

# 中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

高級中等學校組 物理與天文學科

(鄉土)教材獎

051819

懸浮微粒 PM2.5 擴散作用研究

學校名稱：新北市私立南山高級中學

作者： 高二 林楷博 高二 莊至翰 高二 黃怡甄	指導老師： 黃大桀 高溥聲
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：懸浮微粒、擴散、雷射

## 壹、 摘要

本實驗以懸浮微粒 PM2.5 擴散作用為主題，將實驗結果做計算找出擴散作用的半衰期 ( $\tau_{1/2}$ )，將擴散快慢以時間尺度來表現；此外，同時測量懸浮微粒 PM10，其行為表現與懸浮微粒 PM2.5 相似。實驗過程分為四個部分，分別改變體積、溫度、風向與開窗方式來進行。結果顯示體積與半衰期呈現正相關；溫度越高，半衰期越短；有風環境中半衰期較小且與風向角度有關；開窗面積相同情況下，側邊單開的半衰期較中間單開小，而中間對開的半衰期較側邊斜對開小。在所有開窗方式中，中間單開的半衰期最長，而中間對開半衰期最短。最後，為了讓懸浮微粒的研究可以在更多中小學實驗室中進行，利用實驗室常見的器材（雷射和鏡子）建構一個可以測量懸浮微粒相對濃度的方法。

## 貳、 研究動機

在我們的日常生活中，除了有交通排放及火力發電的廢氣會造成 PM2.5 的產生外，室內中，廚房油煙、傳統家庭每日所必須點的線香和抽菸等等現象也會使室內的 PM2.5 上升。而空氣中 PM2.5 的平均濃度越高，導致肺癌、中風、缺血性心臟病、慢性肺病的相對風險上升。因此，盡快地將有害物質排出室內就是一件重要的事情，於是，我們想藉由不同的體積大小、開窗方式、風向與溫度這四種變因來探討其關聯性，並設計相關實驗。為了讓更多學生可以觀測懸浮微粒，利用懸浮微粒對光線散射的特性，找出一個簡單的測量方法。

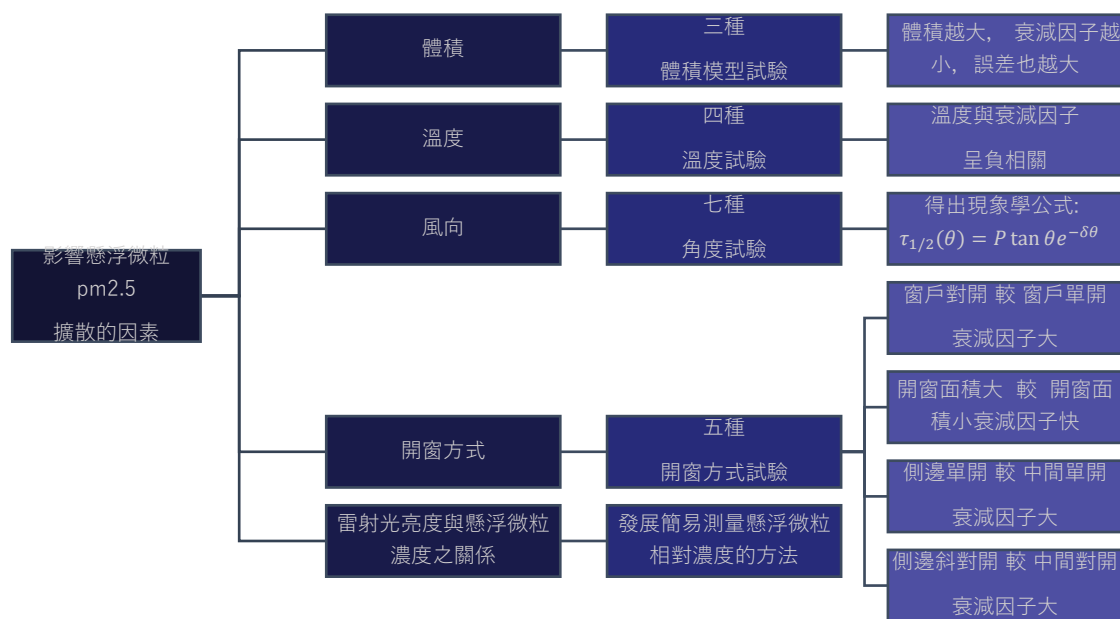
## 參、 研究目的

近年來國際衛生組織警示懸浮微粒對呼吸系統和心血管系統有顯著危害。利用中學課程中常使用的 Arduino 偵測模組進行懸浮微粒濃度的探測，建築物的大小和開窗方式是影響懸浮微粒擴散的重要因素；此外，環境溫度以及風向條件亦會造成擴散速度改變。利用縮小建築物模型進行實驗，期望得到懸浮微粒擴散速度與上述變因之間的關係從而建立建築物設計的依據。

此外在空間龐大的狀況下，若僅使用單一懸浮微粒感測器，感測空間內的微粒濃度變化，

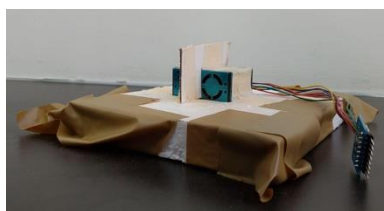
在長期監測下雖具有代表性，但是相信空間內的不同位置仍有所偏差，若要在空間中使用大量感測器則價格難以負擔，技術難度也較高。所以想嘗試發展測量懸浮微粒濃度的簡易方法，期許能夠在有限資源下做為日後測量懸浮微粒相對濃度變化的參考依據。

## 肆、 實驗架構



## 伍、 研究設備與器材

### 一、 實驗儀器



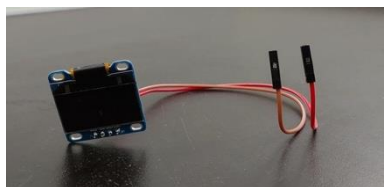
PMS5003 懸浮微粒感測器



樹梅派控制電腦



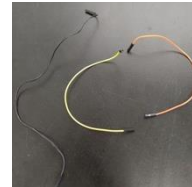
直流電源供應器



顯示器



風扇



ARDUINO 杜邦線

延長線、PP板、打火機、封箱膠帶、線香、木板、平面鏡、藍光雷射

## 二、模型

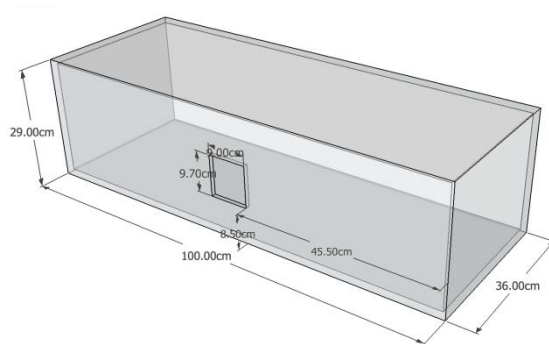
### (一) 模型尺寸大小

組別	B	C	D	實際教室
長(cm)	69	100	138	1000
寬(cm)	20	29	40	290
高(cm)	25	36	50	360

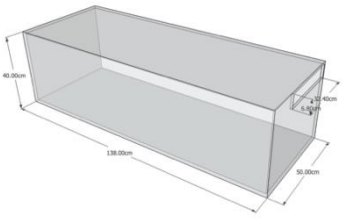
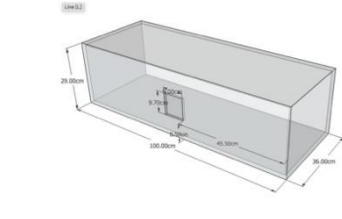
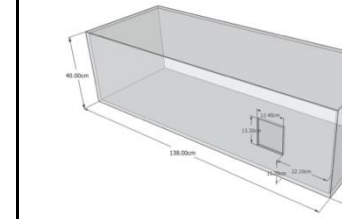
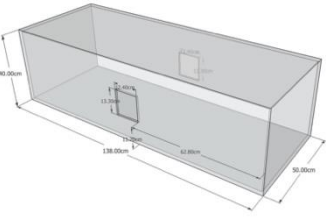
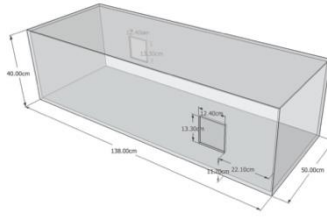
### (二) 開口示意圖

實驗一：模型 B

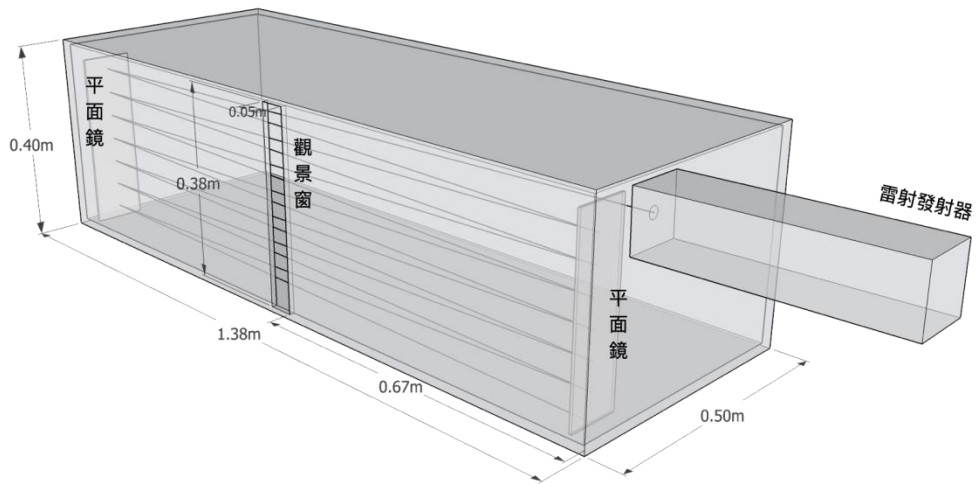
實驗二、三：模型 C



實驗四：(模型 D)

			
天窗 (001 組)	中間單開 (002 組)	側邊單開 (003 組)	
			
中間對開 (004 組)		側邊對開 (005 組)	

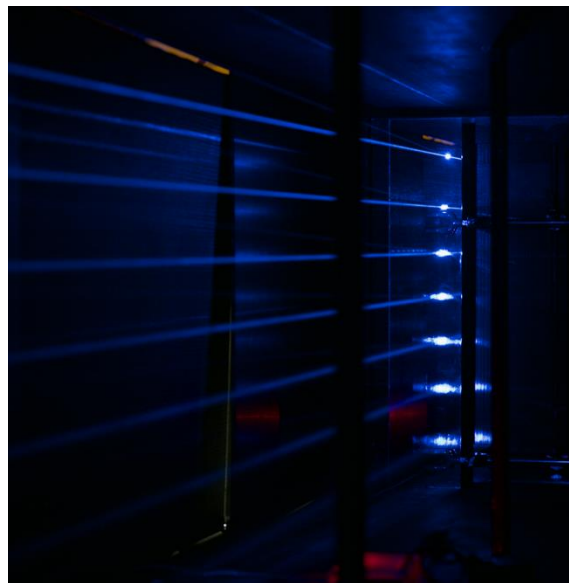
### (三) 雷射光束對懸浮微粒散射裝置圖



在模型中平行放置兩平面鏡（35cm × 10cm），讓雷射光束在兩平面鏡間產生數次反射。真實裝置圖如下圖。



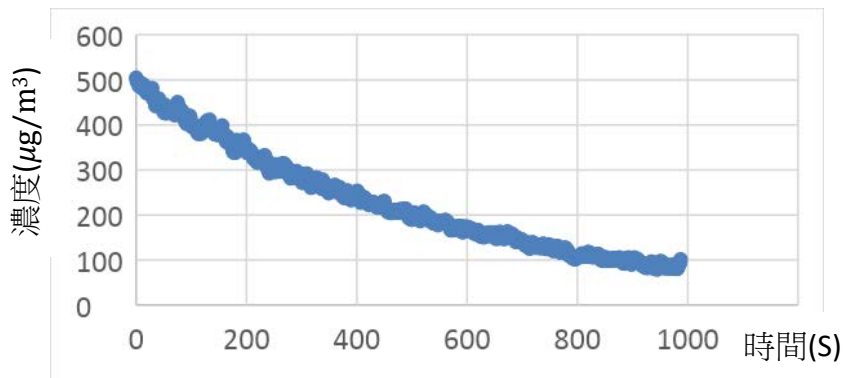
實驗裝置圖 1



實驗裝置圖 2

## 陸、 實驗理論背景

以一維氣體擴散為例，設一濃度函數為 $u(x, t)$ ，氣體擴散方程式為 $\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ 。利用分離變數法，設 $u(x, t) = A(x) \cdot B(t)$ 代入擴散方程式，解出 $u(x, t) = A(x) \cdot e^{-ct}$ 。由於偵測器沒有改變位置，因此 $A(x)$ 可視為常數。當 $t = 0$ 時， $A(x)$ 等於常數，視為初始濃度；濃度函數可以重新表達成 $u(t) = Ae^{-ct}$ 。典型的氣體擴散實驗中，濃度隨時間變化的關係圖如下圖。



PM2.5 濃度隨時間變化的關係圖

假設濃度降為初始濃度一半所需的時間為半衰期 ( $\tau_{1/2}$ )，利用半衰期可以更直觀地表達氣體擴散的快慢關係。根據理論計算，半衰期公式為 $\tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{c}$ 。

## 柒、 實驗方法

### A. 偵測裝置架設

- a. 架設懸浮微粒感測器於模型中央，並將偵測口朝向與開窗連線垂直的方向。
- b. 利用應用程式（遠端桌面連線）控制樹梅派電腦，利用 python 程式語言控制懸浮微粒感測器，使偵測數值直接寫入 csv 檔。

### B. 模型調整

- a. 調整開窗方式，用紙檔住洞口並在旁邊用封箱膠帶封住縫隙。

### C. 懸浮微粒模擬

- a. 將線香點燃後伸入模型內，使模型內有煙，模擬實際的懸浮微粒。

### D. 靜待至模型內的煙分佈均勻

- a. 利用偵測器判斷是否均勻，若數值浮動在正負 5%內且持續五分鐘以上，我們判定此情況為分佈均勻。

### E. 打開模型窗戶，開始偵測濃度值，直到數值小於 $60\mu\text{g}/\text{cm}^3$ 以下，停止實驗。

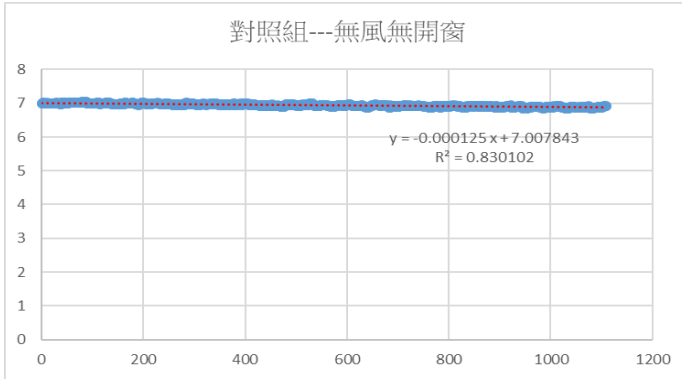
### F. 將內有實驗數據的 csv 檔利用應用程式（FileZilla）抓出樹梅派，選取 $500\mu\text{g}/\text{cm}^3$ 至 $100\mu\text{g}/\text{cm}^3$ 的數值並繪製成濃度與時間的關係圖。

