

簡易比色計的發展 A-濁度計的設計與實驗探究

廖旭茂

臺中市立大甲高級中等學校
教育部高中化學學科中心
nacl880626@gmail.com

摘要：本文介紹一款簡易濁度計，該濁度計使用紅外線 IR LED 作為光源與接收器，溶液樣品置於黑色比色盒的玻璃品內；不需撰寫程式編程，僅藉常用的三用電表，即可測量 IR LED 接收器所散色光的強弱，來紀錄比色盒中溶液濁度；此計由 USB 介面提供穩定的電源，搭配限流電阻與可變電阻，可調整入射光的強度與輸出訊號的強弱；在濁度 4~100 NTU 的標準液所製作的檢量線，相關係數 R^2 可達 0.9993，與商用的濁度計製作的檢量線 0.9994 相差無幾；若搭配可變電阻使用，在 4~400 NTU 的溶液製作的檢量線的相關可達 0.9998，顯示可變電阻可降低入射光強度，適於偵測濁度更高溶液。

■ 前言

108 課綱選修化學 V 中的有機化學與應用科技課程中，安排了環境汙染與防治相關的主題，將常見水汙染的檢測（濁度、酸鹼度、導電度及溶氧度等）列入實驗之中。這些檢測項目都有可攜式的儀器可以添購，其金額約在數千至數萬元之間，其中濁度計的價格較為高昂，如果列入一般學生實驗，昂貴的購置成本（含多種濁度標準液），將對高中學校是一筆沉重的負擔；若使用創新的數位科技 Arduino 平台，結合數位感測器-濁度計，價格著實降低大半，惟化學教師須具備跨界資通訊領域能力，這樣門檻不算太低，恐是另一種教學的阻力；因此研發出一種簡易、便宜，不需要撰寫程式即可測量、紀錄反應過程中濁度的變化的濁度計，是一項相當有挑戰性、有意義的目標。

本文將介紹一款簡易型濁度計，將盛裝取樣溶液的玻璃樣本瓶置入黑色的壓克力比色盒中，比色盒四方預留孔洞，其一做為紅外光 LED 甲（型號 TSGH6210, 850nm）發射光源的駐紮安裝處；當紅外光 LED 正、負腳位兩端通入約 1.5V 的直流電後，進入溶液的紅外光會被溶液中顆粒大的膠體或懸浮微粒散射，散射光隨即於 90 度角處預留孔洞的另一紅外光 LED 乙接收器接收；此時以三用電表的連接紅外光 LED 乙的正、負兩極，因為光電效應使然，可直接測量出 LED 乙兩端電位差的存在；水中濁度越高，被散射的光越強，電位差則越大。簡易濁度計的相關設計示意圖如圖 1 所示。

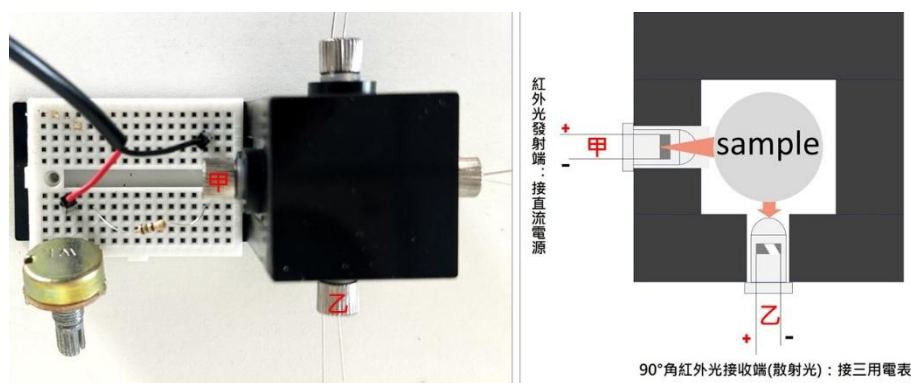


圖 1 圖左為簡易濁度計的外觀，圖右為設計圖

■ 器材與藥品

一、器材

簡易濁度計實驗模組 1 組、三用電表、Vernier 濁度計 (TRB-BTA)、Gravity 類比式濁度感測器、4 毫升玻璃樣本瓶 7 個、5.00 毫升移液器、移液吸頭。

