

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

纖維原料解聚物應用於生質沼氣技術開發與評估
(Study of using anaerobic digestion de-aggregation pretreatment
organic source to produce biogas)

計畫編號：NL1060461

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

協同主持人：陳文華

研究期程：中華民國 106 年 4 月至 106 年 12 月

研究經費：新台幣 120 萬元

核研所聯絡人員：詹明峯

報告日期：106 年 12 月 05 日

目 錄	I
中文摘要.....	3
英文摘要.....	4
壹、計畫緣起與目的.....	5
貳、研究方法與過程.....	8
參、主要發現與結論.....	20

中文摘要

纖維廢棄物如稻稈、狼尾草等具高化學需氧特性，可作為厭氧沼氣醱酵原料使用，但因纖維原料化學結構穩定，以厭氧微生物分解至產生沼氣時間長，本單位計畫去年成果得知纖維原料經解聚前處理(酸蒸氣爆裂法)後，因 pH 為酸性不適合進行沼氣生產，經鹼調整 pH 值後可比縮短 2-3 倍醱酵產氣時間，但所需前處理化學藥品費用，會增加產沼氣成本，為有效降低纖維廢棄物轉沼氣成本，本計畫將比較不同解聚前處理法，以批次式厭氧醱酵實驗評估不同解聚法對沼氣產量及產氣速率之影響。先前研究成果亦得知纖維原料經酸蒸氣爆裂解聚後，可藉由添加尿素調整厭氧醱酵碳氮比，所合成氨氮產物能穩定沼氣生產量及速率，考量國內養豬廢水亦有高氨氮的特性，可作為評估纖維解聚物混摻養豬場廢水提升沼氣產量所用。

Abstract

Cellulosic wastes such as rice straw, napier grass contain high chemical oxygen demand which can be used for enhancing biogas production by anaerobic digestion (AD). However, cellulosic wastes take long time for biogas production due to its stable structure. In last year, we revealed cellulosic wastes with acidic-steam explosion pretreatment has low efficiency for biogas production because of the low pH value. It can shorten the digestion time about 2-3 times after adding extra chemical base in the solution, but it also enhance the costs. In order to lower the costs, in this study we will compare different pretreatment methods (steam explosion and acidic- steam explosion) for cellulosic wastes and evaluate its biogas production efficiency through batch experiment. Besides, we found that adding extra urea could produce the ammonia byproduct and enhanced the efficiency of biogas production. Considering the high level of ammonia in the swine wastewater, it could be the candidate of co –digestion material with cellulosic waste for AD.

壹. 計畫緣起與目的

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，美國執行 AgSTAR 計畫對於農業與畜牧業沼氣開發已進行十五年，共扶植 242 個農業或畜牧業建立沼氣廠，以 2015 年為例，可產生相當於 981 百萬千瓦的電力以及減少 3 萬噸二氧化碳排放；歐洲沼氣發電產業也相當興盛，德國境內在 2014 年已超過一萬座沼氣廠，年發電約占全國 8%。相較於燃煤發電，以纖維素進行沼氣發電可減少 80% 的溫室氣體排放，其效益符合當今環保及減碳排放的趨勢。

台灣農業發展中種植作物以水稻為最大宗，根據農委會統計每年約產 158 萬噸稻米，伴隨產生 189 萬噸的農業廢棄物(稻蒿、稻殼)，佔所有農業廢棄物的 46%，這些廢棄物主要由纖維素、半纖維素及木質素組成，目前這些廢棄物處理方式以就地翻耕掩埋為主，或作為作物栽培覆蓋、焚燒、墊料與育苗介質。在其他主要生產稻米的國家例如中國、印度與印尼等，則將這些廢棄物做為能源開發的選項之一，發表許多以稻稈做為原料進行沼氣生產的研究，有些技術

已經商業化。除了農業廢棄物類型的纖維素，還有一些作物也具有能源開發潛力，例如：玉米、大豆與狼尾草等，前兩者主要為榨油與酒精生產的原料，但因商業化而造成價格波動及影響民生疑慮，故較少做為生產沼氣原料；而狼尾草含有豐富木醣、纖維素而被視為能源作物(Green plants)，狼尾草可作為飼養牲畜牧草，主要優勢為生長快速、人力成本低可機械化播種與收割，經過育種改良出不同特性品種，目前台灣種植最多的品種為台畜二號占全部的 85%，其單位產量可達 306 噸(每公頃/年)。

