

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

高級中等學校組 化學科

佳作

050217

就這樣「紫」-建立簡易水楊酸定量法應用於市  
售洗面乳

學校名稱： 國立竹東高級中學

作者：	指導老師：
高二 蔡昕嬪	黃勤展
高二 張喆妍	

關鍵詞： 柳酸、三價鐵離子、暖暖包

## 摘要

隨著含水楊酸清潔保養品的廣泛使用，肌膚刺激案例日益增加，顯示市面上缺乏快速且低成本的檢測工具。本研究旨在開發一種簡易、環保且具量化能力的水楊酸檢測方法。

首先，利用水楊酸與三價鐵離子在酸性條件下生成紫色錯合物，建立吸光度與濃度間的比色檢量線 ( $R^2 = 0.9993$ )。為提升實用性及對抗洗面乳的偽陰性成分，本研究進一步開發比色試紙，並使用廢棄暖暖包中的氧化鐵作為替代鐵源，調整緩衝液與鐵離子比例，試紙能有效辨識 0% 至 2% 間五種常見濃度，並透過 RGB 與灰階分析提升判讀客觀性。

整體而言，本方法具備高靈敏度、良好可操作性與環境友善特性，未來可朝向提升抗干擾能力、擴展偵測範圍及整合手機 App 應用，發展為具商業潛力的居家快篩工具。

## 壹、研究動機

雖然在市面上販售的水楊酸產品有管制濃度範圍，但每個人的肌膚敏感度不同，接觸到過量的水楊酸會導致身體產生乾燥、脫皮、紅疹等反應。不過市面上並沒有對應的居家檢測產品，也會有產品未標示清楚水楊酸濃度的狀況，於是我們便想作出一個可以檢測水楊酸濃度的方法，讓大眾們可以方便的檢測手邊的物品中所含的水楊酸濃度，以降低水楊酸過敏產生的機率。

由於民眾取得鐵離子還要額外花錢，我們想到能夠回收使用過的暖暖包中所含鐵源，將它溶於鹽酸後當成本研究的三價鐵離子使用，這不但可以讓廢棄物再利用，也可以讓民眾更容易的取得檢測水楊酸濃度的用品。

## 貳、研究目的

1. 探討鐵離子製作水楊酸檢測試劑的可行性
2. 尋找試劑的適合成分與最佳比例
3. 尋找合適的緩衝溶液
4. 建立水楊酸檢測的 SOP 以及水楊酸檢量線
5. 以自製檢量方式檢測市售含水楊酸洗面乳所含的實際水楊酸濃度
6. 探討本研究比色試劑的優勢
7. 探討本研究比色試劑的限制(實測洗面乳產品的基質效應)
8. 探討回收廢棄暖暖包中鐵離子作為檢測試劑的可行性
9. 利用廢棄暖暖包中的鐵離子來製作水楊酸試紙
10. 探討本研究比色試紙的優勢
11. 探討本研究比色試紙的限制(探討試紙製作優化、試紙的保存性)
12. 探討水楊酸比色試紙的製作成本

# 參、研究器材與藥品

## 一、藥品

名稱	學名	化學式	來源
水楊酸	Salicylic acid	$C_6H_4(OH)(COOH)$	蝦皮
硫酸鐵銨	Iron(II) ammonium sulfate	$NH_4Fe(SO_4)_2$	蝦皮
氫氧化鉀	Potassium hydroxide	KOH	蝦皮
鹽酸	hydrochloric acid	HCl	蝦皮
蒸餾水	Distilled water	$H_2O$	蝦皮

## 二、設備或器材

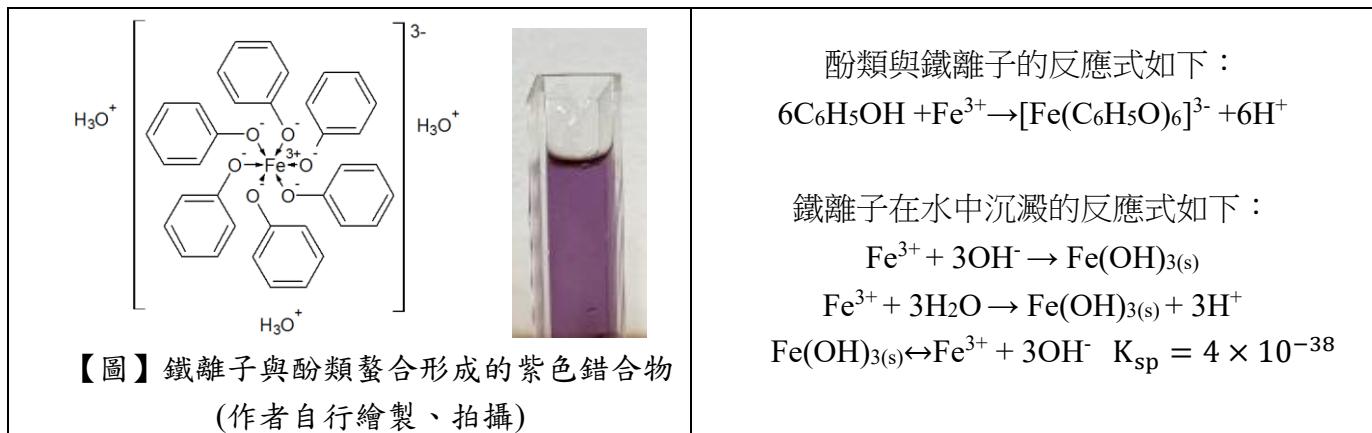
名稱	學名	名稱	學名
燒杯	Beaker	洗滌瓶	Wash bottle
漏斗	Funnel	定量瓶	Graduated flask
滴管	Drop	電子秤	electronic scale
濾紙	Filter paper	酸鹼計	pH meter
烘箱	Laboratory oven	光度計樣品槽	Test cell
秤量紙	Weight paper	微量吸量管	Pipette
分光光度計	Spectrophotometer	磁石加熱攪拌器	Magnetic stirrer
照度計	Lux meter		

圖示			
說明	玻璃容器(燒杯、漏斗、定量瓶)及滴管	烘箱	分光度計
圖示			
說明	酸鹼計	分光槽	照光計
圖示			
說明	微量吸量管	濾紙	暖暖包
作者自行拍攝			

## 肆、實驗原理(取自 ChatGPT 改寫再經老師修改)

### 一、鐵離子與螯合劑的錯合反應

大多數的酚能與鐵離子的水溶液發生顯色反應，不同的酚與氯化鐵反應呈顯不同的顏色。例如：苯酚、間苯二酚、1，3，5-苯三酚與氯化鐵溶液作用，均顯紫色；甲苯酚呈藍色；鄰苯二酚、對苯二酚呈綠色；1，2，3-苯三酚呈紅色， $\alpha$ -萘酚為紫色沉澱， $\beta$ -萘酚則為綠色沉澱等。此顯色反應常用以鑑別酚類的存在。

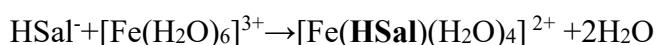


【圖】鐵離子與酚類螯合形成的紫色錯合物  
(作者自行繪製、拍攝)

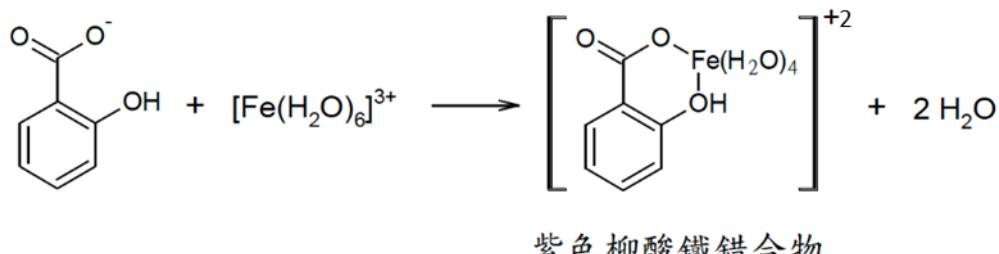
而本研究將此理論延伸，以鐵離子檢測來檢測水楊酸。

### 二、鐵離子與水楊酸的錯合反應

方程式



結構方程式



【圖】水楊酸以雙牙基的方式螯合鐵離子(作者自行繪製)

#### • 反應機制：

- 水楊酸陰離子（來自水楊酸失去一個質子後）具備羧酸基 ( $-COO^-$ ) 與酚羥基 ( $-OH$ )，可作為雙齒配位基。
- 六水合三價鐵離子： $Fe^{3+}$  與 6 個水分子形成穩定錯合物。

#### • 反應產物：

- 紫色錯合物：水楊酸與  $Fe^{3+}$  配位後，兩個水分子被取代，形成含水楊酸和四個水分子的錯合物。
- 放出 2 分子水

此錯合反應會產生明顯紫色，是檢測水楊酸存在的依據。紫色深淺可與吸光度對應，用於定量分析。

# 伍、研究構想

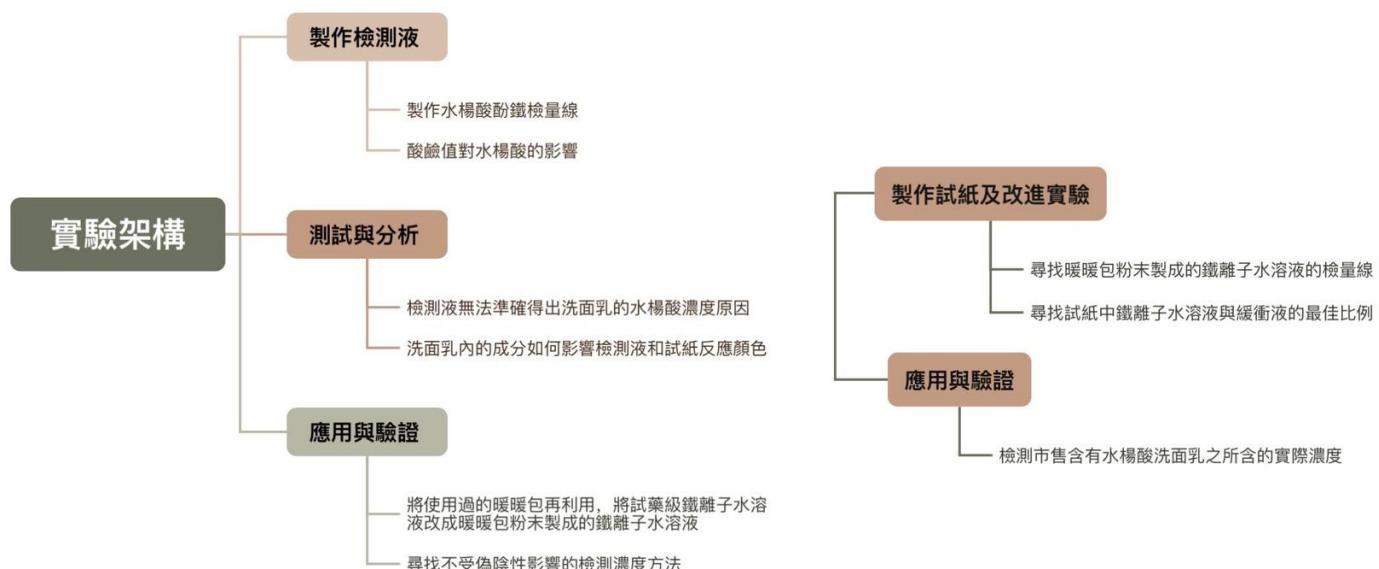
## 一、實驗發想

市面上有各種試紙卻沒有水楊酸試紙，因此本研究旨在開發一套可檢測洗面乳中水楊酸含量的簡易方法，並探討不同條件對檢測效果的影響。

實驗首先製備含鐵離子的檢測液，建立水楊酸濃度對應的顏色變化與吸光度標準曲線，並分析酸鹼值對反應的影響。進一步探討洗面乳中其他成分對檢測準確性的干擾，並以實驗方式找出其干擾、影響反應顏色的原因。

為提升檢測應用性與永續性，本研究亦嘗試以廢棄暖暖包中的氧化鐵粉為原料製作試紙與檢測液，探討其檢量極限與最佳比例，並評估其重複利用的可行性。最後實際應用所製檢測方法於市售洗面乳樣品中，比對標示與實測水楊酸濃度，並提出降低偽陰性影響的改良策略。本實驗兼具創新、實用與環保概念，具發展成簡易快篩工具之潛力。

## 二、實驗架構(作者自行繪製)



一、製作檢測液	二、測試與分析
1.製作水楊酸顏色變化標準量線 2.探討酸鹼值對檢測結果的影響	1.檢測液無法準確測得洗面乳水楊酸濃度的原因分析 2.洗面乳內其他成分如何影響檢測液反應與試紙顏色
三、製作試紙及改進實驗	四、應用與驗證
1.尋找暖暖包粉末製成的鐵離子水溶液檢測極限 2.探討試紙中鐵離子的最佳比例（顏色最明顯）	<input checked="" type="checkbox"/> 檢測液應用： 1.檢測市售含水楊酸洗面乳之實際含量 2.尋找不受偽陰性干擾的檢測方法 <input checked="" type="checkbox"/> 檢測方式改進： 1.將使用過的暖暖包中鐵粉再利用，製成檢測液 2.評估此方式是否能有效檢測水楊酸，並達到永續/環保目的

本研究包含：實驗基本設計 + 問題分析 + 儀器或材料創新 + 真實應用驗證，貼合 STEM 跨領域整合思維（化學反應、生活應用、永續思考）。

# 陸、研究過程與方法

## 實驗一、配製不同濃度的水楊酸標準溶液

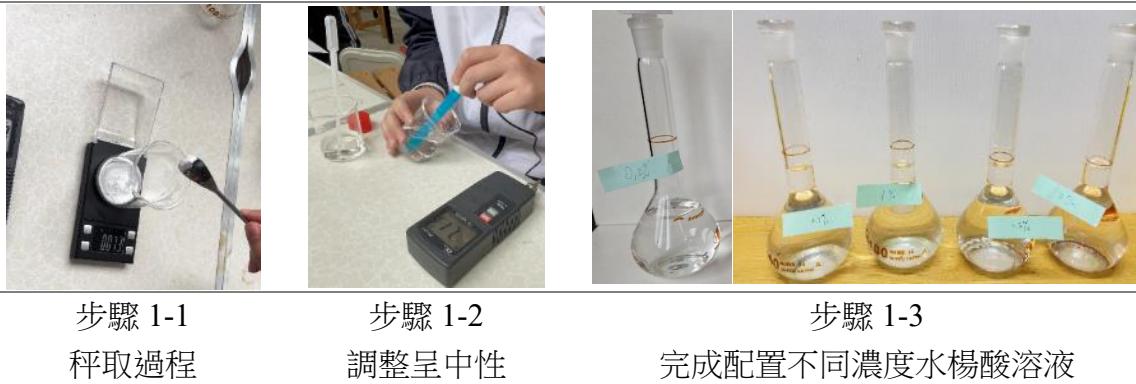
### (一) 步驟

步驟 1-1 秤取 0.2 g、0.5 g、1 g、1.5 g、2 g 水楊酸粉末，分別加水至 50 mL。(呈透明，有白色沉澱)

步驟 1-2 以 KOH 水溶液調整 pH=7.0

步驟 1-3 使用 100 mL 定量瓶配製成 0.2%、0.5%、1%、1.5%、2% 之透明無色水楊酸溶液

### (二) 圖例說明(作者自行拍攝)



## 實驗二、配置三價鐵離子溶液

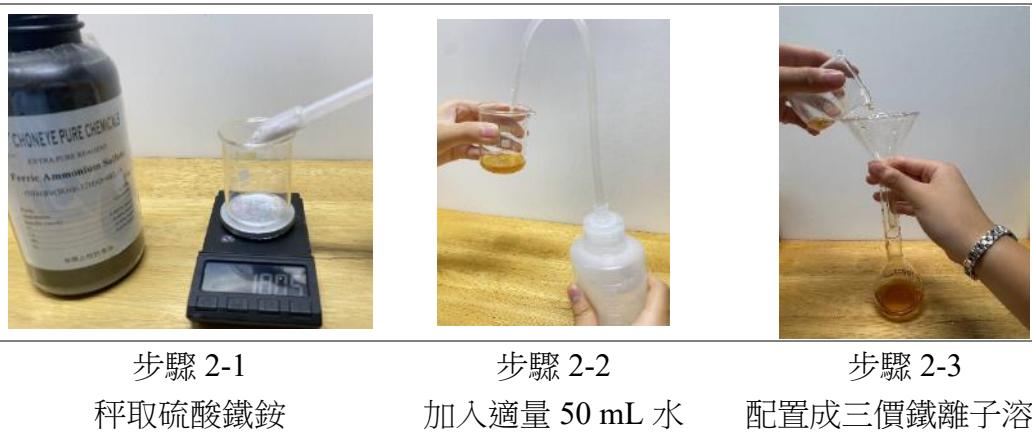
### (一) 步驟

步驟 2-1 秤取 2.66 g 硫酸鐵銨

步驟 2-2 加入水至 50 mL 使部分溶解

步驟 2-3 倒入定量瓶，加水至 100 mL。(形成橘色溶液)

### (二) 圖例說明(作者自行拍攝)



## 實驗三、繪製紫色錯合物在不同可見光波長時的吸收度曲線

### (一) 步驟

步驟 3-1 取 10 mL 緩衝溶液加入 0.1 mL 三價鐵離子溶液，加入 0.1 mL 水楊酸

步驟 3-2 以蒸餾水為背景值，利用分光度計測出 400-700 nm 的吸收度。(每隔 20 nm 取一次數值)

步驟 3-3 重複步驟 3-1 到 3-2，並得到 0.2%、0.5%、1%、1.5%、2% 水楊酸酚鐵化合物的吸收度，以圖表繪製出曲線

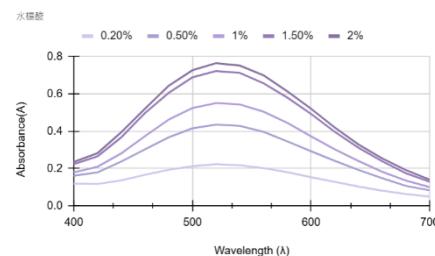
## (二) 圖例說明(作者自行拍攝)



步驟 3-1  
混和溶液



步驟 3-2  
測量吸收度



步驟 3-3  
繪製成圖表

## 實驗四、尋找適合的水楊酸測試劑比例

### (一) 步驟

步驟 4-1 取 0.1 mL 水楊酸溶液加入 10 mL 緩衝溶液

步驟 4-2 分別加入 20 uL、60 uL、100 uL、200 uL、300 uL 三價鐵離子溶液

步驟 4-3 在分光槽中加入溶液，以蒸餾水為背景值，測量溶液在最佳波長(520 nm)吸收度

步驟 4-4 利用吸收度數據繪製出圖表

步驟 4-5 重複步驟 4-1 到 4-3，取 0.5%、1.0%、2.0% 水楊酸製作

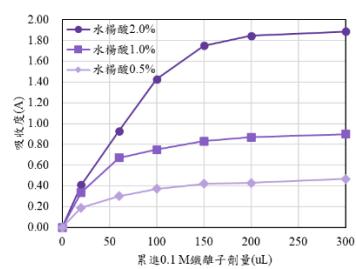
### (二) 圖例說明(作者自行拍攝、繪製)



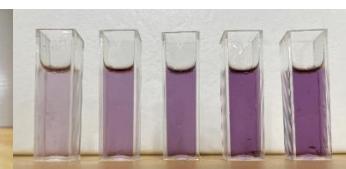
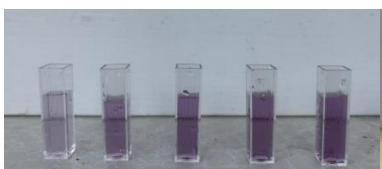
步驟 4-1  
混和溶液



步驟 4-2  
測量吸收度



步驟 4-3  
繪製成圖表



0.5% 水楊酸、1.0% 水楊酸、2.0% 水楊酸製作之不同鐵離子比例水楊酸酚鐵溶液

步驟 4-4~4-5

## 實驗五、建立以水楊酸酚鐵方法檢測水楊酸 SOP 之檢量線

### (一) 步驟

步驟 5-1 在五個不同的瓶子內加入 10 mL 緩衝溶液 (pH2)、100 uL 商用鐵離子 0.1 M 水溶液，製作成檢測溶液。

步驟 5-2 分別加入 100 uL 的 0.2%、0.5%、1%、1.5%、2% 水楊酸溶液

步驟 5-3 將步驟 5-2 的五個溶液加入分光槽，利用分光度計檢測在波長 520 nm 時的吸收度

步驟 5-4 繪製出水楊酸的濃度檢量線，並計算其迴歸方程式以及 R square 值。

### (二) 圖例說明(作者自行拍攝、繪製)



步驟 5-1

混和溶液

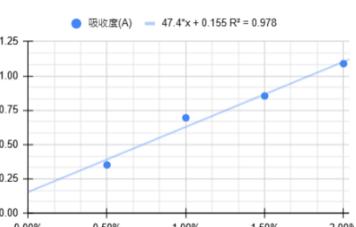


步驟 5-2

0.2%、0.5%、1%、1.5%、2%水楊  
酸加入檢測液

步驟 5-3

測量其吸收度



步驟 5-4

繪製檢量線

## 實驗六、利用水楊酸酚鐵檢測之 SOP 檢測市售產品所含的水楊酸濃度

### (一) 步驟

步驟 6-1 取 100  $\mu$ L 鐵離子溶液加入 10 mL 緩衝液形成檢測液。

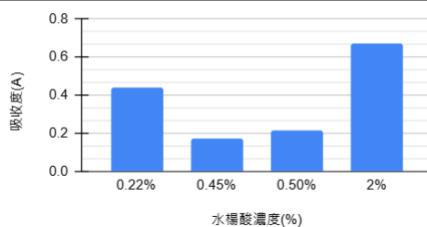
步驟 6-2 取 1 mL 分別為 0.22%、0.45%、0.5%、2% 的洗面乳加入檢測溶液。

步驟 6-3 放置一段時間使洗面乳中的水楊酸溶解出。

步驟 6-4 分別測量四種濃度溶液在波長 520 nm 時的吸收度。

步驟 6-5 將數據繪製成圖表。

### (二) 圖例說明(作者自行拍攝)



步驟 6-1

配製檢測液

步驟 6-2

溶出法

步驟 6-2

水楊酸和檢測液反應

步驟 6-3

測量吸收度

步驟 6-4

繪製圖表

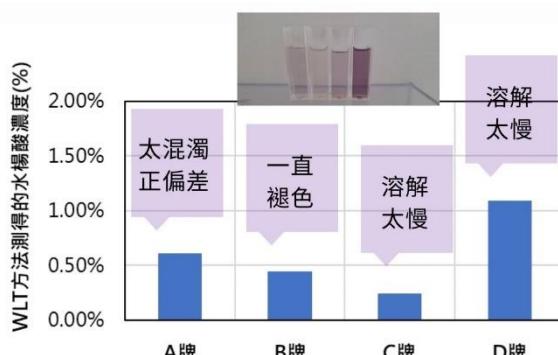
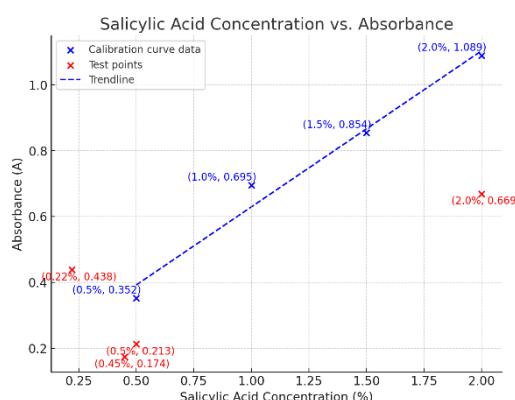
## 實驗七、探討市售洗面乳產品檢測結果

### (一) 步驟

步驟 7-1 將實驗六測得四種濃度的吸收度帶回檢量線。

步驟 7-2 觀察四種溶液並提出可能影響數據的因素。

### (二) 圖例說明(作者自行繪製)



步驟 7-1

將產品濃度帶回檢量線

步驟 7-2

觀察初步實驗結果、推測原因

## 實驗八、為排除洗面乳其他成分之干擾進而開發水楊酸試紙 SOP

### (一) 步驟

步驟 8-1 配置檢測溶液。

步驟 8-2 用檢測融液將濾紙浸濕。

步驟 8-3 使用烘箱將浸濕的濾紙烘乾形成試紙。

步驟 8-4 將製作好的試紙剪成小塊的矩形。

### (二) 圖例說明(作者自行拍攝)



步驟 8-1  
配置溶液



步驟 8-2  
浸濕濾紙



步驟 8-3  
將濾紙烘乾



步驟 8-4  
剪成矩形形成試紙

## 實驗九、調整試紙中的鐵離子比例

### (一) 步驟

步驟 9-1 提高試紙檢測溶液中的三價鐵離子溶液比例。

步驟 9-2 重複實驗八直到肉眼可觀測出不同濃度試紙的顏色差異。

### (二) 圖例說明(作者自行拍攝)



步驟 9-1  
調整鐵離子溶液比例



檢測液與不同濃度水楊酸反應



步驟 9-2  
製作試紙觀察顏色差異

## 實驗十、尋找暖暖包代替商用鐵離子最佳製作比例

### (一) 步驟

步驟 10-1 利用分光度計檢測在波長 520 nm 時的吸收度，以 0.5%水楊酸的數據為標準。(在檢測液中加入 100 uL 0.5%水楊酸，吸收度為 0.352) 利用鹽酸將使用過的暖暖包粉末中的鐵離子溶出。

