

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 化學科

第三名

030210

酵母菌發電—單槽式微生物燃料電池的性質研究

學校名稱：高雄市立大灣國民中學

作者： 國二 吳紋沂 國二 黃詩涵	指導老師： 吳忠戎
-------------------------	--------------

關鍵詞：微生物燃料電池、酵母菌、石墨粉

摘要

微生物燃料電池的陽極是用酵母菌在混有石墨粉的低筋麵粉或糯米中培養，數天後，加水覆蓋，當底部成為缺氧狀態時就完成了。我們發現培養酵母菌的營養物質的重量、培養的時間或石墨粉的純度、質量、顆粒大小等，都會影響陽極氧化電位的高低。

用兩層玻璃紙包著石墨棒和 98% 的石墨粉做為陰極，不需通入空氣，就可以維持很高的還原電位。通入空氣之後，還原電位會增加。陰極泡水 4 天後，可以去除石墨粉中影響電壓的物質，提高還原電位。

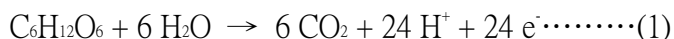
以糯米製作出來的微生物電池最大電壓 0.455V，添加適量的葡萄糖，電壓可達 0.651V，如果加入鐵圈到微生物底泥中，電壓可達 0.823V。

本研究獨創的單槽式微生物燃料電池，構造簡單，電壓穩定，一次可以操作多個，有利於多種變因的探討。

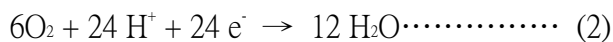
壹、研究動機

微生物代謝有機物(例如：葡萄糖等)時，在缺氧的環境中，會產生電子和氫離子，電子經由導線，迅速的移動到陰極，而氫離子則是經由溶液，移動到陰極。氫離子、電子在陰極與氧氣或其他氧化劑反應。微生物代謝時，葡萄糖釋出電子是氧化反應，氧氣得到電子是還原反應。反應方程式如下：

陽極中，葡萄糖進行氧化反應：



當電子及質子到達陰極進行還原氧氣：



觀看網路影片⁽¹⁾，發現池塘底泥放在容器中，放入電極，就可以發電，我們也想嘗試看看。後來參考許多文獻，才知道很多人已經做了相關的研究。其中有人利用純化的菌種進行研究，有人研究使用不同的裝置(單槽和雙槽)，有人將燃料電池小型化以便攜帶，有人研究廢水處理的同時也能產電，增加收益。微生物燃料電池的變因相當多，卻很難有系統性的研究，原因

是製作不易，尤其是雙槽式燃料電池。我們希望能製作一種簡易的微生物燃料電池來進行研究。以下是歷屆全國中小學科展中微生物燃料電池的研究摘要：

屆別	題目	微生物燃料電池的組合
全國科展 57 屆 (2017)	石墨烯微生物燃料電池 綠能研究 ⁽²⁾	小型化組裝式結構。陽極：五層石墨烯碳布、酵母菌、葡萄糖。陰極：碳布兩層、EDTA·Fe ³⁺ 。隔離膜：質子交換膜。最大電壓：0.7 V。
全國科展 55 屆 (2015)	微生物燃料電池 ⁽³⁾	雙槽式結構。陽極：碳棒、酵母菌、流動式供應葡萄糖。陰極：水、赤血鹽。隔離膜：質子交換膜。最大電壓：0.386 V。
全國科展 53 屆 (2013)	會發電與自循環的魚缸 —底泥微生物燃料電池 之探討與應用 ⁽⁴⁾	單槽式結構。陽極：石墨氈、魚缸底泥、魚糞便。陰極：石墨氈、魚缸水。隔離膜：硬不織布。最大電壓：0.899 V。
全國科展 53 屆 (2013)	微生物燃料電池的研究 ⁽⁵⁾	單槽式結構。陽極：以鋼索串住碳織布的四個角落、石墨粉、葡萄糖、大腸桿菌。陰極：用鱷魚夾夾住 12cm 折半的鋼索、打氣的蒸餾水。隔離膜：無。最大電壓：0.9 V。
全國科展 51 屆 (2011)	多醣類廢棄物轉化為微 生物燃料電池研究 ⁽⁶⁾	雙槽式結構。陽極：酵母菌、白紙水解葡萄糖。陰極：0.1M 磷酸鹽緩衝溶液、氯化鈉 4%(10g)。隔離膜：離子交換膜。最大電壓：0.125 V。
全國科展 50 屆 (2010)	嗜甜發電廠 ⁽⁷⁾	單槽式結構。陽極：酵母菌、亞甲藍、葡萄糖、碳棒。陰極：赤血鹽水溶液、碳棒。隔離膜：玻璃紙或蛋膜。最大電壓：0.3 V。
全國科展 49 屆 (2009)	來電用「絲絲」---絲藻 在微生物燃料電池之應 用 ⁽⁸⁾	雙槽式結構。陽極：置入台製生化棉及 0.005M 葡萄糖當燃料，100 cm ² 碳織布。陰極：12mL/s 曝氣速率、陽極 6 小時水力停留時間，10cm×10cm 打洞碳串當陰極。隔離膜：半透膜。最大電壓：0.63 V。
全國科展 48 屆 (2008)	乳牛瘤胃液消化分解與 發電效益探討 ⁽⁹⁾	雙槽式結構。陽極：以澱粉、草和稻桿作為受質，牛瘤胃液、緩衝溶液，進行發酵。陰極：電解液為鐵氰化鉀或過錳酸鉀。隔離膜：氫離子交換膜。最大電壓：1.15 V。

2021 年五月台灣發生了兩次大停電，造成生活上許多不便。我們希望利用廚房中可取得的酵母菌、麵粉、糯米等材料，來製作微生物燃料電池，說不定哪一天停電了，我們只要一湯匙麵粉或半碗飯就可以幫手機充電囉。

貳、研究目的

一、隔離膜的研究：尋找替代質子交換膜的隔離膜。

(一) 隔離膜對氫離子的通透性。

(二) 隔離膜對紅色染料的通透性。

二、陽極的研究：

(一) 微生物在不同天數的培養後對電壓的影響。

(二) 不同顆粒大小、純度和重量的石墨粉對電壓的影響。

(三) 微生物在不同重量的糯米中培養後對電壓的影響。

(四) 添加葡萄糖到微生物底泥中對電壓的影響。

(五) 添加鐵環到微生物底泥中對電壓的影響。

(六) 通氣到微生物底泥中對電壓的影響。

三、陰極的研究：

(一) 不同純度的石墨粉所組成的陰極對電壓的影響

(二) 打空氣到陰極後對電壓的影響。

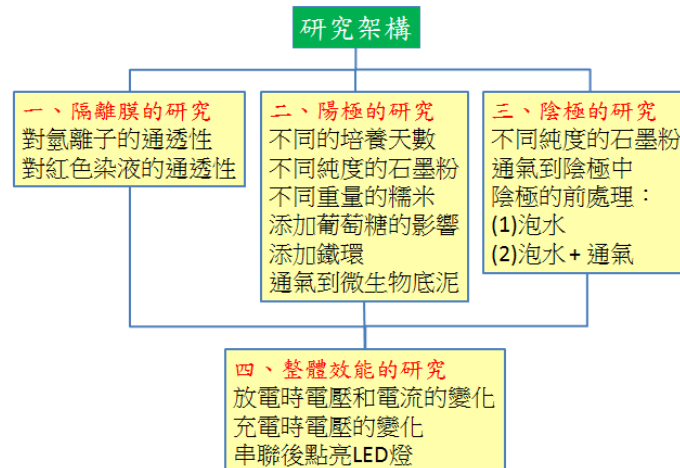
(三) 是什麼原因造成陰極還原電位的差異？陰極的改良。

四、電池效能測定：

(一) 微生物電池放電時電壓和電流的變化。

(二) 微生物電池放電之後再充電時電壓的變化。

(三) 串聯六個微生物電池後點亮 LED 燈。



叁、研究設備與器材

			
<p>食物保鮮袋，3M 公司製造。HDPE 材質。</p>	<p>保鮮袋，速配鼎公司。LDPE 材質。</p>	<p>玻璃紙。</p>	<p>pH 計，測量氫離子穿透隔離膜的效果。</p>
			
<p>紅色染液</p>	<p>秋雅梅酒瓶：高 19 cm，口徑 5.2 cm，直徑 7.3 cm。內裝發酵的麵粉。</p>	<p>速發酵母 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)，適用於麵粉發酵。</p>	<p>安琪牌釀酒酵母 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)適用於酒精、白酒、醋等製造</p>
			
<p>人造石墨粉，100 目，固定碳 98%。弘明科技公司。</p>	<p>99%石墨粉，德億貿易公司。顆粒大小分別為 20、40、60、80 和 100 目。</p>	<p>電線纏繞在石墨棒(73 mm, 0.0262 Ω)後，用絕緣膠帶緊緊包覆。德億貿易公司。</p>	<p>左邊 HIOKI 鉤錶，右邊數位電錶，用來量電壓和電流。</p>
			
<p>糯米</p>	<p>滅菌釜</p>	<p>雙層牛皮紙封口，內裝滅過菌的糯米飯。</p>	<p>曬衣夾和鐵環 (0.9 公克)</p>
			
<p>麵包板、LED 燈、按鈕開關、連接線。</p>	<p>竹籤(25 cm)和玻棒 (30 cm)</p>	<p>打氣泵浦</p>	<p>廣用試紙</p>

肆、研究過程與方法

一、隔離膜的研究：

- (一) 隔離膜對氫離子的通透性：從市面上買到三種不同材質的包裝材料，內裝 1M 鹽酸 40 mL，放入裝有 100 mL RO 水的燒杯中，用 pH 計測量包材外的酸鹼值。
- (二) 隔離膜對紅色染料的通透性：將 1 mL 紅墨水稀釋到 50 mL 的 RO 水中，裝在單層玻璃紙、雙層玻璃紙、材料為 HDPE (3M 公司生產)或材料為 LDPE 的保鮮袋。每天觀察紅墨水擴散的情形。

二、微生物燃料電池的構造：如圖 1，容器使用秋雅梅酒瓶(玻璃製，高 19 cm，口徑 5.2 cm，直徑 7.3 cm。)底層是酵母菌在低筋麵粉或糯米飯中培養數天，加入 99% 石墨粉混合均勻，成為微生物底泥，將石墨棒壓入當中。加入水覆蓋在微生物底泥之上，一天之後，微生物底泥成為缺氧的狀態。此時，放入製作好的陰極到水層，就能測量電壓和電流。

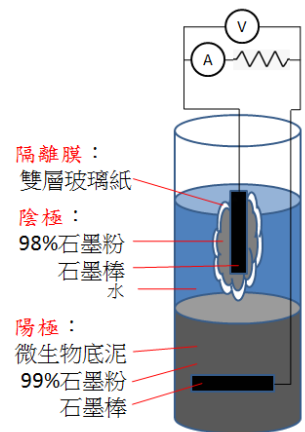


圖 1. 單槽式微生物燃料電池的構造示意圖。

三、陽極的製作：

(一) 速發酵母菌在低筋麵粉中的生長：將 40 克低筋麵粉、30 克石墨

粉、0.5 克速發酵母菌、1 克葡萄糖、60 克水混合攪拌，揉成「黑麵糰」，放入秋雅梅酒瓶中，培養 3 小時可以看到黑麵糰膨發，代表酵母菌可以在石墨粉中正常的生長。放入石墨棒電極，覆水 250 mL，靜置一天後，就完成陽極的製作。

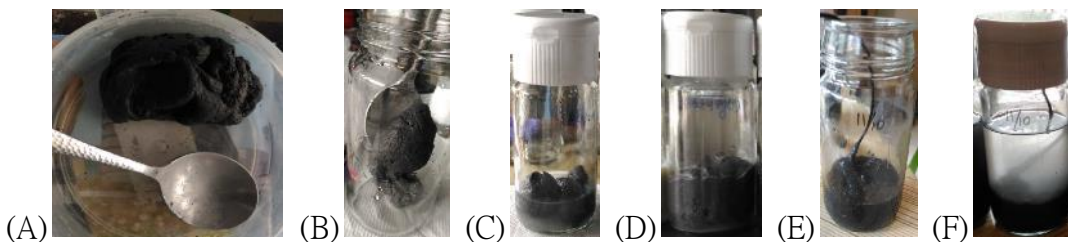


圖 2. 陽極的製作過程：(A) 用湯匙攪拌揉成黑麵糰 (B) 放入玻璃瓶 (C) 加水 (D) 發酵 (E) 放入連接電線的石墨棒 (F) 覆水 250 mL，靜置 1 天。

