

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

連續生產沼氣之厭氧發酵技術開發
(Development of continuous anaerobic digestion biogas production
technology)

計畫編號：109B002

受委託機關(構)：國立交通大學

計畫主持人：曾慶平

聯絡電話：03-5712121#56913

E-mail address：cpts@cc.nctu.edu.tw

核研所聯絡人員：詹明峯

報告日期：109 年 11 月 23 日

目 錄

目 錄	i
中文摘要	1
英文摘要	2
壹、計畫緣起與目的	4
貳、研究方法與過程	7
一、料源基本性質分析	7
(一) 總固體組成及揮發性固體組成	7
(二) 化學需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD).....	8
(三) 碳/氮比例 (Carbon/Nitrogen, C/N ratio).....	9
(四) 氨氮濃度檢測	10
(五) 沼氣樣品分析	11
二、批次式搖瓶試驗	11
三、批次式搖瓶試驗 (參數調整部分).....	12
(一) pH 值影響	12
(二) 食殖比 (Substrate/Inoculum ratio, S/I ratio).....	12
(三) 碳/氮比例 (Carbon/Nitrogen, C/N ratio).....	13
四、公斤級連續式反應器醱酵測試	13
五、公斤級連續式反應器醱酵測試 (參數調整部分).....	14
(一) pH 值影響	14
(二) 水力滯留時間(Hydraulic Retention Times, HRT)	14
(三) 碳/氮比例 (Carbon/Nitrogen, C/N ratio).....	15
參、主要發現與結論	16

一、料源基本性質分析	16
二、高含氮廚餘沼液與解聚纖維原料共發酵批次產氣試驗	16
三、pH 值調整批次產氣試驗	18
七、公斤級連續式反應器產氣試驗	19
伍、參考文獻	25

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。台灣為農業大國，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，因此相當適合進一步作為生質能源使用。

本研究探討纖維廢棄物酸解聚處理後於連續式厭氧消化生產沼氣系統最佳化，利用高含氮之沼液當作調整材以調整碳氮比評估沼氣生產效率。廚餘沼液的化學需氧量為 44800 mg/L、總固體含量及揮發性固體分別為 43%、25%，碳氮比為 7.5。批次搖瓶實驗結果顯示，解聚稻稈與廚餘沼液共醱酵最佳條件為 S/I=1、C/N=20、pH=7，平均每克乾重可產生 476 毫升沼氣。

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、碳氮比，達到最佳沼氣生產量。公斤級連續式反應器實驗結果顯示，水力滯留時間 25 天、碳氮比 20 為產沼氣最佳條件，每克 COD 及乾重產氣量達 333 毫升、880 毫升沼氣。

英文摘要

According to the statistics of the Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs more than 97% of Taiwan's energy needs must rely on imports. Therefore, energy development will become an important issue for Taiwan's economic development. Taiwan produces about 2.46 million metric tons of agricultural waste per year.

This study explores the optimization of biogas production in continuous anaerobic digestion after acid depolymerization of fiber waste, and high-nitrogen biogas slurry is used a material to adjust the carbon/nitrogen ratio. The chemical oxygen demand (COD) of the kitchen waste biogas slurry was 44800 mg/L, the total solid content (TS) was 43% and the volatile solids (VS) was 25%. The C/N ratio of the high-nitrogen biogas slurry was 7.5. High nitrogen-containing kitchen waste biogas slurry and depolymerized fiber raw materials batch flask experiments show that the optimal conditions are the substrate/inoculum ratio (S/I ratio) of 1 and C/N ratio 20, pH=7, which produced 476 mL-biogas/g TS.

In this study, the biogas potential of depolymerized fiber materials mixed with wastewater of pig farms in different parameters (hydraulic retention time and organic load rate) of CSTR anaerobic digestion is

further analyzed. The best experimental parameters are the hydraulic retention time of 25 days and the carbon-nitrogen ratio of 20 are the best conditions for biogas production, which produced 333 mL-biogas/g COD and 795 mL-biogas/g TS.

壹、計畫緣起與目的

近年因經濟發展對於能源需求與日俱增，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，例如二氧化碳使全球溫室效應加劇、溫度升高、氣候異常。人類在追求產能增量過程中也漸漸重視環境維護，並發展相關技術使資源可再利用。

厭氧消化產氣之沼氣組成成分，主要由甲烷、二氧化碳及微量硫化氫組成。其中硫化氫除了引起臭味外，最主要是若直接燃燒沼氣時，硫化氫會腐蝕設備。所以需要另外的除硫設備，根據濃度高低不同，其適合的設備也會不同。

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。根據行政院農委會統計，台灣每年平均約產生 246 萬噸的農業廢棄物，其中最大宗的為稻稈，約為 195 萬噸，此外還有蔗渣、廢棄菇包、木屑等，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，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]。

厭氧消化產沼氣技術快速成長下，伴隨大量副產物沼液沼渣的生成，促使近年來沼液沼渣去化再利用之研究興起。環保署力推沼液沼渣還田方式以減少排放，因其具有高氮含量、高磷鉀、高化學