### G. 將數值取完自然對數後再做一張和時間的關係圖，以線性函數擬合後探討方程式係數的含意。

# 捌、 實驗結果

## 一、 實驗對照組

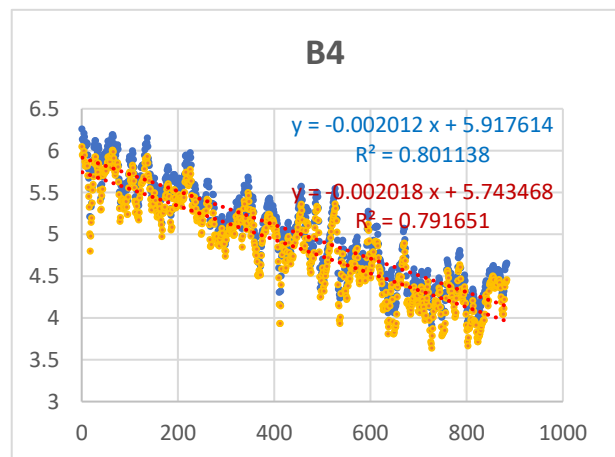
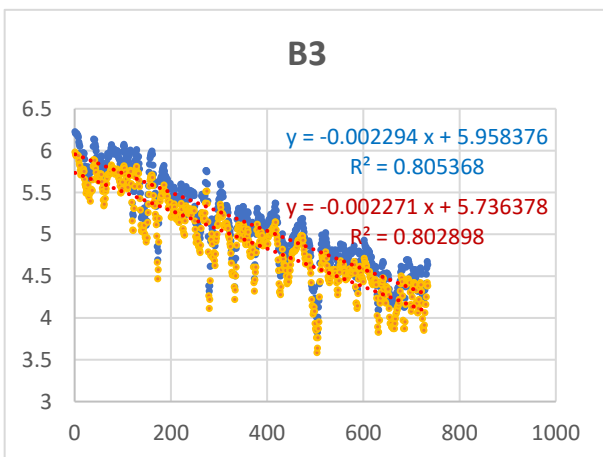
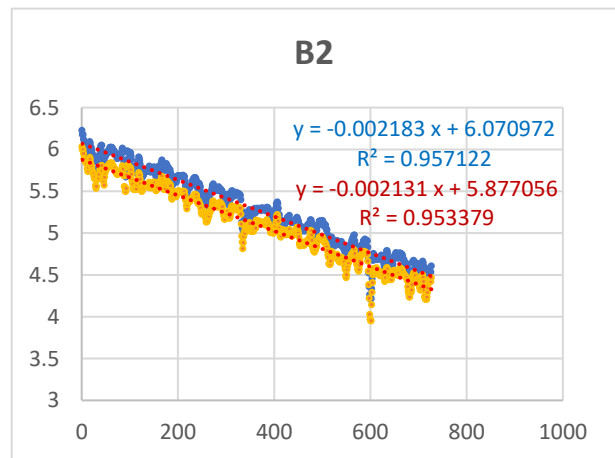
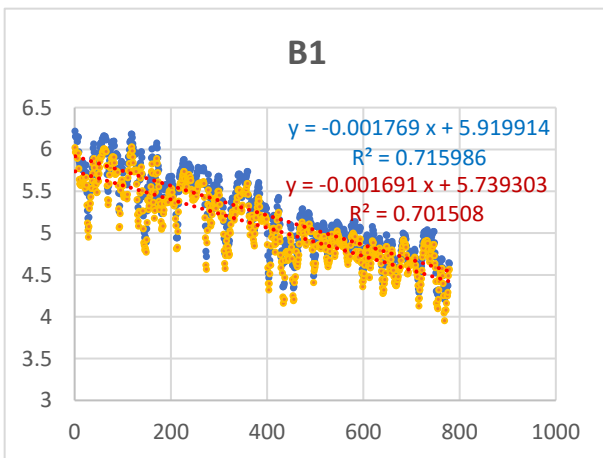
對照組（無開窗）：橫軸為時間（s），縱軸為濃度（ $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ）



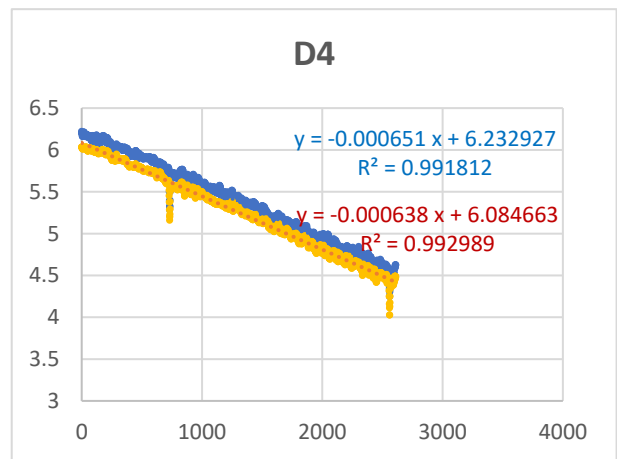
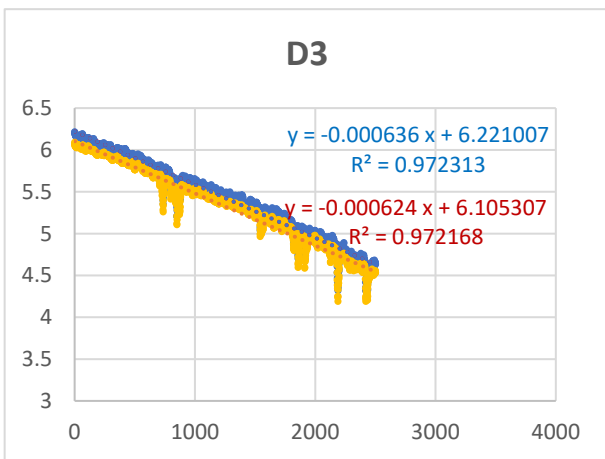
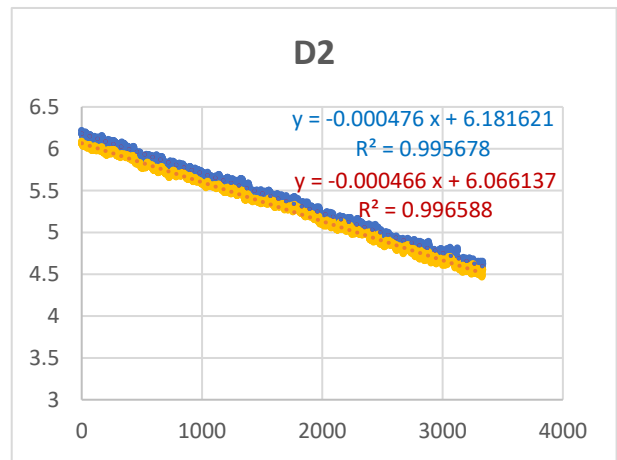
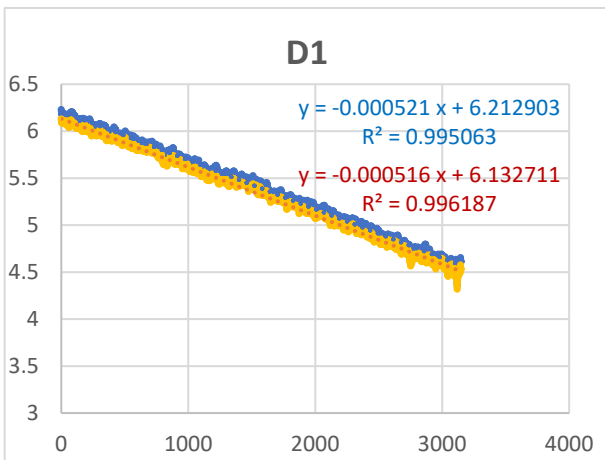
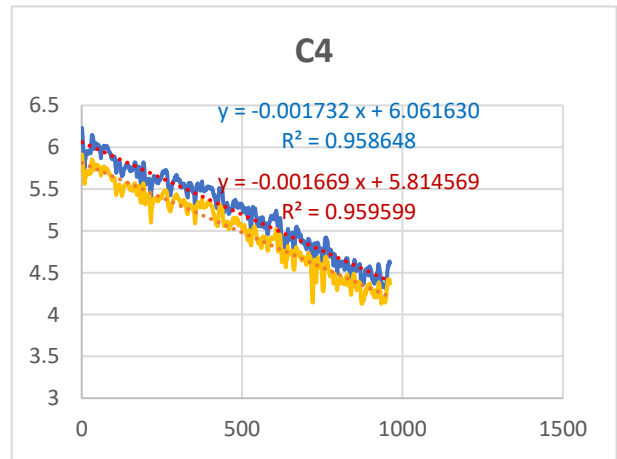
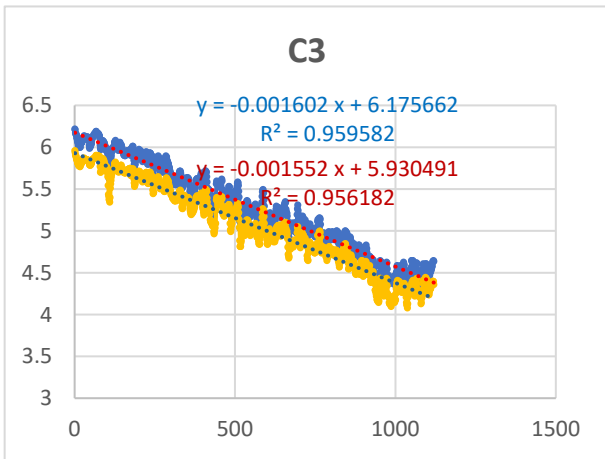
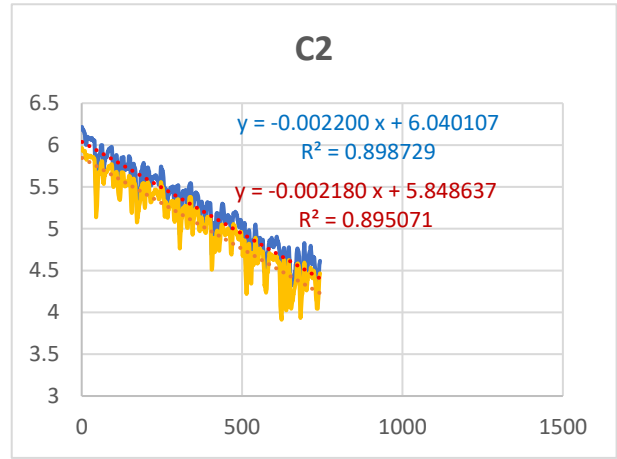
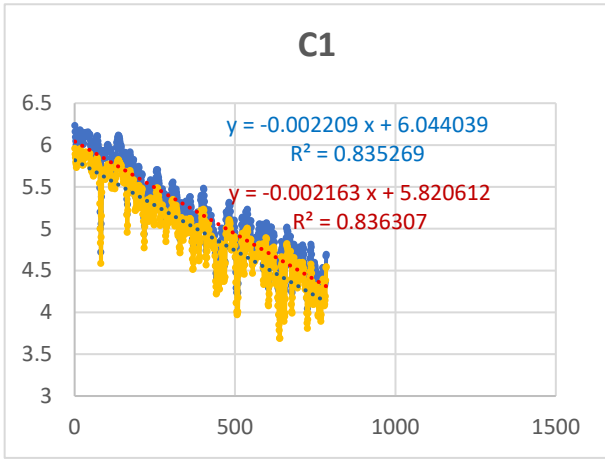
在無開窗的情況下，PM2.5 的濃度幾乎不變，說明空間在密閉的情況下懸浮微粒不會朝外界擴散。擬合方程式會有很小的負斜率，是因為容器無法達到完美密閉的條件所致。

## 二、 實驗一：體積與半衰期之關係

利用不同體積的模型、同一開窗方式觀察其半衰期的關係：橫軸為時間（s），縱軸為濃度（ $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ）。下圖中，藍色為懸浮微粒 PM2.5 的數據，黃色為懸浮微粒 PM10 的數據。



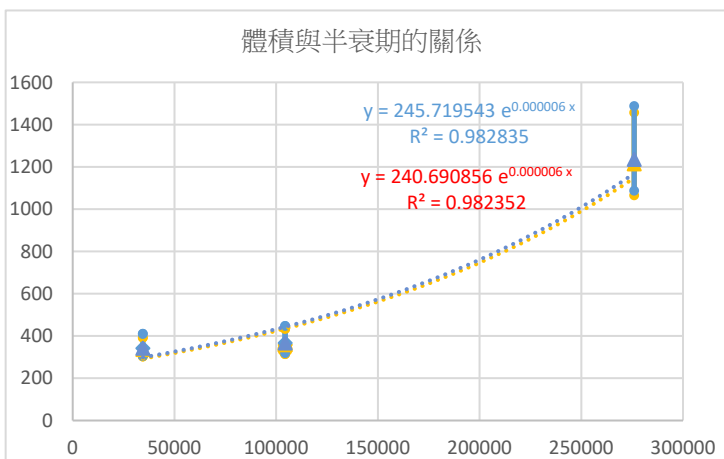




半衰期 (PM2.5)	B 組	C 組	D 組
平均(s)	339.00	365.43	1235.30
標準差(s)	39.33	60.37	189.81

半衰期 (PM10)	B 組	C 組	D 組
平均(s)	345.97	375.08	1257.00
標準差(s)	45.40	65.78	192.37

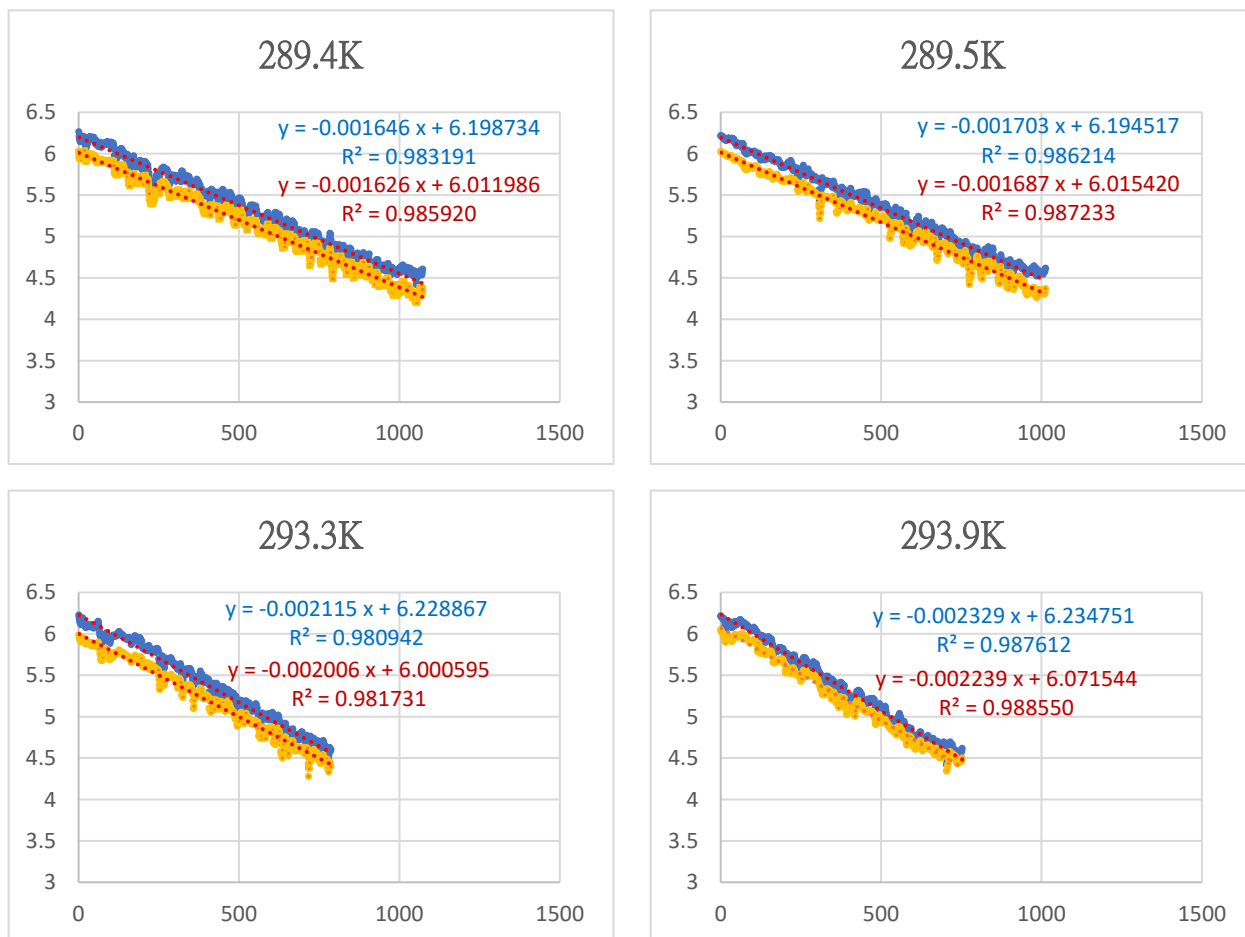
實驗一結論：橫軸為容器體積 ( $\text{cm}^3$ )，縱軸為半衰期 (s)



