

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

連續厭氧發酵生質氣生產技術開發

Development of biogas technology of continuous anaerobic digestion

計畫編號：108B009

受委託機關(構)：國立交通大學生物科技系

計畫主持人：曾慶平

聯絡電話：03-5712121#56908

E-mail address：cpts@cc.nctu.edu.tw

協同主持人：

研究期程：中華民國 108 年 05 月至 108 年 11 月

研究經費：新臺幣 103 萬元

核研所聯絡人員：化學組 詹明峯

報告日期：108 年 11 月 21 日

## 目 錄

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 目 錄.....                                          | i  |
| 中文摘要.....                                         | 1  |
| Abstract.....                                     | 3  |
| 壹、計畫緣起與目的.....                                    | 5  |
| 貳、研究方法與過程.....                                    | 8  |
| 一、料源基本性質分析 .....                                  | 8  |
| (一)總固體含量及揮發性固體含量 .....                            | 8  |
| (二)化學需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD) .....      | 9  |
| (三)碳/氮比例 (Carbon/Nitrogen, C/N ratio) .....       | 10 |
| (四)氨氮濃度檢測 .....                                   | 10 |
| 二、沼氣樣品分析 .....                                    | 11 |
| 三、高含氮沼液與解聚纖維原料共消化批次搖瓶產氣評估 .....                   | 12 |
| (一)批次式搖瓶實驗 .....                                  | 12 |
| (二)pH 值影響 .....                                   | 13 |
| (三)碳/氮比例 (Carbon/Nitrogen, C/N ratio) .....       | 14 |
| 四、連續式厭氧消化系統產氣參數最佳化測試.....                         | 14 |
| (一)食殖比 (Substrate/Inoculum ratio, S/I ratio)..... | 14 |

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| (二)養豬廢水混摻調整解聚纖維料 .....                         | 14        |
| (三)有機固體負荷率 (Organic Loading Rate, OLR).....    | 15        |
| (四)水力滯留時間(Hydraulic Retention Times, HRT)..... | 15        |
| (五)公斤級連續式系統厭氧產氣試驗 .....                        | 16        |
| <b>參、主要發現與結論.....</b>                          | <b>19</b> |
| 一、料源基本性質分析 .....                               | 19        |
| 二、S/I 混合比例調整高含氮沼液與纖維料批次產氣試驗 .....              | 19        |
| 三、pH 調整高含氮沼液與纖維料批次產氣試驗 .....                   | 20        |
| 四、C/N 比值調整高含氮沼液與纖維料批次產氣試驗 .....                | 21        |
| 五、純解聚纖維原料於公斤級連續式系統批次產氣試驗 S/I=1..               | 22        |
| 六、純解聚纖維原料於公斤級連續式系統連續進料產氣試驗 S/I=1<br>.....      | 24        |
| 七、純解聚纖維原料於公斤級連續式系統批次產氣試驗 S/I=2..               | 28        |
| 八、公斤級解聚纖維料與養殖廢水連續進料攪拌厭氧共醱酵反應實<br>驗 C/N=20..... | 29        |
| <b>肆、參考文獻.....</b>                             | <b>35</b> |

## 中文摘要

根據經濟部能源局統計資料，台灣 97%以上能源需求皆須依賴進口，因此能源開發將成為台灣經濟發展之重要課題。台灣每年約有 246 萬公噸之農業纖維廢棄物產出，農業廢棄物的有機質含量仍然很高，因此適合進一步作為生質能源使用。

本研究將探討厭氧消化後含有高氮之沼液，用來當作解聚纖維料之調整材，評估沼氣生產效率。研究結果顯示沼液的化學需氧量(COD)為 44800 mg/L、總固體含量(TS)及揮發性固體(VS)分別為 4 %、57 %，碳氮比(C/N)為 7.53。沼液與解聚纖維原料共發酵產氣試驗，測試在不同食殖比(Substrate/Inoculum, S/I)下的產氣效率，S/I=3 有最佳產氣量，平均每克乾重料源可產生 296 毫升沼氣。在 S/I=3 條件下藉由控制酸鹼值 pH=7-8 可提升沼氣潛能，實驗結果顯示 pH 8 組別的產氣情況最佳，甲烷濃度也是最高，平均每克乾重料源可產生 366 毫升沼氣。

我們也評估純解聚纖維原料於連續性厭氧消化系統中沼氣生產效率。以 S/I=1，水力滯留時間 HRT=20 days，固體停留時間 SRT 為二十天，有機負荷率 OLR 1.5 kgCOD/m<sup>3</sup>/day，C/N=20 條件下，純纖維料之每克乾重產氣量平均為 237 ml。反應第二十天時，加入尿素

調整 C/N=25，每克乾重產氣量提升為 350 ml，結果顯示改變為 C/N=25 於連續性厭氧系統可提升約 1.5 倍的產氣量。

本研究也進一步探討纖維料與養豬廢水混摻於連續系統厭氧共醱酵沼氣生產效率並探討參數最佳水力滯留時間、有機負荷率，達到最佳沼氣生產量。以養豬廢水用來當作解聚纖維料之調整材，可調整最佳碳氮比。條件參數為 HRT=16 Days, OLR=1.25 kgCOD/m<sup>3</sup>/day, C/N=20；HRT=8 Days, OLR=2.5 kgCOD/m<sup>3</sup>/day, C/N=20；HRT=32 Days, OLR=0.62 kgCOD/m<sup>3</sup>/day, C/N=20; 固體停留時間 SRT 分別為 16 天、8 天、32 天。當 HRT 為 8、16、32 days，每克乾重產氣量分別為 347、385、458 ml。結果顯示纖維料混摻養豬廢水確實能提高產氣表現，與純纖維料相比可提升約 2 倍的產氣量。實驗對照組 HRT=32 Days, OLR=1.0 kgCOD/m<sup>3</sup>/day，以養豬廢水調整 C/N=25，為最佳產氣參數條件，其每克乾重產氣量 530 ml。與 HRT=32 Days, C/N=20 組別相比，可再提升約 20% 的產氣量。

## **Abstract**

According to the reports of the Energy Bureau of the Ministry of Economic Affairs, more than 97% of Taiwan's energy needs are dependent on imports. Therefore, the new bio-energy development becomes an important issue for Taiwan's economy because it produces about 2.4 million metric tons of agricultural waste per year in Taiwan. The agricultural waste is suitable for further processing as a biomass energy source, and is a part of the circular economy.

On this study, the high-nitrogen biogas slurry produced by anaerobic digestion was used as an adjustment material for depolymerized fiber materials to produce biogas as bioenergy. The results showed that the chemical oxygen demand (COD) of the high-nitrogen biogas slurry was about 44800 mg/L, the total solid content (TS) was 4% and the volatile solids (VS) was 57%. The carbon/nitrogen ratio of the high-nitrogen biogas slurry was 7.53. The substrate/inoculum ratio (S/I ratio) of 3 produced the most of biogas which was 296 mL-biogas/g TS. Under the condition of 3 of S/I, the biogas potential was improved by adjusting the pH value to 7-8. The results showed that in pH value treatment group the best condition was 8 of pH which produced 366 mL-biogas/g TS.

The biogas potential of only depolymerized fiber materials was conducted by anaerobic digestion in continuously stirred tank reactor (CSTR). The results showed that the condition was under 1 of S/I and the HRT was 20 days. When the daily feed with the OLR was 1.5

kgCOD/m<sup>3</sup>/day and 20 of C/N, it was beneficial for CSTR anaerobic digestion. Only depolymerized fiber materials produced the biogas 237 mL-biogas/g TS. The efficiency of the biogas production was 350 mL-biogas/g TS which was 1.5 times increased by adding urea to adjust the condition of 25 of C/N.