(二) 釀酒酵母在糯米飯中的生長：糯米 40 克，水 150 mL，放入秋雅梅酒瓶，瓶口用兩層牛皮紙封口，用棉線綁緊，送入滅菌鍋滅菌(121°C，15 分鐘)。冷卻後，加入 1 克釀酒酵母，1

克葡萄糖，用滅菌過的竹籤(25 cm)，在瓶中攪拌均勻，經過 2 天培養，可以聞到酒香。加入 30 克 99% 石墨粉，用滅菌過的竹籤攪拌均勻。再經過 2 天的培養，加 150 mL 無菌水，覆蓋在微生物底泥之上，一天後，陽極製作完成。

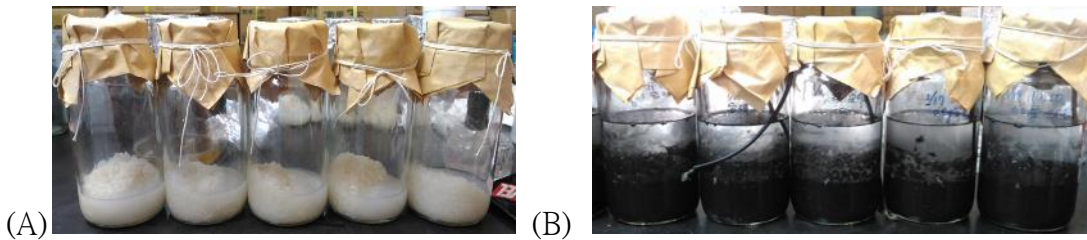


圖 3. (A)滅菌後的糯米飯 (B)製作好的陽極。

四、陰極的製作：

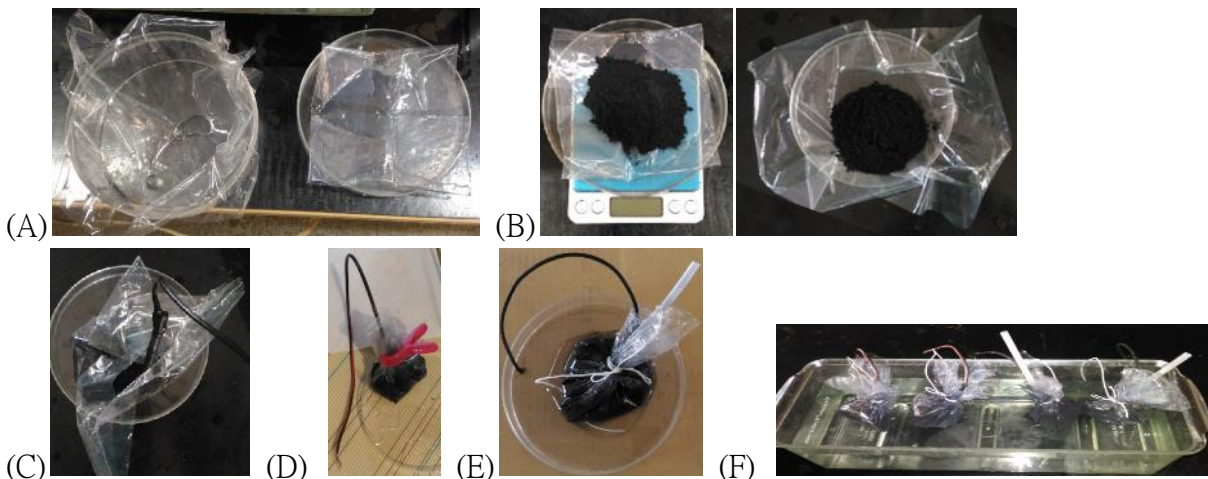


圖 4. 陰極製作。(A)自來水浸泡後的兩張玻璃紙，外層(左)攤平，內層(右)的玻璃紙四邊向內折，放在透明塑膠蓋上面，準備秤重。(B)秤取 20 克 98% 石墨粉後，將內折的玻璃紙攤平。(C)拉起四邊成袋狀，加入 50 mL 水，放入石墨棒和硬質矽膠管(打氣用)到袋子的中心，外面再包第二層玻璃紙。兩層玻璃紙的中間加入 30 mL RO 水。(D)將裝石墨粉的雙層玻璃紙袋用洗衣夾夾緊，或用(E)棉線綁緊，不要使內容物流出來。(F)98% 石墨粉和石墨棒用單層玻璃紙包起來，泡在水中，每天換水。右邊兩個電極的中間附有一根硬質管子伸入石墨粉中，以便打氣。

五、電池效能測定：

(一)不加電阻，直接測量微生物燃料電池的電壓：將陰極放入裝有微生物底泥(陽極)的玻璃

瓶中，組成微生物燃料電池。可用電表直接測量電壓。

(二)微生物燃料電池放電時電壓和電流的變化：如圖 1 所示，加上電阻(1Ω 或 10KΩ)，串聯一個測量電流的電表，並連連一個測量電壓的電表，可測量放電過程中電壓和電流的變化。

(三)微生物燃料電池充電過程中電壓的變化：放電後，將連接電阻的鱷魚夾拔掉，測量電壓的變化。

(四)串聯六個微生物電池後點亮 LED 燈：先對電容充電，再點亮 LED 燈。

六、數據處理：利用 Tracker 軟體分析拍攝的影片，由每 1/30 秒記錄的影格，讀取影格中的數據，用 EXCEL 軟體整理成表格，並繪製成圖。

伍、研究結果

一、尋找隔離膜：

(一)、氫離子通透性的研究：

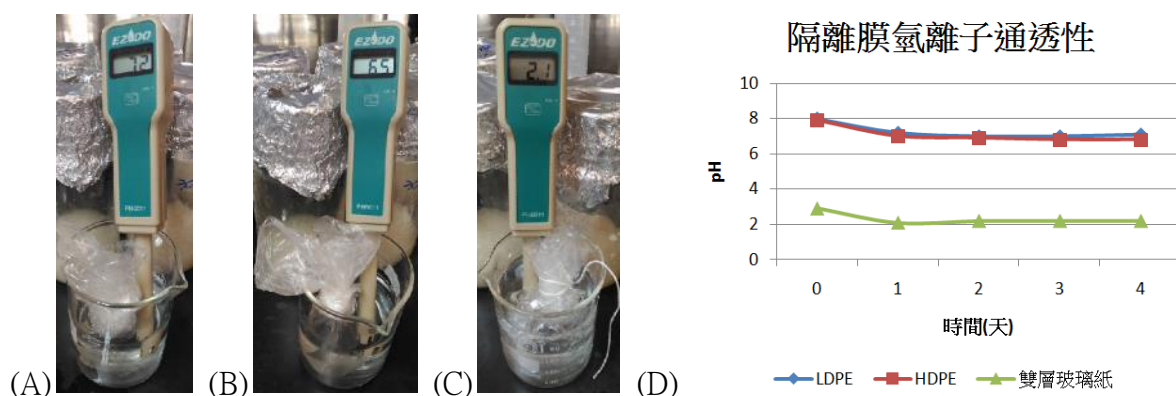


圖 5. 三種不同材質的隔離膜，分別裝 1M 鹽酸 40 mL 後，放入裝有 100 mL RO 水的燒杯中，用 pH 計測量膜外的 pH 值。(A) LDPE 保鮮袋 (B) HDPE 保鮮袋 (C)雙層玻璃紙 (D)pH 值的變化。

將 1M HCl 40 mL 分別裝在雙層玻璃紙、材料為 HDPE (3M 公司生產)或材料為 LDPE 的保鮮袋中，結果只有雙層玻璃紙可以讓氫離子自由通過。原本膜外 RO 水的 pH 值是 8.3，當裝有 1M HCl 40 mL 的雙層玻璃紙放入後，瞬間 pH 值降到 2.9，隔天再降到 2.1。而 LDPE 和 HDPE 保鮮袋外的 pH 值幾乎不變，隔天 pH 稍降，其中 HDPE 材質的保鮮袋下降得比 LDPE

保鮮袋稍多。

(二)、紅墨汁通透性的研究：

























經過時間	單層玻璃紙	雙層玻璃紙	LDPE 保鮮袋	HDPE 保鮮袋
0 天				
1 天				
2 天				
3 天				
4 天				
5 天				

圖 6. 將 1 mL 紅墨水稀釋到 50 mL 的 RO 水中，再分別裝在單層玻璃紙、雙層玻璃紙、材料為 HDPE (3M 公司生產)或材料為 LDPE 的保鮮袋。只有玻璃紙中的紅墨汁可以逐漸擴散出來，裝在單層玻璃紙的紅墨水到了第 5 天擴散完成，玻璃紙內外水的顏色相同，而雙層玻璃紙的中間有 30 mL 的 RO 水，可以延遲紅墨水擴散的速度。

二、陽極的研究

(一)不同培養天數的黑麵糰，製作成微生物電池的陽極。

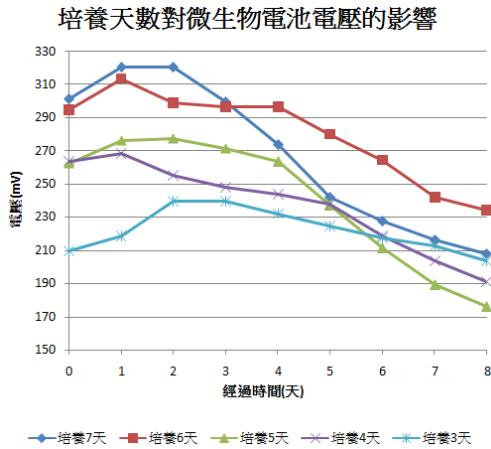
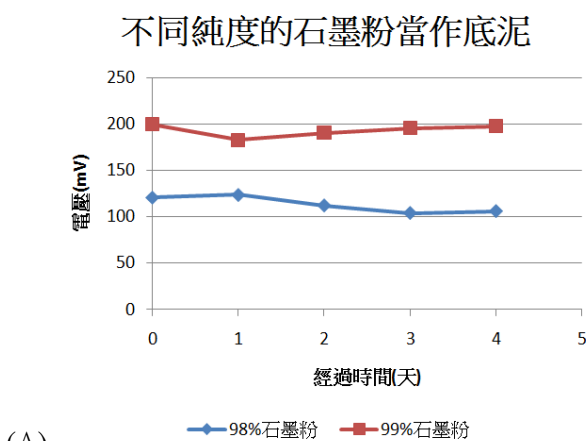


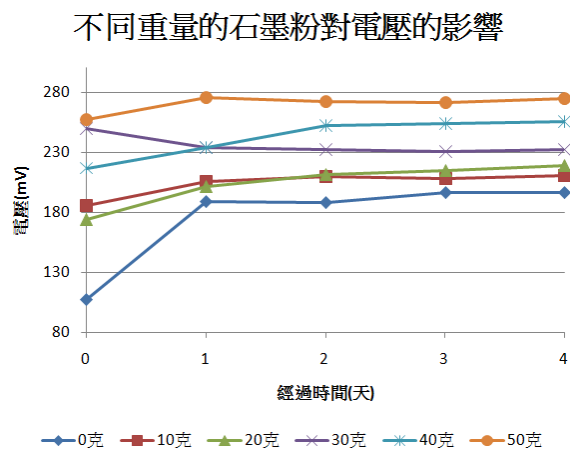
圖 7. 培養不同天數對微生物電池電壓的影響。

黑麵糰在玻璃瓶底部生長不同天數，覆蓋水一天後，放入雙層玻璃紙製作的陰極，連接到電表，測量電壓。我們發現酵母菌培養的天數越多，一開始的電壓會越高，因為是使用相同的陰極，我們也可以說酵母菌培養的時間越長，氧化電位越高。每天測量電池的電壓，發現前 2-3 天的電壓會上升，其後電壓緩慢下降，可以持續 2 週以上。雖然培養 7 天的酵母菌一開始的電壓較高，但是第 3 天以後，電壓下降的速度比培養 6 天的酵母菌快，因此以後的實驗，我們黑麵糰底泥的培養以 6 天為主。

(二)不同純度、不同重量的石墨粉對電壓的影響。



(A)



(B)

