

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 化學科

第一名

030211

塑膠發電 - PLA 水解之燃料電池研究

學校名稱：中正國防幹部預備學校

作者： 國二 吳東澤 國二 郭冠廷	指導老師： 許瑋育
-------------------------	--------------

關鍵詞：PLA、水解、自製電池

## 得獎感言

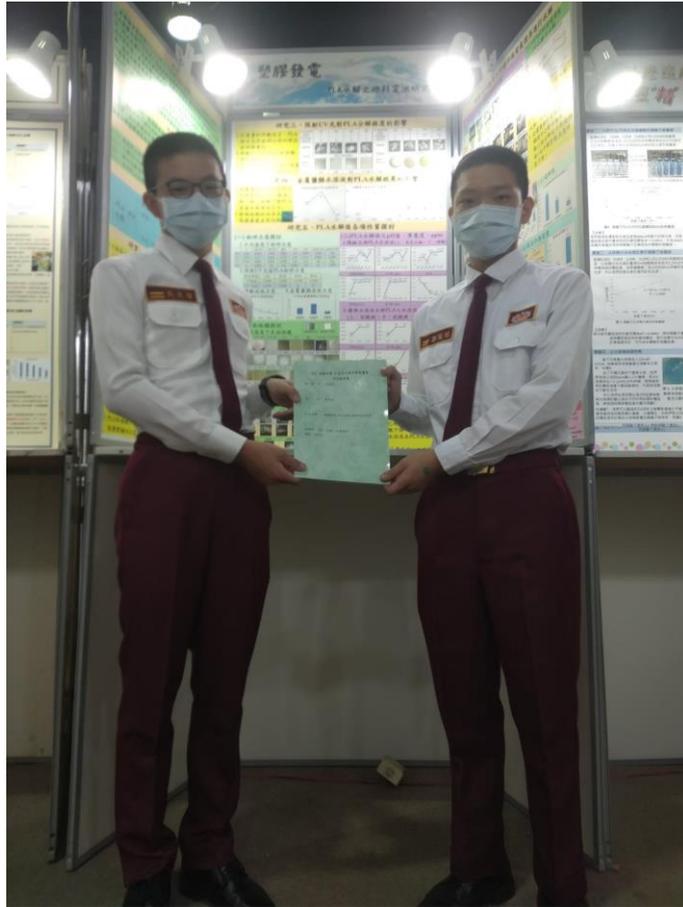
參加科展，本來我們只是想體驗一個完整科學實驗發現與探尋結果的過程。從最初的市賽一路到全國賽，最後榮獲第一名的寶座，回想起來連我們自己都覺得不可思議，其中最感謝的人毫無疑問就是我的指導老師許瑋育老師。她帶領著我們尋找日常生活中的問題，以科學方法思考解決方式，設計實驗，並慢慢地修正假設得出結果。

在實驗的過程中常常會有一些意外的發現。記得有一次我們利用硫酸銅水解 PLA，實驗後我們在硫酸銅水溶液中發現綠色的沉澱物。起初我們以為有了新的發現，找到新的反應，產生了未知的新物質。但後來在多次實驗找出答案的過程中，證實那不過是氧化物而已。雖然這個插曲對我們實驗的最終結果並沒有太大的影響，但這也是科學有趣的地方，總是能出奇不異的給我們帶來驚喜。由於我們是化學組，雖然實驗過程總是很有趣，但對實驗的流程設計與方法也是要特別注意。有一次我們在實驗室操作自行設計的實驗時，因為對實驗的不熟悉使加熱的氫氧化鈉與 PLA 產生了一堆黑色煙霧，整間實驗室臭氣熏天。幸好黑煙只是 PLA 燒焦產生的，於是我們就將實驗室趕快收拾之後打開空氣清淨機後逃離了實驗室。

由於科展是一個長時間對於科學的探討與發現，未來若有興趣參與的同學，可以從身邊的小問題開始，設計並解決。同時團隊合作也很重要，隊友彼此間的溝通與鼓勵都是能夠持續往前的動力，當然遇到問題時一定要先問指導老師，不要成為拖後腿的那個人啦！



照片一、認真進行實驗



照片二、高雄市科展



照片三、線上全國賽

## 摘要

本實驗主要利用 PLA 水解形成小分子乳酸，作為燃料電池之燃料，找出 PLA 塑膠水解可行方式，並使其再循環產生能量，減少塑膠產品對環境之污染。為尋找 PLA 分解之最佳方法，以溫度和溶液種類為變因，發現 PLA 水解率隨溫度增加而上升。其中以氫氧化鈉溶液前處理再置入乙醇中水解有最佳效果。後續改採熱熔方式直接將 PLA 與氫氧化鈉混合加熱，可將 PLA 完全水解，以上述 PLA 水解溶液作為燃料電池之燃料。自製燃料電池分別以氧氣與 PLA 水解液為正、負極，鍍鉑鎳鉻絲為電極，0.7M 氫氧化鈉溶液為電解液，同時以氧氣供應裝置優化，電壓可達 0.85V。PLA 雖為可分解性塑膠，現今仍無良好之處理方式，此自製乳酸燃料電池可提供 PLA 塑膠分解與利用之新思維。

## 壹、前言

### 一、研究動機

因為在學校上課時發現，能源發展與環保議題是現在社會上的幾大問題之一，卻又不易同時解決，因此去找了理化老師詢問希望可以運用科學的方式來幫助解決社會上的大問題，經過跟老師的詢問與討論後，決定用課本中有提到的有機聚合物進行實驗，看是否能以學校現有資源分解塑膠避免造成環境污染，並能使其成為電池，達到能量循環利用。

### 二、研究目的

- (一)、尋找 PLA 水解最有效率的溶液及溫度。
- (二)、實驗酸鹼溶液對 PLA 水解的效率。
- (三)、了解 UV 光對 PLA 水解率的影響。
- (四)、實驗金屬鹽類對 PLA 水解率的影響。
- (五)、探討水解後 PLA 的物理性質變化。
- (六)、使用特定條件做前處理再進行水解獲得最佳水解效果。
- (七)、使用 PLA 水解溶液自製燃料電池

## 貳、研究設備及器材

### 一、研究器材：

酒精燈、鑷子、打火機、石蠟紙、刮勺、濾紙、剪刀、LED 燈、漏斗、秤量紙、容量瓶、量筒 (25、50、100ml)、乳膠手套、載玻片、蓋玻片、試管、滴管、塑膠滴管、尖嘴鉗、錶玻璃、鱷魚夾、電子天秤、棉花

					
PLA 吸管	50ml 樣品瓶	碳棒	碳織布	塑膠管	銅線
					
鎳鉻絲	針筒	防水膠	烘箱	電源供應器	三用電表
					
加熱攪拌器	紫外燈箱	pH 計	水質檢測計		

## 二、研究藥品：

							
乙醇	氫氧化鈉	硫酸銅	硫酸鋅	硝酸鉀	硫酸鈉	甘油	鹽酸
							
乳酸	聚乙烯醇	六氯鉻酸	硫酸	磷酸	過氧化氫	二氧化錳	

## 參、研究過程及方法

### 一、塑膠與 PLA

(一)塑膠：一般常見 1~6 號塑膠均不易分解，因此我們去尋找市面上號稱的可分解塑膠進行下一步實驗。

(二)PLA：分類為 7 號的 PLA 中文名為聚乳酸，常見於一般塑膠杯或塑膠吸管之材料。成分主要是玉米、小麥等纖維素食物，市面上常號稱無毒、環保可分解。

### 二、PLA 分解

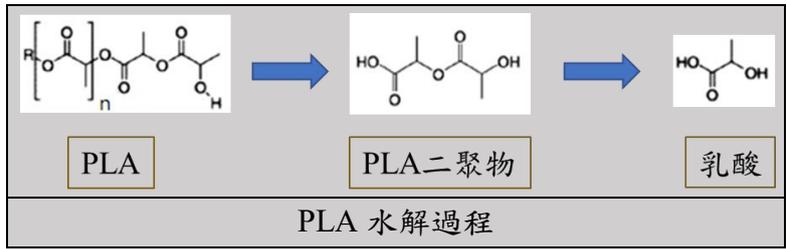
(一)根據文獻中指出常見 PLA 分解方式有(1)水解：利用不同溶液使其分解

(2)熱解：利用高溫使其分解(3)光解：照射日光、UV 光使其分解。

本實驗改變不同上述變因，觀察其對 PLA 水解效果的改變。

(二)PLA 於水溶液水解或照 UV 光光解後，由於 PLA 水解成小分子乳酸易溶於水，可測得其前後重量差異，換算出水解率與光解率。

(三)分解後之 PLA 水溶液可做為燃料電池之燃料。

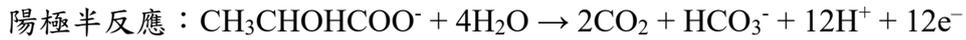


### 三、燃料電池

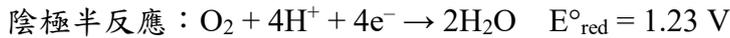
#### (一)直接燃料電池

燃料電池是將原本物質燃燒所釋放的能量，直接透過電子釋放的方式轉化成電能。直接燃料電池是利用觸媒使乳酸直接釋放出電子，目前常見為直接甲醇燃料電池。優點是發電完之後不會對環境有太大的汙染，但缺點是由於大部分的直接燃料電池發電效率都不太理想。

#### (二)乳酸-氧氣燃料電池：理論電壓 0.89V



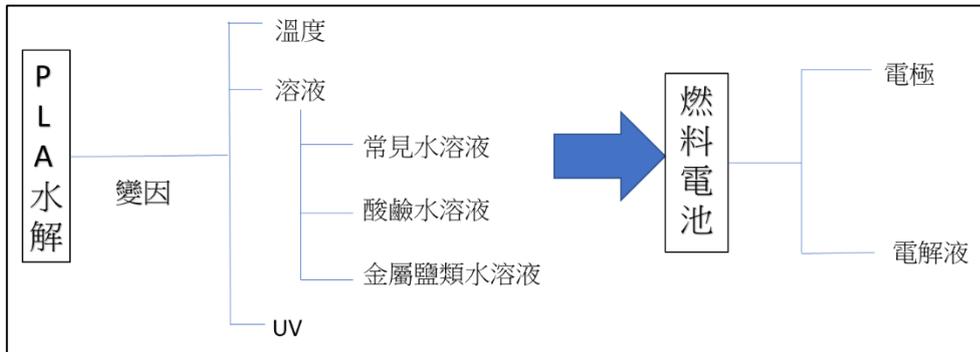
$$E^\circ_{\text{ox}} = -0.34 \text{ V}$$



#### (三)電極與電解液

- 1.目前市售的甲醇燃料電池是利用白金觸媒，因為其有較高的催化效率，在我們的乳酸燃料電池中使用白金觸媒期望能增加電子釋放效果而增加電壓。
- 2.根據文獻直接燃料電池常以氫氧化鈉或硫酸做為電解液，因此本實驗將以此條件作為主要設計進行探討。

### 四、研究架構



## 肆、研究結果

### 研究一、在不同溶液及溫度中水解度差異

#### 實驗(一)、常溫下以不同溶液水解

1.目的：尋找在常溫時使 PLA 水解最有效率的溶液

2.實驗步驟：

- (1) 將 PLA 吸管剪成 1g 重，放入不同種類的 40ml 溶液中  
 水溶液種類：去離子水、乙醇 50%、乙醇 95%、汽水、聚乙烯醇、  
 0.5M 氫氧化鈉、1M 氫氧化鈉、甘油  
 有機溶液種類：丙酮、正己烷、乙酸乙酯
- (2) 將有 PLA 的溶液靜置常溫中  
 一般水溶液：40hr  
 有機溶劑：50hr、70hr
- (3) 使用濾紙過濾溶液中的 PLA
- (4) 拿至烘箱中烘乾並秤重
- (5) 將乾燥之 PLA 放入夾鏈袋中保存

3.實驗數據：

(1)一般水溶液

常溫	去離子水	50%乙醇	95%乙醇	汽水	聚乙烯醇	0.5MNaOH	1MNaOH	甘油
原重(g)	1	1	1	1	1	1	1	1
乾重(g)	0.99	0.99	1	0.99	1.04	0.67	0.65	1.06
減少重(g)	0.01	0.01	0	0.01	-0.04	0.33	0.35	-0.06
水解率*(%)	1	1	0	1	-4	33	35	-6

(2)有機溶劑水解率(%)

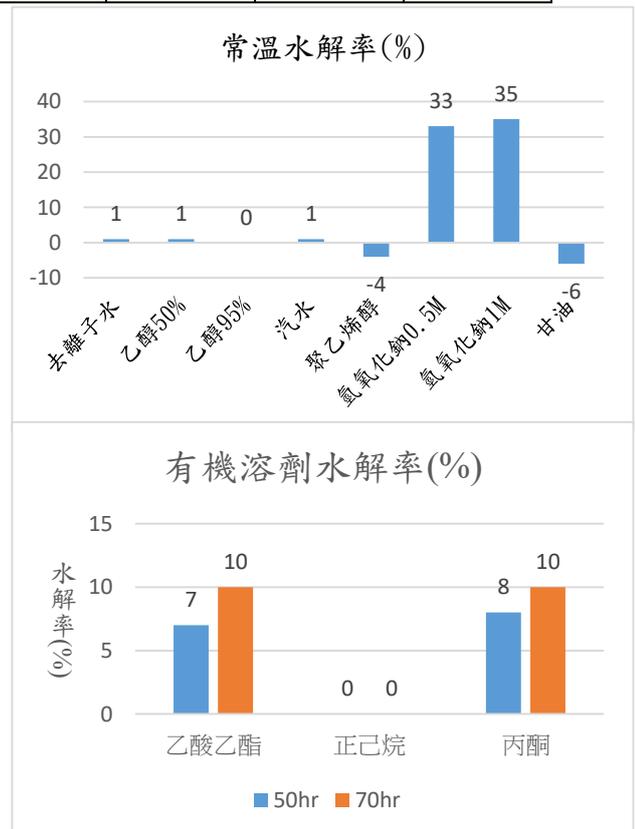
有機溶劑靜置時間	乙酸乙酯	正己烷	丙酮
50hr	7	0	8
70hr	10	0	10

(\*)水解率計算方式

乾重：PLA 過濾後於烘箱中烘乾之重量

減少重：PLA 原重-PLA 乾重

$$\text{水解率} = \frac{\text{減少重}}{\text{原重}} \times 100\%$$



#### 4.討論：

- (1)在常溫時**氫氧化鈉水解率明顯較其他溶劑高**，以 1M 氫氧化鈉的水解效率最高，推測鹼性物質氫氧化鈉對於 PLA 水解有較明顯幫助。又 1M 氫氧化鈉高於 0.5M，隨著濃度增加可能可以提高水解效果。
- (2)在常溫時去離子水、50%乙醇、95%乙醇與汽水水解率幾乎沒變，推測在常溫下上述溶液對於 PLA 水解較無明顯的幫助。
- (3)在常溫時聚乙烯醇與甘油水解率為負值，推測此時上述溶液可能滲入 PLA 進行結合或附著在 PLA 的表面，使得烘乾後重量不減反增。以水解率數據而言聚乙烯醇與甘油對於 PLA 水解無明顯幫助，且不易分辨剩餘重量為 PLA 或聚乙烯醇，因此未來不考慮以此溶液作為水解溶劑。
- (4)以有機溶劑而言丙酮和乙酸乙酯水解率約 10%相對正己烷而言較佳，推測是因為丙酮和乙酸乙酯是極性分子，而正己烷是非極性分子，因此丙酮和乙酸乙酯有較佳的水解能力。

#### 5.問題：

- (1)發現去離子水、50%乙醇、95%乙醇與汽水水解率幾乎沒變，但由於去離子水、乙醇為常見及易取得並分析處理之溶液，所以後面考慮**提高溫度進行下一步實驗**，試驗高溫是否能增加上述溶液之水解率。
- (2)發現聚乙烯醇與甘油水解率為負值，推測可能有部分溶液殘留在 PLA 上，猜想是否由於實驗步驟中缺少「**以去離子水清洗分解後之 PLA**」。因此需修正實 PLA 驗步驟為取出 PLA 後使用去離子水清洗乾淨後放置錶玻璃再放入烘箱中烘乾。
- (3)靜置約 70hr 後有機溶劑對 PLA 水解的效果並不好，因此後續不再考慮繼續使用上述有機溶劑作為水解 PLA 的條件。

