

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 生活與應用科學科(三)

第二名

083004

「雨」你每滴都來電-「液滴摩擦發電」與「晴雨轉換系統」的研究

學校名稱：臺中市私立明道普霖斯頓國民小學

作者：	指導老師：
小六 陳品伊	王懋勳
小五 劉宥霆	劉原旭
小五 陳亮妘	
小四 王修顥	

關鍵詞：液體摩擦起電、晴雨轉換系統、新綠色能源

# 「雨」你每滴都來電-「液滴摩擦發電」與「晴雨轉換系統」的研究

## 摘要

本研究主要探討【自製液滴摩擦發電模組】最佳設置條件，並設計【晴雨轉換系統】，不僅開發新綠能，也能節省面積讓兩種發電系統並行。

我們用方便取得的材料自製【液滴摩擦發電模組】；設計【可控式液滴滴落系統】模擬液滴落下；利用示波器收集大量數據並制定測量標準及方法。

研究發現【液滴摩擦發電模組】在以下條件有最佳效果：①和水平面夾角 70 度②液滴直徑越大、數量越多、導電度越小③滴落高度、頻率越高④液滴不能重複利用⑤多組並聯⑥發電模組寬度適當。

除了自製【滴雨盆】模擬下雨，也在戶外實測，結果【晴雨轉換系統】正常運作，能發電讓 5 個 LED 燈同時閃爍；幫  $1\mu\text{F}/50\text{V}$  的電容充電，60 秒達到 23V，雨水真的滴滴都能發電！

## 【傳統太陽能板發電】

下雨天，太陽能板無法發揮正常的發電功能。



(圖片由 recraft.ai 生成)

## 【晴雨兩用綠能發電裝置】

【晴天狀態】  
太陽能板朝上，可搭配追日系統進行發電。



【雨天狀態】  
盤面翻轉，讓「液滴摩擦發電模組」進行發電。



(照片由指導教師及作者拍攝、製作)

## 壹、研究動機

綠色能源是人類現在積極追求的目標，而且台灣從 2026 就要開始徵收碳費了，但目前火力發電仍然是台灣最大發電方法，發電成本一定會增加不少。老師曾經介紹過為了讓人類永續生活，聯合國大力推動 SDGs (永續發展目標)，第 7 項就是【可負擔的潔淨能源】。所以除了節約能源，如果能從大自然中多找一些發電的來源，減少碳排放量，不僅能降低發電成本，也能減少對環境的汙染。

我們從網路上發現有科學家結合「雨滴」和「摩擦起電」原理的發電裝置，讓我們覺得很新奇。我們也想試著做出這樣的裝置，並且用實驗證明該如何設置此裝置才能有最好的發電效果。另外我們也想利用所學過的 Arduino 和相關感應器、伺服馬達，結合太陽能發電系統，研究出遇雨可自動轉換發電方式的【晴雨兩用發電系統】，讓白天、晴天用太陽能板發電，雨天、晚上可以用液滴持續發電。

★ 與課程相關單元：【好玩的電路】、【能量與生活】、【地球的生態】、【資訊課 Arduino、Scratch】



(圖片引用自網頁 The Global Goals)

## 貳、研究目的

【研究一】設計【液滴摩擦發電模組】、【液滴滴落的方法】及【測量工具】

- 一、【液滴摩擦發電模組】的製作
- 二、設計【可控式液滴滴落系統】
- 三、設計【電壓量測】的方法及裝置
- 四、制定測量的標準流程

## 【研究二】不同情況對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響

- 一、【液滴摩擦發電模組】不同傾斜角度，對發電情形的影響
- 二、不同液滴直徑對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響
- 三、不同滴落高度對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響
- 四、不同滴落頻率對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響
- 五、同一滴液滴是否可連續讓不同的【液滴摩擦發電模組】進行發電
- 六、同時滴落不同液滴數量對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響
- 七、不同液滴導電度對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響
- 八、【液滴摩擦發電模組】串聯、並聯對發電情形的影響
- 九、【液滴摩擦發電模組】整體不同面積大小對發電情形的影響
- 十、總結各項實驗結果，找出最佳設置條件

## 【研究三】利用 Arduino 與雨滴感測器設計【晴、雨發電轉換系統】

## 【研究四】模擬下雨，實際測試【晴雨轉換系統】和【雨天狀態發電情形】

## 【研究五】實際戶外測試雨天發電情形

# 參、研究設備及器材

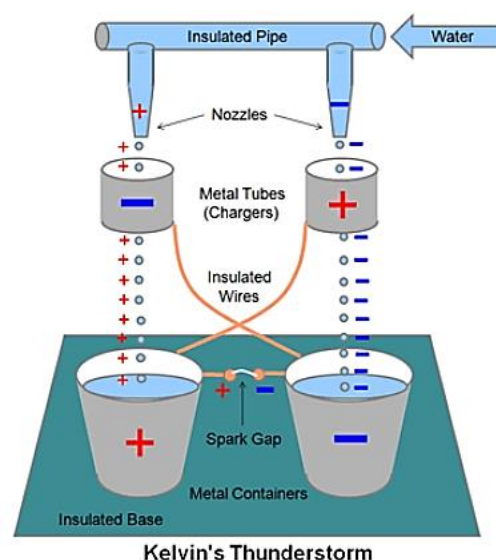
製作工具	電鑽、螺絲起子、線鋸機、熱熔槍、直角尺、美工刀
可控式液滴滴落系統	針筒、電動推桿、直流 DC 調速器、LED 電壓表
實驗數據記錄工具	Arduino 開發板、電壓檢測模組、bDesigner 軟體、示波器、Excel
液滴摩擦發電模組	鋁箔膠帶、FEP、漆包線、塑膠片、膠帶
晴、雨轉換系統	Arduino 開發板、雨滴感測器、伺服馬達、加熱片、PVC 水管

# 肆、研究過程與方法

## 一、文獻探討：

### 1. 開爾文滴水起電機（引用自科學 Online）：

- (1). 開爾文滴水起電機（Kelvin Water Drop）是英國科學家克爾文於 1867 年所發明的一種靜電產生器。
- (2). 此裝置一開始時幾乎都不帶電，但是因為液滴本身不一定是電中性，會把非常少量電荷帶給金屬水桶，造成水桶帶有微量電荷。
- (3). 金屬水桶和金屬環用導線相連接，因為靜電感應效應，兩邊金屬筒和金屬環上的電荷會不斷增加。
- (4). 把兩個金屬桶分別用導線連接到 LED 燈，裝置運作一段時間後，可以把 LED 燈點亮。



（圖片引用自網頁 Ancientstartech Lord Kelvin's Sema-Tawy）

### 2. 摩擦起電效應（引用自翰林雲端學院）：

- (1). 當兩種不同材料互相摩擦時，一種材料的部分電子轉移到另一種材料上，失去電子的帶正電，獲得電子的帶負電，稱為摩擦起電。

- (2). 經過以前科學家的研究，右表可以了解不同材料經過接觸後，其表面能夠攜帶正、負電的相對能力。
- (3). 摩擦起電不能創造額外的電荷，電荷只是發生轉移、移動，用這樣的方式產生電流。

### 3. 液滴摩擦發電機(引用自香港城市大學-研究故事-新研發高效能水滴發電機)：

- (1). 這個裝置是由上下兩層 (PTFE、ITO)、喜歡不同電荷的材質組成，最下層的玻璃是當支撐的基板。

- (2). 當液滴持續不斷撞擊長期帶有電荷的永電體材料聚四氟乙烯 (PTFE)，所產生的表面靜電會不斷累積，一直累積到一定的程度。

- (3). 當某一滴液滴「接通」鋁電極和 PTFE / ITO 兩個電極之間的通路時，它們之間就變成一個可通電的完整電路，剛剛累積的靜電就會以【PTFE→液滴→鋁電極→ITO】這樣的路線流出去，產生電流。

- (4). 看到這種幾乎是“無中生有”的發電方式，我們覺得很新奇而且對人類真的很有幫助，所以我們想進行以下自己的研究，讓它變得更實用：

I. 參考既有的理論，找尋容易取得的材料製作我們的【液滴摩擦發電模組】。

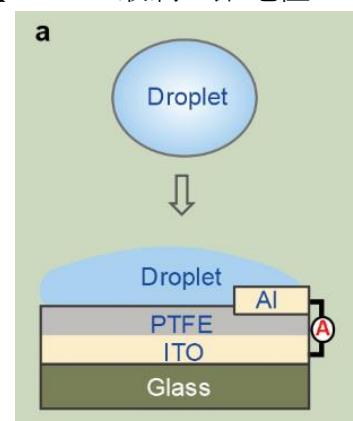
II. 設計自己的製作方式、檢驗工具、實驗流程。

III. 改變各種不同的情境，找出【液滴摩擦發電模組】最佳的設置方式。

IV. 結合太陽能發電，用 Arduino 設計晴、雨轉換系統，製作出【晴雨兩用綠能發電裝置】，晴天時用太陽能板發電，下雨時會自動轉換成雨滴發電模式。

Tribopositive		Tribonegative
Aniline formaldehyde resin		Wood
Polyformaldehyde 1.3-1.4		Amber
Polyurethane foam		Sealing wax
Ethylcellulose		Poly (methyl methacrylate)
Sorbothane		Nickel, Copper
Polyamide 11		Sulphur
Polyamide 6,6		Brass, Silver
Melamine formaldehyde		Gold
Hair		Poly urethane flexible sponge
Oily skin		Poly (ethylene terephthalate) (PET)
Dry skin		Epoxy resin
Glass		Hard rubber
Acrylic, Lucite		Poly vinyl butyral
Leather		Poly chloro butadiene
Rabbits fur		Natural rubber
Asbestos		Polyacrylonitrile (PAN)
Quartz		Acrylonitrile vinyl chloride
Mica		Poly (bisphenol A carbonate)
Lead		Poly(vinylidene chloride)
Rock salt (NaCl)		Polyolefin
Wool		Poly chloroether
Cat's fur		Polyvinylidene fluoride (PVDF)
Silk, woven		Polystyrene (PS)
Aluminium		Orlon
Poly vinyl alcohol		Polyethylene (PE)
Poly vinyl acetate		Polypropylene (PP)
Paper		Silicone
Cellulose		Polyimide (Kapton)
Cellulose acetate		Polyvinyl chloride (PVC)
Polyethylene glycol adipate		FEP
Polydiallyl phthalate		Polydimethyl siloxane (PDMS)
Cellulose regenerated sponge		Polytetrafluoroethylene (PTFE)
Cotton		Silicone rubber
Steel		Ebonite

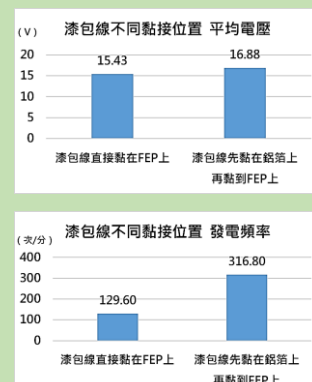
(圖片引用自 Results in Engineering Volume 15 Triboelectric nanogenerators for marine energy harvesting and sensing applications)



(圖片引用自香港城市大學-研究故事-新研發高效能液滴發電機)

### ! 發現疑問！為什麼漆包線不能直接連接在 FEP 上？(我們用 FEP 取代 PTFE)

1. 既然電子累積在 FEP 上面，為什麼漆包線不直接連接在 FEP 上，而是要透過鋁箔呢？
2. 我們製作了兩種【液滴摩擦發電模組】，一組漆包線直接連接 FEP，另一組漆包線連接鋁箔後再黏在 FEP 上。實驗結果如右：
3. 「漆包線直接黏在 FEP 上」的平均電壓下降 8.55%，但是發電頻率下降 59.09%。
4. 查詢資料發現 FEP 是一種優良的絕緣體，不易導電，推測可能跟這個特性有關，所以 FEP 上面要先貼鋁箔當電極，漆包線再貼到鋁箔上。



(本圖由作者使用 Excel 製作)



## 二、歷屆研究靜電、靜電發電的作品探討與本研究【雨你每滴都來電】特色

(本表由作者整理)

作品名稱	研究大綱	優點	缺點
靜觀奇電	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 利用凱氏滴水器持續累積，便可產生高電壓進而放電。</li> <li>● 研究不同的環境因素及儀器材質對電荷累積速度的影響。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 對實驗器材的架設，選材有不少改進。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 凱氏滴水器(開爾文滴水起電機)較不具創意。</li> <li>● 對定性的探討可再延伸。</li> </ul>
靜"殿"神來，與與灰"臣"說拜拜	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 製造、改良一台靜電除塵裝置。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 善用身邊物品製作。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 消耗能源產生靜電，而不是用靜電產生能源</li> <li>● 增加三用電表讀值紀錄會更確實</li> </ul>
滴水發電－應用開爾文靜電裝置過濾懸浮微粒	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 簡單材料組裝的開爾文靜電裝置進行集塵、過濾懸浮微粒</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 實地走訪蒐集懸浮微粒，有良好過濾效果。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 收集雨水當滴水來源，但有乾季雨季及地域性限制。</li> </ul>
帶「靜」紗窗，防塵來「勁」－靜電紗窗防塵效果研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 不鏽鋼紗窗上裝置自製靜電產生器。</li> <li>● 研發靜電紗窗取代市面昂貴靜電紗窗。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 不需非常複雜的儀器，方法具體，理論淺顯。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 若能有定量的分析更具說服力。</li> <li>● 靜電紗窗對煙霧污染僅有延遲效用。</li> </ul>

過去科展沒有進行關於【利用液滴摩擦產生靜電來發電】的相關研究，本研究希望能利用實驗找出【液滴摩擦發電模組】最佳的設置大小、結構及方式。

<p>我們的作品 「雨」你每滴都來電-「液滴摩擦發電」與「晴雨轉換系統」的研究</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 尋找易取得的材料，自製【液滴摩擦發電模組】</li> <li>● 自製【可控式液滴滴落系統】</li> <li>● 設計數據測量方式和分析方法</li> <li>● 分析各項變因，找出【液滴摩擦發電模組】的最佳設置條件</li> <li>● 設計、自製【晴雨轉換系統】</li> <li>● 設計、自製【滴雨盆】</li> <li>● 實際測試【晴雨轉換系統】和【雨天狀態發電情形】</li> </ul>	<p>本研究特色</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 用容易取得的材料製作【液滴摩擦發電模組】，人人都可做。</li> <li>● 自己設計用不同電壓控制電動推桿推針筒，盡可能準確控制液滴滴落頻率。</li> <li>● 用示波器取得放電電壓數據，並用自己研究出來的方法計算放電頻率。</li> <li>● 利用 ChatGPT 的協助，讓 Excel 程式處理每次實驗 4 萬多筆資料，讓我們可以分析、解讀數據代表的意義。</li> <li>● 進行 9 種變因實驗，找出【液滴摩擦發電模組】最佳設置條件，讓它有最大的發電效果。</li> <li>● 利用二極體，解決並聯時電流逆行的問題。</li> <li>● 利用我們設計的【晴雨轉換系統】，可同時容納太陽能發電和雨滴發電，讓面積效益最大。</li> <li>● 自己設計在水盆打洞並鋪上棉布，創造出可滴水的【滴雨盆】，就算不下雨也能進行測試。</li> <li>● 我們的成品可讓雨水在進行傳統的水力發電之前，再多一次發電的機會，成功開源！</li> </ul>
---	---	---

## 探討【自製液滴摩擦發電模組】的最佳設置條件 與「晴雨轉換系統」的開發

### 文獻資料探討

開爾文滴水起電機  
摩擦起電效應  
液滴摩擦發電機

### 自製測量工具及設計實驗方法

自製液滴摩擦發電模組  
可控式液滴滴落系統  
**找到放電瞬間電壓的方法**  
計算放電頻率的方法  
比較不同變因數據的方法

學習使用  
ChatGPT  
協助處理  
大量數據

### 發現問題

Arduino 無法正確測量電壓，改用示波器測量，並自行研究用 Excel 分析資料。

### 找出【液滴摩擦發電模組】 最佳發電的設置條件

發電模組傾斜角度	滴落頻率	液滴導電度
液滴直徑	液滴重複使用	發電模組整體面積
滴落高度	滴落不同液滴數量	<b>多個發電模組串聯、並聯</b>

### 利用 Arduino 與雨滴感測器 設計【晴、雨發電轉換系統】

### 發現問題

並聯時會出現像電池充電正接正、負接負的情形，導致電流沒有統一輸出。要**加裝二極體固定電流方向**。

### 模擬下雨，測試 【晴雨轉換系統】和【雨天發電情形】

自製「滴雨盆」模擬下雨、戶外真實下雨

【晴雨轉換系統】正常運作  
防水措施成功防水

1 $\mu$ F/50V 電容順利充電達 23.06V  
5 個紅色 LED 燈同時不斷閃爍

成功發電  
還能儲存



### 實際戶外測試雨天發電情形

【晴雨轉換系統】正常運作  
成功順利發電

**雨滴不同大小會造成發電情形的差異**  
**考慮裝設接雨盆，穩定雨滴的大小和滴速**

### 未來可再研究項目

- 測試發電模組不同材質
- 測試更多不同導電度液體
- 分析裝設接雨盆的優缺點，考慮必要性。

未來加裝  
接雨盆滴水

(本圖由作者繪製)

## 伍、研究結果與討論

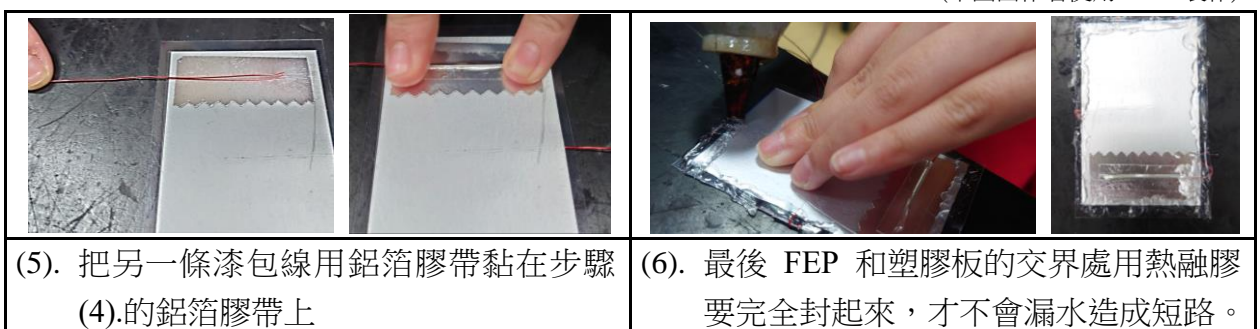
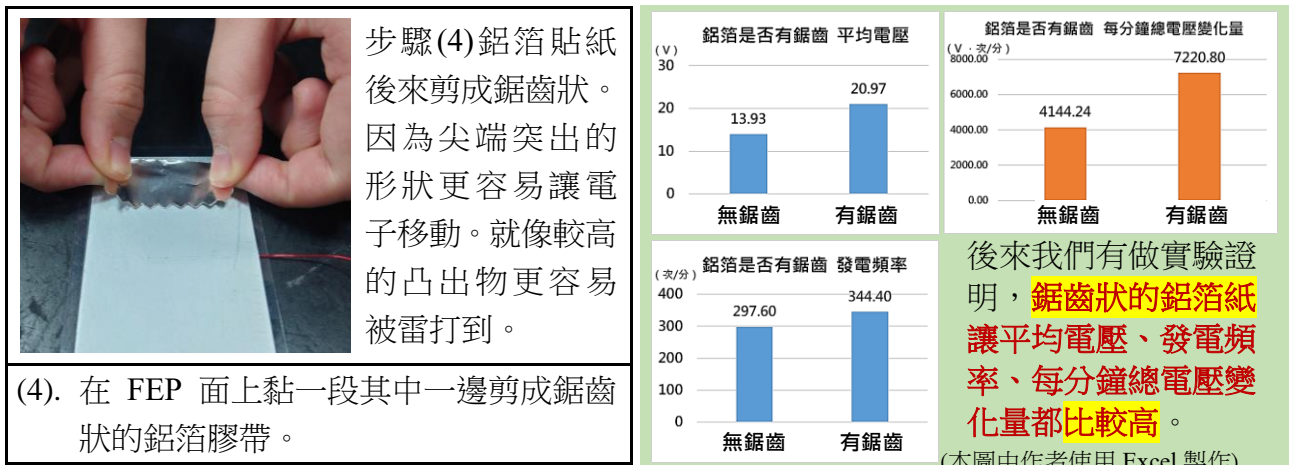
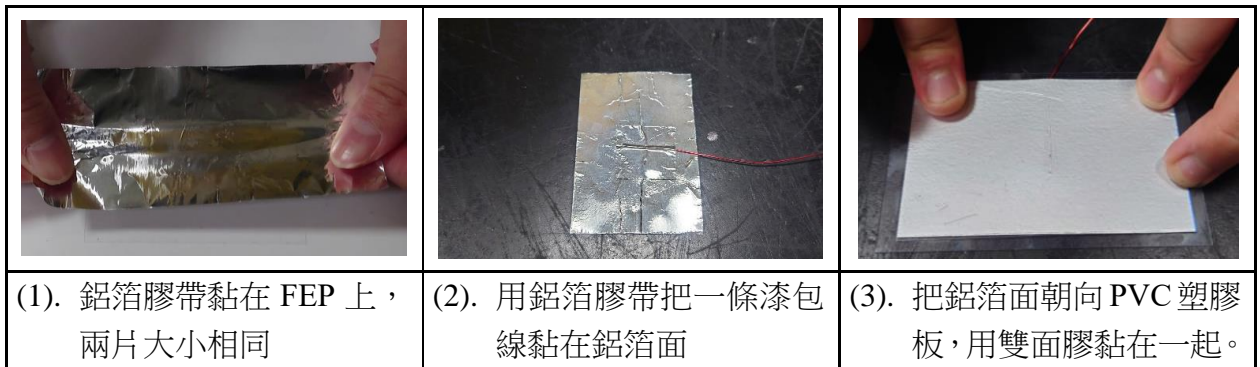
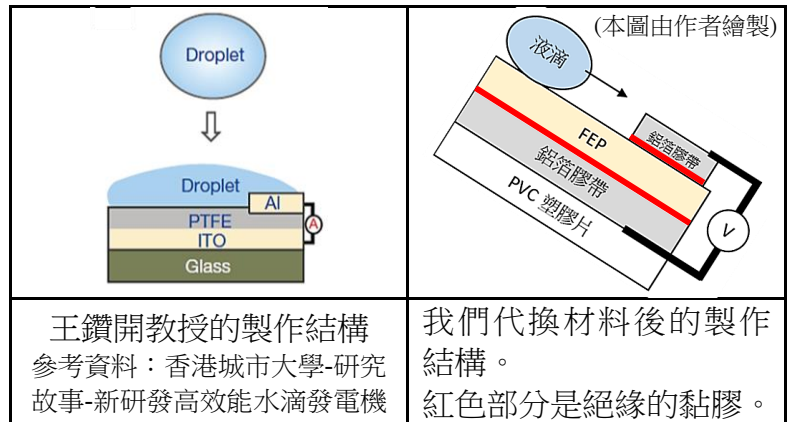
### 【研究一】設計【液滴摩擦發電模組】、【液滴滴落方法】及【測量工具】

#### 一、【液滴摩擦發電模組】的製作

1. 參考模型：參考香港大學王鑽開教授的作法，把其中材質換成我們能買到的材質。
2. 查詢摩擦序列表後，我們選取以下方便取得材料：  
鋁箔膠帶（易攜帶正電且為導體）、FEP（3D 列印離型膜、容易取得，易攜帶負電）、PVC 塑膠片（當作基板固定用）、漆包線（較細、容易塑形）

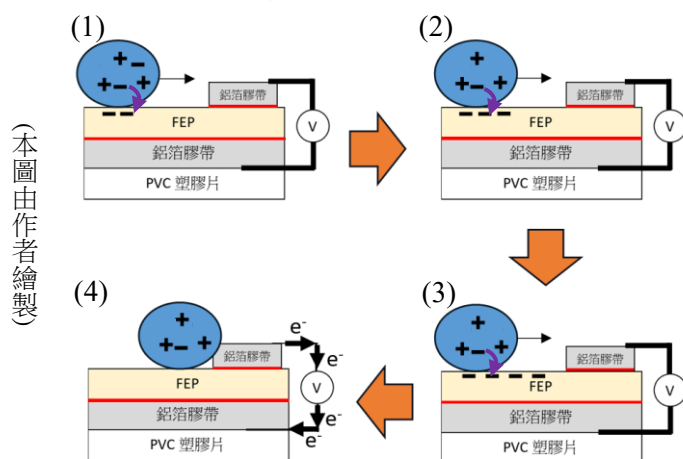
#### 3. 製作過程：

（以下照片由指導教師及作者拍攝）





#### 4. 【液滴摩擦發電模組】的發電原理：



- 在(1)·(2)·(3)的情況下，因為 FEP 這種材質容易帶負電，液滴和 FEP 因為摩擦起電效應，會使液滴上的電子移動到 FEP 表面。
- 當液滴接通了 FEP 和上方鋁箔電極，此時電子就流往下層的鋁箔膠帶，產生電流。
- 而且實驗發現，**每滴液滴通過上方鋁箔電極時，都會放電！**
- 註：紅色部分是絕緣的黏膠

從發電原理我們可以知道，**電子移動方向是：【FEP 上方鋁箔】→【下方鋁箔】**，所以**【FEP 上方鋁箔】是負極(-)；【下方鋁箔】是正極(+)**。

#### 實驗證明【液滴摩擦發電模組】的放電經過

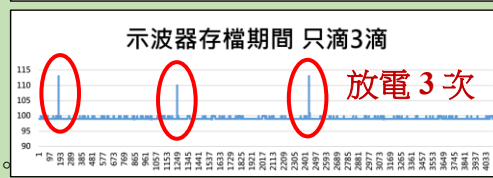
我們想知道【液滴摩擦發電模組】的放電經過是：①累積很多液滴轉移的電子後才會放電，還是②每一滴液滴經過鋁箔電極時都會放電。

★實驗方法：在示波器存檔期間，分別滴下 1 滴、2 滴、3 滴的液滴，觀察放電次數。

★實驗結果：



**放電次數和液滴滴數相同！**在【研究二】的數據(P.15)也觀察到，**放電頻率和液滴頻率是接近的**。例如：液滴每 10 秒 53 滴(每分鐘 318 滴)，放電頻率是每分鐘 341 次，兩者差距 6.7%。



(本圖由作者使用 Excel 製作)

## 二、設計【可控式液滴滴落系統】

### 1. 可以產生液滴的工具分析：

(本表由作者整理)

	控制滴速方式	優點	缺點
滴管	人手控制	方便取得	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 擠壓力量無法固定</li> <li>● 容量非常小</li> </ul>
滴定管	控制閥的旋轉角度	利用控制閥旋轉角度來固定滴落速度	要每次固定相同旋轉角度還是會有點誤差
點滴	滾輪壓住塑膠管的鬆緊來控制	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 點滴瓶容量很大</li> <li>● 利用滾輪位置固定滴速</li> </ul>	要每次固定滾輪相同位置還是會有點誤差
針筒	人手控制	方便取得	擠壓力量無法固定