圖 8. (A)不同純度的石墨粉當作微生物底泥。(B)以 99% 石墨粉當作底泥，不同重量的石墨粉對電壓的影響。

99% 石墨粉摻入糯米中所製作出來的陽極，氧化電位較高，而且石墨粉越多，氧化電位越大。

(三)不同重量的培養基質對氧化電位的影響。

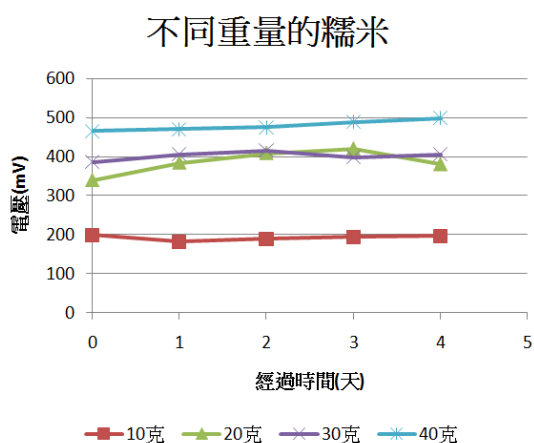


圖 9. 培養酵母菌的糯米越重，氧化電位越大。

用 3M 公司出產的 HDPE 保鮮袋當做隔離膜，雖然可以量到電壓，但是卻量不到電流。

可能因為這種隔離膜的孔洞太少，阻礙離子的移動。所以，後來就棄置不用。

(四)添加葡萄糖到微生物底泥中對電壓的影響。

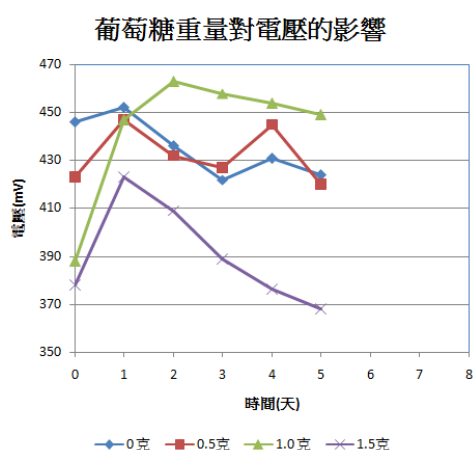


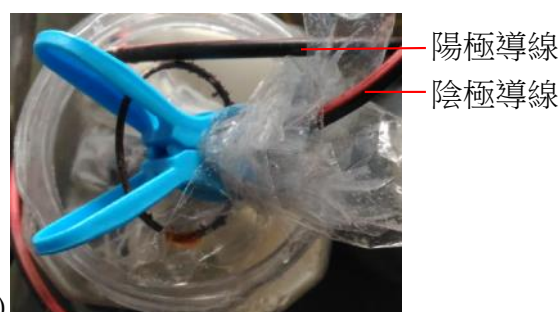
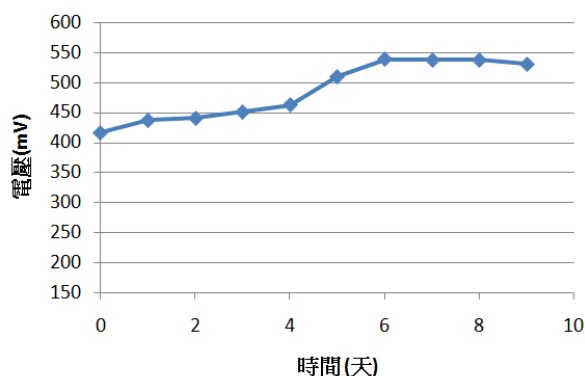
圖 10. 添加不同重量的葡萄糖到底泥後對電壓的影響。

將陰極放入陽極槽中，裝置好電池，立即測量電壓，發現添加葡萄糖的重量越大，一開始量到的電壓越小。添加 1 克葡萄糖的微生物電池在 2 天之後，電壓可以達到最大值，而且持續較久的時間。添加 2 克以上的葡萄糖，電壓反而較低。

(五)加鐵環到微生物底泥中對電壓的影響。

為了方便，一開始我們的陰極是用洗衣夾夾住上端開口處，結果發現 4 天之後，電壓不如預期般的往下降，反而上升，觀察洗衣夾上的鐵環已經生鏽了。我們懷疑是鐵環影響電壓。

洗衣夾上的鐵環對電壓的影響

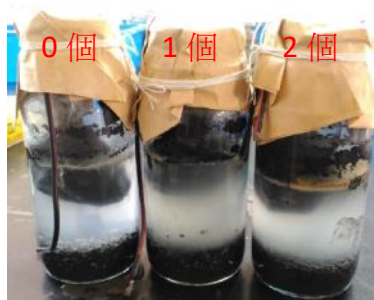
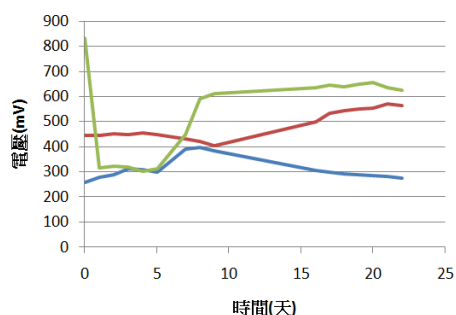


(A)

(B)

圖 11. (A)用洗衣夾夾住陰極的上方開口，4 天後電壓上升。(B)陰極上方洗衣夾上生鏽的鐵環。

鐵環數量對電壓的影響



(A)

(B)

圖 12. (A)鐵環數量對電壓的影響。(B)由左至右分別加了 0 個、1 個和 2 個鐵環，3 週後電池的外觀。

將洗衣夾上的鐵環拆下來，放入陽極的微生物底泥中。外加兩個鐵環的微生物電池的電壓一開始的電壓達到 832 mV，但是瞬間下降到 532 mV。我們認為陰極內 98% 石墨粉中可能有某些可溶性物質，在陰極放入陽極槽中，立即從玻璃紙擴散出來，導致電壓下降。

(六)打氣到微生物底泥中對氧化電位的影響。

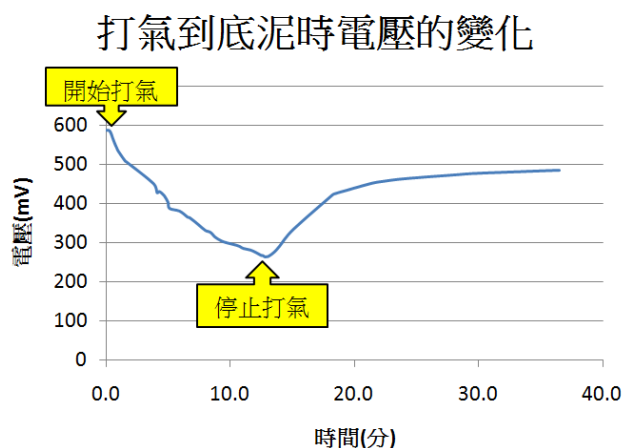


圖 13. 打氣到底泥時，電壓立刻下降，停止打氣之後，電壓緩慢上升，而且無法恢復到原來的電壓。

三、陰極的研究：

(一)不同純度石墨粉所組成的陰極對電壓的影響：

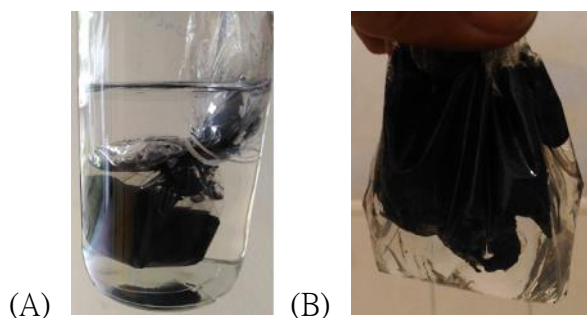


圖 14. 不同純度的石墨粉製作的陰極。(A)98%石墨粉。(B)99%石墨粉。

98%石墨粉沉澱到玻璃紙的底部，像是泥水混合，而 99%石墨粉有很強的斥水性，會吸附在石墨棒周圍，和水無法混合。可能因為這樣，使得 98%石墨粉之間能容納比較多的氧氣，適合當作陰極。而 99%石墨粉導電性比較好，適合添加在陽極的微生物底泥中。

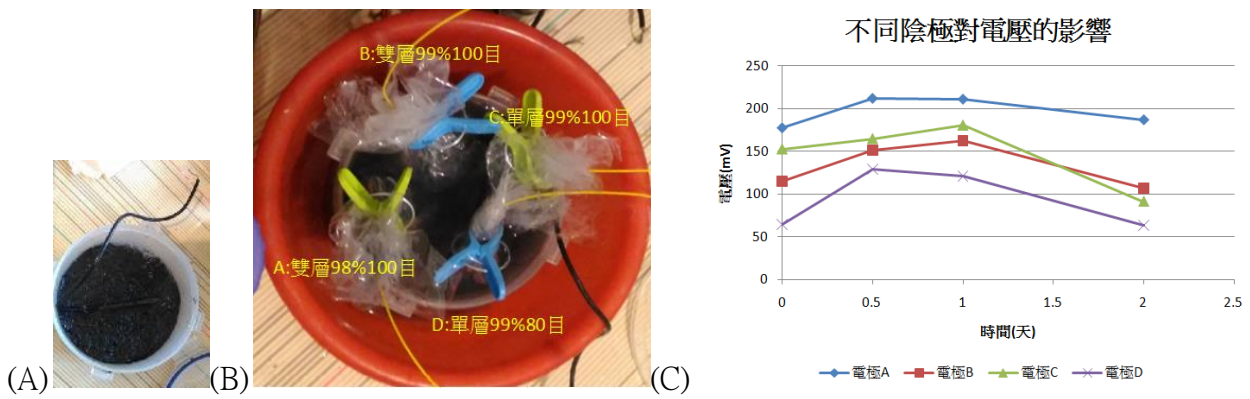


圖 15. (A)微生物底泥的製作：速發酵母菌加入含有 98% 石墨粉的麵糰中培養 12 天之後，將石墨棒壓入麵糰之中，加入水 250 mL，經過 1 天，消耗底部氧氣，成為缺氧狀態的微生物底泥，是陽極(負極)。(B)將不同的陰極(正極)到放入微生物底泥之上。圖中微生物底泥裝在白色盒子中，紅色盆子是用來承接漏出來的水。四種不同的陰極分別為：

電極 A: 雙層玻璃紙中含有 98% 100 目的石墨粉

電極 B: 雙層玻璃紙中含有 99% 100 目的石墨粉

電極 C: 單層玻璃紙中含有 99% 100 目的石墨粉

電極 D: 單層玻璃紙中含有 99% 80 目的石墨粉。

由圖 15B 可以知道對相同的微生物底泥(陽極)而言，以電極 A 的電壓最高，也就是雙層玻璃紙中含有 98% 100 目的石墨粉，以後的實驗都以這種電極當作陰極。電極 B、C、D 雖然是以純度較高的石墨粉做成的，但是相對於相同的底泥而言，電壓較小，我們可以說剛放進去的時候，還原電位大小為電極 A > 電極 C > 電極 B > 電極 D。

