

2025年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

作品編號	200006
參展科別	環境工程
作品名稱	微生物燃料電池結合外加磁場與TiO ₂ 海綿--對於提升產電與柴油降解效率之潛能評估
就讀學校	國立中科實驗高級中學 財團法人東海大學附屬高級中等學校
指導教師	王郁茜 賴奇厚
作者姓名	王壬亨 柯亘澤 石采穎
關鍵詞	<u>微生物燃料電池、柴油降解、二氧化鈦(TiO₂)</u>

作者簡介



大家好，我們是來自於國立中科實驗高級中學的王壬亨（中）、柯亘澤（右）及東海大學附屬高級中學的石采穎（左），透過進行利用微生物燃料電池降解柴油的實驗，我們提升做實驗時遇到困難的解決能力，也能更有效率地分配做實驗與準備課業的時間。非常感謝在逢甲大學，透過教授與助教的栽培，讓我們能夠成功完成複雜的實驗操作及分析數據！希望我們的發現，未來在面對溢油事故時，能有助於恢復遭受油污污染的海洋環境，為環境盡一份心力！

114年臺灣國際科學展覽會

研究報告

科 別：環境工程科

作品名稱：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

關 鍵 詞：微生物燃料電池、柴油降解、二氧化鈦(TiO₂)

編號：

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。結果顯示，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。

Abstract

Diesel pollution has caused severe ecological crises. We leverage the rapid growth and organic matter metabolism of microorganisms to address oil contamination using Microbial Fuel Cells (MFC). By incorporating a self-made PVB-TiO₂ sponge into the anode chamber of the MFC and adding neodymium magnets on both sides to create an external magnetic field, we aim to enhance the MFC's ability to metabolize diesel. We investigated various parameters, including the type of MFC electrode, the concentration of TiO₂ in the PVB-TiO₂ sponge, and the number and orientation of the magnets. The results showed that adding a PVB-TiO₂ sponge (12 g/L) and applying two repelling magnetic fields significantly improved the COD degradation rate, average output voltage, VFA production, and diesel degradation rate compared to the control group. Specifically, COD degradation increased by 1.4 times, average output voltage by 1.8 times, and diesel degradation by 2.0 times. We anticipate that this experiment could provide solutions for diesel pollution, mitigating its impact on the environment.

壹、前言

一、研究動機

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。

二、研究目的

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

三、文獻探討

(一)水域油汙染處理方式

1. 人為處理

- (1)攔油網：能防止油汙擴散，減少受汙染的區域。
- (2)燃燒法：需採用各種助燃劑，使大量溢油能在短時間內燃燒完，無需複雜裝置，處理費用低，但其產物對海洋生物的生長和繁殖會有所影響。
- (3)撇油器：撇油器是在不改變石油的物理化學性質的基礎上將石油回收。
- (4)吸油材料：可使用親油性的吸油材料，使溢油被黏在其表面而被吸附回收。吸油材料主要用在靠近海岸和港口的海域，用於處理小規模溢油。
- (5)使用分散劑：用化學分子包圍油汙形成油滴小分子，但使用後形成的乳化

溶液，形成穩定溶液後可能導致帶來更長期性的傷害(郭毓璞，2016)。

2. 水域自淨

水域本身就有降解柴油機制，透過各種物理、化學、生物作用來達到降的目的，降解方法分成：擴散、蒸發、乳化、溶解、光氧化、生物降解和沉積(簡孜翰，2016)。

3. MFC

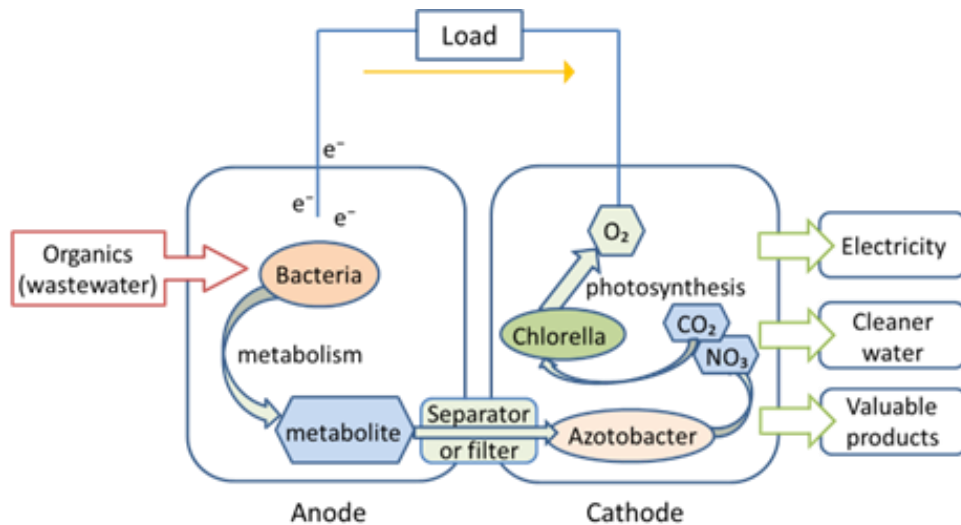
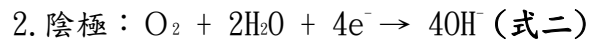
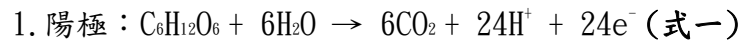
(1)利用石油汙泥分解之*Rhodococcus erythropolis* NTU-1獨特之生物降解和生物吸附能力，結合生物和物理吸附方法，快速移除石油污染物。1%(10,000 ppmV)原油作為探源的實驗中，NTU-1能夠用C10-C32之正直鏈烷，經過2天培養，污染物移除效率約90%。此外，在 Fed-Batch 中，在適當的pH、通氣條件、培養基置換和間歇性的進料條件下，持續操作2週以上，能達90%的原油移除效率 (Liu, C. & Liu, Hwai-Shen, 2011)。

(2)D' Ugo等人開發一個可處理漏油污染的漂浮型生物膜燃料電池系統。漂浮的生物膜通過漂浮的細絲直接連結到水面下的水體。研究結果發現，細絲形成由缺氧引起的異常脂質含量所形成的細絲系統，具有與脊椎動物神經系統突膠質細胞中發現的髓鞘相似的顯著超微結構特徵。在水面上的石油碳氫化合物降解生物膜的生長和呼吸作用優養化的爆發，皆會消耗O₂濃度。此外，水面上優養化的現象阻止藻類光合作用產生的氧氣溶解在水中，造成透光區的缺氧環境，進而誘導水體中會產生電子的菌群孳生。因為菌群的呼吸作用，電子接受者除O₂之外，其他如重金屬、硫酸鹽、硝酸鹽或可能造成晶體沉積。因為缺氧環境，連同石油洩漏造成的化學污染物，也可能導致進一步的不利影響魚類 (D' Ugo, E. & Bertuccini, Lucia & Spadaro, F., 2021)。

(二)MFC反應化學式

陽極為生物厭氧槽，主要提供微生物進行代謝反應；陰極則置放電解液，並使其呈現好氧狀態。MFC 陽極槽內的微生物將有機物降解後，會釋放質子和電子(如式 1)。電子流經由外部迴路到達陰極，質子則通過質子交換膜到陰極，而在陰極槽內電子、質子與氧結合最終生成水。MFC 的運作即是利用陽極

周圍之微生物的代謝作用所產生之能量並將其轉換成電流的一種技術。(Logan & Rabaey, 2012)



圖一、微生物燃料電池反應途徑圖(彭美娟等，2019)

(三) TiO_2 與柴油降解之關聯

賴奇厚教授曾開發之光催化與生物降解近場耦合體系(Intimately Coupled Photocatalysis and Biodegradation, ICPB)，以多孔海綿為載體，載體表面光催化劑受到光激發發生氧化反應產生易於生物降解的中間產物，載體內部生物膜利用光催化產物進行生物降解作用，並以 PVB-TiO_2 為光催化劑，以活性污泥為植種菌種，成功構建ICPB 協同體系。(賴奇厚，2022)