On this study, the biogas potential of depolymerized fiber materials mixed with pig manure in different parameters (hydraulic retention time, organic load rate) by anaerobic digestion in CSTR. The pig manure was used as nitrogen-rich materials to appropriate C/N ratio. Experimental parameters were 16 days of HRT, 1.25 kgCOD/m<sup>3</sup>/day of OLR, 20 of C/N; 8 days of HRT, 2.5 kgCOD/m<sup>3</sup>/day of OLR, 20 of C/N; 32 days of HRT, 0.62 kgCOD/m<sup>3</sup>/day of OLR, 20 of C/N; 8, 16, 32 days of SRT. When 8, 16, 32 days of HRT, the biogas production were 347, 385, 458mL-biogas/g TS, respectively. The results showed that the condition under fiber materials mixed with wastewater elevated the biogas production about 2 times compared with the pure fiber material group.

Thus, the results demonstrated that the best condition of experimental control group was 32 days of HRT, 1.0 kgCOD/m<sup>3</sup>/day of OLR, adjust the condition of 25 of C/N with wastewater which produced 530 mL-biogas/g TS, which elevated the biogas production by about 20% compared with 32 days of HRT and 20 of C/N group.

## 壹、計畫緣起與目的

根據經濟部能源局統計年報，2001 到 2017 年國內能源需求增長了 28%，由國外進口的能源比例高達 97%以上，能源供給依賴向國外進口石化、燃煤與天然氣。近年因能源需求，大部分石化燃料即將用盡，燃燒石化燃料所排放的氣體對環境影響甚鉅，如二氧化碳使全球溫室效應加劇、溫度升高、氣候異常。近年環保意識抬頭、再生能源需求逐漸增高，對於沼氣生產利用已從廢棄物處理的副產物轉為商業化運作，各國以不同料源(廢水處理、畜牧業、農業廢棄物與複合料源)生產沼氣，尤其是畜牧業結合農業廢棄物產沼氣近年發展快速。

根據聯合國統計全球每年可產生 5 億噸農業纖維廢棄物，若將這些農業廢棄物轉化為生質能源使用，將可取代 25%石化原料 (1, 2)，並降低石化原料使用對於環境所帶來的衝擊。根據綠色國民所得帳農業固體廢棄物歷年表，台灣每年平均會生產 246 萬噸的農產廢棄物，主要為稻桿、廢棄太空菇包、蔗渣等，這些農產廢棄物若隨意傾倒、丟棄、燃燒或處理不當，均會對環境造成污染，破壞生態平衡系統，然而這些農產廢棄物富含大量有機質，相當適合作為生質沼氣原料，因此將農業纖維廢棄物轉化成生質能源是可說具有



龐大的產生質能潛力 (3, 4)。

農產廢棄物含有豐富的木質纖維素 (lignocellulose)，木質纖維素由纖維素 (Cellulose)、半纖維素(Hemi-cellulose)與木質素(Lignin)聚合而成 (5, 6)，經由複雜的纏繞組成複雜度高之結晶性結構，組成比例可依照料源種類而有所不同。先前研究發現，因為木質纖維素的結構複雜，未經處理的木質纖維素直接當作生質沼氣料源使用時，微生物將木質素分解為單糖的時間較長，導致沼氣生產速率過低。為了提高纖維原料的產氣效率，必須將纖維素進行解聚處理，增加單糖類溶出，以提升沼氣生產速率。目前常使用水解木質纖維素的方法主要有三種 (4, 7-10)，分別為使用稀酸高溫水解纖維素與半纖維素、透過濃酸低溫水解、利用酵素水解的方式 (11-16)，經由解聚後的纖維素都可以提升沼氣生產效率。

本研究將以台灣常見的稻稈作為原料進行厭氧消化產沼氣之研究，由核能研究所化學組提供解聚後之纖維原料進行連續厭氧消化產沼氣實驗，並調整影響厭氧消化產氣的參數，找出生產沼氣最佳條件，用以評估解聚纖維原料於連續厭氧消化。研究內容包含：

一、解聚後纖維料於公斤級濕式連續厭氧設備參數測試，有機固體負荷率 (Organic Loading Rate, OLR)、水力滯留時間 (Hydraulic

Retention Times, HRT)，對於厭氧消化產氣效率之影響。二、以養豬廢水當作氮源調整材，調整解聚後稻稈原料之碳氮比，於公斤級濕式連續厭氧系統中找尋最佳沼氣生產效率之參數。三、利用養豬場厭氧消化後之沼液，當作氮源調整材，調整解聚後稻稈原料之碳氮比，並評估沼氣生產效率。

## 貳、研究方法與過程

### 一、料源基本性質分析

本研究測試稻稈與沼液共醱酵之產氣效率，評估以沼液取代自來水的可行性與產氣效率。對農業固體廢棄物、沼液與汙泥(厭氧發酵菌種來源)進行基本性質分析，調整厭氧消化系統參數以達到最產氣之條件。分析項目包含：

#### (一)總固體含量及揮發性固體含量

樣品於 105°C 反應溫度，反應至恆定重量後所殘留下的重量，被移除之揮發性物質則統稱為水分，剩餘之重量稱為總固體含量 (Total Solid, TS)。將樣品放於 550°C 高溫爐灰化至恆定重量後，所殘留物之稱為灰份 (Ash)，揮發之氣體重量，稱為揮發性固體重量 (Volatile Solid, VS)，可揮發性固體多為有機化合物，灰分中的物質多為無機化合物。分析樣品的 TS 及 VS，可用來做為後續基本參數參考與進行產氣效率評估。TS 及 VS 分析方法採用 American Public Health Association (APHA)、The American Water Works Association (AWWA)、The Water Environment Federation (WEF)聯合出版之 Standard Methods 提供之方法進行，步驟如下：

1.總固體含量：

- (1)將空坩鍋以 105°C 烘乾 2 小時後秤重並記錄重量 A
- (2)取適量已知體積樣品至坩鍋中秤重並記錄重量 B
- (3)重量 B 扣重量 A 再除以體積，即可得單位體積所含濕重
- (4)將坩鍋置於 105°C 烘箱中烘乾至恆定重量，秤重重量 C
- (5)將重量 C 扣除重量 A 再除以體積，即可得單位體積所含  
總固體重量並計算出在濕重中所佔比例

計算公式為： $(\text{濕重}-\text{水份})/\text{濕重}*100\%$

2.揮發性固體：

- (1)將上述已測試過總固體含量之樣品放入 550°C 超高溫爐進  
行灰化
- (2)灰化 4 小時後取出，置於耐熱板上等待冷卻，秤重重量 D
- (3)將重量 C 扣除重量 D 再除以體積，即可得單位體積所含  
揮發性固體重量並計算出在乾重所佔比例

計算公式為： $(\text{TS 重}-\text{灰分})/\text{TS 重}*100\%$

**(二)化學需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD)**

化學需氧量代表樣品中有機物質氧化時所需消耗氧之總量，可用於評估樣品中有機物質的多寡，將利用重鉻酸鉀密閉

迴流法去測定樣品中的 COD，以用來評估料源 COD 與其所產生沼氣的相關性。

1.分析方法與步驟如下所述：

- (1)將樣品搖晃均勻後以二次水稀釋至適當濃度
- (2)取體積 2ml 樣品於強氧化試劑管 ( $K_2Cr_2O_7$ ) 中並搖勻
- (3)取 2ml 二次水於強氧化試劑管，作為空白校正組
- (4)將試劑管置於  $150^{\circ}C$  乾浴槽，加熱 2 小時
- (5)將加熱後試劑管上下晃動搖勻，靜置試管架冷卻 1 小時
- (6)以校正組將進行歸零動作，藉由 DR/890 colorimeter 以比色法測定樣品 COD 濃度 (unit：mgCOD/L)

### **(三)碳/氮比例 (Carbon/Nitrogen, C/N ratio)**

碳/氮比例為影響厭氧消化產沼氣的重要參數，將影響厭氧微生物的生存及其酵素作用。可使用養豬廢水與養豬場厭氧消化後之沼液，當作解聚纖維料的氮源調整材，找出最適合的碳氮比，並評估沼氣生產效率之參數。將利用元素分析儀分析樣品中碳、氮元素的組成。

