

# 中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國中組 化學科

佳作

030213

不要「碳」氣！自製氣瓶探究碳捕捉材料的吸附  
效能

學校名稱： 高雄市立五福國民中學

作者：  國二 張芷菱  國二 林宥彤  國二 蔡宜陵	指導老師：  邱意雯  何姿穎
---	-----------------------------

關鍵詞： 碳捕捉、自製氣瓶、碳酸氫鹽指示劑

## 摘要

工業革命後，人類排放至大氣中的二氧化碳（化學式  $\text{CO}_2$ ）逐漸增加，若不及時控制將會導致全球氣候變遷。但我們認為僅減少  $\text{CO}_2$  排放量是不夠的，應該更有效率的捕捉它，於是我們設計了一系列實驗來驗證我們的想法。為了有穩定的  $\text{CO}_2$  供氣來源，我們成功自製了  $\text{CO}_2$  氣瓶，經過改良後以排水集氣法得到時間和體積變化有很好的線性關係，能替代笨重的鋼瓶。接下來  $\text{CO}_2$  多寡的測量是選用碳酸氫鹽指示劑的顏色變化來量化，方法是通入不同時間的  $\text{CO}_2$  到指示劑後再用分光光度計測量其穿透率，再利用此穿透率區間回推每公克矽膠乾燥劑能吸附多少毫升的  $\text{CO}_2$ ，建立一個科學實驗模式後應用到其他生活中具孔洞的材料中，並進一步探討不同材料間吸脫附重複率的效能。

## 壹、研究動機

工業革命後，人類對能源和燃燒化石燃料的依賴越來越深，而排放到大氣中的  $\text{CO}_2$  也一直在增加。若溫室效應等這些暖化現象不及時控制減緩，將會形成全球氣候變遷的重大危機。然而，我們認為僅減少  $\text{CO}_2$  排放量是不夠的，更應該有效率捕捉空氣中的  $\text{CO}_2$ 。為了解決這個問題，我們針對以下幾篇以碳捕捉為實驗目的的文獻報告，做了以下的分析與探討。

### （一）第 51 屆全國科展(國中組化學科)：太陽能二氧化碳捕捉器<sup>[1]</sup>

- 1.內容：利用鹼性化學藥品捕捉空氣中的  $\text{CO}_2$ ，並利用化學方法還原，重複利用減少污染。
- 2.優點：捕捉器以太陽能為電力來源，可減少二次污染，碳捕捉後還能將  $\text{CO}_2$  成功脫附。
- 3.缺點： $\text{CO}_2$  量之量取設備較為粗糙，僅以針筒作為粗略的測量工具。
- 4.發想：使用化學指示劑的變色情形取代針筒再用光度計的穿透率計算出  $\text{CO}_2$  的吸收量。

### （二）成功大學藥學系(陳登豪)：以永續性之分子孔洞材料進行高效率壓吸附捕捉 $\text{CO}_2$ <sup>[2]</sup>

- 1.發想：發現孔洞的材料有助於吸附氣體，接下來會找有孔洞的材料作為研究方向。






## 貳、研究目的

結合以上研究動機及文獻探討，本實驗希望能捕捉大氣中既有的  $\text{CO}_2$ 。因此以探究日常生活中有無適合碳捕捉的材料作為我們的題目。我們想研究自製  $\text{CO}_2$  氣瓶來取代昂貴且笨重的鋼瓶以供應穩定氣源，並且找到適合的化學指示劑去量化並探討吸附材料是否真的可以讓  $\text{CO}_2$  的濃度降低，甚至完全吸附，因此我們的實驗目的有以下五點：

- (一) 找到穩定提供且方便攜帶的 CO<sub>2</sub> 來源
- (二) 找到適當的化學指示劑種類和比例來量化 CO<sub>2</sub> 的體積
- (三) 測試生活中易取得的材料來探究有無 CO<sub>2</sub> 吸附能力
- (四) 找到適合的方法驗證材料是否吸附 CO<sub>2</sub>
- (五) 探究吸附 CO<sub>2</sub> 的材料能否重複使用

### 參、研究設備及器材

碳酸氫鈉	酚紅 (0.1%)	溴瑞香草藍 (0.1%)	氯化鉀
			
檸檬酸(氣瓶用)	parafilm	乾燥劑	碳酸氫鈉(氣瓶用)
			
吸量管	安全吸球	止逆閥	快插瓶蓋
			
氣流調節閥	計泡器	簡易氣壓計	微調氣流調節閥
			
三通連接閥	通用瓶蓋	強力磁鐵+重力球	三通管
		 (吸酸控制器)	

20mL 閃爍計數瓶	電子數顯游標卡尺	pH 計(Teser30)
		
紫外/可見光 分光光度計(UV-1500)	紫外/可見光 分光光度計 (SPECORD PLUS 250)	
		

## 肆、研究過程與方法

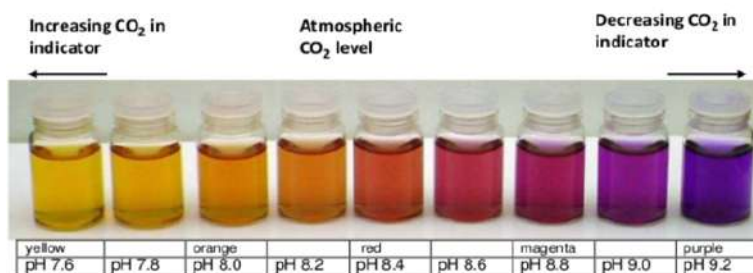
### 一、碳酸氫鹽指示劑<sup>[3,7]</sup>

我們想利用化學指示劑的方式來檢測 CO<sub>2</sub> 的濃度(因為這樣就可藉由指示劑顏色的變化來量化所吸收的 CO<sub>2</sub>)，所以在網路搜尋到碳酸氫鹽指示劑 (Hydrogencarbonate indicator 或稱 Bicarbonate indicator) 是一種容易吸收 CO<sub>2</sub> 的化學物質，用於在光合作用及呼吸實驗時檢測 CO<sub>2</sub> 是否被釋放。

此溶液由 A、B 兩種溶液組合而成：

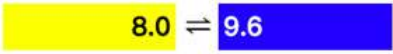

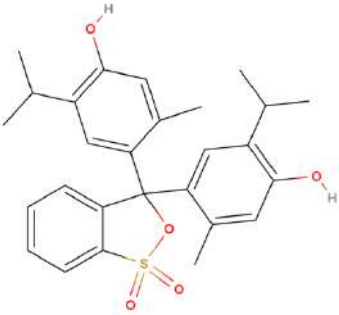
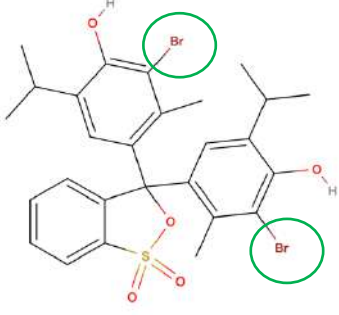

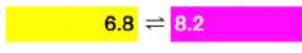
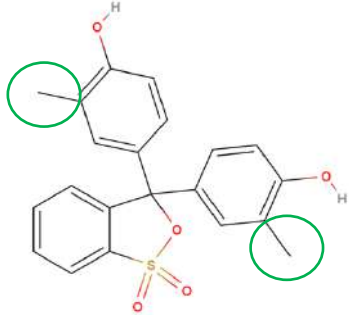
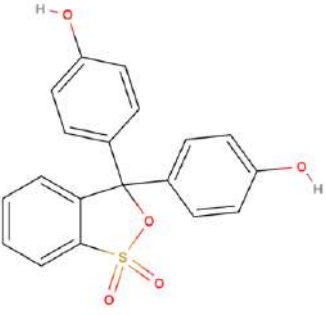
- (一) A 溶液：0.02 克百里酚藍及 0.01 克甲酚紅溶於 2 毫升的乙醇 (兩者質量比 2 : 1)
- (二) B 溶液：0.8 克碳酸氫鈉及 7.48 克的氯化鉀溶於 90 毫升蒸餾水
- (三) 將 A、B 劑混合後以 9:1000 的比例以蒸餾水稀釋即得碳酸氫鹽指示劑。

在增加或減少 CO<sub>2</sub> 的顏色和 pH 值變化如下<sup>[4]</sup>：



▲圖 1.文獻中碳酸氫鹽指示劑在增減 CO<sub>2</sub> 後的顏色和 pH 值<sup>[4]</sup>

(四) 百里酚藍、甲酚紅、溴瑞香草藍、酚紅的特性比較

中文名	百里酚藍	溴瑞香草藍
英文名	Thymol blue	Bromothymol blue
變色範圍	$\text{below pH } 8.0 \Rightarrow \text{above pH } 9.6$ 	低於pH 6.0 時 高於pH 7.6 時 
結構式		
中文名	甲酚紅	酚紅
英文名	Cresol red	Phenol red
變色範圍	$\text{below pH } 7.2 \Rightarrow \text{above pH } 8.8$ 	$\text{below pH } 6.8 \Rightarrow \text{above pH } 8.2$ 
結構式		

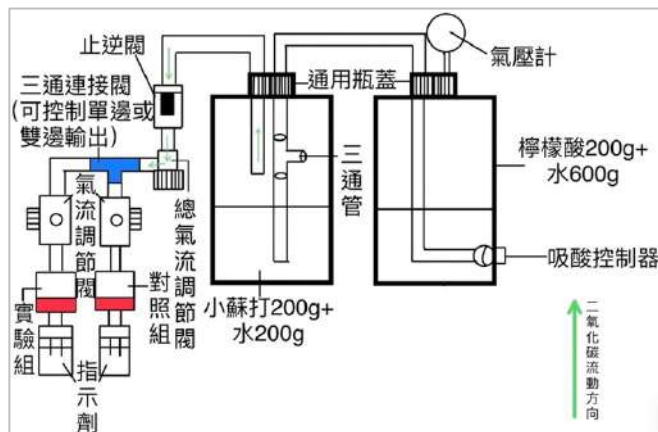
(五) 根據上述的配方，我們找到實驗室存有的**溴瑞香草藍**來代替百里酚藍，**酚紅**來代替甲酚紅。從結構可以看出溴瑞香草藍僅比百里酚藍多二個溴基，溴基為吸電子團其活性範圍和結構都和百里酚藍相似，且 pH 的變化皆為 1.6，另外酚紅和甲酚紅相比雖少了兩個甲基（吸電子團）以及變色範圍（pH 相差 1.4）稍微小一點，但能與溴瑞香草藍互補當作較高 pH 值時的指示顏色，故將溴瑞香草藍搭配酚紅作為我們碳酸氫鹽指示劑的選擇。

(六) 我們實驗中使用的碳酸氫鹽指示劑成分：0.1%**溴瑞香草藍**（簡稱為 A1）、0.1%**酚紅**（簡稱為 A2）、碳酸氫鈉 0.8g+氯化鉀 7.48g+蒸餾水 90g（簡稱為 B 溶液）、蒸餾水，再利用實驗找出較適合的比例，往後的報告內容中簡稱為『指示劑』。

## 二、自製 CO<sub>2</sub> 氣瓶

我們利用稀酸加碳酸鹽類會產生 CO<sub>2</sub> 的化學反應，一開始用碳酸鈣粉筆加鹽酸來製備，但因氣流不穩定且不可調控供氣量，在搜尋解決方法時看到水族影片<sup>[5]</sup>「誰說種水草要花很多錢？只要 60 元，做出二氧化碳鋼瓶！」自製養水草的氣瓶做發想，原理簡述如下：

- (一) 原理：先擠壓檸檬酸的瓶子，讓檸檬酸瓶內的液體流入小蘇打水中，使其反應產生 CO<sub>2</sub>。三通管是為了避免小蘇打水倒抽回去檸檬酸瓶裡面。等兩個瓶子都充滿 CO<sub>2</sub> 時，將氣流調節閥打開即可供應 CO<sub>2</sub>。最後當瓶子裡的 CO<sub>2</sub> 減少後，兩個瓶子會產生壓力差，這時小蘇打水這邊的瓶子就會把檸檬酸吸過去進行反應並繼續製造 CO<sub>2</sub>。
- (二) 利用以上原理我們將自製的 CO<sub>2</sub> 氣瓶加上三通連接閥、氣流調節閥來控制氣體的流速和方向，進而取代笨重的鋼瓶作為 CO<sub>2</sub> 的氣源。裝置設計圖如圖 2 實際成品如圖 3。



▲圖 2.二代氣瓶示意圖



▲圖 3.二代氣瓶的實際照片

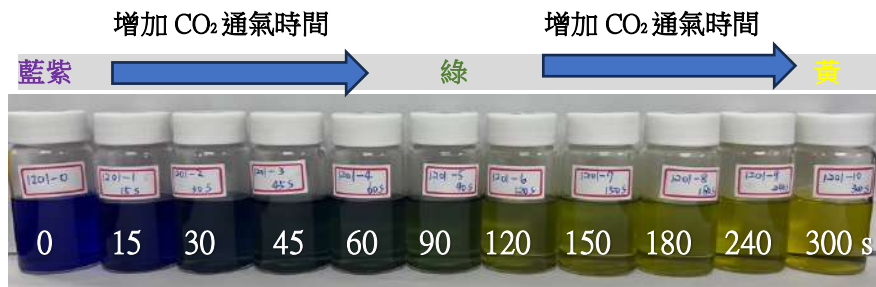
## 三、分光光度計

- (一) 比耳定律：

光穿透有色溶液時，光的吸收度  $A$  與吸收係數  $\alpha$ 、光徑長  $b$ 、濃度  $c$  三者均呈正比，公式可表示為  $A = \alpha bc$ ，一束光照射到一有色溶液時，部份的光線會被溶液吸收，剩下的光線則穿透溶液，即原本光入射線強度  $I_0$ ，穿透光線強度變為  $I_1$ ，此時光的穿透度  $T$ ，公式可表示為  $A = -\log T = -\log I_1/I_0$ 。由此可知，溶液濃度越大時，顏色越深，吸光度也越大。

- (二) 我們實驗將通入不同時間的 CO<sub>2</sub> 到指示劑後，記錄指示劑的顏色從藍色變成灰綠色到綠色最後至黃色，如圖 4。





▲圖 4.在溴瑞香草藍+酚紅的碳酸氫鹽指示劑通入不同秒數 CO<sub>2</sub> 後變色情形

#### 四、矽膠乾燥劑<sup>[6]</sup>

(一) 矽膠乾燥劑為透明固體顆粒，具有開放性多孔結構，為二氧化矽微粒子的三維凝聚多孔非結晶形固體材料，其化學結構為 SiO<sub>2</sub> · xH<sub>2</sub>O，物理化學性質穩定，且具有親水性表面及對極性分子的吸附量大。而矽膠因其可製成

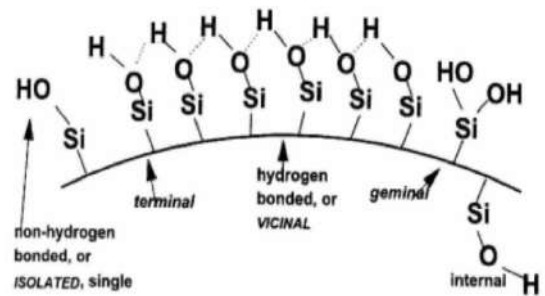


圖 5.矽膠表面上不同種類矽醇基團<sup>[6]</sup>

具高表面積與高孔隙度的多孔性結構，所以應用方面可作為觸媒載體與吸附劑，也因矽膠表面的官能基多為矽醇基團(Silanol group, Si-OH)如圖5 所示，因此對極性的氣體分子，如水氣、甲醇與氨氣皆具有良好的吸附能力，加上具有無毒、無臭、不燃性、對金屬無腐蝕性與化學和物理性安定等，故常被使用於吸附除濕方面之應用。

(二) 市售混藍珠的矽膠乾燥劑：在白色乾燥劑中添加5%藍色氯化亞鈷濕度指示劑，吸濕後會變粉紅色，此材料是我們是碳捕捉的選擇之一。

#### 五、碳捕捉的方法分析<sup>[8]</sup>

(一) 吸收技術：

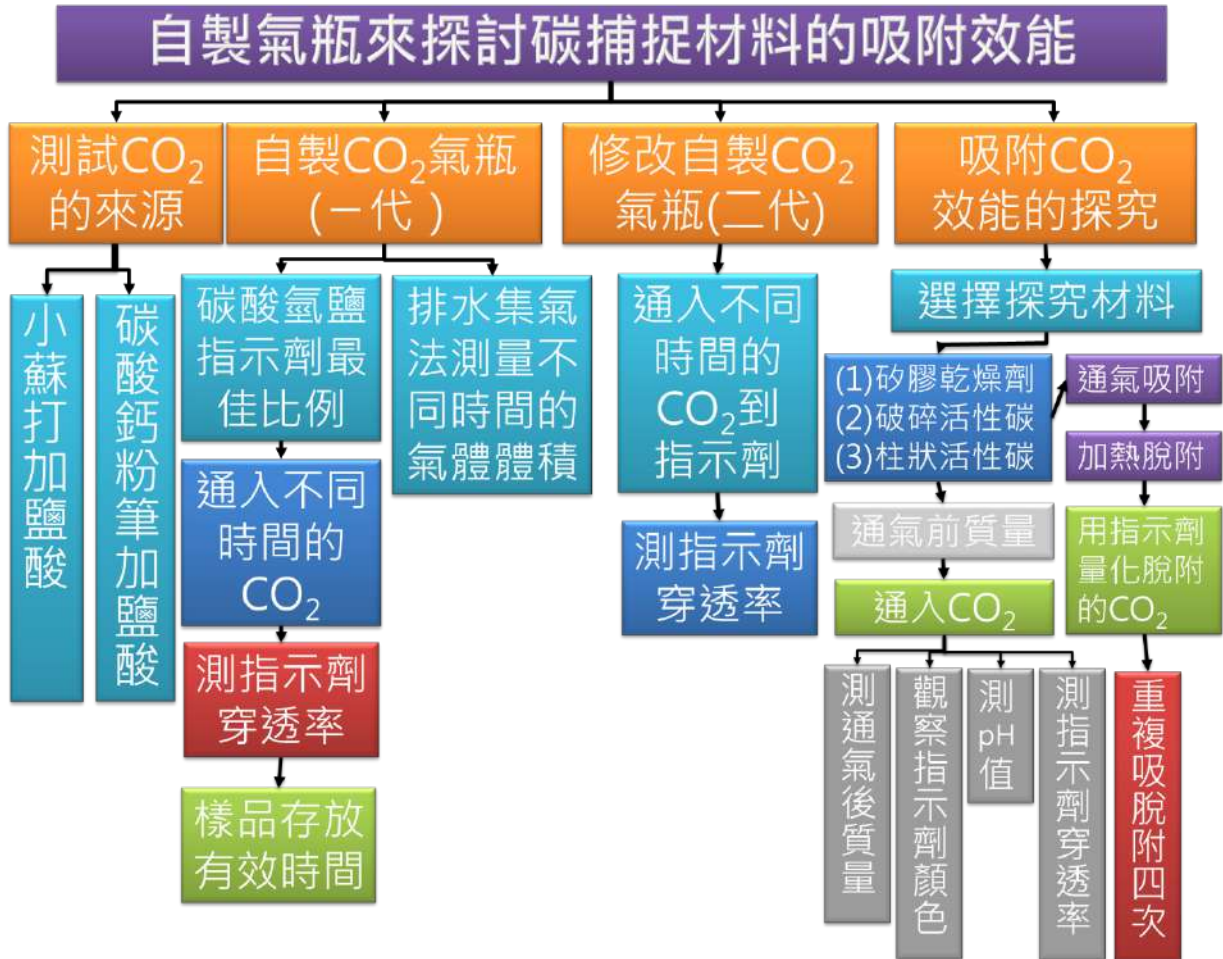
1. 物理方法：改變 CO<sub>2</sub> 與有機吸收劑之間的壓力和溫度。
2. 化學方法：以吸收劑與 CO<sub>2</sub> 發生化學反應，並利用其逆反應進行吸收劑再生。

(二) 吸附技術：CO<sub>2</sub> 分子選擇性地吸收到另一種材料的表面上，從而實現富集 CO<sub>2</sub>，這種能選擇性地吸附某種氣體分子的材料被稱為吸附劑。

(三) 薄膜分離技術：

1. 利用特殊製造的氣體分離膜與原料氣接觸在膜兩側壓力差下，氣體分子透過膜的現象。
2. 優點：操作簡單；缺點：薄膜耐久性差，且分離效率低。

## 六、實驗流程架構



## 七、實驗步驟

(一) 利用含有碳酸鈣的粉筆加上鹽酸來製造 CO<sub>2</sub>

1. 將白色的粉筆（成份為碳酸鈣）加入 10mL 1M 的鹽酸，將產生的氣體導入澄清石灰水來檢驗是否為 CO<sub>2</sub>（產生白色混濁）。
2. 利用上述氣源通入 A1 二滴 + A2 一滴 + 不同比例 B 溶液和蒸餾水的指示劑。

測試代號	一	二	三	四	五	六	七
B 溶液 (mL)	1.0	2.0	3.0	5.0	1.0	1.0	2.0
水 (mL)	5.0	4.0	3.0	1.0	5.0	11.0	10.0