### **實驗(二)、將不同溶液放置於 50°C、70°C、90°C 中水解**

1.目的：尋找最佳之水解溫度條件

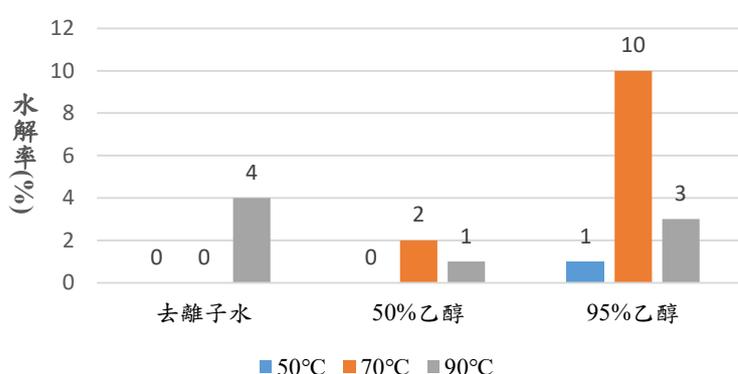
#### 2.實驗步驟：

- (1) 將 PLA 吸管剪成 1g 重，放入不同種類的 40ml 溶液中
- (2) 放置烘箱分別設置 50°C、70°C、90°C，靜置 40hr
- (3) 以濾紙過濾分解之 PLA 水溶液並保存於試管中
- (5) 將濾紙上之 PLA 以去離子水潤洗乾淨
- (6) 拿至烘箱中烘乾並秤重
- (7) 將乾燥之 PLA 放入夾鏈袋中保存

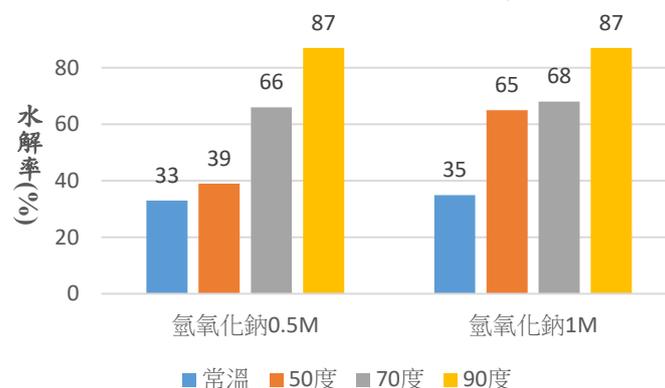
### 3.實驗結果：

溶液種類		去離子水	50%乙醇	95%乙醇	0.5MNaOH	1MNaOH
50°C	減少重(g)	0	0	0.01	0.39	0.65
	水解率(%)	0	0	1	39	65
70°C	減少重(g)	0	0.2	0.1	0.66	0.68
	水解率(%)	0	2	10	66	68
90°C	減少重(g)	0.04	0.01	0.03	0.87	0.87
	水解率(%)	4	1	3	87	87

水、乙醇於不同溫度水解率



NaOH不同溫度水解率



### 4.討論：

- (1)去離子水、50%及 95%乙醇水解率大多隨著溫度的增加而有所提升，但在 70°C時 95%乙醇水解 PLA 卻有較突出的表現。
- (2) 0.5M、1M 氫氧化鈉水解率會隨著溫度增加而有所提升，因此決定之後使用 90°C當作主要水解溫度。
- (3)常溫、50°C與 70°C時 1M 氫氧化鈉水解率分別為 35%、65%、68%均較 0.5M 氫氧化鈉水解率 33%、39%、66%還高，推測提高濃度可能有助於 PLA 水解。

### 5.問題：

- (1)乙醇在 70°C中水解率雖僅為 10%，但已較 50°C時的 1%有明顯提升。但由於乙醇為一良好且易取得溶劑，因此後續考慮先以其他化學方法進行結構初步破壞再置入乙醇中繼續水解，期望能更提高水解率。
- (2)在不同溶液的試驗中，可知氫氧化鈉水解效果較佳，並得知氫氧化鈉濃度高低可能和 PLA 水解率呈現正相關，為了確切得知濃度與水解率之間的關係，在後續研究中將探討不同濃度氫氧化鈉對 PLA 水解率的影響。

## 研究二、氫氧化鈉對 PLA 水解率的影響

### 實驗(一)：氫氧化鈉濃度對 PLA 水解率的影響

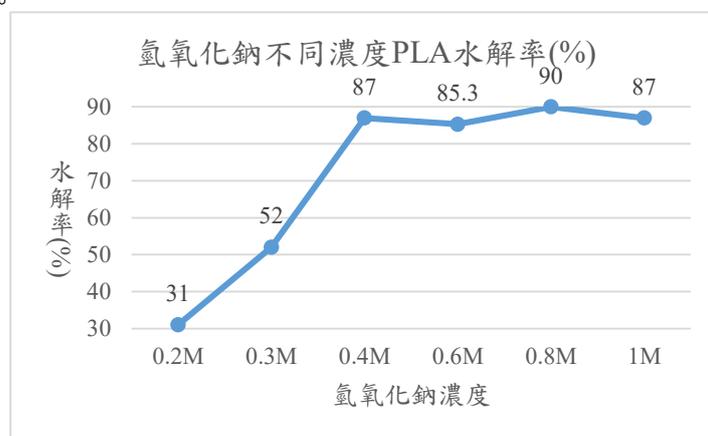
1 目的：了解氫氧化鈉濃度和 PLA 水解率之關係

#### 2 實驗步驟：

- (1) 以容量瓶配置 0.2M、0.3M、0.4M、0.6M、0.8M、1.0M、1.2M 的氫氧化鈉溶液，各取 40ml，並放入試管中。
- (2) 於試管內放入 1g PLA。
- (3) 將裝有 PLA 的氫氧化鈉溶液試管放入烘箱，調整為 90 度、40 小時。
- (4) 以濾紙過濾分解之 PLA 水溶液並保存於試管中。
- (5) 濾紙上之 PLA 以去離子水中潤洗乾淨。
- (6) 拿至烘箱中烘乾並秤重。
- (7) 將乾燥之 PLA 放入夾鏈袋中保存。

#### 3 實驗結果：

氫氧化鈉濃度(M)	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1
減少重(g)	0.31	0.52	0.87	0.85	0.9	0.87
水解率(%)	31	52	87	85.3	90	87



#### 4. 討論：

- (1) 由實驗結果知氫氧化鈉濃度  $< 0.4M$  之前，PLA 水解率與氫氧化鈉濃度呈現正相關，可能是  $> 0.4M$  已經超過 PLA 的有效分解濃度。
- (2) 當氫氧化鈉濃度  $> 0.4M$  時，PLA 水解率開始維持在一定範圍內(85~90%) 不再持續顯著上升，可能 **氫氧化鈉超過某濃度後 PLA 水解率不再呈現性增加**。
- (3) 為了解 PLA 在氫氧化鈉溶液中結構被初步破壞時間點，將於後續實驗中利用氫氧化鈉較佳分解濃度 0.4M~1M 探討分解率與時間的關係。

#### 5. 問題：

- (1) PLA 在氫氧化鈉中水解率可達 82%，但 PLA 直接水解在氫氧化鈉中不易作為燃料電池之燃料，因此考慮先利用氫氧化鈉做初步分解破壞 PLA 結構，再進行水解。
- (2) PLA 水解率有時會有些許不一致，可能是因為樣品的 PLA 分子量分佈不均勻導致分解速率不一。

## 實驗(二) 氫氧化鈉水解時間對水解率的影響

1.目的：了解氫氧化鈉水解時長與 PLA 水解效率的關係

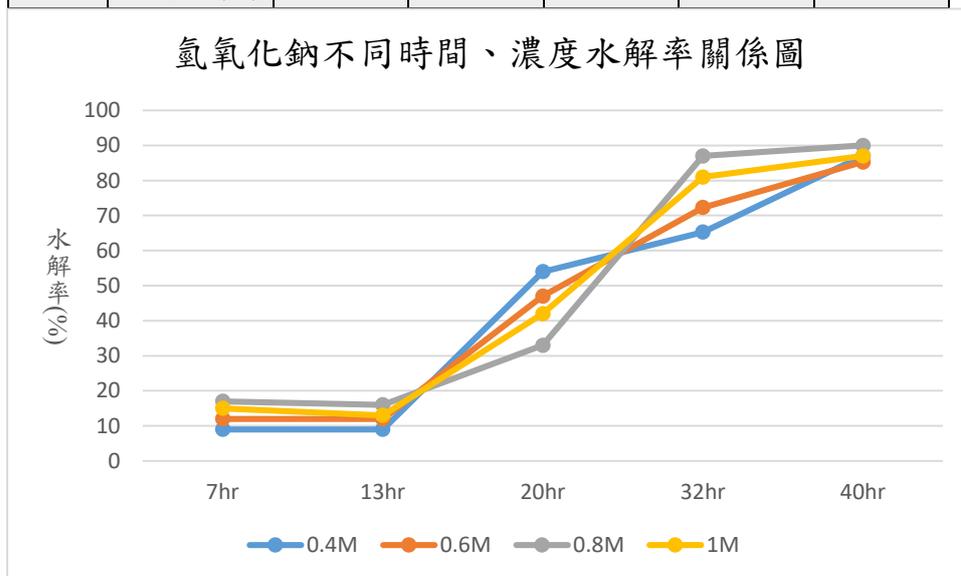
2.實驗步驟：

同實驗(一)之實驗步驟，分別將溶液置入烘箱 7 小時、13 小時、20 小時、32 小時、40 小時後取出。

3.實驗結果：

氫氧化鈉水解時間		7hr	13hr	20hr	32hr	40hr
原重(g)		1	1	1	1	1
0.4M	減少重(g)	0.09	0.09	0.54	0.65	0.87
	水解率(%)	9	9	54	65.3	87
0.6M	減少重(g)	0.12	0.12	0.47	0.72	0.85
	水解率(%)	12	12	47	72.3	85.3
0.8M	減少重(g)	0.17	0.16	0.33	0.87	0.90
	水解率(%)	17	16	33	87	90
1.0M	減少重(g)	0.15	0.13	0.42	0.81	0.87
	水解率(%)	15	13	42	81	87

氫氧化鈉不同時間、濃度水解率關係圖



4.討論：

- (1)PLA 浸泡於 0.4~1M 的氫氧化鈉溶液，於前 13 小時水解率均無顯著提高。在 13 小時之後水解率隨著時間有顯著增加，推測 13 小時前氫氧化鈉溶液可能僅破壞 PLA 表面結構，並未徹底打斷鍵結。超過 13 小時 PLA 開始逐漸被分解成較小分子，因此水解率開始提高。
- (2)時間越長氫氧化鈉溶液的水解效果越好，經 40 小時水解後，氫氧化鈉溶液均可達到接近 90%的水解效果。
- (3)由結果可看出 PLA 於氫氧化鈉中水解 7 小時與 13hr 時的水解率差不多，為了可以減少能源輸出與節省時間，後續實驗採取先將 PLA 於氫氧化鈉中浸泡 7 或 13 小時作為前處理破壞表面結構後，再進一步進行水解。

### 5.問題：

(2)在氫氧化鈉溶液中前 13 小時的水解率差不多，但表面結構用肉眼觀察已有些為改變，因此推測氫氧化鈉此時已經將 PLA 結構破壞。為確認結構是否與初始狀態有所差異，於後續實驗中將以顯微鏡對 PLA 水解後之表面進行觀察。

### 實驗(三) PLA 以氫氧化鈉前處理後於水、乙醇中水解

1.目的：期望以氫氧化鈉使結構被破壞提高水解效率並方便作為電池之燃料

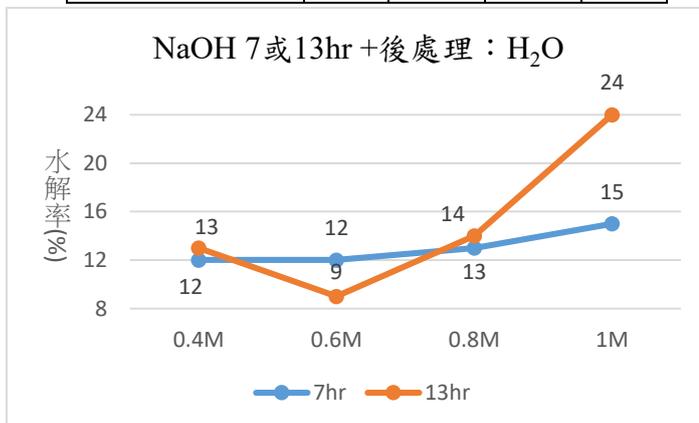
### 2.實驗步驟：

同實驗(一)之水解步驟，將有 PLA 的氫氧化鈉溶液分別置入烘箱(調至 90 度) 7hr、13 hr 後，以去離子水潤洗、烘乾。再將 PLA 分別置入水、乙醇中進行後處理(90°C、20hr)，並使用去離子水洗淨，烘乾並秤重。

### 3.實驗結果：

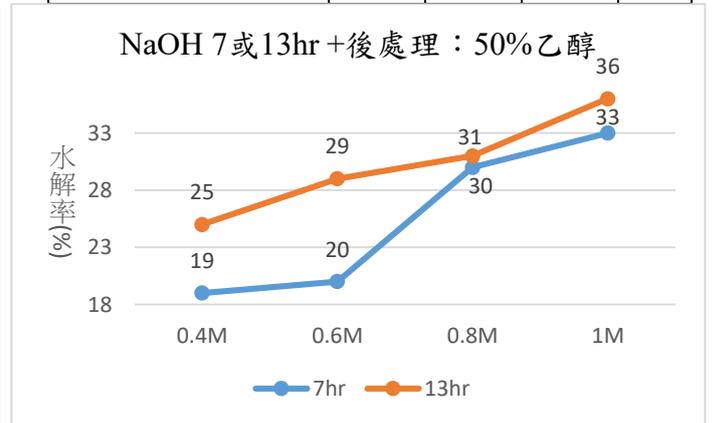
(1) NaOH 7 或 13hr + 後處理：水

NaOH 處理時間	0.4M	0.6M	0.8M	1M
7hr 水解率(%)	12	12	13	15
13hr 水解率(%)	13	9	14	24



(2) NaOH 7 或 13hr +後處理：50%乙醇

NaOH 處理時間	0.4M	0.6M	0.8M	1M
7hr 水解率(%)	19	20	30	33
13hr 水解率(%)	25	29	31	36



### 4.討論：

(1)由數據可知於氫氧化鈉中水解 7 或 13 小時，再於水中水解 20 小時，水解率可由原本 9%~15%上升至 12%~24%。

(2)氫氧化鈉中水解 7 或 13 小時，再於乙醇中水解 20 小時，水解率可由原本 9%~15%上升至 19%~36%，可再一步增加 PLA 水解率，且相對 PLA 僅以乙醇處理可提升約 30%，代表氫氧化鈉能使 PLA 初步分解，使其水解率提高。

### 實驗(四) PLA 於氫氧化鈉中加熱液化水解

1.目的：實驗高濃度氫氧化鈉溶液是否能有效提升 PLA 水解率作為良好燃料電池燃料

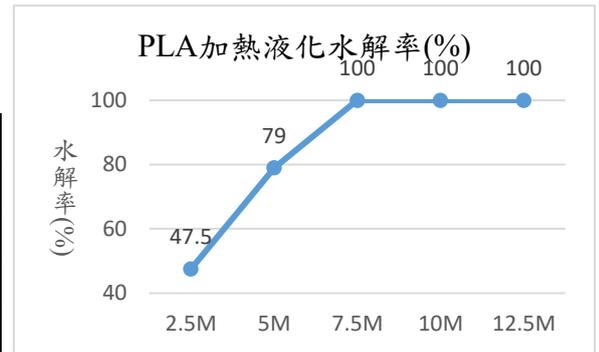
#### 2.實驗步驟：

- (1)將 2g PLA 與 10ml 水放入燒杯，分別加入 1~5g NaOH
- (2)放置加熱攪拌器加熱至 PLA 成液態(最多不超過 10 分鐘)
- (3)自熱攪拌器取下，加入 20ml 95%乙醇攪拌均勻

#### 3.實驗結果：

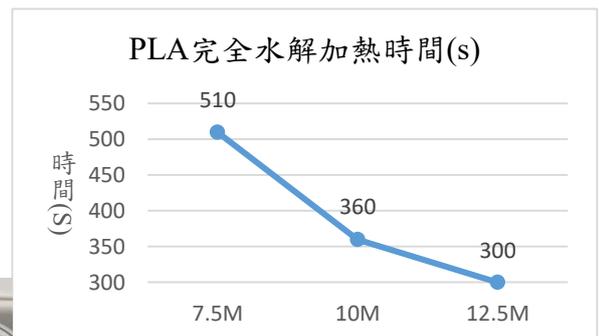
(1) 氫氧化鈉濃度與 PLA 水解率關係

加入 NaOH 質量(g)	1	2	3	4	5
氫氧化鈉濃度(M)	2.5	5	7.5	10	12.5
PLA 原重(g)	2	2	2	2	2
減少重(g)	0.95	1.58	2	2	2
水解率(%)	47.5	79	100	100	100



