

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

複合料源固液分離設計及產氣機制評估

計畫編號：111B013

受委託機關(構)：明志科技大學環境與安全衛生工程系

計畫主持人：吳容銘教授

聯絡電話：02-29089899#4380

E-mail address：jwu@mail.mcut.edu.tw

協同主持人：陳錫金

研究期程：中華民國 111 年 6 月至 111 年 11 月

研究經費：新臺幣 58 萬元

核研所聯絡人員：王蔚

報告日期：111 年 11 月 30 日

目 錄

目 錄	I
中文摘要	1
英文摘要	2
壹、計畫緣起與目的	3
貳、研究方法與過程	6
一、研究架構	6
二、實驗方法	11
(一) 料源水熱前處理	11
(二) 前處理產物固液分離-離心固液分離	20
(三) 前處理產物固液分離-過濾固液分離	25
(四) 厭氧消化測試	26
三、分析方法	30
(一) 總固體含量(Total solid content, TS)	30
(二) 總揮發固體含量(Total volatile solid content, VS)	30
(三) 化學需氧量(Chemical oxygen demand, COD)	30
(四) 氣體收集與組成分析	31
參、主要發現與結論	35
一、第 I 次基本測試	35
二、鹼前處理測試	36
三、酸前處理測試	39
四、參數優化測試	41
(一) 添加新的污泥鹼處理測試	41
(二) 添加新的污泥酸處理測試	43
(三) 增加質傳攪拌的鹼處理測試	45
(四) 增加質傳攪拌的酸處理測試	47
(五) 各料源固液產物產氣貢獻比例與最適化產氣方案	49

(六) 4 kg 級之固液分離測試.....	50
肆、結論與未來改善進行方向	52
伍、參考文獻	53

中文摘要

近年來科技發展使廢棄物產生量大增，連帶的處理費和運輸費用也增高，因此廢棄物減量化相形重要，常用的減量化方法包括濃縮脫水、厭氧消化等。厭氧消化可降解有機質大約 30-50%，並產生沼氣能源。而若有機質偏低，則厭氧消化的應用受到了一些限制。因此將廢棄物轉化為生質燃料的循環生物經濟是現代社會的永續發展願景，本計畫擬針對稻桿、稻殼、廢菇包以及廚餘等 4 種本土料源進行水熱前處理，建立固液分離技術，分析固體、液體產物經厭氧消化反應後之沼氣產量，藉以作為後續厭氧消化參數之規畫依據，並評估固液分離對整體厭氧消化產氣之影響。

Abstract

The technology advancement in recent years not only significantly increased the waste generation but also elevated the cost of associated treatment and transportation, making waste reduction an important issue. Concentration, dehydration, and anaerobic digestion were viewed as common waste reduction technologies. Anaerobic digestion (AD) could degrade approximately 30–50% organics content and generate biogas, a promising bioenergy. Low concentration of organics in substrate could limit the application of AD process, therefore the concept of circular bio-economy which converts waste into biofuel is the goal for sustainable development of modern society. The project plans perform hydrothermal pretreatment for four types of indigenous feedstocks including rice straw, rice husk, spent mushroom waste, and kitchen waste. The suitable solid-liquid separation (S/L) technology for pretreated biomass was investigated, and the AD batch test for solid/liquid fraction of pretreated biomass was conducted to evaluate the biomethane potential, which was used for optimizing AD parameters and evaluating the S/L effect on biogas production.

壹、計畫緣起與目的

近年來工商業快速發展，海運、航空運輸頻繁，全球能源面臨大量消耗甚至缺乏的危機，替代能源相形之下顯得重要。生質能源是人類持續使用僅次於石油、煤炭和天然氣的能源之一，隨著再生能源和環保需求的不斷增加，厭氧消化(anaerobic digestion)沼氣技術引起了相當大的關注⁽¹⁾。

厭氧消化係為一種將生質物(biomass)轉換為生質能源的一種技術，可將生質物中的有機質轉化為沼氣。沼氣通常含有 40-75% 之甲烷(CH_4)、25-60%之二氧化碳(CO_2)，以及少量雜質如硫化氫(H_2S)、氨氣(NH_3)以及其他氣體，可以替代目前許多地區使用的天然氣⁽²⁾。

厭氧消化係由不同種類之微生物菌群偕同進行反應，其反應機制主要包含水解(hydrolysis)、酸化(acidogenesis)、乙酸化(acetogenesis)、甲烷化(methanogenesis)，其中以水解整體反應之速率為決定步驟⁽³⁾。為有效提升厭氧消化程序之效率，研究上往往利用前處理先行破壞生質物結構藉以提升水解效率，進而改善厭氧消化程序之沼氣產量。

前處理方法主要可分為物理法、化學法、生物法與熱處理法，而水熱法(hydrothermal pretreatment)係為一常見之前處理方式。水熱反應主要係以水為反應媒介，可同步輔以酸、鹼等催化劑提升反應效率。酸催化反應具有低成本之優勢，並可於不溶解木質素之情形下有效水解半纖維素(hemicellulose)，惟反應中易於產生抑制物，且酸液容易造成設備腐蝕⁽⁴⁻⁵⁾。常見使用之酸催化劑包含硫酸(H_2SO_4)、鹽酸(HCl)、硝酸(HNO_3)以及磷酸(H_3PO_4)等。為有效

提升經濟效益，藉由固液分離之方式回收酸液重複再利用，為常見之策略。鹼催化反應則可有效地溶出木質素，具有低能耗、低抑制物產生等優勢，惟過程中會產生大量之黑液(black liquor)，須妥善處理。常見使用之鹼催化劑包含氫氧化鈉(NaOH)、氫氧化鉀(KOH)、氫氧化鈣(Ca(OH)₂)等⁽⁶⁾。

基於水熱反應之操作固液比(w/w%)一般小於 10%，換言之，反應後之產物有超過九成之比例係為液體所組成，如此可觀之液體將稀釋整體產物之揮發性固體(volatile solid, VS)，即厭氧消化反應中可供應微生物產製沼氣之基質來源，致使單位體積厭氧槽所能處理之基質原料大幅減少，進而影響沼氣生產效率。

另一方面如上所述，水熱前處理通常輔以酸、鹼催化劑進行反應，伴隨著大量之酸、鹼液產物生成。上述酸液產物可能含有醋酸(CH₃COOH)、甲酸(HCOOH)等有機酸，或是糠醛(furfural)和 5-羥甲基糠醛(5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF)等抑制物；鹼液產物則可能含有酚類衍生物，上述產物對於厭氧消化之微生物均會造成負面影響，進而降低沼氣產量⁽⁷⁾。

對於上述瓶頸，為有效減少設備成本，提升料源處理效率，藉以改善厭氧消化沼氣生產製程之經濟可行性，可先行利用適宜固液分離技術將固體產物與液體產物進行分離，再行將固體進行厭氧消化生產沼氣，藉以提升沼氣生產效率。如此不僅可減少厭氧槽所需之體積，降低抑制物之影響，也可同時減少進料酸鹼值調控所需之酸、鹼液需求，同時達成節省設備成本、化學藥品量之效益。

有鑒於此，本研究擬針對稻桿、稻殼、廢菇包以及廚餘等 4

種常見之本土料源，經水熱化學前處理程序所衍生產物之特性，評析適宜之固液分離方法，並分析其液體與固體各自之厭氧產氣潛能，藉以評析固液分離技術之必要性，以及固液分離對整體厭氧消化產氣之影響。並依上述測試結果，分析前處理液體產物-水解液與固體產物-前處理固渣之產氣貢獻比例，完成固液分離暨厭氧消化參數優化，藉此完成各生質料源之最適化產氣方案。

貳、研究方法與過程

一、研究架構

本計畫擬先行對稻桿、稻殼、廢菇包以及廚餘等 4 種本土料源進行前處理，再進行固液分離並各自厭氧產氣，以評估整體之產氣結果。試驗進行的步驟如圖 1 所示，料源經基本之粉碎以及水熱前處理之後，經固液分離將水解液體以及料源固體分離出來，然後各自進行厭氧消化產氣試驗以及產氣分析，圖 2 為程序步驟的示意圖。本計畫擬處理的料源預計有稻桿、稻殼、廢菇包以及廚餘等。基於料源之特性有所變異，故此隨著處理料源之不同，固液分離方法也須配合前處理產物之特性進行設計。本研究預計以離心或過濾等方法建立固液分離技術。

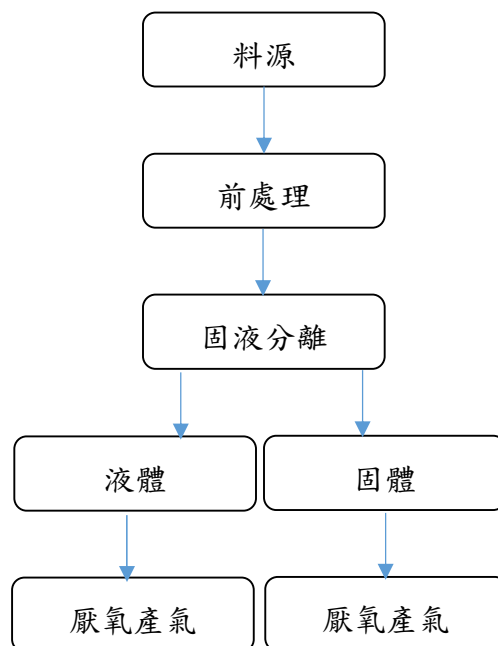


圖 1：計畫預計試驗步驟

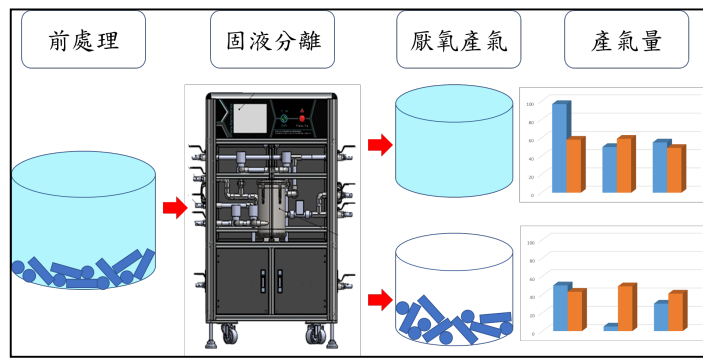


圖 2：試驗步驟示意圖

各類生質料源經前處理後，其固、液體產物之沼氣產氣潛能彙整於表 1。由表 1 可得知前處理固、液產物對於沼氣產量之貢獻因料源種類、前處理方法與操作參數之不同而有所變異，各情境下適宜之產氣方案簡要說明如下：(1)沼氣產量之貢獻主要來自於固體產物：為有效減少厭氧槽體積，藉由固液分離技術先行獲取固體產物，再行厭氧消化係為選擇策略，液體產物可思考重複利用或加值應用之可行性；(2)前處理產物沼氣產量之貢獻主要來自於液體：固液分離之必要性降低，產物可直接進行厭氧消化；(3)前處理固、液體產物具有相比之沼氣產量貢獻：可藉由固液分離技術先行分離固、液產物，並依固體、液體產物之特性設計厭氧槽及調整厭氧消化參數，分別進行厭氧消化，藉以最適化產氣量。

