD Removal Efficiency (%)
ST-R2	12	7.23±0.10	7.33±0.07	54.34±4.93	39.09±4.52	30.05±10.9
T1-R2	12	7.12±0.02	7.18±0.04	46.35±2.31	37.63±2.75	18.56±4.62 ^a
T2-R2	10	7.23±0.03	7.26±0.04	52.73±2.98	42.46±2.06	19.13±4.28 ^a
T3-R2	8	7.25±0.01	7.41±0.04	60.13±1.26	52.01±1.55	13.18±1.79 ^b

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。

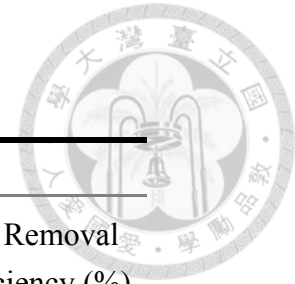


表 4-9 R2 反應槽各階段試驗之進出流水質

Test	HRT (Days)	TS (g/L)			VS (g/L)		
		Influent	Effluent	TS Removal Efficiency (%)	Influent	Effluent	VS Removal Efficiency (%)
ST-R2	12	43.89±1.20	41.55±1.63	5.63±2.90	26.66±0.68	24.41±1.24	9.11±3.66
T1-R2	12	41.69±1.27	39.47±1.07	5.69±2.61 ^b	25.43±0.86	22.88±0.63	10.58±2.40 ^b
T2-R2	10	45.55±2.73	41.96±2.53	8.47±1.82 ^a	27.40±1.75	22.91±1.31	16.02±3.14 ^a
T3-R2	8	46.87±1.20	44.54±0.64	5.01±1.37 ^b	27.84±0.51	23.73±0.17	14.49±1.83 ^a

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。



表 4-10 R2 反應槽試驗之沼氣產率、甲烷濃度及產率、單位基質甲烷產率

Test	HRT (Days)	GPR (L/L/day)	Methane content (CH ₄ %)	MPR (L CH ₄ /L/day)	Methane yield - COD (L CH ₄ /g COD added)	Methane yield - VS (L CH ₄ /g VS added)
PT-R2	12	0.40±0.14	49.91±3.23	0.20±0.08	0.04±0.01	0.09±0.03
T1-R2	12	0.25±0.02 ^c	43.30±1.90 ^c	0.11±0.01 ^c	0.028±0.004 ^b	0.05±0.01 ^b
T2-R2	10	0.44±0.11 ^b	51.24±0.57 ^b	0.22±0.06 ^b	0.042±0.01 ^a	0.08±0.02 ^a
T3-R2	8	0.56±0.01 ^a	53.80±0.51 ^a	0.30±0.01 ^a	0.040±0.001 ^a	0.09±0.002 ^a

GPR: Gas production rate, MPR: Methane production rate

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。



4.1.3 R3 槽之進出流數值及產氣分析

R3 反應槽之工作體積與 R2 同為 2.5L，不過其進流為 R1 出流沼液添加葉菜廢棄物作為碳源，使其碳氮比維持在 30。各階段試驗有機負荷率如表 4-11 所示。其進出流各項水質分析數值及產氣效率之變化如圖 4-3、表 4-12 及表 4-14 所示。

由於 R2 與 R3 反應槽係作為控制組與對照組，為確保兩者之起始狀態一致，R3 反應槽在起動期(ST)之進流與 R2 槽之進流完全相同，皆自起動第 3 天開始，將沼液作為進流，觀察其數值與 R2 槽之數值相近，且維持穩定至第 20 天，才進入試驗一(T1)，此時 R3 之進流始與 R2 進流區別。

進流沼液之 pH 值穩定，加入葉菜廢棄物後之 pH 開始下降，由於 T1、T2、T3 之進流中，添加葉菜廢棄物之比例約為 30%、20%、10%，R3 進流之 pH 值分別降至 6.57、6.74、6.75。與之相較，R3 出流廢水之變化則不明顯，標準差皆在 0.03 以下，由 T1 之 7.14 至 T3 之 7.31 僅微幅上升。

隨著水力停留時間(HRT)縮短，R1 槽之有機物去除率下降，出流有機物含量增加，碳氮比提高，R3 進流中所需添加之葉菜廢棄物比例下降，使其 COD、TS、VS 數值僅微幅上升，自 T1 之 35.63 g/L、35.72 g/L、20.31 g/L 升至 T2 之 41.26 g/L、39.43 g/L、23.27 g/L，再升至 T3 之 46.56. g/L、40.17 g/L、24.22 g/L。

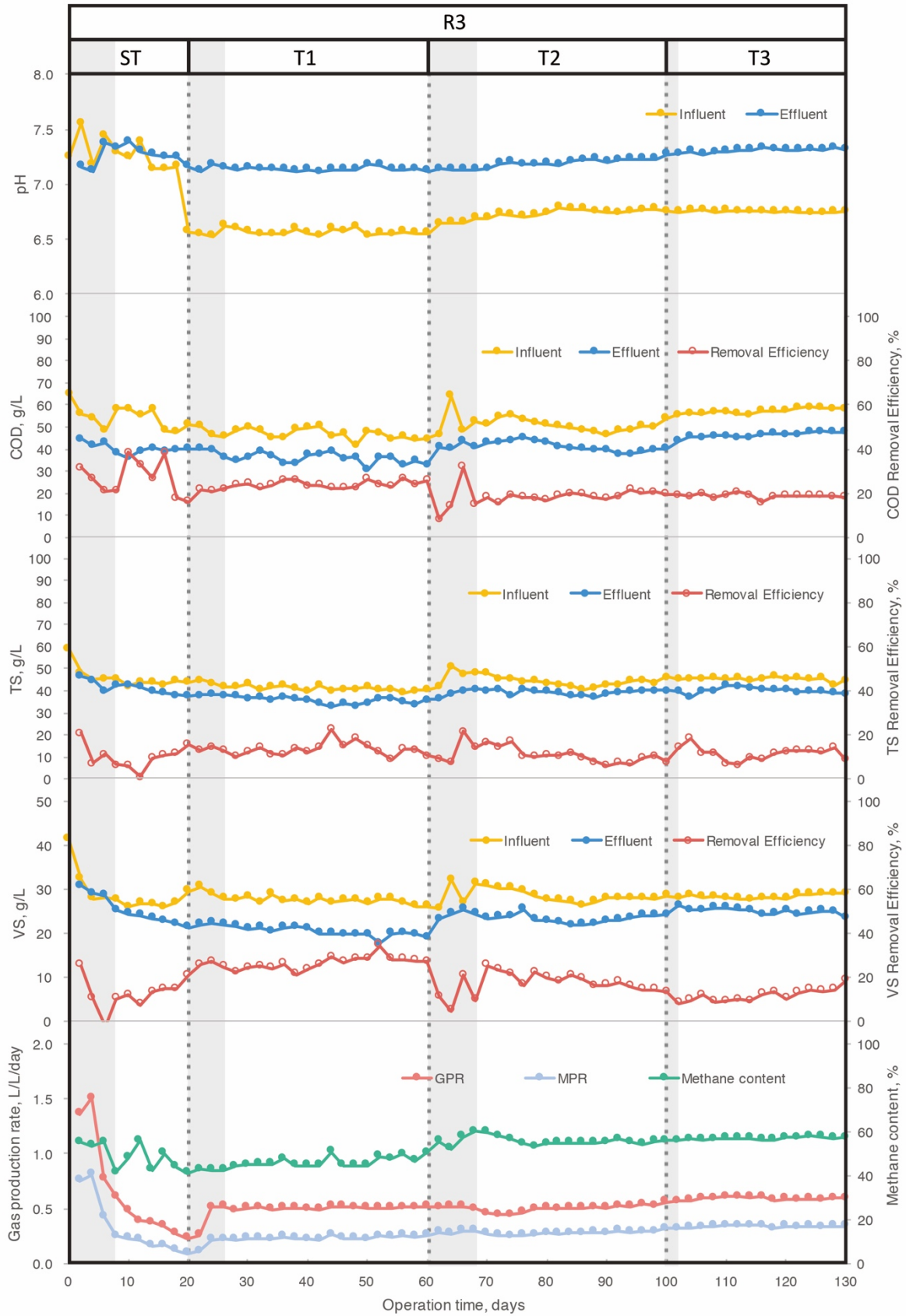


圖 4-3 R3 槽進出流之水質變及產氣率變化圖



其去除率之走勢則不相同，由 T1 經 T2 至 T3 之變化，經 DMRT 法檢定，T1 之 COD 去除率自 24.06% 下降至 T2 之 18.55% 有顯著差異，T2 至 T3 之 18.67% 則無顯著差異；TS 去除率亦是自 T1 之 13.50% 降至 11.02% 有顯著差異，T2 至 T3 之 11.49% 則無顯著差異；VS 去除率部分則是驟降之走勢，由 T1 之 26.35% 降至 T2 之 18.11%，至 T3 時再下降至 14.63%，彼此間皆有顯著差異。

然而儘管去除率走下坡，在產氣效率的部分仍是呈現微幅提升之走勢。沼氣產率在 T1 時為 0.51 L/L/day，至 T2 時為 0.50 L/L/day，經 DMRT 法檢定沒有顯著差異，然至 T3 顯著升至 0.59 L/L/day。甲烷濃度之上升亦有顯著差異，在 T1、T2、T3 期間分別為 46.20%、55.87% 及 57.06%。因而亦使甲烷產率獲得明顯上升，自 T1 之 0.23 L CH₄/L/day 至 T2 之 0.28 L CH₄/L/day，再上升至 T3 之 0.34 L CH₄/L/day。