(2) 氫氧化鈉濃度與 PLA 完全水解時間關係

氫氧化鈉濃度	7.5M	10M	12.5M
加熱時間(s)	510	360	300



(3) PLA 加熱液化水解結果



←本圖為 2g PLA  
100% 水解之情形

#### 4.討論：

- (1)使用高濃度氫氧化鈉溶液能有效增加水解率，**氫氧化鈉 $\geq$ 7.5M 時 PLA 可被全部水解**，且溶解時間隨濃度增加而下降，有效達成水解並大幅縮短反應時間。
- (2)現今已知 PLA 主要仍以直接燃燒方式做使用後之處理，本實驗研究出此方法可有效分解 PLA，未來可作為 PLA 使用後之處理參考方式。

### 研究三、酸與金屬鹽類水溶液對 PLA 水解率的影響

#### 實驗(一) 磷酸與鹽酸濃度對水解率的影響

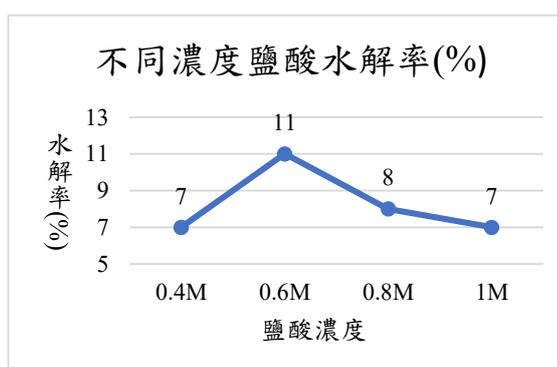
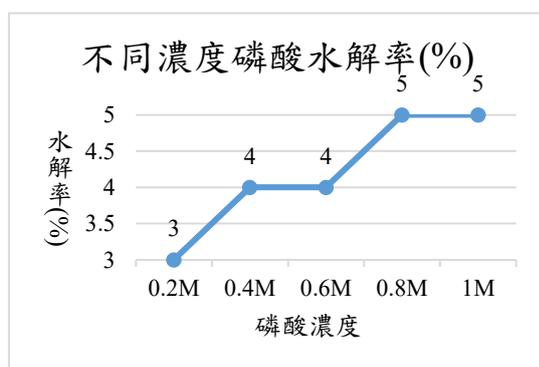
1.目的：磷酸與鹽酸濃度是否影響水解效率

2.實驗步驟：

- (1)以容量瓶分別配置 0.2M、0.4M、0.6M、0.8M、1.0M 的磷酸溶液，及 0.4M、0.6M、0.8M、1.0M 的鹽酸溶液，取出 40ml。
- (2)取 1g PLA 分別放入已配好的磷酸、鹽酸溶液。放入烘箱(調至 90 度)，40 小時後取出。
- (3)以濾紙過濾 PLA 水溶液並保存於試管中。
- (4)濾紙上之 PLA 以去離子水潤洗乾淨。
- (5)拿至烘箱中烘乾並秤重。
- (6)將乾燥之 PLA 放入夾鏈袋中保存。

3.實驗結果：

溶液種類	磷酸					鹽酸			
	0.2M	0.4M	0.6M	0.8M	1M	0.4M	0.6M	0.8M	1M
原重(g)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
乾重(g)	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.93	0.89	0.92	0.93
減少重(g)	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.11	0.08	0.07
水解率(%)	3	4	4	5	5	7	11	8	7



4.討論：

- (1)以酸性溶液分解 PLA，其中鹽酸水解率最高僅有 11%。磷酸中水解率最高僅有 5%。推測強酸可能相對弱酸有較好的水解效果。
- (2)PLA 水解率會隨著磷酸濃度增加而上升，鹽酸則維持 7%~11%，再提高濃度可能可以再增加水解效果，但因為其水解率不如氫氧化鈉，故後續實驗仍以氫氧化鈉水溶液作為主要水解溶液。

## 實驗二：不同濃度金屬鹽類對 PLA 水解率的影響

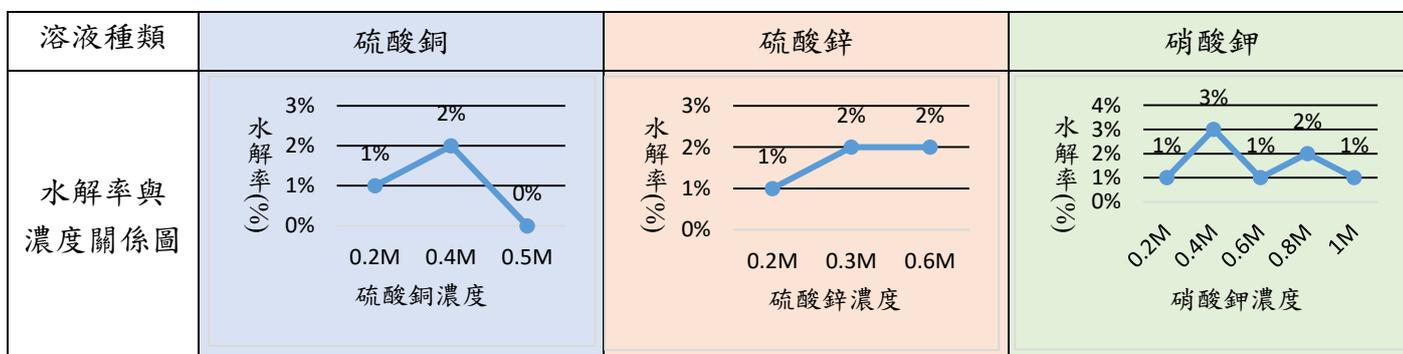
1.目的：觀察硫酸銅、硫酸鋅、硝酸鉀對 PLA 的水解效果

2.實驗步驟：

同實驗(一)之實驗步驟，配置指定濃度之硫酸銅、硫酸鋅、硝酸鉀水溶液，並將 PLA 置入。

3.實驗結果：

溶液種類	硫酸銅			硫酸鋅			硝酸鉀				
溶液濃度	0.2M	0.4M	0.5M	0.2M	0.3M	0.6M	0.2M	0.4M	0.6M	0.8M	1M
原重(g)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
減少質量(g)	0.01	0.02	0	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01
水解率(%)	1	2	0	1	2	2	1	3	1	2	1

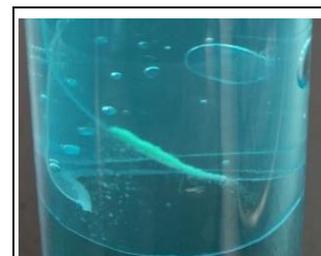


4.討論：

- (1)濃度 0.4M 的硫酸銅水解率最好，但其濃度與水解率並非呈現正相關。
- (2)硫酸銅水溶液對 PLA 水解率均低於 5%，推測**金屬銅離子可能對 PLA 水解幫助不大**。
- (3)硫酸鋅在濃度 0.3M 時水解率不再上升，推測濃度 0.3M 可能已達水解極限，且水解率只有 2%，推測**鋅離子對 PLA 直接水解幫助不大**。
- (4)硝酸鉀在濃度 0.4M 時，水解效果最佳，但硝酸鉀濃度與水解率並非呈現正相關。總觀而言硝酸鉀水溶液中 PLA 水解率均< 5%，推測**鉀離子對 PLA 直接水解幫助不大**。

5.發現：

在實驗過程中我們發現硫酸銅水溶液裡有**綠色沉澱物**，最初以為是 PLA 和硫酸銅的反應物，為了證明我們的想法，我們將 PLA 放入飽和硫酸銅，也有發現綠色沉澱物。接著將濃度 88% 乳酸與飽和硫酸銅等比例混合，也有發現綠色沉澱。最後將飽和硫酸銅單獨放入烘箱，也有發現綠色沉澱物。因此我們推斷綠色沉澱物不是 PLA 和硫酸銅的反應物，而是**銅在高溫下的氧化物**。



銅在高溫下的氧化物

## 研究四、日光與 UV 光對 PLA 分解程度的影響

### 實驗(一)：照射日光與 UV 光時長對 PLA 分解效果

1. 目的：觀察直接照射日光與 UV 光對 PLA 分解有無幫助

#### 2. 實驗步驟：

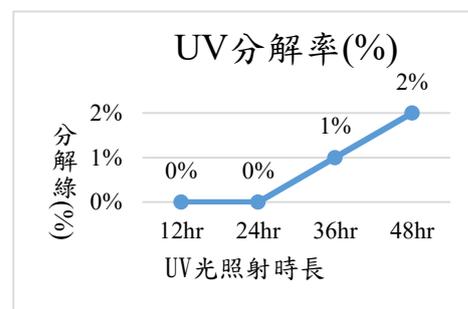
- (1)取 1g PLA 分別放於日光下照射日光或於 210.5nm UV 燈箱中照射 UV 光 12hr、24hr、36hr、48hr。
- (2)將 PLA 取回後秤重。
- (3)將剩餘 PLA 放入夾鏈袋中保存。

#### 3. 實驗結果：

日光照射時間		12hr	24hr	36hr	48hr
原重(g)	日光	1	1	1	1
	UV	1	1	1	1
照射後重(g)	日光	1	1	1	1
	UV	1	1	0.99	0.98
分解率(%)	日光	0	0	0	0
	UV	0	0	1	2

(1)照射後重：以 UV 光照射後直接取出秤得之重量

$$(2) \text{分解率} = \frac{\text{照射後重}}{\text{原重}} \times 100\%$$



#### 4. 討論：

- (1)以重量和外觀而言，PLA 經日光照射 48 小時內都沒有明顯變化
- (2)在顯微鏡下觀察時，只有 48hr 的 PLA 表面結構有小裂痕，推測日光對 PLA 分解可能有一點點影響。
- (3)以重量和外觀而言，PLA 經照 UV 光後，雖然隨時間增加 PLA 質量有十分微量的下降，外觀亦無明顯變化，但以鑷子取出 PLA 時可感受到 **PLA 會因為施力過度而脆裂**，可推測 PLA 表面結構已有被破壞。

#### 5. 問題：

由於 UV 光照射後的 PLA 重量和外觀沒有直接明顯改變，但在結構上可能有變化，因此後續實驗將以 **PLA 照 UV 光進行前處理後，再進行水解**，以提升 PLA 水解效果。

## 實驗(二) PLA 以 UV 光照射前處理後於水、乙醇中水解

1 目的：先照射 UV 光使 PLA 表面結構被破壞，提高乙醇中 PLA 水解率。

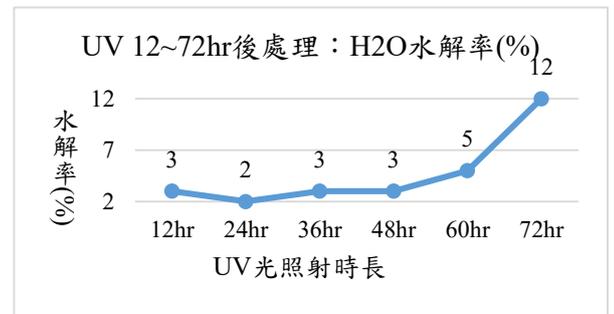
### 2 實驗步驟：

- (1)取出 1g PLA 放入 UV 燈箱中分別照射 12hr、24hr、36hr、48hr
- (2)取出後秤量 PLA 重量
- (3)放入裝有 40mL 水、乙醇的試管中進行水解
- (4)將裝有 PLA 的乙醇溶液試管放入烘箱，調整為 90 度、20 小時。
- (5)以濾紙過濾 PLA 水溶液並保存於試管中。
- (6)濾紙上之 PLA 以去離子水中潤洗乾淨。
- (7)拿至烘箱中烘乾並秤重。
- (8)將乾燥之 PLA 放入夾鏈袋中保存。

### 3.實驗數據：

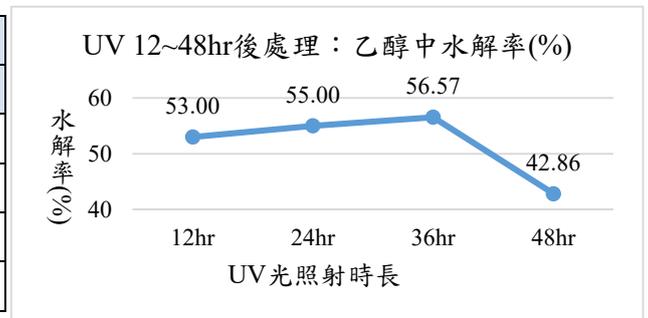
#### (1)UV 12~72hr 後處理：水

UV 光照射時間	12hr	24hr	36hr	48hr	60hr	72hr
水解時間	20hr					
原重(g)	1	1	1	1	1	1
後處理：水乾重(g)	0.97	0.98	0.97	0.97	0.95	0.88
減少重(g)	0.03	0.02	0.03	0.03	0.05	0.12
水解率(%)	3	2	3	3	5	12



#### (2) UV 12~48hr 後處理：乙醇

UV 光照射時間	12hr	24hr	36hr	48hr
乙醇中水解時間	20hr			
原重(g)	1	1	0.99	0.98
後處理：乙醇乾重(g)	0.47	0.45	0.43	0.56
減少重(g)	0.53	0.55	0.56	0.42
水解率(%)	53	55	56.57	42.86



### 4.討論：

- (1) PLA 照射 UV 光後以乙醇水解，其水解率可達 55% 以上，比原本僅用乙醇水解(3%)大幅提升水解率。
- (2)照射 UV 時長 36 小時內 PLA 水解率呈線性上升，但在照射 48 小時後卻有些微下降。
- (3)照射 UV 光後以水作水解溶液，隨 UV 光照射時間水解率漸增，最高可達 12%。照射 UV 光後以乙醇作水解溶液，UV 光照射 12~36 小時隨時間水解率增加，但於照射 48 小時後水解率有下降趨勢。

### 5.問題：

照射 UV 光後以水作水解溶液，水解率並不是非常理想。因此未來將以乙醇作水解溶液。乙醇水解的水解率在 48hr 時下降，所以不再繼續探討 60hr 和 70hr。

## 研究五：PLA 水解後各項性質探討

### 實驗一：PLA 水解後粉碎力度探討

1.目的：探討水解後 PLA 可承受的壓力

2.實驗步驟：

- (1)將水解後之 PLA 放至電子秤
- (2)用鑷子輕壓水解後之 PLA
- (3)觀察 PLA 受力至出現裂痕時公克數

3.實驗結果：

(1)不同溫度下粉碎力度

	水	乙醇 95%	乙醇 50%	膠水	甘油	汽水	NaOH 1M	NaOH 0.5M
常溫	有彈性	有彈性	有彈性	有彈性	太硬	有彈性	已粉碎	105g
50°C	有彈性	有彈性**	有彈性	有彈性*	太硬	有彈性*	有彈性	已粉碎
70°C	有彈性	有彈性	有彈性	有彈性	太硬	235g	30g	60g
90°C	4g	有彈性	70g	815g	有彈性	175g	8g	已粉碎

\*以鑷子反摺後即斷裂

\*\*以鑷子反摺 3 次後斷裂

a.有彈性：施力於 PLA 時，PLA 可彎曲。在電子秤能承受最大克數 (2100g)內不會斷裂。

b.太硬：施力於 PLA 時，PLA 不可彎曲。在電子秤能承受最大克數 (2100g)內不會斷裂。

c.已粉碎：PLA 已完全碎成極小片段，不須再施加力量

(2)不同酸鹼水溶液下 PLA 粉碎力度

水解溶液	0.2M	0.4M	0.6M	0.8M	1M
磷酸(g)	24	15	7	5	2
NaOH(g)	已粉碎				

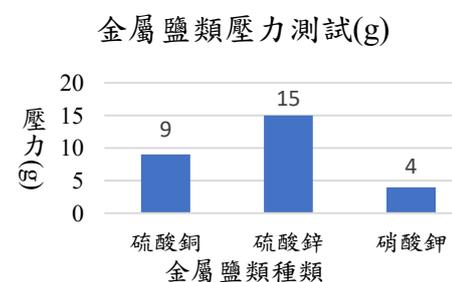
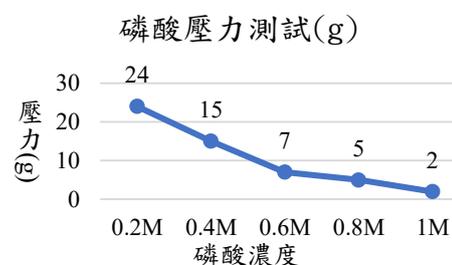
水解溶液	0.4M	0.6M	0.8M	1M
鹽酸(g)	5	3	2	1