3. 配製不同比例 1M 鹽酸和蒸餾水的溶液，將 2.0 公克的粉筆加入，馬上用導管通入指示劑，分別通氣 60 秒或 360 秒後，將顏色拍照和紀錄。



## (二) 自製 CO<sub>2</sub> 氣瓶 (一代氣瓶, 僅單邊輸出氣體)

1. 將兩瓶 2L 汽水瓶分別裝 200g 小蘇打 + 200g 水和 200g 檸檬酸 + 600g 水並裝上快插瓶蓋, 接上風管、三通管、氣壓計、止逆閥、氣流調節閥和計泡器, 為一代氣瓶。

## (三) 利用一代氣瓶再次找尋適合實驗的最佳比例指示劑

1. 碳酸氫鹽指示劑的配製: A1 固定兩滴, A2 固定一滴 (用眼藥水罐裝比滴管更能精確控制體積), 使用安全吸球加吸量管來取 B 溶液和水的體積, 並改變比例配成指示劑並裝在試管, 同一比例皆裝成兩管作為有通氣和未通氣對照。測試次數和體積如下:

測試編號	一	二	三	四	五
B 溶液 (mL)	1.0	0.5	1.5	2.0	2.5
水 (mL)	5.0	5.5	4.5	4.0	3.5

2. 通入 240 秒的 CO<sub>2</sub> (往後實驗的氣體流速皆控制在每 10 秒 10 顆氣泡, 皆用碼錶校正後才開始通氣), 觀察顏色並拍照紀錄結果。

## (四) 利用排水集氣法測試自製 CO<sub>2</sub> 氣瓶的氣體供應的穩定度

1. 準備一個水槽裝滿水, 並把量筒裝滿水倒置在液面下。
2. 通入 CO<sub>2</sub> 到量筒中, 紀錄每 30 秒量筒刻度的變化 (每 10 秒 10 顆氣泡)。
3. 重複步驟 1.2 總共進行三次實驗。

## (五) 一代氣瓶通入不同時間下的指示劑顏色變化及穿透率測量

1. 依照步驟 (三) 的結果, 將最佳比例 (A1 兩滴 + A2 一滴 + B 溶液 0.5mL + 水 5.5mL) 的指示劑分別通入 30、60、90、120、180、240、300 秒的 CO<sub>2</sub> (固定 10 秒 10 顆氣泡的氣流量), 為了增加密封度和樣品儲存方便性把試管改成閃爍計數瓶。
2. 接下來利用分光光度計 (型號 UV-1500) 選擇 560 nm (黃光)、400 nm (紫光)、460 nm (藍光) 三種波長, 測量通氣後的指示劑和放置一至四天的穿透率。每次測量完立刻倒回瓶內並轉緊蓋子。
3. 將未通氣的指示劑和通 CO<sub>2</sub> 300 秒的指示劑以分光光度計 (型號 SPECORD PLUS 250) 測量 190~1100nm 的吸收度, 以確認最佳比例指示劑的吸收度最明顯的波長。

## (六) 修改自製 CO<sub>2</sub> 氣瓶 (成為二代氣瓶, 可控制單/雙邊輸出氣體)

1. 拿掉計泡器, 以確保氣流更穩定, 另一方面降低 CO<sub>2</sub> 的含水量。
2. 將原本的風管連接三通連接閥改裝成可控制單邊或雙邊輸出氣體的裝置。

3. 在分開後的兩管分別接上可微調的氣流調節閥。
4. 為了避免不供氣時產生過多的 CO<sub>2</sub>，在檸檬酸瓶內的風管上裝吸液控制裝置，不進行實驗時可以讓風管末端離開液面，以免壓力過大而毀壞裝置。

#### (七) 測量實驗步驟 (三) 配製的每一瓶指示劑 pH 值

1. 配製碳酸氫鹽指示劑 (A1 四滴 + A2 二滴 + B 溶液 1.0mL + 水 11.0mL) 共 34 瓶。
2. 分別測量其 pH 值，並將平均值  $\pm 0.20$  內的指示劑保留做使用。
3. 往後步驟 (八) 到 (十一) 皆重複此步驟。

#### (八) 二代氣瓶通入不同時間下的指示劑顏色及穿透率測量

1. 將指示劑配製成 (A1 四滴 + A2 二滴 + B 溶液 1.0mL + 水 11.0mL) 利用二代氣瓶分別通入 15、30、45、60、90、120、180、240、300 秒的 CO<sub>2</sub> (流速每 10 秒 10 顆氣泡)。
2. 通氣完馬上測 pH 值，利用分光光度計 560nm 波長去測量通氣後指示劑的穿透率。
3. 重複步驟 1~2 進行兩次。

#### (九) 測試矽膠乾燥劑是否能吸附 CO<sub>2</sub>：利用二代氣瓶相同流速同時通入 CO<sub>2</sub> 到矽膠乾燥劑 (實驗組) 和保麗龍球 (對照組) 兩個容器並導入到指示劑進行通氣。

1. 兩邊皆以裝滿保麗龍球的容器進行通氣並插到有裝水的閃爍計數瓶中來校正流速 (流速每 10 秒 10 顆氣泡)。
2. 測量空容器的質量再將相同尺寸的容器裝滿矽膠乾燥劑並測量乾燥劑通氣前的質量。
3. CO<sub>2</sub> 通入乾燥劑和保麗龍球，並觀察兩邊的指示劑液面下有無氣泡產生，持續 300 秒。如圖 6 所示。
4. 結束通氣馬上測量乾燥劑通氣後的質量，觀察且紀錄通氣後的顏色，測量 pH 值。
5. 用分光光度計測量 560nm 的穿透率。
6. 重複步驟 1~6 將同一個矽膠乾燥劑通入第二~五次的 CO<sub>2</sub>，觀察其結果並記錄。



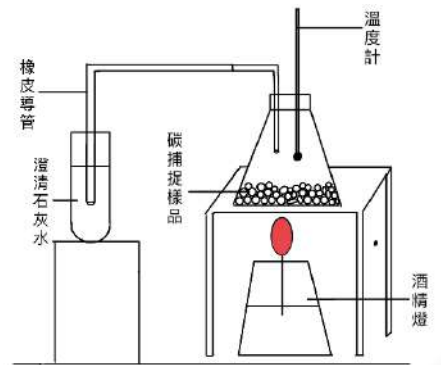
▲圖 6.自製二代氣瓶同時通氣於矽膠乾燥劑和保麗龍球照片

(十) 以澄清石灰水檢驗矽膠乾燥劑通入 CO<sub>2</sub> 後是否有吸附

1. 把通了四次，每次 300 秒 CO<sub>2</sub> 的乾燥劑(起始質量 43.38g)以酒精燈加熱，如圖 7、8。
2. 記錄從 25 至 90°C (約 10 分鐘)的澄清石灰水的變化
3. 取相同質量的未通氣乾燥劑同樣加熱 10 分鐘，紀錄變化。



▲圖 7.以澄清石灰水檢測脫附 CO<sub>2</sub> 的實驗照片



▲圖 8. 裝置示意圖

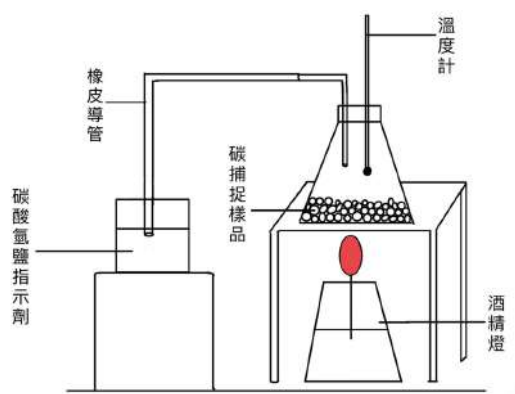
(十一) 不同碳捕捉材料重複吸附和加熱脫附 CO<sub>2</sub> 的實驗

1. 取三個相同尺寸的空容器甲、乙、丙，測量質量再將此容器裝滿待測樣品（矽膠乾燥劑、破碎活性碳、柱狀活性碳）並記錄個別通氣前的質量。
2. 用二代 CO<sub>2</sub> 氣瓶校正氣體流速（流速每 10 秒 10 顆氣泡）先流過待測樣品再導入指示劑，並觀察指示劑的液面下有無氣泡產生，持續通氣 300 秒。
3. 結束通氣馬上測量樣品的質量變化。
4. 接下來將乾燥劑倒至錐形瓶並用酒精燈加熱至 90°C 使產生的氣體導入最佳比例碳酸氫鹽指示劑，實驗照片如圖 9，裝置示意如圖 10。

5. 記錄起始溫度到 90 度(約 10 分鐘)的指示劑顏色變化及測量指示劑的 pH 值。
6. 將步驟 5 的指示劑用分光光度計測量 560nm 的穿透率並記錄。
7. 測量樣品冷卻後的質量並記錄。
8. 接著重複步驟 2~7 總共四次。



▲圖 9.以碳酸氫鹽指示劑檢測碳捕捉材料脫附 CO<sub>2</sub>的實驗裝置



▲圖 10.裝置示意圖

#### (十二) 測量乾燥劑、破碎活性碳、柱狀活性碳通氣前後外觀的大小變化

1. 利用電子數顯游標卡尺分別測量 50 個乾燥劑直徑、50 個柱狀活性碳的長寬（破碎活性碳因形狀不規則和尺寸過小而無法測量）。
2. 將通氣前後的樣品分別拍照。

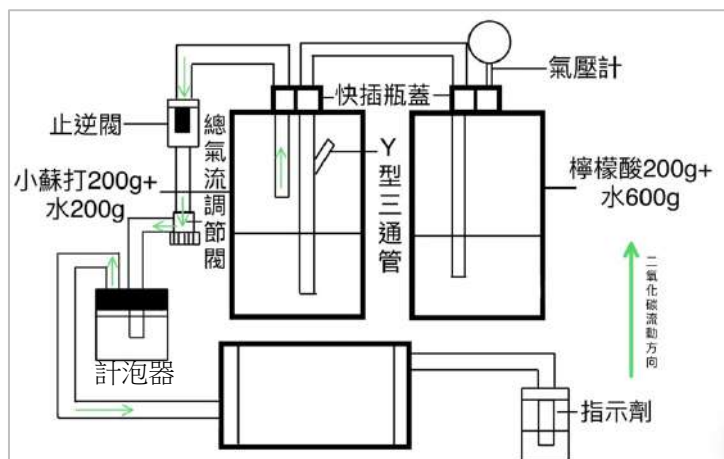
## 伍、研究結果

### 一、利用含有碳酸鈣的粉筆加上鹽酸來製造 CO<sub>2</sub>

藥品 編號	A1 (滴)	A2 (滴)	B (mL)	蒸餾水 (mL)	通前 顏色	白粉筆 (g)	鹽酸 (mL)	蒸餾水 (mL)	通氣 時間	通後 顏色	通氣後的照片
一	2	1	1	5	紫	1.5	1	9	60 秒	紫	
二	2	1	2	4	藍	1.5	5	5	60 秒	淡藍	
三	2	1	3	3	藍	1.5	8	2	60 秒	淡綠	
四	2	1	5	1	紫	1.5	8	2	60 秒	淡灰綠	
五	2	1	1	5	紫(沒 拍照)	1.5	8	2	60 秒	黃(沒 拍照)	
六	2	1	1	11	紫	2.0	8	2	360 秒	綠黃	
七	2	1	2	10	藍	2.0	8	2	360 秒	淺藍	

### 二、自製 CO<sub>2</sub> 氣瓶 (一代氣瓶, 僅單邊輸出氣體)

#### (一) 裝置示意圖和實際照片








▲圖 11.一代氣瓶的示意圖



▲圖 12.一代氣瓶的實際照片

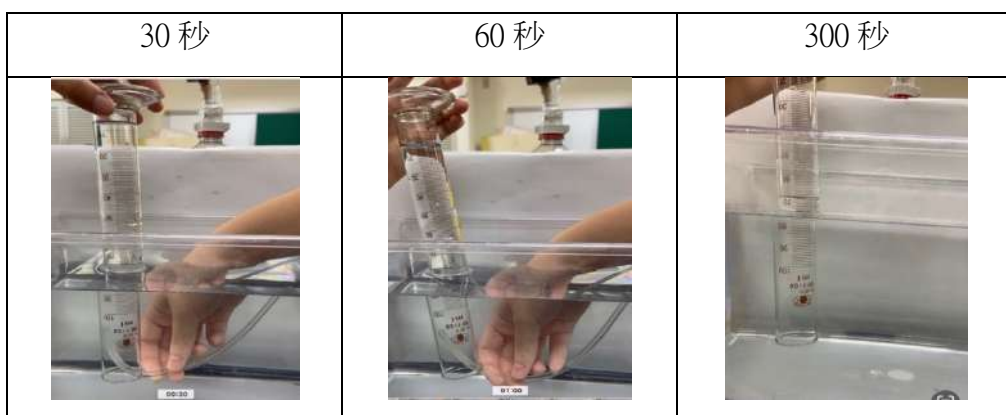


三、利用一代氣瓶再次找尋適合實驗的最佳比例指示劑

編號	一	二	三	四	五
B 溶液(mL)	1.0	0.5	1.5	2.0	2.5
水(mL)	5.0	5.5	4.5	4.0	3.5
通氣時間(秒)	240				
通氣後顏色	綠	黃綠	灰綠	灰綠	淺藍
照片					
照片中的右邊試管皆是與左管相同比例但未通入 CO <sub>2</sub> 的指示劑					

四、利用排水集氣法測試一代自製 CO<sub>2</sub> 氣瓶的氣體供應穩定度

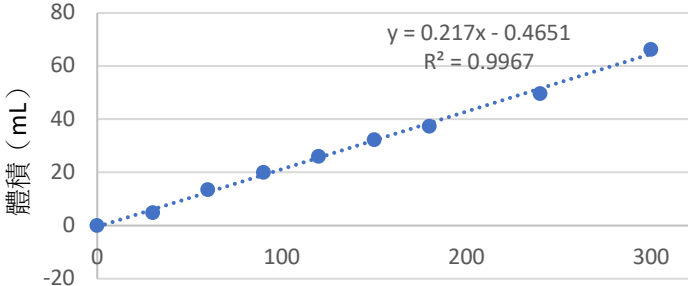
(一) 排水集氣的方式：以手機攝影的方式紀錄，再播影片截圖來觀察並記錄體積的變化。



(二) 重複三次取平均體積

時間 (秒)	0	30	60	90	120	150	180	240	300	15	45
第一次	0	5	15	23	30	36	42	55	70	用趨勢線公式 $y = 0.217x - 0.4651$ 來預測體積	
第二次	0	4	10	18	23	30	35	45	61		
第三次	0	5	15	19	25	31	35	49	68		
平均	0	4.7	13.3	20.0	26.0	32.3	37.3	49.7	66.3	2.8	9.3

將通氣時間和平均體積作成關係圖	<p>不同時間下 CO<sub>2</sub> 氣瓶輸出的平均體積</p> 	
	<p>體積 (mL)</p> <p>輸出氣體時間 (秒)</p>	






(三) 綜合數據和趨勢線公式可以整理出表 1。

表 1. 不同時間下 CO<sub>2</sub> 氣瓶 (流速為每 10 秒 10 顆) 輸出的平均體積

通氣時間 (秒)	0	15	30	45	60	90	120	150	180	240	300
CO <sub>2</sub> 體積 (mL)	0	2.8	4.7	9.3	13.3	20.0	26.0	32.3	37.3	49.7	66.3

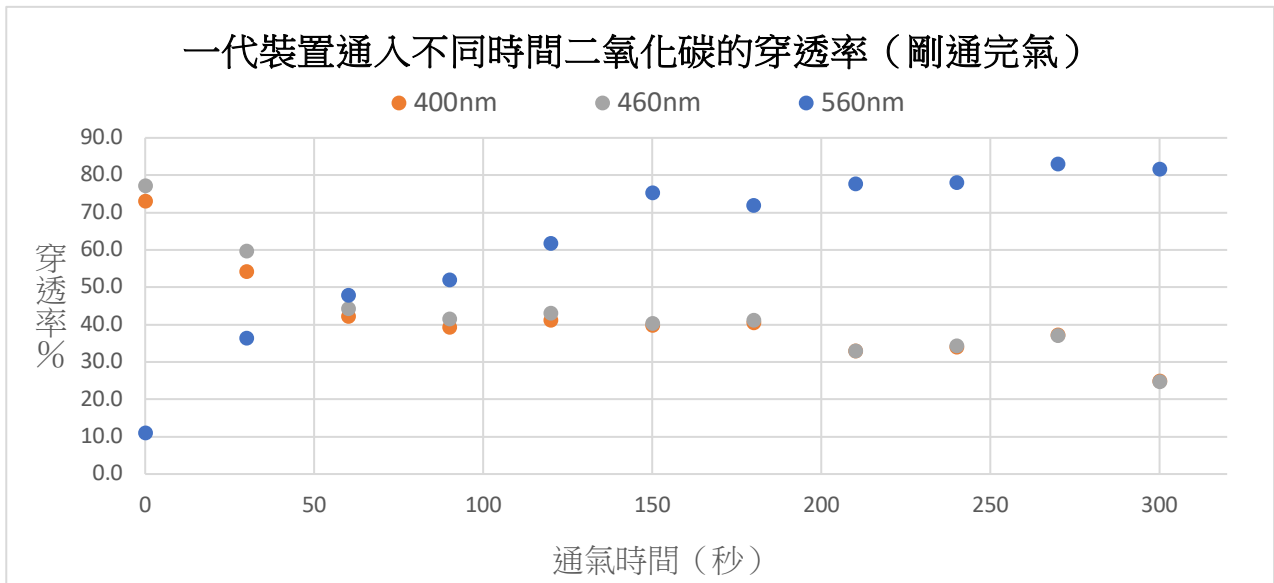
### 五、一代氣瓶通入不同時間下的指示劑顏色變化

(一) 指示劑通入不同時間的 CO<sub>2</sub> 的顏色變化和光度計穿透率及五天的觀察

時間(秒)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	
通氣完顏色												
穿 透 率	560nm	11.1	36.4	47.9	52.0	61.8	75.3	71.9	77.8	78.1	83.1	81.6
	400nm	73.1	54.2	42.2	39.3	41.2	39.8	40.5	33.0	34.0	37.3	24.9
	460nm	77.2	59.7	44.3	41.5	43.1	40.3	41.2	33.0	34.3	37.2	24.7
蓋緊瓶蓋一天後的顏色												
穿 透 率	560nm	10.7	22.0	27.2	21.6	28.3	42.2	40.9	50.4	56.3	55.0	46.7
	400nm	72.8	61.5	48.9	50.4	50.5	46.5	47.0	37.1	37.5	42.3	29.5
	460nm	77.1	69.0	52.5	54.8	55.7	49.2	50.3	38.7	39.3	44.8	30.5
蓋緊瓶蓋二天後的顏色												
穿 透 率	560nm	10.6	18.1	15.0	14.7	15.8	20.1	16.3	20.5	26.9	22.4	16.9
	400nm	71.8	64.4	56.6	55.0	68.7	55.8	59.0	52.1	45.2	52.2	37.4
	460nm	76.0	72.0	61.0	59.9	65.6	59.9	64.0	54.3	49.2	57.8	39.4
蓋緊瓶蓋三天後的顏色												
穿 透 率	560nm	10.5	16.7	10.8	12.4	13.0	14.7	12.2	13.7	15.8	12.6	6.84
	400nm	70.7	65.9	61.2	58.4	61.1	60.8	64.5	58.3	52.2	60.5	47.8
	460nm	75.9	73.7	65.5	63.4	68.8	65.0	69.3	60.5	57.1	67.4	49.4
蓋緊瓶蓋四天後的顏色												
穿 透 率	560nm	10.6	15.6	9.81	10.7	11.5	12.0	11.0	11.1	10.7	11	4.68
	400nm	71.9	67.3	63.8	61.9	64.8	65	66.6	60.3	58.3	63.8	53.3
	460nm	76.1	74.9	67.9	66.6	71.8	68.8	71.4	68.9	63.2	70.2	54.2