(1). 從以上分析可以發現，使用滴定管或點滴是比較好的選擇。

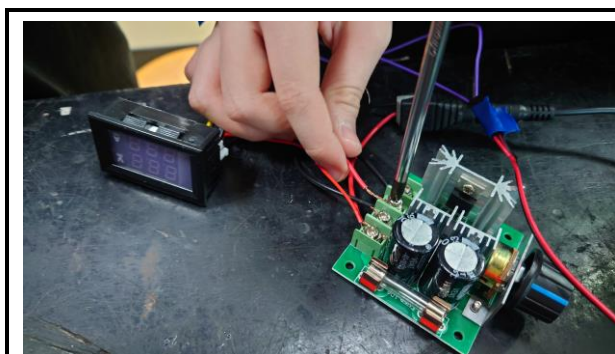
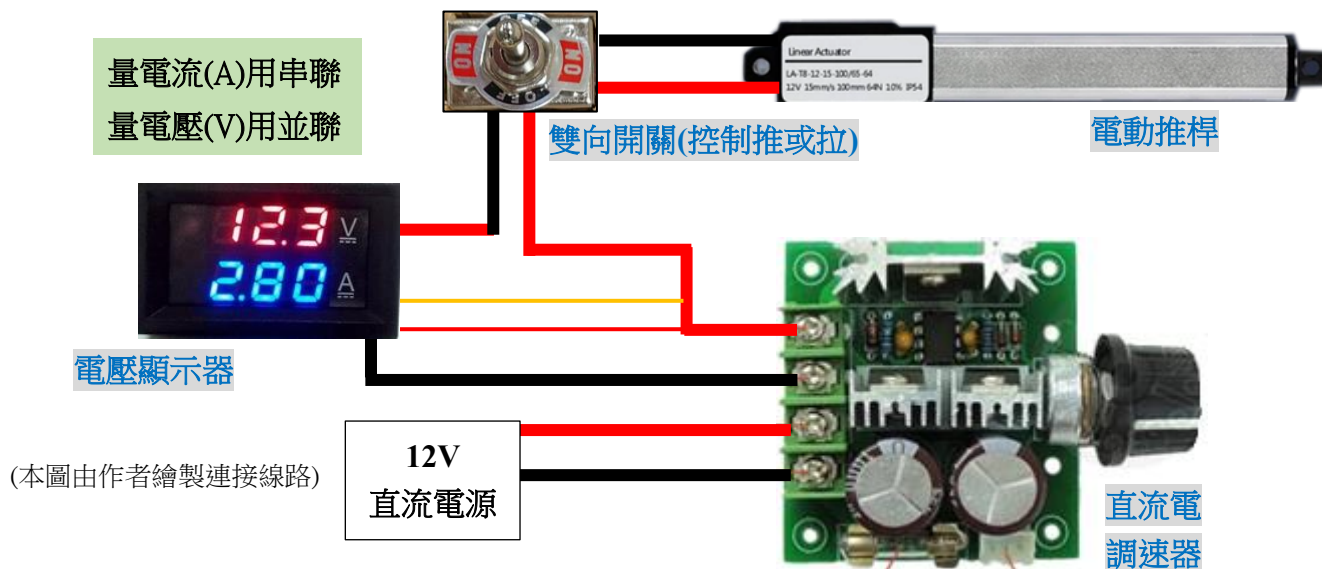
(2). 但是這兩個工具都是用**機械的位置、或是開關角度來控制滴速**，**每次實驗是否能調整到完全相同的位置，是一大問題。**



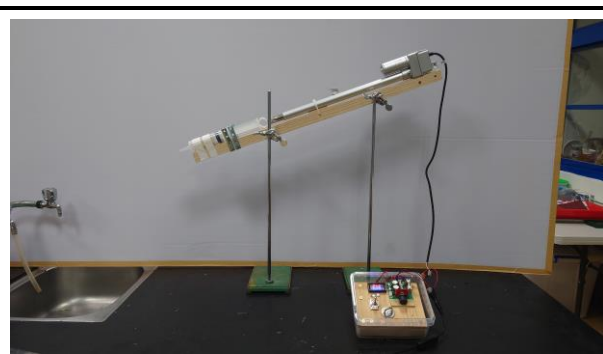
(3). 所以我們想到針筒是用推擠的方式滴落液體，去年科展我們有用了一種工具叫做「電動推桿」，如果能**找到可以改變電壓、調整推動速度的工具**，就能實現用「數位」的方式來控制滴落速度。

## 2. 直流電調速器的接線方式

除了利用「直流電調速器」調整電動推桿推針筒的速度，我們還需要**加裝一個「電壓顯示器」**，這樣我們就可以**利用電壓數字當作我們調整液體滴速的標準**。



(1). 根據電路圖連接電線



(2). 把電動推桿連接針筒，看是否能順利控制電動推桿推、拉、調速。

(照片由指導教師及作者拍攝)

## 3. 實際使用情形

- (1). 以下實驗利用**不同電壓控制推桿力量，造成針筒滴水速度不同**。
- (2). 利用手機慢速攝影，計算 10 秒內水滴落下數量。
- (3). 不同電壓依序輪流測試，共**進行五輪測試，結果水滴數量都相同**，代表我們可以**利用電壓大小控制每次滴落速度都相同**。
- (4). 測試結果如下：

電壓(V)	1.9 V	2.5 V	2.9 V	3.1 V	3.3 V	3.5 V
每 10 秒滴數	26 滴	53 滴	74 滴	105 滴	143 滴	171 滴

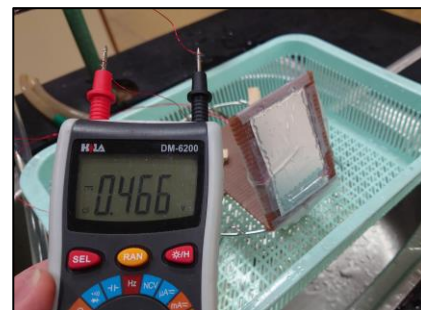
### 三、設計【電壓量測】的方法及裝置

#### 1. 決定測量項目

- (1). 發電的「**電壓大小**」。
- (2). 因為我們是利用水滴摩擦累積發電，所以需要知道「**發電頻率**」。

#### 2. 利用「三用電表」測量電壓 - 不可行

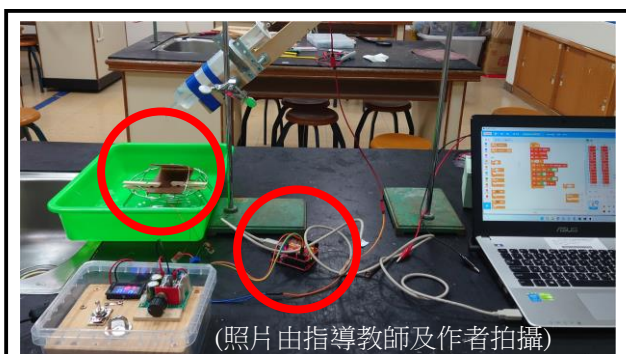
- (1). 雖然「**三用電表**」可以測量電壓，但是**沒辦法長時間紀錄數據**、進行分析。
- (2). 就算用手機錄影三用電表的電壓數字變化，還需要大量時間、人力記錄數字，不是有效率的方法。
- (3). 需要能自動記錄數據、而且能存成電子檔的方法



(照片由指導教師及作者拍攝)

#### 3. 使用 Arduino 的「電壓感測器」，搭配 Scratch 積木程式測量、收集電壓數據 - **原本以為可行，後來發現嚴重問題**

- (1). 電腦課有介紹過 Arduino 有很多不同種類的感測器，查詢後發現有測量電壓的專屬感測器。
- (2). 我們對於寫出 Arduino 的程式碼不是很熟悉，但是有找到一款軟體可以把 Arduino 和我們學過且熟悉的 Scratch 做結合，**利用 Scratch 的積木程式來控制 Arduino 的「電壓感測器」**。



(照片由指導教師及作者拍攝)

把【液滴摩擦發電模組】的正、負極連接到 Arduino 的「電壓感測器」，再連接至電腦。



(本程式由作者設計)

- (3). 藍框的部份是對偵測的數值進行計算。

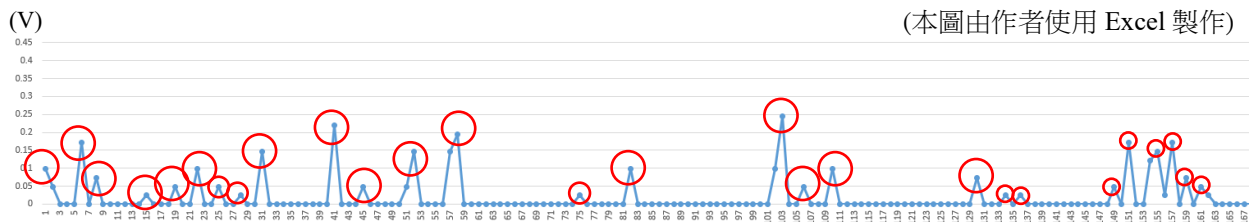
- Arduino 能偵測到的數值為 0 ~ 1024；能偵測到的電壓為 0 ~ 25V。
- 所以這有點像溫度°C、°F的轉換，要把偵測到的數值轉換成電壓伏特數。

- (4). 我們利用全新 3V、9V 電池進行準確度測試，把 3000 筆資料平均後進行比較：

電池標示電壓	Arduino 的數值	誤差百分比	Arduino 數值和電池標示最大只差 1.4%，我們認為相當準確！
3 V	2.983 V	0.6%	
9 V	9.126 V	1.4%	

#### 4. 分析數據的方法：**找出放電瞬間的電壓**並**計算固定時間內放電次數**

- (1). 我們把 Arduino 收集到的 3000 筆資料（1 分鐘）用 Excel 畫成折線圖可以發現，有很多凸起來的部分，我們認為這些**突起最頂端的部分**就是我們要找的「**放電瞬間電壓**」；整個折線圖**有幾個頂端**就是我們要找的「**固定時間內放電次數**」。



(本圖由作者使用 Excel 製作)

- (2). 如果要人工挑選這 3000 筆資料太費時費工了，所以我們決定求助 ChatGPT，詢問它是否有可以用電腦自動處理的方法。給它的要求與回答如下：

請寫出 Excel 程式，將工作表中的原始資料尋找比上下相鄰儲存格數值還大的儲存格，新建一個「高峰值輸出」工作表，將尋找到的儲存格的值及位置輸出



以下是 Excel VBA 程式碼，用於尋找原始資料中「比上下相鄰儲存格數值還大」的儲存格，並將結果輸出到名為「高峰值輸出」的新工作表中。

VBA 程式碼

```

Sub FindVerticalPeaks()
    Dim wsInput As Worksheet
    Dim wsOutput As Worksheet
    Dim rng As Range
    Dim cell As Range
    Dim outputRow As Integer

    ' 設定來源工作表
    Set wsInput = ActiveSheet ' 可以更改為具體的工作表名稱，例如：ThisWorkbook.Worksheets("S")

    ' 新建輸出工作表
    On Error Resume Next
    Set wsOutput = ThisWorkbook.Worksheets("高峰值輸出")
    If wsOutput Is Nothing Then
        Set wsOutput = ThisWorkbook.Worksheets.Add
        wsOutput.Name = "高峰值輸出"
    End If
    On Error GoTo 0

    ' 遍歷每個儲存格 (跳過第一行和最後一行)
    Dim rownum As Long, colnum As Long
    For rownum = 2 To rng.Rows.Count - 1
        For colnum = 1 To rng.Columns.Count
            Set cell = rng.Cells(rownum, colnum)

            ' 判斷是否為垂直峰值 (先比較上下相鄰儲存格)
            If cell.Value > rng.Cells(rownum - 1, colnum).Value And _
               cell.Value > rng.Cells(rownum + 1, colnum).Value Then

                ' 將結果寫入輸出工作表
                wsOutput.Cells(outputRow, 1).Value = cell.Value
                wsOutput.Cells(outputRow, 2).Value = cell.Column
                wsOutput.Cells(outputRow, 3).Value = cell.Column
                outputRow = outputRow + 1
            End If
        Next colnum
    Next rownum

    ' 提示完成訊息
    MsgBox "高峰值已輸出到「高峰值輸出」工作表！" & vbInformation
End Sub

```

(本圖為作者使用 ChatGPT 的過程的截圖)

- (3). 經過比對資料查證，真的可以用 Excel 自動找出我們要的「放電瞬間電壓」，也可以用 Excel 的統計功能計算出總共有幾筆資料，也就是「放電次數」。

## !!! 發現非常嚴重的問題 !!!

- (4). 在進行第一個變因「液滴摩擦發電模組不同角度」實驗時發現，測量出 400 多次的高峰值數據中，只有 2 次超過 2 伏特(V)，其他全部都小於 0.5 伏特(V)。

**這非常不合理！**

(照片由指導教師及作者拍攝)

- (5). 因為我們在正式實驗之前，已經先把「液滴摩擦發電模組」接上「紅光 LED 燈」進行測試，我們當時還非常興奮它不停的閃光！查詢資料後發現，「紅光 LED 燈」發光需要 1.8~2.2V，所以我們的測量方式可能是錯誤的！



(照片由指導教師及作者拍攝)

- (6). 後來我們寫信詢問「物理雙月刊」寫摩擦發電相關文章的教授，他建議我們可以使用【示波器】來測量，因為原本的測量方式抓取資料的速度可能不夠快。



(照片由指導教師及作者拍攝)



(照片由指導教師及作者拍攝)

- (1). 跟資訊老師借簡易型【示波器】測電壓。

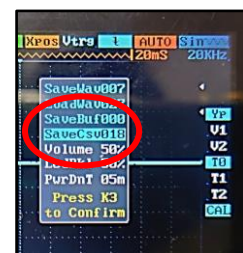
- (2). 第一次測就量到 11.2 伏特，果然有用！



## 5. 使用「示波器」收集電壓數據 - 可行

- (1). 測量時可以用儲存數據的功能，把測到的數據存成 Excel 檔。

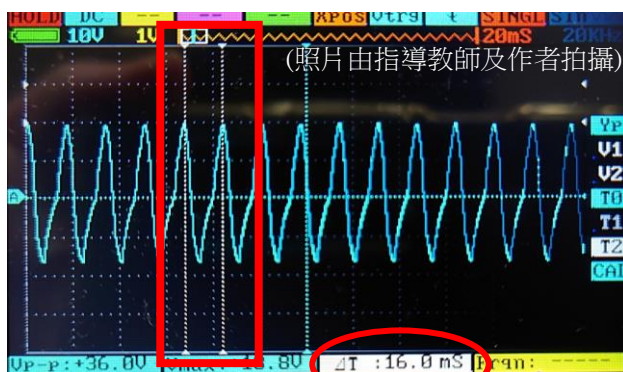
**【發現問題】**：每存一次檔案會有 **4096 筆資料**，這些資料是多久時間內的資料呢？這關係到我們計算「固定時間內放電次數」，非常重要！查詢使用手冊並沒有相關說明。



(照片由指導教師及作者拍攝)

- (2). 後來發現用手摸測量電極會出現穩定的波形，我們就想如果可以知道這個波形兩個高峰之間的時間和資料數量，就可以算出 4096 筆資料是經過多少時間。

- (3). 這台機器可以設定兩條時間線的位置，顯示其中的時間。右圖可以看到，把兩條白虛線對準兩個最高峰的地方（紅方框），下方就顯示這兩者之間是 16ms（毫秒，紅橢圓框）



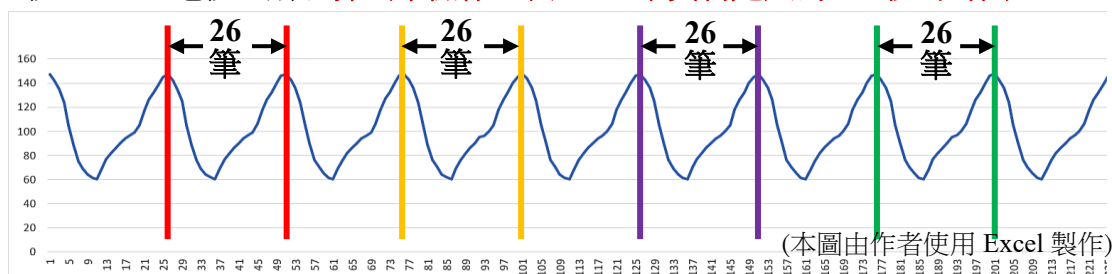
(照片由指導教師及作者拍攝)

- (4). 接著再對照 Excel 上的檔案，計算兩個高峰之間有幾筆資料。結果發現兩個高峰之間有 26 筆資料，找了 10 個地方

都是這樣的結果。而且第 1 筆和第 4096 筆資料都是高峰，所以：

$4096 \div 26 = 157.5$ （代表有 157.5 個間格）； $16 \times 157.5 = 2520\text{ms}$ （總共 2520 毫秒）

1 秒 = 1000 毫秒，所以算出來儲存一次 4096 筆資料是大約 2.5 秒的時間。



(本圖由作者使用 Excel 製作)

## 6. 「示波器」存檔的數據轉換成電壓

- (1). 在分析存檔數據時發現，明明在示波器上看到的伏特數都在 50V 以內，但是存檔出來的數據都是 100 以上，代表機器有他自己的數據的意義。
- (2). 所以我們進行了以下的換算：

- 什麼都不接的基準數值：99.54（4096 筆資料平均，數值中有 99、100）
- 接 2.95 V 電池的數值：106.33（4096 筆資料平均，數值中有 106、107）
- 接 9.27 V 電池的數值：121.44（4096 筆資料平均，數值中有 121、122）

伏特數的倍率

- $9.27 \div 2.95 = 3.14$
- 倍率為 3.14 倍

	示波器數值
什麼都不接	99.54
接 2.95V	106.33
接 9.27V	121.44

示波器數值倍率  
(先減去基礎數值，再算倍率)

- $(121.44 - 99.54) \div (106.33 - 99.54) = 3.22$
- 倍率為 3.22 倍

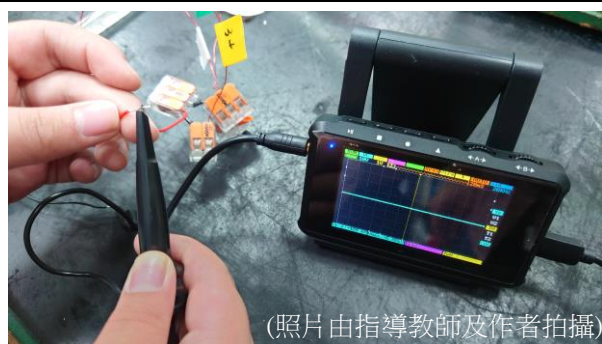
兩者倍率只有誤差 2.48%，所以之後可以利用「什麼都不接的基準數值」和「2.95 V 電池的數值」進行比較，把示波器的存檔數值換算成電壓(V)。



(3). 例如示波器數值為 124，代表的電壓為 10.63 V，計算方法如下：  

$$(124-99.54) \div (106.33-99.54) \times 2.95 = 10.63$$
，可以用 Excel 幫我們快速計算！

#### 四、制定測量的標準流程



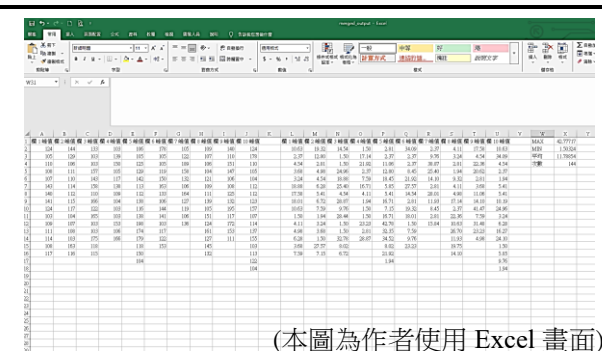
(照片由指導教師及作者拍攝)



(照片由指導教師及作者拍攝)

(1). 設置好【液滴摩擦發電模組】並接上【示波器】測電壓。

(2). 每次實驗【示波器】開始測量後，**隨機按下 10 次存檔按鈕，代表測 10 次。**



(本圖為作者使用 Excel 畫面)



(本圖為作者使用 Excel 畫面)

(3). 利用 Excel 找出這 10 次資料中，找出每次**高峰的頂端數值**，也就是「放電瞬間電壓」，並且**只篩選出大於 1.5V 的**。

(4). 分析資料，紀錄每個實驗的：①最大電壓、②平均電壓、③放電頻率(每分鐘放電次數)、④**每分鐘總電壓變化量**。

1. 因為【液滴摩擦發電模組】發電原理是：累積電荷後再瞬間放出，發電時間不固定，所以**為了公平，我們每次實驗都隨機按下 10 次存檔按鈕代表進行 10 次隨機測試**。
2. 因為我們最後設定「至少要能充 1.5V 的電池」，所以**只記錄大於 1.5V 的發電情形**。
3. 我們不僅需要**電壓越大越好，發電頻率越高**也很重要，所以最後的比較是用【**平均電壓 × 放電頻率**】，算出來的數值命名為【**每分鐘總電壓變化量**】，用它來**幫我們選出【液滴摩擦發電模組】最佳設置條件**！

### 【研究二】不同情況對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響

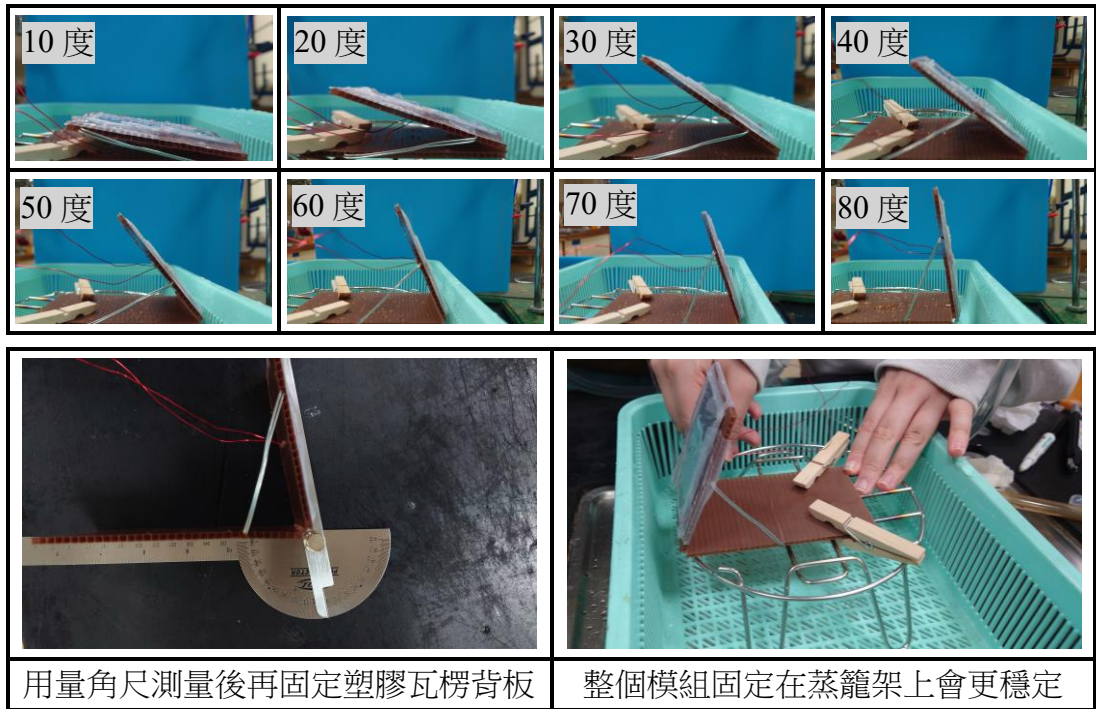
#### 一、【液滴摩擦發電模組】不同傾斜角度，對發電情形的影響

我們想要知道液滴和【液滴摩擦發電模組】接觸的最佳角度是多少，因為太平緩液滴可能會無法流動無法發電；太陡峭液滴可能會無法有效持續接觸表面。

##### 1. 實驗方法：

- (1). 設定【液滴摩擦發電模組】與水平面夾角角度為 10 度 ~ 80 度，每改變 10 度進行一次實驗。所有角度都用量角尺測量後，再把塑膠瓦楞板固定。

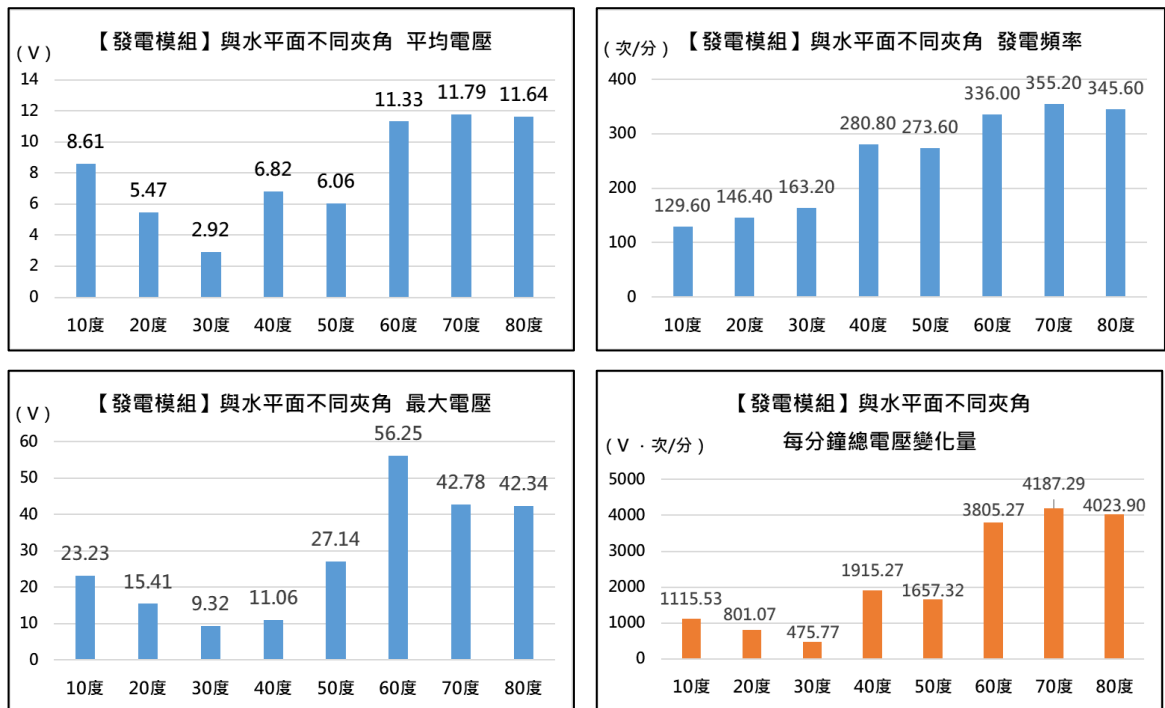
(照片由指導教師及作者拍攝)



(2). 液滴滴落高度為 40 公分、推針筒的電壓設定 2.5 V (每 10 秒滴落 53 滴)。

## 2. 實驗結果

(本圖由作者使用 Excel 製作)



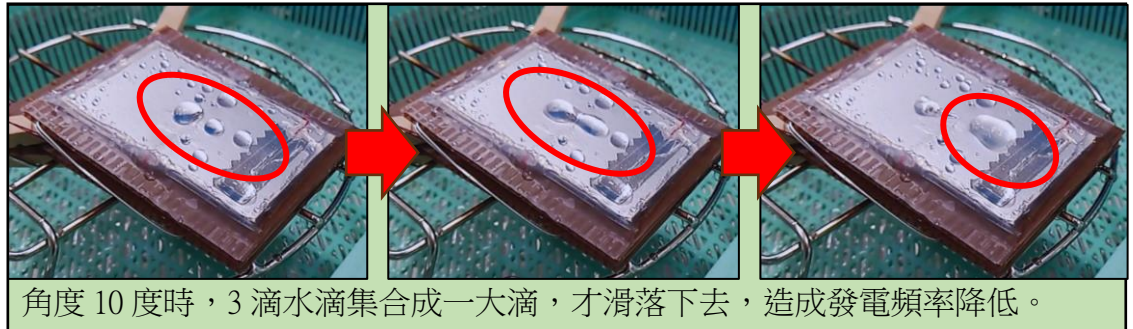
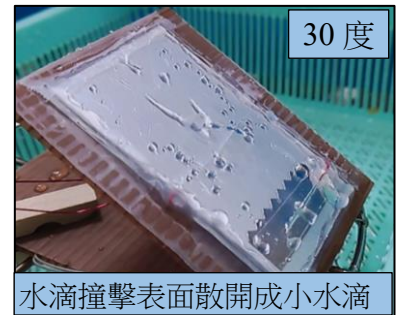
## 3. 實驗討論

- (1). 平均電壓排名：**70 度** > 80 度 > 60 度 > 10 度 > 40 度 > 50 度 > 20 度 > **30 度**
- (2). 發電頻率排名：**70 度** > 80 度 > 60 度 > 40 度 > 50 度 > 30 度 > 20 度 > **10 度**
- (3). **平均電壓**超過 10V 的有 60 度、70 度、80 度，其中**最高的是 70 度**。因為這三者都**可以讓水滴完整順利從頭到尾滑落**，所以這三個角度的發電頻率也是前三名。



(照片由指導教師及作者拍攝)

- (4). 平均電壓低於 6V 的有 20 度、30 度、50 度，40 度也只有 6.8V。推測原因為：這四者角度較平，水滴滴到表面後撞擊散開噴到別的地方，只有小水滴流下。
- (5). 角度 10 度的平均電壓竟然高於 8V，因為表面角度真的太平了，很多滴水滴會聚集後才一大滴滑落，所以平均電壓才升高，但是也造成發電頻率最低！



- (6). 所以最後我們選擇「平均電壓」、「發電頻率」都是最高的【與水平面夾角 70 度】，當作【液滴摩擦發電模組】裝設的條件。之後實驗都以角度 70 度進行實驗。

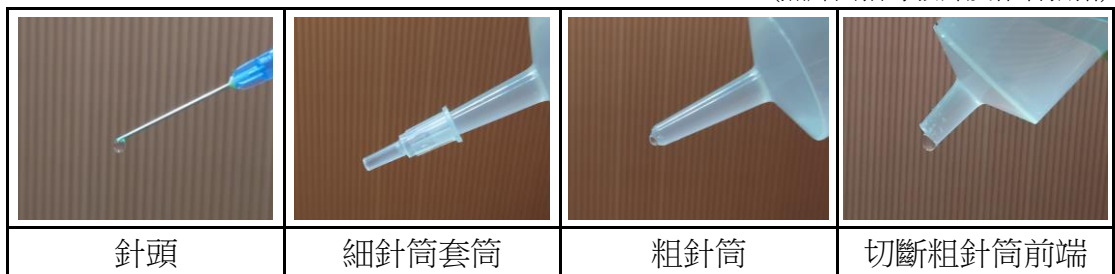
## 二、不同液滴直徑對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響