(3)照射 UV 光後 PLA 粉碎力度

照光時長	12hr	24 hr	36 hr	48 hr
日光	有彈性	有彈性	有彈性	有彈性
UV 光(g)	有彈性	有彈性	43	37

(4)0.2M 金屬鹽類水溶液下 PLA 粉碎力度

金屬鹽類	硫酸銅	硫酸鋅	硝酸鉀
粉碎力(g)	9	15	4



#### 4.討論：

- (1)水解溫度越高，水解後 PLA 較易被折斷，結構上能承受的力度較低，代表對 PLA 結構均有更強的破壞力。
- (2)膠水、甘油、汽水等溶液水解後 PLA 依然很有彈性，推測其結構上並沒有受到明顯的破壞。
- (3)酸、鹼溶液對 PLA 的結構破壞十分顯著，磷酸不須很大外力即可碎裂，且隨著濃度提升，粉碎力度逐漸下降。氫氧化鈉溶液則是不需施加任何外力直接粉碎成粉末。

#### 實驗二：PLA 水解後表面結構觀察

1.目的：觀察 PLA 水解後表面結構差異

2.實驗步驟：

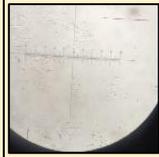
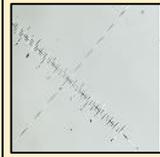
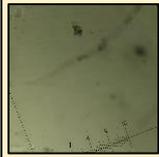
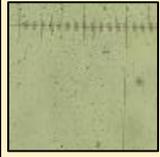
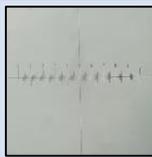
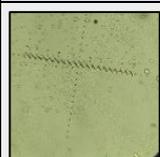
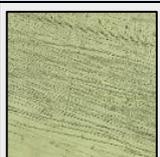
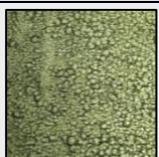
- (1)將水解後之 PLA 取出
- (2)以肉眼觀察表面狀態差異
- (2)剪下 1cm×1cm 大小 PLA 做成標本並用顯微鏡(100X)觀察表面結構。
- (3)將剩餘 PLA 放入夾鏈袋中保存。

#### 3.實驗結果

(1)PLA 初始表面狀態、結構



(2)溫度和不同溶液對 PLA 表面結構的影響

溶液	水	50%乙醇	95%乙醇	甘油	汽水	膠水	0.5M NaOH	1M NaOH
常溫								
	較不透光	有小裂痕	較不透光	有小裂痕	有小黑點	有小黑點	較不透光	完全水解
50°C								
	較不透光	較不透光	較不透光	較不透光	較不透光	較不透光	有大裂痕	有細裂痕
70°C								

	有小黑點	較不透光	很多黑點	較不透光	有小黑點	大量細痕	茂密黑點	有小黑點
90								
	很多黑點	很多黑點	明顯裂痕	很多黑點	有小黑點	很多黑點	明顯裂痕	凹凸不平

### (3) 酸鹼溶液對 PLA 表面結構的影響

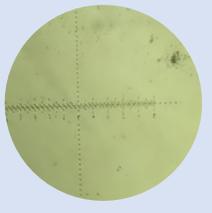
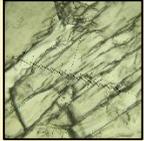
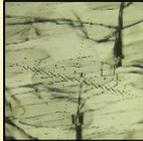
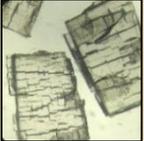
濃度	0.2M	0.4M	0.6M	0.8M	1M
磷酸外觀變化 (直接觀察)					
磷酸外觀描述	水解後呈扭曲狀、透明度下降				
NaOH 外觀變化 (直接觀察)					
NaOH 外觀描述	水解後成粉狀、透明度下降、質量明顯下降				

### (4) 日光對 PLA 表面結構的影響

日光照射時長	12hr	24hr	36hr	48hr
照射日光後外觀狀態				
外型描述	外觀上均無明顯變化			
照射日光後顯微鏡下觀察結果				
觀察描述	光滑	光滑	光滑	有小裂痕

### (5) UV 光對 PLA 表面結構的影響

前處理	UV 12hr	UV 24hr	UV 36hr	UV 48hr
照射 UV 光後外觀狀態				
外型描述	外觀上均無明顯變化			

照射 UV 光後 顯微鏡下觀察 結果				
觀察描述	光滑	有裂痕	有裂痕	明顯裂痕
水解條件	50%乙醇、90°C、20hr			
乙醇水解後外 觀狀態				
外型描述	表面並無裂痕	表面有清楚裂痕	表面有細微裂痕	表面有清楚裂痕
乙醇水解後顯 微鏡下觀察結 果				
觀察描述	有長裂痕 透光度佳	整片都是裂痕 透光度差	有多處裂痕 半透光	分解成小塊、整 片都是裂痕、半 透光

#### (6)金屬鹽類溶液對 PLA 表面結構的影響

金屬鹽類種類	硫酸銅	硫酸鋅	硝酸鉀
表面結構變化 (顯微鏡觀察)			
外觀變化 (直接觀察)			
外觀描述	長條狀/不透明	長條狀/向內彎曲	長條狀/不透明

#### 4.討論

- (1)水解過的 PLA 表面結構透光度明顯下降。
- (2)顯微鏡下觀察可以看到小黑點或黑條紋，推測是 PLA 表面結構被破壞，讓此區塊透光度大幅降低，形成小黑點。
- (3)氫氧化鈉對 PLA 有比較強的破壞力，在顯微鏡下觀察已可看出明顯裂痕，或直接粉碎成粉末。
- (4)顯微鏡下觀察時，發現隨著照射 UV 時間增加開始有**明顯裂痕**出現，推測 UV 光可能讓 PLA 結構改變。

### 實驗三：PLA 水解後水溶液之酸鹼度、導電度、粒子數探討

1.目的：了解 PLA 水解後水溶液酸鹼度、導電度、粒子數

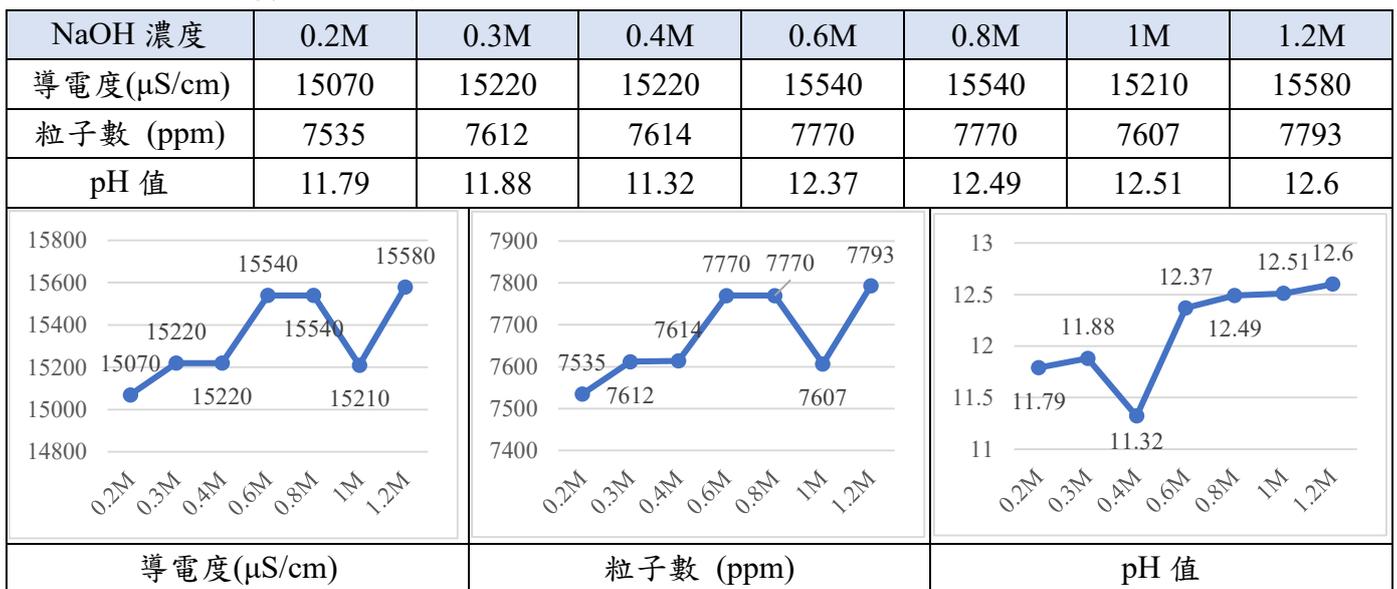
2.實驗步驟：

- (1)將 PLA 水解後，濾掉 PLA 後，將剩餘 PLA 水解水溶液倒入燒杯中。
- (2)以水質檢測計測量導電度與粒子數、pH 計測量 pH 值，並記錄結果。

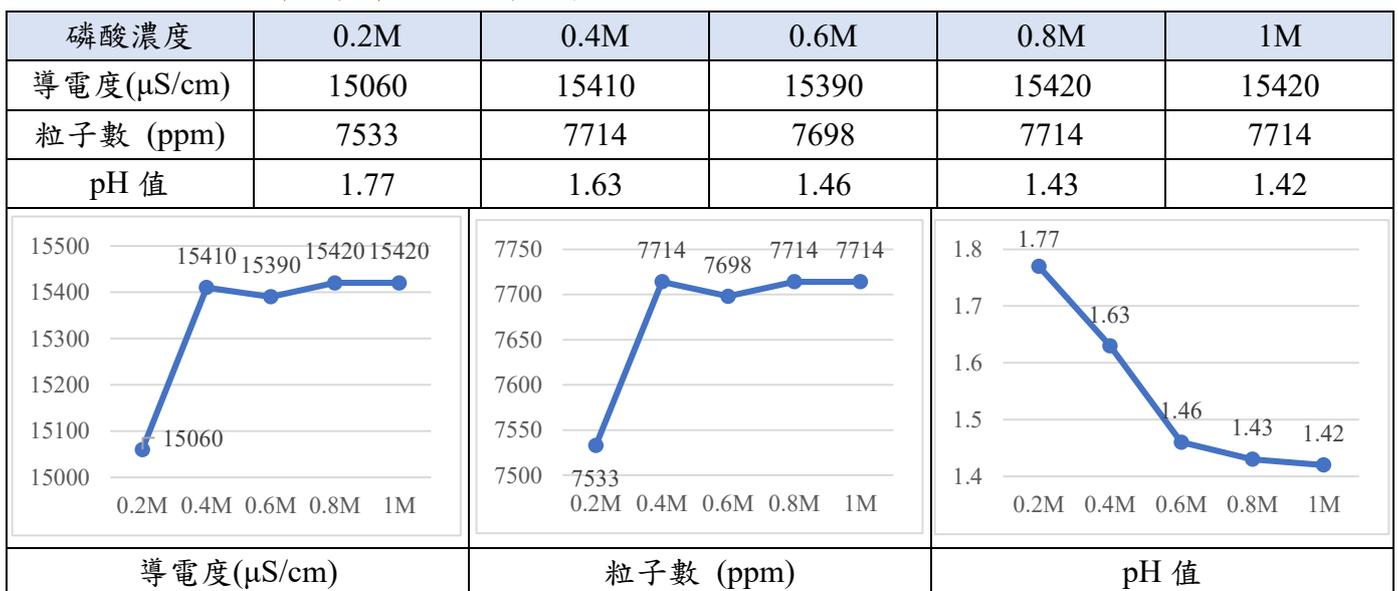
3.實驗結果：

(1)酸、鹼溶液水解 PLA

a.氫氧化鈉水解 PLA 之水溶液

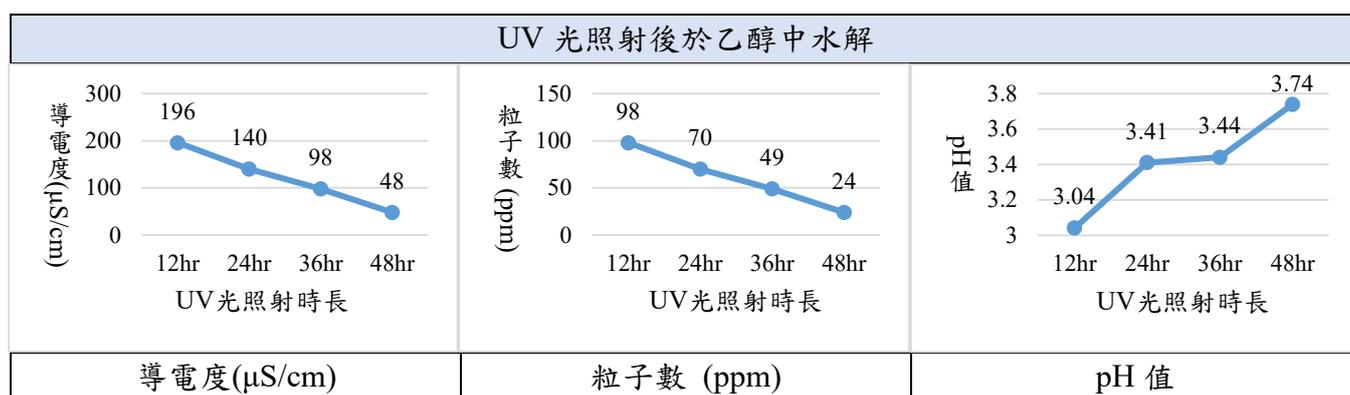


b.磷酸水解 PLA 之水溶液



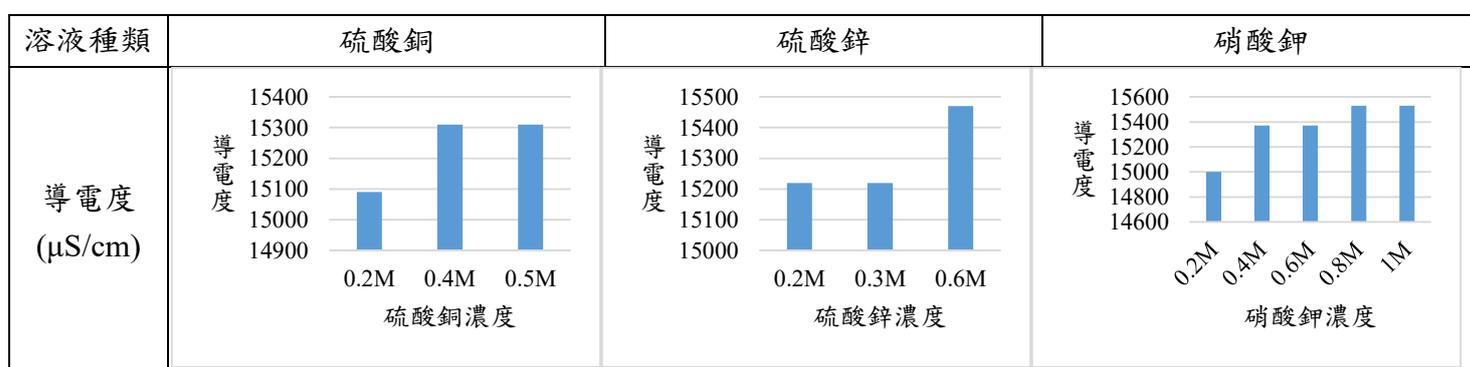
### (2)UV 光解 PLA

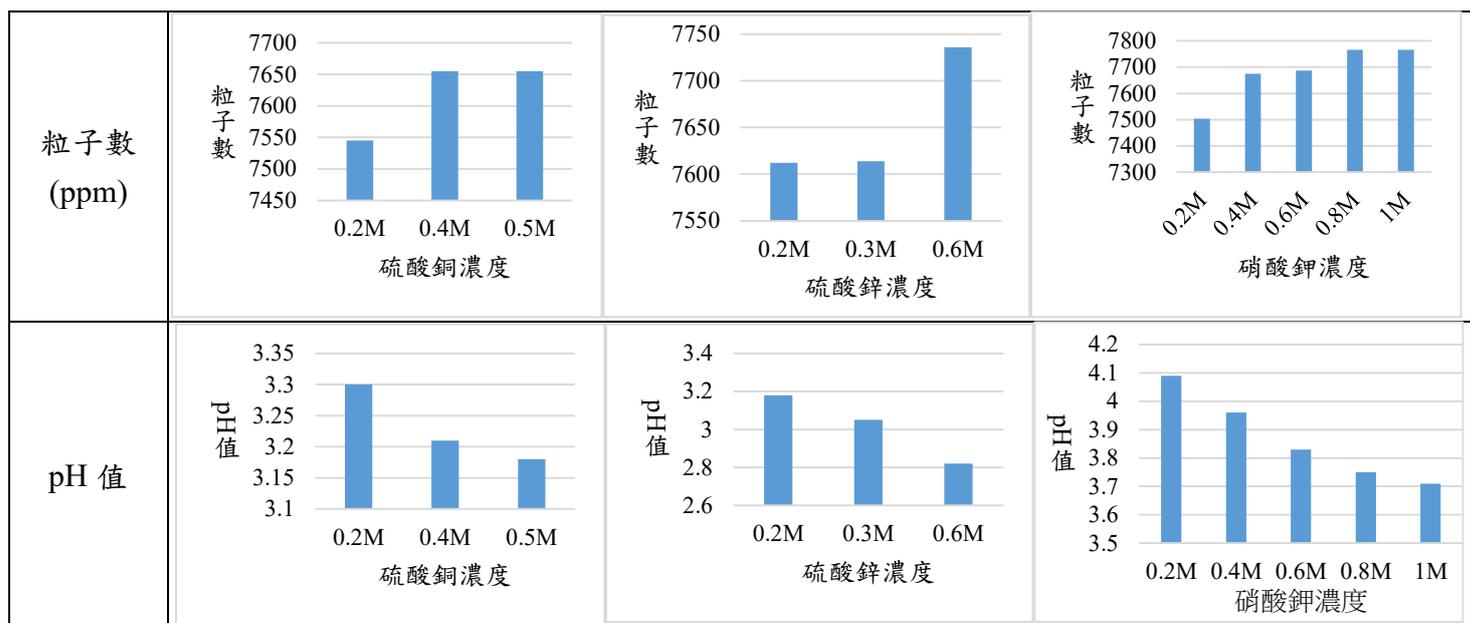
前處理	UV 12hr	UV 24hr	UV 36hr	UV 48hr
水解條件	50%乙醇、90°C、20hr			
導電度(μS/cm)	196	140	98	48
粒子數 (ppm)	98	70	49	24
pH 值	3.04	3.41	3.44	3.74



