

花蓮縣第 66 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

科別：物理科

組別：國小組

作品名稱：

「泰」然升起，「勒」在其中！

——泰勒氣泡形成及運動行為之探究

關鍵詞：泰勒氣泡、「可調節式幫浦」進氣儀

編號：

壹、研究動機

在日常生活中，我們常會看到氣泡在水中上升的現象，例如魚缸裡的打氣裝置，或是汽水瓶中產生的氣泡，這些氣泡大多呈現球形，大小不一。然而，有次在倒置膠水瓶時，我們意外發現，在膠水瓶中出現像子彈般的長條形氣泡，我們覺得有趣極了！這與我們過去的生活經驗中看到的氣泡型態明顯不同！

查閱資料才知道這種外型特殊，像子彈的氣泡稱為「泰勒氣泡」！課本中對於氣泡的介紹大多僅說明「氣體會上升」的現象，為了更深入了解這種氣泡的特性，我們決定設計實驗，觀察不同條件下「泰勒氣泡」的形成與運動情形，希望能透過實驗探索這顆神奇氣泡背後的科學原理。

貳、研究目的

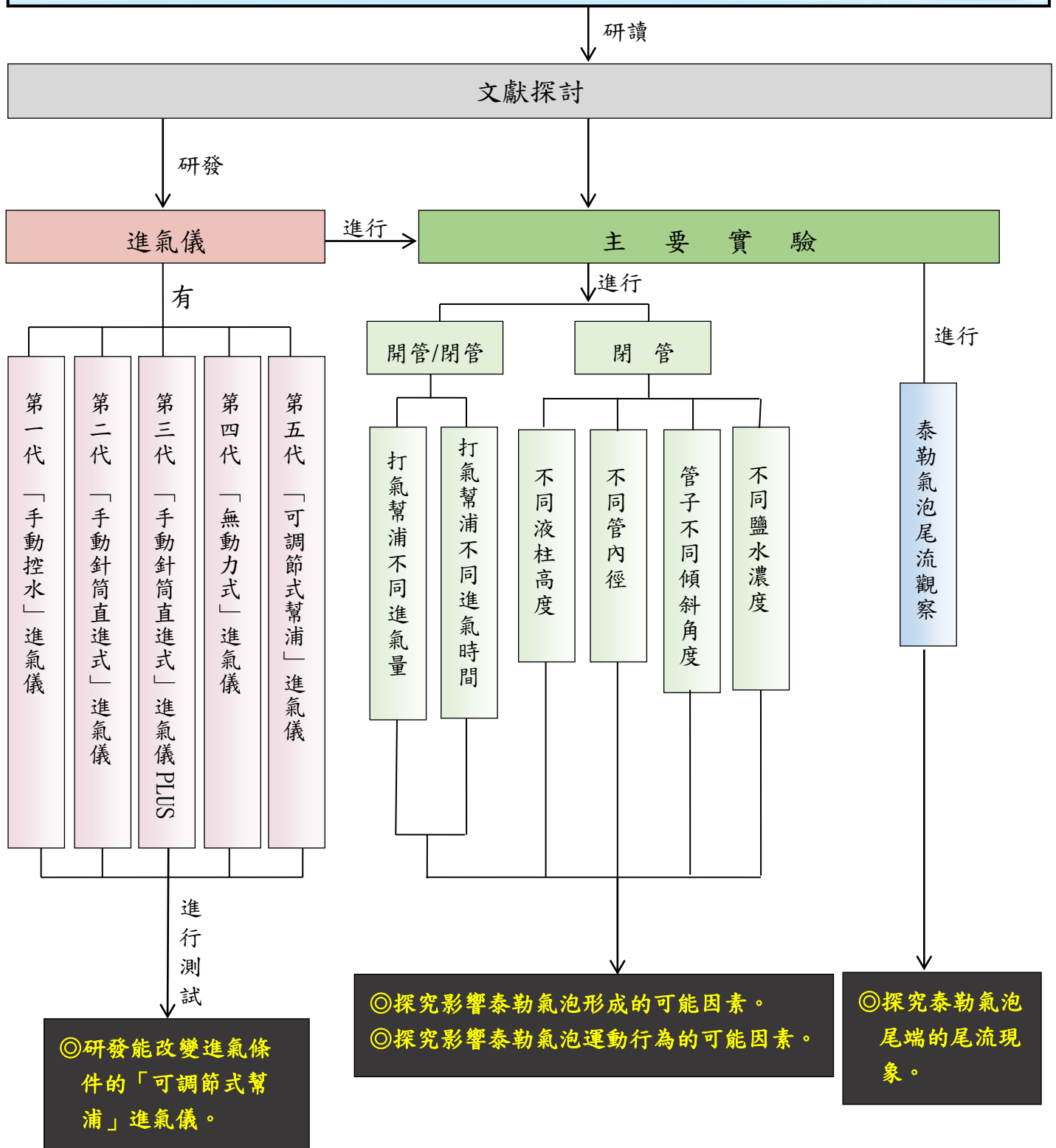
- 一、研發能改變進氣條件的「可調節式幫浦」進氣儀。
- 二、探究影響泰勒氣泡形成的可能因素。
- 三、探究影響泰勒氣泡運動行為的可能因素。
- 四、探究泰勒氣泡尾端的尾流現象。

參、研究設備及器材

- 一、材料：R0 水、研磨胡椒粉、鹽、Arduino Uno R3 板、壓力感測器、直流馬達擴充板、電源線、燒錄線、Microbit 開發板、繼電器、止逆閥、三通閥、布尺、不同內徑塑膠硬管、塑膠軟管、注射筒、杜邦線、微調閥、熱熔膠條、寶特瓶、珍珠吸管、小白板、海報板。
- 二、工具：打氣幫浦、切管刀、鑽孔器、熱熔膠槍、Ipad、腳架、水平儀、手提電腦、鐵架、鑽孔器、焊槍。
- 三、軟體：Tracker 軟體、Arduino IDE 軟體、Microbit 軟體。

肆、研究架構及流程

「泰」然升起，「勒」在其中！



▲圖 1-1：研究架構及流程圖

伍、研究過程及結果

【文獻探討】

一、認識「氣泡」(Bubble)

(一)「氣泡」的定義

「氣泡」是指「被水包住的一小團空氣」，也可以說當空氣跑進水裡時，就會形成「氣泡」。因為水的「表面張力」，所以氣泡的形狀通常趨近於球形。

(二)常見的「球形氣泡」尺寸及其名稱之分類表

氣泡可依其尺寸大小與流動特性進行分類，不同尺寸的氣泡在形狀、穩定性與運動行為上皆有所不同。

根據國際標準化組織 (International Organization for Standardization, 簡稱 ISO) 的定義，水中氣泡依據其大小與特性主要可分為三類，如表一所示。

表一：液體中氣泡的直徑大小與其對應之名稱及特色一覽表

名 稱	尺寸範圍 (直徑)	特色
普通氣泡 (Bubble)	> 1 mm	在水中上升速度快，會迅速破裂消失。
微氣泡 (Microbubble)	1 μm ~ 1 mm	上升速度較慢，數量多時能使水變成乳白色。
超微細氣泡 (Ultrafine Bubble)	< 100 μm	在水中上升速度極慢，在水中存在時間長（幾秒到幾分鐘），且會不斷收縮甚至在水中溶解消失。

一般而言，氣泡尺寸越小，越容易維持球形；尺寸越大，則可能因流體作用而變形，甚至形成特殊型態的氣泡結構。

(三)依「氣泡」型態分類

氣泡可依其在液體中的型態與分布情形，主要可分為三類：

1. 單一氣泡 (bubble) (圖 1-2)

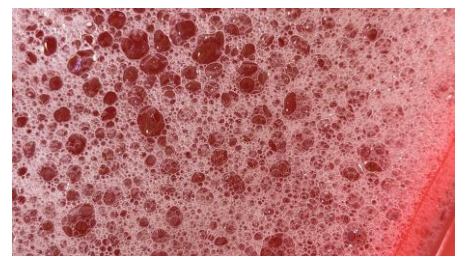
液體中單獨存在的一個氣體體積，通常趨近於球形。這類氣泡常見於液體中氣體逸出時所形成，例如：汽水中上升的氣泡。



▲圖 1-2：單一氣泡

2. 泡沫 (foam) (圖 1-3)

由大量氣泡聚集而成的結構，氣泡彼此之間由液體薄膜分隔，形成穩定或半穩定的多氣泡系統，例如：肥皂泡、啤酒泡。



▲圖 1-3：泡沫

3. 泰勒氣泡 (Taylor bubble) (圖 1-4)

在管道中形成的長條狀氣泡，其尺寸接近管徑，幾乎充滿整個管道截面。這類氣泡具有明顯的子彈頭狀的前端。

其中，泰勒氣泡的形狀與一般常見的球形氣泡有明顯差異，其呈現長條狀且接近管徑的特殊外型，並具有穩定上升的特性，使我們感到十分好奇。因此，我們希望透過實驗進一步探討影響泰勒氣泡形成與運動的關鍵因素，例如打氣量、打氣時間、管子直徑及運動方式等，以探究其背後的科學原理。



▲圖 1-4：泰勒氣泡

二、氣泡的產生方式

氣泡的形成可依其產生方式區分為兩類：

(一)以「物理方式」產生的氣泡

是指氣體「原本就存在」，只是透過外力進入液體形成氣泡，例如：

1. 在水族箱中利用打氣裝置將空氣導入水中所形成的氣泡。
2. 利用氣泡水機將二氧化碳氣體加壓溶入水中，並在減壓過程中釋放形成氣泡。

(二)以「化學反應」產生的氣泡

是指透過化學反應產生氣體所形成的氣泡，例如：

1. 將發泡錠溶於水中，透過化學反應產生氣體，而形成的氣泡。
2. 將醋與小蘇打混合，經酸鹼反應產生氣體，所形成的氣泡。

本研究所探討之「泰勒氣泡」，是屬於以「物理方式」產生的氣泡，即是由外部注入氣體所形成之氣液兩相流現象。

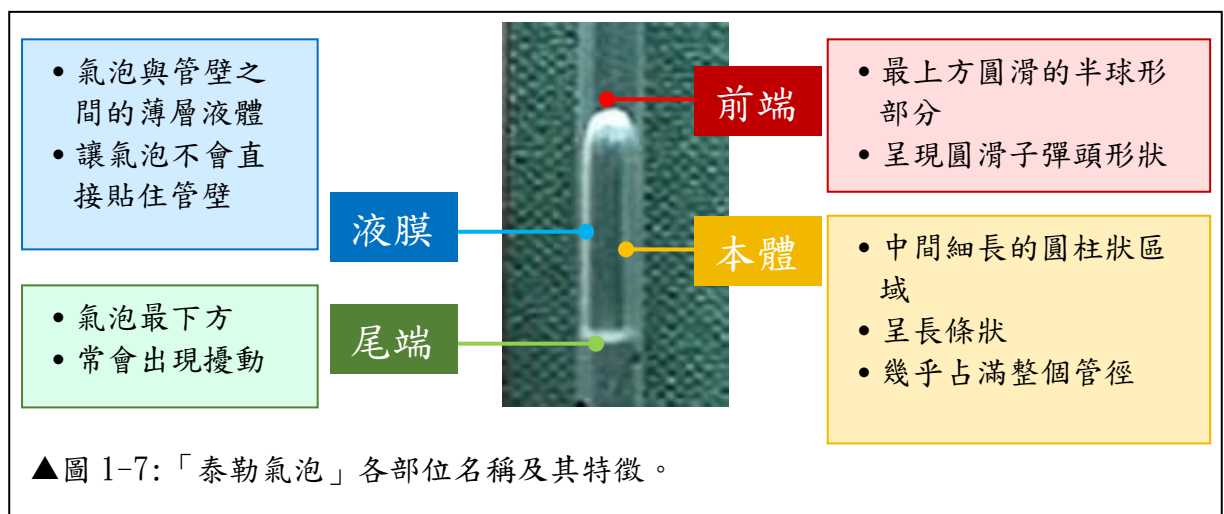
三、認識「泰勒氣泡」(Taylor Bubble)