目前由表 1 資料彙整之結果，本研究團隊初步推論於低濃度酸/鹼催化劑與溫和之操作條件下，其前處理產物之沼氣產量主要貢獻係來自於固體產物，故此整合固液分離技術與厭氧消化程序，具有顯卓之必要性。

本計畫擬完成稻桿、稻殼、廢菇包以及廚餘等 4 種生質料

源前處理產物之固液分離技術建立暨厭氧消化產氣測試，了解其水解液與水解固渣產氣貢獻比例，分析其產氣機制，藉以：(1) 評估整合固液分離技術於厭氧消化程序之必要性；(2) 完成固液分離暨厭氧消化參數優化，藉此完成各生質料源之最適化產氣方案。吾人擬另比較前處理固、液體產物與原始固/液混合產物之產氣潛能，分析固、液產物之共發酵是否具有偕同效益。

表 1：生質料源前處理固/液產物厭氧消化產氣彙整

處理原料	前處理方式	固體產物沼氣產量	液體產物沼氣產量	產氣主要來源	參考文獻
污水污泥(sewage sludge)	高壓均質(High pressure homogenization)20-60MPa	~70-100 ml/gVS	~15-70 ml/gVS	固體	(8)
活性污泥(Waste activated sludge)	水熱(hydrothermal)/165°C, 0 min	9.2 ml CH ₄ / gCOD	262.6 mlCH ₄ / gCOD	液體	(9)
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)/121°C , 1h	177.09 CH ₄ L/kg	86.51 CH ₄ L/kg	固體	(10)
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)/80°C , 24h	211.36 CH ₄ L/kg	105.49 CH ₄ L/kg	固體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)/2% H ₂ SO ₄ ,121°C ,1h	203.93 CH ₄ L/kg	80.51 CH ₄ L/kg	固體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)/10% H ₂ SO ₄ ,121°C ,1h	174.74 CH ₄ L/kg	86.07 CH ₄ L/kg	固體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)/20% H ₂ SO ₄ ,121°C ,1h	141.18 CH ₄ L/kg	107.77 CH ₄ L/kg	固體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)/2% H ₃ PO ₄ ,121°C ,1h	211.39 CH ₄ L/kg	83.05 CH ₄ L/kg	固體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)/10% H ₃ PO ₄ ,121°C ,1h	177.62 CH ₄ L/kg	92.31 CH ₄ L/kg	固體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)/20% H ₃ PO ₄ ,121°C ,1h	146.99 CH ₄ L/kg	128.33 CH ₄ L/kg	固體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)/2% HCl,121°C ,1h	222.37 CH ₄ L/kg	65.09 CH ₄ L/kg	固體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)/10% HCl,121°C ,1h	164.72 CH ₄ L/kg	233.38 CH ₄ L/kg	液體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)/20% HCl,121°C ,1h	134.23 CH ₄ L/kg	193.99 CH ₄ L/kg	液體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)2%/NaOH, 80°C , 24h	255.68 CH ₄ L/kg	147.42 CH ₄ L/kg	固體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)10%/NaOH, 80°C , 24h	214.70 CH ₄ L/kg	173.60 CH ₄ L/kg	固體	
草坪(Grass Lawn)	水熱(hydrothermal)20%/NaOH, 80°C , 24h	202.06 CH ₄ L/kg	225.01 CH ₄ L/kg	液體	

表 1：生質料源前處理固/液產物厭氧消化產氣彙整(續)

處理原料	前處理方式	固體產物沼氣產量	液體產物沼氣產量	產氣主要來源	參考文獻
葵花油粕(sunflower oil cake)	25%(w/w) CaO, 4h	130 ml CH ₄ /gCOD	152 ml CH ₄ /gCOD	液體	(11)
葵花油粕(sunflower oil cake)	25%(w/w) NaOH, 4h	54 ml CH ₄ /gCOD	2 ml CH ₄ /gCOD	固體	
葵花油粕(sunflower oil cake)	25%(w/w) H ₂ SO ₄ , 4h	61 ml CH ₄ /gCOD	0 ml CH ₄ /gCOD	固體	
葵花油粕(sunflower oil cake)	25%(w/w) NaHCO ₃ , 4h	88 ml CH ₄ /gCOD	249 ml CH ₄ /gCOD	液體	
葵花油粕(sunflower oil cake)	25%(w/w) CaO, 75°C, 4h	26 ml CH ₄ /gCOD	273 ml CH ₄ /gCOD	液體	
葵花油粕(sunflower oil cake)	25%(w/w) NaOH, 75°C, 4h	84 ml CH ₄ /gCOD	58 ml CH ₄ /gCOD	固體	
葵花油粕(sunflower oil cake)	25%(w/w) H ₂ SO ₄ , 75°C, 4h	74 ml CH ₄ /gCOD	0 ml CH ₄ /gCOD	固體	
葵花油粕(sunflower oil cake)	25%(w/w) NaHCO ₃ , 75°C, 4h	77 ml CH ₄ /gCOD	145 ml CH ₄ /gCOD	液體	
玉米稈(corn stalks)	熱處理(thermal)/110°C, 800s	138.6 ml CH ₄ /gTS	59.7 ml CH ₄ /gTS	固體	(12)
玉米稈(corn stalks)	微波加熱(microwave heating)/710W, 800s	153.2 ml CH ₄ /gTS	64.9 ml CH ₄ /gTS	固體	
玉米稈(corn stalks)	加壓微波加熱(pressurized microwave heating)/300W, 180s	154.1 ml CH ₄ /gTS	63.9 ml CH ₄ /gTS	固體	
芒草(miscanthus)	熱處理(thermal)/110°C, 800s	174.3 ml CH ₄ /gTS	1.2 ml CH ₄ /gTS	固體	(11)
芒草(miscanthus)	微波加熱(microwave heating)/710W, 800s	197.6 ml CH ₄ /gTS	1.4 ml CH ₄ /gTS	固體	
芒草(miscanthus)	加壓微波加熱(pressurized microwave heating)/300W, 180s	202.5 ml CH ₄ /gTS	1.2 ml CH ₄ /gTS	固體	

二、實驗方法

(一) 料源水熱前處理

本研究擬定以稻稈、稻殼、廢菇包、與廚餘(初步先測試香蕉)做為測試料源，進行水熱前處理，反應溫度擬規劃介於 60~100°C，反應時間擬規劃介於 3~6 小時，固液比介於 5~10%。水熱前處理擬規劃分別以酸、鹼催化劑進行反應，反應後立即將產物進行固液分離，避免過度反應。固液分離所得之水解液與固渣存放於 4°C 冰箱供後續使用。

1. 鹼法前處理

在進行氫氧化鈉(NaOH) 前處理之前，需檢測所有原料之含水率，用於添加適合重量的物料進行前處理實驗；4 種原料含水率數據分別為：稻稈(12%)、稻殼(12%)、廢菇包(50%)、香蕉(82%)。鹼處理的濃度為 2 wt%的氫氧化鈉，反應溫度為 100°C，反應時間為 3 小時。

原料準備好之後，將其與鹼液混合後放入烘箱 3 個小時，溫度設定為 100°C，再將其取出進行固液分離，如圖 3、圖 4 所示。



圖 3：取部分香蕉切塊



圖 4：經烘乾後的香蕉

2. 酸法前處理

同樣的方式，在進行硫酸(H_2SO_4)前處理之前，需將所有原料檢測含水率，酸處理的濃度為 2% wt 的硫酸，反應溫度為 100°C ，反應時間為 3 小時。

表 2 為鹼前處理之生質料源固液分離後之結果。表 3 為酸前處理之生質料源固液分離後之結果。而圖 5 為另一組(廚餘)固液不分離的前處理對照組。

表 2：鹼前處理之生質料源固液分離之結果

前處理方法	生質料源種類	生質料源名稱	圖示
鹼處理法 (NaOH)	固體	稻稈	
		稻殼	
		廢菇包	
		廚餘 (香蕉)	

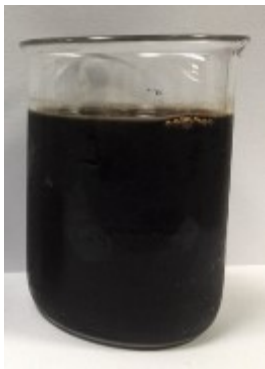
前處理方法	生質料源種類	生質料源名稱	圖示
鹼處理法 (NaOH)	液體	稻稈	
		稻殼	
		廢菇包	
		廚餘 (香蕉)	

表 3：酸前處理之生質料源固液分離之結果

前處理方法	生質料源種類	生質料源名稱	圖示
酸處理法 (H ₂ SO ₄)	固體	稻稈	
		稻殼	
		廢菇包	
		廚餘 (香蕉)	

前處理方法	生質料源種類	生質料源名稱	圖示
酸處理法 (H ₂ SO ₄)	液體	稻稈	
		稻殼	
		廢菇包	
		廚餘 (香蕉)	