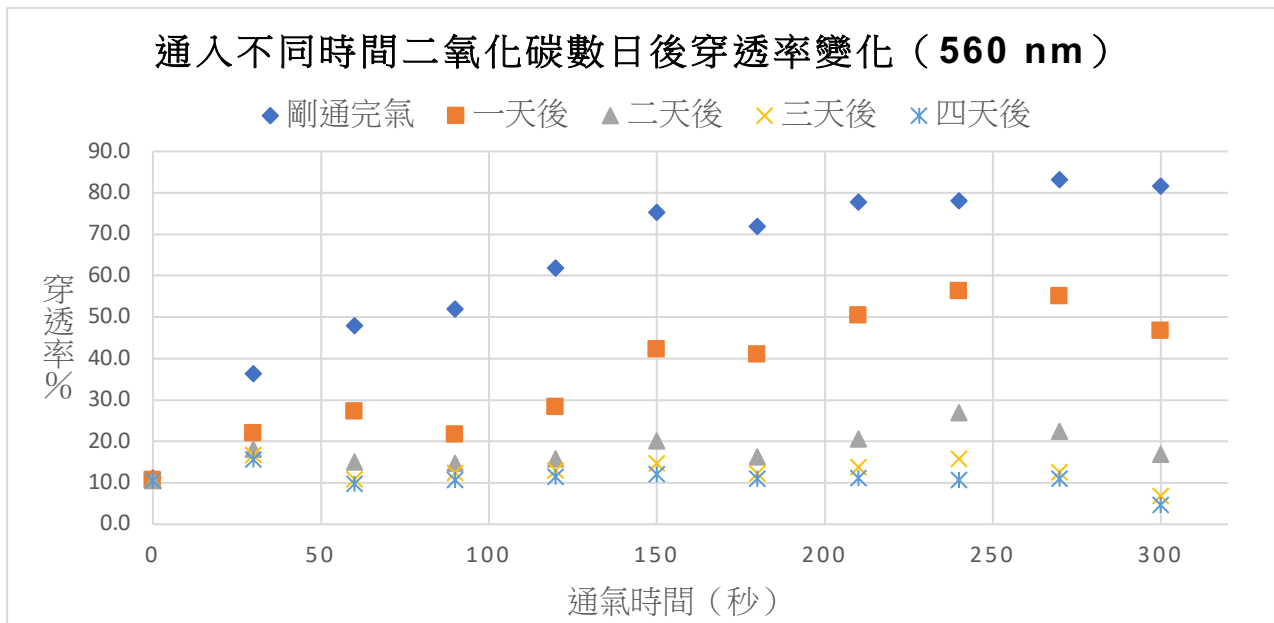
(二) 將分光光度計的穿透率對應 CO<sub>2</sub>的秒數作圖

1. 將一通氣完的樣品用 400、460、560nm 的波長下測量其穿透率，並將其做成圖 13。



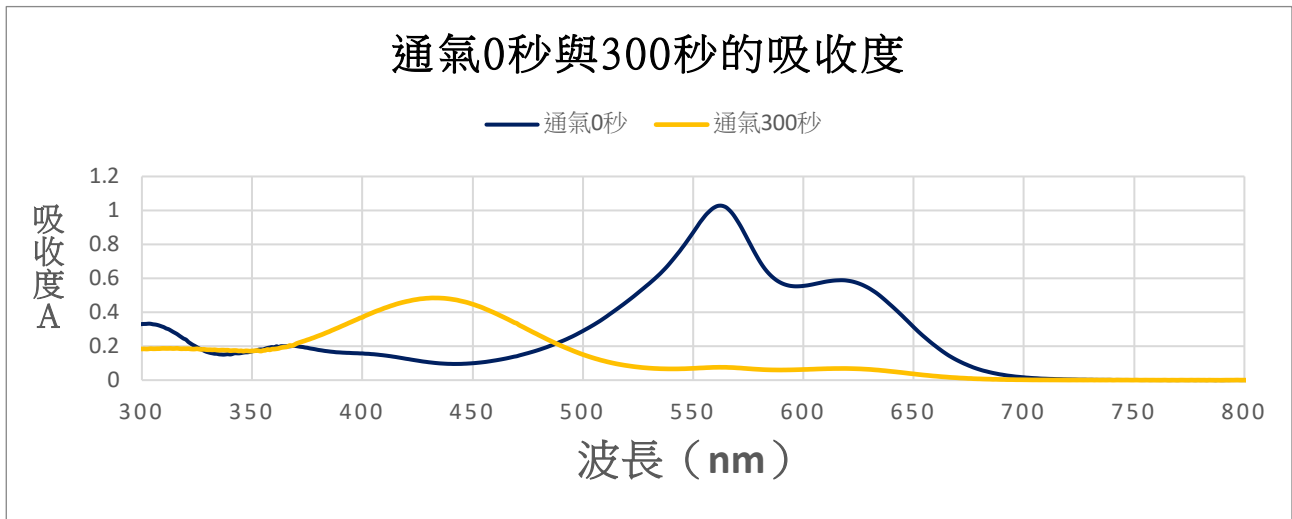
▲圖 13. 一代氣瓶裝置通入不同時間 CO<sub>2</sub> 通氣完立刻測量其穿透率

2. 作圖以方便觀察連續五天測量樣品的變化 (以波長為 560nm 的穿透率變化表示)



▲圖 14. 一代氣瓶裝置通入不同時間 CO<sub>2</sub> 放置 1~4 天後測量的穿透率 (波長 560nm)

(三) 將未通氣的指示劑和通入 300 秒的指示劑兩者利用分光光度計 (型號 SPECORD PLUS 250) 測量 190~1100nm 的光譜圖，發現最大吸收度在 560 nm，如圖 15。



▲圖 15.未通氣和通氣 300 秒的碳酸氫鹽指示劑測量其最大吸收度的光譜圖

#### 六、修改自製 CO<sub>2</sub> 氣瓶成為二代氣瓶（可控制單/雙邊輸出氣體）

（一）實驗結果：一開始改成雙邊通氣裝置時（因為換了通氣時裝待測樣品的容器），遇到嚴重漏氣問題，花了很多時間才發現是裝樣品的容器蓋子未能完全密合所以不斷漏氣，所幸使用 parafilm 繞緊即解決漏氣的問題。

（二）修改的原因：是為了能夠控制相同時間且同流速的 CO<sub>2</sub> 通過對照組（保麗龍球）和實驗組（待測試碳捕捉材料），通入相同時間後如果實驗組有吸附 CO<sub>2</sub> 的能力，那麼指示劑端收到的 CO<sub>2</sub> 就會比較少，以致顏色會偏向藍色或綠色，再拿去測量分光光度計的穿透率，藉由測得穿透率對照成 CO<sub>2</sub> 流出的秒數，假設保麗龍吸附能力是 0，就能計算出每公克的待測試碳捕捉材料能吸附多少毫升的 CO<sub>2</sub>，進而比較其吸附效能。

#### 七、測量實驗步驟（三）配製的每一瓶指示劑 pH 值

（一）為了確定每瓶指示劑的 pH 值是否接近，我們配製兩倍量的碳酸氫鹽指示劑（A1 四滴、A2 二滴、B 溶液 1.0mL、水 11.0mL）共 34 瓶，分別測量其 pH 值並記錄。

如下表：

編號	pH	編號	pH	編號	pH	編號	pH	編號	pH
1	8.62	8	8.64	15	8.73	22	8.72	<del>29</del>	<del>8.31</del>
2	8.63	9	8.65	16	8.75	23	8.75	<del>30</del>	<del>8.36</del>
3	8.64	10	8.65	17	8.74	24	8.74	<del>31</del>	<del>8.28</del>
4	8.63	11	8.66	18	8.76	25	8.76	32	8.76
5	8.65	12	8.65	19	8.74	26	8.78	<del>33</del>	<del>8.33</del>
6	8.75	13	8.73	20	8.74	<del>27</del>	<del>8.34</del>	<del>34</del>	<del>8.09</del>
7	8.66	14	8.74	21	8.73	28	8.53		
平均值：8.62									

(二) 將平均值  $8.62 \pm 0.2$  的指示劑保留做使用。(上表刪去編號、pH 數值為丟棄試劑)

(三) 以防不同氣溫、濕度影響指示劑的酸鹼值，接下來的步驟(八)到(十一)實驗前配製指示劑皆重複此步驟。


#### 八、二代氣瓶通入不同時間下的指示劑顏色及穿透率測量

三通連接閥轉成單邊供氣，容器裡裝滿保麗龍球(對照組)，分別通氣 0~300 秒(流速每 10 秒 10 顆氣泡)，指示劑的量：A1 四滴、A2 二滴、B 溶液 1.0mL、水 11.0mL，進行三次實驗，結果如下表。T%：穿透率(原始數據)，A：吸收度 ( $A = 2 - \log_{10} T\%$ )

##### (一) 第一次實驗結果

通氣時間(秒)	0	15	30	45	60	90	120	150	180	240	300	
通完氣 pH 值	8.59	7.80	7.32	7.14	7.13	7.00	6.92	6.73	6.61	6.50	6.35	
一通氣完照片												
通氣後指示劑顏色	藍紫	藍紫	灰藍	灰綠	深綠	綠	黃綠	黃綠	黃	黃	黃	
穿透率 T%	560	7.27	11.8	30.7	35.5	40.6	50.6	58.2	68.7	74.6	77.3	81.5
吸收度 A	nm	1.138	0.928	0.513	0.450	0.392	0.296	0.235	0.163	0.127	0.112	0.089
測光度計後 pH 值		8.50	8.13	7.68	7.44	7.30	7.25	6.90	6.83	6.80	6.75	6.53

##### (二) 第二次實驗結果

通氣時間(秒)	0	15	30	45	60	90	120	150	180	240	300	
通完氣 pH 值	9.06	8.24	7.48	7.12	6.90	6.59	6.45	6.41	6.34	6.26	6.13	
一通氣完照片												
通氣後指示劑顏色	藍紫	藍紫	灰藍	灰綠	黃綠 偏綠	黃綠 偏黃	黃	黃	黃	黃	黃	
穿透率 T%	560	5.98	12.8	37.2	44.1	59.4	70.4	77.4	81.53	83.4	84.0	85.0
吸收度 A	nm	1.223	0.893	0.430	0.356	0.226	0.152	0.111	0.089	0.079	0.076	0.071



(三) 第三次實驗結果

通氣時間 (秒)	0	15	30	45	60	90	120	150	180	240	300	
通完氣 pH 值	8.53	7.52	7.20	6.95	6.84	6.60	6.59	6.59	6.45	6.41	6.34	
一通氣完照片												
通氣後指示劑顏色	藍紫	藍紫	灰藍	灰綠	黃綠偏綠	黃綠偏黃	黃	黃	黃	黃	黃	
穿透率 T %	560	10.5	32.5	47.5	57.9	62.8	72.6	76.7	78.1	80.8	83.8	86.6
吸收度 A	nm	0.9830	0.5229	0.3449	0.2569	0.2190	0.1469	0.1255	0.1155	0.1013	0.0828	0.0658

九、測試矽膠乾燥劑是否能吸附 CO<sub>2</sub>：

利用二代氣瓶相同流速同時通入 CO<sub>2</sub> 到矽膠乾燥劑（實驗組）和保麗龍球（對照組）兩個容器並連接到碳酸氫鹽指示劑。


(一) 實驗結果：

通氣次數		第一次		第二次		
樣品	未通氣	矽乾	保麗龍	矽乾	保麗龍	
矽膠乾燥劑原 始質量=43.1g	通氣前質量(g)	-	62.7	-	62.9	
	通氣後質量(g)	-	63.0	-	63.1	
通氣前後質量變化	-	0.3	-	0.2	-	
通氣後指示劑顏色	藍紫	藍紫	黃綠偏綠	藍紫	黃綠偏黃	
通氣完照片						
分光光度計 560 nm ( T % )	7.83	14.30	59.80	26.90	81.50	


通氣次數		第三次		第四次		第五次	
樣品	未通氣	矽乾	保麗龍	矽乾	保麗龍	矽乾	保麗龍
通氣前質量(g)	-	63.1	-	63.19	-	63.25	-
通氣後質量(g)	-	63.2	-	63.25	-	63.30	-
通氣前後質量變化	-	0.1	-	0.06	-	0.05	-
通氣後指示劑顏色	藍紫	藍紫	黃	藍紫	黃綠	藍紫	黃
通氣完照片							
分光光度計 560 nm ( T % )	7.50	8.61	71.30	16.10	55.50	9.90	73.8

十、以澄清石灰水檢驗矽膠乾燥劑通入 CO<sub>2</sub>後是否有吸附

(一) 記錄從 25 度到 85 度(約 10 分鐘)的澄清石灰水的變化，如表和照片所示。

起始溫度	23°C	
27°C時狀況(約 3 分鐘)	開始有氣泡排出到石灰水	
40°C時狀況(約 5 分鐘)	石灰水開始混濁	
65°C時狀況(約 7 分鐘)	石灰水持續混濁	
85°C時狀況(約 10 分鐘)	石灰水轉透明	

(二) 取相同質量的未通氣乾燥劑同樣加熱 10 分鐘，我們觀察到仍持續有氣體冒出，但未使澄清石灰水混濁，如表和照片所示。

起始溫度	24°C	
40°C(約 3 分鐘後)	尚未冒泡且未混濁	
50°C(約 5 分鐘後)	尚未冒泡且未混濁	
78°C(約 8 分鐘後)	開始冒泡(但很少)	
85°C(約 10 分鐘)	冒泡結束且未混濁	

十一、不同碳捕捉材料重複吸附和加熱脫附 CO<sub>2</sub>的實驗

(一) 四次矽膠乾燥劑脫附 CO<sub>2</sub>的結果

1. 加熱脫附矽膠乾燥劑的溫度、顏色變化

脫附次數	第一次	第二次	第三次	第四次
加熱時間/ 溫度/ 顏色	0 '00"/30°C/紫色	0 '00"/30°C/紫色	0 '00"/32°C/紫色	0 '00"/30°C/紫色
	5 '00"/50°C/灰藍	4'20"/50°C/灰藍	5 '10"/55°C/灰藍	5 '00"/50°C/藍色
	8 '00"/70°C/綠黃	4 '55"/55°C/綠色	7 '30"/75°C/綠色	6 '00"/65°C/綠色
	10 '00"/90°C/黃色	8 '33"/90°C/綠黃	9 '03"/90°C/黃綠	9 '00"/90°C/黃綠

2. 前後質量、指示劑顏色、指示劑穿透率、pH 值、照片

脫附次數	第一次	第二次	第三次	第四次
通後(脫前)質量(g)	43.22	42.20	41.63	41.31
脫後質量(g)	42.09	41.55	41.22	41.03
指示劑顏色	黃	綠	綠	綠
560nm 穿透率 T%	71.6	64.8	53.8	57.4
pH 值	6.51	6.67	6.81	6.91

(二) 四次**破碎**活性碳脫附 CO<sub>2</sub>的結果

1. 加熱脫附破碎活性碳的溫度、顏色變化

脫附次數	第一次	第二次	第三次	第四次
加熱時間/	0'00"/32°C/紫色	0'00"/33°C/紫色	0'00"/30°C/紫色	0'00"/30°C/紫色
溫度/	2'30"/40°C/灰藍	3'30"/45°C/灰藍	5'05"/50°C/灰藍	3'50"/50°C/灰藍
顏色	5'00"/65°C/綠黃	7'00"/75°C/黃綠	7'00"/70°C/灰綠	6'50"/75°C/灰綠
	9'00"/90°C/黃色	8'45"/90°C/綠黃	10'00"/90°C/綠色	9'00"/90°C/綠色

2. 前後質量、指示劑顏色、指示劑穿透率、pH 值、照片

脫附次數	第一次	第二次	第三次	第四次
通後(脫前)質量(g)	28.81	27.81	27.71	27.73
脫後質量(g)	27.69	27.59	27.61	27.53
指示劑顏色	黃	灰綠	灰綠	灰綠
560nm 穿透率 T%	76	47.2	28.5	52.8
pH 值	6.37	6.88	7.16	6.94

(三) 四次**柱狀**活性碳脫附 CO<sub>2</sub>的結果

1. 加熱脫附柱狀活性碳的溫度、顏色變化

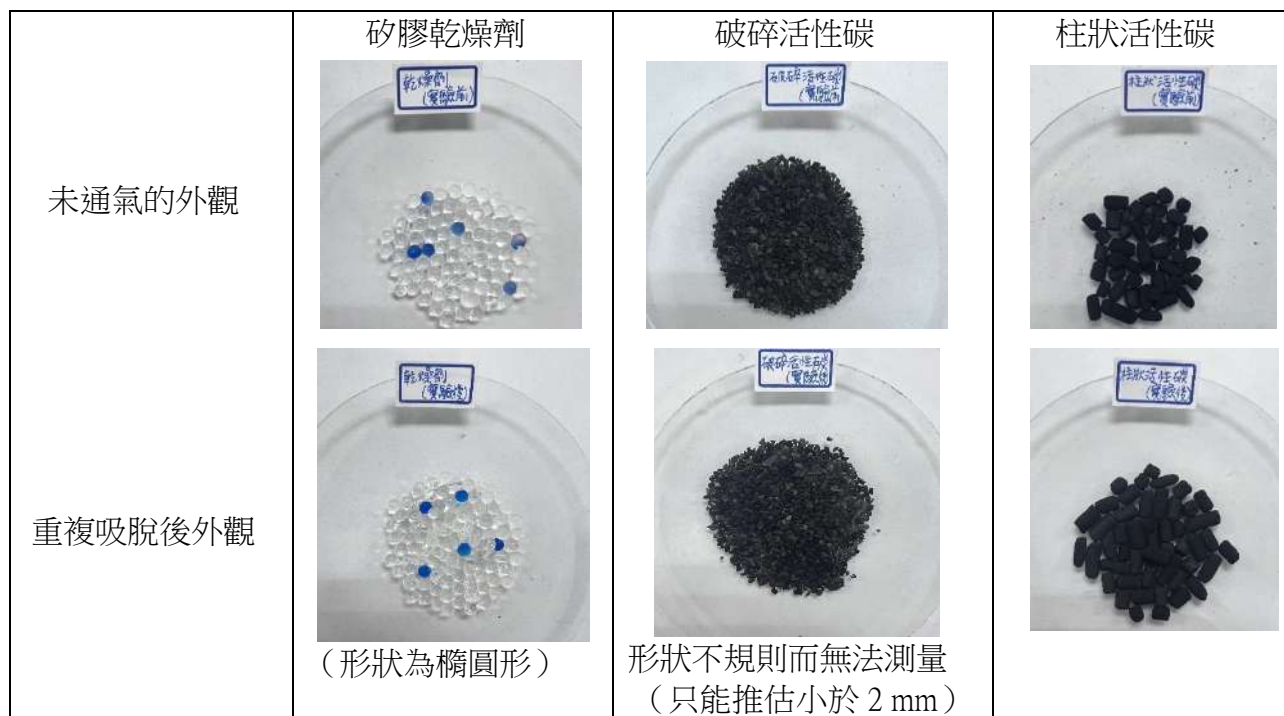
脫附次數	第一次	第二次	第三次	第四次
加熱時間	0'00"/30°C/紫色	0'00"/35°C/紫色	0'00"/33°C/紫色	0 分鐘/40°C/紫色
/溫度/	6'20"/70°C/綠色	3'00"/45°C/淺紫	3'10"/43°C/灰藍	3 分鐘/50°C/灰藍
顏色	8'50"/90°C/綠黃	4'20"/55°C/灰藍	6'40"/75°C/黃綠	6 分鐘/75°C/綠色
		9'00"/90°C/黃綠	8'50"/90°C/綠色	8 分鐘/90°C/綠黃

2. 前後質量、指示劑顏色、指示劑穿透率、pH 值、照片

脫附次數	第一次	第二次	第三次	第四次
通後(脫前)質量(g)	24.50	24.18	24.23	24.20
脫後質量(g)	24.09	24.10	24.07	23.96
指示劑顏色	綠	灰綠	灰綠偏綠	灰綠偏綠
560nm 穿透率 T%	55.1	37.6	48.8	52.1
pH 值	6.84	7.14	6.93	6.95

十二、測量矽膠乾燥劑、破碎活性炭、柱狀活性炭通氣前後的大小變化（詳細數據見附件）

吸附材料	矽膠乾燥劑長徑	柱狀活性炭長度	柱狀活性炭寬度
通氣前平均	3.686 mm	6.262 mm	3.790 mm
四次吸脫附後平均	3.612 mm	6.372 mm	3.834 mm



## 陸、討論

- 一、起初我們用碳酸氫鈉粉末加不同濃度（0.1~1.0M）的鹽酸來製造 CO<sub>2</sub>，發現速率不好控制，所產生的氣體通入碳酸氫鹽指示劑無法從藍紫色漸進變成其他顏色，於是才選用粉筆加鹽酸，可能粉筆非純碳酸鈣且不是粉狀，而降低了反應速率，使得產氣速率適中（通入液面下的氣流量約每秒一至兩顆氣泡），但如果想調整成持續穩定的氣流量，則會變得不方便操控，所以開始在網路上尋找能自製且穩定供氣的方式。
- 二、一代氣瓶裝置的原理是由檸檬酸加小蘇打（碳酸氫鈉）反應產生 CO<sub>2</sub>，分成兩個汽水瓶填裝是可以控制兩者反應的速率，又能儲存氣體，待氣壓降低時檸檬酸溶液會因壓力差而自動吸進小蘇打瓶進行反應，再接上止逆閥又能防止氣體逆流，計泡器的裝設是為了能確認關閉氣流調節閥時有無漏氣，氣壓計是簡單偵測氣瓶內壓力是否會過大，但無法精準量測氣壓值。

三、實驗步驟（三）的七次測試比例過程中，發現 A1（溴瑞香草藍）：A2（酚紅）：B 溶液（碳酸氫鈉 0.8g+氯化鉀 7.48g+蒸餾水 90g）：蒸餾水=兩滴：一滴：0.5mL：5.5mL 在通氣 240 秒下從藍紫色完全變成黃色是較適合作為我們實驗研究的比例，所以將此比例作為之後實驗的碳酸氫鹽指示劑的最佳比例。

四、一代氣瓶作為氣源以每 10 秒 10 顆氣泡的速率通入水中，可以得到輸出氣體時間與氣體體積的關係，從圖可以發現通氣時間和 CO<sub>2</sub> 體積有良好的線性關係（R<sup>2</sup>=0.9967），表示一代自製氣瓶供氣的穩定性佳，後續還可以利用此線性關係來得知相同氣流速率下，從通氣秒數來推得 CO<sub>2</sub> 體積，整理成表 1。

