

2024 年【科學探究競賽—這樣教我就懂】

普高組 成果報告表單

題目名稱：微生物燃料電池結合外加磁場與 TiO₂ 海綿--對於提升產電與柴油降解效率之潛能評估

一、摘要

柴油汙染已然造成嚴重的生態危機，我們藉由微生物快速生長與代謝有機物的特性，結合 MFC 解決油汙。將自製 PVB-TiO₂ 海綿加入 MFC 陽極反應室中，在兩側添加釹磁鐵形成外加磁場。為提升 MFC 代謝柴油效能，我們探討 MFC 電極種類、PVB-TiO₂ 海綿的 TiO₂ 添加濃度、磁鐵數量與方向等參數。實驗顯示，添加 PVB-TiO₂ 海綿(12 g/L)及外加相斥兩顆磁場，對 COD 降解率、平均輸出電壓、VFA 代謝產量與柴油降解率，較未添加組有最顯著提升。分別達成 COD 降解率增為 1.4 倍、平均輸出電壓增為 1.8 倍、柴油降解率增為 2.0 倍之效果。預期本實驗未來能對柴油汙染提供解方，降低柴油洩漏對環境的衝擊。

二、探究題目與動機

新聞上經常看到輪船因意外或觸礁導致大量的柴油洩漏，不僅造成水域生態嚴重的汙染，事後的環境恢復與生態平衡更是需要長時間的維護與清除。經過尋找許多資料後，我們著手設計實驗，試利用「微生物燃料電池(Microbial Fuel Cell, MFC)」結合「外加磁場」與「PVB-TiO₂ 海綿」來處理與分解柴油。因此我們利用微生物的特性分解柴油可有效將柴油內的化學能轉化為電能，同時透過外加磁場提升細菌活性，並結合自製 PVB-TiO₂ 海綿，利用 TiO₂ 對柴油進行初步分解。並在實驗最後結合最佳條件之「外加磁場」與「PVB-TiO₂ 海綿」，盡可能製造最佳 MFC 降解柴油條件。

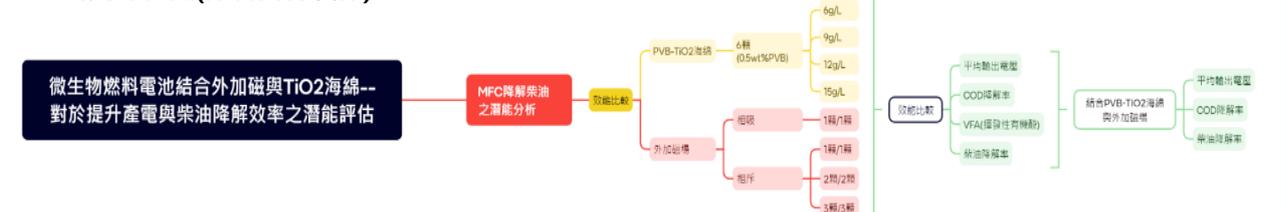
三、探究目的與假設

微生物燃料電池(MFC)對於有機物能夠達到降解的效果，利用微生物的特性分解柴油可有效將柴油內的化學能轉化為電能，同時透過外加磁場提升細菌活性，並結合自製 PVB-TiO₂ 海綿，利用 TiO₂ 對柴油進行初步分解。本實驗最終目的為測試最佳條件之「外加磁場」與「PVB-TiO₂ 海綿」，並結合兩者，盡可能製造最佳柴油降解條件。

- (一)測試並篩選石墨板與發泡鎳電極
- (二)測試不同 TiO₂ 濃度之 PVB-TiO₂ 海綿對 MFC 降解柴油之影響
- (三)測試不同磁場強度與方向對 MFC 降解柴油之影響
- (四)測試結合外加磁場及 PVB-TiO₂ 海綿對 MFC 降解柴油之影響

四、探究方法與驗證步驟

一、研究流程圖(作者自行製作)