### (3)金屬鹽類溶液水解 PLA

溶液種類	硫酸銅			硫酸鋅			硝酸鉀				
	0.2M	0.4M	0.5M	0.2M	0.3M	0.6M	0.2M	0.4M	0.6M	0.8M	1M
導電度 (μS/cm)	15090	15310	15310	15220	15220	15470	15000	15370	15370	15530	15530
粒子數 (ppm)	7545	7655	7655	7612	7614	7736	7503	7675	7687	7767	7767
pH 值	3.3	3.21	3.18	3.18	3.05	2.82	4.09	3.96	3.83	3.75	3.71





#### 4. 討論：

- (1)以氫氧化鈉水解 PLA，水解後溶液 pH 值隨濃度增加而上升，因溶液中可能有微量乳酸所以 pH 仍較原本的氫氧化鈉低。其中 0.4M NaOH 水解溶液 pH 值較低，推測 0.4M NaOH 水解率較高，分解後的乳酸影響 pH 值。
- (2)磷酸水解 PLA 後水溶液 pH 值隨著濃度越高而降低，主要仍為磷酸本身濃度影響，較無法判斷是否受水解之乳酸而變化。
- (3)酸鹼及鹽類溶液水解 PLA 後導電度及粒子數隨著濃度增加而逐漸增加，主因仍為溶液本身濃度影響，較難由此判斷 PLA 分解出的分子數量。
- (4)水解後乙醇水溶液 pH 值約在 3~4 之間，和原本乙醇相比已明顯下降，代表溶液中的確有水解後之小分子乳酸。
- (5)以 UV 光照射後水解溶液之電導度和粒子數均隨 UV 光照射時間而減少，pH 值則隨 UV 光照射時間而增加。
- (6)實驗中之金屬鹽類溶液原本為接近中性，但在水解 PLA 後接近 pH=3，推斷為溶液中水解出乳酸的緣故。且隨濃度增加 pH 逐漸下降，與水解率的數據吻合(濃度越高水解率越大)。

#### 5. 問題：

- (1)原本假設水解率增加代表可能是 PLA 分解成小分子溶於水溶液中，於是採用水質檢測計希望量測其粒子數，由於水質檢測計是由電導度推算粒子數，所以僅能得知水中已解離成離子的數量多寡，無法真實得知粒子數。
- (2) pH 計測得的 pH 值和粒子數呈現負相關，由於水解水溶液之 H<sup>+</sup> 主要由可

解離之乳酸小分子提供，當能解離的粒子數越少，水溶液中能提供之  $H^+$  越少，pH 值則隨之上升。

- (3)由水解率和粒子數的結果發現，水解後水溶液中除了相對較易解離的**乳酸單體**，同時猜測可能也有一些可溶於水但解離度較低的**寡聚物(2~6 個乳酸聚合)**。因此水解率會增加，但卻無法由水質檢測計測出粒子數。

## 研究六、自製燃料電池

### 實驗(一)：利用不同電極製備乳酸燃料電池

1.目的：實驗不同電極對乳酸燃料電池電壓的影響

2.實驗步驟：

- (1)取兩隻 25ml 空針筒，用塑膠軟管將兩隻針筒尖端處連接
- (2)取 **0.7M 氫氧化鈉作為電解液**，緩慢填入針筒中(若有氣泡於管內需用手指將塑膠軟管中的空氣彈出)
- (3)取兩隻 5ml 針筒，將棉花分別塞住針筒尖端處，放入 25 ml 空針筒內
- (4)其中一側加入 5ml 市售乳酸(88%)，另一側加入 5ml 的去離子水
- (5)將**電極**分別置入 5ml 針筒中

電極種類：1. 碳棒 2. 活化碳棒 (將碳棒以高溫火焰燒烤使其活化)  
3. 碳織布 4. 碳棒+碳織布 (將碳織布包裹在碳棒外層)  
5. 銅線 6. 鍍 Pt 的 Ni-Cr 絲

在 Ni-Cr 絲上鍍 Pt 實驗步驟：

1. 取 20cm 長之 Ni-Cr 絲。
2. 以竹筷捲成螺旋狀，並保留 6~10cm(連接電極)。
- 3.將 Ni-Cr 絲與碳棒放入 25ml 1M 硫酸中，接上電源供應器(Ni-Cr 絲連接正極、碳棒連接負極)，並通電 0.2A 10 秒。
- 4.取六氯鉑酸 0.08g 溶於 20ml 1M 鹽酸中。
- 5.將清洗好之電極放入 Pt/HCl 中，接上電源供應器(Ni-Cr 絲連接負極、碳棒連接正極)，並通電 0.02A 30 分鐘。
- 6.取出鍍完 Pt 的 Ni-Cr 絲，並放入 1M 硫酸 30 秒。
- 7.洗淨後放入去離子水保存。

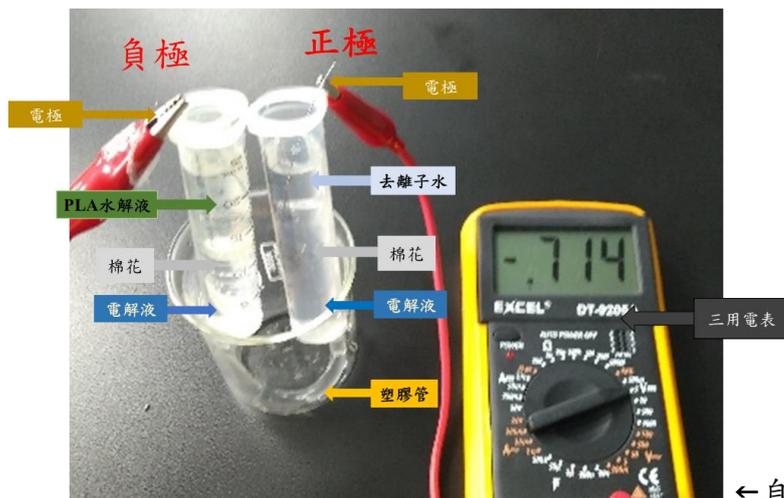


Pt 電極

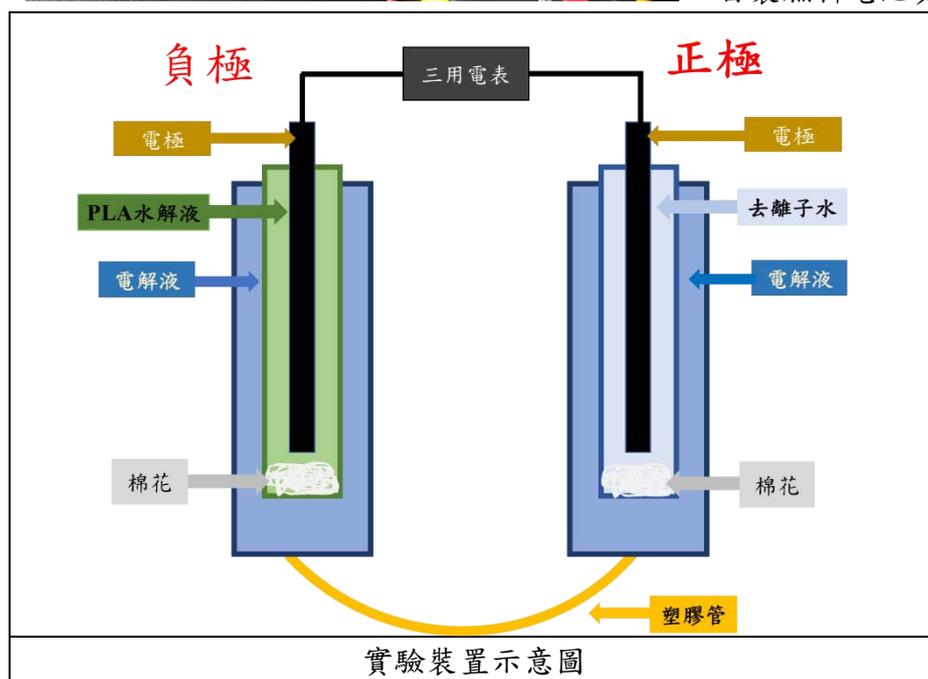


Ni-Cr 絲上鍍 Pt 裝置

- (6)將鱷魚夾連接電極與三用電表
- (7)將三用電表調至 2V 電壓檔位，量測其電壓值。

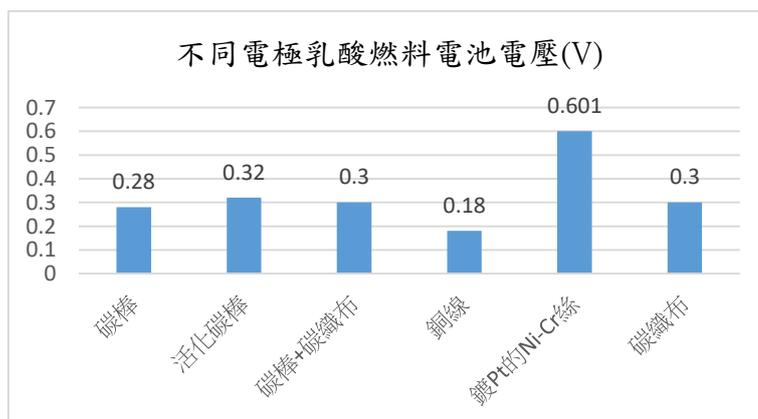


←自製燃料電池實驗裝置



### 3.實驗結果：

電極種類	電壓值(V)
碳棒	0.28
活化碳棒	0.32
碳織布	0.30
碳棒+碳織布	0.30
銅線	0.18
鍍Pt的Ni-Cr絲	0.60



### 4.討論：

(1)由結果可知碳棒電極電壓為 0.28V，活化後可上升至 0.32V。但效果均較

市售之碳織布差，接著便思考在碳棒外包裹碳織布是否能更提升電壓，但結果卻與碳織布的 0.3V 相同，並沒有再提升電壓值。推測可能是因為碳織布包裹碳棒時主要仍是利用碳織布來傳導，並沒有加成效果。

(2)銅線電極的電壓為 0.18V 相較其他電極來說較不理想，可能因為金屬銅對乳酸釋出電子較無幫助，因此考慮使用其他電極來代替。

(3)鍍 Pt 的 Ni-Cr 絲是測試過的所有電極當中最好的，電壓值 0.6V 以接近乳酸燃料電池理論電壓 0.89V，因此決定之後**使用鍍 Pt 的 Ni-Cr 絲當作燃料電池的電極**，並後續考慮使用其他方法來增加電壓。

### 實驗(二)：利用不同電解液製備燃料電池

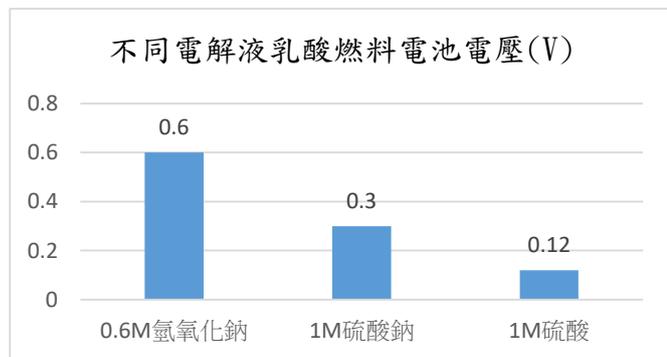
1.目的：實驗電解液對乳酸燃料電池電壓的影響

2.實驗步驟：

按實驗(一)之實驗步驟自製電池，以鍍 Pt 的 Ni-Cr 絲為電極，將電解液置換成硫酸與硫酸鈉。

3.實驗結果：

電解液	電壓值(V)
0.6M 氫氧化鈉	0.60
1M 硫酸鈉	0.30
1M 硫酸	0.12



4.討論：

(1)根據文獻得知燃料電池電解液以 0.6M~0.7M 氫氧化鈉溶液為佳。由結果可知 0.6M 氫氧化鈉溶液的導電度 > 其餘兩種液體，因此決定之後**使 0.6M 氫氧化鈉溶液當電解液**。同時 PLA 水解亦以氫氧化鈉為主要水解溶液可考慮**直接將 PLA 置入電解液中**，方便電池操作。

(2)1M 硫酸鈉溶液與 1M 硫酸溶液作為電解液時電壓值較不理想，因此決定之後不使用此溶液作為燃料電池之電解液。

### 實驗(三)：使用水解之 PLA 溶液作為電池燃料

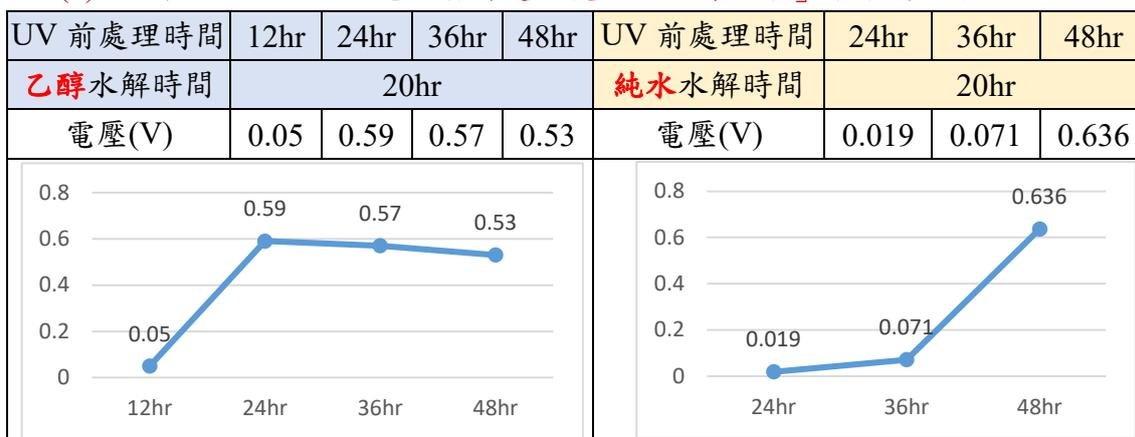
1.目的：將水解之 PLA 溶液作為燃料電池之燃料

2.實驗步驟：

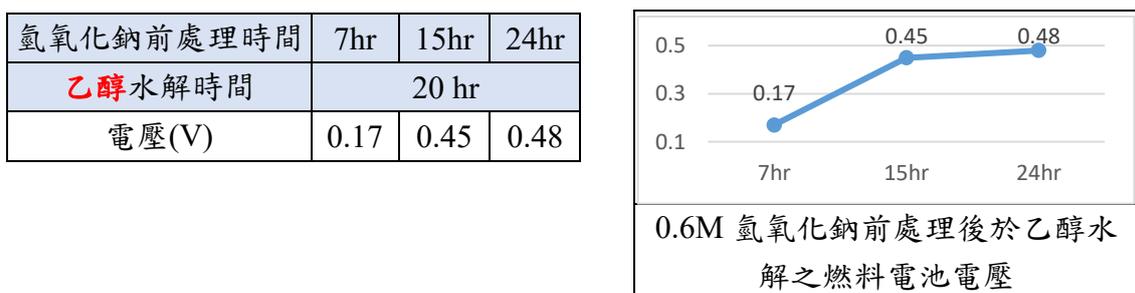
按實驗(一)之實驗步驟自製電池，以鍍 Pt 的 Ni-Cr 絲為電極，以 0.6M 氫氧化鈉為電解液，並將燃料置換成 PLA 水解溶液。