表 1. 不同時間下 CO<sub>2</sub> 氣瓶（流速為每 10 秒 10 顆氣泡）輸出的平均體積

通氣時間（秒）	0	15	30	45	60	90	120	150	180	240	300
CO <sub>2</sub> 體積（mL）	0	2.8	4.7	9.3	13.3	20.0	26.0	32.3	37.3	49.7	66.3

五、在一代氣瓶下從指示劑顏色變化所測得穿透率的數據來定量 CO<sub>2</sub> 的實驗中，我們發現：

（一）從數據及照片發現通 CO<sub>2</sub> 後的指示劑會隨著時間增加而 CO<sub>2</sub> 濃度下降，這表示 CO<sub>2</sub> 溶解度下降導致指示劑顏色慢慢變回未通氣時的顏色（藍紫色），從分光光度計波長 560nm 的穿透率也發現不論一開始通氣幾秒的樣品在四天後穿透率都會回到未通氣的狀態，表示之後每次指示劑通氣完都必須立刻做後續的數據測量，否則會有極嚴重的誤差。

（二）用全光譜的分光光度計測量的樣品是通氣 0 秒和 300 秒，最大的吸收度是 560nm，驗證我們前面選擇用 560nm（黃光）來測量樣品的穿透率是正確的選擇。

六、相比一代氣瓶，二代氣瓶改成微調氣流調節閥更為靈敏，再加上吸酸控制器，提升氣瓶使用的實用性及操控性。

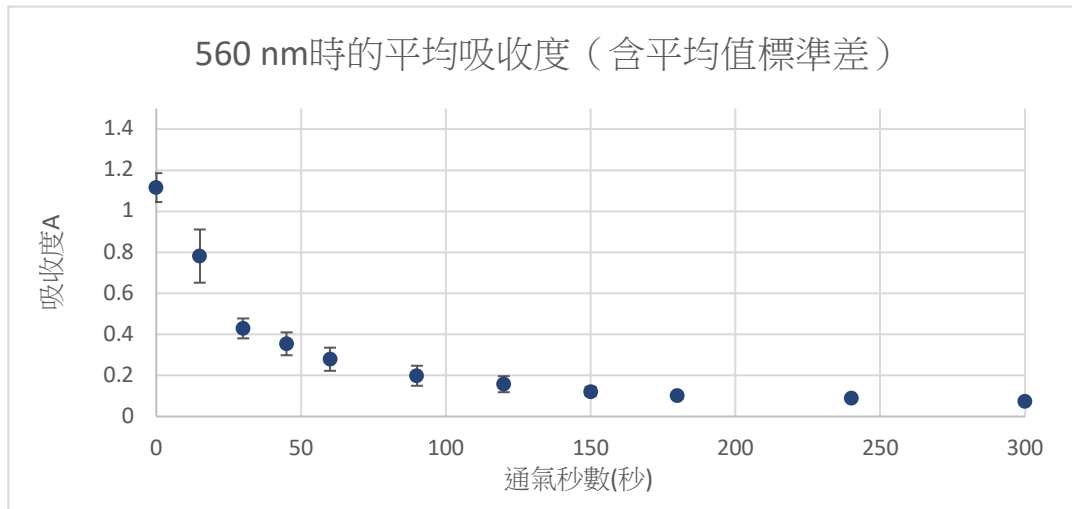
七、每一瓶碳酸氫鹽指示劑 pH 值是否接近？透過結果得知，碳酸氫鹽指示劑大部分的 pH 值相差雖不大，但 34 瓶中有 7 瓶超過 3% 的誤差（丟棄率達 20%），因為 pH 值和指示劑的穿透率有很大的關聯，所以之後的指示劑使用前都必須先用 pH 計檢查。

八、二代氣瓶下通氣不同時間的實驗討論：

（一）三次實驗取平均來比較不同通氣時間後指示劑測得的分光光度計 560 nm 時的吸收度關係圖（如圖 16），可以作為後續的碳捕捉材料通氣後的指示劑做對照。



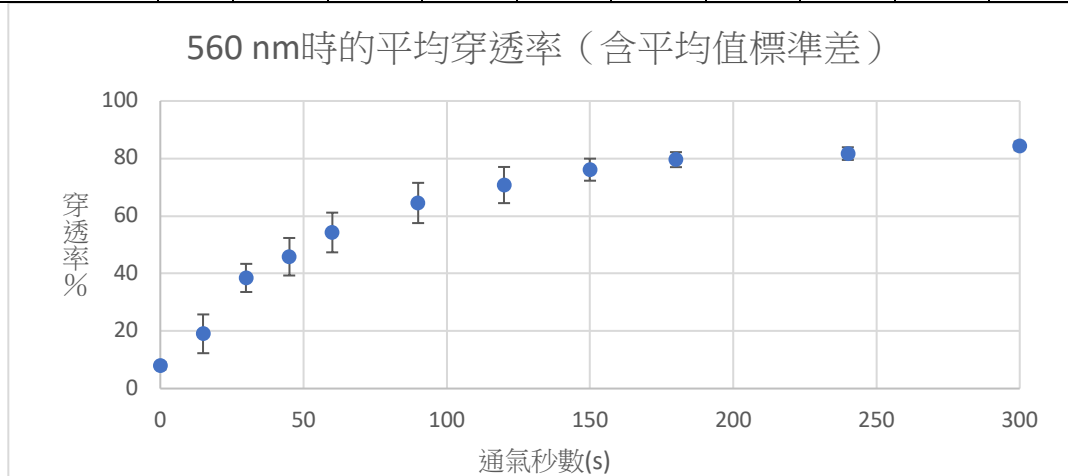
通氣秒數(s)		0	15	30	45	60	90	120	150	180	240	300
吸收度 A (560nm)	第一次	1.138	0.928	0.513	0.450	0.391	0.296	0.235	0.163	0.127	0.112	0.089
	第二次	1.223	0.893	0.429	0.356	0.226	0.152	0.111	0.089	0.079	0.076	0.071
	第三次	0.983	0.523	0.345	0.257	0.219	0.147	0.126	0.115	0.101	0.083	0.066
	平均	<b>1.115</b>	<b>0.781</b>	<b>0.429</b>	<b>0.354</b>	<b>0.279</b>	<b>0.198</b>	<b>0.157</b>	<b>0.122</b>	<b>0.102</b>	<b>0.090</b>	<b>0.075</b>
SD(標準差)		0.122	0.224	0.084	0.096	0.098	0.084	0.068	0.038	0.024	0.019	0.012
SE(平均值標準差)		0.070	0.130	0.048	0.056	0.056	0.049	0.039	0.022	0.014	0.011	0.007



▲圖 16. CO<sub>2</sub> 通入不同時間下指示劑的吸收度

(二) 三次實驗取平均來比較不同通氣時間後指示劑測得的分光光度計 560 nm 的穿透率關係圖 (如圖 17)，可以作為後續的碳捕捉材料通氣後的指示劑做對照。

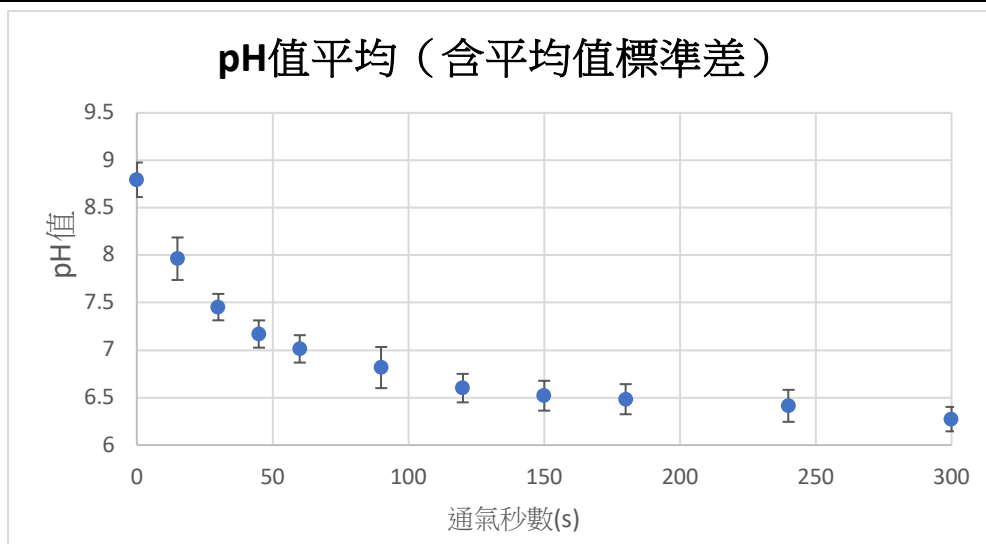
通氣秒數(s)		0	15	30	45	60	90	120	150	180	240	300
穿透率% (560nm)	第一次	7.27	11.8	30.7	35.5	40.6	50.6	58.2	68.7	74.6	77.3	81.5
	第二次	5.98	12.8	37.2	44.1	59.4	70.4	77.4	81.53	83.4	84.0	85.0
	第三次	10.5	32.5	47.5	57.9	62.8	72.6	76.7	78.1	80.8	83.8	86.6
	平均	<b>7.90</b>	<b>19.0</b>	<b>38.5</b>	<b>45.8</b>	<b>54.3</b>	<b>64.5</b>	<b>70.8</b>	<b>76.1</b>	<b>79.6</b>	<b>81.7</b>	<b>84.4</b>
SD(標準差)		2.33	11.67	8.47	11.30	11.96	12.12	10.89	6.64	4.52	3.81	2.61
SE(平均值標準差)		1.344	6.740	4.891	6.524	6.903	6.996	6.287	3.835	2.610	2.201	1.506



▲圖 17. CO<sub>2</sub> 通入不同時間下指示劑的穿透率

(三) 從第一次實驗的測量數據，發現立刻通完氣後的指示劑 pH 值皆略低於測量完光度計後的 pH 值，這代表 CO<sub>2</sub> 會慢慢的從指示劑逸散出來，而造成溶液的酸性降低；另一部分，將三次實驗取平均結果發現隨著通氣時間的拉長發現 pH 值會隨著時間降低（如圖 18），而我們實驗 0~150 秒中 pH 平均值的變化量（8.70-6.52=2.18）與文獻的圖 1（9.2-7.6=1.6）對照，表示我們實驗所配製的碳酸氫鹽指示劑配方也能測量到足夠的 CO<sub>2</sub> 變化範圍。

通氣秒數(s)	0	15	30	45	60	90	120	150	180	240	300	
通氣完 pH 值	第一次	8.50	8.13	7.68	7.44	7.30	7.25	6.90	6.83	6.80	6.75	6.53
	第二次	9.06	8.24	7.48	7.12	6.90	6.61	6.45	6.32	6.31	6.23	6.16
	第三次	8.53	7.52	7.20	6.95	6.84	6.59	6.45	6.41	6.34	6.26	6.13
	平均	<b>8.70</b>	<b>7.96</b>	<b>7.45</b>	<b>7.17</b>	<b>7.01</b>	<b>6.82</b>	<b>6.60</b>	<b>6.52</b>	<b>6.48</b>	<b>6.41</b>	<b>6.27</b>
SD(標準差)	0.3150	0.3879	0.2411	0.2488	0.2501	0.3754	0.2598	0.2722	0.2747	0.2919	0.2228	
SE(平均值標準差)	0.1819	0.2239	0.1392	0.1436	0.1444	0.2167	0.1500	0.1572	0.1586	0.1686	0.1286	



▲圖 18. CO<sub>2</sub> 通入不同時間下指示劑的 pH 值

(四) 因為從分光光度計的穿透率、pH 值都和通氣的秒數似乎有規律性，於是試將不同時間下的分光光度計穿透率、pH 值和『表 1. 不同時間下 CO<sub>2</sub> 氣瓶輸出的平均體積』做結合，整理成表 2，如此一來就能得知欲探究的吸附材料其吸附或脫附 CO<sub>2</sub> 的體積。

表 2. 通氣體積對應波長 560nm 分光光度計的穿透率

通氣時間(秒)	0	15	30	45	60	90	120	150	180	240	300
CO <sub>2</sub> 體積 (mL)	0	2.8	4.7	9.3	13.3	20.0	26.0	32.3	37.3	49.7	66.3
通氣後指示劑顏色	藍紫	藍紫	灰藍	灰綠	深綠	綠	黃綠	黃綠	黃	黃	黃
通氣後指示劑 pH 值	8.70	7.96	7.45	7.17	7.01	6.82	6.60	6.52	6.48	6.41	6.27
560 nm 穿透率(T%)	7.90	19.0	38.5	45.8	54.3	64.5	70.8	76.1	79.6	81.7	84.4

## 九、矽膠乾燥劑（簡稱矽乾）碳捕捉能力：

（一）將步驟九的第一~二次通氣結果整理成下表：

通氣次數		第一次		第二次	
		未通氣	矽乾	保麗龍	矽乾
樣品	未通氣	矽乾	保麗龍	矽乾	保麗龍
通氣前後質量變化(g)	-	0.3	-	0.2	-
通氣後指示劑顏色	藍紫	藍紫	黃綠偏綠	藍紫	黃綠偏黃
560nm 穿透率 (T%)	7.83	14.30	59.80	26.90	81.50
對照表 2 的穿透率 推估通氣的時間區間 (秒)	0	0~15	60~90	15~30	240~300

（二）將步驟九的第三~五次通氣結果整理成下表：

通氣次數		第三次		第四次		第五次	
		未通氣	矽乾	保麗龍	矽乾	保麗龍	矽乾
樣品	未通氣	矽乾	保麗龍	矽乾	保麗龍	矽乾	保麗龍
通氣前後質量變化(g)	-	0.1	-	0.06	-	0.05	-
通氣後指示劑顏色	藍紫	藍紫	黃	藍紫	黃綠	藍紫	黃
560nm 穿透率 (T%)	7.50	8.61	71.30	16.10	55.50	9.90	73.80
對照表 2 的穿透率 推估通氣的時間區間 (秒)	0	0~15	120~150	0~15	60~90	0~15	120~150

（三）前兩次通完氣，質量有明顯的上升，但後面三次的質量變化相對變少，可能是矽膠乾燥劑原本功能就是吸收水氣，而導致質量增加明顯。

（四）設計二代氣瓶是想要輸出等量的 CO<sub>2</sub> 同時通過具碳捕捉能力的樣品（實驗組）和假設沒有碳捕捉能力的保麗龍球（對照組），利用碳酸氫鹽指示劑的穿透率可以知道有多少 CO<sub>2</sub> 被樣品吸附，再將實驗組和對照組通過的 CO<sub>2</sub> 體積差除以吸附樣品的吸附前質量，就能得知具碳捕捉能力的樣品每公克可以吸附多少 CO<sub>2</sub>，將結果整理成表 3。

表 3. 每公克矽膠乾燥劑吸附 CO<sub>2</sub> 體積比例（矽膠乾燥劑吸附前質量為 43.1 公克）

次數	第一次		第二次		第三次		第四次		第五次	
	矽乾	保	矽乾	保	矽乾	保	矽乾	保	矽乾	保
通氣的材料	矽乾	保	矽乾	保	矽乾	保	矽乾	保	矽乾	保
對應的時間(秒)	0~15	60~90	15~30	240~300	0~15	120~150	0~15	60~90	0~15	120~150
上限體積(mL)	0.0	13.3	2.8	49.7	0.0	26.0	0.0	13.3	0.0	26.0
下限體積(mL)	2.8	20.0	4.7	66.3	2.8	32.3	2.8	20.0	2.8	32.3
平均體積(mL)	1.4	16.7	3.8	58.0	1.4	29.2	1.4	16.7	1.4	29.2
與同次保麗龍體積相差 (mL)	15.3	0.0	54.3	0.0	27.8	0.0	15.3	0.0	27.8	0.0
<b>吸附體積 (mL)</b> <b>吸附材料質量(g)</b> (mL/g)	0.354	--	1.259	--	0.644	--	0.354	--	0.644	--

(五) 從表 3 發現五次通氣中第二次是吸附體積最多的，猜測原因是水氣吸附來到最大量，從文獻六中知道水氣能幫助吸附 CO<sub>2</sub>，但實驗過程中我們有觀察到第五次通過矽膠乾燥劑的風管在指示劑中幾乎沒有冒出氣泡，這代表兩個可能，一為吸附能力持續存在且增強而導致沒有不溶於水的氣體能抵達指示劑，二是有可能乾燥劑的孔洞已填滿水和 CO<sub>2</sub>，再加上一開始矽膠乾燥劑是填滿整個容器，阻力過大造成 CO<sub>2</sub> 無法通過。

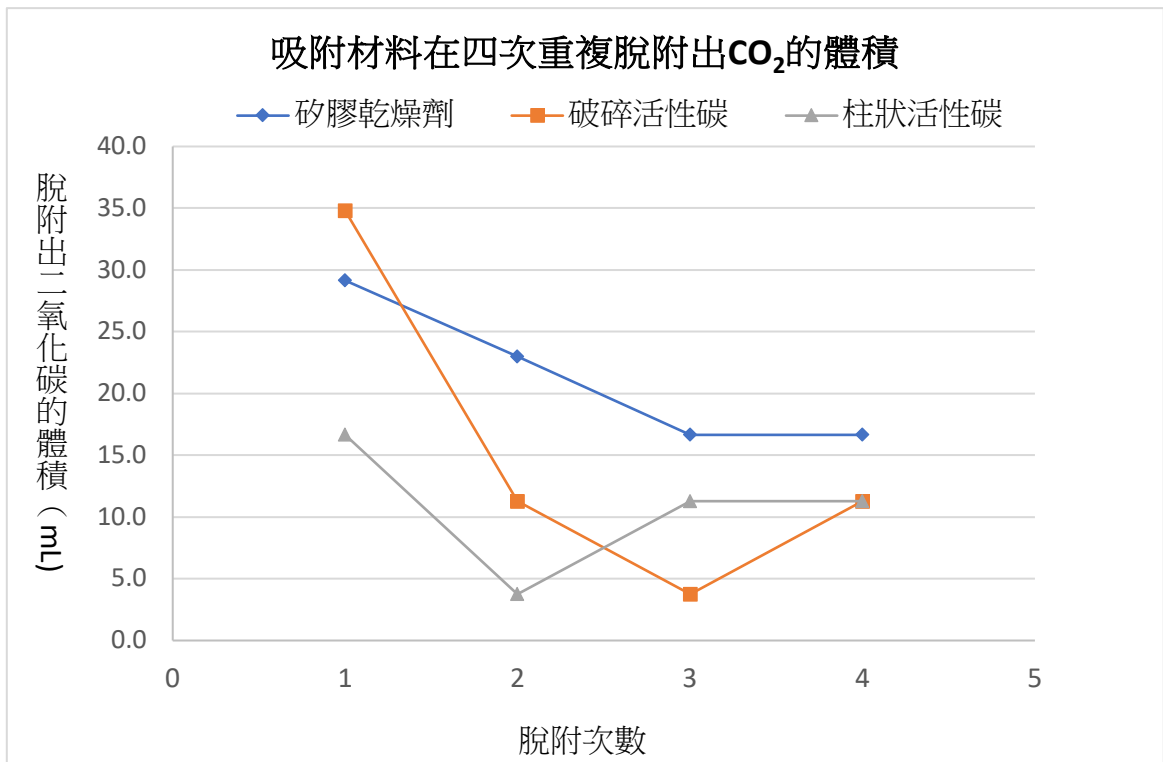
十、以澄清石灰水檢驗矽膠乾燥劑通入 CO<sub>2</sub> 後是否真的吸附：通氣三次後的矽膠乾燥劑加熱約 10 分鐘後（25~85℃）能使澄清石灰水變混濁；再取相同質量未通氣過的矽膠乾燥劑以相同條件加熱，發現雖然過程中有氣體冒出但未使澄清石灰水混濁，這表示我們的系統能讓矽膠乾燥劑成功捕捉 CO<sub>2</sub>，也間接驗證我們的實驗設計可以有效作為碳捕捉效能探究的裝置，但若要比較出不同材料的吸附效能，需要將其結果標準量化，於是利用碳酸氫鹽指示劑進行以下實驗。

十一、不同碳捕捉材料重複吸附脫附 CO<sub>2</sub> 的實驗：

由實驗九和十可知此系統能讓矽膠乾燥劑確實捕捉到 CO<sub>2</sub>，接下來我們僅用單邊供氣以相同流速的 CO<sub>2</sub> 分別通入矽膠乾燥劑、破碎活性炭、柱狀活性炭三種樣品 300 秒後再進行加熱脫附 CO<sub>2</sub>，使氣體導入至碳酸氫鹽指示劑，再藉由穿透率數值回推至表 2 來得知 CO<sub>2</sub> 被脫附出的體積。下表為三種材料在四次通氣 300 秒後加熱至 90℃ 的整理結果：