二、藥品

所需溶液，A 溶液的製備：六亞甲基四胺溶液(Hexamethylenetetramine solution)：將 10.0 g 六亞甲基四胺溶於 RO 水中，並稀釋至 100.0 mL。B 溶液的製備：硫酸肼溶液(Hydrazine sulfate solution)：將 1.0 g $(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ 溶於 RO 水中，並稀釋至 100.0 mL。

■ 研究方法與步驟

一、常見濁度計原理

筆者搜尋文獻，並參考 Arduino 版的濁度感測器、Vernier 專業商用濁度計等，兩者的外觀結構明顯不同；創客們常用的 Arduino 濁度感測器是利用波長 910 nm 紅外線作為光源，接收器為位於 180° 對向的紅外線光電晶體 (IR phototransistor)，紅外光檢測水中因總懸浮顆粒 (Total suspended solids, TSS) 含量的高低所造成的透光率與散射率的變化 (總懸浮固體增加，溶液濁度上升)。其缺點是必須把感測器泡到水中，使用者甚至必須製作支撐架，使整個濁度器平穩地待在待測容器中，同時必須防止電線的連接處進水，造成濁度計度電路燒毀的風險。而商用濁度計亦使用不受溶液顏色干擾的紅外光為光源，測量的樣品則被放置到一個玻璃樣本瓶中；當紅外光通過樣品溶液時，水中懸浮顆粒會散射光線，接收器則位於 90° 方向的固定位置，來偵測散射光的強度；若偵測到的散射光越強，代表水的濁度越高 (Turbidity, 2025)；其優點為準確、並備有標準液隨時提供校正，惟價格昂貴，高中學校難以普遍購置，圖 2

為兩種濁度計的外觀。



圖 2 圖左為 arduino 用濁度感測器，圖右為 Vernier 商用濁度計

二、濁度計設計與組裝

(一) 濁度計設計

本濁度裝置，參考期刊《Journal of Chemical Education》名為「Simplified Low-Cost LED Nephelometer and Turbidity Experiments for Practical Teaching」文章，此文章作者為愛爾蘭都柏林大學聖三一學院(Trinity College Dublin)的 John O'Donoghue、Lucy Fitzsimmons 兩位學者 (O'Donoghue & Fitzsimmons, 2022)。因有些材料不易取得，且設計與操作上有可預見訊號不穩情形，故進行相關優化：

1. 發射光源：使用價格低廉、易取得的 850nm 的 IR LED，測試結果優於預期。
2. 穩定電源：為穩定輸出電壓放棄乾電池，而改用 5 伏特的 USB 電源，但須串聯一限流電阻 (約 150~200 歐姆上下即可)，以保護 LED 不被過大的電流燒毀。
3. 準確光路：比色盒自行設計，透過雷射切割，發射光源與接受器 90 度垂直，Led 皆被 8 字形的黑色壓克力板以螺絲緊密固定在精準位置，確保光路穩定。
4. 提升功能：為方便以後長時間監測反應及溶液充分混合之需，提供攪拌磁攪拌子穩定運行，4 毫升圓柱形樣本瓶將取代方形比色管，置於黑色比色槽中。
5. 延伸探究：電表可改為藍芽電表。方便同學使用手機、平板觀看與連續監控。

(二) 自製濁度計的組裝

簡易濁度計包括：黑色壓克力製比色盒 (含上蓋、底座)、IR LED 發射、M4 手擰螺絲、8 字形 LED 固定座、小麵包版、可變電阻、usb 電源線、150Ω 限流電阻、鱷魚夾線等。所需材料如圖 3 所示：



