

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

高級中等學校組 農業與食品學科

第二名

052205

應用濕度感測器監測食品保存性之研究

學校名稱： 國立民雄高級農工職業學校

作者：	指導老師：
職二 陳芊樺	王俊雄
高二 王郁甯	王瓊祥
職二 江宗晟	

關鍵詞： 濕度感測器、水活性、食品保存性

## 壹、摘要

首先以濕度儀測量花生樣品之水活性，需時超過 264 分鐘，而水活性儀僅約 22 分鐘，經實驗證明，較小的密閉空間可加速平衡相對濕度的穩定，進而縮短測試時間。因此，本研究設計自製 DIY 裝置，樣品槽上部空間採用圓錐狀設計可縮小空間，同時促進水氣向上集中，提高測量穩定性。進而利用六種飽和鹽液進行校正，得到趨勢線方程式應用於 DIY 裝置之校正，使其測量結果與專業水活性儀無顯著差異。就經濟成本分析，濕度儀與水活性儀的購置成本分別為新台幣 9,500 元與 103,500 元，而 DIY 裝置的材料成本僅為 1,151 元。本研究開發之 DIY 裝置在提升測量準確性與時間效益的同時，亦具備高度成本效益，未來頗具商品化潛力。



(此相片是由作者拍攝)

## 貳、研究動機與目的

### 一、研究動機

有關花生產品中黃麴毒素污染的新聞報導時有所聞，這讓我對花生的保存方法以及如何避免發霉、進而避免黃麴毒素污染感到好奇，並決定深入探討這個問題。透過網路查詢發現，黃麴毒素是花生製品中最主要的真菌毒素污染來源之一。它是由黃麴菌所產生的一種毒素，黃麴菌的生長關鍵在於環境的溫度與濕度。專家建議花生製品應盡快食用完畢，並存放於低溫、乾燥的環境中，最佳的相對濕度應維持在 55%~65% 之間。<sup>(15)(20)</sup>

進一步蒐集相關資料<sup>(3)</sup>後，我們發現影響食品保存性的關鍵因素之一是「水活性 (Water Activity, Aw)」。水活性是指食品中可供微生物利用的水分含量，與食品的含水率有所不同。而水活性是一種判斷食品是否易受微生物污染的重要指標。基於上述發現，我們開始對如何測量花生中的保存性感到興趣，希望透過本研究，探討來監測食品保存狀況，以確保食品安全，減少健康風險。

### 二、研究目的

- (一) 分析濕度儀與水活性儀測量食品水活性之優缺點，探討如何將濕度儀感測器應用於食品水活性測量。
- (二) 研發如何設計製作測量食品水活性的自製裝置。
- (三) 探討自製裝置測量食品水活性之精準性，並改善測量時間過久與成本昂貴的問題。

## 叁、研究過程與方法

### 一、文獻回顧

#### (一) 食品的保藏原理 <sup>(13)(14)(16)(17)</sup>

食物發生劣變的常見原因包括物理性、化學性與生物性變化，其中以生物性變化最具影響力。在適宜的環境條件下，微生物會迅速繁殖，進而破壞食品的結構與品質。影響微生物生長的主要因素包括溫度、pH 值、氧氣與水分，其中水分是其生長的基本需求。因此，移除微生物可利用的水分，是一種常見且有效的食品保存方法。

#### (二) 食品中的水分 <sup>(1)(5)(19)</sup>

食品中的水分可分為兩種存在形式：自由水 (free water) 與結合水 (bound water)。自由水是指存在於食品組織間隙中、能夠自由流動的水分，可以被微生物直接利用，因此與食品腐敗有密切關係。結合水則是與食物中的親水性官能基團(如  $-OH$ 、 $=NH$ 、 $-NH_2$ 、 $-COOH$ 、 $=C=O$ ) 以氫鍵或與離子基團形成離子鍵所結合的水分，結合水通常不能被微生物所利用。食品中微生物的生長並不取決於總水分含量，而是受到水活性 (water activity,  $a_{1w}$ ) 的影響。由於只有自由水能被微生物利用，因此僅以水分含量的多寡來評估食品的保存性是不夠全面的。真正影響食品穩定性與保藏效果的關鍵因素，是其水活性。

#### (三) 水活性 <sup>(4)(7)(8)(9)(10)(11)(19)</sup>

水活性(water activity,  $Aw$ )定義：係指含水物質之水蒸氣壓除以在同一氣壓溫度下純水之水蒸氣壓所得之值。而平衡相對濕度 (equilibrium relative humidity, E.R.H) 則是指食品周圍空氣在與食品達到水分平衡狀態時的相對濕度，亦即食品蒸氣壓相對於相同條件下純水蒸氣壓的百分比。

$$A_w = \frac{P}{P_0} = \frac{E.R.H}{100}$$

$P$ : 含水物質的蒸氣壓       $P_0$ : 相同溫度下純水的蒸氣壓

水活性常用作評估微生物在食品加工與儲存過程中，與水分相關反應的重要指標，能有效預測微生物的生長速率以及食品成分的穩定性。一般而言，微生物的生長速率會隨水活性的提升而增加，直至達到其生理可耐受的下限為止。大多數細菌僅能在水活性高於0.91的環境中生長，而酵母與黴菌的耐受性較高，能在較低的水活性條件下繼續生長。當水活性低於0.6時，幾乎無任何微生物能夠繁殖。因此，透過降低食品的水活性，能有效抑制微生物生長，是一種安全且有效的食品保存方式。

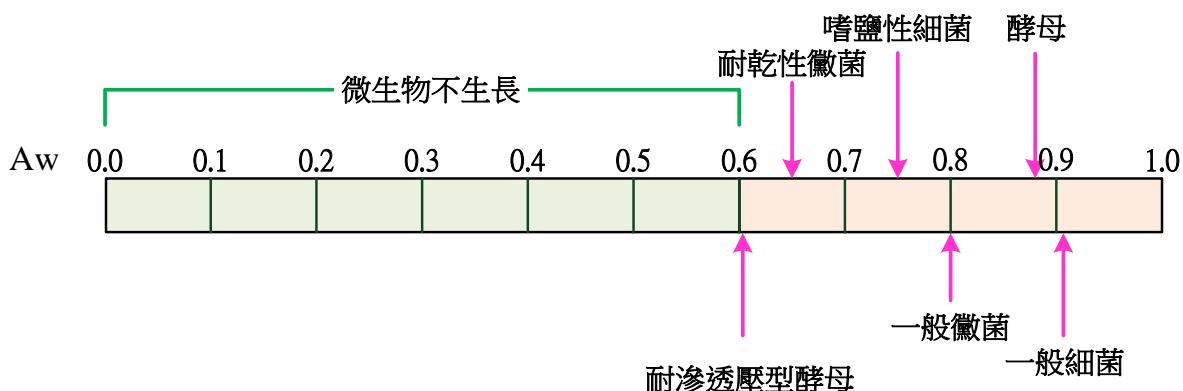


圖1. 食品水活性與微生物最低生長水活性 (作者根據參考資料<sup>(6)(20)</sup>繪製)

### (五) 水活性的測量<sup>(3)(18)</sup>

#### 1. 重量法

在乾燥器底部放入標準鹽類，加入少量蒸餾水使其部分溶解。將預先製備的樣品置於密閉容器中，在 30°C 恒溫靜置 24 小時。之後取出樣品，測量乾燥前後重量，計算水分損失百分比。以飽和鹽溶液的相對濕度為橫軸、水分損失率為縱軸繪圖，曲線交點對應的相對濕度即為樣品的水活性。優點是價格較低廉，缺點是測試時間冗長。

#### 2. 濕度計法

將樣品與已知水活性的參考溶液置於密閉容器中，讓雙方達到水蒸氣壓平衡。為推算樣品水活性，需建立濕氣吸附等溫線，根據含水量對應出水活性。實驗中常以吸濕材料與樣品共置，測定其含水變化作為間接指標。優點是價格較低廉，缺點是精準度較差。

#### 3. 水活性儀

水活性儀可直接測量樣品表面水蒸氣壓，並根據與純水水蒸氣壓的比值計算出水活性。測量時將樣品放入水活性儀的密閉測量腔中，儀器會自動偵測並計算其水活性值。優點是具有較高的精準度，缺點是價格昂貴。

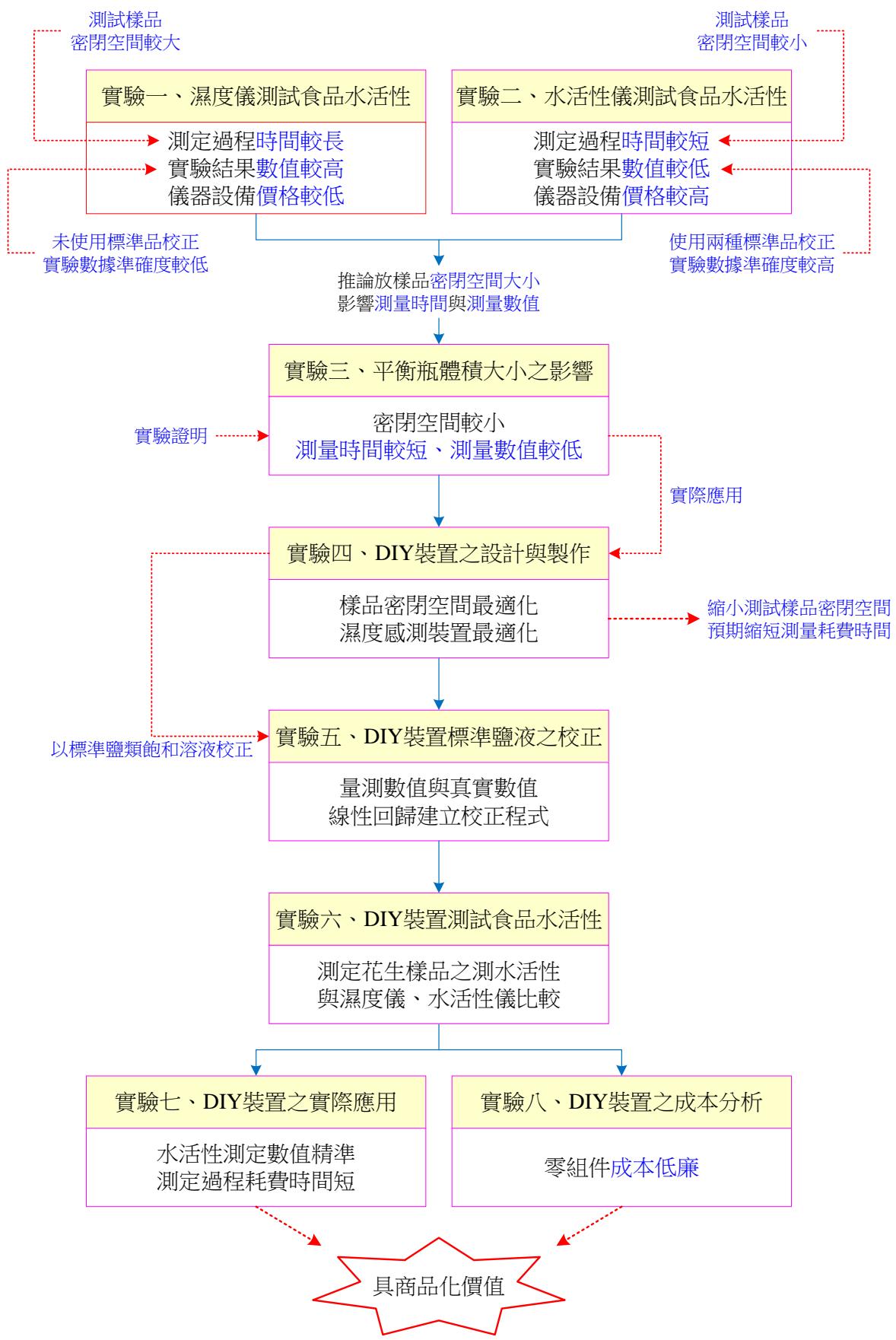
### (六) 飽和鹽液的校正<sup>(2)(3)</sup>

利用特定鹽類在特定溫度下所產生的濕度作為已知的水活性，用以校正儀器。

表 1. 特定飽和鹽溶液的水活性 (作者根據參考資料<sup>(2)(3)</sup>製表)

飽和鹽液	IUPAC 名	化學式	20°C	25°C	30°C
氯化鋰	Lithium Chloride	LiCl	0.11	0.11	0.11
醋酸鉀	Potassium Acetate	CH <sub>3</sub> COOK	0.23	0.23	0.22
碳酸鉀	Potassium Carbonate	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.43	0.43	0.43
氯化鈉	Sodium Chloride	NaCl	0.76	0.75	0.75
氯化鉀	Potassium Chloride	KCl	0.85	0.84	0.84
硫酸鉀	Potassium Sulfate	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.98	0.97	0.97

## 二、研究架構



(此圖由作者自行繪製)

### 三、設備與材料

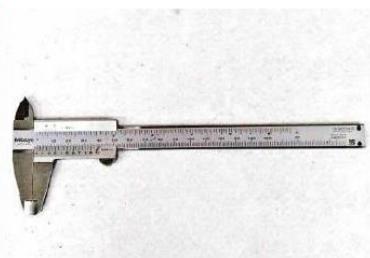
#### (一) 設備



溼度記錄儀  
(Data Logger)  
Testo 174H  
(Germany)



水活性儀  
Novasina LabStart aw  
(Switzerland)



游標卡尺(150mm)  
Mitutoyo  
(Japan)



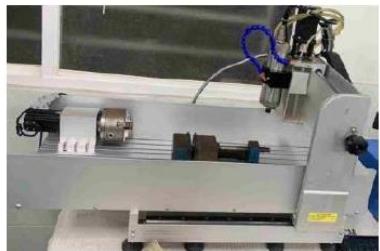
桌上型真空包裝機  
TS-350M  
(Taiwan)



筆記型電腦  
Acer-4720ZG  
(Taiwan)



車床  
S430X760  
(Taiwan)



CNC 雕刻機  
Bonta3630  
(Taiwan)



立式銑床  
SZ-A8-V  
(Taiwan)



直立式鑽床  
King-sanc  
(Taiwan)

(上列相片皆由作者拍攝)

#### (二) 材料

- |                       |  |
|-----------------------|--|
| 1. 花生 (虎尾鎮農會產品加工廠)    | 1. 氯化鋰LiCl (Choneye Pure Chemicals)                              |
| 2. QQ糖 (義美食品股份有限公司)   | 2. 醋酸鉀CH <sub>3</sub> COOK (Choneye Pure Chemicals)              |
| 3. 牛奶糖 (台灣森永製菓股份有限公司) | 3. 碳酸鉀K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (shimakyu's pure chemicals) |
| 4. 仙貝 (宜蘭食品工業股份有限公司)  | 4. 氯化鈉NaCl (Choneye Pure Chemicals)                              |
| 5. 豆丁 (溢旺貿易實業有限公司)    | 5. 氯化鉀KCl (Choneye Pure Chemicals)                               |
| 6. 豬肉角 (新東陽股份有限公司)    | 6. 硫酸鉀K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Nihon Seiyaku)             |
| 7. 鱈魚香絲 (有豐食品股份有限公司)  |  |

## 四、研究方法

### 【實驗一】濕度儀測定法之測試

**前言**：本實驗參考中華民國國家標準水分活性測定法<sup>(18)</sup>，以濕度儀(testo 174H, Made in Germany)測量食品的相對濕度(RH%)，再換算成水活性(Aw)。同時，初步瞭解採用此方法測定水活性所需的時間。

**步驟：**

1. 實驗變因：測試時間（每分鐘紀錄一次數據）。
2. 實驗室內空調設定溫度為25°C，選取真空包裝完整的花生樣品。使用擀麵棍將包裝袋內的花生樣品輾壓至粉碎，然後拆開包裝袋，立即將花生樣品放入500ml的密閉平衡瓶中。
3. 將濕度儀放入500ml密閉平衡瓶內，並扣緊瓶蓋，確保平衡瓶保持密閉狀態，如圖2A所示。
4. 經過6小時後，取出平衡瓶中的濕度儀，使用濕度儀專用的數據讀取介面，將濕度儀內儲存的數據傳輸至電腦，如圖2B所示。
5. 記錄每分鐘的相對濕度(RH%)數據，並將其轉換為水活性(Aw)數據。
6. 重複步驟2~步驟5，共進行三次實驗。
7. 繪製測試時間與水活性之間的關係圖，從而觀察隨著測試時間的增加，花生樣品水活性變化的趨勢。
8. 彙整步驟7的實驗數據，確定水活性(Aw)達到穩定狀態的平衡時間，並記錄此時的水活性(Aw)數值。



A.以濕度儀量食品的相對濕度(RH%)

B.讀取濕度儀的數據並換算為水活性(Aw)

圖2. 使用濕度儀測量食品的相對濕度(RH%)再換算為水活性(Aw) (相片皆由作者拍攝)

**結果：**

1. 由圖3顯示，水活性數據在前60分鐘內呈現明顯下降趨勢；60分鐘之後，下降速率逐漸減緩；大約240分鐘以後，水活性的變化趨於平緩，逐漸呈現接近穩定的狀態。
2. 以濕度儀測量花生樣品的水活性(Aw)，經三次重複試驗後發現，水活性達到穩定的平衡時間約為264分鐘，此時的水活性數值約為0.43，如表2所示。

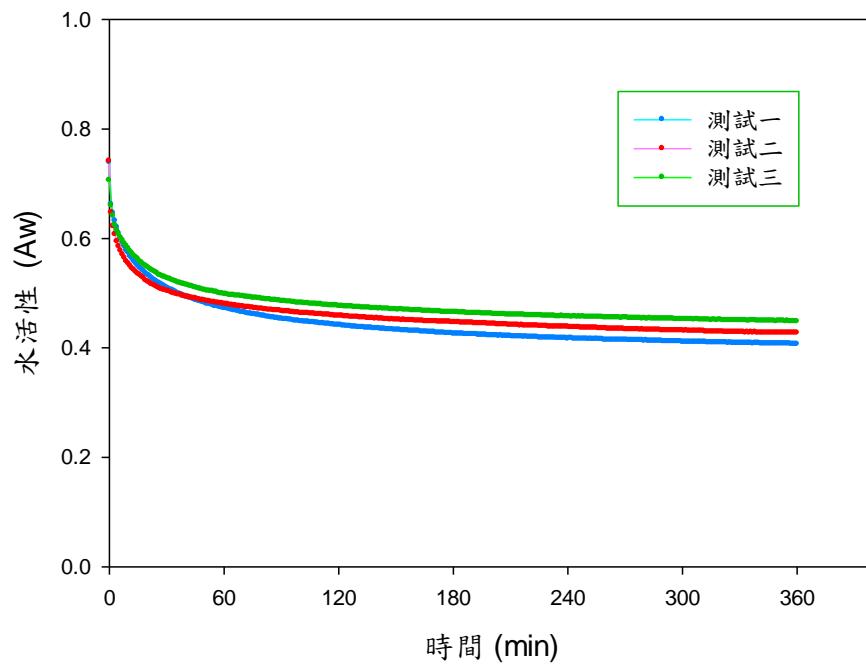


圖 3. 以濕度儀測試花生水活性(Aw)數值變化之趨勢 (此圖由作者繪製)

表 2. 以濕度儀測試花生樣品之水活性(Aw)與平衡時間

項 目	500ml 平衡瓶				標準差
	測試一	測試二	測試三	平均值	
水活性 (Aw)	0.41	0.43	0.45	0.43	0.02
平衡時間 (min)	259	261	272	264	7

**討論：**

- 為確保每次實驗所使用之樣品均屬同一批次，並維持水活性的穩定性，本研究採用一致的實驗條件。為此，所有實驗樣品皆以真空包裝方式儲存，以減少環境因素對水活性的影響。
- 由於本實驗所採用的濕度儀(Testo 174H)之濕度感測器(sensor)與濕度儀一體成形，如圖 2 所示。因此，在實驗過程中，需將整個濕度儀放置於密閉的平衡瓶中，用以記錄樣品中所含水分與平衡瓶內氣相水分之間的相對濕度平衡。
- 根據本實驗的觀察，我們推測測量頂部空間中平衡相對濕度所需時間較長，推測這一現象的潛在原因與感測器的安裝位置有關，因為將濕度儀(Testo 174H)放置於平衡瓶中，會在樣品上方產生較大空間，這可能影響平衡瓶內的相對濕度平衡時間。基於此假設，若能縮小密閉平衡瓶的體積，則可能會縮短測量頂部空間中平衡相對濕度達到穩定所需的時間。

## 【實驗二】水活性儀測定法之測試

**前言**：本實驗使用水活性儀(Novasina LabStart-aw, Made in Switzerland)測定花生樣品的水活性(Aw)，並將所得數值與【實驗一】中濕度儀測得的水活性數據進行比較，以探討兩者之間的差異及其可能成因。

**步驟**：

1. 水活性儀之校正用之兩種鹽類標準品，採用原廠(Novasina)之SAL-T33 (Aw0.33)／SAL-T75 (Aw0.75)，如圖4A所示。
2. 分別將SAL-T33／SAL-T75兩種鹽類標準品，置於水活性儀的樣品槽中進行水活性儀之校正，如圖4B、圖4C所示。
3. 取真空包裝完整的花生樣品，先將包裝袋內的樣品壓碎後，再拆封包裝袋，接著將花生樣品置於水活性儀的樣品槽中，進行水活性(Aw)之測定。
4. 當水活性儀測定花生樣品結束後，讀取並記錄樣品之水活性(Aw)數據及測試完成所需時間。
5. 將本實驗所測得的水活性(Aw)數據與【實驗一】濕度儀進行彙整，將水活性數據及測試所需時間進行統計分析及繪圖，用以評估兩組數據是否有顯著差異。



圖4. 使用水活性儀測定花生樣品的水活性(Aw) (相片皆由作者拍攝)

**結果**：

1. 由表3、圖5顯示，以濕度儀測試水活性(Aw)約 $0.43 \pm 0.02$ ；以水活性儀測試水活性(Aw)約 $0.23 \pm 0.01$ 。以濕度儀測試之數值，很明顯高於水活性儀測試之數值，並經統計分析得知，兩組數據是有顯著差異。
2. 由表4、圖6顯示，以濕度儀測試水活性所需時間約 $264 \pm 7$ 分鐘(Aw數值呈現穩定狀態時間)；以水活性儀測試水活性所需時間約 $22 \pm 3$ 分鐘。以濕度儀測試所需時間，很明顯高於水活性儀測試所需時間，並經統計分析得知，兩組數據是有顯著差異。

表 3. 以濕度儀／水活性儀測試花生樣品之水活性(Aw)

測試儀器	水活性 (Aw)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
濕度儀	0.41	0.43	0.45	0.43 <sup>a</sup>	0.02
水活性儀	0.24	0.23	0.23	0.23 <sup>b</sup>	0.01

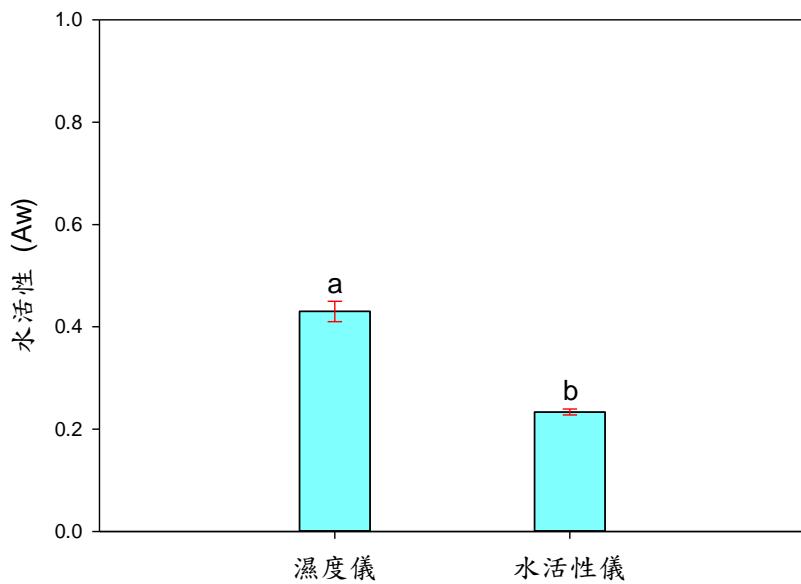


圖 5. 以濕度儀／水活性儀測試花生之水活性(Aw) (此圖由作者繪製)

表 4. 以濕度儀／水活性儀測試花生水活性之所需時間

測試儀器	時間(min)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
濕度儀	259	261	272	264 <sup>a</sup>	7
水活性儀	22	24	19	22 <sup>b</sup>	3