步驟 10-2 將暖暖包粉末過濾出，得到三價鐵離子溶液

步驟 10-3 將檢測液中的商用鐵離子替換成暖暖包鐵離子溶液，加入水楊酸後測量吸收度。

步驟 10-4 重複步驟 10-2 直到吸收度數據接近 0.267。

### (二) 圖例說明(作者自行拍攝)



步驟 10-1

鹽酸溶解暖暖包粉末中的鐵離子

步驟 10-2

過濾出三價鐵離子溶液

步驟 10-3

測量吸收度

## 實驗十一、利用暖暖包三價鐵離子水溶液製作水楊酸濃度檢量線

### (一) 步驟

步驟 11-1 粹取 2 g 暖暖包粉末，加入 5 mL 鹽酸溶解鐵離子。

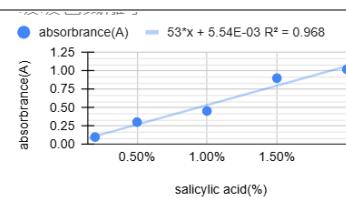
步驟 11-2 過濾溶液，取得暖暖包製成的三價鐵離子溶液。

步驟 11-3 按照水楊酸酚鐵檢測之 SOP，將 0.1 mL 商用鐵離子溶液替換成 0.1 mL 暖暖包鐵離子溶液。

步驟 11-4 檢測五種水楊酸酚鐵溶液的吸光度。

步驟 11-5 將五個數據繪製成檢量線。

### (二) 圖例說明(作者自行拍攝、繪製)



步驟 11-1

秤取暖暖包粉末並  
加入鹽酸

步驟 11-2

過濾出鐵離  
子溶液

步驟 11-3

製作暖暖包鐵  
離子檢測液

步驟 11-4

檢測吸收度

步驟 11-5

繪製檢量線

## 實驗十二、利用暖暖包鐵離子製作試紙

### (一) 步驟

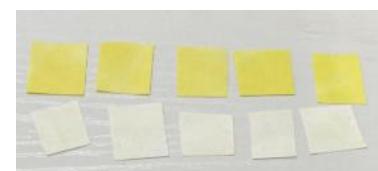
步驟 12-1 混合 4 mL 鐵離子溶液和 1 mL 緩衝溶液形成檢測溶液。

步驟 12-2 利用檢測溶液將濾紙浸濕。

步驟 12-3 使用烘箱將浸濕的濾紙烘乾形成試紙。

步驟 12-4 將製作好的試紙剪成小塊的矩形。

### (二) 圖例說明(作者自行拍攝)



步驟 12-1

混合鐵離子溶  
液和緩衝溶液

步驟 12-2

將試紙浸濕

步驟 12-3

放入烘箱烘乾

步驟 12-4

將試紙剪成小塊

## 實驗十三、製作試紙色度卡對照表

### (一) 步驟

步驟 13-1 取 1 mL 水楊酸試藥標準溶液加上 9 mL 水稀釋，使濃度變淡 10 倍。

步驟 13-2 分別使用 0.2%、0.5%、1%、1.5%、2% 水楊酸重複步驟 13-1 後滴上試紙。

步驟 13-3 在固定光源下(400 lx)，使用手機軟體分析試紙顏色的 R、G、B。

步驟 13-4 重複步驟 13-1 到 13-4，使用市售鐵離子試紙和暖暖包鐵離子試紙各做一次。

### (二) 圖例說明(作者自行拍攝)



步驟 13-1  
稀釋水楊酸  
溶液



步驟 13-2  
將稀釋過後的溶液滴上試紙



步驟 13-3  
分析 R、G、B  
數值



步驟 13-4  
重複實驗

## 實驗十四、利用試紙檢測市售產品

### (一) 步驟

步驟 14-1 取 1 mL 產品加入 9 mL 水(溶出法)，靜置一段時間讓產品中的洗面乳溶解。

步驟 14-2 將洗面乳水溶液滴上試紙，並以純水為對照組。

步驟 14-3 在固定光源下(400 lx)，滴完後、滴完後三分鐘、五分鐘、十分鐘各拍一張照片

步驟 14-4 分析試紙顏色的 R、G、B，並觀察隨著時間變化試紙是否有褪色的狀況發生。

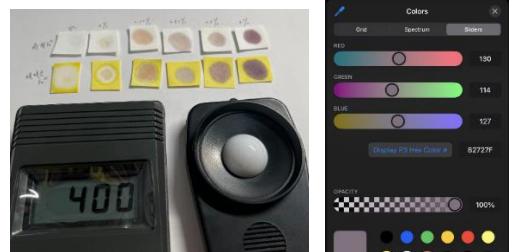
### (二) 圖例說明(作者自行拍攝)



步驟 14-1  
浸泡洗面乳於水中，將水楊酸  
溶解出形成檢測樣本



步驟 14-2  
將產品樣本溶液滴上試紙



步驟 14-3  
在固定光源下拍攝  
試紙照片



步驟 14-4  
照片的 R、  
G、B 分析

## 實驗十五、以不同鐵源製作之水楊酸試紙

步驟 15-1 取 2.66 g 硫酸鐵銨加水至 100 mL 配製 0.1 M 硫酸鐵銨溶液。

步驟 15-2 取 5 mL 鹽酸溶解 2 g 暖暖包粉末得到暖暖包鐵離子溶液。

步驟 15-3 取 1.62 g 氯化鐵加水至 100 mL 配製 0.1 M 氯化鐵溶液。

步驟 15-4 混合 1 mL 緩衝溶液和 4 mL 鐵離子溶液形成試紙檢測液(三種鐵離子分別製作)。

步驟 15-5 將三種檢測溶液分別利用光碟機旋轉均勻滴上試紙。

步驟 15-6 將試紙烘乾並剪成小塊矩形。

步驟 15-7 在固定光源 (400 Lux) 下拍攝照片、吸取色塊 RGB 數值並計算灰階值。

## 柒、問題與討論

### 討論一、探討本研究水楊酸在不同酸鹼值的溶解度

本研究的目標在於探討市售洗面乳的水楊酸含量，因此標準樣本的製作需參考市售提供的數值。

如圖為不同牌子的水楊酸，由左而右為 0%、0.22%、0.45%、1.0%、2.0% 產品明確標示之洗面乳。



【圖】本研究選用的 5 種常見洗面乳(作者自行拍攝)

水楊酸含量規定：

#### 水楊酸藥粧品：濃度上限2%

我國核准含水楊酸(salicylic acid)等成分之抗痘產品包括化粧品及藥品，化粧品含水楊酸成分用於「軟化角質，面皰預防」者，均以含藥化粧品管理，其水楊酸成分之限量為0.2~2%。

參考資料：衛生福利部食品藥物管理署 (TFDA) 公告：為維護含藥化粧品使用安全，修正含藥化粧品可用成分及其含量規定一覽表 (公告日期：108 年 6 月 25 日)

回到研究的方面：

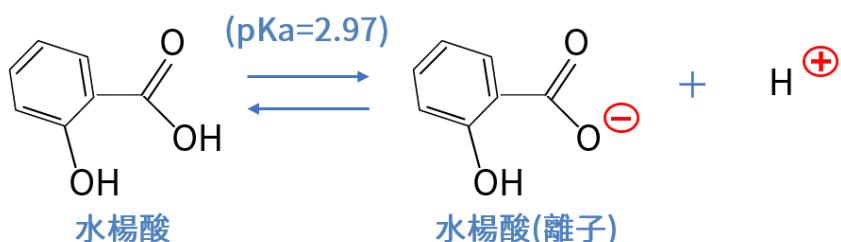
水楊酸的自然溶解度不高，因此沒辦法只通過簡單的溶解配製得到本研究目標市售藥用 2% 濃度。

【表】水楊酸(Salicylic Acid)的溶解度

溫度	20°C	25°C
溶解度 (g/100 mL 水)	0.2 g	0.22 g
註解	室溫下即使飽和水楊酸也只有 0.22% 左右，無法作為研究我國洗面乳水楊酸含量的標準溶液	

參考來源：pubchem

因此我們透過測量市售洗面乳的 pH 可以知道，pH 在 7 附近，一來是由於用在人體需要中性，二來是因為根據勒沙特列原理，水楊酸的解離需要在  $H^+$  較低的環境下，才能平衡向右，因此本研究所使用的標準水楊酸溶液都是以調整 pH7 環境來配製。



【圖】水楊酸的解離方程式

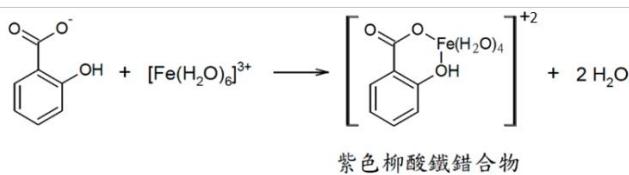
參考來源：VOCUS 平台 ★★★MSMF 保養品 DIY 【理論+實作】專題

## 討論二、尋找水楊酸酚鐵溶液最大吸收波長

如右圖是本研究利用水楊酸與鐵離子作用產生紫色酚鐵錯合物，該紫色溶液的最大吸收波長為 520 nm，濃度也與其相關。

故之後會以 520 nm 波長作為檢測波長

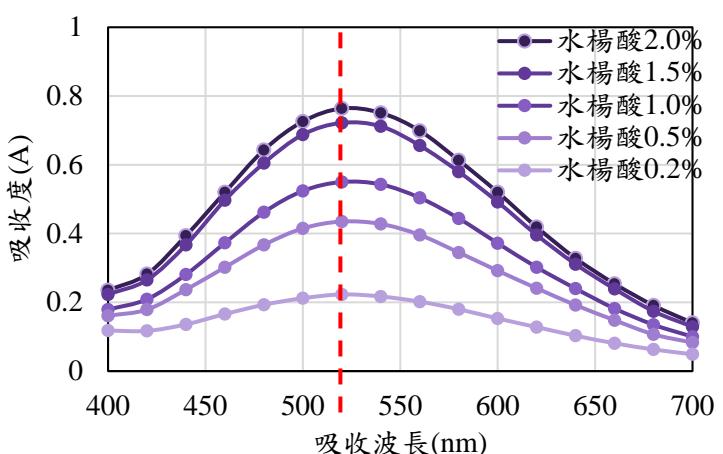
根據的高中原理是苯酚與鐵離子的配位如下



【圖】水楊酸與水合鐵離子形成紫色酚鐵

資料來源：陽明交通大學普化實驗二十 阿斯匹靈  
藥品的分析

根據配位化合物的性質可能的配位情況有  $[\text{Fe}(\text{HSal})_3]$  、  $[\text{Fe}(\text{HSal})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^+$  、 或是  $[\text{Fe}(\text{HSal})(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$  在之後的討論會進一步以實驗確認是哪一型態



【圖】不同濃度水楊酸形成之紫色錯合物吸收光譜  
(作者自行繪製)

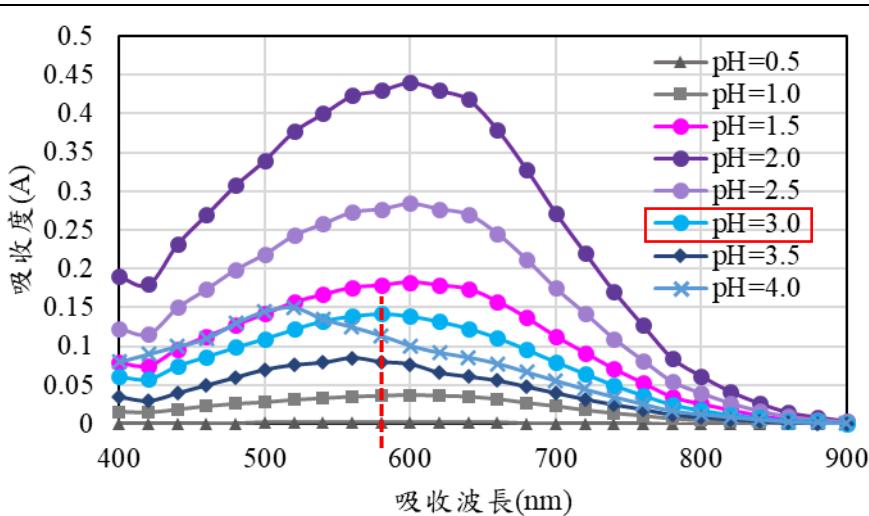


【圖】不同濃度水楊酸形成之水楊酸酚鐵(未控 pH)  
(由左至右為 0.2、0.5、1.0、1.5、2%)(作者自行拍攝)

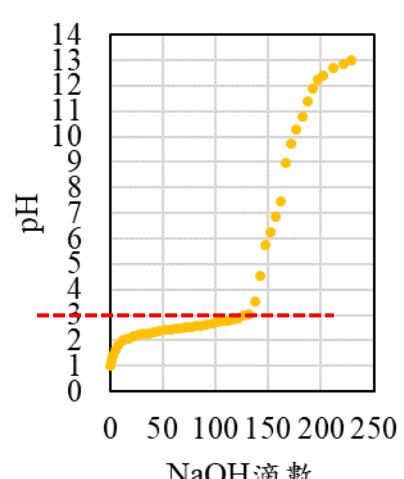
## 討論三、探討水楊酸酚鐵顏色的穩定性

### (一)水楊酸酚鐵吸收光譜以及鐵離子沉澱滴定曲線

實驗發現一件事就是當水楊酸酚鐵太酸或是太鹼時，導致原本的紫色消失或是變成其他顏色。但如果我們要測水楊酸濃度的話，變色或是深淺改變會讓實驗很困擾。於是有了以下測試：



【圖】不同 pH 之水楊酸酚鐵吸收光譜(作者自行繪製)



【圖】鐵離子  $\text{Fe}^{3+}$  滴定曲線  
(作者自行繪製)



【圖】不同 pH 之相同濃度水楊酸與 0.1 M  $\text{Fe}^{3+}$  反應得到不同顏色或深淺(作者自行拍攝)  
(由左而右為 pH=0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0)

## (二)水楊酸(SA)與鐵離子(Fe<sup>3+</sup>)在不同 pH 下的反應與吸收光譜分析(作者解釋)

一、酸鹼性影響水楊酸(SA)的結構			二、Fe <sup>3+</sup> 與水楊酸的錯合物形成
水楊酸 (C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (OH)COOH) 是具有羧基(-COOH)和酚羥基(-OH)的有機酸 H <sub>2</sub> Sal，其解離常數(pKa)為：			由於三價鐵離子 (Fe <sup>3+</sup> ) 具有強烈的路易斯酸特性：
			1. 能與水楊酸的 羧基 (-COO <sup>-</sup> ) 或酚羥基(-OH) 配位形成錯合物。
H <sub>2</sub> Sal	pKa <sub>1</sub>	pKa <sub>2</sub>	2. 能與水的 OH 基形成 Fe(OH) <sub>3</sub> 沉澱
數值	約為 3	約為 13	
註解	(COOH 解離)	(OH 解離)	

表示在不同 pH 值下，水楊酸的解離狀況會影響其與 Fe<sup>3+</sup> 的錯合能力：

- pH = 2 時**：水楊酸分子 (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OH)COOH) 約佔 90%，只有 10% 解離形成 C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OH)COO<sup>-</sup>。
- pH = 3 時**：一半羧基解離，形成 C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OH)COO<sup>-</sup>，能與 Fe<sup>3+</sup> 穩定配位，另一半維持 COOH 配位能力差。
- pH = 4 時**：水楊酸分子在水中約有 90% 解離去形成 C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OH)COO<sup>-</sup>，羧基或羥基電子密度增強，影響 Fe<sup>3+</sup> 的配位方式，可能形成不同類型的錯合物例如[Fe(HSal)<sub>3</sub>]、[Fe(HSal)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>]<sup>+</sup>。

來解釋實驗結果：

高酸性環境下 (pH<2)，水中的 Fe<sup>3+</sup> 主要以 [Fe(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>]<sup>3+</sup> 形式存在，水楊酸的錯合能力受限。而隨著 pH 提升使水楊酸的錯合能力也提升，Fe<sup>3+</sup> 逐漸與水楊酸錯合，產生紫色的錯合物文獻說比較有可能是 [Fe(HSal)(H<sub>2</sub>O)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup>，或是 [Fe(HSal)<sub>3</sub>]、[Fe(HSal)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>]<sup>+</sup>。

然後在低酸性環境下 (pH>2)，實驗發現其吸收峰開始下降，吸收峰位置也發生變化，可能是橘色 Fe(OH)<sub>3</sub> 生成，因為從滴定曲線可知，大約在 pH 3 時 Fe<sup>3+</sup> 始沉澱。

備註：以上為查詢 ChatGPT 後作者吸收內化後給予的解釋。

## (三)吸收光譜變化解釋(這邊是 ChatGPT-4o 級的專業原始資料)

### (1) 低 pH (0.5 - 1.0)：吸收度極低

- Fe<sup>3+</sup> 主要以 [Fe(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>]<sup>3+</sup> 形式存在，幾乎不與水楊酸形成錯合物。
- 水楊酸幾乎未解離 (仍以 C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OH)COOH 形式存在)，難以提供配位點。
- 溶液顏色接近淡黃色，吸收光譜信號微弱。

### (2) pH ≈ 2.0：吸收峰達到最大

- 水楊酸的羧基部分解離，形成 C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OH)COO<sup>-</sup>，能有效與 Fe<sup>3+</sup> 配位。
- 形成 [Fe(SA)<sub>3</sub>]<sup>3-</sup> 或 [Fe(SA)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>]<sup>+</sup> 等錯合物，導致吸收峰顯著增強。
- 吸收峰約出現在 500 nm 附近，對應於 Fe<sup>3+</sup> 與水楊酸錯合後的紫色錯合物。

### (3) pH > 2.0：吸收度逐漸下降

- pH 逐漸上升時，Fe<sup>3+</sup> 容易與水發生水解反應：



- 當 Fe<sup>3+</sup> 水解，會降低可用於與水楊酸配位的 Fe<sup>3+</sup> 濃度，使錯合物的形成受到抑制。
- 水楊酸的酚羥基在較高 pH 下成為 -O<sup>-</sup> (失去 H<sup>+</sup>)，影響錯合物的結構，使吸光度降低。
- 溶液顏色可能逐漸變為黃綠色，吸收度下降。

### (4) pH ≈ 4.0：吸收度最低

- Fe<sup>3+</sup> 的水解更明顯，可能生成 Fe(OH)<sub>3</sub> 沉澱，錯合物進一步減少。
- 水楊酸的解離程度較高，影響 Fe<sup>3+</sup> 的錯合模式。
- 溶液顏色可能接近橙黃色或透明，吸收光譜接近基線。

## 討論四、建立本研究水楊酸試劑-尋找合適的鐵離子劑量

### (一) 實驗設計與假設：

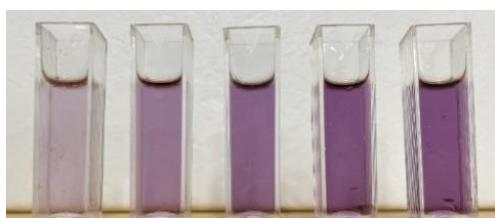
根據討論三的結果可知，水楊酸檢測試劑的開發需要在 pH2 環境下作用，因此往後都會控制反應系統為 pH2，這樣可以使水楊酸被偵測到的靈敏度大為提升，意思就是當水楊酸濃度很低時，也可以有比較深的顏色、吸收度較大。

為了得知配製水楊酸試劑時成分需要  $\text{Fe}^{3+}$  最合適的前置劑量，實驗固定水楊酸樣本量，改變鐵離子劑量(鐵離子濃度固定，以添加溶液體積的方式來逐步增加劑量)，**提出研究假設：**

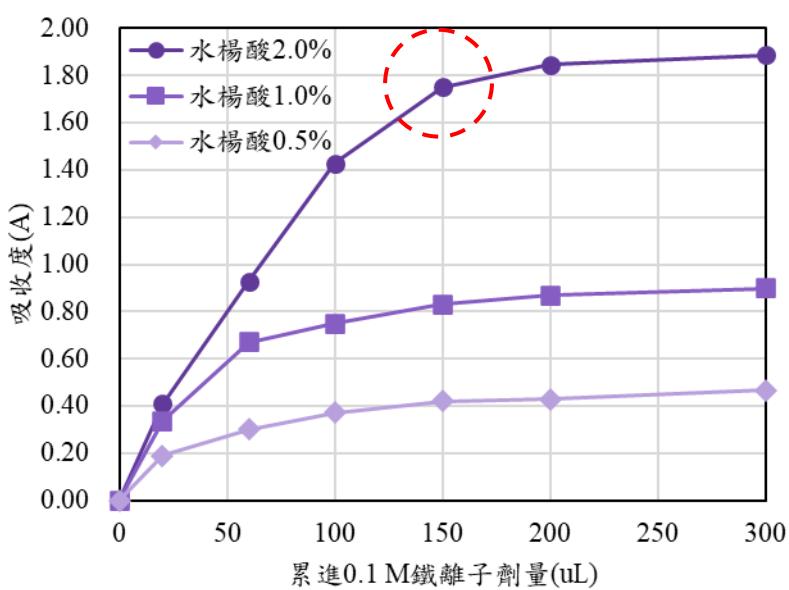
隨著鐵離子添加，當溶液顏色達飽和時，此時鐵離子的劑量才足夠偵測此濃度下的水楊酸

### (二) 實驗條件說明：

- 反應系統：緩衝液 (pH2) +0.1 mL 水楊酸溶液(0.5%、1.0%、2.0%)。
- 操縱變因：累進添加 0.1 M  $\text{Fe}^{3+}$ 離子水溶液的體積 30、60、100、150、200、300  $\mu\text{L}$ 。
- 控制變因：調整緩衝液至溶液總體積固定為 10 mL。應變變因：吸光度 (紫色錯合物)。



(作者自行拍攝)



【圖】不同濃度水楊酸(0.1 mL)與不同鐵離子(0.1 M)劑量反應形成紫色酚鐵的吸收度變化(作者自行繪製)  
(10 mL 檢測液中的 100  $\mu\text{L}$  相當於 0.001 M  $\text{Fe}^{3+}$ )

### (三)、結果觀察與解釋：

- 1.吸光度隨  $\text{Fe}^{3+}$  增加而上升，但會趨於平穩，表示反應接近飽和。
- 2.濃度越高的水楊酸，吸光度越高：因為水楊酸與  $\text{Fe}^{3+}$  結合形成的錯合物越多。
- 3.市售藥用最濃 2% 水楊酸的吸光度變化最明顯，反應更劇烈且吸光度達到接近 1.8 A。

所有濃度在  $\text{Fe}^{3+}$  體積達 150  $\mu\text{L}$  左右時，吸光度都趨近飽和 → 可推測是反應的最佳比例點。

### (四)、估算 $\text{HSal}^-$ - $\text{Fe}^{3+}$ 反應比 (找到試劑最佳配製比例)

保持 [水楊酸] 濃度不變，改變  $[\text{Fe}^{3+}]$  濃度，找出吸光度最高點 (即錯合物形成最大量時的比例)，該點對應的莫耳數比即為反應比。透過「莫耳比 (Mole Ratio) 法」，找出 pH2 時水楊酸分子與  $\text{Fe}^{3+}$  的莫耳比例來推知試劑反應機制。

0.1 mL 的 2%水楊酸大約含有  $0.002 \text{ g}/(138\text{g/mol})=1.45\times 10^{-5} \text{ mol}$  的水楊酸  $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})\text{COOH}$ ，而水中含有三價鐵離子  $0.1 \text{ M}\times 150 \text{ }\mu\text{L}=1.5\times 10^{-5}$ ，表示 pH2 時水中的紫色物種應為 $[\text{Fe}(\text{HSal}^-)(\text{H}_2\text{O})_4]^{+}$ 而非 $[\text{Fe}(\text{HSal})_3]^{3-}$ 、 $[\text{Fe}(\text{HSal})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^-$ ，代表鐵離子劑量應接近 150  $\mu\text{L}$  最佳。