既然「液滴」是提供電子的來源，所以我們想要知道液滴本身大小是否會影響發電情形。

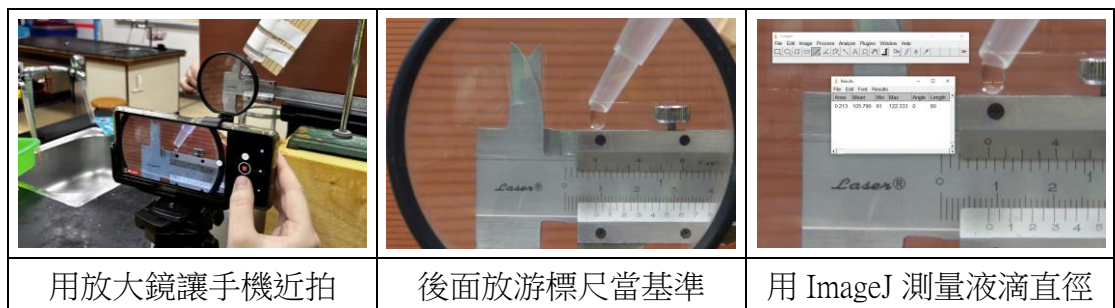
### 1. 實驗方法：

- (1). 從以前的科展作品可以知道，不同的孔洞大小可以改變液滴的直徑。
- (2). 所以我們把針筒孔洞分成以下四種大小

(照片由指導教師及作者拍攝)



- (3). 把針筒和游標尺架設成如下圖，錄影、照相後用軟體 ImageJ 進行液滴直徑測量



液滴直徑：

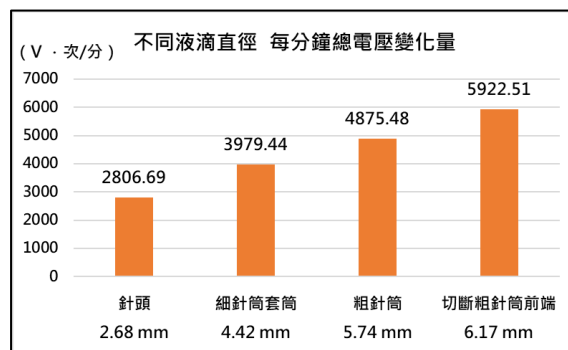
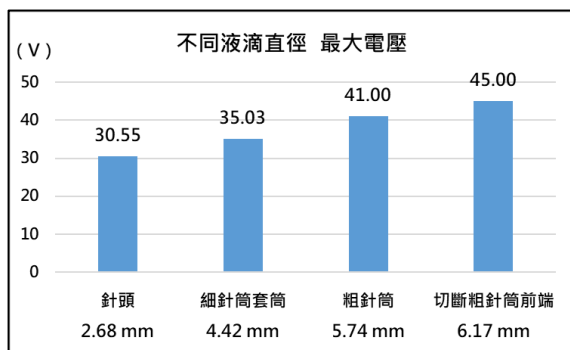
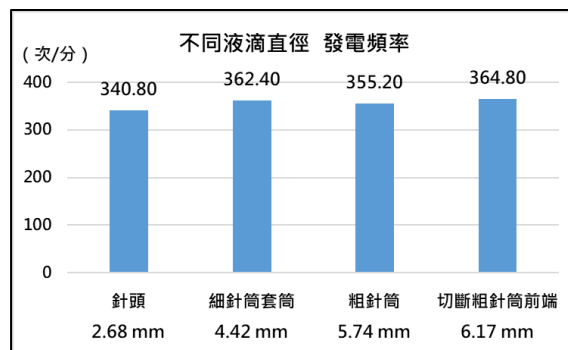
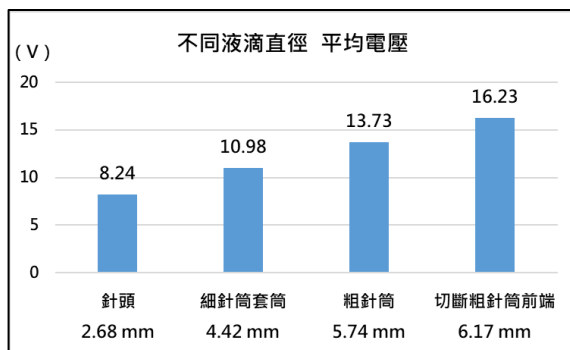
(照片由指導教師及作者拍攝)

針頭 2.68 mm；細針筒套筒 4.42 mm；粗針筒 5.74 mm；切斷粗針筒前端 6.17 mm

- (4). 發電模組角度 70 度、滴落高度為 40 公分、推針筒的電壓設定 2.5 V(每 10 秒 53 滴)

## 2. 實驗結果

(本圖由作者使用 Excel 製作)

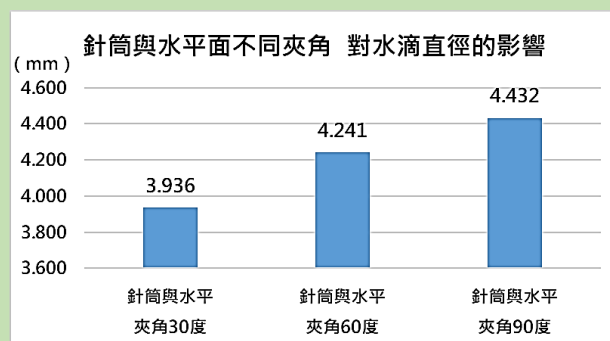


## 3. 實驗討論

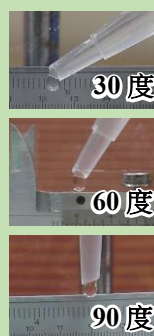
- (1). 推針筒時如果用相同的電壓，越細的孔洞滴落速度會越快，所以這 4 種不同大小孔洞的推針筒電壓有進行調整，讓它們的滴速控制在每 10 秒 50 ~ 53 滴之間。
- (2). 發電頻率四種不同孔洞差異不大，最多只有相差 6.6%。
- (3). 平均電壓排名：切斷粗針筒前端 > 粗針筒 > 細針筒套筒 > 針頭
- (4). 每分鐘總電壓變化量排名：切斷粗針筒前端 > 粗針筒 > 細針筒套筒 > 針頭
- (5). 水滴越大，「平均電壓」、「每分鐘總電壓變化量」越高。推測原因為：較大的水滴含有越多電子，這跟我們查到的資料「第 58 屆全國科展-國中物理-電場下的極限運動-水滴帶電量之探討：水滴的帶電量與其表面積成正比」，結果相符合。
- (6). 而且較大的水滴，和 FEP 的接觸面積也越大，推測可以轉移更多的電子，才会有水滴越大，「平均電壓」、「每分鐘總電壓變化量」越高的結果。

### 【特別注意：針筒與水平面不同夾角對水滴直徑的影響】

液體是因為【表面張力和與針筒出口邊緣的附著力】和【重力】對抗，才慢慢形成液滴，最後因為液滴重量越來越大才滴下來。我們推測針筒傾斜不同角度可能會影響液滴大小，所以把針筒放置與水平面夾角 30 度、60 度、90 度，進行液滴大小測量。



(本圖由作者使用 Excel 製作)



實驗結果發現，針筒不同傾斜角度會影響水滴直徑！

所以我們之後的實驗，都要固定【可控式液滴滴落系統】的傾斜角度。

(照片由指導教師及作者拍攝)



### 三、不同滴落高度對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響

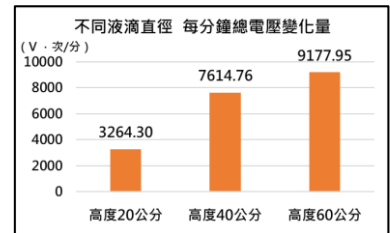
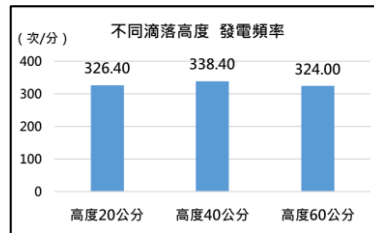
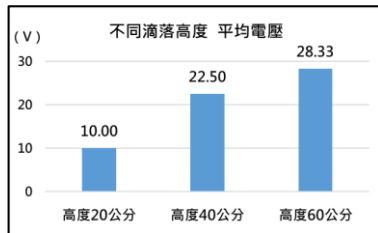
我們都是用自己的滴落系統進行實驗，但是雨滴從空中掉下來時撞擊力量會更強，我們想知道這樣的情況是否會影響發電情形。

#### 1. 實驗方法：

- (1). 用木箱把【可控式液滴滴落系統】架高。
- (2). 高度計算方式為：針筒前端到【液滴摩擦發電模組】的上方邊緣。共分成三種高度：20 公分、40 公分、60 公分。
- (3). 發電模組角度 70 度、液滴直徑 6.17 mm、推針筒的電壓設定 2.5 V(每 10 秒 53 滴)



#### 2. 實驗結果



(本圖由作者使用 Excel 製作)

#### 3. 實驗討論

- (1). 發電頻率三種不同滴落高度差異不大，最多差 4.4%。
- (2). 平均電壓排名：高度 60 公分 > 高度 40 公分 > 高度 20 公分
- (3). 每分鐘總電壓變化量排名：高度 60 公分 > 高度 40 公分 > 高度 20 公分
- (4). 滴落高度越高，「平均電壓」、「每分鐘總電壓變化量」越高。推測原因為：較高處滴落，撞擊力量較大造成兩種可能：①液滴會被攤開較大的面積，②撞擊產生較多的能量。我們認為這兩個原因造成電子轉移更多、靜電更強。
- (5). 為了證實想法，我們上網搜尋相關研究：
  - ①液滴會被攤開較大的面積：第 45 屆全國科展-國小組自然科-靜觀其電，證明「摩擦面積愈大，產生的靜電愈強」。
  - ②撞擊產生較多的能量：2015 年臺灣國際科學展覽會-探討鉻鋼球碰撞的力與能量，證明「撞擊物高度越高，白紙燒焦的面積越大」，撞擊力會轉換成熱能。

### 四、不同滴落頻率對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響

既然我們發的電是由水滴轉移過來的，那水滴滴落的頻率越高，是否能增加發電效果呢？

#### 1. 實驗方法：

(照片由指導教師及作者拍攝)

- (1). 用我們自己設計、製作的【可控式液滴滴落系統】，調整不同的滴落頻率(P.8)：

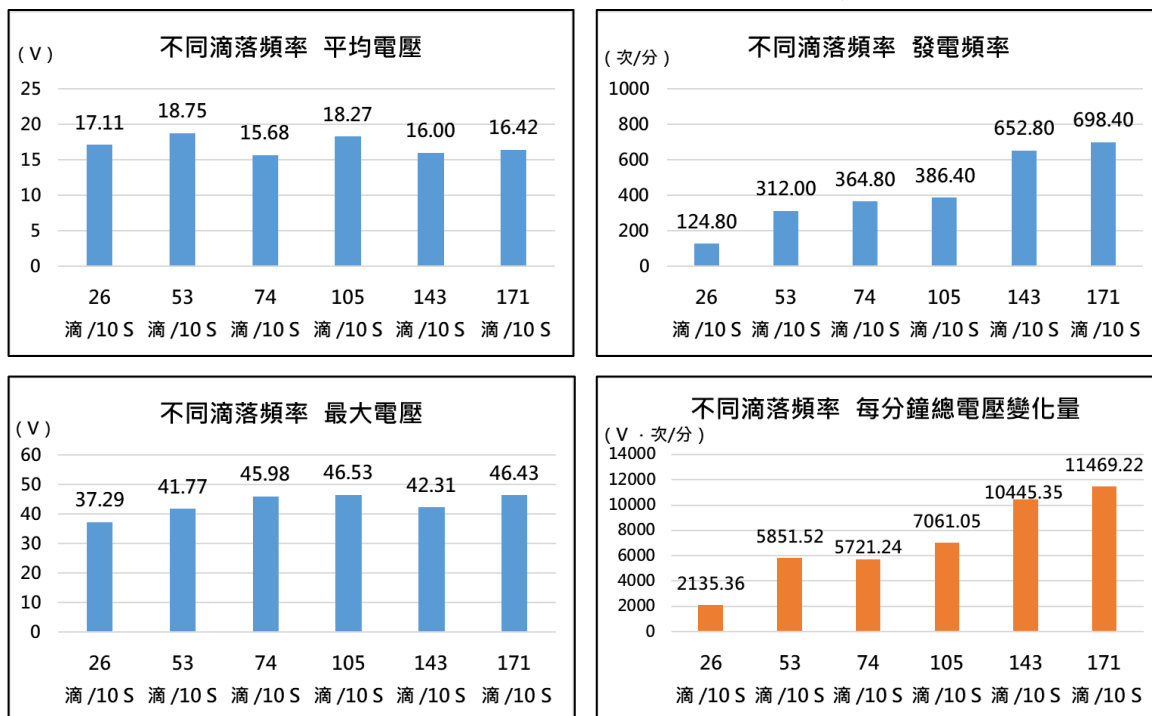
電壓(V)	1.9 V	2.5 V	2.9 V	3.1 V	3.3 V	3.5 V
每 10 秒滴數	26 滴	53 滴	74 滴	105 滴	143 滴	171 滴

- (2). 模組角度 70 度、液滴滴落高度為 40 公分、液滴直徑 6.17 mm。



## 2. 實驗結果

(本圖由作者使用 Excel 製作)



## 3. 實驗討論

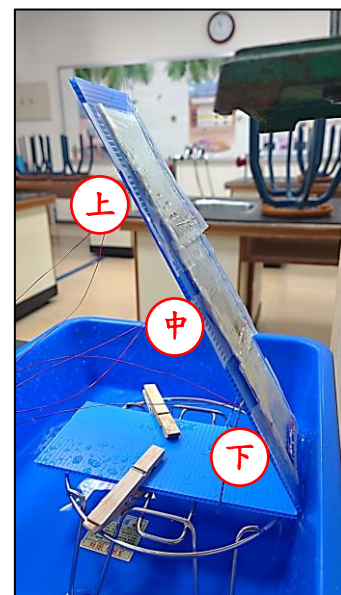
- (1). **平均電壓排名**：53(滴/10S) > 105(滴/10S) > 26(滴/10S) > 171(滴/10S) > 143(滴/10S) > 74(滴/10S)  
最大與最小相差 3.07V (16.38%)，平均電壓和滴落頻率之間**沒有明顯的正相關**。
- (2). **發電頻率排名**：**171(滴/10S)** > 143(滴/10S) > 105(滴/10S) > 74(滴/10S) > 53(滴/10S) > 26(滴/10S)
- (3). **每分鐘總電壓變化量排名**：  
**171(滴/10S)** > 143(滴/10S) > 105(滴/10S) > 53(滴/10S) > 74(滴/10S) > 26(滴/10S)
- (4). **滴落頻率越高，「發電頻率」、「每分鐘總電壓變化量」越高**。推測原因為：我們的發電原理是靠液滴上的電子移動到 FEP 上後，**每滴液滴通過鋁箔電極時都會放電**，所以**滴落頻率越高，液滴通過鋁箔電極頻率也越高，發電頻率被明顯提高**。
- (5). 但是「**增加滴落頻率並不會提高平均電壓**」，因為「液滴大小」、「撞擊高度」、「撞擊角度」這些發電條件都保持相同。

## 五、同一滴液滴是否可連續讓不同的【液滴摩擦發電模組】進行發電

我們的電是從液滴上轉移過來的，因為滑落速度很快，液滴滑過每片 FEP 會轉移全部的電子，還是有剩下的電子轉移到另一片 FEP 上？這結果關係到我們最後成品上，每片 FEP 的擺放方式。

### 1. 實驗方法：

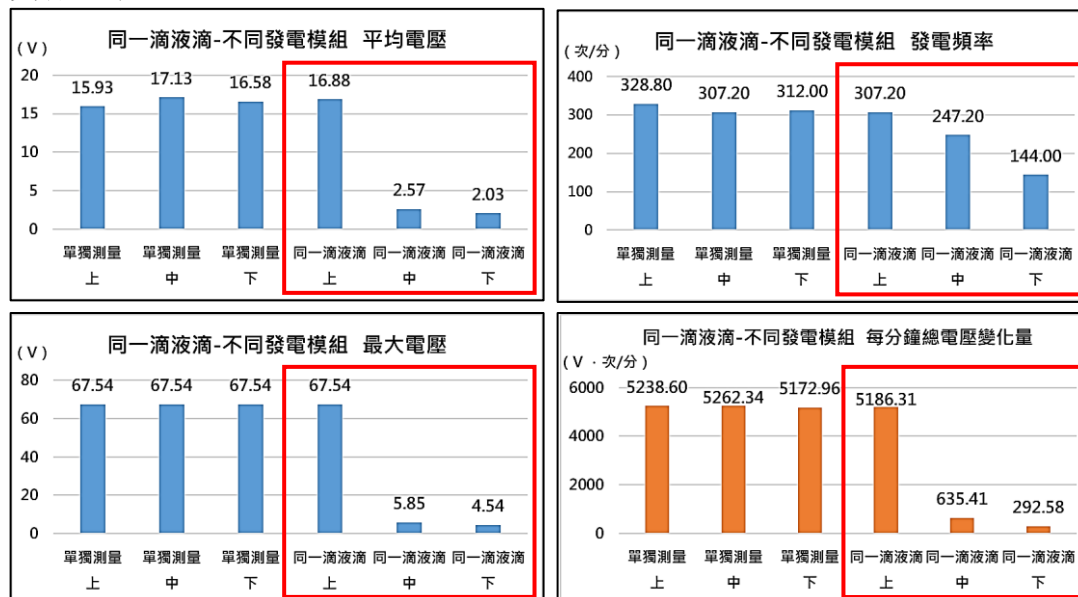
- (1). 用三組【液滴摩擦發電模組】垂直組裝在一起，一組下方邊緣壓在另一組的上方邊緣，讓同一滴液滴可以流過三組【液滴摩擦發電模組】。
- (2). 我們**先分別單獨測量這三組的【液滴摩擦發電模組】**，**確認它們的發電效果相近，確保公平**。



(照片由指導教師及作者拍攝)

- (3). 發電模組角度 70 度、滴落高度為 40 公分、液滴直徑 6.17 mm、推針筒的電壓設定 2.5 V (每 10 秒滴落 53 滴)。

## 2. 實驗結果：



(本圖由作者使用 Excel 製作)

## 3. 實驗討論

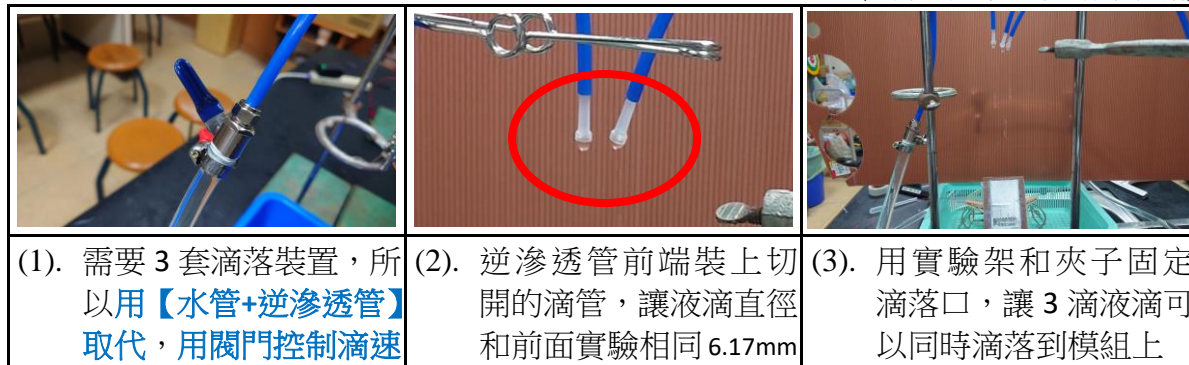
- (1). **單獨測量時**，上、中、下三組【液滴摩擦發電模組】它們的平均電壓(最多差 5.9%)、發電頻率(最多差 6.7%)、最大電壓(都相同)、每分鐘總電壓變化量(最多差 1.7%)的差異都不大，代表**它們的發電效果相近**。
- (2). **用同一滴液滴測量時**：  
 平均電壓排名：**上** > 中 > 下。**上、中相差 6.57 倍**；中、下相差 1.27 倍。  
 發電頻率排名：**上** > 中 > 下。上、中相差 1.24 倍；中、下相差 1.72 倍。  
 每分鐘總電壓變化量排名：**上** > 中 > 下。**上、中相差 8.16 倍**；中、下相差 2.17 倍。
- (3). 可以推測兩個原因：①液滴在遇到第一組【液滴摩擦發電模組】就轉移了大部分的電子；②液滴沒有撞擊「中、下兩組」提供電子轉移的能量。所以導致「上方那組」在平均電壓、最大電壓、每分鐘總電壓都比「中、下兩組」大很多！
- (4). 所以未來在**打造多組【液滴摩擦發電模組】時，用過的液滴不可再流到另一組**。

## 六、同時滴落不同液滴數量對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響

我們證明了同一滴液滴不可以重複再用來發電，那同時有多滴液滴、滴落在同一組【液滴摩擦發電模組】上，會不會影響發電呢？因為下雨時雨滴是很多滴一起下來的。

### 1. 實驗方法：

(照片由指導教師及作者拍攝)

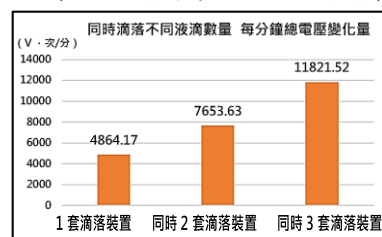
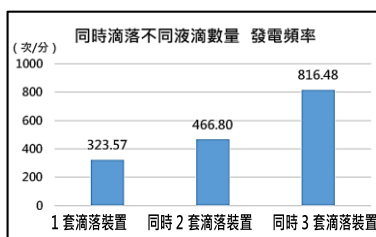
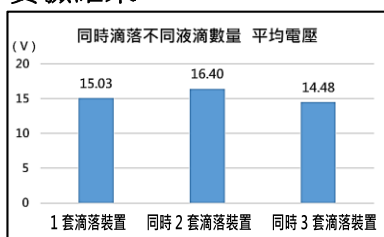




- (4). 實驗分為三項：1 套滴落裝置+1 組【液滴摩擦發電模組】、同時 2 套滴落裝置+1 組【液滴摩擦發電模組】、同時 3 套滴落裝置+1 組【液滴摩擦發電模組】。
- (5). 發電模組角度 70 度、滴落高度為 40 公分、液滴直徑 6.17 mm、滴速為每 10 秒滴落 53 滴（用水龍頭和閥門同時控制，用手機慢速攝影確認）。

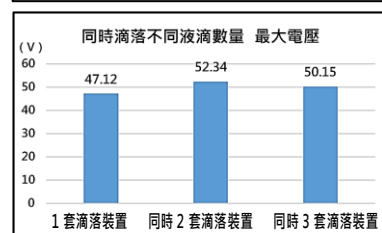
## 2. 實驗結果：

(本圖由作者使用 Excel 製作)



## 3. 實驗討論

- (1). **平均電壓排名**：同時 2 套滴落裝置 > 同時 3 套滴落裝置 > 1 套滴落裝置。  
最大與最小相差 1.92V (13.24%)，**平均電壓和液滴數量之間沒有明顯的正相關**。
- (2). **發電頻率排名**：**同時 3 套滴落裝置** > 同時 2 套滴落裝置 > 1 套滴落裝置。
- (3). **每分鐘總電壓變化量排名**：  
**同時 3 套滴落裝置** > 同時 2 套滴落裝置 > 1 套滴落裝置。
- (4). **同時滴落的液滴數量越多，「發電頻率」、「每分鐘總電壓變化量」越高**。推測原因為：我們的發電原理是靠液滴上的電子移動到 FEP 上後，**每滴液滴通過鋁箔電極時都會放電**，所以**同時越多液滴滴落，液滴通過鋁箔電極頻率也越高，發電頻率被明顯提高**。
- (5). 但是**增加「同時滴落液滴數量」並不會提高平均電壓**，因為「液滴大小」、「撞擊高度」、「撞擊角度」這些發電條件都保持相同。



## 七、不同液滴導電度對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響

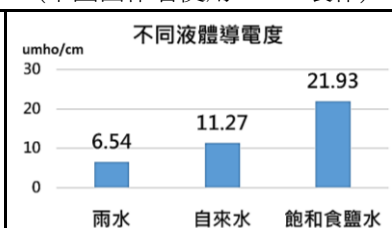
除了用雨滴發電，我們也想把它用在會產生液滴的地方（瀑布、海洋），但是不同的液體裡面含有的成分也不同。我們有學過會導電的水溶液（電解液），所以就想液體的導電度會不會影響【液滴摩擦發電模組】的發電情形，因為都是跟電子的移動有關。



### 1. 實驗方法：

(照片由指導教師及作者拍攝)

(本圖由作者使用 Excel 製作)



(1). 查詢資料得知到，測量液體電阻的兩根電極距離為 1 公分。

(2). 收集雨水、自來水、飽和鹽水，用三用電表測量它們的電阻值。

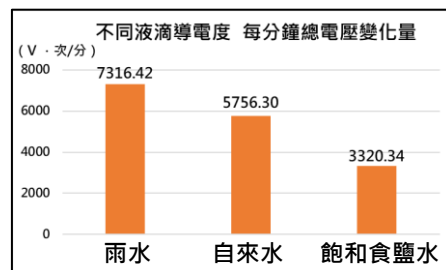
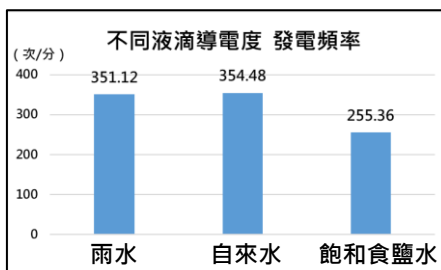
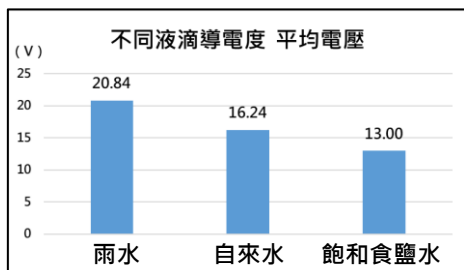
(3). **導電度單位為姆歐，是電阻值的倒數**，我們就用這個標準進行比較。

(4). 實驗分為 3 種液體：雨水、自來水、飽和食鹽水。

(5). 發電模組角度 70 度、滴落高度為 40 公分、液滴直徑 6.17 mm、推針筒的電壓設定 2.5 V (每 10 秒滴落 53 滴)。

## 2. 實驗結果：

(本圖由作者使用 Excel 製作)



## 3. 實驗討論

(1). 不同液滴導電度：飽和食鹽水 (21.93) > 自來水 (11.27) > 雨水 (6.54)

(2). 平均電壓排名：雨水 > 自來水 > 飽和食鹽水。

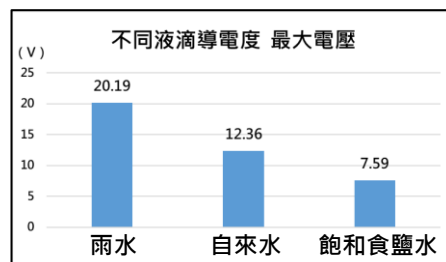
雨水和自來水相差 4.6V (22.07%)；平均電壓和液滴

導電度之間有明顯的負相關 (液滴導電度越大，但是平均電壓卻越小)。

(3). 發電頻率排名：自來水 > 雨水 > 飽和食鹽水。自來水和雨水差異很小，只有相差 0.94%。但是自來水和飽和時鹽水卻相差 27.96%。

(4). 每分鐘總電壓變化量排名：雨水 > 自來水 > 飽和食鹽水。

(5). 液滴的導電度越大，「平均電壓」、「每分鐘總電壓變化量」越小。推測原因為：食鹽水是一種含有電解質的水溶液，食鹽溶於水中會變成離子 ( $\text{Na}^+$ ;  $\text{Cl}^-$ )，因為這些離子的移動，讓電子能夠在食鹽水被傳遞，形成電流。所以我們推測，食鹽水中的離子會對電子的移動造成影響，所以鹽水液滴中的電子無法順利轉移到 FEP 上，導致「平均電壓」、「發電頻率」下降。