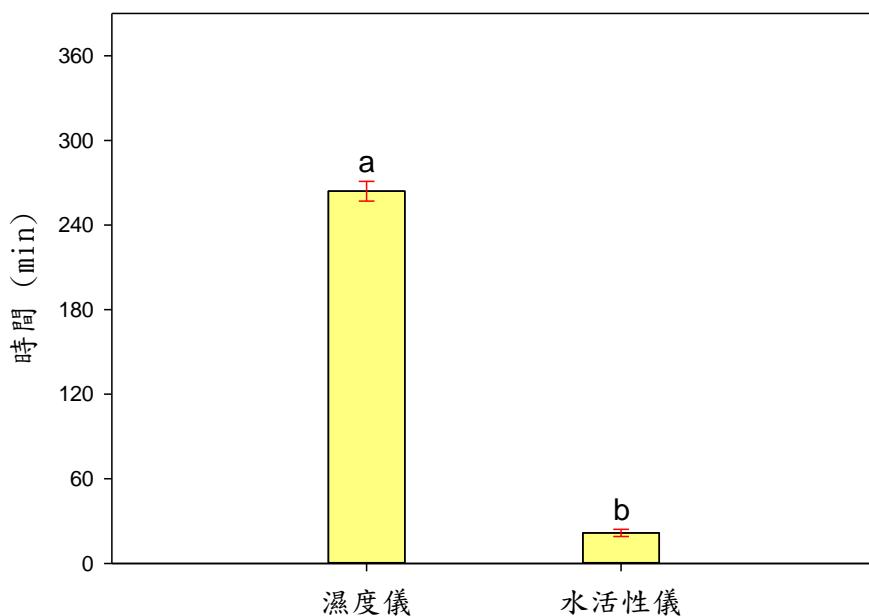


圖 6. 以濕度儀／水活性儀測試花生水活性之所需時間 (此圖由作者繪製)

## 討論：

1. 本實驗結果顯示，使用濕度儀測得的水活性數值高於使用水活性儀測得的數值，且經統計分析確認兩者之間存在顯著差異。在【實驗一】中，濕度儀並未配備校正用的鹽液標準品；相比之下，本實驗使用的水活性儀配備了 Aw0.33 和 Aw0.75 的鹽液標準品進行校正，因此水活性儀所測得的水活性數值更加精確。
2. 在【實驗一】以濕度儀測試水活性所需時間，並非是完成測試所需時間，而是水活性數值呈現穩定狀態之時間。若要維持穩定數值至完成測試，所需時間將會更加冗長；相較之下，若以水活性儀測試所需時間可大幅縮短。
3. 根據本研究分析，使用濕度儀測量水活性時，必須考慮感測器的密閉性，因此所需的密閉空間較大。而水活性儀則設計了較小的密閉空間，如圖 7 所示。我們推測，水活性儀所用的較小密閉空間能顯著縮短平衡時間。因此，樣品在密閉空間中的體積大小，可能是影響水活性平衡達穩定所需時間的關鍵因素。



圖7. 水活性儀放置樣品的密閉空間較小 (相片皆由作者拍攝)

## 【實驗三】平衡瓶體積大小之影響

**前言：**本實驗利用不同體積大小的平衡瓶進行CNS 5255, N 6119測定法(二)<sup>(18)</sup>，透過調整樣品放置空間的大小，探討平衡瓶體積與平衡時間之間的關係。預期隨著平衡瓶體積的減小，所需的平衡時間也將縮短。

## 步驟：

1. 實驗變因：不同體積(500ml／150ml)的平衡瓶。
2. 實驗室內空調設定溫度為25°C，選取真空包裝完整的花生樣品。使用擀麵棍將包裝袋內的花生樣品輾壓至粉碎，然後拆開包裝袋，立即將花生樣品放入500ml的密閉平衡瓶中。
3. 將濕度儀放入150ml密閉平衡瓶內，並扣緊瓶蓋，確保平衡瓶保持密閉狀態。
4. 經過6小時後，取出平衡瓶中的濕度儀，使用濕度儀專用的數據讀取介面，將濕度儀內儲存的數據傳輸至電腦。
5. 記錄每分鐘的相對濕度 (RH%) 數據，並將其轉換為水活性 (Aw) 數據。
6. 重複步驟2~步驟5，共進行三次實驗。
7. 將本實驗所測得的水活性(Aw)數據與【實驗一】濕度儀進行彙整，將水活性數據及測試所需時間進行統計分析及繪圖，用以評估兩組數據是否有顯著差異。

**結果：**

- 由圖8顯示，以不同體積(500ml／150ml)的平衡瓶測試水活性(Aw)，整體而言，500ml平衡瓶的水活性數值高於150ml平衡瓶。針對150ml平衡瓶，其水活性在前60分鐘內呈現明顯下降的趨勢；60分鐘後，下降幅度趨緩，僅有輕微變化；至120分鐘後，水活性逐漸趨於穩定。

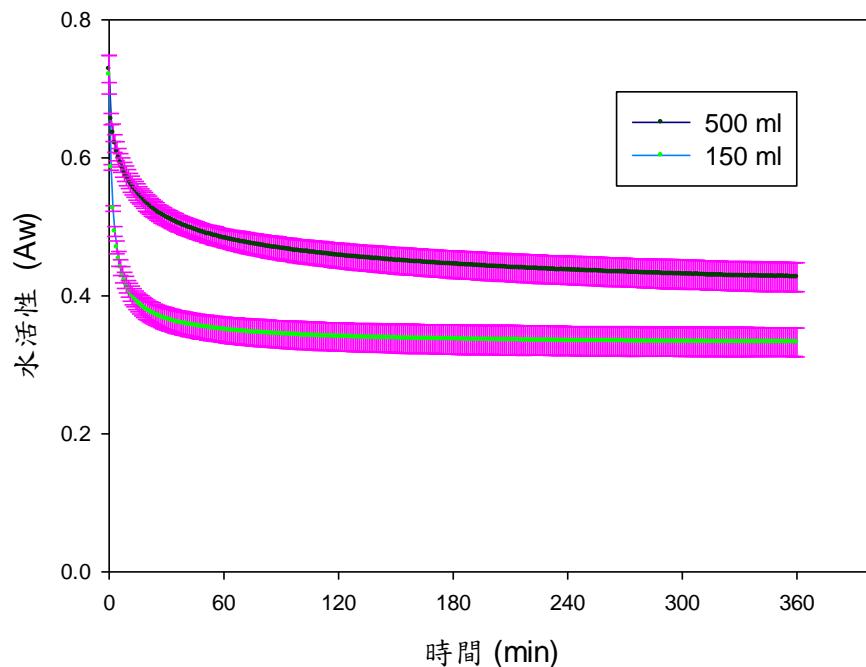


圖 8. 以不同體積平衡瓶測試花生水活性(Aw)與時間之關係 (此圖由作者繪製)

- 由表5、圖9顯示，以500ml平衡瓶測試水活性約 $0.43 \pm 0.02$ ；以150ml平衡瓶測試水活性約 $0.34 \pm 0.02$ 。以500ml平衡瓶測試之數值，很明顯高於以150ml平衡瓶測試之數值，並經統計分析得知，兩組數據是有顯著差異。
- 由表6、圖10顯示，以500ml平衡瓶測試水活性所需時間約 $264 \pm 7$ 分鐘(Aw數值呈現穩定狀態時間)；以水活性儀測試水活性所需時間約 $130 \pm 25$ 分鐘。以150ml平衡瓶測試水活性所需時間，很明顯低於以500ml平衡瓶測試水活性所需時間，並經統計分析得知，兩組數據是有顯著差異。

表 5. 以不同體積平衡瓶測試花生樣品之水活性(Aw)

平衡瓶體積	水活性 (Aw)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
500ml	0.41	0.43	0.45	0.43 <sup>a</sup>	0.02
150ml	0.36	0.32	0.33	0.34 <sup>b</sup>	0.02

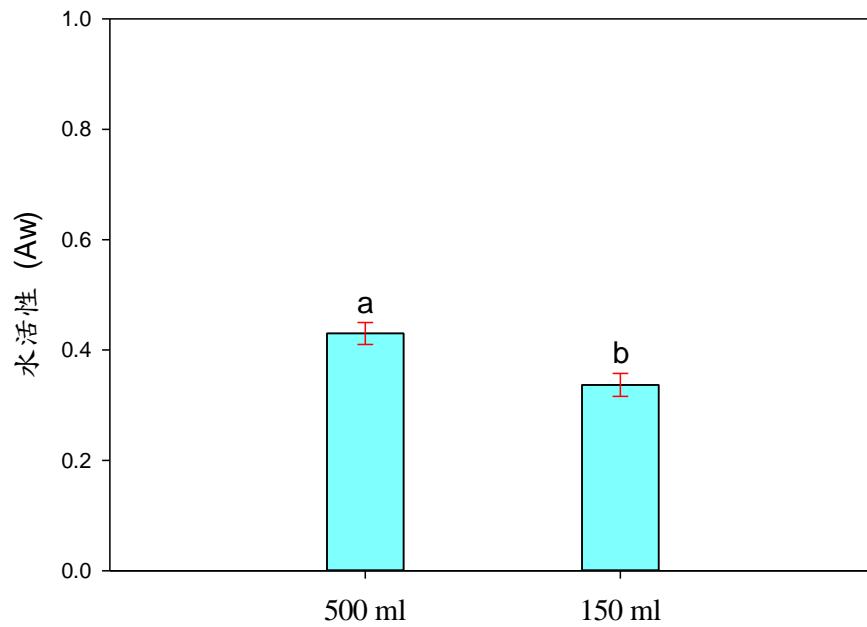


圖 9. 平衡瓶大小對水活性(Aw)量測數值之影響 (此圖由作者繪製)

表 6. 以不同體積平衡瓶測試花生水活性所需時間

平衡瓶體積	平衡時間 (min)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
500ml	259	261	272	264 <sup>a</sup>	7
150ml	111	158	122	130 <sup>b</sup>	25

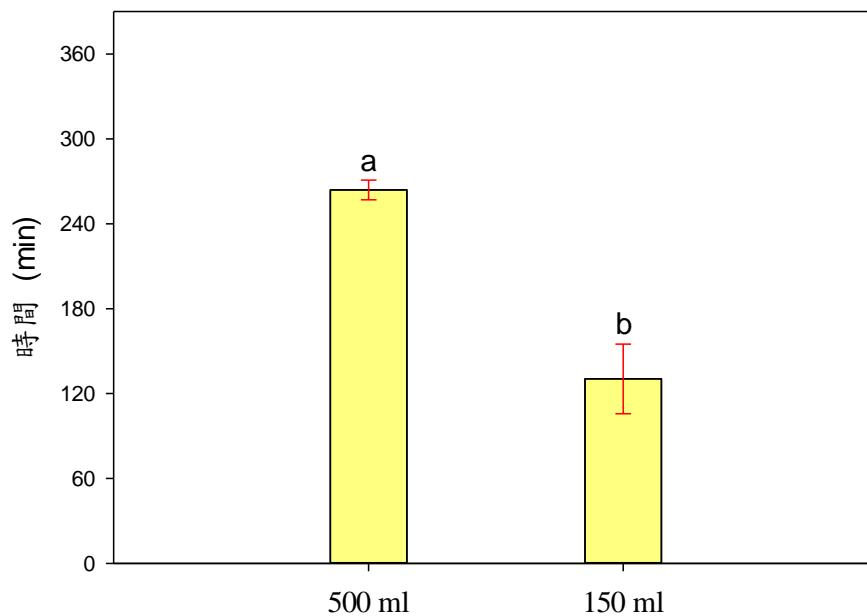


圖 10. 以不同體積平衡瓶測試花生水活性所需時間 (此圖由作者繪製)

## 討論：

1. 經過本實驗證明，使用不同體積(500ml／150ml)的平衡瓶，水活性數值呈現穩定狀態之時間，以150ml平衡瓶測試水活性所需時間明顯較短。這代表縮小平衡瓶的體積，可有效縮短測試所需時間。
2. 使用體積為500ml的平衡瓶所測得之水活性( $0.43 \pm 0.02$ )，明顯高於體積為150ml的平衡瓶所測得之水活性( $0.34 \pm 0.02$ )。二者之實驗數據，經過統計分析後，證實兩者具有顯著差異。推論體積為500ml所測得之水活性較高，可能是平衡瓶中，原有存在的空氣較多，相對存在較多水氣，因此，導致最終呈現的水活性數據偏高。
3. 使用濕度儀測試水活性(Aw)，測試所需時間較長，實驗結果數據較有疑慮，但儀器設備成本較低；使用水活性儀測試水活性(Aw)，測定過程時間較短，實驗數據較精準，儀器設備價格成本較高。二者各有優缺點，本研究希望應用濕度感測器，以DIY模式，自製水活性(Aw)測試裝置，整合二者之優點，改善其缺點，設計製作出測試所需時間快速，實驗數據精準，設備成本低廉的DIY裝置。

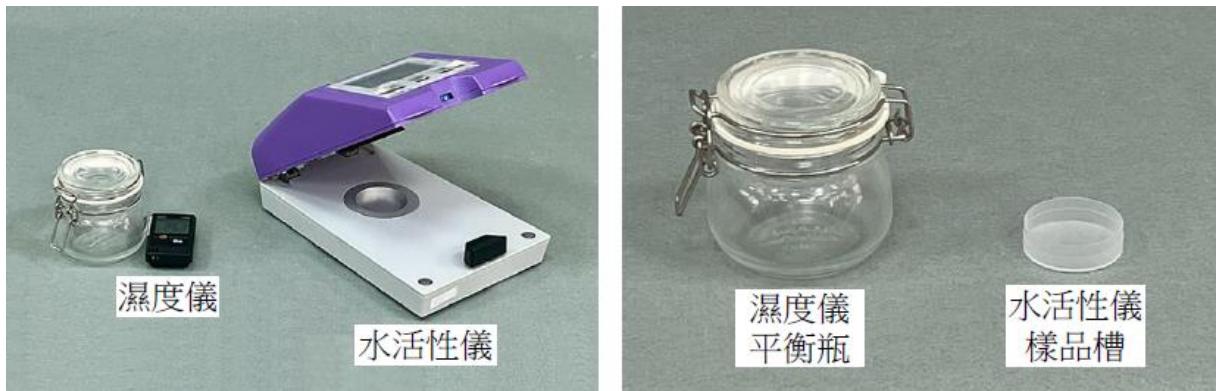
## 【實驗四】DIY裝置之設計與製作

**前言：**本實驗針對「中華民國國家標準食品水分活性測定法」<sup>(18)</sup>之測定法（二）進行改良，針對濕度儀實驗過程耗時過久、相對濕度數值偏高及水活性儀價格昂貴等問題，保留濕度儀成本低廉、水活性儀測試時間快且數值穩定的優勢，並且縮小樣品容器體積。製作「DIY 裝置」與水活性儀的測試結果進行比對，觀察其穩定性。「DIY 裝置」參考水活性儀的設計，預期能縮短平衡時間，減少空氣對水活性的影響，並在最短時間內獲得樣品的水活性。整個流程分為容器與電路的設計、容器與電路的製作，還有就是可以使硬體順利運作的軟體程式設計。

### A、設計

#### (A) 濕度感測裝置容器最適化分析

1. 觀察【實驗一】濕度儀和【實驗二】水活性儀發現，兩者濕度感測裝置放置位置不同。濕度儀之感測器位於儀器裡面，測試時必須把整個濕度儀放入平衡瓶中，易使濕度儀碰觸到樣品。且內部空間大，平衡時間長，如圖11所示。
2. 從【實驗二】過程觀察到，水活性儀感測器是位於上蓋，樣品盤上方還有保留高度不會碰到樣品。整個空間較小，平衡時間較短，如圖11所示。
3. 因此我們就進一步發想，把水活性儀的上蓋加以改良成錐形狀，一方面縮小上部空間，另一方面利用形狀的空間特性，使平衡時所蒸發的氣體更容易被感測器準確的量測到，如圖12所示。
4. 加上控制盒，這樣我們「DIY 裝置」的構想就成形了，如圖12所示。



A. 濕度儀、水活性儀

B. 水活性儀樣品密閉平衡空間較小

圖11. 樣品平衡空間最適化之設計 (相片皆由作者拍攝)

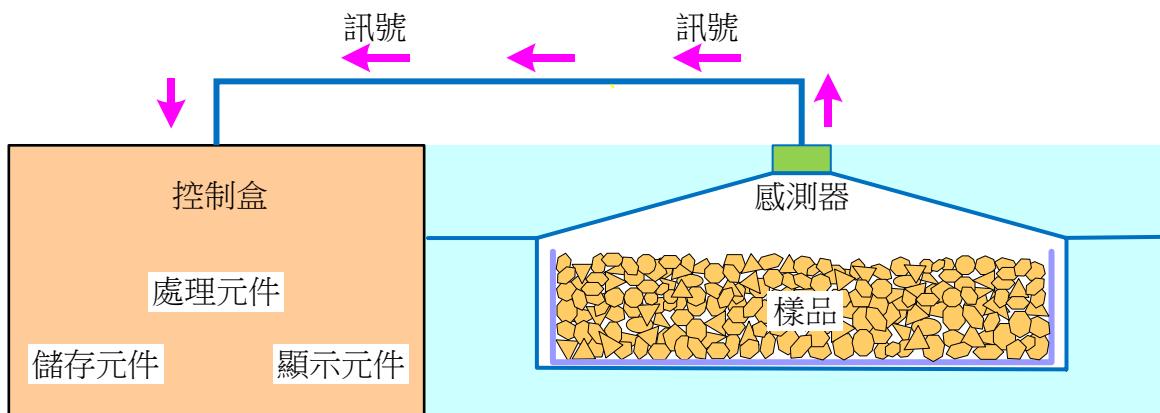


圖12. 「DIY 裝置」構想圖 (此圖由作者繪製)

### (B) 濕度感測裝置電路設計

我們分析水活性的量測，「DIY 裝置」整個處理流程如圖13所示。依據它的流程所需要的功能與設備，來設計與佈置各個零件的相關位置配置圖，如圖14所示。

以下為各個組件的使用原由功能與相互關係說明：

1. 本裝置需要偵測出容器內的濕度值，同時要便於移動，我們採用體積小、便宜且易於開發使用的ESP32s做為控制板的處理元件。
2. 為了顯示偵測到的資料，同時能夠比較容易觀察出平衡的狀態，我們選用了TFT\_LCD螢幕顯示元件，可以透過程式設計同步顯示出測量的水活性與其曲線圖。
3. 增加可以儲存數據資料的SD記憶卡以便於分析資料的儲存元件。
4. 想將容器空間縮小，我們使用體積小的溼度感測元件。
5. 設置一些按鈕控制裝置，以及LED燈來顯示目前的狀態。

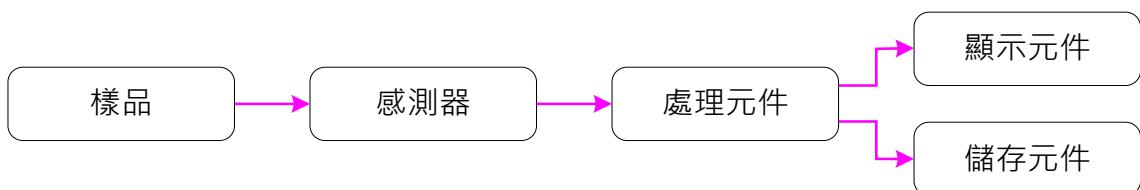


圖13. 「DIY 裝置」處理流程 (此圖由作者繪製)

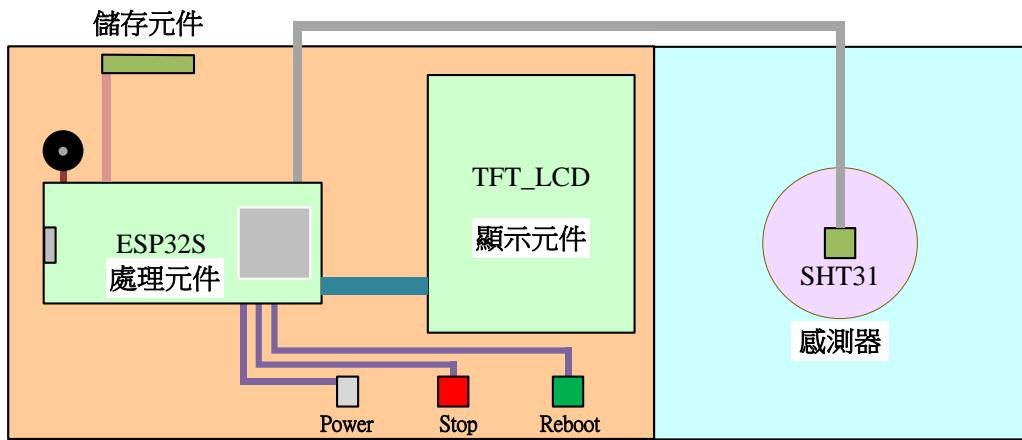


圖14. 「DIY 裝置」電路配置圖 (此圖由作者繪製)

## B、製作

我們依照電路圖、設計簡單的測試程式以及容器的順序，依序製作並加以組裝，並來回測試整個組件的穩定度，詳細步驟如下。

**步驟：**

1. 先畫電路圖，再將電線所在位置預先規劃好，如圖15A所示。
2. 元件佈置與組裝，依電路圖焊接電路，如圖15B所示。
3. 撰寫簡易測試程式，看看各個電路組件是否可正常運作，如圖15C所示。
4. 置放樣品容器元件之製作，取適當的材料鋸切加工如圖15D所示。
5. 使用銑床加工出上蓋精確尺寸，達到設計的形狀與所需尺寸，如圖15E所示。
6. 車削加工樣品槽，如圖15F所示。
7. 使用鑽床鑽孔加工，鎖上螺絲裝好絞鍊和箱扣，進行容器裝置組裝，如圖15G所示。
8. 容器需注意氣密性，所以要與線路組裝密封，如圖15H所示。

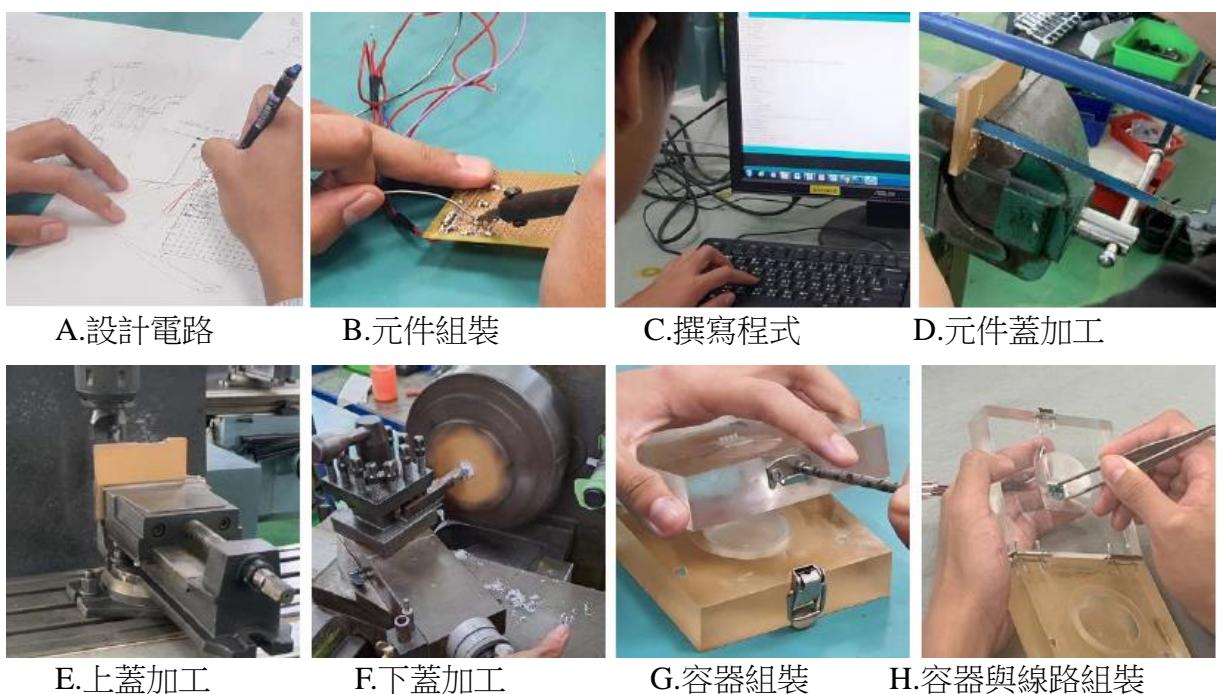


圖15. 「DIY 裝置」的製作 (相片皆由作者拍攝)

## C、濕度感測裝置程式設計之流程

在「DIY 裝置」中使用濕度感測器偵測容器內的相對溼度，我們利用目前較普遍的 DIY 控制板 ESP32 來製作開發，進行程式撰寫。

### 步驟：

1. 引用外部感測器的程式庫。
2. 將一些變數以及一些參數的初始值加以設定。
3. 讓程式計時 5 秒鐘之後，呼叫感測器讀取濕度值。
4. 經過程式處理後將數據與圖形顯示於螢幕上。
5. 經判斷是否平衡，監測數據經過一段時間後是否相同，若數據維持穩定將執行終止程式。
6. 若判斷尚未達到平衡標準將繼續重複步驟 3、4、5、6。
7. 如果合乎平衡條件，程式結束停止測量，如圖 16 所示。