### **(四)氨氮濃度檢測**

厭氧消化反應中，高濃度的氨氮將抑制甲烷菌生產甲烷的

效率，因此將分析料源中氨氮濃度的高低，避免因為氨氮濃度的累積造成產效下降。將利用水楊酸比色法 (Salicylic Acid Colorimetric Method) (環保署水中氨氮檢測方法一分立分析系統比色法 (NIEA W457.50B))檢測液體樣本氨氮濃度，用以評估養豬廢水氨氮濃度與纖維料源混摻所產沼氣的相關性質。主要原理是以強鹼將含氮有機物轉為銨鹽 (Ammonium Salt)，再與水楊酸鈉 (Sodium Salicylate) 及次氯酸鈉 (Sodium Hypochlorite)反應，測量其吸光質變化 (660nm)。

#### 1.實驗步驟如下:

- (1)以 Ammonia-free water 將樣品稀釋
- (2)取 100 $\mu$ L 稀釋樣品到氨氮預製檢測試劑
- (3)加入 Ammonia Salicylate Reagent Powder
- (4)加入 Ammonia Cyanurate Reagent Powder 混合均勻
- (5)置於室溫反應 20 分鐘
- (6)比色計以校正組歸零後測定樣品 NH<sub>3</sub>-N 濃度

## 二、沼氣樣品分析

厭氧發酵產氣作用後所收集的沼氣，其總產氣量將利用 Dry Gas Meter DC-1C (Shinagawa Seiki, Japan)來進行分析，甲烷濃度

是透過 XP-3140 Portable Gas Detector 來進行測量，二氧化碳與硫化氫得濃度則是利用檢知管 Tube No.126UH and Tube No.120SF (Kitagawa America, United States)進行檢測。

### 三、高含氮沼液與解聚纖維原料共消化批次搖瓶產氣評估

#### (一)批次式搖瓶實驗

為找尋固體廢棄物與厭氧微生物汙泥混合之最佳比例 (Substrate/Inoculum ratio, S/I)，使其能夠在最佳條件下開始產氣反應，以達到最佳產氣效率，不同 S/I 進行厭氧產氣。研究中使用批次式厭氧反應瓶進行，批次式搖瓶試驗意指所有反應物 (固體廢棄物與微生物汙泥)一次性地投入厭氧反應器，等待其反應完全後，再一次性地排放出料並分析生成物以及剩餘反應物之性質。測試最適當 S/I 條件時，固體廢棄物加入量以化學需氧量 (COD)作為調整指標，而微生物汙泥則以其揮發性固體含量表示，故 S/I 表示法為  $\text{gCOD}_{\text{substrate}} / \text{gVS}_{\text{inoculum}}$ 。以 1 公升凹底錐形瓶為容器，實際反應體積為 800 毫升，固定厭氧汙泥投入濃度為 10 gVS/L，料源 COD 則控制為 10、20、30。COD 來源為纖維料源及沼液以 1:1 比例添加，混合不同重量之固體廢棄物，配製出控制組以及 S/I=1、2、3 條件，而產氣效率評

估標準則以生化沼氣潛能 (Biogas potential) 為準。置於水浴槽內保持 35°C 恆溫，並以採氣袋收集產生之沼氣，7 天後結束實驗並進行後續分析。

1. 批次實驗設置步驟如下：

- (1) 取適量以保存的纖維固體解聚物進行回溫
- (2) 秤量出實驗所需之纖維固體解聚物重量並加入血清瓶中
- (3) 以氮氣充填血清瓶 5 分鐘
- (4) 以虹吸管快速地將汙泥加入血清瓶中並立刻封蓋
- (5) 將採氣袋接上瓶蓋上方矽膠管
- (6) 將反應瓶置入至 35°C 之水浴槽

## (二)pH 值影響

根據過往實驗條件發現，解聚纖維料多偏酸性 ( $\text{pH} < 7$ )，然而在厭氧過程中 pH 將會影響其產氣效率，當 pH 過低時，會抑制沼氣的生成，因此將料源的 pH 調整至最佳狀態進行產氣測試。將纖維料與沼液在搖瓶內混合後，以 3 N 氫氧化鈉水溶液來調整料源水溶液的 pH，將 pH 調至 pH 7、8，隨後加入厭氧汙泥與水至總體積 800 毫升，並進行厭氧產氣 6 至 7 日測量沼氣產量，至產氣結束，找出最佳產氣之反應酸鹼值。



### (三)碳/氮比例 (Carbon/Nitrogen, C/N ratio)

纖維料的碳源含量高，而沼液是一種氮源含量豐富之源料，因此將利用沼液來調整纖維料碳氮比值。本研究調整碳氮比以重量為單位計算。C/N 為饋料的總碳重量與總氮重量比值，在 S/I=3 的條件下將 C/N 比例調整至 C/N=20、25、30 (汙泥固定 300 ml，料源濕重分別為 71.2、80.2、86.2 g，沼液分別為 128、74、37 ml，剩餘部分補純水至 800 ml 以進行產氣)，產氣七天後評估碳氮比對沼氣產量的影響並找出最適合的碳氮比例。

## 四、連續式厭氧消化系統產氣參數最佳化測試

### (一)食殖比 (Substrate/Inoculum ratio, S/I ratio)

使半連續厭氧消化系統於不同 S/I ( $\text{gCOD}_{\text{substrate}} / \text{gVS}_{\text{inoculum}}$ ) 條件下建立，評估其產氣效率。使用公升級半連續式反應器為，作用體積為 40 公升，初始菌量投入量設定為 15 gVS/L，實驗步驟依序為進料、補水、接菌，在接菌前後皆於反應器內通入氮氣以維持厭氧環境，以採氣袋收集每日產生之沼氣。

### (二)養豬廢水混摻調整解聚纖維料

碳氮比的平衡是維持厭氧消化產沼氣系統的重要因素，解

聚纖維料的碳氮比為 40-45 之間，先前研究指出最佳的碳氮比為 20-30 之間 (3)。而養豬廢水含有高濃度的氮源，碳氮比為 14-15，可使用養豬廢水當作解聚纖維料的調整材，藉由調整解聚纖維料與廢水混和比例，達成調整碳氮比。酸鹼值同樣是維持厭氧消化系統的因素，由於酸催化水熱解聚料水溶液酸鹼值小於 5，不利於厭氧沼氣生成，因養豬廢水的 pH 值約在 8，因此廢水的混摻將可以平衡酸解聚後的纖維料酸鹼值。

### **(三)有機固體負荷率 (Organic Loading Rate, OLR)**

有機負荷率是連續操作下的重要條件，為每日單位體積所負荷的有機物量，當系統發生過載時揮發性脂肪酸可以使系統快速酸化，將嚴重抑制甲烷生成。因此可藉由調整公斤級連續式反應器每日饋料之 COD，找出最大有機負荷率使連續操作可以維持穩定下有最大產氣表現。

### **(四)水力滯留時間(Hydraulic Retention Times, HRT)**

饋料從打入到出流排出所經過的時間，稱為滯留時間。在這段時間中，會與汙泥充分均勻混和，進行厭氧消化反應後排出水與代謝抑制物。同樣產甲烷氣量下，HRT 能夠越短表示反應器效率越高。但過短的 HRT 可能造成殖菌被洗出或厭氧消

化反應不完全。因此可藉由調整公斤級連續式反應器每日饋料之體積，找出最短 HRT 使連續操作可以穩定並且得到此系統最有效率產氣表現。

### **(五)公斤級連續式系統厭氧產氣試驗**

使用 Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)的反應器，進行純纖維原料、纖維料混養豬廢水共醱酵厭氧產氣公斤級放大連續批次實驗。