需氧量 (COD)等特性 [5, 6]，適合將其作為有機氮肥以供農業使用，以節省肥料開支。惟現今臺灣法規規定，若要使用做為肥料澆灌農業土地須先向農業主管機關審查同意，且目前每日沼液產量大於可澆灌的農地數量，多餘的沼液仍會經過三段式廢水處理法淨化後排放，無法造成產值。另外衍生出沼液沼渣運輸儲存成本、去毒化複雜處理度及高成本、溫室氣體逸散、肥料成分不穩定、重金屬、病原菌等環境影響也增加了應用上的難度 [5-9]。

本研究採取以高含碳聚纖維稻稈為料源，並添加廚餘(或豬糞)厭氧消化系統出流之高含氮沼液以供發酵做進一步產沼氣，運用於公斤級連續式反應器 CSTR 進行生質沼氣研究，並評估纖維稻稈與沼液共發酵之最佳產氣條件。

在先前試驗中，我們將高含氮沼液與核能所水熱法前處理稻稈混合，用其各自的特性來調整不同的參數以進行共發酵產沼氣實驗：如稻稈 C/N 比例為 37.6，沼液為 7.5，兩者混合由稻稈提供碳源、沼液提供氮源以調整 C/N 比例為厭氧發酵最適當的 20-30 之間進行產沼氣 [10]。水解稻稈 pH 值偏酸，沼液因厭氧消化過程中脂肪酸的降解偏鹼性 [11]，兩者混合能調整 pH 值為中性可以提供適合產甲烷菌作用的環境 [12, 13]。實驗結果顯示，共發酵產氣效率比單獨使用稻稈或沼液進行厭氧發酵為佳，甲烷含量也有所提升，因此沼液用於與纖維固體稻稈厭氧共發酵具有相當潛力。

計畫目的

此本研究以高含氮沼液與台灣常見的纖維原料作為主要研究目標，使用核能所化學組開發之酸催化水熱法前處理稻稈混摻高氮含量沼液，調整影響厭氧消化產氣參數，進行共醱酵產氣潛能評估，同時使用公斤級連續式厭氧消化反應器進行稻稈解聚物之最佳厭氧參數調整，找尋稻稈之最佳醱酵條件。

研究內容包括

1. 高含氮沼液混摻解聚物 (前處理渣料)厭氧消化產沼氣實驗室級瓶杯測試與潛能評估。
2. 公斤級解聚物厭氧消化連續式進料操作生產沼氣之操作參數最佳化。

貳、研究方法與過程

一、料源基本性質分析

厭氧消化的料源特性，將影響產氣效率，分析料源性質才能調整厭氧消化系統參數以達到最產氣之條件。本實驗分析高含氮沼液的基本性質，分析項目包含：

(一) 總固體組成及揮發性固體組成

總固體含量 (Total Solid, TS)指樣品在 105°C高溫下烘乾至恆定重量後所殘留的重量，其餘在 105°C被移除之水與揮發性物質則統稱為水分，過高的 TS 可能導致反應器內無法均質，影響沼氣生產量，必須選擇適當的反應器類型來進行厭氧發酵。揮發性固體含量 (Volatile Solid, VS)指樣品在 550°C高溫下灰化至恆定重量後化為氣體逸散的重量部分，可揮發性固體為有機物質，其餘在 550°C處理後留下之物質稱為灰份 (Ash)，大多為無機化合物。揮發性固體含量常在文獻中用以評估厭氧消化反應物中有機物含量，本研究將以揮發性固體含量做為污泥中微生物量多寡指標、實驗參數設計以及產氣效率評估。

總固體含量與揮發性固體含量分析實驗採用 American Public Health Association (APHA)、The American Water Works Association (AWWA) 及 The Water Environment Federation (WEF)聯合出版之 Standard Methods，提供之方法進行分析，

方法與步驟如下所述：

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。並取

適量已知體積樣品至坩鍋中秤重並記錄重量 B。將重量 B

扣除重量 A 再除以體積，即可得單位體積所含濕重。

(2)將坩鍋置於 105°C烘箱中烘乾至恆定重量，秤重重量 C。

(3)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)將上述已經測試過總固體含量之樣品放入 550°C超高溫

爐中進行灰化。灰化 4 小時後取出，置於耐熱板上等待

冷卻，秤重並記錄重量 D。

(2)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濕重中所佔比例。

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)

化學需氧量指將樣品當中所有有機物質氧化時，所消耗的

氧總量，相較於生物需氧量 (Biological oxygen demand, BOD)

以微生物測定有機物氧化的氧總量，化學需氧量是由強氧化劑

進行氧化反應，可將生物亦無法分解之有機物氧化，得知廢水中全部有機物之含量，由於化學需氧量測試方法較生物法簡易且穩定，故常見以化學需氧量來表示樣品中有機物濃度或廢水汙染程度，本研究使用化學需氧量評估有機質含量，進而估算有機物移除率及甲烷理論產量。化學需氧量亦使用 Standard Methods 方法進行分析。

1.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 2 ml 樣品於強氧化試劑管 ($K_2Cr_2O_7$)中並搖勻。