由表 4-14 發現 R3 的 T1、T2、T3 單位 COD 之甲烷產率皆有顯著差異，且為逐漸下降趨勢，分別為 0.060 L CH₄/g COD added、0.054 L CH₄/g COD added 及 0.047 L CH₄/g COD added；T1、T2、T3 之單位 VS 之甲烷產率則皆為 0.10 L CH₄/g VS added。

表 4-11 R3 反應槽各階段試驗有機負荷率

Test	HRT (Days)	COD loading rate (g COD/L/day)	VS loading rate (g VS/L/day)
ST-R3	12	4.53±0.41	2.22±0.06
T1-R3	12	3.90±0.20	2.28±0.06
T2-R3	10	5.08±0.25	2.85±0.15
T3-R3	8	7.18±0.14	3.55±0.06

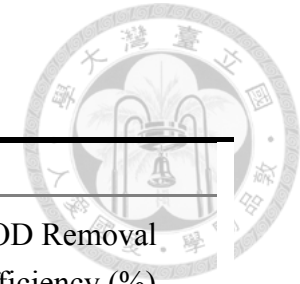


表 4-12 R3 反應槽各階段試驗之進出流水質

Test	HRT (Days)	pH		COD (g/L)		COD Removal Efficiency (%)
		Influent	Effluent	Influent	Effluent	
ST-R3	12	7.23±0.10	7.30±0.05	54.34±4.93	38.75±1.61	31.44±7.93
T1-R3	12	6.57±0.03	7.14±0.02	46.78±2.35	35.63±2.30	24.06±1.57 ^a
T2-R3	10	6.74±0.03	7.20±0.03	50.76±2.51	41.26±2.35	18.55±1.78 ^b
T3-R3	8	6.75±0.01	7.31±0.02	57.44±1.11	46.56±0.97	18.67±1.08 ^b

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。

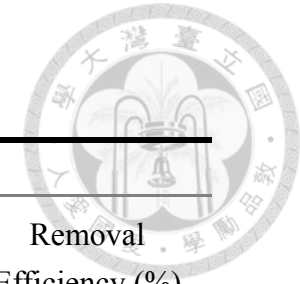


表 4-13 R3 反應槽各階段試驗之進出流水質

Test	HRT (Days)	TS (g/L)			VS (g/L)		
		Influent	Effluent	Removal Efficiency (%)	Influent	Effluent	Removal Efficiency (%)
ST-R3	12	43.89±1.20	40.67±2.05	7.46±4.01	26.66±0.68	23.65±1.18	11.83±3.00
T1-R3	12	41.11±1.06	35.72±1.51	13.50±3.16 ^a	27.40±0.73	20.31±1.08	26.35±3.01 ^a
T2-R3	10	44.11±2.17	39.43±1.18	11.02±3.32 ^b	28.52±1.46	23.27±0.95	18.11±3.98 ^b
T3-R3	8	45.97±0.97	40.17±1.42	11.49±3.09 ^b	28.37±0.50	24.22±0.63	14.63±2.80 ^c

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。

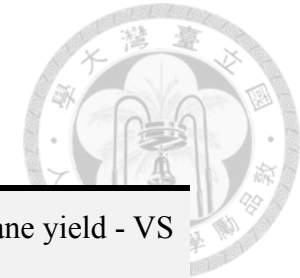


表 4-14 R3 反應槽試驗之沼氣產率、甲烷濃度及產率、單位基質甲烷產率

Test	HRT (Days)	GPR (L/L/day)	Methane content (CH ₄ %)	MPR (L CH ₄ /L/day)	Methane yield - COD (L CH ₄ /g COD add)	Methane yield - VS (L CH ₄ /g VS add)
ST-R3	12	0.41±0.12	46.99±5.41	0.19±0.05	0.04±0.01	0.09±0.02
T1-R3	12	0.51±0.01 ^b	46.20±2.43 ^c	0.23±0.01 ^c	0.060±0.01 ^a	0.10±0.01 ^a
T2-R3	10	0.50±0.03 ^b	55.87±1.88 ^b	0.28±0.02 ^b	0.054±0.01 ^b	0.10±0.01 ^a
T3-R3	8	0.59±0.01 ^a	57.06±0.53 ^a	0.34±0.01 ^a	0.047±0.001 ^c	0.10±0.003 ^a

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。



4.1.4 R2、R3 反應槽綜合比較

圖 4-4 及表 4-15 為 R2、R3 反應槽之平均去除率及產率的比較。由圖 4-4 所示，在 T1 期間，由於 HRT 為 12 天，R1 槽之厭氧菌有充足時間處理有機物，可立即使用之有機物在離開槽體時應皆已被充分處理，出流中剩餘之可立即被利用之有機物較少，因此 T1 期間之 R2 的 COD、TS、VS 去除率無論是與同為 T1 期間之 R3 槽的有機物去除率相比，還是與 T2、T3 期間 R2 自身之有機去除率相比皆較低。因此 R2 在 T1 期間之氣體產率及甲烷產率也是最差的，如此可知，若要對已經厭氧處理過之出流做再處理，將 HRT 設為 12 天並不是一符合經濟效益之操作條件。而對此可做出的補償方式，為本實驗對 R3 槽進流之設計，在經處理後之出流中加入額外碳源，調整其碳氮比，理論上應可改善去除率及產氣率下降之問題。見圖 4-4 之 T1 期間，在進流加入 30% 葉菜廢棄物之 R3 反應槽，其有機物各項去除率皆大為提升，尤以 VS 去除率之改善最明顯，增加了 15.77%，甲烷產率也隨之增加了 10%。

至 HRT 縮短為 10 天之 T2 期間，由於自 R1 槽離開出流中含有較多可立即利用之有機物，R2 的去除率有些微上升，也因沼液之碳氮比提高，R3 進流中添加的葉菜廢棄物比例降至 20%，因此 R3 各項有機物去除率也有下降之趨勢，接近但仍高於 R2 之去除率，甲烷產率也略高於 R2。



在 T3 期間，由於 HRT 縮短至 8 天，有機負荷率大幅提高，R2 各項有機物去除率開始下降，在進流中僅加入 10% 葉菜廢棄物之 R3 各項有機物去除率亦不見增長，R2、R3 在氣體產率的部分差距不大，且皆僅有微幅增長。

在產氣的表現上，有額外添加新鮮碳源的 R3 皆明顯優於 R2。尤其在 T1 時，葉菜廢棄物的添加比例最高，其和 R2 的差異更為明顯——由 DMRT 法檢定之結果可見，T1-R3 之各項數值除 MPR 及甲烷濃度外，皆顯著高於其他試驗之結果，而 T1-R2 之各項數值則為 R2 及 R3 合計六項試驗中結果最差的。

其中單位 COD 的 Methane yield 之變化趨勢最為明顯，T1-R3 試驗之產率最高，為 0.060 L CH₄/g COD added，其次是 T2-R3 之 0.054 L CH₄/g COD added，第三高亦為添加了葉菜廢棄物的共消化的 R3 反應槽，T3-R3 之 0.047 L CH₄/g COD added，接著得較差三組皆為 R2 之結果，由高到低依序為 T2-R2 之 0.042 L CH₄/g COD added、T3-R2 之 0.040 L CH₄/g COD added 及 T1-R2 之 0.028 L CH₄/g COD added。

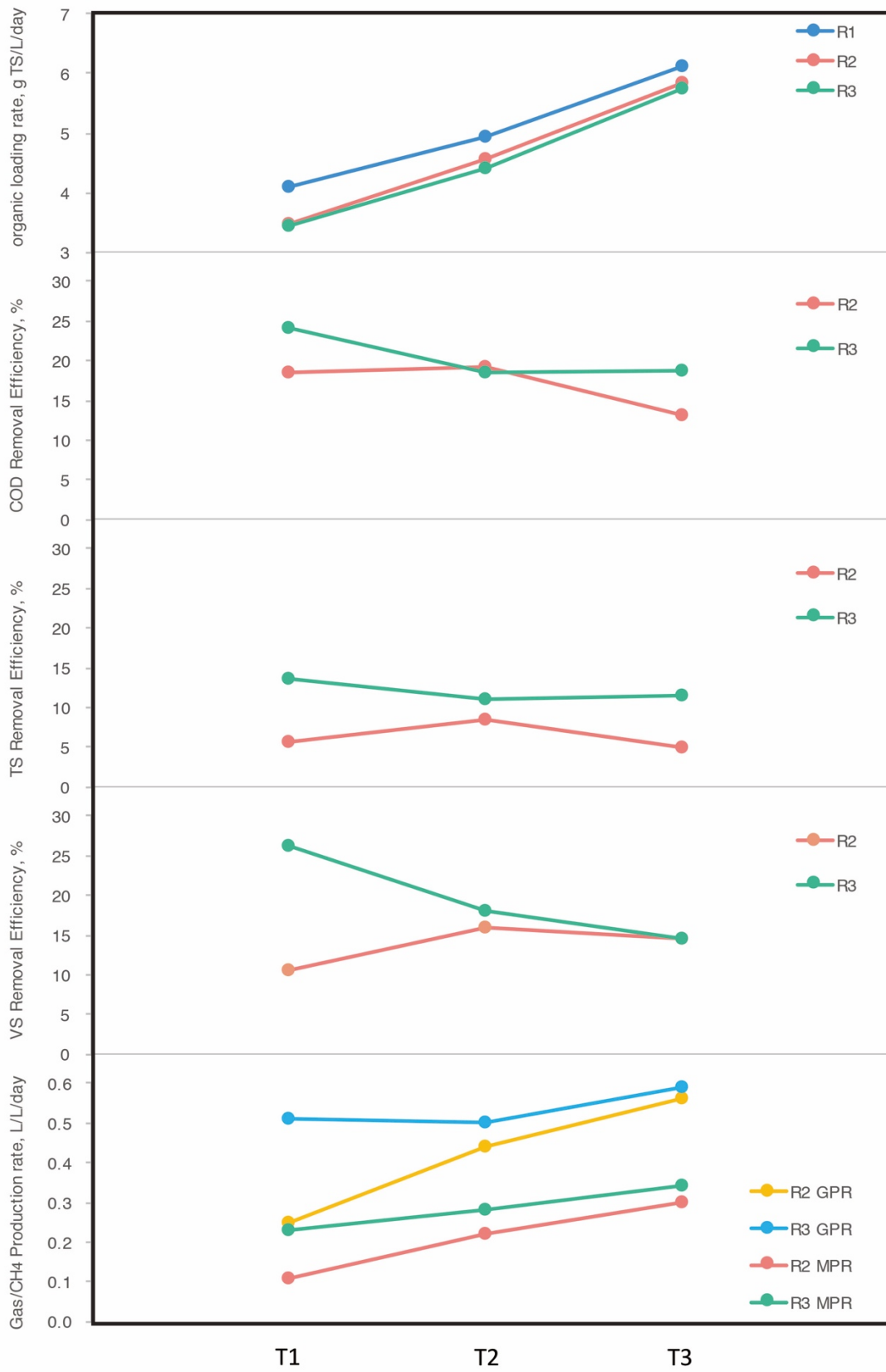
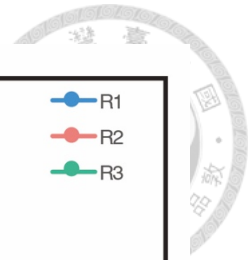