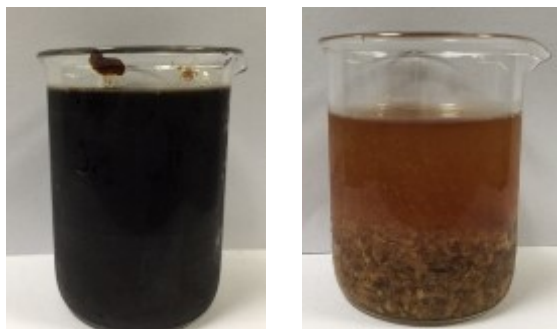


圖 5：固液不分離的前處理照(左：鹼前處理；右：酸前處理)

以稻稈為例，首先將清理過的稻稈取 10 g，放入烘箱烘乾至恆重，恆重後將其取出並秤量，計算放入烘箱前後可得稻稈含水率 12.14%。接著進行酸解前處理作業，首先溶液濃度設為 2%，取約 20.83g $H_2(SO)_4$ 倒入 979.17g 的水中均勻混和，獲得 2% $H_2(SO)_4$ 水溶液。將酸解前處理固液比設定為 7%，預計配得總溶液重 1000 g，則使用下方公式 1 計算得到原料添加量，使用公式 2 計算出溶劑添加量，再將原料添加量與溶劑添加量倒入 1 公升的廣口瓶，可獲得固液比為 7% 的酸解前處理溶液。

$$\frac{\text{固液比} \times \text{總溶液重}}{1 - \text{原料含水率}} = \text{原料添加量} = \frac{7\% \times 1000 \text{ g}}{1 - 12.14\%} = 79.67 \text{ g} \quad (\text{公式 1})$$

$$\text{總溶液重} - \text{原料添加量} \times \text{原料含水率} = \text{溶劑添加量}$$

$$= 1000 \text{ g} - 79.67 \text{ g} \times 12.14\% = 990.33 \text{ g} \quad (\text{公式 2})$$

將配置好的酸解前處理溶液放入烘箱加熱 3 小時，加熱後放置至常溫後進行固液分離作業，步驟如下：

將濾布放入離心機後開機，使用低轉數運轉讓濾布攤平，並倒入物料後蓋上蓋子，將轉數緩慢調整至目標轉數 500 rpm，固液分離完後，取出在濾布裡面的固體物料，即可分別收集固體與液體。

在厭氧實驗前還須將先前離心後的固體與液體，分別測量總揮發固體含量 VS(%)與化學需氧量 COD (mg O₂/L)，才可計算出此次厭氧所需添加的污泥與渣料的量。

總揮發固體含量(Total volatile solid content, VS)之測定係參考美國公共衛生協會 (American Public Health Association, APHA)之標準方法。先將離心後的固體取 10 g 放置坩鍋(W₂)，再放入 105°C 烘箱烘乾至恆重，恆重後將其取出並秤量(W₃)，再放入高溫爐 575°C 燃燒 3 小時(W₄)，其中空坩鍋重為(W₁)。計算總固體含量，計算方式如下：

$$VS(\%)=(W_3-W_4)/(W_3-W_1) \quad (\text{公式 3})$$

本次稻桿 VS 為 17.23%，使用之污泥 VS 為 3.17 %。

化學需氧量採取 Hach Oxygen Demand, Chemical kit (20-1500 mg/ml COD, High Range, Hach Company, Loveland, CO, USA)之方法進行測定，其分析方法係採用重鉻酸鉀 (K₂Cr₂O₇)高溫消解法。分析時取 3 ml 之樣品置入反應瓶中，於 150°C 下進行反應 2 小時。反應完後放置於室溫冷卻，以分光光度計測定吸光值，計算化學需氧量。本次酸前處理稻桿液體 COD 為 18,550 mg O₂/L)，計算出總固體含量 VS(%)

與化學需氧量 COD(mg/L)後，設定厭氧瓶體積 200 ml，所需渣料 VS(%) 5 g 與所需液體 COD(mg/L) 1g，使用下方公式 4、公式 5、公式 6 進行計算，得到污泥添加量(g)、所需厭氧渣料重(g)、發酵浸液體積(ml)，等數值為：酸稻稈固體之污泥添加量為 157.73 g、所需 DI 水量為 42.27 g、渣料重為 29.02 g。計算方式如下：

$$\frac{5 \text{ g}}{\text{污泥 VS}(\%)} = \text{污泥添加量(g)} = \frac{5 \text{ g}}{3.17\%} = 157.73 \text{ g} \quad (\text{公式 4})$$

$$\frac{5 \text{ g}}{\text{渣料 VS}(\%)} = \text{渣料添加量(g)} = \frac{5 \text{ g}}{17.23\%} = 29.02 \text{ g} \quad (\text{公式 5})$$

$$DI \text{ 水量} = 200 - 157.73 = 42.27 \quad (\text{公式 6})$$

而酸稻稈液體的部分，污泥添加量 63.09 g、酸浸液體積 53.91 ml、所需水量 83 g 之計算方式如下：

$$\frac{2 \text{ g}}{\text{污泥 VS}(\%)} = \text{污泥添加量(g)} = \frac{2 \text{ g}}{3.17\%} = 63.09 \text{ g} \quad (\text{公式 7})$$

$$\frac{\text{所需液體 COD(g)}}{\text{液體 COD}(\frac{\text{mg}}{\text{L}})} = \text{發酵浸液體積(ml)} = \frac{1 \text{ g COD}}{18550 \text{ mg/L}} = 53.91 \text{ mL}$$

(公式 8)

$$DI \text{ 水量} = 200 - 63.09 - 53.91 = 83 \quad (\text{公式 9})$$

(二) 前處理產物固液分離-離心固液分離

本研究室具備如下圖 6 之離心機，最大轉速 5000 rpm，最大離心力 1400 G，最大容量 170 mL，大小約為 200 × 260 × 315 mm，重量約 8.5 kg。



圖 6：Kokusan H-112 型遠心離心機

在實驗室進行實驗時，以上述機器可以將前處理後之料源固液分離，液體測量化學需氧量(chemical oxygen demand, COD)，然後接續各自的厭氧產氣。每批次的處理通常可處理 100 mL，符合實驗的需求。

步驟如下：

將濾布(圖 7)放入離心機後開機，使用低轉數運轉讓濾布攤平(圖 8)，並倒入物料後蓋上蓋子(圖 9)，將轉數緩慢調整至目標轉數 500 rpm，圖 10 之黃色水管即為離心液體流出處。固液分離完後，取出在濾布裡面的固體物料，即可分別收集固體與液體。



圖 7：濾布



圖 8：低轉數將濾布攤平



圖 9：將物料倒入濾布



圖 10：啟動離心機



圖 11：將濾布的固體取出



圖 12：獲得固體與液體

未來經過研究評估，有必要進行固液分離，以及離心是適合的固液分離方式(取決於料源的不同)的前提下，本研究室另有容量 2 kg 級的離心分離機如圖 13 所示，若處理固含量 2% 的溶液，則單次最大處理量為 100 公斤($100\text{ kg} \times 2\% = 2\text{ kg}$)，符合大量生產的需求。



圖 13：大批量離心機

離心機原理即管式分離機，內轉鼓(圖 14)高速旋轉產生離心力場，依據物料比重不同在離心力場的作用下，使具有不同比重的液體與固體分離。以底部進料，上部出料，而固相物質殘留於設備轉鼓之內(圖 15)，需停機人工清除(圖 16)。

轉鼓安裝的步驟是將鐵氟龍材質的濾布放入轉鼓內部後，將轉鼓蓋子鎖緊，轉鼓以蓋子朝下的方向，放入離心桶內，再依序將集液盤與離心桶外蓋放上，最後將上方傳動裝置與離心桶外蓋連結處鎖緊，即完成安裝。之後開啟離心機電源，設定至目標赫茲(Hz)數，待離心機加速運轉至該赫茲數時(10000 Hz 約 16800 rpm)，再將樣品均勻混合，倒入水槽內，並開啟抽水馬達將水槽內的水樣抽入離心機，進行固液分離。



圖 14：離心內轉鼓



圖 15：內轉鼓內部以及襯紙



圖 16：內轉鼓內固料

(三) 前處理產物固液分離-過濾固液分離

由於有四種料源，意味著前處理之後產生四種固液混合液，若離心機固液分離效果不佳，另一可行方式乃過濾固液分離，本研究室具備如下圖 17 之過濾機，最大處理量為 1 噸/時。

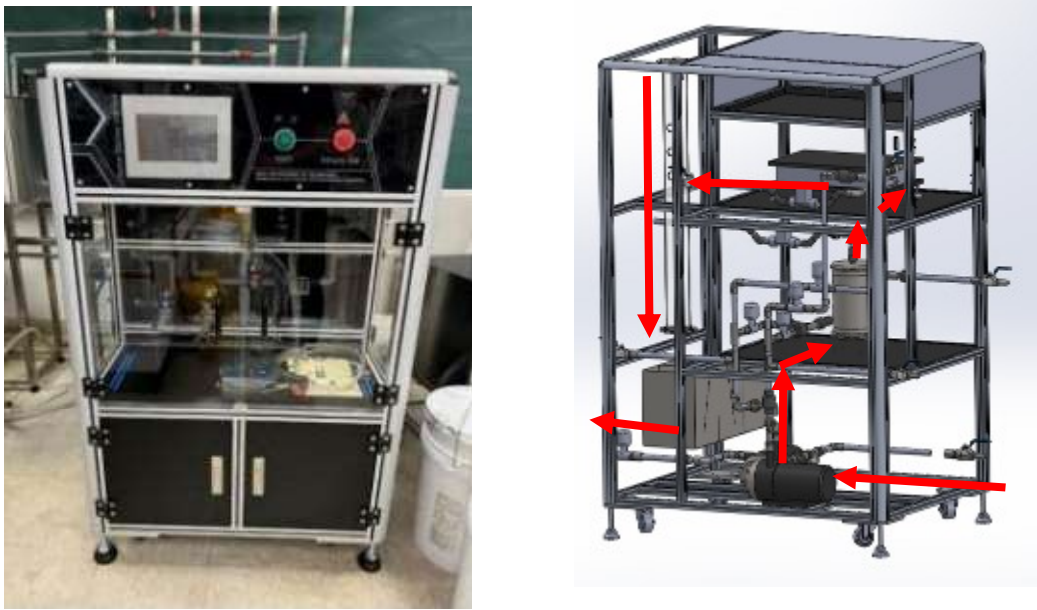


圖 17：過濾機(左：設備外觀；右：作動流程)