台灣有潛力可以發展沼氣能源，中大型規模養豬場(約 280 場)共飼養將近 200 萬頭豬約占全台 30%，每天產生大量廢水，目前處理方式多以三段式放流為主，其三段功能分別為：固液分離(Separation)、厭氧醱酵(Anaerobic fermentation)、好氧曝氣(Aeration)。養豬業廢水有較高的化學需氧量(COD)、天然且適合微生物生長，具有沼氣開發潛力；但養豬廢水有碳氮比較低、碳源不足的情形是需要克服；而植物纖維素碳氮比較高，可與畜殖廢水做混摻進而達到適合厭氧醱酵的碳氮比，可提升厭氧醱酵效率。

隨著近年替代能源開發與研究，將農業廢棄物與能源作物作為厭氧醱酵的料源，並藉由不同的水解方式(物理性、化學性)將纖維素、

半纖維素分解成厭氧菌可利用的五碳糖、六碳糖等小分子糖類，可縮短醱酵時程、提升沼氣產量。先前研究以酸催化雖可對於木質素有較佳的解聚效果，但會造成 pH 值降低導致厭氧醱酵低落，調整 pH 值也提升成本，故以不同的解聚方式避免後續料源調整問題，並研究低 pH 值對厭氧醱酵的影響與解決方式。將纖維作物與畜殖廢水混摻再加上解聚技術，可提升廢棄物價值、並促進產業升級與轉型。

計畫目的

本計畫主要目的在於探討稻稈與狼尾草經不同解聚方式，對最佳條件混摻養豬廢水生產沼氣之參數評估；研究包括：一、不同解聚方式(酸催化、蒸氣爆裂)的料源與養豬廢水成份分析及性質分析；二、比較不同解聚方式料源厭氧醱酵產氣數據；三、評估最佳化連續式沼氣生產參數；四、建立放大反應器模擬養豬場三段式放流設計；五、開發一種連續進料且混摻廢水的反應條件，解決單一纖維料源進行厭氧醱酵時，需要額外調整、沼氣生產量不足或難以醱酵改善方法，並評估實際養豬場廢水處理混摻纖維料源可行性，藉由參數調整改善厭氧醱酵條件，提升沼氣產量。

貳. 研究方法與過程

一、 料源基本性質分析

本研究利用蔗渣、稻稈等固體廢棄物建立厭氧沼氣生產系統，為評估固體廢棄物產生沼氣潛力、設計實驗參數及探討實驗結果，分別對固體廢棄物與汙泥進行基本性質分析，包括總固體含量(TS)、揮發性固體含量(VS)、化學需氧量(COD)、元素分析有機組成分析。

二、 批次式搖瓶實驗

為研究固體廢棄物與厭氧微生物汙泥混合之最佳比例(S/I ratio)，使其能夠在最佳條件下進行反應，達到最高產氣效率，以不同 S/I ratio 條件下進行厭氧消化產氣實驗。

表一、批次式搖瓶實驗條件

料源條件	料源總乾重 (g)	料源總 COD (gCOD)	汙泥總 VS (gVS)
稻稈, R1, S/I=1	6.66	10	10
稻稈, R1, S/I=2	13.32	20	
稻稈, R1, S/I=3	19.98	30	
稻稈, R1, S/I=4	26.64	40	
稻稈, R2, S/I=1	6.34	10	
稻稈, R2, S/I=2	12.68	20	
稻稈, R2, S/I=3	19.02	30	
稻稈, R2, S/I=4	25.36	40	
稻稈, R3, S/I=1	6.65	10	
稻稈, R3, S/I=2	13.3	20	
稻稈, R3, S/I=3	19.8	30	
稻稈, R3, S/I=4	26.45	40	
稻稈, R4, S/I=1	6.43	10	
稻稈, R4, S/I=2	12.86	20	
稻稈, R4, S/I=3	19.29	30	