(四) 外加磁場提升微生物燃料電池降解有機物效能

近年來，外加磁場技術被用於廢水處理技術中。賴奇厚教授執行科技部「應用自產電流轉換磁場提升MFC 產電效能之技術開發(MOST 108-2221-E-035-036 -MY3)」，第一年的研究在雙槽式立方微生物燃料電池 (Microbial fuel cell, MFC) 的外部添加了釹鐵硼磁鐵，探討改變磁鐵強度與磁場方向(相吸或相斥磁場)對MFC產電效能之影響。

研究指出，外加磁場技術會影響生物代謝酵素活性與細胞膜滲透性等，進而提升微生物燃料電池的產電效能(賴奇厚，2022)。

貳、研究設備及器材

一、實驗器材及設備 (圖二-1到圖二-20)(作者拍攝)

雙槽型反應槽	批次瓶	血清瓶	恆溫箱	金屬蓋
				
pH計	真空抽濾機	發泡鎳(Ni)電極	COD KIT	MFC反應槽
				
採氣筒+採氣針	COD分光光度計	過濾膜	COD加熱器	質子交換膜
				

磁石加熱攪拌器	分光光度計	鈦鐵硼磁鐵	PVB-TiO ₂ 海綿	震盪培養箱
				

二、藥品試劑

(一)陽極菌群培養基配方(ENDO配方)

陽極菌群培養基配方(ENDO配方)			
藥品名稱	g/L	藥品名稱	mL/L
柴油	20	硫酸亞鐵濃縮液(25g/L)	1
碳酸氫銨	5.24		
碳酸氫鈉	8	濃縮混和液(成分如下): 硫酸錳(15 g/L) 硫酸銅(5 g/L) 氯化鈷(0.125 g/L) 氯化鎂(100 g/L)	1
氯化鈣	0.1		
磷酸氫二鉀	0.125		

表一、陽極菌群培養基配方(ENDO配方)(作者製作)

(二)陰極配方：

鐵氰化鉀(K₃[Fe(CN)₆])：50mM

(三)檢測試劑：

1. COD：(1)重鉻酸鉀 (2)硫酸銀 (3)斐羅琳試劑 (4)0.1M硫酸銨亞鐵

2. 柴油含量：(1)正己烷

參、研究過程或方法

一、研究流程圖

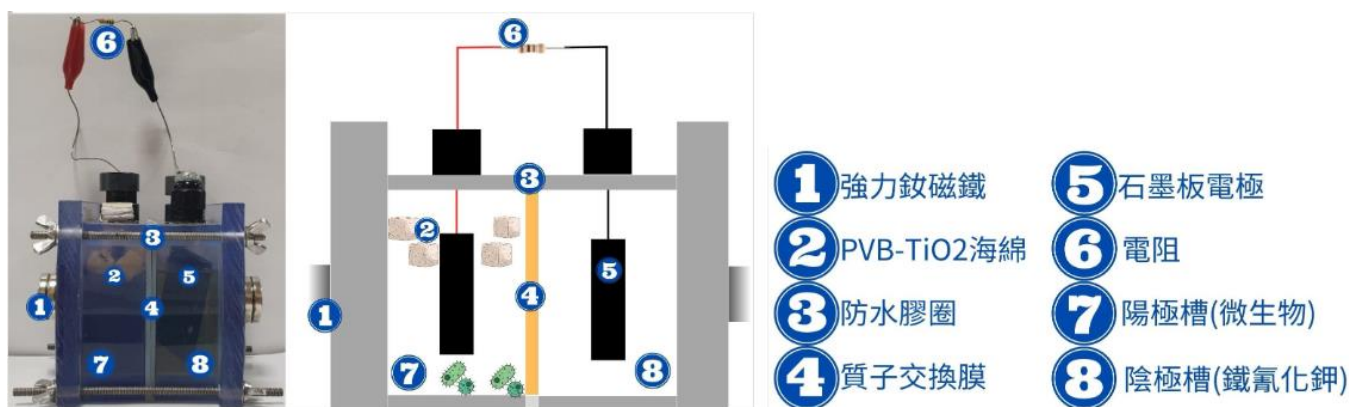


圖三、研究流程圖(作者製作)

二、MFC裝置設計、架設及實驗流程

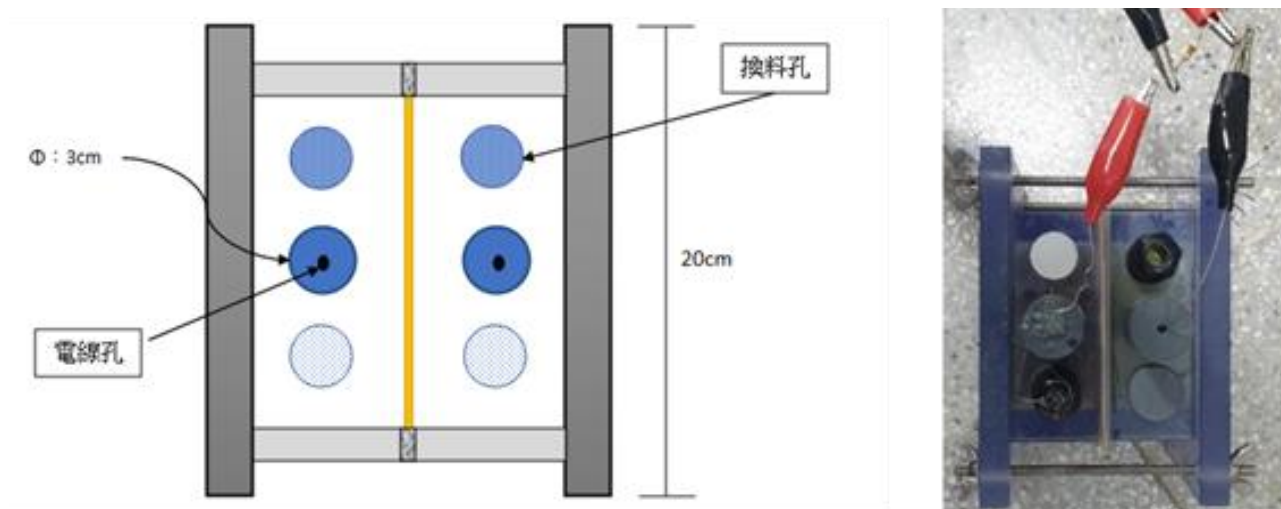
(一)MFC裝置設計

1. MFC槽體基本設置



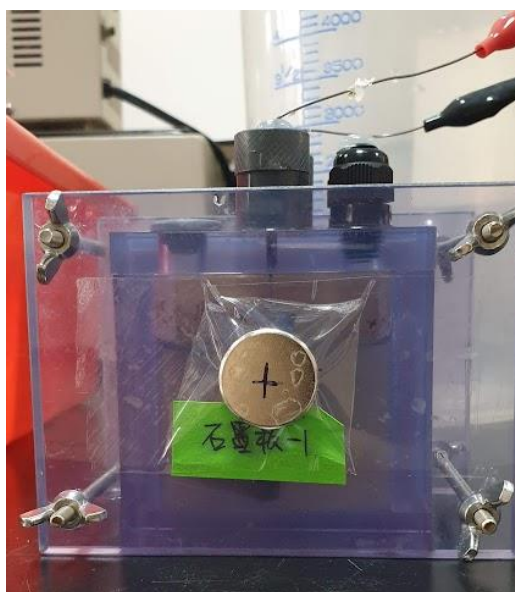
圖四、微生物燃料電池側視實體+示意圖(作者拍攝與繪製)

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(如圖四、圖五)所示。



圖五、微生物燃料電池俯視實體+示意圖(作者拍攝與繪製)

2. 外加磁場設置方式

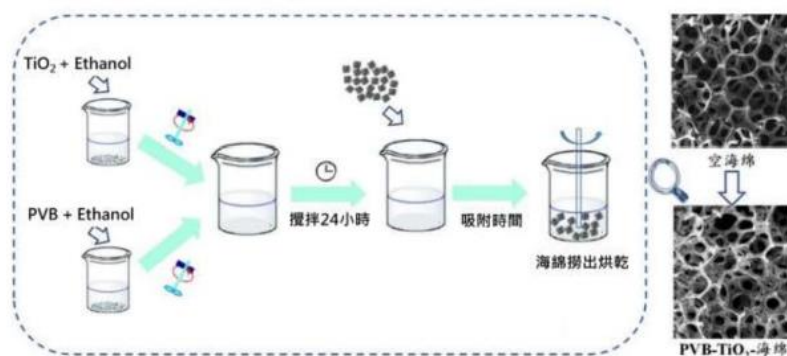


圖六、微生物燃料電池側視實體圖(作者拍攝)