(四) 厭氧消化測試

於進行厭氧消化實驗前，首先檢測經離心機固液分離後，固體的總揮發固體含量(VS)與液體的化學需氧量(COD)，藉以計算厭氧消化反應渣料固體與液體產物之添加量，如圖 18-21 所示。固體總揮發固體含量(VS)與液體之化學需氧量(COD)彙整於表 4。

表4：前處理固體、液體產物特性分析

	固體總揮發固體含量(VS)(%)			
	稻稈	稻殼	廢菇包	香蕉
酸處理法 (H ₂ SO ₄)	17.23	30.13	21.50	10.49
鹼處理法 (NaOH)	17.55	27.74	22.07	10.42
	液體化學需氧量(COD) (mg/L)			
	稻稈	稻殼	廢菇包	香蕉
酸處理法 (H ₂ SO ₄)	18850	9575	27000	75500
鹼處理法 (NaOH)	3850	1970	3450	70500



圖 18：烘乾前準備



圖 19：將坩鍋放入高溫爐 575°C、3 小時



圖 20：進入高溫爐後的渣料



圖 21：離心後的液體進行 COD 檢測

本研究之厭氧消化測試係以 250 ml 之血清瓶作為反應器，操作體積設定為 200 ml。反應之基質/微生物污泥比例(S/I ratio)設定為 0.5~1 之間，視產物之總揮發性固體含量(VS)、化學需氧量(chemical oxygen demand, COD)與操作體積進行調整。依上述操作參數混合污泥與水熱前處理產物至反應器後，為營造厭氧環境，反應瓶會先行以氮氣(N_2)進行氣體置換 2 分鐘以上，再將其置入於恆溫水浴槽，於反應溫度 $35^{\circ}C$ 、震盪速率 100 rpm 之條件下進行厭氧消化反應 7~14 天。基於甲烷菌之最適化酸鹼值介於 6~8 之間，料源經水熱前處理後之固、液產物與污泥混和前，會先行以適量硫酸(H_2SO_4)/氫氧化鈉($NaOH$)將酸鹼值調整至 7。本實驗室相關之測試設備示意圖彙整如下。



圖22：厭氧消化試驗之完整裝置圖



圖 23：氮氣鋼瓶

三、分析方法

(一) 總固體含量(Total solid content, TS)

總固體含量之測定係參考美國公共衛生協會(American Public Health Association, APHA)之標準方法。將適量樣品置於坩鍋中並秤重，再將其置入 105°C 烘箱烘乾至恆重，計算總固體含量，計算方式如下：

$$TS(\%) = (W_3 - W_1) / (W_2 - W_1)$$

其中 W_1 表示空坩鍋重； W_2 表示樣品濕重與坩鍋重； W_3 表示經 105°C 乾燥之樣品乾重與坩鍋重。

(二) 總揮發固體含量(Total volatile solid content, VS)

總揮發性固體含量之測定係參考美國公共衛生協會(American Public Health Association, APHA)之標準方法。將前述經總固體含量分析後含有乾燥樣品之坩鍋，置於高溫爐中，於 575°C 下灰化 3 小時，計算總固體含量，計算方式如下：

$$VS(\%) = (W_3 - W_4) / (W_3 - W_1)$$

其中 W_1 表示空坩鍋重； W_3 表示經 105°C 乾燥之樣品乾重與坩鍋重； W_4 表示經 575°C 灰化後之樣品剩餘固體重與坩鍋重。

(三) 化學需氧量(chemical oxygen demand, COD)

化學需氧量採取 Hach Oxygen Demand, Chemical kit (20-1500 mg/ml COD, High Range, Hach Company, Loveland, CO, USA) 之方法進行測定，其分析方法係採用重鉻酸鉀 ($K_2Cr_2O_7$) 高溫消解法。分析時取 2 ml 之樣品置入反應瓶中，

於 150°C 下進行反應 2 小時。反應完後放置於室溫冷卻，以分光光度計測定吸光值，計算化學需氧量。

(四) 氣體收集與組成分析

各厭氧消化實驗組生產之沼氣以氣體採樣袋進行收集，其容積為 1 L。氣體產量以乾式氣體流量計(DC-1C,SINAGAWA)分析沼氣產量，指針回轉 1 圈之體積為 1L，最小刻度為 5 ml。相關設備與耗材如下圖所示。



圖 24：集氣體所使用之氣體採集袋



圖 25：式氣體流量計(DC-1C)

氣體採樣袋之氣體以氣相層析儀(Perkin Elmer, AutoSystem XL)(圖 26)進行甲烷、二氧化碳之分析，單次樣品注射體積為 1000 μ l。於氣體分析後，實驗使用氣體採集袋之清潔，會使用空壓機(圖 27)氣體排出，有利氣體採集袋之重複使用，也能降低氣體殘留造成實驗結果誤差及干擾。於分析前先行以標準氣體(35%CO₂, 25%CO, 10% CH₄, 30%H₂)建立檢量線。甲烷檢量線之數據及圖如表 5、圖 28。二氧化碳檢量線之數據及圖如表 6、圖 29。

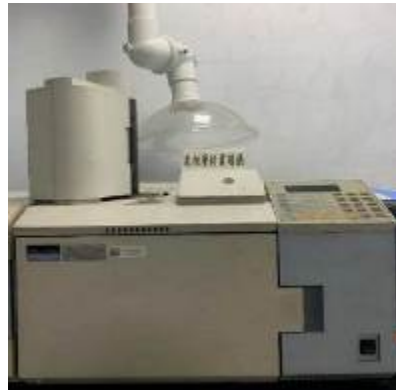


圖 26：氣相層析儀(Perkin Elmer, AutoSystem XL)



圖27：空壓機之實體圖

表5：甲烷之檢量線數據

標準品量 (uL)	含量 (%)	含量 (μL)	面積 (μL)
0	0	0	0
200	10%	20.00	21127.08
400	10%	40.00	46865.31
600	10%	60.00	69395.18
800	10%	80.00	92232.29
1000	10%	100.00	116462.41

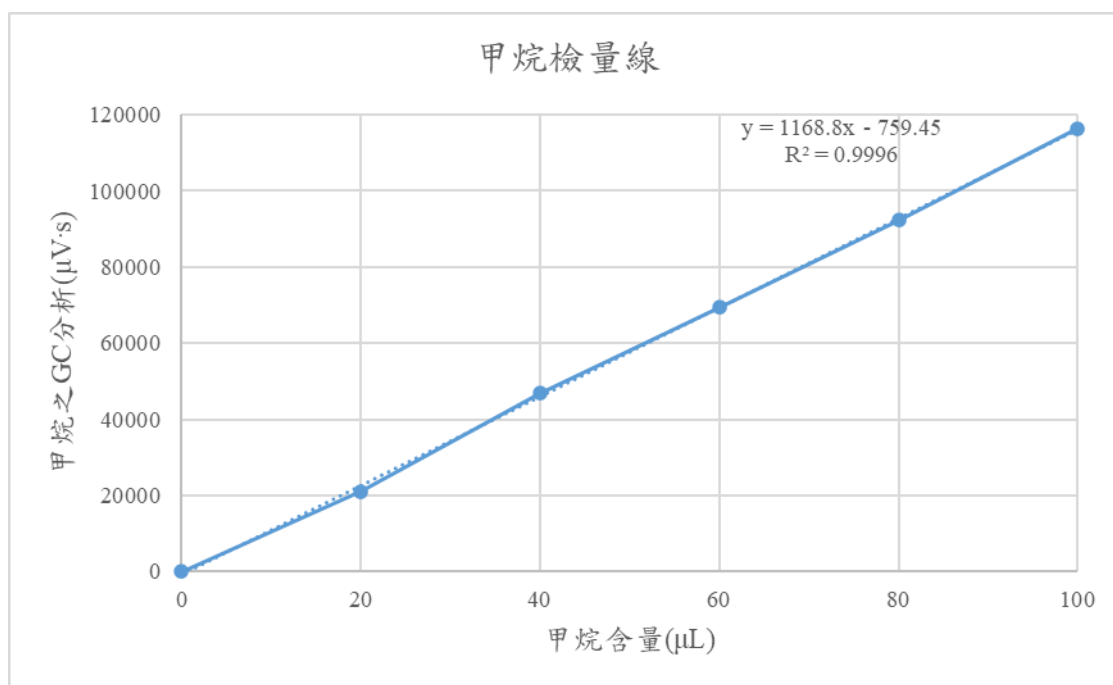


圖28：甲烷之檢量線圖

表6：二氧化碳之檢量線數據

標準品量 (uL)	含量 (%)	含量 (μL)	面積 (μL)
0	0	0	0
200	35%	70.00	130425.24
400	35%	140.00	244932.28
600	35%	210.00	355131.87
800	35%	280.00	474662.06
1000	35%	350.00	577860.13

