

中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 化學科

佳作

030206

來電用「絲絲」---絲藻在微生物燃料電池之應用

學校名稱：高雄市立陽明國民中學

作者：	指導老師：
國二 林弘恩	陳宗慶
國二 黃士恩	陳昶翰
國二 李郁柔	
國二 劉靜文	

關鍵詞：絲藻、微生物燃料電池、功率密度

摘要

在養殖池中絲藻的增長速度非常快，會影響魚苗的生長，造成漁民的困擾。若將其當作再生能源利用，不也是一種廢物利用的做法嗎？

本實驗利用絲藻培養的新菌種「YMJH 一號」，以自製微型雙槽式研究微生物燃料電池的產電效能。以 8cm×8cm 半透膜取代價格而貴的質子交換膜、陽極置入台製生化棉及 0.005M 葡萄糖當燃料，在陰極 12mL/s 曝氣速率、陽極 6 小時水力停留時間，在 500Ω 電阻下最大功率密為 34.87 mW²/m²，超越參考文獻中最大功率密度。

在不同電極種類下，100cm² 碳纖布當陽極、10cm×10cm 打洞碳串當陰極使內電阻大幅降低，因此得到最大電壓為 0.63V 而最大功率密度提升至 79.38 mW²/m²，超越歷屆科展作品的最大電壓 0.09936V、最大功率密度 1.9745 mW²/m²，甚至是參考文獻最大電壓 0.416V、最大功率密度 32.9 mW²/m² 的 2 倍產量。

壹、研究動機

升國二暑假，與家人前往屏東的魚塢釣魚。當時看到了魚塢主人撈起一些不知名的藻類，在我好奇詢問之下，得知那是漁民間之色變的「絲藻」，在了解絲藻是魚塢裡常見的藻類之後，腦中一直有個想法，如果絲藻可以拿來利用的話那不就太美好了嗎？

在查閱了相關資料後發現，絲藻死亡後會造成水質的優氧化及菌數異常孳生，對魚塢的生態造成很大的威脅；加上最近國際間相當流行再生能源的研究，因此在評估可行性之後，便展開我們的研究。



貳、實驗目的

- 一、絲藻菌液的培養與菌落數的測量。
- 二、向上流式單槽式反應槽對電壓的影響。
- 三、自製微型雙槽式反應槽對電壓的影響。
- 四、隔離膜的性質探討。
- 五、微生物菌落數與產生電壓的關係。
- 六、陰極曝氣量對功率密度及內電阻的影響。
- 七、水力停留時間對功率密度及內電阻的影響。
- 八、燃料對功率密度及內電阻的影響。
- 九、外電阻對功率密度及內電阻的影響。
- 十、電極材質與面積對功率密度及內電阻的影響。
- 十一、自製燃料電池內串聯對功率密度及內電阻的影響。
- 十二、自製雙槽式燃料電池對不同微生物作測試。
- 十三、利用微生物燃料電池改善水質汙染。

參、實驗設備及器材

一、測試工具：

- | | | | | |
|-----------------------|----------------|--------|---------|--------|
| (一)筆記型電腦 | (二)vernier 數據機 | (三)電壓器 | (四)pH 計 | (五)加熱板 |
| (六)光學顯微鏡(Motic BA300) | | | | |

二、微生物燃料電池裝置：

- | | | | | |
|-----------|--------|----------|----------|--------|
| (一)絲藻(淡水) | (二)碳纖布 | (三)台製生化棉 | (四)德製生化棉 | (五)半透膜 |
|-----------|--------|----------|----------|--------|

三、平板計數法：

- | | | | | |
|------------|--------------|----------|--------|------------|
| (一)酒精(70%) | (二)LB + agar | (三)無菌操作台 | (四)微波爐 | (五)無菌 RO 水 |
|------------|--------------|----------|--------|------------|

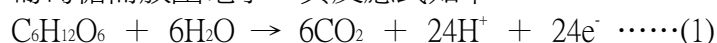
肆、研究原理及相關名詞

一、絲藻：

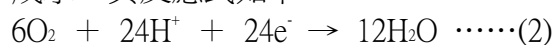
絲藻常見於水流動力低或靜水區的湖泊、池塘及淡水養殖池，若疏於清理則會大量孳長，一旦藻體死亡會耗掉水中大量的溶氧，導致漁獲量減少。漁民為了避免絲藻大量孳長，有的以人工撈取方式清除，有的放入以絲藻為食物的動物或與絲藻相互競爭的植物來控制絲藻的數量，但減除的成效均有限，且增養的動植物佔據了養殖空間，因而產量無法提升；也有人利用化學藥劑如硫酸銅等進行清除，但劑量若使用錯誤反而毒死養殖生物，甚至危害到食物鏈頂端的人類。

二、微生物燃料電池：

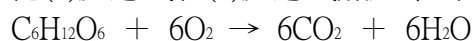
微生物電池的運作是利用陽極附近的微生物新陳代謝，把化學能轉為電能的一個過程，以本實驗的葡萄糖為例，陽極的細菌在吸收葡萄糖後，氧化葡萄糖而放出電子，其反應式如下：



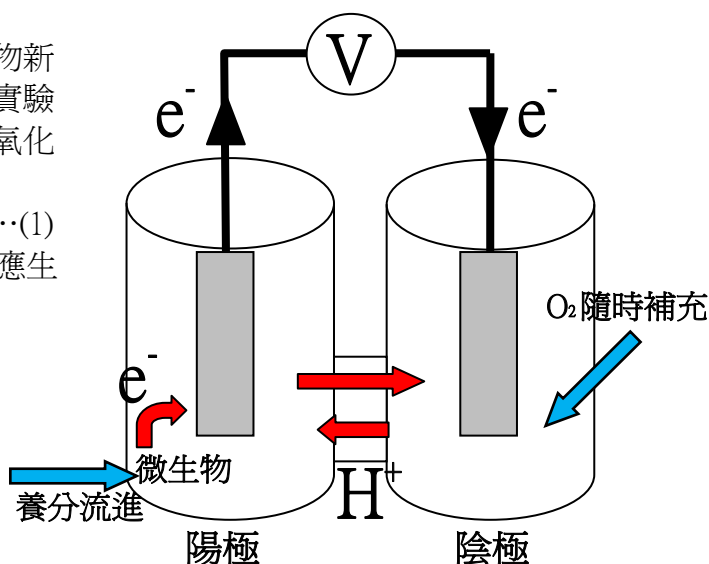
然而在陰極的電極接受電子之後會和 O_2 、 H^+ 反應生成水，其反應式如下：



把(1)反應式和(2)反應式加起來為：



此總反應式就是微生物燃料電池的反應機制。



三、歐姆定律：

依穩定電流而言，電路中電流的大小與該電路之電壓成正比，而與該電路的總電阻成反比。公式如下：

$$I = \frac{V}{R}$$

V：電壓，單位為伏特。R：電阻，單位為歐姆。

四、功率密度：

發電效率愈好，其功率密度也會愈大，在一外接電阻 R 下，用程式求得電壓 V，又知道陽極的電極面積 A 時，可經由公式算出功率密度。公式如下：

$$P = \frac{V^2}{RA}$$

P：功率密度，單位為 mW/m^2 V：電壓，單位為伏特
R：電阻，單位為歐姆。 A：陽極面積，單位為 m^2 。

五、內電阻：

一般來說，電池的內電阻不會很大，不過在微生物電池中，內電阻會隨著實驗裝置和溶液的改變而有所不同，當內電阻愈大，電池內部消耗的電壓也會愈大，讓外電路的電壓變小，功率密度也會愈小。其公式如下：

$$R_{\text{int}} = \frac{VR_L}{V_L} - R_L$$

R_{int} ：內電阻，單位為歐姆。 V：最大電壓，單位為伏特。
 V_L ：最大功率的電壓，單位為伏特。 R_L ：最大功率的電阻，單位為歐姆。

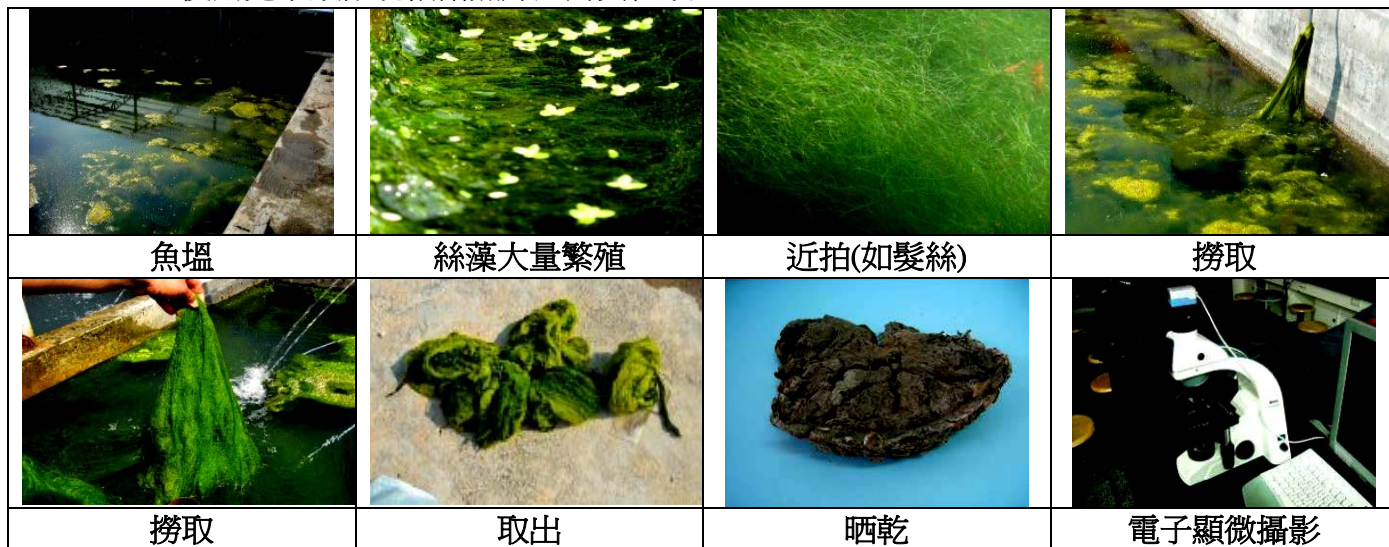
伍、研究過程、結果及討論

研究一、絲藻菌液的培養與菌落數的測量。

探討 1、絲藻的種類與特性。

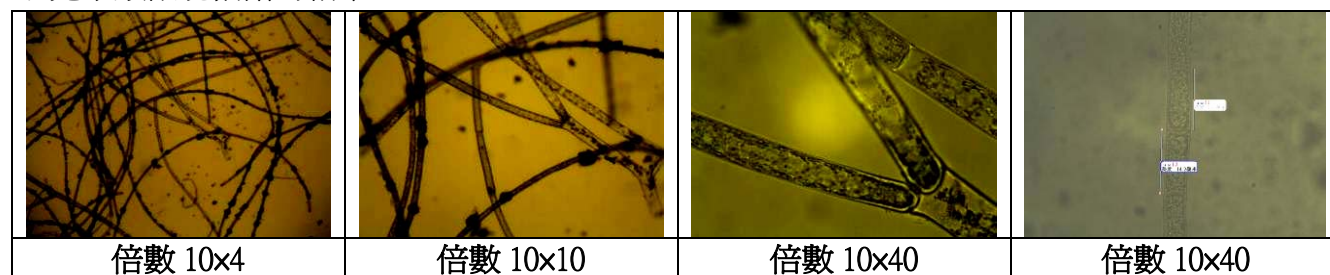
【目的】探討絲藻的種類與特性。

- 【步驟】1.至屏東縣內埔鄉魚塭撈取絲藻樣品。
2.用清水洗掉絲藻上的雜質，並將水份瀝乾。
3.使用光學顯微鏡拍攝照片比對其種類。



【結果】

1.以光學顯微鏡拍攝的結果：



2.估計每一個細胞的長度與寬度：如右圖

3.絲藻的種類很多，經上網比對照片的結果得知，我們的絲藻「*Rhizoclonium* sp.」為淡水藻類，*Rhizoclonium*是屬名（sp.指的是未知的種）。

【討論】1.本實驗用的絲藻由光學顯微鏡觀察，在分類上屬於綠藻門

（Chlorophyta）、石蓴藻綱（Ulvophyceae）、剛毛藻（Cladophoraceae）、剛毛藻科（Cladophoraceae）、根枝藻屬（*Rhizoclonium*），藻體呈管狀，細胞細長，為單列細胞組成的絲狀體，少數絲狀體具分枝，具有細胞壁，構造外層為果膠層，內層為纖維質所組成，無接合生殖現象。

2.絲藻繁殖速度極快，死亡時會消耗大量氧氣使得水質優氧化，使池塘內的細菌大量孳長，如果可以利用絲藻的這個優點來產生大量細菌，再利用細菌產電，一方面可以幫助漁民解決困擾，一方面又可以利用它來產生再生能源。



探討 2、利用平板計數法來計算菌落數。

【目的】計算菌液單位體積的菌數。

【步驟】1.準備滅菌用品(微波爐、70%酒精)。

2.把器具(量筒、試管、滴管、LB+agar)裝熱水，開口封上鋁箔紙，與裝有 RO 水的有蓋水壺，放進微波爐內加熱 20 分鐘滅菌。

3.用滅菌過的滴管取菌液至試管內，再到自製無菌操作室稀釋。(雙手記得噴酒精滅菌)

4.取原液 1mL 至試管，加 RO 水至 10mL，以此類推，共 1M、 10^{-1} M、 10^{-2} M、 10^{-3} M、 10^{-4} M、 10^{-5} M、 10^{-6} M 等 7 支。

5. 在自製無菌操作室內把 LB + agar 倒入培養皿中(大概 20mL)凝固。
6. 用 PIPE 取 1 cc 的 10^5 M、 10^6 M 菌液至培養皿塗盤，塗完盤後將培養皿倒置。
7. 靜置一天就可計算其菌落數。