(一)「泰勒氣泡」的名稱來源

「泰勒氣泡 (Taylor bubble)」的名稱源自英國著名流體力學家 Geoffrey Ingram Taylor。他在研究氣體於液體中流動的過程中，最先發現在狹長管道內，氣泡不會呈現一般常見的球形，而是會形成長條狀、前端類似子彈頭的特殊形態。此外，Taylor 也是最早對這類氣泡在管道中的運動特性進行系統性的研究與描述。因此，後人便以其姓氏將這類氣泡命名為「泰勒氣泡」。

(二)「泰勒氣泡」各部位名稱及其特徵(圖 1-7)

泰勒氣泡 (Taylor bubble) 是指在狹長管道中的大氣泡，通常出現在氣液兩相流中。它和一般小氣泡不同，具有以下幾個明顯特徵：



四、關於「氣泡」的相關科展研究：

自科教館網站查詢全國第 1~64 屆國中小科展參展作品中和「以物理方式產生的氣泡」之相關研究有 4 件，閱讀後整理摘要如表 1-1：

表 1-1:全國科展第 1~64 屆國中小組與「以物理方式產生的氣泡」之相關作品一覽表

屆數	組別	科別	作品名稱	作品摘要
第 50 屆	國中組	生活與應用科學科	水舞太極之氣泡 聲光魔幻秀	此研究發現水流沖擊氣泡的時候，大氣泡會破裂成小氣泡並隨著水流方向偏移；氣泡破裂時會產生聲音，氣泡越小，破裂聲音的頻率越高。根據研究的結果，加上燈光效果就能完成氣泡聲光魔幻秀。
第 54 屆	國中組	物理科	躍動～水中上升 氣泡左右振盪之 探討	此研究發現氣泡上升時左右振盪的振幅與氣泡的直徑有密切關係，且氣泡在左右振盪時會產生形變。
第 57 屆	國小組	物理科	讓「氣泡」說話	本研究採用物理製造法來及自行研發的「可調式氣體流量計」找出二氧化碳氣體逸散率低且逸散速度緩慢穩定的氣泡水！利用顯微鏡及軟體進行實驗，發現氣泡水在不同靜置時間、不同注水衝擊力道、不同粗細顆粒、不同容器材質等都是影響氣泡水中氣泡生成的重要因素。
第 62 屆	國小組	物理科	「顯像」環生— 環形氣泡產生方 法及變因之研 究	本研究以自行用 3D 列印機製造的空氣砲成功製造出環形氣泡。以細小氣泡作為顯影顆粒，進行簡易的流體可視化，分析出環形氣泡形成歷程與內部運動軌跡。孔徑、管長和管徑都會影響環形氣泡效果。

由表 1-1 可知，目前關於「以物理方式產生的氣泡」的科展研究多著重於一般氣泡或環狀氣泡的生成方式、形狀變化及運動特性等主題，**尚未發現有針對「泰勒氣泡」進行深入探討之相關作品。**

泰勒氣泡屬於氣液兩相流中具有特殊結構與運動特性的氣泡型態，其形成條件與流動機制比一般氣泡更為複雜，具有高度的研究價值。

本研究想以此為出發點，期望透過系統性的實驗設計，進一步釐清泰勒氣泡之形成與運動特性。

【實驗一】實驗環境介紹

一、「進氣儀」的設計及代數演進

(一)設計理念：

研究之初，首要之務是設計一款「能調整進氣量、調整進氣時間，將空氣導入裝水的長管中，以能形成泰勒氣泡」的進氣裝置。

(二)代數演進：

我們花了數個月時間思考並動手設計，並將完成的「進氣儀」接在長管下方測試，以下將敘述五代「進氣儀」的演進過程，並簡略說明製作方式及優缺點分析(表 1-2)。

表 1-2: 不同代數「進氣儀」的名稱、照片、操作方式、優缺點分析一覽表-1

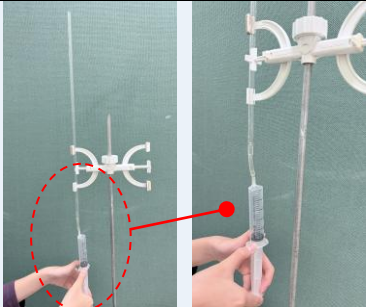
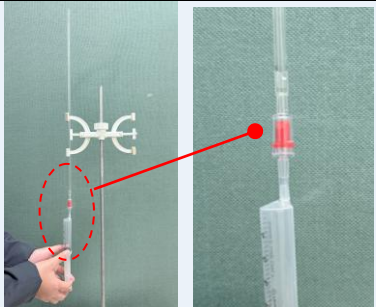
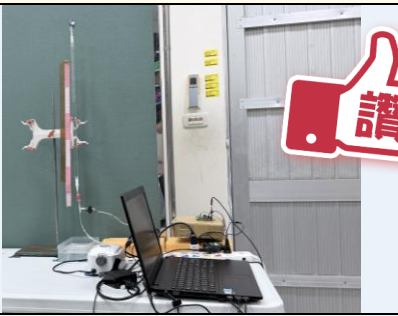
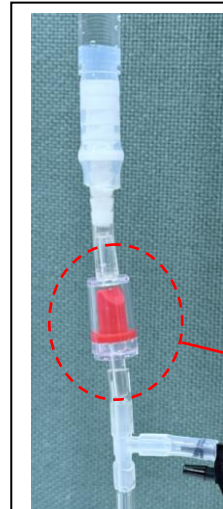
代數	第一代	第二代	第三代
名稱	「手動控水」進氣儀	「手動針筒直進式」進氣儀	「手動針筒直進式」進氣儀 PLUS
照片			
操作方式	1. 先用塞子塞住瘦長硬管的一端，在硬管中注水 N 毫升後，再用塞子塞住長硬管的另一端。 2. 以手倒置硬管後，即能在硬管底部產生泰勒氣泡。	1. 在瘦長硬管的下方以一小截透明塑膠管連接注射器。 2. 手動操作注射筒，使空氣進入瘦長硬管中，即能產生泰勒氣泡。	1. 在瘦長硬管的下方以一小截透明塑膠管連接止逆閥後，再用一小截透明塑膠管連接注射器。 2. 手動操作注射筒，使空氣進入瘦長硬管中，即會產生泰勒氣泡。
優缺點分析	◎優點- (1) 器材組裝簡單。 (2) 不易漏水、漏氣。 ◎缺點- (1) 以手動倒置硬管，不易控制倒置的力道、速度、角度。 (2) 若要調整氣體量，得拔除塞子後，以調整水量的方式來調整氣體量。	◎優點- (1) 器材組裝簡單。 (2) 可調整進氣量。 ◎缺點- (1) 進氣口處，水容易倒流至注射筒。 (2) 進氣口處，容易漏水。 (3) 以人力推動注射筒，將會影響打氣力道及速度。	◎優點- (1) 器材組裝簡單。 (2) 進氣口處，水不會倒流至注射筒。 (3) 可調整進氣量。 ◎缺點- (1) 以人力推動注射筒，將會影響打氣力道及速度。

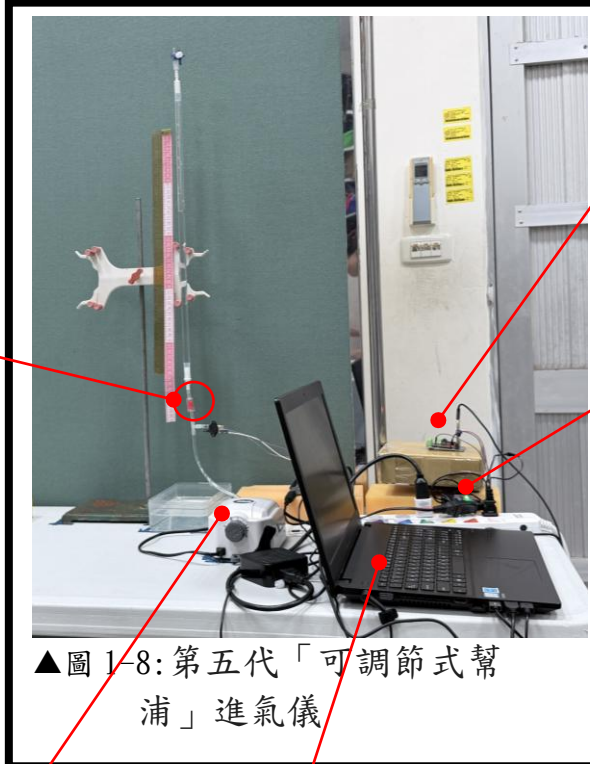
表 1-2: 不同代數「進氣儀」的名稱、照片、操作方式、優缺點分析一覽表-2

代數	第四代	第五代
名稱	「無動力式」進氣儀	「可調節式幫浦」進氣儀
照片		
操作方式	1. 準備兩個 2L 寶特瓶，使用 PVC 軟管、吸管、膠帶將其組合，再使用 PVC 軟管、微調閥與瘦長硬管組合成一系統。 2. 將下瓶裝滿水後，將此裝置旋轉 180 度(倒置)，即可將空氣導入硬管中，在硬管底部產生泰勒氣泡。	1. 將瘦長硬管下方以軟管銜接止逆閥及可調整進氣量的打氣幫浦。 2. 打氣幫浦也連結繼電器、直流馬達擴充版，以程式調整打氣時間。 3. 再藉由 Arduino Uno R3 板及 pressur sensor 來確認導入硬管的進氣量。
優缺點分析	◎優點- (1)可藉由調整瓶中水量調節進氣量。 (2)可藉由調整微調閥調節進氣速度，可減少人為操縱誤差。 ◎缺點- (1)進氣量小，形成泰勒氣泡的成功率低。 (2)只能約略調節進氣量、進氣速度，精準度不足。	◎優點- (1)打氣過程全程藉由電腦程式控制進氣，可完全去除人為因素。 (2)可精準調整進氣量。 (3)可精準控制進氣時間。 ◎缺點- (1)組裝較為繁複、費時。