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 Polyvinyl Butyral Resin (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 100-300 μm，孔隙率為 87%)的載體上。海綿在使用之前用純水洗三遍，每次放入超音波清洗器中震盪分散 30 min 後烘乾待用。秤取一定量的 TiO₂ 催化劑加入 200 mL 乙醇中，以超音破震盪後再以磁力攪拌 24 h 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。再將海綿過濾取出置於 70°C 烘箱直至海綿全部烘乾，即製得 PVB-TiO₂ 海綿。



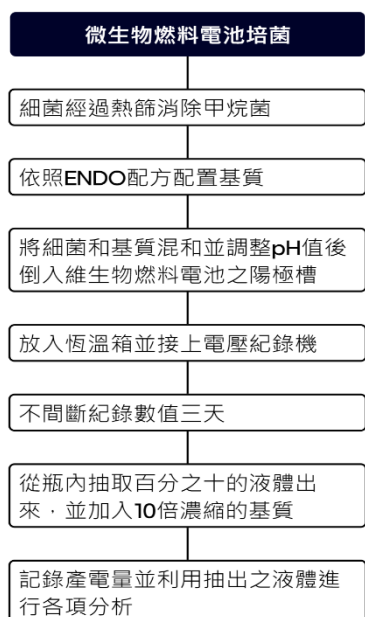
圖七、PVB-TiO₂ 海綿製備流程圖(賴奇厚，2022)

4. MFC實驗條件

反應槽	陽極	陰極
反應槽型態	立方體型雙槽式MFC	
Membrane	Anion exchange membrane	
電極	發泡鎳電極	發泡鎳電極
進料方式	Sequencing batch	Sequencing batch
植種菌群	雞糞厭氧消化菌	-
營養源	碳源：柴油10g/L 營養源：ENDO配方	$K_3Fe(CN)_6$ 50 mM
外加電阻	100 Ω	
Initial pH	7.0	
溫度	37°C	

表二、MFC實驗條件表(作者製作)

(二)實驗流程



如右圖，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100 Ω 之電阻。

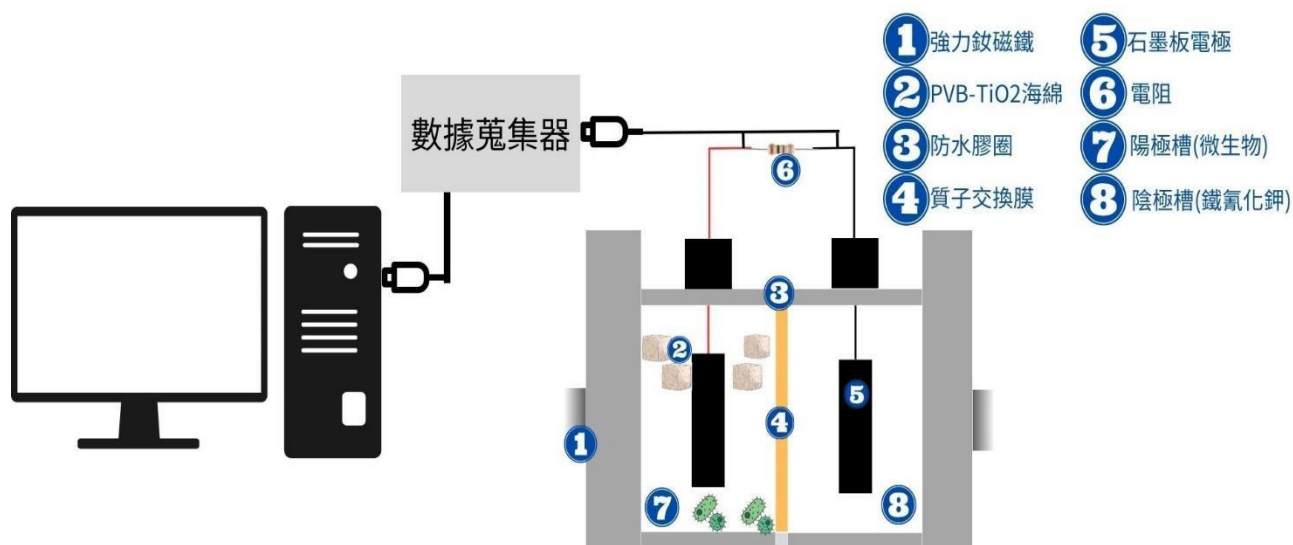
組裝時，首先將質子交換膜放置於兩槽體的中間，界面以墊片相隔，以防止在組裝兩槽體時產生孔隙。燃料電池組裝大致完成。為了確保實驗進行中系統不會有漏水的情形產生，以蒸餾水注滿兩個槽體，進行一天的防漏試驗。

本部分會重複四次，一次三天，共十四天

圖八、MFC架設與更換基質之實驗流程圖(作者製作)

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)。



圖九、電壓數據收集示意圖(作者製作)

(二)水質分析：pH值、COD(化學需氧量)



圖十、COD測量流程圖(作者製作)

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。

四、數據計算與統計

(一)COD降解率計算：

$$\left(\frac{A - B}{A} \right) \times 100\%$$

A：反應前COD數值(mg/L)

B：反應後COD數值(mg/L)

式三、COD降解率計算式

(二)柴油降解率計算：

$$\left(\frac{A - B}{A} \right) \times 100\%$$

A：反應前柴油含量(mg/L)

B：反應後柴油含量(mg/L)

式四、柴油降解率計算式

(三)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)

作法為：選定待測組別與對照組，以單尾分配(1)與成偶(1)進行分析

✖ ✓ fx =TTEST(I2:L2,I3:L3,1,1)

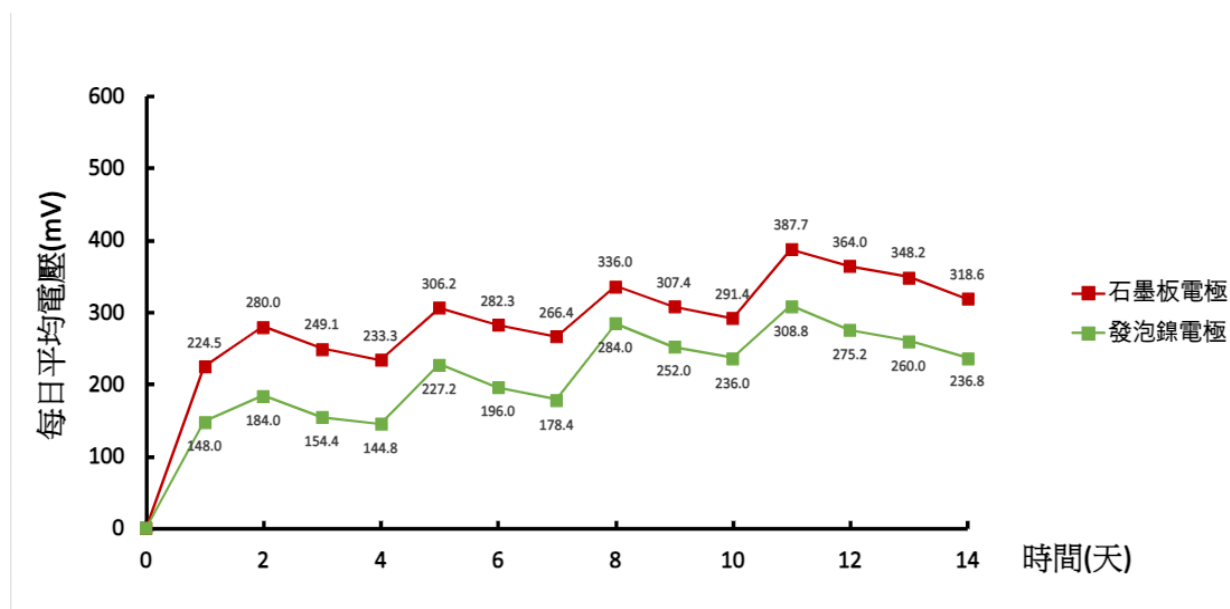
G	H	I	J	K	L	M	N	O
		第一	第二	第三	第四	平均	與無添加之T檢定值	
	無添加	25.3	31.2	35.6	42.3	33.5		
	6g/L	35.5	41.3	43.2	54.2	43.5	=TTEST(I2:L2,I3:L3,1,1)	
	9g/L	48.2	46.6	60.5	75.3	57.6	0.003465563	
	12g/L	56.2	58.3	61.5	74.2	62.3	0.000137306	
	15g/L	45.2	46.5	56.3	65.5	53.4	0.000623634	