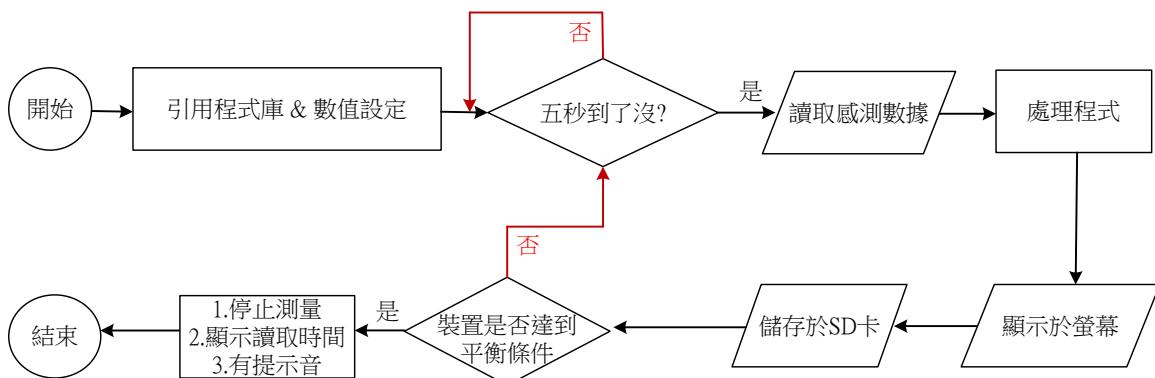


圖 16. 程式流程圖 (此圖由作者繪製)

### 結果：

1. 透過裝設於上蓋的感測器可以感測樣品的相對濕度，如圖 17D 所示。
2. 感測器感測到相對濕度後，會送至處理元件，如圖 17B 所示。接著進入處理程序，執行已被上傳的程式，將相對濕度轉換成水活性。
3. 水活性資料被處理過後的資料會存入儲存元件，如圖 17A 所示。
4. 水活性同時會顯示於 TFT\_LCD 顯示元件上，螢幕顯示也同時包含測試時間與水活性的趨勢圖，如圖 17C 所示。
5. 經測試結果顯示，「DIY 裝置」可以正常順利運作。

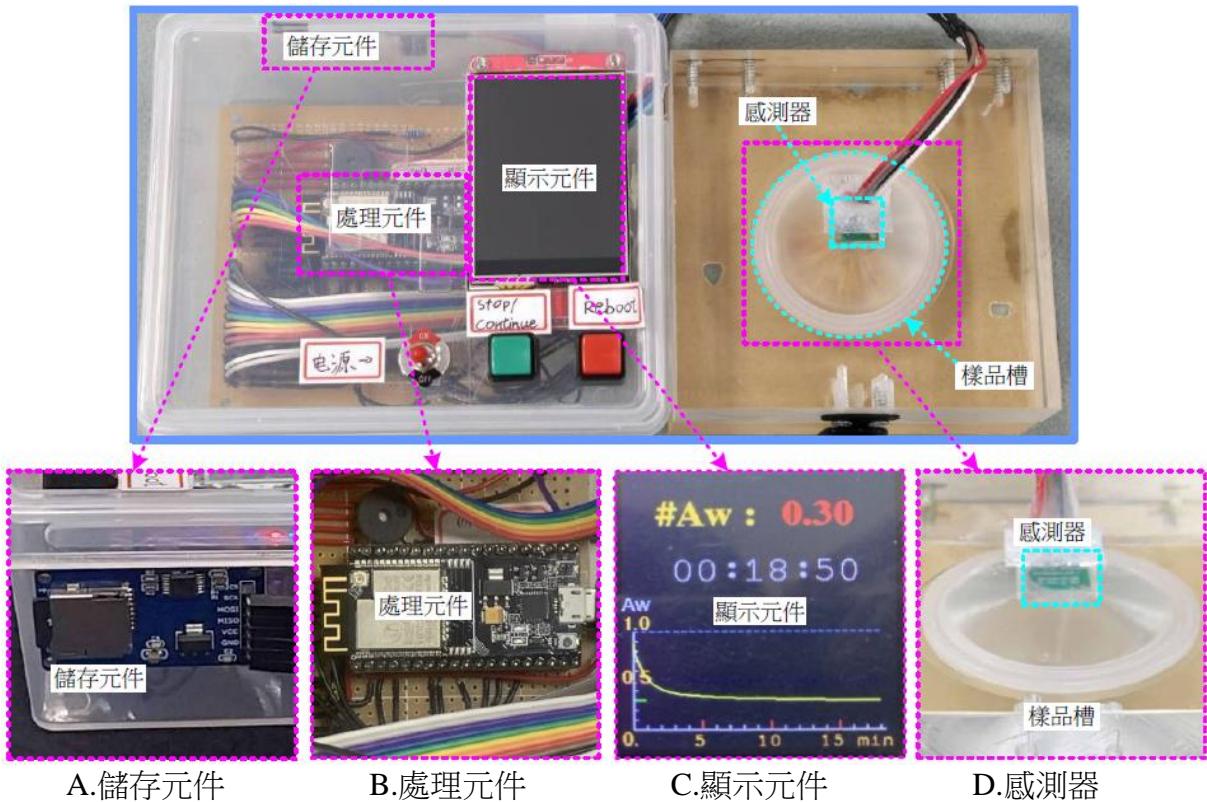
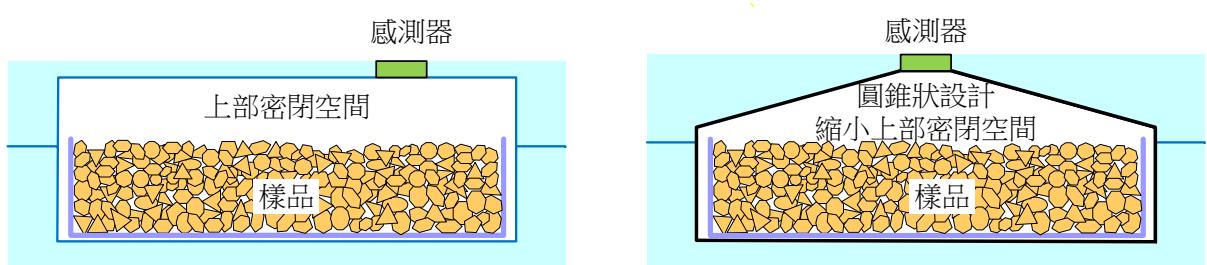


圖17. 「DIY裝置」成品 (相片皆由作者拍攝)

**討論：**

1. 從【實驗三】的結果顯示，平衡瓶體積大小會影響相對濕度數值，體積越小所測出的水活性越不受空氣中水分影響。我們參考水活性儀，將樣品平衡空間縮小，降低空氣過多而對相對濕度數值的影響。
2. 我們參考水活性儀樣瓶平衡空間大小，從【實驗二】的水活性儀可以觀察到其容器空間高度約是17mm，樣品盤高度約為12mm，而直徑約為42mm，代表樣品上方空間僅有約7cm<sup>2</sup>，如圖18A所示。
3. 參考【實驗三】實驗結果，將樣品上方空間縮小，可以減少樣品平衡空間，預期檢測時間會縮短。我們覺得水活性儀的樣品槽體積可以更小，於是將容器空間上方改良成圓錐狀，設計圓錐形狀可使上方體積縮小，讓蒸氣壓順著錐形斜斜往上，集中到感測器。如圖18B所示。



A.水活性儀樣品槽上部密閉空間設計

B. DIY裝置圓錐狀設計縮小上部密閉空間

圖18. 濕度感測裝置最適化之設計 (此圖由作者繪製)

## 【實驗五】DIY裝置標準鹽液之校正

**前言**：參考相對濕度(RH%)校正相關資料<sup>(2)(3)</sup>，配製六種標準鹽類飽和溶液，以DIY裝置測試標準鹽液之相對濕度(RH%)進行校正，希望DIY裝置經由校正後，其精準度能大幅提昇。

**步驟**：

### A、飽和鹽液方程式之校正

1. 參考相對濕度(RH%)校正相關資料<sup>(2)(3)</sup>，配製六種標準鹽類飽和溶液(氯化鋰、醋酸鉀、碳酸鉀、氯化鈉、氯化鉀、硫酸鉀)，如圖 19A 所示。
2. 使用滴管吸取5 mL標準飽和鹽類溶液，並注入樣品容器中。
3. 將樣品容器置入「DIY裝置」內，並蓋緊樣品槽蓋，如圖19B所示。
4. 啟動「DIY裝置」電源，分別測量六種標準飽和鹽類溶液樣品的水活性( $Aw$ )，並觀察記錄測試完成後的水活性數值。
5. 重複步驟2至4，依序測量六種標準飽和鹽類溶液樣品的水活性數值。
6. 以「DIY裝置」所測得的水活性數值為x軸，標準飽和鹽類溶液的理論水活性值為y軸，繪製圖形進行線性回歸分析以求得趨勢線方程式如圖19C所示。



A. 配製六種標準飽和鹽液      B.進行DIY裝置校正      C.線性回歸求出校正方程式

圖19. 「DIY裝置」標準飽和鹽液之校正過程 (相片皆由作者拍攝)

### B、校正方程式之更改

1. 將所得的趨勢線方程式作為校正依據，應用於「DIY裝置」的資料處理程式中，以提升水活性測量結果的準確性。
2. 使用開發版程式修改，增加程式流程，把多增加校正方程式，寫成運算處理程式，將原始的水活性數據加以運算校正。
3. 將運算校正後的數據，與用手動方式把原始數據帶入飽和鹽液校正的趨勢線方程式，試算結果看看數值是否一樣，驗證程式修改之後是否正確。

**結果**：

### A、飽和鹽液方程式之校正

1. 以「DIY 裝置」測試六種標準鹽類飽和溶液之水活性( $Aw$ )，其實驗所得的「量測數值」與文獻資料上的「真實數值」，如表 7 所示。
2. 將表7六種標準鹽類飽和溶液之「量測數值」與「真實數值」繪製分析圖形，並經線性回歸分析結果，趨勢線方程式為： $y = 1.1394x - 0.1495$ ，如圖20所示。

表 7. 六種標準鹽類飽和溶液水活性 (Aw) 之「量測數值」與「真實數值」

數據種類	標準鹽類飽和溶液之水活性 (Aw)					
	氯化鋰	醋酸鉀	碳酸鉀	氯化鈉	氯化鉀	硫酸鉀
量測數值	0.19	0.34	0.54	0.79	0.88	0.99
真實數值	0.11	0.23	0.43	0.75	0.84	0.97

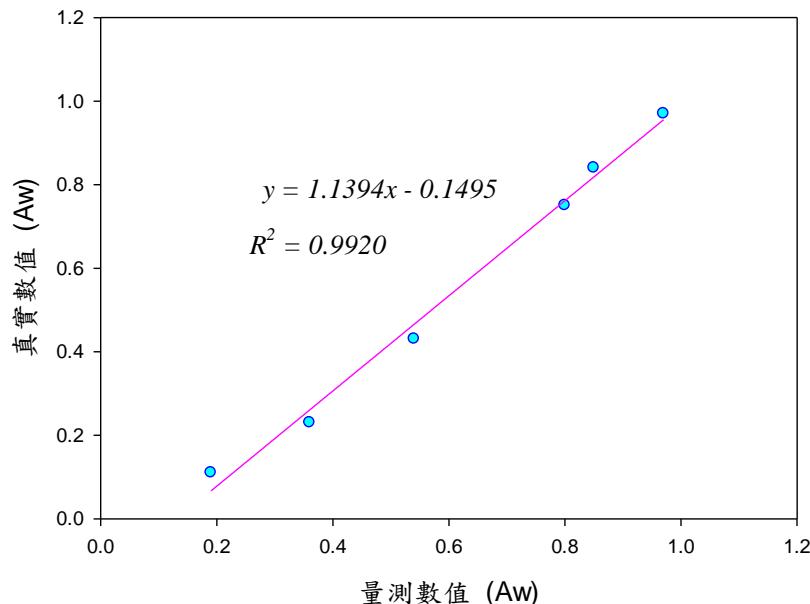


圖20. 以「DIY裝置」測試標準鹽類飽和溶液之水活性 (Aw)  
(此圖由作者繪製)

## B、校正方程式之更改

- 校正方程式的程式更改敘述如下：

```
humidity = mySensor_readHumidity();
Aw_Data= humidity *0.01;
Aw_Data =(1.1394* Aw_Data)-0.1495;
```

- 將標準鹽液校正所得之趨勢線方程式寫為程式處理資料，使水活性數值更加準確，修改後程式流程，如圖21所示。

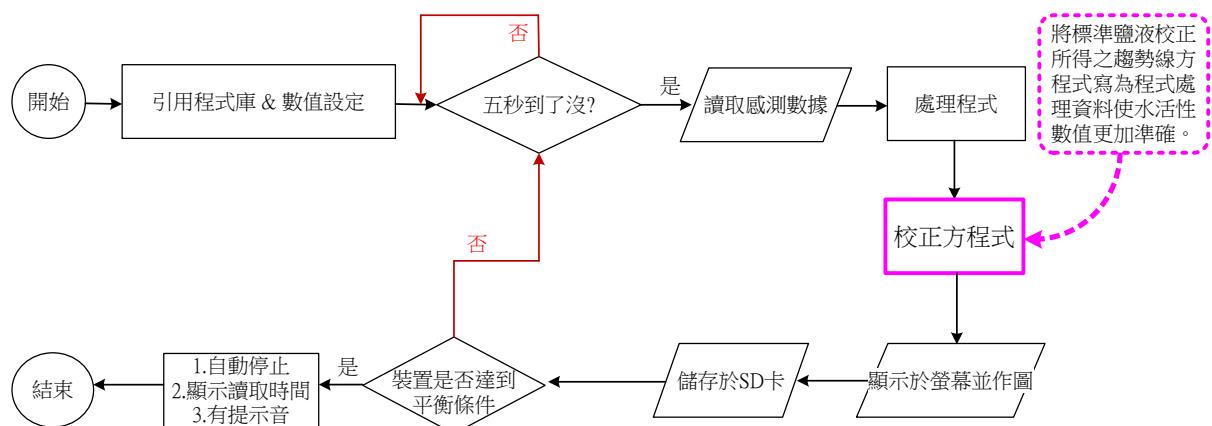


圖21. 修改後程式流程圖 (此圖由作者繪製)

**討論**：

1. 在【實驗二】中，使用水活性儀進行校正時，採用了Aw0.33和Aw0.75兩種鹽類標準品進行校正，因此水活性儀所測得的水活性數值更加精確。
2. 本實驗採用氯化鋰(Aw 0.11)、醋酸鉀(Aw 0.23)、碳酸鉀(Aw 0.43)、氯化鈉(Aw 0.75)、氯化鉀(Aw 0.84)、硫酸鉀(Aw 0.97)等六種標準飽和鹽液進行校正，標準飽和鹽液水活性涵蓋範圍更廣(Aw 0.11~ Aw 0.97)，更有效提升「DIY 裝置」之準確性。

### 【實驗六】以DIY裝置測試Aw

**前言**：本實驗採用【實驗五】校正後的「DIY裝置」測試花生樣品的水活性(Aw)，並將所得數據與【實驗一】、【實驗二】、【實驗三】的實驗結果進行比較，初步評估「DIY 裝置」在測試水活性(Aw)之精準度及所需時間。

**步驟**：

1. 取真空包裝完整的花生樣品，先將包裝袋內的樣品壓碎後，再拆封包裝袋，接著將花生樣品置於水活性儀的樣品槽中，進行水活性(Aw)之測定。
2. 當「DIY裝置」測定結束後，讀取並記錄花生樣品的水活性(Aw)數據及測試完成所需時間。
3. 將本實驗所測得的水活性(Aw)數據與【實驗一】、【實驗二】、【實驗三】之Aw測試數據進行彙整。
4. 將步驟3所彙整的水活性(Aw)數據進行統計分析，瞭解各組數據之間的差異，進而判斷是否存在顯著性。
5. 根據統計分析結果，繪製長條圖，對比分析各組水活性數據之差異。

**結果**：

1. 由表8與圖22可知，使用濕度儀 (500ml及150ml) 測得的水活性數值，明顯高於水活性儀與DIY裝置的測試結果。經統計分析顯示，濕度儀 (500ml與150ml) 所測得之數值與水活性儀及DIY裝置之間存在顯著差異；然而，水活性儀與DIY裝置之間的測試結果則無顯著差異。

表 8. 以不同儀器裝置測試花生樣品之水活性(Aw)

儀器裝置	水活性 (Aw)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
濕度儀 (500ml)	0.41	0.43	0.45	0.43 <sup>a</sup>	0.02
濕度儀 (150ml)	0.36	0.32	0.33	0.34 <sup>b</sup>	0.02
水活性儀	0.22	0.24	0.24	0.23 <sup>c</sup>	0.01
DIY 裝置	0.24	0.25	0.22	0.24 <sup>c</sup>	0.02

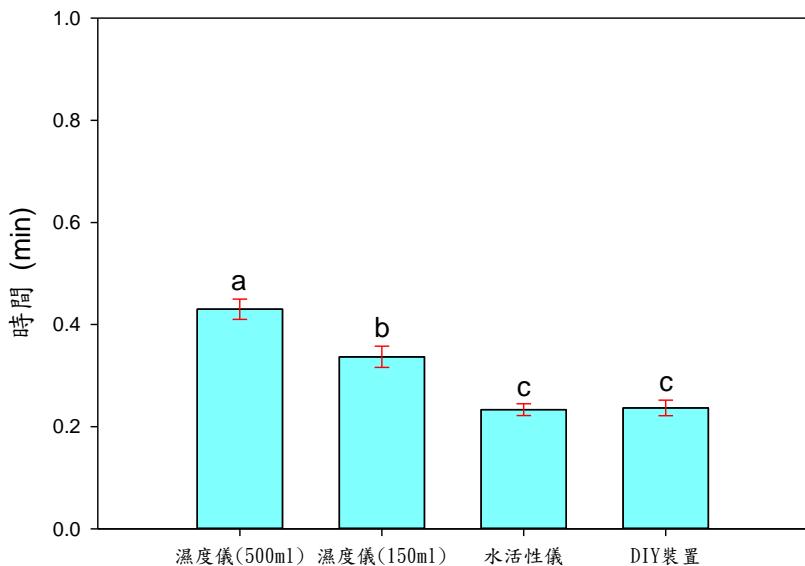


圖 22. 以不同儀器裝置測試花生樣品之水活性(Aw) (此圖由作者繪製)

2. 由表9、圖23可知，使用濕度儀（500ml及150ml）測得的水活性所需時間，明顯高於水活性儀與DIY裝置的測試結果。經統計分析顯示，濕度儀（500ml與150ml）所測得之數值與水活性儀及DIY裝置之間存在顯著差異；然而，水活性儀與DIY裝置之間的測試結果則無顯著差異。

表 9. 以不同儀器裝置測試花生水活性所需時間

儀器裝置	時間 (min)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
濕度儀 (500ml)	259	261	272	264 <sup>a</sup>	7
濕度儀 (150ml)	111	158	122	130 <sup>b</sup>	25
水活性儀	22	26	24	24 <sup>c</sup>	2
DIY 裝置	13	15	11	13 <sup>c</sup>	2

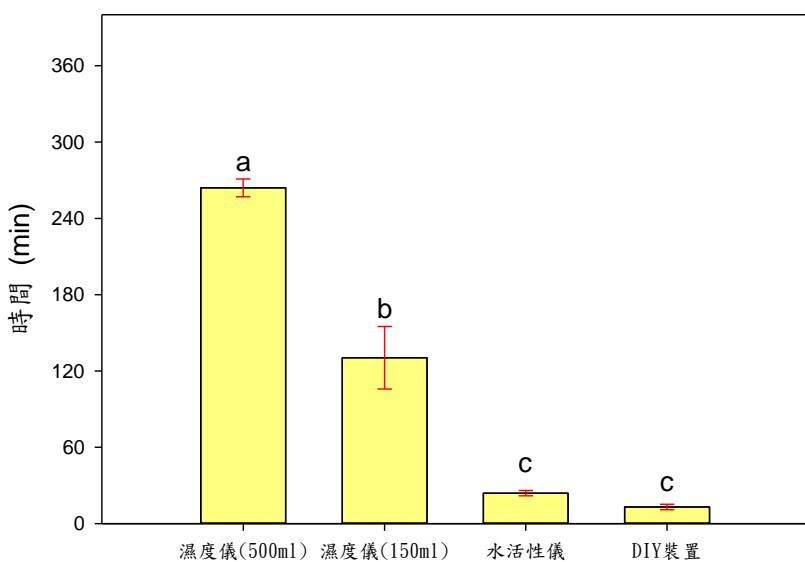


圖 23. 以不同儀器裝置測試花生水活性所需時間 (此圖由作者繪製)

### 討論：

- 由本實驗結果可證實，對相同花生樣品進行測試時，使用DIY裝置所測得的水活性(Aw)及其所需測量時間，經統計分析後與專業水活性儀的測量結果無顯著差異，顯示本DIY裝置具備良好的可行性與準確性。
- 本研究自製的DIY裝置在實用性方面已可媲美專業水活性儀。更大的優勢是其零組件成本低廉，未來具備商品化與推廣應用的潛力。

## 【實驗七】DIY裝置之實際測試

**前言：**在【實驗六】中已驗證，使用DIY裝置測試相同的花生樣品，其測得的水活性結果與專業水活性儀之間無顯著差異。為進一步驗證DIY裝置的精準度與實用性，本實驗擴大測試範圍，實際應用DIY裝置對更多種類的食品進行水活性測定，並將所得數值與專業水活性儀的測試結果進行比較與分析，以更多實測數據佐證DIY裝置的準確性與應用價值。

### 步驟：

- 實驗變因：水活性儀、DIY裝置。
- 同時採用專業水活性儀與自製DIY裝置，對QQ糖、牛奶糖、仙貝、豆丁、豬肉角、鱈魚香絲等六種食品樣品進行水活性測試。
- 實驗測定完成後，讀取並記錄各樣品的水活性數值與測量所需時間。
- 每項測試皆重複進行三次，並將各樣品的水活性數值與所需時間進行彙整。
- 彙整後的數據進行統計分析，以評估兩種測量裝置之間在測得水活性與所需時間方面是否存在顯著差異，進而判斷DIY裝置的準確性與可行性。

### 結果：

- 由表10、圖24顯示，使用水活性儀／DIY裝置分別測量六種樣品的水活性(Aw)數值，經統計分析後發現，各樣品之水活性(Aw)數值之間並無顯著差異

表 10. 使用水活性儀／DIY 裝置分別測試六種樣品之水活性(Aw)

儀器裝置	水活性 (Aw)					
	A. QQ 糖	B. 牛奶糖	C. 仙貝	D. 豆丁	E. 豬肉角	F. 鱈魚香絲
水活性儀	0.68±0.01 <sup>a</sup>	0.60±0.01 <sup>a</sup>	0.44±0.01 <sup>a</sup>	0.68±0.01 <sup>a</sup>	0.70±0.01 <sup>a</sup>	0.59±0.01 <sup>a</sup>
DIY 裝置	0.67±0.01 <sup>a</sup>	0.59±0.02 <sup>a</sup>	0.43±0.02 <sup>a</sup>	0.67±0.01 <sup>a</sup>	0.70±0.02 <sup>a</sup>	0.58±0.01 <sup>a</sup>