並取 2 ml 二次水於強氧化試劑管，作為空白校正組。

(3)將試劑管置於 150°C加熱板上，加熱 2 小時。將加熱 2 小時後試劑管上下晃動搖勻，靜置試管架冷卻 1 小時。

(4)以校正組將進行歸零動作。藉由 DR/890 colorimeter 以比色法測定出樣品 COD 濃度 (unit：mgCOD/L)。

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

有機物中所含之碳與氮元素為微生物生長所必需的元素，其中碳與氮的比例會影響微生物的生長情形。如碳氮比例過高，產甲烷菌將迅速將氮源消耗殆盡，而剩餘碳源將無法再被產甲烷菌所利用，使得產沼氣量下降；若碳氮比過低，微生物會將多餘氮源轉為氨的形式累積，使得系統酸鹼值升高，且氨濃度

過高也將對微生物造成抑制。

進行有機物之元素分析需仰賴貴重儀器，本研究委託台灣大學理學院貴重儀器中心進行元素分析，操作機型為德國 elementar vario EL cube (for NCSH) 元素分析儀。其原理為將樣本加熱至 1150°C-1800°C 高溫下完全燃燒，再利用銅進行還原處理，生成 N_2 、 CO_2 、 H_2O 混合物後經過特殊分離管分離，再利用熱傳導偵測器 (TCD) 分別測定其含量，最後經計算可得碳、氫、氮及硫之重量百分比、碳氮重量比例 (C/N)。

(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。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 μL 稀釋樣品到氨氮預製檢測試劑。

(3)加入 Ammonia Salicylate Reagent Powder 以及加入 Ammonia Cyanurate Reagent Powder 混合均勻。

(4)置於室溫反應 20 分鐘。

(5)比色計以校正組歸零後測定樣品 $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度。

(五) 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，二氧化碳與硫化氫的濃度則是利用檢知管 Tube No.126UH and Tube No.120SF (Kitagawa America, United States)進行檢測。

二、批次式搖瓶試驗

為找尋解聚纖維料和高含氮沼液與厭氧微生物汙泥共發酵厭氧產氣反應之最佳條件，以達到最佳產氣效率，於不同 S/I ratio、C/N ratio、pH 值條件下進行厭氧產氣。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（解聚纖維料與微生物汙泥）一次性地投入厭氧反應器，等待其反應完全後，再一次性地排放料並分析生成物以及剩餘反應物之性質。找尋最佳反應條件時，解聚纖維料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 ratio 表示法為 $\text{COD}_{\text{substrate}} / \text{VS}_{\text{inoculum}}$ ，而產氣效率評估標準則以生化沼氣潛能(Biogas potential)為準。

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，並秤量出實驗所需之固體解聚纖維料重量與沼液重量並加入血清瓶中。

(2)以氮氣充填血清瓶 5 分鐘，並以虹吸管快速地將汙泥加入血清瓶中並立刻封蓋。

(3)將採氣袋接上瓶蓋上方矽膠管並將反應瓶置入已預熱至 35°C 之水浴槽。

三、批次式搖瓶試驗 (參數調整部分)

(一) pH 值影響

本 pH 值調整實驗以氫氧化鈉及鹽酸來做調整，將以計算好 COD 量的原料以 2M 氫氧化鈉水溶液 ($\text{NaOH}_{(\text{aq})}$) 或 15% 鹽酸水溶液 ($\text{HCl}_{(\text{aq})}$) 來調整料源 pH 值，實驗將測試 pH=6、7、8 及 Control 組別的產沼氣量多寡，並找出最適合料源進行厭氧消化反應的 pH 值。

(二) 食殖比 (Substrate/Inoculum ratio, S/I ratio)

本研究參照文獻以揮發性固體含量表示活性污泥中厭氧微生物總量，並以化學需氧量作為料源進料量調整指標，每組分別加入不同重量的纖維原料，使反應在不同 S/I ratio ($\text{gCOD}_{\text{substrate}} / \text{gVS}_{\text{inoculum}}$) 條件下進行。此實驗以 1 L 凹底錐形瓶為容器，實際反應體積為 800 mL，初始菌量設定為 15 gVS/L，實驗步驟依序為進料、補水、接菌，在接菌前後皆通入氮氣以維持厭氧環境，完成後將錐形瓶置於水浴槽內保持 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。

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

文獻指出，在厭氧發酵的過程當中，碳源跟氮源的比例將會影響沼氣生產效率，而纖維料的碳的含量較高，因此會影響沼氣產氣效率，而沼液是一種氮源含量非常豐富之源料，因此本實驗利用沼液來調整纖維料碳氮比值，以纖維料源 COD 量與沼液進行碳氮比的調整，調整碳氮比皆以重量當單位來計算。實驗將測定碳氮比為 10、20、30 條件下對沼氣產量的影響並找出最適合的碳氮比例。

四、公斤級連續式反應器發酵測試

為模擬噸級反應器每日進料與排出沼液下連續操作，使用

Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)的反應器，進行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。反應器工作體積為 40 公升，活性汙泥濃度為 15 gVS/L，攪拌速率維持於 50 rpm，溫度以外循環恆溫水維持於 35°C，每日進料結束待至 pH 檢測器讀值穩定後，打入少量 NaOH 維持反應系統 pH 值約 7。實驗進行中將調整控制參數如進料 C/N、HRT、系統 pH 值，並根據每日產氣表現，評估公斤級 CSTR 中溫厭氧醱酵產沼氣之最適進料組成比例與反應系統控制參數。