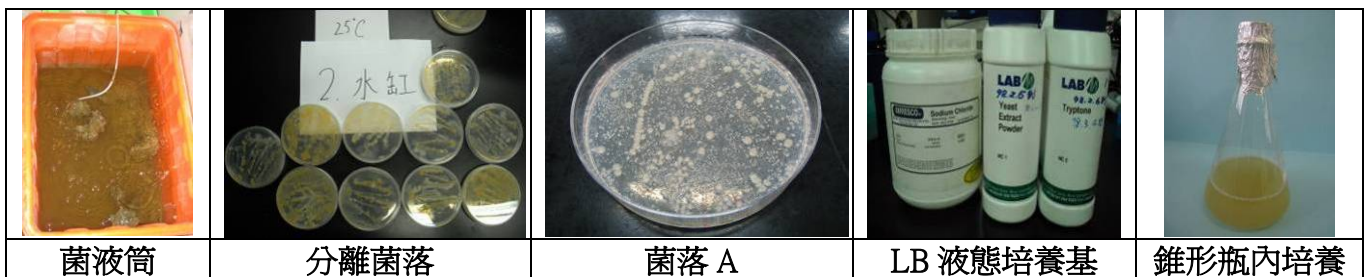


- 【討論】
1. 利用平板計數法來計算樣品中每 cc 的菌數，以了解菌數與產生電壓的關係。
 2. 爲了減少菌數的誤差，盡量縮短在自製無菌操作室裡操作的時間。

探討 3、用絲藻來培養菌種 A。

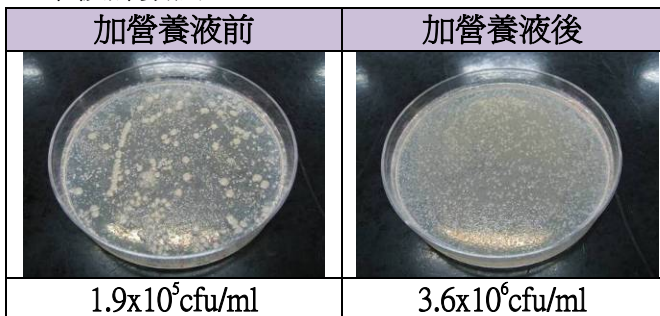
【目的】菌種 A 液的培養與檢驗。

- 【步驟】
1. 每三天添加一次微量的養魚用飼料、葡萄糖，菌液沒水時，倒入自來水即可。
 2. 使用打氣泵浦以防菌液發臭，之後取營養液加入前後的菌液作平板計數法比較。
 3. 利用平板計數法慢慢劃分培養菌落數較多的細菌，之後把菌落挑起置入錐形瓶內培養。
 4. 以 950 毫升的去離子水中加入 LB 液態培養基後，搖盪至完全溶解。
 5. 再用 5 N NaOH (約 0.2 毫升) 中和至 pH 7.0，之後再加去離子水，使溶液達 1 公升。

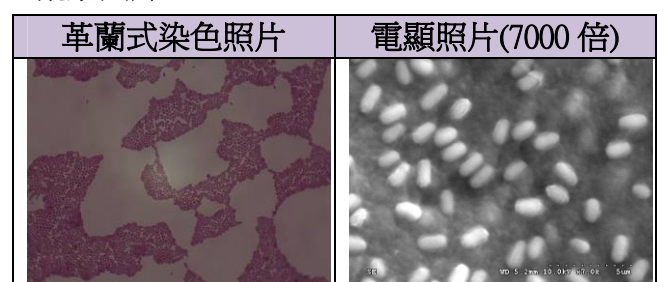


【結果】

1. 平板計數法：



2. 觀察圖片：



【備註】將菌液送至食品工業發展研究所生資中心檢驗。得知 *Bacillus cereus* 爲革蘭陽性菌，屬兼氣菌，菌體爲桿狀，菌落呈乳白色，適宜培養的環境是溫度 30-37 °C。

【討論】加營養液前菌數爲 1.9×10^5 cfu/ml，而加營養液後菌數爲 3.6×10^6 cfu/ml，由實驗數據可得知，養魚用飼料、葡萄糖可以有效增加菌數的增長。

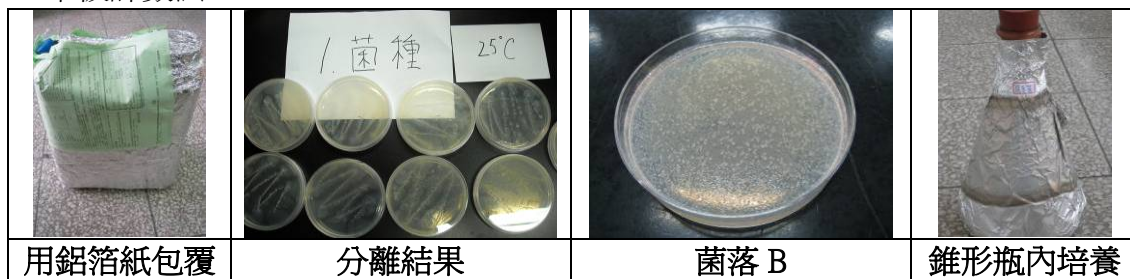
探討 4、如何用絲藻培養菌種 B？

【目的】培養菌種 B 液

- 【步驟】
1. 把絲藻菌液倒入 20L 筒內蓋上蓋子，筒外包覆鋁箔紙置於暗室培養。
 2. 一個禮拜後取菌液作平板計數法。
 3. 利用平板計數法慢慢劃分培養菌落數較多的細菌，把菌落挑起置入錐形瓶內培養。

【結果】

1. 平板計數法：



【備註】將菌液送至食品工業發展研究所生資中心檢驗。經與國內外菌種比對之後發現為新菌種，在此先把它命名為「**YMJH 一號**」，屬革蘭陽性菌、兼氣菌，菌體為圓形，菌落呈橘黃色，適宜的培養環境是在溫度 28-37 °C。

【討論】1. 文獻顯示，當細菌存在於無氧空間中，會分解葡萄糖行呼吸作用來產生所需的養分；微生物電池就是利用細菌的這個特性，讓其在無氧的陽極中，氧化葡萄糖產生電子，流經外電路至有氧氣的陰極而產生電壓。

2. 至於菌液 A、B 的產電能力將在後面做比較。

研究二、向上流式單槽式反應槽對電壓的影響。

探討 1、絲藻菌液能發電嗎？

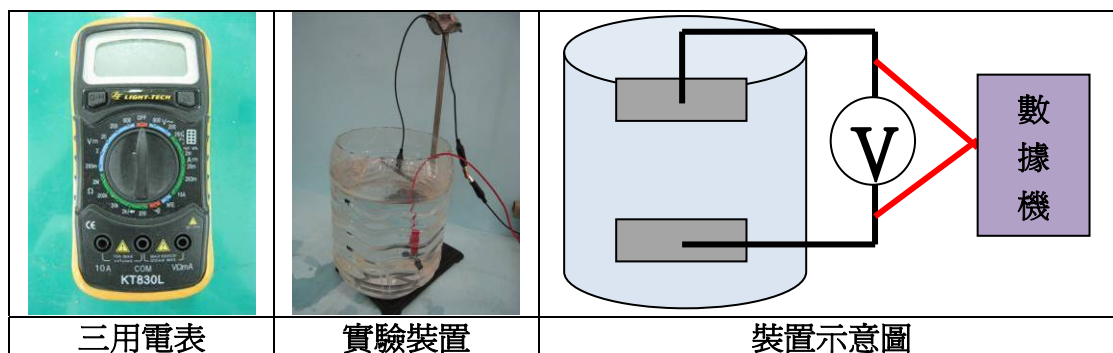
【目的】向上流式單槽式反應槽測試絲藻的發電電壓

【步驟】1. 把 5000mL 的礦泉水瓶開口裁掉。

2. 使用 10cm 石墨棒(面積：25cm²)當作陰陽極，用鱷魚夾固定並以防水膠綑綁。

3. 將陽極 10cm 石墨棒置入反應槽的下方並倒入 2000mL 菌液 A，陰極 10cm 石墨棒置入上方並倒入 2000mL 自來水，使兩電極距離固定 10cm。

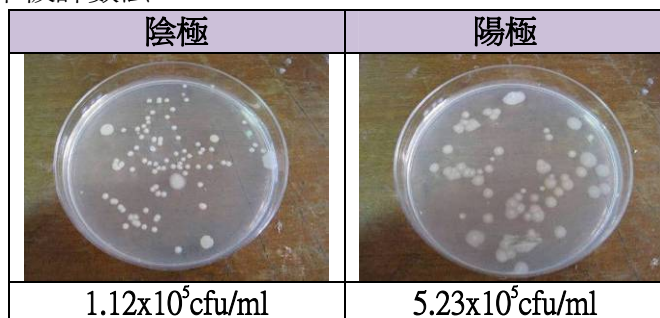
4. 使用三用電表測量電壓。



【結果】

1. 由三用電表中得知測得電壓為 0.01V。

2. 平板計數法：



【討論】1. 由結果得知電壓過小，而且十分不穩定。

2. 可能菌液未達飽和。

探討 2、如何讓菌液達最大數量。

【目的】利用燃料的導入及廢液的流出讓菌數達最大。

- 【步驟】1.在 5000mL 的礦泉水瓶中加入 2.16g 的葡萄糖，加水至 4L 配成 0.003M 培養菌液的燃料。
2.利用點滴注射器將燃料以固定速率滴入反應槽的陽極。
3.在礦泉水瓶距離上端 1cm 處連接口徑 8mm、5mm 及 3mm 矽膠管，測試其排水性。
4.使用三用電表測量電壓。



【結果】

1.排水管測試結果：

	是否會堵住
矽膠管(3mm)	是
矽膠管(5mm)	否
矽膠管(8mm)	否

3.平板計數法：

陰極	陽極
$6.13 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$	$4.61 \times 10^7 \text{ cfu/ml}$

2.電壓提升為 0.05 伏特。

【討論】1.比較：

燃料導入	廢液導出	陽極菌數(cfu/ml)	陰極菌數(cfu/ml)	沒接電阻電壓(V)
無	無	5.23×10^5	1.12×10^5	0.01
有	有	4.61×10^7	6.13×10^6	0.05

2.利用燃料的導入使菌數增加，使電壓從 0.01V 提升至 0.05V，但陰陽極溶液相混合將對陰陽極的反應及電子的傳遞造成影響。

3.5mm 和 8mm 矽膠管不管水量多大都不會塞住而溢出，最後我們決定使用比較硬的中型矽膠管以方便固定。

探討 3、隔離膜對氧化還原反應的影響。

【目的】隔離膜能否讓菌有效的將燃料氧化。

- 【步驟】1.陽極倒入 2000mL 菌液 A，置入 10cm 石墨棒電極，中央部分置入海棉，並以竹筷固定。
2.陰極倒入 2000mL 自來水，並在陰極置入 10cm 石墨棒電極，使兩電極距離 10cm。
3.陽極以固定速率注入 0.003M 的燃料。
4.使用 Vernier 數據機 + 外接電壓器 + 筆記型電腦 + LabPro.程式開始測量。

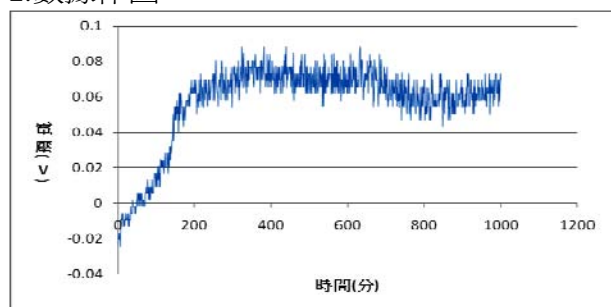


【結果】

1.數據結果：

電池模式	沒接電阻最高電壓(V)	沒接電阻平均電壓(V)
向上流式單槽式反應槽	0.088	0.057

2.數據作圖：



【討論】1.比較：

隔離膜種類	陽極菌數(cfu/ml)	陰極菌數(cfu/ml)	沒接電阻電壓(V)
無	4.61×10^7	6.13×10^6	0.05
海棉	9.82×10^7	2.21×10^6	0.088

2.由平板計數法得知，反應槽中央置入海棉隔離膜提高陽極菌數 5.21×10^7 cfu/ml，證明陽極菌數多寡對電壓有直接的影響。

研究三、自製微型雙槽式反應槽對電壓的影響。

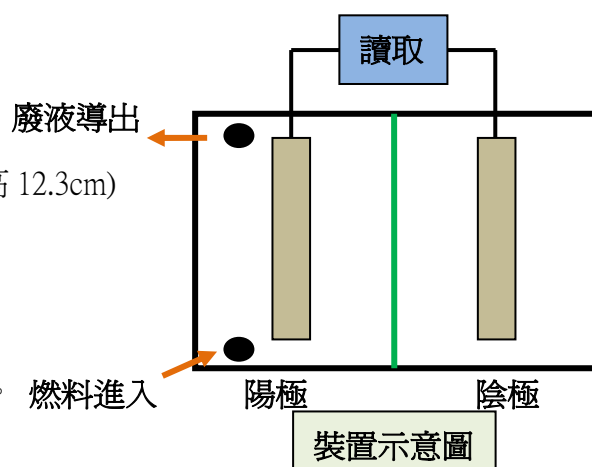
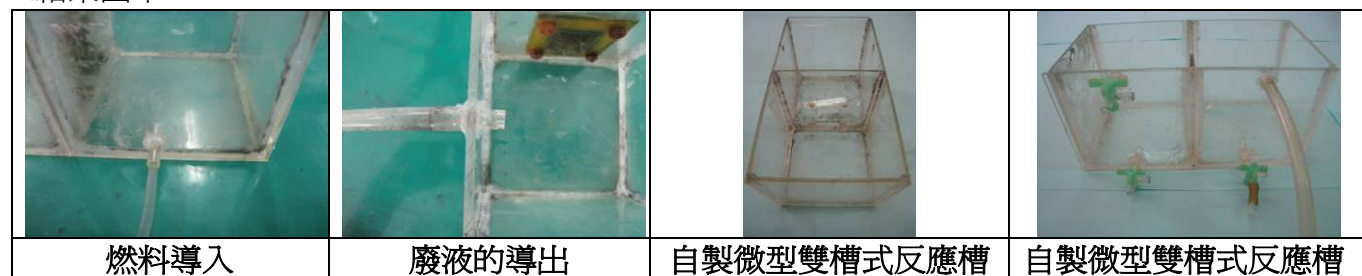
探討 1、自製微型雙槽式反應槽

【目的】製作微型雙槽式反應槽。

- 【步驟】
- 1.製作 3mm 壓克力槽(長 20.9cm、寬 10.6cm、高 12.3cm)
 - 2.完成之後成為各 1200cm³ 的陰陽兩槽。
 - 3.在距離上端 2cm 處挖洞裝置導出口。
 - 4.在距離底部 0.5cm 處挖洞裝置燃料注入口。
 - 5.中間為可換式夾板，可更換不同種類及面積的隔離膜，並以不導電的塑膠螺絲鎖住夾板。

【結果】

1.結果圖示：



- 【討論】
- 1.在討論向上流式單槽式反應槽時，廢液排出的矽膠管直接固定在反應槽上，導致清洗時常常踩到而損毀，所以我們設計了這個可拆式的矽膠管。
 - 2.向上流式單槽式的燃料是從陽極上方直接注入，由於上方有電極接線，為了避免打結，所以我們在微型雙槽式反應槽設計一個可外接燃料的開口。