稻稈, R4, S/I=4	25.72	40	
狼尾草, 酸蒸氣爆裂, S/I=1	9.25	10	
狼尾草, 酸蒸氣爆裂, S/I=2	18.49	20	
狼尾草, 酸蒸氣爆裂, S/I=3	27.73	30	
狼尾草, 酸蒸氣爆裂, S/I=4	36.97	40	
狼尾草, SE1, S/I=1	8.17	10	
狼尾草, SE1, S/I=2	16.34	20	
狼尾草, SE1, S/I=3	24.51	30	
狼尾草, SE1, S/I=4	32.67	40	
狼尾草, SE2, S/I=1	7.26	10	
狼尾草, SE2, S/I=2	14.51	20	
狼尾草, SE2, S/I=3	21.77	30	
狼尾草, SE2, S/I=4	29.02	40	
狼尾草, 酸催化蒸氣爆裂調整			
狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂/SI=1, pH5	9.25	10	

狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂/SI=1, pH6	9.25	10	
狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂/SI=1, pH7	9.25	10	
狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂/SI=2, pH5	18.49	20	
狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂/SI=2, pH6	18.49	20	
狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂/SI=2, pH7	18.49	20	
狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂/SI=1, C/N=20	9.25	10	
狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂/SI=1, C/N=30	9.25	10	
狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂/ SI=1, C/N=40	9.25	10	
狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂混摻 1%廢水	4.7	-	

<p>狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂混摻 3%廢水</p>	<p>14.1</p>	<p>-</p>	
<p>狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂混摻 5%廢水</p>	<p>23.5</p>	<p>-</p>	

參. 主要發現與結論

(一)料源基本性質分析

表二、總固體含量、化學需氧量分析結果

料源條件	總固體含量 ^{註1} (Total Solid, TS)	揮發性固體含量 ^{註2} (Volatile Solid, VS)	化學需氧量 ^{註3} (Chemical Oxygen Demand, COD, mg/g)	
			原料狀態	乾燥後
稻稈, R1	15.98	89.81	246	1542
稻稈, R2	20.80	88.46	327	1577
稻稈, R3	24.87	85.31	374	1502
稻稈, R4	23.40	84.42	364	1557
狼尾草, 酸蒸氣爆裂	20.65	92.90	223	1082
狼尾草, SE1	21.40	92.20	262	1224
狼尾草, SE2	22.04	92.80	304	1378
料源條件	總固體含量 ^{註1} (Total Solid, TS)	揮發性固體含量 ^{註2} (Volatile Solid, VS)	化學需氧量 ^{註3} (Chemical Oxygen Demand, COD, g/g)	
			原料狀態	乾燥後
酸蒸氣爆裂稻 稈 R5	31.80	89.60	0.480	1.510

酸催化蒸氣爆裂狼尾草 SE3	20.70	92.80	0.288	1.392
蒸氣爆裂狼尾草 SE4	22.00	89.50	0.281	1.279

註 1. 總固體含量計算方式係利用取回原料扣除液體重後剩餘之固體重量計算，計算公式為： $(\text{濕重}-\text{水份})/\text{濕重}*100\%$

註 2. 揮發性固體含量計算方式係利用總固體含量之重量扣除灰份後之固體重量計算，計算公式為： $(\text{TS 重}-\text{灰分})/\text{TS 重}*100\%$

註 3. 化學需氧量原料狀態表示方式為每克濕重含有化學需氧量克數(COD mg/ wet-g)

(1) 元素分析

表三、元素分析結果

料源條件	碳 (Carbon, %)	氮 (Nitrogen, %)	氫 (Hydrogen,%)	碳氮比(C/N)
狼尾草, 酸蒸氣爆裂	45.3054	1	6.235	45.305