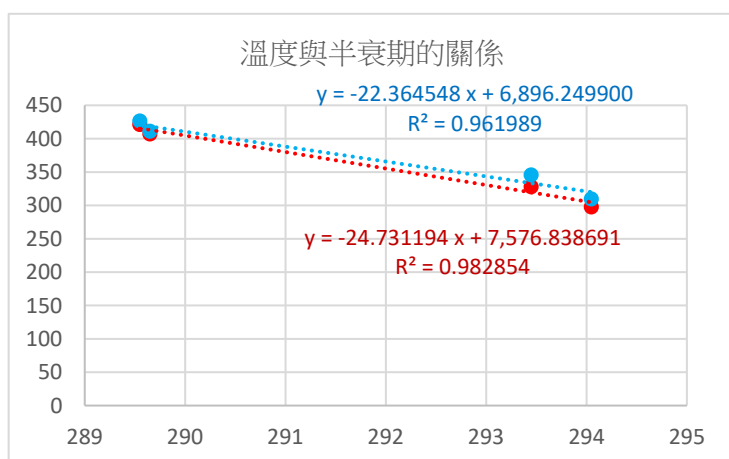
- 體積較小的實驗組其誤差較大，因為總微粒量較少且擴散較快，些許的擾動會大幅影響衰減因子，需增加實驗數減少誤差。
- 用指數形式的趨勢線會得到良好的擬合效果，擬合公式的形式為  $\tau_{1/2}(V) = \alpha e^{\beta V}$ 。
- 體積在無限大時，半衰期趨近於無限大，因此推判此趨勢線是正確的。需要透過增加實驗組數確認擬合公式的正確性。

### 三、 實驗二：溫度與半衰期之關係

利用同一模型及開窗方式、不同溫度觀察其半衰期的關係：橫軸為時間 (s)，縱軸為濃度 ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )。下圖中，藍色為懸浮微粒 PM2.5 的數據，黃色為懸浮微粒 PM10 的數據。



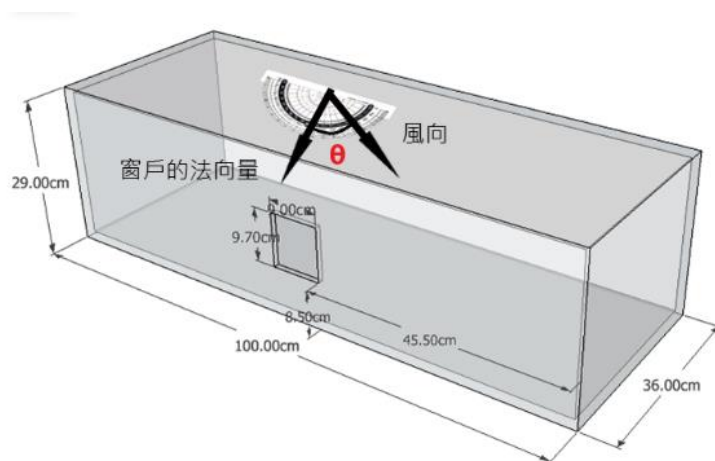
實驗二結論：橫軸為溫度 (K)，縱軸為半衰期 (s)



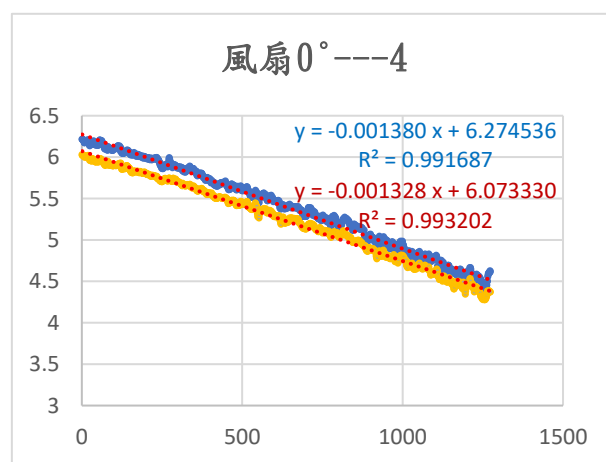
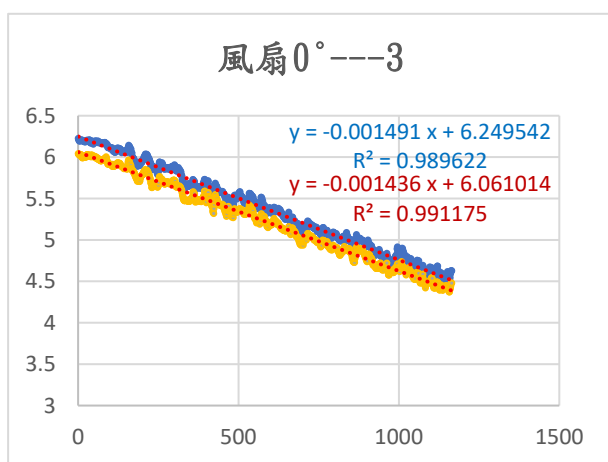
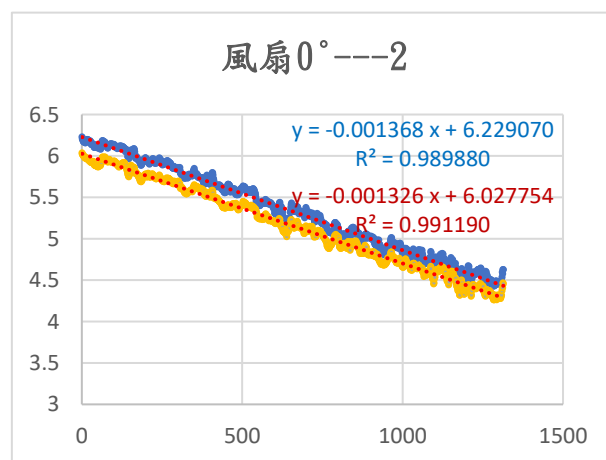
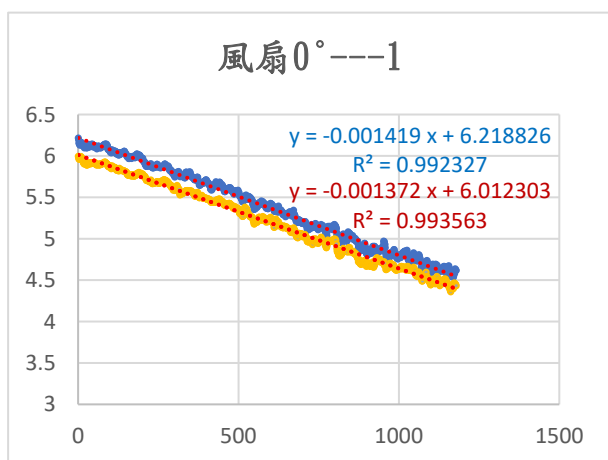
- 趨勢線斜率為負值，符合理論符合我們對實驗的預期，溫度越高，半衰期越短。
- 根據理論計算（菲克公式），我們的實驗與理論公式有相同的趨勢，但數值誤差較大。
- 推判此趨勢線非常接近真實情況，需增加實驗組數和實驗數提高準確度。

#### 四、實驗三：風向與半衰期之關係

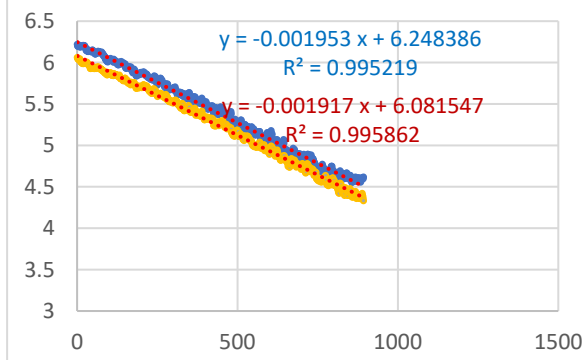
利用風扇模擬環境風，改變風向並觀察其半衰期的變化（風扇距離窗口 18 公分）：橫軸為時間 (s)，縱軸為濃度 ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )。下圖中，藍色為懸浮微粒 PM2.5 的數據，黃色為懸浮微粒 PM10 的數據。