Presented with xmind

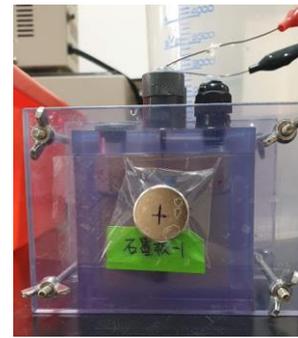
二、MFC 裝置設計、架設及實驗流程

(一)MFC 裝置設計

1. MFC 槽體基本設計：



圖三、微生物燃料電池側視實體+示意圖(作者自行繪製)



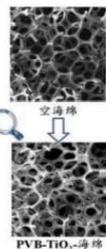
圖四、微生物燃料電池側視實體圖(作者自行拍攝)

在文獻資料中，我們得知有許多不同種類型態的微生物燃料電池(Logan, B. E. & Rabaey, K., 2012)，本實驗最終採用雙槽型微生物燃料電池，槽體使用壓克力構成，外型為正方形結構，內部容積陰陽極相加，中間以質子交換膜相隔，上方均設有連接外部電路的孔洞，並於陽極槽上方裝有曝氣閥，以製造厭氧環境，裝置(如圖三)所示。

2.外加磁場設置方式：

在文獻資料中，我們得知外加磁場可幫助微生物反應，於是我們使用強力釹磁鐵(單顆磁力5(mT))黏貼於槽體陰陽兩槽外側正中央處，藉此產生穩定之靜磁場。

3.PVB-TiO₂ 海綿製備方式：



我們採用 PVB-TiO₂ 海綿，進行降解柴油之潛能測試。PVB-TiO₂ 海綿以 PVB 為黏合劑混合 TiO₂，再附著在 2 mm × 2 mm × 2 mm 聚氨酯海綿立方體(孔徑範圍 100–300µm，孔隙率為 87%)的載體上。海綿使用前用純水洗三遍，

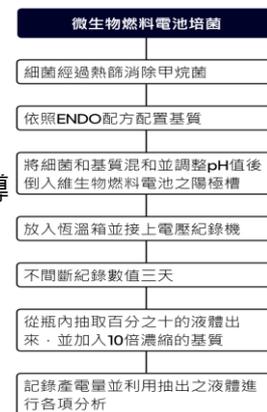
圖五、PVB-TiO₂ 海綿製備流程圖(賴奇厚，2022)

放入超音波清洗器震盪分散後烘乾待用。秤取

定量的 TiO₂ 催化劑加入 200 mL 乙醇中，以超音波震盪後再以磁力攪拌至分散均勻。接著稱取處理後的聚氨酯海綿放入溶液中，磁力攪拌一段時間。再將海綿取出置於 70°C 烘箱至海綿全部烘乾，即製得 PVB-TiO₂ 海綿。

4.MFC 實驗流程：

如圖六，架設系統前，各設備需先經下列前處理：將反應槽清洗乾淨後，將質子交換膜浸泡於 5% 鹽水中一天，之後將發泡鎳電極與外部導電電線連接，中間再夾上 100Ω 之電阻。組裝時，首先將質子交換膜放置於兩槽體的中間，交界面以墊片相隔，以防止在組裝兩槽體時產生孔隙。燃料電池組裝大致完成。為了確保實驗進行中系統不會有漏水的情形產生，以蒸餾水注滿兩個槽體，進行一天的防漏試驗。本部分會重複四次，一次三天，共十四天。



圖六、MFC 架設與更換基質之實驗流程圖(作者自行製作)

三、數據量測

(一)輸出電壓：利用外電阻與生物燃料電池之陰陽極連接，並以多功能電表與電阻之兩端並聯，以電腦持續記錄電表所測得之電壓值(mV)。



圖七、COD 測量流程圖(作者自行製作)

(二)水質分析：pH 值、COD(化學需氧量)