探討 2、測試絲藻培養的菌液 A 對電壓的影響。

【目的】在自製雙槽式反應槽以菌液 A 做測試。

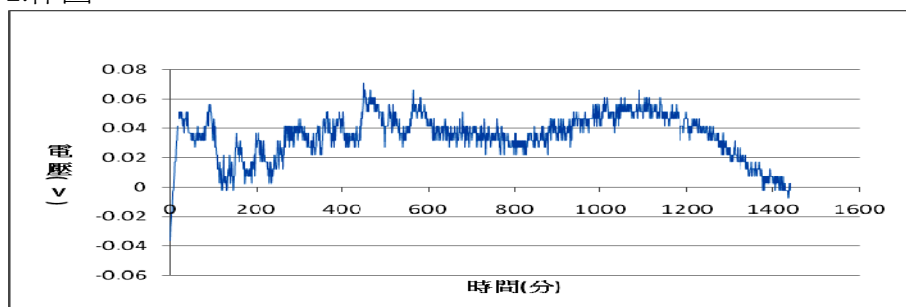
- 【步驟】
- 1.陽極倒入 900mL 的菌液 A，陰極倒入 900mL 自來水。
 - 2.在陰陽兩極中央置入 10cm 石墨棒使其距離 10cm，中間隔膜為 3cm × 3cm 海棉。
 - 3.以固定速率注入 0.003M 燃料即可開始測量。

【結果】

1.數據結果：

電池模式	陰極水源	沒接電阻最高電壓(V)	沒接電阻平均電壓(V)
自製雙槽式	自來水	0.071	0.0347

2.作圖：



【討論】1.菌液 A 的產生電壓從原本的 0.05V 提升至 0.071V。

2.產生電壓極不穩定，可能是自來水裡離子所造成的影響。

探討 3、探討陰極電解質溶液對電壓的影響

【目的】探討陰極換成 RO 水對電壓的影響。

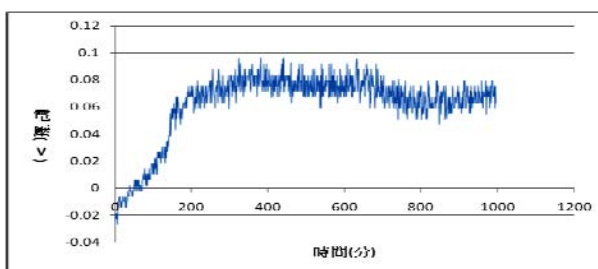
【步驟】陰極電解質溶液換成 900mL RO 水即可開始測試。

【結果】

1.數據結果：

電池模式	自製雙槽式
陰極水源	RO 水
沒接電阻最高電壓(V)	0.091
沒接電阻平均電壓(V)	0.062

2.作圖：



【討論】1.比較：

陰極水源	沒接電阻最高電壓(V)	沒接電阻平均電壓(V)
自來水	0.071	0.0347
RO 水	0.091	0.062

2.使用 RO 水做為陰極水源時，電壓較穩定，而且電壓稍微大一些。

3.為了排除未知離子造成的影響，我們決定使用離子較少的 RO 水。

4. RO 水裡離子太少可能是導致產生電壓較小。

探討 4、探討食鹽濃度對電壓的影響

【目的】測試不同的食鹽濃度對電壓的影響。

【步驟】1.在陰極依序加入不同克數的食鹽於 900mL RO 水中。

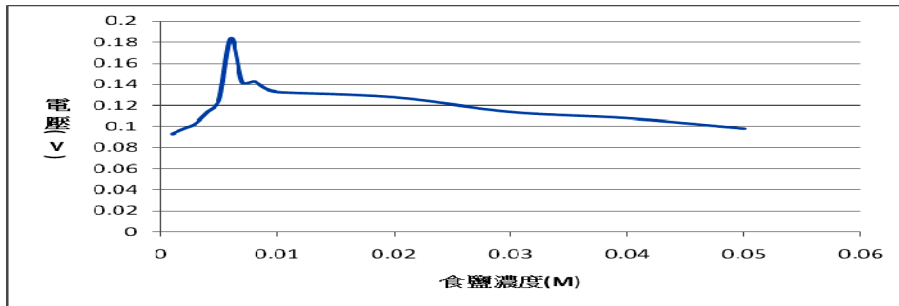
2.依序測量 0.01M、0.02M、0.03M、0.04M、0.05M、0.06M、0.07M、0.08M、0.09M、0.1M、0.2M、0.3M、0.4M、0.5M 的食鹽濃度。

【結果】

1.數據結果：

食鹽水濃度 (M)	沒接電阻最高電壓 (V)	沒接電阻平均電壓 (V)	食鹽水濃度 (M)	沒接電阻最高電壓 (V)	沒接電阻平均電壓 (V)
0.001	0.093	0.066	0.008	0.143	0.129
0.002	0.098	0.071	0.009	0.136	0.121
0.003	0.103	0.098	0.01	0.133	0.109
0.004	0.114	0.097	0.02	0.128	0.117
0.005	0.125	0.105	0.03	0.114	0.106
0.006	0.204	0.175	0.04	0.108	0.102
0.007	0.142	0.135	0.05	0.098	0.088

2.作圖



【討論】1.加入適當濃度的食鹽，不只可以增加溶液導電度，而且食鹽溶液不會影響陰陽極行氧化還原反應。

2.結果顯示：0.006M 食鹽溶液的發電量是最大的 0.204V。

探討 5、測試絲藻培養的菌液 B 對電壓的影響。

【目的】在雙槽式反應槽以菌液 B 發電。

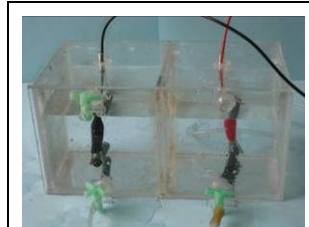
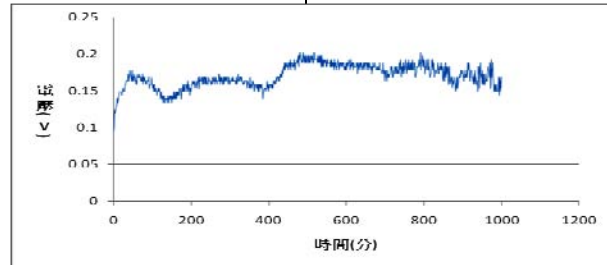
【步驟】陽極菌液換成菌液 B，陽極上方加以密閉隔絕空氣後即可開始測試。

【結果】

1.數據結果：

電池模式	自製雙槽式
陰極水源	RO 水
沒接電阻最高電壓(V)	0.231
沒接電阻平均電壓(V)	0.213

2.作圖：



實驗裝置

【討論】1.比較：

菌液種類	沒接電阻最高電壓(V)	沒接電阻平均電壓(V)
菌液 A	0.204	0.175
菌液 B	0.231	0.213

同樣裝置下，菌液 B 的發電電壓高於菌液 A。

2.菌液 A 所存在的陽極槽中有氧氣的存在，氧化葡萄糖後電子可能會直接在陽極槽還原氧氣；然而菌液 B 處在無氧的陽極槽中，氧化葡萄糖後電子會從外電路至陰極槽還原氧氣而產生電壓，故菌液 B 的產電電壓會比菌液 A 來得大。

研究四、隔離膜的性質探討。

探討 1、隔離膜質子滲透率的測試

【目的】測試質子穿透隔離膜的能力。

【步驟】1.隔離膜面積固定為 3cm×3cm。

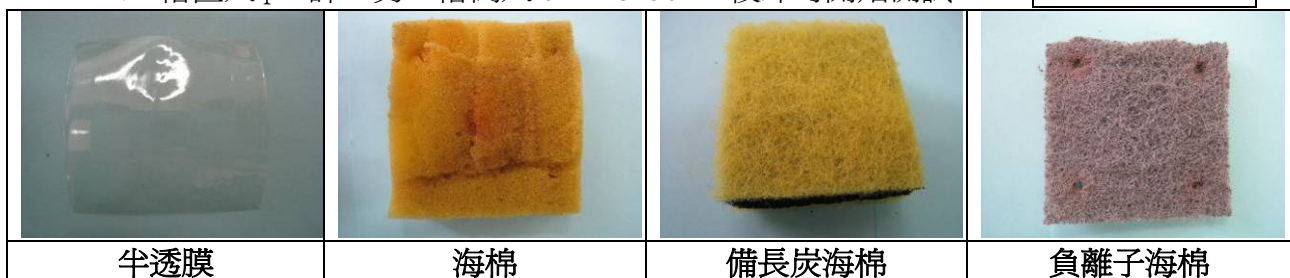
2.隔離膜分別為半透膜、海棉、負離子海棉、備長炭海棉。

3.陰陽兩極各加 500mL 的自來水。

4.一槽置入 pH 計，另一槽倒入 6M HCl 30mL 後即可開始測試。

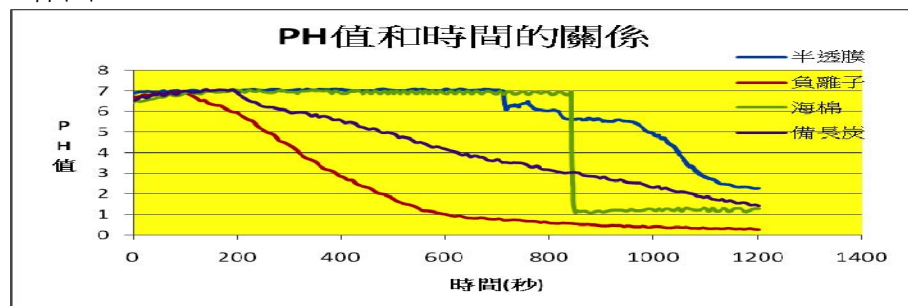


實驗裝置



【結果】

1.作圖：



【討論】1.結果顯示：這四種隔離膜都具有質子滲透能力，滲透能力的大小依序是：

負離子>備長炭>半透膜>海棉。

2.電池的隔離膜須具備質子穿透能力，而這四種材質都可以做為電池的隔離膜。

探討 2、隔離膜氧氣滲透率的測試

【目的】測試隔離膜透氣率的能力。

【步驟】1.在塑膠袋上剪裁 1cm²的開口，依序黏上四種隔離膜。

2.在水裡接上曝氣泵浦，觀察水面有無氣體冒出。

【結果】

1.數據結果：

	半透膜	海棉	負離子海棉	備長炭海棉
氣體是否通過	否	是	是	是



實驗裝置

【討論】1.由實驗得知：海棉、負離子海棉、備長炭海棉有孔隙，所以無法隔絕氣體。

2.半透膜包覆的塑膠袋最後會爆開，證明半透膜會隔絕空氣溢出。

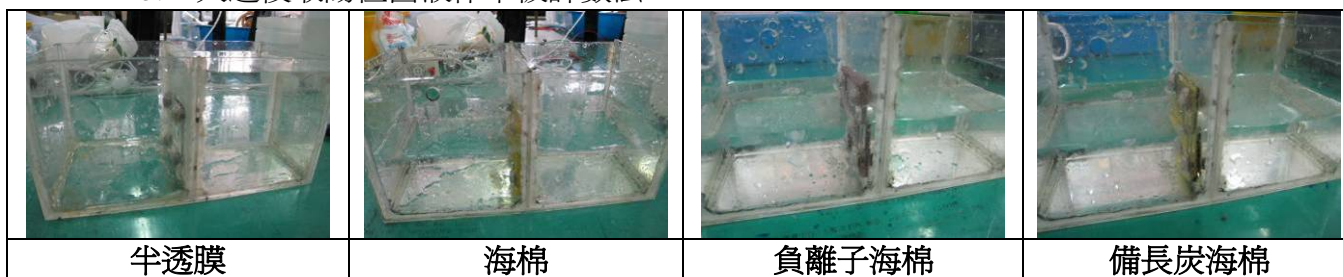
探討 3、隔離膜隔離細菌的測試

【目的】測試隔離膜隔離細菌的效果。

【步驟】1.中間夾層依序置換四種隔離膜。

2.陽極倒入 500mL 菌液 B，陰極倒入 500mLRO 水。

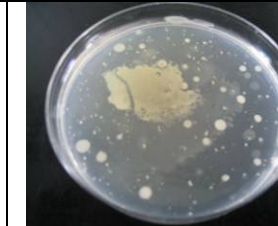
3.一天過後取陽極菌液作平板計數法。



【結果】

1.平板計數法：

半透膜(前)	負離子海棉(前)	海棉(前)	備長炭海棉(前)
1.4x10 ⁴ cfu/ml	5.31x10 ⁶ cfu/ml	1.5x10 ⁵ cfu/ml	5.1x10 ⁶ cfu/ml

半透膜(後)	負離子海棉(後)	海棉(後)	備長炭海棉(後)
			
$1.02 \times 10^7 \text{ cfu/ml}$	$3.4 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$	$6.41 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$	$4.6 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$

【討論】1. 隔離膜隔離細菌效果比較：

	半透膜	海棉	負離子海棉	備長炭海棉
前	$1.4 \times 10^4 \text{ cfu/ml}$	$1.5 \times 10^5 \text{ cfu/ml}$	$5.31 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$	$5.1 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$
後	$1.02 \times 10^7 \text{ cfu/ml}$	$6.41 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$	$3.4 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$	$4.6 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$
效果	優	良好	差	劣

半透膜和海棉隔離細菌的能力最好。

2. 實驗發現：海棉、負離子海棉、備長炭海棉不能完全隔離菌液流至陰極，而半透膜可完全隔離菌液流至陰極。

3. 我們將以隔離細菌效果最好的半透膜和海棉做為隔離膜來測試產電電壓。

探討 4、隔離膜面積對電壓的影響

【目的】測試不同面積的半透膜與海棉對電壓的影響。

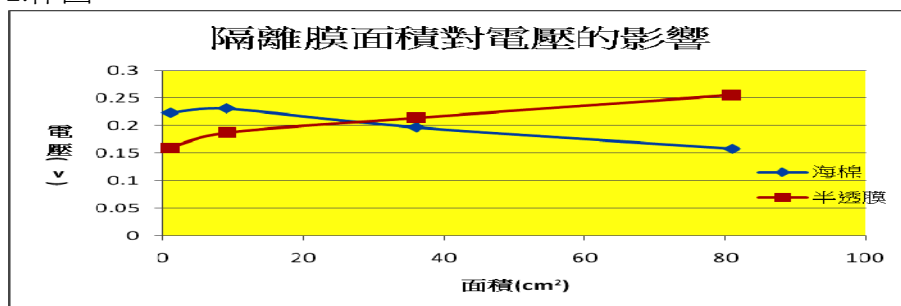
【步驟】1. 陽極倒入 900mL 的菌液 B，陰極倒入 900mL RO 水並加入 0.32g 的食鹽。
2. 在陰陽兩極中央置入 10cm 石墨棒使其距離 10cm。
3. 中間隔膜為分別為 1cm×1cm、3cm×3cm、6cm×6cm、8cm×8cm 的海棉、半透膜。
4. 以固定速率注入 0.003M 燃料，接上 250Ω 電阻即可開始測試。