#### **1.純纖維原料公斤級連續式系統厭氧產氣試驗**

實驗起始反應總體積共 40 公升，以  $S/I=1$  條件下為 600 gCOD 進料，補水後並以氫氧化鈉溶液調整控制其  $pH=7$ ，活性汙泥濃度為 30 gVS/L，為使反應器內濃度為 15 gVS/L 汙泥體積為 20 公升，另加入純水 20 公升使總體積達 40L，溫度固定於  $35^{\circ}C$ ，進行公斤級放大批次實驗。

純纖維原料連續進料試驗，以  $S/I=1$  條件下，以水力停留時間 20 days 為每天以固定體積為 2 L 進料，有機負荷率 OLR 為 1.5 kgCOD/m<sup>3</sup>/day 為每天以固定 COD 為 60 gCOD 連續進料，並記錄每日產氣量與甲烷濃度，以評估系統可能

的最佳化條件。實驗中為提高產氣表現、甲烷濃度，加入尿素溶液調整 C/N=25。

純纖維原料批次實驗為起始反應總體積共 40 公升，以 S/I=2 條件下，固定為 1200 gCOD 進料，補純水至 20 公升並調整其 pH=7，溫度固定於 35<sup>0</sup>C，控制活性汙泥濃度為 15 g/L，汙泥(菌種)體積為 20 公升，進行公斤級放大批次實驗。

## 2.解聚纖維與養豬廢水共醱酵公斤級連續式系統厭氧產氣試驗

解聚纖維料與養豬廢水共醱酵組別則將 10 公升的厭氧汙泥、15 公升的養豬廢水、15 公升的純水來建立 40 公升的連續培養系統。控制活性汙泥濃度為 7.5 g/L，以 S/I=1 條件下，進料 300 gCOD，調整比例控制 C/N 20 進行公斤級放大批次實驗。估算每日有機負荷率，以每日進料的方式進行連續厭氧醱酵產氣實驗。實驗設計組別為 HRT=16 Days, OLR=1.25 kgCOD/m<sup>3</sup>/day，進料 50 gCOD，進料體積 2.5 L/day 廢水，C/N 20；HRT=8 Days, OLR=2.5 kgCOD/m<sup>3</sup>/day，進料 100 gCOD，進料體積 5 L/day，C/N 20；HRT=32 Days, OLR=0.625 kgCOD/m<sup>3</sup>/day，進料 25 gCOD，進料體積 1.25 L/day，C/N 20；HRT=32 Days, OLR=1 kgCOD/m<sup>3</sup>/day，進料

42.56 gCOD，進料體積 1.25 L/day，C/N 25，固體滯留時間 SRT 分別為 16、8、32 天。並記錄每日產氣量與甲烷濃度，以評估系統可能的最佳化條件。

## 參、主要發現與結論

### 一、料源基本性質分析

將酸催化解聚處理後的稻稈、養殖廢水、沼液與汙泥 (厭氧發酵菌種來源)進行基本性質分析，分析總固體含量 (TS)、揮發性固體含量 (VS)、乾重化學需氧量 (COD)、C/N 比值，以利後續實驗的進行，調整厭氧消化系統參數以達到最產氣之條件，分析結果顯示於表一。

表一、料源固體含量、化學需氧量分析結果

| 料源    | TS %<br>(g/g-wet) | VS %<br>(g/g-dry) | COD mg /g<br>(Dry substrate) | NH3-N<br>(mg/L) | C%    | N%   | C/N   |
|-------|-------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|-------|------|-------|
| RWH12 | 19.5              | 91.7              | 1400                         | NA              | 44.56 | 1.18 | 37.76 |
| 汙泥    | 6                 | 54                | 40000                        | NA              | NA    | NA   | NA    |
| 廢水    | 1.3               | 21                | 4600                         | NA              | 34.03 | 4.04 | 8.42  |
| 沼液    | 4                 | 57                | 44800                        | 1200            | 31.65 | 4.20 | 7.53  |

### 二、S/I 混合比例調整高含氮沼液與纖維料批次產氣試驗

測試在不同 S/I 下的產氣效率，調整進料總 COD 量與汙泥量食殖比。汙泥固定每瓶加入 10 gVS，料源 COD 則控制為 10、20、30。COD 來源為纖維料源及沼液以 1:1 比例添加，所加入的料源濕重為 16.48 g, 32.97 g, 49.45 g，沼液為 100.45 ml, 200.89 ml, 301.34 ml。實驗結果顯示於表二。總產氣效率最佳的是 S/I=3 的

組別，平均每克乾重料源可產生 84.6 毫升沼氣，每克乾重產氣量為 S/I=1 的 14 倍、S/I=2 的 1.3 倍。結果可看出在 S/I=1 的情況下食物量無法維持細菌生長，導致產氣不佳；而 S/I=3 組別則最合適。

表二、S/I 混合比例批次產氣試驗

| S/I | 總產氣量<br>ml | 料源<br>濕重<br>g | 每克乾重<br>產氣量<br>mL/gTS | 每克 COD<br>產氣量<br>mL/gCOD | CH <sub>4</sub><br>% | CO <sub>2</sub><br>% | H <sub>2</sub> S<br>ppm |
|-----|------------|---------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| 1   | 45±7       | 16.48         | 6.0±0.9               | 5±0.8                    | ND                   | ND                   | ND                      |
| 2   | 990±14     | 32.97         | 65.7±0.9              | 55±0.8                   | 30.5                 | 3.5                  | 60                      |
| 3   | 1910±791   | 49.45         | 84.6±35.0             | 70.7±29.3                | 33.3                 | 6.8                  | 165                     |

### 三、pH 調整高含氮沼液與纖維料批次產氣試驗

不同的 pH 將會影響產氣的效率，因沼液 pH 值偏鹼，實驗將測試於 S/I=3 時在 pH 7、8 下的產氣效率，實驗對照組為不調整 pH 值（以下稱 pH 6），其產氣結果列於表三。實驗結果顯示 pH 8 組別的產氣情況最佳，甲烷濃度也是最高，平均每克乾重料源可產生 156 毫升沼氣，每克乾重產氣量為 pH 6 的 1.8 倍、pH 7 的 1.2 倍。推估可能原因為初始 pH 值若偏高，在微生物進行水解、酸化階段時產生脂肪酸降低 pH 值，此時 pH 值剛好適

合甲烷菌作用產生的結果。

表三、pH 調整批次產氣試驗

| pH | 總產氣量<br>ml | 料源濕重<br>g | 每克乾重<br>產氣量<br>mL/gTS | 每克 COD<br>產氣量<br>mL/gCOD | CH <sub>4</sub><br>% | CO <sub>2</sub><br>% | H <sub>2</sub> S<br>ppm |
|----|------------|-----------|-----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| 6  | 1910±791   | 49.45     | 84.6±35.0             | 70.7±29.3                | 33.3                 | 6.8                  | 165                     |
| 7  | 2970±141   | 49.45     | 131±6                 | 110±5.2                  | 27.3                 | 8.5                  | 330                     |
| 8  | 3525±361   | 49.45     | 156±16                | 131±13.4                 | 32.4                 | 11.7                 | 400                     |

註 1.兩批做的時間不同且有可能有不穩定性存在，現已用 6 重複實驗數據修正

註 2.每克乾重與 COD 產氣量係指纖維料+沼液之總乾重、COD

#### 四、C/N 比值調整高含氮沼液與纖維料批次產氣試驗

在厭氧產氣實驗中，C/N 將會影響甲烷產出的效率，因此 C/N 為必須考慮因子。本研究所使用的纖維料 C/N 比值為 37.8，高含氮沼液 C/N 比值則為 7.5，透過這兩種料源的混和，以 S/I=3 的條件下將 C/N 比例調整至 20、25、30 進行實驗。加入汙泥量固定為 300 ml，加入纖維濕重為 71.2 g, 80.2 g, 86.2 g，沼液為 128 ml, 74 ml, 37 ml，其產氣結果列於表四。實驗結果以 C/N=25 的產氣情況最佳，甲烷濃度也是最高，平均每克乾重料源可產生 28 毫升沼氣，每克乾重產氣量為 C/N=20 的 2 倍、C/N=30 的 1.2