五、公斤級連續式反應器醱酵測試 (參數調整部分)

(一) pH 值影響

pH 值調整實驗以氫氧化鈉及鹽酸來做調整，以計算好 COD 量的原料以 2M 氫氧化鈉水溶液 ($\text{NaOH}_{(\text{aq})}$)或 15%鹽酸水溶液 ($\text{HCl}_{(\text{aq})}$)來調整料源 pH 值，實驗測試槽內 pH 控制在 7、7.5 兩組條件之產沼氣量多寡，並找出最適合料源進行厭氧消化反應的 pH 值。

(二) 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。本實驗將測試 HRT 為 15、20、25 日，找出最短 HRT 使連續操作可以穩定並得到此系統最有效率產氣表現。

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

文獻指出，在厭氧發酵的過程當中，碳源跟氮源的比例將會影響沼氣生產效率，而纖維料的碳的含量較高，因此會影響沼氣產氣效率，而沼液是一種氮源含量非常豐富之源料，因此本實驗利用沼液來調整纖維料碳氮比值，以纖維料源 COD 量與沼液進行碳氮比的調整，調整碳氮比皆以重量當單位來計算。實驗控制每日進料之碳氮比為 15、20、25 三組條件，並配合 pH 值與 HRT 參數調整找出最佳產氣條件。

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 (RWH12)與沼液進行分析，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，分析結果顯示於表一，沼液分析結果如表二。

表一、料源固體含量、化學需氧量、碳氮比分析結果

料源	TS % (g/g-wet)	VS % (g/g-dry)	COD mg /g (Dry substrate)	C/N	C ratio (%)	N ratio (%)
RWH12	19.5	91.7	1400	37.8	44.56	1.18

表二、沼液及廢水固體含量、化學需氧量、氨氮濃度、碳氮比分析結果

沼液	TS (g/L)	VS (g/L)	COD (mg/L)	NH3-N (mg/L)	C/N	C ratio (%)	N ratio (%)
廚餘	43	25	44800	1200	7.5	31.65	4.22
廢水	17	10.5	11500		14.14	26.59	1.88

二、高含氮廚餘沼液與解聚纖維原料共發酵批次產氣試驗

測試在不同 S/I 比以及不同 C/N 比下的產氣效率，以找出產沼氣最佳條件，各條件下之進料配方顯示於表三，實驗結果顯示於表四。實驗結果為 S/I=1、C/N=20 條件下產氣效果最佳，平均每克乾重可產生 339 毫升的沼氣，為同 C/N 下 S/I=2 的 1.36

倍，S/I=3 的 2.08 倍。此實驗結果表明無論 S/I 為何，C/N=20 的條件下產氣效果普遍最好，說明此種條件下碳源及氮源最適合微生物作用。

表三、搖瓶試驗進料配方

S/I	C/N	沼液 (ml)	稻稈 (g)	汙泥 (ml)
1	10	152	10.6	300
	20	49	27.4	300
	30	14	33.2	300
2	10	303	21.3	300
	20	99	54.8	300
	30	29	66.3	300
3	10	455	31.9	300
	20	148	82.3	300
	30	43	99.5	300

表四、沼液與解聚纖維原料共發酵產氣試驗

S/I	C/N	總產氣量 ml	料源 濕重 g	每克乾重 產氣量 mL/gTS	每克 COD 產氣量 mL/gCOD	CH ₄ %	CO ₂ %	H ₂ S ppm	實驗後 pH
1	10	77±133	10.6	9±15	8±14	13	0.9	ND	7.04
	20	2540±99	27.4	339±13	262±10	43	16	20	6.88
	30	1595±35	33.2	225±5	164±4	39	10	240	6.75
2	10	520±901	21.3	30±52	27±46	44	7	133	7.16
	20	3700±14	54.8	248±1	191±0.7	40	26	700	6.97
	30	310±155	66.3	22±11	16±8	22	5	10	6.14
3	10	3160±1061	31.9	123±41	109±36	41	19	140	7.28

	20	3660±749	82.3	163±34	126±26	37	27	1230	6.90
	30	405±49	99.5	19±2	14±2	69	17	10	4.92

三、pH 值調整批次產氣試驗

根據前次實驗結果，取產氣效果最佳的兩組條件 (S/I=1&2，C/N=20)進行本次實驗，各組搖瓶依照進料配方(表五)加入料源後將 pH 值分別調至 6、7、8，測試產氣效率，實驗結果顯示於表六。實驗結果以 S/I=1、pH=7 條件下產氣最佳，平均每克乾重可產生 476 毫升沼氣，為同樣 pH 值下 S/I=2 的 1.2 倍。實驗結果以 pH=7 產氣最佳，且產氣相較上次實驗皆明顯提升，說明微生物最佳作用環境為 pH=7。

綜合實驗結果顯示，廚餘沼液與解聚纖維原料共醱酵具有生產沼氣潛能，未來可應用於大型廚餘厭氧醱酵廠之沼液。

表五、搖瓶試驗進料配方

S/I	pH	沼液 (ml)	稻稈 (g)	汙泥 (ml)
1	6	49	27.4	300
	7	49	27.4	300
	8	49	27.4	300
2	6	99	54.8	300
	7	99	54.8	300
	8	99	54.8	300