【結果】

1. 數據結果：

中間夾層	沒接電阻 最高電壓 (V)	沒接電阻 平均電壓 (V)	250Ω 下 最大電 壓(V)	250Ω 下 平均電 壓(V)	250Ω 下 最大功率密 度(mW^2/m^2)	250Ω 下 平均功率密 度(mW^2/m^2)	內電阻(Ω)
1cm×1cm 海棉	0.223	0.201	0.058	0.054	5.98	5.18	711
3cm×3cm 海棉	0.231	0.213	0.061	0.057	6.62	5.78	696
6cm×6cm 海棉	0.197	0.177	0.049	0.044	4.27	3.44	755
8cm×8cm 海棉	0.158	0.149	0.041	0.037	2.57	2.43	789
1cm×1cm 半透膜	0.159	0.152	0.032	0.03	1.82	1.60	992
3cm×3cm 半透膜	0.187	0.166	0.043	0.04	3.29	2.84	837
6cm×6cm 半透膜	0.214	0.203	0.057	0.051	5.18	4.62	741
8cm×8cm 半透膜	0.256	0.236	0.067	0.062	7.98	6.83	705

2. 作圖：



【討論】1. 海棉面積為 3cm×3cm 時電壓最大，沒接電阻電壓為 0.231V，電阻 250Ω 下最大電壓為

0.061V。

2. 3cm×3cm 海棉電壓比 1cm×1cm 海棉大的原因可能是 1cm×1cm 海棉的孔徑太小，電子穿透率低而造成電壓較小。
3. 半透膜面積愈大電壓愈大，最大為 0.256V，在 250Ω 下最大電壓為 0.067V，原因為半透膜的電子穿透率較低，所以需要增加面積來提升電子穿透率。
4. 比較：

中間夾層	250Ω 下 最大功率密度(mW^2/m^2)	250Ω 下 平均功率密度(mW^2/m^2)	內電阻(Ω)
3cm×3cm 海棉	6.62	5.78	696
8cm×8cm 半透膜	7.98	6.83	705

功率密度與內電阻都是 8cm×8cm 半透膜 > 3cm×3cm 海棉，原因是半透膜的電子穿透率較低所造成，此時 8cm×8cm 半透膜已將功率密度提升為 $7.98\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，比歷屆科展最大功率密度 $1.97\text{mW}^2/\text{m}^2$ 高出很多。

5. 雖然海棉的內電阻較低，但無法完全阻隔細菌流入陰極，所以最後決定以功率密度較高的 8cm×8cm 半透膜繼續下面的探討。

研究五、微生物菌落數與產生電壓的關係。

探討 1、測試陽極 pH 值對菌落數與電壓的關係。

【目的】討論菌落數與電壓的關係。

【步驟】1. 先使反應槽反應一天至最大電壓。

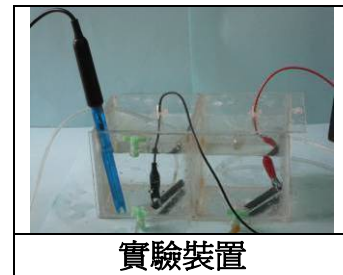
2. 陽極放入 pH 計，以固定速率開始注入 0.003M 燃料。

3. 以 pH=10 的氫氧化鈉溶液滴入陽極即可開始測試。

4. 依 pH 值變化取菌液作平板計數法。

【結果】

1. 數據結果：



實驗裝置

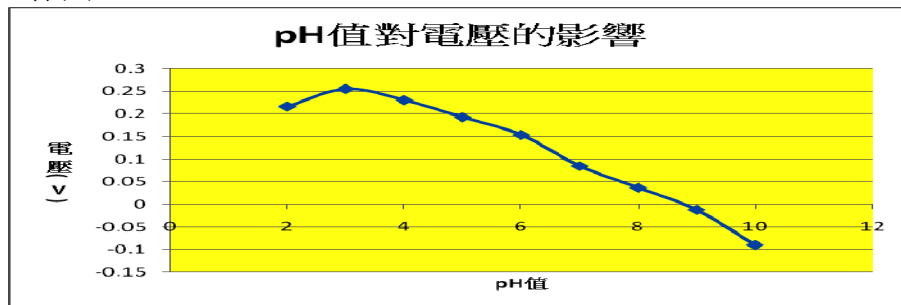
pH 值	陰極菌數(cfu/ml)	陽極菌數(cfu/ml)	沒接電阻電壓(V)
2	2.6×10^4	1.7×10^8	0.217
3	2.0×10^4	3.1×10^8	0.256
4	1.1×10^4	9.7×10^7	0.231
5	6.1×10^4	7.3×10^7	0.193
6	5.6×10^4	4.1×10^6	0.154
7	1.5×10^4	1.7×10^6	0.085
8	4.6×10^4	8.9×10^5	0.037
9	3.7×10^4	5.8×10^5	-0.012
10	3.4×10^4	4.3×10^4	-0.090

2. 平板計數法：

pH=2	pH=3	pH=4	pH=5
$1.7 \times 10^8 \text{ cfu/ml}$	$3.1 \times 10^8 \text{ cfu/ml}$	$9.7 \times 10^7 \text{ cfu/ml}$	$7.3 \times 10^7 \text{ cfu/ml}$

pH=6	pH=7	pH=8	pH=9
			
4.1×10^6 cfu/ml	1.7×10^6 cfu/ml	8.9×10^5 cfu/ml	5.8×10^5 cfu/ml

3.作圖：



pH=10

4.3×10^4 cfu/ml

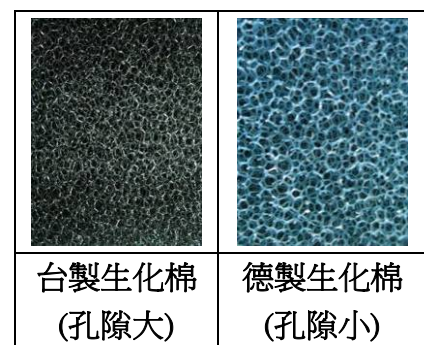
【討論】1.當 pH=3 時菌數是最大的 3.1×10^8 ，電壓也是最大的 0.256V。

2.質子濃度會影響細菌的氧化還原反應，可是並不是 pH 愈低電壓就愈大，最大的電壓需建立在菌數、質子濃度、溶氧量、燃料濃度的平衡而產生。

探討 2、生化棉對微生物菌落數的影響。

【目的】討論使用生化棉前後菌數的變化。

- 【步驟】1.陽極倒入 850mL 的菌液 B，陰極倒入 900mL RO 水並加入 0.32g 的食鹽。
2.在陰陽兩極中央置入 10cm 石墨棒使其距離 10cm。
3.中間隔膜固定為 8cm×8cm 半透膜。
4.陽極分別置入德製生化棉與台製生化棉。
5.以固定速率注入 0.003M 燃料。
6.接上 250Ω 電阻即可開始測試。
7.實驗結束後取陽極菌液作平板計數法。

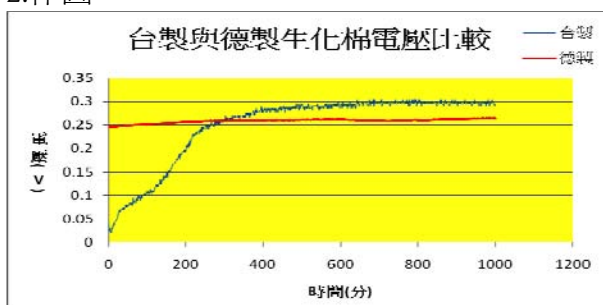


【結果】

1.數據結果：

中間夾層	陽極生化棉	沒接電阻最高電壓(V)	沒接電阻平均電壓(V)	250Ω下最大電壓(V)	250Ω下平均電壓(V)	250Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	250Ω下平均功率密度(mW^2/m^2)	內電阻(Ω)
8cm×8cm 半透膜	台製	0.284	0.271	0.075	0.071	10	8.96	697
8cm×8cm 半透膜	德製	0.266	0.251	0.069	0.063	8.46	7.06	714

2.作圖：



3.平板計數法

台製生化棉	德製生化棉
	
6.5×10^8 cfu/ml	7.3×10^8 cfu/ml

【討論】1.生化棉可提供細菌一個棲息的環境，所以具有培菌的效果。

2.比較：

生化棉	陽極菌 cfu/ml	250Ω 下最大功率密度(mW^2/m^2)	內電阻(Ω)
無	3.1×10^8	7.98	705.
台製	6.5×10^8	10	697
德製	7.3×10^8	8.46	714

培菌效果以**德製生化棉**效果最好，菌數增加至 $7.3 \times 10^8 \text{cfu/ml}$ 。

3.雖然德製生化棉陽極的菌數比台製生化棉大，不過電壓比台製生化棉小，原因為台製生化棉的孔隙較大，使得菌液容易穿透流動，導致內電阻較小，產電電壓較大。

4.使用台製生化棉時最大功率密度已由 $7.98 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ 提升為 $10 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ ，比歷屆科展最大功率密度 $1.97 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ 高出甚多，但仍比文獻中最大功率密度 $32.9 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ 還低。

研究六、陰極曝氣量對功率密度及內電阻的影響。

探討 1、簡易曝氣量的測量。

【目的】利用自製可變電阻器控制曝氣泵浦的曝氣量。

【步驟】1.將曝氣泵浦、三用電表接至可變電阻。

2.將電壓控制在 40V、50V、60V、70V、80V、90V、100V，利用排水集氣法測量曝氣泵浦收集 590mL 體積所需時間並計算氣體輸送速率。

3.作電壓及速率的檢量線圖形，由檢量線換算曝氣量為 4、8、12、16、20mL/s 所需電壓。

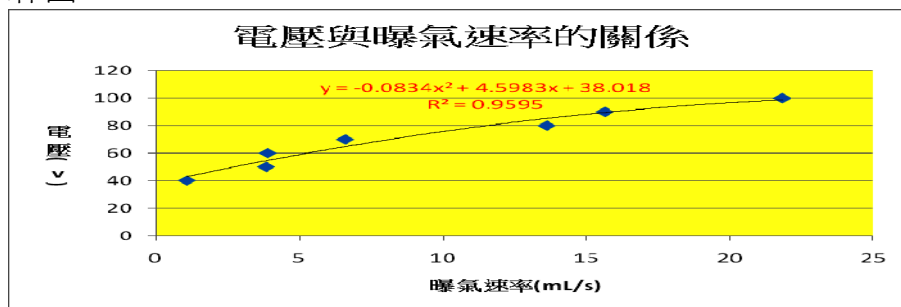


【結果】

1.數據結果：(錐形瓶 590mL)

電壓(V)	秒(s)	速率(mL/s)
40	557	1.06
50	154	3.83
60	152	3.88
70	90	6.59
80	43	13.63
90	89	15.66
100	27	21.85

2.作圖：



曝氣量表	
電壓(V)	曝氣速率(mL/s)
96	20
90	16
81	12
69	8
55	4

【討論】1.由檢量線得知： $Y = -0.0834X^2 + 4.5983X + 38.018$ Y：電壓(V) X：曝氣速率(mL/s)。

- 2.當電壓值小於 40V 時，曝氣量會過小以致無法使用排水集氣法量測。
- 3.利用公式求出所需曝氣速率的電壓。

探討 2、陰極曝氣量對功率密度及內電阻的關係。

【目的】以不同曝氣速率討論功率密度及內電阻的關係。

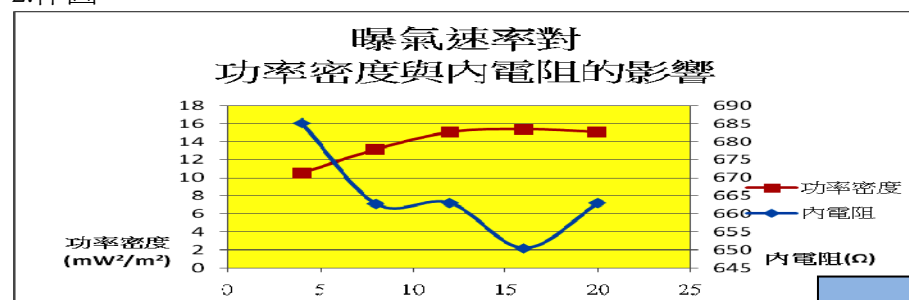
【步驟】陽極置入台製生化棉，以不同曝氣速率(4、8、12、16、20 mL/s)曝氣，接上 250Ω 電阻即可開始測試。

【結果】

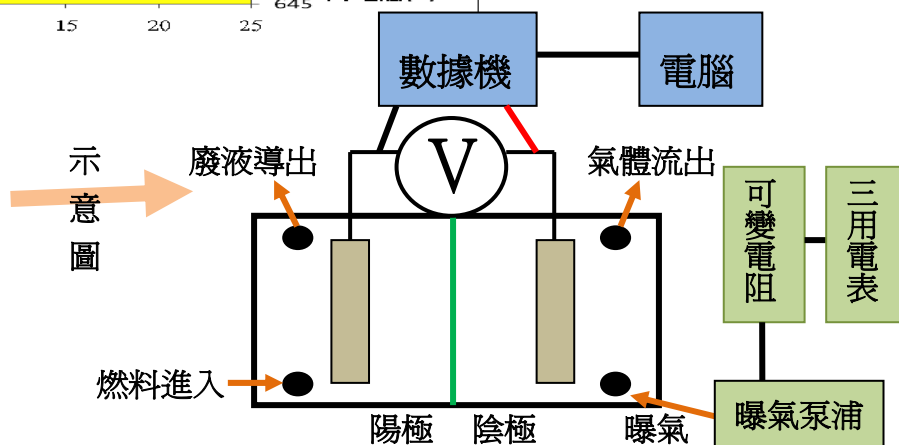
1.數據結果：

曝氣速率 (mL/s)	沒接電阻最高電壓(V)	沒接電阻平均電壓(V)	250Ω下 最大電壓(V)	250Ω下 平均電壓(V)	250Ω下 最大功率密度 (mW ² /m ²)	250Ω下 平均功率密度 (mW ² /m ²)	內電阻 (Ω)
4	0.288	0.275	0.077	0.075	10.54	10	685
8	0.314	0.284	0.086	0.083	13.15	12.25	663
12	0.336	0.303	0.092	0.089	15.05	14.08	663
16	0.335	0.305	0.093	0.089	15.38	14.08	651
20	0.336	0.303	0.092	0.089	15.05	14.08	663

2.作圖：



3.實驗裝置圖：



【討論】1.曝氣速率到達 12mL/s 時，功率密度達最大值且內電阻為最小，原因為陰極 RO 水的溶氧量到達飽和。

2.陰極曝氣可以有效提高細菌行氧化還原能力，此時最大功率密度已經從原本的 10mW²/m² 大幅提升到 15.38mW²/m²。

研究七、水力停留時間對功率密度及內電阻的影響。

探討 1、簡易水力停留時間的測量。

【目的】測量點滴注入器的進流速率。

【步驟】1.水力停留時間：控制燃料進流 850mL 所需的時間。

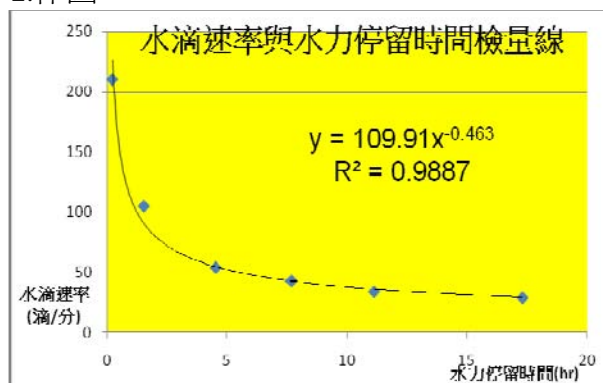
2.利用點滴注射器接入量筒，調整滴入速率，測量滴入體積為 25 毫升時所需時間及滴數。