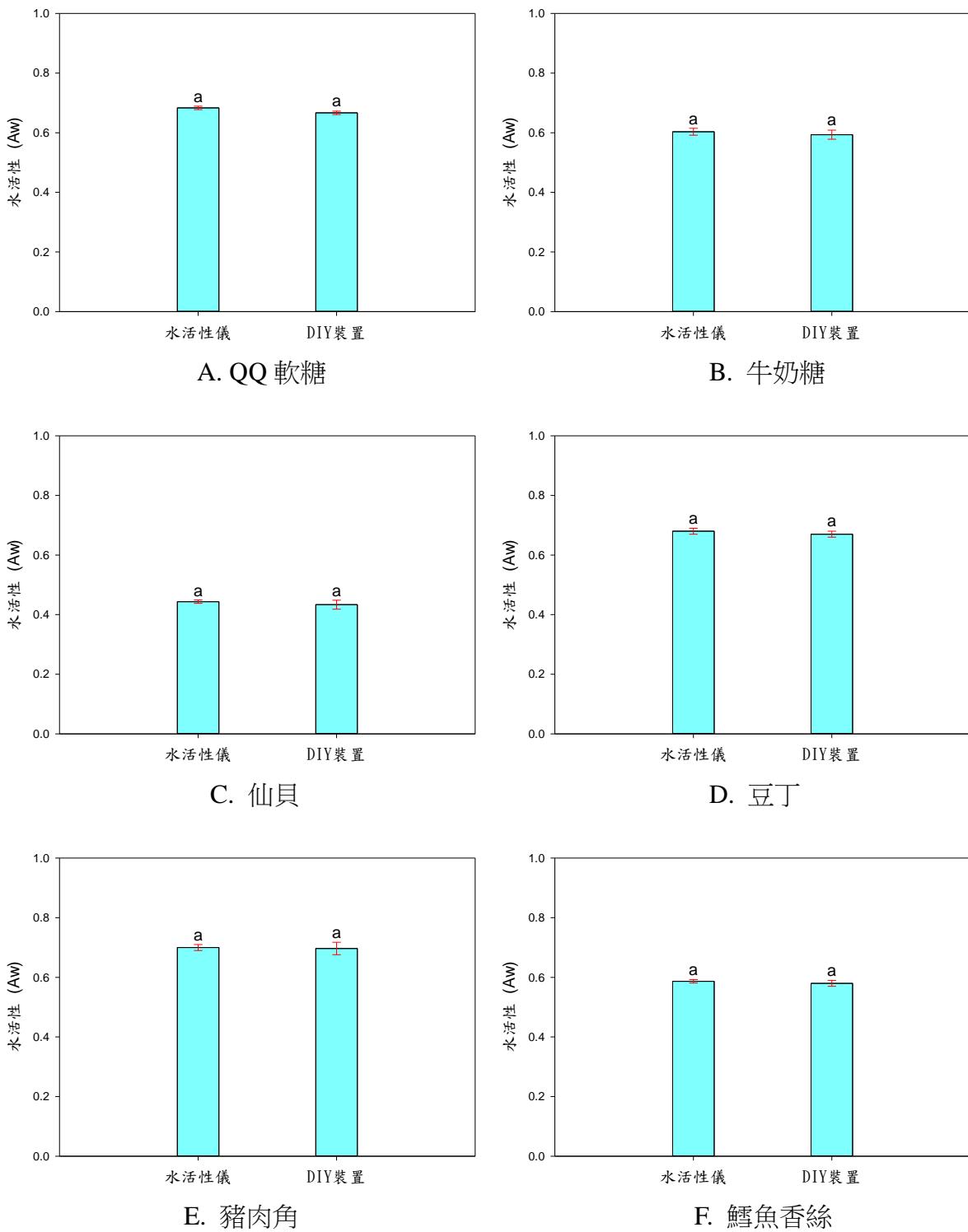
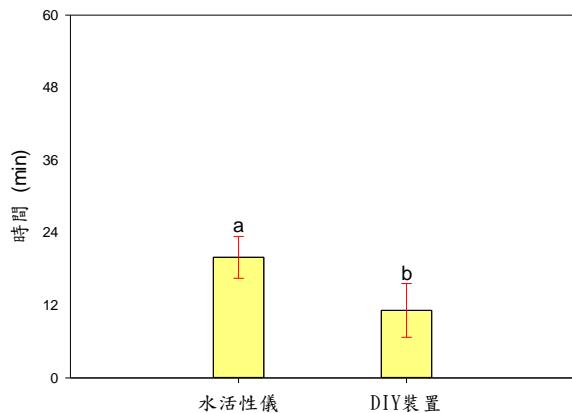


圖 24. 使用水活性儀／DIY 裝置分別測試六種樣品之水活性(Aw)  
(此圖由作者繪製)

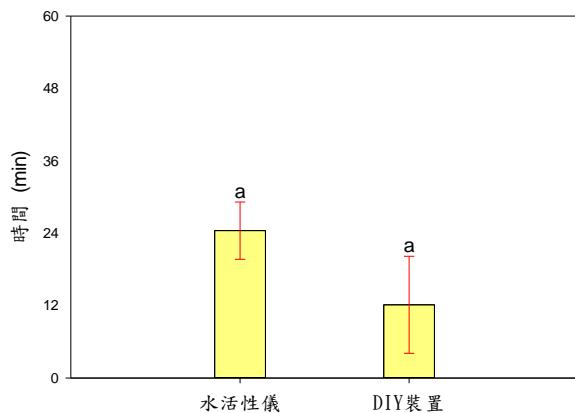
2. 由表11、圖25顯示，使用水活性儀／DIY裝置分別測量六種樣品水活性值所需時間，經統計分析後發現，測試牛奶糖、仙貝、豆丁、鱈魚香絲等四種樣品所需時間，並無顯著差異；但測試QQ糖、豬肉角等二種樣品所需時間則有顯著差異。

表 11. 使用水活性儀／DIY 裝置測試六種樣品水活性所需時間

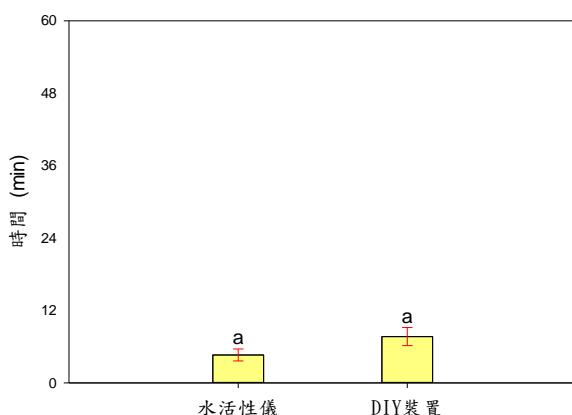
儀器裝置	時間 (min)					
	A. QQ 糖	B. 牛奶糖	C. 仙貝	D. 豆丁	E. 豬肉角	F. 鱈魚香絲
水活性儀	20±3 <sup>a</sup>	24±5 <sup>a</sup>	5±1 <sup>a</sup>	18±2 <sup>a</sup>	20±4 <sup>a</sup>	8±3 <sup>a</sup>
DIY 裝置	11±4 <sup>b</sup>	12±8 <sup>a</sup>	8±2 <sup>a</sup>	11±5 <sup>a</sup>	11±2 <sup>b</sup>	7±3 <sup>a</sup>



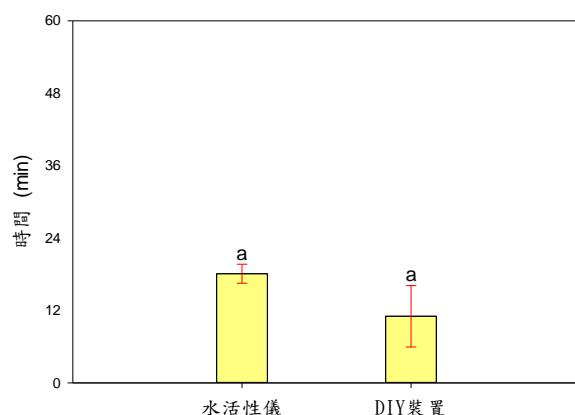
A. QQ 軟糖



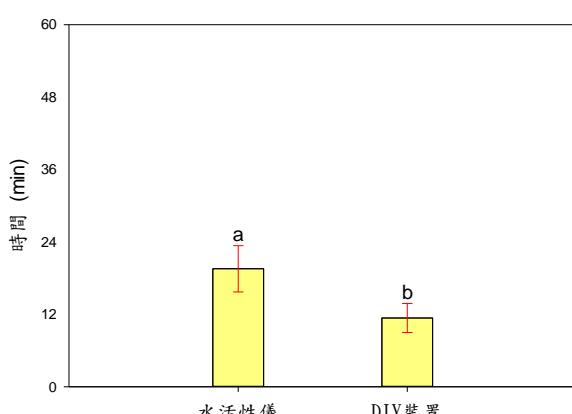
B. 牛奶糖



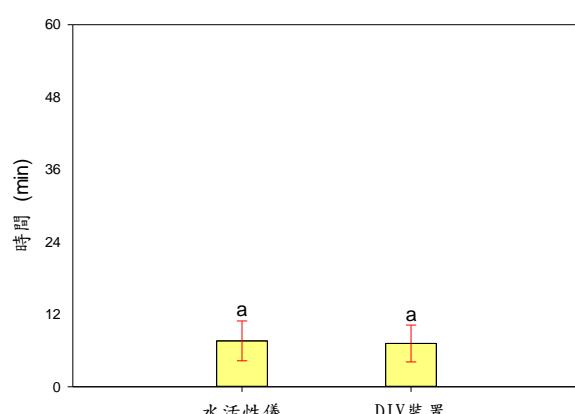
C. 仙貝



D. 豆丁



E. 豬肉角



F. 鱈魚香絲

圖 25. 使用水活性儀／DIY 裝置測試六種樣品水活性所需時間  
(此圖由作者繪製)

### 討論：

1. 因DIY裝置是經由六種標準鹽類飽和溶液進行校正，可確保其測量結果的準確性。
2. 本實驗使用水活性儀／DIY裝置分別測試六種樣品之水活性數值，經過統計分析數據顯示，每一種樣品無論採用水活性儀或DIY裝置，二者測試結果都沒有顯著差異，這表明水活性儀／DIY裝置兩者之間具數據一致性，從而證實了DIY裝置在測量水活性(Aw)之精確性。
3. 本研究所設計製作的「DIY裝置」，參考了Novasina LabStart-aw水活性儀的設計優勢，將樣品放置的密閉空間進行縮小，從而有效縮短了測量時間，提升了測試效率。這些設計改進使得DIY裝置在性能上接近專業儀器，且在測量準確性與時間效能方面具有顯著優勢。
4. 本實驗使用水活性儀／DIY裝置分別測試六種樣品水活性所需時間，水活性儀平均約16分鐘，DIY裝置所需時間稍短，平均約10分鐘。經統計分析數據顯示，有四種樣品測試所需時間沒有無顯著差異；但有兩種樣品測試所需時間是有顯著差異。

## 【實驗八】DIY裝置之成本分析

**前言：**整理本研究所製作的DIY裝置零組件成本，並與濕度儀及水活性儀的設備成本進行比較分析，以評估其經濟性，預期DIY裝置的成本最低。

### 步驟：

1. 彙整本研究所製作的DIY裝置零組件購入成本，並收集濕度儀與水活性儀的設備購入成本。
2. 整理三種設備的成本數據，繪製比較圖表，以直觀呈現DIY裝置、濕度儀及水活性儀之間的成本差異。

### 結果：

#### 1. 濕度儀

採用德國製造之 Testo 174H 迷你型溫溼度記錄器，以進行密閉容器內溼度變化的連續監測。該裝置配備電容式溼度感測器 (capacitive humidity sensor)，其測量精度為  $\pm 3\% \text{RH}$ ，適用範圍介於 2 % ~ 98 % RH 之間。為確保濕度儀數據讀取的準確性，配備相應的 USB 介面讀取器(USB interface for data loggers)。該濕度儀包含介面讀取器之購置成本為新台幣 9,500 元。

#### 2. 水活性儀

採用瑞士製造的 Novasina LabStart-aw 水活性分析儀。此儀器適用於低至中等水活性範圍之測定，並採用電阻式電解感測器 (resistive electrolytic sensor)，其測量精確度

為  $\pm 0.03\text{Aw}$ ，適用範圍為  $0.33 \sim 0.75\text{Aw}$ 。此外，該設備配置  $0.33\text{Aw}$  及  $0.75\text{Aw}$  之校正標準品，以確保測量之準確性。該水活性儀包含校正標準品之購置成本為新台幣 103,500 元。

### 3. DIY 裝置

本研究所設計並製作的 DIY 裝置，其零組件材料成本合計約新台幣 1,151 元，細目條列如表 12 所示。

該裝置之核心是濕度感測器，位於瑞士斯塔法 (Stäfa) 的 Sensirion(盛思銳)公司的 SHT31 高精度的溫濕度感測器模組，其精度為  $\pm 2\%\text{RH}$  (相對濕度) 和  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  (溫度)。濕度測量範圍為  $0 \sim 100\% \text{RH}$ 。該感測器是 3.3 伏和 5 伏兼容，速度可達  $1\text{MHz}$ ，它結合了多種功能和各種接口 ( $\text{I}^2\text{C}$ ，模擬電壓輸出)，適用範圍廣泛，它晶片面積尺寸僅為  $2.5 \times 2.5\text{ mm}^2$ ，高度為  $0.9\text{ mm}$ 。

表12. 「DIY裝置」的零組件材料成本明細 (此表由作者製作)

品名	價格 (NT.元)
SHT31 濕度感測器	146
ESP32s 開發版	205
TFT_LCD 240x320	340
SD 儲存裝置	40
按鈕開關	80
電源變壓器	40
線 電路板 LED 燈	100
其他材料及耗材	200
合計	1151

4. 彙整濕度儀、水活性儀、DIY 裝置三種儀器設備購入價格，繪製圖形進行成本分析比較，如圖 26 所示，水活性儀購入價格最昂貴，DIY 裝置購入價格最便宜。

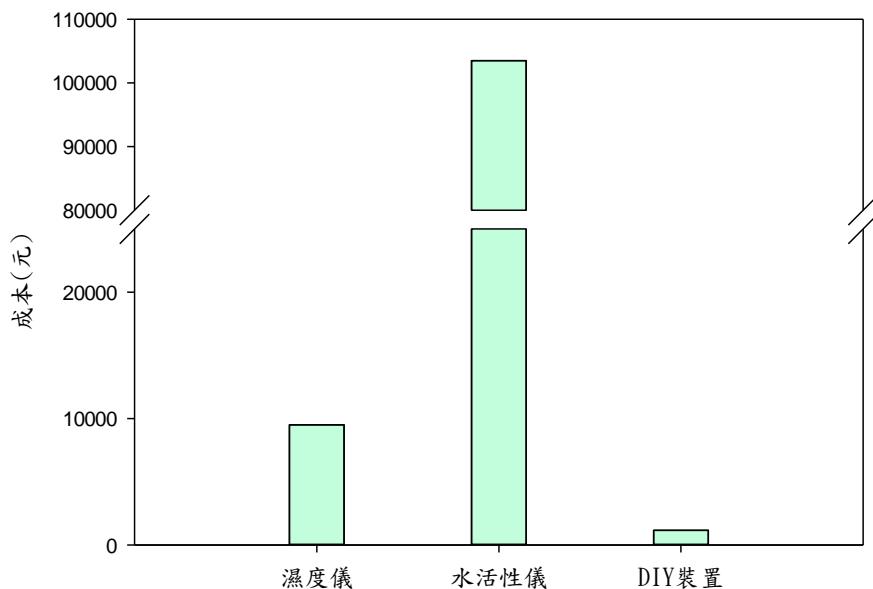


圖 26. 濕度儀、水活性儀、DIY 裝置等儀器設備購入成本 (此圖由作者繪製)  
(DIY 裝置僅計算零組件材料成本)

### 討論：

1. 【實驗一】使用的濕度儀（Testo 174H 迷你型溫溼度記錄器）包含介面讀取器，其購置成本為新台幣 9,500 元，位於濕度儀、水活性儀與 DIY 裝置三者之間。相較之下，【實驗二】使用的專業的水活性儀（Novasina LabStart-aw 水活性分析儀）其購置成本非常高，為新台幣 103,500 元，是三者中最昂貴的設備。另一方面，本研究自行設計製作的「DIY 裝置」零組件材料的總成本為新台幣 1,151 元，是這三者中最為經濟實惠的選擇。
2. 本研究所設計的「DIY 裝置」不僅具有顯著的成本優勢，且其測試精準度經【實驗六】證明，可與專業水活性儀相媲美，這顯示其在商業化方面具備潛力。低廉的成本與較高的測量精度相結合，使得此「DIY 裝置」在未來的應用和商品化過程中頗具潛力。

## 肆、研究結論

### 一、實驗結論

#### 【實驗一】濕度儀測定法之測試

本實驗顯示，水活性數據在前60分鐘內呈現明顯下降趨勢；60分鐘之後，下降速率逐漸減緩；大約240分鐘以後，水活性的變化趨於平緩，逐漸呈現接近穩定的狀態。經三次重複試驗後發現，水活性達到穩定的平衡時間約為264分鐘。使用濕度儀測量水活性所需時間較長，因其濕度感測器固定於儀器內並需放置於密閉平衡瓶中。測量頂部空間的平衡相對濕度所需時間較長且變異較大，可能與感測器安裝位置及瓶內空間有關，縮小瓶體積可能有助於縮短穩定時間。

#### 【實驗二】水活性儀測定法之測試

水活性儀測量時間約22分鐘，顯著短於濕度儀所需的264分鐘，展現較高的時間效益。此外，水活性分析儀經鹽液標準品校正，使其測量結果較濕度儀更為精確。觀察結果顯示，濕度儀之密閉樣品空間較大，而水活性儀則較小，推測密閉空間體積為影響水活性測量時間的關鍵因素。較小的密閉空間可加速平衡相對濕度的穩定，進而縮短測試時間。

#### 【實驗三】平衡瓶體積大小之影響

本實驗結果顯示，150ml平衡瓶相較於500ml平衡瓶能更快速達到平衡相對濕度，證實較小體積可有效縮短測量時間。此外，500ml平衡瓶測得之水活性為0.43，高於150ml平衡瓶之0.34，兩者數據經統計分析後確定存在顯著差異。推測500ml平衡瓶內的初始

空氣量較多，導致水氣含量相對較高，進而影響最終水活性數據，使其偏高。

#### 【實驗四】「DIY裝置」之設計製作

參考水活性儀樣品平衡空間大小，我們對樣品槽進行了設計改良，將上方空間改為圓錐狀結構，以縮小體積並促使蒸氣壓沿著錐形向上集中，最終到達感測器。平衡瓶體積的大小會影響水活性測量結果，較小的體積能減少空氣中水分對相對濕度的干擾。為此，我們將樣品平衡空間縮小，減少空氣過多對相對濕度數值的影響。

#### 【實驗五】「DIY裝置」飽和鹽液之校正

選用六種不同的飽和鹽液進行自製的DIY裝置之校正，預期可提高測量的準確性與可靠性。測量後，以水活性量測數值為x軸；以真實數值為y軸，進行繪圖，並經線性回歸得到趨勢線方程式： $y = 1.1394x - 0.1495$ ，作為校正方程式，有助於優化DIY裝置的數據處理，提升測量結果的準確性與整體效能。

#### 【實驗六】DIY裝置之實際測試

採用校正後的DIY裝置測試水活性(Aw)，並將數據與【實驗一】、【實驗二】、【實驗三】的實驗結果進行比對，由本實驗結果證實，對相同花生樣品進行測試時，使用DIY裝置所測得的水活性及其所需測量時間，經統計分析後與專業水活性儀的測量結果無顯著差異，顯示本DIY裝置具備良好的可行性與準確性。

#### 【實驗七】DIY裝置之實際測試

DIY裝置在實用性上已可媲美專業水活性儀，透過擴大測試範圍，進一步驗證其在不同類型食品水活性測定上的精確度與應用潛力。DIY裝置採用六種標準飽和鹽溶液進行校正，並縮小樣品所處的密閉空間，有效縮短平衡與測量所需時間，提升整體操作效率，兼具測量準確性與時間效益。

#### 【實驗八】DIY裝置之成本分析

濕度儀（包含介面讀取器）之購置成本為新台幣9,500元，水活性儀（包括校正標準品）的成本則為新台幣103,500元。相比之下，本研究設計的DIY裝置其零組件材料成本僅約新台幣1,151元。透過成本分析比較，水活性儀的購入價格最為昂貴，而DIY裝置的零組件成本則相對低廉。

## 二、具體貢獻

1. 本研究比較「濕度儀」與「水活性儀」在測量食品水活性過程中的所需時間，並通過實驗證明，當樣品被設計為較小的密閉空間時，能有效加速平衡相對濕度的穩定，從而縮短測試所需的時間。

2. 本研究的「DIY裝置」採用了圓錐狀結構來縮小密閉空間，並使用標準鹽類飽和溶液進行校正，這使得該裝置在測量精確度上足以媲美專業級水活性儀。
3. 本研究的「DIY裝置」不僅在提升測量準確性和時間效益方面表現優異，更因設備成本低廉，具備明顯著的成本效益，展現未來商品化之潛力。

## 伍、參考文獻資料

1. A.k. Datta. (2007). Porous Media Approaches to Studying Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food Processes. I: Problem Formulations. *Journal of Food Engineering*, 80(1), 80–95.
2. Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards: A Physics and Chemistry*, 81A:89–96.
3. Gustavo V. Barbosa-Cánovas, Anthony J. Fontana Jr., Shelly J. Schmidt, & Theodore P. Labuza. (2007). Water Activity in Food. Blackwell Publishing and the Institute of Food Technologists.
4. John A. Troller, & J.H.B Christian. (1978). Water Activity and Food. Academic Press. [https://books.google.com.tw/books?hl=zh-TW&lr=&id=14PXhbYMIVAC&oi=fnd&pg=PP1&dq=water+activity&ots=U0ngtBevDP&sig=cKUcs52S7rzFDTrwafr6wx3oFQ0&redir\\_esc=y#v](https://books.google.com.tw/books?hl=zh-TW&lr=&id=14PXhbYMIVAC&oi=fnd&pg=PP1&dq=water+activity&ots=U0ngtBevDP&sig=cKUcs52S7rzFDTrwafr6wx3oFQ0&redir_esc=y#v)
5. Mazui, G. (2025). What Is the Difference Between Free Water and Bound Water? Redbcm. <https://anamma.com.br/en/free-water-vs-bound-water/>
6. Niklas lorén, Jun niimi, Evelina höglund, Rickard albin, Elisabet rytter, Karin bjerre, & Tim nielsen. (2023). Sodium Reduction in Foods: Challenges and Strategies for Technical Solutions. *Journal of Food Science*. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16433>
7. O. F. Nielsen, M. Bilde, & M. Frosch. (2015). Water Activity. *Journal of Spectroscopy*.
8. U.S. Food and Drug Administration . (2014). Water Activity (Aw) in Foods.
9. W. D. Grant. (2004). Life at Low Water Activity. The Royal Society.
10. Water Activity vs. Water Content. (n.d.). Province of Manitoba.
11. Water Content and Water Activity: Two Factors That Affect Food Safety. (n.d.). Province of Manitoba. [https://www.gov.mb.ca/agriculture/food-safety/education-resources/print\\_water-content-water-activity.html](https://www.gov.mb.ca/agriculture/food-safety/education-resources/print_water-content-water-activity.html)

12. 呂秀英 (2011)。正確使用統計圖表呈現處理間比較台灣農業研究。60 (1): p61-71  
台中市。行政院農業委員會農業試驗所。
13. 施明智、陳燕瑩 (2020)。食品加工 (上)。五南圖書出版公司。
14. 黃忠村 (2023)。食品微生物 (上)。復文圖書有限公司。
15. 哪些食品容易滋生黴菌產生真菌毒素? 如何檢驗真菌毒素? (2024)。SGS。  
<https://msn.sgs.com/Knowledge/FOOD/5928>
16. 郭文玉、邱宗甫、吳幸娟、劉發勇 (2020)。食品加工 (上)。復文圖書有限公司。
17. 陳坤地、陳麗瑄、吳啟瑞、謝欣瑜 (2016)。食品加工 I (No. IC02110)。台科大圖書股份有限公司。
18. 經濟部標準檢驗局 (1987)。食品水分活性測定法 CNS 5255 N6119。
19. 劉展罔、韓建國、劉冠汝、李嘉展、陳建元、虞積凱、孫芳明、蘇敏昇、馮惠萍、謝秋蘭、饒家麟、梁弘人、林聖敦、江伯源、李政達、盧更煌、周志輝 (2023)。食品化學，四版。台中市，華格那出版有限公司。
20. 衛生福利部食品藥物管理署 (2025)。乾燥陰涼，妥善保存，防止花生製品滋生黃麴毒素。藥物食品安全週報，1015。  
<https://www.fda.gov.tw/TC/PublishOtherEpaperContent.aspx?id=1549&tid=5061&r=1033060689>

## 【評語】052205

本研究針對食品保存性進行了深入探討，特別是利用濕度感測器來監測水活性，這對於確保食品安全及延長保存期限具有重要意義。DIY 裝置的成本分析顯示出其經濟效益，這對於未來的商品化潛力提供了良好的基礎，能夠吸引更多的消費者。自製設備有智財權申請的潛力，應加強檢索相關資料並申請專利。