吸附材料	矽膠乾燥劑				破碎活性炭				柱狀活性炭			
	一	二	三	四	一	二	三	四	一	二	三	四
脫附次數												
脫附前的質量(g)	43.22	42.2	41.63	41.31	28.81	27.81	27.71	27.73	24.5	24.18	24.23	24.2
指示劑 pH	6.51	6.67	6.81	6.91	6.37	6.88	7.16	6.94	6.84	7.14	6.93	6.95
指示劑穿透率 ( T % )	71.6	64.8	53.8	57.4	76.0	47.2	28.5	52.8	55.1	37.6	48.8	52.1
對應秒數(秒)	120~150	90~120	60~90	60~90	150~180	45~60	15~30	45~60	60~90	15~30	45~60	45~60
上限體積	26.0	20.0	13.3	13.3	32.3	9.3	2.8	9.3	13.3	2.8	9.3	9.3
下限體積	32.3	26.0	20.0	20.0	37.3	13.3	4.7	13.3	20.0	4.7	13.3	13.3
脫附出 CO <sub>2</sub> 體積(mL)	29.2	23.0	16.7	16.7	34.8	11.3	3.8	11.3	16.7	3.8	11.3	11.3
四次平均(mL)	21.4				15.3				10.8			
脫附體積 ( mL ) 吸附材料質量(g)	0.67	0.55	0.40	0.40	1.21	0.41	0.14	0.41	0.68	0.16	0.47	0.47
四次平均(mL/g)	0.51				0.54				0.44			

- (二) 從上表中脫附後指示劑的 pH 值及穿透率來看，每一個樣品都與未通氣的指示劑有相當大的差異，表示確實有加熱且脫附出 CO<sub>2</sub> 與指示劑產生作用，也間接表示三種材料都有吸附到不同程度的 CO<sub>2</sub>。
- (三) 以相同尺寸的容器皆填充滿材料來看，即相同體積下四次平均脫附出 CO<sub>2</sub> 體積(mL) 比較其吸附效能為：**矽膠乾燥劑(21.4) > 破碎活性碳(15.3) > 柱狀活性碳(10.8)**，以三個材料第一次脫附出 CO<sub>2</sub> 的體積(mL)來看其吸附效能為：**破碎活性碳(34.8)>矽膠乾燥劑(29.2)>柱狀活性碳(16.7)**，整理成圖 19 所示。



▲圖 19.三種吸附材料四次重複脫附出 CO<sub>2</sub> 的體積

- (四) 比較三個材料四次平均的  $\frac{\text{脫附體積(mL)}}{\text{吸附材料質量(g)}}$  值，其順序是：**破碎活性碳(0.54) > 矽膠乾燥劑(0.51) > 柱狀活性碳(0.44)**。
- (五) 經由四次重複吸脫附來看出這三種材料皆有可重複使用的可能，但隨著每次的吸脫附後，脫附效能會逐次降低。

## 十二、 測量矽膠乾燥劑、破碎活性碳、柱狀活性碳通氣前後的大小變化

- (一) 矽膠乾燥劑通氣後直徑變小，根據文獻二可知矽膠乾燥劑主要成分是多孔洞矽膠（富含結晶水的矽氧聚合物），本身加熱脫水就會縮得比原本還小，孔洞也會因此縮小，文獻九中也提到其加熱後可能會造成脫附不完全，所以吸附效能逐次下降。



(二) 由文獻十，我們推測柱狀活性碳加熱脫附後直徑變大，可能是因為活性碳是結構較堅硬的固體無彈性，CO<sub>2</sub>進到孔洞後把孔洞撐大而無法恢復，所以吸附效能逐次下降可能為此原因。

## 柒、結論

- 一、我們成功設計自製 CO<sub>2</sub> 氣瓶能輕便且穩定的供氣，替代笨重又昂貴的 CO<sub>2</sub> 鋼瓶，且能控制單或雙邊輸出氣體，也能控制氣流量，或許能將此方法應用到其他化學方式的氣體製備，例如：氧氣的製備是用雙氧水加到二氧化錳、鐵離子或金針菇；氫氣製備用稀酸加活性大的金屬。
- 二、成功利用酚紅代替甲酚紅以及溴瑞香草藍代替百里酚藍，測試出適合比例的碳酸氫鹽指示劑，A1（溴瑞香草藍）：A2（酚紅）：B（碳酸氫鈉 0.8g+氯化鉀 7.48g+蒸餾水 90g）：蒸餾水=兩滴：一滴：0.5 mL：5.5 mL，顏色變化從藍紫隨著 CO<sub>2</sub> 的增加慢慢變成綠色最後到黃色，這表示我們的碳酸氫鹽指示劑能有效測量到 CO<sub>2</sub> 的變化。
- 三、一代氣瓶下，通 CO<sub>2</sub> 到碳酸氫鹽指示劑的樣品，會隨著時間改變而 CO<sub>2</sub> 濃度下降，且在四天後穿透率回到未通氣的狀態，表示每次通氣完都必須立刻做後續數據測量，否則會帶來嚴重誤差。
- 四、二代氣瓶下，不同的通氣時間與通入碳酸氫鹽指示劑其分光光度計 560 nm 的穿透率之間，對照排水集氣法測量不同時間下的 CO<sub>2</sub> 體積，進而整理成的表 2 可以大約用來估算吸附材料所吸附或脫附 CO<sub>2</sub> 的體積。
- 五、利用自製氣瓶同時通氣到實驗組和對照組，以矽膠乾燥劑作為探究材料，觀察指示劑變色和測量穿透率，發現矽膠乾燥劑有吸附 CO<sub>2</sub> 的能力，並進行加熱導出到澄清石灰水和碳酸氫鹽指示劑驗證成功，還可以重複吸附和脫附。
- 六、將三種吸附材料加熱脫附後發現質量皆變輕，且碳酸氫鹽指示劑皆有明顯變色，代表 CO<sub>2</sub> 確實有從吸附材料裡脫附出來並與指示劑發生作用。

(一) 相同體積下四次平均脫附出 CO<sub>2</sub> 體積(mL)其效能為：

矽膠乾燥劑(21.4 mL) > 破碎活性碳(15.3 mL) > 柱狀活性碳(10.8 mL)。

- (二) 相同體積下第一次脫附出 CO<sub>2</sub>的體積大小來比較效能：  
破碎活性碳(34.8 mL)>矽膠乾燥劑(29.2 mL)>柱狀活性碳(16.7 mL)。
- (三) 每公克吸附材料脫附出 CO<sub>2</sub>的效能：  
破碎活性碳(0.54 mL/g) > 矽膠乾燥劑(0.51 mL/g) > 柱狀活性碳(0.44 mL/g)。

## 捌、參考資料及其他

- 一、 王知桓 (2011)。太陽能二氧化碳捕捉器。中華民國第 51 屆中小學科學展覽會。
- 二、 陳登豪 (2021)。以永續性之分子孔洞材料進行高效率變壓吸附捕捉 CO<sub>2</sub>。未來科技館。
- 三、 碳酸氫鹽指示劑 (2023 年 10 月 26 日)。載於維基百科。  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Bicarbonate\\_indicator/碳酸氫鹽指示劑](https://en.wikipedia.org/wiki/Bicarbonate_indicator/碳酸氫鹽指示劑)
- 四、 Ms Kim ISAAC (2020 年 2 月 26 日)。Gas Exchange and Hydrogen Carbonate Indicator [影片]。Youtube。[https://youtu.be/52QBgMRdapw?si=wxCXiYgX\\_DsdiIxx](https://youtu.be/52QBgMRdapw?si=wxCXiYgX_DsdiIxx)
- 五、 AC 草影水族 (2021 年 1 月 20 日)。誰說種水草要花很多錢？只要 60 元，做出 CO<sub>2</sub>鋼瓶！[影片]。Youtube。<https://www.youtube.com/watch?v=kI7LPQjrvJs>
- 六、 簡士凱 (2014)。水分子於矽膠孔洞擴散特性分子動力學研究。【臺灣能源期刊】，1(4)，427-436
- 七、 李明芳 (2021)。國中自然與生活科技課本第四冊。翰林。
- 八、 引自環境資訊中心【氣候變遷 Q&A】(13) 什麼是碳捕捉與封存技術？碳捕集技術的主要形式？，英國衛報報導(陳巾眉編譯，蔡麗伶審校)，2011  
<https://e-info.org.tw/node/69594>
- 九、 李秀霞 (2014)。試量級奈米中孔徑 CO<sub>2</sub> 吸附材之穩定性及再生性評估。【工業污染防治】，130, 1-14.
- 十、 詹玉燕、張孝全(2012 年 9 月 28 日)。活性碳纖維製備與應用發展。世界材料網。  
<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=10624>

附件、實驗結果（十二）測量矽膠乾燥劑、破碎活性炭、柱狀活性炭通氣前後的大小變化

矽膠乾燥劑通氣前										矽膠重複吸脫四次後									
	長度		長度		長度		長度		長度		長度		長度		長度		長度		長度
1	3.6	11	3.7	21	3.8	31	3.4	41	3.3	1	3.4	11	3.6	21	3.5	31	3.6	41	3.3
2	3.9	12	4.0	22	4.6	32	3.7	42	4.0	2	3.4	12	3.5	22	3.5	32	3.4	42	3.7
3	3.6	13	3.7	23	3.3	33	3.3	43	3.5	3	3.5	13	3.6	23	3.6	33	4.1	43	3.3
4	3.5	14	3.6	24	3.4	34	3.8	44	4.2	4	3.5	14	3.3	24	3.3	34	3.7	44	3.7
5	3.7	15	4.0	25	3.6	35	3.8	45	3.8	5	3.9	15	3.6	25	4.7	35	4.1	45	3.7
6	3.8	16	3.8	26	3.6	36	4.2	46	3.6	6	3.7	16	3.5	26	3.7	36	3.3	46	4.0
7	3.7	17	3.6	27	4.3	37	3.7	47	3.8	7	3.5	17	3.3	27	3.0	37	3.8	47	3.6
8	3.4	18	3.4	28	3.8	38	3.3	48	3.8	8	3.3	18	4.1	28	3.7	38	4.2	48	3.6
9	3.4	19	3.4	29	3.5	39	3.5	49	3.7	9	3.1	19	3.6	29	3.8	39	3.4	49	3.2
10	3.4	20	3.7	30	3.7	40	3.9	50	3.5	10	4.3	20	3.6	30	3.6	40	3.7	50	3.5
平均：3.686（單位：mm）										平均：3.612（單位：mm）									

柱狀活性炭通氣前長度										柱狀活性炭重複吸脫四次後長度									
	長度		長度		長度		長度		長度		長度		長度		長度		長度		長度
1	4.7	11	7.6	21	8.6	31	7.0	41	5.4	1	9.7	11	7.7	21	7.6	31	5.2	41	4.7
2	7.3	12	9.0	22	6.2	32	8.6	42	5.0	2	6.2	12	8.6	22	6.5	32	4.6	42	5.8
3	5.5	13	7.2	23	5.7	33	4.7	43	4.3	3	5.7	13	6.4	23	7.0	33	6.1	43	4.9
4	6.6	14	9.5	24	6.5	34	4.6	44	4.1	4	3.9	14	8.3	24	8.8	34	6.3	44	7.4
5	7.9	15	6.3	25	5.8	35	5.2	45	4.5	5	4.2	15	8.0	25	4.0	35	8.1	45	6.4
6	8.1	16	4.7	26	10.0	36	4.8	46	5.1	6	4.1	16	6.6	26	8.2	36	5.3	46	4.8
7	8.9	17	7.8	27	4.1	37	6.1	47	4.1	7	5.4	17	6.4	27	6.1	37	4.7	47	7.0
8	8.9	18	6.7	28	7.8	38	5.7	48	3.9	8	5.3	18	7.9	28	9.9	38	5.7	48	6.3
9	5.9	19	6.9	29	6.5	39	4.4	49	4.2	9	4.5	19	6.6	29	9.7	39	6.1	49	7.1
10	8.0	20	6.5	30	7.8	40	4.9	50	3.5	10	4.9	20	8.4	30	4.2	40	5.1	50	6.2
平均：6.262（單位：mm）										平均：6.372（單位：mm）									

柱狀活性炭通氣前寬度										柱狀活性炭重複吸脫四次後寬度									
	寬度		寬度		寬度		寬度		寬度		寬度		寬度		寬度		寬度		寬度
1	4.3	11	3.0	21	3.6	31	3.6	41	3.9	1	4.0	11	3.7	21	3.7	31	3.4	41	3.4
2	4.5	12	3.8	22	4.1	32	3.5	42	3.6	2	3.6	12	4.2	22	6.0	32	3.9	42	3.9
3	3.1	13	3.9	23	4.3	33	3.1	43	3.8	3	3.7	13	4.1	23	3.9	33	3.8	43	3.9
4	3.3	14	3.9	24	3.6	34	4.1	44	4.0	4	3.9	14	4.5	24	3.9	34	3.2	44	4.2
5	3.6	15	4.0	25	3.3	35	3.7	45	3.9	5	3.4	15	3.9	25	3.8	35	3.2	45	3.7
6	3.8	16	3.7	26	4.1	36	4.1	46	3.4	6	3.9	16	4.1	26	3.5	36	4.0	46	4.2
7	4.1	17	3.7	27	4.0	37	3.6	47	3.9	7	4.0	17	3.9	27	3.1	37	3.1	47	3.8
8	4.0	18	3.7	28	3.4	38	4.1	48	3.9	8	4.2	18	3.0	28	4.2	38	4.0	48	3.9
9	4.0	19	4.1	29	4.1	39	3.3	49	3.7	9	4.4	19	3.5	29	3.6	39	4.0	49	3.7
10	3.9	20	3.8	30	4.3	40	3.8	50	3.5	10	4.0	20	3.6	30	3.8	40	4.0	50	3.3
平均：3.79（單位：mm）										平均：3.834（單位：mm）									

本作品說明書除了圖 1 和圖 5 分別出自文獻四、六，其餘照片和圖片皆為自己攝影或繪製

## 【評語】 030213

為了有穩定的 CO<sub>2</sub> 供氣來源以研究其捕捉效率，自製了 CO<sub>2</sub> 氣瓶，經過改良後以排水集氣法得到時間和體積變化有很好的線性關係，並以碳酸氫鹽指示劑的顏色變化來量化 CO<sub>2</sub> 多寡，利用此穿透率區間回推每公克矽膠乾燥劑能吸附多少毫升的 CO<sub>2</sub>。實驗發想簡單具創意且是目前熱門研究題材。

1. P7 提到薄膜分離技術，但實際上並無利用到，故建議增加”本實驗並未採用…”等文字。
2. 以碳酸氫鹽指示劑的顏色變化來量化 CO<sub>2</sub> 多寡的精準度為何？是否需要一檢量線或關係式，文中說明不足。或與其他方法如稱種法等比較。

## 作品簡報





# 不要「碳」氣！

自製氣瓶探究碳捕捉材料的吸附效能





# 壹、研究動機

工業革命後，人類排放到大氣中的CO<sub>2</sub>一直在增加。若溫室效應等暖化現象不及時控制，將會形成全球氣候的重大危機。然而，我們認為僅減少排放CO<sub>2</sub>是不夠的，應該更有效率捕捉空氣中的CO<sub>2</sub>。

# 貳、研究目的

- (一)找到穩定提供且方便攜帶的CO<sub>2</sub>來源
- (二)找到適當的化學指示劑種類和比例來量化CO<sub>2</sub>體積
- (三)找到適合的方法驗證材料是否吸附CO<sub>2</sub>
- (四)測試生活中易取得的材料來探究有無CO<sub>2</sub>吸附能力
- (五)探究吸附CO<sub>2</sub>的材料能否重複使用

# 參、研究原理

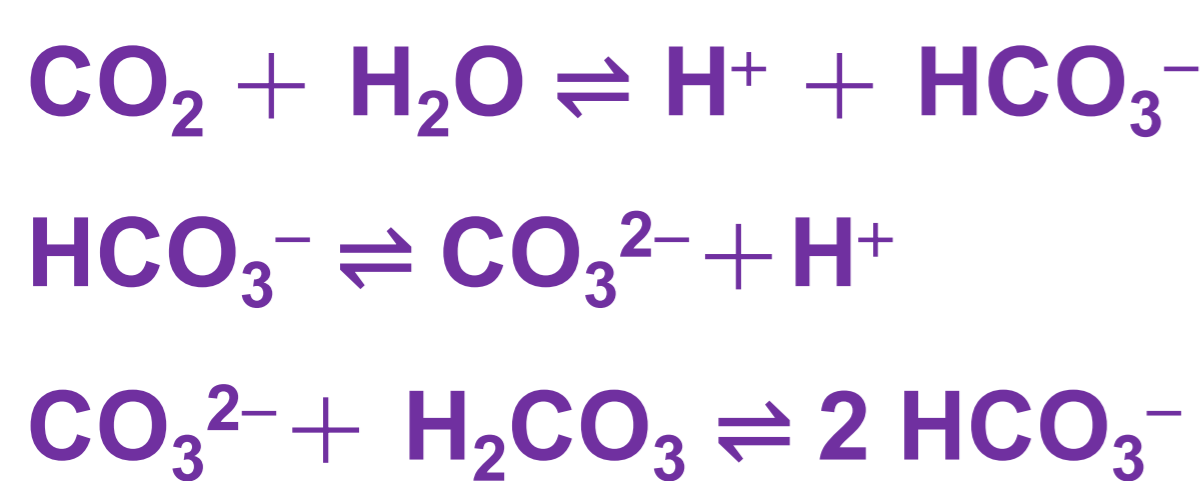
## 一、碳酸氫鹽指示劑

- (一)A溶液：0.1%溴瑞香草藍(稱A1)和0.1%酚紅(稱A2)
- (二)B溶液：0.8g碳酸氫鈉及7.48g氯化鉀溶於90mL純水
- (三)將A1、A2和B溶液來作為碳酸氫鹽指示劑的藥品，指示劑的變色範圍如下表：

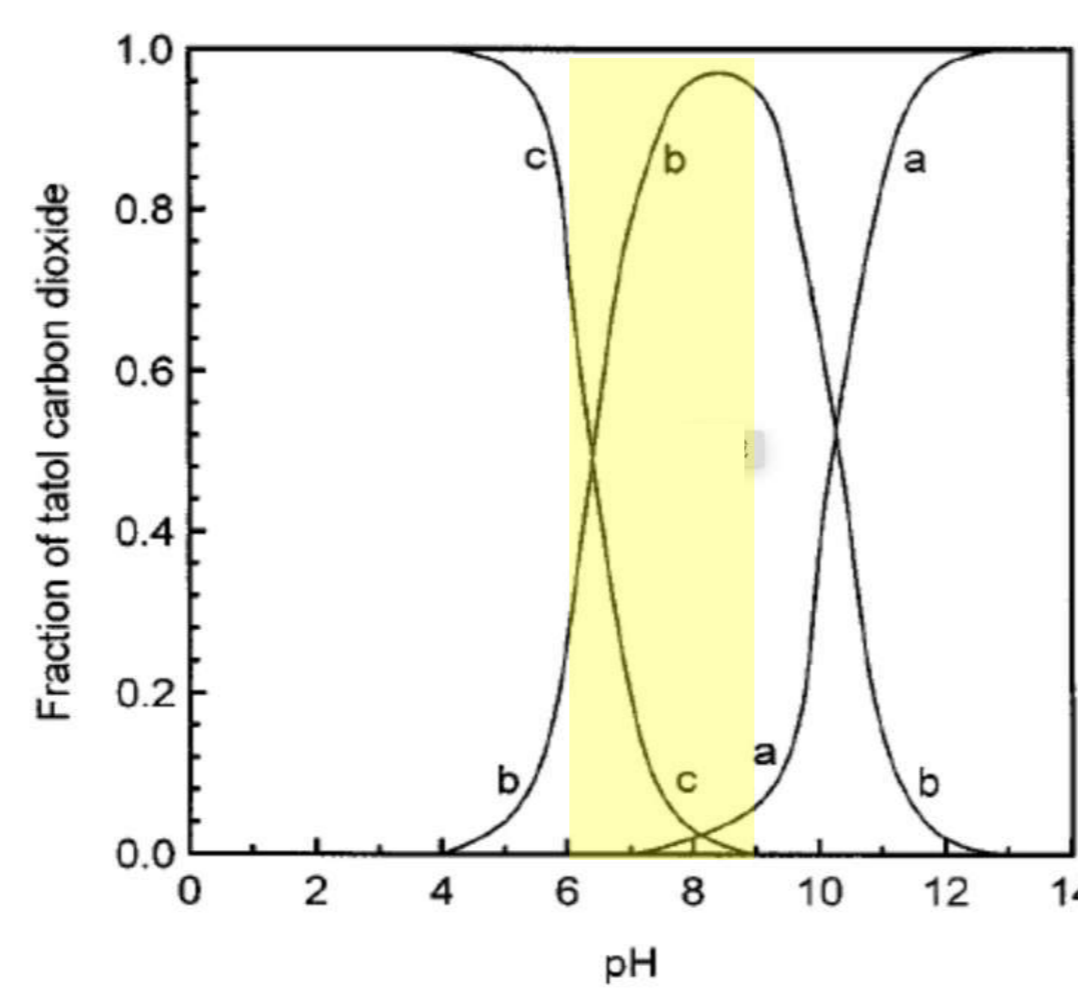
指示劑	溴瑞香草藍	酚紅
變色範圍	below pH 6.0    above pH 7.6 6.0 ⇌ 7.6	below pH 6.8    above pH 8.2 6.8 ⇌ 8.2

## (四)碳酸氫鹽指示劑的變色機制

NaHCO<sub>3</sub>加上KCl為弱鹼性，使得溴瑞香草藍呈藍色(pH>7.6)，酚紅呈紅色(pH>8.2)。當通入CO<sub>2(g)</sub>後，與水作用先變成碳酸再與碳酸氫鈉酸鹼中和，降低pH。在系統中H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>與HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>與CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>與H<sup>+</sup>，其平衡式如下：