## 討論五、建立水楊酸比色試劑及繪製檢量線

### (一) 實驗設計與假設：

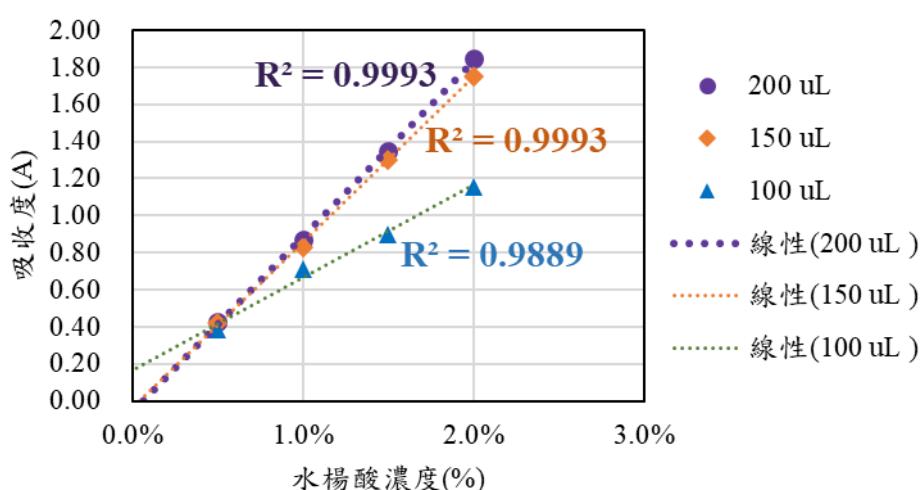
實驗希望在成功控制 pH 以及確保鐵離子足夠與待測水楊酸樣本完全反應，能夠使待測水楊酸任一濃度大小能夠與所形成的紫色酚鐵顏色深淺呈高度相關。

#### 研究假設：

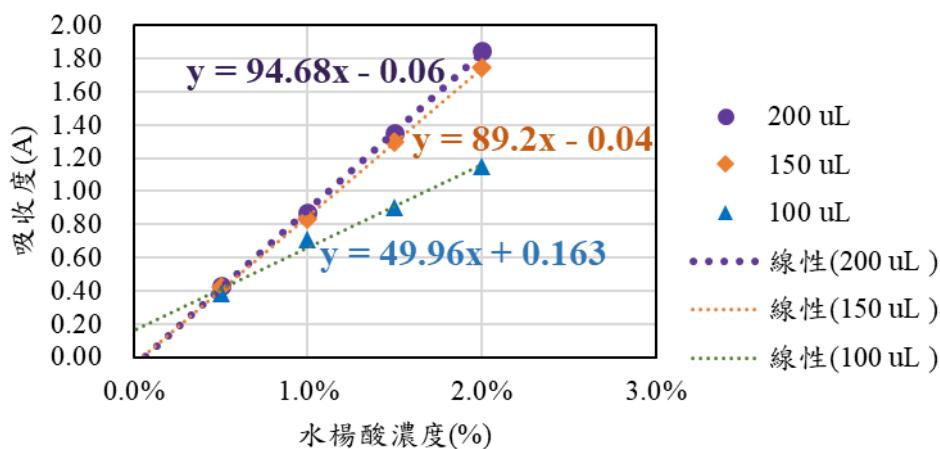
水楊酸濃度與水楊酸酚鐵紫色吸收度成正比

### (二) 實驗條件說明：

- 反應系統：緩衝液 (pH2) +0.1 M 鐵離子溶液(100、150、200 uL)。
- 操縱變因：0.1 cc 水楊酸標準溶液 (0.5%、1.0%、2.0%)
- 控制變因：調整緩衝液至溶液總體積固定為 10 mL。應變變因：吸光度 (紫色錯合物)。



【圖】本研究建立之水楊酸比色試劑在不同鐵離子量時的定量情形(作者自行繪製)



【圖】本研究建立之水楊酸比色試劑在不同鐵離子量時的定量情形(作者自行繪製)

### (三) 結果觀察與解釋：

- 試劑成分中鐵離子不足時，測量高濃度水楊酸的吸光度會發生負偏差。
- 當高濃度水楊酸數據點的偏差使得迴歸方程式無法通過原點(無法成正比)。
- 比較回歸線的 y 截距

【表】不同鐵離子量之水楊酸比色試劑

試劑中鐵離子添加量	迴歸方程式 Y 截距	解讀
100 uL	0.163	
150 uL	-0.04	最接近成正比的檢量點
200 uL	-0.06	

### (四) 建立本研究水楊酸試劑及其檢量線

- 本研究建立水楊酸檢測標準比色試劑成分確定為 10 mL 緩衝液+150 uL 鐵離子+0.1 cc 樣本
- 此方法測量 0.5~2.0% 區間之水楊酸濃度所得檢量線為

$$A = 89.2[SA\%] - 0.04$$

$$R^2=0.9993$$

## 討論六、利用本研究之水楊酸比色試劑檢測市售洗面乳(市賽後研究)

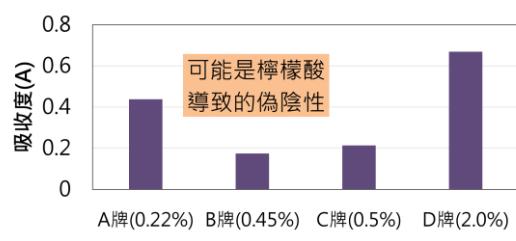
### (一) 實驗設計與假設：

#### 研究假設：

洗面乳背面標示之水楊酸濃度越高，該洗面乳經本研究水楊酸比色試劑檢測出越深的紫色

### (二) 實驗條件說明：

- 反應系統：緩衝液 (pH2) +0.1 M 鐵離子溶液(150 uL)。
- 操縱變因：不同品牌洗面乳。
- 控制變因：調整緩衝液至溶液總體積固定為 10 mL。應變變因：吸光度 (紫色錯合物)。
- 取樣方法：溶出測試法(水萃)。



【圖】不同品牌洗面乳測得(作者自行繪製)  
一開始深色卻逐漸褪色(含有檸檬酸)



【圖】本研究選擇之洗面乳樣本(作者自行拍攝)  
(由左而右為設定為 A 牌、B 牌、C 牌、D 牌)

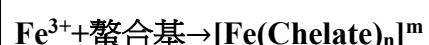
### (三) 結果觀察與解釋：

- 1. 實驗結果與假設不符。
- 2. D 牌 2.0% 吸光度顯著較高 → 為目前法規允許的最高濃度，反應效果最明顯，呈深紫色。
- 3. A 牌雖濃度低，但吸光度高於 B 及 C → 有可能使用游離型水楊酸，較容易溶出並與鐵離子反應，可能實際使用體感強烈。
- 4. 洗面乳有其他成分可能干擾鐵離子比色試劑運作。可能受到以下因素影響：
  - 萃取效率 (是否完全釋放水楊酸)
  - 配方中其他干擾成分 (如皂基、香精、表面活性劑)
  - 水楊酸型態 (游離型 vs 經包覆/酯化等)

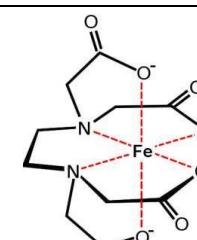
品 牌	吸光度 (A)	回歸方程式 $A = 89.2[SA\%] - 0.04$	實測濃 度 (%)	標示濃 度 (%)	作者的解釋說明
A	0.43	$(0.43 + 0.04) / 89.2 \approx 0.52\%$	0.52%	0.22%	實測高於標示，可能游離型水楊酸比例高或標示偏低
B	0.18	$(0.18 + 0.04) / 89.2 \approx 0.25\%$	0.25%	0.45%	水萃效率低，或成分中有非游離型水楊酸
C	0.22	$(0.22 + 0.04) / 89.2 \approx 0.29\%$	0.29%	0.5%	與 B 類似，實測低於標示
D	0.67	$(0.67 + 0.04) / 89.2 \approx 0.80\%$	0.80%	2.0%	實測遠低於標示，可能有包覆或酯化水楊酸

也就是说，本研究比色試劑會受到基質效應的影響。

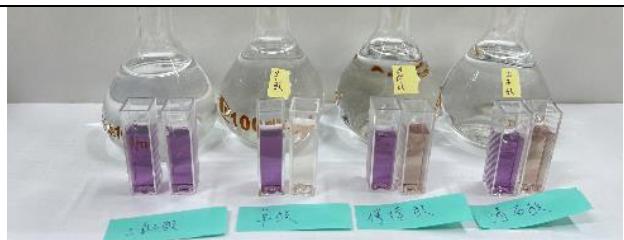
例如草酸、檸檬酸、酒石酸等均可以進行以下反應：



使得紫色酚鐵顏色消失，其中又以檸檬酸、EDTA 最常添加於洗面乳。



【圖】EDTA-Fe  
(作者自行繪製)



【圖】紫色柳酸酚鐵遇到不同螯合基的褪色(作者自行拍攝)

## 討論七、試劑偽陰性問題以及試紙優勢 (市賽後研究)

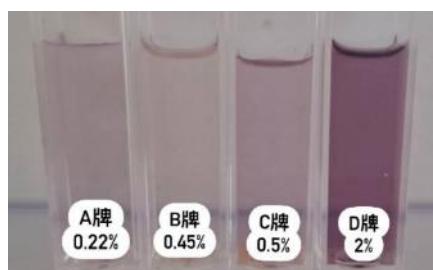
### (一) 實驗設計與假設

初步實驗市售洗面乳檢測後發現帶入檢量線的數據結果與標示濃度不符，因此推論試劑檢測會受**基質效應**影響。查詢成分表及參考 ChatGPT 搜尋資料發現 EDTA、檸檬酸、酒石酸等成分會和水楊酸產生螯合反應，導致鐵離子和水楊酸解離，紫色褪色。

**實驗假設：**產品含有會和水楊酸螯合的成分，使結果呈現偽陰性。

### (二) 實驗條件說明

- 反應系統** 紫色水楊酸酚鐵溶液: 10 mL 緩衝液 (pH=2) + 0.1 mL(0.5%)水楊酸溶液 + 0.1 mL 三價鐵離子溶液 (0.1 M 硫酸鐵銨溶液)
- 操縱變因** 不同會和水楊酸螯合的物質加入紫色水楊酸酚鐵溶液中
- 控制變因** 水楊酸酚鐵溶液為相同吸收度
- 應變變因** 吸收度(紫色錯合物)
- 取樣方法** 配製 0.01 M 檸檬酸、草酸、酒石酸、EDTA(可能和鐵離子螯合之物種)



【圖】試劑檢測實驗結果呈現偽陰性(作者自行拍攝)



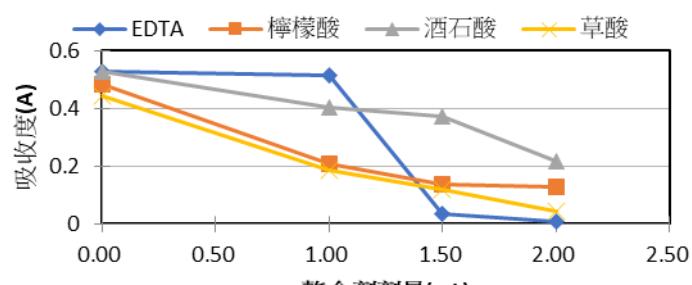
【圖】偽陰性實驗結果  
(由左至右分別增加螯合劑劑量 mL)  
(作者自行拍攝)

【表】生活中常見之螯合劑及其用途

螯合劑	配位結構	加入洗面乳可能性	主要用途
EDTA	六牙基	極高	螯合水中鈣、鎂離子，穩定洗面乳產品功效
檸檬酸	雙牙基	高	去角質、調節 pH、抗氧化延長產品保存時間
酒石酸	雙牙基	中 (水果成分)	去角質、角質代謝、調節 pH
草酸	雙牙基	低	去垢、清潔，對皮膚具有高度刺激性而不常見

### (三) 結果觀察與解釋

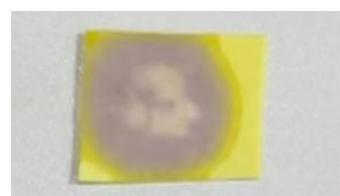
- 檸檬酸、草酸、酒石酸、EDTA 均會對試劑實驗結果造成偽陰性。
- 產品中若含有螯合劑則會導致實驗結果呈現負偏差，產生褪色現象。
- 褪色反應為螯合造成，與 pH 值變化無關。
- EDTA 與三價鐵離子螯合力最強，酒石酸最弱。



【圖】不同螯合劑對水楊酸酚鐵的褪色影響(偽陰性)  
(作者自行繪製)

### (四) 排除基質效應之應用

- 使用試紙檢測可以透過濾紙毛細層析現象減緩各成分移動速率，使試紙能在最外圈顯紫色，進而防止基質效應產生。
- 右方試紙中產生顏色變化反應成分依序為：EDTA(橘色物質為 EDTA-Fe<sup>3+</sup>)、水楊酸(紫色物質為水楊酸酚鐵)、水(深黃色，乃是稀釋使 pH>2 導致)，而檢測時的色塊擷取方式為拍照→擷取紫色部分→取得 R、G、B 數值並計算灰階值。



【圖】試紙檢測洗面乳產品結果  
(中間為偽陰性，但外圈仍變紫)  
(作者自行拍攝)

## 討論八、利用廢棄暖暖包作為鐵源製作水楊酸比色試劑的可行性

有鑑於民眾不太可能為了測新買的洗面乳而花幾百塊錢去買一罐市售的鐵離子，因此本研究認為生活中能夠有廢棄的鐵離子可以回收使用，正是使用過後不再發熱的暖暖包。

### (一)、暖暖包特性基本測試



【圖】本研究選用的是小白兔(作者拍攝)



【圖】左為剛開封呈黑色是由於活性碳；右為不再發熱的暖暖包內容物呈紅色是因為鐵粉氧化  
(老師拍攝)



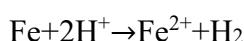
【圖】發熱後的內容物會變成硬塊，這是因為氧化鐵  $Fe_2O_3$  的聚集，結塊算是均勻，表示鐵粉在活性碳中不至於分布不均(老師拍攝)



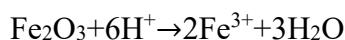
【圖】剛開封的暖暖包經鹽酸溶解後的濾液帶有  
亞鐵離子及鐵離子(老師拍攝)

暖暖包相關的化學反應有：

1. 尚未氧化的鐵粉溶於鹽酸



2. 氧化鐵溶於鹽酸



而本研究需要的是  $Fe^{3+}$

因此實驗會取適量發熱後暖暖包的內容物來作為免費鐵源的材料。



【圖】溶解出  $Fe^{2+}$  為綠色(老師拍攝)



【圖】溶解出  $Fe^{3+}$  為  
黃色(含有氯離子時)  
(老師拍攝)



【圖】 $Fe^{3+}$  水  
解後會呈橘色  
(老師拍攝)

由於暖暖包中的鐵粉比例屬於小白兔商標的專利，我們無從查起，因此實驗必須先了解單位克數的廢棄暖暖包粉大約能夠提供我們多少鐵離子，才不至於在比色試劑中加太多  $Fe^{3+}$ 。

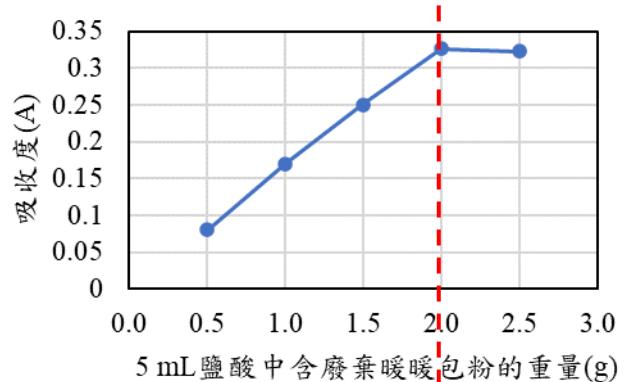
### (二)、實驗設計與假設：

#### 研究假設：

以 5 mL 家用鹽酸溶解適量廢棄暖暖包粉，當獲取的鐵離子量足夠時能夠做出與市售鐵離子接近的檢量線以及比色試劑

### (三)、實驗條件說明：

- 反應系統：緩衝液 (pH2) +100  $\mu$ L 小白兔暖暖包來源的鐵離子溶液。
- 操縱變因：不同克數廢棄暖暖包粉溶於 5 mL 家用鹽酸後過濾，將濾液(含鐵離子)與 0.5% 水楊酸作用。
- 控制變因：調整緩衝液至溶液總體積固定為 10 mL。應變變因：吸光度(紫色錯合物)。
- 取樣方法：以家用鹽酸進行溶出法從  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  提取  $\text{Fe}^{3+}$ 。

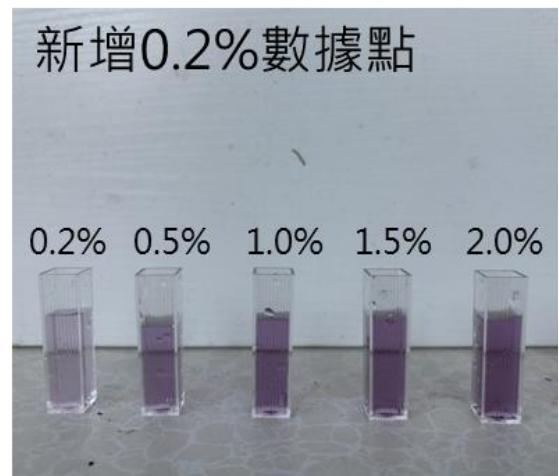
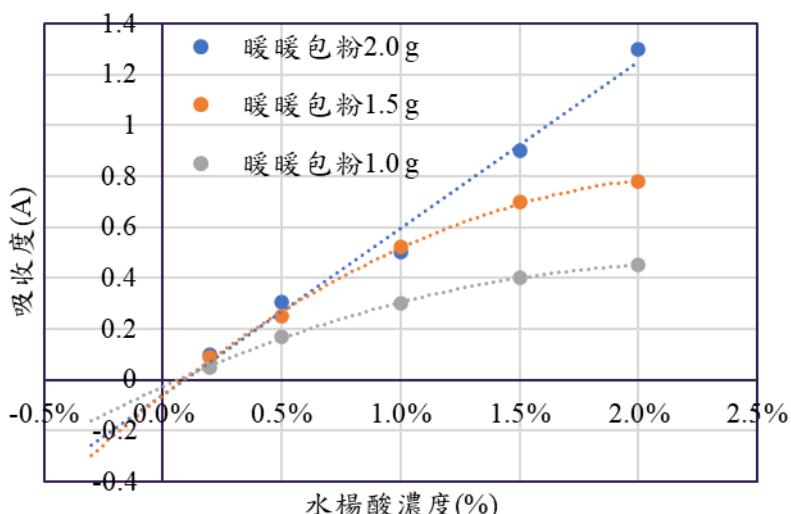


【圖】使用廢棄暖暖包作為鐵源成分來製作比色試劑(作者自行繪製)

### (四)、結果觀察與解釋：

- 吸光度隨著暖暖包粉末的加入量上升，在約 2.0 g 達到最高值。
- 超過 2 g 時，吸光度不再明顯上升，鐵離子已過量，與水楊酸形成錯合物反應達飽和。
- 超過 2 g 時，只有 5 mL 的鹽酸也不太好溶解這麼多的暖暖包粉，會變成泥濘狀難以過濾。

### (五)、製作暖暖包鐵離子源的比色試劑與檢量線



【圖】本研究建立之水楊酸比色試劑(暖暖包鐵源)對水楊酸的定量情形(作者自行繪製)(作者自行拍攝)

### (六)、此部分結論與應用：

吸光度與濃度呈現正相關相當有利於後續製作成商業化比色試劑

- 隨著水楊酸濃度上升，吸光度也上升，符合比色分析原理。
- 暖暖包粉越多，提供越多  $\text{Fe}^{3+}$ 離子，顏色反應越明顯。
- 顯示在 0.2%~2.0% 的水楊酸範圍內，具有良好線性。
- 廢棄暖暖包中的氧化鐵粉可成功釋出  $\text{Fe}^{3+}$ 並與水楊酸反應形成紫色錯離子，吸光度可作為濃度指標，可作為定量檢測水楊酸的標準曲線。
- 提供一種環保、低成本的水楊酸檢測方法，適用於科學教育與簡易分析。

## 討論九、開發本研究水楊酸試紙的可行性與挑戰

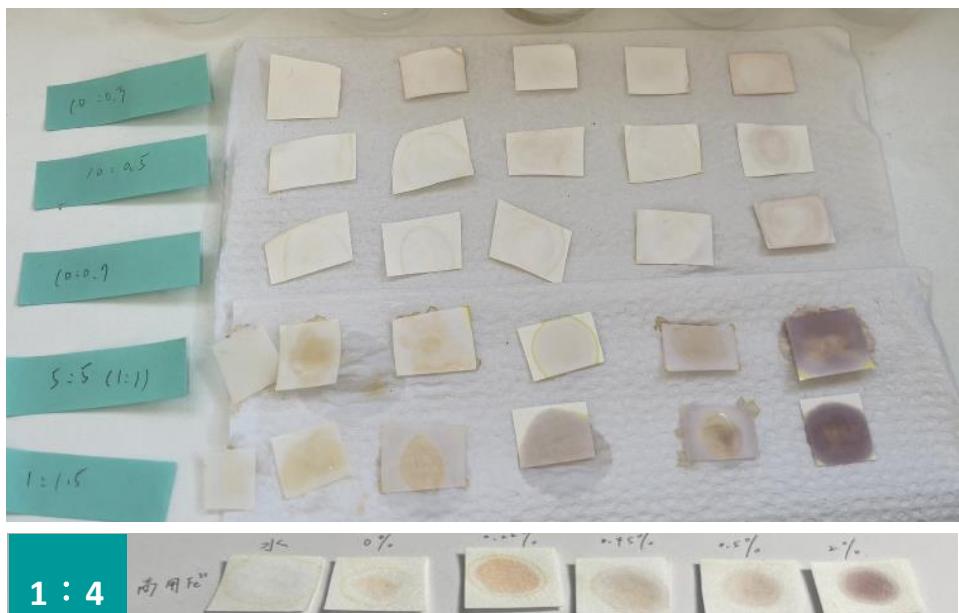
本實驗探討以不同緩衝液與鐵離子比例製作水楊酸比色試紙，評估其對水楊酸濃度變化的顯色效果與靈敏度。

### (一) 實驗設計與假設：

#### 研究假設：

使用「肉眼」分析半定量試紙變色情況，結果希望能儘可能辨別 0、0.22、0.45、0.5、2% 等水楊酸

### (二)、結果觀察與解釋：



【圖】使用廢棄暖暖包作為鐵源成分來製作比色試劑(作者自行拍攝)

(由左而右為 A 牌 0%、B 牌 0.22%、C 牌 0.45%、D 牌 0.5%、E 牌 2% 水楊酸含量之洗面乳)

【表】比色試紙初步製備比例條件表

緩衝液：鐵離子比例	顯色觀察	顏色階層	靈敏度	評價
10 : 0.2	幾乎無色或極淡色	不明顯	很低	✗ 鐵離子不足
10 : 0.5	淡紫至微黃	不穩定	低	✗ 不建議
10 : 0.7	稍有變色	可見但模糊	中低	⚠ 可當初篩 2% 用
5 : 5 (1:1)	紫色層次明顯	清晰	高	✓ 推薦
4 : 6 (1:1.5)	顏色深、反應迅速	清楚	很高	✓ 效果提升
2 : 8 (1:4)	顏色最深、反應迅速	最清楚	非常高	✓ 最佳反應效果

在比色試紙的製備實驗中，藉由調整緩衝液與鐵離子 ( $\text{Fe}^{3+}$ ) 的比例，觀察試紙在不同水楊酸濃度下的顏色反應程度。結果顯示，當鐵離子濃度偏低 (如 10:0.2) 時，顯色效果極不明顯，難以判讀；而當比例達到 5:5 (1:1) 與 4:6 時，試紙呈現明顯紫色漸層對應水楊酸濃度，能有效反映水楊酸濃度變化，具有良好的靈敏度。

- 原本製備比色試劑的鐵離子比例並不是適用於製作比色試紙，製作試紙需要更濃的鐵離子。
- 綜合比較，建議以 1:4 作為最佳製備比例，用於製作應用於水楊酸濃度篩檢的「半定量」比色試紙，兼具操作簡便與結果可判讀性。

### (三)、此部分結論與未來應用：

## 產品設計

本研究之水楊酸比色試紙對比卡(作者自行拍攝)



水楊酸濃度 (%)	顏色觀察 (以 1:4 比例製作試紙)	色彩描述
0.0%	無色或淡黃色	● 無明顯反應
0.22%	周圍淡紫色而中間淡黃色	● 稍有變色
0.45%	淡紫	◆ 可見漸層
0.5%	淡紫	◆ 清楚顯色
2.0%	深紫紅色	▲ 反應最明顯

### 使用說明(研擬)：

將本研究開發比色試紙滴上待測液，靜置約 30 秒觀察顏色變化。

比對上表判讀水楊酸濃度範圍。

建議搭配白背景操作以提升辨識度。



【圖】由 AI 生成之示意圖

### 備註：

- 顏色會受環境光源影響，建議於自然光或白光下觀察。
- 此比色卡為半定量用途，供快速篩檢水楊酸含量使用。
- 當水分蒸發後，紫色會消失，應於立即與比色卡比對。

### 討論十、開發本研究水楊酸試紙討論濃度鑑別度以及褪色情況

本實驗探討以不同鐵源(市售鐵離子、廢棄暖暖包)製作水楊酸比色試紙，評估試紙的顯色效果與靈敏度。由於只使用肉眼來辨識太容易因人而異，而且環境的光照也會對實驗觀察造成很大影響，因此在此部分希望以更有公信力的方式來研究試紙成效。