文獻回顧中，應該加強說明事項與參考文獻精準連結。並就關鍵部分再做一深入介紹。

在測試過程中，可以考慮使用更多的標準品進行校正，以提高測量的準確性和可靠性，並進一步探討不同環境因素對測試結果的影響。

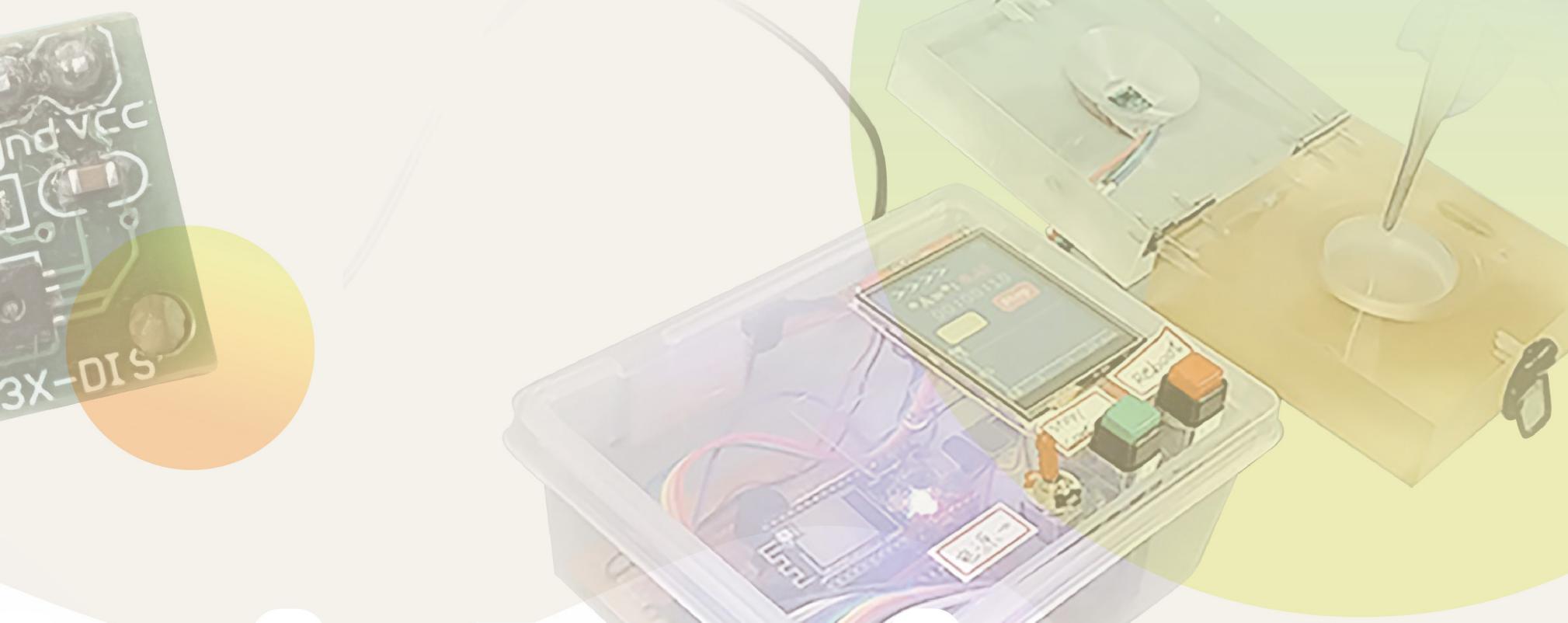
本研究在食品保存性及濕度感測器應用方面展現了良好的潛力和創新性，並在實驗設計及結果呈現上達到了一定的水準。希望未來能在上述方面進一步改善，讓研究成果更加完善，並能成功推向市場。

參考文獻之寫法及排列，有部分缺失，應該參照學術文獻發表格式加以改正。

作品海報

應用濕度感測器

監測食品保存性之研究



## 摘要

首先以濕度儀測量花生樣品之水活性，需時超過264分鐘，而水活性儀僅約22分鐘，經實驗證明，較小的密閉空間可加速平衡相對濕度的穩定，進而縮短測試時間。因此，本研究設計自製DIY裝置，樣品槽上部空間採用圓錐狀設計可縮小空間，同時促進水氣向上集中，提高測量穩定性。進而利用六種飽和鹽液進行校正，得到趨勢線方程式應用於DIY裝置之校正，使其測量結果與專業水活性儀無顯著差異。就經濟成本分析，濕度儀與水活性儀的購置成本分別為新台幣9,500元與103,500元，而DIY裝置的材料成本僅為1,151元。本研究開發之DIY裝置在提升測量準確性與時間效益的同時，亦具備高度成本效益，未來頗具商品化潛力。



## 壹、研究動機與目的

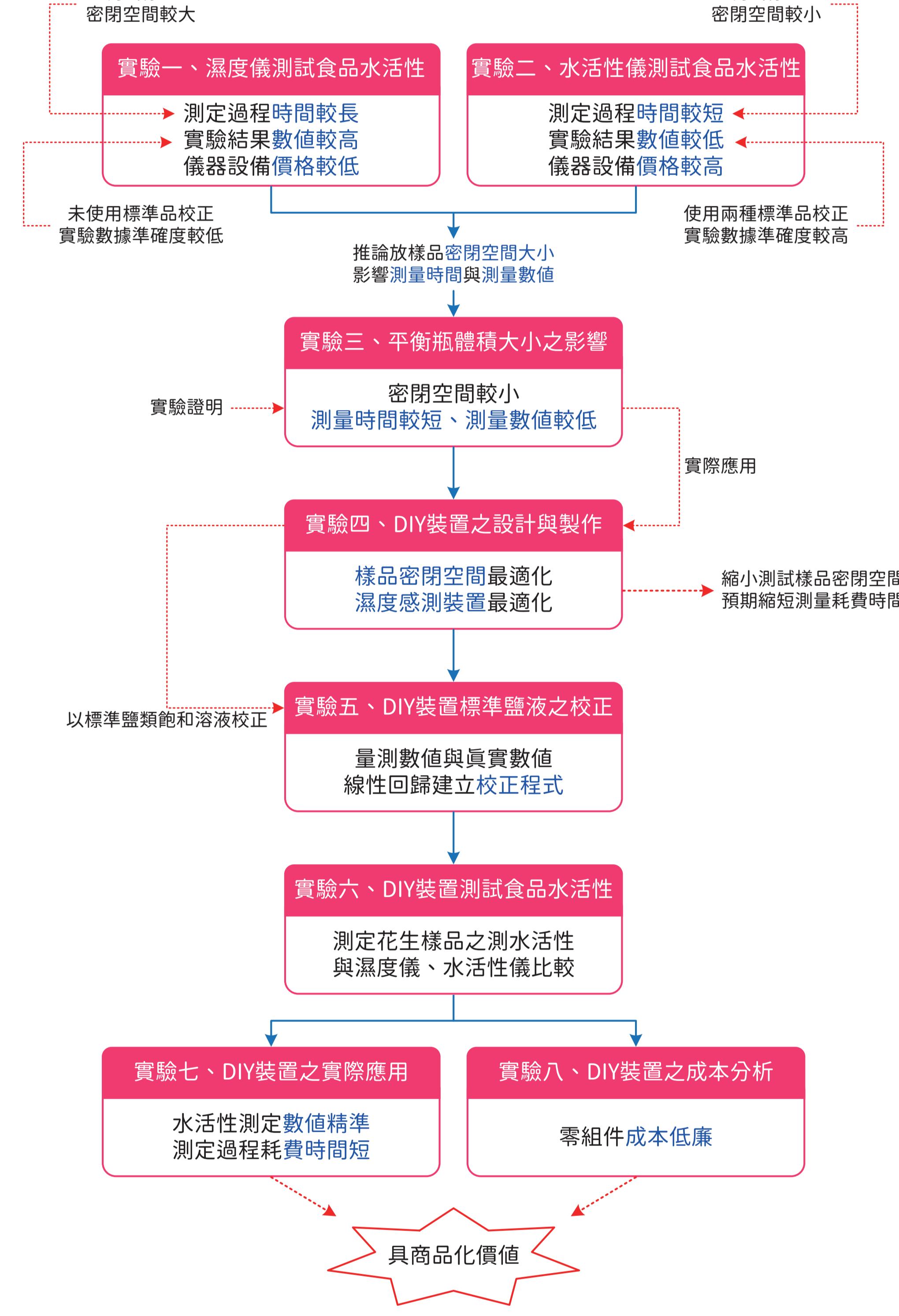
### 研究動機

有關花生產品中黃麴毒素污染的新聞報導時有所聞，這讓我們對花生的保存方法以及如何避免發霉、進而避免黃麴毒素污染感到好奇，並決定深入探討這個問題。進一步蒐集相關資料後，我們發現影響食品保存性的關鍵因素之一是「水活性 (Water Activity, Aw)」。水活性是指食品中可供微生物利用的水分含量，與食品的含水率有所不同。而水活性是一種判斷食品是否易受微生物污染的重要指標。

### 研究目的

- (一) 分析濕度儀與水活性儀測量食品水活性之優缺點，探討如何將濕度儀感測器應用於食品水活性測量。
- (二) 研發如何設計製作測量食品水活性的自製裝置。
- (三) 探討自製裝置測量食品水活性之精準性，改善測量時間過久與成本昂貴的問題。

## 貳、研究架構



## 參、研究方法

### 文獻回顧

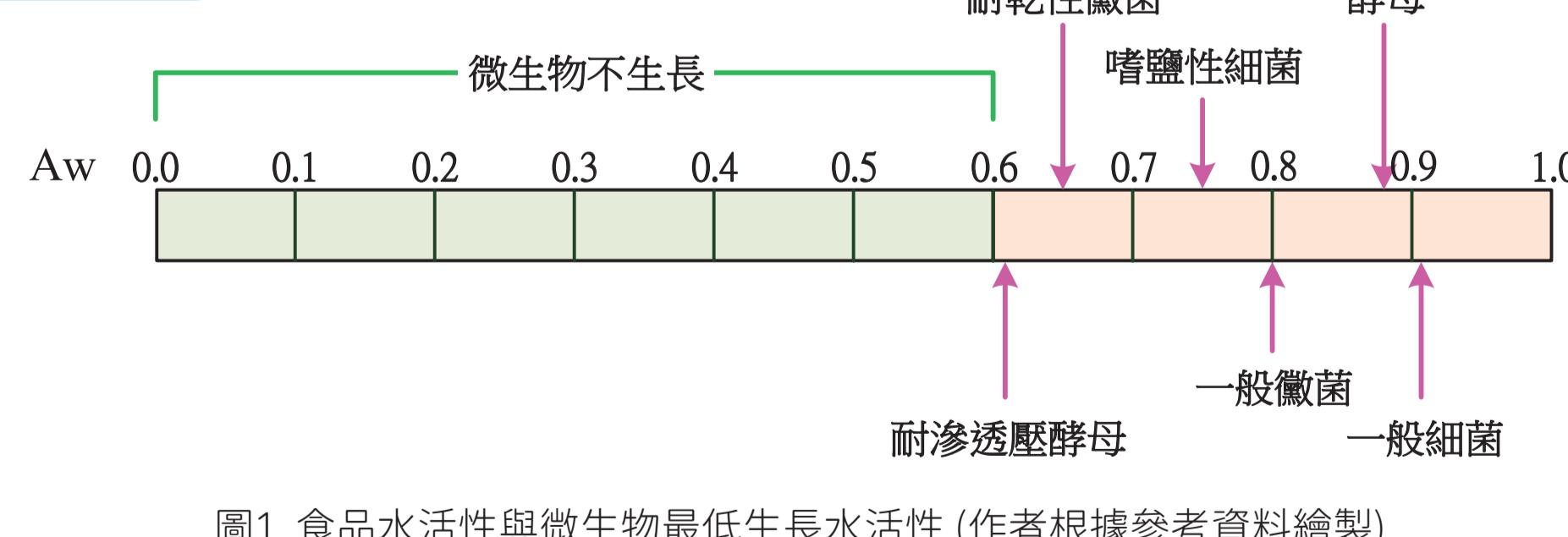


圖1. 食品水活性與微生物最低生長水活性 (作者根據參考資料繪製)

表1. 特定飽和鹽溶液的水活性 (作者根據參考資料製表)

飽和鹽液	IUPAC名	化學式	20°C	25°C	30°C
氯化鋰	Lithium Chloride	LiCl	0.11	0.11	0.11
醋酸鉀	Potassium Acetate	CH <sub>3</sub> COOK	0.23	0.23	0.22
碳酸鉀	Potassium Carbonate	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.43	0.43	0.43
氯化鈉	Sodium Chloride	NaCl	0.76	0.75	0.75
氯化鉀	Potassium Chloride	KCl	0.85	0.84	0.84
硫酸鉀	Potassium Sulfate	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.98	0.97	0.97

## 實驗一、濕度儀測試食品水活性

- 由圖3顯示，水活性數據在前60分鐘內呈現明顯下降趨勢；60分鐘之後，下降速率逐漸減緩；大約240分鐘以後，水活性的變化趨於平緩，逐漸呈現接近穩定的狀態。
- 以濕度儀測量花生樣品的水活性(Aw)，經三次重複試驗後發現，水活性達到穩定的平衡時間約為264分鐘，此時的水活性數值約為0.43，如表2所示。



圖2. 使用濕度儀測量食品的相對濕度再換算為水活性 (相片皆由作者拍攝)

表2. 以濕度儀測試水活性與所需平衡時間

項目	500ml平衡瓶				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
水活性(Aw)	0.41	0.43	0.45	0.43	0.02
平衡時間(min)	259	261	272	264	7

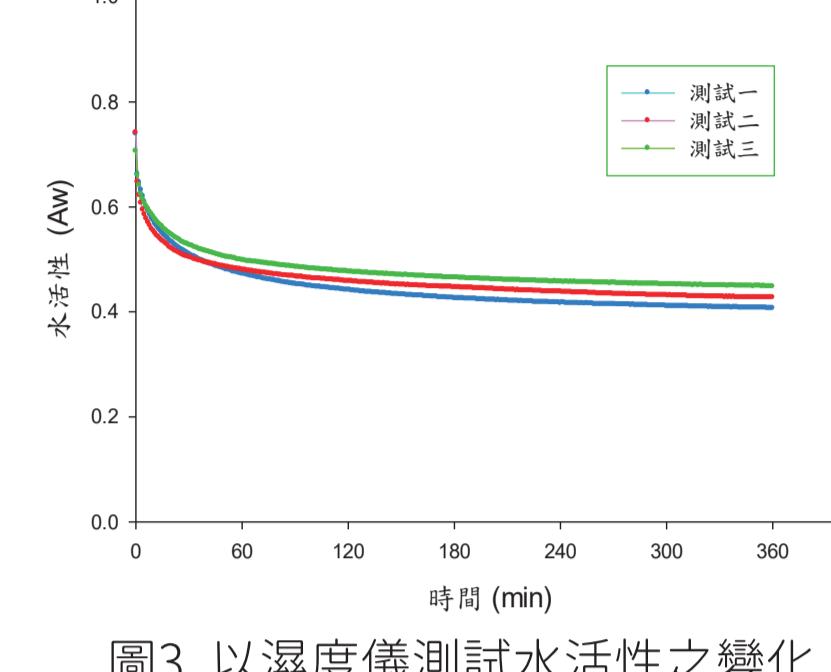


圖3. 以濕度儀測試水活性之變化 (此圖由作者繪製)

## 實驗二、水活性儀測試食品水活性

- 使用的水活性儀配備了Aw0.33和Aw0.75的鹽液標準品進行校正，如圖4所示，因此水活性儀所測得的水活性數值更加精確。



圖4. 使用兩種鹽液標準品進行校正 (相片皆由作者拍攝)

- 由表3、圖5顯示，以濕度儀測試水活性(Aw)約0.43±0.02；以水活性儀測試水活性(Aw)約0.23±0.01。以濕度儀測試之數值高於水活性儀測試之數值，並經統計分析得知，兩組數據是有顯著差異。
- 由表4、圖6顯示，以濕度儀測試水活性所需時間約264±7分鐘(Aw數值呈現穩定狀態時間)；以水活性儀測試水活性所需時間約22±3分鐘。以濕度儀測試所需時間高於水活性儀，並經統計分析得知，兩組數據是有顯著差異。

表3. 以濕度儀／水活性儀測試水活性

測試儀器	水活性 (Aw)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
濕度儀	0.41	0.43	0.45	0.43 <sup>a</sup>	0.02
水活性儀	0.24	0.23	0.23	0.23 <sup>b</sup>	0.01

表4. 以濕度儀／水活性儀測試所需時間

測試儀器	水活性 (Aw)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
濕度儀	259	261	272	264 <sup>a</sup>	7
水活性儀	22	24	19	22 <sup>b</sup>	3

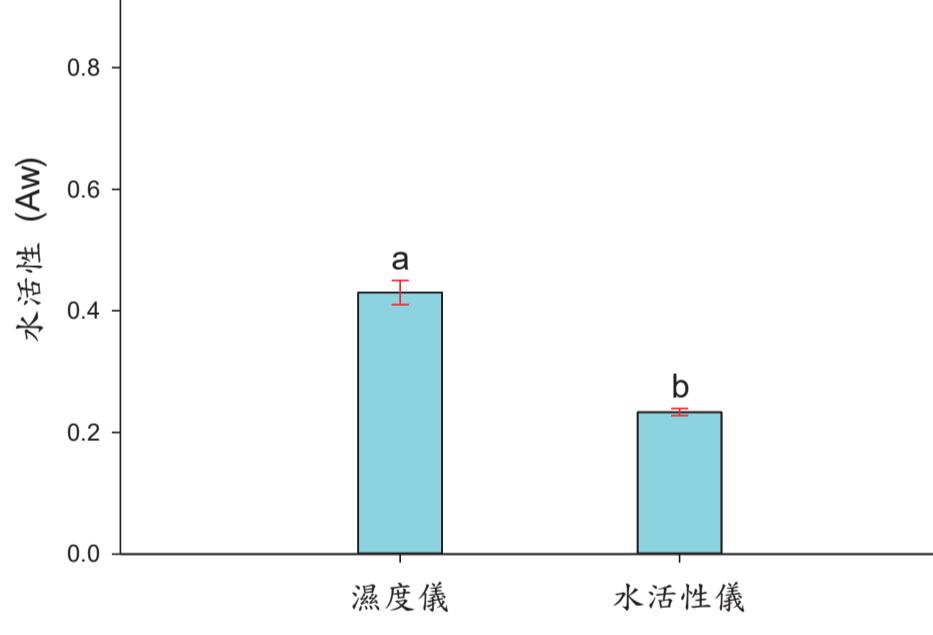


圖5. 以濕度儀／水活性儀測試水活性 (此圖由作者繪製)

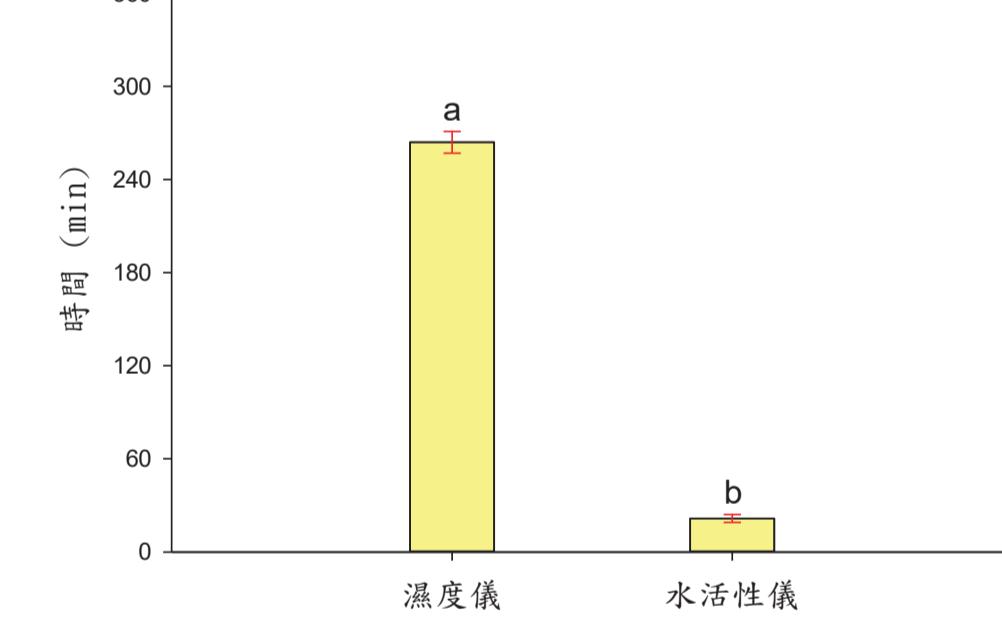


圖6. 以濕度儀／水活性儀測試所需時間 (此圖由作者繪製)



圖7. 水活性儀放置樣品的密閉空間較小 (相片皆由作者拍攝)

## 實驗三、平衡瓶體積大小之影響

- 由圖8顯示，以不同體積(500ml／150ml)的平衡瓶測試水活性(Aw)，整體而言，500ml平衡瓶的水活性數值高於150ml平衡瓶。針對150ml平衡瓶，其水活性在前60分鐘內呈現明顯下降的趨勢；60分鐘後，下降幅度趨緩，僅有輕微變化；至120分鐘後，水活性逐漸趨於穩定。
- 由表5、圖9顯示，以500ml平衡瓶測試水活性約0.43±0.02；以150ml平衡瓶測試水活性約0.34±0.02。以500ml平衡瓶測試之數值，很明顯高於以150ml平衡瓶測試之數值，並經統計分析得知，兩組數據是有顯著差異。
- 由表6、圖10顯示，以500ml平衡瓶測試水活性所需時間約264±7分鐘(Aw數值呈現穩定狀態時間)；以水活性儀測試水活性所需時間約130±25分鐘。以150ml平衡瓶測試水活性所需時間，很明顯低於以500ml平衡瓶測試水活性所需時間，並經統計分析得知，兩組數據是有顯著差異。

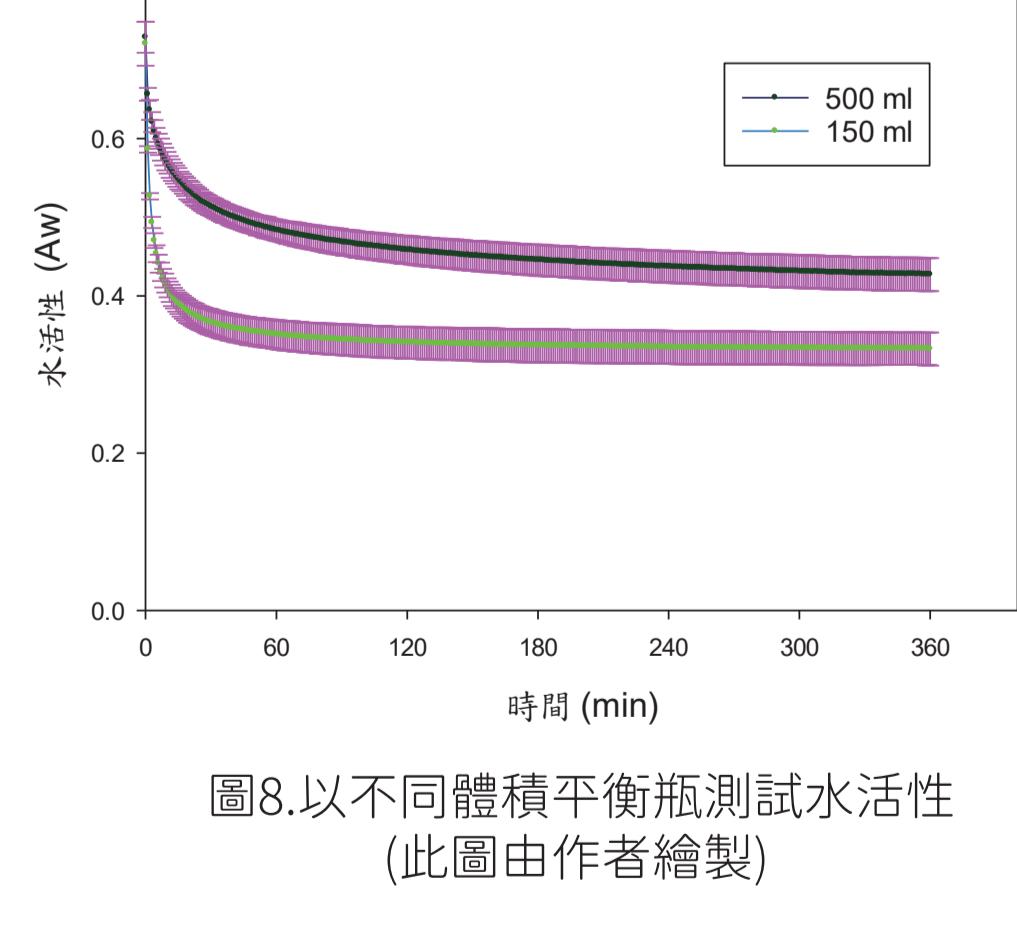


圖8. 以不同體積平衡瓶測試水活性 (此圖由作者繪製)

表5. 以不同體積平衡瓶測試水活性

平衡瓶 體積	水活性 (Aw)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
500ml	0.41	0.43	0.45	0.43 <sup>a</sup>	0.02
150ml	0.36	0.32	0.33	0.34 <sup>b</sup>	0.02