(三)第五代「可調節式幫浦」進氣儀(圖 1-8~圖 1-16)



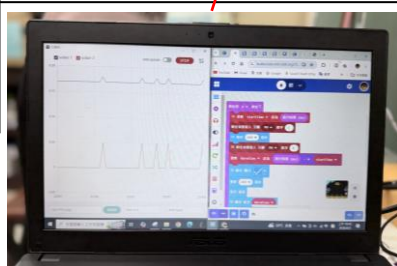
▲圖 1-9: 止逆閥-單向開啟，可防止水倒流，但氣體仍可進入管內。



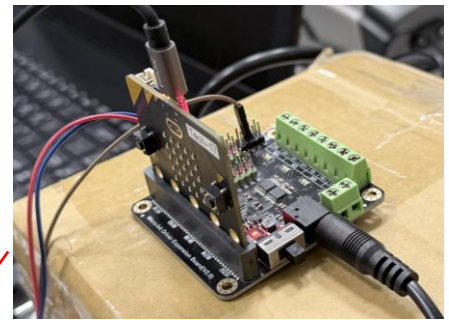
▲圖 1-8: 第五代「可調節式幫浦」進氣儀



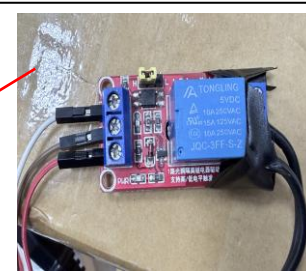
▲圖 1-10: 打氣幫浦



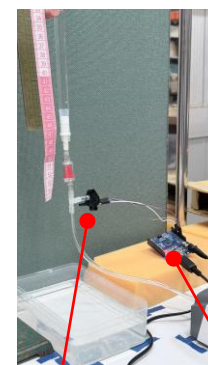
▲圖 1-11: 左邊 Arduino IDE 軟體顯示壓力感測器所測得的壓力數值。右邊 Microbit 軟體可透過程式修改來調整打氣時間。



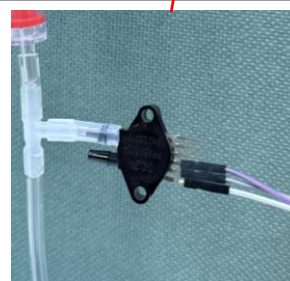
▲圖 1-12: 連結直流馬達擴充板，以程式碼調整打氣時間，且 Microbit 開發板可顯示打氣時間。



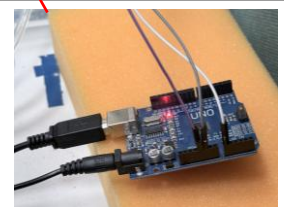
◀圖 1-13: 繼電器-將 110V 交流電經由電源模組轉換為 5V 直流電，以符合直流馬達擴充板的供電需求。



◀圖 1-14: 在進氣口前端連接 Arduino Uno R3 板及壓力感測器來確認導入硬管的進氣量。

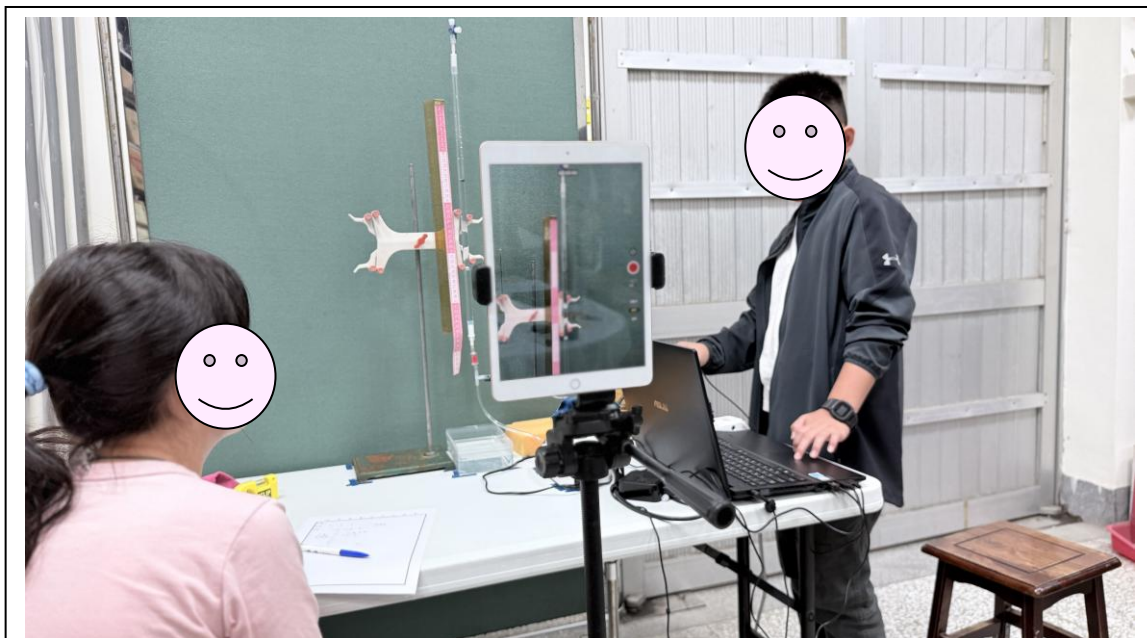


▲圖 1-15: 藉由壓力感測器量測進入管子前的初始壓力值。



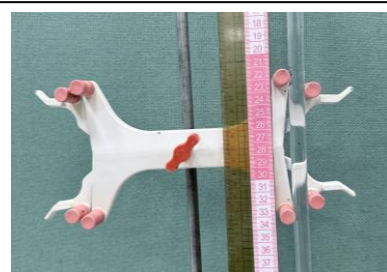
▲圖 1-16: Arduino Uno R3 板-接收感測器訊號，可讀取壓力感測器的資料。

三、實驗環境介紹



▲圖 1-17:本研究之實驗環境布置。

1. 本研究中，將管子以鐵架固定，在管子左方設置尺規(如圖 1-18)，利用自行研發的「第五代可調節式幫浦進氣儀」將空氣自裝水管子的下方導入，在管子上方加裝「接頭」及「三通閥」(如圖 1-19)以利於進行開管/閉管實驗。



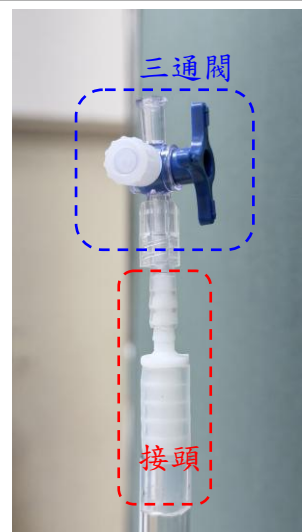
▲圖 1-18:在管子左方設置尺規，以利後續資料的判讀。

2. 為使實驗數據更加精準，因此實驗前會使用水平儀確認透明管、尺規是否與桌面保持垂直。(如圖 1-20)



▲圖 1-20:使用水平儀確認透明管、尺規是否與桌面保持垂直。

3. 為便於使用電腦軟體讀取精準的數值，在實驗桌前方以水平視角架設平板錄製實驗影片，以進行後續的分析。



▲圖 1-19:在管子上方加裝「接頭」及「三通閥」以利於進行開管/閉管實驗。

【實驗二】開管／閉管條件與不同打氣幫浦進氣量如何影響泰勒氣泡的生成及運動情形？

（一）研究方法：

1. 設定實驗條件並進行開管／閉管實驗：

- (1) 固定塑膠管長 50 公分、管內徑 1 公分，管內注水高度為 30 公分，打氣時間設定為 0.1 秒，並將打氣幫浦氣量刻度設定為 1。
- (2) 於實驗過程中，透過調整三通閥，使塑膠管上方呈現「開管」與「閉管」兩種狀態（如圖 2-1）。

2. 進氣操作：

使用「第五代可調節式幫浦進氣儀」，將空氣由管底導入裝水之塑膠管中，以產生氣泡。

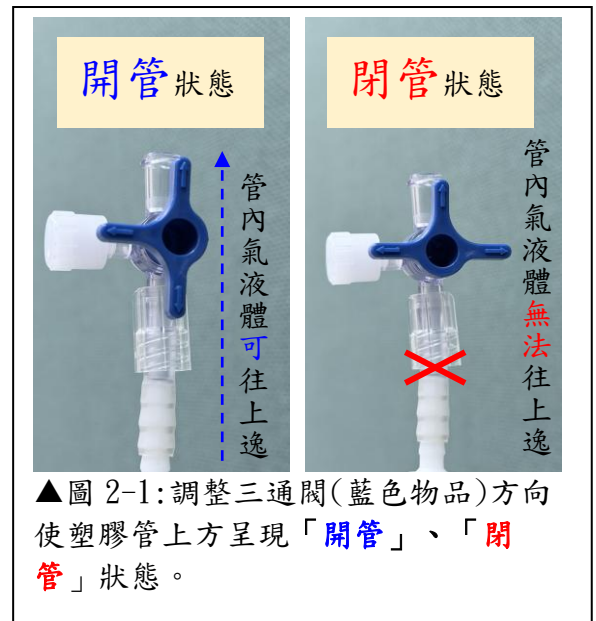
3. 重複實驗與數據蒐集：

於開管與閉管兩種條件下，分別進行 5 次重複實驗，並全程錄影。實驗結束後，利用 Tracker 軟體進行影像分析，以判讀相關數據。量測項目包括：

- (1) 初始壓力值（以壓力感測器量測）
- (2) 是否形成泰勒氣泡
- (3) 氣泡數量
- (4) 泰勒氣泡總長度
- (5) 泰勒氣泡移動速度

4. 調整氣量條件進行比較：

依序調整打氣幫浦氣量刻度由 2 調整至 6，於各刻度條件下重複步驟 1 至 3，以比較不同進氣量條件對泰勒氣泡生成與運動情形之影響。



（二）研究結果：

表 2-1:開管狀態下，打氣幫浦氣量**刻度 1~6**之各項實驗結果(受限於頁數，因此表格中僅呈現 5 次實驗所計得的平均數值。)