圖 4-4 R2、R3 槽之有機物去除率及產氣率綜合比較圖

表 4-15 R2、R3 反應槽之比較

	F value	Test					
		T1-R2	T1-R3	T2-R2	T2-R3	T3-R2	T3-R3
		HRT=12d	HRT=12d	HRT=10d	HRT=10d	HRT=8d	HRT=8d
RCOD (%)	21.64**	18.56 ^b	24.06 ^a	19.13 ^b	18.55 ^b	13.18 ^c	18.67 ^b
RTS (%)	25.90**	5.69 ^d	13.50 ^a	8.47 ^c	11.02 ^b	5.01 ^d	11.49 ^b
RVS (%)	63.71**	10.58 ^d	26.35 ^a	16.02 ^c	18.11 ^b	14.49 ^c	14.63 ^d
GPR (L/L/day)	110.2**	0.25 ^d	0.51 ^b	0.44 ^c	0.50 ^b	0.56 ^a	0.59 ^a
MPR (L CH ₄ /L/day)	166.9**	0.11 ^e	0.23 ^d	0.22 ^d	0.28 ^c	0.30 ^b	0.34 ^a
Methane content (%)	197.6**	43.30 ^f	46.20 ^e	51.24 ^d	55.87 ^b	53.80 ^c	57.06 ^a
Methane yield – COD (L CH ₄ /g COD added)	58.02**	0.028 ^e	0.060 ^a	0.042 ^{cd}	0.054 ^b	0.040 ^d	0.047 ^c
Methane yield – VS (L CH ₄ /g VS added)	48.14**	0.05 ^c	0.10 ^a	0.08 ^b	0.10 ^a	0.09 ^b	0.10 ^a

RCOD: COD removal efficiency, RTS: TS removal efficiency, RVS: VS removal efficiency, GPR: Gas production rate, MPR: Methane production rate
ANOVA 變方分析結果之 F 值上標*符號之意義 —— *: p<0.05 差異值達 5%顯著水準, **: p<0.01 差異值達 1%極顯著水準
經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母; $\alpha = 0.05$ 。



4.2 實驗二：豬糞與葉菜廢棄物之共消化

實驗二在水力停留時間較短 (HRT=5 天) 亦即有機負荷較高的條件下，探討豬糞與葉菜廢棄物共消化的最佳混合比。本實驗啟動 (Start-up) 時所使用之厭氧污泥及基質性質分析如表 4-16。

實驗二同時操作 4 個 CSTR 反應槽，反應槽兩兩一組作二重複——A1 及 A2 為 A 組，進行 Test 4、Test 5、Test 7 之試驗，其葉菜廢棄物所佔體積比分別為 0%、20%、33.3%；B1 及 B2 為 B 組，進行 Test 4、Test 6、Test 8 之試驗，其葉菜廢棄物所佔體積比分別為 0%、25%、50%，其中 Test 8 由於葉菜廢棄物的負荷率過高造成酸的快速累積，抑制甲烷菌反應，需持續加入碳酸氫鈉調整反應槽 pH 值。

除了 Test 8 以外其餘每項試驗都待到甲烷濃度、甲烷產率趨於一定值並保持數值穩定至少 3 個 HRT 才結束該階段試驗。

由表 4-17 所示，第 0-30 天為 Test 4，為未加入葉菜廢棄物混合之起動試驗 (Start-up)，第 16 至第 30 天反應槽呈現穩定狀態，四個槽之甲烷產率都達一穩定數值且彼此之數值接近。第 31 天開始，A 組開始 Test 5 試驗，進流加入 20% 葉菜廢棄物，B 組開始 Test 6 試驗，進流加入 25% 葉菜廢棄物，A 組於第 37 天開始起算穩定期，B 組於第 39 天開始起算，維持 3 個 HRT 之穩定操作。第 57 天開始，A 組進入 Test 7 試驗，進流加入 33.3% 葉菜廢棄物，B 組進入 Test 8 試驗，進流加入 50% 葉菜廢棄物。第 68 至第 80 天為 Test 7 之穩定期，Test 8 則未達穩定狀態。



表 4-16 實驗二起動時厭氧污泥及基質性質分析

項目	厭氧污泥 AS	豬糞 SM	葉菜廢棄物 VW
pH	8.5	7.12	4.4
COD (g/L)	58.4	65.9	59.4
TS (g/L)	56.1	50.2	50.3
VS (g/L)	22.2	36.7	41.6

AS: 厭氧污泥 (Anaerobic sludge)

SM: 豬糞 (Swine manure)

VW: 葉菜廢棄物 (Vegetable wastes)

表 4-17 實驗二反應槽操作條件

Test	編號	VW 含量	操作時間	適應期	穩定期
Test 4	T4-A1	0%	第 0-30 天	第 0-16 天	第 17-30 天
	T4-A2	0%			
	T4-B1	0%			
	T4-B2	0%			
Test 5	T5-A1	20%	第 31-56 天	第 31-36 天	第 37-56 天
	T5-A2	20%			
Test 6	T6-B1	25%	第 31-56 天	第 31-38 天	第 39-56 天
	T6-B2	25%			
Test 7	T7-A1	33.3%	第 57-80 天	第 57-62 天	第 63-80 天
	T7-A2	33.3%			
Test 8	T8-B1	50%	第 57-80 天	第 66 天過度酸化	--
	T8-B2	50%			

VW: 葉菜廢棄物 (Vegetable wastes)



4.2.1 Test 4 –未添加葉菜廢棄物之進出流數值及產氣分析

Test 4 四個反應槽為未添加葉菜廢棄物的試驗，其 COD 及 VS 的有機負荷率分別為 13.36g COD/L/day 及 7.15g VS/L/day。表 4-18 至表 4-20 為 Test 4 的進出流水質及產氣情形的平均值。如圖 4-5 及圖 4-6，T4 部分，由於前期之各項有機物去除率、產氣率皆不高，穩定期取第 16 至第 30 天。

Test4 各槽的出流、去除率及產氣狀況皆頗為相近，出流平均 COD、TS 及 VS 分別為 55.96~57.49 g/L、43.04~44.51 g/L 及 31.18~31.75 g/L；COD、TS 及 VS 的平均去除率則分別為 14.98~17.28%、13.18~15.94%及 11.45~13.04%；GPR、MPR、甲烷濃度、單位 COD 之甲烷產率及單位 VS 之甲烷產率則分別為 1.64~1.75 L/L/day、0.99~1.11 L CH₄/L/day、0.07~0.08 L CH₄/g COD added、0.14~0.15 L CH₄/g VS added。整體來看，除 A2 槽之表現稍差，其餘三個槽之表現較無顯著差異。各項分析數值之差異不大，且於第 16 天至第 30 天期間內之反應操作亦皆沒有明顯動盪，可視為穩定。



表 4-18 Test 4 試驗之進出流水質

Test	VW Content (%)	pH		COD (g/L)		COD Removal Efficiency (%)
		Influent	Effluent	Influent	Effluent	
T4-A1	0	7.13	7.10±0.01	66.81	56.24±3.87	16.88±1.99 ^a
T4-A2			7.11±0.01		57.49±3.19	14.98±1.53 ^b
T4-B1			7.11±0.01		55.96±3.75	17.28±2.47 ^a
T4-B2			7.11±0.01		56.92±4.89	15.93±3.51 ^a
T4-Avg			7.11		56.65	16.27

VW: vegetable wastes,

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。



表 4-19 Test 4 試驗之進出流水質

Test	VW Content (%)	TS (g/L)			VS (g/L)		
		Influent	Effluent	TS Removal Efficiency (%)	Influent	Effluent	VS Removal Efficiency (%)
T4-A1	0	51.34	43.04±1.62	15.94±3.47 ^a	35.76	31.18±0.93	13.04±1.13 ^a
T4-A2			44.51±2.61	13.18±2.22 ^b		31.64±0.88	11.74±1.01 ^{bc}
T4-B1			43.72±1.54	14.63±2.97 ^{ab}		31.44±0.90	12.31±1.57 ^{ab}
T4-B2			44.14±1.97	13.84±2.97 ^b		31.75±0.79	11.45±0.81 ^c
T4-Avg			43.85	14.40		31.50	12.14