圖十一、T檢定示意圖(作者製作)

肆、研究結果

一、MFC電極材質探討

(一)平均輸出電壓

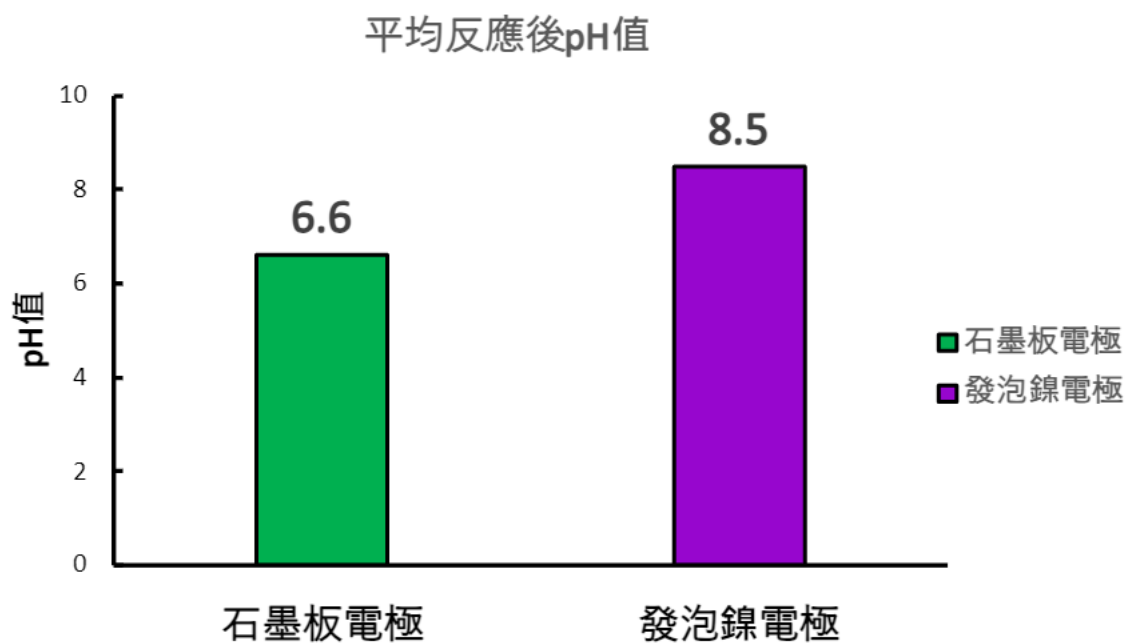


圖十二、電極材質對輸出電壓之關係圖

根據圖十二可觀察出：

1. 因為第一、四、七、十天更換槽內基質，以維持細菌生長所需，使得上述天數的隔天產電電壓數據較高，呈現有峰與谷的數據造型。
2. 以實驗持續觀察14天的數據結果顯示，以石墨板作為電極的MFC輸出電壓皆比發泡鎳板電極高，且具有顯著差異($P=7.8 \times 10^{-9}$)
3. 綜合以上十四天數據的平均值，石墨板：279.7mV > 發泡鎳：205.7mV，約為發泡鎳板1.34倍
4. 整體實驗數據有上升的趨勢，且數據最高為石墨板電極在第十一天的387.7mV。

(二)pH值變化



圖十三、電極材質對平均pH值之關係圖

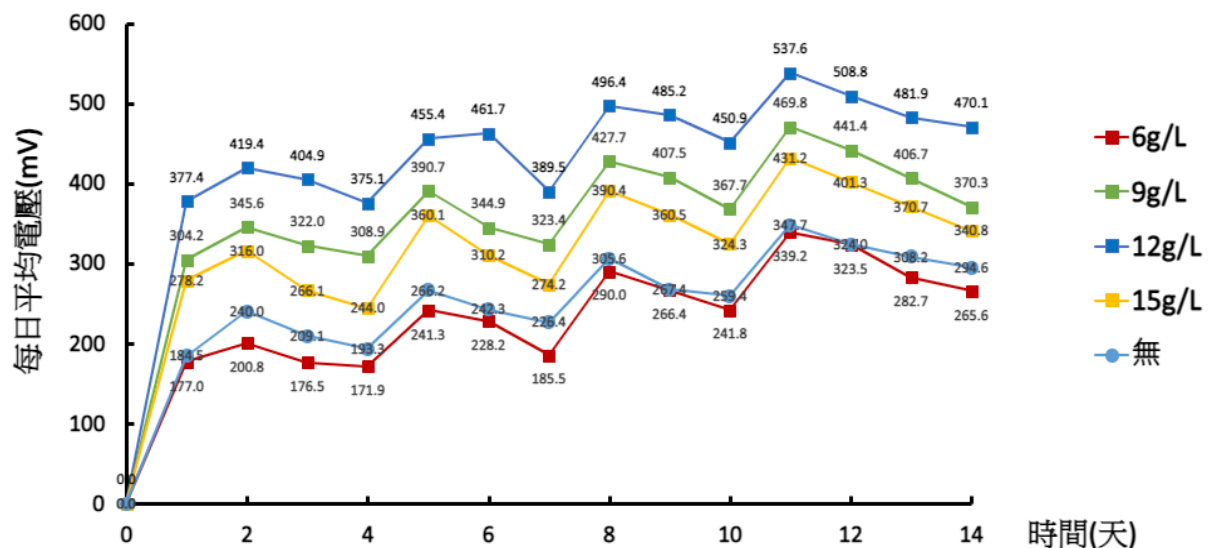
根據圖十三可觀察出：

在實驗前會先調整MFC內溶液pH值為7，以利觀察反應過後pH值變化，實驗研究結果顯示：

1. 以**石墨板**作為電極的MFC反應槽，反應過後pH值下降，呈現**酸性**。
2. 以**發泡鎳**作為電極的MFC反應槽，反應過後pH值上升，呈現**鹼性**。原因待後續討論。

二、添加PVB-TiO₂ 海綿

(一)平均輸出電壓

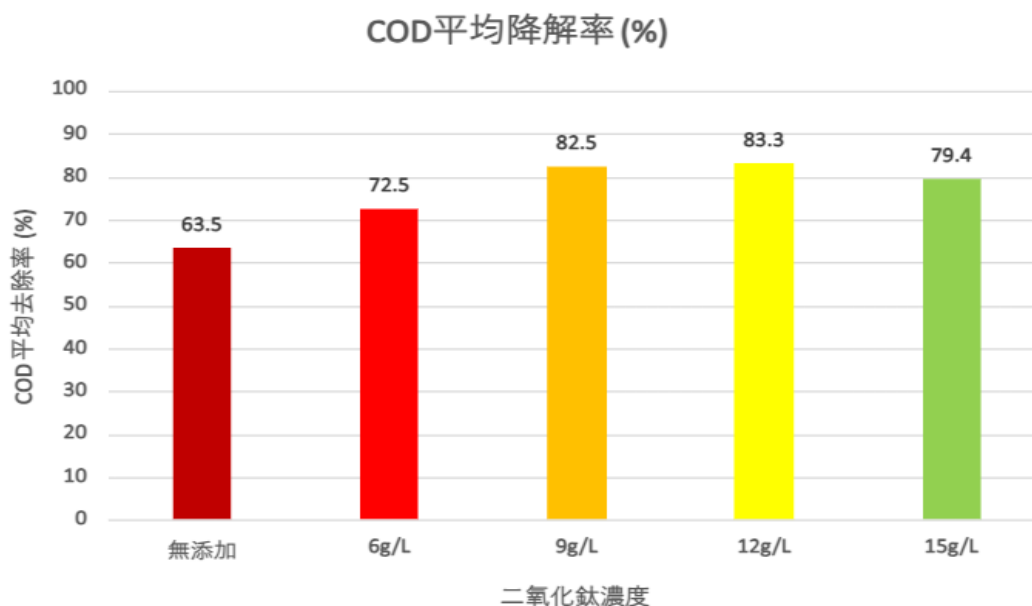


圖十四、TiO₂濃度對輸出電壓之關係圖

根據圖十四可觀察出：

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。
2. 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。
3. 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
4. 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($P=1.1 \times 10^{-9}$)。
5. 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