圖 3 簡易濁度計所需材料

簡易濁度計組裝的相關步驟如下：

1. 濁度計比色盒身的組裝：比色盒身有兩片寬邊 (32x37mm)、兩片窄邊 (16x37mm)，厚約 8mm 的黑色不透光的壓克力塊所組成；使用 8mm 寬的雙面膠做黏合劑，先以剪刀裁剪 2 片約 37mm 長的膠帶，貼緊在窄邊壓克力塊 8mm 厚的側邊；隨後依序撕去兩壓克力單面的離形紙，上下切齊，緊黏在寬邊壓克力塊的左、右兩側；隨後再撕去兩壓克力塊的離形紙，貼齊緊黏另一寬邊壓克力塊的兩側，完成比色盒身 a 的組裝。圖 4 為組裝過程(由左而右，由上而下)。



圖 4 比色盒身雙面膠的組裝

2. 盒身與底座的組合：接著取 3mm 厚的長、短兩塊比色盒底板，撕去離形紙，將方形圓洞底板對齊長底板預留位置，以快乾膠黏合，完成比色盒底座。最後在方形圓洞底板上滴上數滴快乾膠，將盒身 a 對齊方形底座四邊，按壓數秒固定，完成比色盒、底座的組裝。

圖 5 為盒身與底座的組合過程(由左而右，由上而下)。

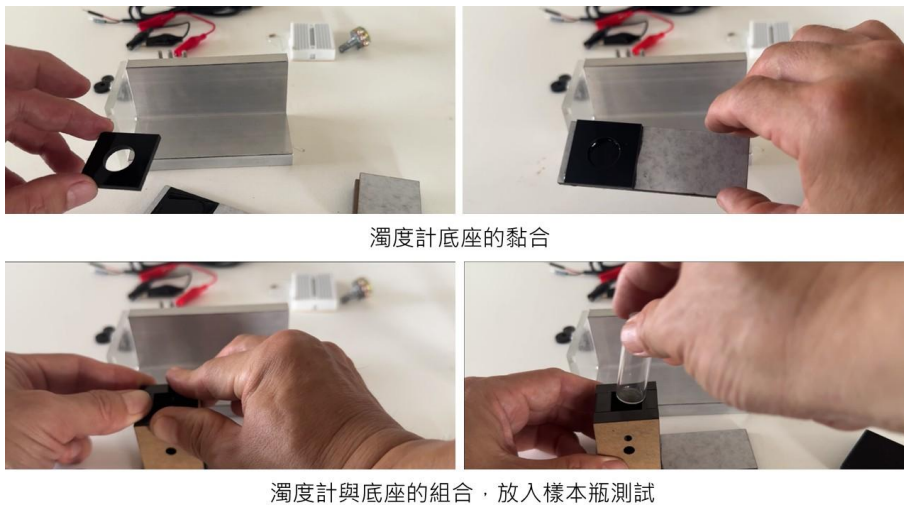


圖 5 盒身與底座的組合過程

3. 比色盒分離式上蓋與盒身整理：將比色盒上蓋的兩片厚、薄兩塊壓克力片撕去離形紙，以快乾膠對齊黏合兩塊壓克力片，待數秒後膠乾，再撕去壓克力片上所有的離形紙。圖 6 為相關過程。



圖 6 比色盒分離式上蓋與盒身組合過程

4. 紅外光接收二極體 IR LED 的安裝：取一波長 850nm 的 IR LED，先將正負兩腳位插入 8 字型固定片預留的位置，再利用 M4 螺絲穿過固定片預留孔洞，旋入比色管身寬邊壓克力板上預留的螺孔中。此舉可使 LED 穩固，確保光路的準確性。圖 7 為相關安裝過程