3.依序將上述體積換算成水力停留時間。

【結果】1.數據結果：體積為 25mL

滴入時間(秒)	22	162	481	813	1178	1835
滴數(滴)	77	285	440	583	672	887
水滴速率(滴/分)	210	105	54	43	34	29
水力停留時間(hr)	0.21	1.53	4.54	7.67	11.12	17.33

2.作圖：



- 【討論】1.由檢量線得知 $y=109.91x^{-0.463}$ Y：水滴速率(滴/分) X：水力停留時間(小時)
2.當燃料桶裡的溶液愈來愈少時，注入速率會因為水壓的關係而有所改變，高度差愈大，誤差愈小。

探討 2、陽極水力停留時間對功率密度及內電阻的關係。

【目的】討論改變水力停留時間對功率密度與內電阻的影響

【步驟】曝氣速率固定為 12mL/s，改變水力停留時間分別為 1、3、6、12、18、24hr 由檢量線求出滴入速率即可開始測試。

【結果】

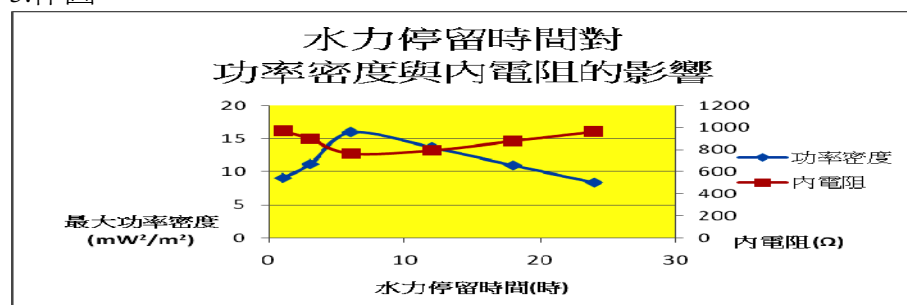
1.不同水利停留時間的水滴入速率：

水力停留時間(hr)	1	3	6	12	18	24
水滴入速率(滴/分)	101	66	48	35	29	25

2.數據結果：

水力停留時間(時)	沒接電阻最高電壓(V)	沒接電阻平均電壓(V)	250Ω下最大電壓(V)	250Ω下平均電壓(V)	250Ω下最大功率密度(mW ² /m ²)	250Ω下平均功率密度(mW ² /m ²)	內電阻(Ω)
1	0.297	0.289	0.069	0.066	8.46	7.74	826
3	0.313	0.301	0.086	0.084	13.15	12.54	660
6	0.339	0.314	0.095	0.091	16.04	14.72	642
12	0.321	0.31	0.089	0.085	14.08	12.84	652
18	0.306	0.286	0.083	0.078	12.25	10.82	672
24	0.284	0.271	0.063	0.065	7.06	7.51	877

3.作圖：



- 【討論】1.水力停留時間為 6 小時的產電電壓最大，在 250Ω 下最大電壓為 0.095V。
2.與之前固定的速率做比較：

水力停留時間(時)	250Ω 下最大功率密度(mW ² /m ²)	250Ω 下平均功率密度(mW ² /m ²)	內電阻(Ω)
5.4	15.4	14.08	651
6	16.04	14.72	642

水力停留時間為 6 小時是最好的狀態，最大功率密度也由 $15.38\text{mW}^2/\text{m}^2$ 上升至 $16.04\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，內電阻更下降至 642Ω 。

3. 滴入速率過慢造成燃料濃度不夠而使細菌濃度下降，速率太快又會造成燃料消耗不完全使產電電壓下降。

研究八、燃料對功率密度及內電阻的影響。

探討 1、討論燃料的種類對功率密度及內電阻的影響。

【目的】探討使用不同種類燃料對功率密度與內電阻的影響。

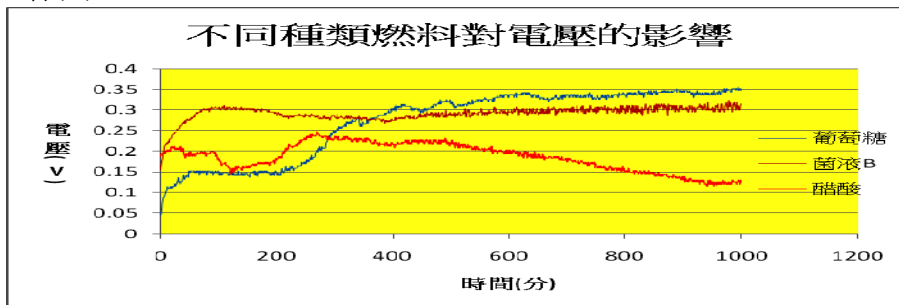
【步驟】水力停留固定為 6 小時，分別測試不同種類燃料(0.003M 醋酸溶液、菌液 B、0.003M 葡萄糖溶液)。

【結果】

1. 數據結果：

燃料種類	沒接電阻 最高電壓 (V)	沒接電阻 平均電壓 (V)	250 Ω 下 最大電壓(V)	250 Ω 下 平均電壓(V)	250 Ω 下 最大功率密度 (mW^2/m^2)	250 Ω 下 平均功率密度 (mW^2/m^2)	內電阻(Ω)
醋酸	0.278	0.243	0.071	0.068	8.96	8.22	729
菌液 B	0.31	0.291	0.078	0.075	10.82	10	744
葡萄糖	0.339	0.314	0.095	0.091	16.04	14.72	642

2. 作圖：



- 【討論】
1. 最佳燃料為 0.003M 的葡萄糖水溶液，最大功率密度為 $16.04\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，原因為葡萄糖能提供菌液足夠的營養而讓細菌達到飽和。
 2. 醋酸溶液電壓偏低的原因是醋酸溶液會影響細菌生長的环境。
 3. 使用菌液 B 為燃料會使菌數無法到達飽和而趨近於定值。

探討 2、燃料的濃度對功率密度及內電阻的影響。

【目的】討論不同燃料濃度對功率密度及內電阻的影響。

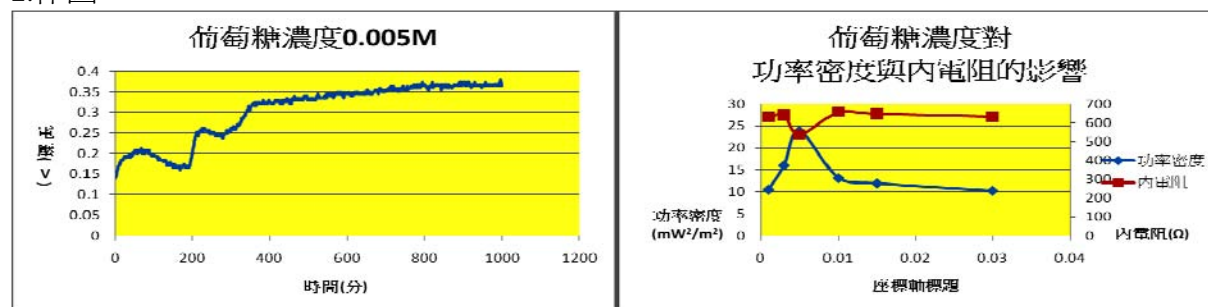
【步驟】改變不同葡萄糖燃料的濃度(0.001M、0.003M、0.005M、0.01M、0.015M、0.03M)即可測試。

【結果】

1. 數據結果：

葡萄糖濃度(M)	沒接電阻 最高電壓 (V)	沒接電阻 平均電壓 (V)	250 Ω 下 最大電壓(V)	250 Ω 下 平均電壓(V)	250 Ω 下 最大功率密度 (mW^2/m^2)	250 Ω 下 平均功率密度 (mW^2/m^2)	內電阻(Ω)
0.001	0.272	0.252	0.077	0.074	10.54	9.74	633
0.003	0.339	0.314	0.095	0.091	16.04	14.72	642
0.005	0.365	0.352	0.116	0.111	23.92	21.9	537
0.01	0.312	0.298	0.086	0.083	13.15	12.25	657
0.015	0.295	0.277	0.082	0.076	11.95	10.27	649
0.03	0.269	0.251	0.076	0.07	10.27	8.71	635

2.作圖：



【討論】1.燃料在 0.005M 時功率密度為最大的 23.92mW²/m²，內電阻為 537Ω。

2.離參考文獻最大功率密度 32.9mW²/m²，內電阻 170Ω 還有一段距離。

研究九、外電阻對功率密度及內電阻的影響。

探討 1、電阻材質對功率密度及內電阻的影響。

【目的】討論不同材質的電阻對功率密度及內電阻的影響。

【步驟】注入 0.005M 葡萄糖燃料，再用自製電阻板接上不同材質的 250Ω 電阻即可開始測試。



【結果】

1.數據結果：

電阻材質	沒接電阻 最高電壓 (V)	沒接電阻 平均電壓 (V)	250Ω 下 最大電壓(V)	250Ω 下 平均電壓(V)	250Ω 下 最大功率密度 (mW ² /m ²)	250Ω 下 平均功率密度 (mW ² /m ²)	內電 阻(Ω)
精密金屬膜電阻	0.365	0.352	0.121	0.118	26.03	24.75	504
金屬氧化膜電阻	0.365	0.352	0.12	0.115	25.6	23.51	510.
碳膜電阻	0.365	0.352	0.116	0.111	23.92	21.9	537
水泥電阻	0.365	0.352	0.098	0.093	17.07	15.38	681
金屬膜電阻	0.365	0.352	0.116	0.112	23.92	22.3	537

【討論】1.電阻的精密程度對效果有很大的影響，碳膜電阻和水泥電阻會受到溫度與電壓的影響使得誤差變大，而精密金屬膜電阻、金屬氧化膜電阻和金屬膜電阻較不會受到溫度與電壓的影響，相對減少電能的消耗，是比較精密的電阻。

2.比較：

電阻材質	250Ω 下最大功率密度(mW ² /m ²)	250Ω 下平均功率密(mW ² /m ²)	內電阻(Ω)
精密金屬膜電阻	26.03	24.75	504
金屬氧化膜電阻	25.6	23.51	510
碳膜電阻	23.92	21.9	537

精密金屬膜電阻最大功率密度達到 24.75mW²/m²，內電阻也降至 504Ω，而金屬氧化膜電阻的最大功率密度也達到 25.6mW²/m²，內電阻也降至 510Ω，與之前做測試的碳膜電阻相比，功率密度大了一些，之後我們將以靈敏度最高的精密金屬膜電阻來做測試。

探討 2、電阻大小與功率密度及內電阻的關係。

【目的】討論不同電阻大小對功率密度與內電阻的影響。

【步驟】用自製電阻板接上不同歐姆(10 Ω 、500 Ω 、5000 Ω)的精密金屬膜電阻與金屬氧化膜電阻即可開始測試。

【結果】

1.數據結果：

電阻材質	精密金屬膜電阻	精密金屬膜電阻	精密金屬膜電阻
電阻大小(Ω)	10	500	5000
沒接電阻最大電壓(V)	0.365	0.365	0.365
最大電壓(V)	0.009	0.201	0.322
平均電壓(V)	0.007	0.197	0.311
最大功率密度(mW^2/m^2)	3.6	35.91	9.22
平均功率密度(mW^2/m^2)	2.18	34.5	8.6
內電阻(Ω)	396	408	668
參考文獻最大功率密度(mW^2/m^2)	19.7	32.9	24.3
參考文獻內電阻(Ω)	206	170	253
電阻材質	金屬氧化膜電阻	金屬氧化膜電阻	金屬氧化膜電阻
電阻大小(Ω)	10	500	5000
沒接電阻最大電壓(V)	0.365	0.365	0.365
最大電壓(V)	0.008	0.198	0.318
平均電壓(V)	0.007	0.193	0.313
最大功率密度(mW^2/m^2)	2.84	34.85	8.99
平均功率密度(mW^2/m^2)	2.18	33.11	8.71
內電阻(Ω)	446	422	739
參考文獻最大功率密度(mW^2/m^2)	19.7	32.9	24.3
參考文獻內電阻(Ω)	206	170	253

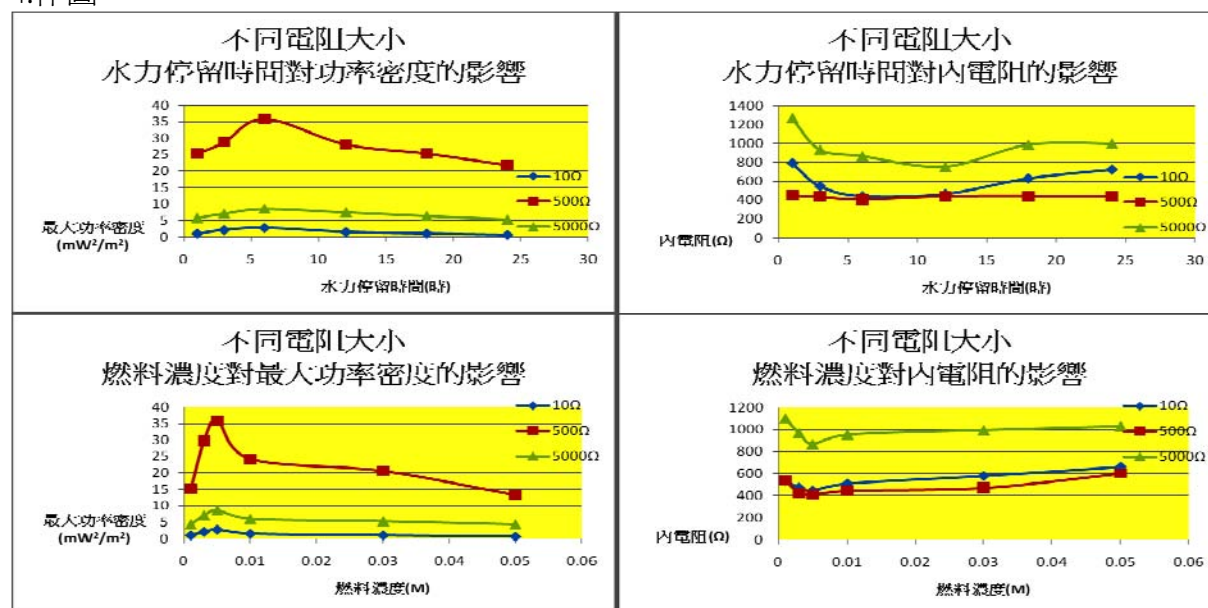
2.固定燃料濃度 0.005M，討論不同歐姆的精密金屬膜電阻下水力停留時間對最大功率的影響：