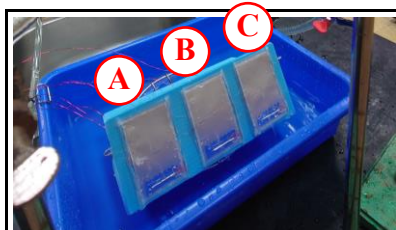


## 八、【液滴摩擦發電模組】串聯、並聯對發電情形的影響

每組【液滴摩擦發電模組】就相當於一顆電池，把它們串、並聯是否對發電會造成影響。

### 1. 實驗方法：

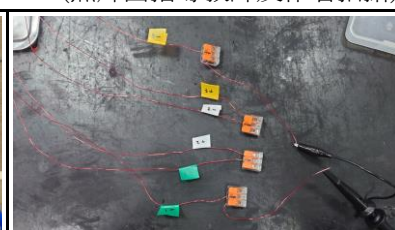
(照片由指導教師及作者拍攝)



(1). 製作三組【液滴摩擦發電模組】貼在塑膠板上。



(2). 用水平儀確認 3 個滴水口的高度相同。



(3). 分別將漆包線串聯、並聯，進行實驗收集數據。

#### (4). ⚠️ 發現問題！但是剛好拿來當作狀況測試 ⚠️

先單獨測量這三組【發電模組】，確認它們的發電效果相近。但是發現其中一組的平均電壓竟然低於其他兩組相差 **70.54%**。檢查發現 C 發電模組側邊熱熔膠沒黏好，漏水到鋁箔膠帶那面，這樣累積的電子就不一定會沿著漆包線流通，導致電壓降低。但是這樣剛好可以讓我們測試未來多組【液滴摩擦發電模組】同時發電時，如果有其中一組出問題，哪種連接方式（串聯 or 並聯）比較不會受到影響。



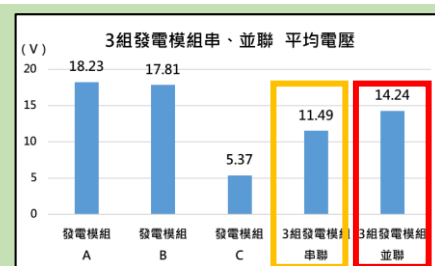
(5). 發電模組角度 70 度、滴落高度為 40 公分、液滴直徑 6.17 mm、滴速為每 10 秒滴落 53 滴（用水龍頭和閥門同時控制，用手機慢速攝影確認）。

## 2. 實驗結果：

(本圖由作者使用 Excel 製作)

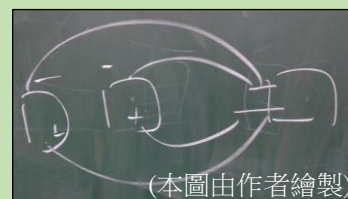
### ⚠️ 發現問題 ⚠️

(1). 三組【發電模組】串聯後平均電壓比較低（黃色框），這很正常。因為我們四年級學過電池的串聯和並聯，串聯時如果通路中有壞掉的部分，會影響整條通路。因為模組 C 本身電壓低，影響串聯後的電壓。



(2). 電池並聯時各自有獨立的通路，不會互相影響。但是為什麼三組【發電模組】並聯後（紅色框）平均電壓比模組 A、B 還要低呢？數值應該要接近才對，不合理！

(3). 討論很久後，老師突然想到了他生活上的經驗：當車子沒電要幫電瓶充電時，要把另一個【有電電瓶】和【沒電電瓶】的正極(+)接正極(+)，負極(-)接負極(-)。這不就剛好跟三組【發電模組】並聯電路圖相同嗎？



(本圖由作者繪製)

(4). 我們也嘗試把電池正接正、負接負，看是否真的能充電，結果真的可以。



(照片由指導教師及作者拍攝)

找到【發電模組】並聯但是平均電壓卻降低的原因了！

因為每個【發電模組】發電瞬間並不相同，所以電流會從【正在發電的模組(高電位)】流向【沒有發電的模組(低電位)】。

(5). 解決方法：在每個【發電模組】加裝二極體固定電流方向，但電壓減損 3.97%



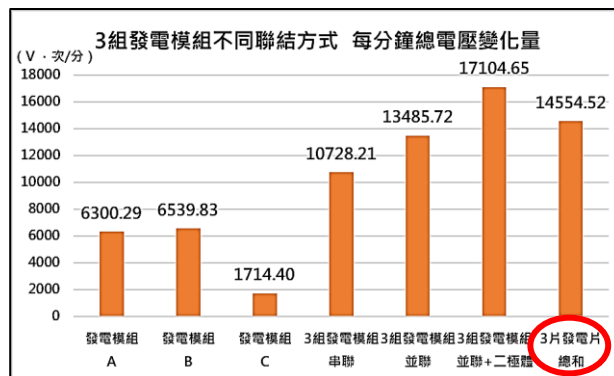
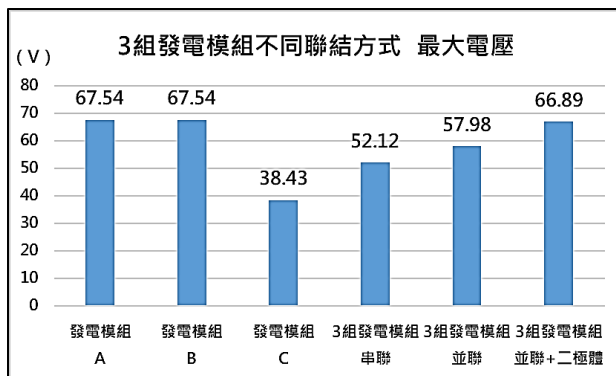
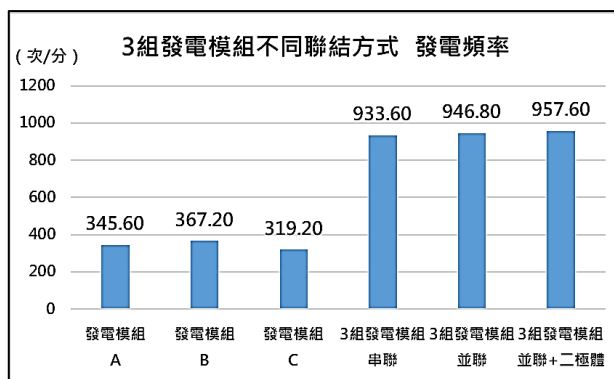
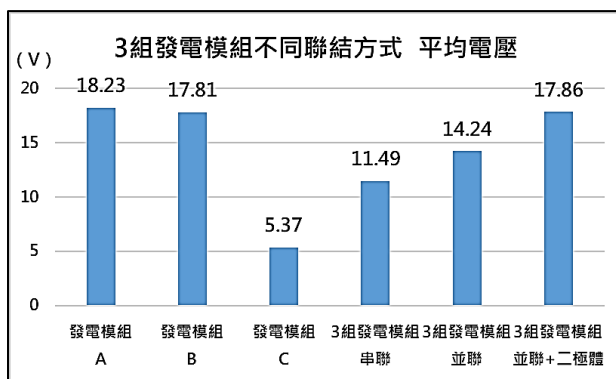
如果二極體方向接錯，電壓會從原本的 8.06V，變成只剩下 0.029V。

這時就要把二極體反過來接，電壓從原本的 8.06V，變成 7.74V，只減損了 3.97%。

在每個【發電模組】加裝二極體固定電流方向，讓電子只往示波器移動，不會流向其他模組。

(以上照片由指導教師及作者拍攝)





(本圖由作者使用 Excel 製作)

### 3. 實驗討論：

- (1). 【液滴摩擦發電模組】側面熱熔膠如果沒有封好漏水，導致鋁箔-FEP 直接連通，平均電壓就會下降，降低發電效果。
- (2). 平均電壓排名：**並聯+二極體** > 並聯 > 串聯。
  - 「加裝二極體的並聯」跟單個模組比較雖然會損耗 2.02% 的平均電壓，但是「不加裝二極體的並聯」的平均電壓會因為流向混亂而降低 21.89%。
  - 串聯因為只有一條通路，每個模組發電的時間沒有同步而互相干擾，所以跟單個模組比平均電壓會降低 36.97%。
- (3). 發電頻率排名：**並聯+二極體** > 並聯 > 串聯。  
但是這三者其實差異很小，最大和最小只有相差 2.51%。而且 3 組發電模組串聯、並聯的發電頻率，是單個模組的 2.58 ~ 3 倍。
- (4). 每分鐘總電壓變化量排名：**並聯+二極體** > 並聯 > 串聯。
- (5). 「3 組發電模組加裝二極體並聯」的每分鐘總電壓變化量，比單個發電模組 A、B、C 三者加總起來還要高。所以多個發電模組並聯才不會被單一模組故障而拖累。

### 九、【液滴摩擦發電模組】整體不同面積大小對發電情形的影響

從前面研究可以知道，並聯越多發電模組發電效果越好。所以我們想知道改變發電模組的面積會不會影響發電效果。如果能縮小面積而不影響發電，就可以並聯更多模組了。

#### 1. 實驗方法：

- (1). 實驗分為 4 種面積：原尺寸 (8cm x 5cm)、寬減半 (8cm x 2.5cm)、長減半 (4cm x 5cm)、長寬都減半 (4cm x 2.5cm)。
- (2). 因為減少面積等於同時間可接受的液滴變少，所以我們加入【同時滴落不同液滴數量】這個變因，一起進行比較。

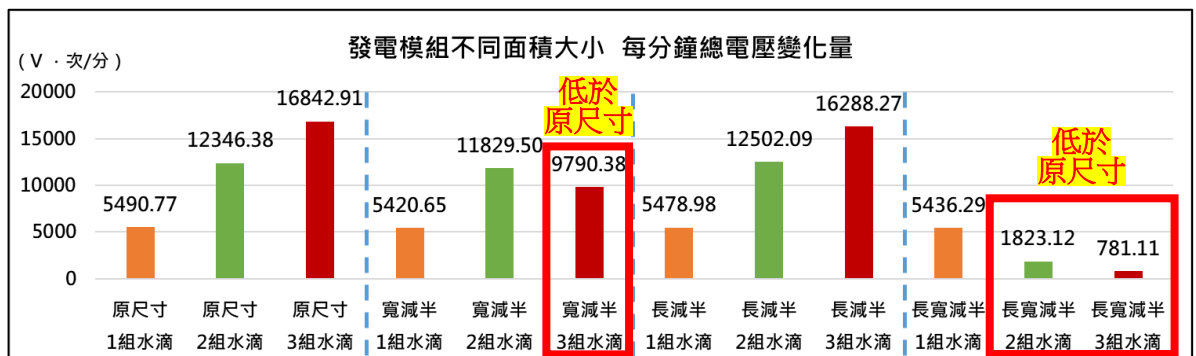
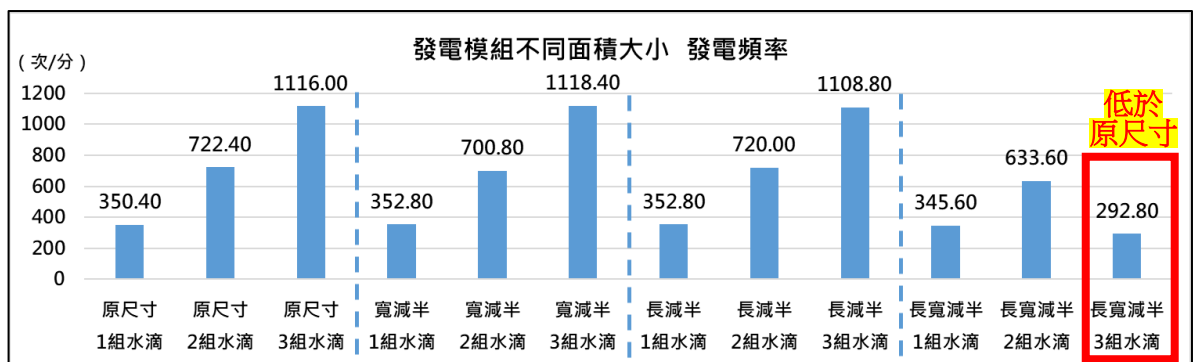
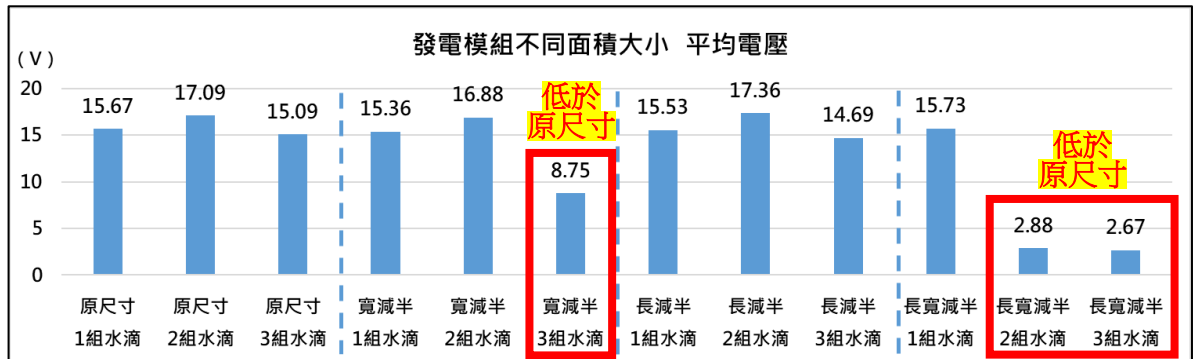


(照片由指導教師及作者拍攝)

- (3). 發電模組角度 70 度、滴落高度為 40 公分、液滴直徑 6.17 mm、滴速為每 10 秒滴落 53 滴（用水龍頭和閥門同時控制，用手機慢速攝影確認）。
- (4). 液滴出口的位置要擺放在：液滴能滴到發電模組表面。

## 2. 實驗結果：

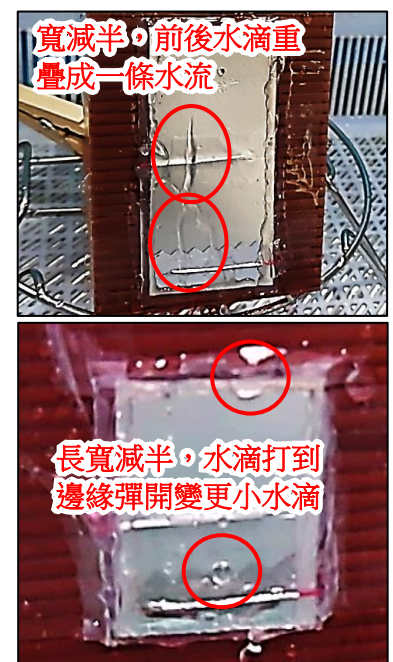
(本圖由作者使用 Excel 製作)



## 3. 實驗討論

### (1). 平均電壓：

- 「寬減半 3 組水滴」和原尺寸相比降低了大約 45%。因為寬減半，導致 3 組水滴會重疊成一條水流，**P.25 有實驗證明一條水流會降低發電效果。**
- 「長寬減半 2 組、3 組水滴」和原尺寸相比，分別降低了 83.16%、82.32%。因為面積太小，許多水滴會打到邊緣而彈開，沒有完整流過發電模組表面。
- 「長減半」所有項目和原尺寸相比最多只相差 2.67%，差異不大。



(以上照片由指導教師及作者拍攝)

(2). 發電頻率：

- 「寬減半」、「長減半」和原尺寸相比，最多只相差 2.67%，差異不大。
- 但是「長寬減半 2 組、3 組水滴」和原尺寸相比，因為面積太小，許多水滴會打到邊緣而彈開，所以分別降低了 12.29%、73.76%。

(3). 每分鐘總電壓變化量：

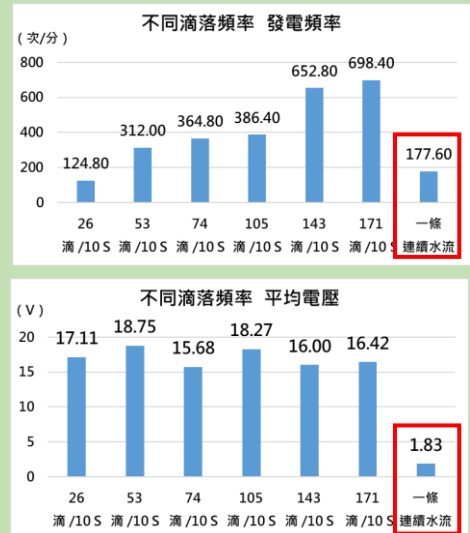
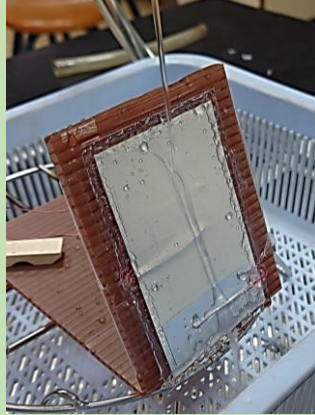
- 「長減半」和原尺寸相比，最多只降低 3.29%，差異不大。
- 但是「寬減半」、「長寬減半」和原尺寸相比，最多分別降低了 41.87%、95.36%。

(4). 所以面積減半但發電數值與原尺寸最相近的是「長減半」。就算因此每分鐘總電壓變化量降低了 3.29%，但是並聯數量多一點，就能降低有模組損壞時所佔的比例，所以最後【發電模組】尺寸為：長 4cm、寬 5cm。

### ⚠重要發現！連成一條線的水流會降低發電效果

從實驗結果可以發現，當一條連續不斷的水流流過發電模組，平均電壓大幅度降低了 90.23%。發電頻率介於 26 滴/10S、53 滴/10S 之間。所以要讓發電效果好，水滴必須一滴一滴的流過，不可以連成一直線。推測原因：P.3 介紹的摩擦發電，兩片不同物質必須要碰觸、分開，才能不斷發電。當水流不斷接觸發電模組表面沒有中斷，就好像摩擦發電的兩片物質一直碰在一起沒有分開，無法發電！

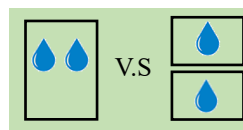
(照片由指導教師及作者拍攝)



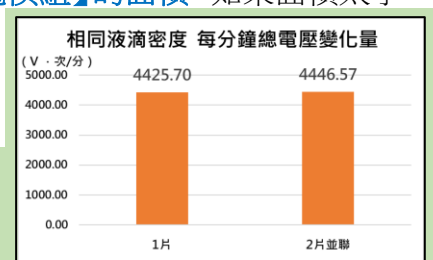
(以上圖片由作者使用 Excel 製作)

## 十、總結各項實驗結果，找出最佳設置條件

1. 【液滴摩擦發電模組】與水平面夾角 70 度。
2. 液滴直徑越大越好、掉落高度越高越好、滴落頻率越大越好。這些都是讓液滴上的電子更大量的移動到 FEP 上的方法。
3. 【液滴摩擦發電模組】必須架高且分開，讓同一滴液滴不會流過 1 片以上的發電模組。
4. 同時滴落的液滴越多越好，但是要注意【液滴摩擦發電模組】的面積。如果面積太小、液滴數量太多，發電效果會降低！
5. 如右圖所示，在發電模組不損壞、相同液滴密度的情況下，「原尺寸+2 液滴」和兩組「半面積+1 液滴」並聯，發電效果差異不大。
6. 液滴導電度越低，發電效果越好。但是還需要測量其他不同液滴的導電度(海水、河流、湖泊…等)，才知道【液滴摩擦發電模組】還能運用在哪些地方(海浪、瀑布)。
7. 多個【液滴摩擦發電模組】要並聯且加裝二極體，才不會被單一模組故障而拖累。



(以上圖片由作者使用 Excel 製作)



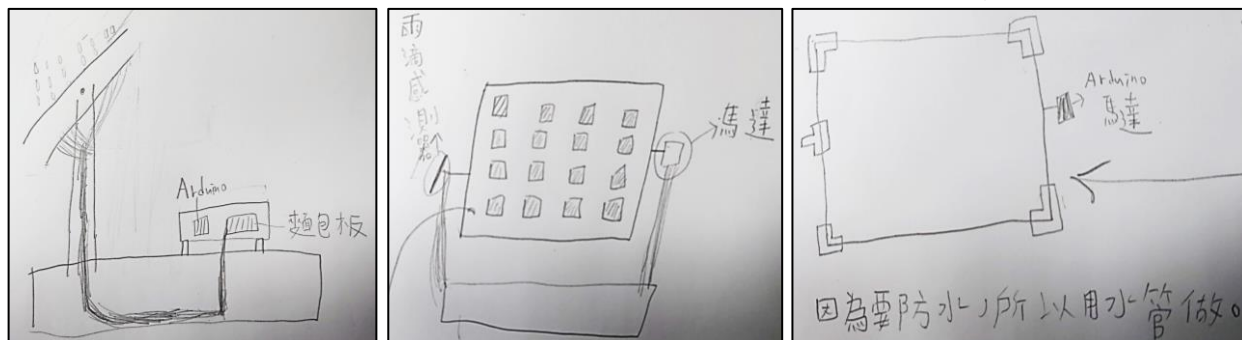


### 【研究三】利用 Arduino 與雨滴感測器設計【晴、雨發電轉換系統】

- 一、我們根據【研究二】的結果，找出【液滴摩擦發電模組】最佳設置條件，進行設計。
- 二、我們的研究主要重點在【液滴摩擦發電模組】和【晴、雨發電轉換系統】。關於太陽能板的發電，過去有許多作品已經實際做出追日系統，未來可直接結合應用，所以這次就沒有進行探討，最後成品太陽能板的部分就用照片黏貼表示。

#### 三、討論設計：

(本項次圖案由作者繪製)



#### 四、實際製作：

(以下照片由指導教師拍攝)



#### 五、最後成品：晴雨兩用綠能發電裝置

##### 【晴天狀態】



太陽能板朝上，可搭配追日系統進行發電。

偵測到雨滴，盤面翻轉 110 度，讓「液滴摩擦發電模組」和水平面夾角 70 度，進行發電。

如果偵測不到雨滴，5 秒後會再翻轉回太陽能板，進行發電

##### 【雨天狀態】

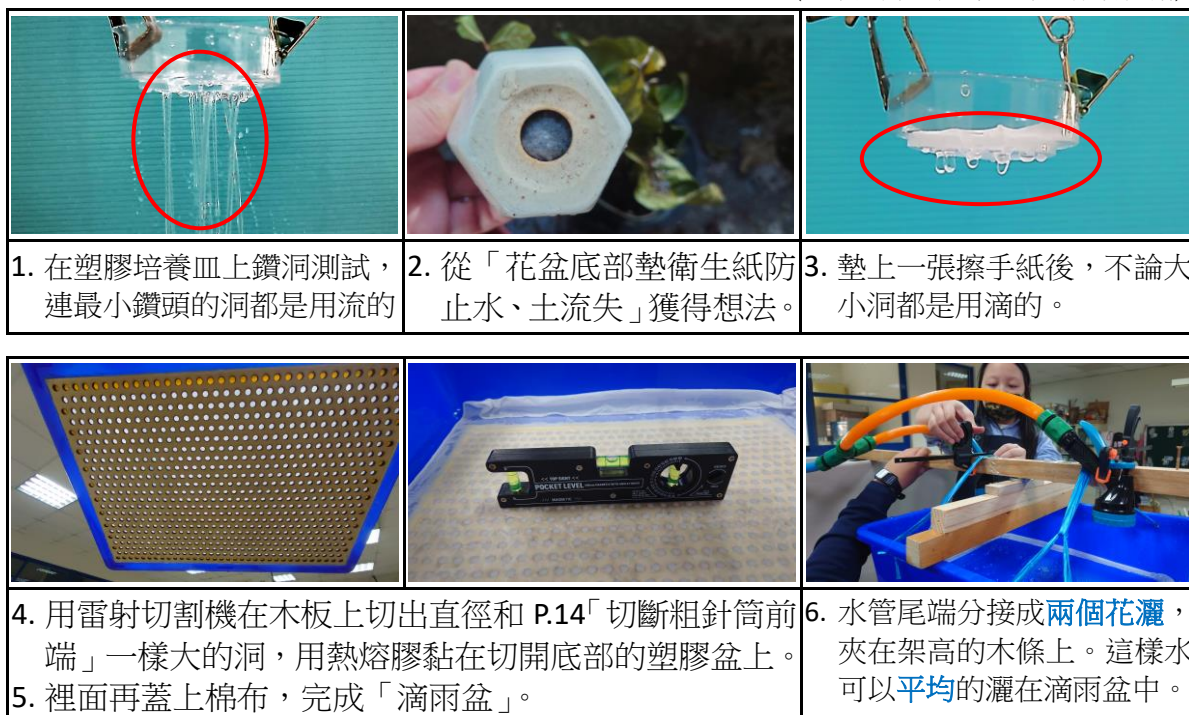


(照片由指導教師及作者拍攝)

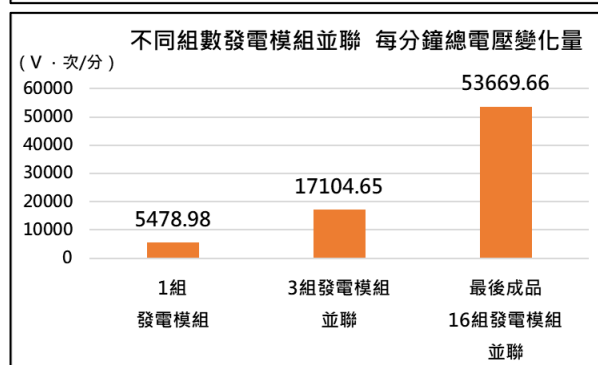
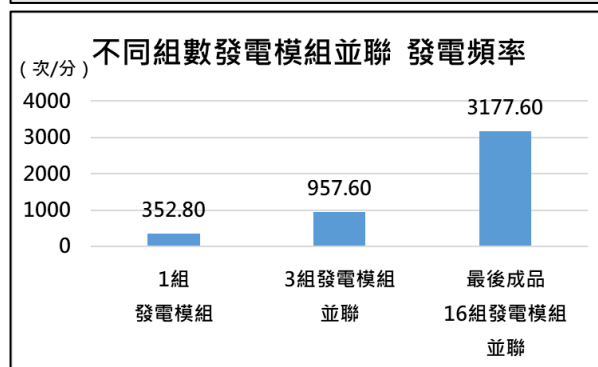
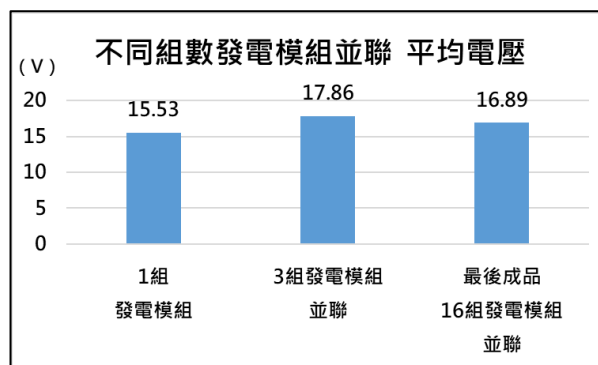
## 【研究四】模擬下雨，實際測試【晴雨轉換系統】和【雨天狀態發電情形】

### 一、模擬下雨的方法-自製「滴雨盆」

(以下照片由指導教師及作者拍攝)



### 二、進行測試與測試結果



(照片由指導教師及作者拍攝)

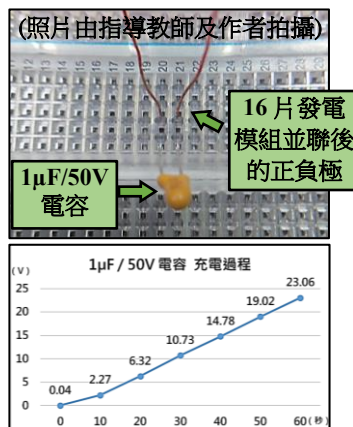
(以上圖片由作者使用 Excel 製作)



### 三、測試後討論

1. 【晴、雨轉換系統】可以**正常運作**，模擬雨滴停止後 3 分鐘內會轉回太陽能板那面。
2. 機器隔天還能運作，**保鮮盒和其他防水措施能成功防水**，讓電子零件保持乾燥。
3. 和只有一片【液滴摩擦發電模組】比較，**平均電壓增加 8.76%、發電頻率增加 800.68%、每分鐘總電壓變化量增加 879.56%**。
4. 因為我們發電原理是累積電子和電位差，和電容原理類似，所以嘗試幫 **1 $\mu$ F/50V** 的電容充電，結果能順利充電，而且高達 **23.06V**！充電接法與曲線如右圖，而且電容也能讓 LED 發亮。
5. 可以讓 5 個紅色 LED 燈同時不斷閃爍，或許可以運用在雨天警示燈(LED)相關的裝置上，一下雨就自動提供電源！