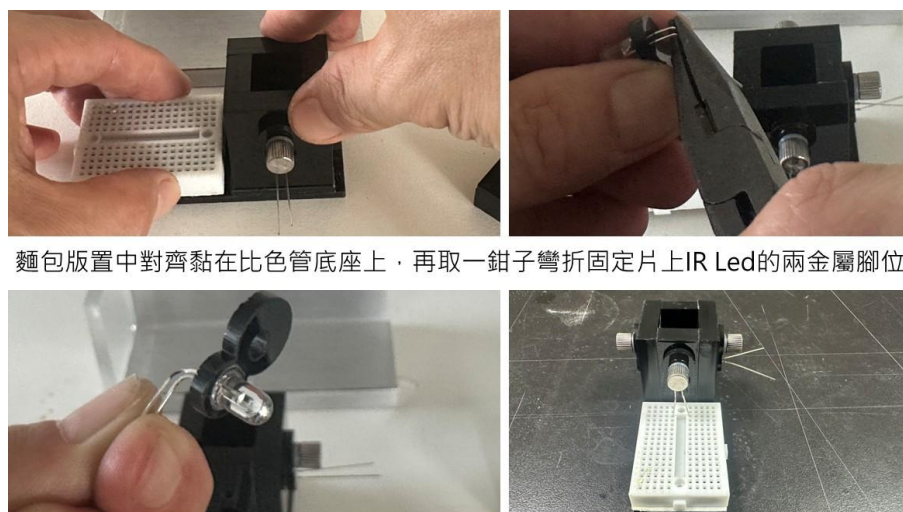


將IR LED的兩金屬腳位與固定片組合

並以M4螺絲將固定片緊鎖於比色管壁長邊的中間

圖 7 紅外光接收二極體 IR LED 的安裝過程

5. 麵包板與紅外線發射二極體 IR LED 的安裝：取一小麵包板，撕去其背膠的離型紙，置中對齊黏貼在比色計底板對應位置。隨後拿一個已安裝在 8 字型固定片上的紅外光二極體，以小鉗子將 Led 的兩金屬腳位垂直彎折後，將其中的金屬腳位插入麵包板兩側的小孔洞中，再利用 M4 螺絲，先穿過 8 字型固定片，再旋入比色管壁中央預留的螺孔中，緊固固定片，確保發射器的光路準確。圖 8 為相關過程。

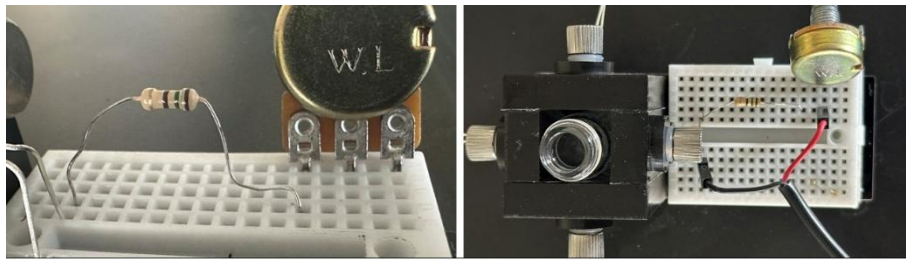


麵包版置中對齊黏在比色管底座上，再取一鉗子彎折固定片上IR Led的兩金屬腳位

將彎折的兩金屬腳位插入麵包版中央兩側，再用螺絲將固定板固定在比色管壁

圖 8 麵包板與紅外線發射二極體 IR Led 的安裝過程

6. 電源與電阻的連接：為提供穩定、安全的電壓，使用 USB 電源插座輸出 5V 的電壓後，在紅外線 IR LED 與電源間，除了串接 1 個 150Ω 的線流電阻外，再使用一個 $0.5K\Omega$ 的可變電阻來調整整體輸入的電流大小，此舉不僅可調節 LED 發射光的強弱與接收器所接收到的訊號，亦可調節三用電表的電位差讀值。限流電阻、可變電阻、USB 電源線的正、負極在麵包板相對應的位置如圖 9 所示。



取一個可變電阻、150Ω限流電阻，與usb電源線的正負極插入麵包板對應位置

圖 9 穩壓與限流電阻麵包板串接

三、濁度標準懸浮液 I (Formazin) 的配置

參考美國環保署 U.S. Environment Protection Agency (1993)，所提供的方法，相關敘述如下：

(一) 濁度標準懸浮液 I (Formazin) 的配置：在 100 mL 容量瓶中，將 5.0 mL 硫酸肼 A 溶液與 5.0 mL 六亞甲基四胺 B 溶液混合。在 $25 \pm 3^\circ\text{C}$ 下靜置 24 小時後，用 RO 水稀釋至 100.0 mL，並充分混合。這種懸浮液的濁度定義為 400 濁度單位 (NTU)。