表六、pH 調整批次產氣試驗

SI	pH	總產氣量 ml	料源 濕重 g	每克乾重 產氣量 mL/gTS	每克 COD 產氣量 mL/gCOD	CH ₄ %	CO ₂ %	H ₂ S ppm	實驗 後 pH
1	6	220±85	27.4	30±12	12±7	ND	ND	ND	7.09
	7	3520±255	27.4	476±34	367±27	42	17	1100	7.16
	8	3465±191	27.4	468±26	361±20	43	19	1100	7.19
2	6	5125±49	54.8	346±3	267±3	28	34	2100	7.09
	7	5785±290	54.8	391±20	301±15	35	28	1600	7.18
	8	5180±1358	54.8	350±92	270±71	32	31	4200	7.25

七、公斤級連續式反應器產氣試驗

為研究不同水力滯留時間 (HRT)與碳氮比之最佳產沼氣條件，調整每日進料之解聚稻稈與養豬廢水混合比例進行實驗。實驗體積為 40 公升，反應器初始汙泥濃度設定為 15 gVS/L，需加入活性汙泥 600g VS，測得活性汙泥 VS 後計算並加入所需之活性汙泥量，並補水至 20 公升。初始進料條件設為 S/I=1，需加入 600g COD。為了避免一次性加入過多料源對微生物造成負擔，將分為 10 天進料(但由於廢水性質限制，每次進料最多只能為 20g COD、碳氮比為 15、20 (兩台反應器)以完成微生物馴養，並在完成後開始調整參數進行實驗，每日進料配方顯示於表七。

微生物馴養完成後，進行調整碳氮比與 HRT 之實驗。實驗條件為 HRT=20 天，固定進出料體積 2 公升、與 HRT=25 天，固定進出料體積 1.6 公升。每組 HRT 分別將料源碳氮比調整至

15、20、25 進行實驗，每日 COD 控制加入 20 g，pH 值控制為 7.3，實驗結果如圖一~圖六。

HRT=20 之情況下，平均每日每克 COD 產氣量，C/N=15 為 247 毫升、C/N=20 為 210 毫升、C/N=25 為 161 毫升；平均每日每克稻稈乾重產氣量，C/N=15 為 3002 毫升、C/N=20 為 580 毫升、C/N=25 為 413 毫升。HRT=25 之情況下，平均每日每克 COD 產氣量，C/N=15 為 376 毫升、C/N=20 為 333 毫升、C/N=25 為 130 毫升；平均每日每克稻稈乾重產氣量，C/N=15 為 2632 毫升、C/N=20 為 880 毫升、C/N=25 為 335 毫升。

不同碳氮比之實驗結果，無論是每克 COD 或是每克乾重產氣量，C/N=15 表現皆為最佳，C/N=20 次之。但由於 C/N=15 原料幾乎為廢水，加入之稻稈量甚微，導致每克稻稈乾重產氣量異常高，同時其單位體積只能處理些許稻稈，對於稻稈處理效率不佳。而產氣表現相近的 C/N=20，所需廢水體積為 C/N=15 的 50%，可處理稻稈量為 C/N=15 的 4.65 倍，每克 COD 產氣表現只比 C/N=15 低 12~15%。

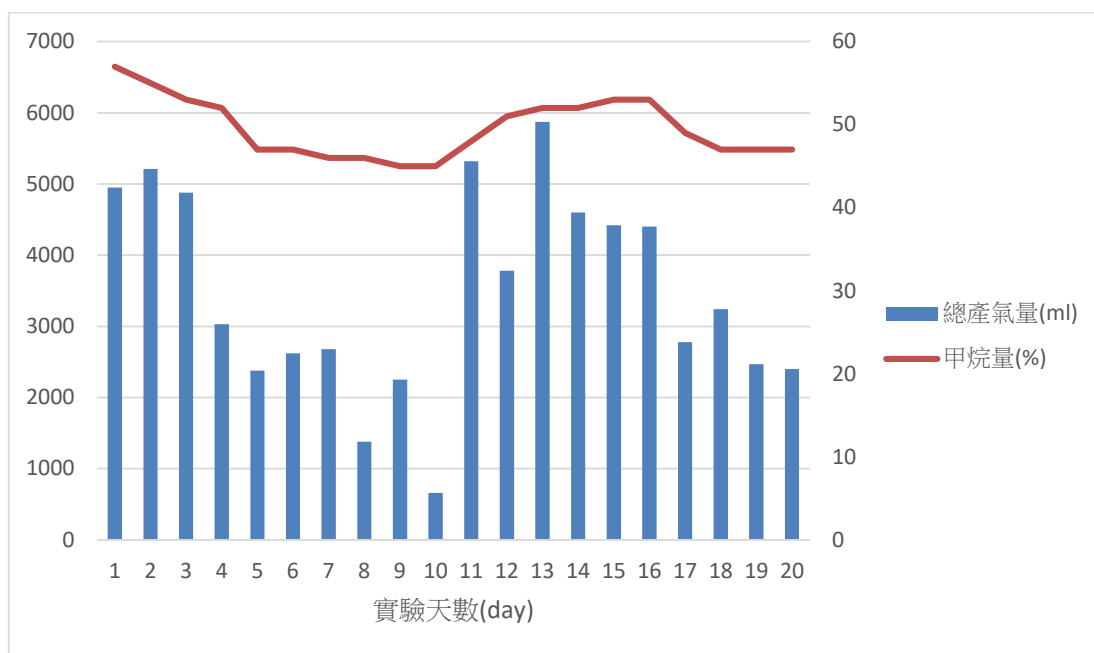
不同 HRT 之實驗結果，以 25 天產氣量為最佳，除 C/N=25 外，其餘條件每克 COD 產氣量皆增加為 1.5 倍，而每克乾重產氣量 C/N=20 提升為 1.5 倍，其餘皆降低。