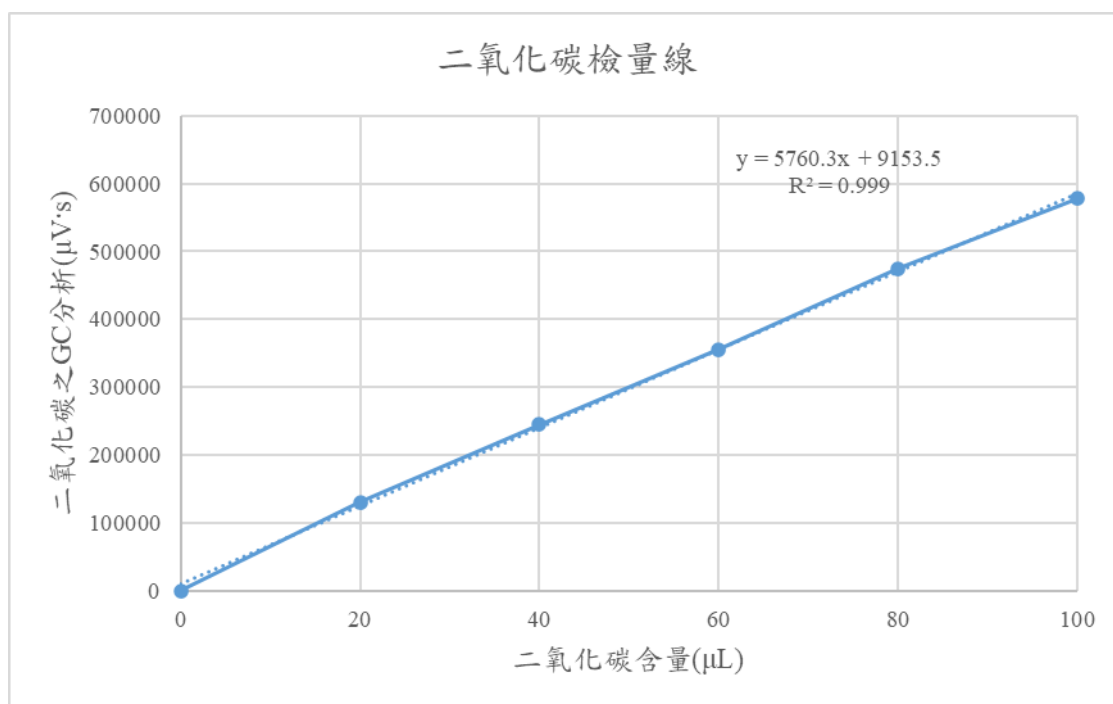


圖 29：二氧化碳之檢量線圖

參、主要發現與結論

一、第 I 次基本測試

本次試驗樣品主要為稻稈、稻殼、廢菇包、廚餘(香蕉)4 種料源經鹼前處理後，其產物之厭氧消化測試。各樣品之命名規則如表 7 所示。舉例，IIB-SL 即代表第 II 種樣品，B 前處理，固液分離後之 SL；也就是稻殼經水熱鹼前處理後，固液不分離。

圖 30 為此次各物料前處理產物之總產氣圖，其中以廚餘具有較佳之產氣量，另由圖 30 得知總產氣量為 0.8 L 以內，換算總產氣率均不超過 160 L/kg VS。

表 7 樣品命名規則

樣品名稱				
blank	I	II	III	IV
僅加污泥之 空白試驗	稻稈	稻殼	廢菇包	廚餘
處理方式				
S	L	SL	A	B
前處理後經 固液分離之 固體	前處理後經 固液分離之 液體	前處理後固 液不分離	水熱酸前處 理	水熱鹼前處 理

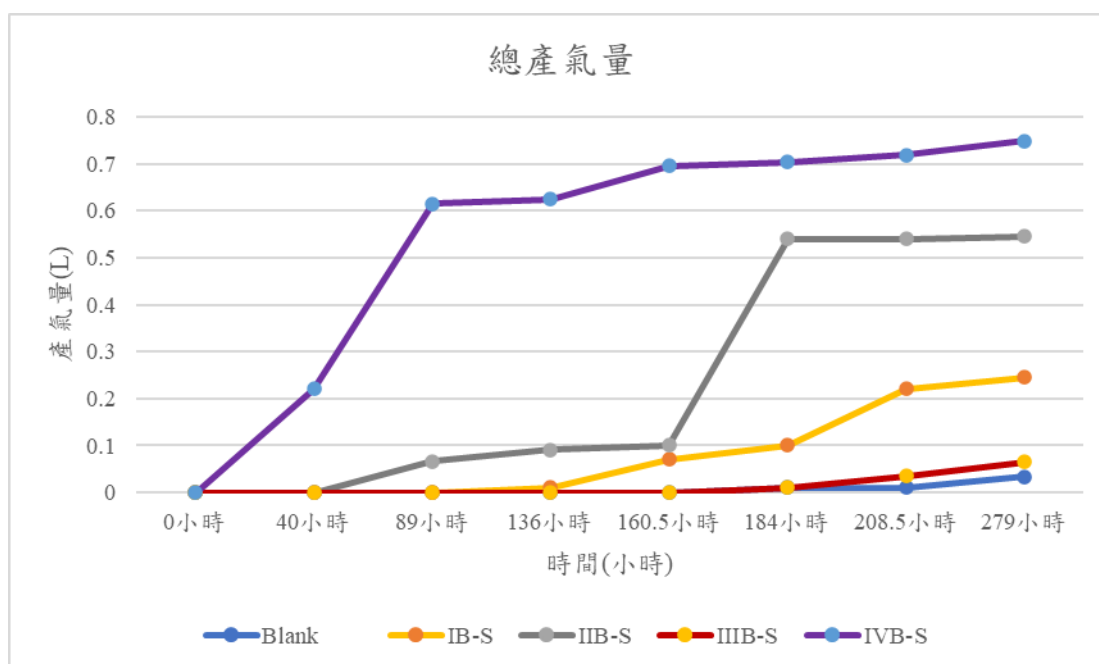


圖 30：總產氣量

表 8 為甲烷與二氧化碳的產氣比例，以廢菇包比例最高，其甲烷產氣量佔比約 35.5%。

表 8：甲烷與二氧化碳的產氣比例

	Blank	IB-S	IIB-S	IIIB-S	IVB-S
甲烷產氣比例(%)	1.3	4.6	2.6	35.5	6.7

二、鹼前處理測試

圖 31 為鹼前處理物料之總累積產氣圖，此次仍為稻稈(I)、稻殼(II)、廢菇包(III)、香蕉(IV)鹼前處理產物之厭氧消化實驗。實驗結果顯示廢菇包固體(IIIB-S)的產氣量較佳，其總產氣量達 0.7 L 以上，其次是廚餘固體(IVB-S)，其總產氣量為 0.37 L；稻稈固體(IB-S)與稻殼固體(IIB-S)之總產氣量分別約為 0.27 L 與

0.2 L。

整體而言，除了稻殼以外，各料源之前處理渣料固體相較於液體部分具有較佳之總產氣量，顯示整合固液分離技術於上述料源之厭氧消化程序具有可行性。另一方面，廚餘固體(IVB-S)之產氣量約於 15 小時即達飽和，顯示廚餘為易於被微生物利用之料源；廢菇包固體(IIIB-S)於 41 小時前處於遲滯期(lag phase)，自 41 小時後產氣量明顯上升，並於 90 小時後逐漸達到飽和；稻稈固體(IB-S)與稻殼固體(IIB-S)之產氣速率較慢，自 40 小時後方有氣體產生，然而氣體產量於 64 小時後有緩步上升之趨勢。

由實驗結果可了解各料源之生物降解性，廚餘最佳、廢菇包次之；稻稈與稻殼較差，顯示稻稈與稻殼可能需要較為劇烈的反應條件，方可有效提升產氣量，同時也需較長之反應時間。

本次測試另比較廚餘經鹼前處理後，其液體、固體產物與固液不分離產物之產氣量。由實驗結果得知，固體產氣量(IVB-S)約 0.37 L，液體產氣量(IVB-L)約 0.19 L，而固液體不分離(IVB-SL)之產氣量為 0.43 L。以總產氣量而言，同時考量厭氧槽單位體積之處理量，固液分離是較有利的。

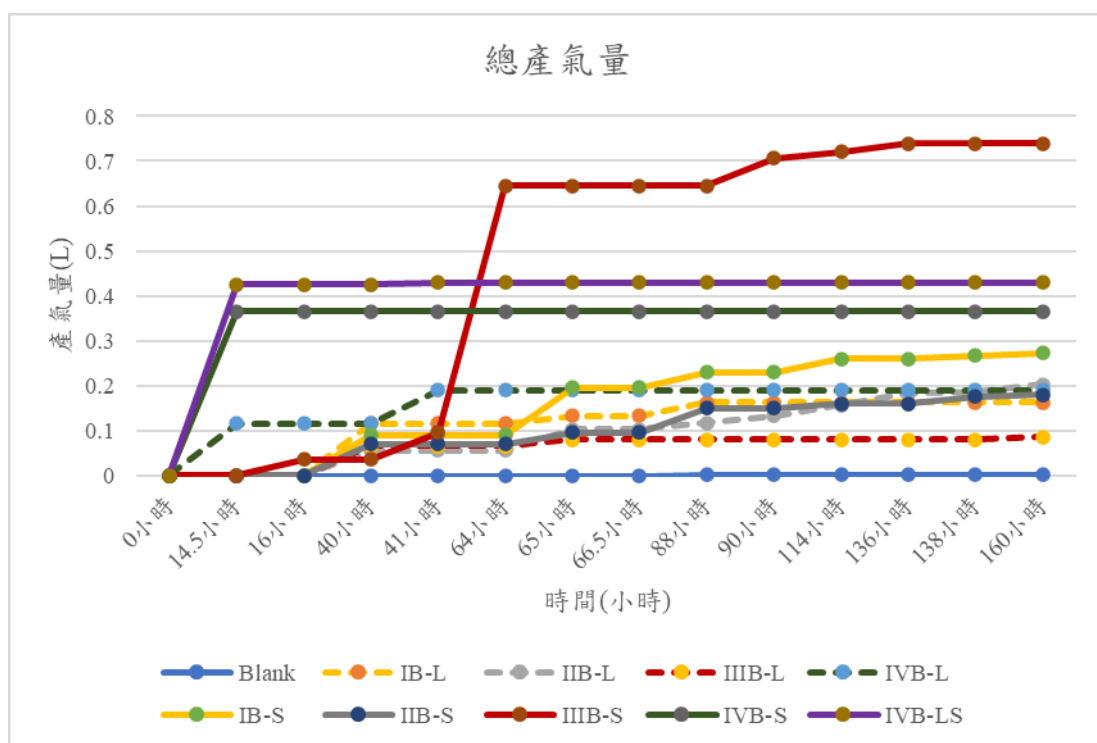


圖 31：鹼前處理總產氣量

表 9 為甲烷與二氧化碳的產氣比例，以廢菇包液體(IIIB-L)比例最高，其甲烷產氣量佔比約 80%，其次為廚餘液體(IVB-L)。相對於液體產物，固體產物之甲烷氣體佔比較低。