開管						
項 目	打氣幫浦氣量					
	刻度 1	刻度 2	刻度 3	刻度 4	刻度 5	刻度 6
氣泡種類			一般	一般	泰勒	泰勒
照 片						
氣泡數(顆)	0	0	1	1	1	1
平均初始壓力值(kPa)	5.04	5.17	5.42	5.97	7.41	7.75
泰勒氣泡平均總長度(cm)					2.19	2.83
氣泡平均移動速度(cm/s)			7.22	7.25	7.37	7.56

表 2-2:閉管狀態下，打氣幫浦氣量**刻度 1~6**之各項實驗結果(受限於頁數，因此表格中僅呈現 5 次實驗所計得的平均數值。)

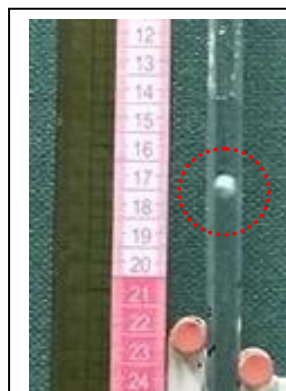
閉管						
項 目	打氣幫浦氣量					
	刻度 1	刻度 2	刻度 3	刻度 4	刻度 5	刻度 6
氣泡種類			一般	一般	一般	泰勒
照 片						
氣泡數(顆)	0	0	1	1	1	1
平均初始壓力值(kPa)	5.01	5.17	5.47	5.93	7.46	7.72
泰勒氣泡平均總長度(cm)						1.78
氣泡平均移動速度(cm/s)			11.15	8.66	7.96	7.33

(三) 研究發現：

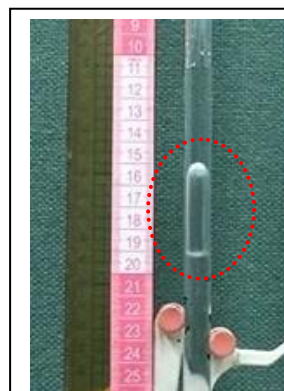
本研究透過「開管」與「閉管」兩種條件，並調整打氣幫浦進氣量刻度（1～6），探討其對泰勒氣泡生成與運動之影響，依據實驗結果整理如下：

1. 「泰勒氣泡」驚豔現身！

(1) 在「開管」狀態下打氣幫浦氣量刻度為 3~4 時，在「閉管」狀態下打氣幫浦氣量刻度為 3~5 時，主要形成的是「一般球狀氣泡」（圖 2-2）。一般球狀氣泡在剛離開管底時會先加速上升，隨著速度增加，因液體阻力逐漸增大，其上升速度最終會趨於穩定。



▲圖 2-2: 閉管/打氣刻度 3 時出現的「一般球狀氣泡」。



▲圖 2-3: 開管/打氣刻度 6 時出現的「泰勒氣泡」。

(2) 當實驗條件改變後，「開管」狀態下打氣幫浦氣量刻度為 5~6，「閉管」狀態下打氣幫浦氣量刻度為 6 時，本研究成功觀察到外型呈子彈狀、幾乎充滿整個管徑的「泰勒氣泡」（圖 2-3），我們感到十分驚喜！相較於一般球狀氣泡，泰勒氣泡在上升過程中呈現穩定且規律的運動行為，並以近似固定的速度泰然升起，彷彿在液體中展現其獨特而優雅的流動姿態！

2. 無論開管/閉管條件下，「平均初始壓力值」隨打氣幫浦氣量刻度增加而上升。

- (1) 「開管」狀態平均初始壓力值由 5.04 kPa→7.75 kPa；「閉管」狀態平均初始壓力值由 5.01 kPa→7.72kPa。
- (2) 隨著打氣幫浦氣量刻度由 1 提升至 6，開管/閉管條件下的平均初始壓力值皆呈現逐漸上升的趨勢，顯示氣量刻度越大，導入管內的氣體量越多，系統壓力亦隨之增加。

3. 在相同氣量刻度下，開管與閉管之平均初始壓力值數值極為接近，差異甚小。

- (1) 在同一氣量刻度下，開管/閉管之平均初始壓力值數值非常接近，顯示打氣幫浦所提供之氣體輸入條件有很好的穩定性與一致性，未受管路開閉狀態之影響。
- (2) 這可說明本實驗中氣泡生成型態與運動情形之差異，主要來自於「水管上端條件（開管／閉管）」對流體行為的影響，而非初始壓力輸入條件不同所造成。

4. 開管條件較早形成泰勒氣泡

- (1)在相同氣量刻度下比較，「開管」在打氣幫浦刻度 5 可形成泰勒氣泡，「閉管」需至打氣幫浦刻度 6 才形成泰勒氣泡。
- (2)說明在本實驗條件下，開管系統較容易在較低壓力下形成泰勒氣泡，推測可能因開管狀態使氣體釋放較順暢，有利於形成長條狀氣泡結構。

5. 打氣幫浦氣量會影響泰勒氣泡長度及平均上升速度

- (1)在開管條件下，氣量越大，泰勒氣泡長度明顯增加，平均上升速度也隨之略為增加。
- (2)在閉管條件下，同氣量，泰勒氣泡長度較小，且平均上升速度稍微下降。
- (3)綜合上述結果可推論，在開管條件下，系統為開放環境，氣體可持續逸散，使管內壓力不易累積，阻力較小。因此，當打氣幫浦氣量增加時，氣體輸入所提供的推進效應能更有效轉換為氣泡的運動動能，使泰勒氣泡的上升速度呈現增加趨勢。

然而，在開管條件下，泰勒氣泡的運動行為實際上為外加氣體(幫浦打進來的氣體)推動與氣泡本身浮力共同作用的結果，無法單純觀察泰勒氣泡僅依靠其內部氣體浮力所產生的上升速度。



選擇【打氣幫浦刻度 6】進行後續實驗

【實驗二】中得知，「開管」狀態下打氣幫浦氣量刻度為 5~6，「閉管」狀態下打氣幫浦氣量刻度為 6 時，本研究成功觀察到外型呈子彈狀、幾乎充滿整個管徑，且具有穩定液膜結構的典型「泰勒氣泡」。

因此，為確保後續實驗能穩定生成符合判定標準的泰勒氣泡，並提升各項實驗結果之可比性與一致性，本研究選擇「打氣幫浦刻度 6」作為後續所有實驗之標準進氣條件。

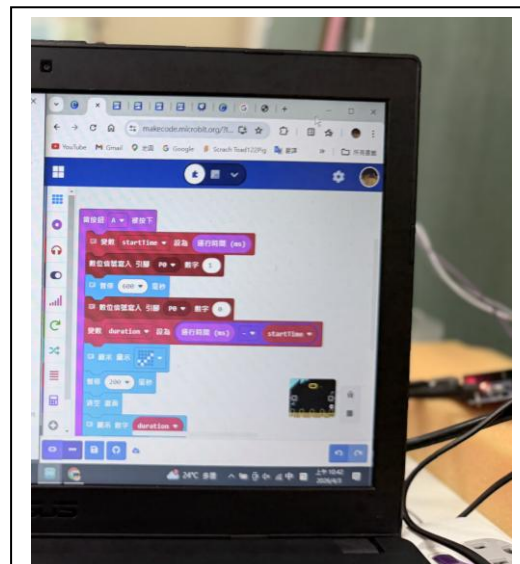
【實驗三】開管／閉管條件與不同打氣時間如何影響泰勒氣泡的生成及運動情形？

(一) 研究方法：

1. 設定實驗條件並進行不同打氣時間之測試：

- (1)開管狀態下，固定塑膠管長 50 公分、管內徑 1 公分，管內注水高度為 30 公分，並將打氣幫浦氣量刻度設定為 6。
- (2)依序調整打氣時間為 0.1 秒、0.2 秒、0.3 秒、0.4 秒、0.5 秒、0.6 秒，進行實驗。

2. 進氣操作：



▲圖 3-1:透過 Microbit 軟體修改程式碼來調整打氣時間。

使用「第五代可調節式幫浦進氣儀」，將空氣由管底導入裝水之塑膠管中，以產生氣泡。

3. 重複實驗與數據蒐集：

各打氣時間條件下皆重複進行 5 次實驗，並全程錄影。實驗結束後，利用 Tracker 軟體進行影像分析，以判讀相關數據。量測項目包括：

- (1) 初始壓力值（以壓力感測器量測）
- (2) 塑膠管上端之壓力值（以壓力感測器量測）
- (3) 氣泡是否形成泰勒氣泡
- (4) 氣泡數量
- (5) 泰勒氣泡總長度
- (6) 泰勒氣泡移動速度