(二)打空氣到陰極後對電壓的影響。

打空氣到陰極對電壓的影響

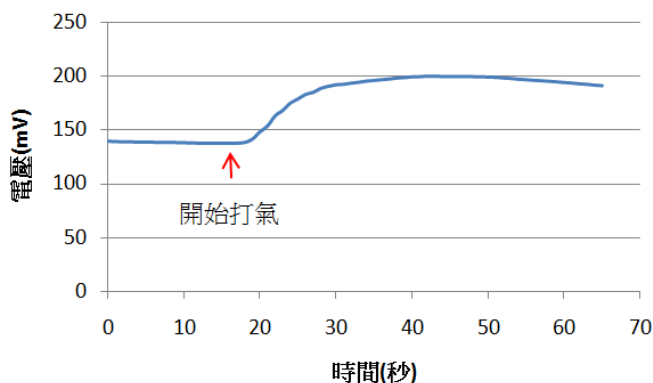


圖 16. 以黑麵糰為微生物底泥，對陰極打氣，電壓變化的情形。

將空氣打入陰極中，可以提高陰極的還原電位。

(三)陰極的改良：

1. 98%石墨粉浸出液呈酸性。

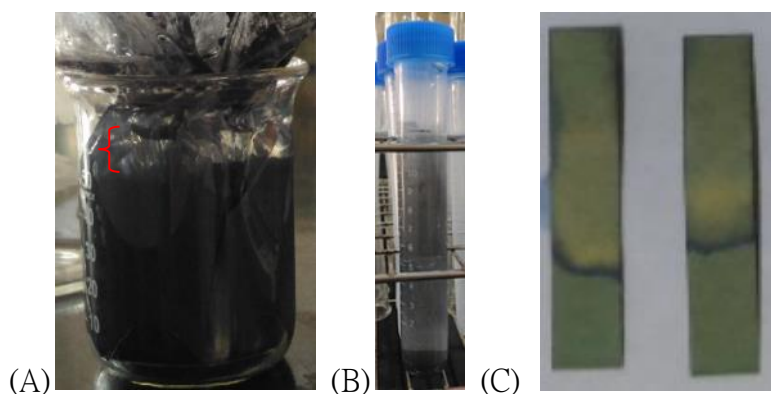


圖 17. (A)20 克 98%石墨粉放在玻璃紙中，內加 50 mL 水，混合均勻，放入 50 mL 燒杯中靜置，可以看到石墨粉下沉，上方有一水層。(B)用吸管輕輕吸取水層到乾淨的塑膠試管中。(C)用玻棒沾取上清液，點在廣用試紙上，呈現綠色(左)與 RO 水的結果(右)相近，用 pH 計測量為 6.0。

98%石墨粉中含有 1.3%的灰分(資料來源：廠商的規格書)，應該不是鹼性的物質，也不是草木灰(碳酸鉀)，因為加入酸也不會產生氣泡。

2. 不泡水的陰極放入陽極槽有電壓下降期。

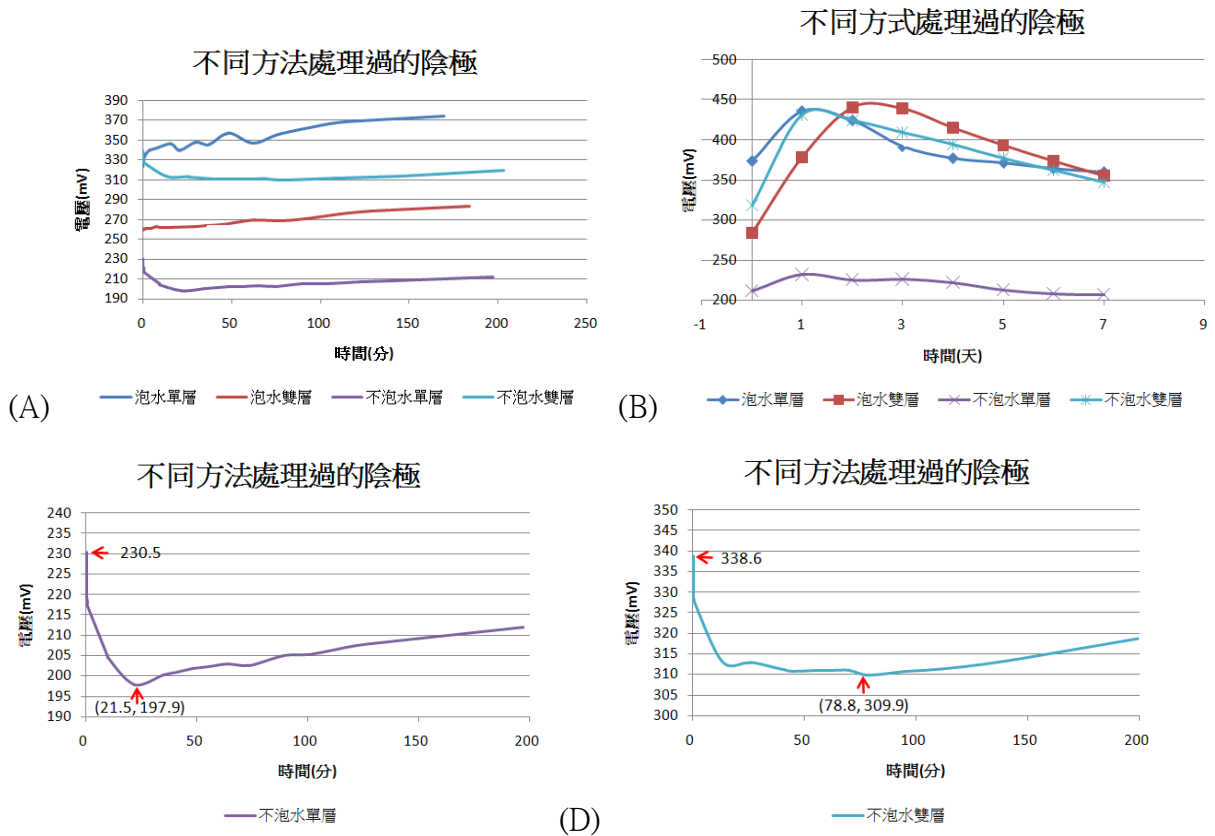


圖 18. 不同方法處理過的陰極，放入相同的陽極槽後，電壓的變化。(A)前 200 分鐘電壓變化圖。(B)前 7 天電壓的變化圖。(C)不泡水單層玻璃紙製作的陰極。(D)不泡水雙層玻璃紙製作的陰極。

由圖 18A 可以看到不泡水的陰極，不論是用單層或雙層玻璃紙包起來，放入陽極槽後都有電壓下降期。由(C)和(D)放大圖更可看出電壓下降期分別為 21.5 分和 78.8 分，受影響的電壓大小分別為 32.6 mV 和 28.7 mV。因為單層玻璃紙的擴散作用比較快，電壓下降期的時間較短，雙層玻璃紙有延緩擴散作用的效果，電壓下降期的時間較長。電壓下降的大小，雙層玻璃紙的陰極比單層玻璃紙的陰極稍小，可能是因為雙層玻璃紙的電壓下降期較長，酵母菌代謝產生電子，減少了電壓下降的量。

3. 泡過水的陰極沒有電壓下降期。

將 98% 石墨粉用單層玻璃紙包起來，泡在自來水中 4 天，每天換水，讓可溶性的物質擴散出去。泡過水、單層玻璃紙的陰極放入陽極槽後，沒有電壓下降期(見圖 18A “泡水平層”)，但是初期電壓的變化較大。泡水的陰極如果多包一層玻璃紙，兩層之間加入 30 mL 的水，成為

雙層玻璃紙的陰極，也沒有電壓下降期(見圖 18A “泡水雙層”)，並且電壓比泡水單層小，我們認為這是因為雙層玻璃紙阻礙氫離子的擴散。

4. 不同方法處理過的陰極，放入相同的陽極槽中，初期的電壓不同，但是長期來看(圖 18B)，最後電壓會相近。
5. 不同泡水時間的陰極對電壓的影響：

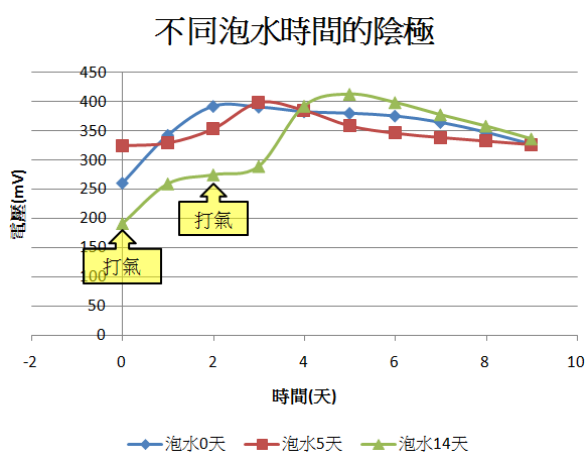


圖 19. 泡水後的陰極，外面再加一層玻璃紙，內外兩層玻璃紙間，加入 30 mL 水。分別放入製作條件相同的陽極槽中，測量電壓隨時間變化的情形。泡水 0 天是指測量電壓當天製作、未經泡水處理的雙層玻璃紙的陰極。

我們發現剛開始(第 0 天)的還原電位：泡水 5 天的陰極 > 泡水 0 天的陰極 > 泡水 14 天的陰極。我們認為，泡水 5 天的陰極，98% 石墨粉中可溶於水的物質(包含會影響電壓的物質)已經擴散出去，剛放進去陽極槽的時候，不會和酵母菌代謝產物(氫離子和電子)發生反應，所以電壓比當天製作的陰極(“泡水 0 天”)高。泡水 14 天的陰極，除了可溶性物質比較少之外，含氧量也比較少，所以一開始的電壓最小，如果打入空氣，電壓可以逐漸提高，甚至超過前兩者。不泡水處理(“泡水 0 天”)的陰極中，98% 石墨粉應該含有氧化劑，被保留在雙層玻璃紙中，有助於前兩天電壓的提升。三種方處理方式的陰極到了第 9 天，電壓會相近。

四、微生物燃料電池效能測定：

(一)充放電時電壓和電流的變化：電阻為 1Ω 。

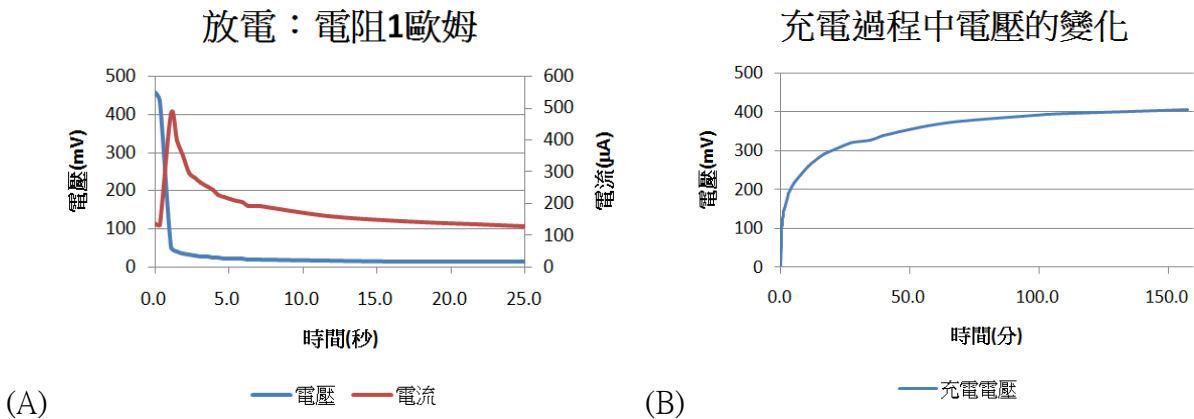


圖 20. (A)放電時電壓和電流的變化。(B)充電過程中電壓的變化。

根據圖 1 線路圖將線路接好，其中電阻使用 1Ω ，開始放電之後，電壓由 459 mV 陡降，電流則先升高到 $480\text{ }\mu\text{A}$ ，再陡降。20 分鐘後，電壓為 4.5 mV ，電流為 $49\text{ }\mu\text{A}$ 。

放電之後，將連接電流計的接頭移除成斷路，電池開始充電，測量電壓的變化。一開始電壓上升較快，後來緩升，經過 157.7 分鐘之後，電壓值為 406 mV 。

(二)充放電時電壓和電流的變化：電阻為 $10\text{K}\Omega$ 。

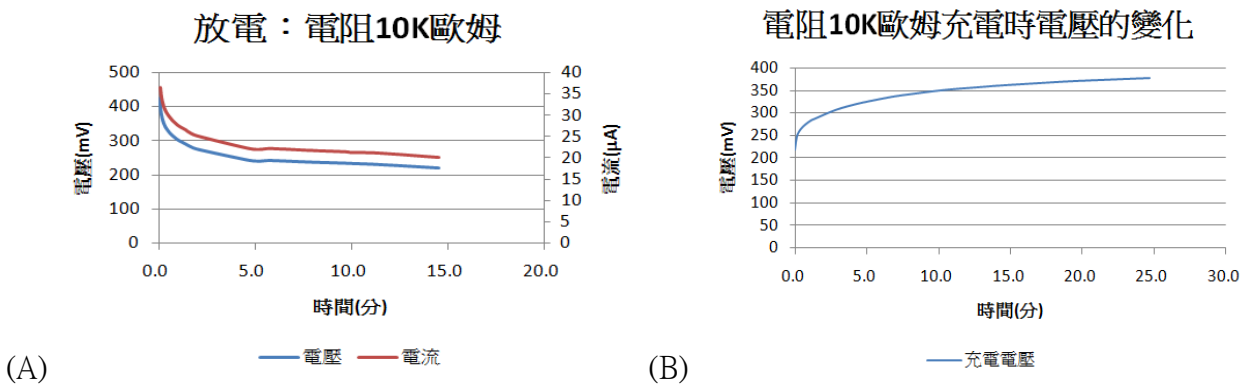


圖 21. 使用 $10\text{K}\Omega$ 的電阻進行充放電。(A)放電過程中電壓和電流的變化。(B)充電過程中電壓的變化。

根據圖 1 線路圖將線路接好，其中電阻使用 $10\text{K}\Omega$ ，開始放電之後，15 分鐘內電壓由 427 mV 降到 220.4 mV ，電流由 $36.6\text{ }\mu\text{A}$ 降到 $20.1\text{ }\mu\text{A}$ 。放電之後，將連接電流計的接頭移除成斷路，電池開始充電，測量電壓的變化。一開始電壓上升較快，後來緩升，經過 24.7 分鐘之後，電壓值為 376.9 mV ，隔天再測電壓值為 430 mV ，已經恢復到一開始放電時的電壓。