(二) 批次式搖瓶實驗

表四、批次式搖瓶產氣結果

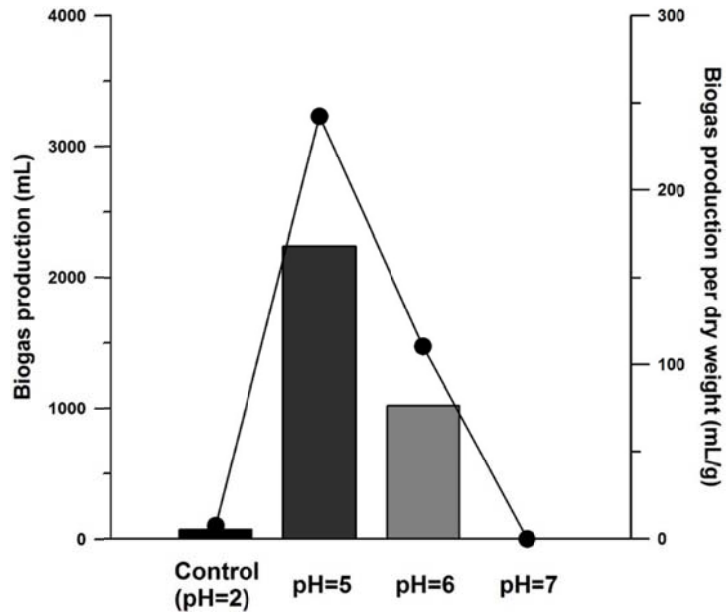
料源條件	總產氣量 (mL)	甲烷 (%)	二氧化碳 (%)	產氣潛能 (biogas-mL/VS)
稻稈, R1, S/I=1	1160	66	25	193.97
稻稈, R1, S/I=2	825	49	19	68.98
稻稈, R1, S/I=3	0	0	-	0
稻稈, R1, S/I=4	0	0	-	0
稻稈, R2, S/I=1	1045	64	23	186.27
稻稈, R2, S/I=2	1295	55	23	115.42
稻稈, R2, S/I=3	130	19	28	7.72
稻稈, R2, S/I=4	0	0	1	0
稻稈, R3, S/I=1	310	55	26	54.64
稻稈, R3, S/I=2	1140	50	27	100.47
稻稈, R3, S/I=3	1070	37	13	62.87

S/I=3				
稻稈, R3, S/I=4	0	0	-	0
稻稈, R4, S/I=1	660	47	23	120.91
稻稈, R4, S/I=2	650	36	8	59.54
稻稈, R4, S/I=3	0	27	5	0
稻稈, R4, S/I=4	50	0	2	2.29
狼尾草, 酸 蒸氣爆裂, S/I=1	160	9	2.5	18.6
狼尾草, 酸 蒸氣爆裂, S/I=2	70	6	5	4.08
狼尾草, 酸 蒸氣爆裂, S/I=3	0	0	0	0
狼尾草, 酸 蒸氣爆裂, S/I=4	0	0	0	0
狼尾草, SE1, S/I=1	1325	32	4	175.93

狼尾草, SE1, S/I=2	0	0	0	0
狼尾草, SE1, S/I=3	0	0	0	0
狼尾草, SE1, S/I=4	335	7	8	11.12
狼尾草, SE2, S/I=1	1175	69	20	174.13
狼尾草, SE2, S/I=2	1705	30	20	126.34
狼尾草, SE2, S/I=3	655	15	6.4	32.35
狼尾草, SE2, S/I=4	205	0	3.6	7.59