### 3.實驗結果：

#### (1) 燃料：PLA 以 UV 光照射前處理後於「乙醇、水」中水解溶液



#### (2) 燃料：PLA 以 0.6M 氫氧化鈉前處理後於「乙醇」中水解溶液



### 4.討論：

- (1) UV 光照射與氫氧化鈉前處理時間越久，由研究六可知接著在乙醇水解時有較好的水解率。PLA 溶液水解率越高，作為電池燃料時電壓越高。
- (2) 水解率和溶液中可成為燃料的乳酸單體或其寡聚物的量呈正相關，可簡單由水解率推斷溶液是否能成為較佳的電池燃料。

### 5.問題：

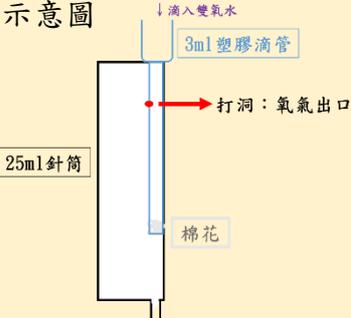
根據文獻推算乳酸燃料電池之理論電壓為 0.89V，目前 PLA 水解溶液電池的電壓最高僅能達到 0.6 左右，因此思考是否能更提高燃料電池的電壓。其中陰極的氧氣部分現階段由去離子水提供，氧氣濃度較低，將於後續實驗設計氧氣供應裝置，以提升氧氣濃度。

#### 實驗(四)：增加氧氣供應裝置提升燃料電池電壓

1.目的：實驗在燃料電池負極加氧氣是否會提升電壓。

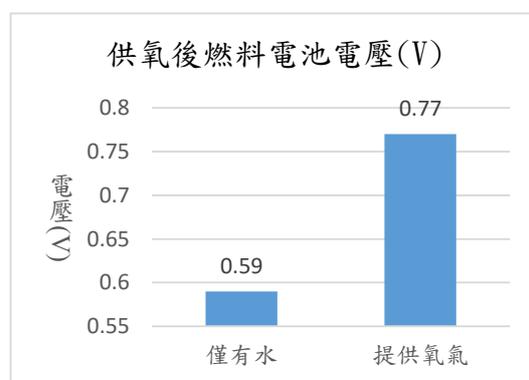
#### 2.實驗步驟：

按實驗(一)之實驗步驟自製電池，以鍍 Pt 的 Ni-Cr 絲為電極，以 0.6M 氫氧化鈉為電解液，UV 光照射前處理 PLA 水解溶液為燃料。並於陰極增加氧氣供應裝置。

<p>自製氧氣供應裝置步驟：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.取一隻 3ml 塑膠滴管剪除頭尾</li> <li>2.於 2ml 處打一小洞，以利氧氣釋出</li> <li>3.將 3ml 塑膠滴管黏至 25ml 針筒內壁</li> <li>4.於塑膠滴管中塞入棉花並加入適量二氧化錳</li> <li>5.使用時逐漸滴入雙氧水，使其產生氧氣</li> </ol>	<p>實驗裝置</p> 	<p>示意圖</p> 
---	---	--

### 3.實驗結果：

陰極狀態	僅有水	提供氧氣
電壓(V)	0.59	0.77



### 4.討論：

自製燃料電池的陰極提供氧氣後能有效提升電壓值。

### 實驗(五)：以熱熔法完全水解 PLA 作為燃料

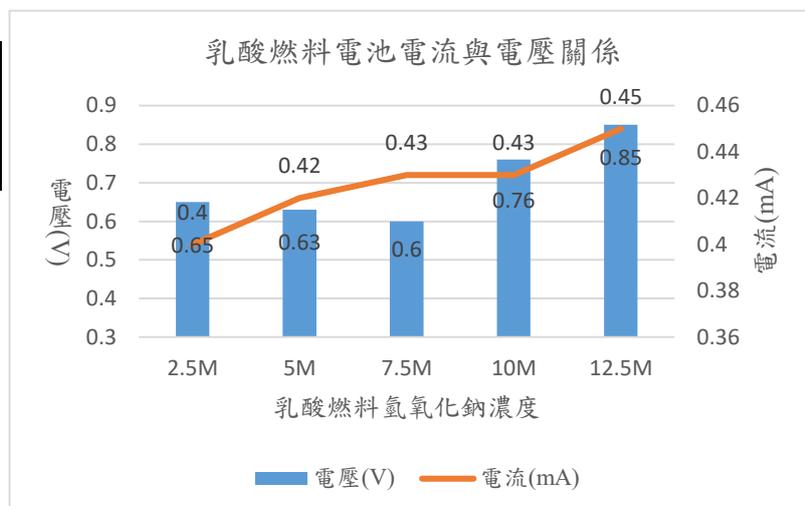
1.目的：提高乳酸燃料電池燃料中乳酸濃度，以達到最佳電壓與電流

### 2.實驗步驟：

按實驗(一)之實驗步驟自製電池，將燃料替換成熱熔法之 PLA 水溶液。

### 3.實驗結果：

氫氧化鈉濃度(M)	2.5	5	7.5	10	12.5
電壓(V)	0.65	0.63	0.6	0.76	0.85
電流(mA)	0.4	0.42	0.43	0.43	0.45



### 4.討論：

(1)使用熱熔法完全溶解 PLA 後，可使燃料電池中乳酸濃度提高，將電壓由原本 0.77V 再提升至 0.85V。

(2)燃料電池中乳酸濃度提高，可加快電池之反應速率，提升電池電流，達到較高之電池功效。

### 5.問題：

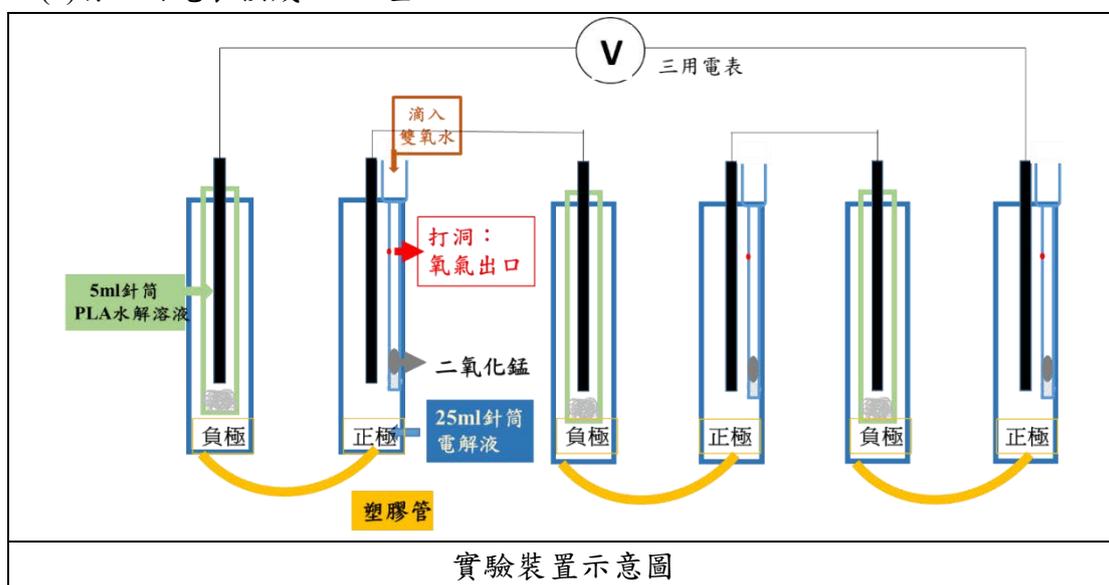
由於單一組燃料電池電壓不足以使一個 LED 燈發光，因此後續實驗中將串、並聯多組燃料電池以增加 LED 燈亮起的機率。

### 實驗(六)：串、並聯自製燃料電池

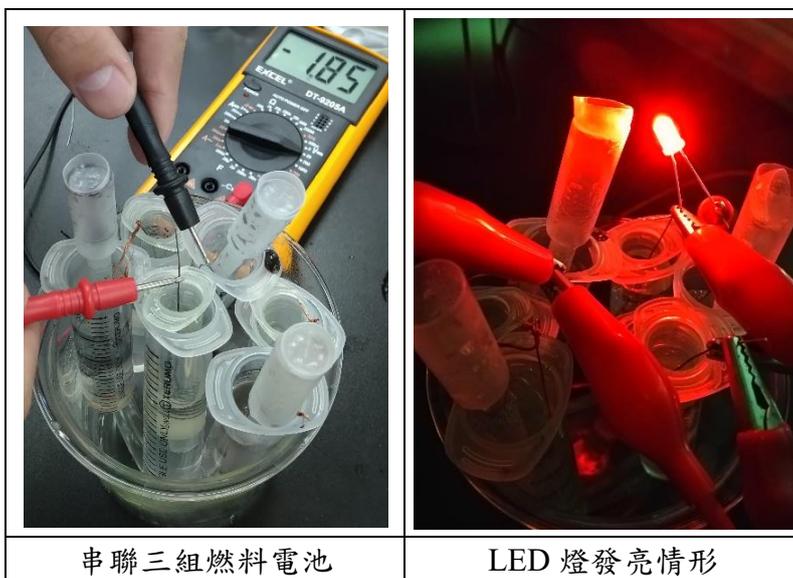
1.目的：串、並聯自製燃料電池使 LED 燈發亮

2.實驗步驟：

- (1)按實驗(四)之實驗步驟自製六組燃料電池
- (2)使用銅線將三組燃料電池串聯，並兩兩並聯
- (3)將鱷魚夾夾至首尾末端之正負極上，並夾至三用電表上的兩極  
(裝有 5ml 的水解之 PLA 溶液接至負極，裝有 5ml 的水接至正極)
- (4)將三用電表調至 20V 電壓檔位，量測並記錄電壓。
- (5)將三用電表換成 LED 燈。



3.實驗結果：



#### 4.討論：

三組自製燃料電池串聯電壓最高可到 1.85V，且可讓 LED 燈泡亮起。

#### 5.問題：

- (1)單一組電池提供氧氣後可達 0.7V，照理說串連三組應該可達 2V，但由於串聯過程中可能有電阻產生，因此電壓無法達到 2V
- (2)此組自製燃料電池電壓最高可到 1.85V，且可持續 10 分鐘左右，但由於其電流量還是太小，之後可以利用其他方式加速反應使其更加完備。

### 伍、討論

- 一、PLA 水解率會隨溫度增加而上升。
- 二、PLA 水解溶液中以氫氧化鈉水解率明顯較高，氫氧化鈉濃度 $< 0.4M$ 時濃度增加有助提升其水解率， $> 0.4M$ 後濃度增加對水解率的幫助並不顯著。後續使用高濃度之鹼液提升 PLA 周圍之氫氧化鈉濃度，可使其完全水解。以時間而言超過 20 小時 PLA 開始逐漸被分解成較小分子。
- 四、日光中有紫外線，可對 PLA 進行表面結構破壞，為縮短實驗時間增加破壞強度，以 UV 光直接進行照射，PLA 從顯微鏡中已可觀察出明顯的改變。
- 五、金屬離子(銅、鋅、鉀)對 PLA 水解較無明顯助益。
- 六、PLA 直接置入乙醇中水解率都不高，但先經適當前處理(氫氧化鈉、UV 光)後可有良好的水解效果，水解後乙醇水溶液 pH 值約在 3~4 之間，代表的確有小分子乳酸被分解出。
- 七、PLA 分解之水溶液中應該有乳酸單體，及其寡聚物(2~6 個乳酸聚合)，故水質檢測計僅能得知水中離子數量多寡，無法真實得知粒子數。
- 八、pH 值和粒子數呈現負相關，溶液中可解離之乳酸小分子越少，酸性越低，pH 值越高。
- 九、PLA 水解燃料電池中，電極採鎳鉻絲鍍鉑，電解液為 0.6M 氫氧化鈉溶液，於陰極通入氧氣後效果最佳。
- 十、可串、並聯多組 PLA 水解燃料電池使電壓、電流上升，助於未來應用。

### 陸、結論

- 一、本實驗為自製 PLA 水解之燃料電池，利用 PLA 水解成小分子乳酸，進一步作為燃料電池之燃料
- 二、PLA 雖為生物可分解性塑膠，但現今實際仍以燃燒方式處理，本實驗找出可完全水解 PLA 之可行方法，期望能達成資源循環再利用。
- 三、水解部分：

1. 0.4M 氫氧化鈉溶液於 90 °C、7 小時，接著放入 95%乙醇中 20 小時，水解率可達 33%。
2. 以熱熔法提高氫氧化鈉濃度至 7.5M，PLA 水解率可達 100%完全水解。

#### 四、UV 光照射部分：

將 PLA 放入 UV 燈箱照射 36 小時，接著放入 95%乙醇中水解 20 小時，水解率可達 56.6%。

#### 五、自製燃料電池：

##### 1. 最佳化電池條件：

- (1) 電極：鎳鉻絲鍍鉑
- (2) 電解液：0.7M 氫氧化鈉溶液
- (3) 燃料：熱熔法水解之 PLA 溶液
- (4) 負極：自製氧氣供應裝置

##### 2. 結果：電池電壓 0.85V

### 柒、未來展望

- 一、PLA 水解後之碎片可利用光度計測量其透光度值，更進一步了解其結構破壞情形。
- 二、PLA 水解後溶液內乳酸及其寡聚物含量可透過旋光度計進一步了解。
- 三、自製燃料電池的反應速率能可透過其他催化劑或加入質子交換膜提升，期望能再進一步提升其電壓或電流。
- 四、乳酸燃料電池水解溶液及電解液均為氫氧化鈉溶液，未來可考慮合成單一電池裝置，製造出 PLA 專屬回收發電設備。

### 捌、參考文獻及其他

- 一、蔡尚芳 (民 111)。自然科學第四冊。新北市：康軒。
- 二、蔡尚芳 (民 111)。自然科學第六冊。新北市：康軒。
- 三、國立台灣大學化學系 (民 79)。大學普通化學實驗。台北市：國立台灣大學出版中心。
- 四、Zaaba et.al. (2020). A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation, Polymer Engineering and Science, Volume60, Issue9

## 【評語】 030211

此科展作品探討各種 PLA 溶解為乳酸的適合條件，再探討乳酸為燃料電池電解液的可行性，利用廢棄物 PLA 吸管為材料水解成小分子乳酸作為燃料電池之燃料。實驗自製 PLA 水解之燃料電池具有創意，也減少垃圾，環保、具有循環再利用新思維。實驗發想有趣且實驗數據與實驗變因豐富，符合科學研究精神。此外，整體的研究十分有條理。