倍。普遍能看出產氣情形不佳，推估原因為(二)所提到的，初始 pH 偏低。預估將往下測試 C/N=10、15 的情形。

表四、C/N 比值調整後批次產氣試驗

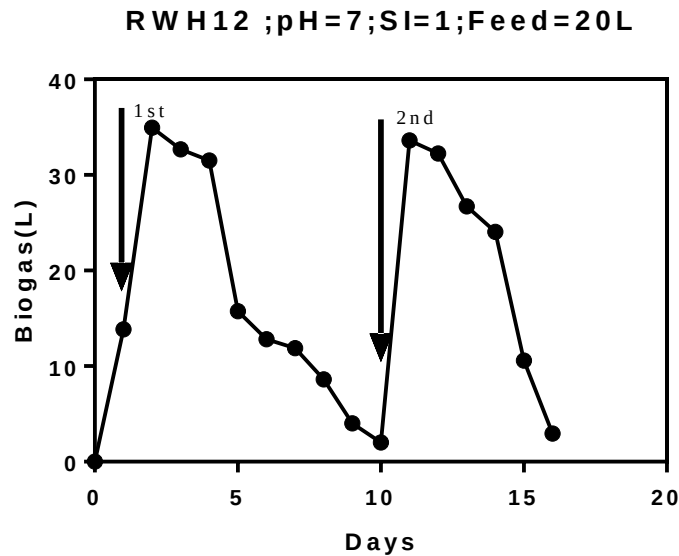
| CN | 總產氣量<br>ml | 料源<br>濕重<br>g | 每克乾重<br>產氣量<br>mL/gTS | 每克 COD<br>產氣量<br>mL/gCOD | CH <sub>4</sub><br>% | CO <sub>2</sub><br>% | H <sub>2</sub> S<br>ppm |
|----|------------|---------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| 20 | 265±261.6  | 71.2          | 14±13.5               | 11±10.4                  | 15.7                 | 1.8                  | 50                      |
| 25 | 535±21.2   | 80.2          | 28±1.1                | 21±0.8                   | 28.6                 | 3.5                  | 40                      |
| 30 | 415±7.1    | 86.2          | 23±0.4                | 16±0.3                   | 18.5                 | 4.0                  | 110                     |

#### 五、純解聚纖維原料於公斤級連續式系統批次產氣試驗 S/I=1

實驗起始反應總體積共 40 公升，以 S/I=1 條件下為 600 gCOD 進料，補水後調整至 pH=7，活性汙泥濃度為 30 gVS/L，為使反應器內濃度為 15 gVS/L 汙泥體積為 20 公升，另加入純水 20 公升使總體積達 40 L，進行公斤級放大批次實驗，並記錄每日產氣量與甲烷濃度，其結果顯示於表五、圖一。兩次的原料厭氧產氣系統測試結果相似，平均每克乾重產氣量為 346.93 ml。兩次實驗第六天起產氣表現下降，因此推估此系統的每日轉化效率為 60~100 gCOD，OLR 為 1.5~2.5 kgCOD/m<sup>3</sup>/day，後續實驗條件更改為每天固定體積為 2 L 進料，每日以 60 gCOD 進料。

表五、純纖維料於連續式系統批次試驗 S/I=1

| 天  | 總產氣量<br>L | CH <sub>4</sub><br>% | CO <sub>2</sub><br>% | H <sub>2</sub> S<br>% | 每克乾重<br>產氣量<br>ml/g-TS | 備註            |
|----|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|---------------|
| 1  | 13.85     | 16                   | 20                   | 0.20                  |                        | 進料 (600 gCOD) |
| 2  | 34.94     | 23                   | 20                   | 0.30                  |                        |               |
| 3  | 32.67     | 27                   | 25                   | 0.30                  |                        |               |
| 4  | 31.51     | 15                   | 17                   | 0.60                  |                        |               |
| 5  | 15.76     | 23                   | 30                   | 0.54                  |                        |               |
| 6  | 12.81     | 30                   | 24                   | 0.40                  |                        |               |
| 7  | 11.87     | 30                   | 23                   | 0.30                  |                        |               |
| 8  | 8.6       | 33                   | 21                   | 0.30                  |                        |               |
| 9  | 4.0       | 35                   | 20                   | 0.16                  |                        |               |
| 10 | 2.0       | 34                   | 20                   | 0.16                  |                        | 產氣完畢          |
|    | 168.01    | 23.6                 | 21.9                 | 0.37                  | 390.98                 | 合計            |
| 11 | 33.61     | 15                   | 33                   | 0.34                  |                        | 進料 (600 gCOD) |
| 12 | 32.24     | 10                   | 27                   | 0.74                  |                        |               |
| 13 | 26.70     | 18                   | 24                   | 0.36                  |                        |               |
| 14 | 24.05     | 31                   | 22                   | 0.34                  |                        |               |
| 15 | 10.59     | 29                   | 10                   | 0.30                  |                        |               |
| 16 | 2.96      | 29                   | 6                    | 0.30                  |                        | 產氣完畢          |
|    | 130.15    | 18.8                 | 25.1                 | 0.44                  | 302.87                 | 合計            |



圖一、純纖維料於連續式系統批次試驗之每日產氣量 S/I=1

#### 六、純解聚纖維原料於公斤級連續式系統連續進料產氣試驗 S/I=1

在進料初期，每日將餵養 2 公升的養豬廢水排除可能殘留的料源並觀察其氣量。經過六天的培養，養豬廢水及汙泥的產氣量都非常低，因此於第六天收氣完畢後，第七天開始每日連續進料。以 S/I=1 條件下，每天以固定體積 2 L 進料，HRT=20 days; SRT 為二十天；有機負荷率  $1.5 \text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$  為每日以 60 gCOD 連續進料，並記錄每日產氣量與甲烷濃度。實驗中為提高產氣表現以及甲烷濃度，加入尿素溶液調整 C/N=25，並且將每日進料加入尿素溶液或氯化銨溶液，使 C/N=25。在同樣操作條件下，純纖維料平均每克乾重產氣量 237 ml，而調整 C/N=25 後每克乾重

產氣量平均為 350 ml，表示提升 C/N 於連續操作下可提升約 1.5 倍的產氣效率，其結果顯示於表六、圖二。

註 1. 添加氮源調整碳氮比計算方式

$$\frac{\text{纖維料乾重} \times \text{RC}\% + \text{調整材乾重} \times \text{C}\%}{\text{纖維料乾重} \times \text{RN}\% + \text{調整材乾重} \times \text{N}\%} = \text{目標碳氮比}$$

