

# 研析電輔助厭氧消化績效及其微生物代謝途徑

## Evaluation of Biogas Production and Microbial Metabolic Pathways of Electro-Anaerobic Digestion

國立臺灣大學  
生物環境系統工程學系

碩士班研究生  
蔡子揚  
Jyi-Yong Chai

副教授  
蕭友晉  
Yo-Jin Shiau

副教授  
潘述元  
Shu-Yuan Pan

### 摘要

能源轉型是實現 2050 年淨零碳排放的關鍵策略，其中廢棄物衍生的生質能源在減緩溫室氣體排放中扮演重要角色。厭氧消化 (Anaerobic Digestion, 簡稱 AD) 可透過水解、酸化、產酸與產甲烷四個階段，將有機廚餘轉化為甲烷；然而，傳統 AD 系統常面臨水解反應緩慢、揮發性脂肪酸累積及微生物生長受抑制等問題，導致甲烷產率降低。電場輔助厭氧消化 (Electro-Anaerobic Digestion, 簡稱 EAD) 藉由施加低電壓電流，促進發酵菌與產甲烷菌之間直接胞間電子傳遞 (Direct Interspecies Electron Transfer, 簡稱 DIET)，跳過傳統需經擴散的氫氣與甲酸等解釋，進而有效克服上述的電子傳遞限制、提升甲烷產量。近年來台灣由於政策趨嚴，廚餘作為養豬飼料的使用逐漸受限，導致堆肥與厭氧消化等資源循環方式受到更多關注。本研究以廚餘為基質，於 1 公升批次反應器中測試 0 至 0.9 V 的 EAD 操作條件，並比較不同電壓下的甲烷產量、COD 去除率與電極生物膜形態差異；同時透過微生物菌相分析以及基因組學分析，以辨識其代謝路徑在不同電壓下的改變。此外，本研究也結合動力學模型與生命週期評估以量化系統效率與環境影響。初步結果顯示，在約 0.6 V 下甲烷產量最高，而較高電壓 (例如 1.2 V) 則會抑制產甲烷菌活性；推測 1.2 V 時電流的波動與胞外電子傳遞基因表現變異有關。本研究釐清電壓驅動下微生物的行為模式與代謝機制，並有助於建立優化的 EAD 模型，以提升甲烷產能與系統永續性。

關鍵詞：生質能源，電驅動厭氧消化，直接胞間電子傳遞，功能性基因

## Abstract

Energy transition is a critical strategy for achieving net-zero carbon emissions by 2050, with waste-derived bioenergy playing an important role in mitigating greenhouse gas emissions. Anaerobic digestion (AD) transforms organic kitchen waste into methane through four stages: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis. However, conventional AD systems often suffer from slow hydrolysis, volatile fatty acid accumulation, and inhibition of microbial growth, leading to reduced methane yields. Electro-assisted anaerobic digestion (EAD) addresses these limitations by applying low-voltage current to promote direct interspecies electron transfer (DIET) between fermentative bacteria and methanogens, bypassing the need for diffusible intermediates such as hydrogen and formate. This approach improves electron transfer efficiency and enhances methane production. In recent years, stricter policies in Taiwan have limited the use of food waste as animal feed, leading to increased attention on composting and anaerobic digestion as resource recovery methods. In this study, kitchen waste was used as the substrate in 1-L batch reactors, and EAD was tested under applied voltages ranging from 0 to 0.9 V. Methane yield, COD removal efficiency, and electrode biofilm morphology were compared under different voltage conditions. Microbial community structures and metabolic pathways under varying voltages were also analyzed through microbial profiling and genomic analysis. In addition, kinetic modelling and life cycle assessment were conducted to quantify system performance and environmental impact. Preliminary results showed that methane production peaked at approximately 0.6 V, while higher voltages (e.g., 1.2 V) inhibited methanogenic activity. These inhibitory effects were associated with current fluctuations and variations in the expression of extracellular electron transfer genes. This study clarifies the microbial behaviour and metabolic mechanisms influenced by applied voltage, and contributes to the development of optimized EAD models to improve methane yield and overall system sustainability.