表 9：甲烷與二氧化碳的產氣比例

	Blank	IB-L	IIB-L	IIIB-L	IVB-L	IB-S	IIB-S	IIIB-S	IVB-S	IVB-LS
甲烷產氣比例 (%)	2.8	0.4	7.8	80.4	66.1	5.9	21.6	15.9	25.1	5.6

三、酸前處理測試

圖 32 為酸前處理物料之總累積產氣圖。相對於鹼前處理而言，除了廚餘固體(IVA-S)較廚餘液體(IVA-L)具有較佳之產氣量，各料源經酸前處理後，其液體產物較固體產物均具有較佳之總產氣量，上述現象與鹼前處理之趨勢相反，顯示整合固液分離技術於上述料源之厭氧消化程序所能獲得之效益較低，產物不固液分離直接進行厭氧消化為較佳之選擇。

由前述液體產物分析結果得知，稻桿、稻殼、廢菇包、香蕉酸處理液體之化學需氧量分別為 18850 mg/L、9575 mg/L、27000 mg/L、75500 mg/L；稻桿、稻殼、廢菇包、香蕉鹼處理液體之化學需氧量分別為 3850 mg/L、1970 mg/L、3450 mg/L、70500 mg/L。由此可見相對於鹼前處理，料源經酸處理後會具有較多之有機質溶於液體中。

另由文獻得知，酸處理法之反應機制主要以移除料源中之半纖維素與纖維素為主；鹼前處理發則著重於料源木質素之移除，故此可以推測酸前處理之液體具有較多的半纖維素與纖維素溶出物，鹼前處理之液體則主要以木質素溶出物為主；換言之，酸前處理固體相較於鹼前處理固體會含有較多之木質素。相較於半纖維素與纖維素，木質素較不容易被微生物利用，此可說明酸前處理固體不甚理想之原因。

如同前述的鹼前處理測試，本次測試同時評估廚餘經酸前處理後，其固體、液體與固液不分離產物之沼氣產量。由圖可知廚餘固體(IVA-S)之產氣量較高，約可達 0.29 L，而廚餘液體(IVA-L)產氣量 0.22 L，與鹼前處理相比，其固體、液體產物之

沼氣產量差異較小。廚餘固液不分離產物(IVB-SL)之產氣量為 0.48 L，與固、液體產物合併之總產氣量 0.51 L 相近。上述實驗結果顯示如以酸處理法進行廚餘前處理，產物不固液分離直接進行厭氧消化應為較佳之策略；然而仍可藉由固液分離技術先行分離固、液產物，並依固體、液體產物之特性設計厭氧槽及調整厭氧消化參數，分別進行厭氧消化，藉以最適化產氣量。

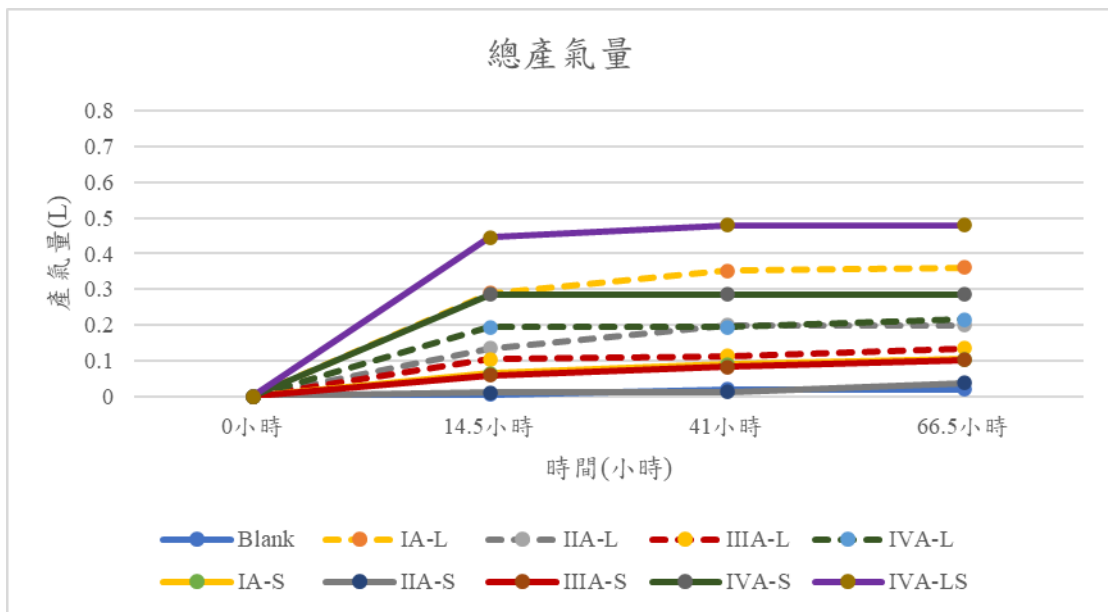


圖 32：酸前處理總產氣量

表 10 為甲烷與二氧化碳的產氣比例，整體甲烷產氣量偏低。

表 10：甲烷與二氧化碳的產氣比例

	Blank	IA-L	IIA-L	IIIA-L	IVA-L	IA-S	IIA-S	IIIA-S	IVA-S	IVA-SL
甲烷產氣比例(%)	1.3	26.5	36.2	14.6	27.9	12.6	16.9	4.5	0	7.3

四、參數優化測試

(一) 添加新的污泥鹼處理測試

以下表 11、12 以及圖 33 分別為本批次參數表以及總產氣結果，表 11 為渣料之 VS 以及固液分離後液相之 COD 值，表 12 為所試驗的參數以及代號說明，圖 33 為總產氣量，表 13 為產生的甲烷與二氧化碳比例。

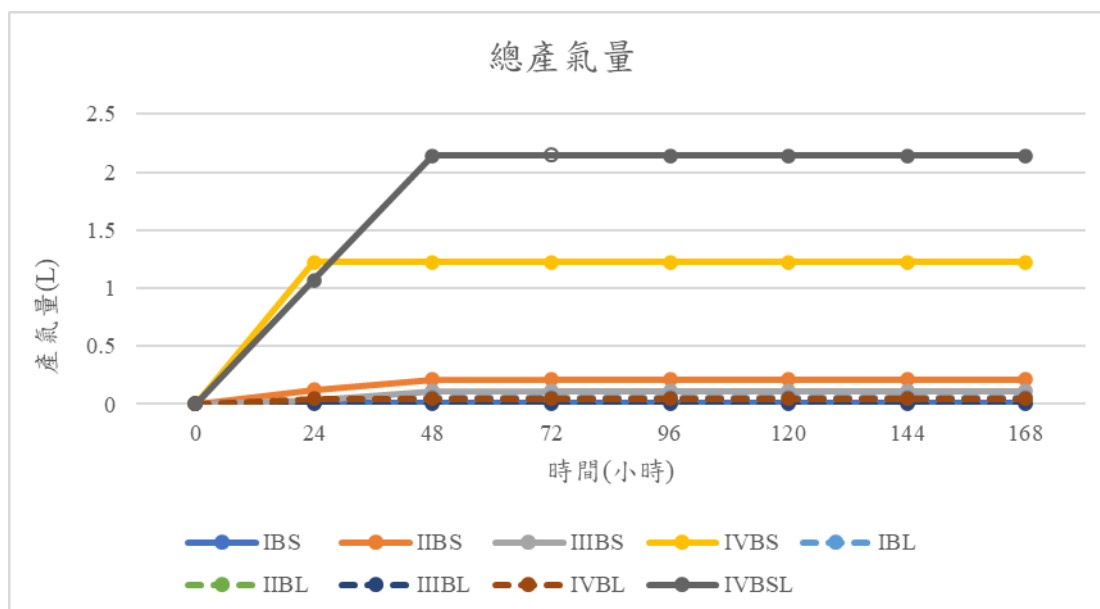
為了提高產氣效果，驗證污泥是否老化因素，本批次添加新鮮污泥，由圖可知本批次產氣結果以廚餘(米飯)為最佳，達到 1.2 L，相當於 244 L/kg VS，顯見廚餘(米飯)之產氣潛力；其次以稻殼為佳，約 42.6 L/kg VS；大部分試驗於 48 小時之後產氣達飽和；固態部份甲烷含量較二氧化碳高；而液態產氣的部分，二氧化碳含量較高。

表 11：渣料的 VS 以及 COD 值

種類	渣料 VS(%)	液體 COD(mg/L)
IBS	17.55	
IIBS	27.74	
IIIBS	22.07	
IVBS	10.47	
IBL		51000
IIBL		35500
IIIBL		42000
IVBL		6850

表 12：添加新的污泥鹼處理

編號	物料	前處理	說明
IBS-1	稻稈 S	鹼	新污泥-鹼
IIBS-1	稻殼 S	鹼	新污泥-鹼
IIIBS-1	廢菇包 S	鹼	新污泥-鹼
IVBS-1	米飯 S	鹼	新污泥-鹼
IBL-1	稻稈 L	鹼	新污泥-鹼
IIBL-1	稻殼 L	鹼	新污泥-鹼
IIIBL-1	廢菇包 L	鹼	新污泥-鹼
IVBL-1	米飯 L	鹼	新污泥-鹼
IVBSL-5	米飯 SL	鹼	新污泥-鹼



編號	IBS	IIBS	IIIBS	IVBS	IVBSL
總產氣率(L/kg VS)	2.3	42.6	22.6	244.4	214.6
編號	IBL	IIBL	IIIBL	IVBL	
總產氣率(L/kg COD)	55	12.5	2	47	