## 作品簡報



塑膠發電  
PLA水解之燃料電池研究

# PLA水解乳酸燃料電池概念

# 燃料電池裝置

PLA塑膠產品

小分子乳酸

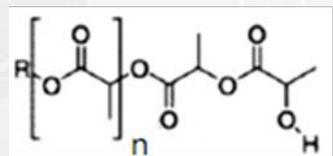
PLA燃料電池

PLA塑膠吸管

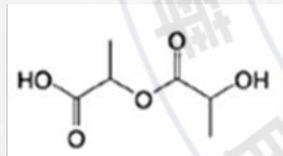
水解  
溶液

PLA  
水解液

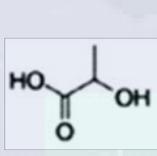
自製燃料電池



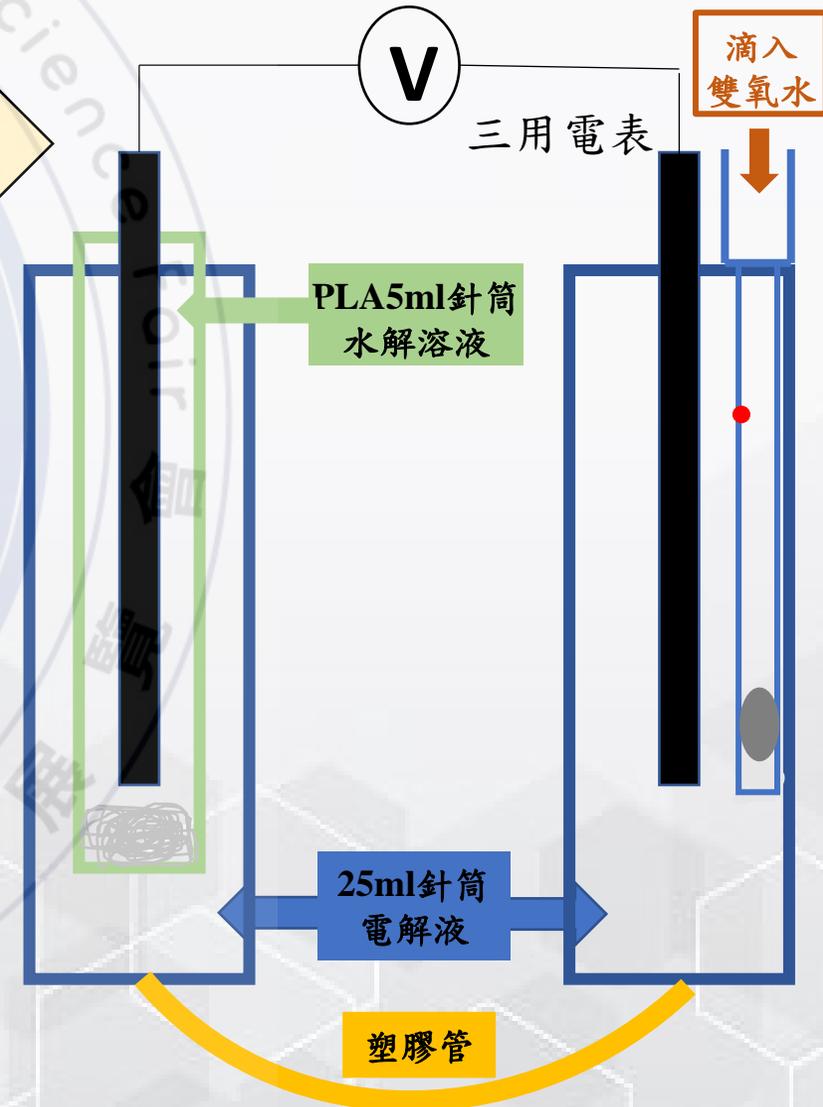
PLA



PLA二聚物

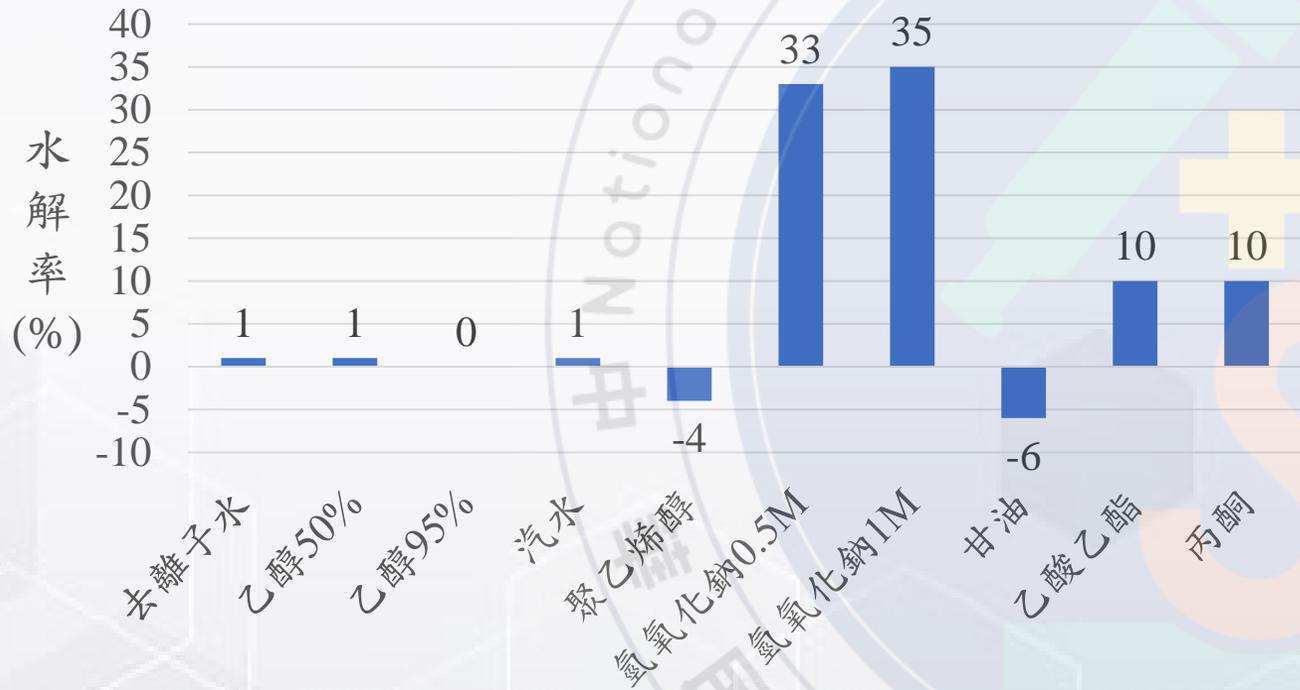


乳酸

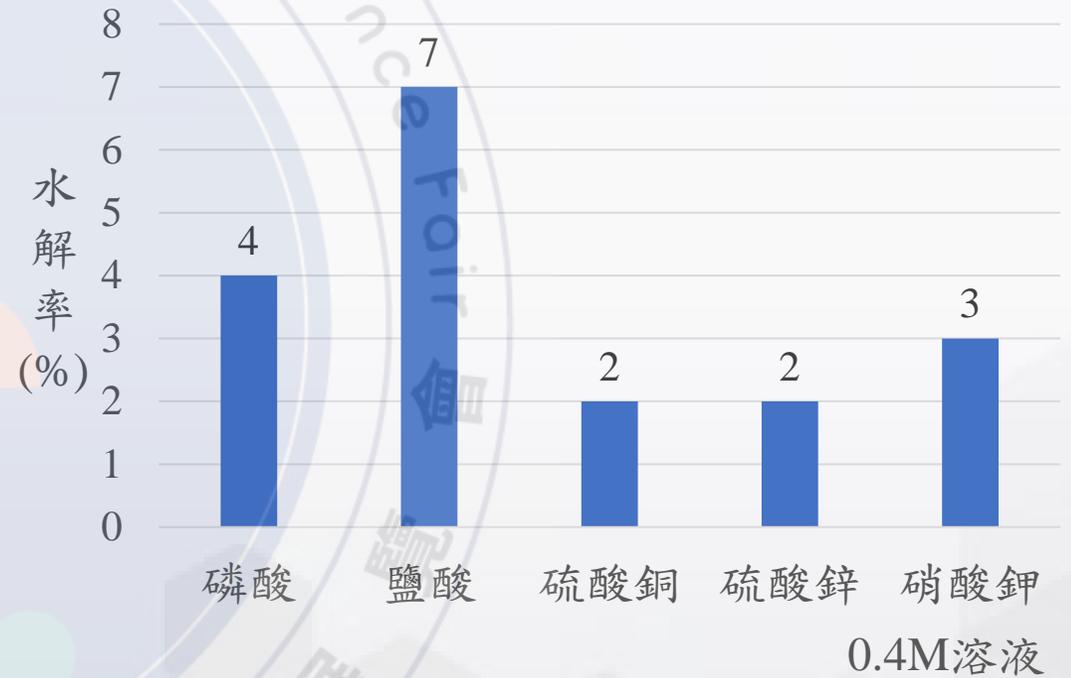


# PLA於不同溶液水解率(%)

## 一般溶液水解率



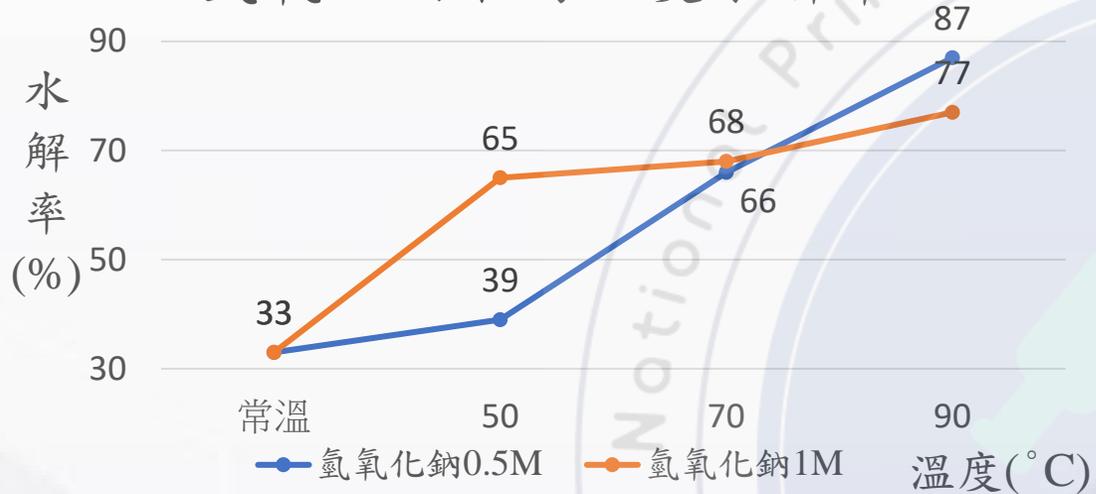
## 酸、鹽溶液水解率



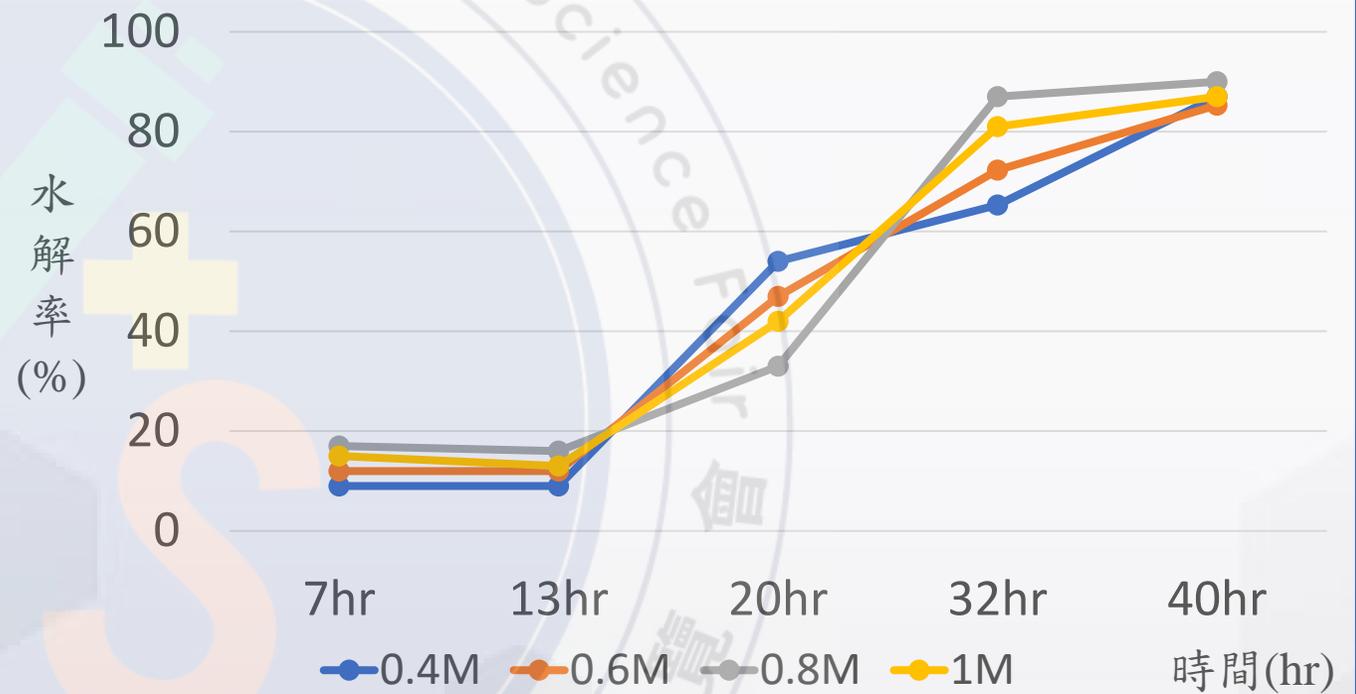
$$\text{水解率} = \frac{\text{減少重}}{\text{原重}} \times 100\%$$