(二) 濁度標準懸浮液 II：用 RO 水稀釋 10.0 mL 濁度標準懸浮液 I 至 100.0 mL。這種懸浮液的濁度定義為 40 濁度濁度單位 (NTU)。圖 10 為容量瓶內混合液靜置 24 小時後，發生混濁的變化。



濁度液 A、B 兩液混合在容量瓶中，經 24 小時混合液的變化

圖 10：兩液混合後容量瓶內濁度標準液的變化

四、利用簡易濁度計調查濁度與電位的關係

首先利用已配置 400 NTU 的濁度標準液 I、II，以蒸餾水稀釋，依序稀釋、配置 100 NTU、60 NTU、40 NTU、20 NTU、10 NTU、4 NTU 備用。隨後將三用電表的旋鈕切換致電位測量檔位，接著將正、負極夾子線接上比色管寬邊壁上紅外線發射二極體 IR Led 的正、負兩金屬腳位，最後將 usb 插頭接上電源，即可進行調查溶液濁度與電位的關係。圖 11 為簡易濁度計完整接線路。

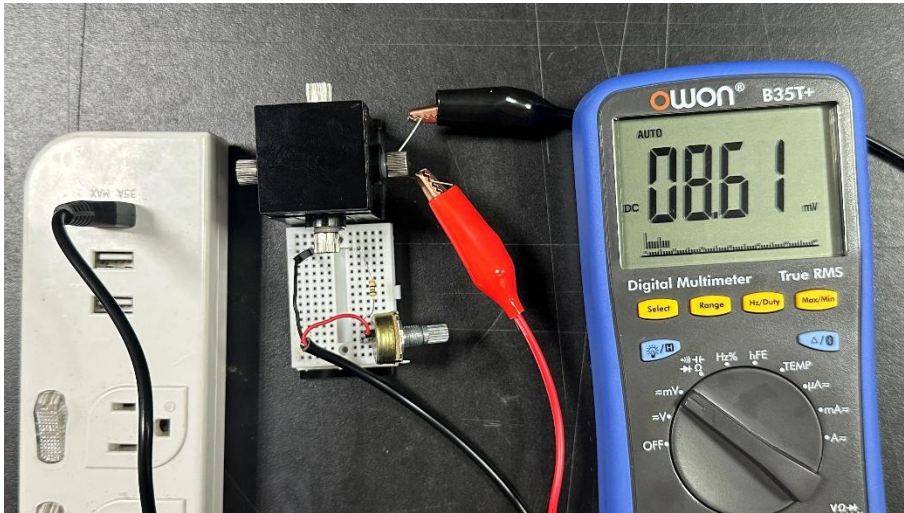


圖 11 簡易濁度計與電源、三用電表完整線路圖

濁度大小與電位關係的調查，步驟如下：

1. 利用移液管吸取 4 毫升濁度為 100 NTU 的溶液，置入樣本瓶甲中，接著蓋上黑蓋後，等待 3 秒後，螢幕畫面的電位數字穩定後，觀察並記錄螢幕畫面的電位數字 V_1 (mV)。
2. 利用移液管吸取 4 毫升濁度為 60 NTU 的溶液，置入樣本瓶乙中，接著蓋上黑蓋後，等待 3 秒後，螢幕畫面的電位數字穩定後，觀察並記錄螢幕畫面的電位數字 V_2 (mV)。
3. 利用移液管吸取 4 毫升濁度為 40 NTU 的溶液，置入樣本瓶丙中，接著蓋上黑蓋後，等待 3 秒後，螢幕畫面的電位數字穩定後，記錄螢幕畫面的電位數字 V_3 (mV)。
4. 利用移液管吸取 4 毫升濁度為 20 NTU 的溶液，置入樣本瓶丁中，接著蓋上黑蓋後，等待 3 秒後記錄螢幕畫面的電位數字 V_4 (mV)。
5. 利用移液管吸取 4 毫升濁度為 10 NTU 的溶液，置入樣本瓶戊中，接著蓋上黑蓋後，等待 3 秒後，記錄螢幕畫面的電位數字 V_5 (mV)。
6. 利用移液管吸取 4 毫升濁度為 4 NTU 的溶液，置入樣本瓶己中，接著蓋上黑蓋後，等待 3 秒後，記錄螢幕畫面的電位數字 V_6 (mV)。
7. 利用移液管吸取 4 毫升的蒸餾水，置入樣本瓶庚中，作為空白實驗，接著蓋上黑蓋後，等待 3 秒後，觀察並記錄螢幕畫面的電位數字 V_7 (mV)。
8. 以濁度 (NTU) 為橫座標、扣除空白實驗值後的電位差 (mV) 為縱座標，依濁度與電位關係作圖，線性擬合最適合的直線方程式為何？相關係數 R^2 為多少？