(本圖由作者使用 Excel 製作)



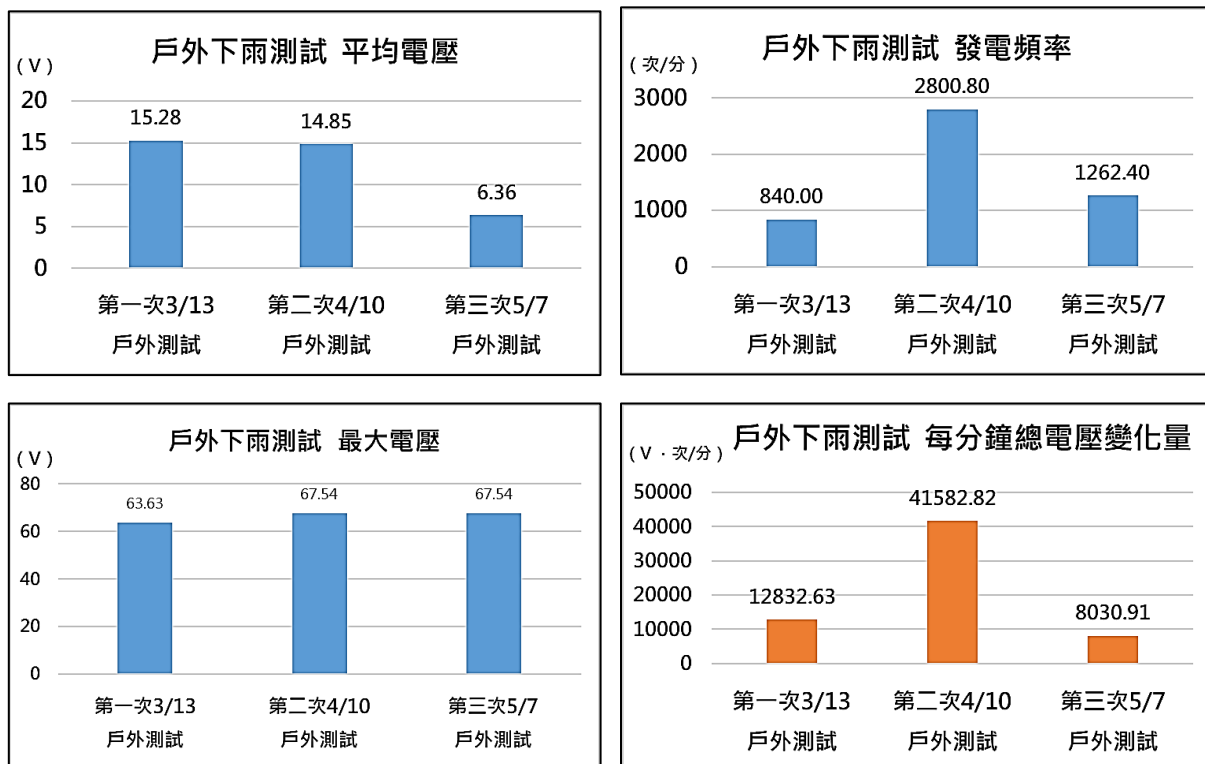
### 【研究五】實際戶外測試雨天發電情形

#### 一、戶外下雨時的測試流程

(照片由指導教師及作者拍攝)

		
1. 把【晴雨兩用綠能發電裝置】放到空曠的地方。	2. 把 16 片並聯的【液滴摩擦發電模組】正、負極接到示波器上。	3. 拿開雨傘，【晴、雨轉換系統】 <b>正常運作</b> ，隨機按下 10 次示波器存檔按鈕。

#### 二、測試結果



(以上圖片由作者使用 Excel 製作)



### 三、測試後討論

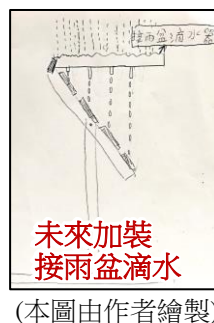
1. 三次下雨發電的總電壓變化量差異很大，第一、二次相差 69.14%；第二、三次相差 80.69%。其中第二次總電壓變化量是最大的，和實驗室模擬下雨比較，相差了 22.52%。
2. 從右邊雨滴大小比較可以發現，**雨滴不同大小會造成平均電壓、發電頻率、每分鐘總電壓變化量的差異**。
3. 所以未來**考慮在上方裝設接雨盆，穩定雨滴的大小和滴落速度**，讓它更實用，成為穩定的新能源。

### 四、未來可再研究項目

1. 測試不同濃度的鹽水，找出更多**不同導電度液體對【液滴摩擦發電模組】**的影響。
2. 測試「**摩擦帶電序列**」表上**不同材質**，讓容易帶負電、正電的能力更明顯，增加電子流動的能力與機會，但是還是要能**低成本取得**。
3. 對於在 16 片【液滴摩擦發電模組】上方架設接雨盆與水滴滴落裝置，**分析裝設後的優缺點**，考慮裝設的必要性。

【液滴摩擦發電模組】上方架設接雨盆與水滴滴落裝置分析	
優點	缺點
(1). 接雨盆接滿水後再開始滴落，統一液滴的大小和滴落速度，穩定發電效果。	(1). 雨滴很小時，統一了液滴大小，但是會很久才滴 1 滴，滴落頻率很低 (2). 損失雨滴從高空撞擊的能量，降低發電效果。 (3). 接雨盆裝滿水後增加的重量，對整體結構和馬達造成負擔。

(以下照片由指導教師及作者拍攝)



## 陸、研究結論

### 一、設計【液滴摩擦發電模組】、【液滴滴落方法】及【測量工具】

1. 【液滴摩擦發電模組】的製作：P.6
  - (1). 選取以下方便取得材料：鋁箔膠帶（易攜帶正電）、FEP（易攜帶負電）、PVC 塑膠片（當作基板固定用）、漆包線（容易塑形）。
  - (2). 電子移動方向是【FEP 上方鋁箔】→【下方鋁箔】，所以【FEP 上方鋁箔】是負極(-)；【下方鋁箔】是正極(+)。
2. 設計【可控式液滴滴落系統】：P.7
  - (1). 利用「直流電調速器」調整電動推桿推針筒的速度。**加裝「電壓顯示器」**，我們可以**利用電壓數字當作我們調整液體滴速的標準**。
  - (2). 共進行五輪測試，在固定相同電壓下，水滴數量都相同，代表**這個系統可以信任**。
3. 【電壓量測】的方法及裝置 P.9
  - (1). 三用電表：沒辦法自動長時間紀錄數據，難蒐集大量數據分析。
  - (2). Arduino 電壓感測器：明明 **Led 燈會亮(至少需要 1.8V)**，但測出來的電壓都小於 **0.5V**，不合理。詢問專家推測：測量速度不夠快，無法抓取放電瞬間的數值。

(以下照片由指導教師及作者拍攝)



(3). 使用「示波器」收集電壓數據 - 可行

①每存一次檔案會有 2.5 秒內 4096 筆的資料。

②用電池測試和數學換算，真實電壓和示波器的數值只相差 2.48%，代表示波器的測量可以信任。

(4). 把數據用 Excel 畫成折線圖，我們認為這

些突起最頂端的部分就是我們要找的「放電瞬間電壓」；整個折線圖有幾個頂端就是我們要找的「固定時間內放電次數」。



(5). 求助 ChatGPT，詢問用電腦自動處理 4096 筆資料的方法：

這段 VBA 程式會遍歷 10 欄、4096 列的數據，尋找每一欄中比上下相鄰儲存格還大且數值大於 102 的儲存格，並將結果輸出到新建的「峰值輸出」工作表，且保持原始欄位結構。

#### 4. 制定測量的標準流程 P.12

- (1). 【液滴摩擦發電模組】接上【示波器】，每次實驗都隨機按下 10 次存檔按鈕。
- (2). 因為我們最後設定「至少要能充 1.5V 的電池」，所以只記錄大於 1.5V 的發電情形。
- (3). 分析數據，把【平均電壓 × 放電頻率】算出來的數值命名為【每分鐘總電壓變化量】，用它來幫我們選出【液滴摩擦發電模組】最佳設置條件！

## 二、不同情況對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響 P.12~P.24

### 1. 【液滴摩擦發電模組】不同傾斜角度，對發電情形的影響 P.12

- (1). 【液滴摩擦發電模組】和水平面夾角 70 度有最佳「平均電壓」、「發電頻率」。
- (2). 角度太平，水滴滴到表面後會撞擊散開噴到別的地方，降低放電效果。

### 2. 不同液滴直徑對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響 P.14

- (1). 液滴直徑越大，平均電壓越高、每分鐘總電壓變化量越高，但發電頻率差異不大。
- (2). 較大的液滴含有越多電子，和 FEP 的接觸面積也越大，可以轉移更多的電子。

### 3. 不同滴落高度對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響 P.16

- (1). 滴落高度越高，平均電壓、每分鐘總電壓變化量越高，但發電頻率差異不大。
- (2). 撞擊力量較大①液滴會被攤開較大的面積，②撞擊產生較多的能量。(有其他研究證明)

### 4. 不同滴落頻率對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響 P.16

- (1). 滴落頻率越高，發電頻率、每分鐘總電壓變化量越高。但平均電壓無明顯正相關。
- (2). 因為每滴液滴通過鋁箔電極都會放電，所以滴落頻率越高，發電頻率越高。

### 5. 同一滴液滴是否可連續讓不同的【液滴摩擦發電模組】進行發電 P.17

- (1). 液滴在遇到第一組【液滴摩擦發電模組】就轉移了大部分的電子。
- (2). 需要撞擊才有能量轉移電子，所以裝置多組【發電模組】要有間隔，而且要墊高。

### 6. 同時滴落不同液滴數量對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響 P.18

- (1). 同時滴落液滴數量越多，「發電頻率」、「每分鐘總電壓變化量」越高。
- (2). 因為每滴液滴通過鋁箔電極都會放電，所以同時滴落的數量越多，發電頻率越高。

### 7. 不同液滴導電度對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響 P.19

- (1). 不同液滴導電度：飽和食鹽水 (21.93) > 自來水 (11.27) > 雨水 (6.54)
- (2). 液滴的導電度越小，「平均電壓」、「發電頻率」越高。

(3). 推測液體中的導電離子越多，液體中電子越難移動到 FEP 上。

#### 8. 【液滴摩擦發電模組】串聯、並聯對發電情形的影響 P.20

- (1). 平均電壓、發電頻率、每分鐘總電壓變化量：**並聯+二極體** > 並聯 > 串聯
- (2). 「3 組發電模組加裝二極體並聯」的每分鐘總電壓變化量，比單個發電模組 A、B、C 三者加總起來還要高。所以**多個發電模組並聯才不會因為單一模組故障而被拖累**。

#### 9. 【液滴摩擦發電模組】整體不同面積大小對發電情形的影響 P.22

(照片由指導教師及作者拍攝)

- (1). 「**長減半**」所有項目和原尺寸相比最多只相差 **2.67%**，差異不大。
- (2). 「寬減半」、「長寬減半」和原尺寸相比，分別降低了 45%、82.32%。
- (3). 在相同液滴密度的正常情況下，**面積對發電效果影響不大**，但是**並聯數量多一點，就能降低有模組損壞時所佔的比例**，所以最後選擇 4cm X 5cm 的尺寸。



### 三、利用 Arduino 與雨滴感測器設計【晴、雨發電轉換系統】 P.25

(照片由指導教師及作者拍攝)

1. 根據**最佳設置條件**把 **16 片發電模組全部並聯+二極體**接在一起。
2. 偵測到雨滴，盤面翻轉 110 度，讓「液滴摩擦發電模組」和水平面夾角 70 度，進行發電。
3. 如果偵測不到雨滴，5 秒後會再翻轉回太陽能板，進行發電。

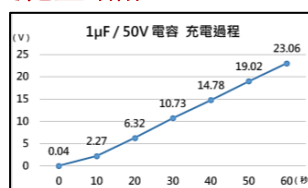


【晴天狀態】

【雨天狀態】

### 四、模擬下雨，實際測試【晴雨轉換系統】和【雨天狀態發電情形】 P.26

1. 【晴、雨轉換系統】可以**正常運作**，模擬雨滴停止後發電面板會轉回太陽能板那面。
2. 和只有一片【液滴摩擦發電模組】比較，**平均電壓增加 8.76%**、**發電頻率增加 800.68%**、**每分鐘總電壓變化量增加 879.56%**。
3. 因為發電原理和電容原理類似，所以嘗試幫 **1μF/50V** 的電容充電，結果能順利充電，而且高達 **23.06V**！



(圖片由作者使用 Excel 製作)

4. 可以讓 5 個紅色 LED 燈同時不斷閃爍，**可運用在雨天警示燈(LED)相關裝置上，下雨就自動提供電源！**



(照片由指導教師及作者拍攝)

### 五、實際戶外測試雨天發電情形 P.27

1. 可以成功順利發電。但觀察雨滴大小可以發現，**雨滴不同大小會造成平均電壓、發電頻率、每分鐘總電壓變化量的差異**。
2. **考慮在上方裝設接雨盆，統一雨滴大小和滴落速度**讓它更實用，成為穩定的新能源。
3. 未來可再研究項目：  
①**測試更多不同導電度液體**對【液滴摩擦發電模組】的影響、②**測試「摩擦帶電序列」**表上**不同材質**、③對於在 **16 片【液滴摩擦發電模組】**上方架設接雨盆與水滴滴落裝置，**分析裝設後的優缺點**，考慮裝設的必要性。

## 柒、參考資料

- 一、科學 Online：克氏滴水發電機 (Kelvin Water Drop)。
- 二、天下文化：科學自然-摩擦起電的原理。 <https://bookzone.cwgv.com.tw/article/13419>
- 三、香港城市大學 - 研究故事 - 新研發高效能水滴發電機。 <https://www.cityu.edu.hk/zh-hk/research/stories/2020/02/06/new-droplet-based-electricity-generator-drop-water-generates-140v-power-lighting-100-led-bulbs>
- 四、歷屆科展作品。58 屆 030107。45 屆 081515。2015 國際科展：探討鉻鋼球碰撞的力與能量。
- 五、均一教育【素養動畫】。何謂靜電、摩擦起電與靜電作用力。  
<https://www.juniacademy.org/junyi-science/science-juni/middle-school-physics-chemistry/s4zdl-v/gg2MifGKDSg?v=gg2MifGKDSg>



## 【評語】 083004

本作品整合自製液滴摩擦發電板與太陽能板模組，設計成晴雨轉換系統，達到晴雨兩用發電系統。研究思路與歷程記錄清楚，展現良好的實作力與應用性。後續可透過完整的電化學實驗和重複試驗，進一步深化摩擦生電特性的理解與環境感測應用潛力。

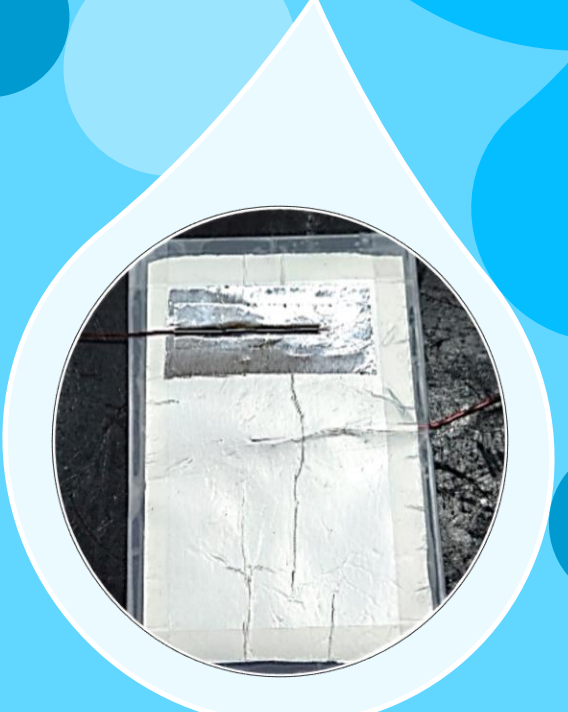
作品海報



# 「雨」你每滴都來電



## 「液滴摩擦發電」與「晴雨轉換系統」的研究





# 摘要

本研究主要探討【自製液滴摩擦發電模組】的最佳設置條件，並開發【晴雨轉換系統】，不僅為綠能找新來源，也能節省面積讓兩種發電系統並行。

我們用方便取得的材料自製【液滴摩擦發電模組】；設計【可控式液滴滴落系統】模擬液滴滴落；利用示波器收集大量數據並制定測量標準及方法。

研究發現【液滴摩擦發電模組】在以下條件有最佳效果：①和水平面夾角70度；②液滴直徑越大、數量越多、導電度越小；③滴落高度、頻率越高；④液滴不能重複利用；⑤多組並聯；量發電模組寬度適當。

最後自製【滴雨盆】模擬下雨，結果【晴雨轉換系統】正常運作，能發電讓5個紅色LED燈同時不斷閃爍；也能幫1μF/50V的電容充電，60秒就高達23V，雨水真的滴滴都能發電！

## 壹、研究動機

綠色能源是人類積極追求的目標，老師曾經介紹過為了讓人類永續生活，聯合國大力推動SDGs（永續發展目標），第7項就是【可負擔的潔淨能源】。所以除了節約能源，如果能從大自然中多找一些發電的來源，減少碳排放量，不僅能降低發電成本，也能減少對環境的汙染。

我們從網路上發現有科學家結合「雨滴」和「摩擦起電」原理而發明的發電裝置，這引起了我們的好奇心。我們也想試著做出這樣的裝置，並且用實驗證明該如何設置此裝置才能有最好的效果。另外我們也想利用所學過的「Arduino」和「Scratch」，結合太陽能發電系統，研究出遇雨可自動轉換發電方式的【晴雨兩用發電系統】

★與課程相關單元：【好玩的電路】、【地球的生態】、【資訊課Arduino、Scratch】

## 參、研究設備及器材

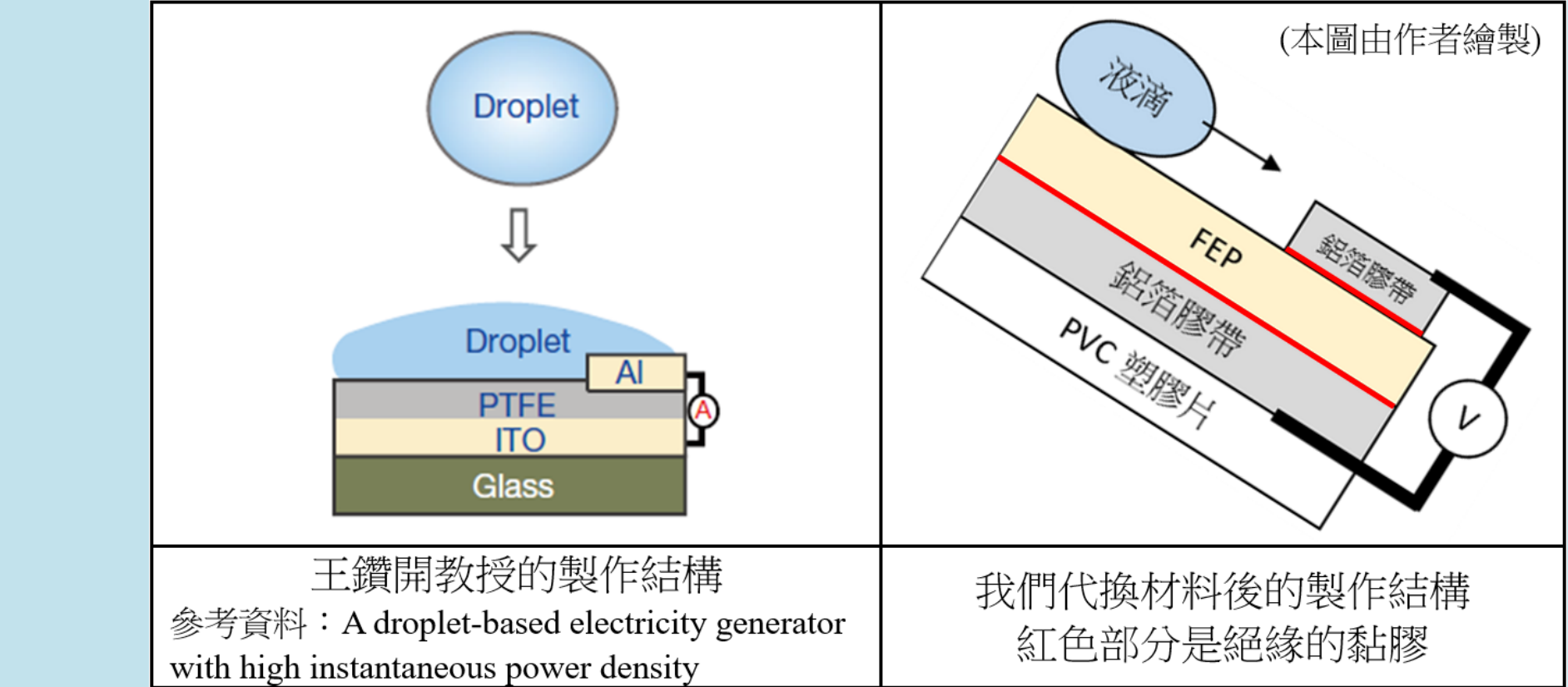
製作工具	電鑽、螺絲起子、線鋸機、熱熔槍、直角尺、美工刀
可控式液滴滴落系統	針筒、電動推桿、直流DC調速器、LED電壓表
實驗數據記錄工具	Arduino開發板、電壓檢測模組、bDesigner軟體、示波器、Excel
液滴摩擦發電模組	鋁箔膠帶、FEP、漆包線、塑膠片、膠帶
晴、雨轉換系統	Arduino開發板、雨滴感測器、伺服馬達、加熱片、PVC水管

## 伍、研究結果與討論

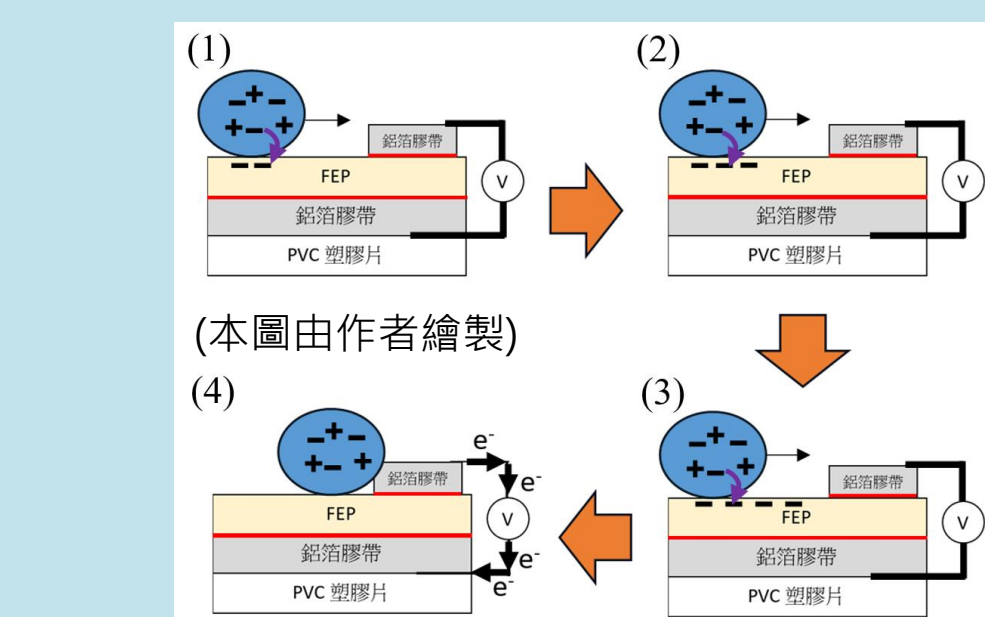
### 【研究一】設計【液滴摩擦發電模組】、【液滴滴落方法】及【測量工具】

#### 一、【液滴摩擦發電模組】的製作

1.參考模型：參考香港大學王鑽開教授的作法，把其中材質換成我們能買到的材質。



#### 4.【液滴摩擦發電模組】的發電原理：



在(1)、(2)、(3)的情況下，因為FEP這種材質摩擦序列傾向帶負電，液滴和FEP因為摩擦起電效應，因為摩擦起電效應，會使液滴上的電子移動到FEP表面。當液滴接通了FEP和上方鋁箔電極，此時電子就流往下層的鋁箔膠帶，產生電流。**實驗發現，每滴夜滴通過上方鋁箔電極時，都會放電。**

從發電原理可以知道，**電子移動方向是：【FEP上方鋁箔】→【下方鋁箔】**，所以【FEP上方鋁箔】是負極(-)；【下方鋁箔】是正極(+)。

#### 二、設計【可控式液滴滴落系統】

- 可以產生液滴的工具分析：
- 直流電調速器的接線方式：除了利用「直流電調速器」調整電動推桿推針筒的速度，我們還需要加裝一個「電壓顯示器」，這樣就可以利用電壓數字當作我們調整液體滴速的標準。
- 實際使用情形：不同電壓共進行五輪測試，結果水滴數量都相同，代表我們可以利用電壓大小控制每次滴落速度都相同。

#### 三、設計【電壓量測】的方法及裝置

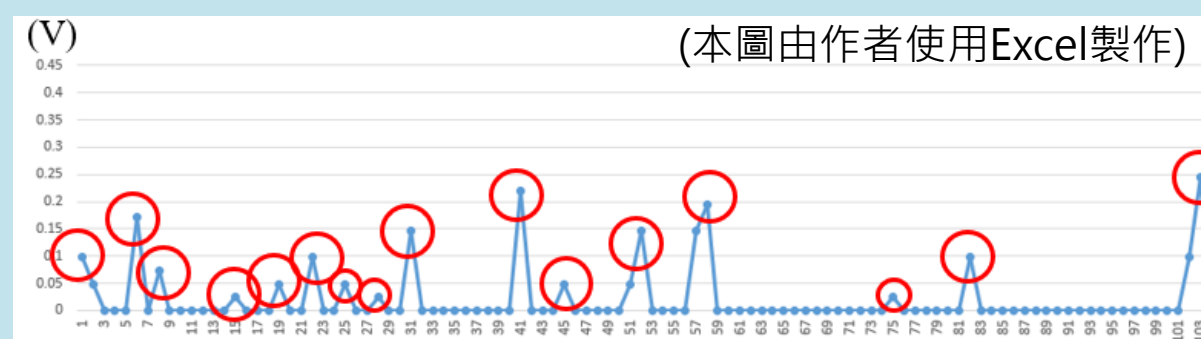
- 決定測量項目
  - 發電的「電壓大小」。
  - 我們是利用水滴摩擦累積發電，所以需要知道「發電頻率」。

#### 4.分析數據的方法：找出放電瞬間的電壓並計算固定時間內放電次數

- 我們把Arduino收集到的3000筆資料（1分鐘）用Excel畫成折線圖可以發現，有很多凸起來的部分，我們認為這些突起最頂端的部分就是我們要找的「放電瞬間電壓」；整個折線圖有幾個頂端就是我們要找的「固定時間內放電次數」。
- 如果要人工挑選這3000筆資料太費時費工了，所以我們決定求助ChatGPT，詢問它是否有可以用電腦自動處理的方法。
- 經過比對，真的可以用Excel自動找出我們要的「放電瞬間電壓」，也可以用Excel統計功能計算出總共有幾筆資料，也就是「放電次數」。
- 測量方式抓取資料的速度可能不夠快，只有2次超過2伏特(V)，其他全部都小於0.5伏特(V)。

#### 5.使用「示波器」收集電壓數據 - 可行

- 測量時可以用儲存數據的功能，把測到的數據存成Excel檔。
- 算出來儲存一次4096筆資料是大約2.5秒的時間。



#### 2. 利用「三用电表」測量電壓 - 不可行

- 雖然「三用电表」可以測量電壓，但是沒辦法長時間紀錄數據，進行分析。
- 就算用手機錄影三用电表的電壓數字變化，還需要大量時間、人力記錄數字，不是有效率的方法
- 所以我們需要能自動記錄數據、而且能直接成為電子檔的方法。

#### 3.使用Arduino「電壓感測器」搭配Scratch積木程式收集電壓數據 - 後來發現嚴重問題

- 電腦課有介紹過Arduino有很多不同種類的感測器，查詢後發現有測量電壓的專屬感測器。
- 我們對於寫出Arduino的程式碼不是很熟悉，但是有找到一款軟體可以把Arduino和我們學過且熟悉的Scratch做結合，利用Scratch的積木程式來控制Arduino的「電壓感測器」。