綜合實驗結果，可得出結合稻稈處理及產氣綜合表現最佳之碳氮比為 20，並且該條件下最佳產氣 HRT 為 25 天。

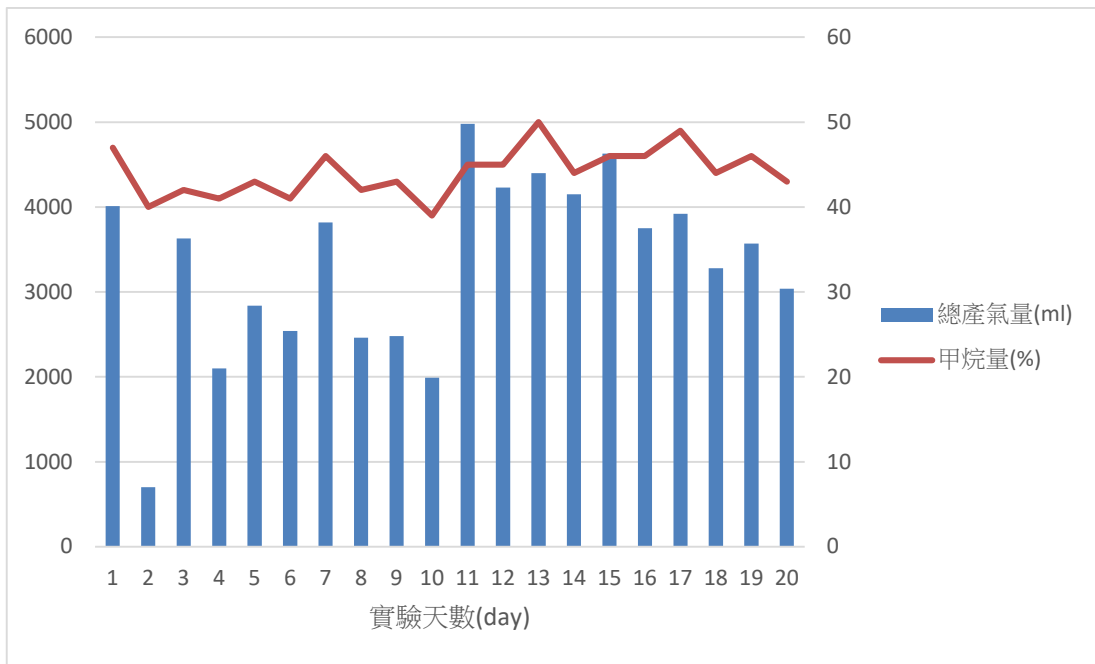
表七、連續式反應器每日進料配方

編號	C/N	HRT	廢水 (ml)	稻稈 (g-wet)	補水後體積 (ml)
1	15	20	1547	8.1	2000
2		25	1547	8.1	1600
3	20	20	845	37.7	2000
4		25	845	37.7	1600
5	25	20	465	53.7	2000
6		25	465	53.7	1600

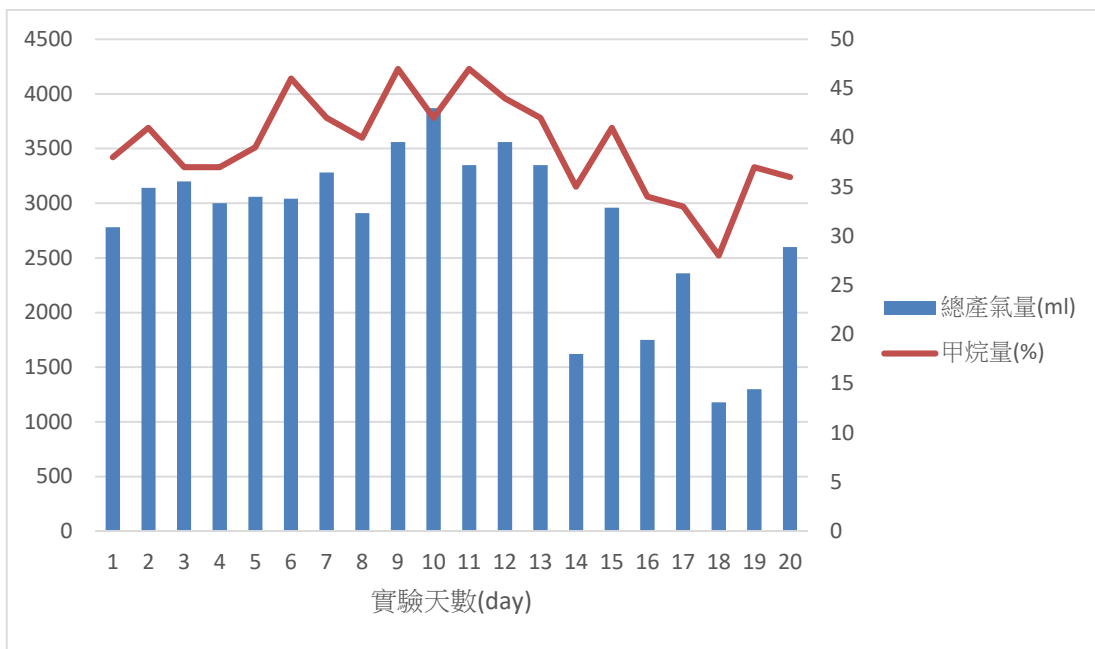
註：廢水每次從彰化養豬場取得之 COD 不為定值，實際會依據該批廢水 COD 調整進料配方，使得每次進料都能為 20g COD