VW: vegetable wastes

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。

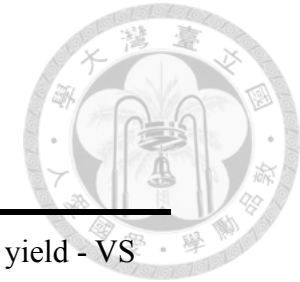


表 4-20 Test 4 試驗之沼氣產率、甲烷濃度及產率、單位基質甲烷產率

Test	VW Content (%)	GPR (L/L/day)	Methane content (CH ₄ %)	MPR (L CH ₄ /L/day)	Methane yield - COD (L CH ₄ /g COD add)	Methane yield - VS (L CH ₄ /g VS add)
T4-A1	0	1.68±0.06 ^b	62.21±1.08 ^{ab}	1.04±0.05 ^b	0.078±0.002 ^b	0.15±0.006 ^b
T4-A2		1.64±0.07 ^b	60.54±1.23 ^c	0.99±0.04 ^c	0.074±0.004 ^c	0.14±0.007 ^c
T4-B1		1.75±0.09 ^a	61.63±0.87 ^{bc}	1.08±0.05 ^a	0.081±0.003 ^a	0.15±0.005 ^a
T4-B2		1.75±0.13 ^a	63.23±0.69 ^{ab}	1.11±0.07 ^a	0.083±0.004 ^a	0.15±0.008 ^a
T4-Avg	0	1.70	61.90	1.06	0.08	0.15

VW: Vegetable wastes, GPR: Gas production rate, MPR: Methane production rate

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。

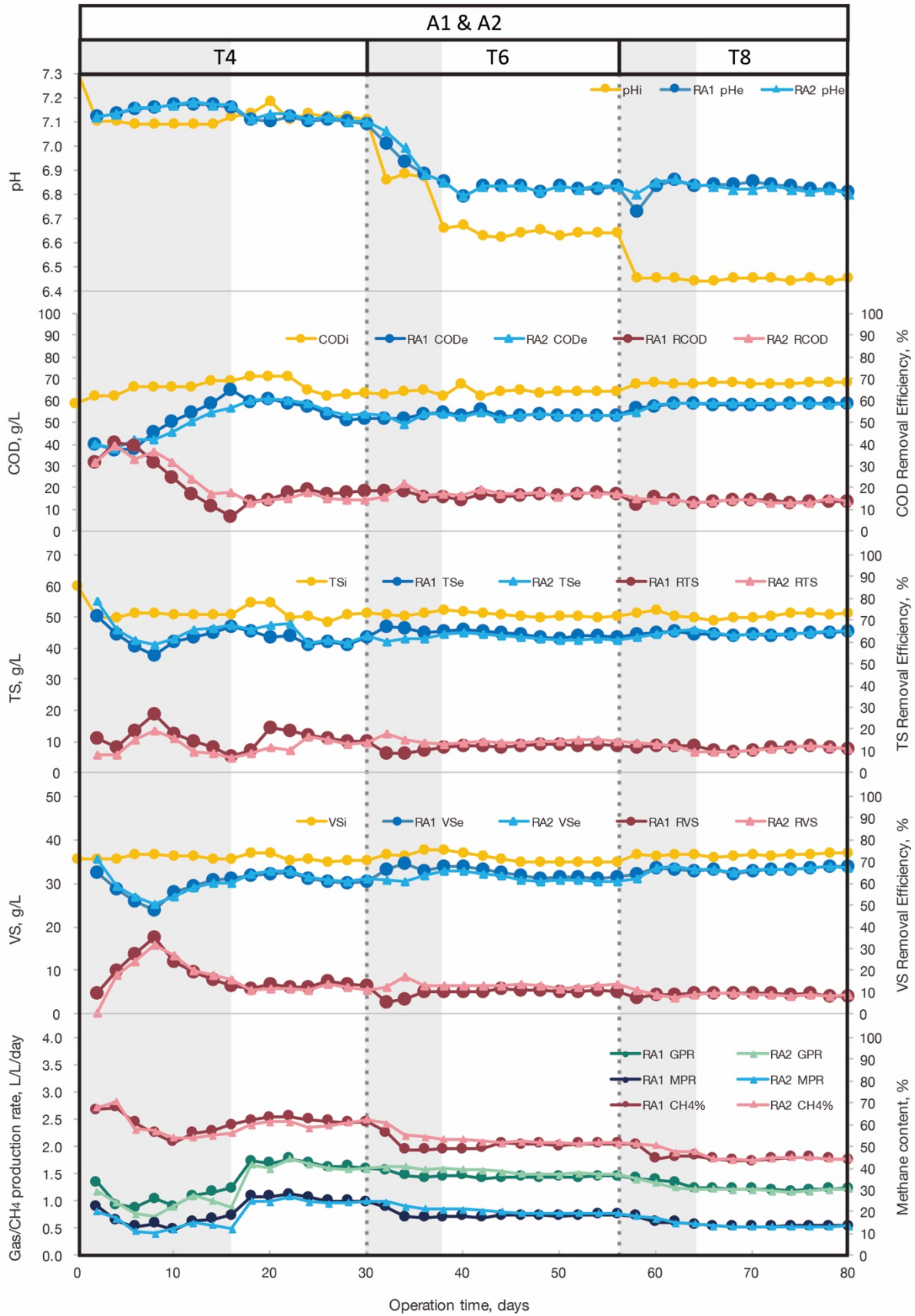


圖 4-5 A1 及 A2 槽進出流之水質變化及產氣率變化圖

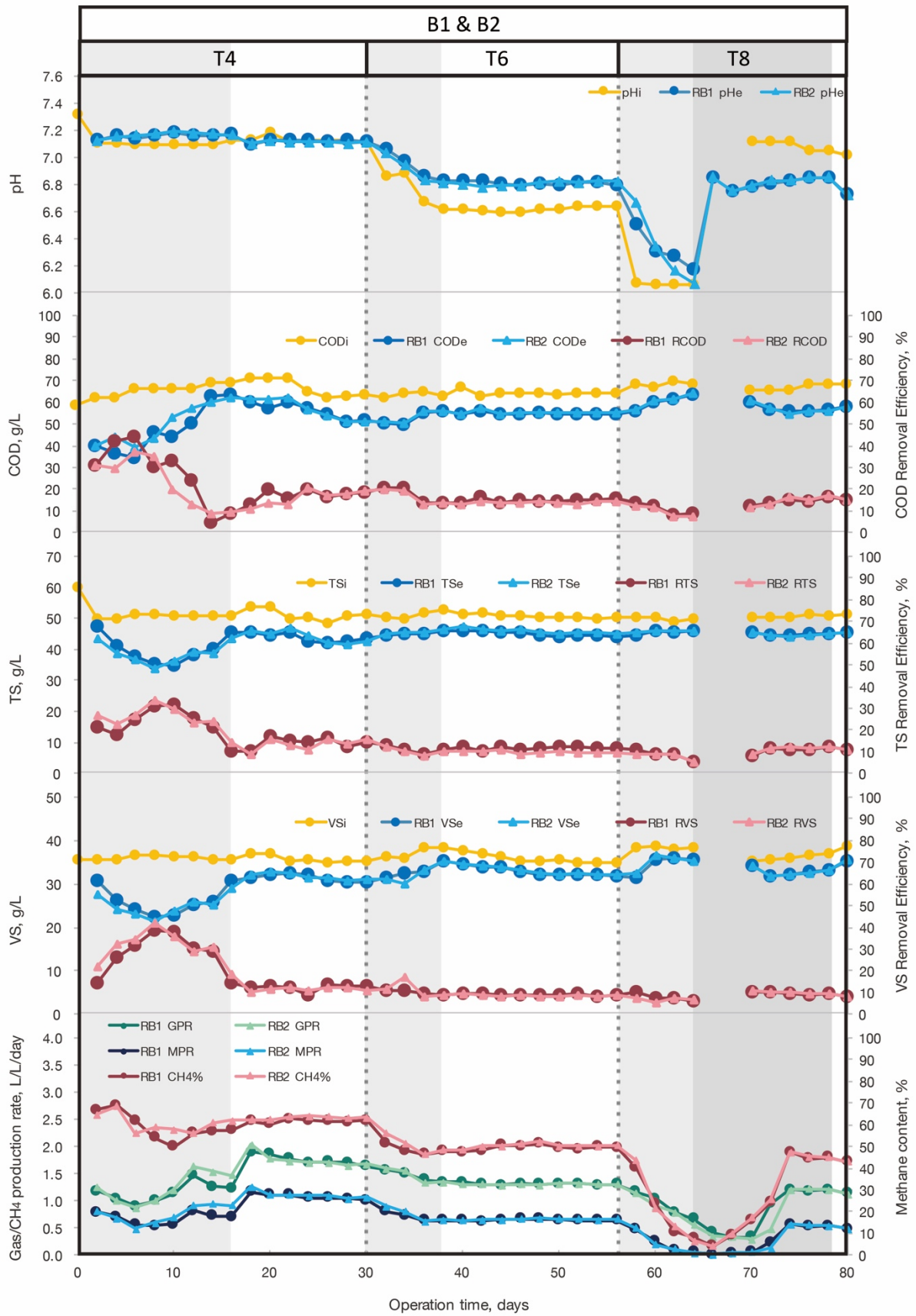


圖 4-6 B1 及 B2 槽進出流之水質變化及產氣率變化圖




4.2.2 Test 5 – Test 7 之進出流數值與產氣分析

試驗 Test 5–Test 7 有機負荷率如表 4-21 所示，各組二重複的反應槽係同時進流相同的基質，因此其有機負荷也相同。表 4-22 至表 4-24 則為 Test 5 – Test 7 的平均進出流水質及產氣的情形。見圖 4-5 之 T5 部分，各曲線大致於第 37 天起進入平穩，穩定期自第 37 天起算至第 56 天結束 T5；T6 部分，大致於第 39 天起進入平穩，穩定期自第 39 天起算至第 56 天結束 T6；T7 部分，大致於第 63 天起進入平穩，穩定期自第 63 天起算至第 80 天結束 T7。