圖 33：添加新污泥鹼處理後之總產氣量

表 13：甲烷與二氧化碳的產氣比例

甲烷產氣比例 (%)	IBS	IIBS	IIIBS	IVBS	IBL	IIBL	IIIBL	IVBL	IVBSL
	91.48	97.39	94.70	7.26	50.00	33.10	19.59	78.14	15.13

(二) 添加新的污泥酸處理測試

以下表 14、15 以及圖 34 分別為本批次參數表以及總產氣結果：表 14 為渣料之 VS 以及固液分離後液相之 COD 值，表 15 為所試驗的參數以及代號說明，圖 34 為總產氣量，表 16 為產生的甲烷與二氧化碳比例。由於米飯極易溶於酸中，故沒有 IVAS 這一組數據。

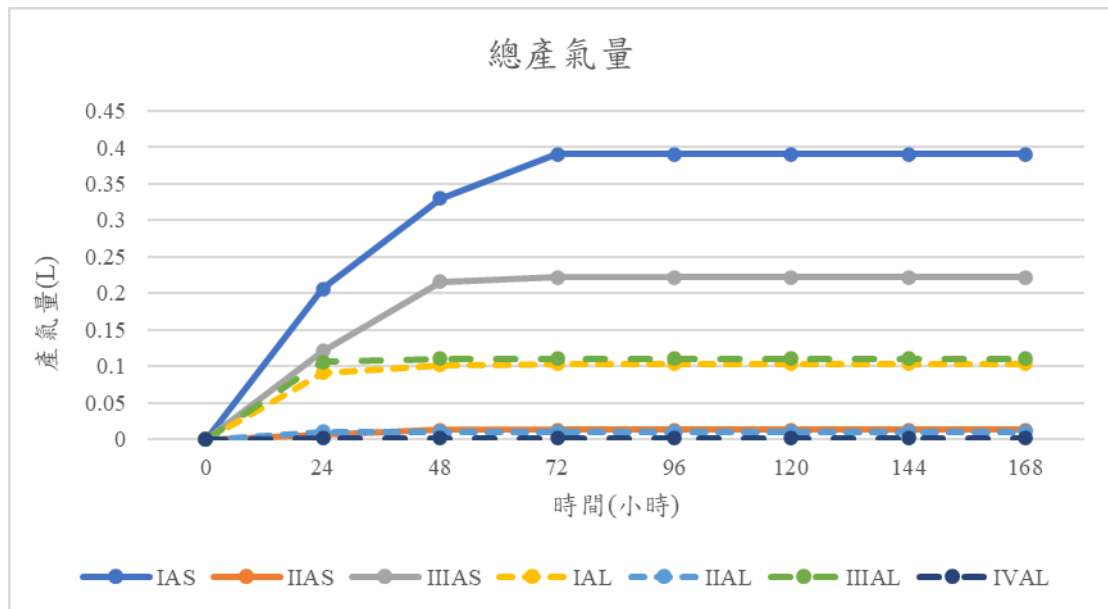
以酸處理而言，稻稈產氣較佳，78.1 L/kg VS；其次以廢菇包為佳，約 43.3 L/kg VS；大部分試驗於 72 小時之後產氣達飽和；甲烷含量都較二氧化碳為高。

表 14：渣料的 VS 以及 COD 值

種類	渣料 VS(%)	液體 COD(mg/L)
IAS	17.23	
IIAS	30.13	
IIIAS	21.5	
IVAS	-	
IAL		11250
IIAL		9575
IIIAL		27000
IVAL		62750

表 15：添加新的污泥酸處理

編號	物料	前處理	說明
IAS-1	稻稈 S	酸	新污泥-酸
IIAS-1	稻殼 S	酸	新污泥-酸
IIIAS-1	廢菇包 S	酸	新污泥-酸
IAL-1	稻稈 L	酸	新污-酸
IIAL-1	稻殼 L	酸	新污-酸
IIIAL-1	廢菇包 L	酸	新污泥-酸
IVAL-1	米飯 L	酸	新污泥-酸



編號	IAS	IIAS	IIIAS		
總產氣率(L /kg VS)	78.11	2.6	43.3		
編號	IAL	IIAL	IIIAL	IVAL	
總產氣率(L /kg COD)	102	2.1	110	1	

圖 34：添加新污泥酸處理後之總產氣量

表 16：甲烷與二氧化碳的產氣比例

甲烷產氣比例 (%)	IAS	IIAS	IIIAS	IAL	IIAL	IIIAL	IVAL
	94.68	100	94.44	89.36	0	90.57	0

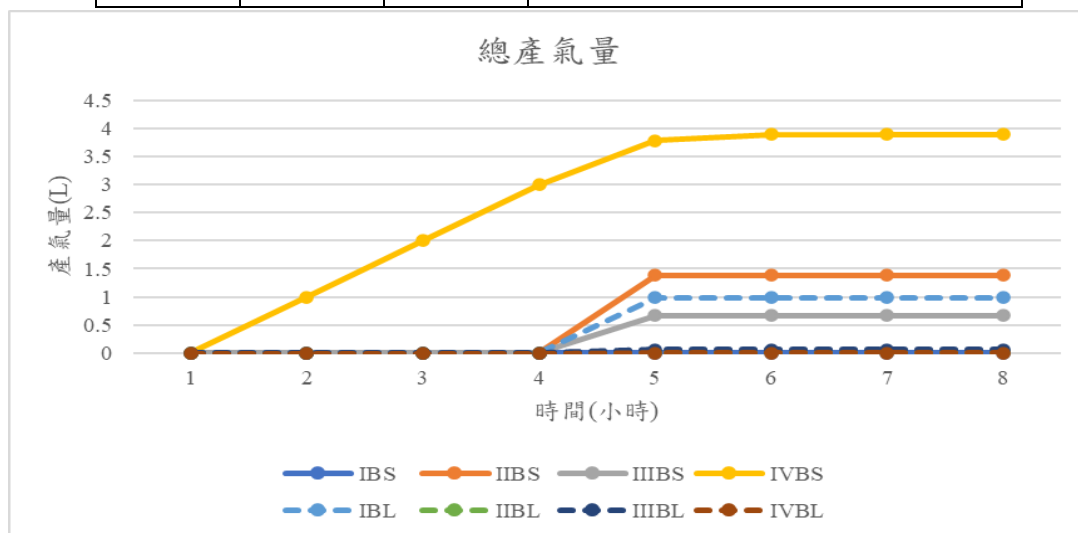
(三) 增加質傳攪拌的鹼處理測試

藉由實驗觀察，於震盪速率 100 rpm 之反應條件下，搖瓶試驗固液混和效果有限，故此本批次測試於反應中輔以磁石進行攪拌，攪拌速率提升為 400 rpm，希望能藉由提升質傳效率優化產氣結果。以下表 17 以及圖 35 分別為本批次參數表以及產氣結果：表 17 為所試驗的參數以及代號說明，圖 35 為總產氣量，表 18 為產生的甲烷與二氧化碳比例。由圖可知本批次產氣結果廚餘(米飯)為最佳，顯見廚餘(米飯)之產氣潛力，達到 389.5 L/kg VS；其次為稻稈之液相，約 198 L/kg VS。

除了稻稈固體產物之改善成效有限，稻殼、廢菇包與米飯之固體產物產氣率分別由 42.3 L/kg VS、22.6 L/kg VS、244.4 L/kg VS 提升至 138.8 L/kg VS、67.1 L/kg VS、389.5 L/kg VS，產氣成效明顯提升。液體產物除了稻稈液體產氣率由 55 L/kg COD 提升至 198L/kg COD，其餘料源鹼處理液相產物之產氣潛能提升成效有限。

表 17：增加質傳攪拌的鹼處理

編號	物料	前處理	說明
IBS	稻稈	鹼	磁石攪拌
IIBS	稻殼	鹼	磁石攪拌
IIIBS	廢菇包	鹼	磁石攪拌
IVBS	米飯	鹼	磁石攪拌
IBL	稻稈	鹼	磁石攪拌
IIBL	稻殼	鹼	磁石攪拌
IIIBL	廢菇包	鹼	磁石攪拌
IVBL	米飯	鹼	磁石攪拌



編號	IBS	IIBS	IIIBS	IVBS
總產氣率(L /kg VS)	0	138.8	67.1	389.5
編號	IBL	IIBL	IIIBL	IVBL
總產氣率(L /kg COD)	198	2.5	13	0.83

圖 35：增加質傳之總產氣量

表 18：甲烷與二氧化碳的產氣比例

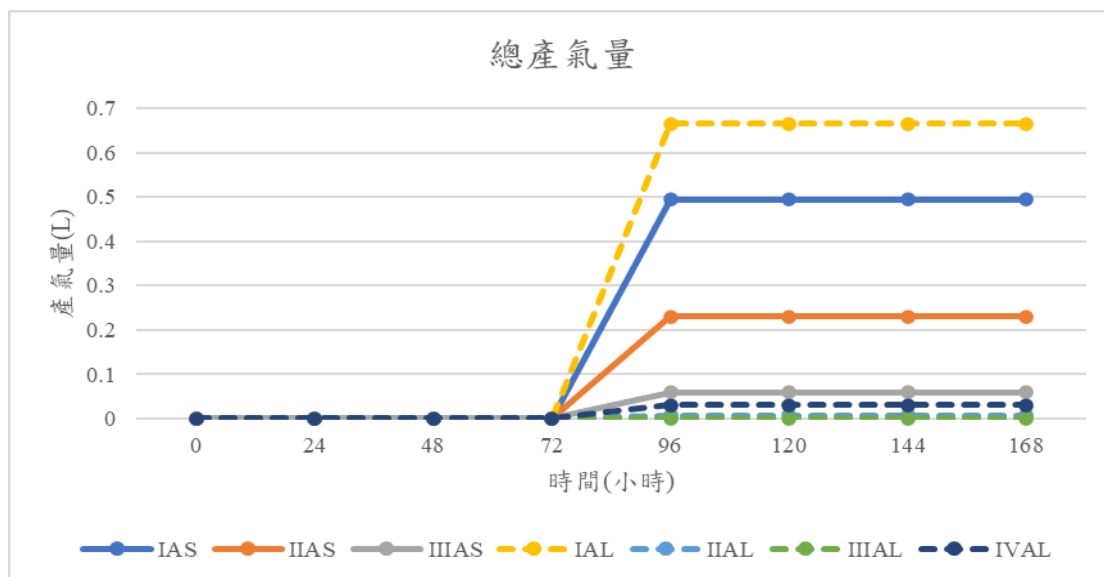
甲烷產氣比例(%)	IBS	IIBS	IIIBS	IVAS	IBL	IIBL	IIIBL	IVBL
	0	67.32	92.36	3.14	69.06	0	0	0