另一方面，為了達到討論八的應用，此部分希望能製作具有公信力的比色卡，每一段濃度需要有明確的色彩數據支持，而非僅由肉眼來判斷。

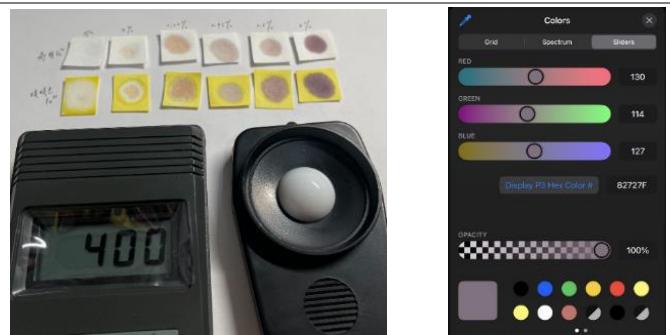
#### (一) 實驗設計與假設：

##### 研究假設：

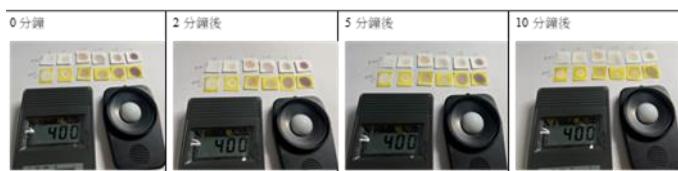
使用「RGB 值」作為分析半定量試紙變色情況，假設光源固定的情況下，結果希望能將 0、0.22、0.45、0.5、2% 等水楊酸濃度之洗面乳樣本的試紙檢測結果數據化

## (二)、實驗條件說明：

- 反應系統：緩衝液 (pH2)：鐵離子溶液 (來自市售或暖暖包)=1：4 製作成的試紙(市售鐵離子做出來為白色試紙而暖暖包做出來的為黃色試紙)。
- 
- 操縱變因 1：不同水楊酸濃度之洗面乳製作成檢測樣本並以純水作為對照組。
- 操縱變因 2：試紙隨時間褪色。
- 
- 控制變因：環境光亮度(以手機補光使達環境相同照度 400 Lux)。應變變因：試紙中心 RGB 值，可利用 APP 來分析。



【圖】固定光源下拍攝試紙照片 分析 R、G、B  
(作者自行拍攝) (作者自行拍攝)



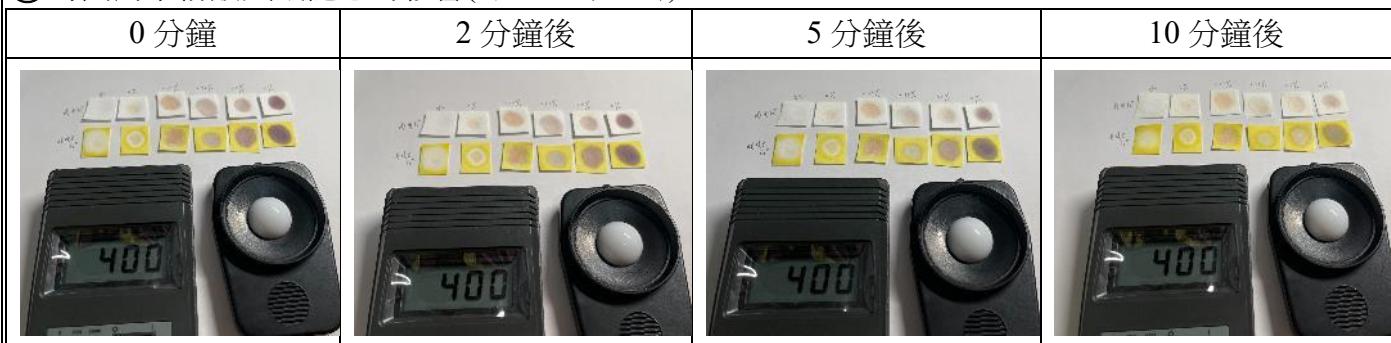
## (三)、結果觀察與解釋：

根據色彩原理，紫色通常為 R 高、B 高、G 低的組合，但是使用 紫色指數(VI) = R+B-G 發現並不能代表真實肉眼看見的樣子，考慮到人眼 對綠光最敏感，其次紅光，對藍光最不敏感。因此試紙實驗採取用 灰階值(Gray value)= 0.299·R+0.587·G+0.114·B 來進行試紙色彩的定量。

【表】市售鐵離子製作之白色試紙變色後之灰階值(作者自行製作)

0 分鐘	純水	0.00%	0.22%	0.45%	0.50%	2.0%
R	191	214	189	178	178	125
G	188	212	178	159	150	99
B	179	199	172	150	140	102
灰階值	140.75	156.631	137.183	123.146	118.302	85.963
2 分鐘後	純水	0.00%	0.22%	0.45%	0.50%	2.0%
R	201	209	194	171	169	128
G	199	207	187	156	149	102
B	191	196	181	143	135	103
灰階值	149.53	153.945	142.935	117.286	112.79	87.105
5 分鐘後	純水	0.00%	0.22%	0.45%	0.50%	2.0%
R	203	220	199	184	190	140
G	202	218	191	173	174	117
B	195	211	187	164	162	117
灰階值	152.134	164.785	147.496	131.562	132.068	97.201
10 分鐘後	純水	0.00%	0.22%	0.45%	0.50%	2.0%
R	203	216	211	202	186	146
G	201	214	201	188	170	124
B	193	207	194	167	156	121
灰階值	151.074	161.697	154.053	136.995	127.806	100.545

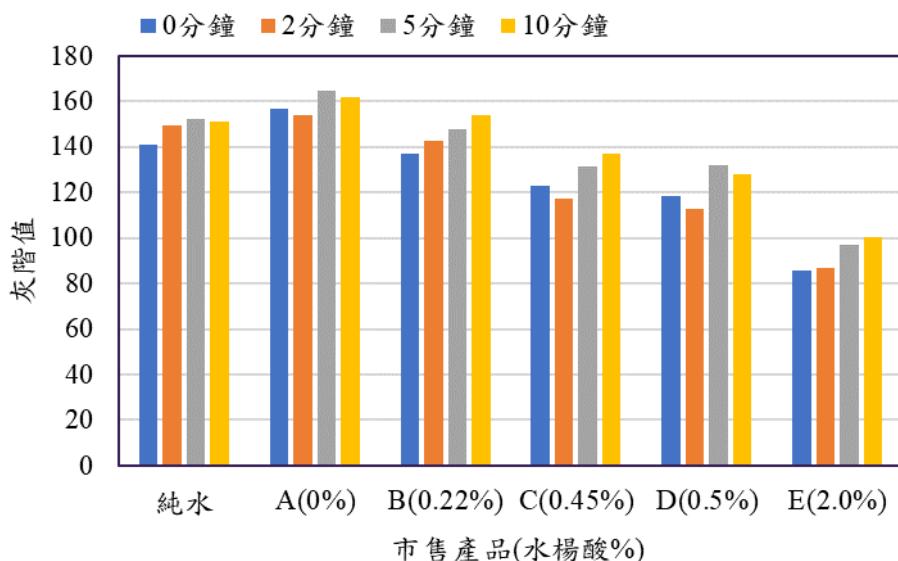
⌚ 時間對水楊酸試紙褪色的影響(作者自行拍攝)



💡 灰階值(Gray)的數值範圍與意義(修改至 ChatGPT)

灰階值範圍	顏色深淺	解讀意義 (以比色試紙為例)	
0–50	非常深	顏色幾乎為深紫	✓ 數值越低 → 顏色越深 → 水楊酸濃度越高
51–100	深色	顯色明顯偏暗，紫紅	
101–150	中等色調	淡紫或棕紫色	
151–200	淺色	淺紫、米白、橘紅色或接近空白	✓ 數值越高 → 顏色越淡 → 水楊酸濃度越低
201–255	非常淺	接近白色、無顏色	

## 1、市售鐵離子製成的比色試紙(白色試紙)效能



【圖】白色試紙的顯色效果與褪色情況(作者自行繪製)

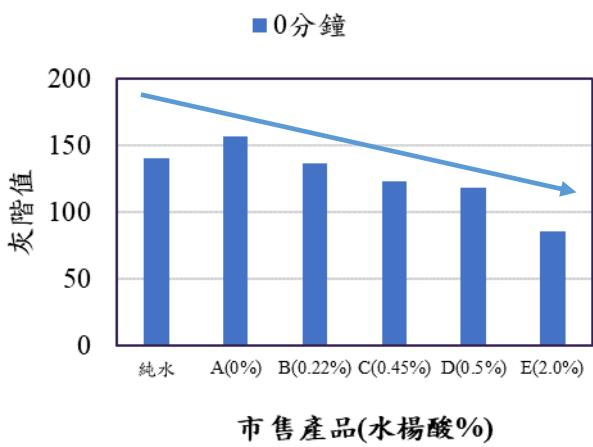
🔍 整體圖表分析：

- 水楊酸濃度越高 (尤其 D、E)，灰階值越低 → 試紙顏色越深，紫色反應明顯。
- 雖然有褪色的情況但大致能辨別出 0%、0.22%、0.45% (0.5% 相同)、2.0% 的差別。
- 大多數產品的灰階值會隨著時間逐漸上升 (顏色變淡)。
- 變色的試紙在 5 分鐘後內幾乎沒有嚴重的褪色。
- 顯示比色反應大約在 5~10 分鐘內達成穩定顯色。



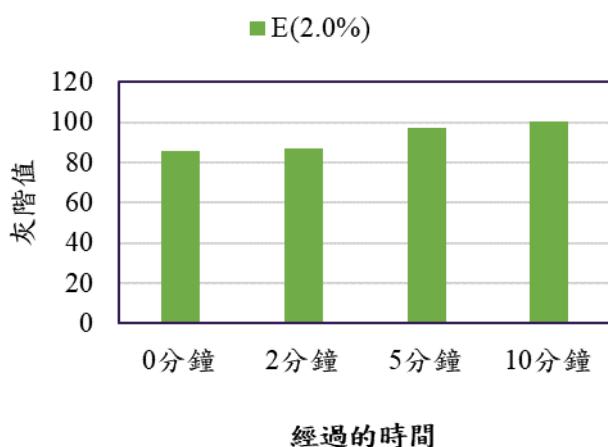
## 白色試紙顯色效果

## 白色試紙褪色效果



【圖】白色試紙的顯色效果(作者自行繪製)

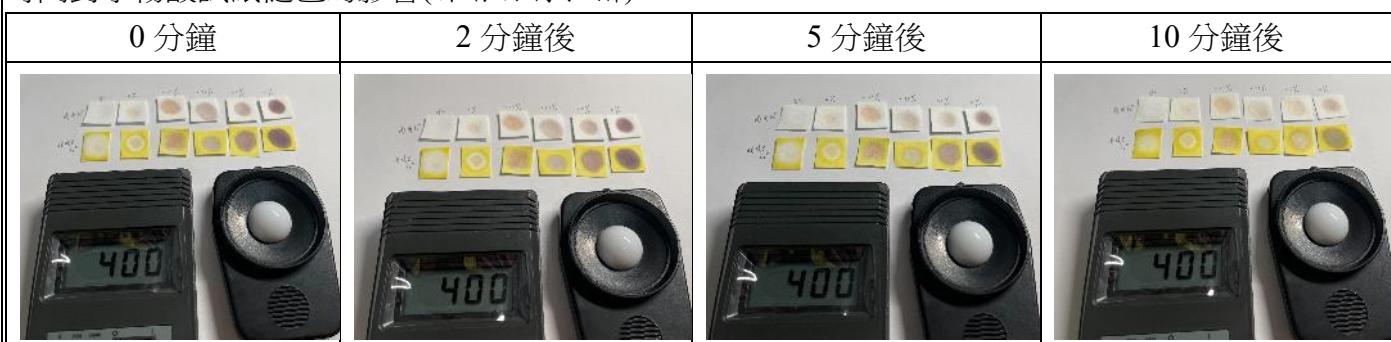
以剛變色的試紙來看已經有能力辨別 0.22% 與 0.45% 差別、0.5% 與 2% 的差別。



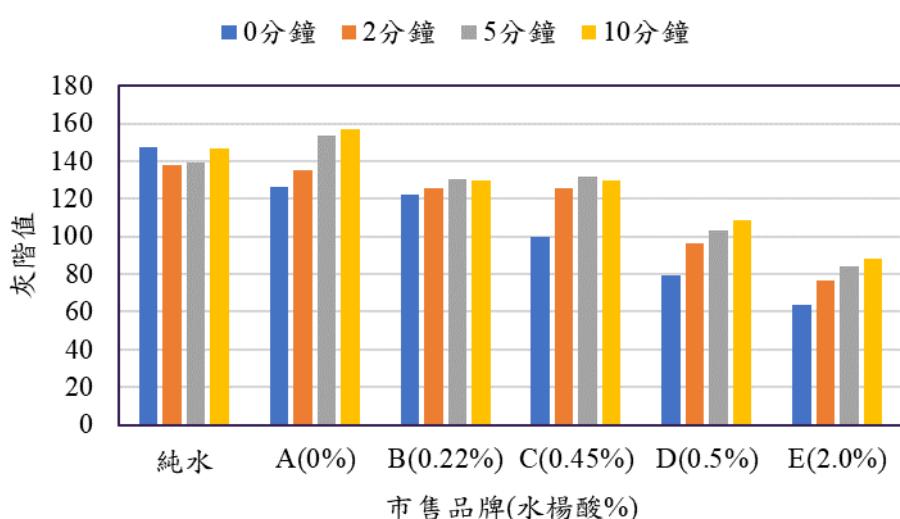
【圖】白色試紙的褪色效果(作者自行繪製)

以顏色最深的試紙來看，大約 2 分鐘內幾乎沒有褪色的疑慮，整體而言即使 10 分鐘也褪色不明顯。

時間對水楊酸試紙褪色的影響(作者自行拍攝)



## 2、廢棄暖暖包鐵離子製成的比色試紙(黃色試紙)效能



【圖】黃色試紙的顯色效果與褪色情況(作者自行繪製)

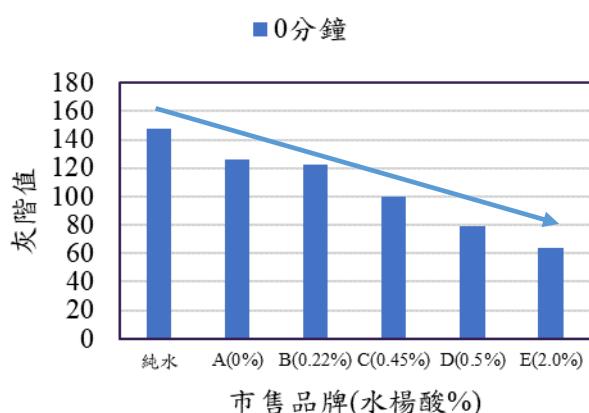


## 整體圖表分析：

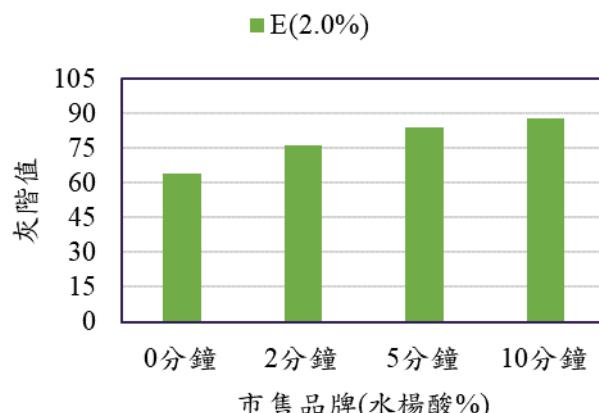
- 水楊酸濃度越高（尤其 D、E），灰階值越低 → 試紙顏色越深，紫色反應明顯。
- 眼睛容易從試紙辨別出 0%、0.22%、0.45% (0.5% 相同)、2.0% 的差別。
- 高濃度 ( $\geq 0.45\%$ ) 樣品能清楚區分，低濃度者 (例如 0%、0.22% 在一開始的灰階值是差不多的) 需拉長觀察時間或提高試紙靈敏度。
- 大多數產品的灰階值會隨著時間逐漸上升 (顏色變淡)。
- 大多數產品褪色都比白色試紙明顯。
- 褪色非常嚴重建議在 2 分鐘比色完畢。



## 黃色試紙顯色效果



## 黃色試紙褪色效果



【圖】黃色試紙的顯色效果(作者自行繪製)

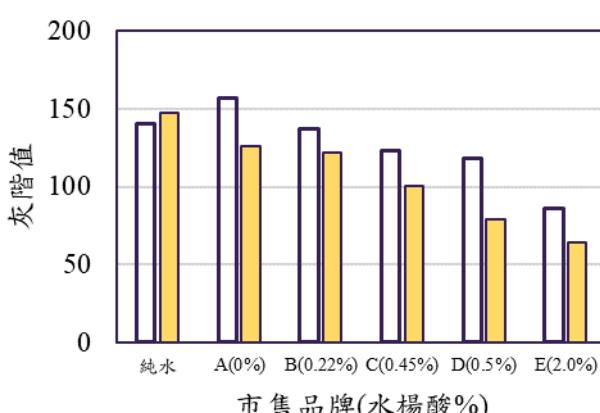
👉 以剛變色的試紙來看已經有能力辨別 0.22%、0.45%、0.5%、2% 的差別，但無法辨別 0% 及 0.22% (但可以放 5 分鐘後再來比較)。

【圖】黃色試紙的褪色效果(作者自行繪製)

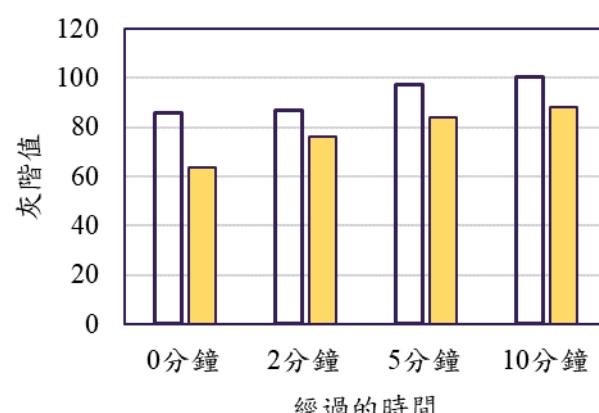
👉 以顏色最深的試紙來看，大約 2 分鐘內褪色就很嚴重，整體而言到 10 分鐘已經跟原本的顏色差很多。

## 討論十一、比較兩種不同試紙(市售鐵鹽 vs 廢棄暖暖包)

### 白色試紙 ■ 黃色試紙



### 白色試紙 ■ 黃色試紙



【圖】兩種試紙的顯色效果(作者自行繪製)

👉 顯色效果：黃色試紙 > 白色試紙

【圖】兩種試紙的褪色效果(作者自行繪製)

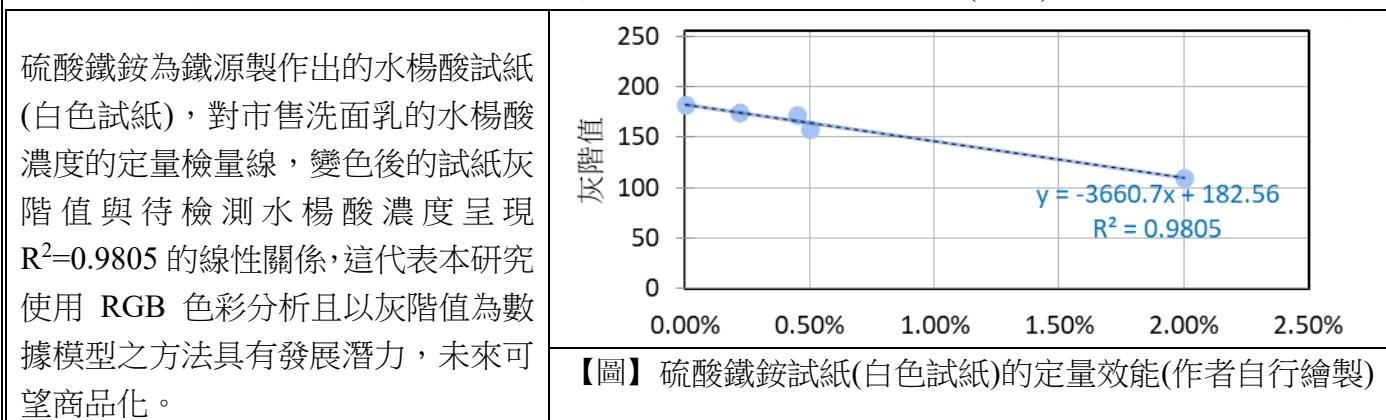
👉 褪色現象：黃色試紙 > 白色試紙

因此，若民眾要使用暖暖包來製作試紙是可行的，而且靈敏度也很好，

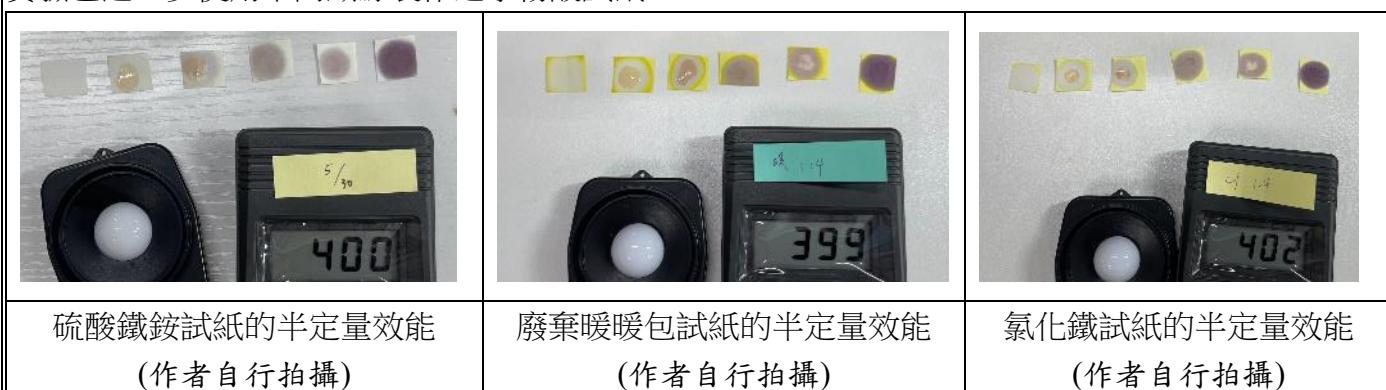
要注意的是褪色比較快，需要馬上比色。

## 討論十二、不同鐵源試紙結合手機軟體用於真正「定量」水楊酸濃度的可行性 (市賽後研究)

由於長條圖沒辦法代表「水楊酸濃度」與「試紙變色灰階值」的數學關係，因此此部分嘗試將其畫成折線圖，意外發現其可能具有線性關係。這意味著試紙原本常用來作為“半定量”的工具，在本研究中可能具有成為定量工具的潛力。如圖是市售硫酸鐵銨製作之試紙(白色)



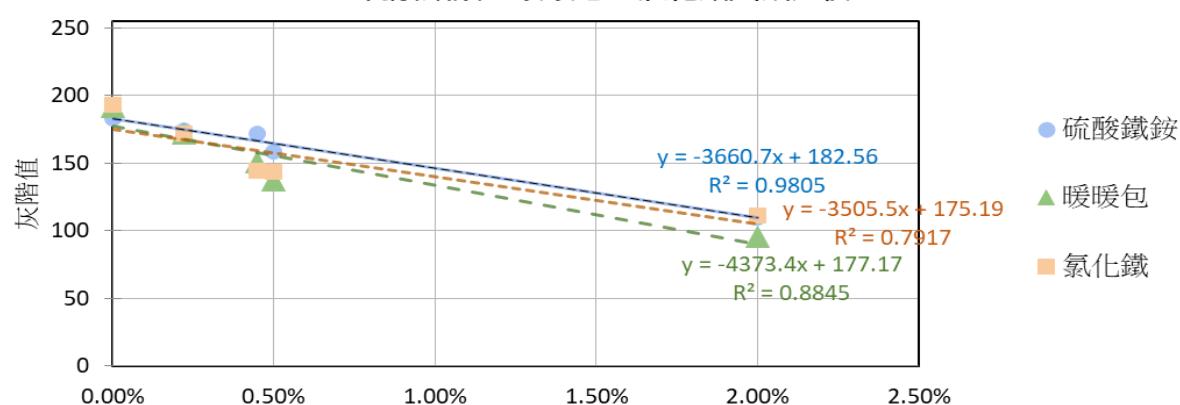
實驗也進一步使用不同鐵源製作之水楊酸試紙



【表】不同鐵源製作之水楊酸試紙的定量效能

灰階值	水(對照組)	0%(A牌)	0.22%(B牌)	0.45%(C牌)	0.5%(D牌)	2.0%(E牌)	$R^2$	斜率
市售硫酸鐵銨	185.23	182.871	174.295	171.654	158.317	109.593	0.9805	-3660
廢棄暖暖包(氧化鐵)	189.86	191.632	172.099	150.899	137.431	95.152	0.8845	-4373
市售氯化鐵	192.447	193.105	172.23	144.437	143.618	111.44	0.7917	-3505