表 4-21 T5、T6、T7 反應槽有機負荷率

Test	VW content (%)	COD loading rate (g COD/L/day)	VS loading rate (g VS/L/day)
T5	20	12.87±0.28	7.17±0.24
T6	25	12.86±0.22	7.25±0.28
T7	33.3	13.58±0.08	7.31±0.07



T5、T6、T7 各階段試驗之進出流 pH、COD 如表 4-22 所示。T5 試驗是操作 A 組之 A1、A2 兩槽，進流之葉菜比例由 T4 之 0% 增為 20%，因此進出流之 pH 皆略為下降，進流之 pH 降至 6.64，出流之 pH 也自 T4 之 7.11 降為 6.83。T6 試驗是操作 B 組之 B1、B2 兩槽，進流之葉菜比例增為 25%，進流之 pH 降至 6.61，出流之 pH 平均也降為 6.81。T7 試驗則是接續 T5 試驗之 A 組兩槽，進流之葉菜比例增為 33.3%，進流之 pH 降至 6.45，出流之 pH 平均與 T5 相近，維持在 6.83。

T5 試驗之進流 COD 為 64.3 g/L，出流之平均 COD 為 53.41 g/L，A1、A2 之 COD 去除率分別為 16.65% 及 17.24%，經 Duncan's 多重檢定顯示無顯著差異；T6 試驗之進流 COD 為 64.41 g/L，出流之平均 COD 為 55.05 g/L，B1、B2 之 COD 去除率分別為 14.7% 及 13.93%，亦無顯著差異，不過較 T5 為低；T7 試驗進流之 COD 升為 67.97 g/L，出流平均 COD 為 58.46 g/L，A1、A2 之 COD 去除率分別為 13.92% 及 13.77%，無顯著差異，與 T6 之 COD 去除率亦無顯著差異。

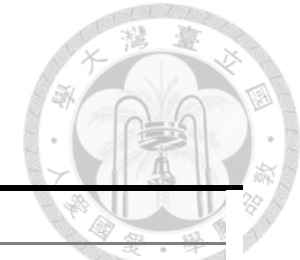


表 4-22 T5、T6、T7 各階段試驗之進出流 pH、COD

Test	VW Content (%)	pH		COD (g/L)		Removal Efficiency (%)
		Influent	Effluent	Influent	Effluent	
T5-A1	20	6.64	6.82±0.02	64.3	53.60±0.97	16.65±1.07 ^a
T5-A2			6.83±0.02		53.22±0.77	17.24±0.88 ^a
T5-Avg	20	6.64	6.83	64.3	53.41	16.95
T6-B1	25	6.61	6.81±0.02	64.41	54.80±0.58	14.7±0.87 ^b
T6-B2			6.80±0.02		55.30±0.82	13.93±0.62 ^b
T6-Avg	25	6.61	6.81	64.41	55.05	14.32
T7-A1	33.3	6.45	6.83±0.01	67.97	58.41±0.21	13.92±0.52 ^b
T7-A2			6.82±0.01		58.51±0.26	13.77±0.67 ^b
T7-Avg	33.3	6.45	6.83	67.97	58.46	13.85

VW: Vegetable wastes

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。



T5、T6、T7 各階段試驗之進出流 TS、VS 如表 4-23 所示。T4-T7 進流之 TS 皆需控制於 50 g/L，T5 試驗之進流 TS 為 50.63 g/L，出流之平均 TS 為 44.03 g/L，A1、A2 之 TS 去除率分別為 12.35%及 14.19%，A2 之去除率稍優於 A1 反應槽；T6 試驗之進流 TS 為 50.62 g/L，出流之平均 TS 為 45.45 g/L，B1、B2 之 TS 去除率分別為 11.64%及 9.77%，檢定無顯著差異，不過較 T5 為低；T7 試驗進流之 TS 升為 50.29 g/L，出流平均 TS 為 44.74 g/L，A1、A2 之 TS 去除率分別為 11.19%及 10.55%，無顯著差異，與 T6 之 TS 去除率亦無顯著差異。

進流 VS 會隨著葉菜廢棄物比例提升而微幅上升，然而儘管 VS 上升，存在葉菜纖維中之 VS 仍較難直接被使用，因此去除率應隨著葉菜比例上升而下降。T5 試驗之進流 VS 為 35.65 g/L，出流之平均 VS 為 31.72 g/L，A1、A2 之 VS 去除率分別為 10.56%及 12.9%，A2 之去除率稍優於 A1 反應槽；T6 試驗之進流 VS 為 35.77 g/L，出流之平均 VS 為 32.97g/L，B1、B2 之 VS 去除率為 9.02%及 8.61%，無顯著差異，較 T5 為低；T7 試驗進流之 VS 升為 36.56 g/L，出流平均 VS 為 33.22 g/L，A1、A2 之 VS 去除率為 9.08%及 8.86%，無顯著差異，與 T6 之 VS 去除率亦無顯著差異。

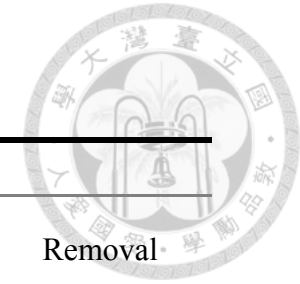


表 4-23 T5、T6、T7 各階段試驗之進出流 TS、VS

Test	VW Content (%)	TS (g/L)			VS (g/L)		
		Influent	Effluent	Removal Efficiency (%)	Influent	Effluent	Removal Efficiency (%)
T5-A1	20	50.63	44.49±0.91	12.35±0.47 ^{bc}	35.65	32.14±1.09	10.56±0.37 ^b
T5-A2			43.56±0.84	14.19±0.51 ^a		31.29±0.97	12.9±0.63 ^a
T5-Avg	20	50.63	44.03	13.27	35.65	31.72	11.73
T6-B1	25	50.62	44.98±0.83	11.64±0.61 ^{cd}	35.77	32.89±1.02	9.02±0.47 ^c
T6-B2			45.92±0.65	9.77±0.48 ^d		33.04±1.03	8.61±0.49 ^c
T6-Avg	25	50.62	45.45	10.71	35.77	32.97	8.82
T7-A1	33.3	50.29	44.58±0.44	11.19±0.95 ^{cd}	36.56	33.18±0.47	9.08±0.63 ^c
T7-A2			44.9±0.52	10.55±1.05 ^{cd}		33.26±0.39	8.86±0.49 ^c
T7-Avg	33.3	50.29	44.74	10.87	36.56	33.22	8.97

VW: vegetable wastes

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。



T5、T6、T7 各階段試驗之沼氣產率、甲烷濃度及產率、單位基質甲烷產率如表 4-24 所示。各項數值在此三階段之變化趨勢皆為逐漸下降，整體而言，產氣表現 T5 優於 T6 優於 T7。

T5 試驗之各項產氣分析結果皆是 A2 槽之表現稍稍優於 A1 槽，A1 及 A2 之沼氣產率分別為 1.44 L/L day 及 1.53 L/L day；甲烷濃度分別為 50.47%及 52.19 %；甲烷產率為 0.73 L CH₄/L day 及 0.80 L CH₄/L day；單位 COD 之甲烷產率為 0.06 L CH₄/g COD added；單位 VS 之甲烷產率為 0.11 L CH₄/g VS added。

T6 試驗之各項產氣分析結果，B1 及 B2 兩槽之數值皆無顯著差異，沼氣產率分別為 1.31 L/L day 及 1.30 L/L day；甲烷濃度分別為 49.48%及 50.46%；甲烷產率為 0.65 L CH₄/L day 及 0.66 L CH₄/L day；單位 COD 之甲烷產率為 0.05 L CH₄/g COD added；單位 VS 之甲烷產率為 0.09 L CH₄/g VS added。

T7 試驗之各項產氣分析結果，A1 及 A2 兩槽之數值皆無顯著差異，沼氣產率分別為 1.21 L/L day 及 1.20 L/L day；甲烷濃度分別為 44.39%及 44.73%；甲烷產率為 0.54 L CH₄/L day；單位 COD 之甲烷產率為 0.04 L CH₄/g COD added；單位 VS 之甲烷產率為 0.07 L CH₄/g VS added。



表 4-24 T5、T6、T7 之沼氣產率、甲烷濃度及產率、單位基質甲烷產率

Test	VW Content (%)	GPR (L/L/day)	Methane content (CH ₄ %)	MPR (L CH ₄ /L/day)	Methane yield - COD (L CH ₄ /g COD added)	Methane yield - VS (L CH ₄ /g VS added)
T5-A1	20	1.44±0.01 ^b	50.47±1.09 ^b	0.73±0.02 ^b	0.06±0.002 ^b	0.10±0.006 ^b
T5-A2		1.53±0.04 ^a	52.19±0.67 ^a	0.80±0.03 ^a	0.06±0.003 ^a	0.11±0.001 ^a
T5-Avg	20	1.49	51.33	0.77	0.06	0.11
T6-B1	25	1.31±0.01 ^c	49.48±1.21 ^c	0.65±0.01 ^c	0.05±0.001 ^c	0.09±0.004 ^c
T6-B2		1.30±0.01 ^c	50.46±1.05 ^{bc}	0.66±0.01 ^c	0.05±0.002 ^c	0.09±0.005 ^c
T6-Avg	25	1.31	49.97	0.66	0.05	0.09
T7-A1	33.3	1.21±0.02 ^d	44.39±0.74 ^d	0.54±0.01 ^d	0.04±0.002 ^d	0.07±0.003 ^d
T7-A2		1.20±0.02 ^d	44.73±1.19 ^d	0.54±0.02 ^d	0.04±0.002 ^d	0.07±0.003 ^d
T7-Avg	33.3	1.21	44.56	0.54	0.04	0.07