圖十五、TiO₂濃度對COD平均降解率關係圖

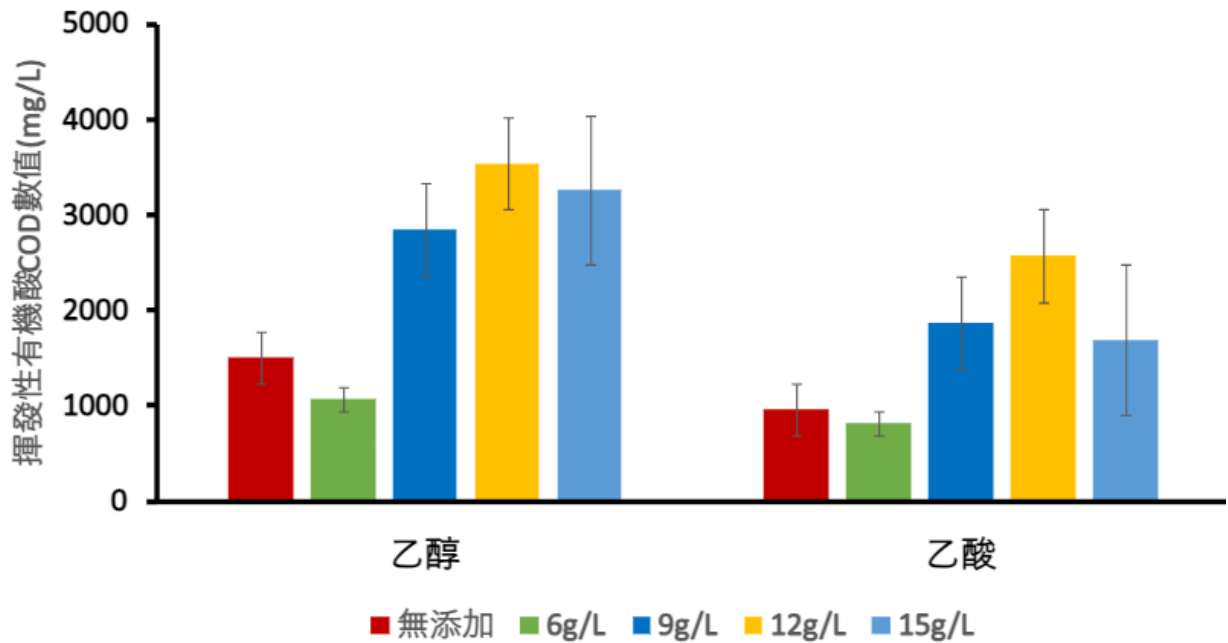
COD降解率(%)					
	無添加	6g/L	9g/L	12g/L	15g/L
Round 1	58.5	65.5	75.6	76.4	71.5
Round 2	65.3	72.3	81.8	85.2	78.5
Round 3	61.7	74.2	82.7	80.5	79.6
Round 4	68.6	78.1	90.2	91.1	88.2
平均值	63.5	72.5	82.5	83.3	79.4

表三、TiO₂濃度對COD降解率各輪次表格

根據圖十五及表三可觀察出：

1. COD平均降解率：TiO₂濃度：12g/L>9g/L>15g/L>6g/L>無添加。
2. 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($P=1.0 \times 10^{-4}$)。
3. 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降解率有最顯著提升。

(三)VFA(揮發性有機酸)

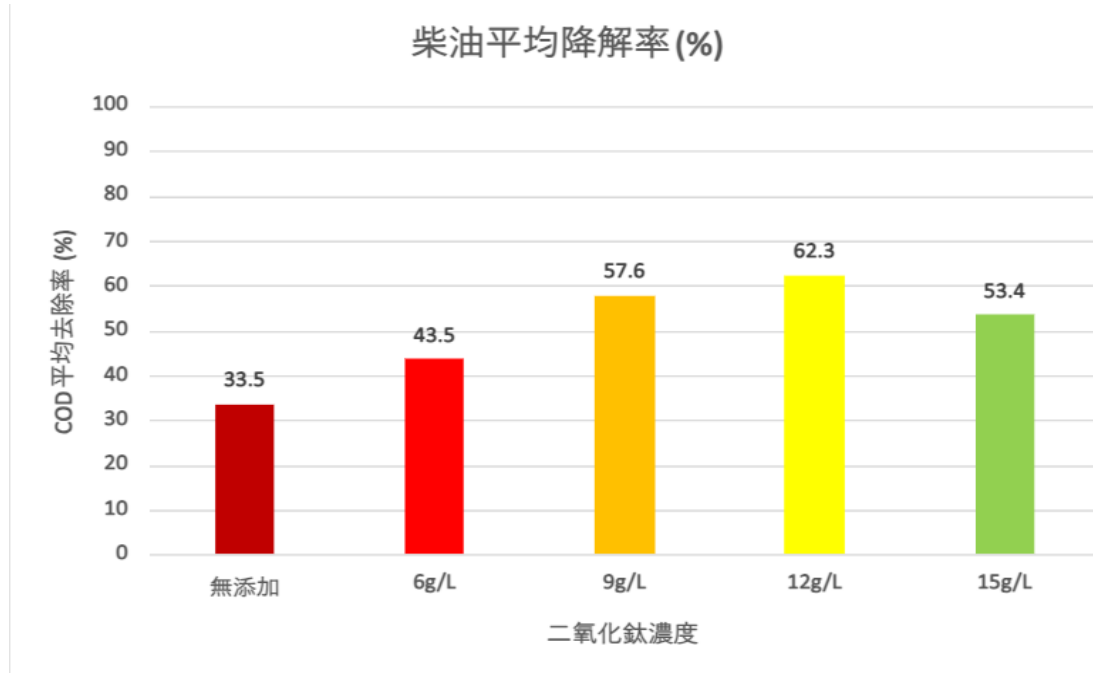


圖十六、 TiO_2 濃度對VFA產量之關係圖

根據圖十六可觀察出：

1. 乙醇含量：12g/L > 15g/L > 9g/L > 無添加 > 6g/L
2. 乙酸含量：12g/L > 9g/L > 15g/L > 無添加 > 6g/L
3. 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。