測定所需的反應化學試劑，包括重鉻酸鉀、硫酸、硫酸銀及硫酸汞，按照比例加入，配置在消解瓶中，由於重鉻酸鉀為管制藥品，本方法採用已配置完成的試劑。測量水樣 COD 時，只需將待測樣品放入消解瓶中加熱 2 小時，再用分光光度計出 COD 的吸光值，即可間接測出試液的 COD 值，其流程如圖十。

(三)揮發性有機酸和醇類與長鏈脂肪酸分析：包括乙醇、乙酸，本方法採用火焰電離檢測器(Flame ionization detector, FID)進行分析。燃燒完畢之數據為一線，特定時間段即為特定產物，再以過往製作之檢量線計算面積並帶入求得實際含量。

COD 及柴油降解率之計算：
$$\left(\frac{A - B}{A} \right) \times 100\%$$

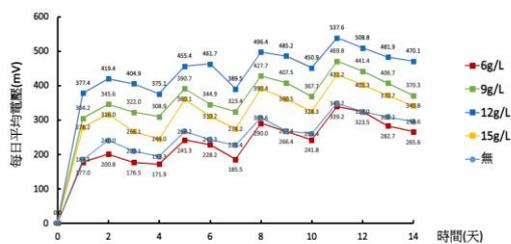
A：反應前 COD 及柴油數值(mg/L)
B：反應後 COD 及柴油數值(mg/L)

四、數據計算與統計

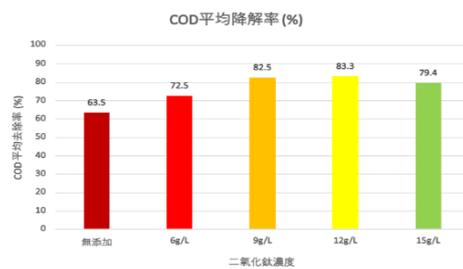
(一)T 檢定：我們利用 T 檢定，確認各組別與對照組是否有顯著差異(P<0.05)，選定待測組別與對照組，以單尾分配與成偶進行分析。

五、結論與生活應用

一、添加 PVB-TiO₂ 海綿



圖八、TiO₂ 濃度對輸出電壓之關係圖



圖九、TiO₂ 濃度對 COD 平均降解率關係圖

(一)平均輸出電壓：根據圖八可看出：

1. 根據實驗設計，我們會在第一、四、七、十天會更換基質，以維持細菌生長所需，故所有組別在更換基質隔天，產電皆會上升，而不同 TiO₂ 濃度(6g/L、9g/L、12g/L、15g/L)平均電壓皆有隨著天數逐漸上升之趨勢。
2. 以此 14 天之產電數據取平均：TiO₂ 濃度：12g/L>9g/L>15g/L>無添加≈6g/L

- 實驗測試至第 11 天時，添加 12g/L TiO₂ 之 PVB-TiO₂ 海綿之平均電壓達到最高 537.6 mV，達到對照組(347.7mV)之 1.9 倍，顯示對產電有顯著提升($P=1.1 \times 10^{-9}$)。
- 最終結果顯示，添加 12g/L TiO₂ 之 PVB-TiO₂ 海綿為其中提升產電效率最佳之條件。

(二)COD 降解率

根據圖九及表一可看出：

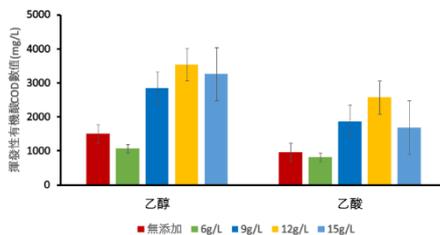
表一、TiO₂ 濃度對 COD 降解率各輪次數數據

- 添加 12g/L TiO₂ 之 PVB-TiO₂ 海綿之 COD 平均降解率最高，達到 83.3%，為無添加(63.5%)之 1.3 倍，顯示 12g/L TiO₂ 之 PVB-TiO₂ 海綿對 COD 降解率顯著提升。
- COD 降解率高，表示水中的有機物可有效的被微生物分解。所有添加 PVB-TiO₂ 海綿之組別，降解率皆較無添加上升，結果顯示，PVB-TiO₂ 海綿對提升 COD 降解率有顯著效果($P=1.0 \times 10^{-4}$)。