#### 6.「示波器」存檔的數據轉換成電壓

- 示波器上看到的伏特數都在50V以內，但是存檔出來的數據都是100以上，代表機器有他自己的數據的意義。
- 所以我們進行了以下的換算：

a. 什麼都不接的基準數值：99.54（4096筆資料平均，數值中有99、100）	b. 接2.95V電池的數值：106.33（4096筆資料平均，數值中有106、107）	c. 接9.27V電池的數值：121.44（4096筆資料平均，數值中有121、122）
伏特數的倍率 ● 9.27÷2.95=3.14 ● 倍率為3.14倍	示波器數值 什麼都不接 99.54 接2.95V 106.33 接9.27V 121.44	示波器數值倍率 (先減去基礎數值，再算倍率) ● (121.44-99.54)÷(106.33-99.54) =3.22 ● 倍率為3.22倍
兩者倍率只有誤差2.48%，所以之後可以利用「什麼都不接的基準數值」和「2.95V電池的數值」進行比較，把示波器的存檔數值換算成電壓(V)。		
(3). 例如示波器數值為124，代表的電壓為10.63V，計算方法如下： (124-99.54)÷(106.33-99.54)×2.95=10.63，可以用Excel幫我們快速計算！		

## 貳、研究目的

### 【研究一】設計【液滴摩擦發電模組】、【液滴滴落的方法】及【測量工具】

- 【液滴摩擦發電模組】的製作
- 設計【可控式液滴滴落系統】
- 設計【電壓量測】的方法及裝置
- 制定測量的標準流程

### 【研究二】不同情況對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響

- 【液滴摩擦發電模組】不同傾斜角度，對發電情形的影響
- 不同液滴直徑對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響
- 不同滴落高度對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響
- 不同滴落頻率對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響
- 同一滴液滴是否可連續讓不同的【液滴摩擦發電模組】進行發電
- 同時滴落不同液滴數量對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響
- 不同液滴導電度對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響
- 【液滴摩擦發電模組】串聯、並聯對發電情形的影響
- 【液滴摩擦發電模組】整體不同面積大小對發電情形的影響
- 總結各項實驗結果，找出最佳設置條件

### 【研究三】利用Arduino與雨滴感測器設計【晴雨轉換系統】

### 【研究四】模擬下雨實際測試【晴雨轉換系統】和【雨天狀態發電情形】

### 【研究五】實際戶外測試雨天發電情形

## 肆、研究過程與方法

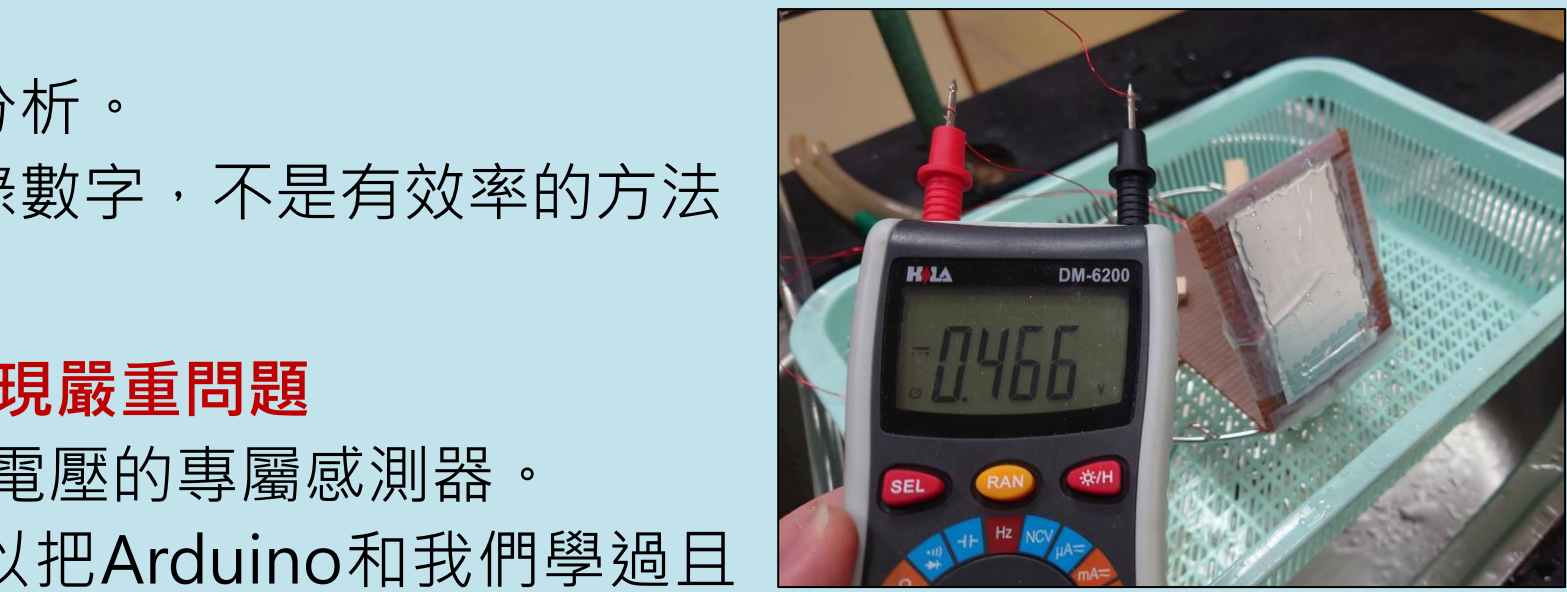
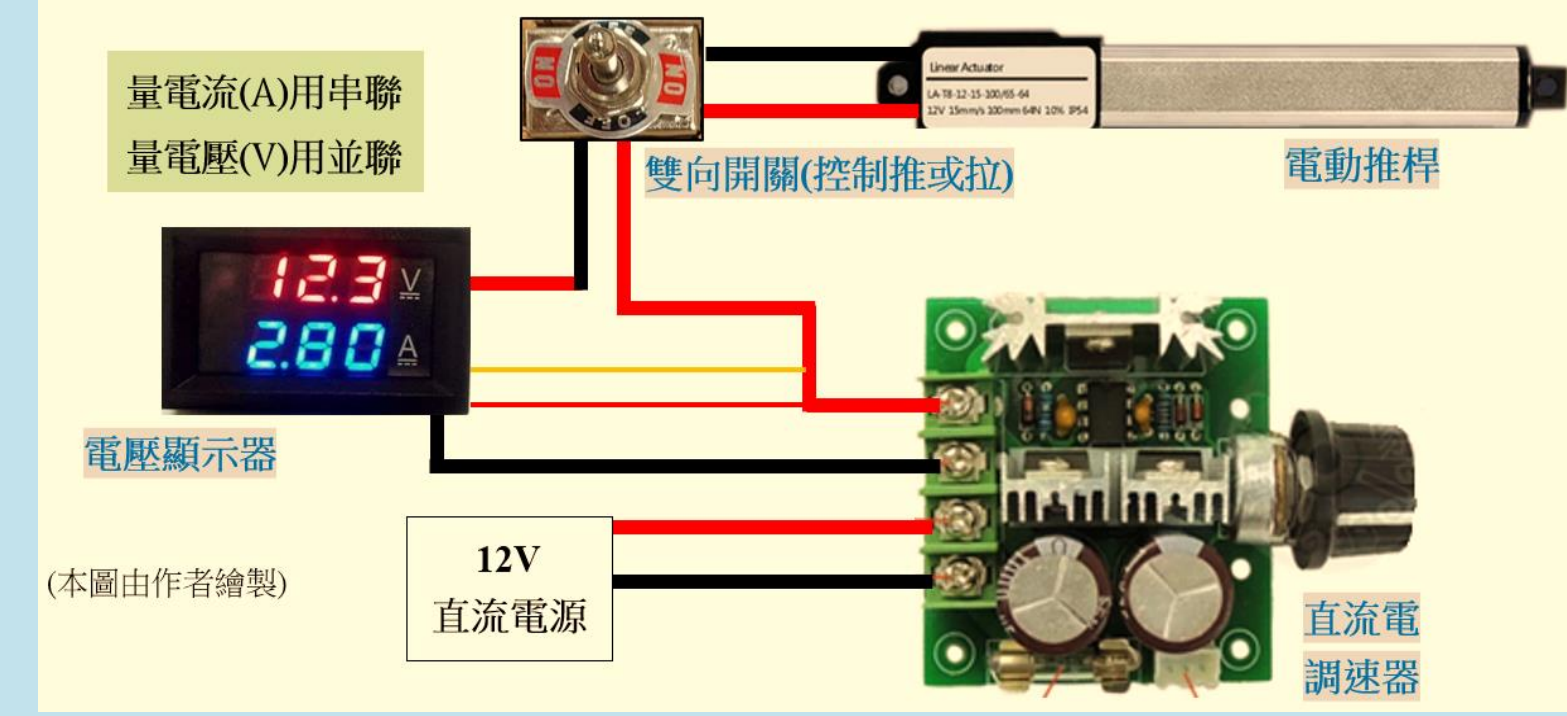
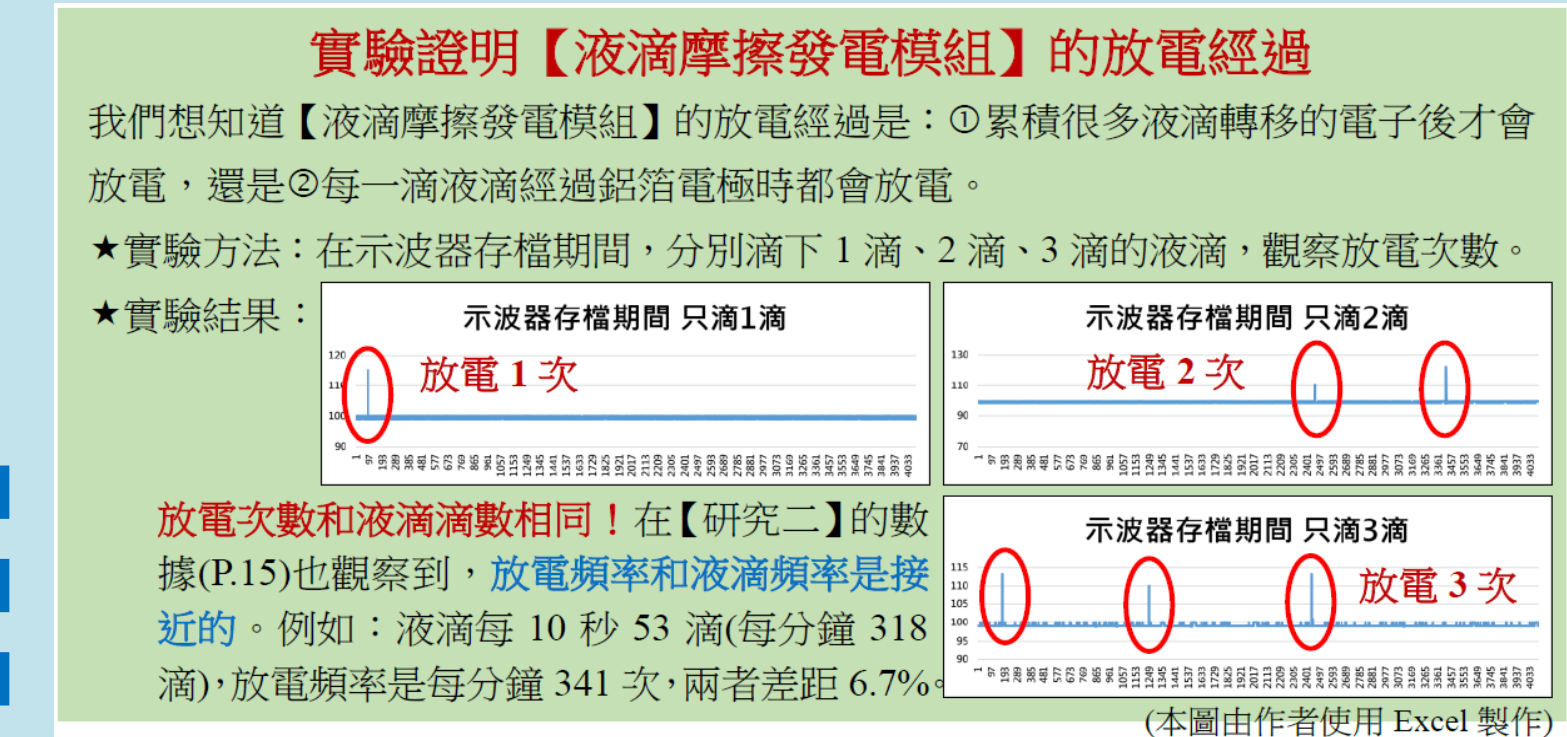
#### 一、文獻探討：

開爾文滴水起電機：液滴帶有微量電荷

摩擦起電效應：當兩種不同材料互相摩擦時，一種材料的部分電子轉移到另一種材料

液滴摩擦發電機：液滴摩擦、電子轉移

#### 二、研究架構：



#### 四、制定測量的標準流程

- 因為【液滴摩擦發電模組】發電原理是：累積電荷後再瞬間放出，發電時間不固定，所以為了公平，我們每次實驗都隨機按下10次存檔按鈕代表進行10次隨機測試。
- 因為我們最後設定「至少要能充1.5V的電池」，所以只記錄大於1.5V的發電情形。
- 我們不僅需要電壓越大越好，發電頻率越高也很重要，所以最後的比較是用【平均電壓 × 放電頻率】，算出來的數值命名為【每分鐘總電壓變化量】，用它來幫我們選出【液滴摩擦發電模組】最佳設置條件！







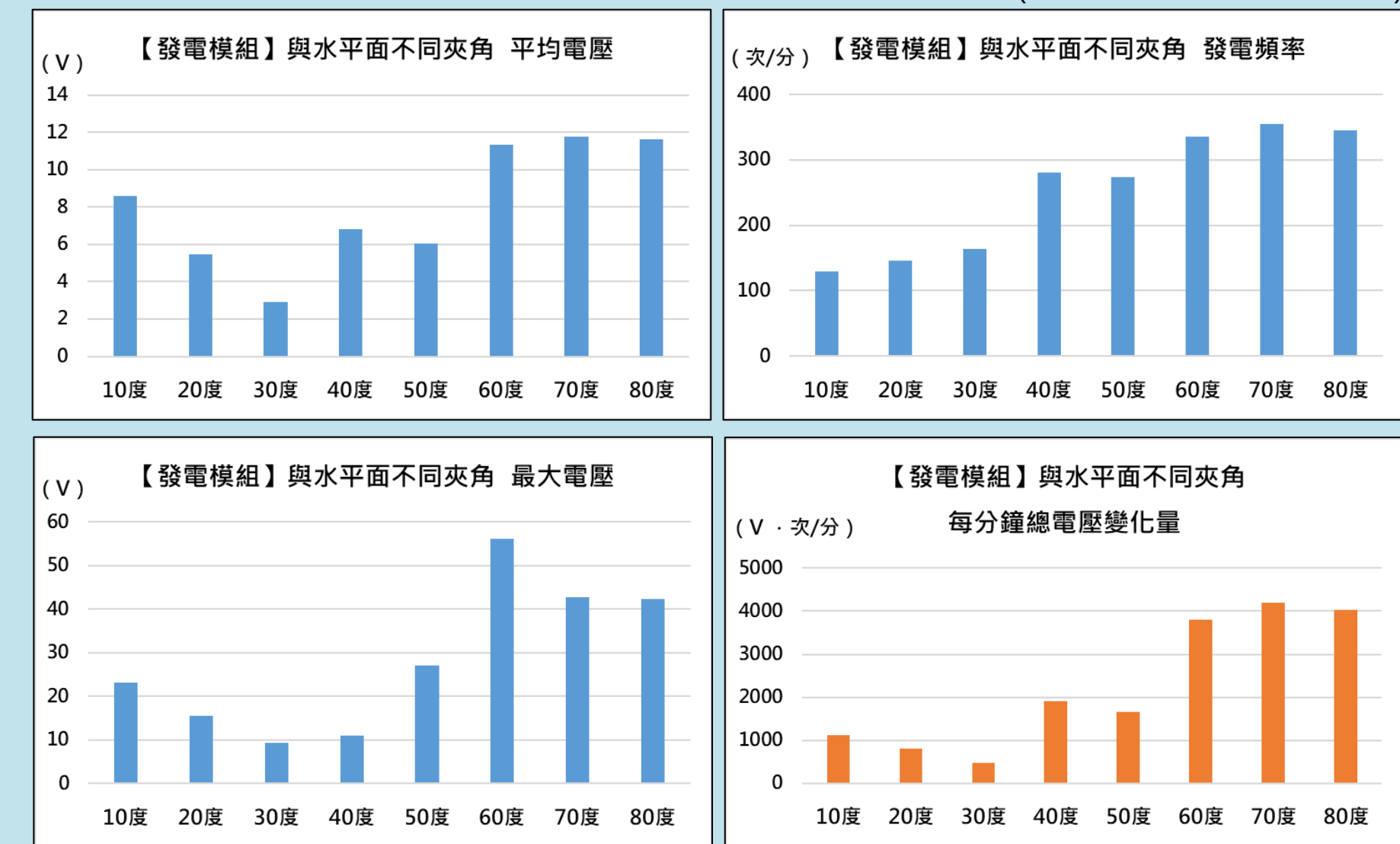
## 【研究二】不同情況對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響

### 一、【液滴摩擦發電模組】傾斜角度，對發電情形影響

#### 1. 實驗方法：

- (1)設定【液滴摩擦發電模組】與水平面夾角角度為10度 ~ 80度，每改變10度進行一次實驗。所有角度都用量角尺測量後，再把塑膠瓦楞背板固定。
- (2)液滴滴落高度為40公分、推針筒的電壓設定2.5 V ( 每10秒滴落53滴)。

#### 2.實驗結果：



#### 3.實驗討論

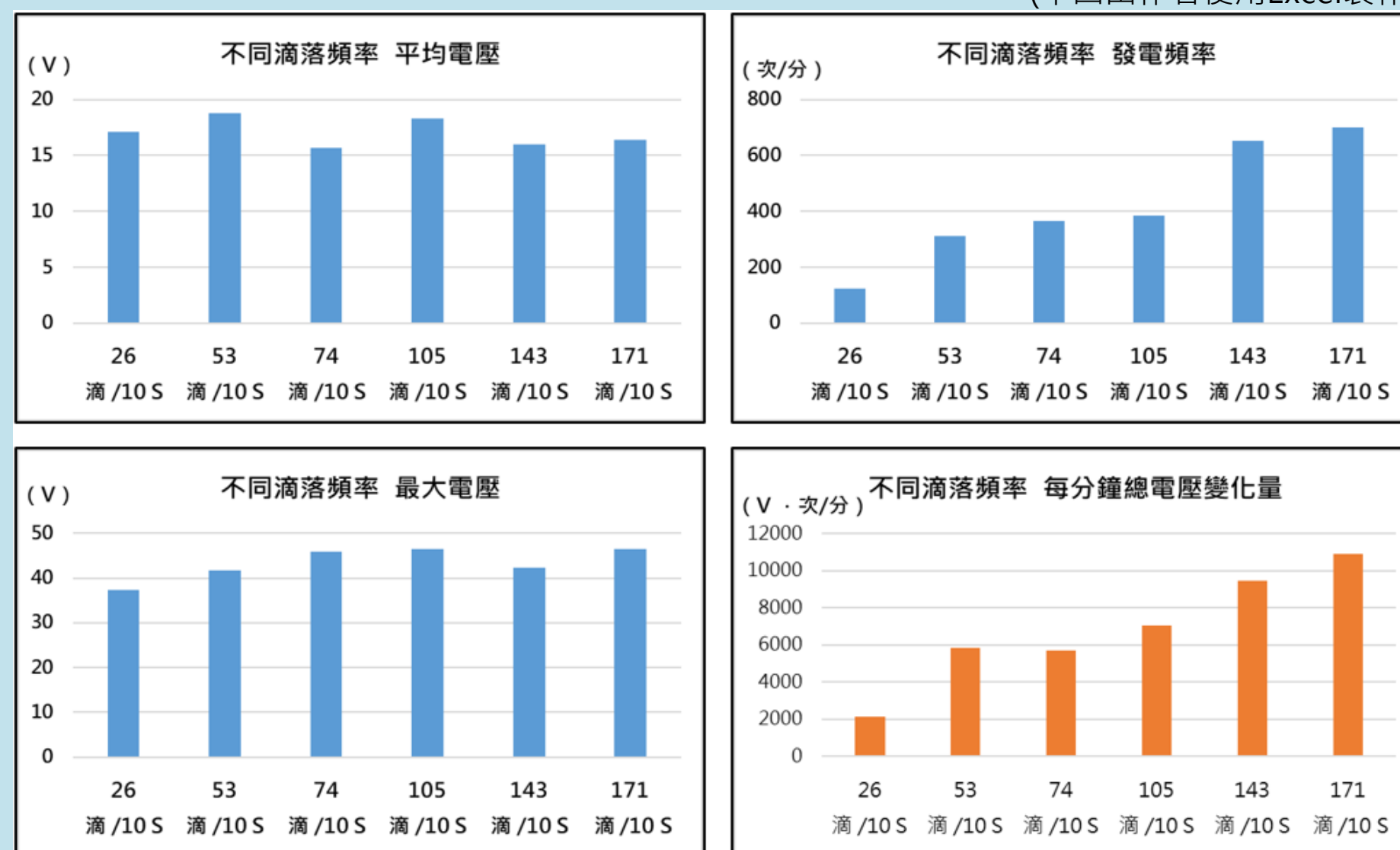
- (1)最後我們選擇「平均電壓」、「發電頻率」都是最高的【與水平面夾角70度】，當作【液滴摩擦發電模組】裝設的條件。之後實驗都以角度70度進行實驗

### 四、滴落頻率對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響

#### 1.實驗方法：

- (1)用自製【可控式液滴滴落系統】，調整不同的滴落頻率
- (2)模組角度70度、滴落高度為40公分、液滴直徑6.17 mm。

#### 2.實驗結果：



#### 3.實驗討論

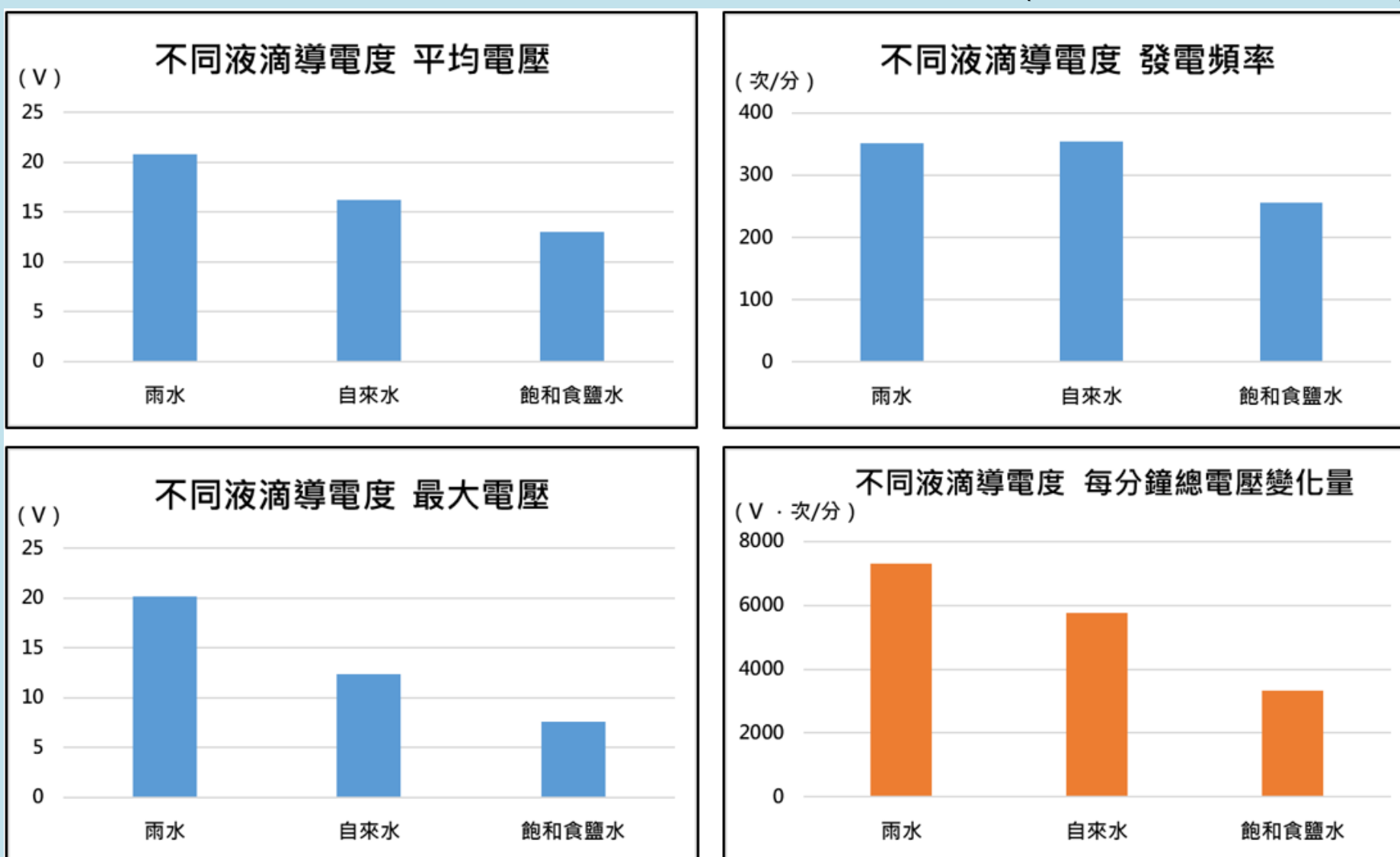
- 滴落頻率越高，「發電頻率」、「每分鐘總電壓變化量」越高。因為滴落頻率越高，液滴通過鋁箔電極頻率也越高。

### 七、液滴導電度對【液滴摩擦發電模組】發電情形影響

#### 1. 實驗方法：

- (1)收集雨水、自來水、飽和鹽水，用三用電表測量它們的電阻值。導電度單位為姆歐，是電阻值的倒數。
- (2)模組角度70度、滴落高度為40公分、液滴直徑6.17 mm、推針筒的電壓設定2.5 V ( 每10秒滴落53滴)。

#### 2.實驗結果：



#### 3.實驗討論

- 不同液滴導電度：飽和食鹽水>自來水>雨水
- 液滴的導電度越大，「平均電壓」、「每分鐘總電壓變化量」越小。推測原因為：食鹽水中的離子會對電子的移動造成影響，鹽水液滴中的電子無法順利轉移到FEP上。

### 九、【液滴摩擦發電模組】整體不同面積大小對發電情形的影響

#### 1. 實驗方法：

- (1)分為4種面積：原尺寸( 8cm x 5cm) 、寬減半(8cm x 2.5cm)、長減半(4cm x5cm)、長寬都減半(4cm x 2.5cm)。
- (2)因為減少面積等於於相同時間可接受的液滴變少，所以加入【同時滴落不同液滴數量】變因，一起進行比較。
- (3)模組角度70度、滴落高度為40公分、液滴直徑6.17 mm、滴速為每10秒滴落53滴。
- (4)液滴出口的位置要擺放在：液滴能滴到發電模組表面。