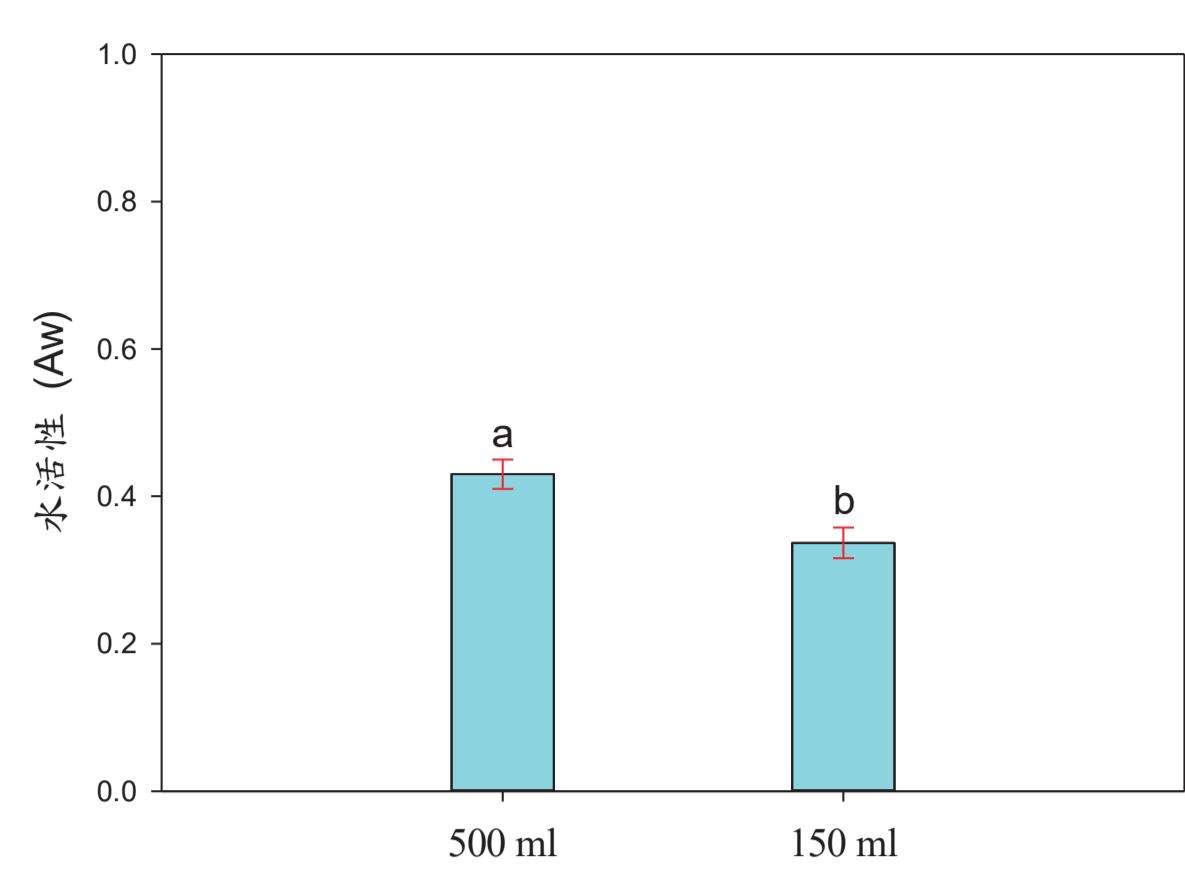
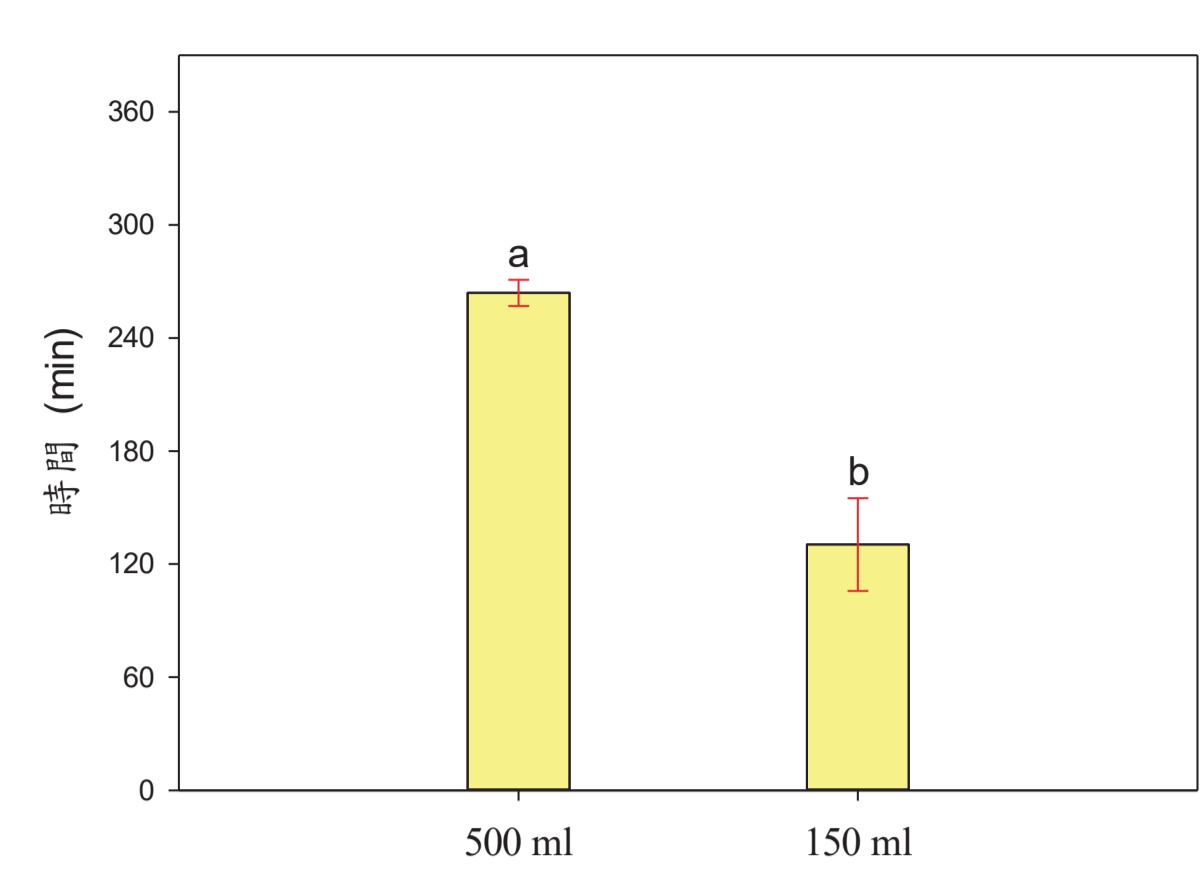
圖9. 以不同體積平衡瓶測試水活性  
(此圖由作者繪製)

表6. 以不同體積平衡瓶測試所需時間

平衡瓶 體積	平衡時間 (min)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
500ml	259	261	272	264 <sup>a</sup>	7
150ml	111	158	122	130 <sup>b</sup>	25

圖10. 以不同體積平衡瓶測試所需時間  
(此圖由作者繪製)

## 實驗四、DIY裝置之設計與製作

### A、設計

#### (A) 濕度感測裝置容器最適化分析

1. 觀察【實驗一】濕度儀和【實驗二】水活性儀發現，兩者濕度感測裝置放置位置不同。濕度儀之感測器位於儀器裡面，測試時必須把整個濕度儀放入平衡瓶中，易使濕度儀碰撞到樣品。且內部空間大，平衡時間長，如圖11所示。

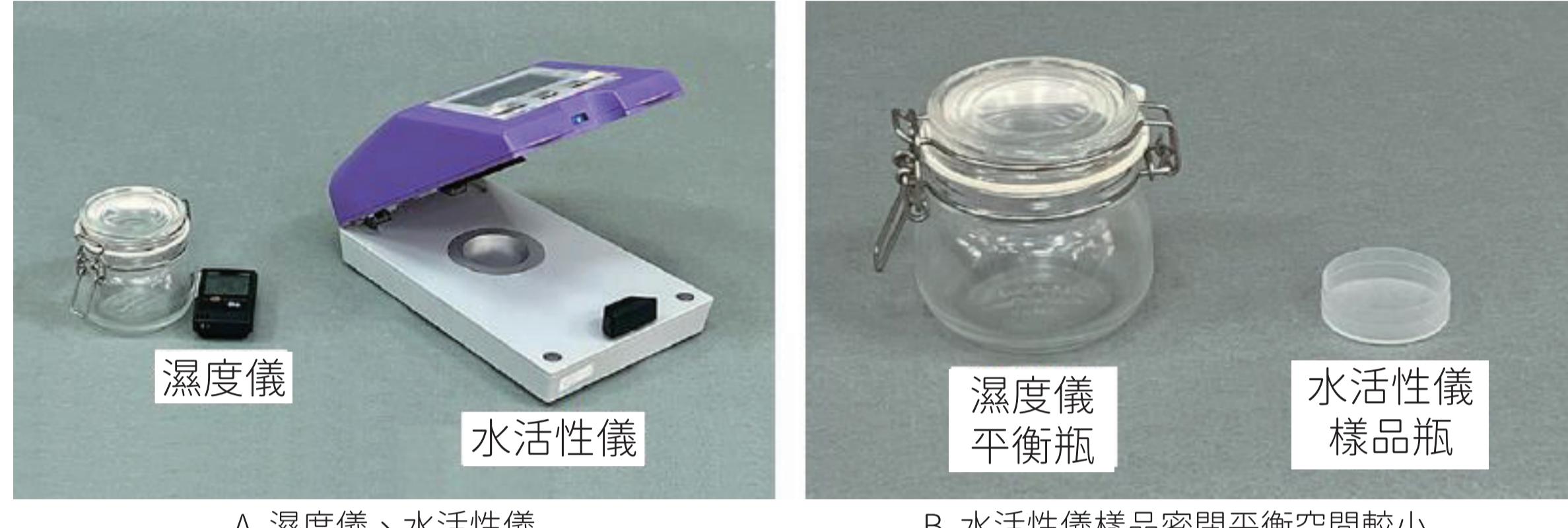


圖11. 濕度儀／水活性儀樣品平衡空間之差異 (相片皆由作者拍攝)

2. 因此我們就進一步發想，把水活性儀的上蓋加以改良成錐形狀，一方面縮小上部空間，另一方面利用形狀的空間特性，使平衡時所蒸發的氣體更容易被感測器準確的量測到，加上控制盒，這樣我們DIY裝置的構想就成形了，如圖12所示。

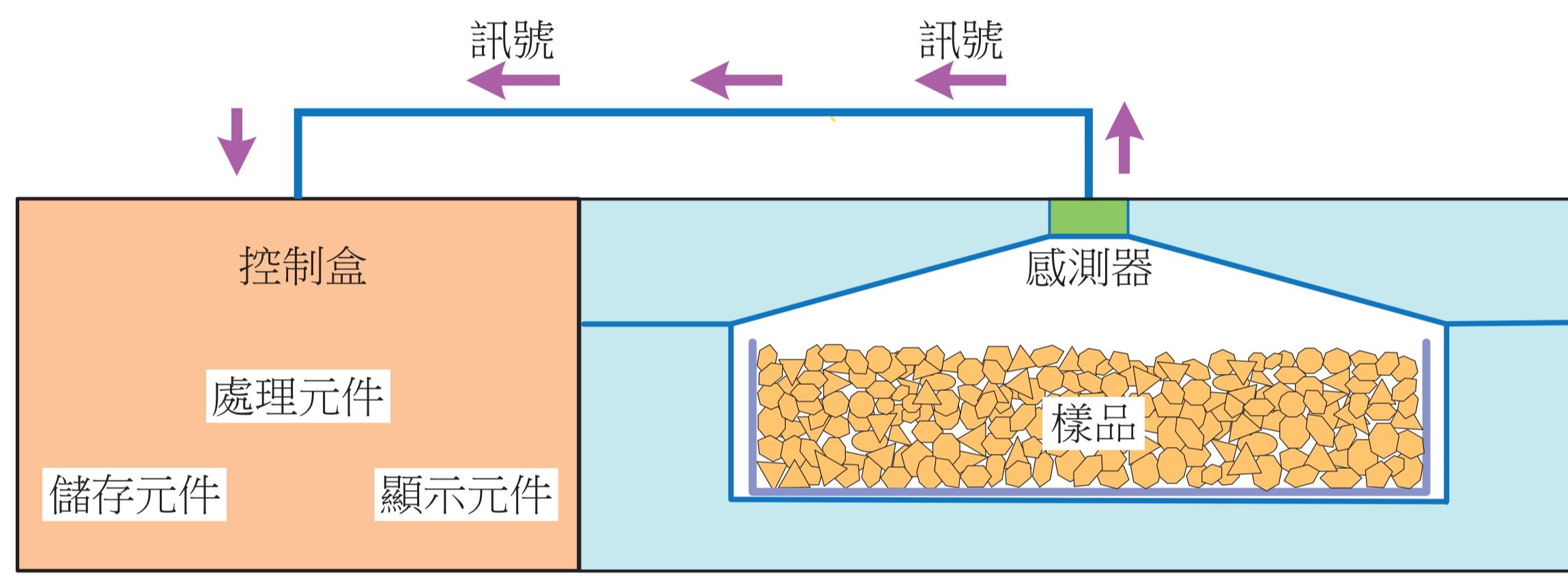


圖12. DIY裝置構想圖 (此圖由作者繪製)

#### (B) 濕度感測裝置電路設計

1. 我們分析水活性的量測，依據它的流程所需要的功能與設備，來設計與佈置各個零件的相關位置配置圖，如圖13所示。

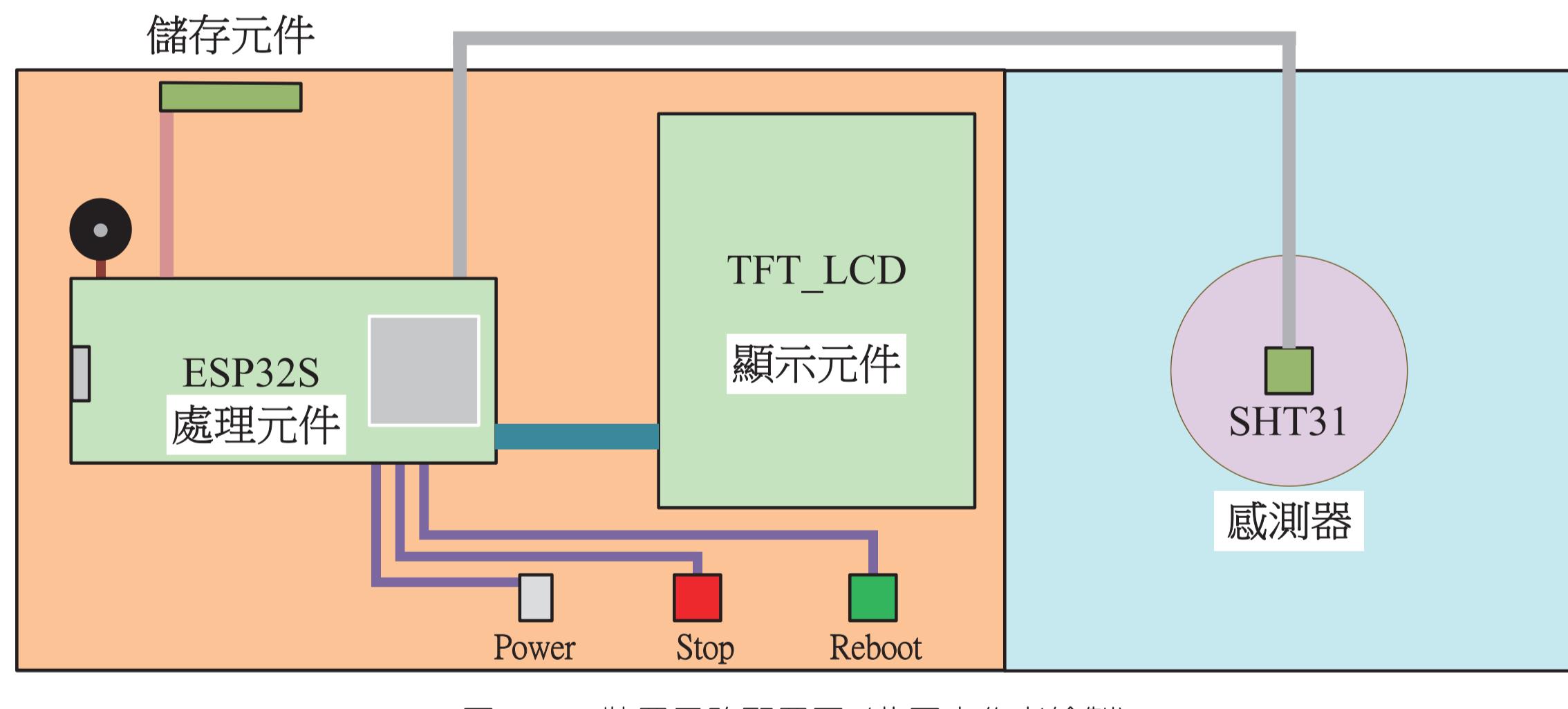


圖13. DIY裝置電路配置圖 (此圖由作者繪製)

### B、製作

1. 我們依照電路圖、設計簡單的測試程式以及容器的順序，依序製作並加以組裝，並來回測試整個組件的穩定度，步驟如下。

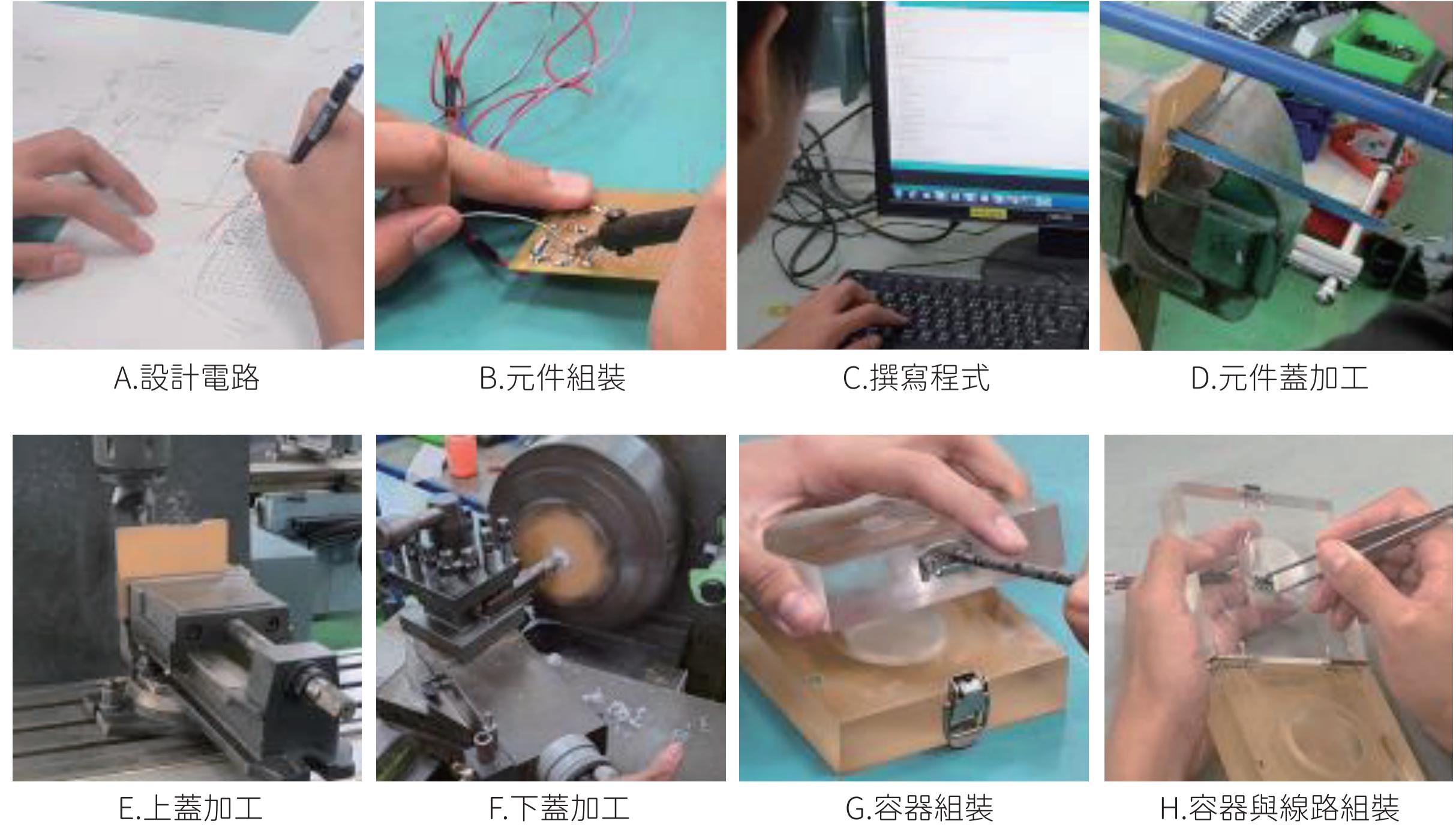


圖14. DIY裝置之流程 (相片皆由作者拍攝)

### C、濕度感測裝置程式設計之流程

1. 在DIY裝置中使用濕度感測器偵測容器內的相對溼度，我們利用目前較普遍的DIY控制板ESP32來製作開發，進行程式撰寫。

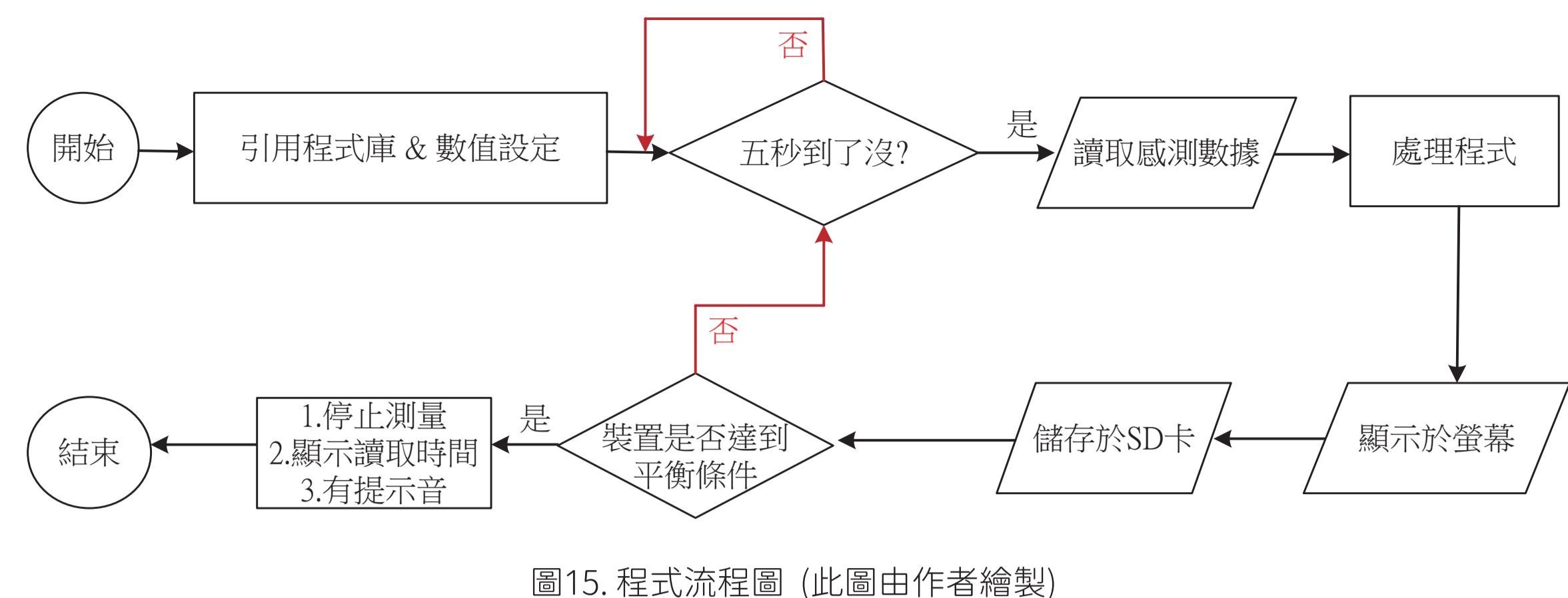


圖15. 程式流程圖 (此圖由作者繪製)