9. 取商用濁度計，經 100 NTU 標準液與蒸餾水校正後，分別測定 4~100 NTU 各種標準溶液的濁度大小；隨後以標準液濁度為橫座標，再以濁度計測量讀數 (NTU) 的結果為橫座標之關係作圖，線性擬合最適合的直線方程式為何？相關係數 R^2 為多少？
10. 以商用濁度與簡易濁度計實測結果相比較兩者的差異性。

■ 實驗結果

1. 簡易濁度計的測試結果如表 1 所示：

表 1：五組測量數據 (扣掉蒸餾水空白值後) 平均值，電位測量結果

標準濁度液(NTU)	量測電壓 (mV)	帶入檢量線換算濁度 (NTU)
4	2.21±0.06	4.06±0.01
10	5.98±0.08	11.20±0.05
20	9.70±0.12	18.24±0.12
40	21.50±0.25	40.54±0.37
60	31.72±0.42	59.86±0.69
100	53.01±0.63	100.09±1.09

相關數據經線性擬合，濁度與電位的相關係數達 0.9993，兩者呈現高度相關。圖 12 為測量後濁度與電位的關係。

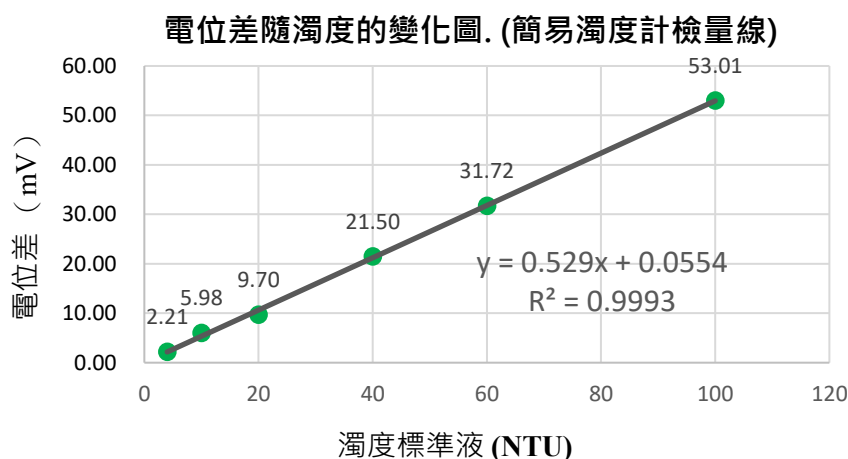


圖 12 標準濁度液與電位的關係

2. 商用濁度計的測試結果如表 2 所示：

表 2：各種濁度標準液經商用濁度計測量的結果比較表

濁度標準液 (NTU)	濁度計讀取值 (NTU)
4	5.34 ±0.05
10	9.32 ±0.11
20	19.67 ± 0.22
40	38.99 ± 0.43
60	58.00 ±0.72
100	98.59 ±1.15

根據實驗結果，簡易濁度計與商用濁度計測量讀取值相當吻合，且皆具有高相關係數，據此評估簡易濁度計應可作實驗室濁度的測量工具，甚至可應用在水環境的探究實驗，如沉澱反應、發酵作用、膠體的形成上。圖 13 商用濁度計測量標準液濁度與讀數之關係。