(四) 增加質傳攪拌的酸處理測試

承襲前述鹼處理測試，本批次實驗以酸處理產物進行測試，輔以磁石攪拌期能優化產氣結果。以下表 19 以及圖 36 分別為本批次參數表以及產氣結果：表 19 為所試驗的參數以及代號說明，圖 36 為總產氣量，表 20 為產生的甲烷與二氧化碳比例。由圖可知本批次產氣結果以稻稈之液相為最佳，達到 133 L/kg VS；其次以稻殼為佳。除了稻稈之液相產物之產氣率由 102 L/kg VS 提升至 133 L/kg VS，其餘各實驗組產氣率提升有限。相對於鹼處理，酸處理產物之產氣潛能欠佳，顯示鹼處理為較理想之前處理方式。

表 19：增加質傳攪拌的酸處理

編號	物料	前處理	說明
IAS	稻稈	酸	磁石攪拌
IIAS	稻殼	酸	磁石攪拌
IIIAS	廢菇包	酸	磁石攪拌
IAL	稻稈	酸	磁石攪拌
IIAL	稻殼	酸	磁石攪拌
IIIAL	廢菇包	酸	磁石攪拌
IVAL	米飯	酸	磁石攪拌



號	IAS	IIAS	IIIAS	
總產氣率(L /kg VS)	49.4	23	6	
編號	IAL	IIAL	IIIAL	IVAL
總產氣率(L /kg COD)	133	1.5	0	6

圖 36：增加質傳之總產氣量

表 20：甲烷與二氧化碳的產氣比例

甲烷產氣比例(%)	IAS	IIAS	IIIAS	IAL	IIAL	IIIAL	IVAL
	90.52	100	0	68.03	0	0	0

(五) 各料源固液產物產氣貢獻比例與最適化產氣方案

表 21 彙整稻稈、稻殼、廢菇包與廚餘各料源經酸、鹼前處理後，其固、液相產物之產氣貢獻比例。產氣結果以單位重量前處理產物之產氣量進行表示，數據基於前述實驗與參數優化之最佳測試結果。

由表可知鹼處理稻稈與酸處理米飯之產氣主要來源為液體，基於產氣貢獻主要來自於液相產物，固液分離程序之必要性降低，產物直接進行厭氧消化為較佳之產氣方案。

相對而言，其餘料源經酸、鹼前處理後，主要以固相產物為主要產氣來源。故此整合固液分離單元至前處理、厭氧發酵程序，藉由固液分離技術先行獲取固體產物，再行厭氧消化生產沼氣，應為各料源最適之產氣方案，液體產物可往重複利用或加值應用的方向進行處理。

表 21：各料源固、液相產物產氣貢獻比例

前處理 方法	料源	固體產物 總產氣率 (L /kg)	液體產物 總產氣率 (L /kg)	產氣 主要來源
鹼處理	稻稈	0.4	10.1	液體
	稻殼	38.5	0.4	固體
	廢菇包	14.8	0.5	固體
	廚餘(米飯)	40.6	0.3	固體
酸處理	稻稈	13.5	1.5	固體
	稻殼	6.9	0.0	固體
	廢菇包	9.3	3.0	固體
	廚餘(米飯)	X	0.4	液體

(六) 4 kg 級之固液分離測試

由上所述，固液分離有其有利性，故本研究試行 4 公斤級之測試，以稻殼為渣料，經酸處理後之圖片如圖 37 所示，固液分離後之結果如圖 38 所示，數據如表 22，顯示渣料 320 g 經處理後再經固液分離，幾乎 99%以上都可回收，並沒有太大的質量損失。



圖 37：稻殼酸前處理照片圖(4 kg 級)

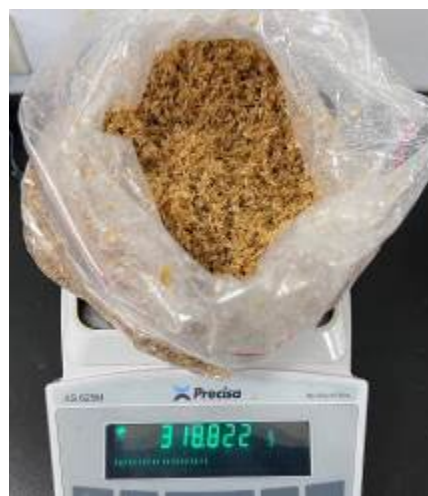


圖 38：固液分離之結果(4 kg 級)

表 22：固液分離質量數據

	原始總重(g)	離心後(g)	回收率(%)
渣料重	320	318.82	100
溶劑重	3960	3918	99

肆、結論與未來改善進行方向

現行已完成稻稈、稻殼、廢菇包與廚餘(香蕉、米飯)4種料源，經酸、鹼前處理方法之測試，並完成上述料源前處理固、液體產物之厭氧消化測試，分析產氣量以及甲烷與二氧化碳之產氣比例。本研究另以磁石攪拌方式於厭氧瓶中增加質傳速率，優化產氣效果，其中鹼處理稻殼與米飯固體產物具有較佳之產氣結果，其產氣率可分別達 138.8 L/kg VS 與 389.5 L/kg VS，產氣成效明顯提升。

此外，本研究完成各料源固液產物產氣貢獻比例分析，基於實驗測試結果，各料源經酸、鹼前處理後，主要以固相產物為主要產氣來源，於此考量下，固液分離程序值得加入；藉由固液分離技術先行獲取固體產物，再行厭氧消化生產沼氣，藉以提升厭氧槽單位體積之產氣量，應為各類料源最適之產氣方案。未來可以上述產氣方案為基礎，配合混和禽糞、畜牧廢水，最佳化厭氧反應參數，進而最大化產氣潛能。

基於固液分離程序之必要性，本研究另完成公斤及固液分離測試，可作為後續放大測試的基礎。

伍、參考文獻

1. De Godos, I., Blanco, S., García-Encina, P. A., Becares, E., & Chunlan Mao, Yongzhong Feng, Xiaojiao Wang, Guangxin Ren, 2015 Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555.
2. Montañez-Hernández, L.E.; Hernández-De Lira, I.O.; Rafael-Galindo, G.; Madariaga, M.L.F.; Balagurusamy, N. Sustainable Production of Biogas from Renewable Sources: Global Overview, Scale Up Opportunities and Potential Market Trends. In *Sustainable Biotechnology-Enzymatic Resources of Renewable Energy*; Singh, O.V., Chandel, A.K., Eds.; Springer International Publishing AG: Cham, Switzerland, 2018; pp. 325–354.
3. Curto, D.; Martín, M. Renewable Based Biogas Upgrading. *J. Clean. Prod.* 2019, 224, 50–59.
4. Ferreira, L.C., Donoso-Bravo, A., Nilsen, P.J., Fdz-Polanco, F., Pérez-Elvira, S.I., 2013. Influence of thermal pretreatment on the biochemical methane potential of wheat straw. *Bioresour. Technol.* 143, 251–257.
5. Talebnia, F., Karakashev, D., Angelidaki, I., 2010. Production of bioethanol from wheat straw: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. *Bioresour. Technol.* 101, 4744–4753.
6. Krishania, M., Vijay, V.K., Chandra, R., 2013. Methane fermentation and kinetics of wheat straw pretreated substrates co-digested with cattle manure in batch assay. *Energy* 57, 359–367.
7. Chandel, A.K., da Silva, S.S., Singh, O.V., Silva, S.S., 2011. Detoxification of lignocellulosic hydrolysates for improved bioethanol production. In: Bernardes, M.A.S. (Ed.), *Biofuel Production – Recent*

- Developments and Prospects. InTech, ISBN 978-953-307-478-8, pp. 225–246.
8. Nabi, M., Zhang, G., Zhang, P., Tao, X., Wang, S., Ye, J., Zhang, Q., Zubair, M., Bao, S., Wu, Y. 2019. Contribution of solid and liquid fractions of sewage sludge pretreated by high pressure homogenization to biogas production. *Bioresour. Technol.*, 286, 121378.
 9. Lu, D., Wu, D., Qian, T., Jiang, J., Cao, S., Zhou, Y. 2020. Liquid and solids separation for target resource recovery from thermal hydrolyzed sludge. *Water Research*, 171, 115476.
 10. Antonopoulou, G., Vayenas, D., Lyberatos, G. 2020. Biogas Production from Physicochemically Pretreated Grass Lawn Waste: Comparison of Different Process Schemes. *Molecules*, 25(2).
 11. Fernandez-Cegri, V., Raposo, F., de la Rubia, M.A., Borja, R. 2013. Effects of chemical and thermochemical pretreatments on sunflower oil cake in biochemical methane potential assays. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 88(5), 924-929.
 12. Bichot, A., Lerosty, M., Mechin, V., Bernet, N., Delgenes, J.P., Garcia-Bernet, D. 2021. Evaluation of chemical-free microwave pretreatment on methane yield of two grass biomass with contrasted parietal content. *Energy Conv. Manag.*, 229.
 13. Xiang, C.X., Tian, D., Hu, J.G., Huang, M., Shen, F., Zhang, Y.Z., Yang, G., Zeng, Y.M., Deng, S.H. 2021. Why can hydrothermally pretreating lignocellulose in low severities improve anaerobic digestion performances? *Sci. Total Environ.*, 752.