註 2. 纖維料 60gCOD 乾重 = 42.85g; 纖維料碳重量比

$$= 44.56\%; \text{纖維料氮重量比} = 1.18\%$$

註 3. 尿素碳重量比 = 20.0%; 尿素氮重量比 = 46.66%

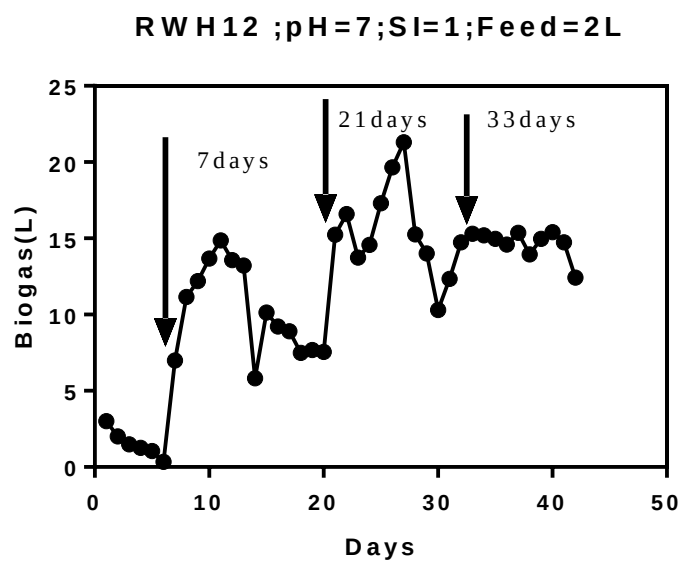
註 4. 氯化銨碳重量比 = 0.00%; 氯化銨氮重量比 = 26.16%

表六、純纖維料於公斤級連續式系統連續進料產氣試驗 S/I=1

| 天  | 總產<br>氣量<br>L | CH <sub>4</sub><br>% | CO <sub>2</sub><br>% | H <sub>2</sub> S<br>% | 每克乾重<br>產氣量<br>ml/g-TS | 備註                     |
|----|---------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 1  | 3.01          | 33                   | NA                   | NA                    |                        | 進 2 L 養豬廢水             |
| 2  | 2.0           | 27                   | NA                   | NA                    |                        |                        |
| 3  | 1.48          | 27                   | NA                   | NA                    |                        |                        |
| 4  | 1.25          | 23                   | NA                   | NA                    |                        |                        |
| 5  | 1.05          | 23                   | NA                   | NA                    |                        |                        |
| 6  | 0.34          | 20                   | NA                   | NA                    |                        |                        |
| 7  | 6.98          | 31                   | 11                   | 0.18                  | 162.43                 | 進料 (60 gCOD) (體積: 2 L) |
| 8  | 11.16         | 28                   | 25                   | 0.30                  | 259.71                 |                        |
| 9  | 12.2          | 21                   | 22                   | 0.20                  | 283.91                 |                        |
| 10 | 13.68         | 22                   | 22                   | 0.20                  | 318.35                 |                        |
| 11 | 14.86         | 22                   | 24                   | 0.36                  | 345.81                 |                        |
| 12 | 13.57         | 24                   | 20                   | 0.3                   | 315.79                 |                        |

|    |       |    |    |      |        |                                                                                            |
|----|-------|----|----|------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13 | 13.21 | 24 | 12 | 0.28 | 307.42 |                                                                                            |
| 14 | 5.82  | 24 | 15 | 0.2  | 135.44 |                                                                                            |
| 15 | 10.14 | 22 | 17 | 0.3  | 235.97 |                                                                                            |
| 16 | 9.22  | 22 | 13 | 0.3  | 214.56 |                                                                                            |
| 17 | 8.91  | 21 | 24 | 0.3  | 207.35 |                                                                                            |
| 18 | 7.48  | 21 | 25 | 0.34 | 174.07 |                                                                                            |
| 19 | 7.68  | 21 | 25 | 0.28 | 178.72 |                                                                                            |
| 20 | 7.56  | 21 | 19 | 0.2  | 175.93 |                                                                                            |
|    | 10.18 | 23 | 21 | 0.27 | 236.82 | 純纖維料平均                                                                                     |
| 21 | 15.23 | 27 | 27 | 0.2  | 354.42 | 進料 (60 gCOD) (體積: 2 L)<br><br>(6ml 8M 尿素) ;<br><br>加入 120ml 8M 尿素將 40L<br><br>反應器調整 C/N=25 |
| 22 | 16.6  | 25 | 25 | 0.2  | 386.31 | 進料 (60 gCOD) (體積: 2 L)<br><br>(6ml 8M 尿素)                                                  |
| 23 | 13.74 | 25 | 25 | 0.3  | 319.75 |                                                                                            |
| 24 | 14.57 | 23 | 23 | 0.2  | 339.06 |                                                                                            |
| 25 | 17.3  | 20 | 20 | 0.3  | 402.60 |                                                                                            |
| 26 | 19.65 | 25 | 24 | 0.3  | 457.28 |                                                                                            |
| 27 | 21.30 | 25 | 20 | 0.3  | 495.68 |                                                                                            |
| 28 | 15.25 | 24 | 22 | 0.3  | 354.89 |                                                                                            |
| 29 | 14.00 | 23 | 21 | 0.3  | 325.80 |                                                                                            |
| 30 | 10.31 | 28 | 20 | 0.3  | 239.93 |                                                                                            |
| 31 | 12.35 | 25 | 25 | 0.3  | 287.40 |                                                                                            |
| 32 | 14.73 | 24 | 20 | 0.3  | 342.79 |                                                                                            |
|    | 15.42 | 23 | 22 | 0.27 | 358.83 | 纖維料添加尿素平均                                                                                  |

|    |       |    |    |      |        |                                         |
|----|-------|----|----|------|--------|-----------------------------------------|
| 33 | 15.3  | 21 | 20 | 0.3  | 356.05 | 進料 (60 gCOD) (體積: 2 L)<br>(21ml 4M 氯化銨) |
| 34 | 15.2  | 21 | 25 | 0.26 | 353.73 |                                         |
| 35 | 14.96 | 20 | 25 | 0.28 | 348.14 |                                         |
| 36 | 14.6  | 20 | 28 | 0.3  | 339.76 |                                         |
| 37 | 15.36 | 18 | 25 | 0.28 | 357.45 |                                         |
| 38 | 13.95 | 26 | 24 | 0.3  | 324.64 |                                         |
| 39 | 14.96 | 24 | 26 | 0.3  | 348.14 |                                         |
| 40 | 15.4  | 21 | 27 | 0.3  | 358.38 |                                         |
| 41 | 14.73 | 21 | 26 | 0.3  | 342.79 |                                         |
| 42 | 12.43 | 26 | 26 | 0.28 | 289.26 |                                         |
|    | 14.69 | 21 | 25 | 0.29 | 341.83 | 纖維料添加氯化銨平均                              |



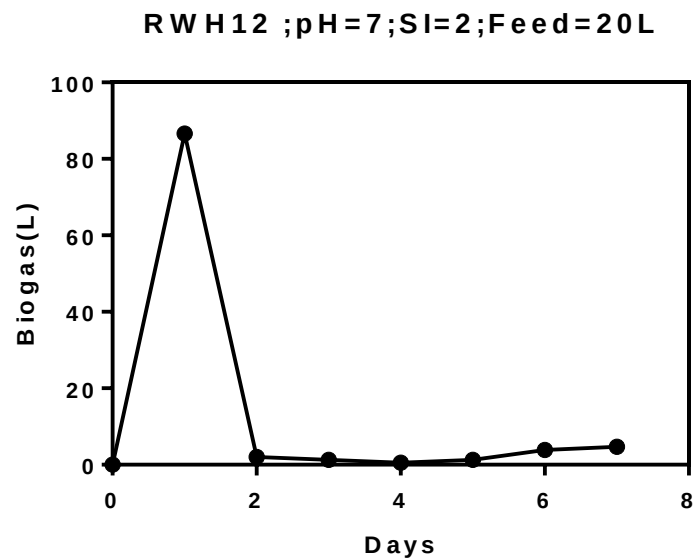
圖二、純纖維料於公斤級連續式系統連續進料產氣試驗之每日產氣  
量 S/I=1

## 七、純解聚纖維原料於公斤級連續式系統批次產氣試驗 S/I=2

起始反應總體積共 40 公升，以 S/I=2 條件下為 1200 gCOD 進料，纖維料補純水至 20 公升，調整至 pH=7，控制反應器汙泥活性濃度為 15 g/L，汙泥體積為 20 公升，進行公斤級放大批次實驗，並記錄每日產氣量與甲烷濃度，其結果顯示於表七、圖三。隨著纖維料添加的比例上升，產氣表現、甲烷濃度下降、二氧化碳濃度上升，判斷超出汙泥負荷能力使 pH 低於 6.0，系統酸化速度大於甲烷轉換速度，抑制了產氣表現，造成反應中止，因此無法做連續進料試驗。