(四)柴油降解率



圖十七、TiO₂濃度對柴油平均降解率關係圖

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

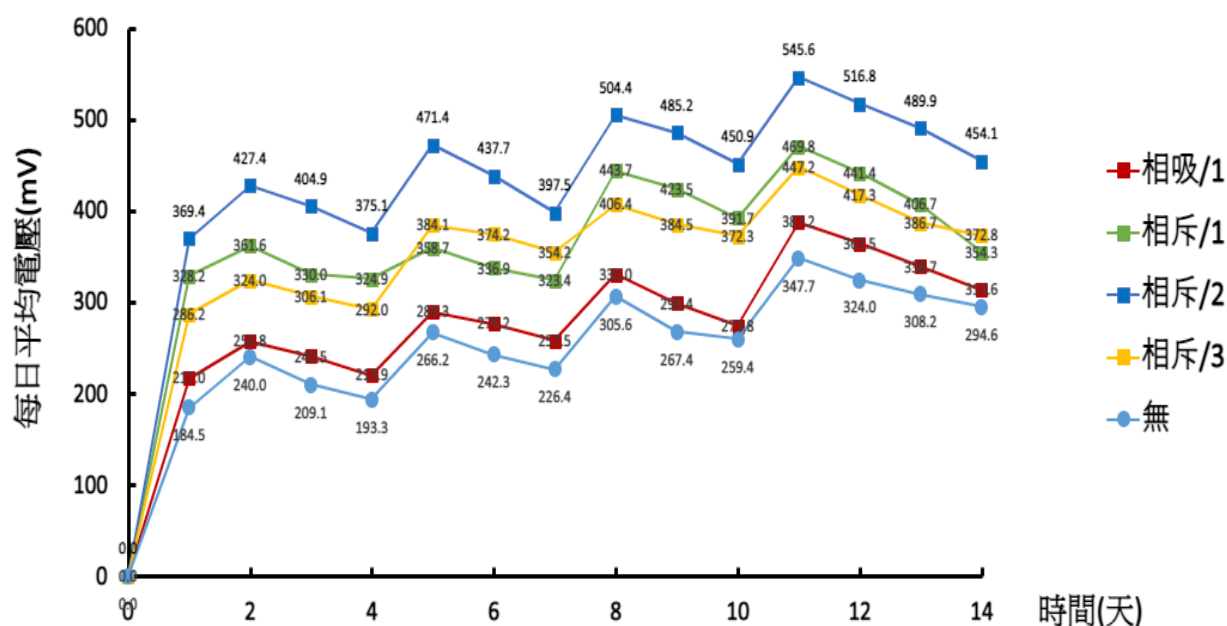
表四、TiO₂濃度對柴油降解率各輪次表格

根據圖十七及表四可觀察出：

1. 柴油平均降解率：TiO₂濃度：12g/L>9g/L>15g/L>6g/L>無添加。
2. 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($P=1.3 \times 10^{-4}$)。
3. 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。

三、添加外加磁場

(一)平均輸出電壓

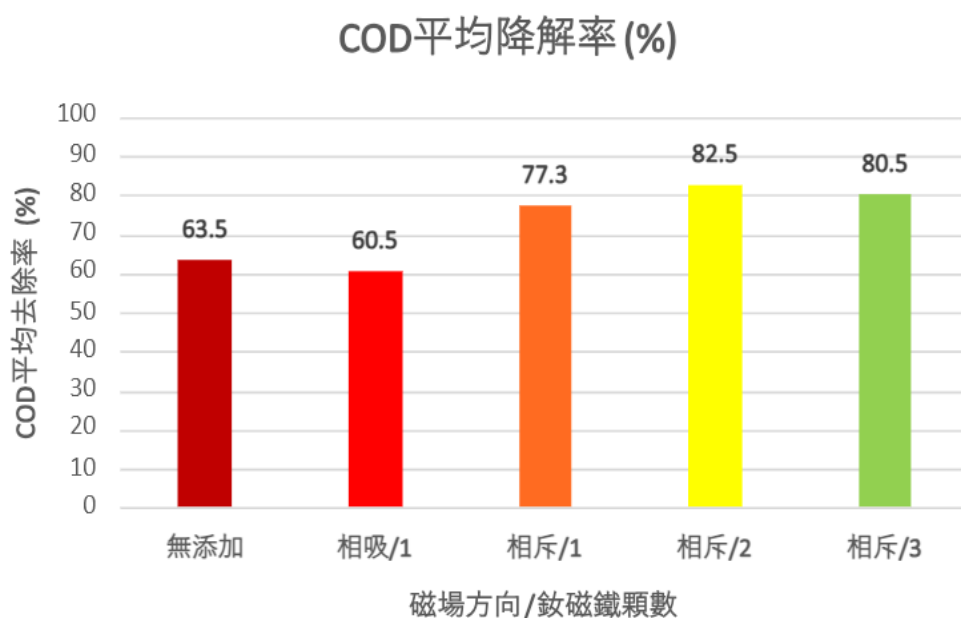


圖十八、外加磁場與平均輸出電壓之關係圖

根據圖十八的實驗結果，可看出：

1. 不同外加磁場的處理（相吸/1、相斥/1、相斥/2、相斥/3）的每日平均電壓，幾乎皆有隨著天數，而逐漸上升之趨勢。
2. 比較相斥磁場之磁鐵個數，可看出相斥/2之平均電壓，較其他組別高，尤其在第11天時，其平均電壓可達545.6mV，而相斥/1與相斥/3之平均電壓則各有消長，無明顯之強弱。顯示相斥/2是提升平均輸出電壓之最佳處理方式，且與對照組有顯著差異($P=1.0 \times 10^{-9}$)。
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



圖十九、外加磁場與COD降解率之關係圖

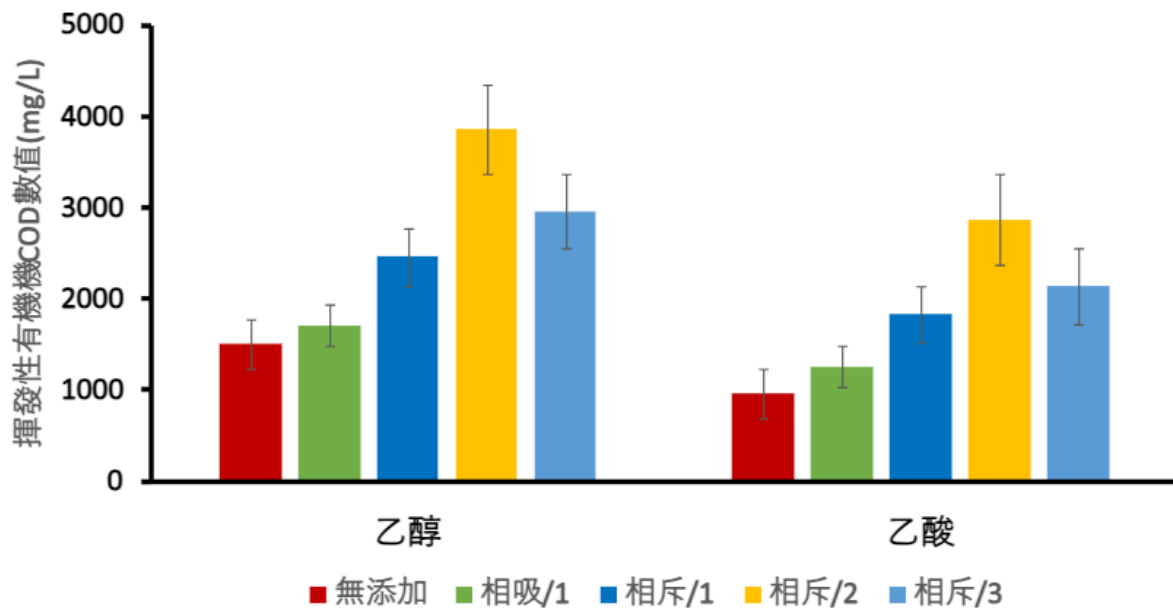
COD降解率(%)					
	無添加	相吸/1顆	相斥/1顆	相斥/2顆	相斥/3顆
Round 1	58.5	54.6	71.5	75.3	70.6
Round 2	65.3	63.2	79.2	81.2	81.3
Round 3	61.7	58.3	75.3	83.6	82.3
Round 4	68.6	65.8	83.4	89.5	88.5
平均值	63.5	60.5	77.3	82.5	80.5

表五、外加磁場對COD降解率各輪次表格

根據圖十九及表五的實驗結果，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)