COD降解率(%)					
	無添加	6g/L	9g/L	12g/L	15g/L
Round 1	58.5	65.5	75.6	76.4	71.5
Round 2	65.3	72.3	81.8	85.2	78.5
Round 3	61.7	74.2	82.7	80.5	79.6
Round 4	68.6	78.1	90.2	91.1	88.2
平均值	63.5	72.5	82.5	83.3	79.4

(三)VFA(揮發性有機酸)

根據圖十可看出：

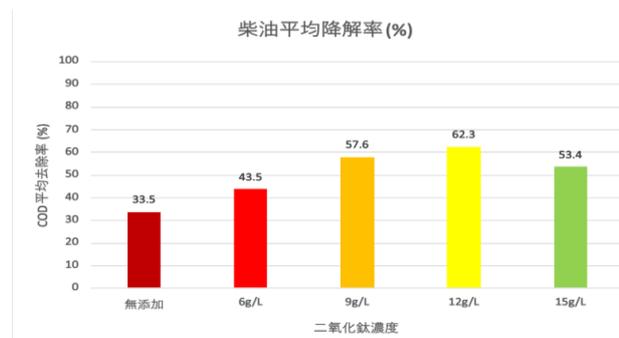


乙醇含量：12g/L > 15g/L > 9g/L > 無添加 > 6g/L

乙酸含量：12g/L > 9g/L > 15g/L > 無添加 > 6g/L

此兩種化合物含量佔 COD 比例高，表示可順利由長碳鏈化合物(柴油(9-18 碳))，降解為短碳鏈化合物(乙酸、乙醇(2 碳))，尤其以 12g/L 之數值最高，表示其降解效果最佳。

圖十、TiO₂ 濃度對 VFA 產量之關係圖



表二、TiO₂ 濃度對柴油降解率各輪次數數據

柴油降解率(%)					
	無添加	6g/L	9g/L	12g/L	15g/L
Round 1	25.3	35.5	48.2	56.2	45.2
Round 2	31.2	41.3	56.6	58.3	46.5
Round 3	35.6	43.2	60.5	61.5	56.3
Round 4	42.3	54.2	65.3	74.2	65.5
平均值	33.5	43.5	57.6	62.3	53.4

圖十一、TiO₂ 濃度對柴油平均降解率關係圖

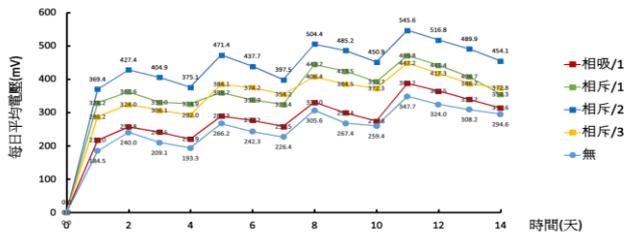
(四)柴油降解率

根據圖十一及表二可看出：

- 柴油平均降解率：TiO₂ 濃度：12g/L > 9g/L > 15g/L > 6g/L > 無添加。
- 柴油降解率高，表示水中的柴油可有效的被微生物分解。所有添加 PVB-TiO₂ 海綿之組別，降解率皆較無添加上升，結果顯示，PVB-TiO₂ 海綿對提升柴油降解率有顯著效果($P=1.3 \times 10^{-4}$)。
- 添加 12g/L TiO₂ 之 PVB-TiO₂ 海綿之柴油平均降解率最高，達到 62.3%，為無添加(33.5%)之 1.85 倍，顯示 12g/L TiO₂ 之 PVB-TiO₂ 海綿對柴油降解率有最顯著提升。