Keyword: Bioenergy, Electro-AD, Direct Interspecies Electron Transfer, Functional Gene

## 一、前言

能源轉型是實現 2050 年淨零碳排放的關鍵策略，其中廢棄物衍生的生質能源在減緩溫室氣體排放中扮演重要角色<sup>[1]</sup>。以廚餘為主的有機廢棄物流近年來已成為資源治理與減碳的核心議題；其大量產生不僅帶來環境與經濟負擔，亦因全球人口成長、人口結構變遷及氣候變遷對農業生產力之衝擊，而在糧食安全面向愈發受關注<sup>[2]</sup>。近年來台灣由於政策趨嚴，廚餘作為養豬飼料的使用逐漸受限，導致堆肥與厭氧消化等資源循環方式受到更多關注<sup>[3]</sup>。針對廚餘增值化路徑的比較中，厭氧消化相較於焚化、掩埋與堆肥等技術，展現出較低的潛在環境影響與較高的能源回收效益；廚餘經厭氧消化產生之沼氣若進一步轉為電力或熱能，可抵銷既有處理鏈所造成的部分環境負荷，降低整體衝擊並提升循環效益<sup>[4]</sup>。

AD 可透過水解、酸化、產酸與產甲烷四個階段，將廚餘轉化為甲烷<sup>[5,6]</sup>；儘管 AD 技術發展歷史已有數十年，但仍面臨著甲烷產率低效之挑戰。AD 因過程涉及多種微生物的複雜交互作用，因此系統的穩定性也將高度依賴於這些微生物群落<sup>[5]</sup>，其中，主要挑戰包括：（1）水解階段的長延滯期，特別是在處理複雜有機物時，水解細菌需要更多時間降解基質<sup>[7]</sup>；（2）酸化階段是厭氧消化過程中最快的階段，揮發性脂肪酸積累會降低 pH 值，進而抑制產甲烷作用<sup>[8]</sup>；（3）乙酸化細菌對氫氣的分壓非常敏感，過多氫氣會抑制其生長，因此，酸化和乙酸化階段產生的氫氣必須被高效利用以維持系統平衡<sup>[5]</sup>；（4）AD 系統中的主要產甲烷菌—乙酸營養型甲烷菌，生長速度較慢，且對操作條件的變化極為敏感，進一步限制了甲烷生成速率<sup>[9-12]</sup>。

EAD 透過引入陽極和陰極電極，利用外部電源保持穩定的電位差，顯著提高對電子之可用性，加速系統產甲烷之效率<sup>[13,14]</sup>。作為 EAD 系統之核心組成，電活性細菌（Electroactive Bacteria）利用 DIET，將電子從細胞高效傳遞至電極或甲烷菌，顯著提升甲烷生成速率<sup>[15]</sup>。相比傳統 AD 的間接種間電子傳遞（Indirect interspecies electron transfer，簡稱 IIET），DIET 不依賴中間產物（例如乙酸、氫氣和甲酸），避免了中間產物積累對系統穩定性的影響<sup>[16]</sup>。DIET 可透過微生物納米導線或膜相關細胞色素直接進行電子交換，於高有機負荷下表現出更高之效率和適應性<sup>[16-18]</sup>；此外，EAD 可增強種間氫氣傳遞（Interspecies Hydrogen Transfer，簡稱 IHT），產氫細菌在陰極利用電子生成氫氣，氫營養型甲烷菌則將氫氣和二氧化碳還原為甲烷，DIET 與 IHT 之協同作用顯著提升甲烷生成之效率<sup>[19]</sup>。然而，EAD 技術的理論與應用仍存在多項未解問題，其中包括微生物群落組成、代謝機制、關鍵操作參數之判定與系統規模化方法。在眾多操作因子中，施加電壓、pH、溫度、電極材料及水力停留時間等，均對系統性能影響顯著，其中以施加電場（電壓）最為關鍵，可直接決定系統能效與甲烷產量<sup>[20,21]</sup>。因此，本研究以電壓調控為起點，並綜合考量微生物代謝機制、動力學模型及生命週期評估等面向，以加速 EAD 技術本土化放大示範之時程。

## 二、研究方法

### 2.1 實驗材料

本研究使用之廚餘依固定配方調製（米飯 35 g、豬五花 35 g、蔬菜 20 g、水 350 mL），再以攪拌粉碎成漿後置於 4 °C 冰箱保存；接種污泥則取自嘉義市之養豬場所。表 1 列出本研究所使用之廚餘與污泥的化學特性。

表 1、廚餘與污泥的化學特性

指標	廚餘	污泥
pH 值	6.38	7.72
導電度 (mS/cm)	4.53	8.95
COD (mg/L)	39,900	-
總固體 (TS, %)	5.89	3.42
揮發性固體 (VS, %)	5.69	5.01