4. 改變氣量條件進行比較：

將打氣幫浦氣量刻度調整為 6，重複步驟 1 至 3，以比較不同氣量條件下之實驗結果。

5. 改變管路條件進行比較：

將系統調整為閉管狀態，重複步驟 1 至 4，以比較開管/閉管條件下之差異。

(二) 研究結果：

表 3-1: 閉管狀態下，打氣幫浦氣量刻度 6，打氣時間 0.1~0.6 秒之各項實驗結果（受限於頁數，因此表格中僅呈現 5 次實驗所計得的平均數值。）

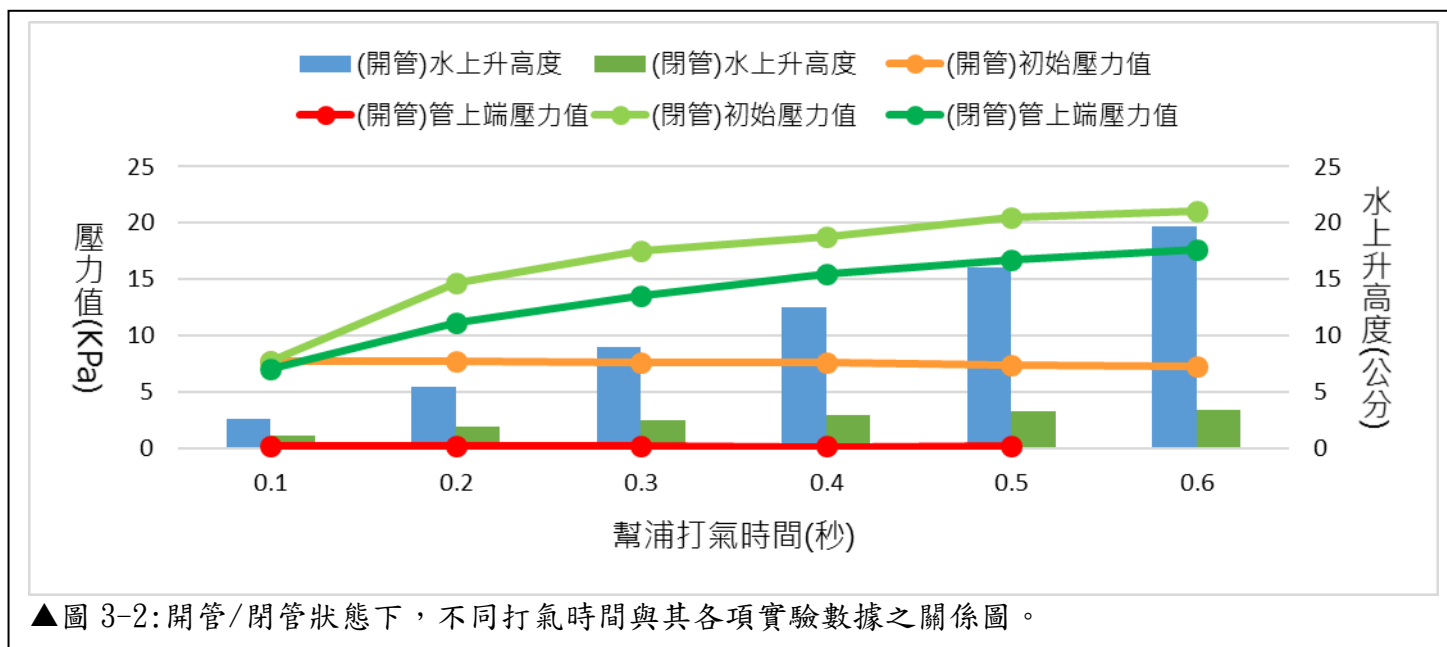
		開				管			
項 目		平均初始 壓力值 (kPa)	管上端 壓力值 (kPa)	水上升 高度 (cm)	泰勒氣泡 數(顆)	泰勒氣泡 平均總長度(cm)		泰勒氣泡平均 移動速度(cm/s)	
						第一顆	第二顆	第一顆	第二顆
幫 浦 打 氣 時 間	0.1 秒	7.75	0.28	2.61	1	3.83		7.56	
	0.2 秒	7.72	0.27	5.48	1	6.44		7.53	
	0.3 秒	7.64	0.27	8.98	1	11.01		7.65	
	0.4 秒	7.57	0.24	12.56	2	14.00	3.15	7.89	7.59
	0.5 秒	7.44	0.25	16.08	2	13.14	6.81	8.18	7.58
	0.6 秒	7.32	水從管 口噴出 無法測 量。	19.74	2	16.30	7.04	8.17	7.59

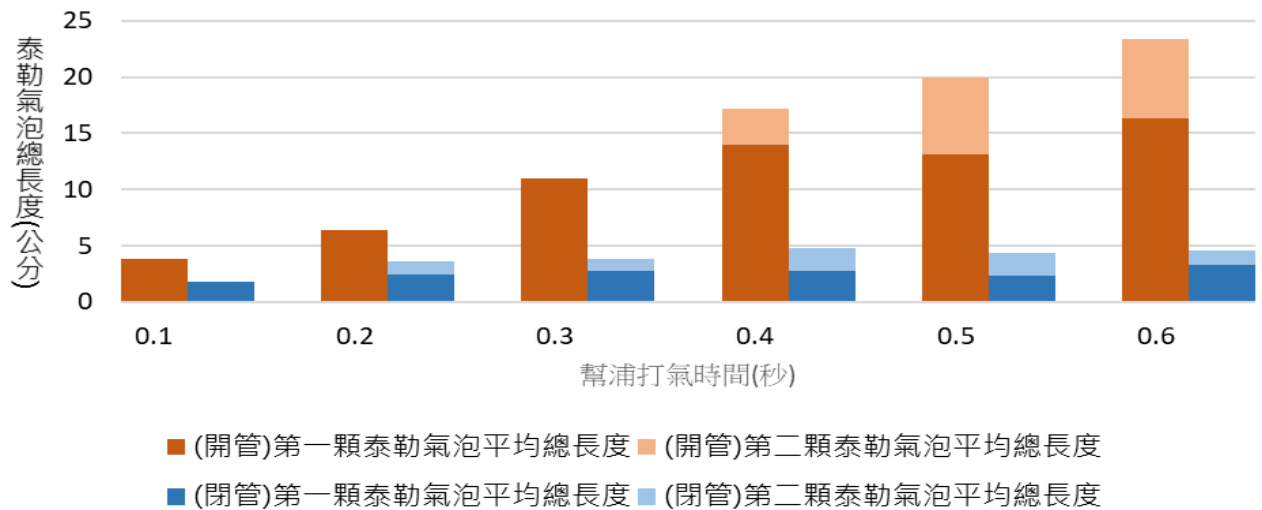
表 3-2: 閉管狀態下，打氣幫浦氣量刻度 6，打氣時間 0.1~0.6 秒之各項實驗結果
(受限於頁數，因此表格中僅呈現 5 次實驗所計得的平均數值。)

		閉					管		
項	目	平均初始 壓力值 (kPa)	管上端 壓力值 (kPa)	水上升 高度 (cm)	泰勒氣泡 數(顆)	泰勒氣泡 平均總長度(cm)		泰勒氣泡平均 移動速度(cm/s)	
						第一顆	第二顆	第一顆	第二顆
幫 浦 打 氣 時 間	0.1 秒	7.72	7.11	1.19	1	1.78		7.33	
	0.2 秒	14.65	11.18	1.96	2	2.50	1.14	7.42	7.21
	0.3 秒	17.50	13.60	2.55	2	2.83	1.02	7.47	7.22
	0.4 秒	18.81	15.50	2.98	2	2.73	2.09	7.48	7.22
	0.5 秒	20.44	16.78	3.29	2	2.36	2.05	7.50	7.22
	0.6 秒	21.05	17.60	3.42	2	3.29	1.30	7.50	7.23

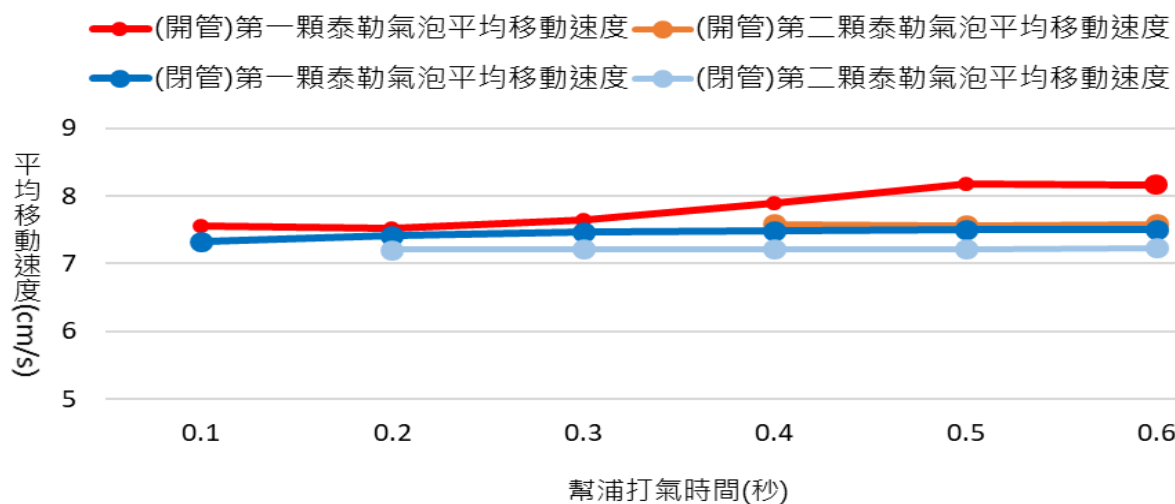
(三) 研究發現：

將表 3-1、表 3-2 部分數據繪製成圖 3-2、3-3、3-4，發現





▲圖 3-3:開管/閉管狀態下，不同打氣時間與其各項實驗數據之關係圖。



▲圖 3-4:開管/閉管狀態下，不同打氣時間與其各項實驗數據之關係圖。

1. 打氣時間會影響管內壓力與水柱高度

- (1)在開管條件下，隨著打氣時間增加，平均初始壓力由 7.75kPa 略降至 7.32kPa，變化不大；但水柱上升高度則由 2.61cm 明顯增加至 19.74cm。其中，打氣 0.6 秒時，水柱甚至從管口噴出，以致無從測得管上端壓力值。
- (2)在閉管條件下，隨著打氣時間增加，平均初始壓力由 7.72kPa 顯著上升至 21.05 kPa，顯示壓力隨打氣時間大幅度增加；水柱上升高度由 1.19cm 微增至 3.42cm。
- (3)呈上，說明打氣時間越長，氣體量越多，會造成水柱上升，開管狀態下尤其明顯；在閉管狀態下則是更容易形成高壓環境。

2. 打氣時間影響泰勒氣泡的生成數量

- (1)在開管條件下，打氣 0.1~0.3 秒皆形成 1 顆泰勒氣泡，打氣 0.4~0.6 秒可形成 2 顆泰勒氣泡。
- (2)在閉管條件下，打氣 0.1 秒形成 1 顆氣泡，打氣 0.2 秒以上：即穩定出現 2 顆氣泡。
- (3)呈上，說明閉管條件下較早（0.2 秒）就會出現多顆泰勒氣泡，推測與壓力快速累積有關。

3. 打氣時間影響氣泡長度，且開管與閉管有顯著差異。

- (1)在開管條件下，隨著打氣時間增加，第一顆泰勒氣泡長度由 3.83cm 增加至 16.30cm，第二顆泰勒氣泡由未出現逐漸增至約 5cm 以上(圖 3-5)。
- (2)在閉管條件下，打氣時間增加，第一顆泰勒氣泡長度約介於 1~3cm，第二顆泰勒氣泡長度也多落於 1~2cm 間。
- (3)呈上，說明開管條件可形成較長的泰勒氣泡，而閉管條件則會限制泰勒氣泡延伸。

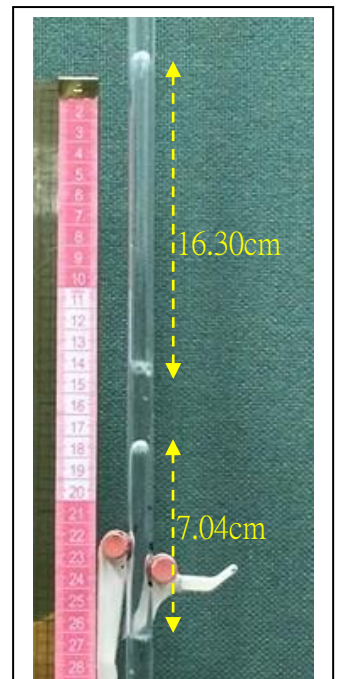
4. 打氣時間對氣泡上升速度的影響不顯著

- (1)在開管條件下，隨著打氣時間增加，泰勒氣泡上升速度約為 7.5~8.2 cm/s。
- (2)在閉管條件下，隨著打氣時間增加，泰勒氣泡上升速度約為 7.3~7.5 cm/s。
- (3)呈上，說明上升速度與打氣時間無明顯關聯。