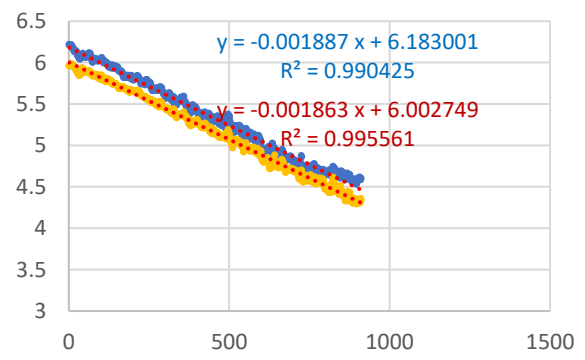
風向與窗戶法向量關係圖



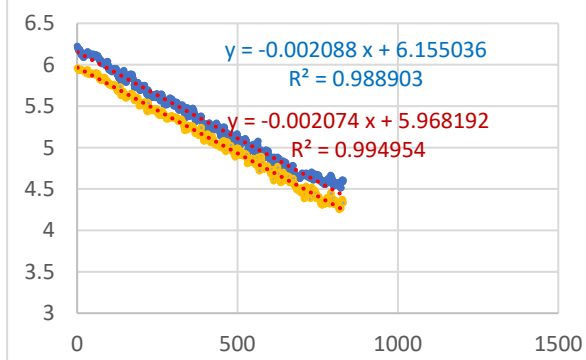
風扇15°---1



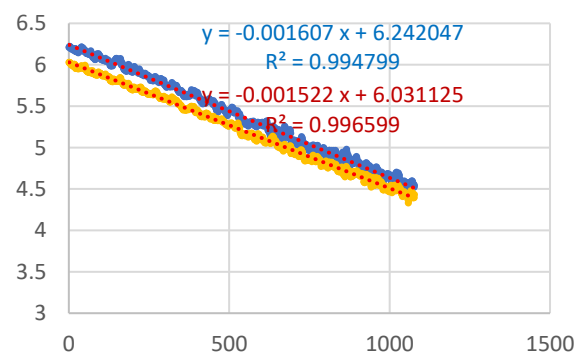
風扇15°---2



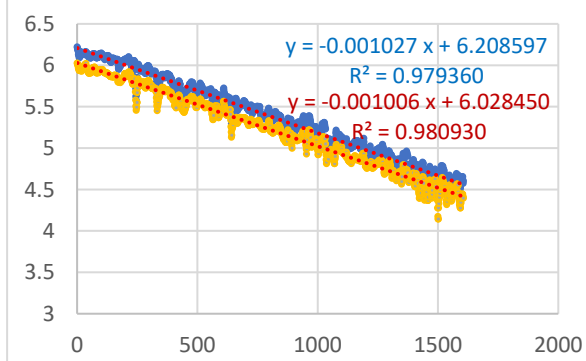
風扇15°---3



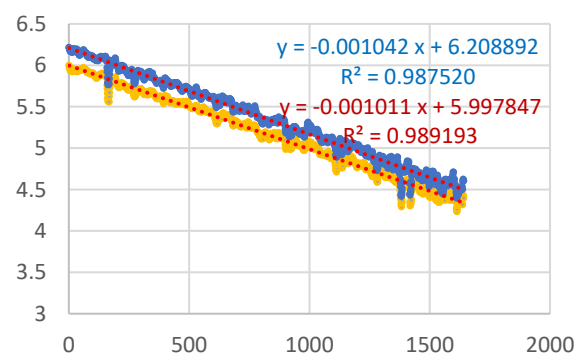
風扇15°---4



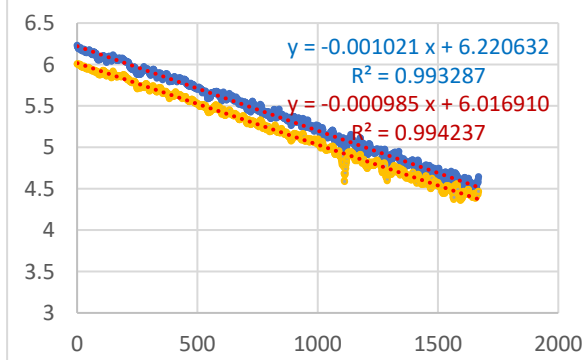
風扇30°---1



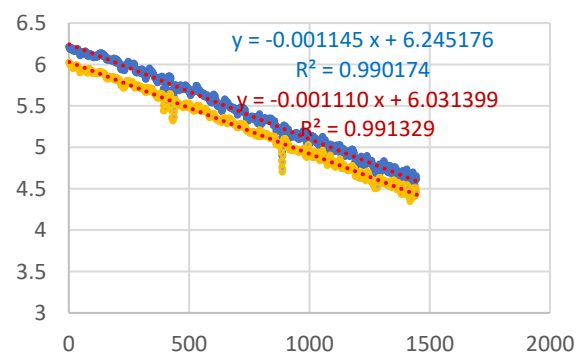
風扇30°---2



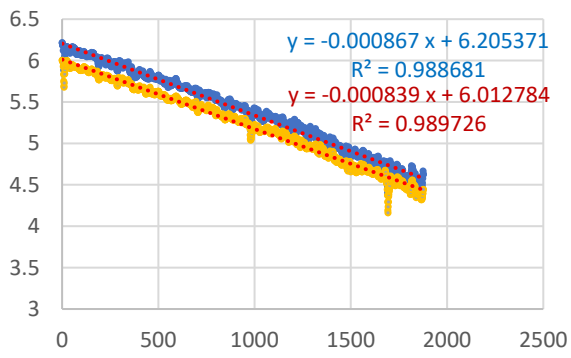
風扇30°---3



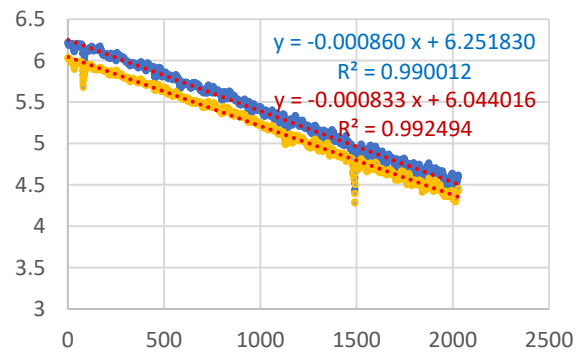
風扇30°---4



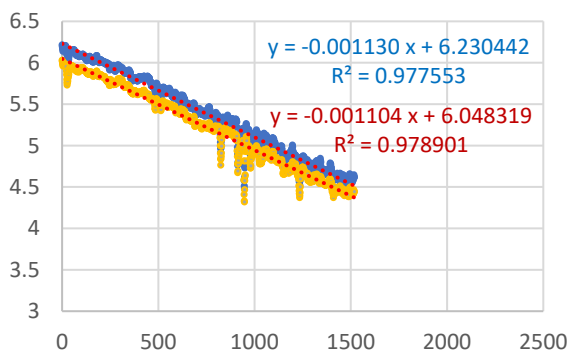
風扇45°---1



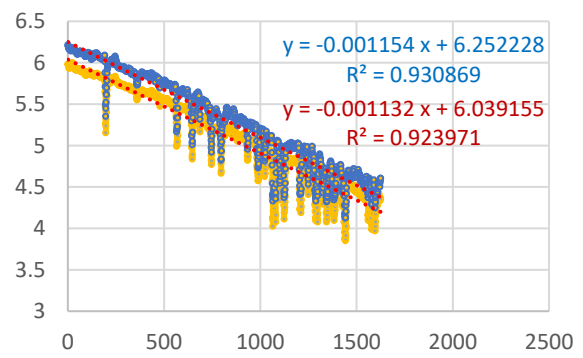
風扇45°---2



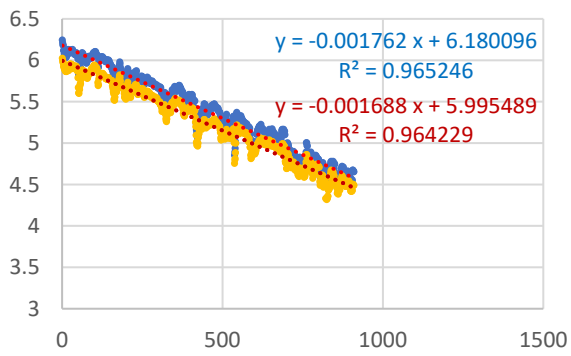
風扇45°---3



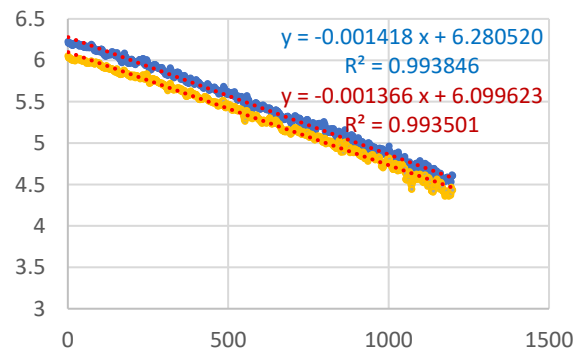
風扇45°---4



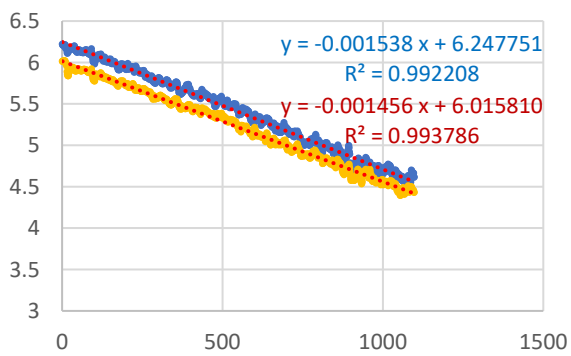
風扇60°---1



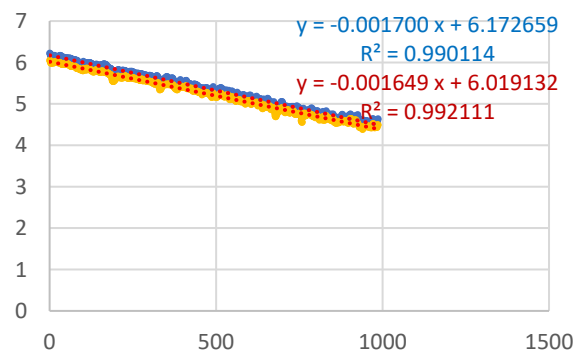
風扇60°---2

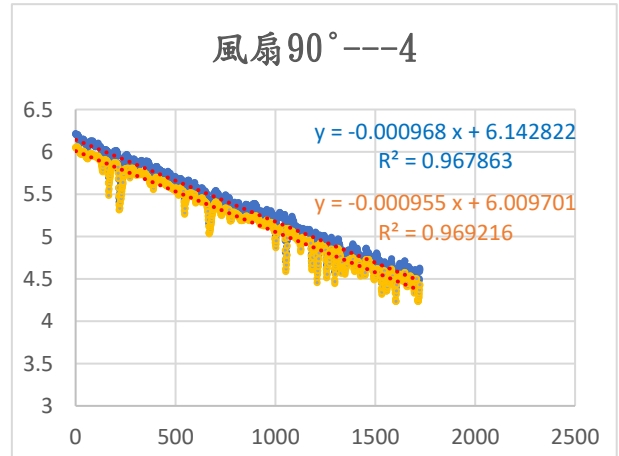
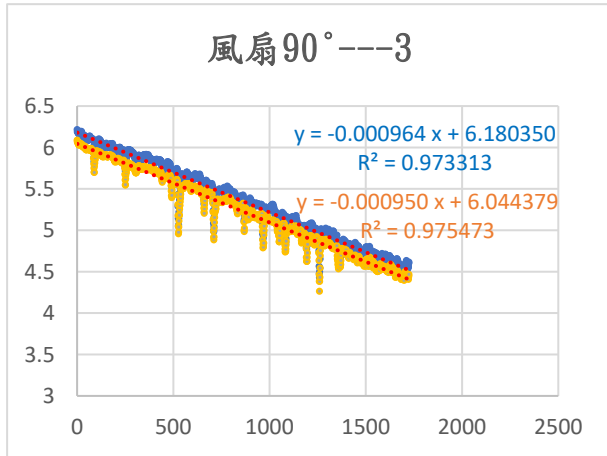
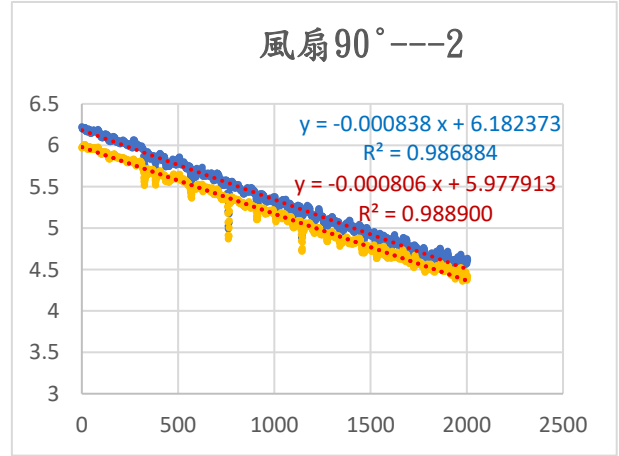
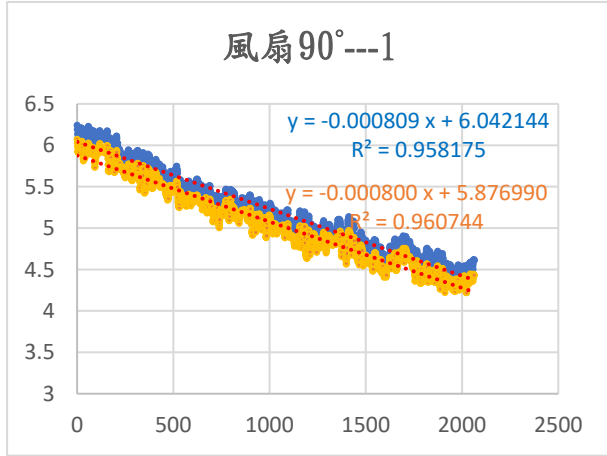
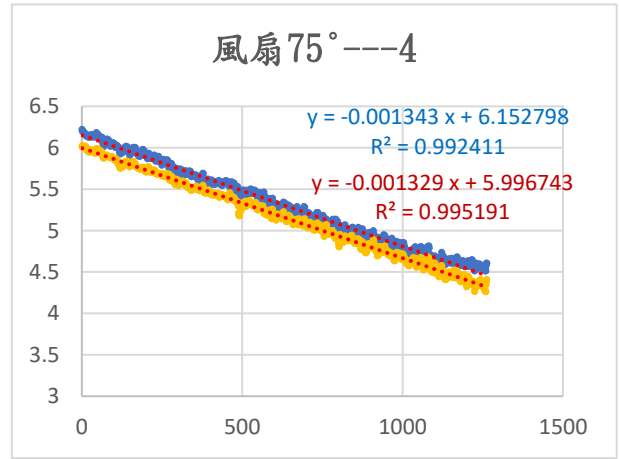
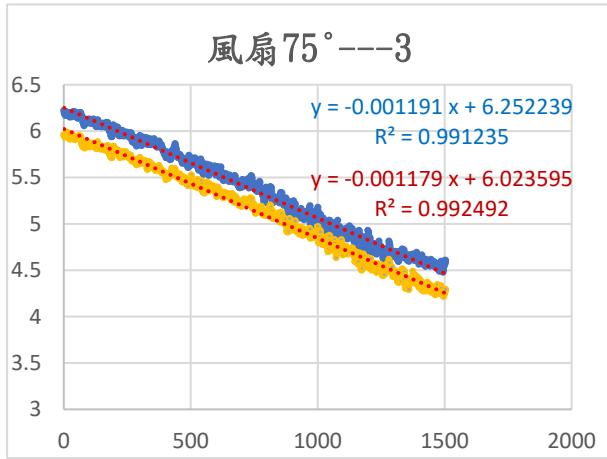
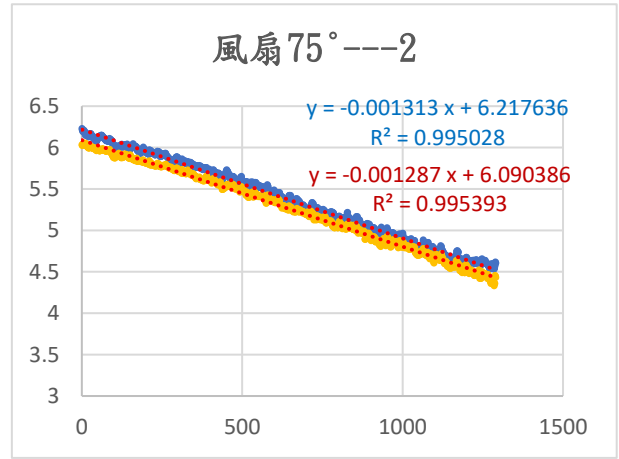
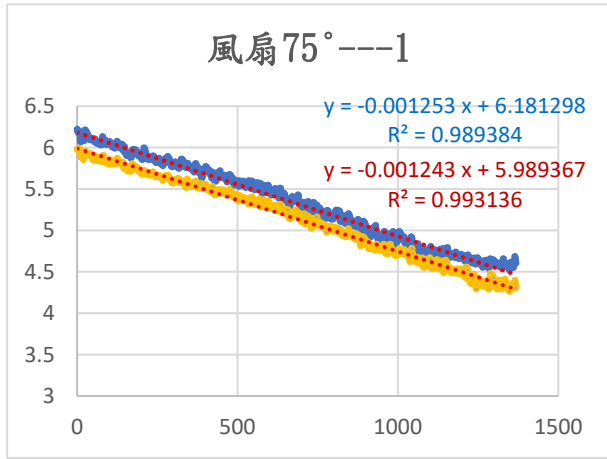


風扇60°---3



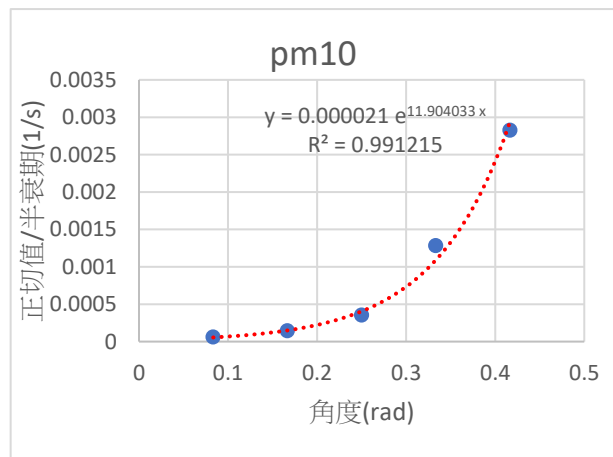
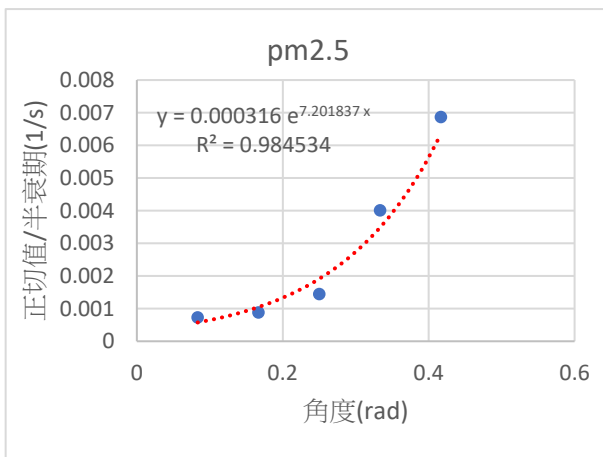
風扇60°---4





半衰期 (PM2.5)	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
平均(s)	779.76	544.80	435.16	704.88	656.10	371.38	490.58
標準差 (s)	72.86	29.22	43.27	113.14	34.30	42.56	18.80

半衰期 (PM10)	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
平均(s)	795.46	551.42	453.62	724.61	675.70	380.82	508.15
標準差 (s)	78.26	28.44	46.02	120.88	35.05	52.23	18.80



實驗三結論：

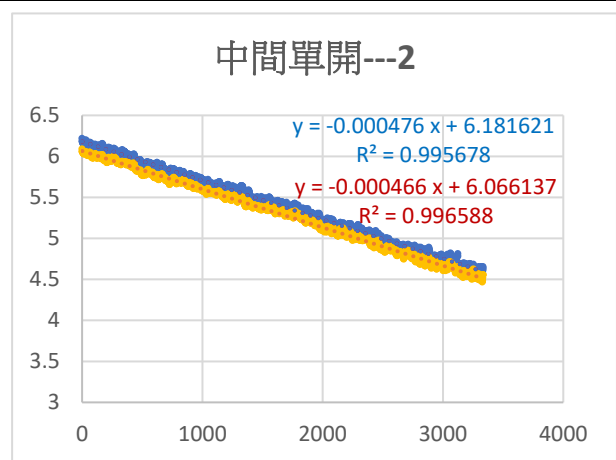
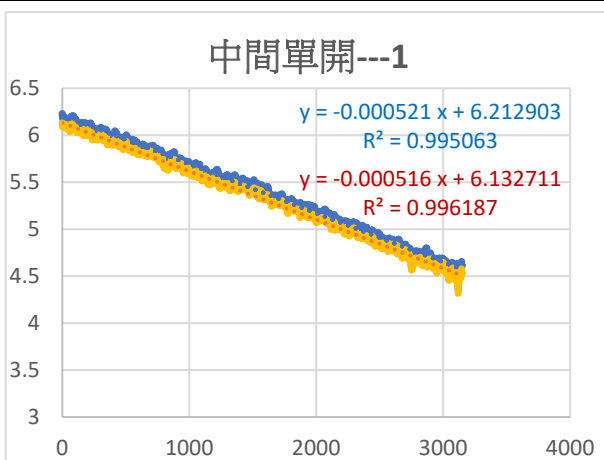
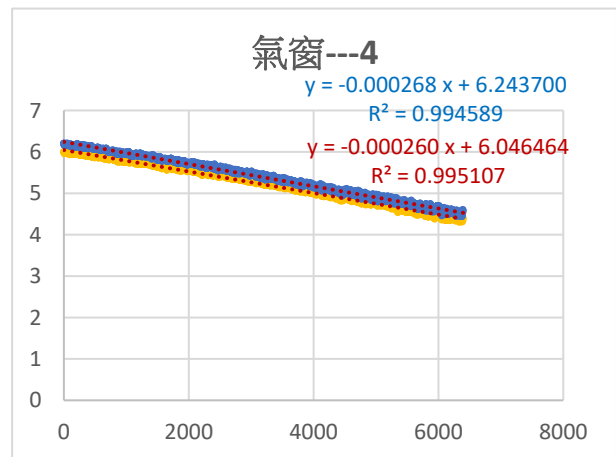
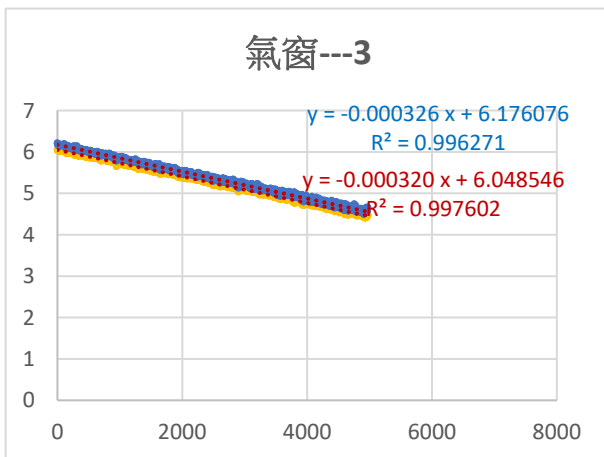
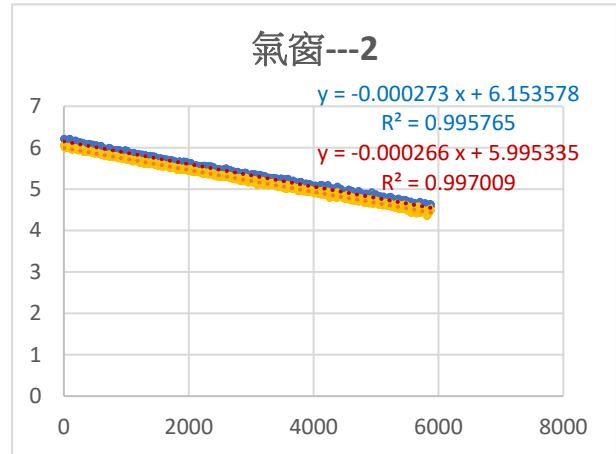
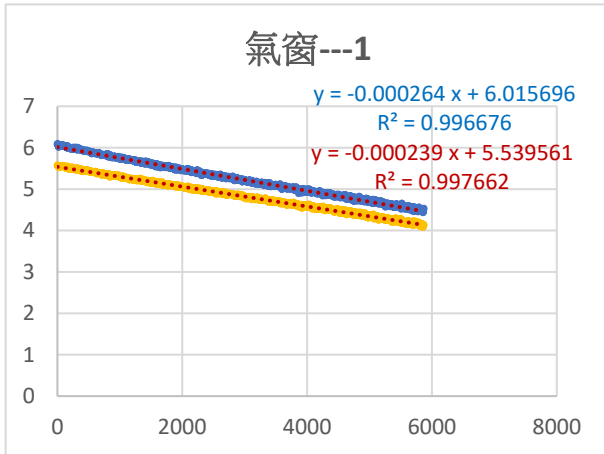
- 推測半衰期會與窗戶法向量和風向夾角的正切值有關，當半衰期倒數除以夾角正切值會呈現指數關係。
- 經驗公式為  $\tau_{1/2}(\theta) = P \tan\theta e^{-\delta\theta}$ ， $\delta$ 及  $P$ 為一常數，需增加實驗組別確認及調整。