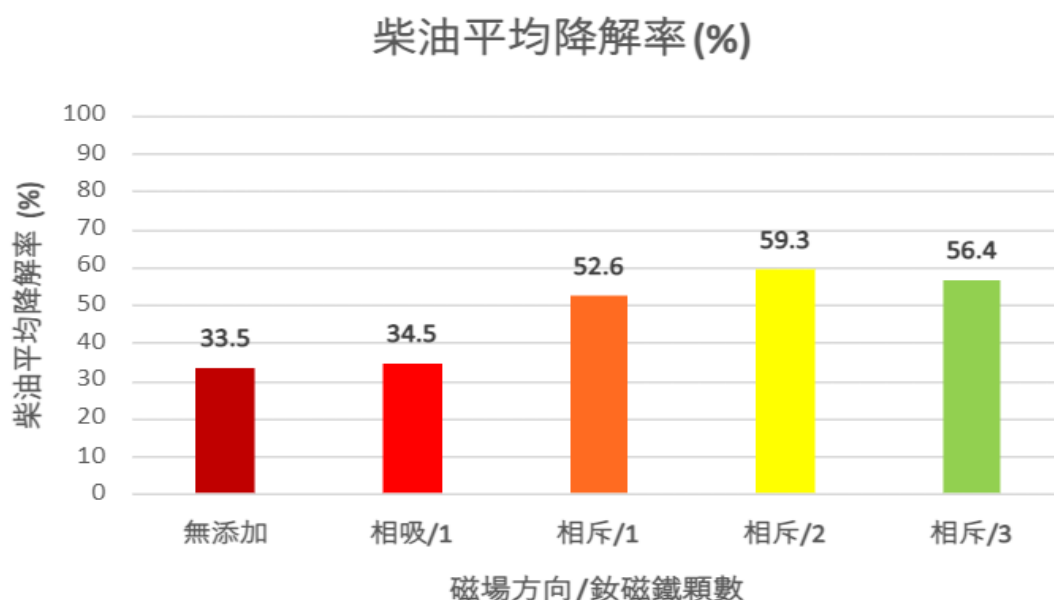


圖二十、外加磁場與VFA(有機揮發酸)產量之關係圖

根據圖二十的實驗結果，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



圖二十一、外加磁場與柴油降解率之關係圖

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

表六、外加磁場對柴油降解率各輪次表格

根據圖二十一及表六的實驗結果，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：

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
平均產電量(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)

表七、結合PVB-TiO₂海綿與外加磁場對MFC效率之比較表

由表七的實驗結果可看出，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。因此我們很好奇，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！

伍、討論

一、MFC電極材質探討

(一)溶液pH值變化：

我們在實驗前調整溶液pH值為7，觀察實驗後的pH值變化，根據文獻我們得知，細菌降解有機物的過程中會產生揮發性有機酸(Md Mosleh Uddin, 2022)，在正常情況下反應過後溶液會呈現酸性，而以發泡鎳為電極的MFC溶液卻呈現鹼性。

針對此情況，我們推測有以下兩種可能原因：

1. 因為金屬鎳(Ni)會與溶液發生氧化反應，產生鹼性的氧化鎳(NiO)、氫氧化鎳(Ni(OH)₂)而使溶液呈現鹼性。鹼性溶液的環境也不利於菌的生長，進而導致輸出電壓較低。
2. 透過文獻探討我們得知，這可能是因為微生物在陽極表面形成生物膜，並分解有機物產生電子和質子。這些質子可能會在電池的陽極被氧氣還原為水，從而消耗掉質子並使環境變得鹼性(Fozia Anjum, 2022)。

(二)使用石墨板的優點：

1. 性質穩定，活性低：化學性質穩定，不易與溶液產生化學反應。
2. 導電性好，電阻低：石墨板的電阻率低於其他碳材料，例如碳纖維、碳黑或活性碳，因此可以減少電能的損耗(Shomik Verma, 2023)。

數據結果顯示，石墨板電極不論在產電效果、pH值變化、化學性質穩定性，都比發泡鎳電極更好，因此兩者之中，石墨板更適合做為MFC內的電極材料。

二、PVB-TiO₂ 海綿提升MFC效率

(一)比較添加12g/L TiO₂ PVB-TiO₂ 海綿與無添加：

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，可看出PVB-TiO₂ 海綿對於產電與降解皆有提升之作用，參考以往文獻我們得知：TiO₂對於有機物有初步分解的效果，可將柴油分解為更容易被分解的中間產物(賴奇厚, 2021)，故柴油經過TiO₂初步分解後，細菌會更容易對其降解，降解率及產電皆會隨之上升，達到更有效的降解。

(二)PVB-TiO₂海綿與TiO₂粉末之比較：

我們選擇以PVB-TiO₂海綿，而不是直接將TiO₂粉末加入MFC中的原因，是因為將TiO₂粉末直接加入需要分解的溶液內，反應完畢回收將會相當困難，自製PVB-TiO₂海綿相較直接加入TiO₂粉末，有以下三項優點：

1. 容易回收：PVB-TiO₂ 海綿在反應後可以直接取出，不會殘留TiO₂在溶液中
2. 增加表面積：等體積下可以有更大的表面積與溶液反應，使反應更迅速
3. 細菌共生：聚氨酯海綿的孔隙可供細菌在其中共生

因PVB-TiO₂海綿有以上優點，因此我們選擇

三、外加磁場提升MFC效率

(一)外加磁場對MFC之影響

我們的研究發現，在微生物燃料電池外加磁場，對於平均輸出電壓、COD降解率，及VFA有機揮發酸都有提升的效果。我們推測原因可能有：

1. 外加磁場可以促進微生物的生長和代謝，增加有機物的降解和電子的產生(Gabriele Beretta, 2019)
2. 外加磁場可以加速電子的傳遞，減少電極表面的電阻，提高電極的電化學活性
3. 外加磁場可以改變電解液中的離子分佈，增加質子的遷移，減少內阻 (Peng Lian g, 2007)

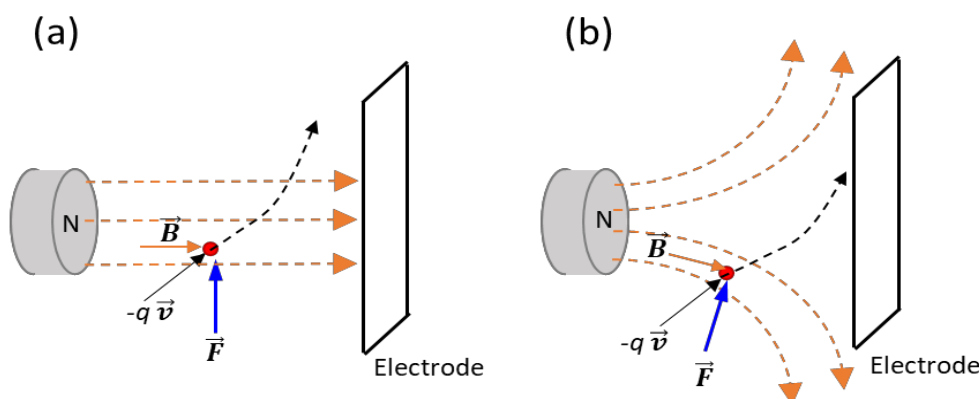
由這幾篇參考文獻可看出，外加磁場的確可以促進微生物的生長和代謝，增加有機物的降解和電子的產生。當然究竟何者是主因，還待後續的研究與探討。

(二)相吸與相斥磁場對MFC之影響

在我們的實驗結果中，可以看到外加磁場是相斥的，產電效果會比相吸的好。文獻中提到，相斥的磁場可以增加電解液中的離子運動，從而提高質子的遷移速度和電極的電化學活性，進而提高微生物燃料電池的發電效率(Zhong-Hua Tong, 2015)。而我們推測，可能是因為兩者的磁力線不同，因為相斥磁場的磁力線是相反的，而相吸磁場的磁力線是順向的（如圖二十一），磁力線的方向可能會影響電解液中的離子運動。因為離子是帶電的粒子，會受到磁場的勞倫茲力的作用。

相斥磁場的磁力線是相反的，可能會使離子在電解液中產生螺旋運動，增加離子的運動速度和方向性，從而提高質子的遷移速度和電極的電化學活性。

相吸磁場的磁力線是順向的，可能會使離子在電解液中產生圓周運動，減少離子的運動速度和方向性，從而降低質子的遷移速度和電極的電化學活性。



圖二十二、勞倫茲力(Lorentz force)對(a)相吸磁場(b)相吸磁場電子運動的影響

(賴奇厚, 2021)

四、結合PVB-TiO₂海綿及外加磁場提升MFC降解效率之原因探討

根據文獻(Ankit Kumar, 2023)，TiO₂海綿具有高孔隙率和高電子傳導性，可以減少電阻，並增加電極的電化學活性；也可以吸附和活化氧氣分子，促進氧化還原反應的進行，並提高電子的接收和傳遞，從而提高電力的產生。而外加磁場可以改變電解液中的離子分佈，增加質子的遷移，減少電阻，並提高電極的電化學活性，進而提高微生物燃料電池的發電效率。