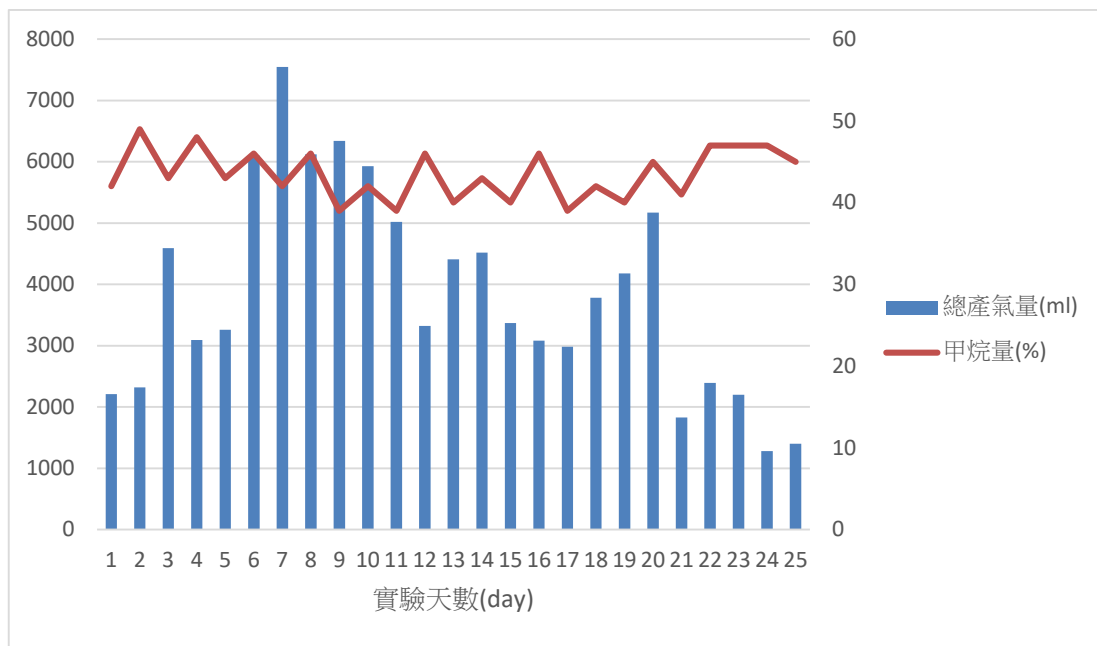
圖一、養豬廢水混纖維料於公斤級連續式系統連續進料產氣試驗-1



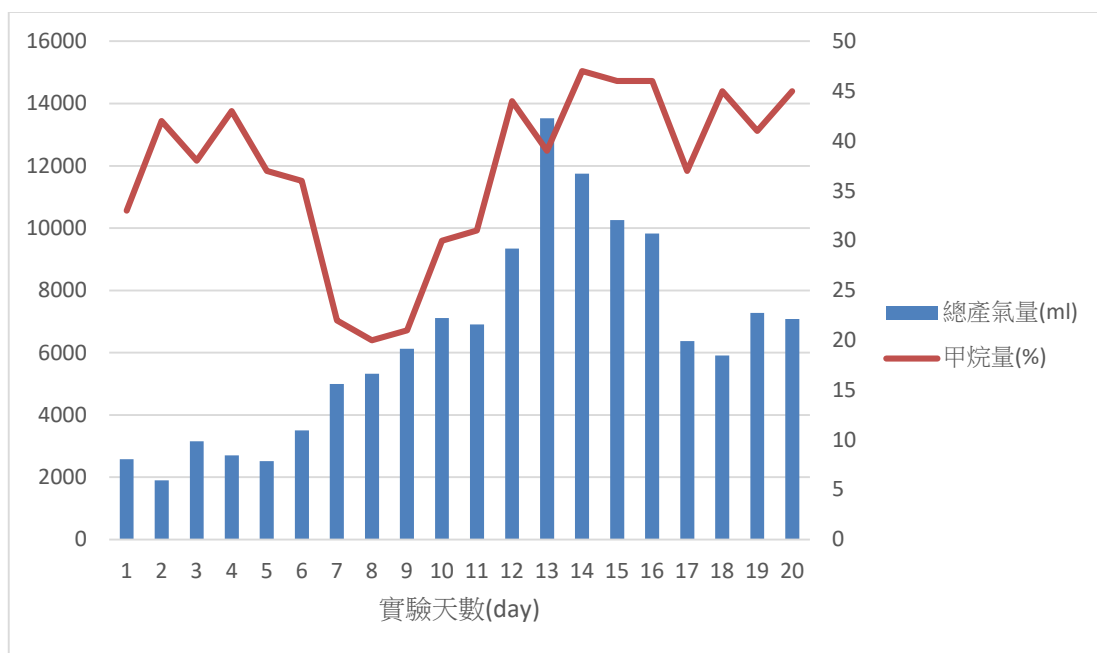
圖二、養豬廢水混纖維料於公斤級連續式系統連續進料產氣試驗-2



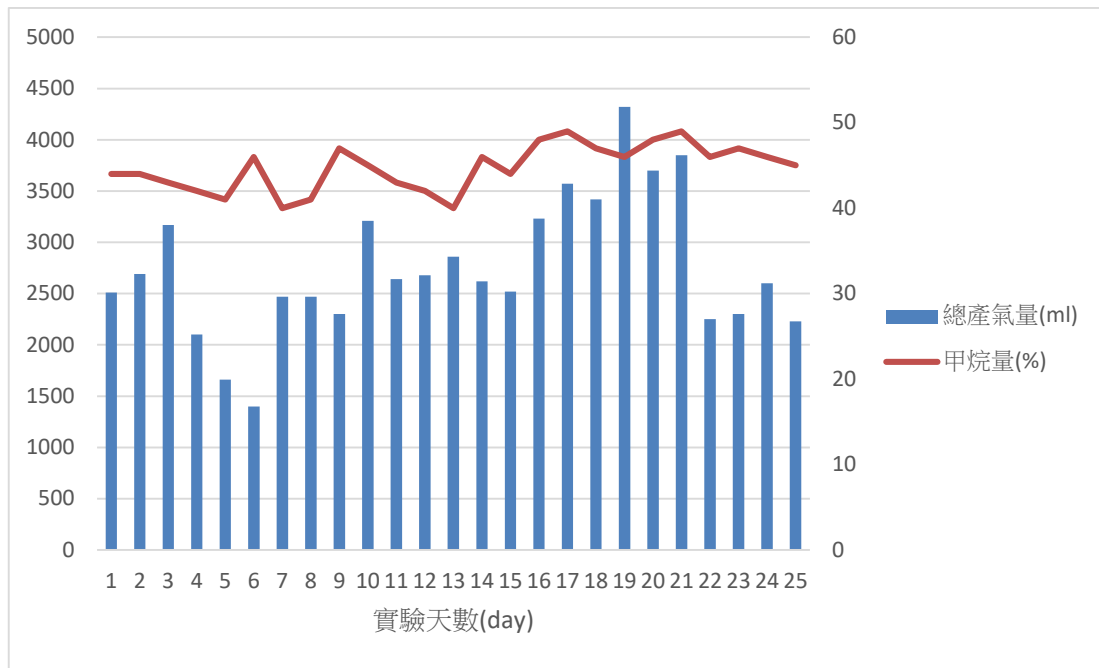
圖三、養豬廢水混纖維料於公斤級連續式系統連續進料產氣試驗-3



圖四、養豬廢水混纖維料於公斤級連續式系統連續進料產氣試驗-4



圖五、養豬廢水混纖維料於公斤級連續式系統連續進料產氣試驗-5



圖六、養豬廢水混纖維料於公斤級連續式系統連續進料產氣試驗-6

伍、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. Kurt Möller, Torsten Müller. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Eng. Life Sci.* 3: 242–257.
6. Marianna Makádi, Attila Tomócsik and Viktória Orosz. 2012. Digestate: A New Nutrient Source – Review. *Biogas*. 14: 295-310.
7. Alburquerque, J.A., Fuente, C.D., Ferrer-Costa, A., Carrasco, L.P., Cegarra, J., Abad, M., & Bernal, M.P. 2012. Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *BIOMASS & BIOENERGY* 40:181-189.
8. Monlau, F., Sambusiti, C., Ficara, E., Aboulkas, A., Barakat, A., Carrere, H. 2015. New opportunities for agricultural digestate valorization: current situation and perspectives. *ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE*. 8(9): 2600-2621..
9. 張應鵬,陳廣銀,黑昆倫,楊一帆,許彩雲,常志州. 2017. 沼液全量連續回流 對稻稈厭氧發酵特性的影響. *Journal of ecology and rural environment*. 33(9): 845-851.
10. 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.
11. Alastair J. Ward, Phil J. Hobbs, Peter J. Holliman , David L. Jones. 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. BIORESOURCE TECHNOLOGY. 99(17): 7928-7940.
 12. Christy E. Manyi-Loh, Sampson N. Mamphweli, Edson L. Meyer, Anthony I. Okoh, Golden Makaka, Michael Simon. 2013. Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal waste in pollution control and the generation of renewable. International Journal of Environmental Research and Public Health. 10: 4390-4417.
 13. T. Abbasi et al., Biogas Energy. 2012. New York: Springer. SpringerBriefs in Environmental Science 2.