表七、純纖維料於連續式系統批次試驗 S/I=2

| 天 | 總產氣<br>量 L | CH <sub>4</sub><br>% | CO <sub>2</sub><br>% | H <sub>2</sub> S<br>% | 每克乾重產氣<br>量 ml/g-TS | 備註             |
|---|------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------|
| 1 | 86.65      | 30                   | 20                   | 0.12                  |                     | 進料 (1200 gCOD) |
| 2 | 2.03       | 26                   | 15                   | 0.10                  |                     |                |
| 3 | 1.30       | 17                   | 18                   | 0.03                  |                     |                |
| 4 | 0.50       | 12                   | 7                    | 0.02                  |                     |                |
| 5 | 1.29       | 6.5                  | 13                   | 0.06                  |                     |                |
| 6 | 3.90       | 3                    | 18                   | 0.10                  |                     |                |
| 7 | 4.71       | 4.3                  | 23                   | 0.12                  |                     | 產氣完畢           |
|   | 100.38     | 27.1                 | 19.7                 | 0.12                  | 116.79              | 合計             |



圖三、純纖維料於連續式系統批次試驗之每日產氣量  $S/I=2$

#### 八、公斤級解聚纖維料與養殖廢水連續進料攪拌厭氧共醱酵反應

##### 實驗 $C/N=20$

控制反應器汙泥  $gVS=7.5\text{ g/L}$ ;  $SI=1$ ;  $300\text{ gCOD}$ ，將酸催化解聚纖維料與養殖廢水混和，調整比例控制  $C/N=20$  進行公斤級放大連續批次實驗，產氣結果如表八、圖四。當系統啟動時，總反應體積： $40\text{ L}$ ，汙泥： $10\text{ L}$ 、養殖廢水： $15\text{ L}$  以及纖維原料  $300\text{ gCOD}$ ，補水至  $40\text{ L}$ 。於第五、六天產氣反應結束，以此推估每日轉化量為  $50\sim60\text{ gCOD}$ ，以此決定最初每日進料為，纖維料  $50\text{ gCOD}$ ，廢水  $2.5\text{ L}$ ， $HRT=16\text{ Days}$ ； $SRT$  為十六天， $OLR=1.25\text{ kgCOD/m}^3/\text{day}$ ， $C/N=20$ 。



再根據產氣情況，調整進料體積纖維料 100 gCOD, 廢水 5.0 L, HRT=8 Days, SRT 為八天, OLR=2.5 kgCOD/m<sup>3</sup>/day, C/N=20；纖維料 25 gCOD, 廢水 1.25 L, HRT=32 Days, SRT 為三十二天, OLR=0.62 kgCOD/m<sup>3</sup>/day, C/N=20，當 HRT 為 8、16、32 days，每克乾重產氣量分別為 347、385、458 ml。產氣表現優於純纖維料調整 C/N=25 的組別，其每克乾重產氣量表現平均為 350 ml/g Ts，表示於纖維料中混入養豬廢水確實能提高產氣表現。對照組固定 HRT=32 days, C/N=25; OLR= 1.0 kgCOD/m<sup>3</sup>/day，每克乾重產氣量 530 ml，為實驗產氣表現最佳組別，與 HRT=32 days, C/N=20; OLR= 1.0 kgCOD/m<sup>3</sup>/day 組別相比可再提升 20% 的每克乾重產氣量。若允許拉長 HRT 下，OLR 也是可以有提升的空間。並且以搖瓶批次實驗的結果與最佳條件，可能會因反應總體機放大而有所不同。

表八、解聚纖維料與養殖廢水連續進料攪拌厭氧共發酵 C/N=20

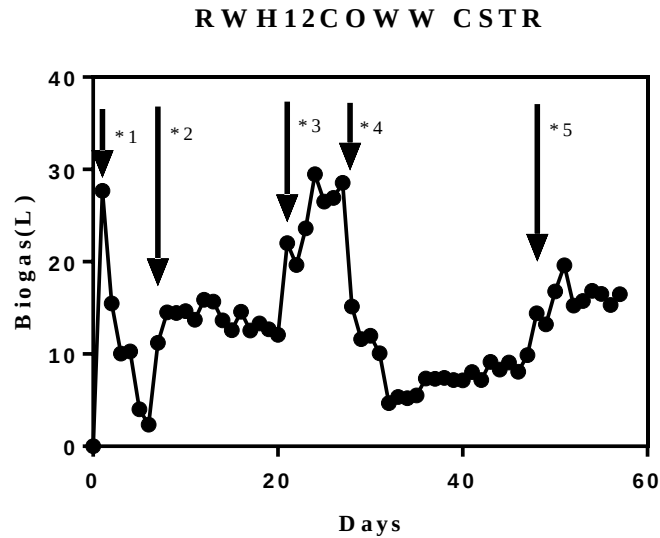
| 天 | 總產<br>氣量<br>L | CH <sub>4</sub><br>% | CO <sub>2</sub><br>% | H <sub>2</sub> S<br>% | 每克乾重<br>產氣量<br>ml/g-TS | 備註 |
|---|---------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----|
|---|---------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----|

|    |       |    |    |      |        |                                                   |
|----|-------|----|----|------|--------|---------------------------------------------------|
| 1  | 27.67 | 31 | 10 | 0.28 |        | 進料 (300 gCOD)<br>(養殖廢水:15L)<br>(纖維原料濕重: 766.27 g) |
| 2  | 15.47 | 39 | 17 | 0.36 |        |                                                   |
| 3  | 10.06 | 33 | 20 | 0.10 |        |                                                   |
| 4  | 10.29 | 33 | 10 | 0.20 |        |                                                   |
| 5  | 4.02  | 34 | 10 | 0.16 |        |                                                   |
| 6  | 2.35  | 31 | 9  | 0.10 |        | 產氣完畢                                              |
|    | 69.86 | 33 | 13 | 0.20 | 321.68 | 總和                                                |
| 1  | 11.20 | 32 | 25 | 0.20 | 309.44 | 進料 (50 gCOD)<br>(養殖廢水:2.5L)<br>(纖維原料濕重:127.71 g)  |
| 2  | 14.53 | 28 | 22 | 0.20 | 401.44 |                                                   |
| 3  | 14.44 | 27 | 25 | 0.20 | 398.96 |                                                   |
| 4  | 14.66 | 26 | 33 | 0.18 | 405.04 |                                                   |
| 5  | 13.71 | 27 | 22 | 0.26 | 378.79 |                                                   |
| 6  | 15.88 | 29 | 25 | 0.20 | 438.74 |                                                   |
| 7  | 15.67 | 28 | 28 | 0.20 | 432.94 |                                                   |
| 8  | 13.65 | 28 | 22 | 0.28 | 377.13 |                                                   |
| 9  | 12.57 | 29 | 11 | 0.20 | 347.29 |                                                   |
| 10 | 14.58 | 31 | 15 | 0.20 | 402.83 |                                                   |
| 11 | 12.56 | 30 | 10 | 0.22 | 347.02 |                                                   |
| 12 | 13.32 | 30 | 21 | 0.24 | 368.01 |                                                   |
| 13 | 12.68 | 29 | 22 | 0.2  | 350.33 |                                                   |
| 14 | 12.09 | 30 | 20 | 0.14 | 334.03 |                                                   |
|    | 13.95 | 28 | 21 | 0.21 | 385.42 | HRT=16 days 平均                                    |