硫酸鐵銨、暖暖包、氯化鐵試紙比較



【圖】不同鐵源製作之水楊酸試紙的定量效能(作者自行繪製)

從硫酸鐵銨、廢棄暖暖包、氯化鐵試紙變色的檢量線斜率依序為-3660、-3505、-4373 可知暖暖包試紙變色最明顯，最適合用於製作半定量色卡(肉眼辨識)的試紙材料，與討論九結果相符。

### 討論十三、改良試紙製作方式 (市賽後研究)

由於直接塗布的方式很容易導致試紙上的鐵離子不均勻，因此實驗進一步利用光碟機特性，固定轉速將多餘的試劑用乾，這樣一來得到的試紙就會非常均勻，未來要做半定量才不至於有色差。



【圖】利用光碟機作為旋轉塗布的機器  
(作者自行拍攝)



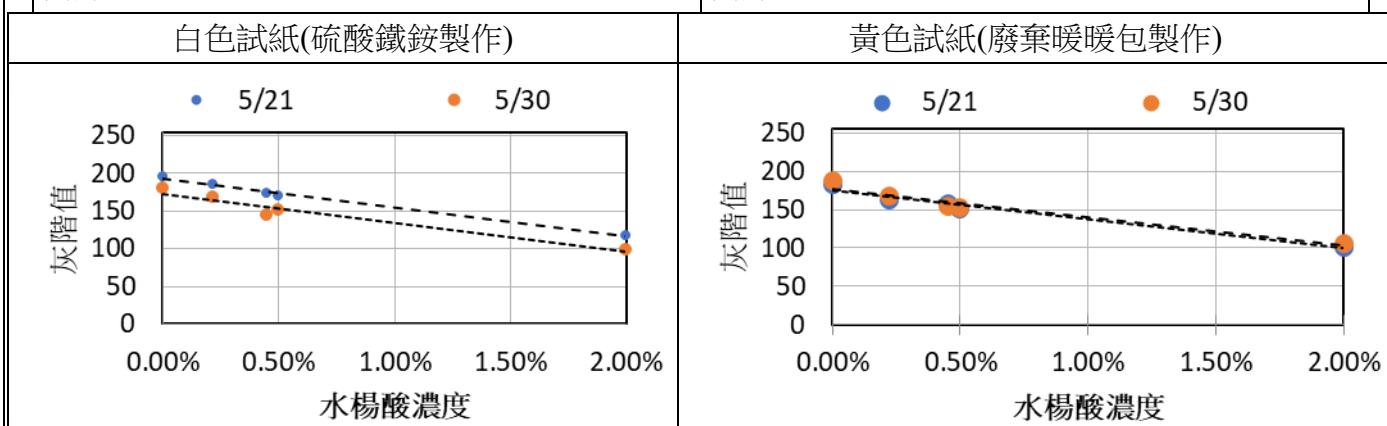
【圖】左為利用旋轉塗布；右為直接塗布做成的試紙  
(作者自行拍攝)

### 討論十四、探討試紙的保存性 (市賽後研究)

為了確定兩種試紙(白色及黃色)，製作好放了約 1 週後還能夠維持原本的效果。因此實驗假設存放 9 天後的試紙以 0.2~2%市售洗面乳進行測試後，查看試紙的灰階值沒有顯著差異(試紙不擔心存放)。

【表】兩種不同試紙經保存 9 天前後(5/21-5/30)進行測試之顯色數據(作者自行製作)

5/21製作							5/21製作						
白色試紙	水	0%	0.22%	0.45%	0.50%	2%	黃色試紙	水	0%	0.22%	0.45%	0.50%	2%
R	207	197	189	179	180	131	R	178	181	164	161	159	111
G	204	197	185	172	166	111	G	178	184	163	157	149	95
B	196	191	182	161	158	120	B	173	177	163	154	146	107
灰階值a	203.985	196.316	185.854	172.839	169.274	118.006	灰階值c	177.43	182.305	163.299	157.854	151.648	101.152
5/30製作							5/30製作						
白色試紙	水	0%	0.22%	0.45%	0.50%	2%	黃色試紙	水	0%	0.22%	0.45%	0.50%	2%
R	201	191	180	159	170	112	R	190	190	172	162	164	119
G	194	182	167	143	148	93	G	191	191	167	152	150	99
B	155	141	141	120	124	88	B	170	169	154	140	142	111
灰階值b	191.647	180.017	167.923	145.162	151.842	98.111	灰階值d	188.307	188.193	167.013	153.622	153.274	106.348



【圖】存放不同天數白色試紙(作者自行繪製)

【圖】存放不同天數黃色試紙(作者自行繪製)

$$p=t.test(\text{灰階值 a, 灰階值 b}, 2, 2) = 0.336 > 0.05$$

$$p=t.test(\text{灰階值 c, 灰階值 d}, 2, 2) = 0.827 > 0.05$$

利用雙尾之非成對等變異 T 檢定公式得 p 均大於 0.05，因此存放 9 天前後之試紙沒有顯著差異。

## 討論十五、本研究開發試紙檢測法的成本 (市賽後研究)

不同鐵離子來源	試紙(作者自行拍攝)	功能
<p>1.以硫酸鐵銨製作：</p> <p>硫酸鐵銨\$1890/500 g 配 0.1 M 100 mL 使用 2.66g \$10.548 取 4 mL <math>\square 10.548 \times 0.04 = 0.40219</math> 濾紙 一盒\$250/100 張 <math>\square 1</math> 張\$2.5 緩衝溶液 (三氯乙酸) \$2900/500 g 配 0.1 M 100 mL 使用 1.634 g \$9.4772 取 1 mL <math>\square 9.4772 \times 0.01 = 0.094772</math> <b>總\$ : 0.40219 + 2.5 + 0.094772 = 2.997</b></p>		可用於「定量」，可用於半定量，隨水楊酸濃度與紫色灰階值變化呈線性相關 ( $R^2=0.98$ )。
<p>2.以廢棄暖暖包的氧化鐵來製作：</p> <p>廢棄暖暖包\$0 鹽酸\$10/500 mL 使用 5 mL <math>\square \\$0.01</math> 濾紙 1 張\$2.5 緩衝溶液 (三氯乙酸) 取 1 mL <math>\square 0.094772</math> <b>總\$ : 0.01 + 2.5 + 0.094772 = 2.605</b></p>		可用於「半定量」，隨水楊酸濃度而變紫色更明顯。 
<p>3.以氯化鐵製作：</p> <p>氯化鐵\$100/500 g 配 0.1M 100 mL 使用 1.622 克 \$0.3244 取 4 mL <math>\square 0.3244 \times 0.04 = 0.012976</math> 濾紙 1 張 2.5 緩衝溶液 (三氯乙酸) 取 1 mL = 0.094772 <b>總\$ : 0.012976 + 2.5 + 0.094772 = 2.608</b></p>		對照組。經分區科展教授建議加入討論比較用。 ps 認為暖暖包氧化鐵粉溶於鹽酸得到之鐵源與氯化鐵成分類似。

## 捌、結論

- 以檢測波長 **520 nm** 成功建立水楊酸比色定量方法  
透過水楊酸與三價鐵離子形成紫色錯合物反應，建立檢量線，能有效對應不同水楊酸濃度。
- pH** 對顯色反應影響重大  
pH 需控制在 2 左右，才能使水楊酸有效與  $\text{Fe}^{3+}$  融合形成穩定的紫色錯合物。
- 鐵離子劑量影響靈敏度與準確性**  
最佳鐵離子量為  $150 \mu\text{L}$ ，超過或不足都會影響檢量線的線性與反應效果。
- 建立高線性之檢量線 ( $R^2 = 0.9993$ )**  
檢量線  $A = 89.2[\text{SA}\%] - 0.04$ ，在  $0.5\text{~}2\%$  濃度範圍內具高準確度。
- 檢測市售洗面乳時會受到基質效應干擾**  
洗面乳中皂基、香料等成分影響反應，導致偽陰性與測值偏低。
- 暖暖包鐵粉可成功替代市售鐵鹽**  
廢棄暖暖包經鹽酸處理可釋出  $\text{Fe}^{3+}$ ，形成紫色錯合物，用於環保檢測。

## 7. 成功將比色試劑製成試紙形式

利用光碟機及濾紙沾染鐵離子與緩衝溶液並烘乾，實現攜帶方便、使用簡單。

## 8. 製作出具辨識度的水楊酸試紙色卡

試紙可分辨 0%、0.22%、0.45%、0.5%、2% 五種濃度，呈現不同顏色階層。

## 9. 成功以灰階值(RGB 轉換)進行數據分析

灰階值可量化試紙顏色變化，提供更具客觀性的濃度判別依據。

## 10. 試紙存在時間性褪色問題

約 5~10 分鐘內紫色會逐漸消退，建議使用者即時判讀。與市售鐵離子製作的白底試紙相比，色差明顯但辨識度仍佳。

## 11. 整體方法具備簡便性、實用性與永續性

使用回收材料、自製試劑、操作容易，適合教育與居家初篩使用。

## 玖、未來展望

### 1. 擴展檢測濃度範圍

優化試劑或試紙反應靈敏度，使其可偵測更低 (<0.2%) 或更高濃度水楊酸。

### 2. 提升對基質干擾的耐受性

探討去除或抵抗乳化劑、香料等成分對比色反應的干擾方法。

### 3. 應用於其他含水楊酸產品

如化妝水、面膜、身體乳等，延伸研究與實驗適用性。

### 4. 開發攜帶式水楊酸檢測套件、發展手機應用程式輔助判讀

利用手機拍照與 AI 演算法讀取 RGB 值，自動轉換為水楊酸濃度範圍，打造便攜、即時的居家檢測工具。

## 拾、參考文獻

- 衛生福利部食品藥物管理署 (TFDA) . (2019). 含藥化粧品可用成分及其含量規定一覽表. 公告日期：108 年 6 月 25 日。
- 陽明交通大學普化實驗二十阿斯匹靈藥品的分析  
<https://pressbooks.pub/gchemlab1/chapter/chemlab2-20/>
- ChatGPT 協助分析與整理資料 (OpenAI GPT-4)，用於解釋錯合反應與比色原理（由研究者內化後使用於報告內容中）。
- 就這樣「紫」-建立簡易水楊酸定量法應用於市售洗面乳，C0119，2025 科學探究競賽。
- Development of a Simple Quantitative Method for Salicylic Acid Test Strips Used in the Analysis of Commercial Facial Cleansers，SA24-616，第 24 屆旺宏科學獎。
- PubChem. (n.d.). *Salicylic acid (CID=338)*. National Center for Biotechnology Information. Retrieved May 30, 2025.
- MSMF 保養品 DIY 理論+實作專題. (2019). *Exfoliation for sensitive skin – 水楊酸中和後之應用*.
- General Chemistry Laboratory I. (n.d.). *Experiment 20: The analysis of aspirin tablets*. In *Chemistry laboratory manual*. Pressbooks. Retrieved May 30, 2025

## 附錄(原始數據)

討論二											
水楊酸 2.0%			水楊酸 1.5%			水楊酸 1.0%			水楊酸 0.5%		
400 <sup>+</sup>	0.235 <sup>+</sup>	0.223 <sup>+</sup>	0.179 <sup>+</sup>	0.161 <sup>+</sup>	0.118 <sup>+</sup>	0.281 <sup>+</sup>	0.237 <sup>+</sup>	0.136 <sup>+</sup>	0.004 <sup>+</sup>	0.018 <sup>+</sup>	0.042 <sup>+</sup>
420 <sup>+</sup>	0.282 <sup>+</sup>	0.265 <sup>+</sup>	0.209 <sup>+</sup>	0.179 <sup>+</sup>	0.117 <sup>+</sup>	0.367 <sup>+</sup>	0.373 <sup>+</sup>	0.203 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.011 <sup>+</sup>	0.027 <sup>+</sup>
440 <sup>+</sup>	0.394 <sup>+</sup>	0.367 <sup>+</sup>	0.281 <sup>+</sup>	0.237 <sup>+</sup>	0.136 <sup>+</sup>	0.497 <sup>+</sup>	0.373 <sup>+</sup>	0.302 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.006 <sup>+</sup>	0.015 <sup>+</sup>
460 <sup>+</sup>	0.52 <sup>+</sup>	0.497 <sup>+</sup>	0.373 <sup>+</sup>	0.302 <sup>+</sup>	0.166 <sup>+</sup>	0.643 <sup>+</sup>	0.605 <sup>+</sup>	0.462 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.004 <sup>+</sup>	0.009 <sup>+</sup>
480 <sup>+</sup>	0.726 <sup>+</sup>	0.688 <sup>+</sup>	0.524 <sup>+</sup>	0.415 <sup>+</sup>	0.212 <sup>+</sup>	0.784 <sup>+</sup>	0.722 <sup>+</sup>	0.55 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.006 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>
500 <sup>+</sup>	0.726 <sup>+</sup>	0.688 <sup>+</sup>	0.524 <sup>+</sup>	0.415 <sup>+</sup>	0.212 <sup>+</sup>	0.784 <sup>+</sup>	0.722 <sup>+</sup>	0.55 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.006 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>
520 <sup>+</sup>	0.784 <sup>+</sup>	0.722 <sup>+</sup>	0.543 <sup>+</sup>	0.426 <sup>+</sup>	0.217 <sup>+</sup>	0.751 <sup>+</sup>	0.712 <sup>+</sup>	0.543 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.006 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>
540 <sup>+</sup>	0.699 <sup>+</sup>	0.656 <sup>+</sup>	0.504 <sup>+</sup>	0.396 <sup>+</sup>	0.202 <sup>+</sup>	0.699 <sup>+</sup>	0.656 <sup>+</sup>	0.504 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.006 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>
560 <sup>+</sup>	0.613 <sup>+</sup>	0.58 <sup>+</sup>	0.444 <sup>+</sup>	0.346 <sup>+</sup>	0.18 <sup>+</sup>	0.613 <sup>+</sup>	0.58 <sup>+</sup>	0.444 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.006 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>
580 <sup>+</sup>	0.52 <sup>+</sup>	0.492 <sup>+</sup>	0.372 <sup>+</sup>	0.292 <sup>+</sup>	0.153 <sup>+</sup>	0.419 <sup>+</sup>	0.396 <sup>+</sup>	0.302 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.006 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>
600 <sup>+</sup>	0.419 <sup>+</sup>	0.396 <sup>+</sup>	0.302 <sup>+</sup>	0.241 <sup>+</sup>	0.128 <sup>+</sup>	0.328 <sup>+</sup>	0.311 <sup>+</sup>	0.24 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.006 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>
620 <sup>+</sup>	0.254 <sup>+</sup>	0.238 <sup>+</sup>	0.182 <sup>+</sup>	0.148 <sup>+</sup>	0.081 <sup>+</sup>	0.191 <sup>+</sup>	0.174 <sup>+</sup>	0.135 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.006 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>
640 <sup>+</sup>	0.14 <sup>+</sup>	0.129 <sup>+</sup>	0.1 <sup>+</sup>	0.083 <sup>+</sup>	0.049 <sup>+</sup>	0.14 <sup>+</sup>	0.129 <sup>+</sup>	0.1 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.006 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>

討論三																									
PH=0.5 <sup>+</sup>			PH=1.0 <sup>+</sup>			PH=1.5 <sup>+</sup>			PH=2.0 <sup>+</sup>			PH=2.5 <sup>+</sup>			PH=3.0 <sup>+</sup>			PH=3.5 <sup>+</sup>			PH=4.0 <sup>+</sup>				
400 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.016 <sup>+</sup>	0.079 <sup>+</sup>	0.19 <sup>+</sup>	0.123 <sup>+</sup>	0.061 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.08 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.015 <sup>+</sup>	0.075 <sup>+</sup>	0.113 <sup>+</sup>	0.27 <sup>+</sup>	0.174 <sup>+</sup>	0.087 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.023 <sup>+</sup>	0.113 <sup>+</sup>	0.27 <sup>+</sup>	0.174 <sup>+</sup>	0.087 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>
420 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.015 <sup>+</sup>	0.075 <sup>+</sup>	0.18 <sup>+</sup>	0.116 <sup>+</sup>	0.058 <sup>+</sup>	0.03 <sup>+</sup>	0.09 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.019 <sup>+</sup>	0.097 <sup>+</sup>	0.232 <sup>+</sup>	0.15 <sup>+</sup>	0.075 <sup>+</sup>	0.04 <sup>+</sup>	0.1 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.023 <sup>+</sup>	0.113 <sup>+</sup>	0.27 <sup>+</sup>	0.174 <sup>+</sup>	0.087 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	
440 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.019 <sup>+</sup>	0.097 <sup>+</sup>	0.232 <sup>+</sup>	0.15 <sup>+</sup>	0.075 <sup>+</sup>	0.04 <sup>+</sup>	0.1 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.023 <sup>+</sup>	0.113 <sup>+</sup>	0.27 <sup>+</sup>	0.174 <sup>+</sup>	0.087 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.023 <sup>+</sup>	0.113 <sup>+</sup>	0.27 <sup>+</sup>	0.174 <sup>+</sup>	0.087 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	
460 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.023 <sup>+</sup>	0.113 <sup>+</sup>	0.27 <sup>+</sup>	0.174 <sup>+</sup>	0.087 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.026 <sup>+</sup>	0.128 <sup>+</sup>	0.308 <sup>+</sup>	0.199 <sup>+</sup>	0.099 <sup>+</sup>	0.06 <sup>+</sup>	0.13 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.026 <sup>+</sup>	0.128 <sup>+</sup>	0.308 <sup>+</sup>	0.199 <sup>+</sup>	0.099 <sup>+</sup>	0.06 <sup>+</sup>	0.13 <sup>+</sup>	
480 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.028 <sup>+</sup>	0.142 <sup>+</sup>	0.34 <sup>+</sup>	0.219 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.07 <sup>+</sup>	0.145 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.028 <sup>+</sup>	0.142 <sup>+</sup>	0.34 <sup>+</sup>	0.219 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.07 <sup>+</sup>	0.145 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.028 <sup>+</sup>	0.142 <sup>+</sup>	0.34 <sup>+</sup>	0.219 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.07 <sup>+</sup>	0.145 <sup>+</sup>	
500 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.031 <sup>+</sup>	0.157 <sup>+</sup>	0.377 <sup>+</sup>	0.243 <sup>+</sup>	0.122 <sup>+</sup>	0.076 <sup>+</sup>	0.15 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.033 <sup>+</sup>	0.167 <sup>+</sup>	0.4 <sup>+</sup>	0.258 <sup>+</sup>	0.133 <sup>+</sup>	0.079 <sup>+</sup>	0.135 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.033 <sup>+</sup>	0.167 <sup>+</sup>	0.4 <sup>+</sup>	0.258 <sup>+</sup>	0.133 <sup>+</sup>	0.079 <sup>+</sup>	0.135 <sup>+</sup>	
520 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.031 <sup>+</sup>	0.157 <sup>+</sup>	0.377 <sup>+</sup>	0.243 <sup>+</sup>	0.122 <sup>+</sup>	0.076 <sup>+</sup>	0.15 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.033 <sup>+</sup>	0.167 <sup>+</sup>	0.4 <sup>+</sup>	0.258 <sup>+</sup>	0.133 <sup>+</sup>	0.079 <sup>+</sup>	0.135 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.033 <sup>+</sup>	0.167 <sup>+</sup>	0.4 <sup>+</sup>	0.258 <sup>+</sup>	0.133 <sup>+</sup>	0.079 <sup>+</sup>	0.135 <sup>+</sup>	
540 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.033 <sup>+</sup>	0.167 <sup>+</sup>	0.4 <sup>+</sup>	0.258 <sup>+</sup>	0.133 <sup>+</sup>	0.079 <sup>+</sup>	0.135 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.176 <sup>+</sup>	0.423 <sup>+</sup>	0.273 <sup>+</sup>	0.139 <sup>+</sup>	0.085 <sup>+</sup>	0.125 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.176 <sup>+</sup>	0.423 <sup>+</sup>	0.273 <sup>+</sup>	0.139 <sup>+</sup>	0.085 <sup>+</sup>	0.125 <sup>+</sup>	
560 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.176 <sup>+</sup>	0.423 <sup>+</sup>	0.273 <sup>+</sup>	0.139 <sup>+</sup>	0.085 <sup>+</sup>	0.125 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.036 <sup>+</sup>	0.179 <sup>+</sup>	0.43 <sup>+</sup>	0.277 <sup>+</sup>	0.142 <sup>+</sup>	0.08 <sup>+</sup>	0.114 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.036 <sup>+</sup>	0.179 <sup>+</sup>	0.43 <sup>+</sup>	0.277 <sup>+</sup>	0.142 <sup>+</sup>	0.08 <sup>+</sup>	0.114 <sup>+</sup>	
580 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.036 <sup>+</sup>	0.179 <sup>+</sup>	0.43 <sup>+</sup>	0.277 <sup>+</sup>	0.142 <sup>+</sup>	0.08 <sup>+</sup>	0.114 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.037 <sup>+</sup>	0.183 <sup>+</sup>	0.44 <sup>+</sup>	0.284 <sup>+</sup>	0.139 <sup>+</sup>	0.077 <sup>+</sup>	0.101 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.037 <sup>+</sup>	0.183 <sup>+</sup>	0.44 <sup>+</sup>	0.284 <sup>+</sup>	0.139 <sup>+</sup>	0.077 <sup>+</sup>	0.101 <sup>+</sup>	
600 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.037 <sup>+</sup>	0.183 <sup>+</sup>	0.44 <sup>+</sup>	0.284 <sup>+</sup>	0.139 <sup>+</sup>	0.077 <sup>+</sup>	0.101 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.036 <sup>+</sup>	0.179 <sup>+</sup>	0.43 <sup>+</sup>	0.277 <sup>+</sup>	0.132 <sup>+</sup>	0.066 <sup>+</sup>	0.092 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.174 <sup>+</sup>	0.418 <sup>+</sup>	0.27 <sup>+</sup>	0.123 <sup>+</sup>	0.061 <sup>+</sup>	0.086 <sup>+</sup>	
620 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.036 <sup>+</sup>	0.179 <sup>+</sup>	0.43 <sup>+</sup>	0.277 <sup>+</sup>	0.132 <sup>+</sup>	0.066 <sup>+</sup>	0.092 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.032 <sup>+</sup>	0.158 <sup>+</sup>	0.379 <sup>+</sup>	0.245 <sup>+</sup>	0.111 <sup>+</sup>	0.056 <sup>+</sup>	0.078 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.027 <sup>+</sup>	0.137 <sup>+</sup>	0.328 <sup>+</sup>	0.212 <sup>+</sup>	0.096 <sup>+</sup>	0.048 <sup>+</sup>	0.067 <sup>+</sup>	
640 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>	0.071 <sup>+</sup>	0.171 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>	0.071 <sup>+</sup>	0.171 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>	0.071 <sup>+</sup>	0.171 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	
660 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.032 <sup>+</sup>	0.158 <sup>+</sup>	0.379 <sup>+</sup>	0.245 <sup>+</sup>	0.111 <sup>+</sup>	0.056 <sup>+</sup>	0.078 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>	0.071 <sup>+</sup>	0.171 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.002 <sup>+</sup>	0.027 <sup>+</sup>	0.137 <sup>+</sup>	0.328 <sup>+</sup>	0.212 <sup>+</sup>	0.096 <sup>+</sup>	0.048 <sup>+</sup>	0.067 <sup>+</sup>	
680 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.027 <sup>+</sup>	0.137 <sup>+</sup>	0.328 <sup>+</sup>	0.212 <sup>+</sup>	0.096 <sup>+</sup>	0.048 <sup>+</sup>	0.067 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>	0.071 <sup>+</sup>	0.171 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.023 <sup>+</sup>	0.113 <sup>+</sup>	0.272 <sup>+</sup>	0.175 <sup>+</sup>	0.08 <sup>+</sup>	0.04 <sup>+</sup>	0.056 <sup>+</sup>	
700 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.023 <sup>+</sup>	0.113 <sup>+</sup>	0.272 <sup>+</sup>	0.175 <sup>+</sup>	0.08 <sup>+</sup>	0.04 <sup>+</sup>	0.056 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>	0.071 <sup>+</sup>	0.171 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.023 <sup>+</sup>	0.113 <sup>+</sup>	0.272 <sup>+</sup>	0.175 <sup>+</sup>	0.08 <sup>+</sup>	0.04 <sup>+</sup>	0.056 <sup>+</sup>	
720 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.018 <sup>+</sup>	0.092 <sup>+</sup>	0.221 <sup>+</sup>	0.143 <sup>+</sup>	0.065 <sup>+</sup>	0.032 <sup>+</sup>	0.045 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>	0.071 <sup>+</sup>	0.171 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>	0.071 <sup>+</sup>	0.171 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	
740 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>	0.071 <sup>+</sup>	0.171 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>	0.071 <sup>+</sup>	0.171 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.014 <sup>+</sup>	0.071 <sup>+</sup>	0.171 <sup>+</sup>	0.11 <sup>+</sup>	0.05 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	
760 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.011 <sup>+</sup>	0.053 <sup>+</sup>	0.127 <sup>+</sup>	0.082 <sup>+</sup>	0.037 <sup>+</sup>	0.019 <sup>+</sup>	0.026 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.011 <sup>+</sup>	0.053 <sup>+</sup>	0.127 <sup>+</sup>	0.082 <sup>+</sup>	0.037 <sup>+</sup>	0.019 <sup>+</sup>	0.026 <sup>+</sup>	0.001 <sup>+</sup>	0.011 <sup>+</sup>	0.053 <sup>+</sup>	0.127 <sup>+</sup>	0.082 <sup>+</sup>	0.037 <sup>+</sup>	0.019 <sup>+</sup>	0.026 <sup>+</sup>	
780 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	0.007 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.085 <sup>+</sup>	0.055 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.012 <sup>+</sup>	0.017 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	0.007 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.085 <sup>+</sup>	0.055 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.012 <sup>+</sup>	0.017 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	0.007 <sup>+</sup>	0.035 <sup>+</sup>	0.085 <sup>+</sup>	0.055 <sup>+</sup>	0.025 <sup>+</sup>	0.012 <sup>+</sup>	0.017 <sup>+</sup>	
800 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	0.005 <sup>+</sup>	0.026 <sup>+</sup>	0.062 <sup>+</sup>	0.04 <sup>+</sup>	0.018 <sup>+</sup>	0.009 <sup>+</sup>	0.013 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	0.005 <sup>+</sup>	0.026 <sup>+</sup>	0.062 <sup>+</sup>	0.04 <sup>+</sup>	0.018 <sup>+</sup>	0.009 <sup>+</sup>	0.013 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	0.005 <sup>+</sup>	0.026 <sup>+</sup>	0.062 <sup>+</sup>	0.04 <sup>+</sup>	0.018 <sup>+</sup>	0.009 <sup>+</sup>	0.013 <sup>+</sup>	