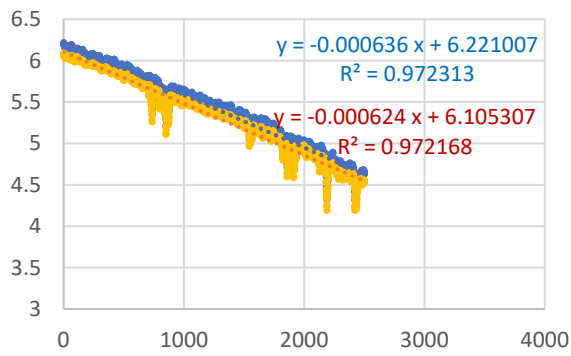
### 五、實驗四：不同開窗方式與半衰期之關係

利用不同開窗方式，觀察其半衰期的變化：橫軸為時間 (s)，縱軸為濃度 ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )。

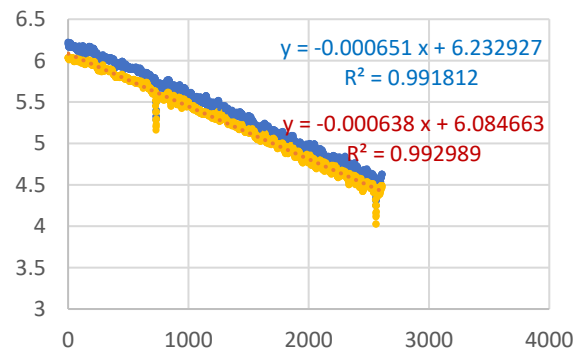
下圖中，藍色為懸浮微粒 PM2.5 的數據，黃色為懸浮微粒 PM10 的數據。



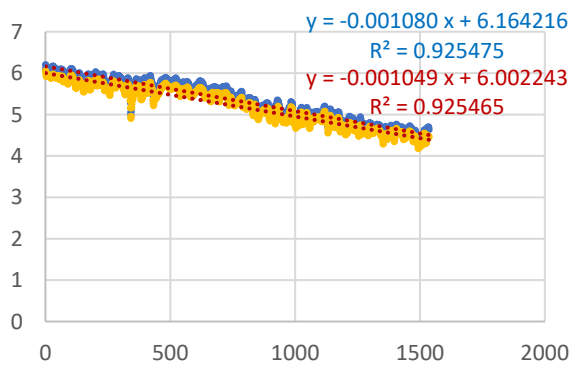
中間單開---3



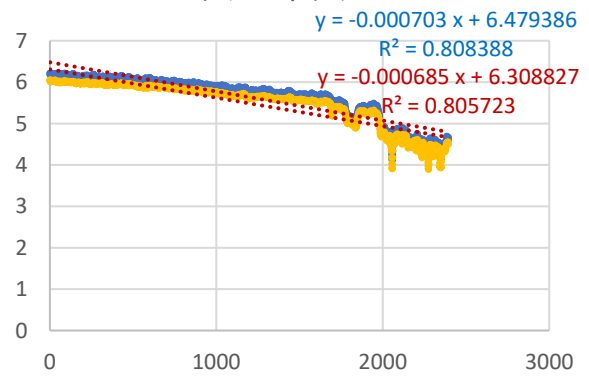
中間單開---4



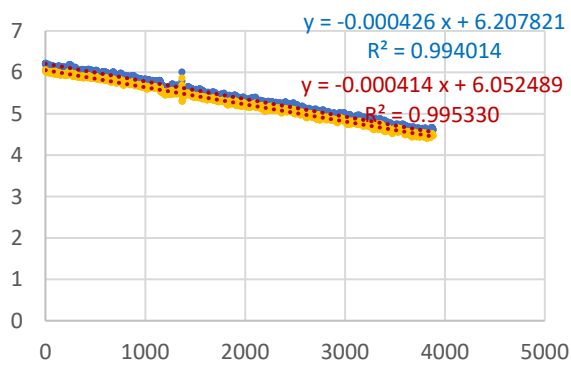
側邊單開---1



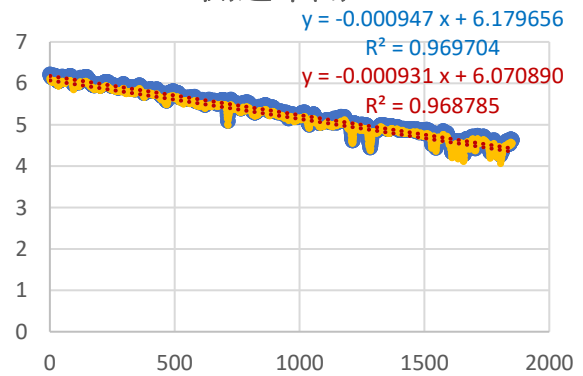
側邊單開---2



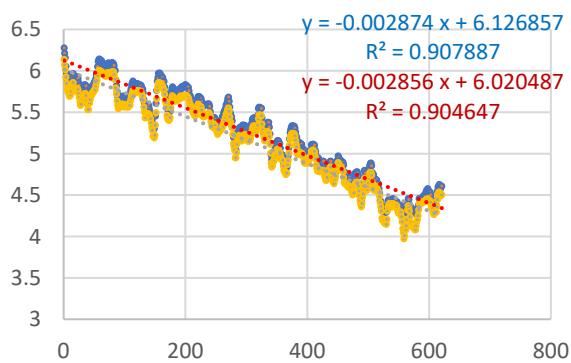
側邊單開---3



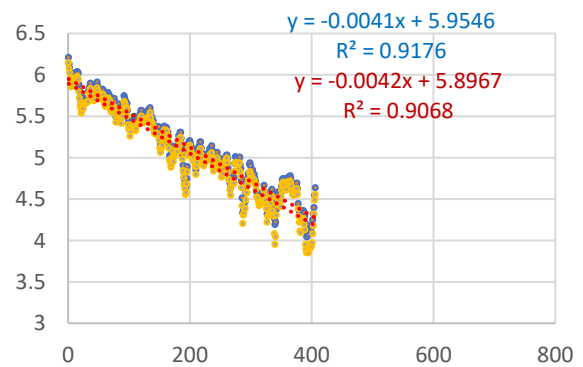
側邊單開---4

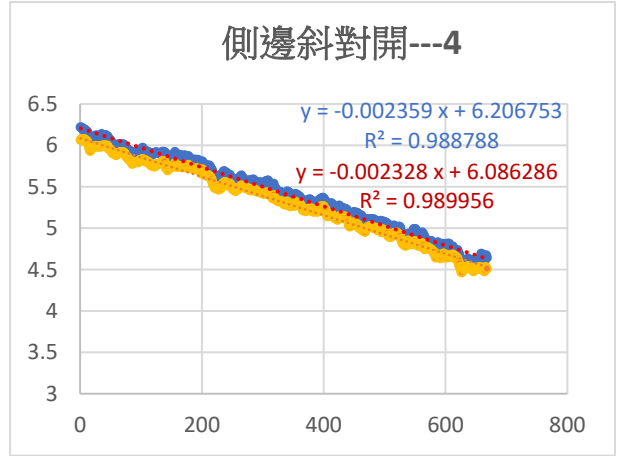
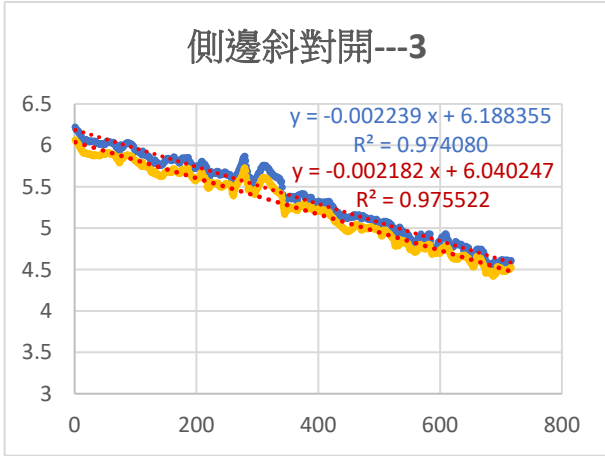
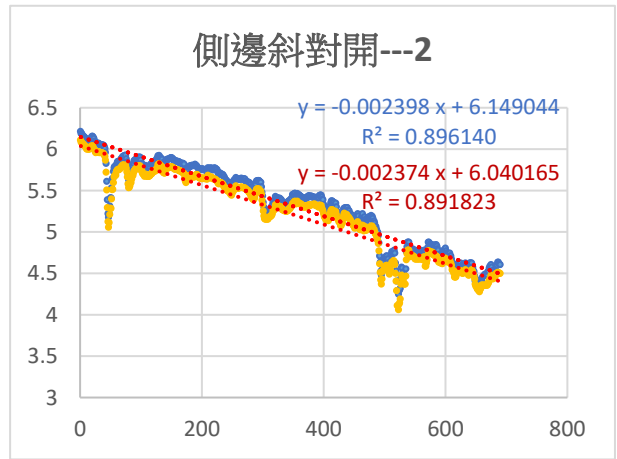
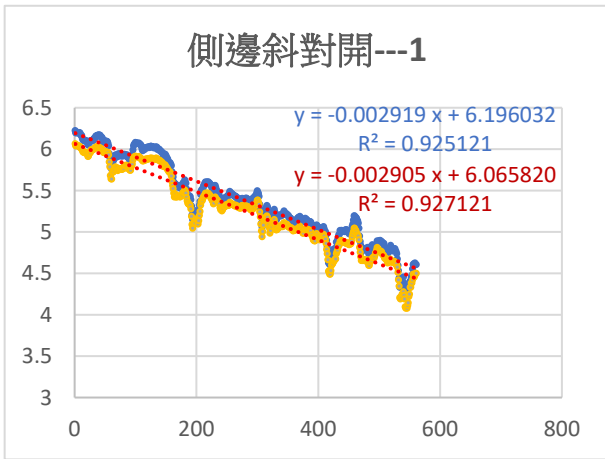
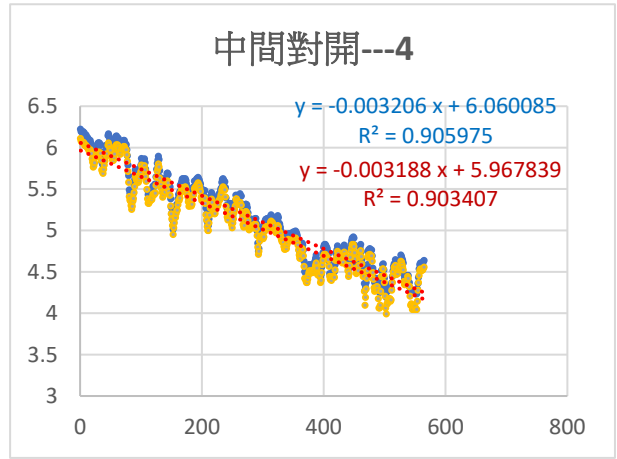
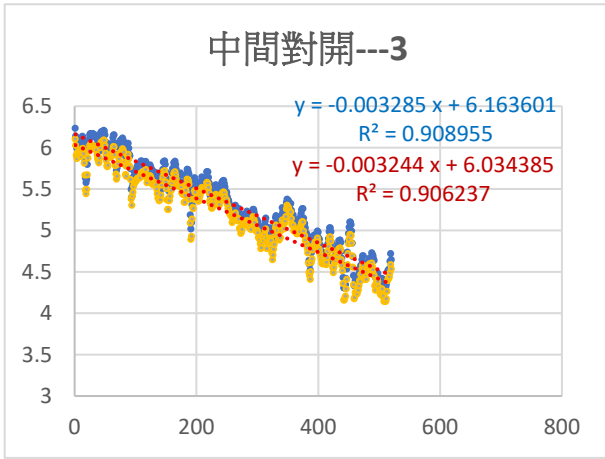


中間對開---1



中間對開---2

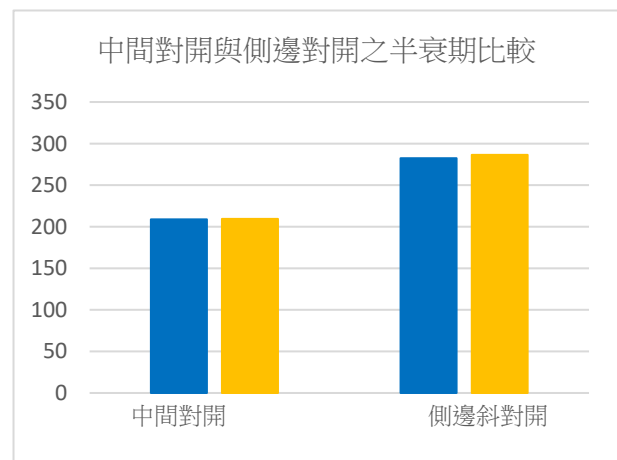
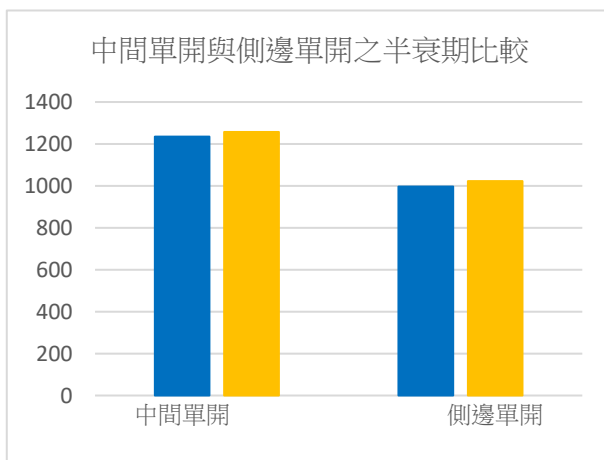




半衰期 (PM2.5)	無開窗	氣窗	中間單開	側邊單開	中間對開	側邊斜對開
平均(s)	4847.18	2469.29	1235.30	996.71	208.94	232.48
標準差 (s)	X	231.43	189.81	444.81	30.68	31.27

半衰期 (PM10)	無開窗	氣窗	中間單開	側邊單開	中間對開	側邊斜對開
平均(s)	6539.12	2515.85	1257.00	1022.86	209.40	286.50
標準差 (s)	X	234.52	192.37	459.36	33.00	33.77

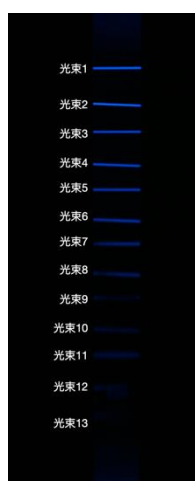
實驗四結論：橫軸為不同的開窗型式，縱軸為半衰期(s)。下圖中，藍色為懸浮微粒 PM2.5 的數據，黃色為懸浮微粒 PM10 的數據。



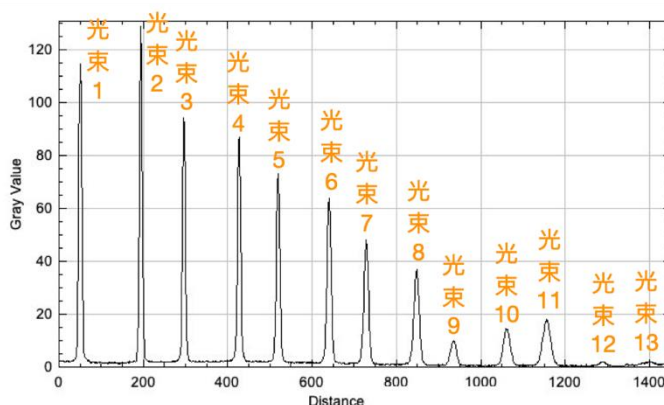
- 側邊單開的半衰期較中間單開小，且中間對開的半衰期較側邊斜對開小。
- 開窗方式對於懸浮微粒的擴散會有些許的影響，但沒有差距很大。
- 根據文獻(註 8)，由於 PM2.5 的分子量 (200~500) 遠大於空氣的分子量 (30)，因此推判因此推判 PM2.5 粒子會下沉，導致氣窗的半衰期較大。