|    |       |    |    |      |        |                                                             |
|----|-------|----|----|------|--------|-------------------------------------------------------------|
| 15 | 22    | 27 | 18 | 0.26 | 303.92 | 進料 (100 gCOD)<br>(養殖廢水:5.0 L)<br>(纖維料濕重: 255.42 g)          |
| 16 | 19.65 | 26 | 16 | 0.24 | 271.45 |                                                             |
| 17 | 23.61 | 24 | 11 | 0.22 | 326.16 |                                                             |
| 18 | 29.47 | 21 | 12 | 0.28 | 407.11 |                                                             |
| 19 | 26.5  | 22 | 14 | 0.36 | 366.08 |                                                             |
| 20 | 26.9  | 24 | 18 | 0.3  | 371.61 |                                                             |
| 21 | 28.56 | 24 | 14 | 0.38 | 394.54 |                                                             |
|    | 22.38 | 25 | 15 | 0.29 | 347.25 | HRT=8 days 平均                                               |
| 22 | 15.15 | 26 | 20 | 0.22 | 837.15 | 進料 (25 gCOD)<br>(養殖廢水:1.25 L)<br>(纖維料濕重: 63.85 g)<br>C/N=25 |
| 23 | 11.63 | 27 | 14 | 0.24 | 642.64 |                                                             |
| 24 | 11.97 | 27 | 18 | 0.24 | 661.43 |                                                             |
| 25 | 10.08 | 27 | 22 | 0.16 | 556.99 |                                                             |
| 26 | 4.68  | 30 | 20 | 0.16 | 258.60 |                                                             |
| 27 | 5.34  | 31 | 13 | 0.2  | 295.07 |                                                             |
| 28 | 5.22  | 31 | 15 | 0.2  | 288.44 |                                                             |
| 29 | 5.52  | 31 | 18 | 0.2  | 305.02 |                                                             |
| 30 | 7.36  | 34 | 13 | 0.2  | 406.69 |                                                             |
| 31 | 7.32  | 33 | 15 | 0.18 | 404.48 |                                                             |
| 32 | 7.42  | 33 | 10 | 0.14 | 410.01 |                                                             |
| 33 | 7.18  | 34 | 15 | 0.16 | 396.75 |                                                             |
| 34 | 7.15  | 35 | 15 | 0.12 | 395.09 |                                                             |
| 35 | 8.05  | 37 | 10 | 0.2  | 444.82 |                                                             |
| 36 | 7.17  | 41 | 12 | 0.14 | 396.19 |                                                             |

|    |      |    |    |      |        |                |
|----|------|----|----|------|--------|----------------|
| 37 | 9.14 | 38 | 11 | 0.14 | 505.05 |                |
| 38 | 8.3  | 35 | 11 | 0.16 | 458.64 |                |
| 39 | 9.09 | 40 | 11 | 0.16 | 502.29 |                |
| 40 | 8.09 | 38 | 10 | 0.18 | 447.03 |                |
| 41 | 9.87 | 37 | 12 | 0.18 | 545.39 |                |
|    | 8.29 | 35 | 15 | 0.20 | 457.89 | HRT=32 days 平均 |

|    |       |    |    |      |        |                                                       |
|----|-------|----|----|------|--------|-------------------------------------------------------|
| 1  | 14.43 | 31 | 15 | 0.2  | 470.97 | 進料 (42.56 gCOD)<br>(養殖廢水:1.25 L)<br>(纖維料濕重: 127.81 g) |
| 2  | 13.2  | 36 | 13 | 0.2  | 430.83 |                                                       |
| 3  | 16.78 | 32 | 20 | 0.24 | 547.67 |                                                       |
| 4  | 19.6  | 30 | 20 | 0.26 | 639.71 |                                                       |
| 5  | 15.24 | 30 | 20 | 0.25 | 497.41 |                                                       |
| 6  | 15.75 | 35 | 15 | 0.2  | 514.06 |                                                       |
| 7  | 16.85 | 35 | 14 | 0.2  | 549.96 |                                                       |
| 8  | 16.5  | 32 | 14 | 0.26 | 538.53 |                                                       |
| 9  | 15.3  | 36 | 12 | 0.26 | 499.37 |                                                       |
| 10 | 16.49 | 39 | 12 | 0.24 | 538.21 |                                                       |
|    | 16.24 | 34 | 15 | 0.23 | 530.14 | HRT=32 days 平均                                        |



**圖四、公斤級解聚纖維料與養殖廢水批次試驗**

\*1:1day: 批次進料，進纖維料和養殖廢水:300gCOD 體積 15L、C/N=20 ;\*2:7day: 每日連續進料 養殖廢水混纖維料 體積=2.5L、HRT=16days、OLR=1.25 kgCOD/m<sup>3</sup> day、C/N=20; \*3:21day: 每日連續進料 養殖廢水混纖維料 體積=5.0L、HRT=8 days、OLR=2.5 kgCOD/m<sup>3</sup> day、C/N=20; \*4:28 day: 每日連續進料 養殖廢水混纖維料 體積=1.25 L、HRT=32 days、OLR=0.625 kgCOD/m<sup>3</sup> day、C/N=20; \*5:48 day: 每日連續進料 養殖廢水混纖維料。體積=1.25 L、HRT=32 days、OLR=1.064 kgCOD/m<sup>3</sup> day、C/N=25。

#### 肆、參考文獻

- 1.Mah RA, Ward DM, Baresi L, Glass TL. 1977. Biogenesis of methane. *Annu Rev Microbiol* 31:309-341.
- 2.Ganesh Saratale R, Kumar G, Banu R, Xia A, Periyasamy S, Dattatraya Saratale G. 2018. A critical review on anaerobic digestion of microalgae and macroalgae and co-digestion of biomass for enhanced methane generation. *Bioresour Technol* 262:319-332.
- 3.Wang X, Lu X, Li F, Yang G. 2014. Effects of temperature and carbon-nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: focusing on ammonia inhibition. *PLoS One* 9:e97265.
- 4.Grabber JH, Schatz PF, Kim H, Lu F, Ralph J. 2010. Identifying new lignin bioengineering targets: 1. Monolignol-substitute impacts on lignin formation and cell wall fermentability. *BMC Plant Biol* 10:114.
- 5.Kaparaju P, Serrano M, Angelidaki I. 2009. Effect of reactor configuration on biogas production from wheat straw hydrolysate. *Bioresour Technol* 100:6317-6323.
- 6.Kaparaju P, Serrano M, Thomsen AB, Kongjan P, Angelidaki I. 2009. Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. *Bioresour Technol* 100:2562-2568.
- 7.Vegas R, Alonso JL, Dominguez H, Parajo JC. 2004. Processing of rice husk autohydrolysis liquors for obtaining food ingredients. *J Agric Food Chem* 52:7311-7317.

8. Rincon MT, Dassa B, Flint HJ, Travis AJ, Jindou S, Borovok I, Lamed R, Bayer EA, Henrissat B, Coutinho PM, Antonopoulos DA, Berg Miller ME, White BA. 2010. Abundance and diversity of dockerin-containing proteins in the fiber-degrading rumen bacterium, *Ruminococcus flavefaciens* FD-1. *PLoS One* 5:e12476.
9. Krause DO, Denman SE, Mackie RI, Morrison M, Rae AL, Attwood GT, McSweeney CS. 2003. Opportunities to improve fiber degradation in the rumen: microbiology, ecology, and genomics. *FEMS Microbiol Rev* 27:663-693.
10. Kuhad RC, Singh A, Eriksson KE. 1997. Microorganisms and enzymes involved in the degradation of plant fiber cell walls. *Adv Biochem Eng Biotechnol* 57:45-125.
11. Kumar A, Singh LK, Ghosh S. 2009. Bioconversion of lignocellulosic fraction of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to ethanol by *Pichia stipitis*. *Bioresour Technol* 100:3293-3297.
12. Nigam JN. 2002. Bioconversion of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to motor fuel ethanol by xylose-fermenting yeast. *J Biotechnol* 97:107-116.
13. Basic A, Mardetko N, Kundas S, Morzak G, Belskaya H, Ivancic Santek M, Komes D, Novak S, Santek B. 2018. Bioethanol Production from Renewable Raw Materials and Its Separation and Purification: A Review. *Food Technol Biotechnol* 56:289-311.
14. Kim D. 2018. Physico-Chemical Conversion of Lignocellulose: Inhibitor Effects and Detoxification Strategies: A Mini Review.

Molecules 23.

15. Zheng J, Rehmann L. 2014. Extrusion pretreatment of lignocellulosic biomass: a review. *Int J Mol Sci* 15:18967-18984.
16. Yanagisawa M, Kawai S, Murata K. 2013. Strategies for the production of high concentrations of bioethanol from seaweeds: production of high concentrations of bioethanol from seaweeds. *Bioengineered* 4:224-235.