## 2.2 實驗設置

本研究以 1 L 血清瓶進行批次反應，反應溫度維持在 37°C。各瓶依揮發性固體 (VS) 比 1:2 裝填廚餘與接種污泥，總工作體積 0.9 L，置於恆溫水浴並以磁力攪拌器 (400 rpm) 持續運轉 40 天，詳如圖 1 所示。電極採 80 × 40 × 10 mm 石墨氈，極板間距 40 mm，分別施加 0.3 V、0.6 V 與 0.9 V 低電壓，且各電壓條件皆設三組平行試驗。啟動前加入馴化培養液 (NaHCO<sub>3</sub> 10 g/L、CH<sub>3</sub>COONa 10 g/L、NH<sub>4</sub>Cl 0.5 g/L、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.1 g/L、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.1 g/L) 與葡萄糖 5 g/L，以供微生物碳源與能量。最後以氮氣置換瓶內氣體，以確保厭氧環境後開始反應。

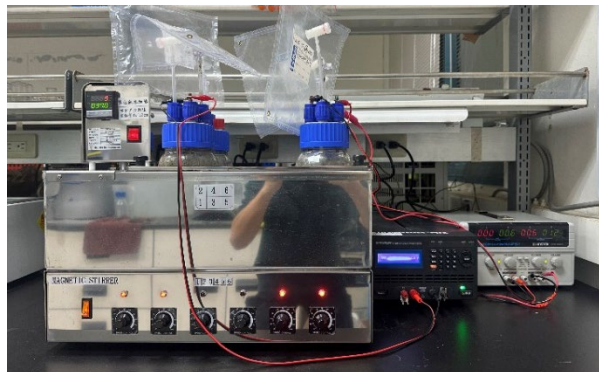


圖 1、電驅動厭氧消化系統設置圖

## 2.3 效益評估

本研究的整體效益評估分為甲烷生成表現、微生物機制及環境影響三層面。首先，電場增益因子 (Ee) 量化厭氧消化與電輔助厭氧消化的甲烷提升幅度 Ee > 0 則證明外加電場可進一步增產甲烷，Ee < 0 則可能抑制產氣。其中 P<sub>EAD</sub> 以及 P<sub>AD</sub> 為 EAD 以及 AD 系統的甲烷產量。

$$E_e = \frac{P_{EAD} - P_{AD}}{P_{AD}} \times 100\% \quad (1)$$

累積甲烷產量再以修正 Gompertz 式擬合，求得最大產氣潛力 (Y<sub>max</sub>)、最高產率 (μ<sub>max</sub>) 與遲滯期 (λ)，以比較不同操作條件的動力學差異。

$$Y(t) = Y_{max} \times e^{-e^{\frac{\mu_{max}}{Y_{max}} \times (\lambda - t) \times e + 1}} \quad (2)$$

其次，為闡明產氣途徑，本研究將收取各樣本組反應末期之水樣，進行 DNA 萃取，以利進行微生物菌相以及基因組學分析，辨識其代謝路徑在不同電壓下的改變。最後，將採生命週期評估的方法，將基質、電力與設備能耗納入系統邊界，並輸出沼氣與沼渣，暫不計入沼渣之應用價值、資本及運輸等，以比較各技術的整體淨效益。

### 三、結果與討論

#### 3.1 沼氣產氣量分析

本研究於初次模擬實驗中先分別以 0 V、0.6 V、1.2 V 及 1.8 V，進行電壓操縱範圍區間之分析。在本批次 EAD 模擬實驗中，施加電壓明顯影響甲烷生成動態，其中 0.6 V 最能加速啟動系統產氣表現並可最快達到最高峰值，於第 12–14 天日產甲烷約達 16–17 mL g<sup>-1</sup> VS，之後維持在約 6–10 mL g<sup>-1</sup> VS 的穩定區間；1.2 V 初期表現遲滯（約第 10 天後才明顯上升），但後期逐步提升，於第 25–28 天達約 8–10 mL g<sup>-1</sup> VS；1.8 V 僅呈 0–2 mL g<sup>-1</sup> VS 的低產量且有下滑趨勢；對照組 0 V 則近乎無產氣。初步結果顯示，適度電壓（0.6 V）可有效刺激甲烷生成，而過高電壓（≥1.2 V，尤以 1.8 V）則造成抑制或需長時間馴化。就以廚餘為基質之 1 L 反應器而言，0.6 V 為快速且高效的條件，1.2 V 可做為較長期穩態的候選，而 1.8 V 不宜採用。