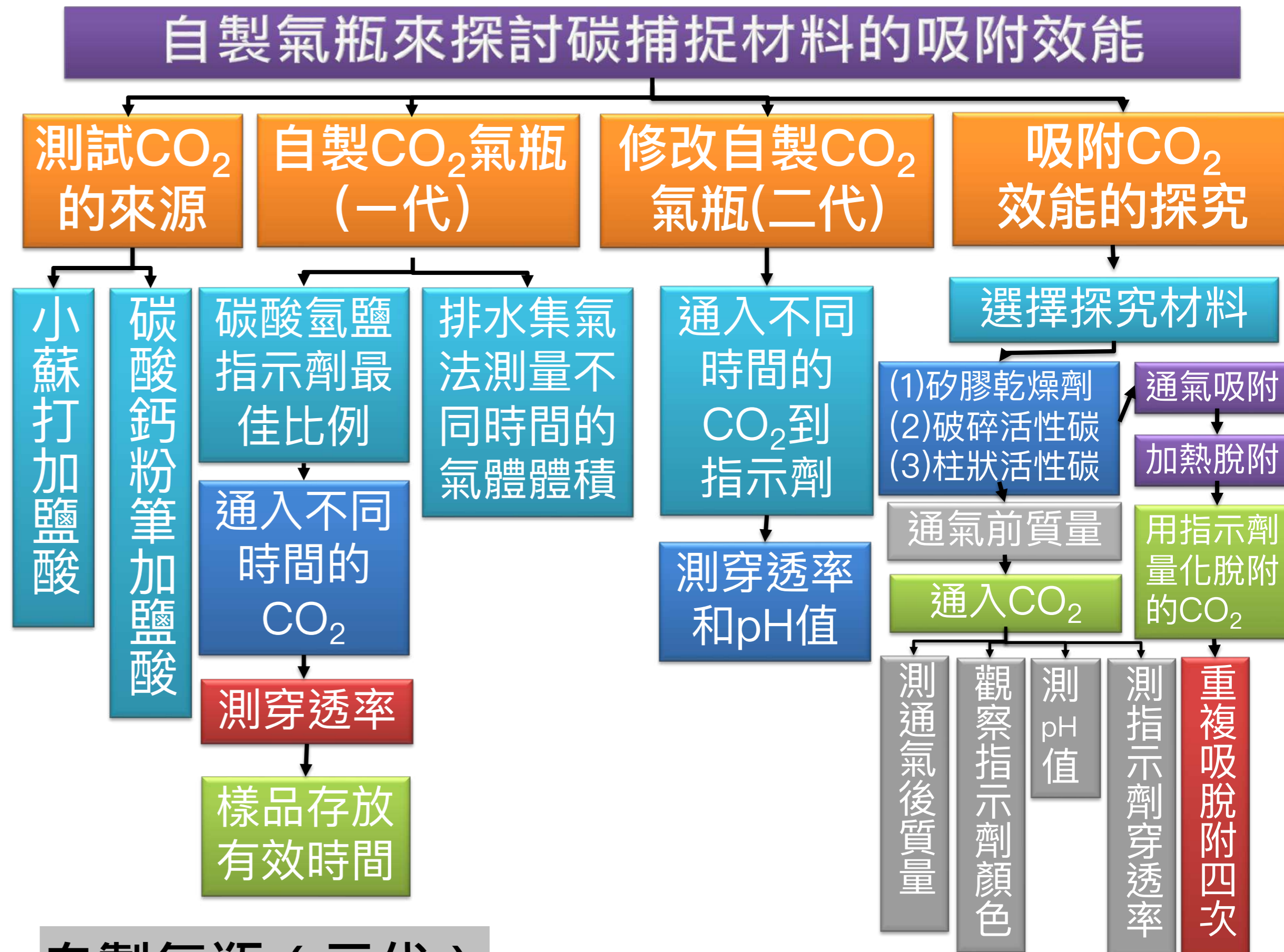


- 由以上可知，溶液中的H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>與HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>與CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>會形成平衡，其成分比例與溶液中之氫離子濃度息息相關。
- 由文獻可知，不同pH值下，CO<sub>2</sub>溶於水中形成的各成分所佔比例。



資料來源：張名惠(2016)。二氧化碳溶解封存技術發展。【工業污染防治】，138, 87.

# 肆、研究架構及設備

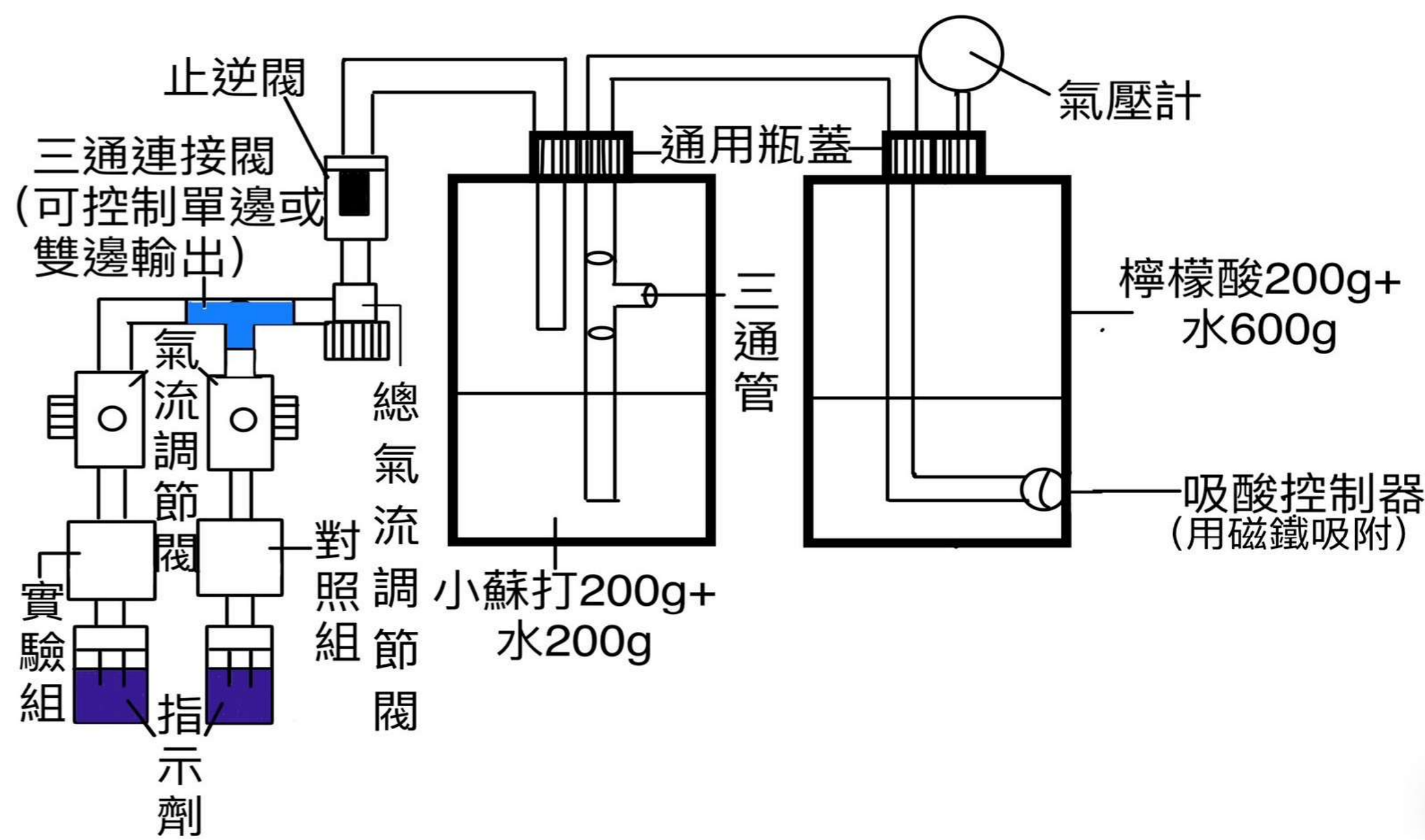


## 自製氣瓶(二代)

(一)原理：

擠壓檸檬酸瓶使其流入小蘇打水，並反應產生CO<sub>2</sub>  
 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7(\text{aq}) + 3\text{NaHCO}_3(\text{aq}) \rightarrow \text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7(\text{aq}) + 3\text{CO}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l})$   
 三通管能避免液體倒抽，待兩瓶都充滿CO<sub>2</sub>時，將氣流調閥打開即可作為穩定氣源。而當瓶內的氣體減少時利用兩瓶的壓力差，小蘇打水瓶就會將檸檬酸液體吸入並持續製造CO<sub>2</sub>。

(二)加上三通連接閥、氣流微調閥可以控制氣體流速和方向，取代鋼瓶做為輕便且便宜又穩定的氣源。

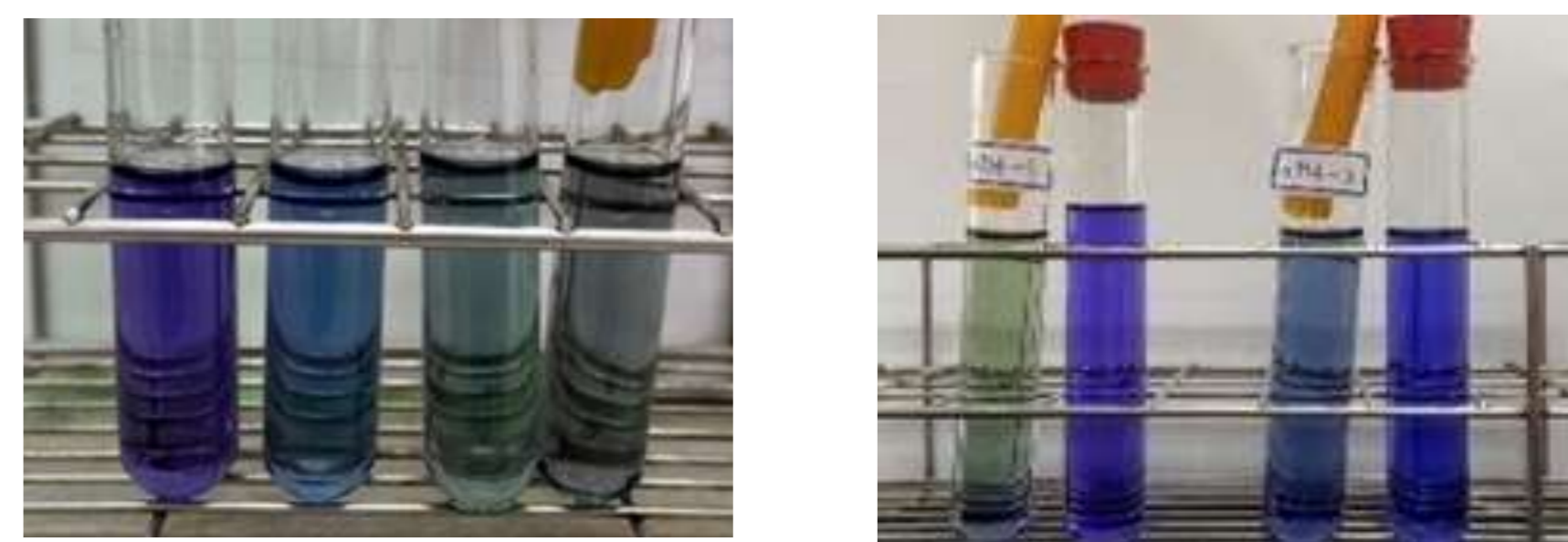


# 伍、實驗過程、結果與討論

## 實驗一：碳酸鈣粉筆加上鹽酸製造CO<sub>2</sub>

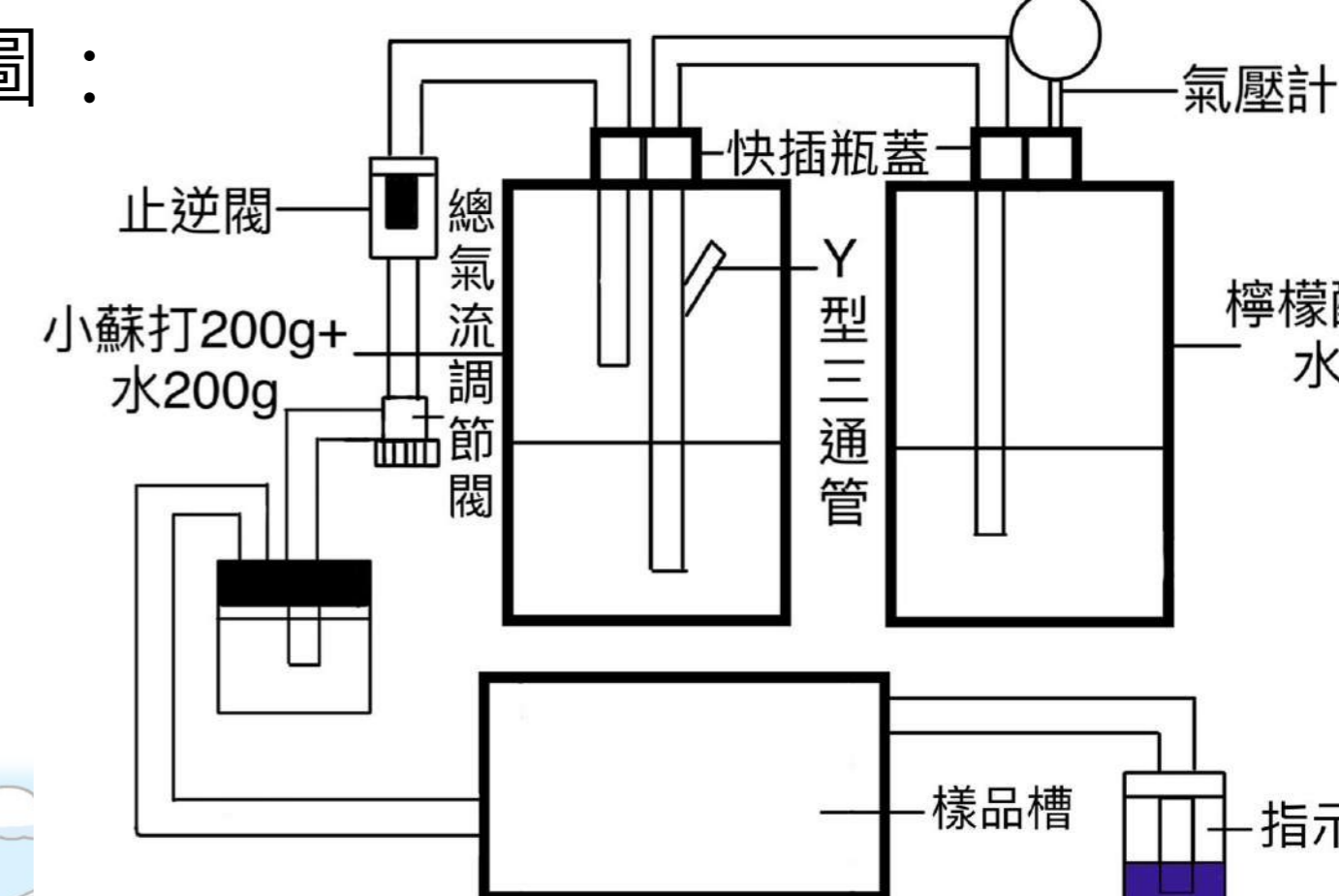
- 1. 以碳酸氫鈉粉末加鹽酸製造CO<sub>2</sub>，但氣流速度不穩定
- 2. 選用碳酸鈣成分粉筆加鹽酸取代，通入不同比例的指示劑中觀察變色，雖速率適中但不方便操控。

A1 (滴)	A2 (滴)	B (mL)	蒸餾水 (mL)	通入前顏色	白粉筆 (g)	1M HCl (mL)	蒸餾水 (mL)	通氣時間(s)	通入後顏色
2	1	1	5	紫	1.5	1	9	60	紫
2	1	2	4	藍	1.5	5	5	60	淡藍
2	1	3	3	藍	1.5	8	2	60	淡綠
2	1	5	1	紫	1.5	8	2	60	淡藍綠
2	1	1	5	紫	1.5	8	2	60	黃
2	1	1	11	紫	2.0	8	2	360	黃綠
2	1	2	10	藍	2.0	8	2	360	淺藍



## 實驗二：自製氣瓶(一代)

將兩瓶2L的汽水瓶分別裝200g小蘇打+200g水和200g檸檬酸+600g水並裝上快插瓶蓋，接上風管、三通管、氣壓計、止逆閥、氣體調節閥和計泡器，作為一代氣瓶的設計，如圖：



## 二、分光光度計

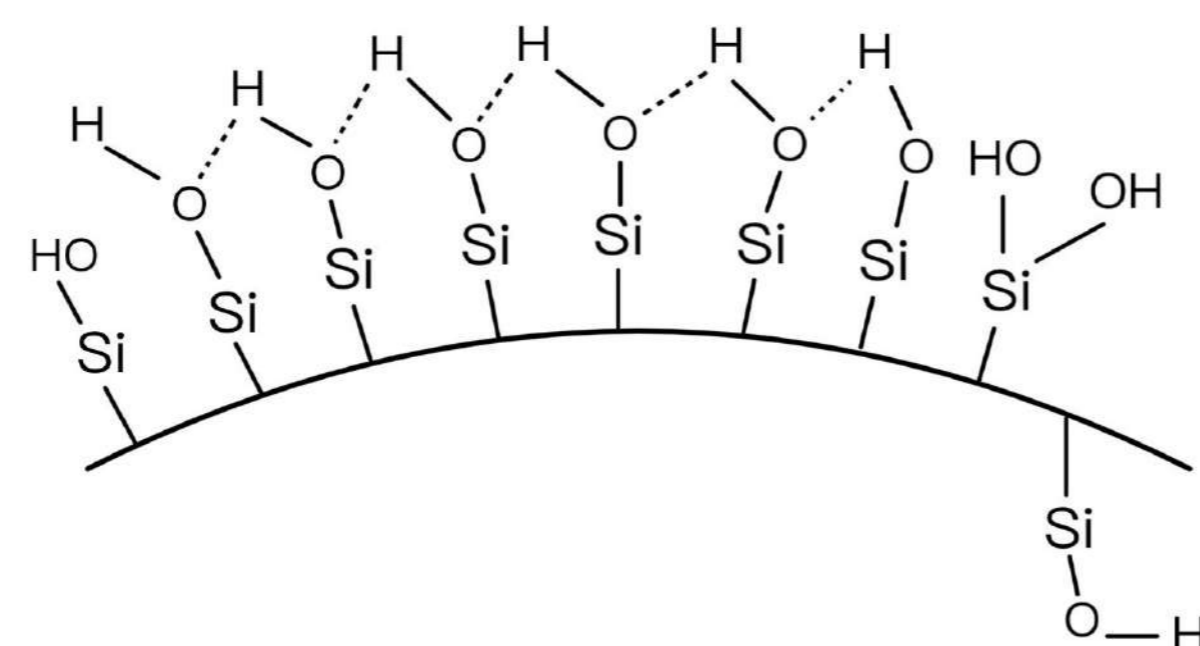
(一)比爾定律：入射線強度I<sub>0</sub>，穿透光線強度變為I<sub>1</sub>，此時光的穿透度T，公式可表示為： $A = -\log T = -\log \frac{I_1}{I_0}$   
 由此可知，溶液濃度越大時，顏色越深，吸收度越大

(二)通入不同時間的CO<sub>2</sub>到指示劑，結果如下：



## 三、矽膠乾燥劑






矽膠可製成高表面積、高孔隙度的多孔性結構，應用方面可作為觸媒載體與吸附劑，也因矽膠表面的官能基多為矽醇基團(Si-OH)，如右圖所示，因此對極性氣體分子，如水氣、甲醇與氨氣皆有良好的吸附效能。





### 實驗三：用一代氣瓶再次找尋最佳比例的碳酸氫鹽指示劑

指示劑的配置：A1兩滴，A2一滴，取B溶液和水的體積，改變比例配成指示劑並裝在試管，通入240秒的CO<sub>2</sub>，觀察顏色並拍照紀錄結果。測試次數和體積如下：