VW: Vegetable wastes, GPR: Gas production rate, MPR: Methane production rate

經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母； $\alpha = 0.05$ 。



4.2.3 Test 4 – Test 7 之綜合比較

如圖 4-7 所示，Test 4~Test 7 的蔬菜佔比各為 0%、20%、25%及 33.3%，產氣情形在圖表中皆為下降走勢。表 4-25 為 T4~T7 四試驗之各項分析數值比較，先以 ANOVA 變方分析測驗各項均值是否皆無差異，右上角若無標示*號表示 T4 至 T7 總計 10 組之分析數值皆無顯著差異，標示一個*號表示 F 值達到 5%顯著水準，即 10 組分析數值有差異，標示兩個**號表示 F 值達到 1%極顯著水準。表 4-26 中各項分析項目之 F 值皆達極顯著水準，進一步以 Duncan 新多變域測驗法比較，上標字母相同者，表示彼此無顯著差異。

出流之 pH 自進流葉菜佔比為 0%時之 7.11 降至 20%葉菜佔比之 6.83 後，於葉菜佔比為 25%及 33.3%之 T6、T7 時之變化不大，維持在 6.81、6.83，至 T8 時 pH 則驟降，表示 pH 6.81 應是反應槽可穩定操作環境之最低酸鹼值範圍。

COD、TS、VS 之變化趨勢相近，進流之葉菜佔比為 0%及 20%時之去除率相近，佔比為 25%時去除率稍降，而佔比為 33.3%時降幅趨緩，與佔比為 25%時之數值大抵相近。COD 去除率分別為 16.27%、16.95%、14.32%、13.85%；TS 去除率為 14.40%、13.27%、10.71%、10.87%；VS 去除率為 12.14%、11.73%、8.82%、8.97%。

氣體部分降幅較明顯，沼氣產率自 T4 至 T7 分別為 1.71 L/L/day、1.49 L/L/day、1.31 L/L/day、1.21 L/L/day；甲烷濃度分別為 61.90%、51.33%、49.97%、44.56%；

甲烷產率為 1.06 L/L/day、0.77 L/L/day、0.66 L/L/day、0.54 L/L/day；單位 COD 之

甲烷產率為 0.08、0.06、0.05 及 0.04 L CH₄/g COD added；單位 VS 之甲烷產率則

為 0.15、0.11、0.09 及 0.07 L CH₄/g VSadded。



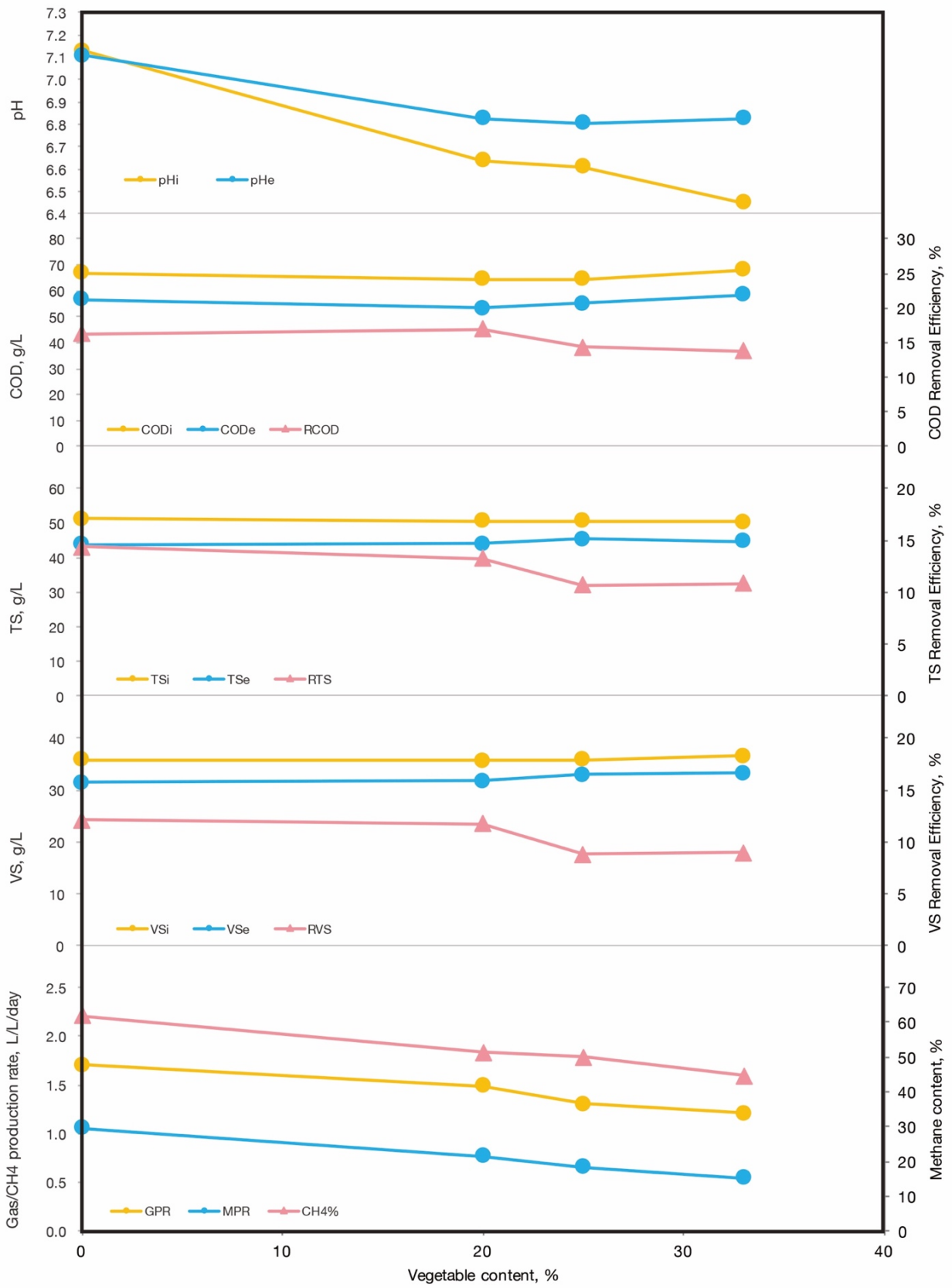


圖 4-7 T4、T5、T6、T7 之綜合比

表 4-25 T4 至 T7 四試驗之各項分析數值比較

	F value	Test									
		T4-A1	T4-A2	T4-B1	T4-B2	T5-A1	T5-A2	T6-B1	T6-B2	T7-A1	T7-A2
		VW = 0%				VW = 20%		VW = 25%		VW = 33.3%	
RCOD (%)	8.67**	16.9 ^a	15.0 ^{bc}	17.3 ^a	15.9 ^{ab}	16.6 ^a	17.2 ^a	14.6 ^{bc}	13.8 ^a	13.9 ^c	13.8 ^c
RTS (%)	11.18**	15.9 ^a	13.2 ^{bc}	14.6 ^{ab}	13.8 ^{bc}	12.2 ^{cd}	14.1 ^b	11.3 ^{de}	9.7 ^e	11.3 ^{de}	10.7 ^{de}
RVS (%)	49.2**	13.0 ^a	11.7 ^{bc}	12.3 ^{ab}	11.5 ^c	10.5 ^d	12.9 ^a	9.1 ^e	8.6 ^e	9.0 ^e	8.7 ^e
GPR (L/L/day)	123.25**	1.67 ^b	1.64 ^b	1.75 ^a	1.75 ^a	1.44 ^d	1.53 ^c	1.32 ^e	1.31 ^e	1.23 ^f	1.20 ^f
MPR (L CH ₄ /L/day)	315.29**	1.04 ^b	0.99 ^c	1.08 ^a	1.11 ^a	0.73 ^e	0.80 ^d	0.65 ^f	0.65 ^f	0.55 ^g	0.54 ^a
Methane content (CH ₄ %)	305.7**	62.2 ^{ab}	60.5 ^c	61.6 ^{bc}	63.2 ^a	50.3 ^e	52.4 ^d	49.0 ^f	49.9 ^{ef}	44.5 ^g	45.0 ^g
Methane yield – COD (L CH ₄ /g COD add)	377.26**	0.078 ^b	0.075 ^c	0.081 ^a	0.083 ^a	0.051 ^e	0.056 ^d	0.050 ^f	0.051 ^f	0.040 ^g	0.040 ^g
Methane yield – VS (L CH ₄ /g VS add)	357.42**	0.146 ^b	0.139 ^c	0.151 ^{ab}	0.155 ^a	0.101 ^e	0.112 ^d	0.089 ^f	0.09 ^f	0.075 ^g	0.074 ^g

RCOD: COD removal efficiency, RTS: TS removal efficiency, RVS: VS removal efficiency, GPR: Gas production rate, MPR: Methane production rate
ANOVA 變方分析結果之 F 值上標*符號之意義 —— *: p<0.05 差異值達 5%顯著水準, **: p<0.01 差異值達 1%極顯著水準
經 DMRT 檢定之結果若無顯著差異則在平均值上標標示相同字母; $\alpha = 0.05$ 。