5. 開管與閉管條件改變氣泡生成機制

- (1)在開管條件下，管內氣體可部分釋放，管上端測得壓力值小於 0.3 kPa，泰勒氣泡可持續延長。
- (2)在閉管條件下，管內氣體無法釋放，管上端壓力可上升至 17.60 kPa 以上，氣體受限於管內空間，使泰勒氣泡較短且較易分裂為多顆。

6. 整體而言，打氣時間主要影響泰勒氣泡的「數量」與「長度」，而氣泡上升速度則相對穩定；此外，開管與閉管條件會透過改變壓力累積與氣體釋放方式，進一步影響氣泡的生成型態與運動行為。



▲圖 3-5:

開管/打氣時間 0.6 秒，第一顆泰勒氣泡長 16.30cm，第二顆泰勒氣泡長 7.04cm。



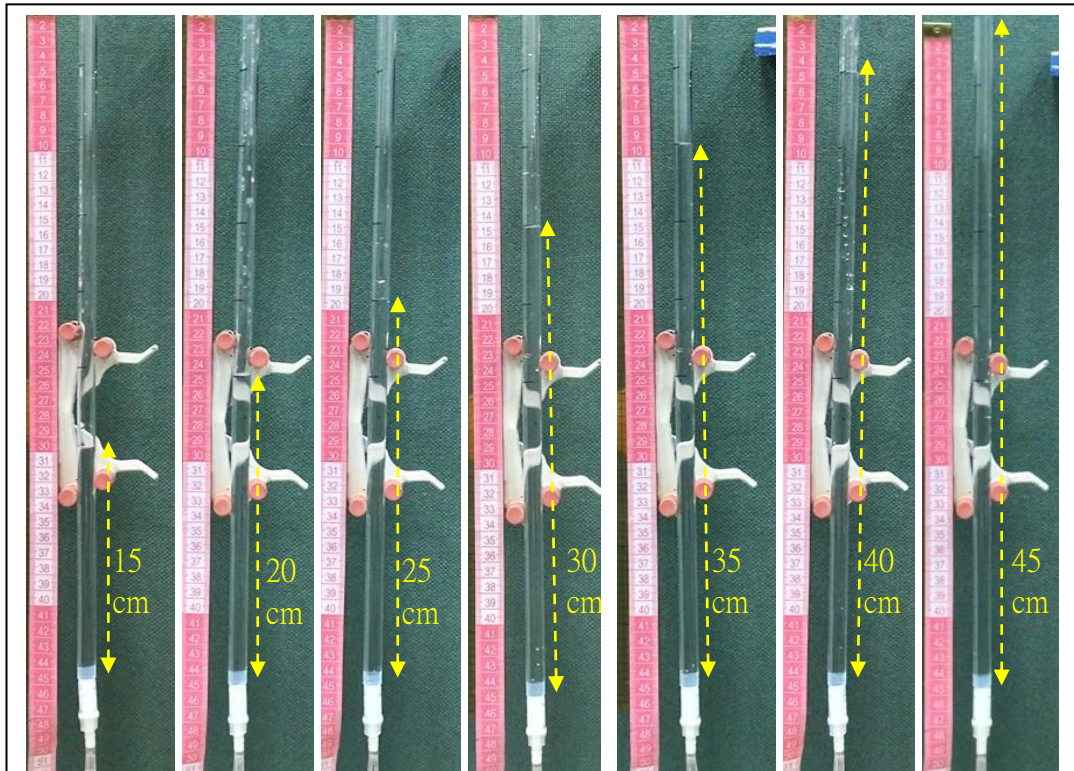
為何選擇【閉管條件】進行後續實驗？

綜合【實驗二】與【實驗三】研究結果得知，「閉管條件」下管內氣體無法逸散，較容易形成穩定且可累積的壓力環境，更可避免開管條件下氣體逸散、氣泡過度延長及水自管口噴出的干擾現象。因此，後續探討「液柱高度」、「塑膠管內徑」…對泰勒氣泡生成與運動情形的影響時，會選擇閉管條件進行實驗，較能使研究變因單純化，並提升實驗結果的穩定性與可比較性。

【實驗四】閉管條件下，液柱高度如何影響泰勒氣泡的生成與運動情形？

（一）研究方法：

1. 設定實驗條件並進行不同液柱高度之實驗：



▲圖 4-1:以不同的液柱高度來進行實驗

- (1)閉管狀態下，固定塑膠管長 50 公分，管內徑 1.0 公分，並將打氣幫浦氣量刻度設定為 6，打氣時間 0.1 秒。
- (2)依序調整液柱高度為 15 公分、20 公分、25 公分、30 公分、35 公分、40 公分、45 公分，進行實驗。

2. 進氣操作：

使用「第五代可調節式幫浦進氣儀」，將空氣由管底導入裝水之塑膠管中，以產生氣泡。

3. 重複實驗與數據蒐集：

各打氣時間條件下皆重複進行 5 次實驗，並全程錄影。實驗結束後，利用 Tracker 軟體進行影像分析，以判讀相關數據。量測項目包括：

- (1)初始壓力值（以壓力感測器量測）
- (2)塑膠管上端之壓力值（以壓力感測器量測）
- (3)氣泡是否形成泰勒氣泡
- (4)泰勒氣泡總長度
- (5)泰勒氣泡移動速度

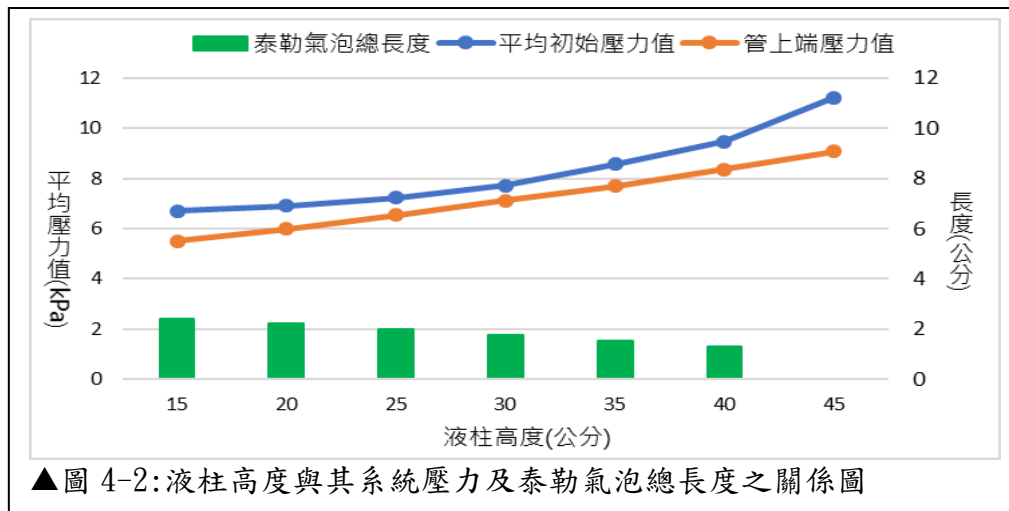
(二) 研究結果：

表 4-1: 閉管狀態下，不同液柱高度與其各項數值一覽表

(受限於頁數，因此表格中僅呈現 5 次實驗所計得的平均數值。)

閉管								
項 目		平均初始 壓力值 (kPa)	管上端 壓力值 (kPa)	水上升 高度 (cm)	氣泡 類型	圖 片	泰勒氣泡 總長(cm)	泰勒氣泡 平均移動速度 (cm/s)
液 柱 高 度	15cm	6.70	5.51	1.56	泰勒		2.39	7.20
	20cm	6.91	5.98	1.49	泰勒		2.21	7.22
	25cm	7.24	6.53	1.39	泰勒		2.00	7.27
	30cm	7.72	7.11	1.19	泰勒		1.78	7.33
	35cm	8.57	7.70	0.98	泰勒		1.55	7.54
	40cm	9.46	8.36	0.76	泰勒		1.29	7.85
	45cm	11.21	9.08	0.55	一般			

(三) 研究發現



本研究在閉管條件下，探討液柱高度對系統壓力、氣泡型態、運動行為之影響。綜合實驗數據分析，各變因之間呈現明確的連鎖關係，彼此層層相扣，整理如下：

1. 液柱高度改變系統壓力

- (1) 隨著液柱高度由 15 cm 增加至 45 cm 時，平均初始壓力值由 6.70 kPa 增加至 11.21 kPa，管上端壓力值由 5.51 kPa 增加至 9.08 kPa。
- (2) 液柱高度愈高，系統整體壓力皆隨之增加。

2. 壓力增加抑制水位上升

- (1) 隨著液柱高度由 15 cm 增加至 45 cm 時，水上升高度由 1.56 cm 逐漸下降至 0.55 cm。
- (2) 說明管上端壓力愈大，對液面的壓制作用愈強，使氣泡推動液體上升的能力降低，導致水位上升高度減少。

3. 壓力增加使泰勒氣泡長度縮短

- (1) 隨著液柱高度由 15cm 增加至 40cm 時，泰勒氣泡總長度由 2.39 cm 逐漸縮短至 1.29cm。因靜水壓力增加，導致氣泡受到壓縮，使得泰勒氣泡的長度變短。
- (2) 液柱高度 45cm 時，無法形成泰勒氣泡，僅產生一般球狀氣泡，說明過高的液柱高度會抑制其生成。