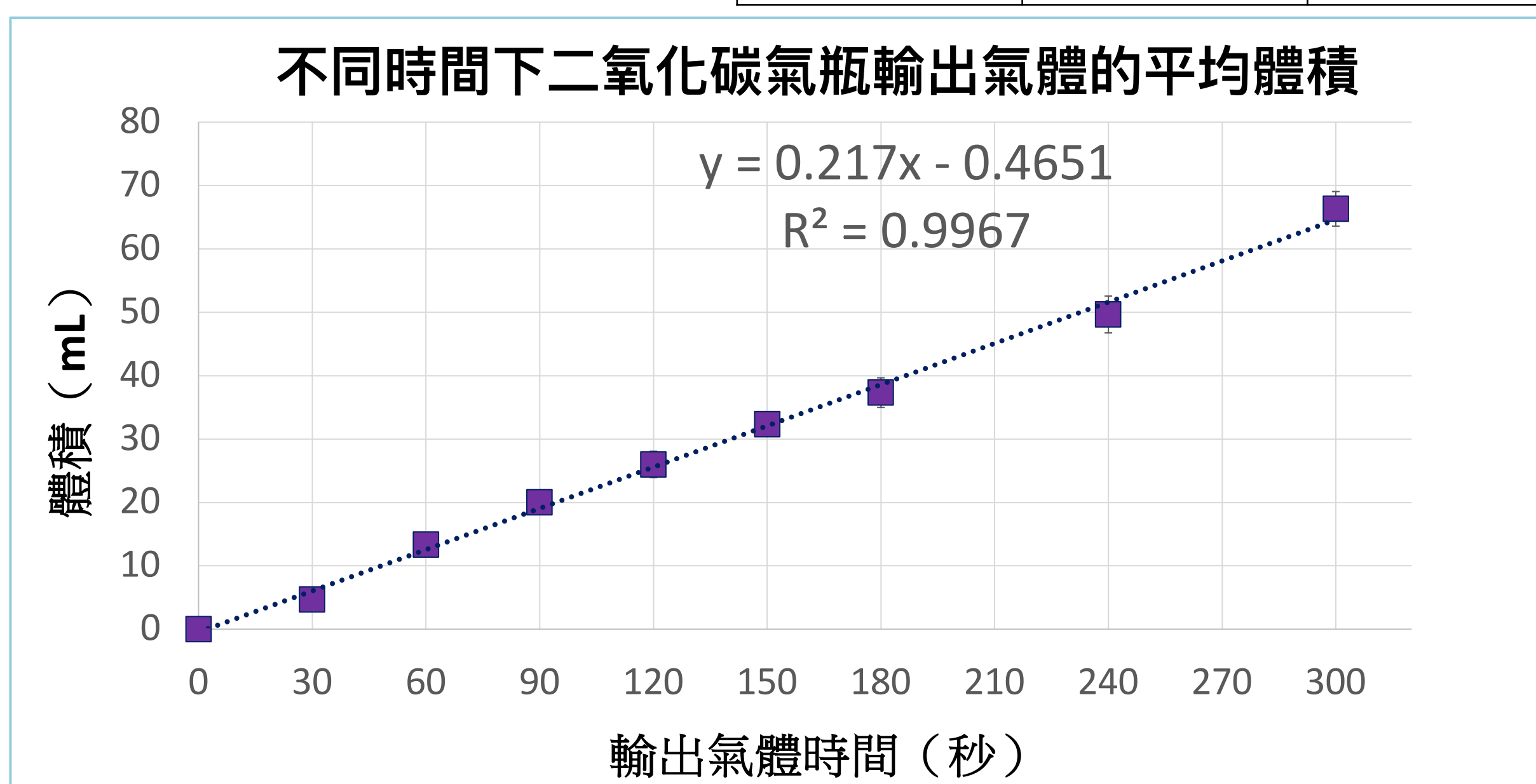
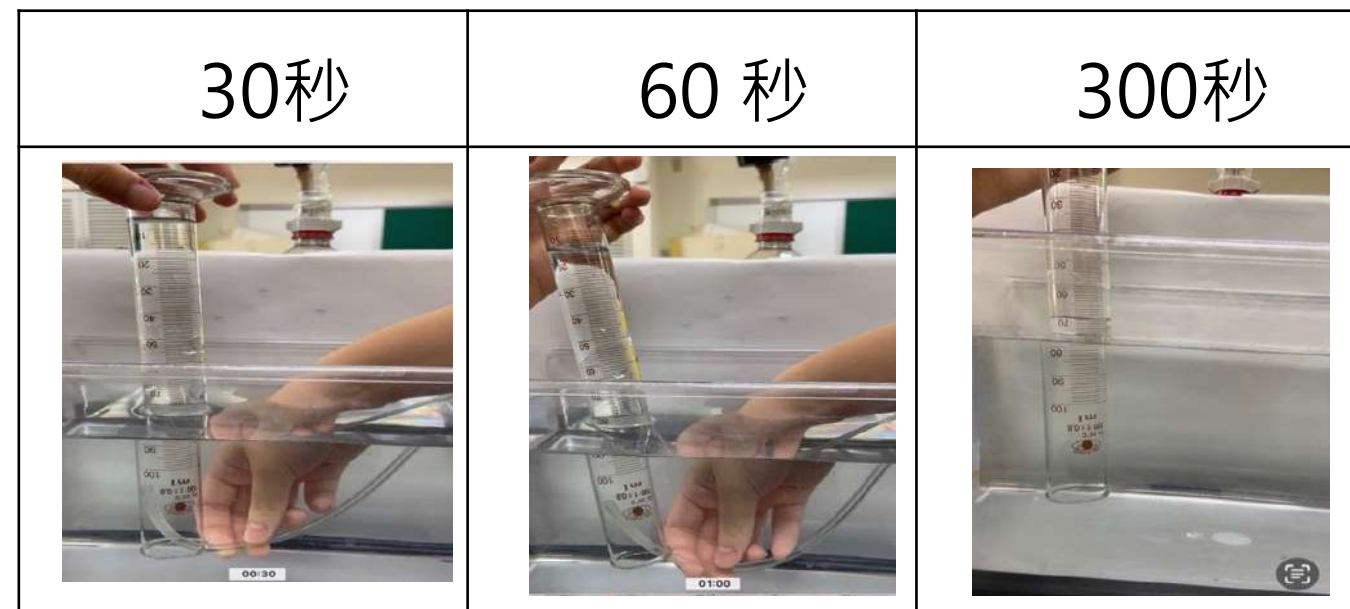
編號	一	二	三	四	五
B 溶液(mL)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
水(mL)	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5
通氣時間(秒)	240				
通氣後顏色	黃綠	綠	藍綠	藍綠	淺藍
照片					

#### 【分析】

A1 : A2 : B 溶液 : 蒸餾水 = 兩滴 : 一滴 : 0.5mL : 5.5mL ⇒此比例顏色變化最明顯

### 實驗四：排水集氣法測試自製氣瓶的氣體供應穩定度

將量筒裝滿水倒置在水槽中，通入CO<sub>2</sub>到量筒中，紀錄每30秒量筒刻度的變化並重複三次求平均以時間為橫軸，排出體積為縱軸做成下圖。



#### 【分析】

通氣時間和CO<sub>2</sub>體積線性關係佳 (R<sup>2</sup> = 0.9967)，表示一代氣瓶供氣穩定性佳，可利用此線性關係，從通氣秒數預估相同氣流下的氣體體積。

### 實驗五：測量實驗三配製的指示劑其pH值

配製碳酸氫鹽指示劑：A1四滴 + A2 二滴 + B 溶液 1.0mL + 水 11.0mL，總共34瓶，分別測量其pH值，將誤差值較大的20%丟棄，以提升實驗準確度。

編號	pH	編號	pH	編號	pH	編號	pH	編號	pH
1	8.62	8	8.64	15	8.73	22	8.72	29	8.31
2	8.63	9	8.65	16	8.75	23	8.75	30	8.36
3	8.64	10	8.65	17	8.74	24	8.74	31	8.28
4	8.63	11	8.66	18	8.76	25	8.76	32	8.76
5	8.65	12	8.65	19	8.74	26	8.78	33	8.33
6	8.75	13	8.73	20	8.74	27	8.34	34	8.09
7	8.66	14	8.74	21	8.73	28	8.53		

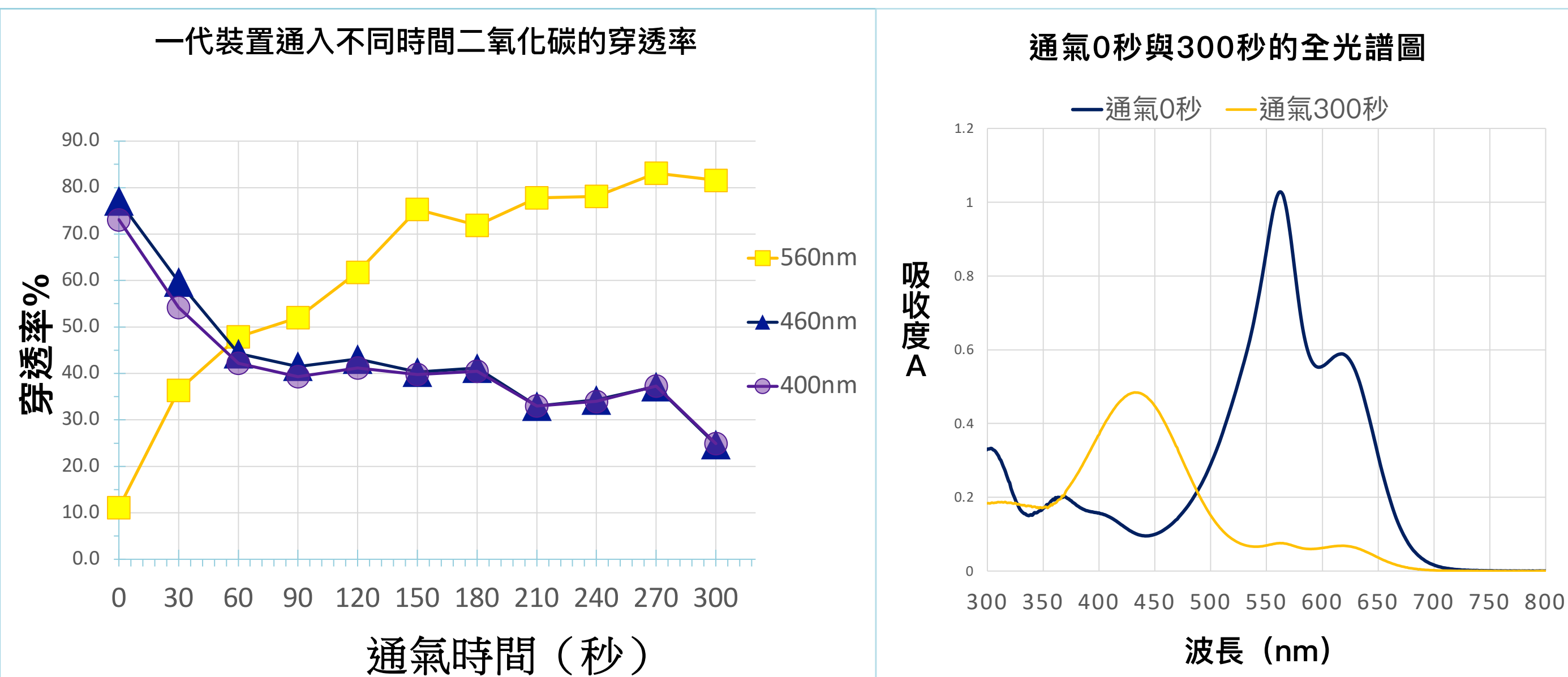
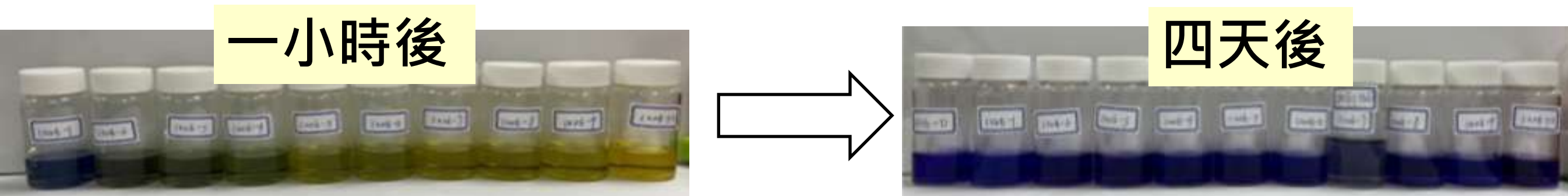
pH平均值：8.62

#### 【分析】

將誤差值較大的20%指示劑丟棄其餘保留做使用。

### 實驗六：一代氣瓶下指示劑通入不同時間的CO<sub>2</sub>

利用一代氣瓶將指示劑分別通入不同秒數的CO<sub>2</sub>，利用分光光度計560nm(黃光)、400nm(紫光)、460nm(藍光)三種波長下，測量通氣後的指示劑和放置一至四天的穿透率。



#### 【分析】

每次通氣完都要立刻測量穿透率，否則會帶來極嚴重誤差

### 實驗七：修改自製CO<sub>2</sub>氣瓶

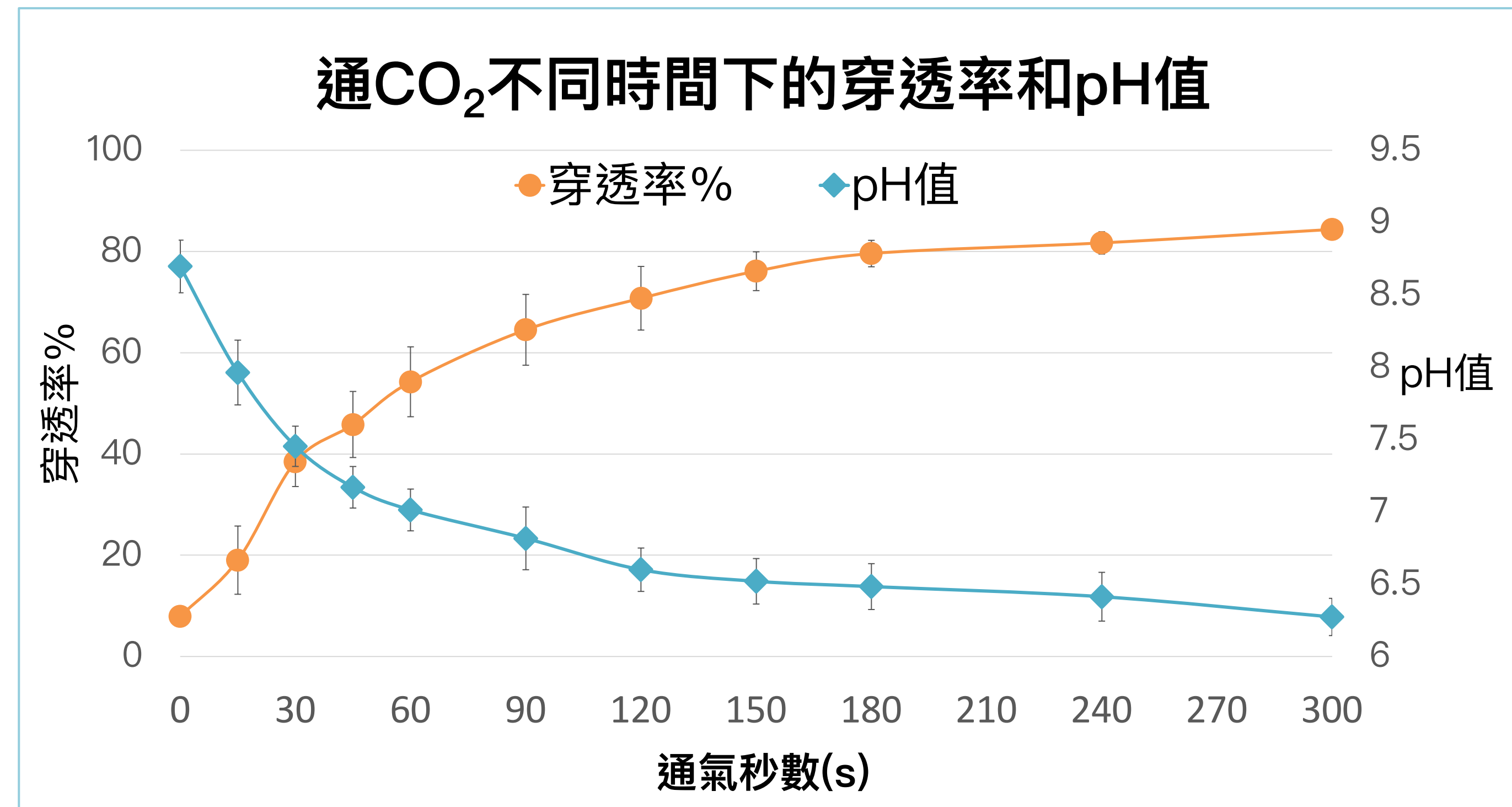
(成為二代氣瓶，可控制單/雙邊輸出氣體)

- (一) 拿掉計泡器，確保氣流更穩定，也能減少CO<sub>2</sub>的含水量。
- (二) 將三通連接閥改裝成可控制單邊或雙邊輸出氣體的裝置。
- (三) 在分開後的兩管分別接上可微調的氣流調節閥。
- (四) 在檸檬酸瓶內吸酸的風管上裝吸液控制裝置，當不需進行實驗時可以讓風管末端離開液面，以免壓力過大而毀壞裝置，實驗裝置如右圖。




### 實驗八：二代氣瓶指示劑通入不同時間的CO<sub>2</sub>

將指示劑配製成：A1四滴 + A2二滴 + B 溶液 1.0mL + 水 11.0mL 利用二代氣瓶分別通入不同秒數的CO<sub>2</sub>，通完馬上測pH值，再用分光光度計 560nm波長去測量指示劑的穿透率，重複三次。



【分析】 將實驗四及實驗八的圖表做結合，整理成下表作為往後實驗分析的參照值。

通氣時間 (秒)	0	15	30	45	60	90	120	150	180	240	300
CO <sub>2</sub> 體積 (mL)	0	2.8	4.7	9.3	13.3	20.0	26.0	32.3	37.3	49.7	66.3
通氣後指示劑顏色	藍紫	藍紫	藍綠	藍綠	深綠	綠	黃綠	黃綠	黃	黃	黃
通氣後指示劑pH值	8.70	7.96	7.45	7.17	7.01	6.82	6.60	6.52	6.48	6.41	6.27
560 nm 穿透率 T%	7.9	19.0	38.5	45.8	54.3	64.5	70.8	76.1	79.6	81.7	84.4
通氣後照片											