## 六、實驗五：雷射光亮度與懸浮微粒濃度之關係

空氣中微粒會造成雷射光束散射，透過影像處理，將每一道雷射光束的亮度轉換成影像的灰度值（數值越大表示雷射光束亮度越高）。嘗試建立懸浮微粒相對濃度與雷射光束亮度間的關係。實驗共進行3次（實驗A~實驗C），因在本實驗濃度範圍內（500~100  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ），光束4之後的光束灰度值較弱，與背景差異較小，易造成判別誤差增加，故取光束1~光束4進行研究。

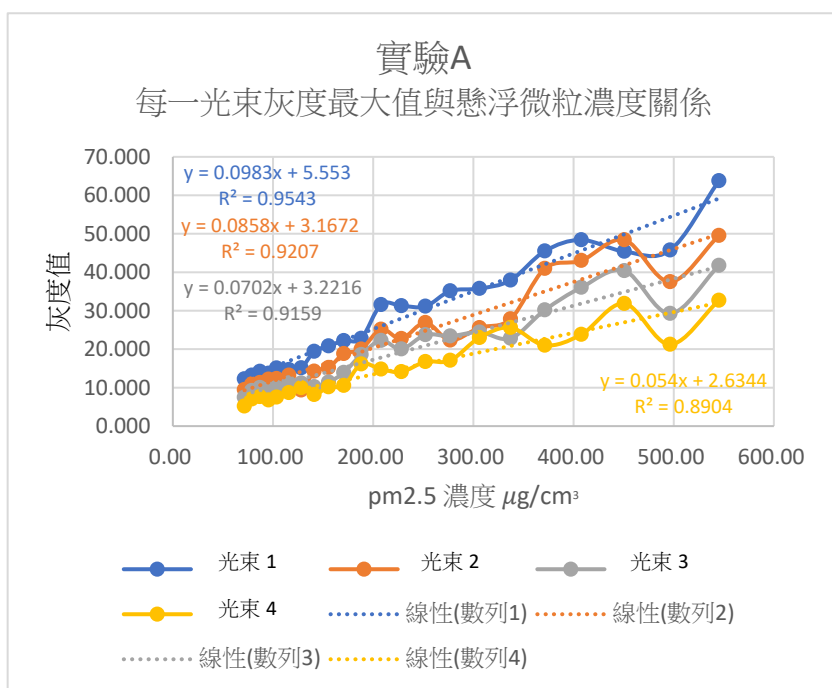


觀景窗觀測



每一光束轉換灰度值

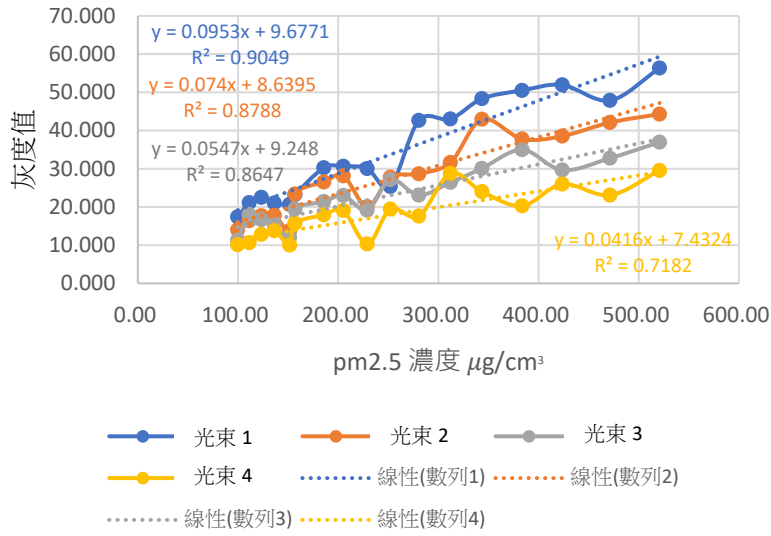
實驗五結論：



	斜率	截距	R <sup>2</sup>
光束 1	0.0983	5.5530	0.9543
光束 2	0.0858	3.1672	0.9207
光束 3	0.0702	3.2216	0.9159
光束 4	0.0540	2.6344	0.8904

### 實驗B

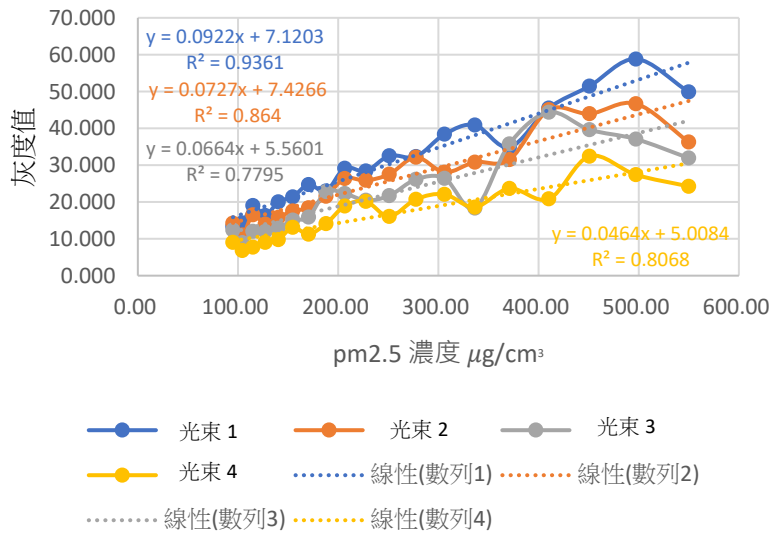
每一光束灰度最大值與懸浮微粒濃度關係



	斜率	截距	R <sup>2</sup>
光束 1	0.0953	9.6771	0.9049
光束 2	0.0740	8.6395	0.8788
光束 3	0.0547	9.2480	0.8647
光束 4	0.0416	7.4324	0.7182

### 實驗C

每一光束灰度最大值與懸浮微粒濃度關係



	斜率	截距	R <sup>2</sup>
光束 1	0.0922	7.1203	0.9361
光束 2	0.0727	7.4266	0.8640
光束 3	0.0664	5.5601	0.7795
光束 4	0.0464	5.0084	0.8068

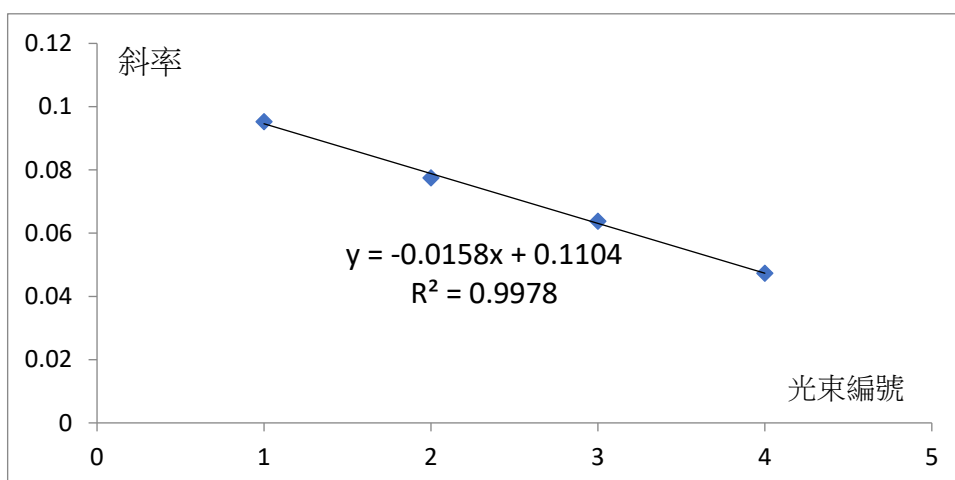
將三次實驗 光束 1 ~ 光束 4 整理，可得下方圖、表。

光束 1	實驗 A	實驗 B	實驗 C	平均	標準差
斜率	0.0983	0.0953	0.0922	0.0953	0.0031
截距	5.5530	9.6771	7.1203	7.4501	2.0817
R <sup>2</sup>	0.9543	0.9049	0.9361		

光束 2	實驗 A	實驗 B	實驗 C	平均	標準差
斜率	0.0858	0.074	0.0727	0.0775	0.0072
截距	3.1672	8.6395	7.4266	6.4111	2.8740
R <sup>2</sup>	0.9207	0.8788	0.8640		

光束 3	實驗 A	實驗 B	實驗 C	平均	標準差
斜率	0.0702	0.0547	0.0664	0.0638	0.0081
截距	3.2216	9.248	5.5601	6.0099	3.0383
R <sup>2</sup>	0.9159	0.8647	0.7795		

光束 4	實驗 A	實驗 B	實驗 C	平均	標準差
斜率	0.054	0.0416	0.0464	0.0473	0.0063
截距	2.6344	7.4324	5.0084	5.0251	2.3990
R <sup>2</sup>	0.8904	0.7182	0.8068		



### 實驗五結論：

- a. 重複三次實驗（實驗 A~C），實驗結果顯示雷射光束散射後的亮度與懸浮微粒的濃度有正相關（懸浮微粒濃度越大，雷射光束散射亮度越亮），根據實驗數據得到不錯的線性關係（ $R^2$  都 0.7 以上）。
- b. 不同次實驗中，相同光束（光束 1~4）的線性擬合方程式在斜率上有高度的一致性（變異係數皆小於 0.13），但在截距上則不太穩定（變異係數在 0.28~0.51 之間）。
- c. 在同一次的實驗中，隨光線前進路線越長，雷射光散射亮度越弱，這完全符合預期。將光束 1~4 線性擬合方程式的斜率平均值對光束編號（光線前進距離）作圖，得到一個非常好的線性關係（ $R^2 > 0.99$ ）。



## 玖、 問題與討論

實驗一：

- a. 體積越大，半衰期越大；在體積無限大的極限下，半衰期會趨近於無限。。
- b. 體積越小，系統穩定性越差，數據分散程度大，需透過增加實驗組數來提高實驗準確性。

實驗二：

- a. 溫度越高，氣體分子動能越大，半衰期越短。
- b. 溫度與半衰期之間的函數行為判定為線性下降，需增加更多的實驗數據來確認經驗公式的係數正確性。即使  $R^2$  值較低，可透過外插法判定斜率相當接近實際值。

實驗三：

- a. 環境有風的情況下，半衰期較無風條件下小。
- b. 發現半衰期會與角度有關，擬合公式為  $\tau_{1/2}(\theta) = P \tan\theta e^{-\delta\theta}$ ，其理論根據和推導都需要進一步研究。

實驗四：

- a. 開窗面積的大小大幅度決定半衰期。
- b. 不同形式開窗會造成 PM2.5 擴散速度些許的不同，可以提供居家建築物窗戶位置我設計的參考。
- c. 沒有開窗的情況下無法降低空氣中懸浮微粒的濃度。
- d. 單個氣窗無法有效使空氣流通。

實驗五：

- a. 雷射光散射對懸浮微粒濃度有極高的敏感度，而實驗腔體內部的濃度是否均勻會有

明顯的影響，造成實驗數據不穩定。

- b. 擬合方程式的斜率對光線前進距離作圖應該具有普世性，可以透過更換反射面材質和懸浮微粒種類來做進一步研究。
- c. 在缺乏懸浮微粒探測器的條件下，使用簡單平面鏡和雷射為測量懸浮微粒相對濃度的實惠方法。

## 壹拾、 參考資料及其他

### 一、書本資料

- a. 林子涵等人(2021),「香」氣四溢—不同開窗形式對懸浮微粒擴散速率的影響

### 二、網路資源

- a. 于菲菲等人(2015),受限空間洩漏孔徑對氣體擴散影響的模擬研究  
<http://cqvip.cgl.org.cn/Qikan/Article/Detail?id=665923277>
- b. 鍾基強等人(1995),作業環境室內汙染物擴散模式之理論與實驗研究  
<http://web.cjcu.edu.tw/~ykchen/Personal/Articles/Chung%20K-C%201995.pdf>
- c. 註謝文濬等人(2015),相同開口面積不同開口形式之屋頂女兒牆空氣流散速度之探討  
<https://www.shs.edu.tw/works/essay/2015/03/2015032513401761.pdf>
- d. 懸浮微粒定義  
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%87%B8%E6%B5%AE%E7%B2%92%E5%AD%90>
- e. 懸浮微粒對健康造成的影響  
<https://www.commonhealth.com.tw/blog/blogTopic.action?nid=2630&from=search>
- f. Python 程式,樹梅派  
<https://github.com/Kenblair1226/pms3003-g3>
- g. 祭祀用線香使用中藥材之調查研究  
<https://www.mohw.gov.tw/dl-29134-167da449-0911-4b96-ac8f-863e9eadb3f0.html>

## 【評語】 051819

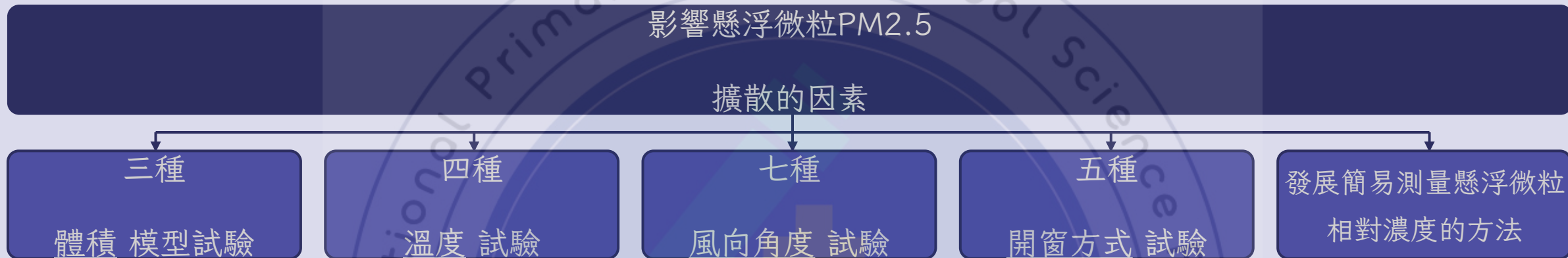
本作品探討懸浮微粒的擴散作用，進行了一些定量的量測實驗，最後主要獲得定性的結論，然而這些結論大多以物理邏輯即可推得，而其定量結論的部分則較乏一般的適用性，且內容的探索方式並非針對 PM2.5 微粒，而是包含了各種大小不同粒徑的粒子，然而 PM2.5 微粒在臺灣一直是個重要的議題，因此作者們若能針對這個方向進行改進加強，將有機會對臺灣有重要貢獻。

## 作品簡報

懸浮微粒 PM2.5

擴散作用研究

## 二、實驗架構



## 三、研究動機與目的

日常生活中的廚房油煙、傳統習俗的線香、抽菸等會使室內的懸浮微粒飆升。而空氣中懸浮微粒的平均濃度越高，導致肺癌、中風、缺血性心臟病、慢性肺病的相對風險上升。因此如何盡快地將有害物質排至室外，就是一件重要的事情。

推測房間內的懸浮微粒擴散速率會和：

1.體積、2.溫度、3.環境風向、4.開窗形式 有關，期望得到懸浮微粒擴散速度與上述變因之間的關係，從而建立建築物設計的依據。

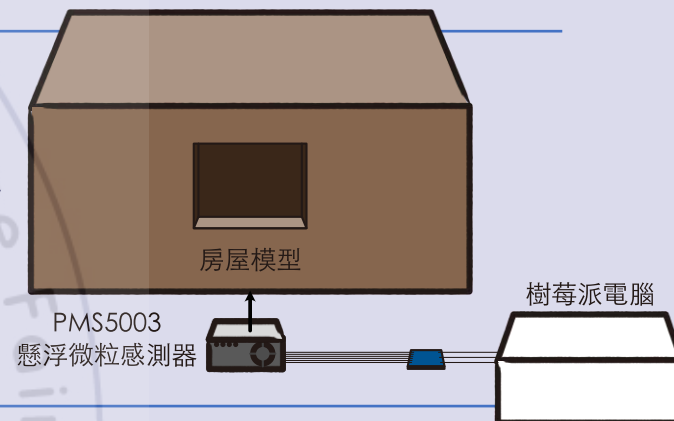
此外想嘗試發展測量懸浮微粒濃度的簡易方法，期許能夠在有限資源下，做為日後測量懸浮微粒相對濃度變化的參考依據。