4. 氣泡長度變短影響運動速度

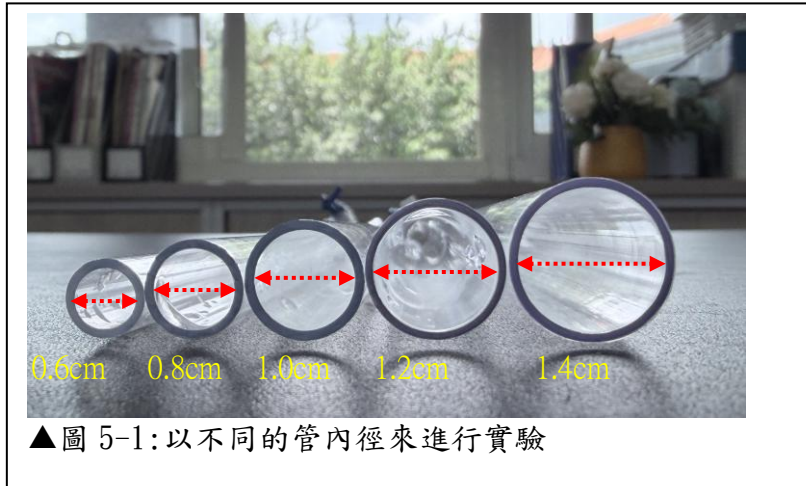
- (1) 隨著液柱高度由 15 cm 增加至 40 cm 時，泰勒氣泡總長度由 2.39 cm 逐漸縮短至 1.29 cm，平均移動速度由 7.20cm/s 增加至 7.85cm/s。
- (2) 說明氣泡長度縮短後，與管壁接觸面積減少，流體阻力降低，使氣泡上升速度略為增加。

【實驗五】閉管條件下，管內徑如何影響泰勒氣泡的生成與運動情形？

（一）研究方法：

1. 設定實驗條件並進行不同管內徑之實驗：

- (1)於閉管狀態下，固定塑膠管長 50 公分，液柱高度 30 公分，打氣幫浦氣量刻度設定為 6，打氣時間 0.1 秒。
- (2)依序替換管內徑為 0.6 公分、0.8 公分、1.0 公分、1.2 公分、1.4 公分，進行實驗。



2. 進氣操作：

使用「第五代可調節式幫浦進氣儀」，將空氣由管底導入裝水之塑膠管中，以產生氣泡。

3. 重複實驗與數據蒐集：

各打氣時間條件下皆重複進行 5 次實驗，並全程錄影。實驗結束後，利用 Tracker 軟體進行影像分析，以判讀相關數據。量測項目包括：

- (1)初始壓力值（以壓力感測器量測）
- (2)塑膠管上端之壓力值（以壓力感測器量測）
- (3)氣泡是否形成泰勒氣泡
- (4)泰勒氣泡總長度
- (5)泰勒氣泡移動速度

（二）研究結果：

表 5-1: **閉管**狀態下，不同管內徑與其各項數值一覽表

(受限於頁數，因此表格中僅呈現 5 次實驗所計得的平均數值。)

閉 管					
項 目	管 內 徑				
	0.6 cm	0.8 cm	1.0 cm	1.2 cm	1.4 cm
氣泡種類	泰勒	泰勒	泰勒	一般	一般
照 片					
平均初始 壓力值(kPa)	9.50	8.52	7.72	7.48	7.38
管上端壓力值(kPa)	9.15	8.16	7.11	5.64	4.13
泰勒氣泡 平均總長度(cm)	2.28	2.02	1.78		
氣泡平均移動 速度(cm/s)	1.04	4.42	7.33		

(三) 研究發現：

1. 管內徑影響系統壓力

- (1)當管內徑由 0.6cm 增加至 1.4cm 時，平均初始壓力值由 9.50kPa 下降至 7.38kPa;管上端壓力值由 9.15 kPa 下降至 4.13 kPa。
- (2)說明**管內徑愈小，流動阻力愈大，使導入的氣體較容易在管內累積壓力；管內徑愈大，管內壓力較不容易累積。**

2. 壓力來源與作用方向影響水位上升

- (1)在本實驗中，當管內徑由 0.6cm 增加至 1.4cm 時，水上升高度由 2.14 cm 下降至 0.71 cm。
- (2)這說明**管內壓力主要來自「打氣所產生的氣體壓力」，其作用方向為由下往上推動水柱。**因此，在越細的管子中因壓力較易累積，對水柱的推動效果較強，使水位上升較高；管徑較大時壓力較低，水位上升較小。

3. 管內徑影響泰勒氣泡的生成條件

- (1)當管內徑 0.6cm~1.0cm 時，可形成穩定泰勒氣泡；當管內徑 1.2cm~1.4cm 時，僅能形成一般氣泡。
- (2)這說明**泰勒氣泡的生成需在適當的管徑範圍內，當管徑過大時，氣液界面無法維持穩定的長條狀結構，使氣泡成為一般氣泡。**

4. 管內徑影響泰勒氣泡長度

- (1)當管內徑 0.6cm~1.0cm 時，泰勒氣泡長度由 2.28 cm 減少至 1.78 cm。

- (2)推論在細管（如 0.6cm）時，管子很窄，氣泡幾乎被「卡住」在管內，只能沿著管子方向上下延伸，所以會形成長條狀的泰勒氣泡；在粗管（如 1.2cm 以上）時，空間變大，氣泡不再被限制，可以往四周擴張（像變胖的樣子），導致長度變短。

5. 管內徑影響氣泡運動速度

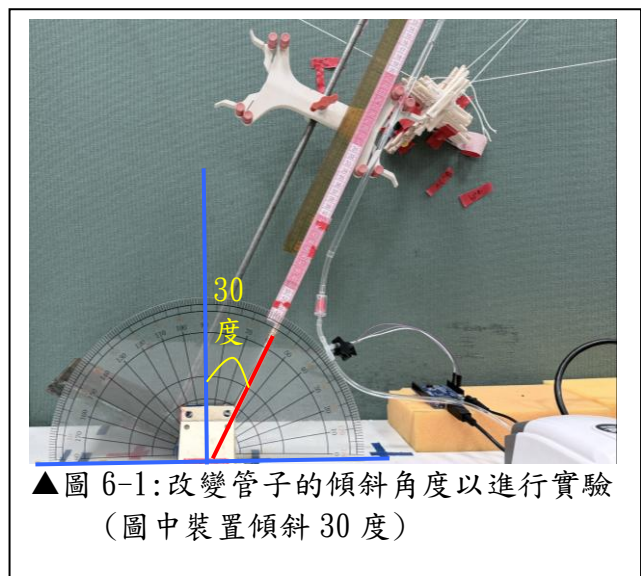
- (1)當管內徑 0.6cm~1.0cm 時，泰勒氣泡移動速度由 1.04cm/s 增加至 7.33cm/s 。
- (2)說明管內徑愈大，氣泡與管壁接觸比例降低，流動阻力減小，使氣泡上升速度增加。

【實驗六】閉管條件下，管子傾斜角度如何影響泰勒氣泡生成與運動情形？

（一）研究方法：

1. 設定實驗條件並進行管子的不同傾斜角度之實驗：

- (1)於閉管狀態下，固定塑膠管長 50 公分，管內徑 0.6 公分，液柱高度 30 公分，打氣幫浦氣量刻度設定為 6，打氣時間 0.1 秒。
- (2)依序調整管子傾斜角度為 5 度、10 度、15 度、30 度、45 度、60 度，進行實驗。



2. 進氣操作：

使用「第五代可調節式幫浦進氣儀」，將空氣由管底導入裝水之塑膠管中，以產生氣泡。

3. 重複實驗與數據蒐集：

各打氣時間條件下皆重複進行 5 次實驗，並全程錄影。實驗結束後，利用 Tracker 軟體進行影像分析，以判讀相關數據。量測項目包括：

(1)氣泡是否形成泰勒氣泡

本研究透過影片與照片進行氣泡型態判讀，依據泰勒氣泡之典型特徵（子彈頭前端、長條狀、接近管徑、具有液膜）建立檢核表，當氣泡符合多數特徵時，即判定為泰勒氣泡。

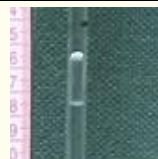
(2)泰勒氣泡總長度

(3)泰勒氣泡移動速度

（二）研究結果：

表 6-1:閉管狀態下，管子不同傾斜角度與其各項數值一覽表

(受限於頁數，因此表格中僅呈現 5 次實驗所計得的平均數值。)

		閉		管		
項 目		泰勒氣泡 檢核項目	氣泡 類型	圖 片	泰勒氣泡 總長(cm)	泰勒氣泡 平均移動速度(cm/s)
傾 斜 角 度	0 度	☒ 前端呈圓滑子彈頭 ☒ 形狀為長條狀 ☒ 幾乎充滿管徑 ☒ 具有液膜	泰勒		2.28	1.04
	5 度	☐ 前端呈圓滑子彈頭 ☒ 形狀為長條狀 ☐ 幾乎充滿管徑 ☐ 具有液膜	一般		2.22	1.20
	10 度	☐ 前端呈圓滑子彈頭 ☒ 形狀為長條狀 ☐ 幾乎充滿管徑 ☐ 具有液膜	一般		2.20	1.57
	15 度	☐ 前端呈圓滑子彈頭 ☒ 形狀為長條狀 ☐ 幾乎充滿管徑 ☐ 具有液膜	一般		2.19	1.93
	30 度	☐ 前端呈圓滑子彈頭 ☒ 形狀為長條狀 ☐ 幾乎充滿管徑 ☐ 具有液膜	一般		2.19	2.51
	45 度	☐ 前端呈圓滑子彈頭 ☒ 形狀為長條狀 ☐ 幾乎充滿管徑 ☐ 具有液膜	一般		2.26	2.71
	60 度	☐ 前端呈圓滑子彈頭 ☒ 形狀為長條狀 ☐ 幾乎充滿管徑 ☐ 具有液膜	一般		2.33	2.39

(三) 研究發現：

1. 只有在管子 0 度(垂直)時，能生成泰勒氣泡。

- (1)管子 0 度（垂直）時，氣泡符合泰勒氣泡所有特徵（子彈頭前端、長條狀、接近管徑、具有液膜）。說明垂直時，氣泡受力對稱（重力方向＝運動方向），可形成穩定「軸對稱結構」。
- (2)管子傾斜 5 度以上，無法同時符合泰勒氣泡的關鍵特徵，特別是「充滿管徑」與「穩定軸對稱形狀」。說明傾斜時，「重力」分解為促進移動的「沿

管方向分力」與造成偏移的「垂直管壁分力」，導致氣泡偏向管壁、形狀不對稱、無法形成完整液膜。

2. 傾斜角度對氣泡長度的影響有限。

(1) 傾斜 0~15 度時，氣泡長度略為下降；傾斜 15~60 度時，氣泡長度略增。

(2) 整體而言，傾斜 0~60 度時，氣泡長度介於 2.19~2.33cm 間，變化不大。

3. 隨管子傾斜角度增加，氣泡移動速度明顯提升，45 度時達到最大值，之後略為下降。

(1) 傾斜 0 度~45 度時，移動速度明顯增加。推論是傾斜後，重力產生沿管方向分力，減少流體阻力的影響，使移動速度提升。

(2) 傾斜 45 度~60 度時，移動速度略為下降。推論是氣泡貼近管壁，與管壁接觸增加，流動阻力上升，導致速度略為下降。

【實驗七】閉管條件下，鹽水的濃度如何影響泰勒氣泡的生成與運動情形？

(一) 研究方法：

表 7-1: 不同鹽水濃度調配方法一覽表

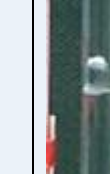
1. 設定實驗條件並進行不同濃度的鹽水之實驗：

(1) 閉管狀態下，固定塑膠管長 50 公分，管內徑 1.0 公分，液柱高度 30 公分，打氣幫浦氣量刻度設定為 6，打氣時間 0.1 秒。

(2) 依序更替管子液體為純水、不同濃度的鹽水(如表 7-1)，進行實驗。

鹽量(g)	水量(g)	總質量(g)	濃度(%)
0	200	200	0 %
18	200	218	8.26 %
36	200	236	15.25 %
54	200	254	21.26 %
72	200	272	26.47 %