(三)串聯六個微生物電池後點亮 LED 燈。

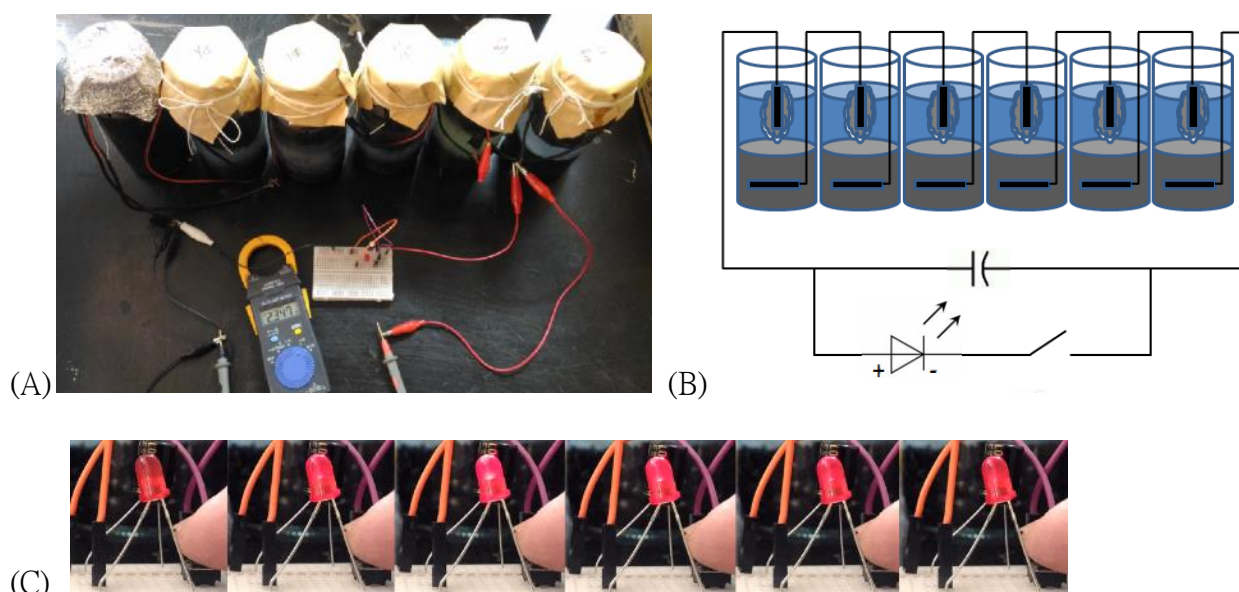


圖 22. (A)將六個微生物電池串聯可以得到總電壓 2.347 V，先對電容充電，按下開關之後，可以點亮 LED 燈。(B)連接線路圖。(C) 按下開關後，LED 燈先快速亮了一下，再逐漸熄滅。每張照片拍攝時間間距為 1/30 秒。

陸、討論

- 一、玻璃紙⁽¹⁰⁾，或譯賽璐玢 (Cellophane)，是一種用纖維素製成的透明薄膜，具生物分解性。
本研究使用的材料對環境是友善的。
- 二、本研究微生物燃料電池的能量來源是麵粉和糯米，這在以往的研究報告中較少見。參考資料 9 利用牛瘤胃液做的微生物燃料電池中，陽極以澱粉為受質，陰極以過錳酸鉀為電解液，可獲得 1150 mV 的電壓。我們的微生物燃料電池產生的最高電壓為 455 mV，但是因為沒有添加其他的電解液來提高電壓，比較環保。
- 三、麵粉和糯米的主要營養素是澱粉，由葡萄糖組成的聚合物，酵母菌可以分解澱粉，取得代謝所需的葡萄糖。我們只加一次營養基質，而非連續供應，做法比較簡單。
- 四、葡萄糖在高溫下會焦糖化，焦糖化的葡萄糖加到微生物底泥中，會影響酵母菌的產電能力。因此，葡萄糖要用過濾滅菌法。本研究因為沒有取得過濾滅菌的器材，採直接添加葡萄糖粉末為基質，因此並非純種培養。希望日後不斷改良操作技巧，以求更精準的實驗結果。

- 五、陽極中如果有活性大的金屬(例如：鐵)存在，電壓會偏高(圖 12)，所以應該避免使用，否則電壓不能說完全由燃料轉換而來，因為也可能是金屬氧化失去電子所造成。參考資料 5 的微生物燃料電池中，陽極以鋼索串住碳織布，陰極以鋼索為電極，最大電壓達 0.9 V，可能就是這種狀況。
- 六、本研究使用的陰極是雙層玻璃紙包著 98% 石墨粉，這種石墨粉一方面可以導電，另一方面斥水性不會太強，可以和水混成泥水的狀態(圖 14A)，儲存較多的氧氣，**本研究中沒有一直打氣就能維持高電壓**(圖 7)，但如果打氣後，電壓會上升(圖 16 和圖 19)。因為 98% 石墨粉中可能含有降低微生物燃料電池電壓的氧化劑，不適合直接加入微生物底泥中(圖 8A)。如果裝在玻璃紙中當作陰極，放入陽極槽中會有電壓下降期(圖 12A、圖 18C 和 D)，最好先泡水處理(圖 18A)，並且先打空氣到陰極的石墨粉中，再包上第二層玻璃紙，這樣處理過的陰極效果最佳。
- 七、燃料電池充放電時電壓的變化(圖 20 和圖 21)，像電容器的充放電。可能是因為我們的單槽式燃料電池沒有連續提供氧氣給陰極，也沒有提供可直接利用的葡萄糖燃料給陽極的酵母菌，所以累積在石墨粉中的電子很快就經由導線，在電阻處釋放能量，因此電壓很快下降。充電的時候，酵母菌代謝產生電子，再逐漸儲存在微生物底泥的石墨粉中，需要比較久的時間才能達到穩定的電壓。如何提高酵母菌產電的效能，使電池的充電更有效率，是我們未來努力的目標。

柒、結論

- 一、本研究用**雙層玻璃紙**來取代**質子交換膜**當作陰極和陽極的隔離膜。本研究發現單層玻璃紙可以很容易讓氫離子通過，而紅色染液需要 5 天才能擴散完畢，如果使用雙層玻璃紙當隔離膜，會延緩紅色染液擴散的速度。
- 二、我們的微生物燃料電池使用秋雅梅酒瓶當作容器，是瘦高型的玻璃瓶。**酵母菌**在**混有石墨粉的低筋麵粉或糯米**中培養，幾天後，加水覆蓋，當底部氧氣耗盡時，**陽極**就製作完成了。
- 三、**營養基質**的重量，酵母菌的培養時間或**石墨粉**的純度、質量、顆粒大小等，都會影響陽極氧化電位的高低。

- 四、不同純度的石墨粉有不同的用途，99%石墨粉斥水性高，石墨粉彼此會吸附在一起，不會和水混合，導電性較佳，適合加到陽極的微生物底泥中，而 98%石墨粉和水混合成泥水狀，石墨粉之間有水分，可以儲存氧氣，適合用在陰極。98%石墨粉加到微生物底泥中，產生的電壓會較低，表示 98%石墨粉中可能含有氧化劑。
- 五、打氣到微生物底泥之中，會造成電壓下降，並且無法恢復到原來的電壓。打氣到陰極中，則可以提高微生物燃料電池的電壓。
- 六、不需額外添加葡萄糖為燃料來源，光靠澱粉或糯米的能量，就可以產生很高的電壓。本研究以糯米製作出來的微生物燃料電池最大電壓 0.455 V。
- 七、添加葡萄糖到微生物底泥中，相同的條件下，葡萄糖加越多，一開始的電壓反而下降，但隔了幾天後，添加 1 克葡萄糖的微生物燃料電池可以上升到最大電壓 0.651 V。
- 八、在陽極的微生物底泥中添加鐵環，微生物燃料電池的電壓最高達 0.823 V。
- 九、陰極 98%石墨粉中可能含有可溶性的氧化劑，從玻璃紙中擴散出來，和電子結合，造成電壓下降。如果將陰極泡在水中 4 天，讓可溶性物質擴散出去，再放入陽極槽中，就不會出現電壓下降期。
- 十、燃料電池放電時電壓迅速下降並維持一定值，充電的初期電壓也是迅速上升，再慢慢達到一定值，這種情形很像電容器的充放電。
- 十一、串聯 6 個單槽式微生物電池，得到最大電壓 2.347V，先將電荷累積在電容中。當電容放電時，可以點亮 LED 燈，證明我們的微生物燃料電池是有功能的。

捌、參考資料

1. How To Set Up a Microbial Fuel Cell•*You Tube*•民國 110 年 3 月 16 日•取自：
<https://www.youtube.com/watch?v=5iMw7-GIJFE>
2. 蔡家欣等 2 人(2017)·石墨烯微生物燃料電池綠能研究·中華民國第 57 屆中小學科展(高中組化學科)。
3. 田浚緯等 3 人(2015)·微生物燃料電池·中華民國第 55 屆中小學科展(高職組化工、衛工及環工科)。

4. 許祐瑄等 3 人(2013)・會發電與自循環的魚缸－底泥微生物燃料電池之探討與應用・中華民國第 53 屆中小學科展 (高中組生活與應用科學科)。
5. 邱偉誠等 3 人(2013)・微生物燃料電池的研究・中華民國第 53 屆中小學科展 (高中組化學科)。
6. 賴璟霈等 3 人(2011)・多醣類廢棄物轉化為微生物燃料電池研究・中華民國第 51 屆中小學科展 (高中組化學科)。
7. 劉哲安等 3 人(2010)・嗜甜發電廠・中華民國第 50 屆中小學科展 (國中組化學科)。
8. 林弘恩等 4 人(2009)・來電用「絲絲」---絲藻在微生物燃料電池之應用・中華民國第 49 屆中小學科展 (國中組化學科)。
9. 何承儒等 4 人(2008)・乳牛瘤胃液消化分解與發電效益探討・中華民國第 48 屆中小學科展 (高中組生物科)。
10. 玻璃紙・維基百科・民國 110 年 3 月 16 日•取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%8E%BB%E7%92%83%E7%BA%B8>

【評語】 030210

在本雙槽式微生物燃料電池研究中，作者針對氫離子流通性，成功地找出一種便宜且有效的材料，來取代市面上昂貴之商業薄膜，這是一大亮點。

在陽極方面的研究，多項變因對電池電壓的影響被探討，包含石墨粉重量、純度、微生物培養天數、葡萄糖量等，這對找出最佳條件有助益。

唯一的小缺陷則為作者提到鐵環對工作電壓有影響，卻沒更深入探討鐵環之真正角色。這是較為可惜的部份。

作品簡報



酵母菌發電-單槽式微生物燃料 電池的性質研究

國中組
化學科

前言

- 由歷屆全國中小學科展中文獻中，我們發現微生物燃料電池的變因相當多，卻很難有系統性的研究，原因是製作不易，尤其是雙槽式燃料電池。我們希望能製作一種簡易的微生物燃料電池來進行系統化的研究。