水力停留時間(時)	沒接電阻最高電壓(V)	10 Ω 下最大電壓(V)	10 Ω 下最大功率密度(mW^2/m^2)	10 Ω 下內電阻(Ω)	500 Ω 下最大電壓(V)	500 Ω 下最大功率密度(mW^2/m^2)	500 Ω 下內電阻(Ω)	5000 Ω 下最大電壓(V)	5000 Ω 下最大功率密度(mW^2/m^2)	5000 Ω 下內電阻(Ω)
1	0.321	0.004	0.71	793	0.169	25.39	450	0.256	5.83	1270
3	0.336	0.006	1.60	550	0.18	28.8	433	0.283	7.12	936
6	0.365	0.008	2.84	446	0.201	35.91	408	0.311	8.6	868
12	0.335	0.007	2.18	469	0.178	28.16	441	0.291	7.53	756
18	0.321	0.005	1.11	632	0.169	25.39	445	0.268	6.38	989
24	0.294	0.004	0.71	725	0.157	21.91	436	0.245	5.34	1000

3.固定水力停留時間為 6 小時，討論不同歐姆的精密金屬膜電阻下燃料濃度對最大功率的影響：

燃料濃度(M)	沒接電阻最高電壓(V)	10Ω下最大電壓(V)	10Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	10Ω下內電阻(Ω)	500Ω下最大電壓(V)	500Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	500Ω下內電阻(Ω)	5000Ω下最大電壓(V)	5000Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	5000Ω下內電阻(Ω)
0.001	0.272	0.005	1.11	534	0.131	15.25	538	0.223	4.42	1099
0.003	0.339	0.007	2.18	474	0.183	29.77	426	0.284	7.17	968
0.005	0.365	0.008	2.84	446	0.201	35.91	408	0.311	8.6	868
0.01	0.312	0.006	1.60	510	0.165	24.20	445	0.262	6.10	954
0.03	0.295	0.005	1.11	580	0.152	20.54	470	0.246	5.38	996
0.05	0.269	0.004	0.71	663	0.122	13.23	602	0.223	4.42	1031

4.作圖：



【討論】 1.比較：

水力停留時間(時)	10Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	10Ω下內電阻(Ω)	500Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	500Ω下內電阻(Ω)	5000Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	5000Ω下內電阻(Ω)
3	1.6	550	28.8	433	7.12	936
6	3.6	446	35.91	408	8.6	868
12	2.18	469	28.16	441	7.53	756

水力停留時間為 6 小時，最大功率密度為最大值 $35.91 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ ；內電阻為最小值 408Ω 。

2.比較：

燃料濃度(M)	10Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	10Ω下內電阻(Ω)	500Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	500Ω下內電阻(Ω)	5000Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	5000Ω下內電阻(Ω)
0.001	1.11	534	15.25	538	4.42	1099
0.005	2.84	446	35.91	408	8.6	868
0.03	1.11	580	20.54	470	5.38	996

高電阻在高燃料濃度下產電大幅下滑，表示陽極槽氧化所產生的電子不容易流到陰極，其內電阻會隨著濃度變高而跟著變大，而在低濃度反應不完全時也跟著下滑。

3. 在使用不同精密金屬膜電阻大小的情況下，最大功率密度與最小內電阻都是在 500Ω 下產生的，此時最大功率密度為 $35.91\text{mW}/\text{m}^2$ ，最小內電阻為 408Ω ，已超過文獻中最大功率密度為 $32.9\text{mW}/\text{m}^2$ ，更是歷屆科展最大功率密度為 $1.97\text{mW}/\text{m}^2$ 的 18 倍產量。

研究十、電極材質與面積對功率密度及內電阻的影響。

探討 1、電極材質對功率密度及內電阻的影響。

【目的】討論電極材質對功率密度與內電阻的影響。

- 【步驟】1. 在陰陽兩極中央置入不同材質(25cm^2 的不鏽鋼、銅片、鉛片、鋁片、鋅片、碳纖維)的電極使其距離 10cm 。
2. 接上 500Ω 自製精密金屬膜電阻板即可開始測試。

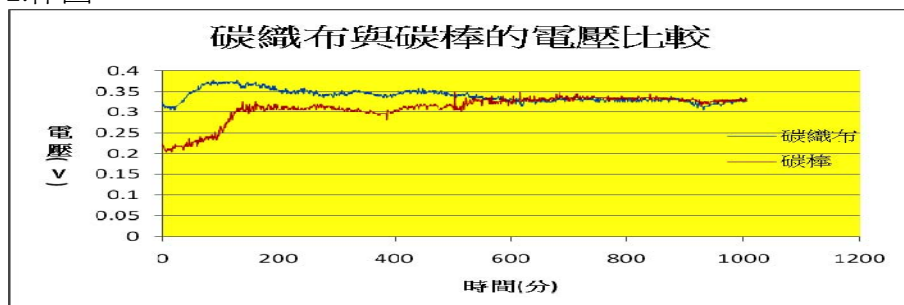


【結果】

1. 數據結果：

電極材料	沒接電阻 最高電壓 (V)	沒接電阻 平均電壓(V)	500Ω下 最大電壓(V)	500Ω下 平均電壓(V)	500Ω下 最大功率密度 (mW/m^2)	500Ω下 平均功率密度 (mW/m^2)	內電阻 (Ω)
碳棒(25cm^2)	0.365	0.353	0.201	0.197	35.91	34.5	408
不鏽鋼(25cm^2)	-0.007	-0.057	-0.001	-0.006	0.004	0.14	3000
銅片(25cm^2)	0.046	0.009	0.002	0.008	0.016	0.26	11000
鉛片(25cm^2)	0.105	0.085	0.043	0.039	7.4	6.08	721
鋁片(25cm^2)	0.032	-0.07	0.01	0.003	0.4	0.04	1100
鋅片(25cm^2)	0.149	0.084	0.08	0.071	25.6	20.16	431
碳纖維(25cm^2)	0.371	0.359	0.22	0.204	38.72	33.29	343

2. 作圖：



【討論】1. 比較：

電極材料	500Ω下 最大功率密度 (mW/m^2)	500Ω下 平均功率密度 (mW/m^2)	內電阻 (Ω)
碳棒(25cm^2)	35.91	34.5	408
碳纖維(25cm^2)	38.72	33.29	343

目前最好的電極種類為碳棒與碳織布，又以碳織布的最大功率密度為最大，已從原本的 $35.91\text{mW}/\text{m}^2$ 提升至 $38.72\text{mW}/\text{m}^2$ ，內電阻也從 408Ω 降至 343Ω 。

2. 碳織布的功率密度比碳棒高，原因為碳織布的纖維較細，接觸面積較大，所以功率密度會比碳棒高。

探討 2、電極互換與功率密度及內電阻的關係。

【目的】探討最佳電極組合與功率密度及內電阻的關係。

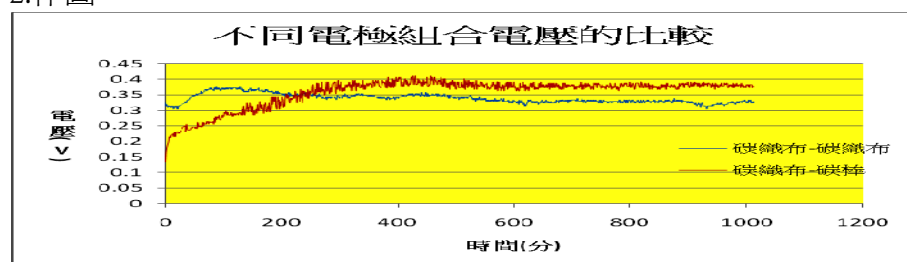
【步驟】陰陽兩極分別置入不同電極組合(碳棒—碳棒、碳織布—碳織布、碳織布—碳棒、碳棒—碳織布)即可測試

【結果】

1. 數據結果：

電極材料 (陽極—陰極)	沒接電 阻最高 電壓(V)	沒接電 阻平均 電壓(V)	500 Ω 下 最大電壓(V)	500 Ω 下 平均電壓(V)	500 Ω 下 最大功率密度 (mW/m^2)	500 Ω 下 平均功率密度 (mW/m^2)	內電阻 (Ω)
碳棒—碳棒	0.365	0.353	0.201	0.197	35.91	34.5	408
碳棒—碳織布	0.312	0.289	0.178	0.171	28.16	25.99	376
碳織布—碳棒	0.398	0.383	0.237	0.226	44.94	40.86	340
碳織布—碳織布	0.371	0.359	0.22	0.204	38.72	33.29	343

2. 作圖：



【討論】1. 比較：

電極材料 (陽極—陰極)	500 Ω 下 最大功率密度 (mW/m^2)	500 Ω 下 平均功率密度 (mW/m^2)	內電阻 (Ω)
碳織布—碳織布	38.72	33.29	343
碳織布—碳棒	44.94	40.86	340

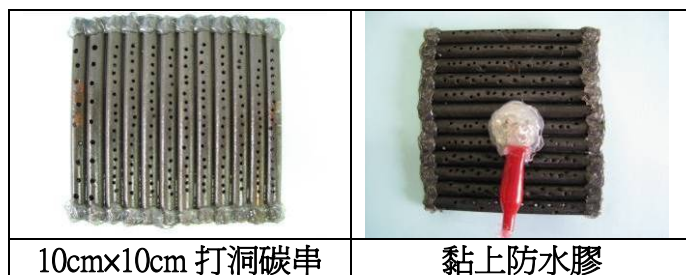
最好的電極組合為陽極：5cm×5cm 碳織布，陰極：10cm 碳棒，最大功率從 $38.72\text{mW}/\text{m}^2$ 提升至 $44.94\text{mW}/\text{m}^2$ ，而內電阻也從 343Ω 降至 340Ω 。

2. 原因是陽極需要吸附能力較好的碳織布，陰極需要導電性較好的碳棒。

探討 3、電極接觸面積與功率密度及內電阻的關係。

【目的】利用最佳電極組合改變電極面積討論功率密度及內電阻的關係。

【步驟】改變陰陽兩極電極面積(100cm² 碳織布—10cm 碳棒、100cm² 碳織布—3cm×3cm 碳串、100cm² 碳織布—5cm×5cm 碳串、100cm² 碳織布—8cm×8cm 碳串、100cm² 碳織布—10cm×10cm 碳串、100cm² 碳織布—10cm×10cm 打洞碳串)即可測試。



【結果】

1.數據結果：

電極面積 (陽極－陰極)	沒接電 阻最高 電壓(V)	沒接電 阻平均 電壓(V)	500Ω下 最大電壓 (V)	500Ω下 平均電壓 (V)	500Ω下 最大功率密度 (mW ² /m ²)	500Ω下 平均功率密度 (mW ² /m ²)	內電 阻(Ω)
25cm ² 碳纖布－ 10cm 碳棒	0.398	0.383	0.237	0.226	44.94	40.86	340
25cm ² 碳纖布－ 10cm×10cm 打洞碳串	0.491	0.546	0.301	0.287	72.48	65.9	316
100cm ² 碳纖布－ 10cm 碳棒	0.433	0.421	0.245	0.232	12.01	10.76	384
100cm ² 碳纖布－ 3cm×3cm 碳串	0.467	0.453	0.279	0.265	15.57	14.05	337
100cm ² 碳纖布－ 5cm×5cm 碳串	0.508	0.497	0.359	0.337	25.78	22.71	208
100cm ² 碳纖布－ 8cm×8cm 碳串	0.559	0.536	0.437	0.426	38.19	36.3	140
100cm ² 碳纖布－ 10cm×10cm 碳串	0.626	0.614	0.583	0.574	67.98	65.9	37
100cm ² 碳纖布－ 10cm×10cm 打洞碳串	0.651	0.645	0.63	0.625	79.38	78.13	16

【討論】1.比較：

電極面積 (陽極－陰極)	沒接電阻最 高電壓(V)	500Ω下 最大電壓(V)	500Ω下最大功率密 度(mW ² /m ²)	內電阻(Ω)
25cm ² 碳纖布－10cm×10cm 打洞碳串	0.561	0.301	72.48	432
100cm ² 碳纖布－10cm×10cm 打洞碳串	0.651	0.63	79.38	17

在 500Ω 下，25cm²碳纖布的功率密度始終很大，不過產電電壓太小，所以我們決定固定陽極為 100cm²碳纖布，討論改變陰極碳串面積對最大功率密度與內電阻的影響。

2.隨著陰極碳串面積變大，功率密度也隨著變大，最佳組合為 100cm²碳纖布－10cm×10cm 打洞碳串，最大功率密度為 79.38 mW²/m²，內電阻降至 17Ω。

3.和參考文獻比較(外接電阻 500Ω)：

電極組合	參考文獻	100cm ² 碳纖布－10cm×10cm 打洞碳串
最大電壓(V)	0.446	0.63
最大功率密度(mW ² /m ²)	32.9	79.38
平均功率密度(mW ² /m ²)	20.3	78.13
內電阻(Ω)	170	17

最大功率密度已經成功提升至 79.38 mW²/m²，超過參考文獻 32.9 mW²/m² 2 倍，而內電阻 17Ω 也比參考文獻 170Ω 小很多，原因為陰極面積變大而使導電能力變強。

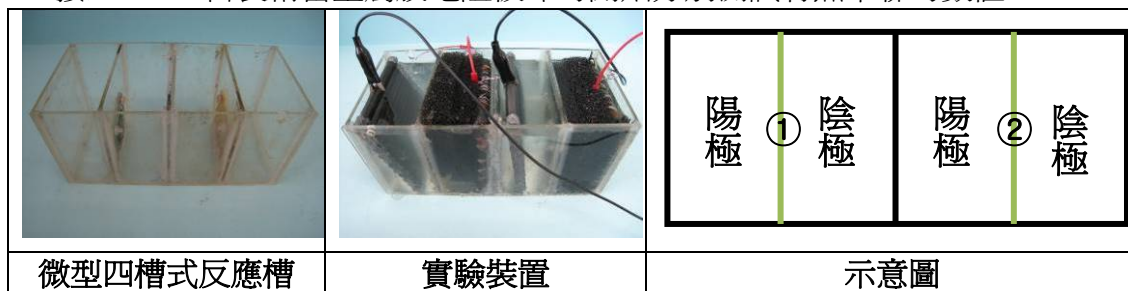
研究十一、自製燃料電池內串聯對功率密度及內電阻的影響。

探討 1、電池內串聯對功率密度及內電阻的影響。

【目的】固定菌液體積，電池內串聯對功率密度及內電阻的影響。

【步驟】1.製作自製微型四槽式反應槽。

- 2.陽極倒入 425mL 的菌液 B，陰極置入曝氣泵浦且倒入 450mL RO 水與 0.16g 的食鹽。
- 3.陽極電極面積 100cm^2 碳纖布－10cm×10cm 打洞碳串)
- 4.中間隔膜為 8cm×8cm 半透膜，陽極置入台製生化棉。
- 5.曝氣速率固定為 12mL/s，開始注入 0.005M 燃料，水力停留固定為 6 小時。
- 6.接上 $500\ \Omega$ 自製精密金屬膜電阻板即可開始分別測試有無串聯的數值。