2. 透過裝設於上蓋的感測器可以感測樣品的相對濕度，如圖16D所示。

3. 感測器感測到相對濕度後，會送至處理元件，如圖16B所示。接著進入處理程序，執行已被上傳的程式，將相對濕度轉換成水活性。

4. 水活性資料被處理過後的資料會存入儲存元件，如圖16A所示。

5. 水活性同時會顯示於TFT\_LCD顯示元件上，螢幕顯示也同時包含測試時間與水活性的趨勢圖，如圖16C所示。

6. 經測試結果顯示，DIY裝置可以正常順利運作。

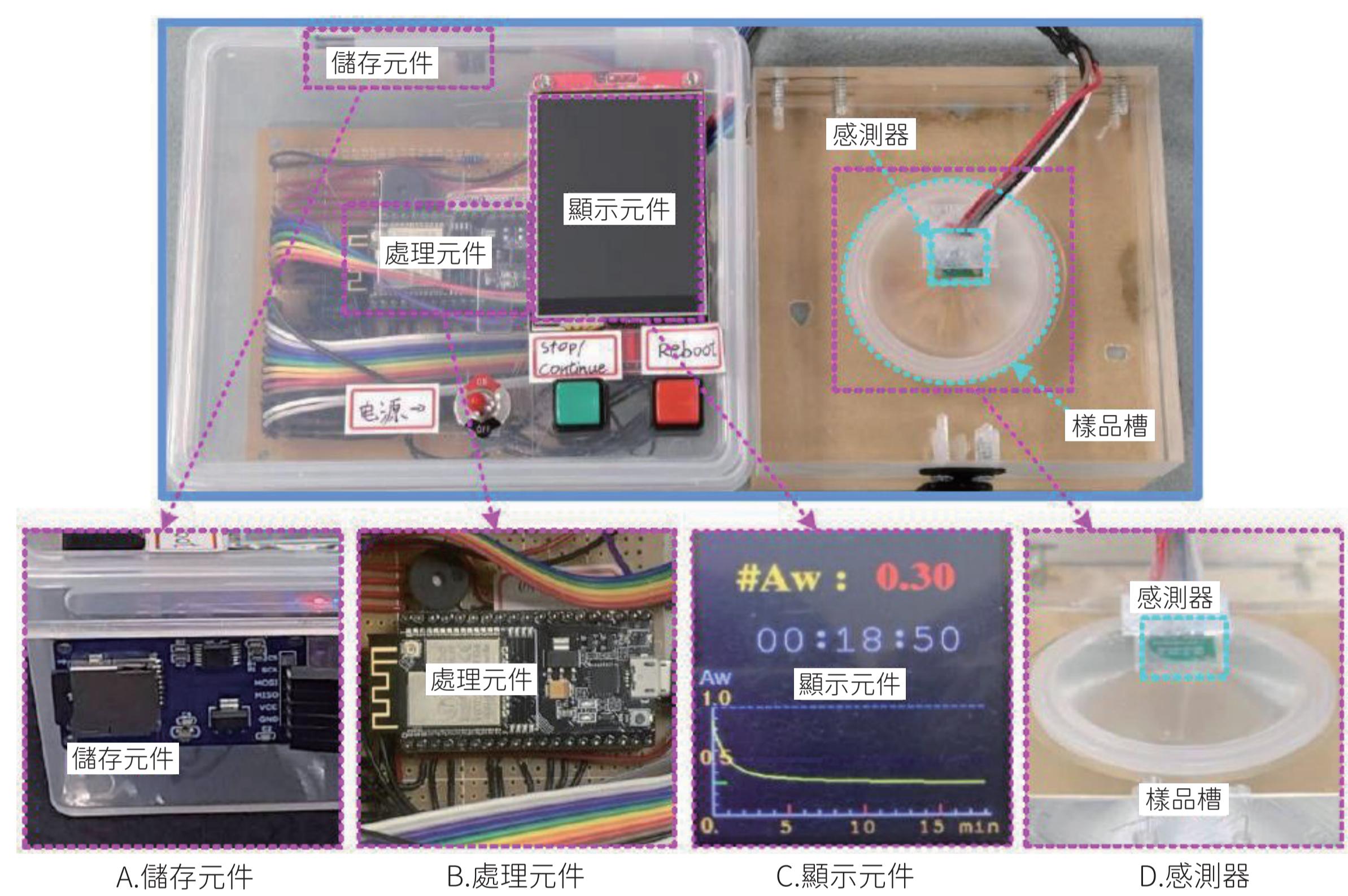


圖16. DIY裝置成品 (相片皆由作者拍攝)

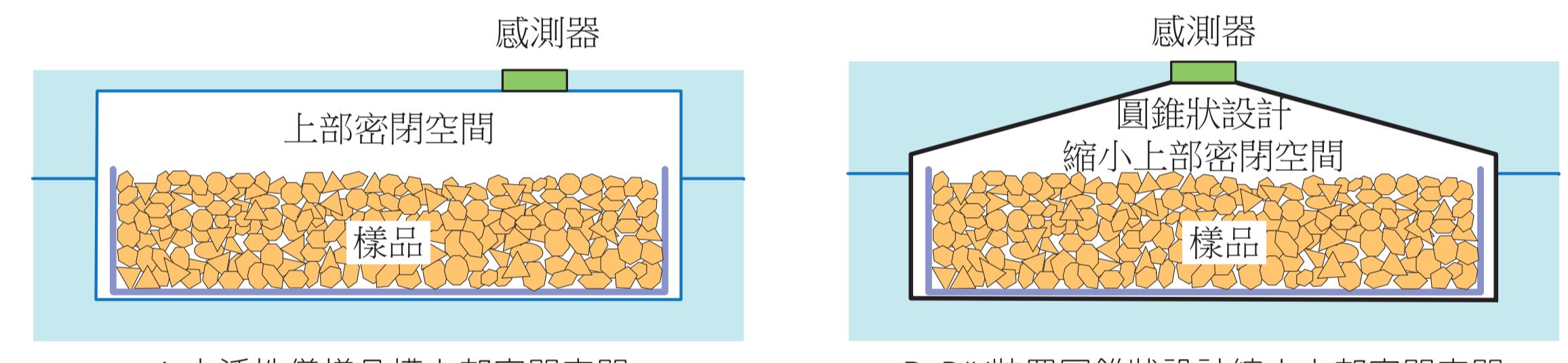


圖17. 濕度感測裝置最適化之設計 (此圖由作者繪製)

## 實驗五、DIY裝置標準鹽液之校正

### A、飽和鹽液方程式之校正

1. 以DIY裝置測試六種標準鹽類飽和溶液之水活性 (Aw)，其實驗所得的「量測數值」與文獻資料上的「真實數值」，如表7所示。

2. 本實驗採用氯化鋰(Aw 0.11)、醋酸鉀(Aw 0.23)、碳酸鉀(Aw 0.43)、氯化鈉(Aw 0.75)、氯化鉀(Aw 0.84)、硫酸鉀(Aw 0.97)等六種標準飽和鹽液進行校正，標準飽和鹽液水活性涵蓋範圍更廣(Aw 0.11~ Aw 0.97)，更有效提升「DIY裝置」之準確性。

3. 將表7六種標準鹽類飽和溶液之「量測數值」與「真實數值」繪製分析圖形，並經線性回歸分析結果，趨勢線方程式為： $y = 1.1394x - 0.1495$ ，如圖19所示。

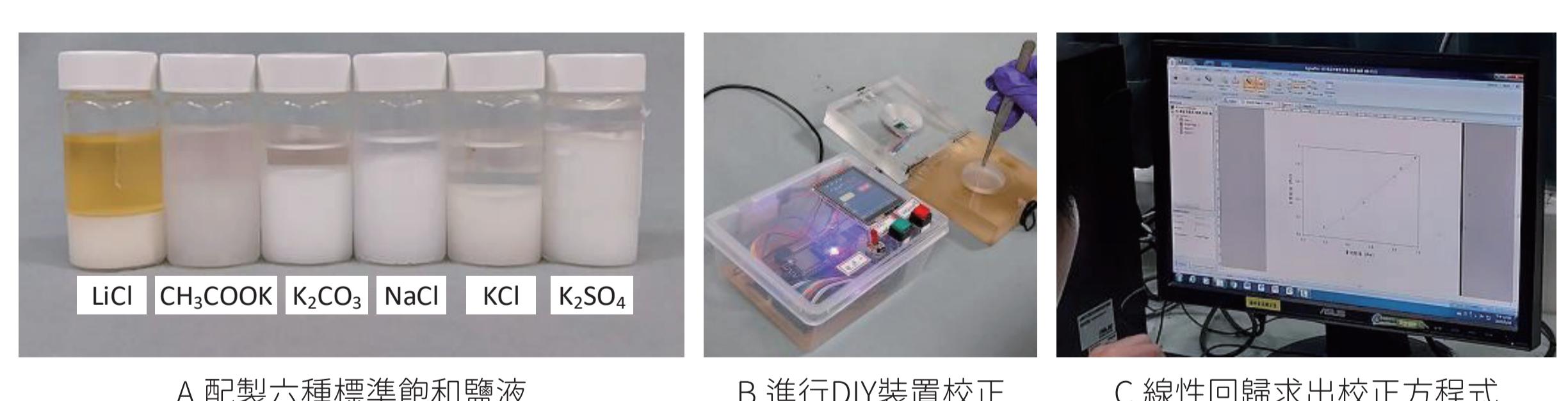


圖18. DIY裝置標準飽和鹽液之校正過程 (相片皆由作者拍攝)

表7. 六種標準鹽類飽和溶液水活性之「量測數值」與「真實數值」

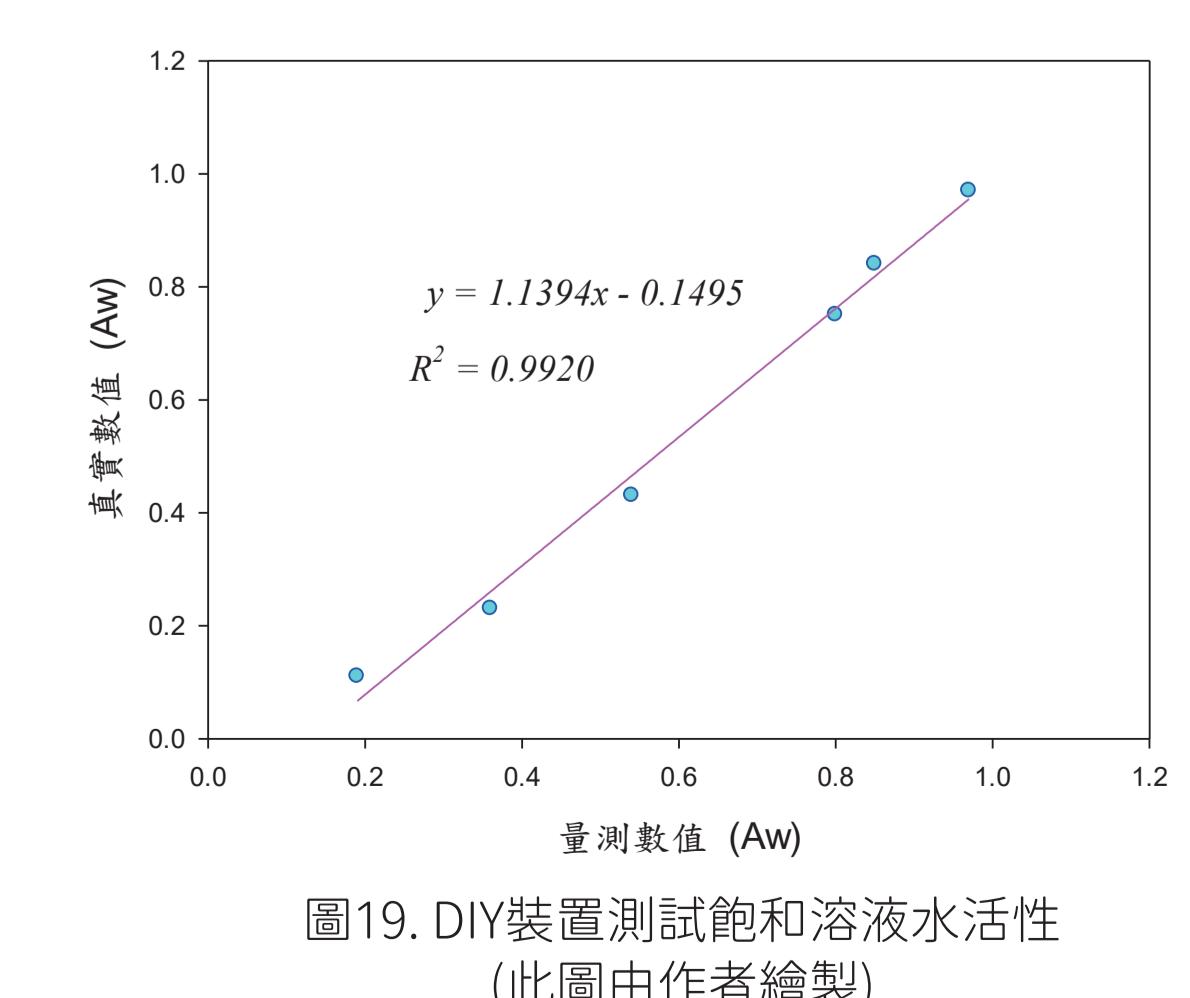
數據 種類	標準鹽類飽和溶液之水活性 (Aw)					
	氯化鋰 LiCl	醋酸鉀 CH3COOK	碳酸鉀 K2CO3	氯化鈉 NaCl	氯化鉀 KCl	硫酸鉀 K2SO4
量測數值	0.19	0.34	0.54	0.79	0.88	0.99
真實數值	0.11	0.23	0.43	0.75	0.84	0.97

### B、校正方程式之更改

1. 校正方程式的程式更改敘述如下：

```
humidity = mySensor_readHumidity( );
Aw_Data = humidity * 0.01;
Aw_Data = (1.1394 * Aw_Data) - 0.1495;
```

2. 將標準鹽液校正所得之趨勢線方程式寫為程式處理資料，使水活性數值更加準確，修改後程式流程，如圖20所示。

圖19. DIY裝置測試飽和溶液水活性  
(此圖由作者繪製)

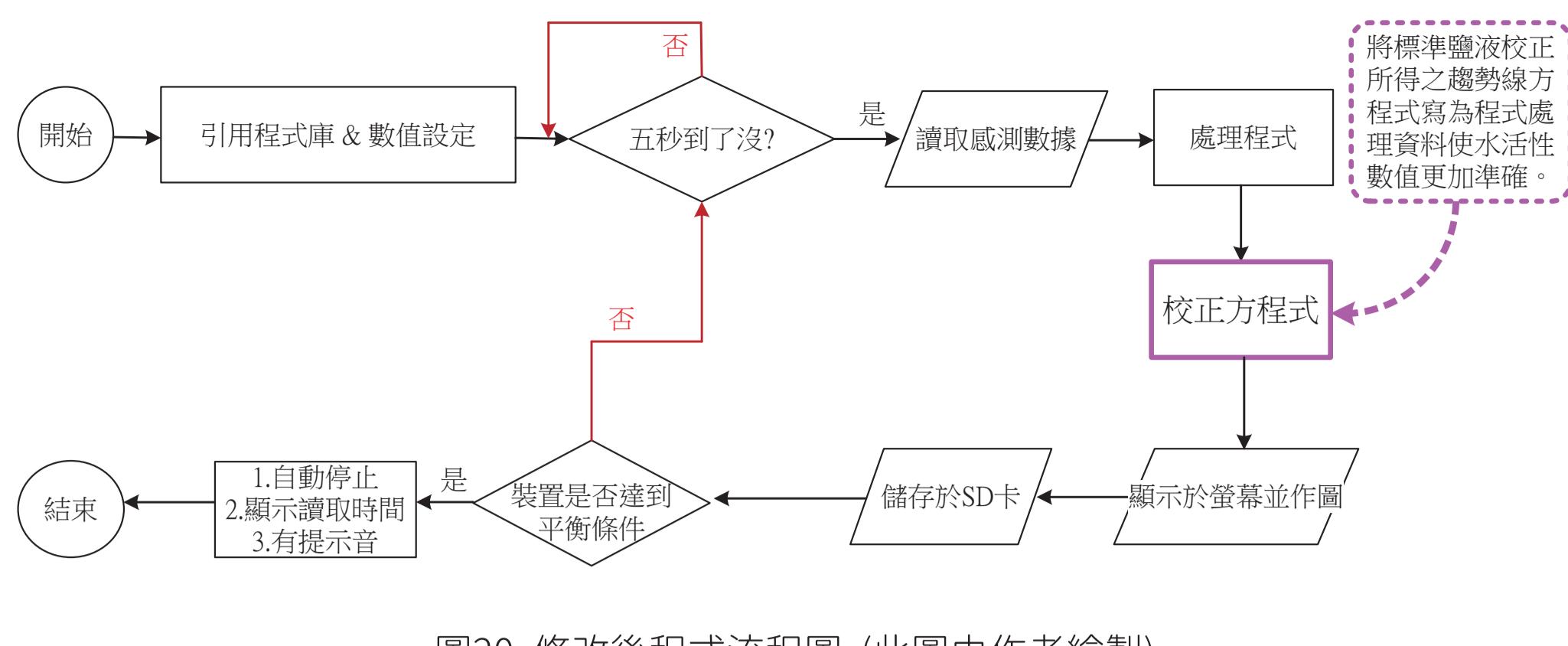


圖20. 修改後程式流程圖 (此圖由作者繪製)

## 實驗六、DIY裝置測試食品水活性

- 由表8、圖21可知，使用濕度儀（500ml及150ml）測得的水活性數值，明顯高於水活性儀與DIY裝置的測試結果。經統計分析顯示，濕度儀（500ml與150ml）所測得之數值與水活性儀及DIY裝置之間存在顯著差異；然而，水活性儀與DIY裝置之間的測試結果則無顯著差異。
- 由表9、圖22可知，使用濕度儀（500ml及150ml）測得的水活性所需時間，明顯高於水活性儀與DIY裝置的測試結果。經統計分析顯示，濕度儀（500ml與150ml）所測得之數值與水活性儀及DIY裝置之間存在顯著差異；然而，水活性儀與DIY裝置之間的測試結果則無顯著差異。

表8. 以不同儀器裝置測試水活性

儀器裝置	水活性 (Aw)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
濕度儀 (500ml)	0.41	0.43	0.45	0.43 <sup>a</sup>	0.02
濕度儀 (150ml)	0.36	0.32	0.33	0.34 <sup>b</sup>	0.02
水活性儀	0.22	0.24	0.24	0.23 <sup>c</sup>	0.01
DIY裝置	0.24	0.25	0.22	0.24 <sup>c</sup>	0.02

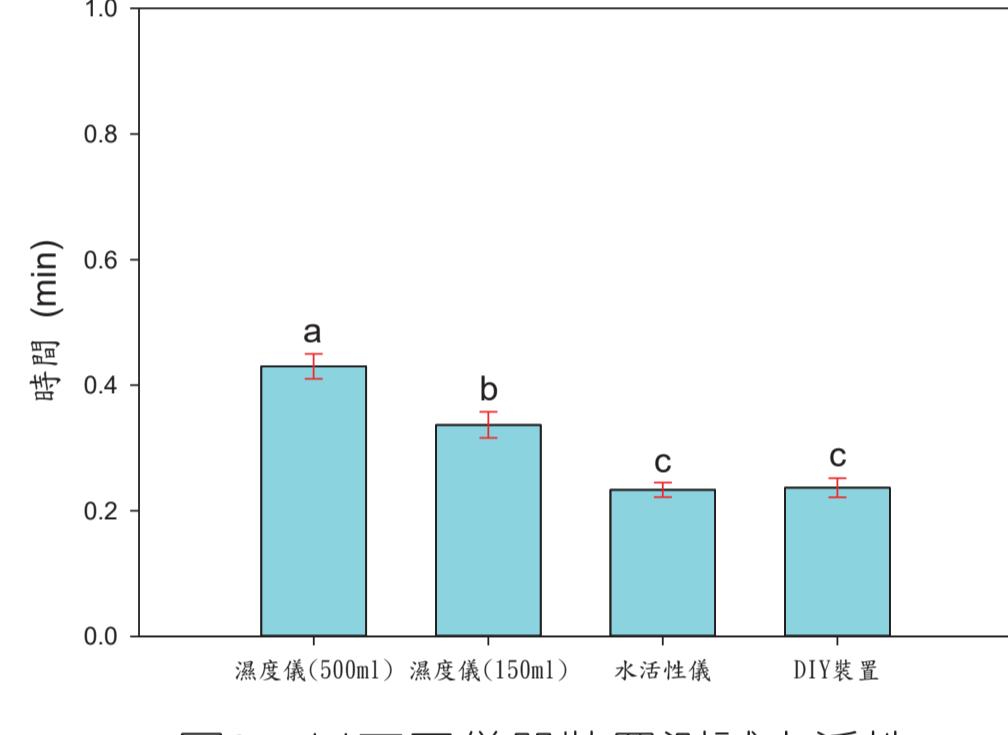


圖21. 以不同儀器裝置測試水活性  
(此圖由作者繪製)

表9. 以不同儀器裝置測試所需時間

儀器裝置	時間(min)				
	測試一	測試二	測試三	平均值	標準差
濕度儀 (500ml)	259	261	272	264 <sup>a</sup>	7
濕度儀 (150ml)	111	158	122	130 <sup>b</sup>	25
水活性儀	22	26	24	24 <sup>c</sup>	2
DIY裝置	13	15	11	13 <sup>c</sup>	2

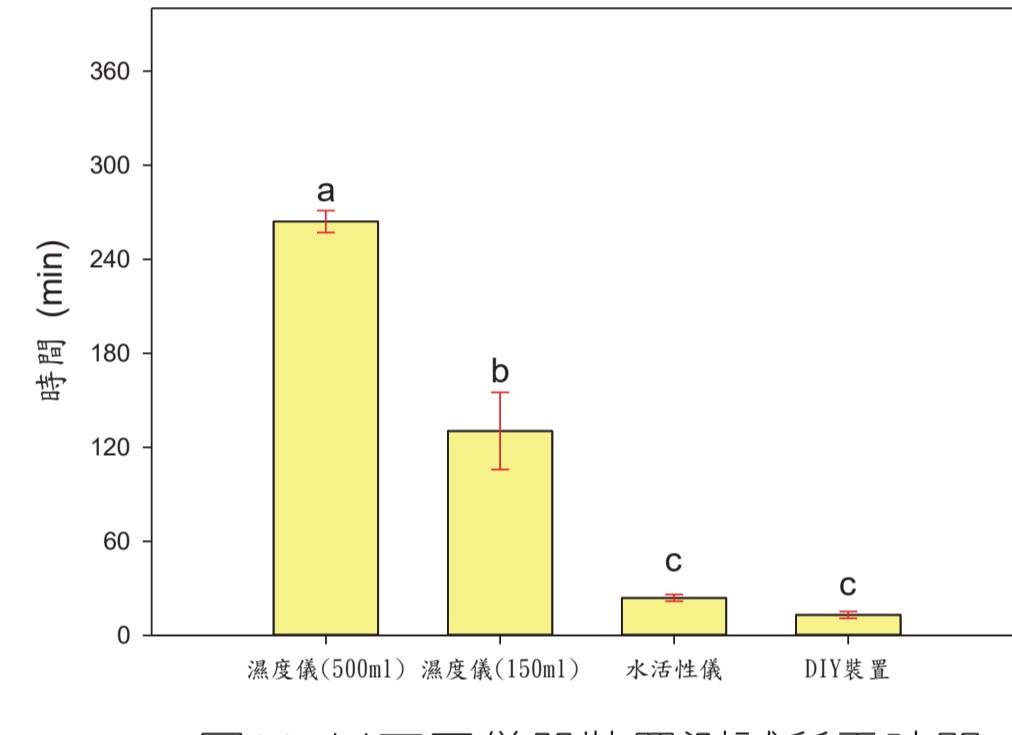


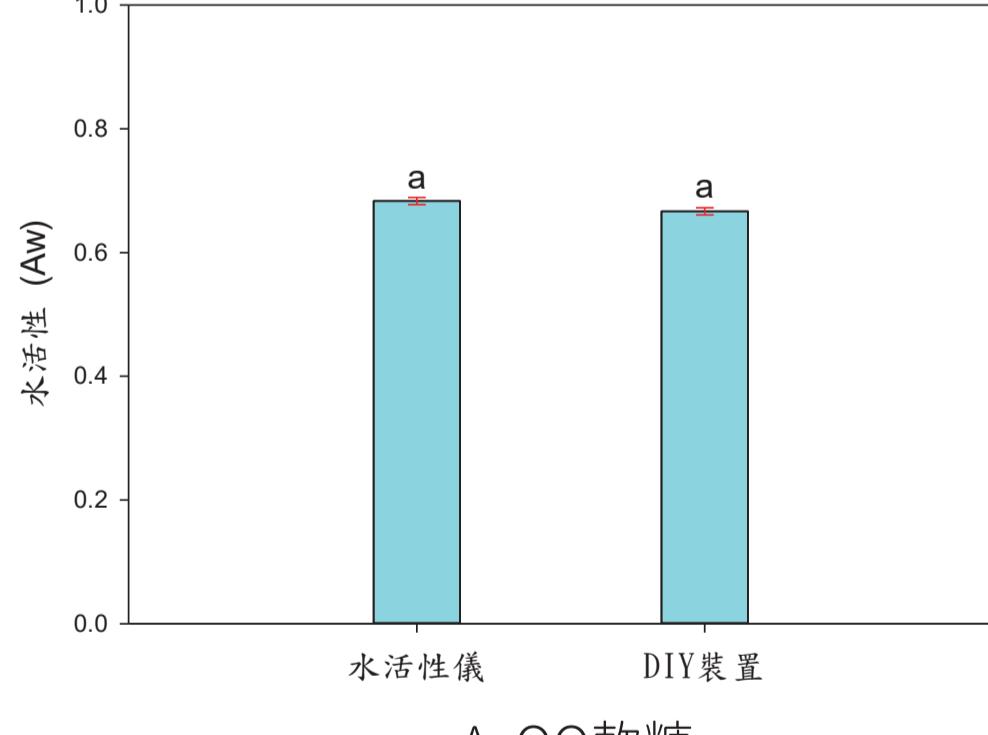
圖22. 以不同儀器裝置測試所需時間  
(此圖由作者繪製)