研究方法

研究架構

一、隔離膜的研究
對氫離子的通透性
對紅色染液的通透性

二、陽極的研究
不同的培養天數
不同純度的石墨粉
不同重量的糯米
添加葡萄糖的影響
添加鐵環
通氣到微生物底泥

三、陰極的研究
不同純度的石墨粉
通氣到陰極中
陰極的前處理：
(1)泡水
(2)泡水+通氣

四、整體效能的研究
放電時電壓和電流的變化
充電時電壓的變化
串聯後點亮LED燈

隔離膜：
雙層玻璃紙

陰極：
98%石墨粉
石墨棒
水

陽極：
微生物底泥
99%石墨粉
石墨棒

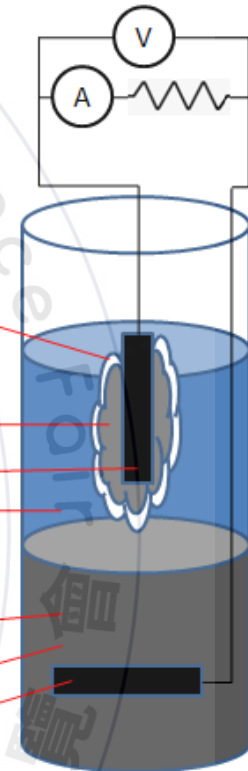


圖1. 構造示意圖。



陽極中，微生物將葡萄糖氧化：

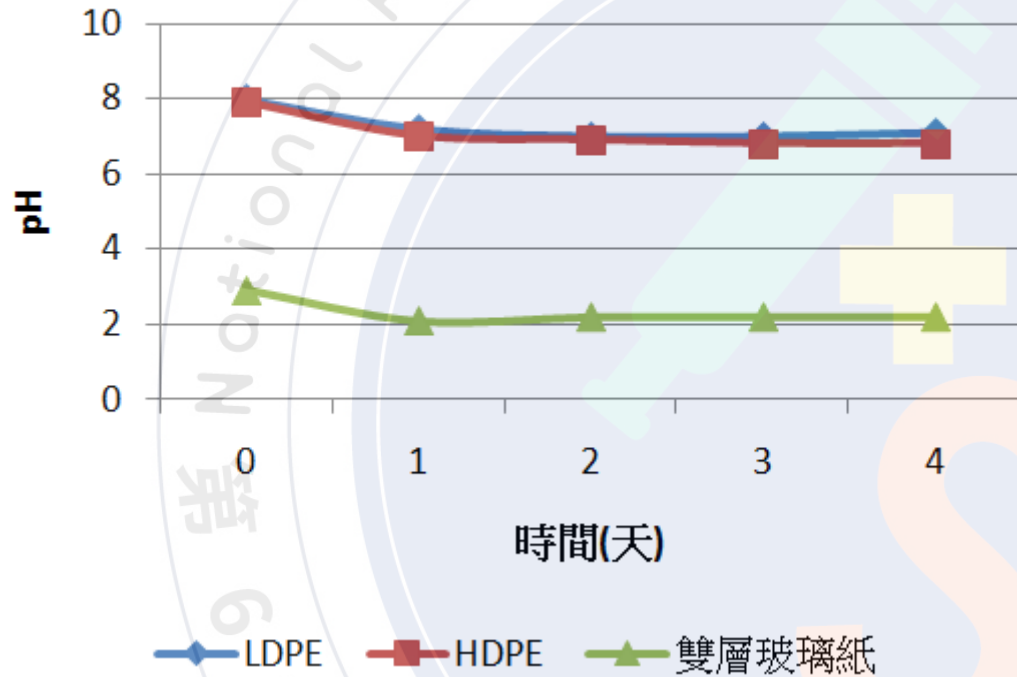


當電子及質子到達陰極進行還原反應：



研究結果~尋找隔離膜

隔離膜：氫離子通透性



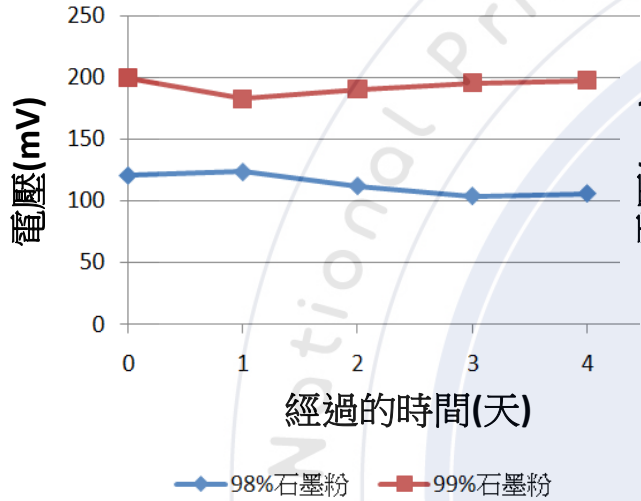
三種不同材質的隔離膜，分別裝 1M 鹽酸 40 mL 後，放入裝有 100 mL RO 水的燒杯中，用 pH 計測量膜外的 pH 值。(A) LDPE 保鮮袋 (B) HDPE 保鮮袋 (C) 雙層玻璃紙 (D) pH 值的變化。

經過時間	單層玻璃紙	雙層玻璃紙	LDPE 保鮮袋	HDPE 保鮮袋
0天				
1天				
2天				
3天				
4天				
5天				

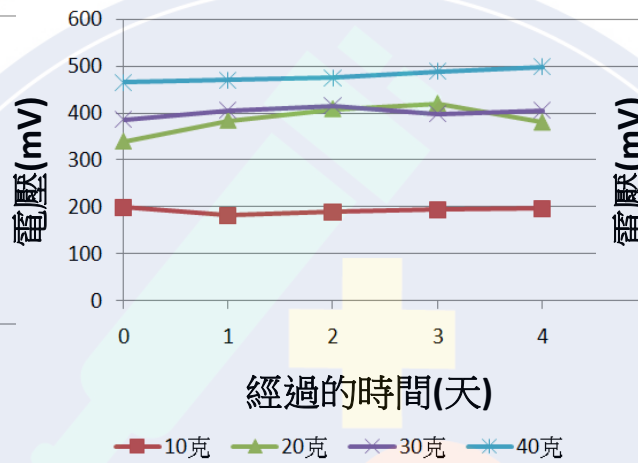


陽極的研究

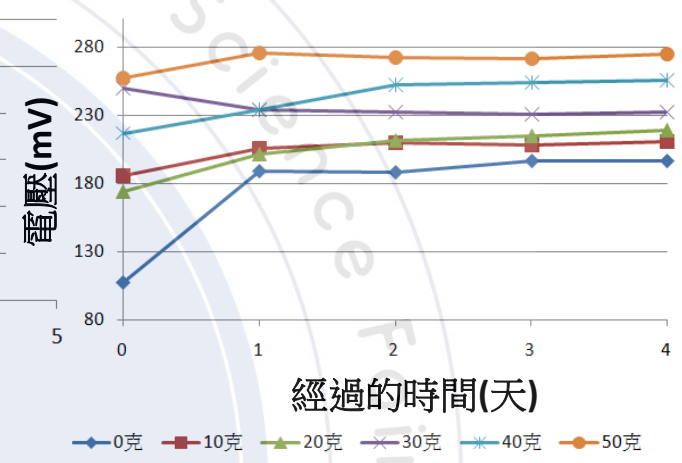
添加不同純度的石墨粉



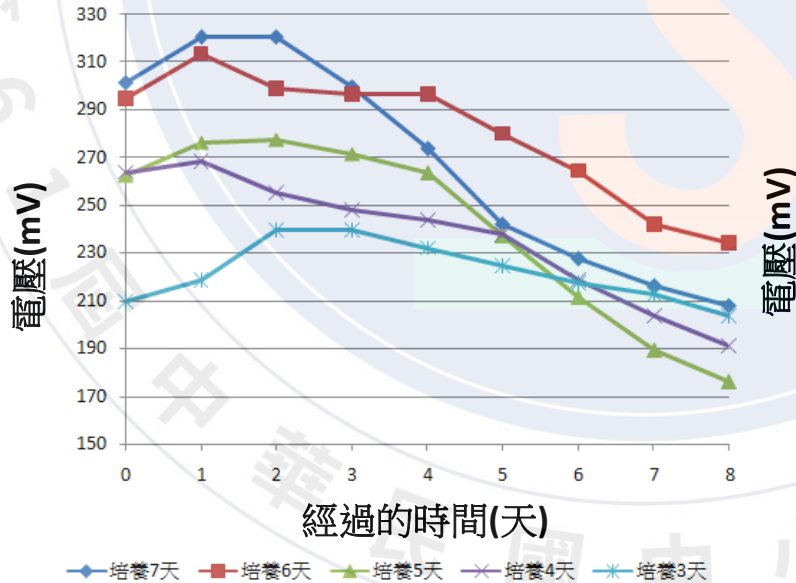
不同重量的糯米



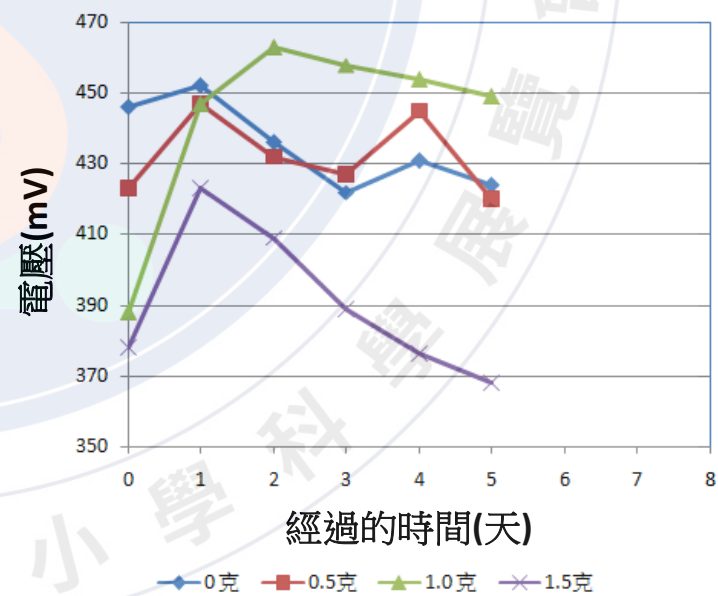
不同重量的石墨粉



培養天數對微生物電池電壓的影響

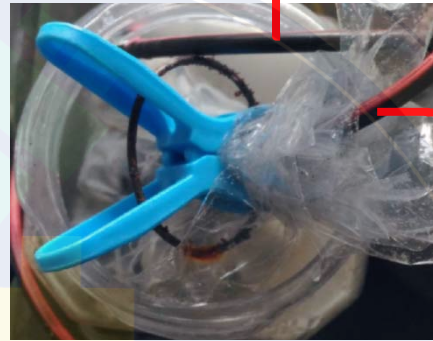
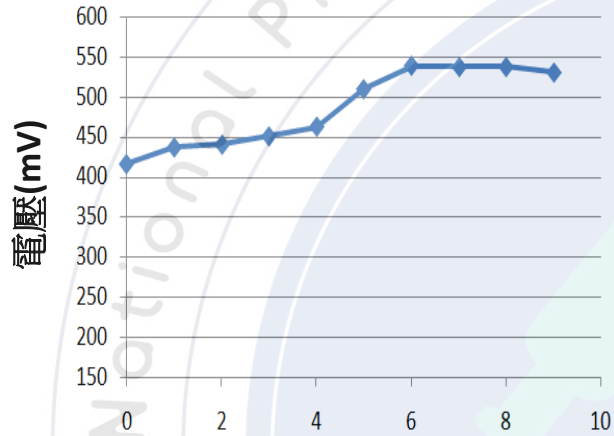