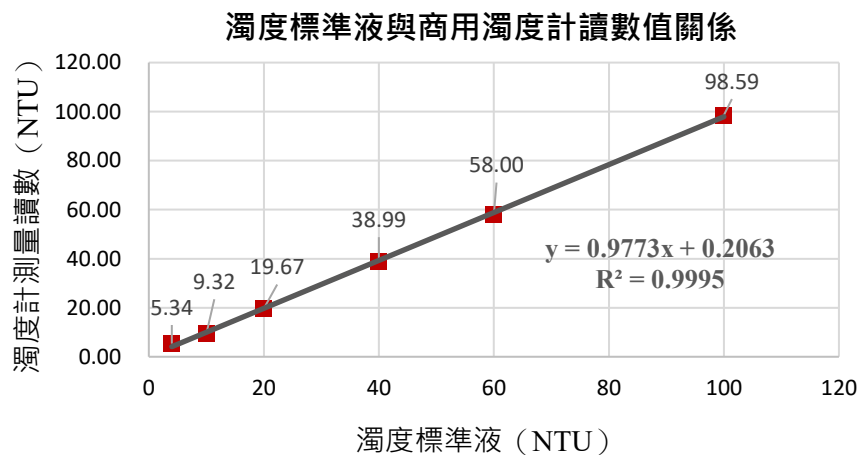


圖 13 商用濁度計標準液濁度與測量讀數關係

■ 討論

一、光源穩定性

此次使用的 850 nm 的紅外光 LED (TSHG6210, 2025)，其順向電壓約為 1.5~1.8 伏特之間，工作電壓約為 10~20 mA，參考文獻 (O'Donoghue & Fitzsimmons, 2022) 亦使用輸出電壓為 1.55 伏特的 3 號鹼性電池作為電源，經測試在一小時的連續點亮後，耗電量約略佔乾電池電量的 1% (電壓值降至 1.53 V)，電壓約有 0.02V 的些微下降，電表讀值也有約略下降情形；而使用 USB 電源，在輸出 5 伏特，經串接 150Ω 限流電阻的供電下，並未發生電壓下降情形，而電表讀值也僅由 1045 mV 降至 1044 mV；所幸濁度的測量時間不長，只需數秒鐘的時間，光衰的影響很小，但若是應用在動力學探究方面，需要長時間監測的情形下，紅外光 IR LED，應該與一般發光的電子元件一樣，無法改變 LED 在長時間點亮的運作下，訊號發生

衰減的事實。圖 14 為 1 小時內，紅外光 LED 持續發射下，對向接受器所測量到的讀值變化圖。

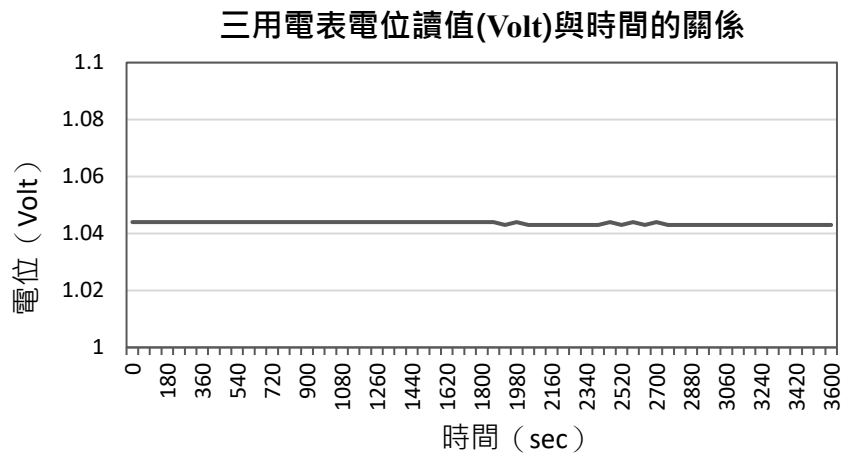


圖 14 1 小時內，電表電壓讀值隨時間的變化

環境溫度亦會影響 LED 的發光強度，從網站 (TSHG6210, 2025) 所提供的數據表顯示，溫度將影響順向電壓 (Forward voltage)，在長時間運作或散熱不良的情況下，LED 不僅會發光變弱，還可能因電壓改變導致電流不穩，因此需要良好的散熱與穩定電流控制；周遭環境溫度若超過 60°C 時，LED 的順向電流 (Forward Current) 將大幅度下降，不過此次測試時間不長，並未出現類似的現象。若使用在動力學探究實驗上，建議在 LED 底部增加散熱設施，避免溫度上升干擾光學測量。