# 三、實驗方法與結果

## 懸浮微粒擴散實驗裝置設置

1. 使用木板建構房屋模型，並用封箱膠帶將縫隙密封。並於實驗過程使用膠帶封閉適當窗戶，模擬各種開窗情況。

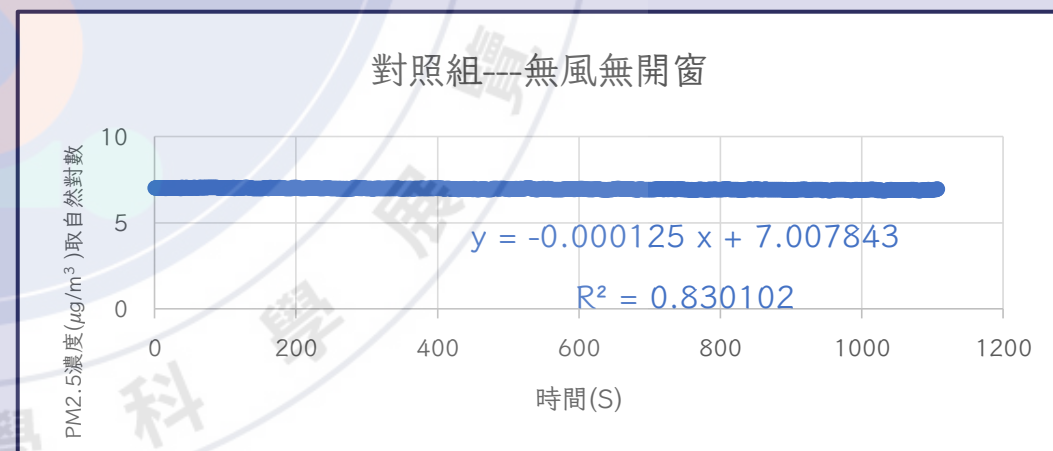
2. 架設偵測裝置，開發python控制程式，遠端控制懸浮微粒感測器記錄數值。



## 懸浮微粒擴散實驗實驗操作

1. 點燃線香作為模擬污染源。將點燃線香置入模型至煙霧充滿模型空間，而後使用膠帶密封開口至分布均勻(利用偵測器判斷，當數值浮動在 $\pm 5\%$ 內且持續五分鐘以上表示均勻)。
2. 打開模型窗戶，開始偵測濃度值，直到數值小於 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，停止實驗。
3. 選取 100 至  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的數值並繪製成濃度與時間的關係圖。

4. 數值取完自然對數後，再做和時間的關係圖，以線性函數擬合並探討方程式係數的含



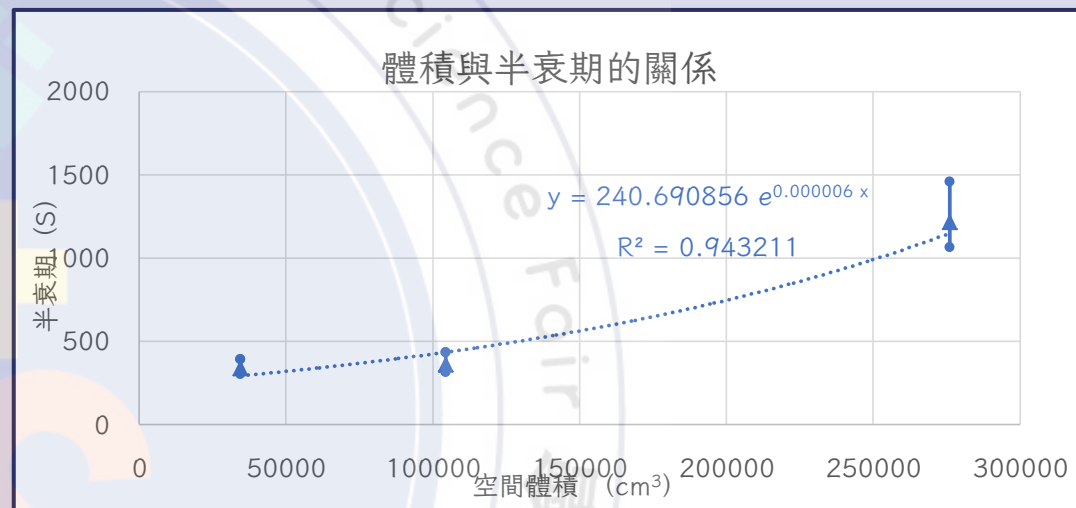
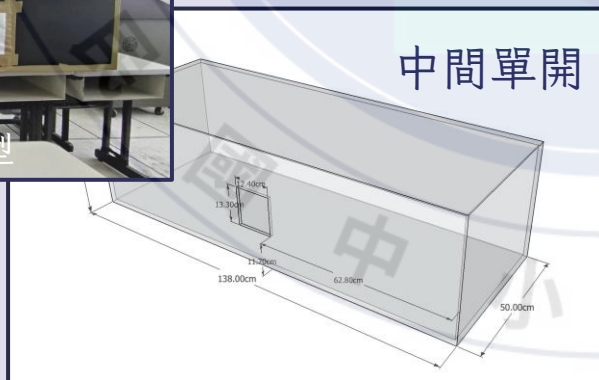


# 三、實驗方法與結果

## 實驗一、體積與擴散速率之關係

利用不同體積的模型、同一開窗方式（中間單開）觀察體積與半衰期的關係

組別名	B	C	D
長(cm)	69	100	138
寬(cm)	25	36	50
高(cm)	20	29	40
半衰期平均(s)	339.00	365.43	1235.30
標準差(s)	39.33	60.37	189.81



1. 體積較小的實驗組其誤差較大，因為總微粒量較少且擴散較快，些許的擾動會大幅影響衰減因子，需增加實驗數減少誤差。
2. 用指數形式的趨勢線會得到較好的擬合效果。符合體積在無限大時，半衰期會趨近於無限大，因此推判此趨勢線是正確的，需要透過增加實驗組數確認擬合公式的正確性。

# 三、實驗方法與結果

## 實驗二、溫度與擴散速率之關係

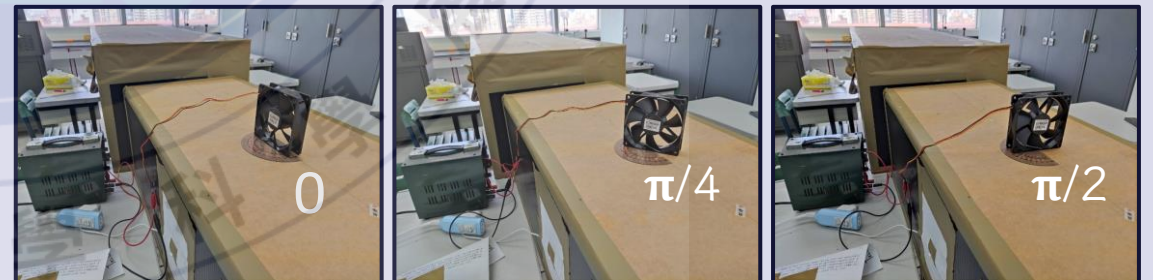
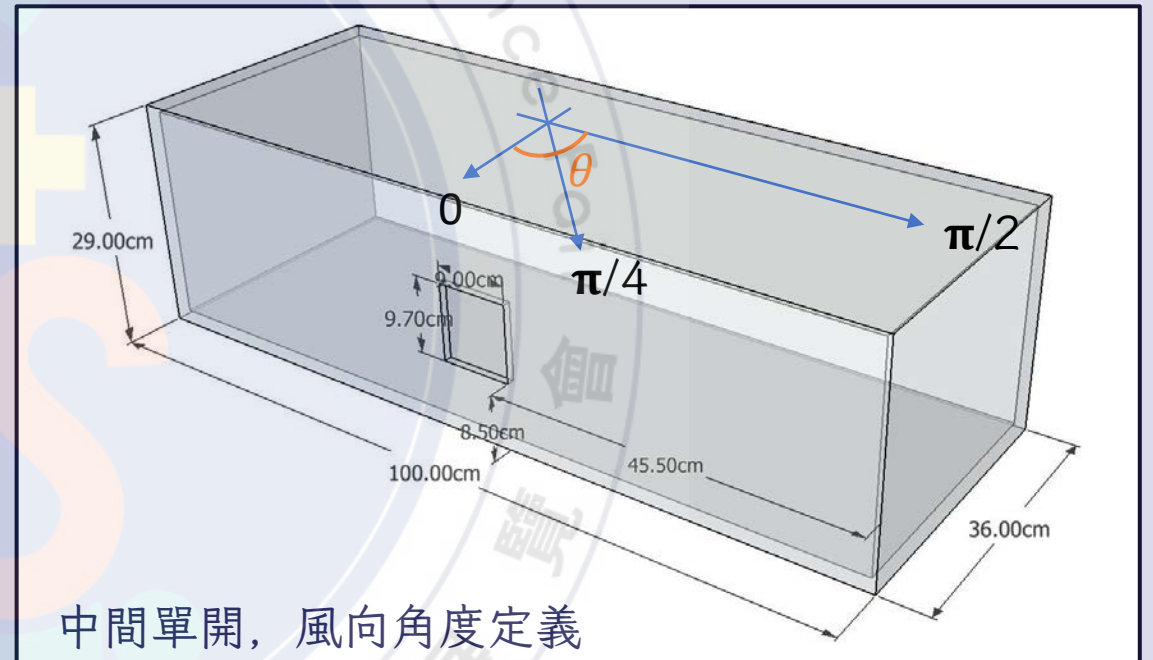
利用模型，窗戶形式為中間單開、觀察不同溫度與半衰期的關係。



1. 實驗結果顯示溫度越高，半衰期越短。根據氣體動力論，氣體分子平均動能正比於溫度；平均動能越大，擴散速度越快
2. 因為實驗溫度變化很小（4K），因此利用線性擬合即可得到好的結果。大範圍溫度和半衰期的關係，須透過更多實驗確認。

## 實驗三、風向與擴散速率之關係

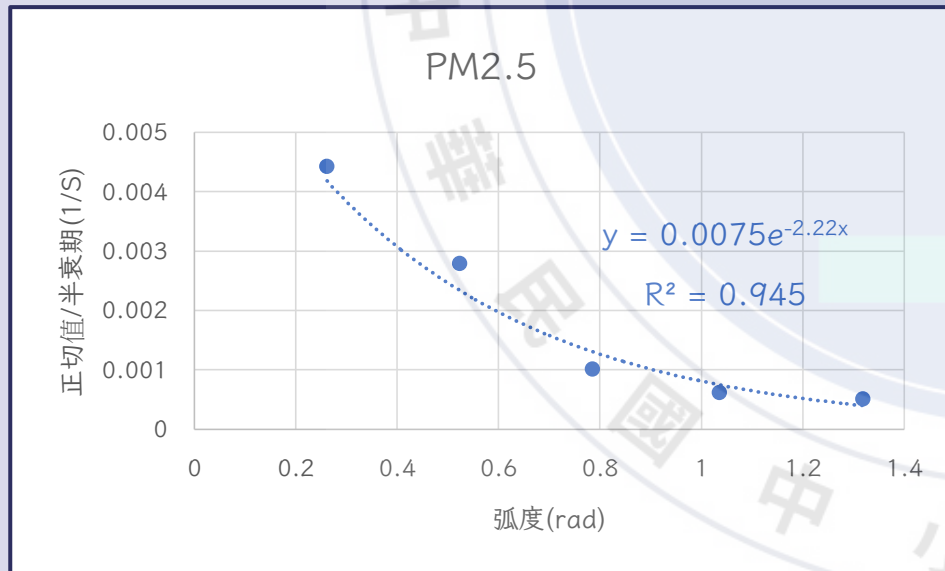
風扇模擬環境風，改變風向並觀察其半衰期的變



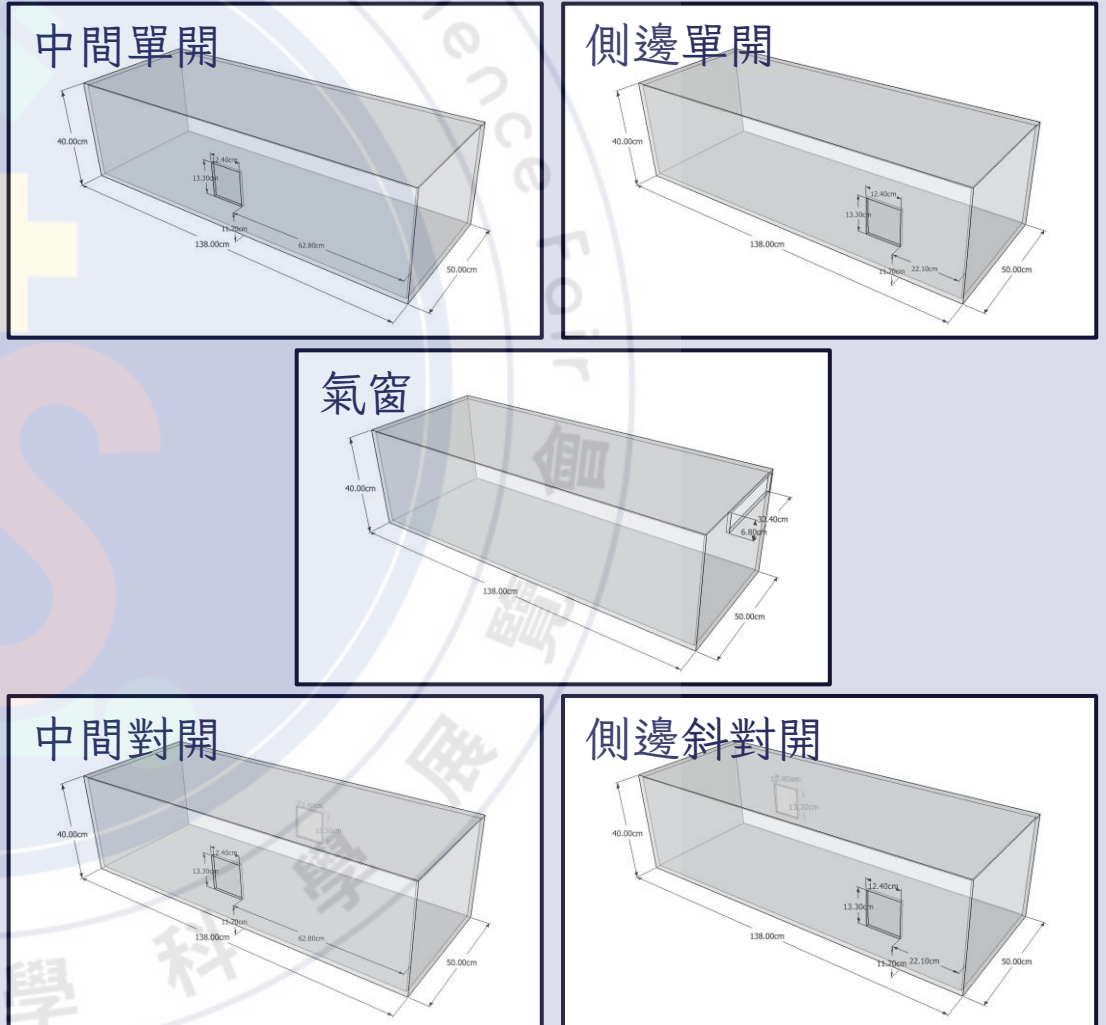
# 三、實驗方法與結果

## 實驗三、風向與擴散速率之關係

1. 推測半衰期會與窗戶法向量和風向夾角的正切值有關，當半衰期倒數除以夾角正切值會呈現指數關係。
2. 經驗公式為 $\tau_{1/2}(\theta) = P \tan\theta e^{-\delta\theta}$ ， $\delta$ 及 $P$ 為一常數，需增加實驗組別確認及調整。。