葡萄糖對微生物電池電壓的影響



鐵環對電壓的影響

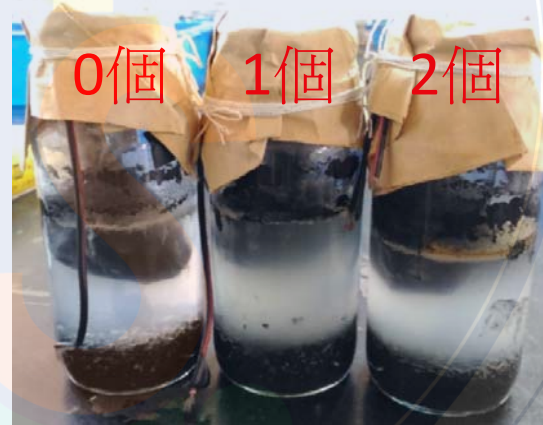
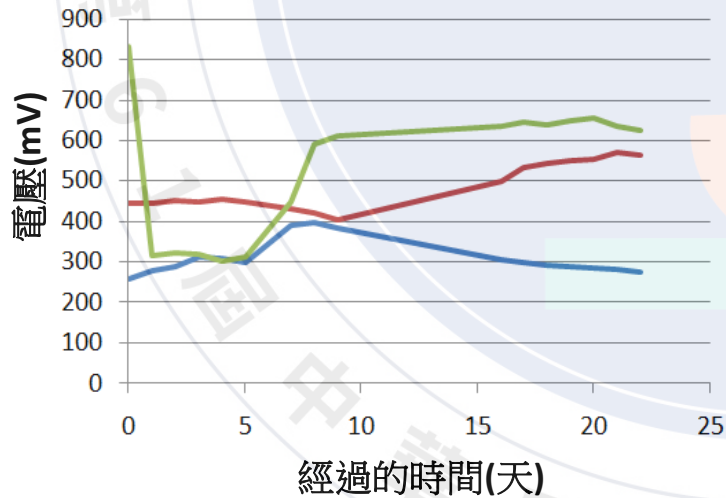
洗衣夾上的鐵環對電壓的影響



陽極導線

陰極導線

鐵環數量對電壓的影響



外加兩個鐵環的微生物電池的電壓一開始的電壓達到832 mV，但是瞬間下降到532 mV。
假設：陰極內98%石墨粉中可能有某些可溶性物質，在陰極放入陽極槽中，從玻璃紙擴散出來，導致電壓下降。

— 0個鐵環 — 1個鐵環 — 2個鐵環

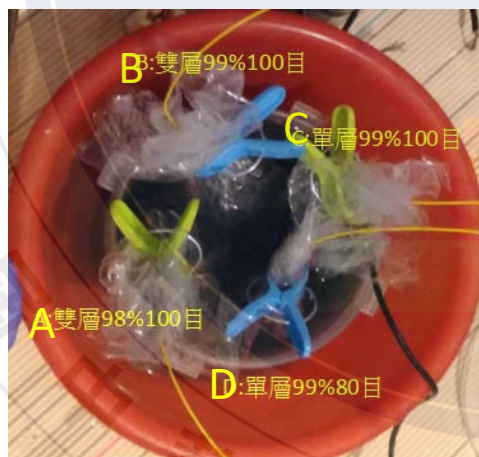
不同陰極放到同一個陽極底泥中



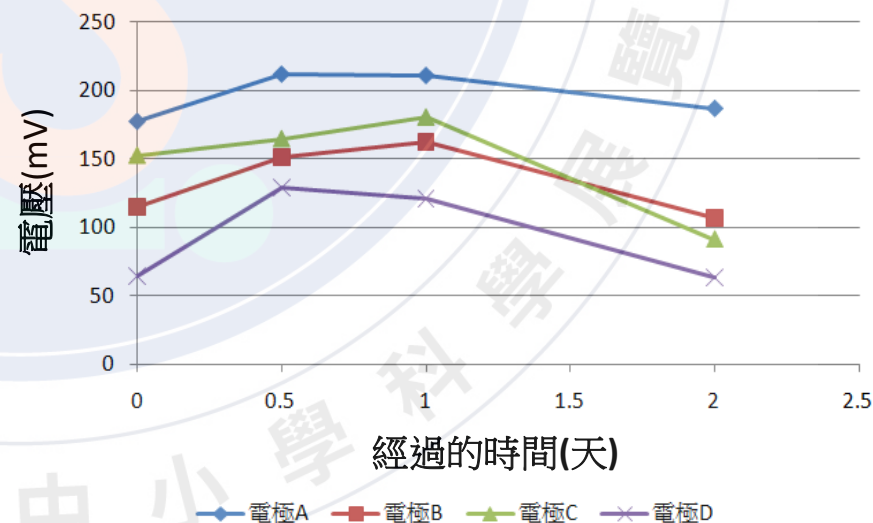
98%石墨粉沉到玻璃紙的底部，像是泥水混合，而99%石墨粉有很強的斥水性，會吸附在石墨棒周圍，和水無法混合。

不同純度的石墨粉製作的陰極。
(A)98%石墨粉。(B)99%石墨粉。

電極A: 雙層玻璃紙中含有98% 100目的石墨粉
電極B: 雙層玻璃紙中含有99% 100目的石墨粉
電極C: 單層玻璃紙中含有99% 100目的石墨粉
電極D: 單層玻璃紙中含有99% 80目的石墨粉。



不同陰極對電壓的影響



不同方法處理的陰極

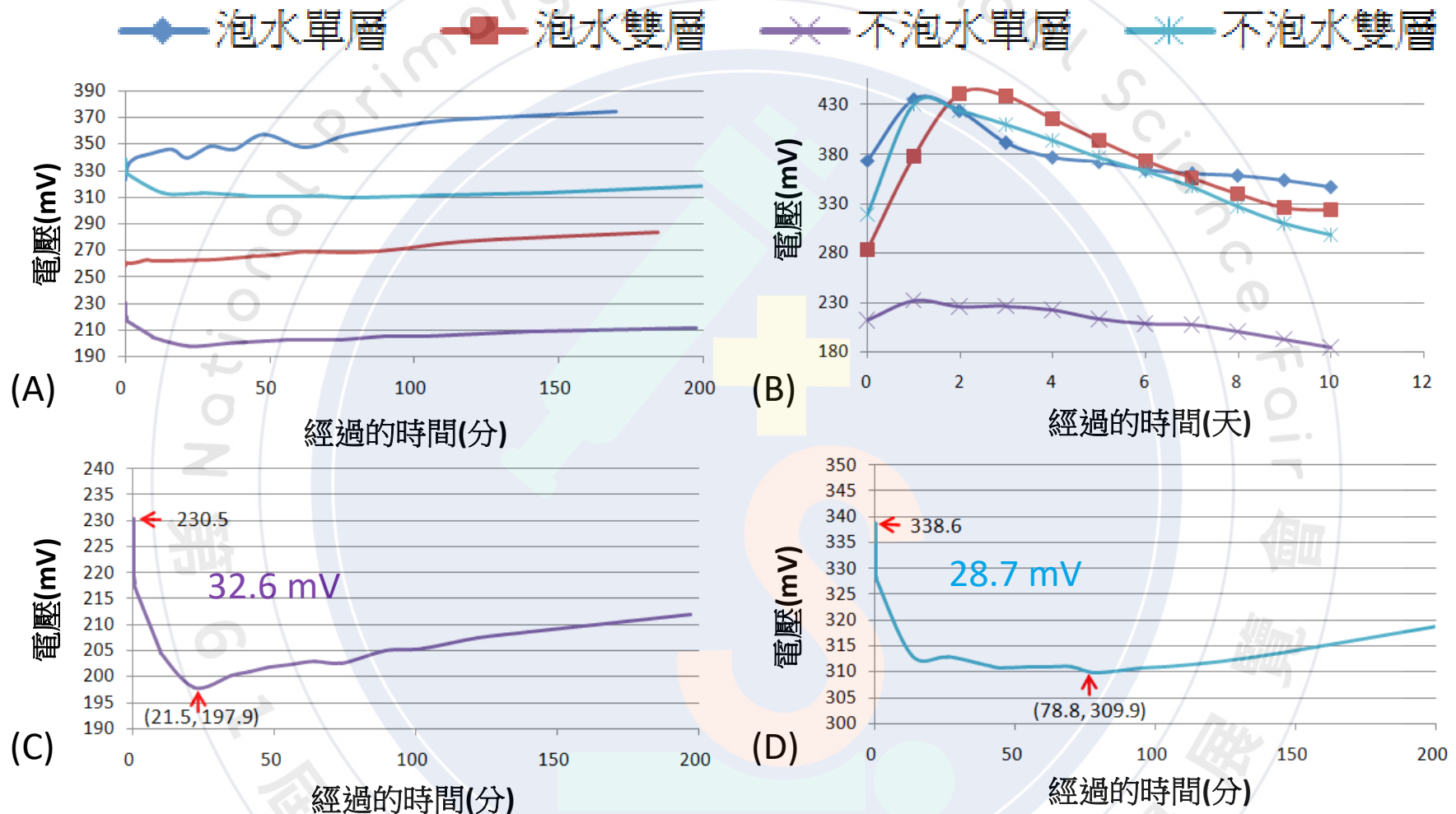


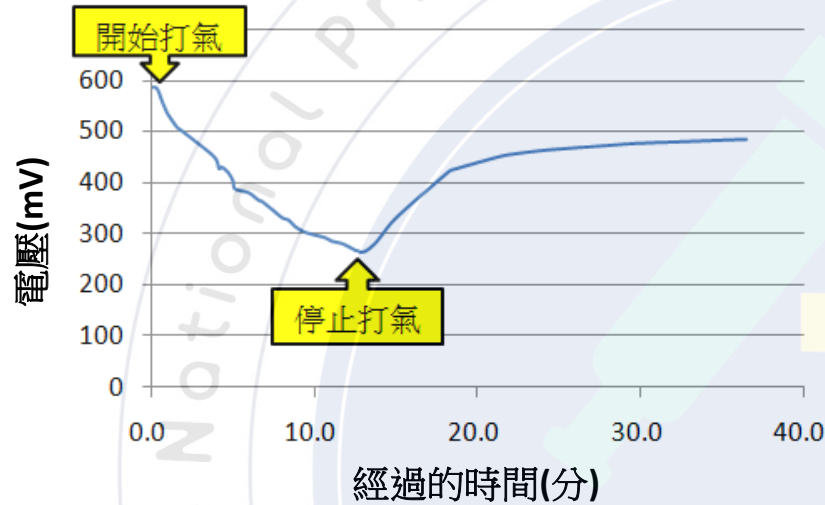
圖.不同方法處理過的陰極，放入相同的陽極後，電壓的變化。(A)前200分鐘電壓變化圖。(B)前7天電壓的變化圖。(C)不泡水單層玻璃紙製作的陰極。(D)不泡水雙層玻璃紙製作的陰極。

不泡水的陰極，放入陽極槽後都有電壓下降期。

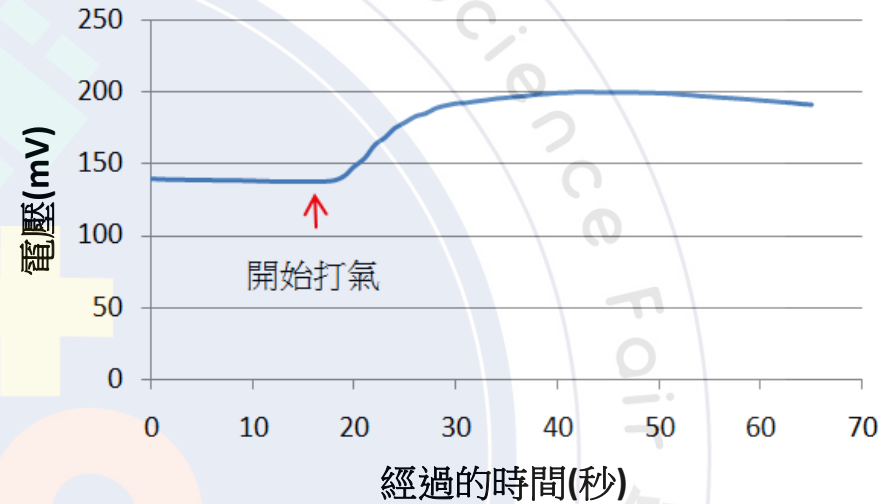
解釋：98%石墨粉中含有使電壓下降的氧化劑，經由擴散作用，中和陽極產生的電子。陰極泡水5天後，就沒有這個現象。