二、可變電阻的使用場合與優勢

本文包含簡易濁度計的製作過程，並與商用濁度計做比較，針對簡易濁度計的使用可行性做評估。商用濁度計每次使用前先以蒸餾水，及標準濁度液 100 NTU 進行校正後，再進行水樣的測量，一般取得的 RO 水、自來水、山泉水等水體的濁度，都會在 0~100NTU 的範圍內；如果要進行高濁度水樣，建議先將水樣稀釋後，再用商用濁度計測量。若想要測量高濁度水樣、或化學上的澄清石灰水與二氧化碳的沉澱反應等，為避免電位訊號超過本三用電表的設定量程上限 (599.99 mV)，除了直接換個更高的限流電阻外，亦可搭配可變電阻使用；透過整體線路電阻值的增加，減弱了紅外光 LED 發射光的強度，進而降低接收器電位的讀值，此舉可使濁度計的線性範圍往高濁度方向移動；因此如果偵測的對象是濁度低的水樣時，可變電阻可保持原位，當偵測的對象是高混濁的溶液時，再依狀況適當增加可變電阻的大小即可，這樣的機動性應該是商用濁度計所不能及的。圖 15 為搭配可變電阻使用下，濁度與電位讀值的關係式。

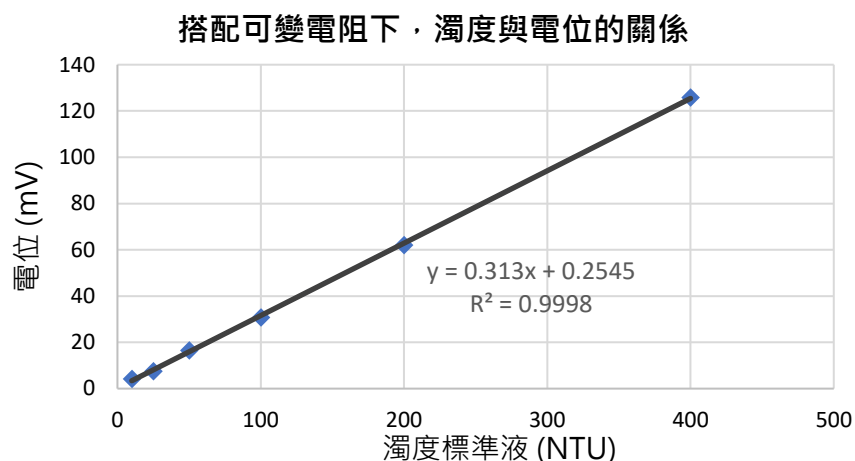


圖 15 可變電阻使用下，濁度與電位的關係

三、簡易濁度計的探測下限

此次簡易濁度計的探測下限 (Limit of Detection, LOD)，依常用的統計法 $LOD = \frac{3 \times \sigma_b}{S}$ ，其中 σ_b 為測量 10 次空白樣品的標準偏差值， S 為檢量線的斜率。經計算 10 次數去的平均值為 5.15 mV，標準偏差值 $\sigma_b=0.053$ ，斜率為 0.313，因此簡易濁度計的探測下限 $LOD = \frac{0.053 \times 3}{0.313} = 0.51 NTU$ 。

■ 安全注意及廢棄物處理

廢液依本實驗建議方法進行回收，其他的依規定傾倒置廢液回收桶。

■ 參考文獻

Turbidity. (2025, October 12). *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Turbidity>

O'Donoghue, J., & Fitzsimmons, L. (2022). Simplified low-cost LED nephelometer and turbidity experiments for practical teaching. *Journal of Chemical Education*, 99(2), 187–199. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c01225>

United States Environmental Protection Agency (1993). *Determination of turbidity by nephelometry*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/method_180-1_1993.pdf