

大綱

一、前言

二、以可控電穿孔脈衝電場技術提升 *Chlorella* 脂質萃取率之研究

三、應用脈衝電場技術高效萃取 *Nannochloropsis salina* 脂質之綠色永續方法

四、*Auxenochlorella protothecoides* 經脈衝電場處理與油脂萃取後，透過厭氧消化技術進行整體利用

五、結論

摘要

隨著能源危機與淨零政策推動，微藻因具備高光合效率、高脂質含量及不佔耕地等優勢，被視為極具潛力的生質能源與功能性脂質來源。然而，微藻細胞壁結構堅固，對脂質釋放造成障礙，傳統破壁方法如超音波、機械研磨與酵素水解常面臨效率不足、能耗高及製程放大困難等挑戰。本研究旨在評估脈衝電場 (pulsed electric field, PEF) 技術作為一種非熱、低能耗且可控的細胞破壁方式，應用於提升微藻的脂質萃取效率與資源利用潛力。PEF 透過高電場脈衝誘導 *Chlorella* 細胞膜產生可逆性電穿孔，提升膜通透性，促進胞內脂質與水溶性成分釋放。實驗結果顯示，導電度 (σ) 與電場強度 (E) 會共同影響比能量輸入 (Wsp) 與細胞穿孔率，進而控制脂質萃取率。在 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 導電度與 35 kV/cm 電場條件下，*Chlorella* 的脂質回收率可達 25.5%，穿孔率達 83.8%，為最佳萃取表現，但若電場強度過高則反而導致細胞過度破壞與脂質流失。在 *Nannochloropsis* 實驗中，PEF 處理後導電度明顯提升，樣品 3 (20 kV/cm, 400 Hz, 30 min) 之導電度增加達 38%，顯示其破壁效果最佳。透過光學顯微鏡觀察可見胞外油滴釋出，細胞結構多數仍完整，證明 PEF 為一種以可逆性破壁為主的高選擇性技術。比較不同培養液條件發現，在低導電度蒸餾水中進行 PEF (PEF-DW) 可提升油脂回收至 2.59 g，優於 RM 培養基 (1.275 g)，且高於超音波處理 (2.36 g)，證明 PEF 對脂質萃取更具效率與穩定性。進一步針對 *Auxenochlorella protothecoides* 進行放大實驗時發現，其生物質組成分析結果顯示其脂質含量達 39.8%、碳水化合物 23.9%、蛋白質 9.1%、灰分僅 1.4%，具有作為生質能源與高值原料的潛力。PEF 處理後，懸浮液導電度由原始的 1070 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 急劇上升至 2290 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，顯示細胞膜已發生有效穿孔，胞內帶電離子與小分子物質迅速釋出，證實電場處理對細胞通透性具顯著影響。在小體積 5 mL 操作下，脂質回收率高達 98.1%；放大至 300 mL 時，仍可維持 59.5% 與 78.7% 的高回收率，顯示其具實際規模應用潛力。綜合而言，本研究證實 PEF 為一項高效能、低能耗、非熱、具選擇性與可放大的微藻破壁與脂質萃取技術，適用於細胞壁堅固的海水或淡水藻種。其可顯著提升脂質萃取效率與品質，並降低後續加工複雜度與能耗，未來在生質能源、功能性脂質、保健食品與綠色生技製程等領域皆具高度應用潛力與發展價值。

参考文献

- Kermani, M., Samimi, A., Mohebbi-Kalhari, D., Beigmoradi, R., Shokrollahzadeh, S., Xia, A., Sun, C., Sun, F., Ashori, A., & Madadi, M. (2024). Pulsed Electric Field Treatment for Efficient oil Extraction from *Nannochloropsis salina* Microalgae: A Green and Sustainable Approach. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(11), 5888-5901.
- Straessner, R., Nikolausz, M., Silve, A., Nazarova, N., Wuestner, R., Papachristou, I., Akaberi, S., Leber, K., Mueller, G., & Frey, W. (2023). Holistic exploitation of pulsed electric field (PEF)-treated and lipid extracted microalgae *Auxenochlorella protothecoides*, utilizing anaerobic digestion (AD). *Algal Research*, 69, 102950.
- Zhang, R., Gu, X., Xu, G., & Fu, X. (2021). Improving the lipid extraction yield from *Chlorella* based on the controllable electroporation of cell membrane by pulsed electric field. *Bioresource Technology*, 330, 124933.