討論四											200 UL			150 UL			100 UL			50 UL			25 UL			10 UL			5 UL			2 UL		
VNNaOH			VNNaOH																															

## 【評語】050217

利用鐵離子與水楊酸錯合的顏色變化，建立一個簡易測量的方法，然而市售的產品中存在多種易干擾的成分，易造成比色上的誤差與判斷。

作品海報

就這樣「紫索」  
-建立簡易水楊酸定量法應用於市售洗面乳

## 摘要

市面上含水楊酸的清潔保養品日益普及，水楊酸過量使用導致肌膚刺激的案例亦逐漸增多。由於目前缺乏簡易、低成本的居家檢測工具，本研究旨在開發一套操作簡便、具量化能力且環保的水楊酸檢測方法。

本研究首先利用水楊酸與三價鐵離子在酸性環境下會產生螯合反應形成的紫色錯合物的特性，配製溶液利用分光度計檢測，卻發現市售洗面乳中其他成分可能干擾測量結果，導致偽陰性現象。

為解決此問題，我們進一步開發水楊酸試紙，並製作比色試紙，成功以廢棄暖暖包中所含的氧化鐵作為替代鐵源，調整緩衝溶液與鐵離子的試劑比例為1:4製作出具顯色反應的環保試劑與檢測紙。可有效區分蒸餾水、0%、0.22%、0.45%、0.5%與2.0%等五種市售常見濃度，並配合RGB分析與灰階值進行客觀判讀。



## 壹、實驗動機

接觸過量的水楊酸會導致部分人身體產生乾燥、脫皮、紅疹等反應，但市面上並沒有對應的檢測產品，我們便想作出一個可以檢測水楊酸濃度的試紙，讓大眾們可以方便的檢測手邊的洗面乳所含的水楊酸濃度。

由於民眾取得鐵離子還要額外花錢，我們想到能夠回收使用過的暖暖包中所含鐵源，將它溶於鹽酸後當成本研究的三價鐵離子使用，這不但可以讓廢棄物再利用，也可以讓民眾更容易的取得檢測水楊酸濃度的用品。

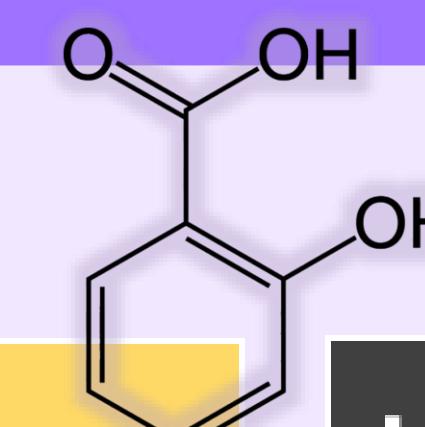
## 貳、研究目的

- 建立水楊酸檢測的SOP以及水楊酸檢量線
- 以自製檢量方式檢測市售含水楊酸洗面乳所含的實際水楊酸濃度
- 探討鐵離子製作水楊酸檢測試劑的可行性
- 探討回收廢棄暖暖包中鐵離子作為檢測試劑的可行性
- 利用廢棄暖暖包中鐵離子製作水楊酸試紙
- 製作出水楊酸試紙半定量比色卡
- 使用智能工具來定量水楊酸濃度

## 參、實驗架構與原理

### 一、實驗架構

#### 1. 建立檢測SOP比色檢量試劑



HSal-Fe<sup>3+</sup>錯合物

偵測波長  
pH緩衝液  
試劑成分  
混合比例

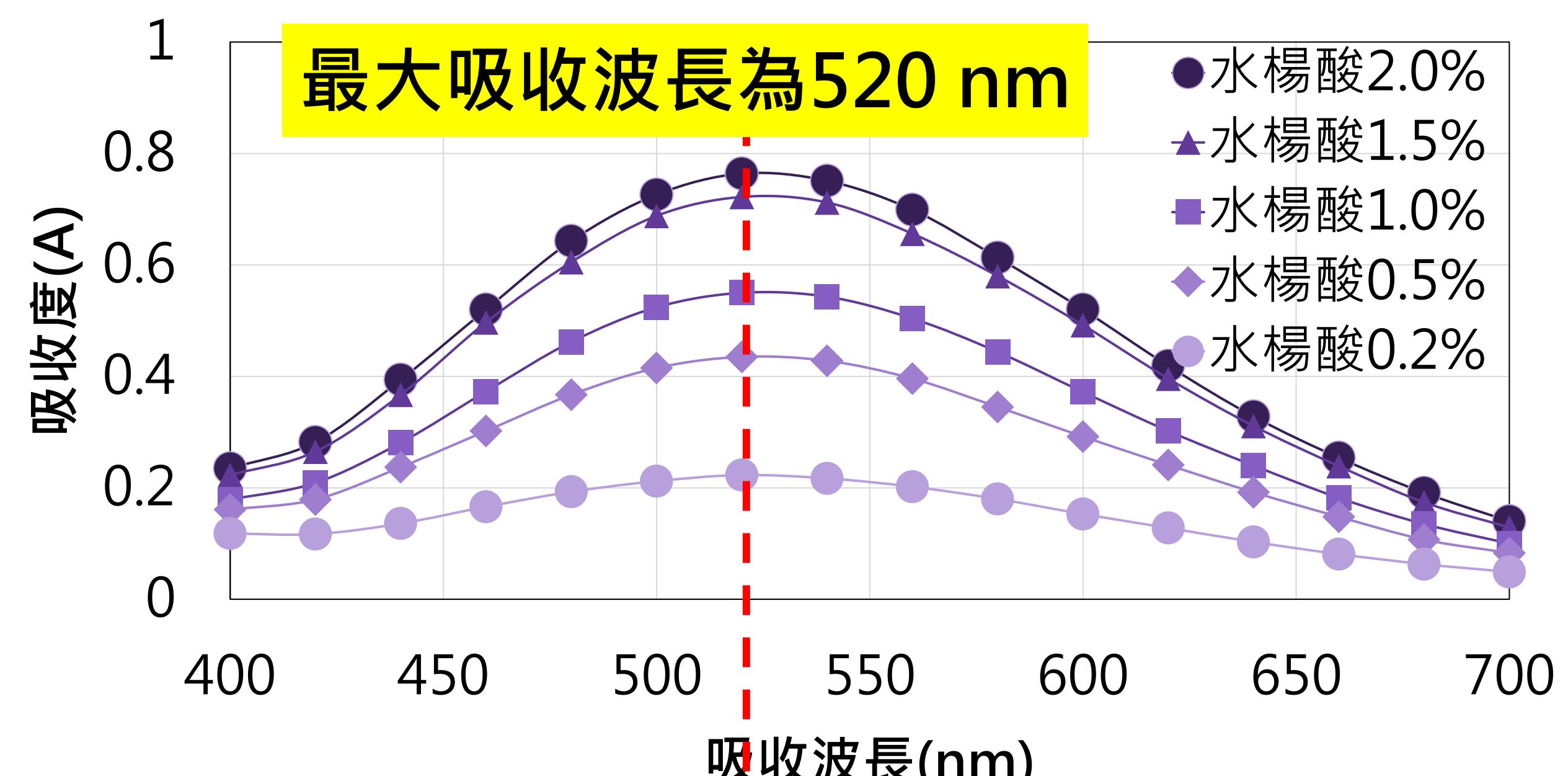
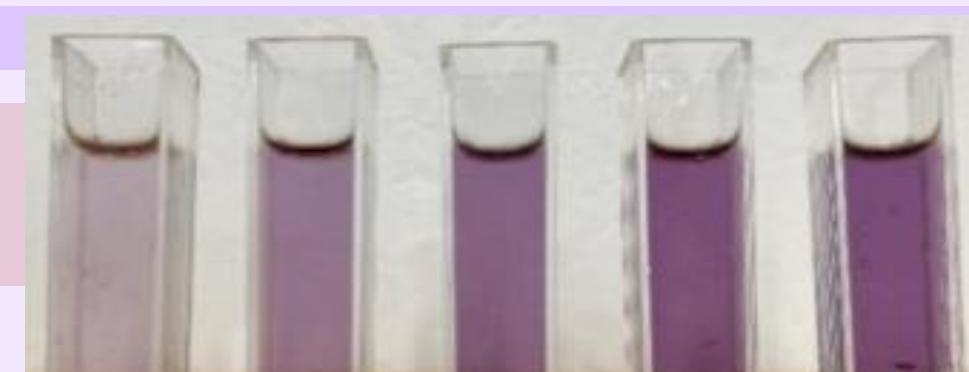
偽陰性  
基質效應

#### 2. 洗面乳的實測問題

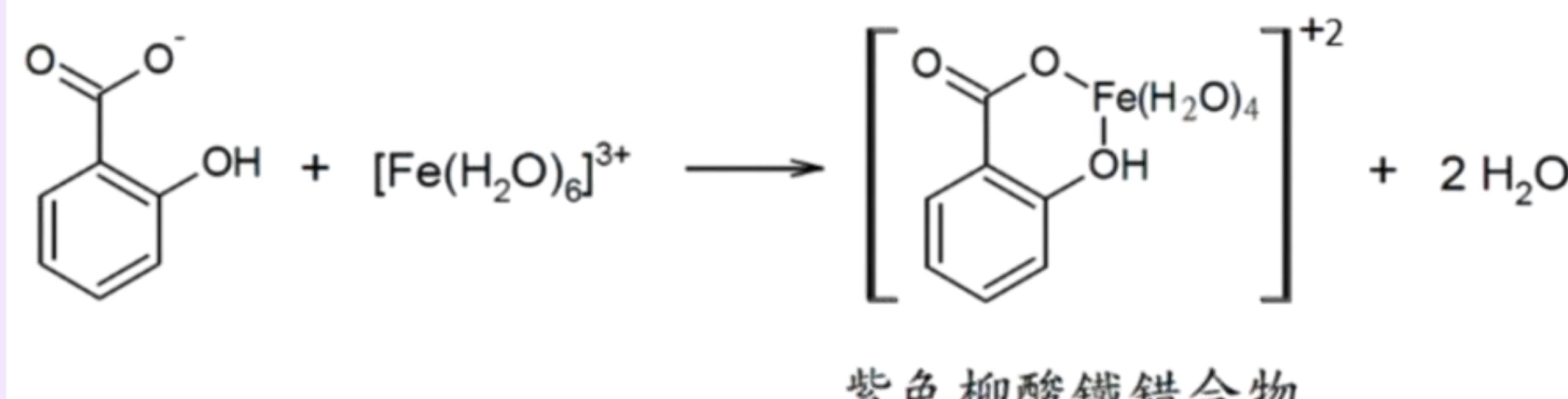
#### 3. 開發試紙解決偽陰性問題

#### 4. 探討試紙的定量能力

### 二、鐵離子的錯合反應

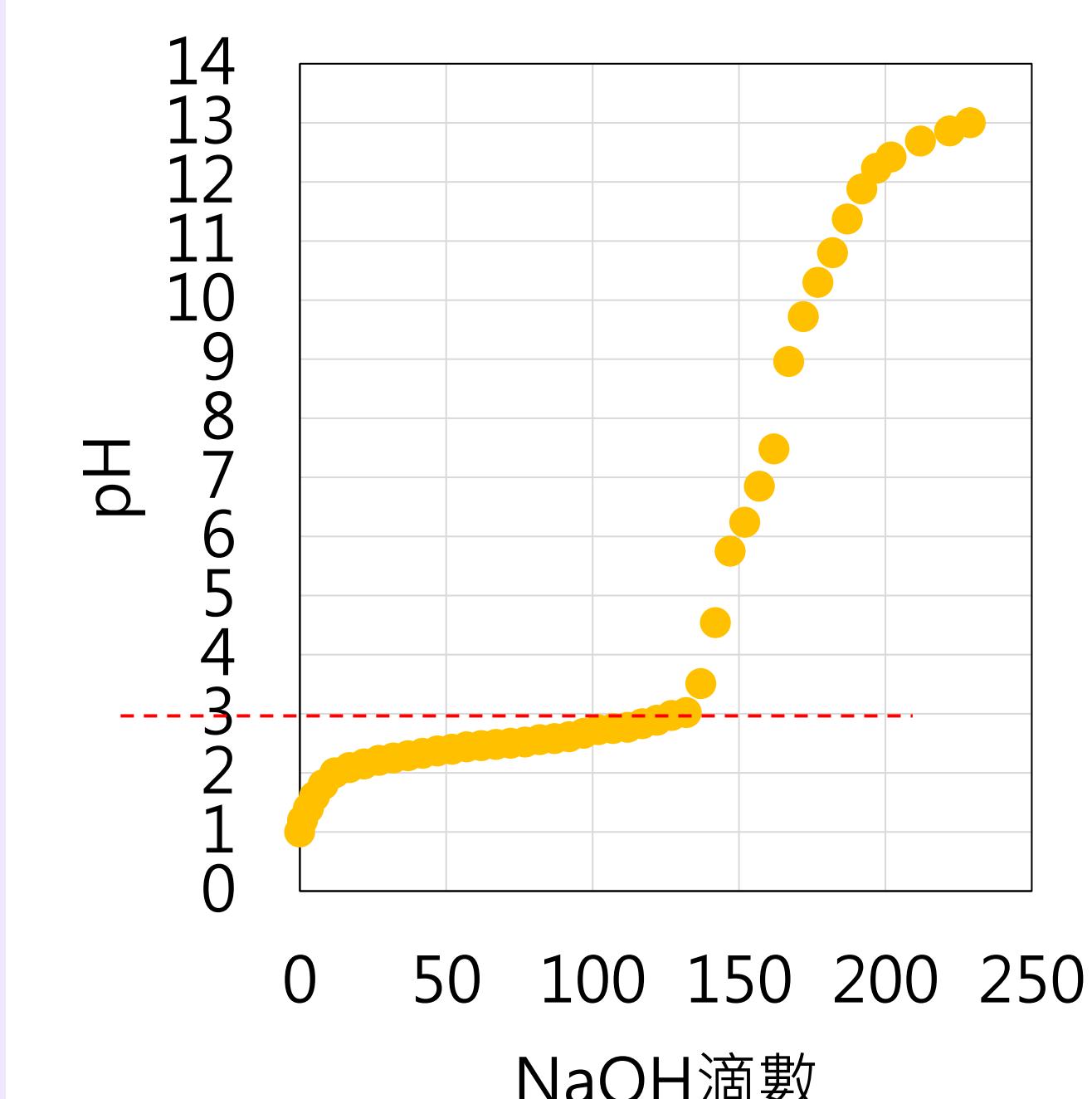
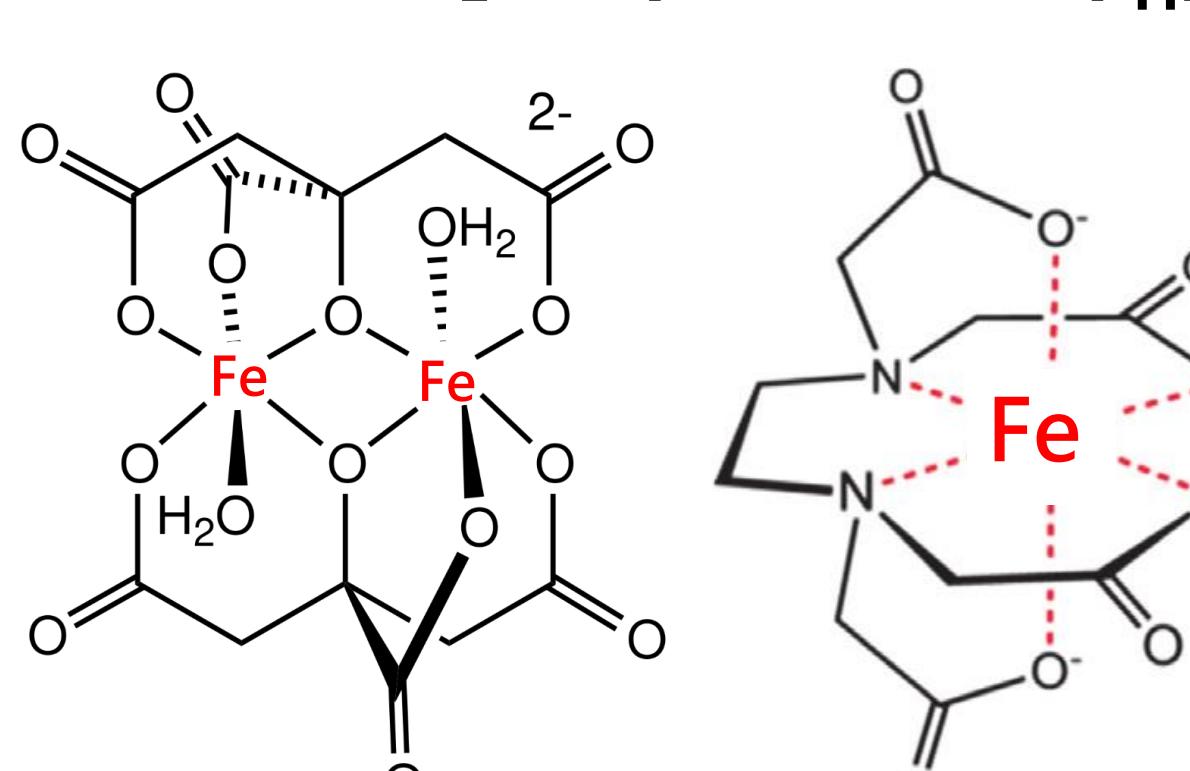


【圖】繪製紫色錯合物在不同可見光波長時的吸收度曲線



【圖】水楊酸以雙牙基的方式螯合鐵離子

### 三、鐵離子對於各物種反應活性



檸檬酸鐵或是EDTA-Fe<sup>3+</sup>

【圖】鐵離子的強鹼滴定曲線

# 肆、研究過程與方法

## 第一部分、製作檢測液

1

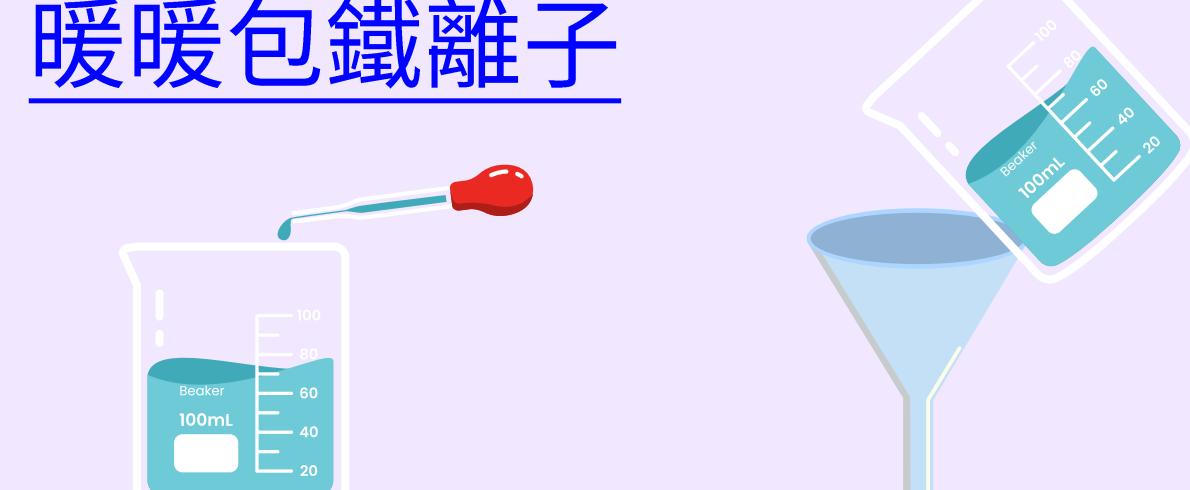
### 製作鐵離子溶液

#### 市售鐵離子



取若干硫酸鐵銨/加水至100 mL

#### 暖暖包鐵離子



取2.000 g暖暖包粉/溶於5000  $\mu$ L鹽酸



過濾溶液

2

### 調整檢測液的比例

- 加入合適的鐵離子劑量  
(對比文獻資料以及觀察數據圖形)
- 控制溶液合適的pH值  
(嘗試不同pKa的酸作為緩衝溶液)