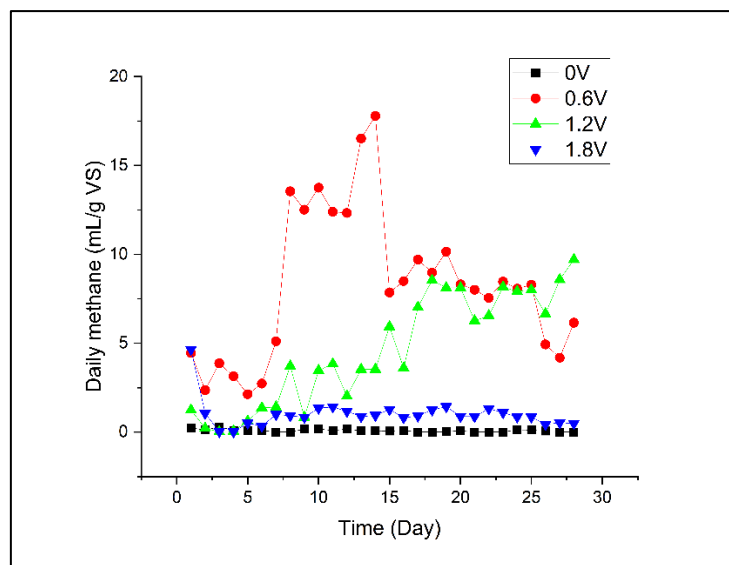


圖 2、沼氣中甲烷日產量

#### 3.2 電流變化分析

延續上述模擬實驗，本研究觀察到 0.6 V 組在反應期間僅維持在 0.05 – 0.12 A 的低而平穩電流，而 1.2 V 組呈現劇烈起伏，甚至偶有出現其電流高於 1.8 V 組之情況（詳

如圖3所示)，初步推測為微生物菌相對電位變動之適應性與其直接胞間電子傳遞相關基因的表現量有關，實際發生情形則需透過微生物菌相以及基因組學的分析結果來佐證。

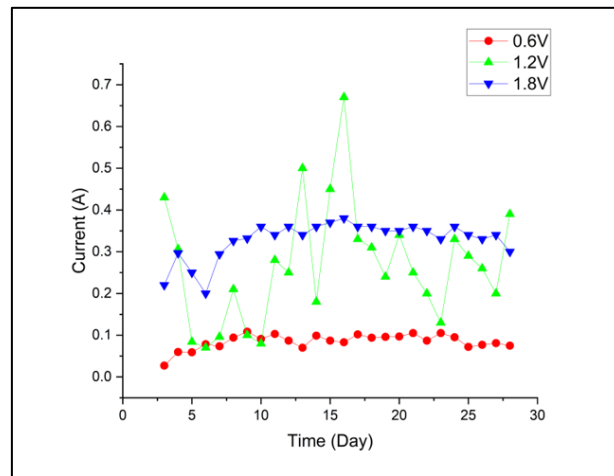


圖 3、電流變化趨勢圖

#### 四、結論

本研究初步證實適度外加電壓可顯著強化甲烷產量；其中，0.6 V 組最符可在 30 天內取得最高累積產氣與最穩定之甲烷含量，其電流僅 0.05–0.12 A、電化學負擔低。相較之下，1.2 V 雖短暫衝高電流與甲烷比例，但整體產氣表現還是少於 0.6 V 組，而 1.8 V 更因氧化壓力導致產氣量與甲烷含量雙雙下降。為深化本研究成果，後續將再規劃一次實驗：以 0.0 V、0.3 V、0.6 V 及 0.9 V 三組微電壓組（各設三重複）運行 1 L 批次反應器，並進行微生物菌相與基因體分析；同時以修正 Gompertz 模型擬合產氣動力學，藉以拆解各階段水解、酸化與產甲烷速率常數對電位的靈敏度。後續也會利用生命週期評估，重新量化單位甲烷之能耗、碳足跡與潛在經濟收益，驗證 0.6 V 是否仍為全局最優，或在更精細區段出現次最佳平衡點。此一多尺度驗證流程可完整鏈結「電壓 → 微生物機制 → 反應動力學 → 系統效益」，為 EAD 之工業化設計與營運策略提供更精確的科學依據。