#### 3. 實驗討論

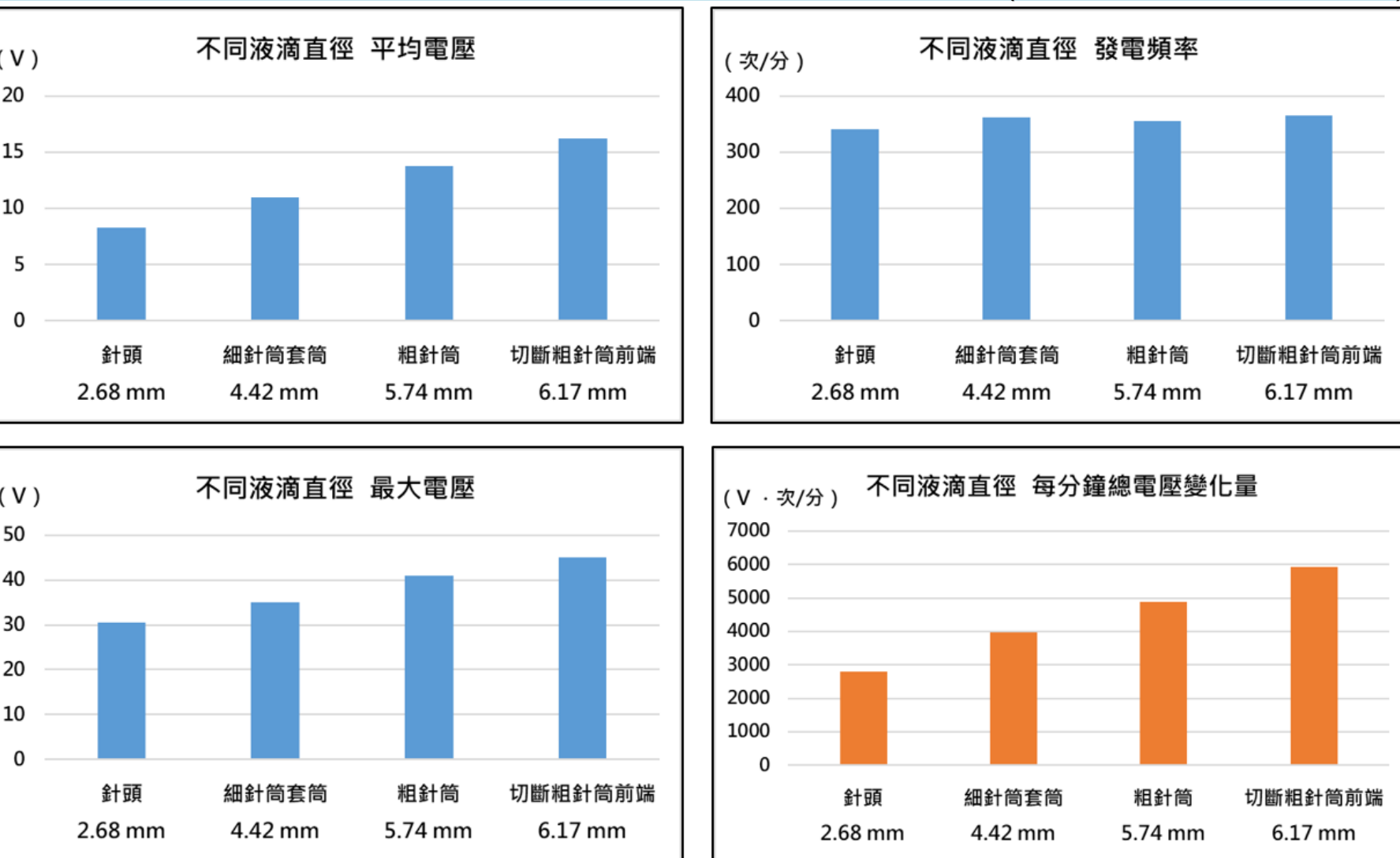
- (1)平均電壓：
  - 「長減半」所有項目和原尺寸相比最多只相差2.67%，差異不大。
- (2)發電頻率：
  - 「寬減半」、「長減半」和原尺寸相比，最多只相差2.67%，差異不大。
- (3)每分鐘總電壓變化量：
  - 「長減半」和原尺寸相比最多只降低3.29%差異不大
- (4)所以面積減半但發電數值與原尺寸最相近的是「長減半」。就算因此每分鐘總電壓變化量降低了3.29%，但從上個實驗可以知道，相同面積下「並聯」的發電模組比單片相加的發電效果還要好，所以最後【發電模組】尺寸為：長4cm、寬5cm。

### 二、液滴直徑對【液滴摩擦發電模組】發電情形影響

#### 1. 實驗方法：

- (1)從以前的科展作品可知不同孔洞大小可以改變液滴直徑。所以把針筒孔洞分成四種大小
  - 針頭2.68 mm；細針筒套筒4.42 mm；粗針筒5.74 mm；切斷粗針筒前端6.17 mm
- (2)模組角度70度、滴落高度為40公分、推針筒的電壓設定2.5 V ( 每10秒滴落53滴)

#### 2.實驗結果：



#### 3. 實驗討論

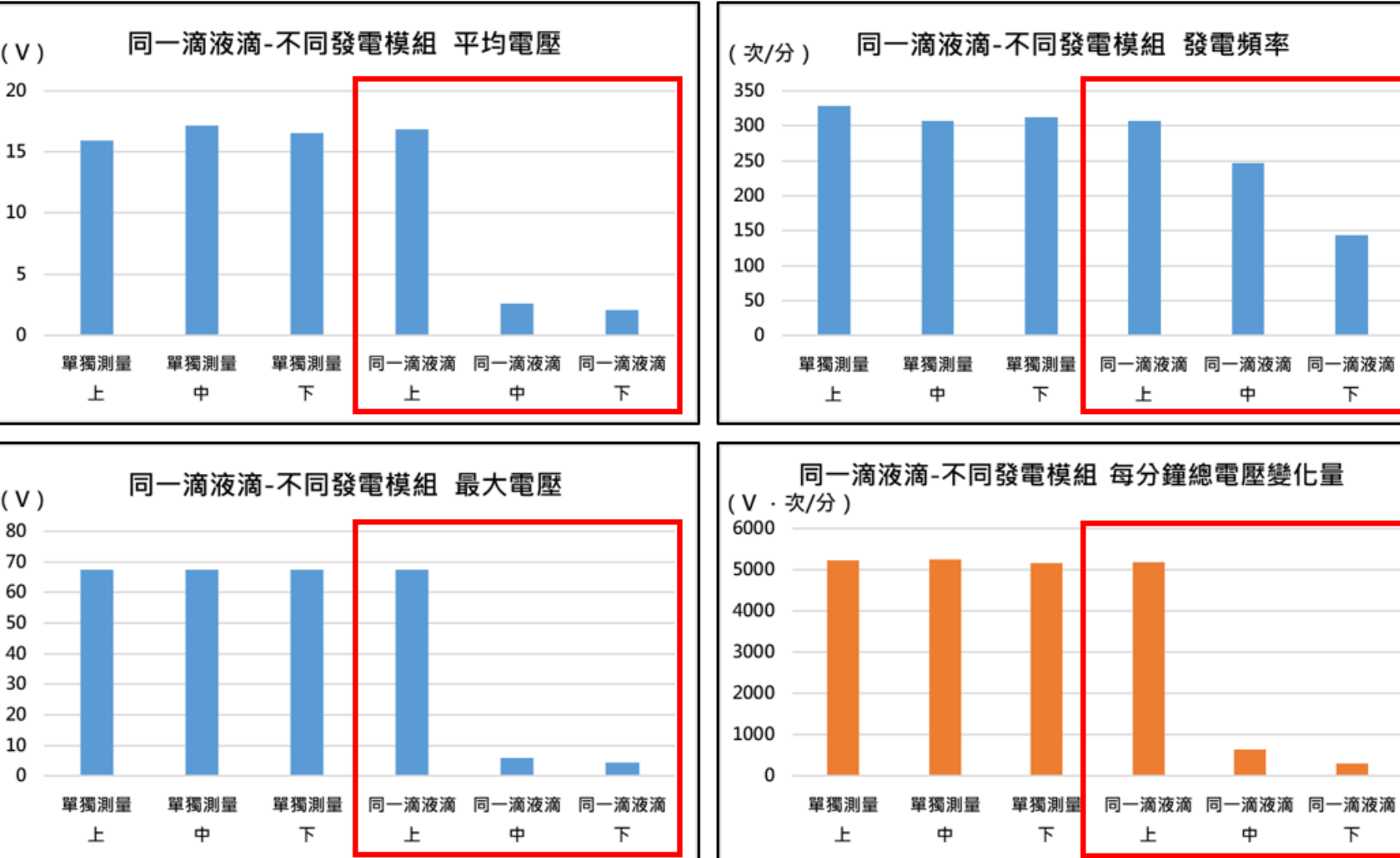
- (1)水滴越大，「平均電壓」、「每分鐘總電壓變化量」越高。
- (2)較大的水滴和FEP的接觸面積越大，推測可以轉移更多電子

### 五、同一滴液滴是否可連續讓不同的【液滴摩擦發電模組】進行發電

#### 1. 實驗方法：

- (1)用三組【液滴摩擦發電模組】垂直組裝在一起。
- (2)模組角度70度、滴落高度為40公分、液滴直徑6.17 mm、推針筒的電壓設定 2.5 V ( 每10秒滴落53滴)。

#### 2.實驗結果：



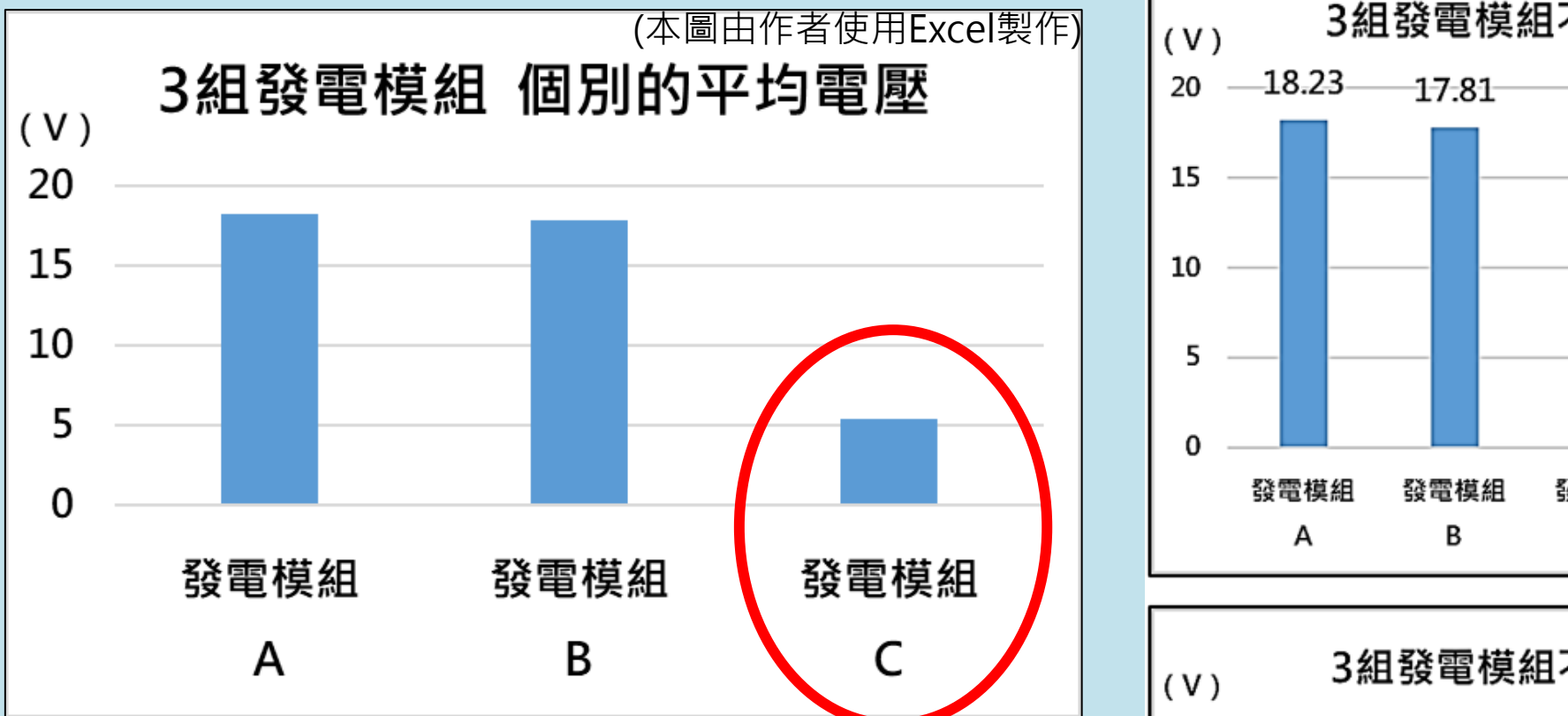
#### 3.實驗討論

- (1)推測兩個原因：①液滴在遇到第一組【液滴摩擦發電模組】就轉移了 大部分的電子 ②液滴沒有撞擊「中、下兩組」提供電子轉移的能量
- (2)打造多組【發電模組】時，用過的液滴不可再流到另一組。

### 八、【液滴摩擦發電模組】串聯、並聯對發電情形影響

#### 1. 實驗方法：

- (1)製作三組【液滴摩擦發電模組】貼在塑膠板上。用水平儀確認3個滴水口的高度相同。
- (2)發現問題！但是剛好拿來當作狀況測試

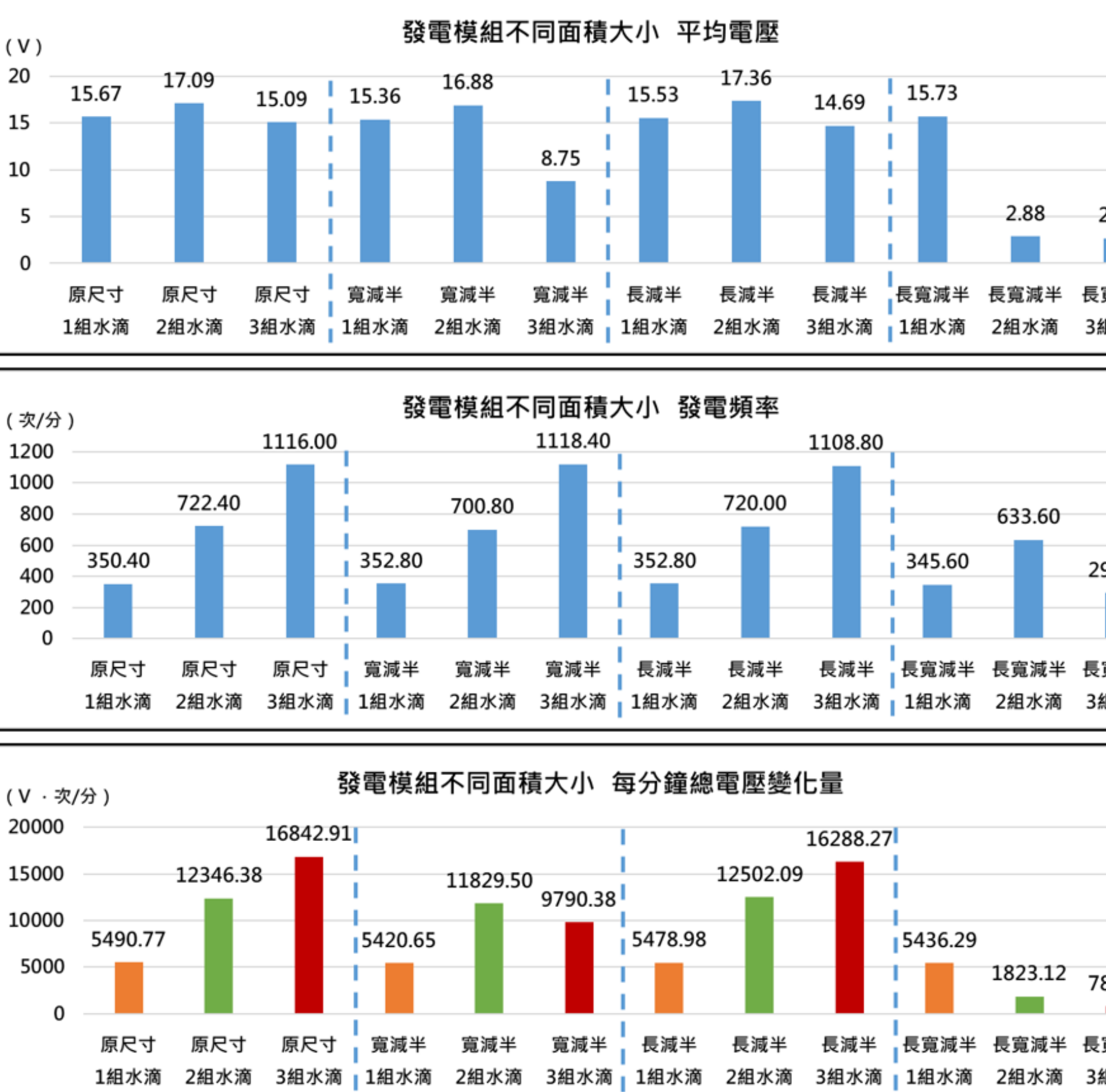


其中一組的平均電壓竟然低於其他兩組相差70.54%。檢查發現C發電模組側邊熱熔膠沒黏好，漏水到鋁箔膠帶那面，這樣累積的電子就不一定會沿著漆包線流通，導致電壓降低。

#### 3.實驗討論：

- (1)平均電壓排名：並聯+二極體 > 並聯 > 串聯。「加裝二極體的並聯」跟單個模組比較雖然會損耗2.02%的平均電壓，但是「不加裝二極體的並聯」的平均電壓會因為流向混亂而降低21.89%。
- (2)串聯因為只有一條通路，每個模組發電時間沒有同步互相干擾，所以跟單個模組比平均電壓會降低36.97%
- (3)每分鐘總電壓變化排名：並聯+二極體 > 並聯 > 串聯
- (4)所以多個發電模組並聯才不會被單一模組故障而拖累，而且必須加裝二極體固定電流方向！

#### 2.實驗結果：

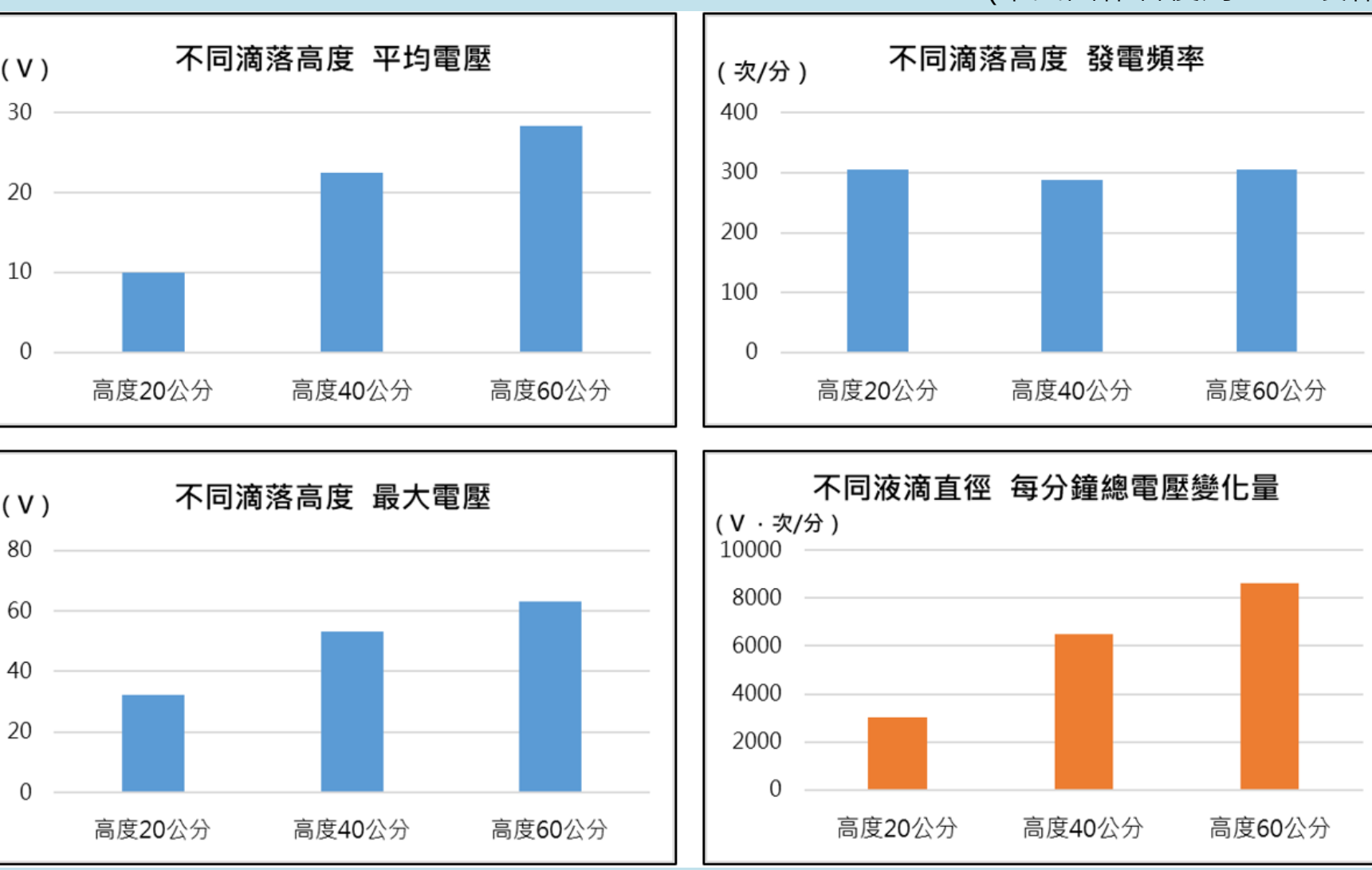


### 三、滴落高度對【液滴摩擦發電模組】發電情形影響

#### 1. 實驗方法：

- (1)用木箱把【可控式液滴滴落系統】架高，高度計算方式為：針筒前端到【液滴摩擦發電模組】的上方邊緣。共分成三種高度：20公分、40公分、60公分。
- (2)模組角度70度、液滴直徑6.17 mm、推針筒的電壓設定 2.5 V ( 每10秒滴落53滴)。

#### 2.實驗結果：



#### 3.實驗討論

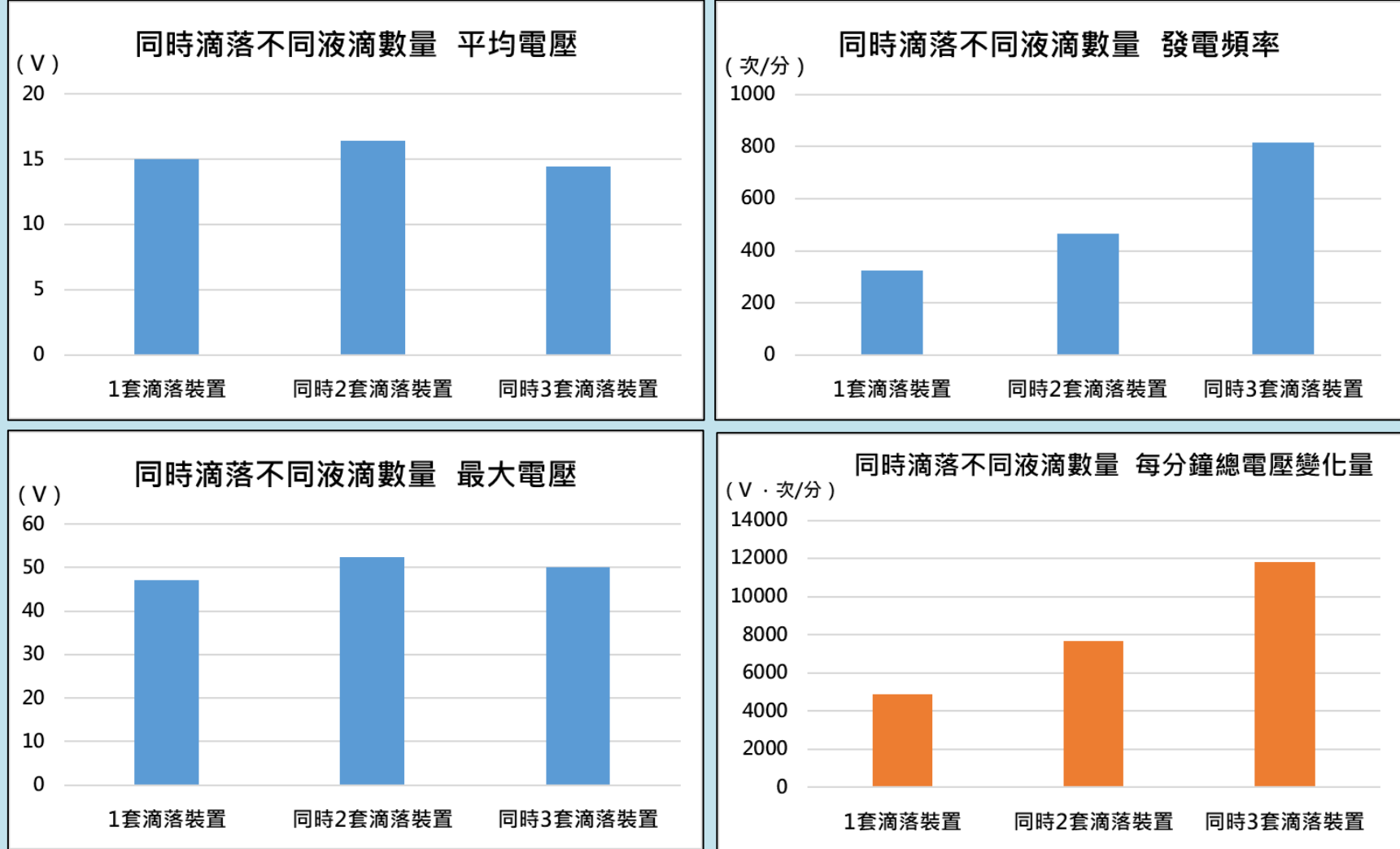
- (1)滴落高度越高，「平均電壓」、「每分鐘總電壓變化量」越高。推測原因為：①液滴會被攤開較大的面積，②撞擊產生較多的能量。
- (2)為了證實想法，我們上網搜尋相關研究：
  - ①第45屆全國科展-國小組自然科-靜觀其電，證明「摩擦面積愈大，產生的靜電愈強」。
  - ②2015年臺灣國際科學展覽會-探討銲鋼球碰撞的力與能量，證明「撞擊物高度越高，白紙燒焦的面積越大」，撞擊力會轉換成熱能。

### 六、同時不同液滴數量對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響

#### 1. 實驗方法：

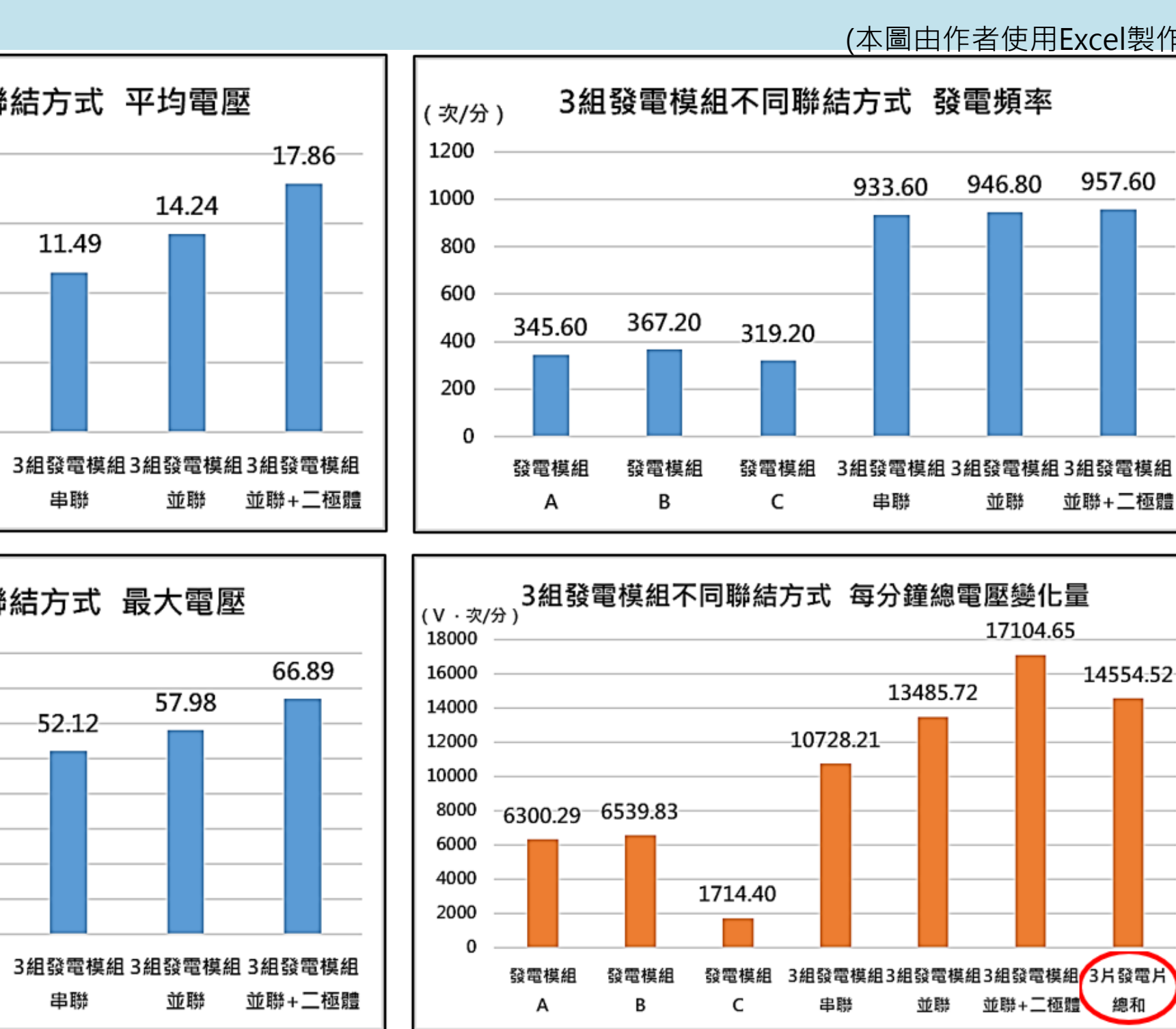
- (1)實驗分為三項：1套滴落裝置+1組【液滴摩擦發電模組】、同時2套滴落裝置+1組【液滴摩擦發電模組】、同時3套滴落裝置+1組【液滴摩擦發電模組】。
- (2)模組角度70度、滴落高度40公分、液滴直徑6.17 mm、滴速為每10秒滴落53滴。