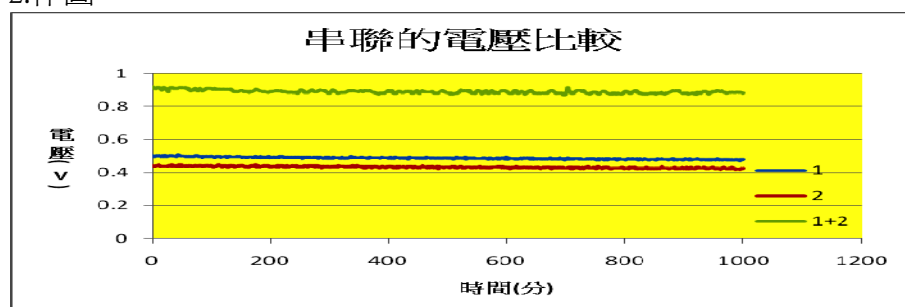


【結果】

1.數據結果：

反應槽名稱	沒接電阻最高電壓 (V)	沒接電阻平均電壓 (V)	500 Ω 下最大電壓 (V)	500 Ω 下平均電壓 (V)	500 Ω 下最大功率密度(mW^2/m^2)	500 Ω 下平均功率密度(mW^2/m^2)	內電阻(Ω)
①	0.511	0.486	0.483	0.471	46.66	44.37	29
②	0.447	0.431	0.421	0.409	35.45	33.46	31
① + ②	0.923	0.901	0.869	0.857	75.52	73.44	31

2.作圖：



【討論】1.在 $500\ \Omega$ 下，反應槽①和反應槽②串聯理論最大電壓為 0.904V，比測試值 0.869V 大了 0.035V，理論最大功率密度為 $82.11\ \text{mW}^2/\text{m}^2$ ，比測試值大了 $6.59\ \text{mW}^2/\text{m}^2$ ，原因為內電阻變大而使輸出電壓電壓變小。

2.由實驗數據可知，內電阻沒有加成性。

探討 2、串聯內溶液互換對功率密度及內電阻的影響。

【目的】討論串聯反應槽內溶液互換對功率密度及內電阻的影響

【步驟】1.製作自製微型四槽式反應槽，反應槽中間部分換成 8cm×8cm 半透膜。

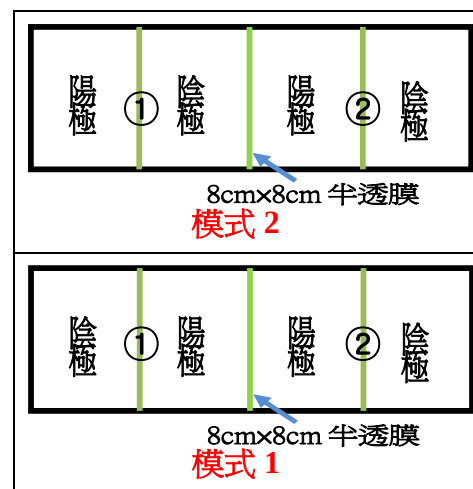
2.陽極倒入 425mL 的菌液 B，陰極置入曝氣泵浦且倒入 450mL RO 水與 0.16g 的食鹽。

3.陽極電極面積 100cm^2 碳纖布－10cm×10cm 打洞碳串)

4.中間隔膜為 8cm×8cm 半透膜，陽極置入台製生化棉。

5.曝氣速率固定為 12mL/s，開始注入 0.005M 燃料，水力停留固定為 6 小時。

6.接上 $500\ \Omega$ 自製精密金屬膜電阻板即可依照不同模式測量。



【結果】

1.數據結果：

反應槽名稱	沒接電阻最高電壓(V)	沒接電阻平均電壓(V)	500Ω下最大電壓(V)	500Ω下平均電壓(V)	500Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	500Ω下平均功率密度(mW^2/m^2)	內電阻(Ω)
①	0.511	0.486	0.483	0.471	46.66	44.37	29
②	0.447	0.431	0.421	0.409	35.45	33.46	31
模式一	0.856	0.836	0.803	0.779	64.48	60.68	33
模式二	1.011	0.993	0.972	0.963	94.48	92.74	20

【討論】1.模式一沒接電阻最大電壓 0.856 比①+②反應槽 0.923 小，電壓偏低的原因為兩槽陽極會相互行氧化還原反應而影響產電電壓。

2.比較：

反應槽名稱	500Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	500Ω下平均功率密度(mW^2/m^2)	內電阻(Ω)
模式二	94.48	92.74	20
①+②	75.52	73.44	31

模式二的最大功率密度為 $94.48 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ 比①+②串聯的 $75.52 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ 大，內電阻也比其小，原因為模式二的①、②反應槽中的陽極陰極會經由 $8\text{cm} \times 8\text{cm}$ 半透膜傳遞電子而降低內電阻造成最大功率密度的提升。

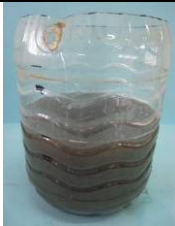
3.就內電阻來說還是以微型雙槽式燃料電池最小，為 17Ω 。

研究十二、自製雙槽式燃料電池對不同微生物作測試。

探討 1、用最佳化電池討論不同菌液的產電電壓。

【目的】用最佳化雙槽式電池以不同菌液比較產電效果

- 【步驟】1.以不同的菌液 850mL 倒入陽極，陰極置入曝氣泵浦且倒入 900mL RO 水與 0.32g 的食鹽
 2.陽極電極為 100cm^2 碳纖維布，陰極電極為 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 打洞碳串。
 3.中間隔膜為 $8\text{cm} \times 8\text{cm}$ 半透膜，陽極置入台製生化棉。
 4.曝氣速率固定為 12mL/s ，開始注入 0.005M 燃料，水力停留固定為 6 小時。
 5.接上 500Ω 自製精密金屬膜電阻板即可開始測試。

			
Rhodospseudomonas palustris	Rhodospseudomonas sphaeroides	東光國小池塘廢水	愛河廢水

【結果】

1.數據結果：

菌液種類	沒接電阻最高電壓(V)	沒接電阻平均電壓(V)	500Ω下最大電壓(V)	500Ω下平均電壓(V)	500Ω下最大功率密度(mW^2/m^2)	500Ω下平均功率密度(mW^2/m^2)	內電阻(Ω)
菌液 A	0.603	0.589	0.577	0.551	66.59	60.72	23
菌液 B	0.651	0.645	0.63	0.625	79.38	78.13	17
光合菌	0.402	0.388	0.384	0.367	29.49	26.94	23
Nano	0.456	0.441	0.437	0.412	38.19	33.95	22
Selenastrum	0.437	0.418	0.418	0.401	34.94	32.16	23
Rhodopseudomonas palustris	0.544	0.509	0.513	0.495	52.63	49	30
Rhodopseudomonas sphaeroides	0.573	0.533	0.556	0.536	6.18	5.75	153
東光國小池塘廢水	0.556	0.525	0.533	0.509	5.68	5.18	216
愛河廢水	0.527	0.499	0.493	0.473	4.86	4.47	345
魚缸水源	0.506	0.476	0.478	0.451	4.567	4.07	293

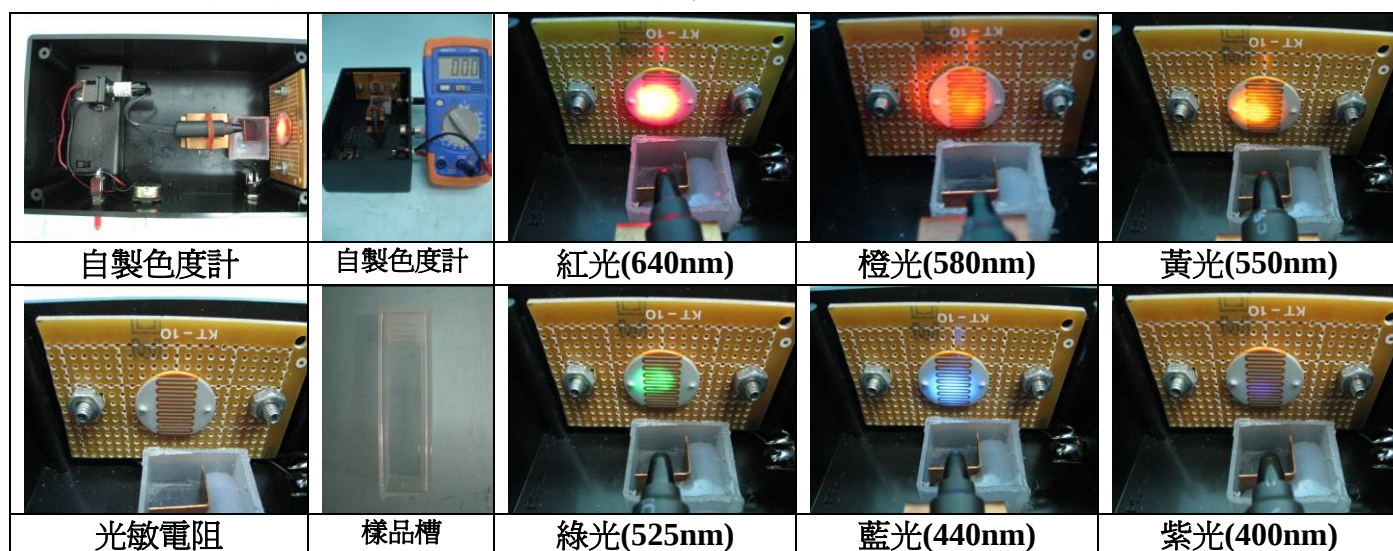
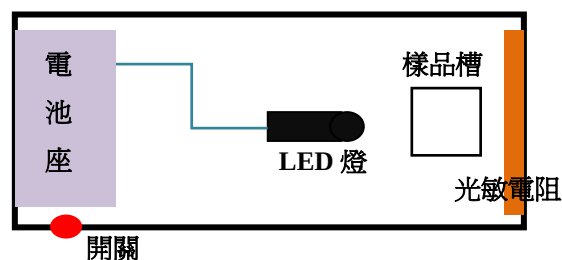
【討論】1.以最佳化微型雙槽式燃料電池對不同菌液發電的結果以**菌液 A** 和**菌液 B** 為最好，尤其又以菌液 B 的產電能力最佳，最大功率密度提升至 $79.38 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ ，內電阻降至 17Ω 。

研究十三、利用微生物燃料電池改善水質汙染。

探討 1. 製作自製色度計

【目的】製作一色度計

- 【步驟】1.量取 0.425g 烘乾 KHP 於水中，並定量至 1L
；取 5ml 和 50mlKHP 溶液加水稀釋至 50ml。
2.將這兩種樣品置入樣品槽中以自製色度計測試紅、橙、黃、綠、藍、紫光的電阻值。



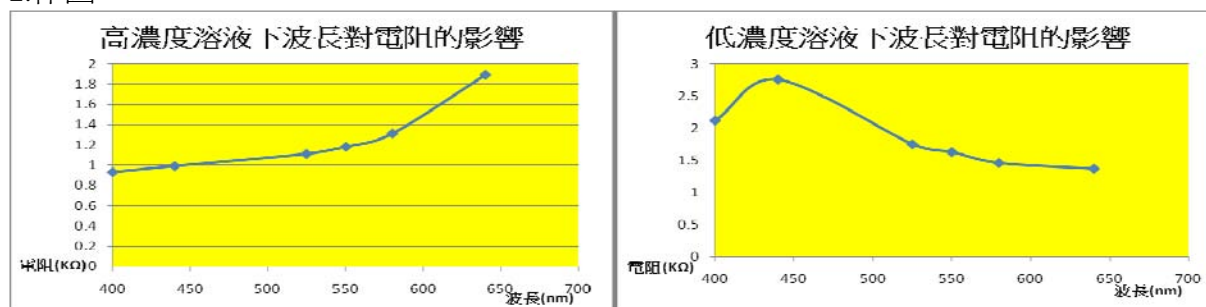
【結果】1.數據結果：

(高濃度)

(低濃度)

波長	400	440	525	550	580	640	波長	400	440	525	550	580	640
電阻(kΩ)	0.93	0.99	1.11	1.18	1.31	1.89	電阻(kΩ)	2.12	2.76	1.75	1.63	1.46	1.37

2.作圖：



- 【討論】1.以光的互補色來說，低濃度的橙色溶液吸收藍光，實驗顯示使用 440nm 的藍光照射有最大的電阻 2.76 kΩ。
- 2.高濃度的綠色溶液吸收紅光，實驗顯示使用 640nm 的紅光照射有最大的電阻 1.89 kΩ。
- 3.最後決定高濃度以紅光照射，低濃度以藍光照射。

探討 2. 利用自製色度計製作 COD 的檢量線。

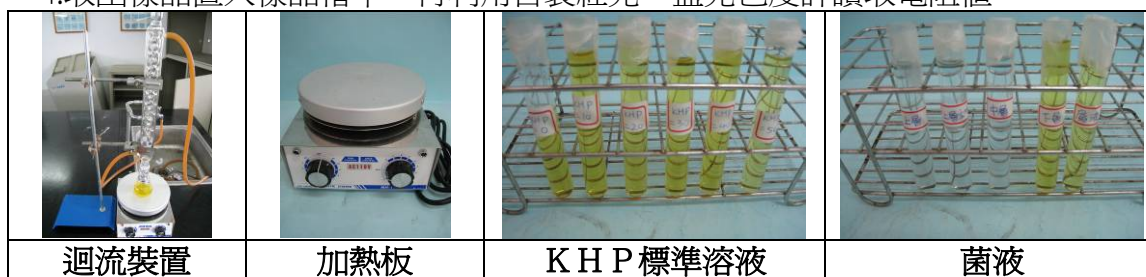
【目的】化學需氧量 COD 檢量線的製作。

【步驟】1.量取 0.425g 已烘乾的 KHP 於水中，並定量至 1L。

2.分別取 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、20、30、40、50mLKHP 標準溶液加水稀釋至 50mL。

3.依序取出 2.5mL 加入二鉻酸鉀 1.5mL、硫酸汞試劑 3.5mL 至迴流管中，加熱迴流 2 小時。

4.取出樣品置入樣品槽中，再利用自製紅光、藍光色度計讀取電阻值。



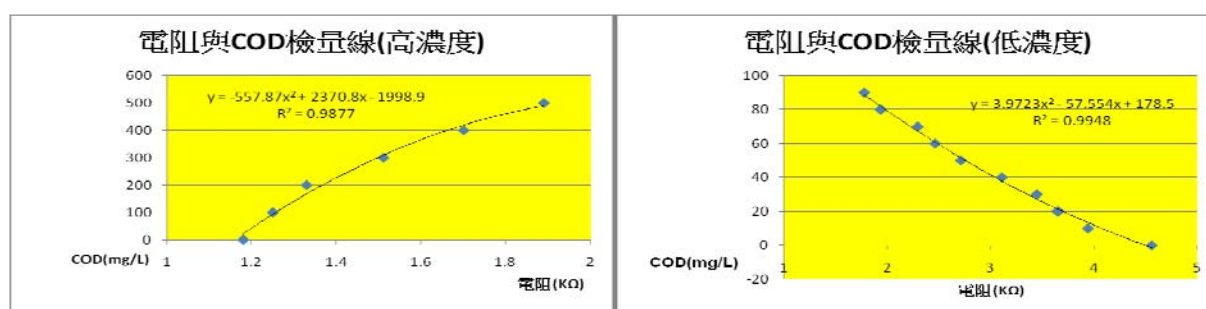
【結果】

1.數據結果：

高濃度	0mL	10mL	20mL	30mL	40mL	50mL
理論 COD(mg/L)	0	100	200	300	400	500
電阻(kΩ)	1.18	1.25	1.33	1.51	1.7	1.89