## 第二部分、製作半定量試紙

### 緩衝溶液

### Fe<sup>3+</sup>溶液

### 檢測液

1



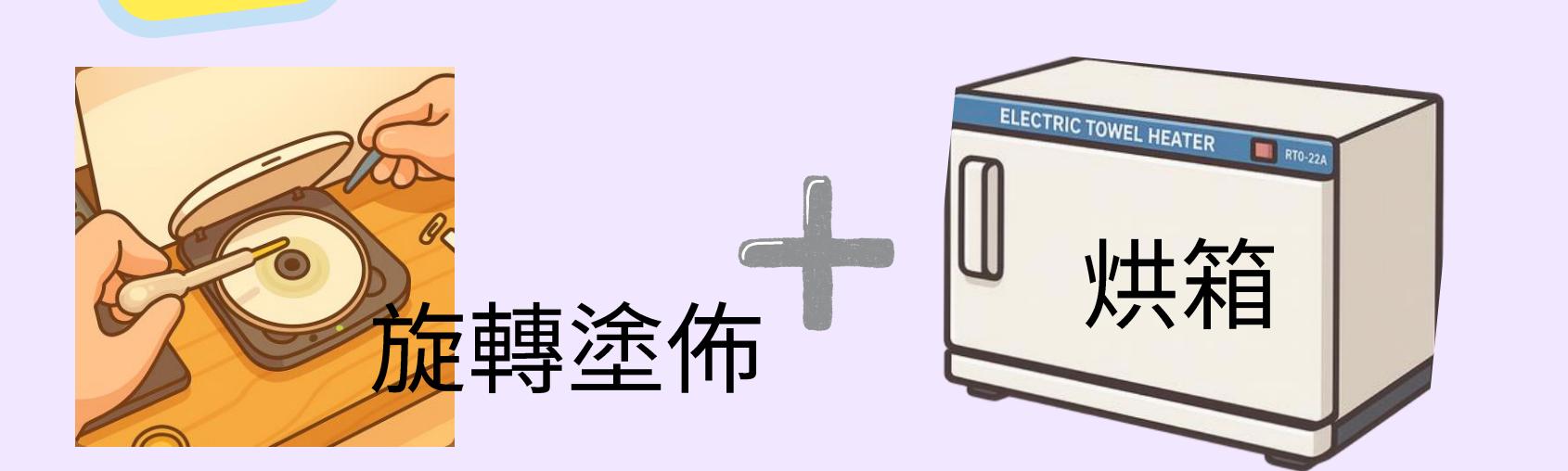
配製檢測液

2



將濾紙浸濕於檢測液

3



→形成試紙

4



建立比色方法

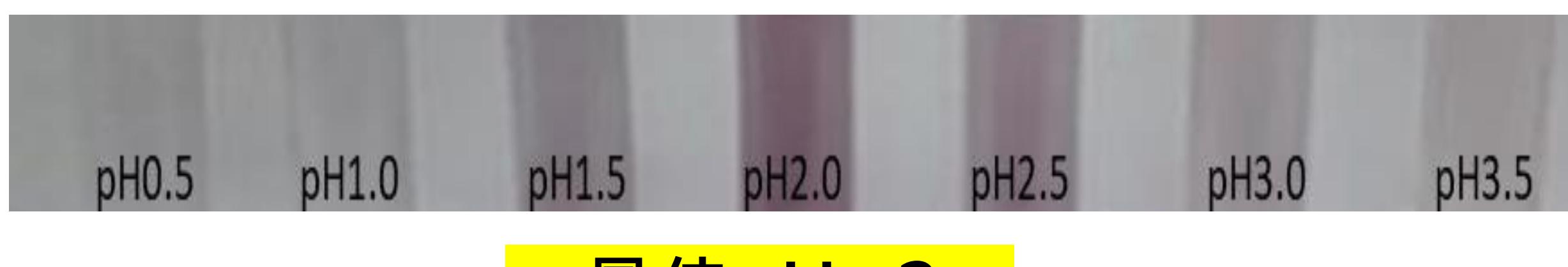
5

灰階值Gray=0.299R+0.587G+0.114B

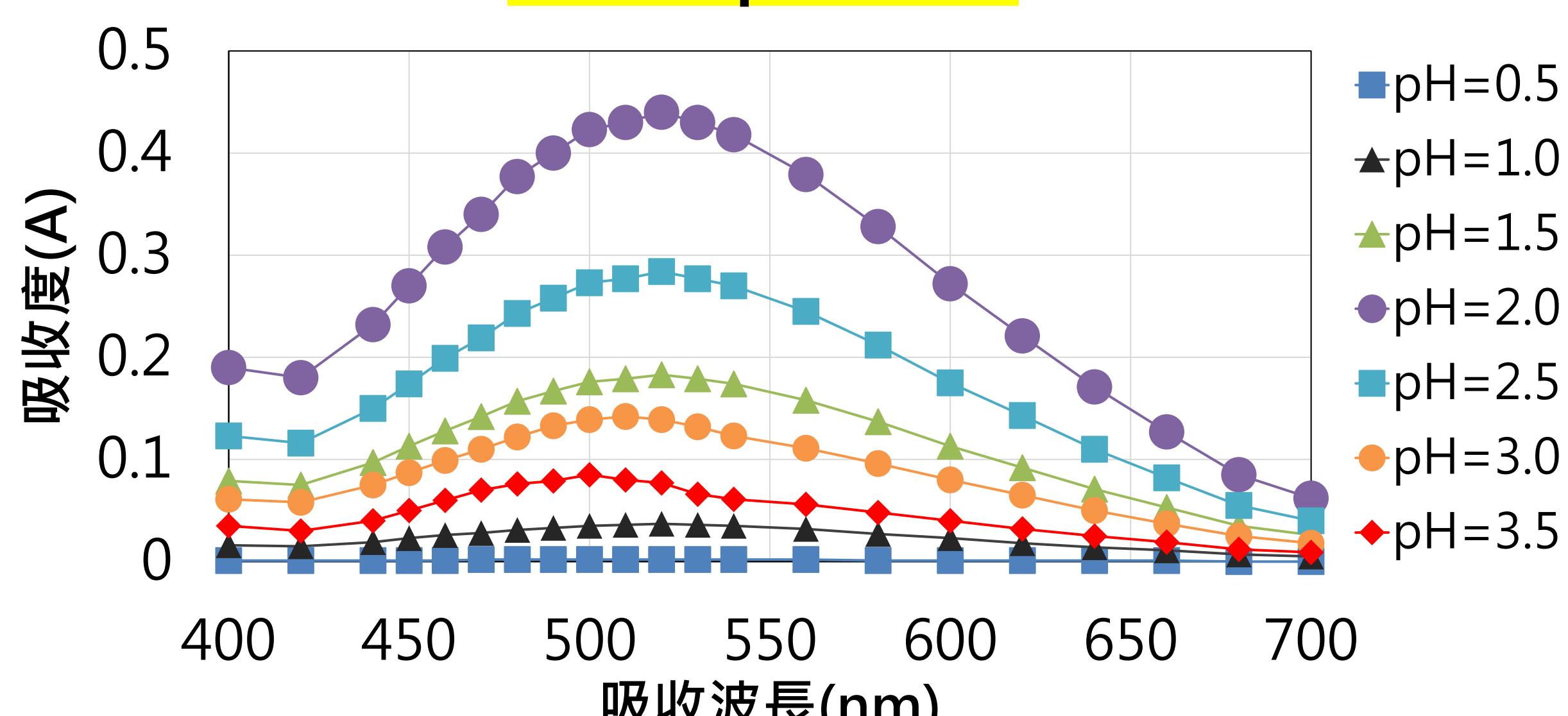
最貼切於民眾直接用肉眼看的情況

## 伍、實驗結果與討論

### 1.建立比色檢量方法及檢量線

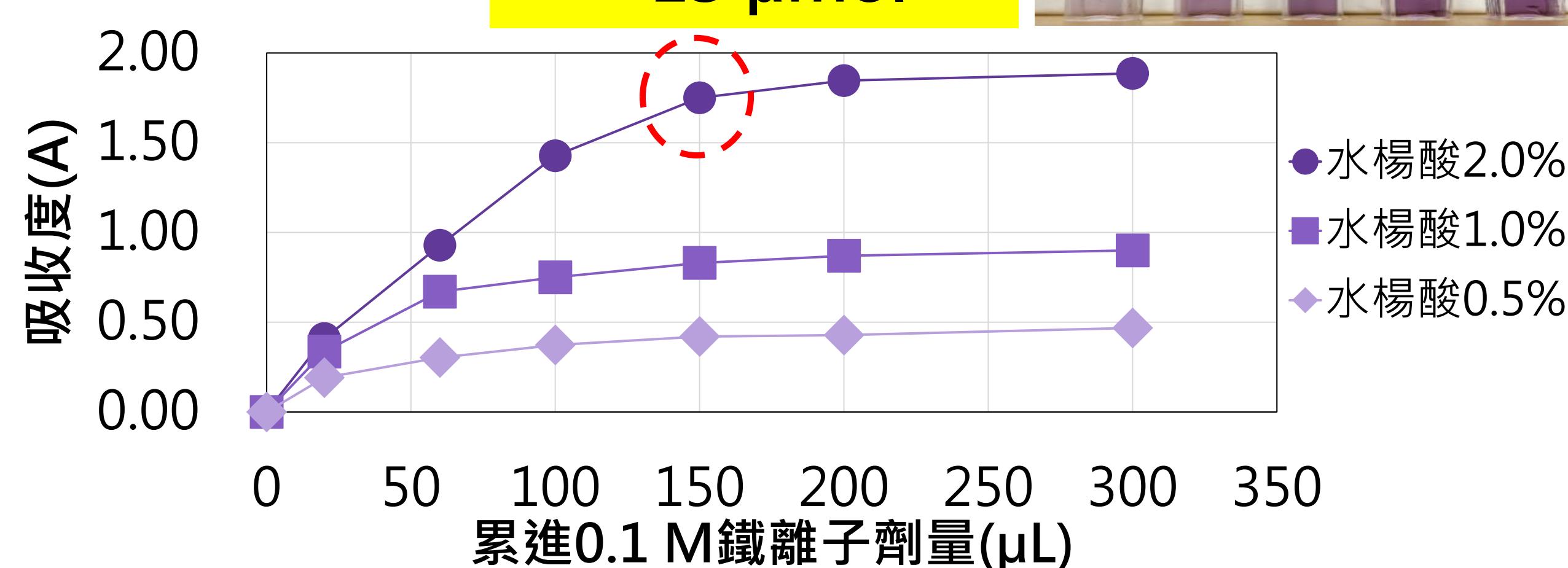
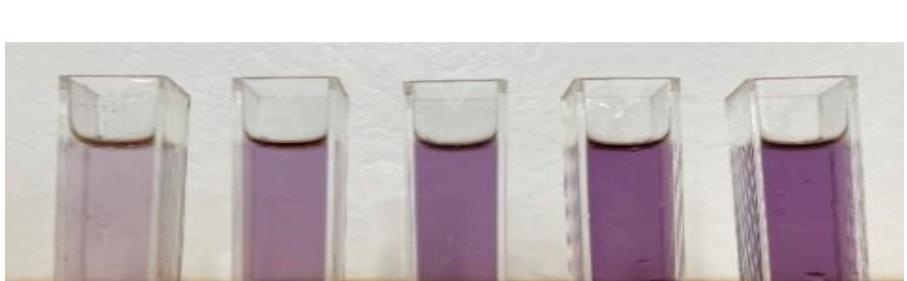


最佳pH=2



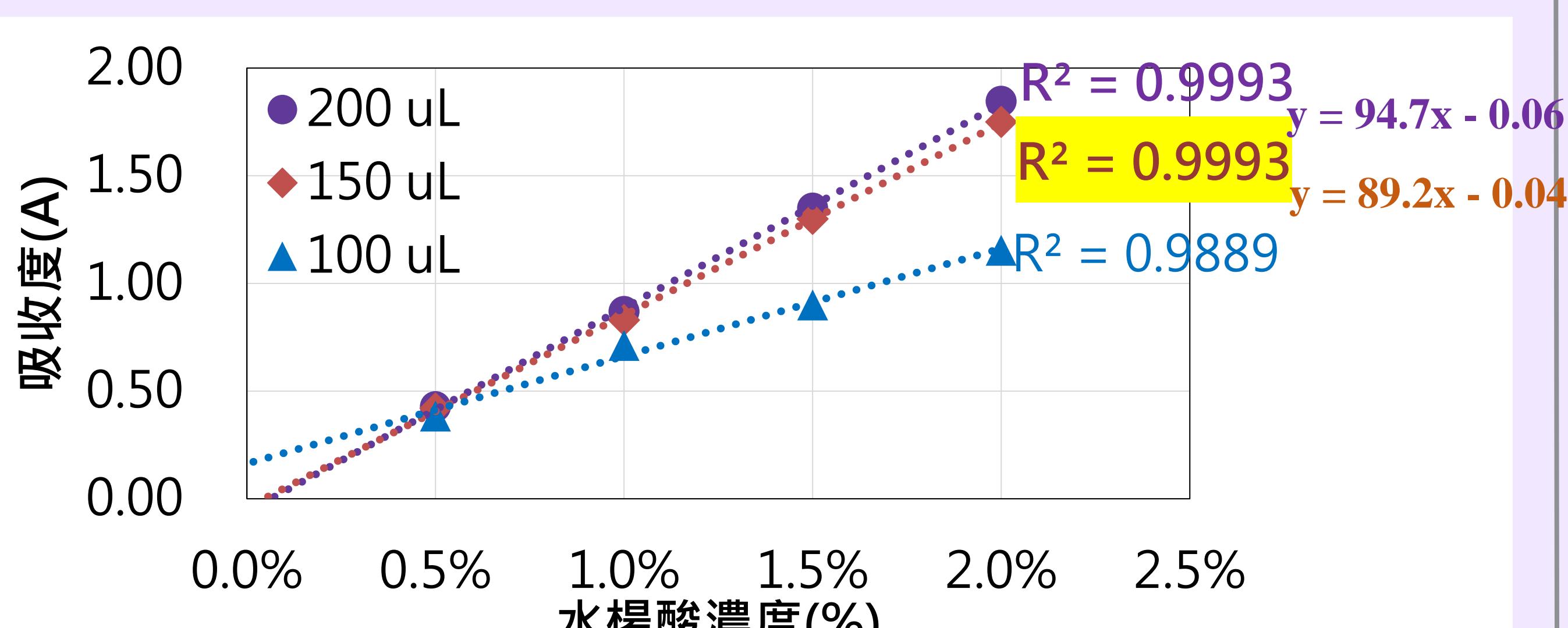
【圖】不同pH之水楊酸酚鐵吸收光譜

最佳鐵離子劑量  
=15  $\mu$ mol



【圖】不同濃度標準水楊酸(100  $\mu$ L)與不同鐵離子(0.1 M)劑量  
反應形成紫色酚鐵的吸收度變化

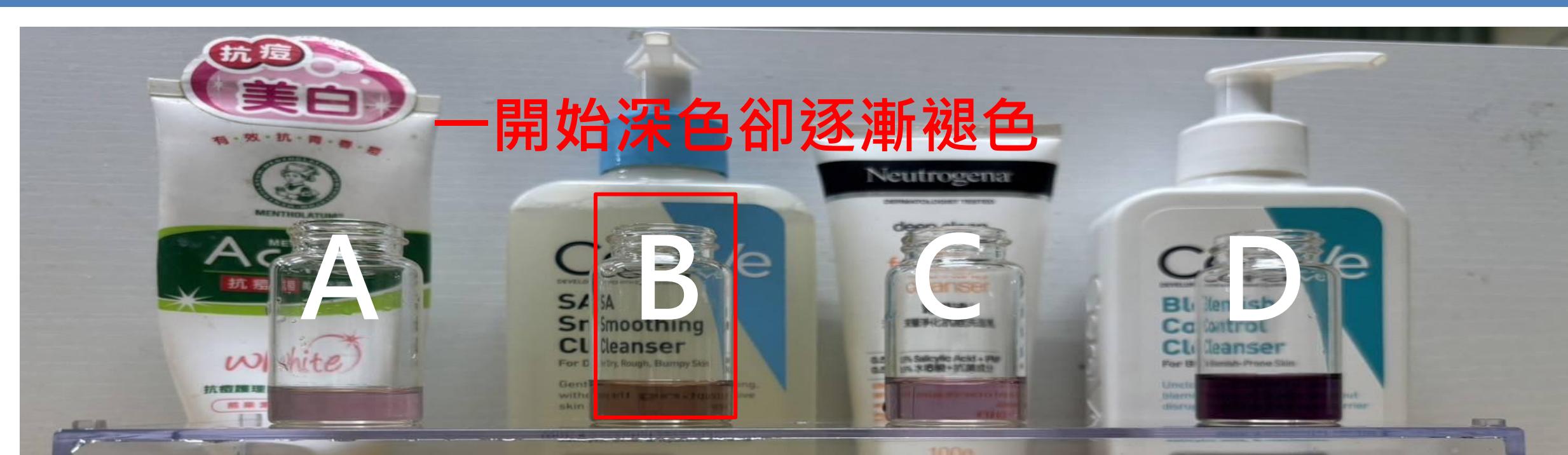
1:1莫耳比螯合→證明本研究紫色錯合物為  
 $[\text{Fe}(\text{HSal}^-)(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$



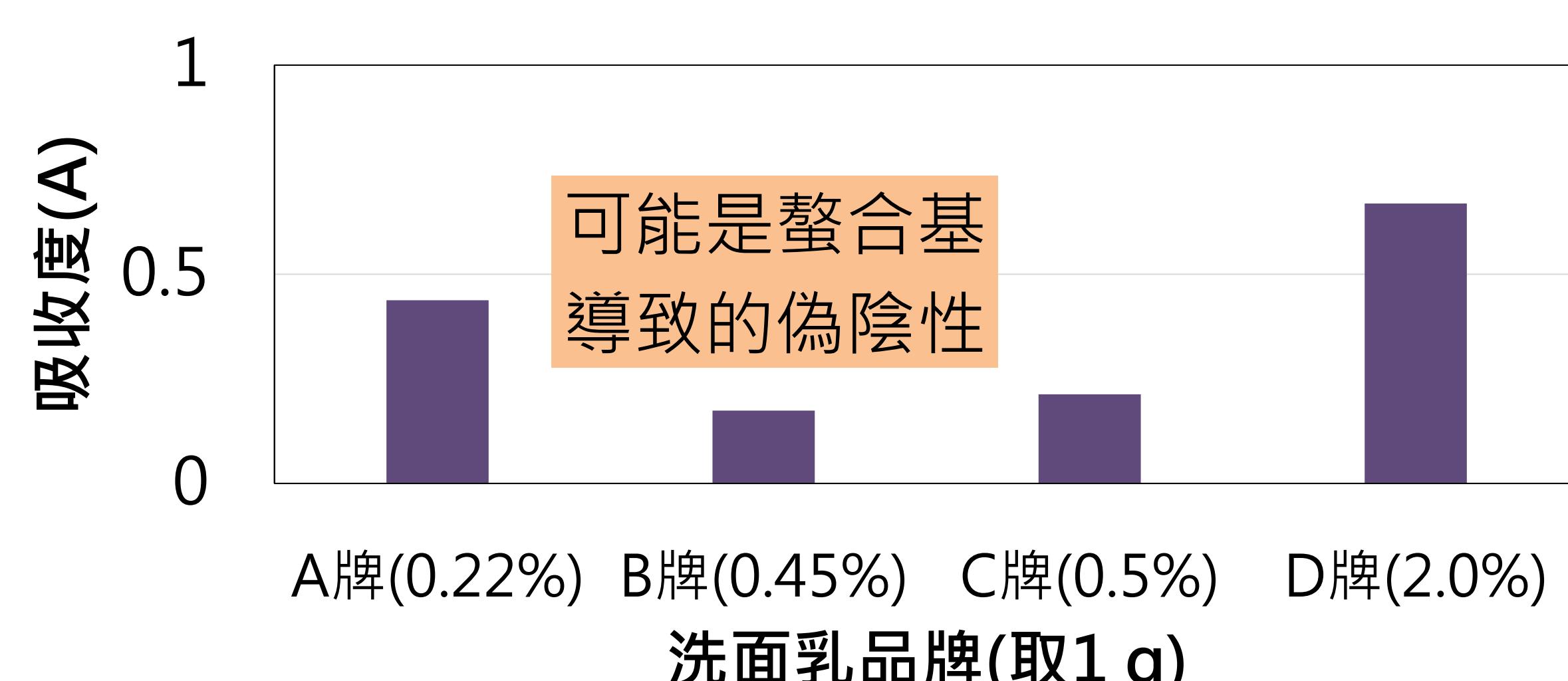
【圖】本研究建立之水楊酸比色試劑在不同鐵離子劑量時的  
吸收度變化對於待測水楊酸濃度的關係

證明當鐵離子作為過量試劑、水楊酸為限量試劑  
時，可以得到高度線性關係

### 2.自製檢測液配方應用於檢測產品



一開始深色卻逐漸褪色

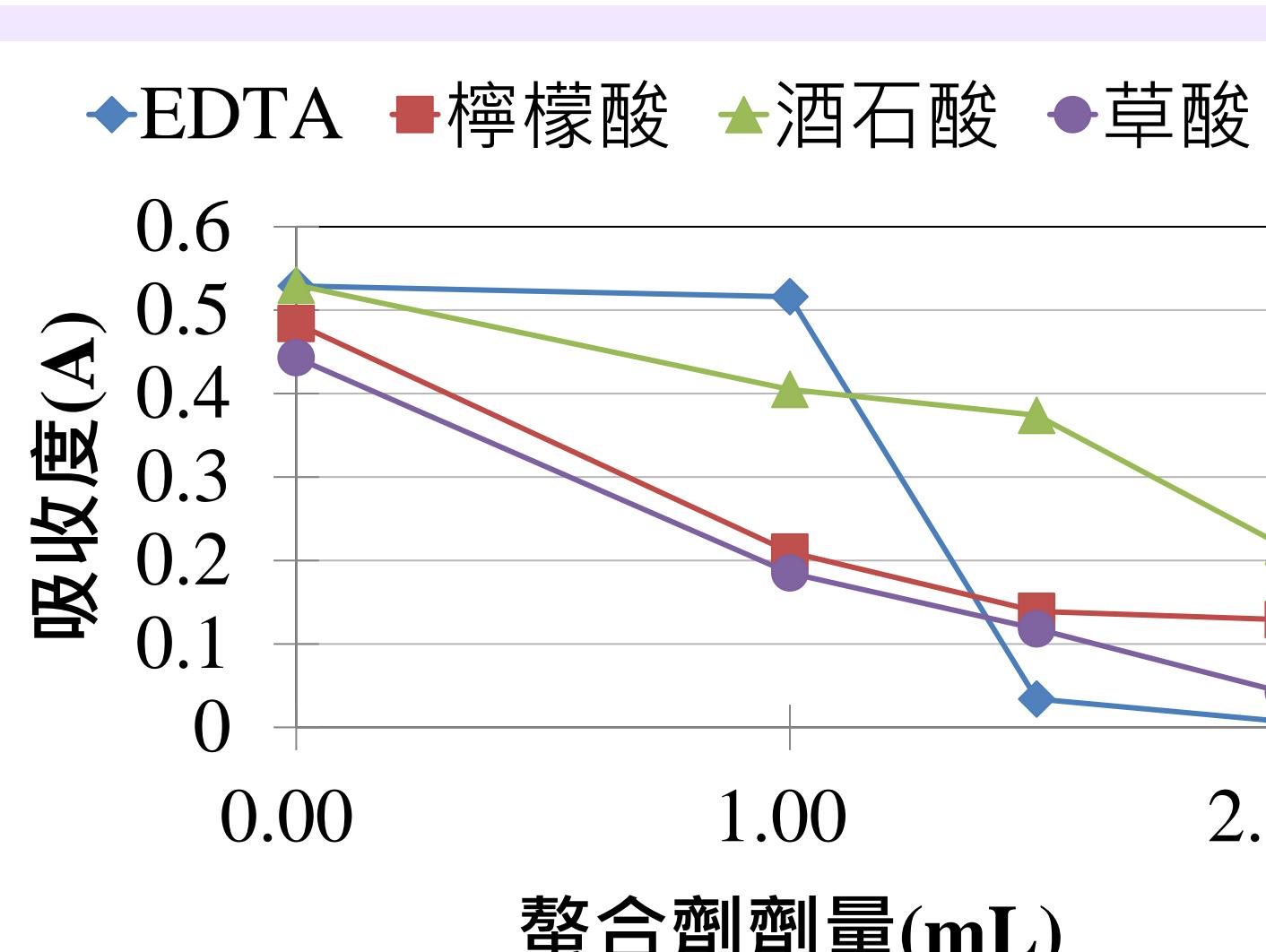


【圖】利用本研究建立之SOP 檢測市售產品水楊酸濃度

本研究比色試劑會受到基質效應的影響



EDTA量



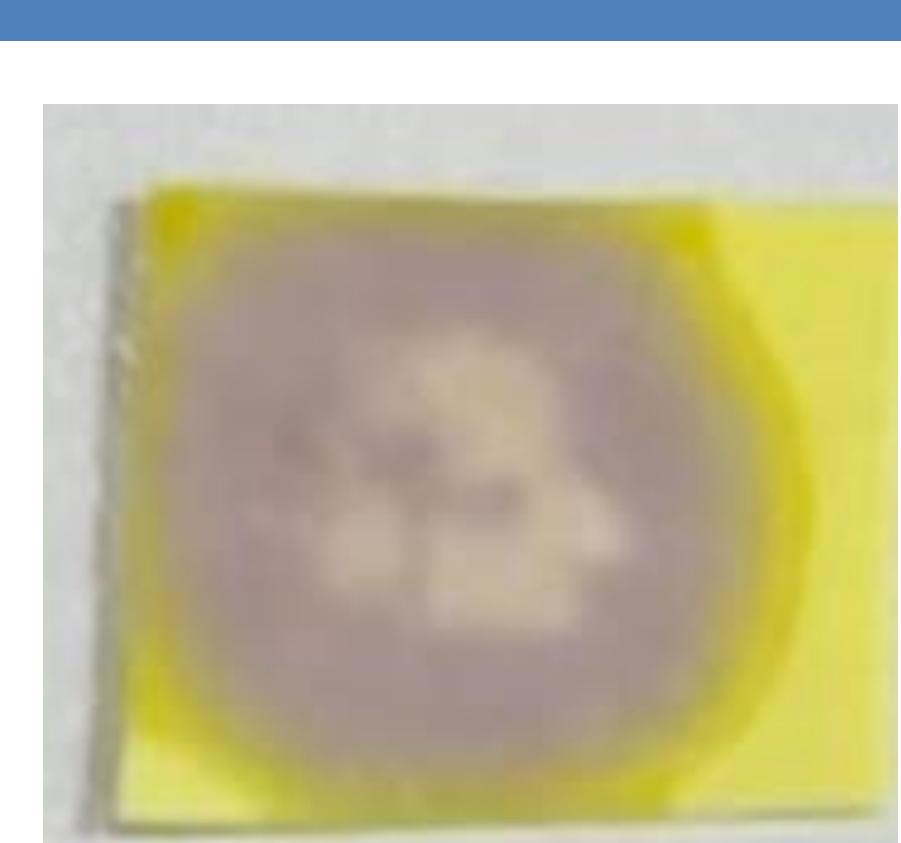
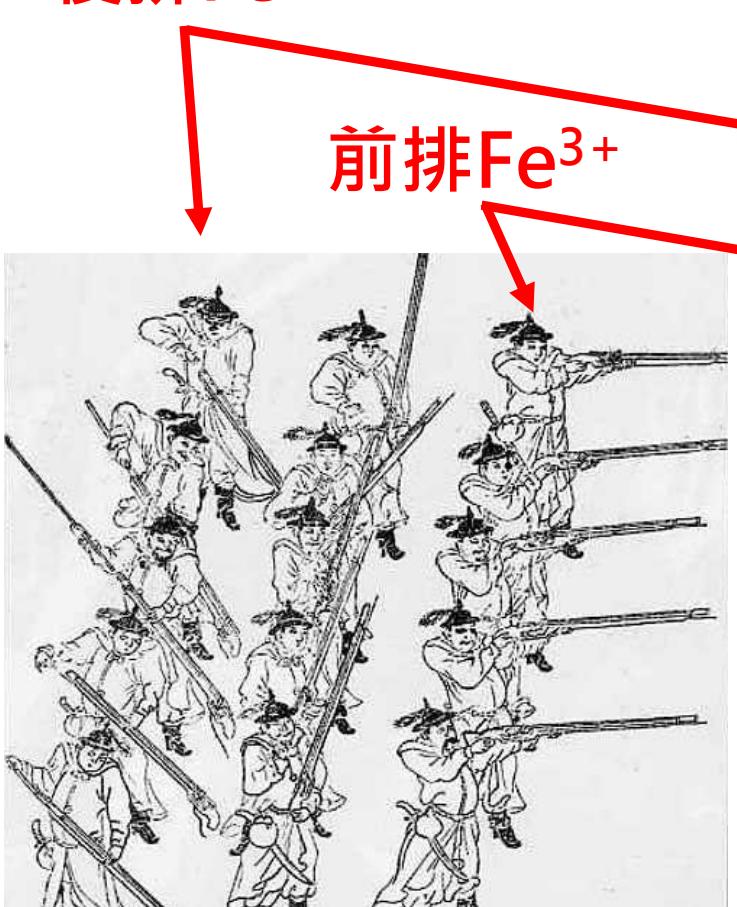
【圖】螯合劑導致水楊酸酚鐵褪色