#### 2.實驗結果：



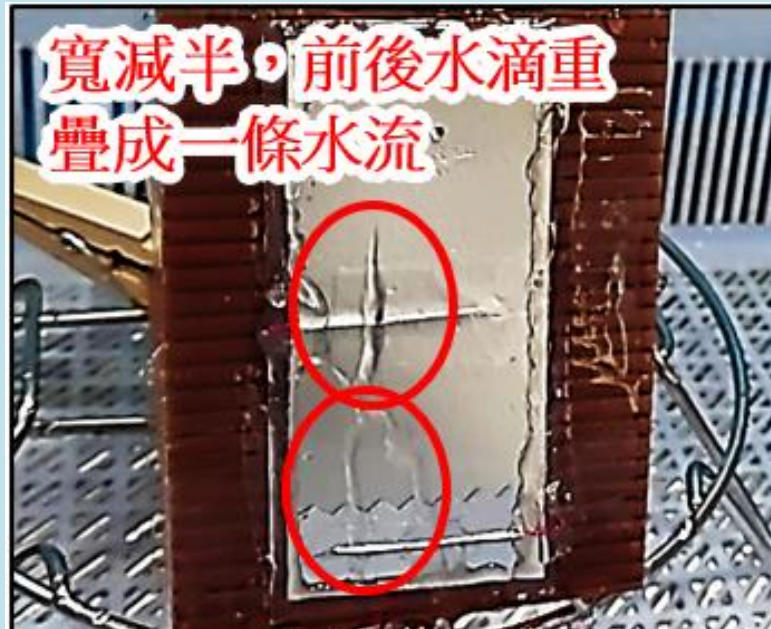
#### 3.實驗討論

- (1)同時滴落的液滴數量越多，「發電頻率」、「每分鐘總電壓變化量」越高。
- (2)推測原因：我們的發電原理是靠液滴上的電子移動到FEP上累積，所以同時越多液滴滴落，液滴通過鋁箔電極頻率也越高。



### 十、總結各項實驗結果，找出最佳設置條件

- 【液滴摩擦發電模組】與水平面夾角70度。
- 液滴直徑越大越好、掉落高度越高越好、滴落頻率越大越好。【液滴摩擦發電模組】必須架高且分開，讓同一滴液滴不會流過1片以上的發電模組。
- 同時滴落的液滴越多越好，但是【液滴摩擦發電模組】面積極限和液滴滴落密度有關。
- 液滴導電度越低，發電效果越好。但是還需要測量其他不同液滴的導電度(海水、河流、湖泊...等)，才知道【液滴摩擦發電模組】還能運用在哪些地方(海浪、瀑布)。
- 多個【液滴摩擦發電模組】要並聯且加裝二極體，才不會被單一模組故障而拖累。



(照片由指導教師及作者拍攝)





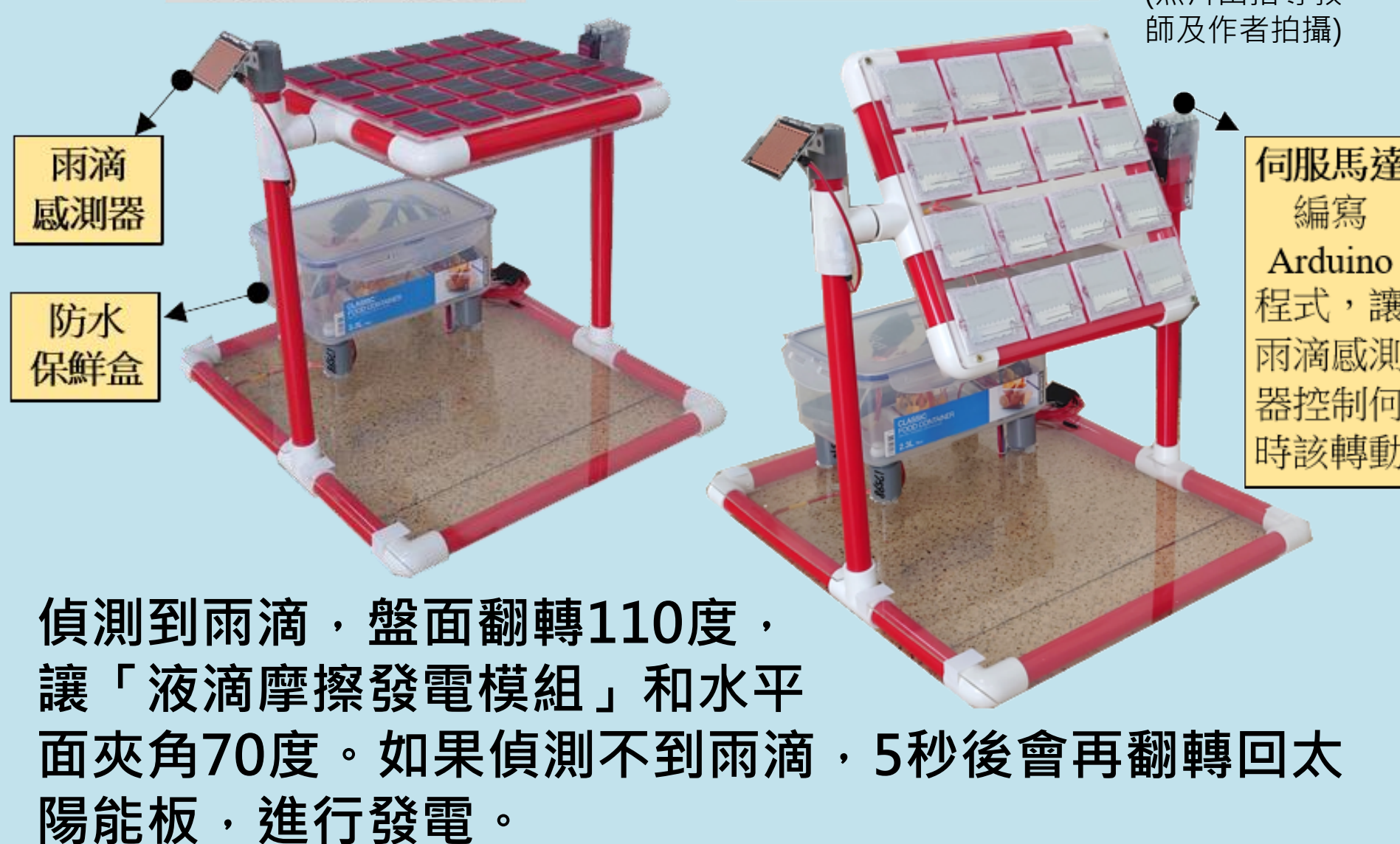
## 【研究三】利用Arduino與雨滴感測器設計【晴、雨發電轉換系統】

- 一、我們根據【研究二】的結果，找出【液滴摩擦發電模組】最佳設置條件，進行設計。
- 二、我們的研究主要重點在【液滴摩擦發電模組】和【晴、雨發電轉換系統】。關於太陽能板的發電，過去有許多作品已經實際做出追日系統，未來可直接結合應用，所以這次就沒有進行探討，最後成品太陽能板的部分就用照片黏貼表示。



### 【晴天狀態】

### 【雨天狀態】



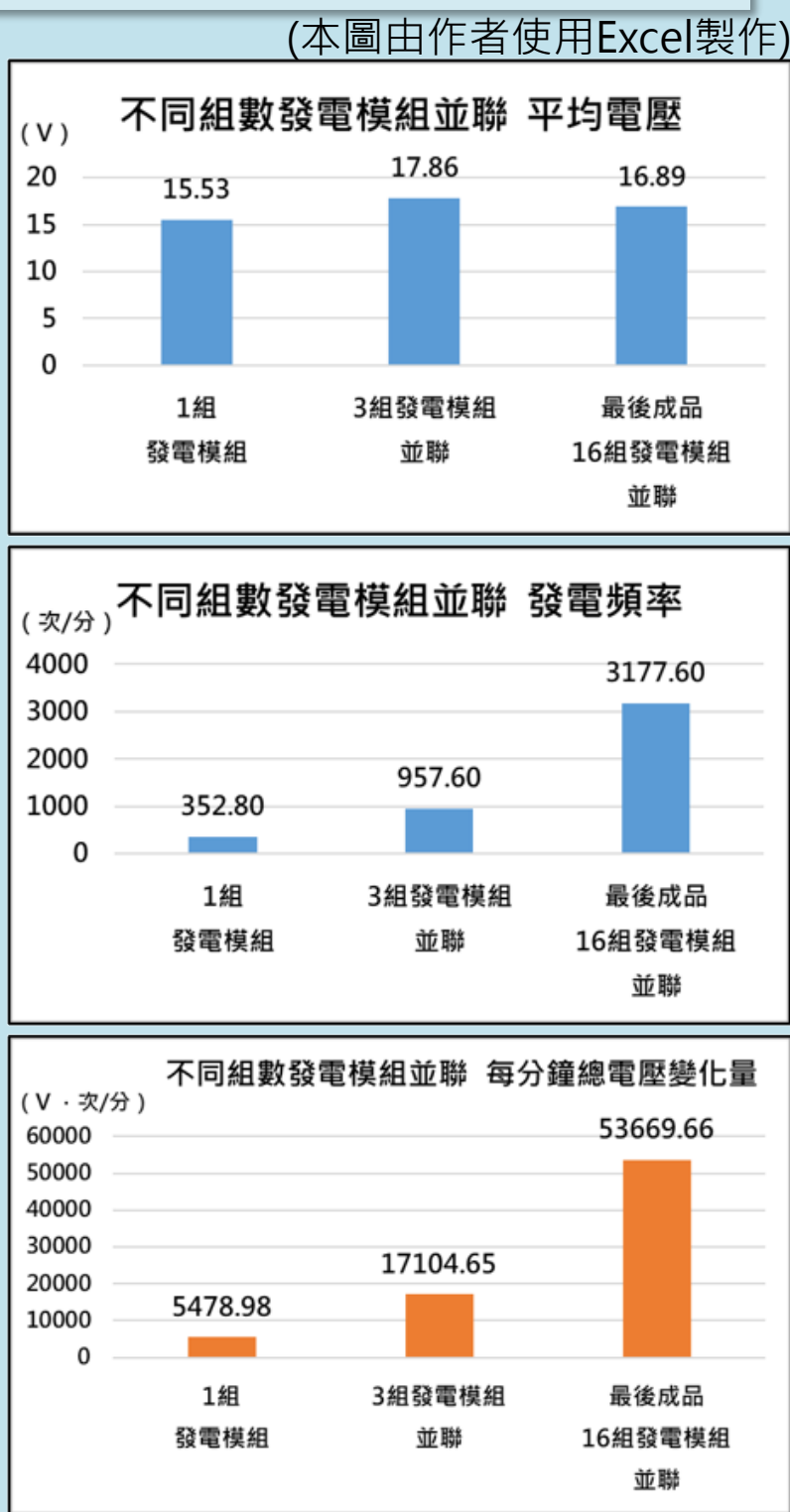
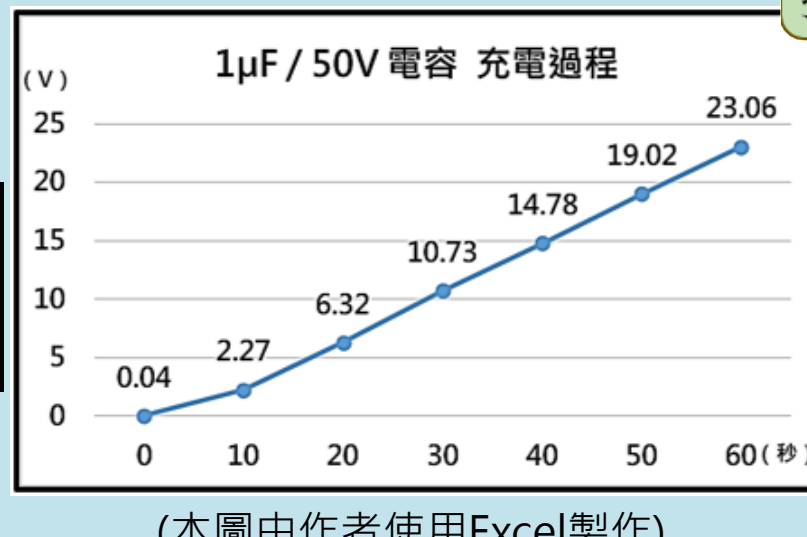
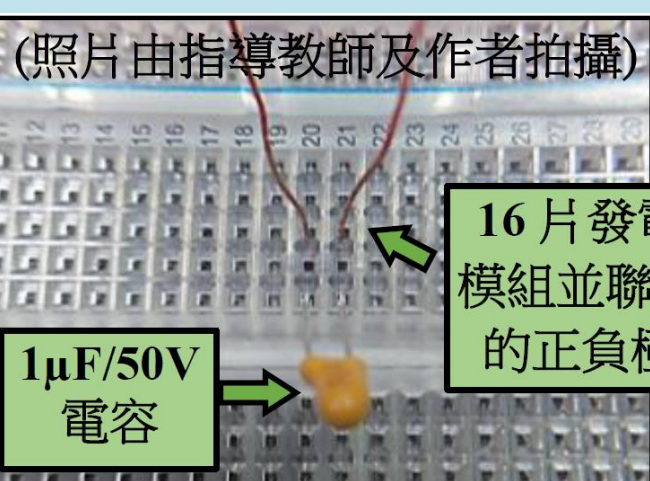
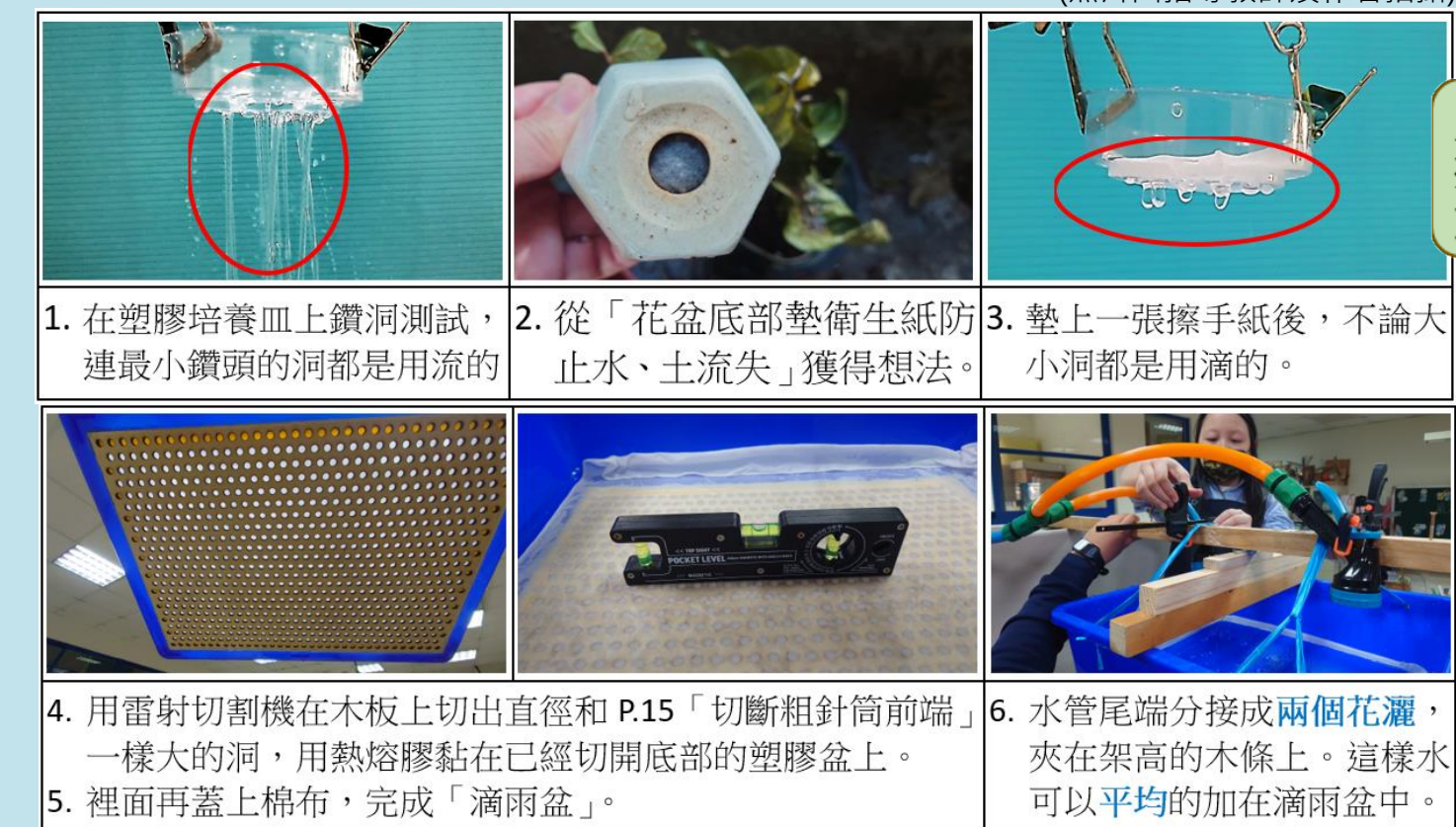
偵測到雨滴，盤面翻轉110度，讓「液滴摩擦發電模組」和水平面夾角70度。如果偵測不到雨滴，5秒後會再翻轉回太陽能板，進行發電。



## 【研究四】模擬下雨，實際測試【晴雨轉換系統】和【雨天狀態發電情形】

### 一、模擬下雨的方法-自製「滴雨盆」

### 二、進行測試



### 三、測試後討論

- 【晴、雨轉換系統】可以**正常運作**，模擬雨滴停止後3分鐘內會轉回太陽能板那面。
- 機器隔天還能運作，**保鮮盒和其他防水措施能成功防水**，讓電子零件保持乾燥。
- 和只有一片【液滴摩擦發電模組】比較，**平均電壓增加8.76%、發電頻率增加800.68%、每分鐘總電壓變化量增加879.56%**。
- 因為我們發電原理是累積電子和電位差，和電容原理類似，所以嘗試**幫1µF/50V的電容充電，結果能順利充電，而且高達23.06V！**充電接法與曲線如左圖，而且電容也能讓LED發亮。
- 可以讓5個紅色LED燈同時不斷閃爍，或許可以運用在雨天警示燈(LED)相關的裝置上，一下雨就自動提供電源！

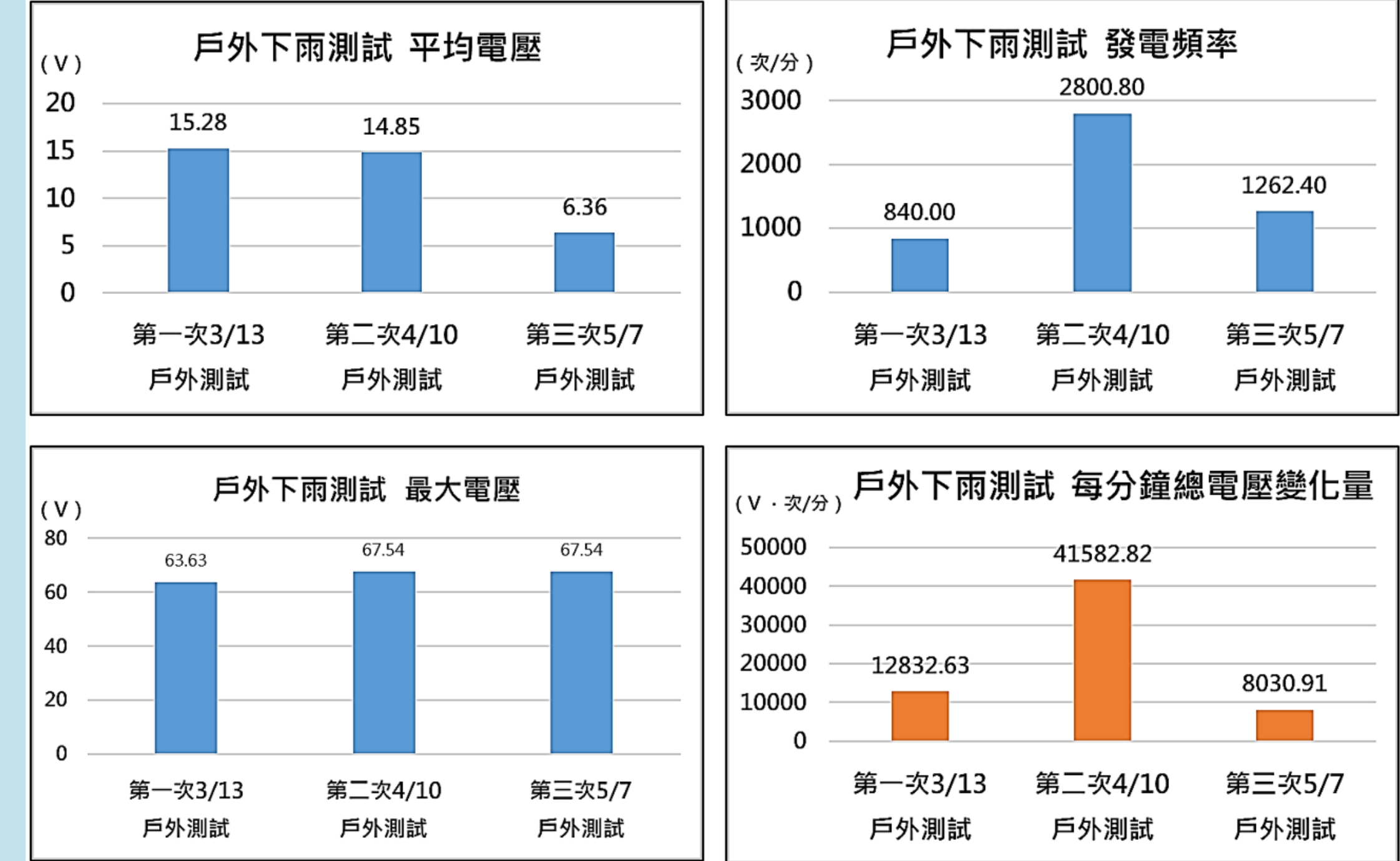


## 【研究五】實際戶外測試雨天發電情形

### 一、戶外下雨時的測試流程



### 二、測試結果



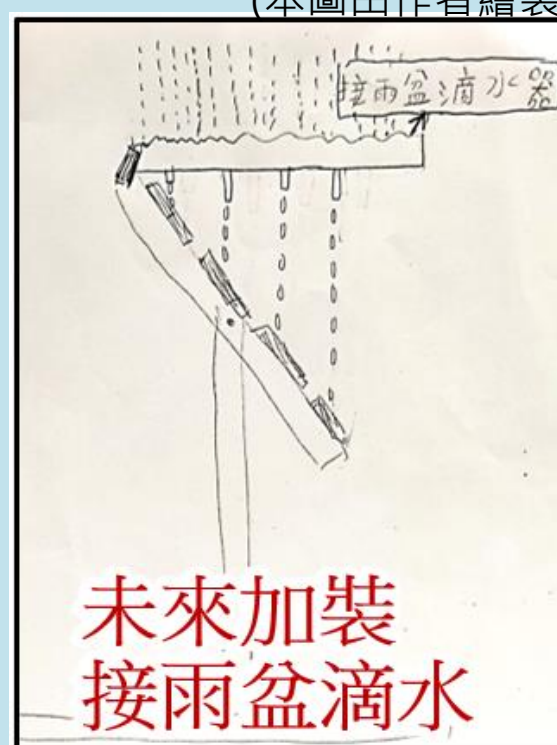
### 三、測試後討論

- 三次下雨發電的總電壓變化量差異很大，第一、二次相差69.14%；第二、三次相差80.69%。其中第二次總電壓變化量是最大的，和實驗室模擬下雨比較，相差了22.52%。
- 從左邊雨滴大小比較可發現，**雨滴不同大小會造成平均電壓、發電頻率、每分鐘總電壓變化量的差異**。
- 所以未來**考慮在上方裝設接雨盆，穩定雨滴的大小和滴落速度**，讓它更實用，成為穩定的新能源。

### 四、未來可再研究項目

- 測試不同濃度的鹽水，找出更多**不同導電度液體對【液滴摩擦發電模組】的影響**。
- 測試「摩擦帶電序列」表上不同材質**，讓容易帶負電、正電的能力更明顯，增加電子流動的能力與機會，但是還是要能**低成本取得**。
- 對於在16片【液滴摩擦發電模組】上方架設接雨盆與水滴滴落裝置，**分析裝設後的優點、缺點**，考慮裝設的必要性。

【液滴摩擦發電模組】上方架設接雨盆與水滴滴落裝置分析	
優點	缺點
(1). 接雨盆接滿水後再開始滴落，統一液滴的大小和滴落速度，穩定發電效果。	(1). 雨滴很小時，統一了液滴大小，但是會很久才滴1滴，滴落頻率很低 (2). 損失雨滴從高空撞擊的能量，降低發電效果。 (3). 接雨盆裝滿水後增加的重量，對整體結構和馬達造成負擔。



## 陸、研究結論

### 1.【液滴摩擦發電模組】的製作：P6

- 選取以下方便取得材料：鋁箔膠帶（易攜帶正電）、FEP（易攜帶負電）、PVC塑膠片（當作基板固定用）、漆包線（容易塑形）。
- 【FEP上方鋁箔】是負極(-)；【下方鋁箔】是正極(+)。

### 2.設計【可控式液滴滴落系統】：P7

- 利用「直流電調速器」調整電動推桿推針筒的速度。
- 加裝「電壓顯示器」。在相同電壓下，水滴數量都相同
- 【電壓量測】的方法及裝置P9：使用「示波器」收集電壓數據 - **可行**
  - 每存一次檔案會有**2.5秒內4096筆的資料**。
  - 真實電壓和示波器的數值只相差2.48%，代表示波器的測量可以信任

### 二、不同情況對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響 P12~P24

- 【液滴摩擦發電模組】不同傾斜角度，對發電情形的影響P12
  - 【液滴摩擦發電模組】和**水平面夾角70度**有最佳每分鐘總電壓變化量。
- 不同液滴直徑對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響P14
  - 液滴直徑越大**，平均電壓越高、每分鐘總電壓變化量越高。
- 不同滴落高度對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響P16
  - 滴落高度越高**，平均電壓、每分鐘總電壓變化量越高。
- 不同滴落頻率對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響P16
  - 滴落頻率越高**，發電頻率、每分鐘總電壓變化量越高。
- 同一滴液滴是否可連續讓不同的【液滴摩擦發電模組】進行發電P17
  - 液滴在遇到第一組【液滴摩擦發電模組】就轉移了大部分的電子**。
- 同時滴落不同液滴數量對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響P18
  - 同時滴落液滴數量越多**，「發電頻率」、「每分鐘總電壓變化量」越高。
- 不同液滴導電度對【液滴摩擦發電模組】發電情形的影響P19
  - 不同液滴導電度：飽和食鹽水（21.93）> 自來水（11.27）> 雨水（6.54）
  - 液滴的導電度越小**，「平均電壓」、「發電頻率」越高。
- 【液滴摩擦發電模組】串聯、並聯對發電情形的影響P20
  - 平均電壓、發電頻率、每分鐘總電壓變化量：**並聯+二極體**> 並聯> 串聯
- 【液滴摩擦發電模組】整體不同面積大小對發電情形的影響P22
  - 「長減半」所有項目和原尺寸相比最多只相差2.67%，差異不大**。
  - 「寬減半」、「長寬減半」和原尺寸相比，分別降低了45%、82.32%。
  - 從【研究二、實驗8】可以知道，**相同面積下「並聯」的發電模組比單片相加的發電效果還要好**，所以最後選擇面積減半（長減半）的尺寸。



## 柒、參考資料

- 科學Online：克氏滴水發電機 (Kelvin Water Drop)。
- 天下文化：科學自然-摩擦起電的原理。  
https://bimonthly.ps-taiwan.org/articles/67bc2f071efd7411b20cb4a8
- 香港城市大學-研究故事-新研發高效能水滴發電機。  
https://www.cityu.edu.hk/zh-hk/research/stories/2020/02/06/new-droplet-based-electricity-generator-drop-water-generates-140v-power-lighting-100-led-bulbs
- 歷屆科展作品。58屆030107電場下的極限運動-水滴帶電量之探討。  
45屆081515靜觀奇電。2015國際科展：探討銻鋼球碰撞的力與能量。
- 均一教育【素養動畫】。何謂靜電、摩擦起電與靜電作用力。  
https://www.junyiacademy.org/junyi-science/science-juni/middle-school-physics-chemistry/s4zdl-/v/gg2MlfGKDSg?v=gg2MlfGKDSg