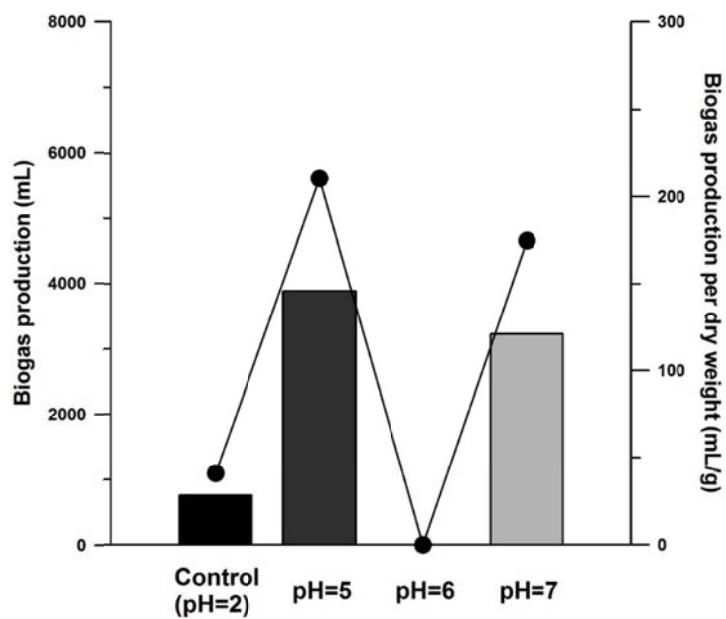
(三) 狼尾草酸催化蒸氣爆裂調整生產沼氣

1. 酸蒸氣爆裂狼尾草解聚物調整 pH 值生產沼氣



圖二、酸蒸氣爆裂狼尾草原料 S/I=1 調整 pH 累積產沼氣圖

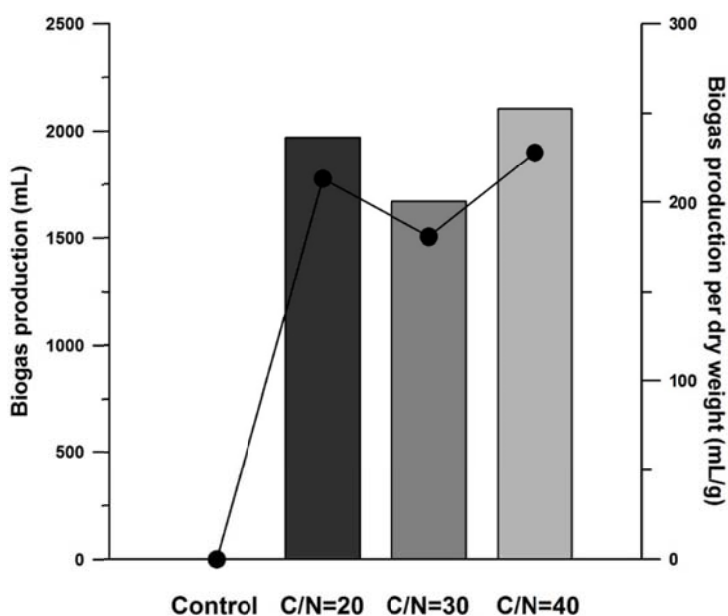
(bar 對應左邊縱軸沼氣產量、line 對應右邊縱軸每克乾重沼氣產量)



圖三、酸蒸氣爆裂狼尾草原料 S/I=1 調整 pH 累積產沼氣圖

(bar 對應左邊縱軸沼氣產量、line 對應右邊縱軸每克乾重沼氣產量)

2. 酸蒸氣爆裂狼尾草解聚物調整 C/N 值生產沼氣



圖四、以酸蒸氣爆裂狼尾草原料 S/I=1 調整 C/N 比之累積產沼氣

圖(bar 對應左邊縱軸沼氣產量、line 對應右邊縱軸每克乾重沼氣產量)

表五、狼尾草酸催化蒸氣爆裂產沼氣比較表

料源/條件	產氣潛能 (biogas-mL/VS)	甲烷 (%)	二氧化 碳	理論產 氣效率

			(%)	(%)
狼尾草/酸催化蒸氣爆裂/SI=1 不調整(pH=2.3)	7.43	57	21	2
狼尾草/酸催化蒸氣爆裂/SI=1, pH5	224.82	58	21	64
狼尾草/酸催化蒸氣爆裂/SI=1, pH6	102.19	59	23	29
狼尾草/酸催化蒸氣爆裂/SI=1, pH7	0	0	29	0
狼尾草/酸催化蒸氣爆裂/SI=2 不調整(pH=2.3)	38.09	19	31	11
狼尾草/酸催化蒸氣爆裂/SI=2, pH5	195.09	63	24	56
狼尾草/酸催化蒸氣爆裂/SI=2, pH6	0	15	23	0
狼尾草/酸催化蒸氣爆裂/SI=2, pH7	162.58	27	28	46
狼尾草/酸催化蒸氣爆裂	197.88	64	26	56

裂/SI=1, C/N=20				
狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂/SI=1, C/N=30	168.15	61	26	48
狼尾草/酸催化蒸氣爆 裂/ SI=1, C/N=40	210.88	68	32	60