## 實驗四、不同開窗方式與擴散速率之關係



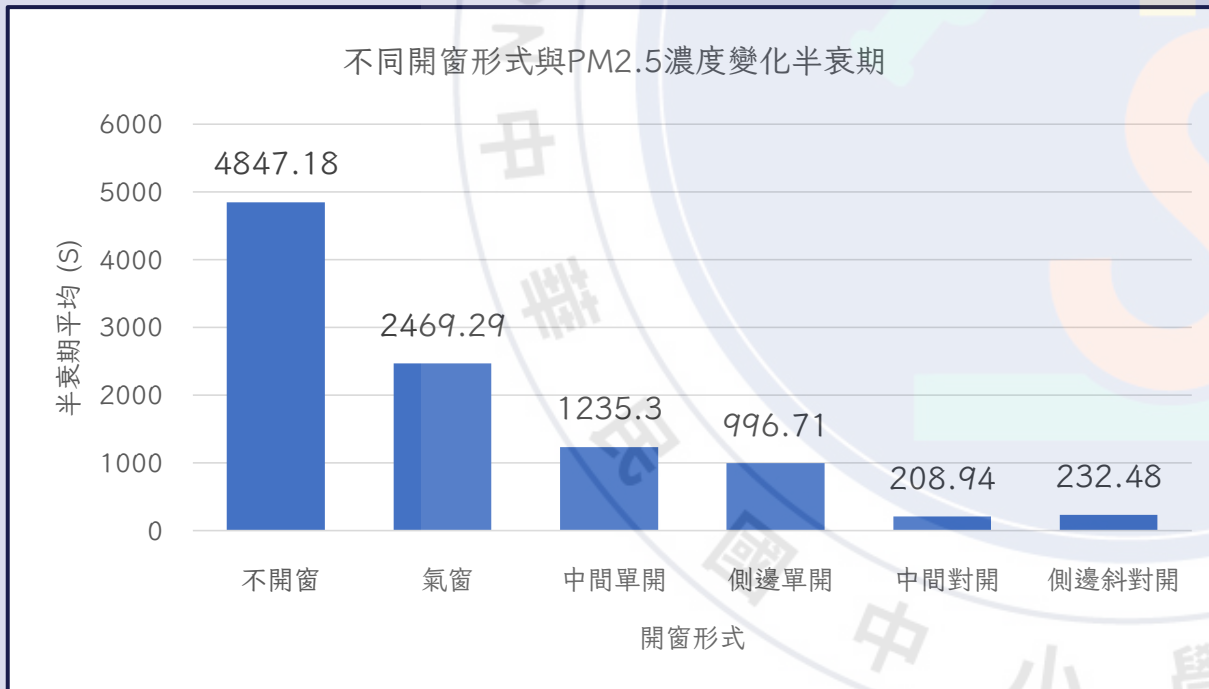


# 三、實驗方法與結果

## 實驗四、不同開窗方式與擴散速率之關係

利用不同開窗方式，觀察其半衰期的變化。

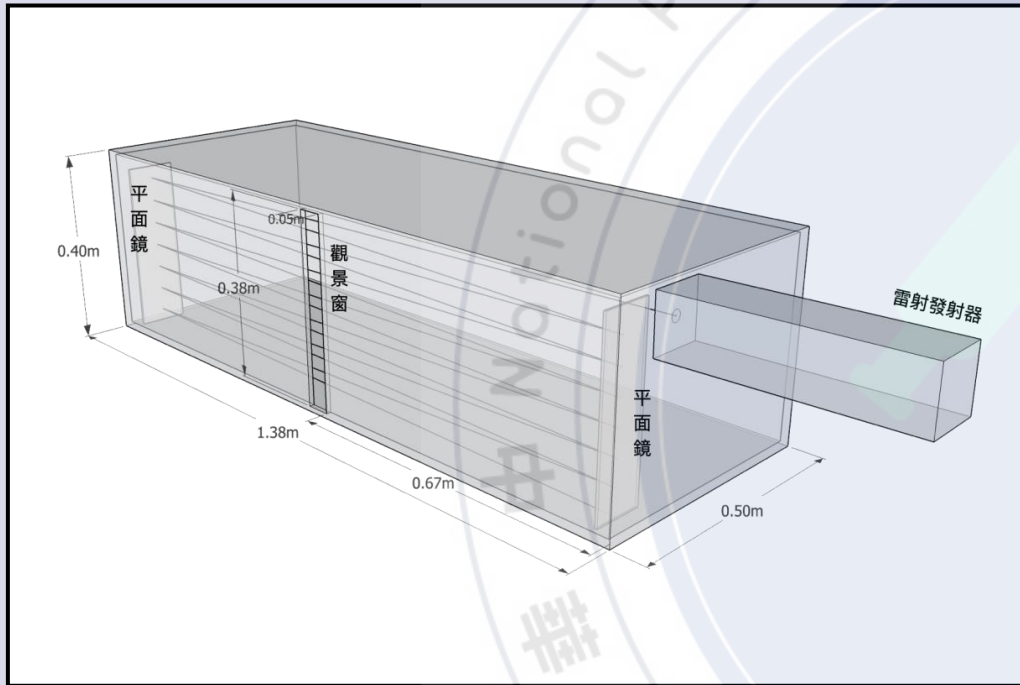
開窗方式	不開窗	氣窗	中間單開	側邊單開	中間對開	側邊斜對開
半衰期標準差(S)	X	231.43	189.81	444.81	30.68	31.27



1. 在相同的高度下（中間單開與側邊單開、中間對開與側邊斜對開），面積大小決定了半衰期長短；開窗方式沒有顯著影響。
2. 由氣窗和單開的實驗比較，發現氣窗面積較大，但半衰期較長。可以推論窗戶高度會對氣體擴散有顯著影響。（根據文獻，由於PM2.5的分子量（200~500）遠大於空氣的分子量（30），因此推判因此推判PM2.5粒子會下沉，導致氣窗的半衰期較大。）

# 三、實驗方法與結果

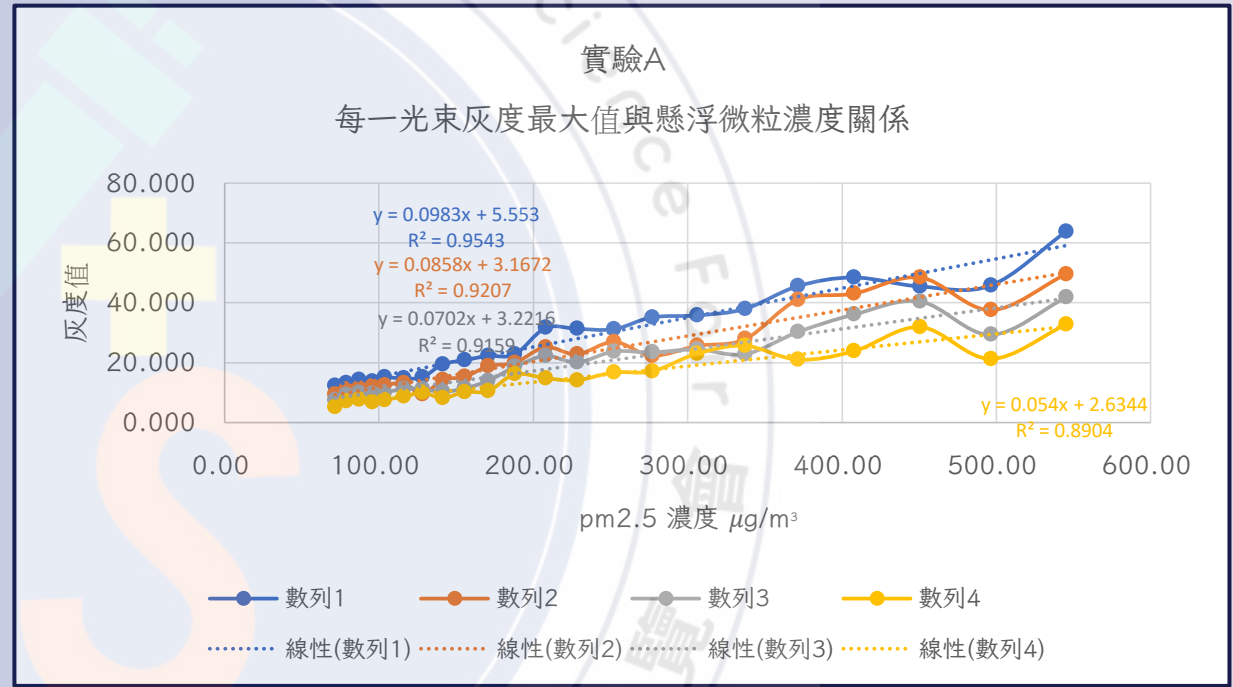
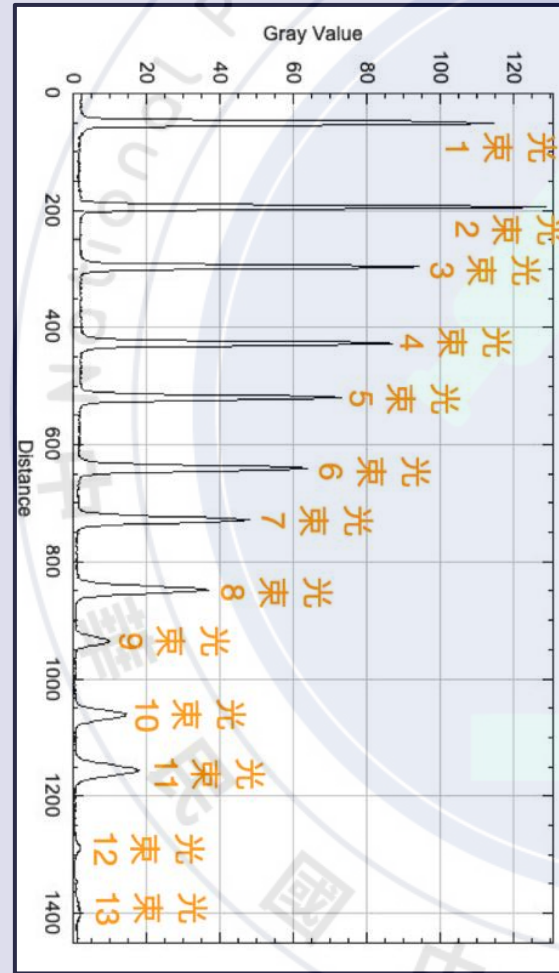
## 雷射光束對懸浮微粒散射裝置



1. 在模型中平行放置兩平面鏡（35cm × 10cm），讓雷射光束在兩平面鏡間產生數次反射。
2. 於模型中架設偵測裝置，遠端控制懸浮微粒感測器記錄數值作為實驗參考背景。
3. 相機固定各項參數，紀錄觀景窗影像，再由影像軟體轉換成灰度值(數值越大表示越明亮)。

# 三、實驗方法與結果

## 實驗五、雷射光亮度與懸浮微粒濃度之關係



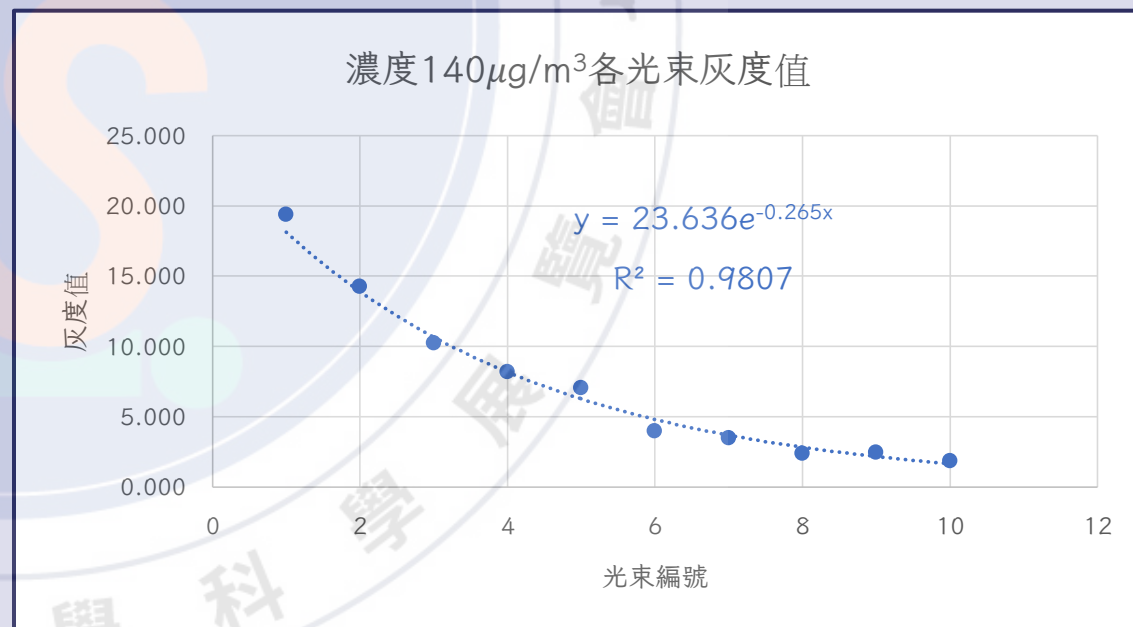
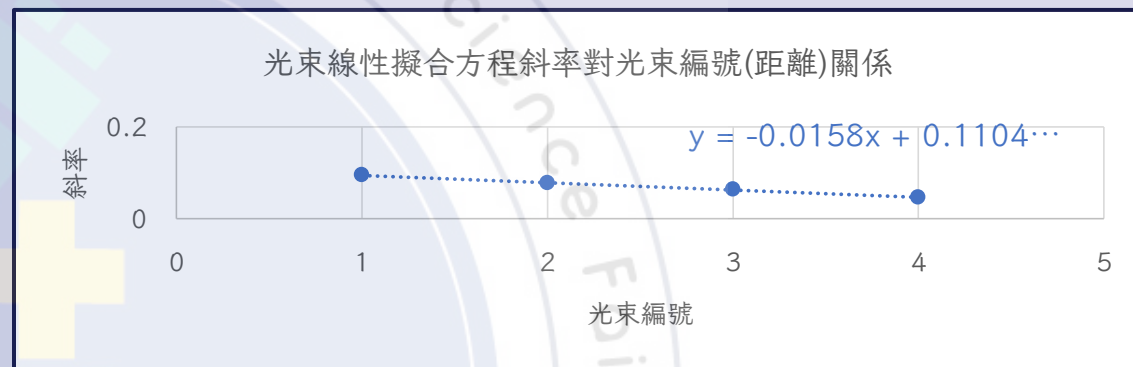
實驗A~C 統整	光束1	光束2	光束3	光束4
斜率平均	0.0953	0.0775	0.0638	0.0473
三次實驗 R <sup>2</sup> 範圍	0.9543~0.904 9	0.9207~0.86 40	0.9159~0.779 5	0.8904~0.718 2



# 三、實驗方法與結果

## 實驗五、雷射光亮度與懸浮微粒濃度之關係

1. 三次實驗結果顯示，雷射光束散射後的亮度與懸浮微粒的濃度有正相關（懸浮微粒濃度越大，雷射光束散射亮度越亮， $R^2$  皆0.7以上）。
2. 不同次實驗中，相同光束（光束1~4）的線性擬合方程式在斜率上有高度的一致性（變異係數皆小於0.13）。
3. 同次實驗中，隨光線前進路線越長，雷射光散射亮度符合預期變弱。將光束1~4線性擬合方程式的斜率平均值對光束編號（光線前進距離）作圖，可得到非常好的線性關係（ $R^2 > 0.99$ ）。



# 四、問題與討論

## 實驗一、體積與擴散速率之關係：

1. 體積越大，半衰期越大；在體積無限大的極限下，半衰期會趨近於無限。。
2. 體積越小，系統穩定性越差，數據分散程度大，需透過增加實驗組數來提高實驗準確性。

## 實驗二、溫度與擴散速率之關係：

1. 溫度越高，氣體分子動能越大，半衰期越短。
2. 溫度與半衰期之間的函數行為判定為線性下降，需增加更多的實驗數據來確認經驗公式的係數正確性。即使 $R^2$ 值較低，可透過外插法判定斜率相當接近實際值。

## 實驗三、風向與擴散速率之關係：

1. 環境有風的情況下，半衰期較無風條件下小。
2. 發現半衰期會與角度有關，擬合公式為 $\tau_{1/2}(\theta) = P \tan \theta e^{-\delta \theta}$ ，其理論根據和推導都需要進一步研究。

## 實驗四、不同開窗方式與擴散速率之關係：

1. 開窗面積的大小和窗戶高度決定半衰期。
2. 不同形式開窗會造成PM2.5擴散速度些許的不同，可以提供居家建築物窗戶位置我設計的參考。
3. 沒有開窗的情況下無法降低空氣中懸浮微粒的濃度。



## 四、問題與討論

### 實驗五、體積與擴散速率之關係：

1. 雷射光散射對懸浮微粒濃度有極高的敏感度，而實驗腔體內部的濃度是否均勻會有明顯的影響，造成實驗數據不穩定。
2. 擬合方程式的斜率對光線前進距離作圖應該具有普世性，可以透過更換反射面材質和懸浮微粒種類來做進一步研究。
3. 在缺乏懸浮微粒探測器的條件下，使用簡單平面鏡和雷射為測量懸浮微粒相對濃度的實惠方法。
4. 此實驗方法可以做進一步改良，測量不同方向上散射光強度，可判斷散射方式為雷利散射或是米氏散射。

## 參考文獻

1. 林子涵等人(2021), 「香」氣四溢－不同開窗形式對懸浮微粒擴散速率的影響  
<https://science.ntpc.edu.tw/pro/Center/Mixed.aspx>
2. 謝文濬等人(2015), 相同開口面積不同開口形式之屋頂女兒牆空氣流散速度之探討  
<https://www.shs.edu.tw/works/essay/2015/03/2015032513401761.pdf>