打氣對電壓的影響

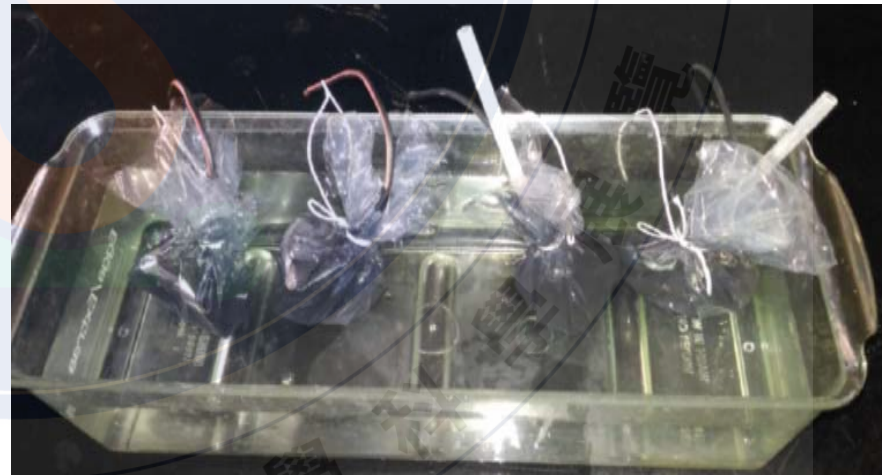
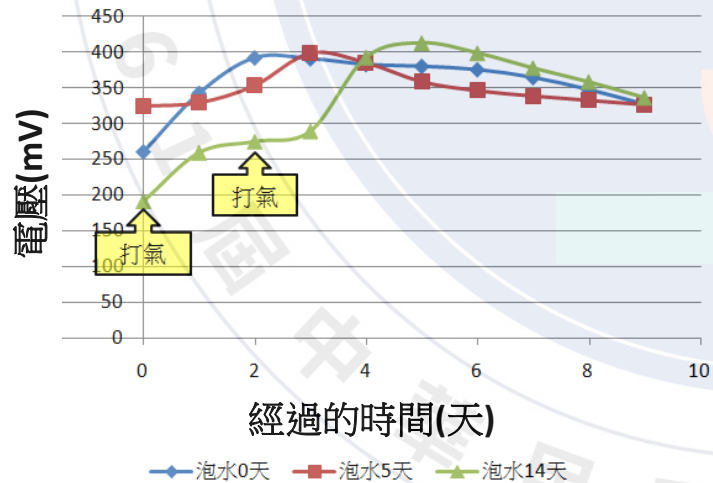
打氣到陽極底泥對電壓的影響



打氣到陰極對電壓的影響

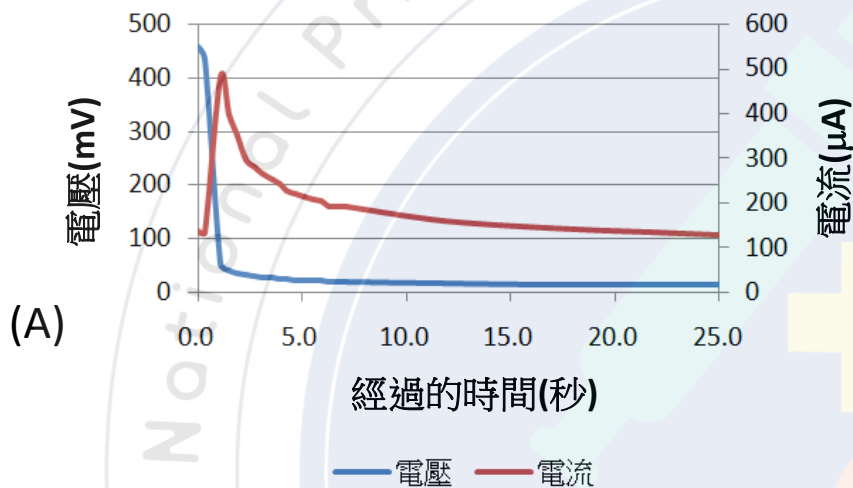


不同泡水時間的陰極

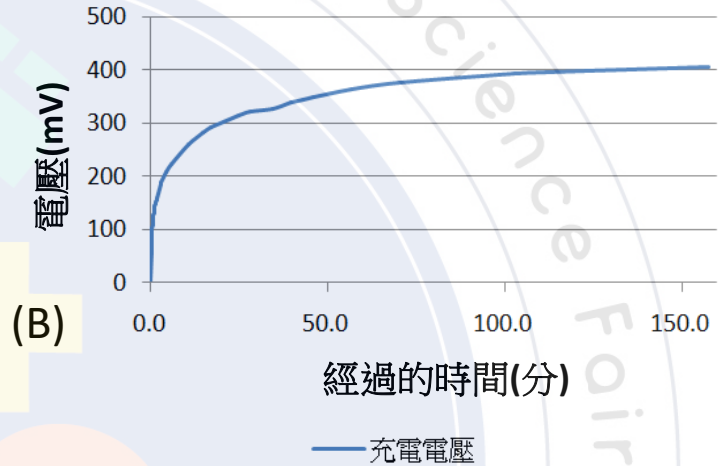


充放電

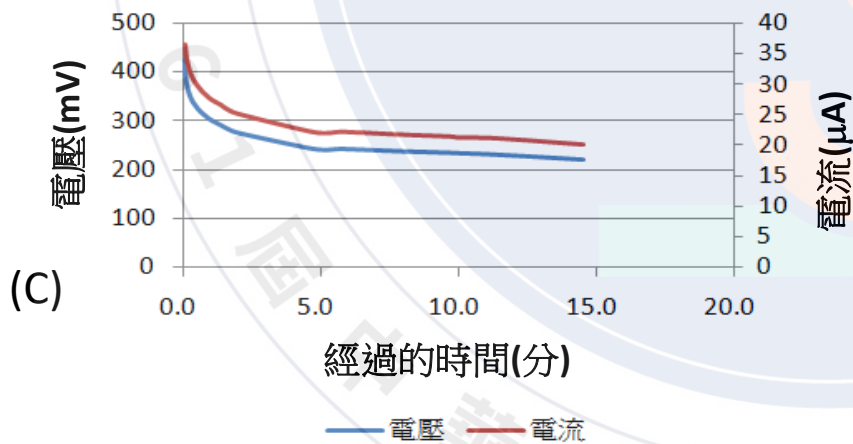
放電：電阻1歐姆



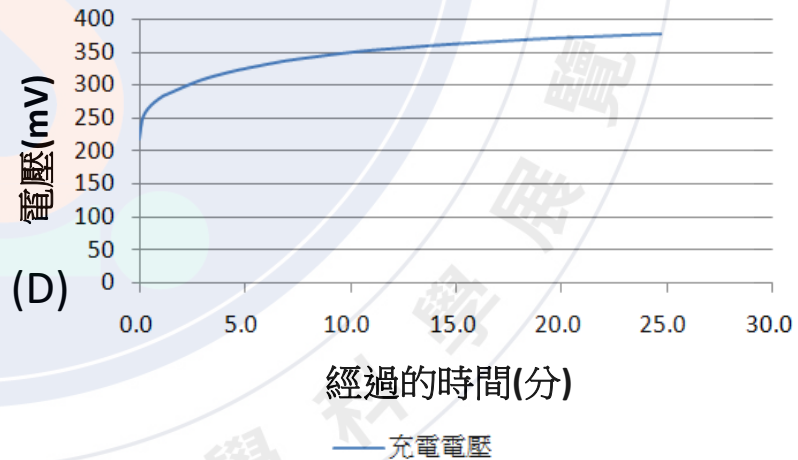
充電過程中電壓的變化



放電：電阻10K歐姆



電阻10K歐姆充電時電壓的變化



串聯六個微生物燃料電池

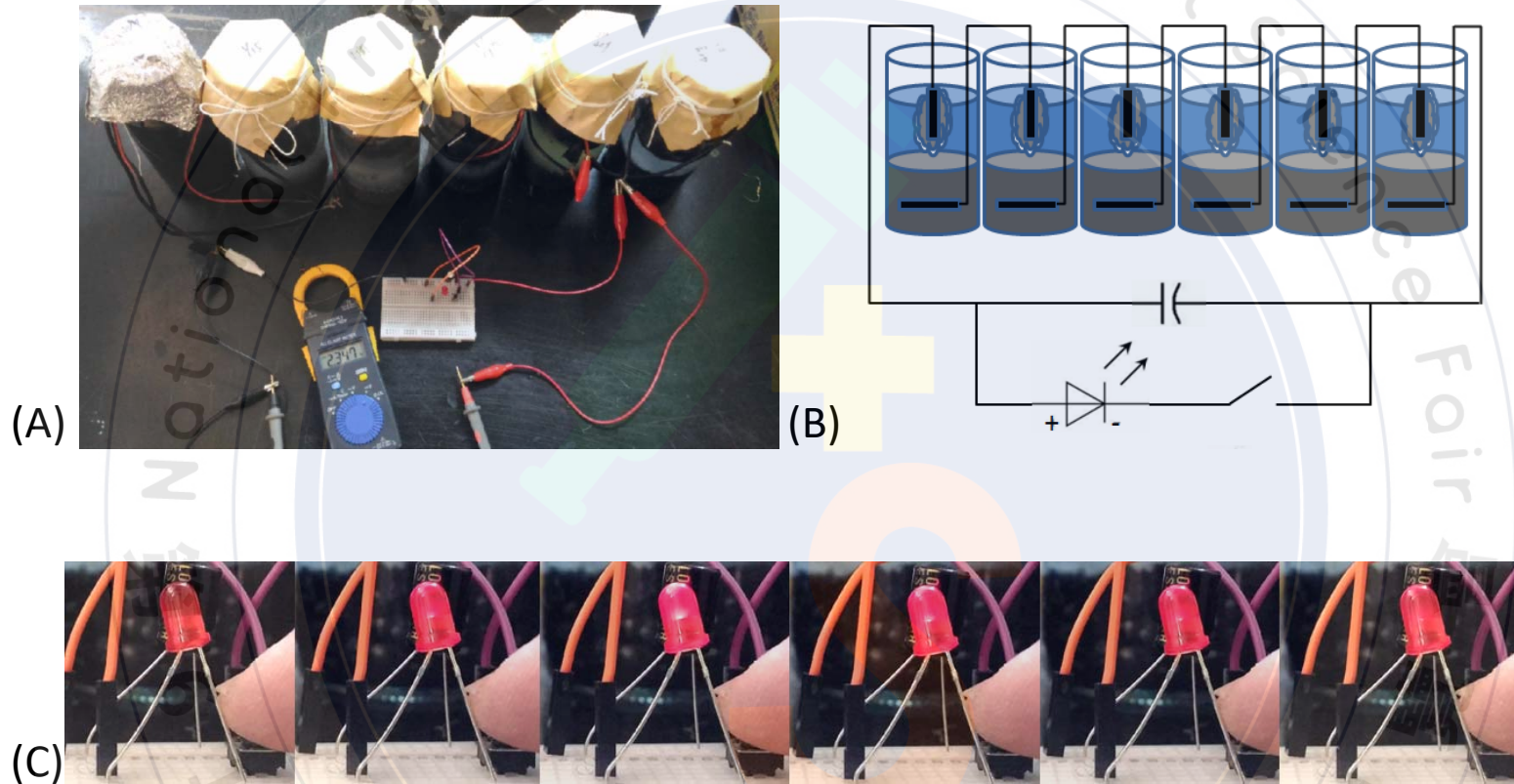


圖22. (A)將六個微生物電池串聯可以得到總電壓2.347 V，先對電容充電，按下開關之後，可以點亮LED燈。(B)連接線路圖。(C)按下開關後，LED燈先快速亮了一下，再逐漸熄滅。每張照片拍攝時間間距為1/30秒。

結論

結論一：隔離膜

玻璃紙可以讓氫離子自由通過。
雙層玻璃紙可以延遲紅墨水的擴散作用。

結論二：陽極

添加1克葡萄糖
添加鐵環提高電壓
通氣到底泥降低電壓

結論三：陰極

(1) 不同的石墨粉有不同的用途
(2) 玻璃紙無法阻擋氧化劑的滲漏。
(3) 通氣到陰極中可提高電壓。

結論四：整體效能

微生物燃料電池的充放電像電容。
串聯6個微生物燃料電池可以讓LED燈發光。

參考資料

1. How To Set Up a Microbial Fuel Cell•YouTube•民國110年3月16日•取自：
<https://www.youtube.com/watch?v=5iMw7-GIJFE>
2. 蔡家欣等2人(2017)·石墨烯微生物燃料電池綠能研究·中華民國第57屆中小學科展(高中組化學科)。
3. 田浚緯等3人(2015)·微生物燃料電池·中華民國第55屆中小學科展(高職組化工、衛工及環工科)。
4. 許祐瑄等3人(2013)·會發電與自循環的魚缸—底泥微生物燃料電池之探討與應用·中華民國第53屆中小學科展(高中組生活與應用科學科)。
5. 邱偉誠等3人(2013)·微生物燃料電池的研究·中華民國第53屆中小學科展(高中組化學科)。