(二) 研究結果 表 7-2: 閉管狀態下，不同鹽水濃度與其各項數值一覽表
(受限於頁數，因此表格中僅呈現 5 次實驗所計得的平均數值。)

閉管					
項 目	不同鹽水濃度				
	0 %	8.26 %	15.25 %	21.26 %	26.47 %
氣泡類型	泰勒	泰勒	泰勒	泰勒	泰勒
圖 片					
泰勒氣泡總長(cm)	1.78	1.55	1.44	1.35	1.26
泰勒氣泡平均移動速度(cm/s)	7.32	7.28	7.28	7.28	7.28

(三) 研究發現：

1. 不同鹽水濃度皆可形成泰勒氣泡

各濃度條件下，皆可成功生成泰勒氣泡，說明在適當進氣與閉管條件下，**鹽水濃度並不影響泰勒氣泡是否生成。**

2. 鹽水濃度增加，泰勒氣泡長度呈現減少趨勢

當鹽水濃度由 0% 增加至 26.47% 時，泰勒氣泡總長由 1.78 cm 逐漸下降至 1.26 cm，呈現隨濃度增加而縮短的趨勢。說明**鹽水濃度會影響氣泡的長度。**

3. 鹽水濃度對氣泡移動速度影響不顯著

當鹽水濃度由 0% 增加至 26.47% 時，泰勒氣泡平均移動速度皆約為 7.28～7.32 cm/s，變化幅度極小，顯示在本研究條件範圍內，**鹽水濃度對氣泡運動速度影響有限。**

4. 鹽水濃度增加，液膜厚度增加

由觀察結果可知，隨鹽水濃度提高，氣泡與管壁之間的液膜厚度明顯增加。推測其原因為鹽水濃度增加使液體性質（如黏滯性）改變，使液體更容易**附著於管壁，形成較厚的液膜。**

5. 液膜變厚可能為氣泡長度縮短之原因之一

由上述結果推論，當液膜厚度增加時，氣泡實際可佔據的有效截面積減少，進而使氣泡長度縮短。說明**液膜結構為影響泰勒氣泡形態的重要因素之一。**

【實驗八】閉管條件下，觀察泰勒氣泡的尾流現象。



尾流觀察【示蹤方法】之探究與改良

在進行泰勒氣泡尾流現象的觀察前，為了使氣泡後方的流動結構能被清楚辨識，本研究歷經多次嘗試與調整示蹤方法。

初期曾使用色素、棉線條及亮片等材料，但均無法有效呈現尾流的擾動情形。**經反覆觀察與改良後，改以研磨胡椒粉作為示蹤粒子，就能清楚顯示泰勒氣泡後方的流體運動與循環結構，成功觀察到泰勒氣泡的尾流現象。**

(一) 研究方法：

1. 設定實驗條件並將研磨胡椒粉置入塑膠管中進行觀察：

(1)閉管狀態下，固定塑膠管長 50 公分，管內徑 1.0 公分，液柱高度 30 公分，打氣幫浦氣量刻度為 6，打氣時間 0.1 秒。

(2)於管內液體中加入適量研磨胡椒粉，使其均勻分散於水中，作為流場觀察之示蹤粒子。

(3)啟動「第五代可調節式幫浦進氣儀」，使氣體進入管內形成泰勒氣泡，並觀察泰勒氣泡上升過程。

2. 觀察與紀錄尾流現象：

(1)以肉眼及錄影方式觀察泰勒氣泡上升時，氣泡後方胡椒粉顆粒的運動情形。

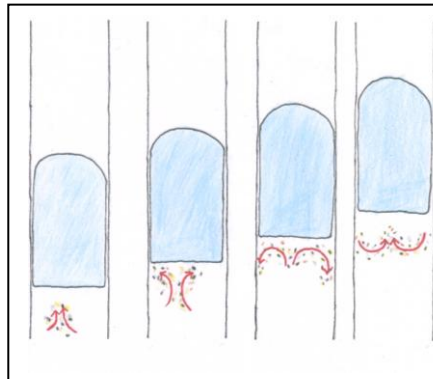
(2)特別關注氣泡尾端是否出現顆粒聚集、迴旋或循環流動等現象，以判斷尾流結構的形成。

(3)重複實驗多次，確認尾流現象之穩定性與一致性。



▲圖 8-1：研磨胡椒粉中。

(二)研究結果



◀圖 8-2：以研磨胡椒粉為示蹤粒子，觀察氣泡尾端兩側的流動方向大致呈對稱分布，形成向上與向下交替的循環流動。

(三) 研究發現：

1. 示蹤粒子選擇對觀察結果具有關鍵影響

相較於色素、棉線及亮片，研磨胡椒粉能隨流體流動且不易沉降，能清楚呈現尾流的細部結構，說明適當的示蹤粒子是觀察流體現象的重要關鍵。

2. 泰勒氣泡後方存在明顯的尾流循環結構

藉由研磨胡椒粉為示蹤粒子，從實驗影片可清楚觀察到，泰勒氣泡上升過程中，其尾端後方會形成規律的流體循環，呈現類似渦流的流動型態，顯示氣泡運動會帶動周圍液體產生持續性的流動結構。(圖 8-2)。

3. 尾流可能影響氣泡後方流體混合與運動行為

由示蹤粒子的運動軌跡可知，尾流會帶動氣泡後方液體產生循環與擾動，推測此現象可能促進流體混合，並對氣泡整體運動行為產生影響。

陸、結論

一、成功研發能改變進氣條件的「可調節式幫浦」進氣儀，提升實驗穩定性與可控性。

在實驗一中，成功設計並製作「可調節式幫浦進氣儀」，可精確控制「進氣量」與「進氣時間」，有效降低人為操作誤差，使氣泡形成條件具高度穩定性與可重複性，並確保各項實驗能在一致條件下進行比較，進而提升研究結果的可靠性與分析的有效性。

二、成功掌握「泰勒氣泡」形成條件，能在實驗中穩定生成典型泰勒氣泡。

【實驗二】至【實驗六】中，改變進氣量、管內壓力（開管／閉管）、液柱高度、管徑、管子傾斜角度及液體濃度等因素，成功找出形成泰勒氣泡的關鍵條件。

結果顯示，在適當進氣量（刻度6）與閉管條件下，搭配適切的液柱高度、管內徑與液體性質，可穩定生成具有「子彈頭前端、長條狀、接近管徑、具有液膜與尾流」之典型泰勒氣泡，

三、泰勒氣泡的形成與運動為多重因素交互作用之結果

研究發現泰勒氣泡非由單一因素決定，而是多項物理條件共同影響之結果，包含：

（一）在形成條件方面

1. 【實驗二】顯示進氣量與管內壓力為關鍵因素，適當進氣量（打氣幫浦刻度6）有助於形成典型泰勒氣泡。。
2. 【實驗三】顯示打氣時間主要影響泰勒氣泡的「數量」與「長度」。
3. 【實驗七】顯示隨鹽水濃度提高，使液體性質（如黏滯性）改變，使液體更容易附著於管壁，形成較厚的液膜。

（二）在運動行為方面

【實驗二】至【實驗六】中，觀察到泰勒氣泡在上升過程中呈現穩定且規律的運動行為，並以近似固定的速度泰然升起，彷彿在液體中展現其獨特而優雅的流動姿態！

四、液柱高度、管徑與液體濃度會透過物理機制影響氣泡特性

1. 【實驗四】顯示液柱高度增加 → 靜水壓力上升 → 泰勒氣泡受壓縮變短 → 流動阻力降低 → 移動速度略為增加。
2. 【實驗五】顯示管徑增加 → 側向空間限制減弱 → 氣體向周圍擴散 → 不易維持長條狀結構 → 長度變短。

3. 【實驗七】顯示液體濃度增加→黏滯性提高→流體流動較緩→有助於穩定氣泡外型，但不影響氣泡上升速度。

顯示壓力、空間限制與流體性質（黏滯性）是影響泰勒氣泡的重要控制因子。

五、管子傾斜角度會影響泰勒氣泡的穩定性與型態

【實驗六】顯示當管子產生傾斜時，氣泡逐漸偏離典型泰勒氣泡特徵（如液膜與完整形狀），顯示重力方向與流動對稱性對於維持泰勒氣泡結構具有關鍵影響。

六、成功觀察並解析泰勒氣泡尾流現象

【實驗八】透過研磨胡椒粉作為示蹤粒子，本研究清楚觀察到氣泡尾端具有對稱的循環流動結構，呈現上下交替的流動型態。尾流會帶動周圍液體產生擾動與循環，推測此現象可促進流體混合，並影響氣泡整體運動行為。

玖、未來展望

本研究已成功探討影響泰勒氣泡形成與運動行為之多項因素，並建立穩定的實驗系統，未來想朝以下方向進一步深化與拓展研究：

一、探討更多流體性質對氣泡行為的影響

未來想進一步改變液體的黏滯性、表面張力及密度（例如使用不同濃度糖水、甘油溶液等），以深入了解流體性質如何影響泰勒氣泡的形成條件與穩定性。

二、探討不同幾何條件下的氣泡行為

本研究以直管為主要研究環境，未來想進一步探討不同管道形狀（如三角形管、六角形管…）、不同材質或粗糙程度對氣泡運動的影響，以更貼近實際應用情境。

捌、參考資料

1. Taylor, G. I. (1961). Deposition of a viscous fluid on the wall of a tube. *Journal of Fluid Mechanics*, 10(2), 161–165.
2. 全國第 50 屆科展國中組生活與應用科學科作品~水舞太極之氣泡聲光魔幻秀。
3. 全國第 54 屆科展國中組物理科作品~躍動~水中上升氣泡左右振盪之探討。
4. 全國第 57 屆科展國小組物理科作品~讓「氣泡」說話。
5. 全國第 62 屆科展國小組物理科作品~「顯像」環生一環形氣泡產生方法及變因之研究。