4.4 未添加葉菜廢棄物試驗的比較

如表 4-26 所示，T1-R1、T2-R1、T3-R1、T4-A_{vg}(A_{vg}表 A1、A2、B1、B2 之平均)之進流皆為 TS 為 50 g/L 之豬糞，隨著 HRT 停留時間的縮短、有機負荷增加，GPR、及 MPR 皆有逐漸增加之趨勢，不過單位甲烷產率則是呈先升後降的趨勢，HRT 10 天時有最大的單位 VS 甲烷產率。HRT 5 天時尚可維持反應槽之正常操作，並有最佳之 MPR。

表 4-26 HRT 為 12、10、8、5 天之比較

Test	HRT (Days)	Working Volume (L)	OLR (g VS/L/day)	GPR (L/L/day)	Methane content (CH ₄ %)	MPR (L CH ₄ /L/day)	Methane yield (L CH ₄ /g VS added)
T1-R1	12	6	2.28	0.94	67.73	0.64	0.22
T2-R1	10	6	2.85	1.17	70.01	0.82	0.25
T3-R1	8	6	3.55	1.19	71.53	0.85	0.23
T4-A _{vg}	5	3	7.15	1.70	61.90	1.06	0.15



4.5 文獻比較

本研究之結果與其他以豬糞及果菜廢棄物進行共消化實驗之文獻比較如表 4-27 所示，以果/葉菜廢棄物之混合比例之多寡排序。

比較進料基質中果/葉菜混合比例相近之幾組實驗，本研究實驗所得之 GPR、MPR 皆有優異表現。在 Mazareli 等人 (App. 1-4) 的研究中，進流有機負荷率為 11.0 g COD/L/d 的實驗 (VW 30%) 及 5.2 g COD/L/d (VW 20%) 的實驗之產氣表現亦不遜於本研究之結果，探討其原因有二項：其處理之果菜廢棄物組成為 70% 的番茄與 30% 的香蕉，與本研究之葉菜廢棄物相比，其纖維較少且可立即分解供微生物使用之有機物含量高，因此在 HRT 較短之條件下亦可有優異的產氣表現；第二項優勢為採用工作體積達 39 L 之水平厭氧固定床為反應槽，由於其所處理之果菜廢棄物僅有少量纖維，因此可於槽內填充滿固定化生物性濾材，而不會有堵塞的問題。而本實驗目的在處理果菜市場之最大宗廢棄物—葉菜廢棄物，其含有大量纖維，在濾材或固定化細胞的使用上有較多限制。

與其他以豬糞及果菜廢棄物進行共消化實驗之文獻相比較，本研究在 HRT 極短之條件下可處理高濃度、高有機負荷率、高葉菜廢棄物比例之進流，並得到優異之產氣表現。

表 4-27 本研究結果與其他文獻之比較

Material		Operational conditions			Influent		Effluent			Biogas			Ref.
Co-substrates	Ratio	OLR (g COD/L/d)	OLR (g VS/L/d)	HRT	COD (%)	VS (%)	COD removal efficiency(%)	VS removal efficiency(%)	pH	GPR (L/L/day)	MPR (L CH ₄ /L/day)	CH ₄ (%)	
SM:VW	67:33	13.58	7.31	5	6.8	3.7	13.85	8.97	6.8	1.21	0.54	45	This Study
SCSSW&SCSM : FVW	67:33	-	0.13	30	-	4	-	52.4	7.4	0.08	0.04	56	App.1-2
SM:VW	70:30	11.0	-	2	2.2		17.1	-	7.4	1.86	1.08	58	App.1-4
SM:VW	70:30	4.1	-	4.5	2.2		93.3	-	7.8	0.03	0.01	33	App.1-4
SM:VW	70:30	0.2	-	6.5	2.2		96.2	-	7.9	0.01	0.01	71	App.1-4
SM:VW	75:25	12.86	7.25	5	6.4	3.6	14.32	8.82	6.8	1.31	0.66	50	This Study
SM: CS	75:25	-	3.84	16	-	6.14	-	46.4	7.1	1.17	0.79	67.3	App.1-1
SM:VW	80:20	12.87	7.17	5	6.4	3.6	16.95	11.73	6.8	1.49	0.77	51	This Study
SM:VW	80:20	5.2	-	2	1.1		34.4	-	7.3	1.41	0.99	70	App.1-4
SM:VW	80:20	3.1	-	4.5	1.1		89.6	-	7.5	0.40	0.30	75	App.1-4
SM:VW	80:20	0.2	-	6.5	1.1		94.1	-	7.3	0.03	0.02	73	App.1-4
SCSSW&SCSM : FVW	83:17	-	0.13	30	-	4	-	54.2~67.3	7.7	0.07~ 0.08	0.04	51~53	App.1-2

CS: corn stover

FVW: fruit and vegetable wastes

SCSM: solid cattle and swine manure

SCSSW: solid cattle and swine slaughterhouse wastes

SM: swine manure

VW: vegetable wastes



第五章 結論與建議

本研究為探討豬糞與葉菜廢棄物，在何種操作條件、混合比例下進行中溫厭氧共消化試驗，可得最佳之甲烷產率，將實驗分為兩大部分進行，共七項試驗。

第一部分實驗之主要目的為以共消化方式提升沼液之甲烷產率，第二部分實驗之目的為解決葉菜廢棄物之問題，探討與豬糞共消化時可加入的葉菜廢棄物含量至多可達多少比例。

5.1 結論

1. 在第一部分實驗，以厭氧醱酵方式處理沼液時，加入葉菜廢棄物共消化之處理方式所得結果皆優於未加入額外碳源之反應槽。其中以加入 30% 葉菜廢棄物之共消化處理方式提升之幅度最高，在 HRT 為 12 天、OLR 為 3.90 g COD/L/day 之條件下，Methane yield 可達 0.06 L CH₄/g COD_{added}，遠高於未添加葉菜廢棄物之反應槽的 0.03 L CH₄/g COD_{added}。
2. 第二部分實驗，在沒有控制進流的酸鹼值之條件下，葉菜廢棄物之添加比例至多可達 33.3%，出流之 pH 為 6.83 左右，此時 COD 與 VS 之 OLR 分別為 13.58 g COD/L/day 及 7.31 g VS/L/day；去除率分別為 13.85% 及 8.97；Methane yield 分別為 0.04 L CH₄/g COD_{added} 及 0.07 L CH₄/g VS_{added}。



5.2 建議

1. 由結論一可知在沼液的處理上，HRT 12 天及加入 30%之葉菜廢棄物可得到最佳結果，建議可再多探討：

(1) 同時控制葉菜廢棄物含量為 30%以及控制第一階段反應槽之 HRT 時間為 10 天以固定沼液之有機物含量，改變第二階段 HRT 為 10、8、5 天。

(2) 固定第二階段之 HRT 時間為 12 天，增加葉菜廢棄物含量為 33%、45%、50%、67%、75%。

2. 由結論二可知葉菜廢棄物在與新鮮豬糞混合共消化的試驗上，最多可添加 33.3%，建議可再探討加鹼調整進流之 pH 值，觀察是否可再提升葉菜廢棄物之添加比例。

3. 葉菜廢棄物經前處理後，顆粒越小，處理效率越高，特別是 HRT 停留時間較短時，處理效率之差異會越明顯。因此在 HRT 較短之操作條件下，建議要進行細碎葉菜廢棄物至小顆粒之前處理。

參考文獻



本間琢也、牛山泉、梶川武信；高詹燦、黃正由譯。2013。用再生能源打造非核家園。初版。新北市：瑞昇文化。

立法院公報處。2016。立法院公報。105 (46)：237-324。

行政院主計總處。2015。綠色國民所得帳編製報告 103 年。南投：行政院主計總處。

行政院農業委員會。2015。103 年農業統計要覽。台北：行政院農委會。

行政院農業委員會。2015。103 年農業統計年報。台北：行政院農委會。

行政院環境保護署環境檢驗所。2012。國內生質燃料的料源調查與應用評估。台北：行政院環境保護署環境檢驗所。

行政院環保署。2015。104 年重要施政成果與 105 年未來工作規劃。臺北：行政院環保署。

行政院環保署。2015。水污染防治措施及檢測申報管理辦法部分條文修正草案總說明。臺北：行政院環保署。

沈明來。2010。試驗設計學。第四版：36-74。台北市：九州圖書。

徐仙達、白子易、王順成、送寶瑞、曾珠惠。2008。台中市果菜市場有機廢棄物再利用之現況。台灣環境資源永續發展研討會。桃園：國立中央大學土木系、南亞技術學院土環系。

財團法人中央畜產會。2016。2015 年台灣養豬統計手冊。台北：財團法人中央畜產會。



郭寶育。2001。果菜批發市場有機廢棄物堆肥化處理之可行性探討。碩士論文。
高雄：高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系。

郭猛德、蕭庭訓、王政騰。2008。養豬三段式廢水與污泥處理技術。畜牧半月刊
81(5):29-38。

盛中德。2008。果菜批發市場殘貨去化暨廢棄物減量之研究。農糧署 96 年度科
技計畫研究報告。台北：行政院農委會。

臺北農產運銷股份有限公司。2015。運銷統計年報。
<http://www.tapmc.com.taipei/price6.html>。上網日期 2015.4.5。

Alvarez, R., G. Lidén. 2008. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse
waste, manure, and fruit and vegetable waste. *Renewable Energy*. 33(4): 726-734.

APHA, AWWA and WEF, 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and
Wastewater*, 18th edition.

Comino, E., M. Rosso, and V. Riggio. 2010. Investigation of increasing organic loading
rate in the co-digestion of energy crops and cow manure mix. *Bioresource Technology*.
101(9): 3013-3019.

Esposito, G., L. Frunzo, A. Giordano, F. Liotta, A. Panico, and F. Pirozzi. 2012.
Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Reviews in Environmental Science and
Bio/Technology*. 11 (4): 325-341.