## 五、參考文獻

1. IEA, *Energy Technology Perspectives 2023*, International Energy Agency. p. 464.2023
2. Roy, P., et al., "A review on the challenges and choices for food waste valorization: environmental and economic impacts," *ACS environmental Au*, Vol. 3, No. 2, pp. 58-75, 2023.
3. Tsai, W.-T. and Y.-Q. Lin. "Analysis of promotion policies for the valorization of food waste from industrial sources in Taiwan," *Fermentation*, Vol. 7, No. 2, pp. 51, 2021.
4. Shih, M.-F., C.-Y. Lin, and C.-H. Lay. "Comparison of potential environmental impacts and waste-to-energy efficiency for kitchen waste treatment scenarios in central Taiwan," *Processes*, Vol. 9, No. 4, pp. 696, 2021.
5. Anukam, A., et al., "A review of the chemistry of anaerobic digestion: Methods of accelerating and optimizing process efficiency," *Processes*, Vol. 7, No. 8, pp. 504, 2019.
6. Meegoda, J.N., et al., "A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion," *International journal of environmental research and public health*, Vol. 15, No. 10, pp. 2224, 2018.
7. Lohani, S.P. and J. Havukainen. "Anaerobic digestion: factors affecting anaerobic digestion process," *Waste bioremediation*, Vol., No., pp. 343-359, 2018.
8. Uddin, M.M. and M.M. Wright. "Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances," *Physical Sciences Reviews*, Vol. 8, No. 9, pp. 2819-2837, 2023.
9. Zakaria, B.S. and B.R. Dhar. "Progress towards catalyzing electro-methanogenesis in anaerobic digestion process: Fundamentals, process optimization, design and scale-up considerations," *Bioresource technology*, Vol. 289, No., pp. 121738, 2019.
10. Cai, W., et al., "mcrA sequencing reveals the role of basophilic methanogens in a cathodic methanogenic community," *Water research*, Vol. 136, No., pp. 192-199, 2018.
11. Wang, H., I.A. Fotidis, and I. Angelidaki. "Ammonia effect on hydrogenotrophic methanogens and syntrophic acetate-oxidizing bacteria," *FEMS microbiology ecology*, Vol. 91, No. 11, pp. fiv130, 2015.
12. Jiang, Y., et al., "Quantifying the percentage of methane formation via acetoclastic and syntrophic acetate oxidation pathways in anaerobic digesters," *Waste Management*, Vol. 71, No., pp. 749-756, 2018.
13. Sydow, A., et al., "Electroactive bacteria—molecular mechanisms and genetic tools," *Applied microbiology and biotechnology*, Vol. 98, No., pp. 8481-8495, 2014.
14. Moscoviz, R., et al., "Electro-fermentation: how to drive fermentation using electrochemical systems," *Trends in biotechnology*, Vol. 34, No. 11, pp. 856-865, 2016.
15. Zhao, Z., et al., "Evaluation on direct interspecies electron transfer in anaerobic sludge digestion of microbial electrolysis cell," *Bioresource technology*, Vol. 200, No., pp. 235-244, 2016.
16. Baek, G., et al., "Role and potential of direct interspecies electron transfer in anaerobic digestion," *Energies*, Vol. 11, No. 1, pp. 107, 2018.
17. Wang, B., et al., "Microbial fingerprints of methanation in a hybrid electric-biological anaerobic digestion," *Water Research*, Vol. 226, No., pp. 119270, 2022.
18. Yu, J., S. Kim, and O.-S. Kwon. "Effect of applied voltage and temperature on methane production and microbial community in microbial electrochemical anaerobic digestion systems treating swine manure," *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, Vol. 46, No. 7, pp. 911-923, 2019.
19. Liu, W., et al., "Microbial electrolysis contribution to anaerobic digestion of waste activated sludge, leading to accelerated methane production," *Renewable Energy*, Vol. 91, No., pp. 334-339, 2016.

20. Mendoza-Tinoco, T.P., et al., "How does a low-magnitude electric field influence anaerobic digestion in wastewater treatment? A review," *Chemosphere*, Vol. 325, No., pp. 138402, 2023.
21. Liu, S., et al., "Contribution of electrodes and electric current to process stability and methane production during the electro-fermentation of food waste," *Bioresource technology*, Vol. 288, No., pp. 121536, 2019.