### 實驗九：以澄清石灰水檢驗矽膠乾燥劑

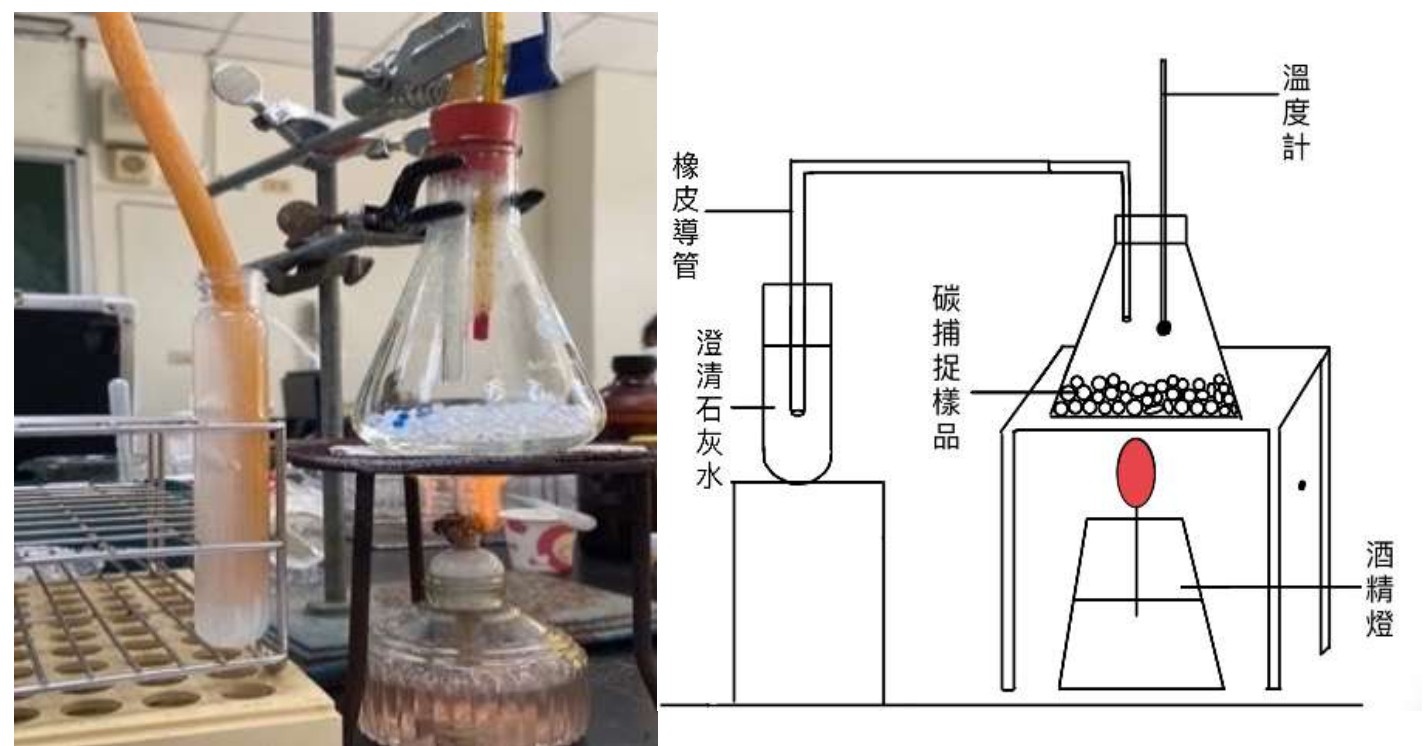
通入CO<sub>2</sub>後是否有吸附

#### (一) 加熱通氣過的矽膠乾燥劑

將通氣過的乾燥劑在密閉下加熱並導至澄清石灰水約10分鐘 (達85°C)，記錄澄清石灰水變化。



起始溫度	26°C
27°C	開始有氣泡排出
40°C	石灰水開始混濁
65°C	石灰水持續混濁
85°C	石灰水轉透明



#### 【結果】

通氣過的矽膠乾燥劑加熱能使澄清石灰水變混濁。

#### (二) 取相同質量未通氣過的矽膠乾燥劑同樣加熱10分鐘

起始溫度	26°C
40°C	尚未冒泡且未混濁
50°C	尚未冒泡且未混濁
78°C	開始冒泡(但很少)
85°C	冒泡結束且未混濁



#### 【結果】

持續有氣體冒出，但未使澄清石灰水混濁。

#### 【分析】

表示我們的系統能讓矽膠乾燥劑成功捕捉到CO<sub>2</sub>，也間接驗證了我們的實驗設計可以有效作為碳捕捉效能探究的裝置。



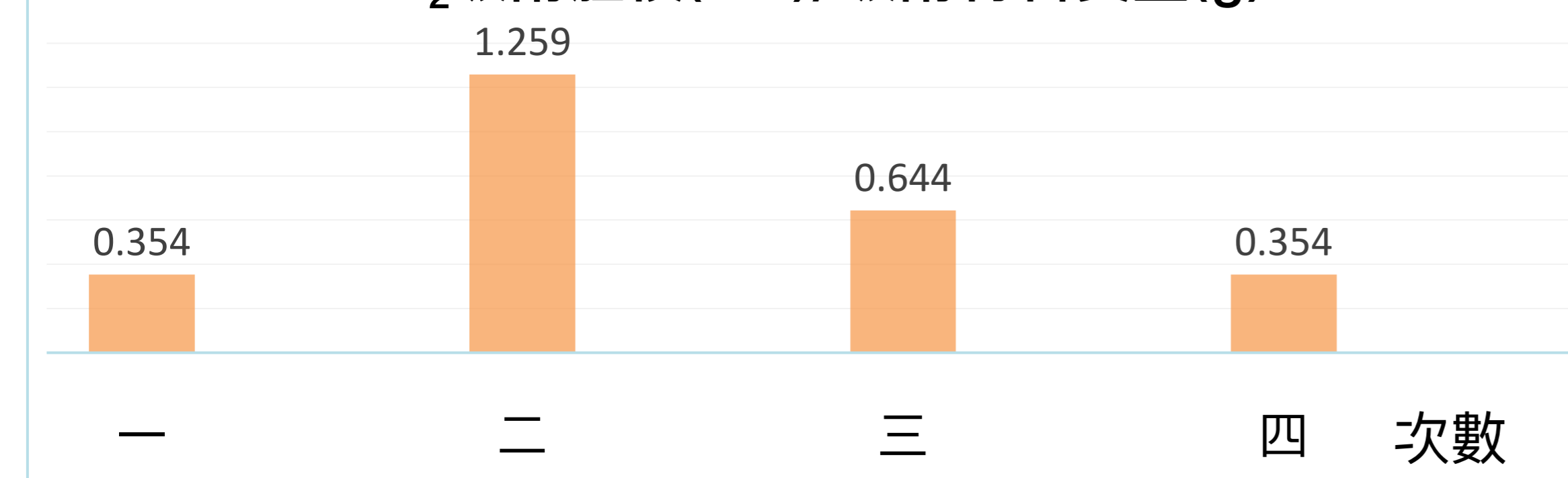
## 實驗十：矽膠乾燥劑能吸附多少CO<sub>2</sub>

兩個容器同時導入到指示劑進行通氣。矽膠乾燥劑（實驗組）和保麗龍球（對照組）通過的CO<sub>2</sub>體積差除以吸附樣品吸附前的質量，可知具碳捕捉能力的樣品每公克可以吸附多少毫升的CO<sub>2</sub>。

次數	第一次		第二次		第三次		第四次			
	矽乾	保	矽乾	保	矽乾	保	矽乾	保		
通氣的材料	560nm	T %	14.30	59.80	26.90	81.50	8.61	71.30	16.10	55.50
對應的時間(秒)	0~15	60~90	15~30	240~300	0~15	120~150	0~15	60~90		
下限體積(mL)	0.0	13.3	2.8	49.7	0.0	26.0	0.0	13.3		
上限體積(mL)	2.8	20.0	4.7	66.3	2.8	32.3	2.8	20.0		
平均體積(mL)	1.4	16.7	3.8	58.0	1.4	29.2	1.4	16.7		
與同次保麗龍體積相差 (mL)	15.3	0.0	54.3	0.0	27.8	0.0	15.3	0.0		

### 【分析】

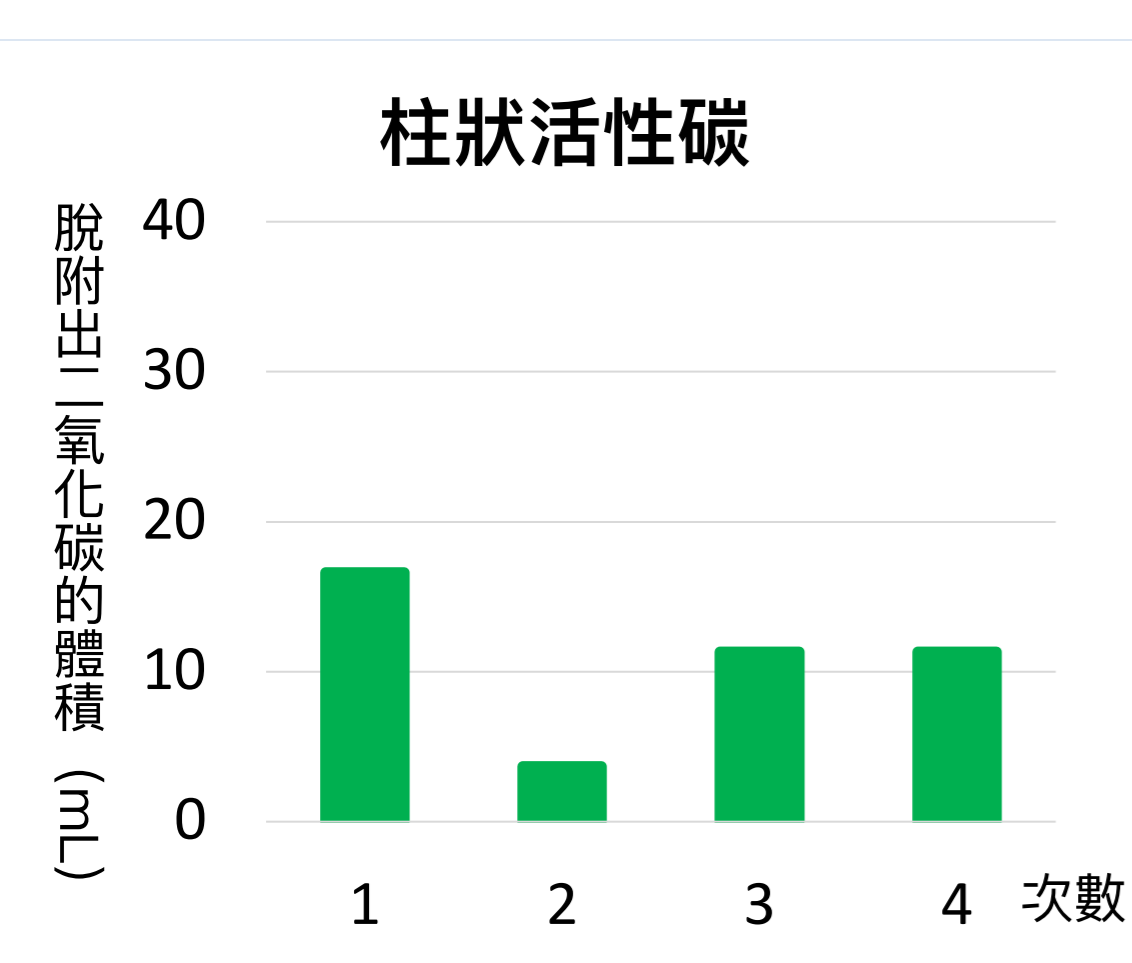
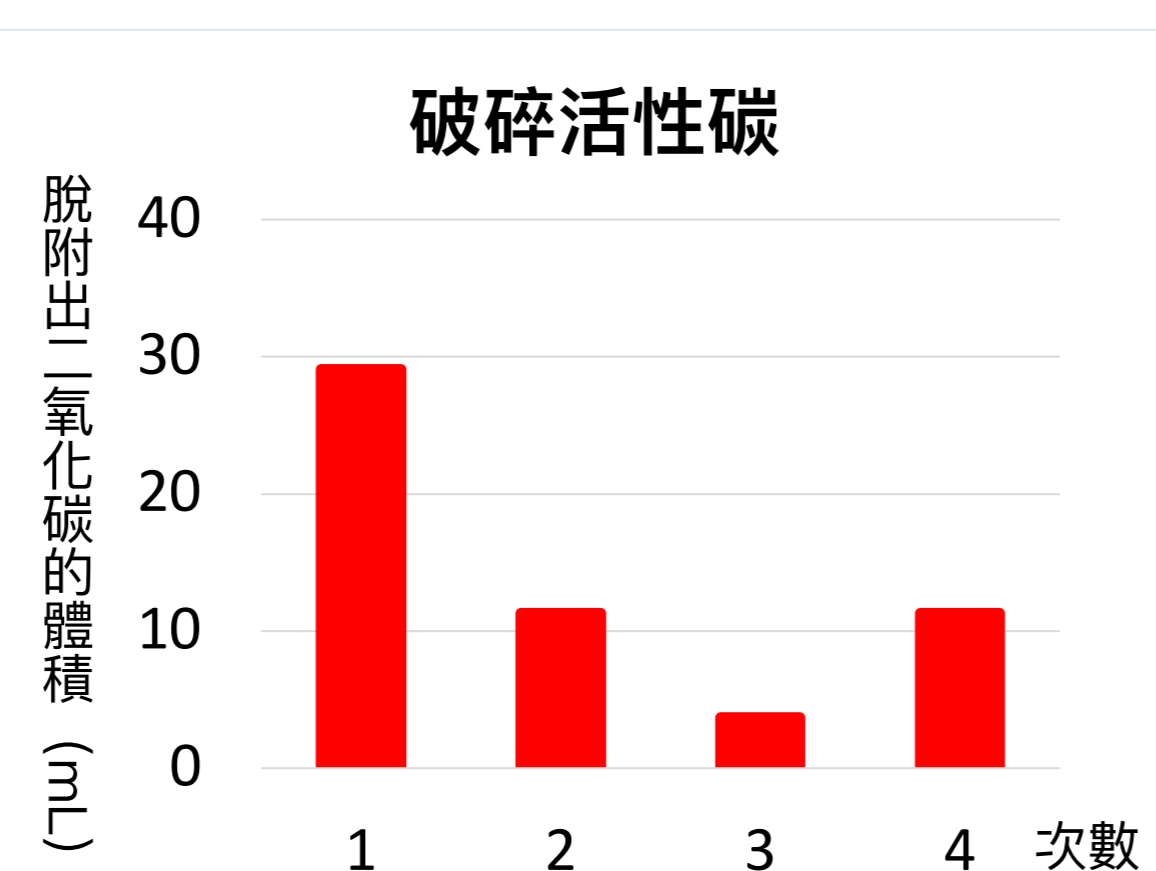
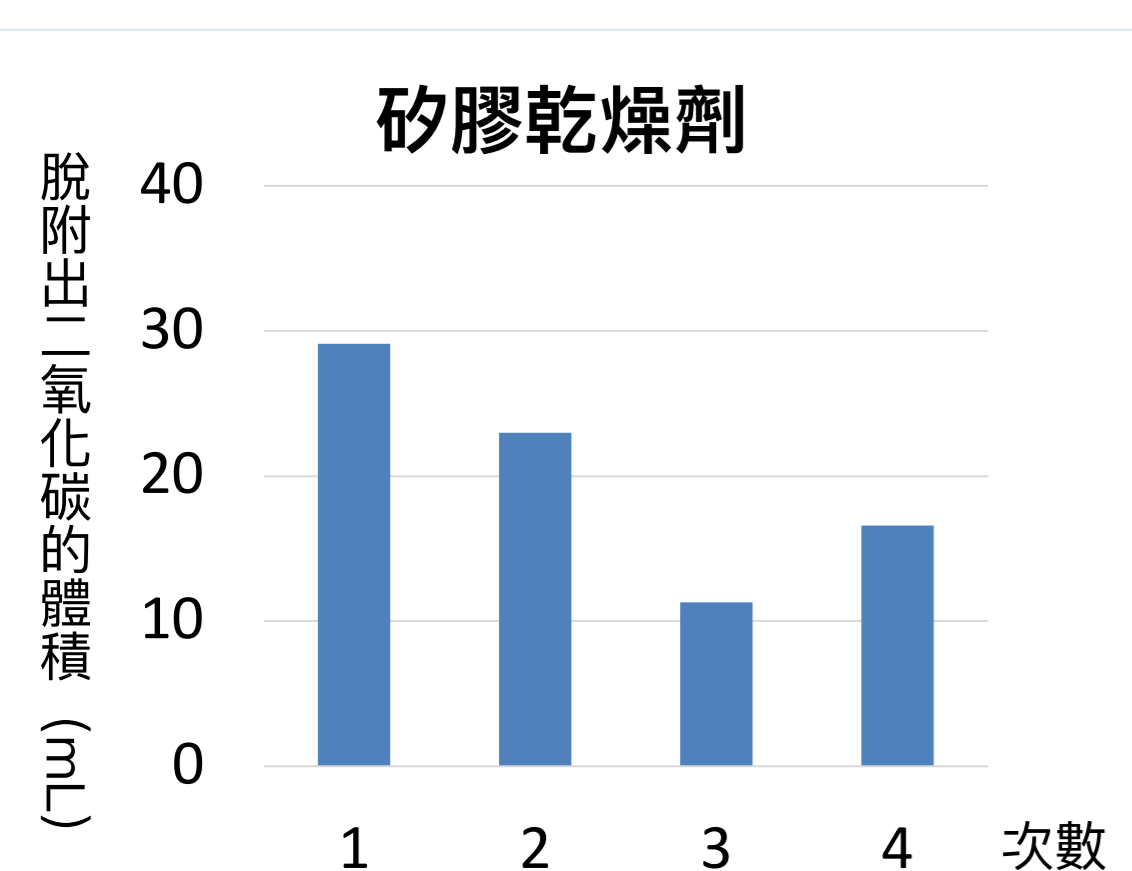
CO<sub>2</sub>吸附體積(mL)/吸附材料質量(g)



## 實驗十一：不同碳捕捉材料吸附後直接加熱

吸附後直接脫附CO<sub>2</sub>重複四次的實驗結果：

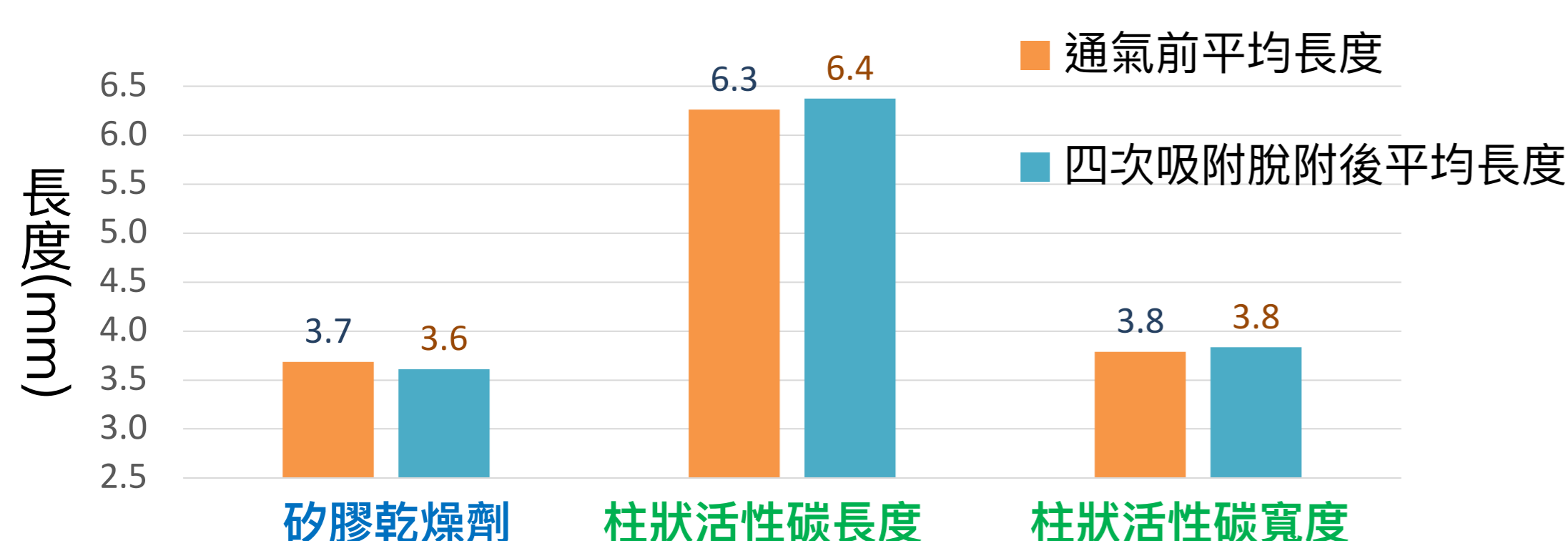
吸附材料	矽膠乾燥劑				破碎活性炭				柱狀活性炭			
	一	二	三	四	一	二	三	四	一	二	三	四
脫附次數	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
指示劑pH	6.51	6.67	6.81	6.91	6.37	6.88	7.16	6.94	6.84	7.14	6.93	6.95
560nm T %	71.6	64.8	53.8	57.4	76.0	47.2	28.5	52.8	55.1	37.6	48.8	52.1
對應秒數(秒)	120~150	90~120	45~60	60~90	120~150	45~60	15~30	45~60	60~90	15~30	45~60	45~60
脫附體積 (mL) 吸附材料質量(g)	0.67	0.55	0.27	0.40	1.00	0.41	0.13	0.41	0.68	0.15	0.47	0.47
四次平均 (mL/g)	0.47				0.49				0.44			



### 【分析】

由四次重複吸附和脫附來看出這三種材料皆有可重複使用的可能，但隨著每次的吸附，脫附效能有下降的趨勢。

## 實驗十二：測量矽膠乾燥劑、破碎活性炭、柱狀活性炭通氣前後的大小變化



### 【分析】

- 矽膠乾燥劑通氣後長徑變小，可能因為其主要成分是多孔矽膠，加熱脫水會縮得比原本還小，孔洞也會因此縮小。文獻四中提到其加熱後可能會造成脫附不完全，所以吸附效能逐漸下降。
- 柱狀活性炭通氣後直徑略為變大，寬度不變，所以體積改變應該不是效能降低的主因。

## 陸、結論

- 我們成功設計自製CO<sub>2</sub>氣瓶能輕便且穩定的供氣，且能控制單或雙邊輸出氣體和氣流量。
- 成功利用溴瑞香草藍及酚紅測試出適合比例的碳酸氫鹽指示劑，隨著CO<sub>2</sub>的增加，顏色變化從藍紫到黃色。
- 通氣後的碳酸氫鹽指示劑樣品，會隨著時間改變而CO<sub>2</sub>濃度下降，且在四天後穿透率回到未通氣的狀態，因此通氣完必須立刻做後續數據測量。
- 不同的通氣時間與通入碳酸氫鹽指示劑其分光光度計560 nm的穿透率之間，對照排水集氣法測量不同時間下的CO<sub>2</sub>體積，成功整理成表格可以大約估算吸附材料所吸附或脫附CO<sub>2</sub>的體積。
- 將通氣過的矽膠乾燥劑加熱導出到澄清石灰水證明材料有吸附CO<sub>2</sub>的能力，並進行二代氣瓶同時通氣到實驗組和對照組，得知矽膠乾燥劑每公克能吸附CO<sub>2</sub>的體積。
- 三種吸附材料加熱脫附後發現質量皆變輕，且碳酸氫鹽指示劑皆有明顯變色，代表CO<sub>2</sub>確實能從這三種吸附材料裡脫附出來並與指示劑發生作用。由四次重複吸脫附來看出這三種材料皆有可重複使用的可能，但脫附效能有下降的趨勢。

三種吸附材料的減碳成本：

吸附材料	元/Kg	元/g	mL/g	吸附CO <sub>2</sub> mL/元
矽膠乾燥劑	250	0.250	0.47	1.88
破碎活性炭	119	0.119	0.49	4.12
柱狀活性炭	109	0.109	0.44	4.04

## 柒、未來展望

- 找尋生活中其他易取得的孔洞吸附材料來進行吸附脫附CO<sub>2</sub>的實驗，例如：稻穀農業廢棄物。
- 找尋碳捕捉再利用的相關資料，找出適合我們的方法去有效利用被捕捉的CO<sub>2</sub>。

## 捌、參考資料

- 王知桓(2011)。太陽能二氧化碳捕捉器。中華民國第51屆中小學科學展覽會。
- AC草影水族 (2021年1月20日)。誰說種水草要花很多錢？只要60元，做出CO<sub>2</sub>鋼瓶！〔影片〕。Youtube。  
<https://www.youtube.com/watch?v=kI7LPQjrvJs>
- 簡士凱 (2014)。水分子於矽膠孔洞擴散特性分子動力學研究。【臺灣能源期刊】，1(4)，427-436
- 李秀霞 (2014)。試量級奈米中孔徑CO<sub>2</sub>吸附材之穩定性及再生性評估。【工業污染防治】，130, 1-14.

(其他詳見報告書)