二、添加外加磁場

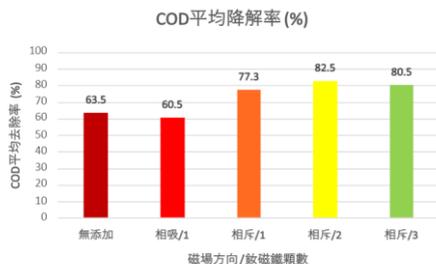
(一)平均輸出電壓：根據圖十二的實驗結果，



圖十二、外加磁場與平均輸出電壓之關係

3. 相斥/1 之平均電壓，較相吸/1 高，如在第 10 天時，兩者的平均電壓差可達 1.43 倍 (391.7V/273.8mV)，顯示磁場相斥的產電效果大於磁場相吸。

(二)COD 降解率



圖十三、外加磁場與 COD 降解率之關係圖

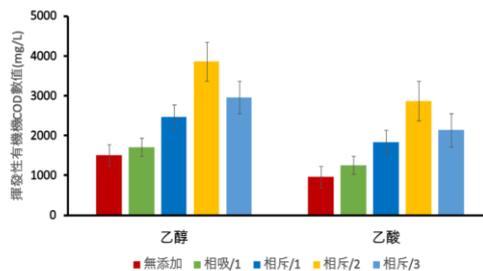
表三、外加磁場對 COD 降解率各輪次表

	COD 降解率 (%)				
	無添加	相吸/1 顆	相斥/1 顆	相斥/2 顆	相斥/3 顆
Round 1	58.5	54.6	71.5	75.3	70.6
Round 2	65.3	63.2	79.2	81.2	81.3
Round 3	61.7	58.3	75.3	83.6	82.3
Round 4	68.6	65.8	83.4	89.5	88.5
平均值	63.5	60.5	77.3	82.5	80.5

根據圖十三及表三的實驗結果，可看出：

1. COD 降解率大小依序為：相斥/2 > 相斥/3 > 相斥/1 > 無添加磁場 > 相吸/1。可看出相斥/2 之 COD 降解率為 82.5%，較其他組別高。
2. COD 降解率高，表示水中的有機物可有效的被微生物分解。與無添加相較，添加相斥/2 的外加磁場，其 COD 降解率為無添加之 1.3 倍 (82.5%/63.5%)。因此，添加相斥/2 的外加磁場，可有效提升 COD 之降解率 ($P=5.2 \times 10^{-4}$)。
3. 相斥/1 之 COD 降解率亦較相吸/1 高，兩者的 COD 降解率可達 1.28 倍 (77.3%/60.5%)，顯示磁場相斥較磁場相吸而言，更能提升 COD 降解率。

(三)VFA(揮發性有機酸)

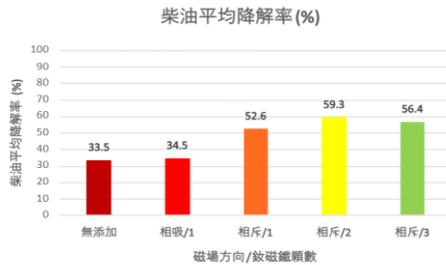


圖十四、外加磁場與 VFA(有機揮發酸) 產量之關係圖

根據圖十四的實驗結果，可看出：1. 揮發性有機酸中，乙醇、乙酸之 COD 數值大小依序為：相斥/2 > 相斥/3 > 相斥/1 > 相吸/1 > 無添加磁場。可看出相斥/2 之乙醇、乙酸濃度，較其他組別高，顯示相斥/2 之柴油降解情況最佳。