# PLA於氫氧化鈉溶液中水解率(%)

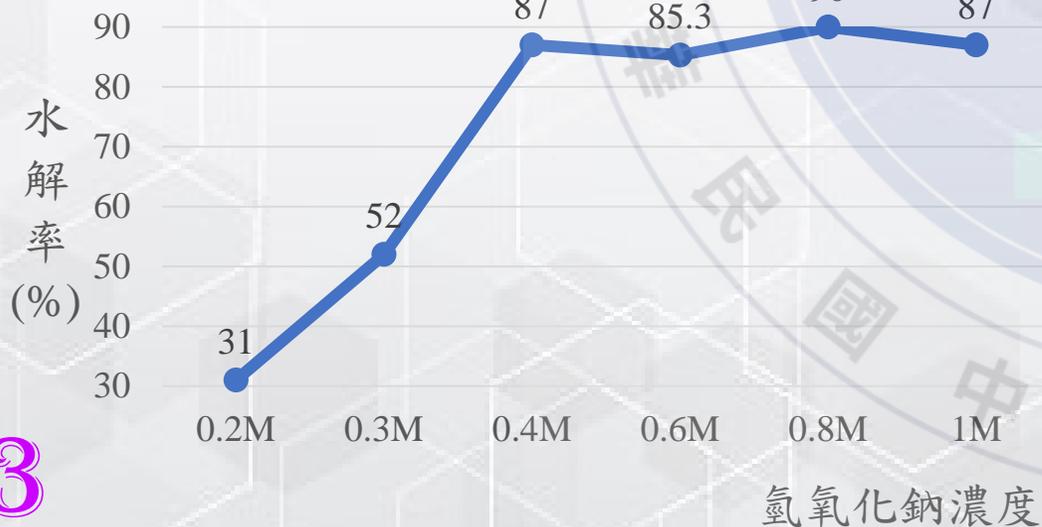
## 氫氧化鈉不同溫度水解率



## 氫氧化鈉不同時間、濃度水解率關係圖



## 氫氧化鈉不同濃度水解率



肉眼直接觀察

顯微鏡下

初始狀態

NaOH處理

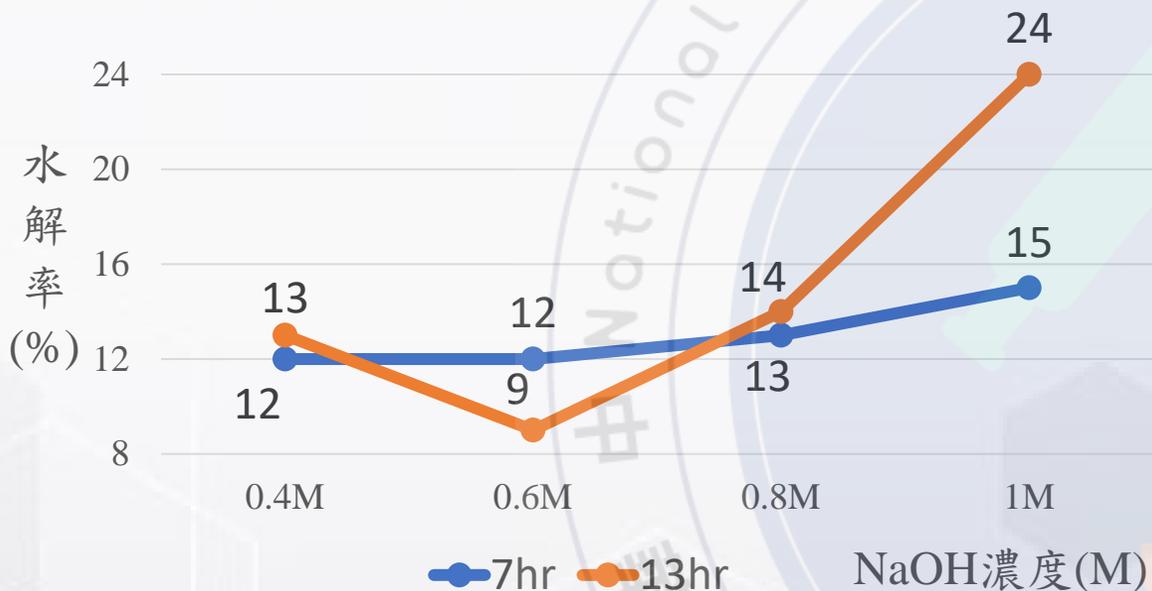
初始狀態

NaOH處理

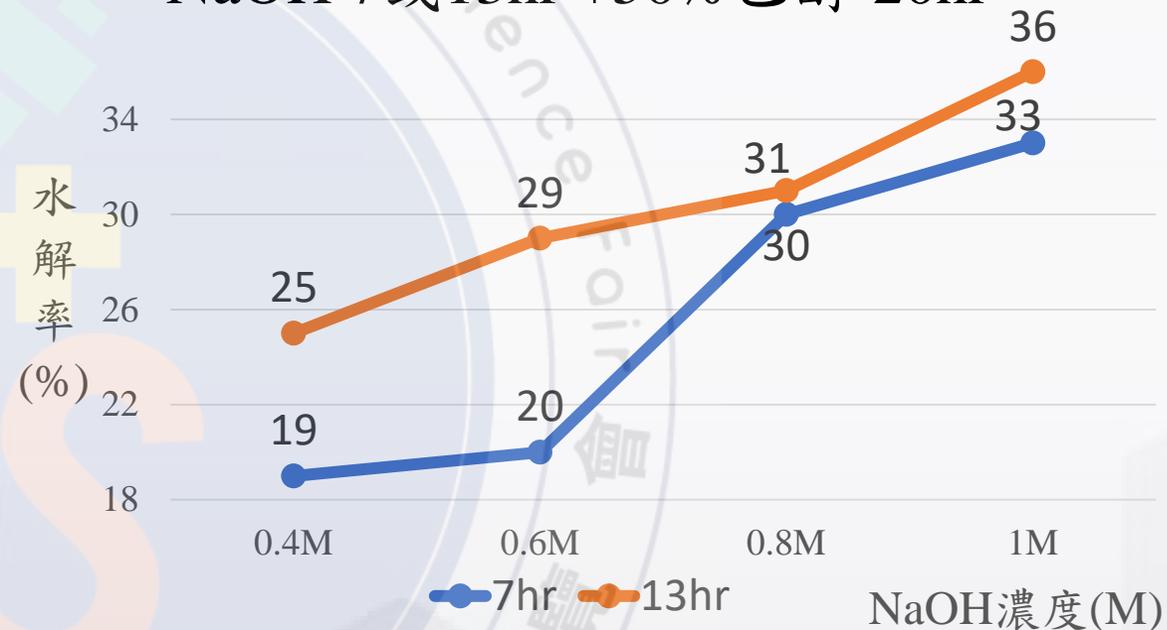


# PLA於氫氧化鈉溶液中前處理再進行水解

NaOH 7或13hr +H<sub>2</sub>O 20hr



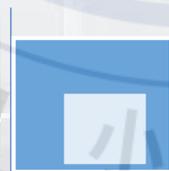
NaOH 7或13hr +50% 乙醇 20hr



NaOH水溶液  
7或13hr

H<sub>2</sub>O或50% 乙醇  
20hr

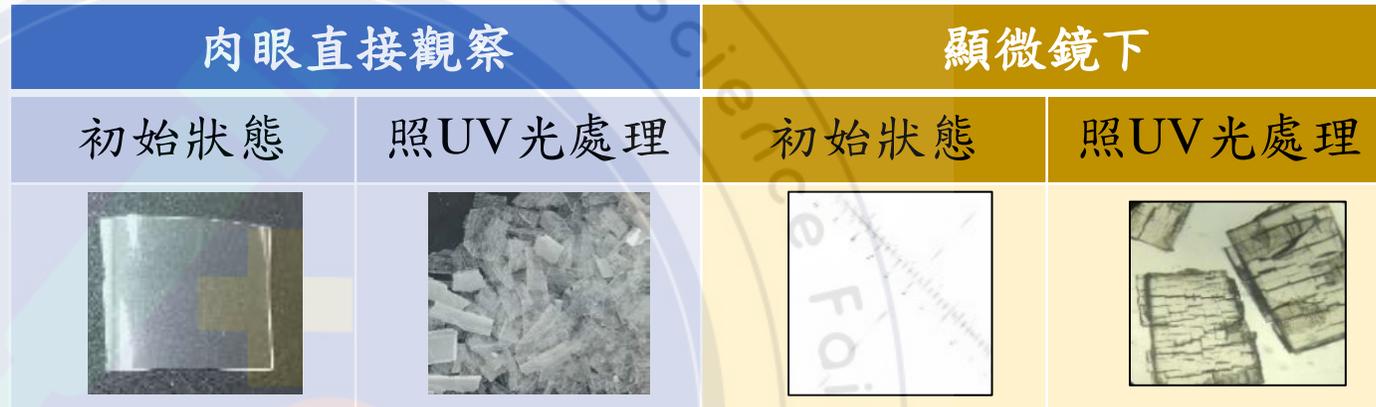
1gPLA



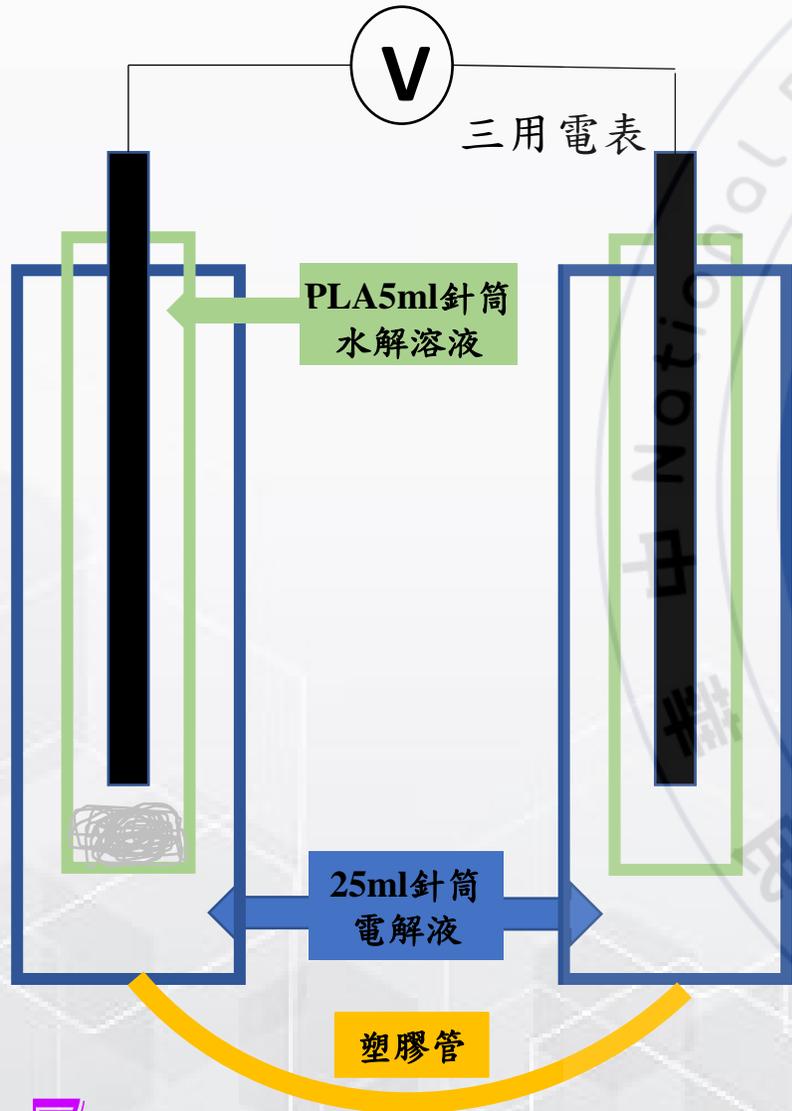
# PLA於NaOH加熱水解



# PLA照射UV光分解率



# 探討乳酸燃料電池最佳電極及電解液



不同電極電池電壓(V)



最佳電極：鍍Pt鎳鉻絲  
 最佳電解液：0.6M NaOH  
 燃料：88% 乳酸

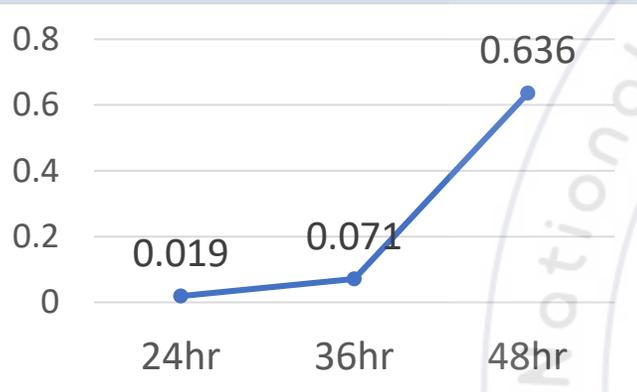
不同電解液電池電壓(V)



# PLA水解液作為電池燃料

## 改良燃料電池： 增加氧氣供應裝置

UV光照射+50%乙醇後處理



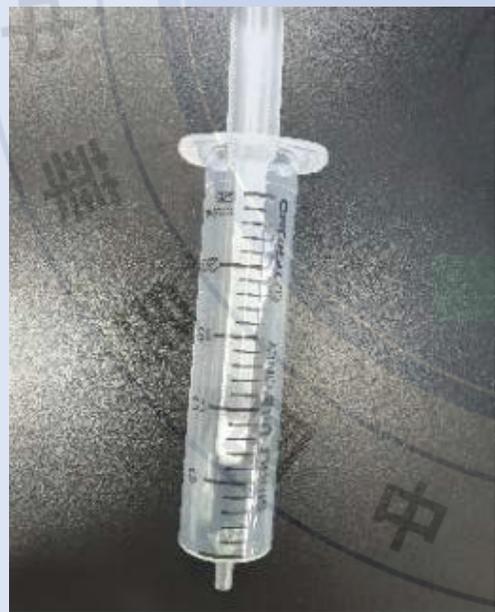
NaOH水解+乙醇後處理



供氧後燃料電池電壓(V)



實驗裝置



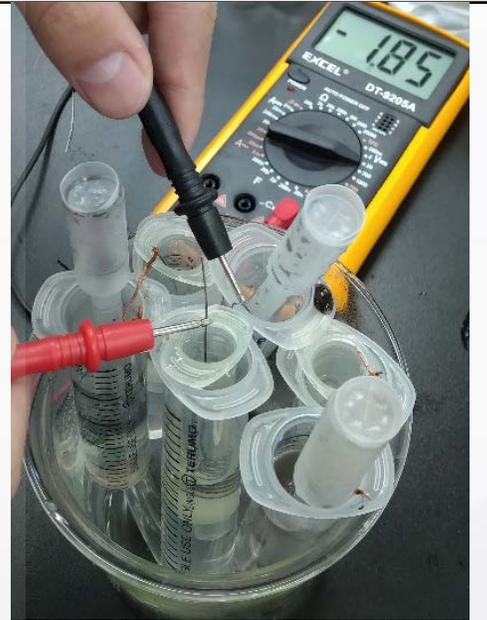
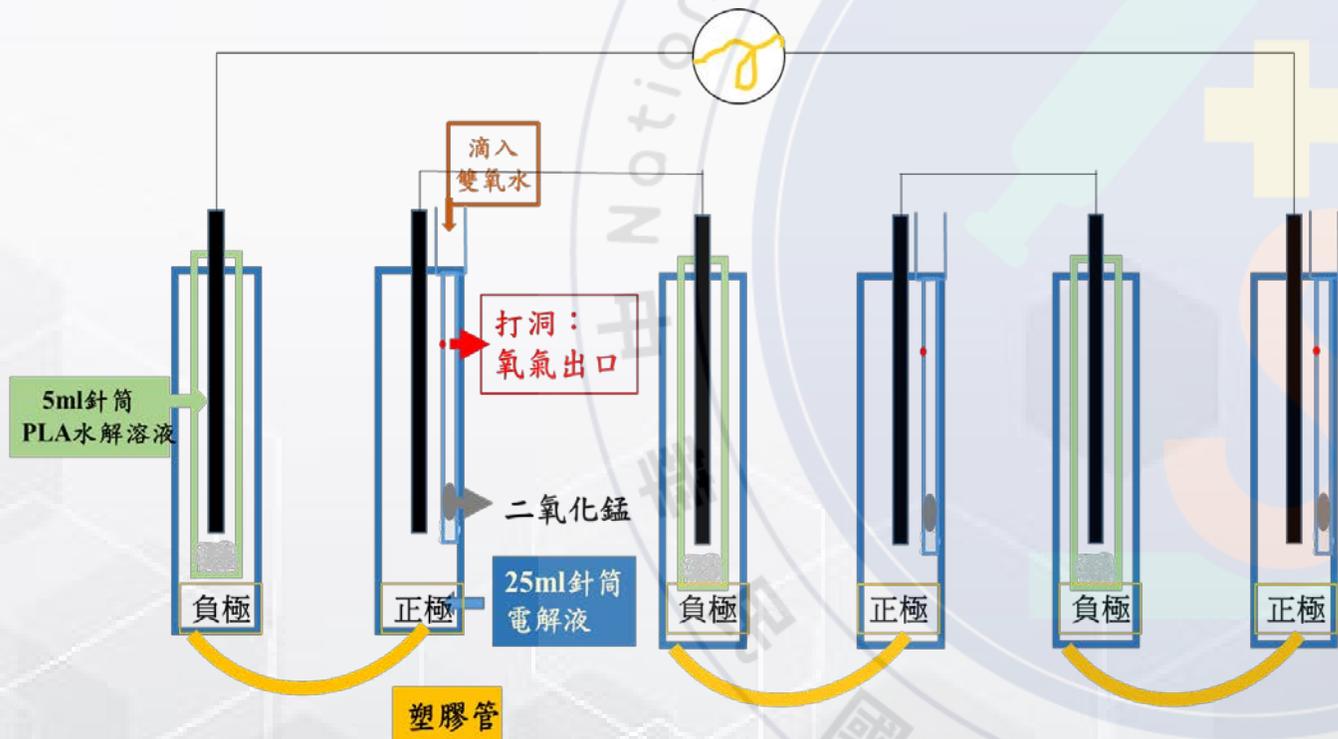
裝置示意圖



# 使用PLA加熱水解液作為電池燃料



# PLA燃料電池串、並聯



串聯三組  
燃料電池

電壓：1.85V

# 最佳乳酸燃料電池

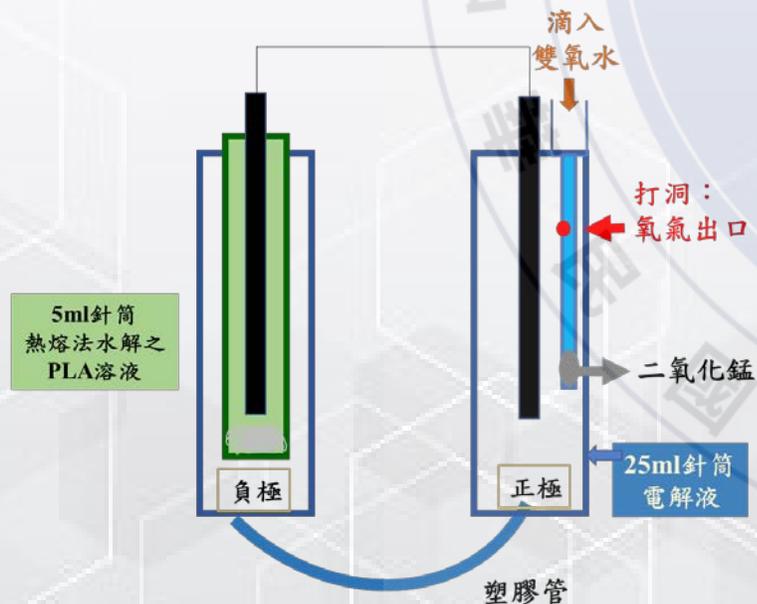
# 結論

燃料：加熱水解法之PLA溶液

電解液：0.7M NaOH

電極：鍍鉑鎳鉻絲

電壓：0.85V



1. 我們成功的用7.5M的NaOH為電解液製作電池達0.85V (如左圖)。
2. 燃料電池雖然並非最新課題，但以PLA水解的產物——**乳酸**——作為燃料電池是史無前例的。
3. 我們發現的加鹼水解方式是首次可以快速處理廢棄PLA，達到再利用的環保目的。