Fujita, M., J.M. Scharer, M. Moo-Young. 1980. Effect of corn stover addition on the
anaerobic digestion of swine manure. *Agric Wastes*. 2:177-184.

Hawkes, D. L. 1980. Factors affecting net energy production from mesophilic anaerobic
digestion. Straford DA, Wheatley BI, Hughes DE (eds) *Anaerobic digestion*. 131-150.

Kafle, G.K., S.H. Kim. 2013. Anaerobic treatment of apple waste with swine manure
for biogas production: Batch and continuous operation. *Applied Eng*. 103: 61-72.

Khalid, A., M. Arshad, M. Anjum, T. Mahmood, and L. Dawson. 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*. 31(8): 1737-1744.

Mata-Alvarez, J., S. Mace, and P. Llabres. 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*. 74(1): 3-16.

Mazareli, R.C.S., R.M. Duda, V.D. Leite, R.A. Oliveira. 2016. Anaerobic co-digestion of vegetable waste and swine wastewater in high-rate horizontal reactors with fixed bed. *Waste Management*. 52: 112-121.

McCarty, P.L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals, Part One: chemistry and microbiology. *Public Works*. 95 (9): 107-112.

McCarty, P.L. and D.P. Smith. 1986. Anaerobic wastewater treatment. *Environ. Sci. Technol.* 20(12):1200-1206.

Scharer, J.M., and M. Moo-YOUNG. 1979. Methane generation by anaerobic digestion of cellulose- containing wastes. *Advances in Biochemical Engineering*. 11:85-101.

Seadi, T. A., D. Rutz, H. Prazzl, M. Kottner, T. Finsterwalder, S. Volk, R. Janssen. 2008. *Biogas handbook*. 1st ed. 21-23. Esbjerg: University of Sothern Denmark Esbjerg.

Shen, F., H. Yuan, Y. Pang, S. Chen, B. Zhu, D. Zou, Y. Liu, J. Ma, L. Yu, X. Li. 2013. Performances of anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste and food waste: Single-phase vs. two-phase. *Bioresource Technology*. 144:80–85.

Sievers, D. M., and D. E. Brune. 1978. Carbon/nitrogen ratio and anaerobic digestion of swine waste. *Transactions of the ASAE*. 21: 537-549.

Wang G. 2009. Biogas production from energy crops and agriculture residues. Dissertation. Technical University of Denmark.

Wu, X., W. Yao, J. Zhu, and C. Miller. 2010. Biogas and CH₄ productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source. *Bioresource Technology*. 101: 4042-4047.

Ye, J., D. Li, Y. Sun, G. Wang, Z. Yuan, F. Zhen, and Y. Wang. 2013. Improved biogas production from rice straw by co-digestion with kitchen waste and pig manure. *Waste Management*. 33(12): 2653-2658.

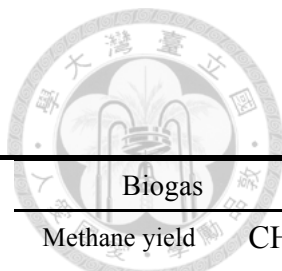


電腦軟體

SAS. 2015. *SAS User's Guide: Statistics*. Ver. 9.4. Cary, N.C.: SAS Institute, Inc.

附錄

附錄 1-1 加拿大玉米桔桿與豬糞之厭氧共消化研究 (Fujita et al., 1980)



Material		Operational conditions			Influent			Effluent		Biogas	
Co-substrates	ratio	Working Volume (L)	OLR (g VS/L/day)	RT (days)	pH	VS (%)	C/N	VS removal efficiency (%)	pH	Methane yield (L CH ₄ /g VS add)	CH ₄ (%)
Pig manure: corn stover	75:25	30	3.84	16	6.6	6.14	10.3	46.4%	7.1	0.205	67.3

39°C conical, cylinder-type digester with an internal diameter of 23 cm, a circulation pump, a temperature controller

附錄 1-2 玻利維亞牛豬屠宰場廢棄物、牛豬糞便與果菜廢棄物之厭氧共消化研究 (Alvarez and Lidén, 2008)

Material		Operational conditions			Influent		Effluent		Biogas	
Co-substrates	Ratio (wet weight basis)	Reactor	OLR(g VS/L/d)	HRT	VS(%)	C/N	VS removal efficiency(%)	pH	Methane Yield (L CH ₄ /g VS added)	CH ₄ %
	2:2:3:93		0.31	30	0.9	5.1	8.7	7.4	0.25	52
	8:7:11:74		1.31	30	3.9	5.1	52.4	7.4	0.32	56
	15:12:20:54		2.03	30	6.1	5.1	51.8	7.7	0.26	55
	8:7:11:74		3.80	10	3.8	5.2	47.1	6.7	0.12	44
	1:1:1:97		0.14	30	0.4	5.2	9.3	7.4	0.14	59
	8:7:11:74	35 °C 2 L	0.78	50	3.9	5.1	67.6	8.1	0.31	54
	25:0:0:75	semi-	0.49	70	3.4	5.1	60.4	7.7	0.34	55
SCSSW :	Ratio (VS basis)	continuously								
SCSM :	100:0:0	stirred				3.4	34.5	7.7	0.06	45
FVW :	0:100:0	stainless steel				8	38.8	7.4	0.21	56
(Dilution)	0:0:100	digesters				9.3	19.2	4.4	0.002	2
	50:50:0					4.8	51.7	7.7	0.26	57
	0:50:50	V=1.8 L				8.3	56.6	7.4	0.32	50
	50:0:50		0.13	30	4	4.4	53.8	5.3	0.04	25
	33:33:33					5.1	52.4	7.4	0.32	56
	67:17:17					4	67.3	7.7	0.27	51
	17:67:17					6.3	54.2	7.8	0.32	53
	17:17:67					6.6	67.4	7.8	0.35	51

SCSSW solid cattle and swine slaughterhouse wastes composed of 57.1% rumen, 33.5% blood, and 9.4% pig's paunch wastes. SCSM solid cattle and swine manure, 71% cattle manure, and 29% swine manure. FVW fruit and vegetable wastes. (14% Orange, 9.2% Banana, 8.6% Grapefruit, 7.5% Locoto, 6.4% Cucumber, 6.2% Lemon, 5.9% Onion, 5.2% Sweet pepper, 4.8% Tomato, 4.7% Cassava, 3.1% Lime, 2.5% Tangerine, 2.4% Pineapple, 2.3% Radish...)

附錄 1-3 韓國蘋果廢棄物與豬糞之厭氧共消化研究 (Kafle et al, 2013)

Material		Operational conditions			Influent			Effluent		Biogas	
Co-substrates	ratio	Reactor	Substrate loading (g VS/L)	HRT (days)	pH	VS (%)	C/N	COD removal efficiency(%)	pH	Methane yield (L CH ₄ /g TCOD added)	CH ₄ (%)
	100:0	36.5°C Batch test 1.2 L glass bottles	2.5	-	8.22	13	28.1	79	7.77	0.25	49
	0:100	WV=0.8L	2.5	-	8.25	3.85	2.7	84	7.9	0.27	81
	0:100	36.5 Batch test 2.3 L glass bottles	5.0	-	8.2	3.85	2.7	81	7.77	0.26	76
	33:67	WV=1.8L	5.0	-	8.25	6.87	11.1	83	7.8	0.27	67
OLR(g VS/L/d)											
AW:SM	25:75		1.0		-	6.14	9.05	-	7.85	0.24	76
	25:75		1.0		-	6.14	9.05	-	7.76	0.20	76
	25:75	36-38°C	1.4		-	6.14	9.05	-	7.37	NA	NA
	25:75	Continuous test 5.5 L CSTR	1.6	30	-	6.14	9.05	-	7.56	0.15	74
	33:67	WV=4.5 L	1.6		-	6.87	11.1	-	7.82	0.14	76
	33:67		1.6		-	6.87	11.1	-	7.81	0.19	79
	50:50		1.7		-	8.43	15.4	-	7.13	0.05	44

AW : Apple waste

SM : Swine manure

附錄 1-4 巴西葉菜廢棄物與豬糞共消化之不同混合比研究 (Mazareli et al., 2016)

Material		Operational conditions			Influent			Effluent		Biogas	
Co-substrates	ratio	Working volume (L)	OLR (g COD/L/day)	HRT (days)	pH	COD (g/L)	COD/N	COD removal efficiency (%)	pH	MPR (L CH ₄ / g CODadded)	CH ₄ (%)
SW : VW	100 : 0	39	5.5	2				62.6	7.4	0.11	80
		86.5	0.9	4.5	6.8	11	18.1	95.1	7.2	0.14	83
		128.9	0.1	6.5				96.6	7.4	0.1	81
	90 : 10	39	4.0	2				16	7.2	0.16	73
		86.5	1.5	4.5	5.7	8	13.9	92.7	7.3	0.13	77
		128.9	0.1	6.5				95.3	7.4	0.2	82
	80 : 20	39	5.2	2				-34.4	7.3	0.19	70
		86.5	3.1	4.5	5.7	11	22.5	89.6	7.5	0.098	75
		128.9	0.2	6.5				94.1	7.3	0.1	73
	70 : 30	39	11.0	2				17.1	7.4	0.098	58
		86.5	4.1	4.5	5.2	22	27.4	93.3	7.8	0.024	33
		128.9	0.2	6.5				96.2	7.9	0.05	71

high-rate horizontal anaerobic reactors with fixed bed (HAFB) : totally filled with bamboo rings as biomass immobilization. The bamboo rings with 75% empty space provided the support medium for fixed bed.

SW: swine wastewater

VW: vegetable waste (70% tomato and 30% banana)