2. 可看出不論外加磁場是相斥或相吸，乙醇、乙酸的 COD 數值，均較無添加磁場為高，且相斥/1 > 相吸/1。顯示在微生物燃料電池上額外添加磁場，不論相斥或相吸，均能有助於提升柴油的降解率！而相斥的外加磁場對柴油降解效果又較相吸為佳！

(四)柴油降解率



圖十五、外加磁場與柴油降解率之關係圖

表四、外加磁場對柴油降解率各輪次表格

柴油降解率 (%)					
	無添加	相吸/1顆	相斥/1顆	相斥/2顆	相斥/3顆
Round 1	25.3	29.6	43.6	47.6	45.3
Round 2	31.2	33.2	50.2	56.8	53.6
Round 3	35.6	32.3	57.3	64.3	59.6
Round 4	42.3	43.3	59.3	67.3	68.3
平均值	33.5	34.5	52.6	59.3	56.4

根據圖十五及表四的實驗結果，可看出：

- 1.柴油平均降解率大小依序為：相斥/2 > 相斥/3 > 相斥/1 > 相吸/1 > 無添加磁場。可看出相斥/2 之柴油降解率為 59.3%，較其他組別高。
- 2.與無添加相較，添加相斥/2 的外加磁場，其柴油平均降解率為無添加之 1.77 倍(59.3%/33.5%)。因此，添加相斥/2 的外加磁場，可有效提升柴油降解率($P=1.5 \times 10^{-4}$)
- 3.相斥/1 之柴油平均降解率亦較相吸/1 高，兩者的柴油平均降解率可達 1.52 倍(52.6%/34.5%)，顯示磁場相斥較磁場相吸而言，更能提升柴油降解率。

四、結合 PVB-TiO₂海綿與外加磁場：

表五、結合 PVB-TiO₂海綿與外加磁場對 MFC 效率之比較表

由表五的實驗結果可看出，添加 12g/L 之 PVB-TiO₂ 海綿，或外加相斥/2 顆之磁鐵，對於平均輸出電壓、COD 降解率、VFA 中降解為短碳鏈化合物，抑或柴油降解率，均有最好之提升效果。

結合 PVB-TiO ₂ 海綿與外加磁場				
	無添加	相斥/2顆	12g/LTiO ₂	12g/LTiO ₂ +相斥/2顆
平均輸出電壓	270mV	410mV _(1.51倍)	430mV _(1.59倍)	490mV _(1.81倍)
COD平均降解率	63.5%	82.5% _(1.29倍)	83.3% _(1.31倍)	90.3% _(1.42倍)
柴油平均降解率	33.5%	59.3% _(1.77倍)	62.3% _(1.85倍)	68.3% _(2.03倍)

而我們很好奇，若將兩者結合，同時施加於微生物燃料電池中，是否會比單獨添加之效果更佳？

在做完實驗後，我們將各項分析數據做比較(如表)，可看出：

- 1.不論在平均輸出電壓、COD 降解率、柴油降解率，將 12g/L 之 PVB-TiO₂ 海綿及外加相斥/2 磁場兩者結合，均比單獨添加之效果為佳！
- 2.與無添加相較，結合 12g/L 之 PVB-TiO₂ 海綿及外加相斥/2 磁場之處理，兩者結合之平均輸出電壓可增加 1.81 倍、COD 降解率可增加 1.42 倍、柴油降解率更可增加 2.03 倍！可見將兩者結合，的確可以有效提升微生物燃料電池的輸出電壓及柴油降解率！

參考資料

1. Logan, B. E., & Rabaey, K. (2012). *Conversion of Wastes into Bioelectricity and Chemicals by Using Microbial Electrochemical Technologies*. 337(6095), 686–690.
<https://doi.org/10.1126/science.1217412>
2. 彭美娟、吳沛陽、朱詠蘭(2019)。「綠」治「微」新-微生物燃料電池結合魚菜共生系統。第 60 屆工程學科(二)。 <https://twfntsec.gov.tw/activity/race-1/60/pdf/NPHSF2020-052406.pdf#951>