因此，若將PVB-TiO₂海綿與外加磁場結合，可以同時提高陰極和陽極的電化學性能，並減少電路的阻力，對微生物燃料電池的輸出電壓及柴油降解率產生加乘的效果！

陸、結論

一、石墨板電極相較發泡鎳電極更適合作為MFC之電極

二、PVB-TiO₂ 海綿：12g/L(TiO₂)，可有效提升COD降解率、輸出電壓、柴油降解率

三、外加磁場：相斥/2顆，可有效提升MFC之COD降解率、輸出電壓、柴油降解率

四、結合PVB-TiO₂ 海綿與外加磁場：12g/L(TiO₂)結合相斥/2顆

可有效提升MFC之COD降解率、輸出電壓、柴油降解率

柒、參考資料及其他

1. 秦逸玲(2018)、林書羽(2018)。以生物復育技術應用於潤滑油污染土壤場址，土壤及地下水污染整治。第五卷(第四期)163 - 173。
2. 郭毓璞(2016年7月10日)。海上漏油事件的處理。科學Online <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?P=74329>
3. 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)。
4. 楊政憲、林彥姁(2013年8月20日)。小兵立大功～生物燃料電池的原理及應用。科學Online。<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=42863>
5. 劉懷勝(2006)。結合生物與物理特性之快速含油污水處理法。
6. 賴奇厚(2022)。2022 科技部專題研究計畫申請書。
7. 簡孜翰(2016)。基隆港煙降解菌之特性分析及其對柴油降解效率之研究。國立臺灣海洋大學環境生物與漁業科學學系。
8. D'Ugo, E., Bertuccini, Lucia, Spadaro, F., Giuseppetti, Roberto, Iosi, Francesca, Santavenere, F., Giuliani, Fausto, Gricia, M., Rodomonte, Andrea, Lovecchio, Nicola, Mukherjee, A., Bucci, Paola, Bruno, Milena, Stellacci, Emilia, Bernardo, A., & Magurano, F. (2021). *Electrogenic and Hydrocarbonoclastic Biofilm at the Oil-Water Interface as Microbial Responses to Oil Spill*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117092>
9. Hazen, T. C., & Prince, R. C. (2021). *Marine Oil Biodegradation*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03333>
10. Head, I. M., Gray, N. d., & Larter, S. R. (2014). *Life in the Slow Lane; Biogeochemistry of Biodegraded Petroleum Containing Reservoirs and Implications for Energy Recovery and Carbon Management*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00566>
11. Karl, D. M. (2007). *Microbial Oceanography : Paradigms, Processes and Promise*. 759 - 769. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1749>

12. Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, George , Gikas, G., & Sylaios, G. (2021). *Oil Spill Modeling : A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges*. <https://doi.org/10.3390/jmse9020181>
13. Kessler, J. d., Valentine, D. L., Redmond, M. C., Du, M., chan, E. W., Mendes, S. D., Quiroz, E. W., Villanueva, C. J., Shusta, S. S., Werra, L. M., Yvon-lewis, S. A., & Weber, T. C. (2011). *A Persistent Oxygen Anomaly Reveals the Fate of Spilled Methane in the Deep Gulf of Mexico*. *Science*, 312 – 315. <https://doi.org/10.1126/science.1199697>
14. Khairul Hanif Mohd Nazri, M., & Sapawe, N. (2019). *A Short Review on Photocatalytic Reaction in Diesel Degradati*. <https://doi.org/10.1080/10934529.2020.1779533>
15. 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>
16. Liu, C., & Liu, Hwai-Shen . (2011). *Rhodococcus Erythropolis Strain NTU-1 Efficiently Degrades and Traps Diesel and Crude Oil in Batch and Fed-Batch Bioreactors*. 46(1), 202 – 209. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.08.008>
17. Nzila , A. (2013). *Update on the Cometabolism of Organic Pollutants by Bacteria*. 474 – 482. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.042>
18. Safdari, MS., Kariminia, HR., Ghobadi Nejad, Z. *et al*. Study Potential of Indigenous *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus subtilis* in Bioremediation of Diesel-Contaminated Water. *Water Air Soil Pollut* 228, 37 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3220-5>
19. Shih, M., Lay, C., & Lin, C. (2021). *Comparison of Potential Environmental Impacts and Waste-to-Energy Efficiency for Kitchen Waste Treatment Scenarios in Central Taiwan*. 264(2). <https://doi.org/10.3390/pr9040696>
20. Wang, J. (2009). *Kinetic Models for Fermentative Hydrogen Production : A Review*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.107>
21. Rafeeq, H., afsheen, nadia, Rafique, S., Arshad, A., Intisar, M., Hussain, asim , Bilal, M., & Iqbal, hafiz m.n. . (2023). *Genetically Engineered Microorganisms for Environmental Remediation*. 310. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136751>
22. Lay et al. (2021) Exploring the effect of attractive and repulsive magnetic fields on electricity generation and microbial community. *International Journal of Energy Research*, <https://doi.org/10.1002/er.7207> in microbial fuel cells.
23. Gabriele Beretta . Andrea Filippo Mastorgio . Lisa Pedrali . Sabrina Saponaro. (2019). *The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-018-09491-9>.
24. Zhong-Hua Tong, Han-Qing Yu, Wen-Wei Li, & Guo-Ping Sheng(2015). *Application of a weak magnetic field to improve microbial fuel cell performance*. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10646-015-1545-2.pdf>.

25. Peng Liang, Xia Huang, Ming-Zhi Fan,& Cheng Wang(2007). *Composition and distribution of internal resistance in three types of microbial fuel cells*. [https : //link.springer.com/article/10.1007/s00253-007-1193-4](https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-007-1193-4).
26. *Exploring the effect of attractive and repulsive magnetic fields on electricity generation and microbial community in microbial fuel cells*.[https : //www.x-mol.com/paper/1432842479942221824](https://www.x-mol.com/paper/1432842479942221824).
27. Md Mosleh Uddin& Mark Mba Wright(2022).*Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances*.[https : //www.degruyter.com/document/doi/10.1515/psr-2021-0068/html](https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/psr-2021-0068/html)
28. Fatemeh Mahmoodzadeh1, Nahid Navidjouy, SaberAlizadeh & Mostafa Rahimnejad(2023).*Investigation of microbial fuel cell performance based on the nickel thin film modified electrodes*.[https : //www.nature.com/articles/s41598-023-48290-3.pdf](https://www.nature.com/articles/s41598-023-48290-3.pdf)
29. Shomik Verma(2023),*High-temperature thermal conductivity measurements of macro-porous graphite*.[https : //arxiv.org/abs/2301.03440](https://arxiv.org/abs/2301.03440)
30. Ankit Kumar, Tabassum Siddiqui,Soumya Pandit, & Hyun-Kyung Park(2023).Application of Biogenic TiO₂ Nanoparticles as ORR Catalysts on Cathode for Enhanced Performance of Microbial Fuel Cell. [https : //www.mdpi.com/2073-4344/13/6/937](https://www.mdpi.com/2073-4344/13/6/937)
- 31.Jingying Ma, Zhihao An, Wenwen Zhang, &Donghui Chen(2022). *TiO₂/CdS composite photocathode improves the performance and degradation of wastewater in microbial fuel cells*. [https : //chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ansa.202100062](https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ansa.202100062)

【評語】 200006

本研究結合磁場與二氧化鈦 (TiO_2) 海綿技術，提升微生物燃料電池的產電效率及柴油降解能力，並探討多項實驗參數的影響，包括電極種類、PVB- TiO_2 海綿中 TiO_2 的添加濃度、磁鐵數量及其排列方向等。整體來看，研究構想新穎，實驗設計合理，文章撰寫清晰且流暢。可考慮幾個改進方向：在反應設備中標註光源位置與特性，以便了解光催化條件。 量化磁場強度，提供更具體的數據支持。 檢視不同電極材料對電解液酸鹼性的影響，確認其準確性。建立揮發性脂肪酸 (VFA) 代謝產量與柴油降解率之間的相關性，以進一步驗證系統效能。這些改進將有助於提升研究的完整性與說服力。