## 實驗七、DIY裝置之實際應用

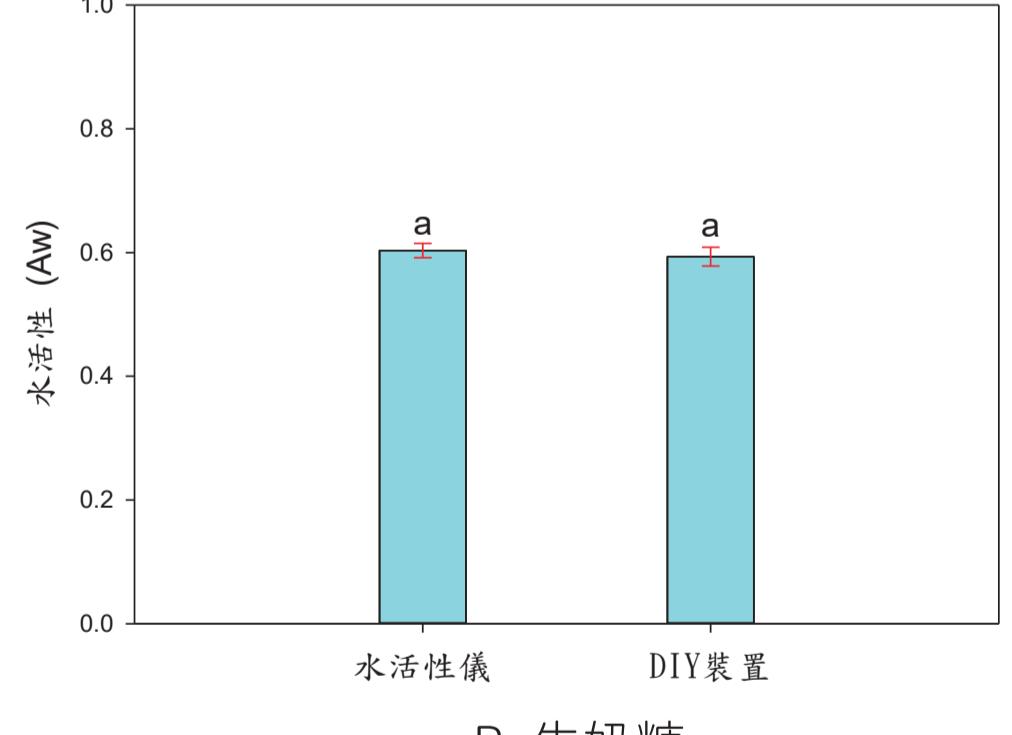
- 由表10、圖23顯示，使用水活性儀／DIY裝置分別測量六種樣品的水活性(Aw)數值，經統計分析後發現，各樣品之水活性(Aw)數值之間並無顯著差異。

表10. 以水活性儀／DIY裝置測試六種樣品之水活性

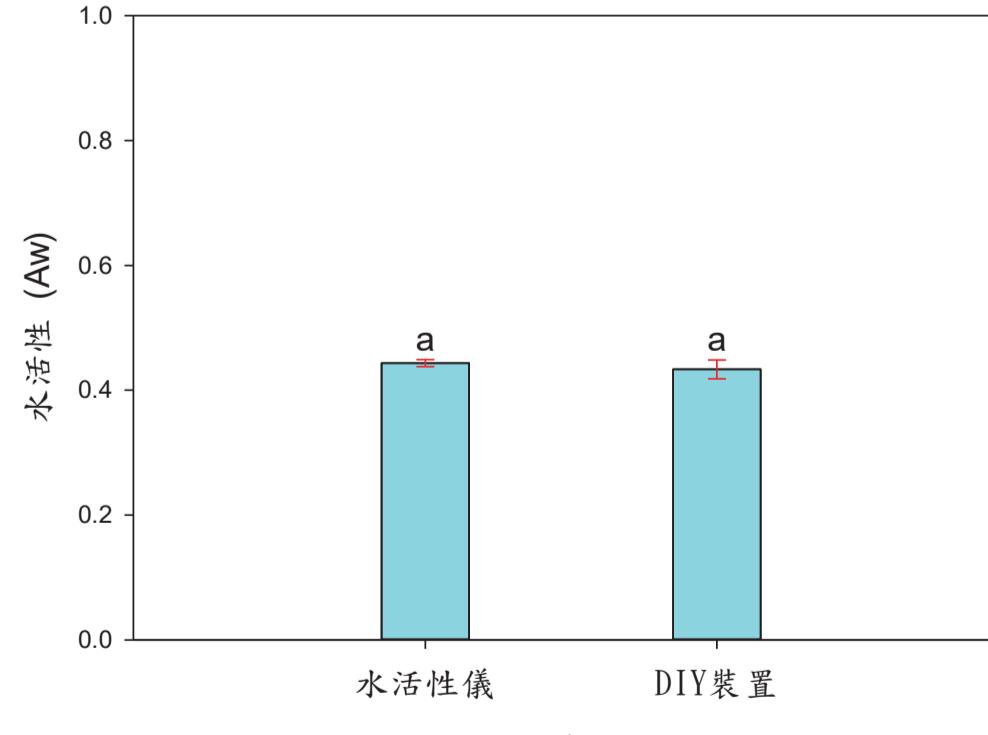
儀器裝置	水活性 (Aw)					
	A.QQ糖	B.牛奶糖	C.仙貝	D.豆丁	E.豬肉角	F.鱈魚香絲
水活性儀	0.68±0.01 <sup>a</sup>	0.60±0.01 <sup>a</sup>	0.44±0.01 <sup>a</sup>	0.68±0.01 <sup>a</sup>	0.70±0.01 <sup>a</sup>	0.59±0.01 <sup>a</sup>
DIY裝置	0.67±0.01 <sup>a</sup>	0.59±0.02 <sup>a</sup>	0.43±0.02 <sup>a</sup>	0.67±0.01 <sup>a</sup>	0.70±0.02 <sup>a</sup>	0.58±0.01 <sup>a</sup>



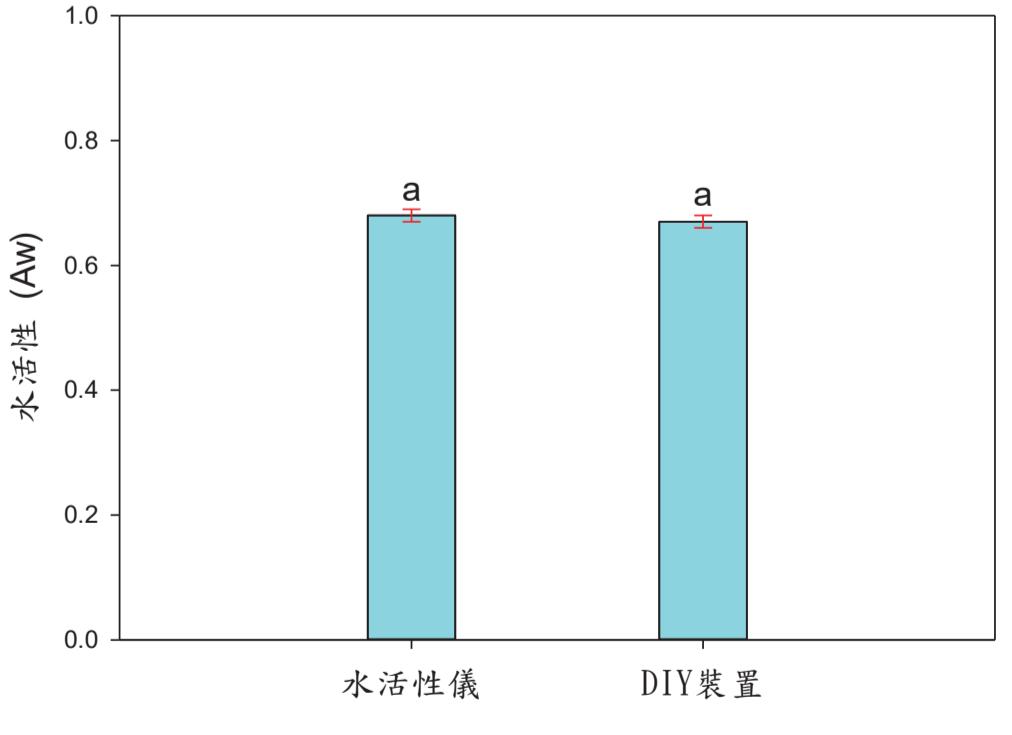
A. QQ軟糖



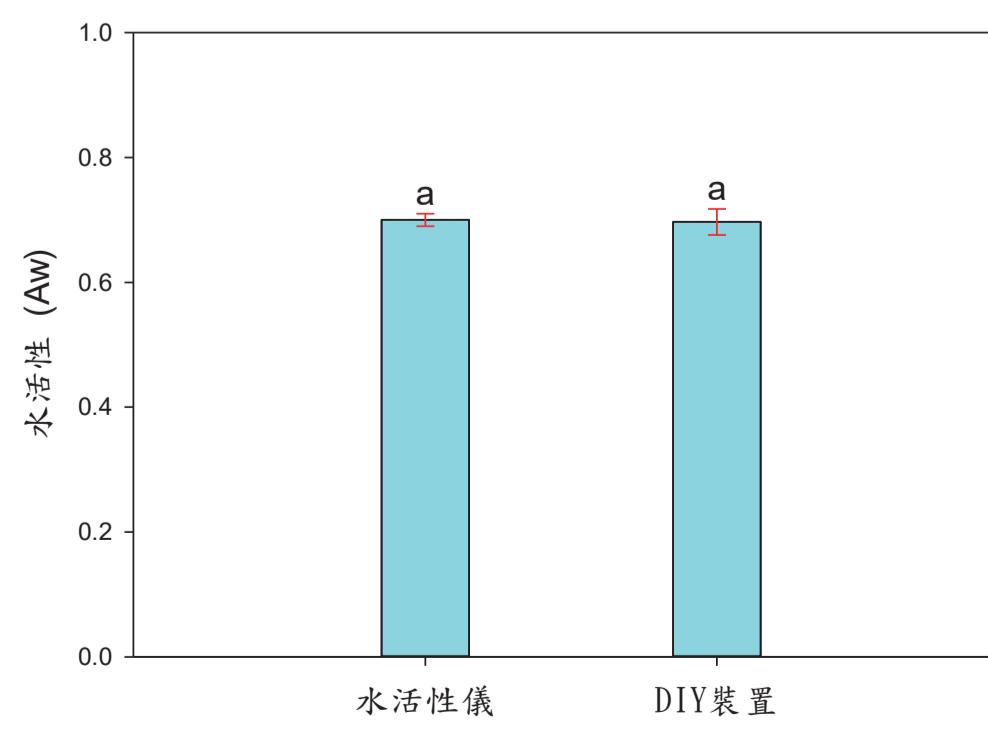
B. 牛奶糖



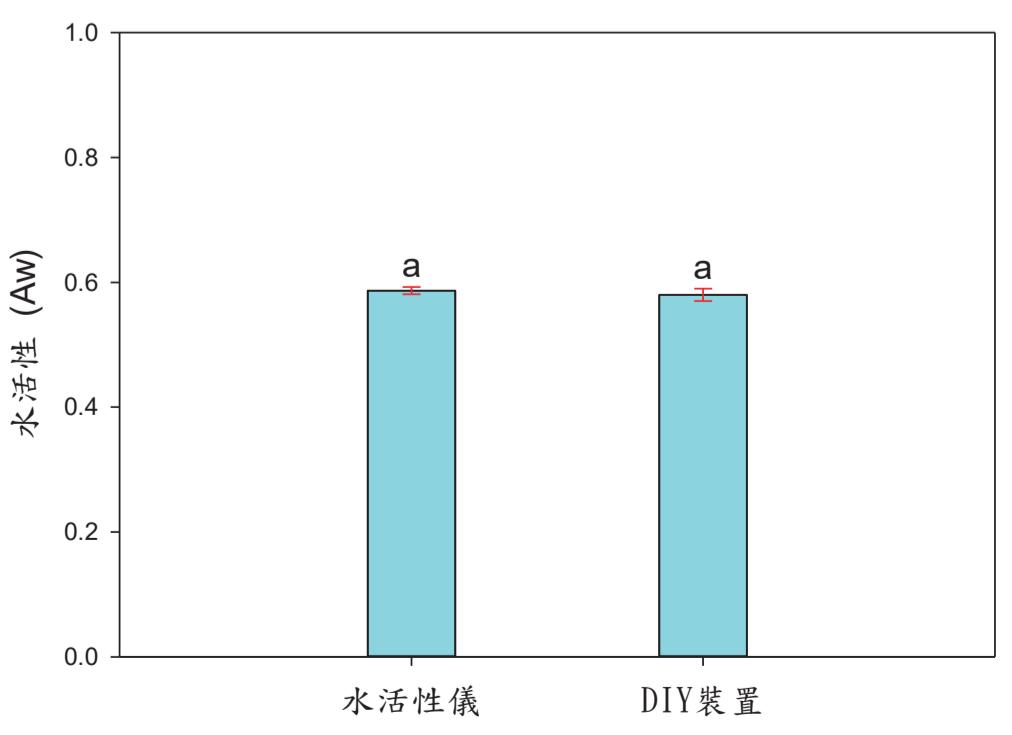
C. 仙貝



D. 豆丁



E. 豬肉角



F. 鱈魚香絲

圖23. 以水活性儀／DIY裝置測試六種樣品之水活性  
(此圖由作者繪製)

2.由表11、圖24顯示，使用水活性儀／DIY裝置分別測量六種樣品水活性值所需時間，經統計分析後發現，測試牛奶糖、仙貝、豆丁、鱈魚香絲等四種樣品所需時間，並無顯著差異；但測試QQ糖、豬肉角等二種樣品所需時間則有顯著差異。

表11. 以水活性儀／DIY裝置測試六種樣品水活性所需時間

儀器裝置	時間(min)					
	A.QQ糖	B.牛奶糖	C.仙貝	D.豆丁	E.豬肉角	F.鱈魚香絲
水活性儀	20±3 <sup>a</sup>	24±5 <sup>a</sup>	5±1 <sup>a</sup>	18±2 <sup>a</sup>	20±4 <sup>a</sup>	8±3 <sup>a</sup>
DIY裝置	11±4 <sup>b</sup>	12±8 <sup>a</sup>	8±2 <sup>a</sup>	11±5 <sup>a</sup>	11±2 <sup>b</sup>	7±3 <sup>a</sup>

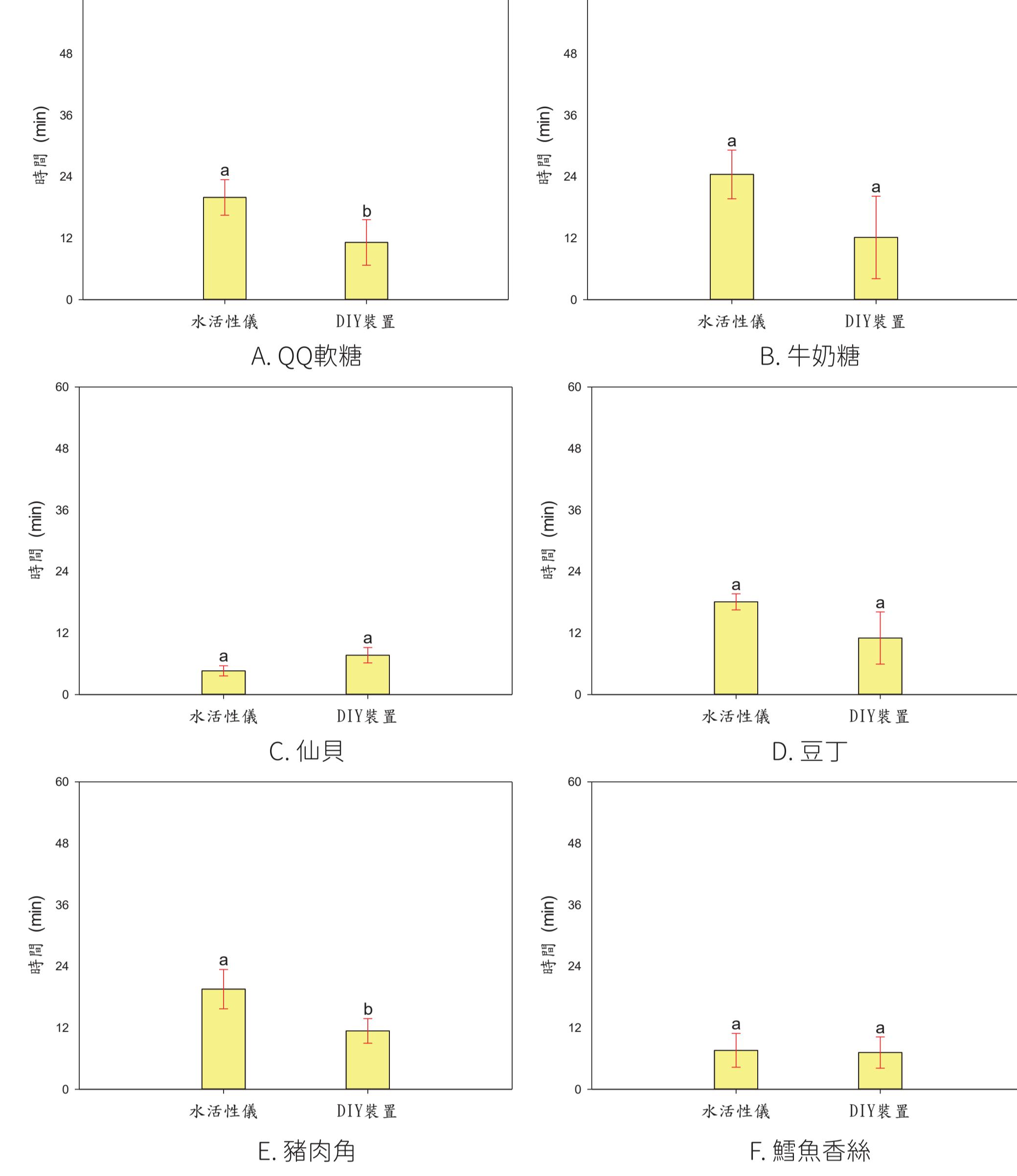


圖24. 以水活性儀／DIY裝置測試六種樣品水活性所需時間  
(此圖由作者繪製)

## 實驗八、DIY裝置之成本分析

### 1.濕度儀

採用德國製造之Testo 174H 迷你型溫溼度記錄器，以進行密閉容器內溼度變化的連續監測。該裝置配備電容式溼度感測器 (capacitive humidity sensor)，其測量精度為 ±3%RH，適用範圍介於2 % ~ 98 % RH之間。為確保濕度儀數據讀取的準確性，配備相應的USB介面讀取器 (USB interface for data loggers)。該濕度儀包含介面讀取器之購置成本為新台幣 9,500 元。

### 2.水活性儀

採用瑞士製造的 Novasina LabStart-aw 水活性分析儀。此儀器適用於低至中等水活性範圍之測定，並採用電阻式電解感測器 (resistive electrolytic sensor)，其測量精確度為 ±0.03Aw，適用範圍為 0.33 ~ 0.75 Aw。此外，該設備配置 0.33Aw 及 0.75Aw 之校正標準品，以確保測量之準確性。該水活性儀包含校正標準品之購置成本為新台幣 103,500 元。

### 3.DIY 裝置

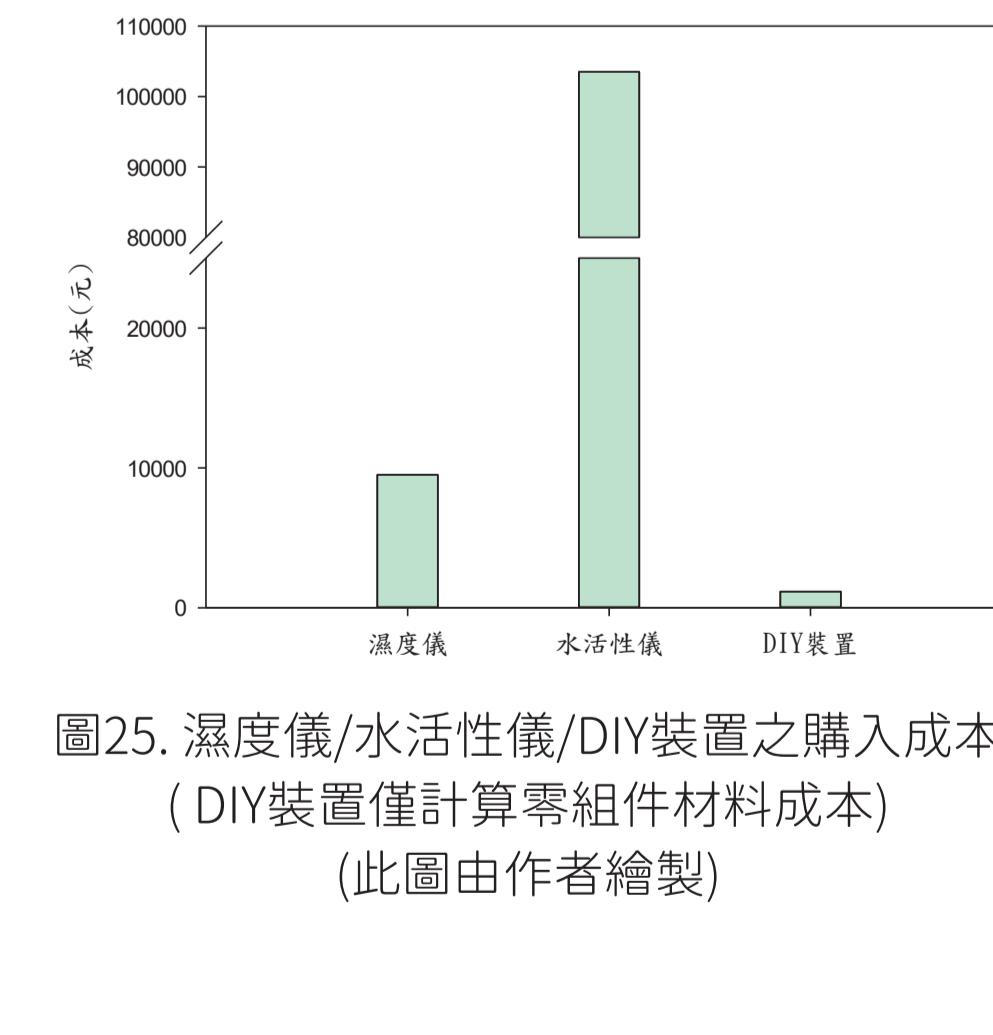
本研究所設計並製作的DIY裝置，其零組件材料成本合計約新台幣 1,151 元，細目條列如表12所示。

4.彙整濕度儀、水活性儀、DIY裝置三種儀器設備購入價格，繪製圖形進行成本分析比較，如圖25所示，水活性儀購入價格最昂貴，DIY裝置購入價格最便宜。

表12. DIY裝置的零組件材料成本明細

(此表由作者製作)

品名	價格 (NT.元)
SHT31濕度感測器	146
ESP32s開發版	205
TFT_LCD 240x320	340
SD儲存裝置	40
按鈕開關	80
電源變壓器	40
線路電路板 LED燈	100
其他材料及耗材	200
合計	1151



## 實驗貢獻

- 本研究比較「濕度儀」與「水活性儀」在測量食品水活性過程中的所需時間，並通過實驗證明，當樣品被設計為較小的密閉空間時，能有效加速平衡相對濕度的穩定，從而縮短測試所需的時間。
- 本研究的「DIY裝置」採用了圓錐狀結構來縮小密閉空間，並使用標準鹽類飽和溶液進行校正，這使得該裝置在測量精確度上足以媲美專業級水活性儀。
- 本研究的「DIY裝置」不僅在提升測量準確性和時間效益方面表現優異，更因設備成本低廉，具備明顯著的成本效益，展現未來商品化之潛力。