低濃度	0mL	1mL	2mL	3mL	4mL	5mL	6mL	7mL	8mL	9mL
理論 COD(mg/L)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
電阻(kΩ)	4.56	3.94	3.65	3.45	3.11	2.71	2.46	2.29	1.93	1.77

2.作圖：



- 【討論】1.光強度愈強，光敏電阻的電阻值愈小，而樣本吸收度愈大穿透度愈小，射至光敏電阻的

光會愈弱，故電阻愈大。

2.高濃度溶液使用紅光測量 Cr^{3+} 生成量。

公式爲： $y = -557.87x^2 + 2370.8x - 1998.9$

Y：COD(mg/L) X：電阻(k Ω)

3.低濃度溶液使用藍光測量 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 減少量。

公式爲： $y = 3.9723x^2 - 57.554x + 178.5$

Y：COD(mg/L) X：電阻(k Ω)

探討 3、串聯微型雙槽式燃料電池進出流對 COD 的影響

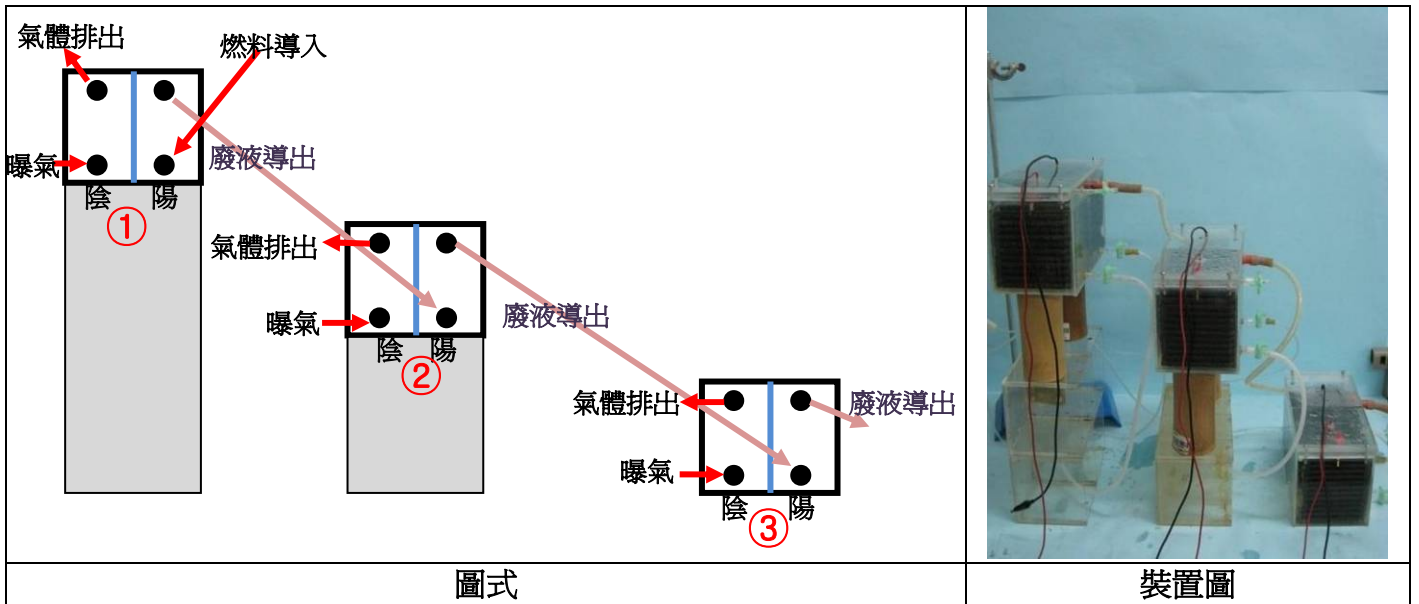
【目的】利用串聯雙槽式進流討論淨化水質的效率

【步驟】1.放置三個最佳化微型雙槽式反應槽，使其有高、中、低的高度落差。

2.以菌液當燃料進流，水力停留時間控制在 6 小時，曝氣速率固定爲 12mL/s。

3.接上 500 Ω 自製精密金屬膜電阻板即可測量。

4.反應 7 天後，取上層、中層、下層陽極菌液和廢液作平板計數法與 COD。



【結果】

1.電壓數據：

電池反應槽	沒接電阻最高電壓(V)	沒接電阻平均電壓(V)	500 Ω 下最大電壓(V)	500 Ω 下平均電壓(V)	500 Ω 下最大功率密度(mW^2/m^2)	500 Ω 下平均功率密度(mW^2/m^2)	內電阻(Ω)
文獻			0.136	0.105	2.2	1.6	525
①	0.321	0.289	0.261	0.257	13.6	13.2	113
②	0.271	0.263	0.215	0.201	9.2	8.1	130
③	0.236	0.227	0.178	0.167	6.3	5.6	163

2.COD 值(mg/L)：

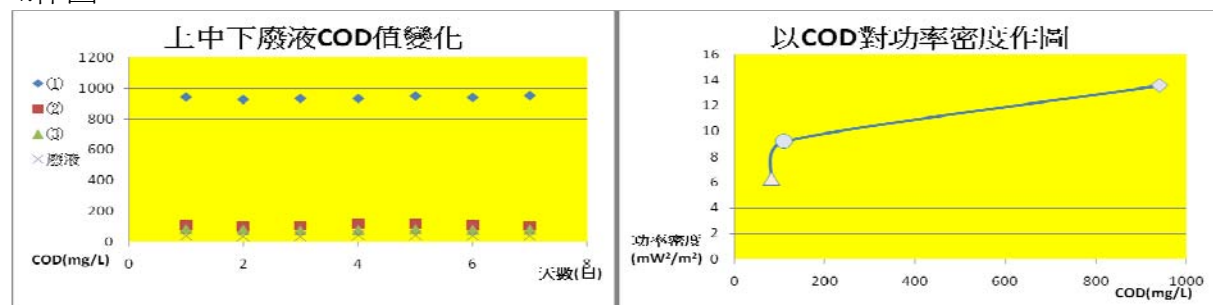
①	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
電阻(K Ω)	1.86	1.84	1.85	1.85	1.86	1.85	1.86
稀釋 1/2 的 COD	472	463	467	467	475	470	472
COD	943	926	933	933	950	940	953
②	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
電阻(K Ω)	1.25	1.25	1.25	1.26	1.26	1.26	1.25
COD	110	102	108	115	120	111	108

③	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
電阻(KΩ)	1.85	1.82	2.07	1.95	1.88	1.92	1.9
COD	84	81	75	80	83	81	82
廢液	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
電阻(KΩ)	3.04	3.17	3.11	2.95	2.89	3.01	3.04
COD	40	36	38	43	45	41	40

3.整理：進流燃料菌液濃度 $8.8 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$

電池種類	菌數(cfu/ml)	菌數剩餘(%)	平均 COD(mg/L)	COD 去除率(%)
文獻				87.1
①	8.9×10^6		940	
②	3.4×10^5	3.82	110	88.2
③	5.9×10^4	0.66	81	91.4
廢液	5.2×10^3	0.058	40	95.7

4.作圖：



【討論】1.三個電池串聯電壓為 0.827V，功率密度 $29.1 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ ，內電阻 406Ω 。

2.利用串聯連續進出流可以有效減少菌數與 COD，菌數由原本的 $8.9 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$ 減少至 $5.2 \times 10^3 \text{ cfu/ml}$ ，COD 值也從 940 mg/L 降至 40 mg/L ，廢液菌數剩餘率為 0.058%、COD 去除率為 95.7%。

3.如果在魚塭設置此種裝置，不僅可以發電，又可以淨化魚塭的水質，簡直是一舉數得啊！

陸、結論

- 1.本實驗使用的絲藻由光學顯微鏡觀察比對結果發現：此絲藻繁殖速度極快，死亡時會消耗大量氧氣而使水質優氧化；本實驗就是利用絲藻的來產生大量的新菌種「YMJH 一號」，再利用其作為微生物燃料電池的菌液。
- 2.在向上流式單槽式反應槽的產電測試中，先利用三用電表測試菌液 A 以 10cm 石墨棒當作電極，結果為 0.01V；反應槽中間設置海棉夾層，再以固定速率的 0.003M 燃料滴流，成功提升菌液的飽和量，使陽極菌數從原本的 $4.61 \times 10^7 \text{ cfu/ml}$ 提升至 $9.82 \times 10^7 \text{ cfu/ml}$ ，電壓也提高到 0.088V。
- 3.利用自製微型雙槽式反應槽，以 3cm×3cm 海棉當隔離膜探討菌液 A 的電壓，發現電壓提升至 0.071V；為了避免未知離子的干擾，將陰極的電解液換成 RO 水，為了增加導電度而加入濃度為 0.006M 食鹽溶液，而此時的最大電壓更大幅提升為 0.204V，達原本的 2 倍之多。
- 4.在相同狀態中以菌液 B 來產電，最大電壓為 0.231V，證明在厭氣狀態下菌液 B 的產電效率比菌液 A 來得好。
- 5.測試隔離膜的結果：使用半透膜作為隔離膜其陽極的菌數為 $1.02 \times 10^7 \text{ cfu/ml}$ ；而使用海棉作為隔離膜其陽極菌數為 $6.41 \times 10^6 \text{ cfu/ml}$ ，顯示半透膜隔離細菌的效果遠比海棉好。
- 6.在 250Ω 下，以不同隔離膜面積的大小來討論產電電壓發現，半透膜的面積愈大其電壓和功率密度也愈大，8cm×8cm 半透膜最大功率密度為 $8 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ 、內電阻為 705Ω ，而 3cm×3cm 海棉最大功率密度為 $6.6 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ 、內電阻為 697Ω ，比較功率密度以 8cm×8cm 半透膜最高，不過內電阻以 3cm×3cm 海棉最小，但兩者均遠高於歷屆科展中 $1.9 \text{ mW}^2/\text{m}^2$ 的最大功率密度。

- 7.陽極放入台製生化棉可有效提高菌落數，使最大功率密度從原本的 $8\text{mW}^2/\text{m}^2$ 更提升至 $10\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，內電阻也由 705Ω 降至 697Ω 。
- 8.以自製可變電阻測試曝氣速率發現，當曝氣速率為 12mL/s 時的功率密度達最大為 $15.4\text{mW}^2/\text{m}^2$ 增加 50%、內電阻也降低為 651Ω ，但距離參考文獻 $32.9\text{mW}^2/\text{m}^2$ 、 170Ω 還有一段距離。
- 9.改變水力停留時間為 6 小時，最大功率密度提升至 $16\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，內電阻降至 642Ω ，證實速率過慢或太快會造成燃料不足或消耗不完全；再以 0.005M 的葡萄糖溶液為燃料，最大功率密度更大幅提升至 $24\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，已達到大多數文獻中的最大值，內電阻更降至 536Ω 。
- 10.更換不同種類與大小的電阻，發現靈敏度最高的精密金屬膜電阻在 500Ω 下可將最大功率密度提升至 $35.9\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，成功得超越了參考文獻值 $32.9\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，而內電阻也降至 408Ω ，距離文獻值 170Ω 還有一段距離。
- 11.更換相同面積的不同電極測試發現，碳織布的功率密度比原本的碳棒好上許多， 500Ω 下最大功率密度提升至 $38.72\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，內電阻下降至 343.18Ω ；接著以碳棒與碳織布互相搭配的組合發現，（碳織布－碳棒）的最大功率密度提升至 $44.94\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，內電阻下降至 339Ω 。
- 12.接著討論（碳織布－碳棒）組合，固定陽極面積為 100cm^2 改變陰極碳棒的面積發現，（ 100cm^2 碳織布－ $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ 打洞碳串）加上「YMJH 一號」的發現使功率密度大幅提升到最高的 $79\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，比參考文獻值 $32.9\text{mW}^2/\text{m}^2$ 高出 2 倍，內電阻也降至 16.7Ω ，比參考文獻 170Ω 還低非常多，可見內電阻對電子的移動造成很大的影響。
- 13.在自製四槽式反應槽內串聯結果得知以（陽－陰－陽－陰）的組合為最好，功率密度甚至達到 $94.5\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，內電阻降至 20Ω ，使微型雙槽式微生物燃料電池在產電的使用上更上一層樓。
- 14.利用自製色度計測試上中下層連續進出流雙槽式微型燃料電池淨化水質的效能發現，菌數剩餘率為 0.058% 、COD 去除率為 95.7% ，串聯發電電壓為 0.827V ，功率密度為 $29.1\text{mW}^2/\text{m}^2$ ，內電阻為 406Ω ，結果顯示，此裝置不只可以產電更可以有效淨化水質。
- 15.漁民常利用除草藥劑去除絲藻，若將絲藻予以利用，可減少環境的化學污染，甚或避免吃到有藥物殘留的水產品，增加食的安全，並在新能源的開發更邁進一大步。

柒、未來展望

如果可以用絲藻來開發其他產品，例如棉花及衛生紙等等，那麼這個漁民口中的垃圾，其用途性一定會更寬廣。

捌、參考資料

- 1.南一書局主編(民 97)。自然與生活科技第六冊。電池(44-49 頁)、電流的熱效應(58-63 頁)。台北：南一書局。
- 2.南一書局主編(民 97)。自然與生活科技第四冊。酸鹼的濃度(22-26 頁)、氧化與還原(58-68 頁)台北：南一書局。
- 3.蔡佳蓉，2003，迴流式連續攪拌混和反應槽系統之厭氧產氫，逢甲大學(土木及水利工程所)
- 4.衣寶廉，(2003)，燃料電池-高效環保的發電方式，五南圖書出版股份有限公司，台北
- 4.<http://web.ncyu.edu.tw/~jgtsay/jg4-13-4.html> 微生物營養代謝與能量。
5. <http://www.ecampustoday.com.hk/robotmain.php?titleID=55>電阻器家族
6. <http://www.leoaqua.com/chlorophyta.html>魚軒草蘆
- 7.<http://microbiology.scu.edu.tw/micro/bacteria/T4.htm>微生物的世界
8. http://microbiology.scu.edu.tw/micro/microbe-exp/exp_website/Exp_17.htm氧的需求

【評語】 030206

海報版面製作精美，學生的表達能力與臨場反應均佳，實驗日誌呈現完整，未將歷屆科展作品引述部分列入參考資料，是本件作品最大的缺失。實驗設計流程加以延伸改進並得到好的結果，值得鼓勵。本實驗的樣本為微生物，操作過程宜留意加入其他物質時有否污染。