EDTA等作為添加劑可能導致鐵離子被消耗

### 3.試紙解決偽陰性問題的靈感

後排Fe<sup>3+</sup>

前排Fe<sup>3+</sup>

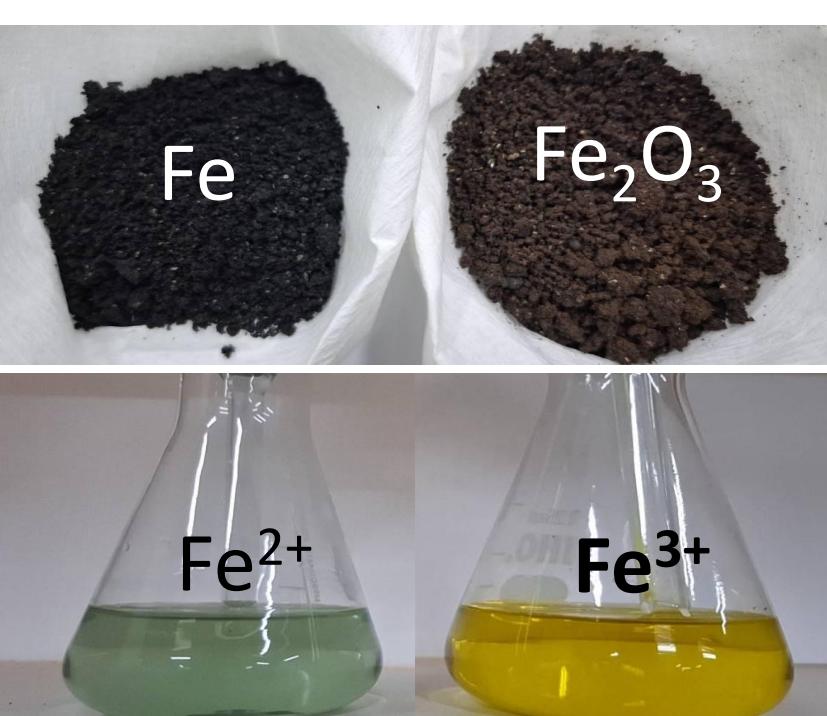
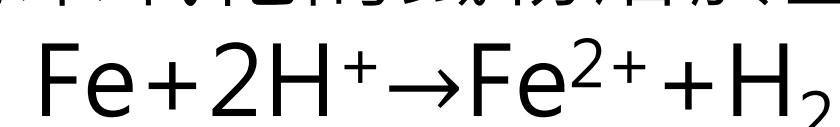


濾紙的層析作用及毛細作用  
限制了少量EDTA只能影響局部的鐵離子

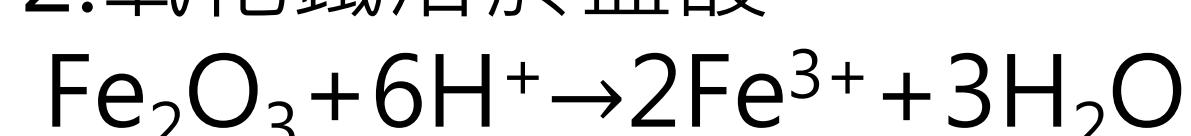
# 伍、實驗結果與討論

## 4.回收廢棄暖暖包製成檢測液

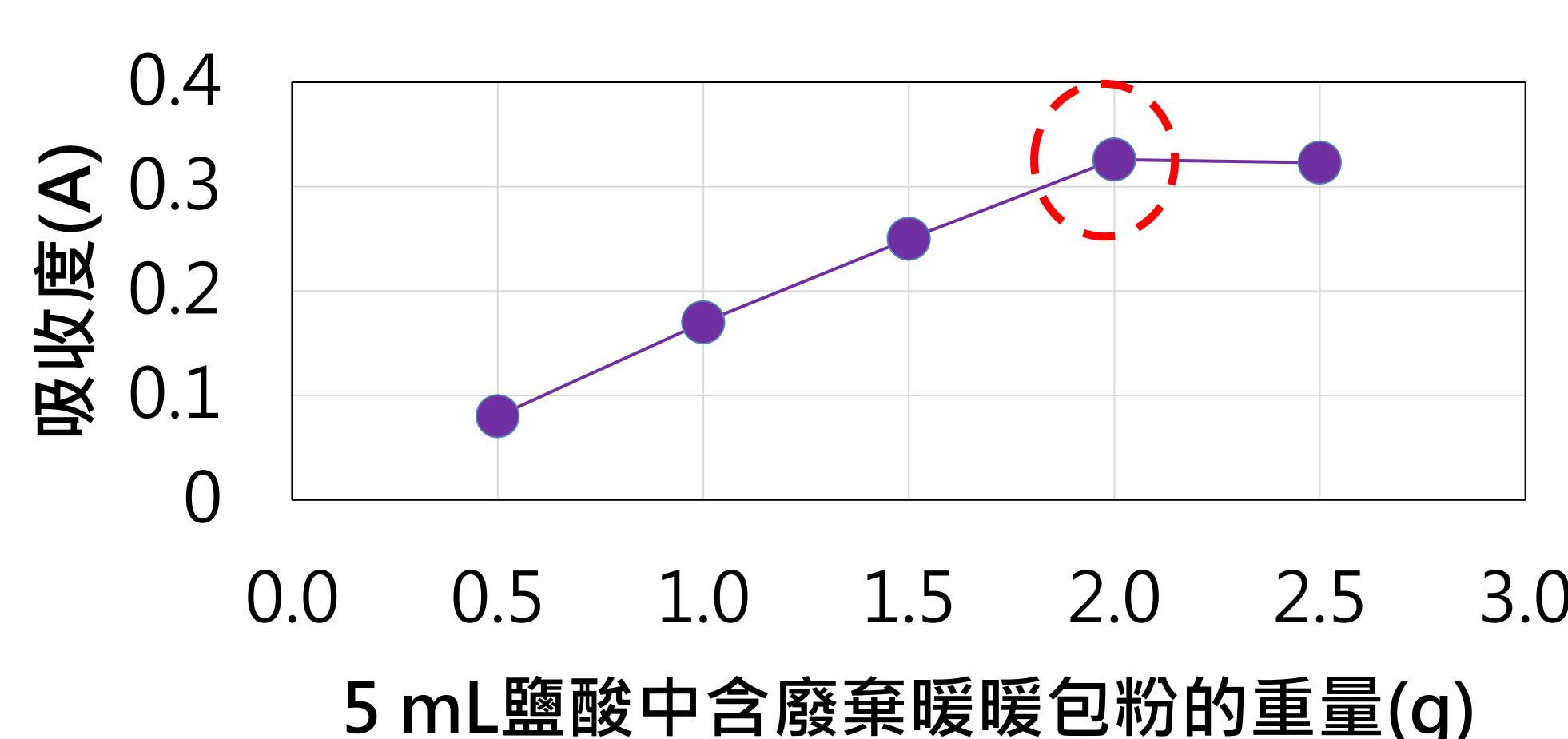
1.尚未氧化的鐵粉溶於鹽酸



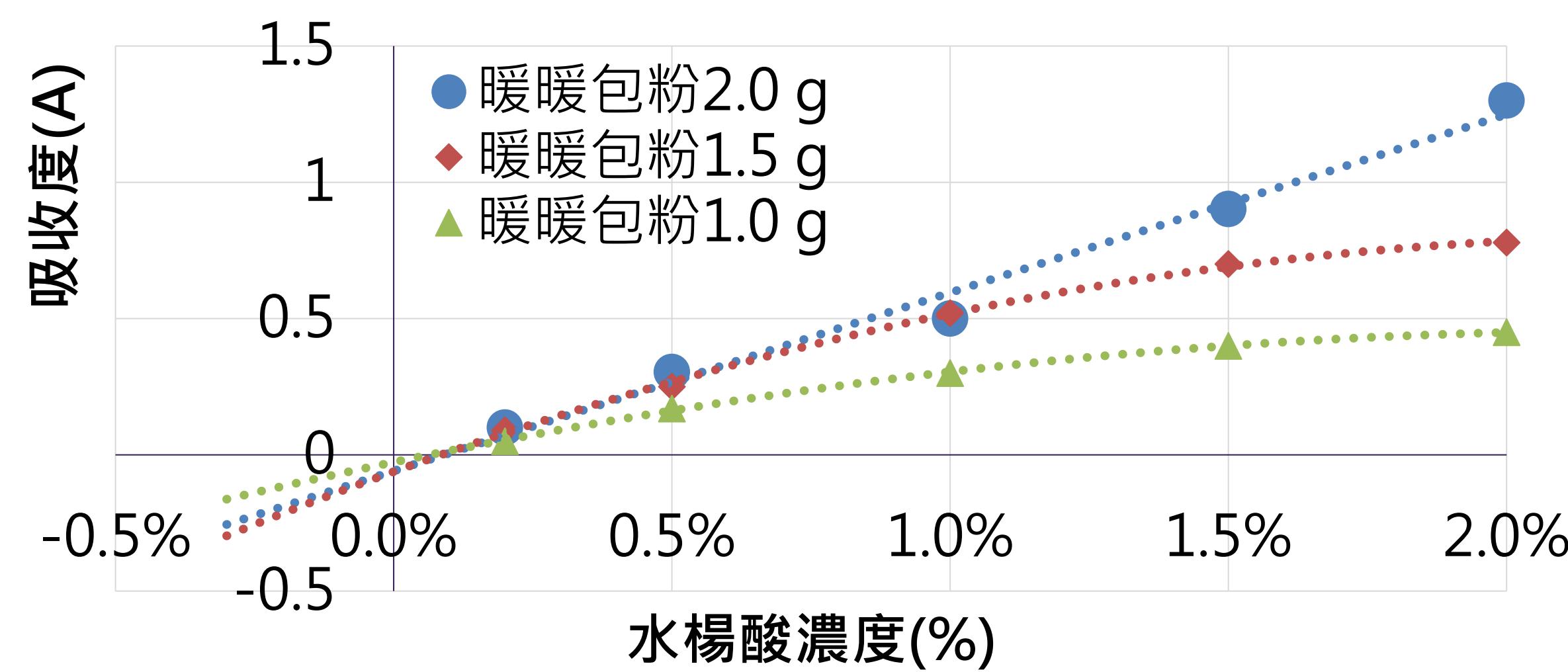
2.氧化鐵溶於鹽酸



符合  
SDGs  
環保、  
低成本  
之水楊  
酸檢測  
液



【圖】使用廢棄暖暖包取代鐵源成分來製作本研究比色試劑所需暖暖包粉量



【圖】提取暖暖包鐵離子製成之水楊酸檢量線

至少需使用2 g廢棄暖包粉溶鹽酸再取100  $\mu$ L來配製檢測液(達15  $\mu$ mol  $Fe^{3+}$ )才足夠測量2%標準水楊酸

## 5.自製水楊酸試紙檢測產品

「水溶出法」萃取洗面乳中的水楊酸分子



緩衝液(aq) :  $Fe^{3+}$ (aq)

9.7:0.3

9.5:0.5

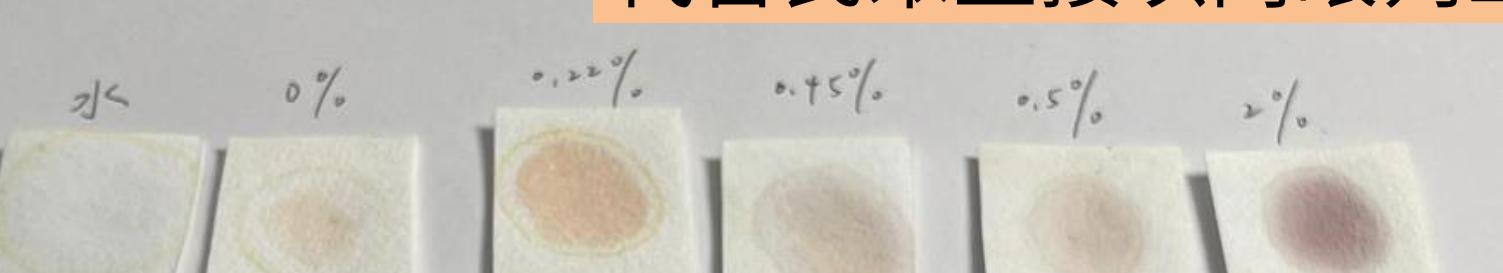
9.3:0.7

5:5

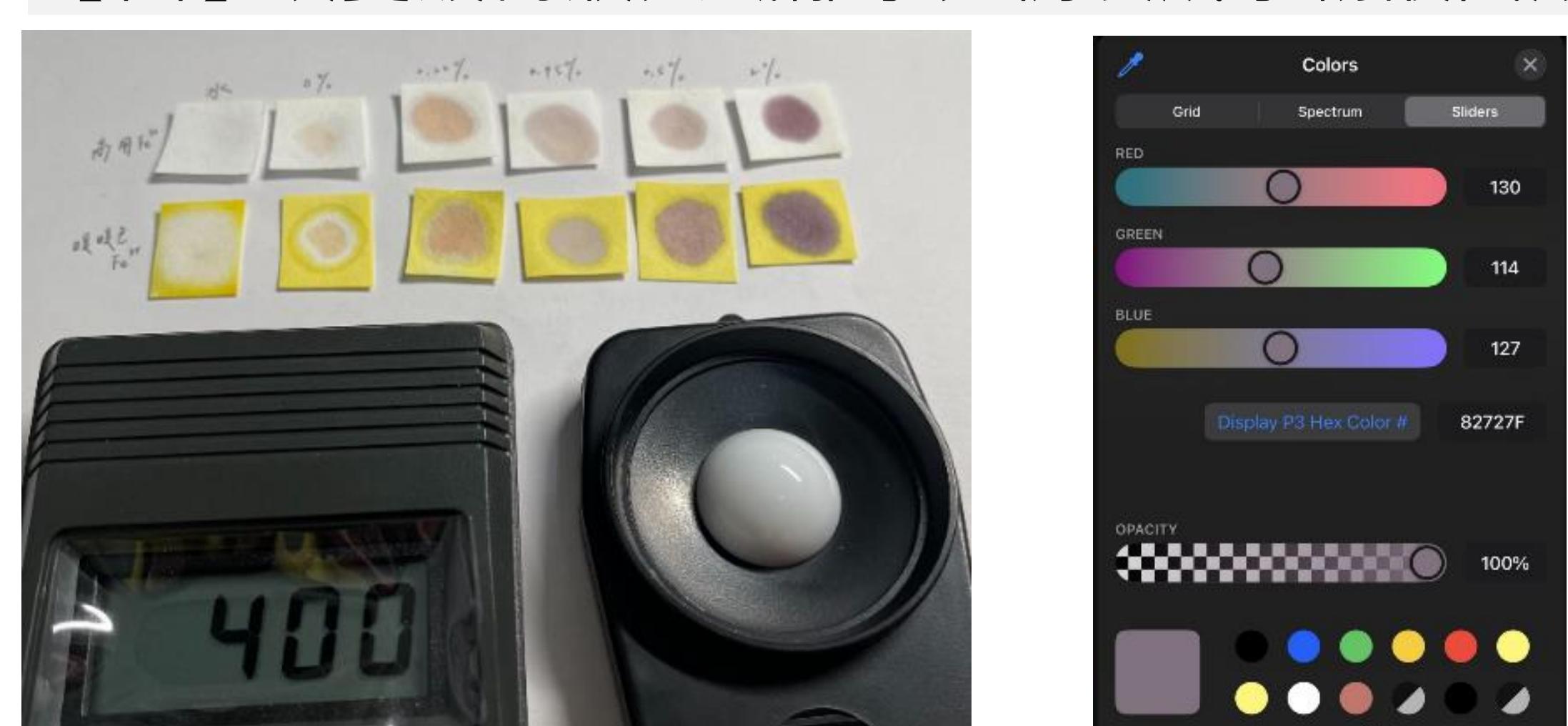
4:6

代替民眾直接以肉眼判斷最佳比例

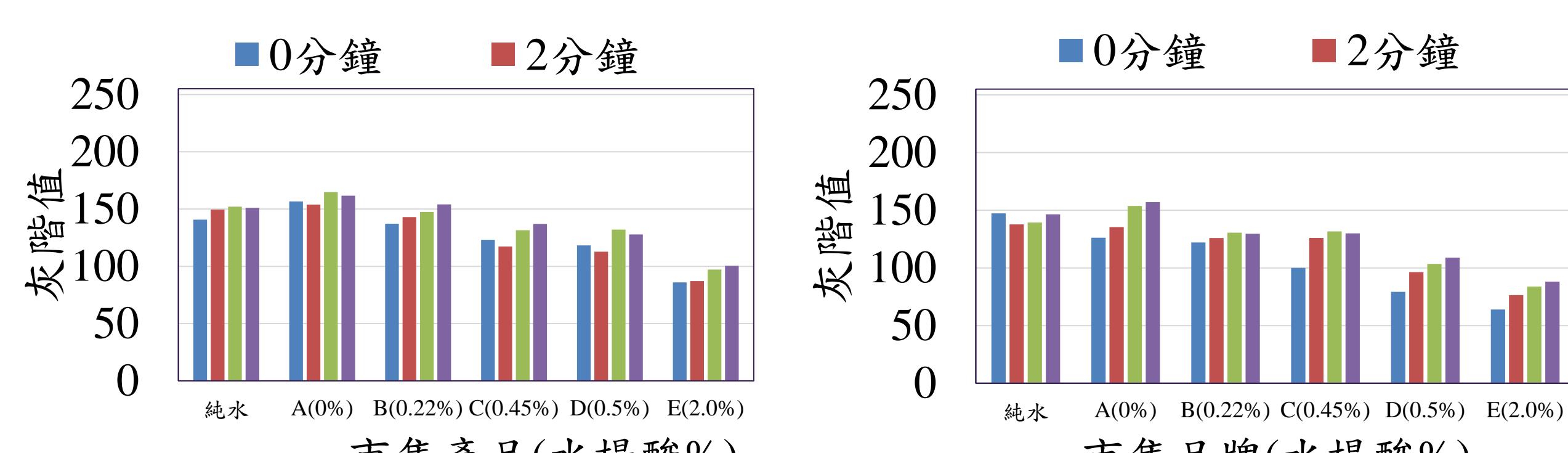
2:8



【圖】改變緩衝液與鐵離子比例製成水楊酸試紙



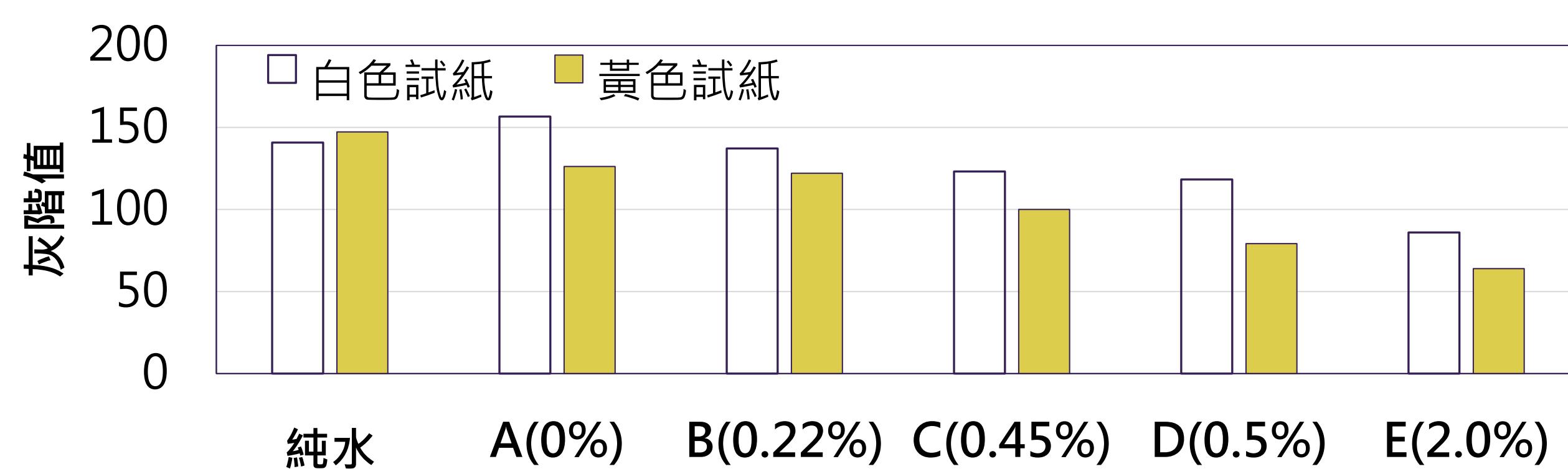
【圖】在固定光源下拍攝試紙照片分析R、G、B數值



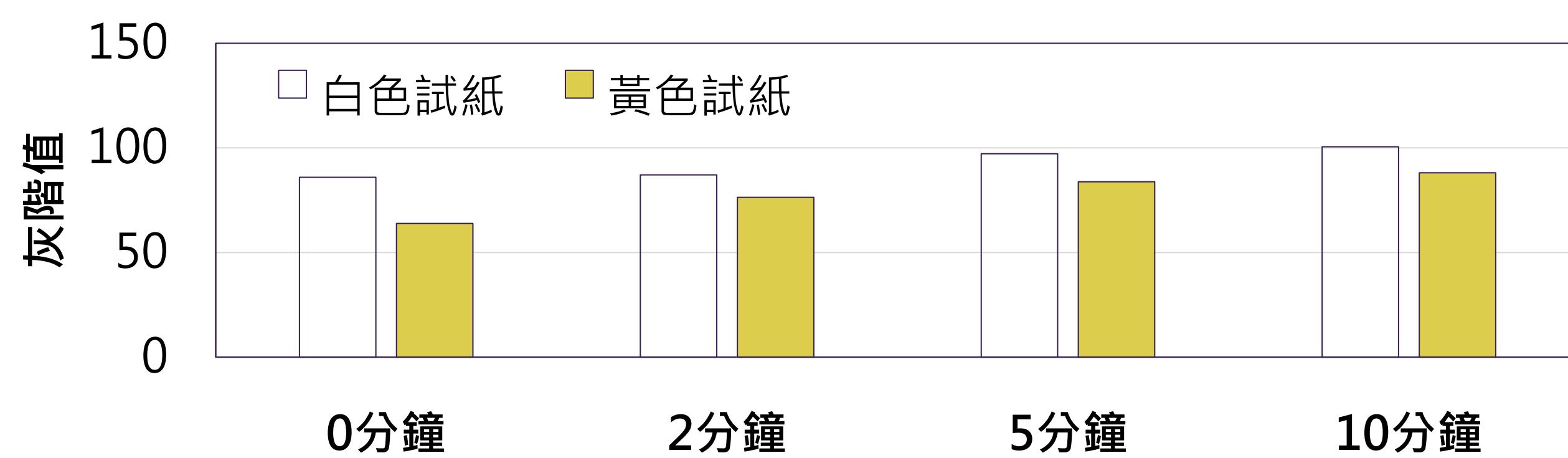
【圖】白色試紙(左圖)、黃色試紙(右圖)的顯色、褪色情況

試紙灰階值隨水楊酸%下降，表示顏色變深

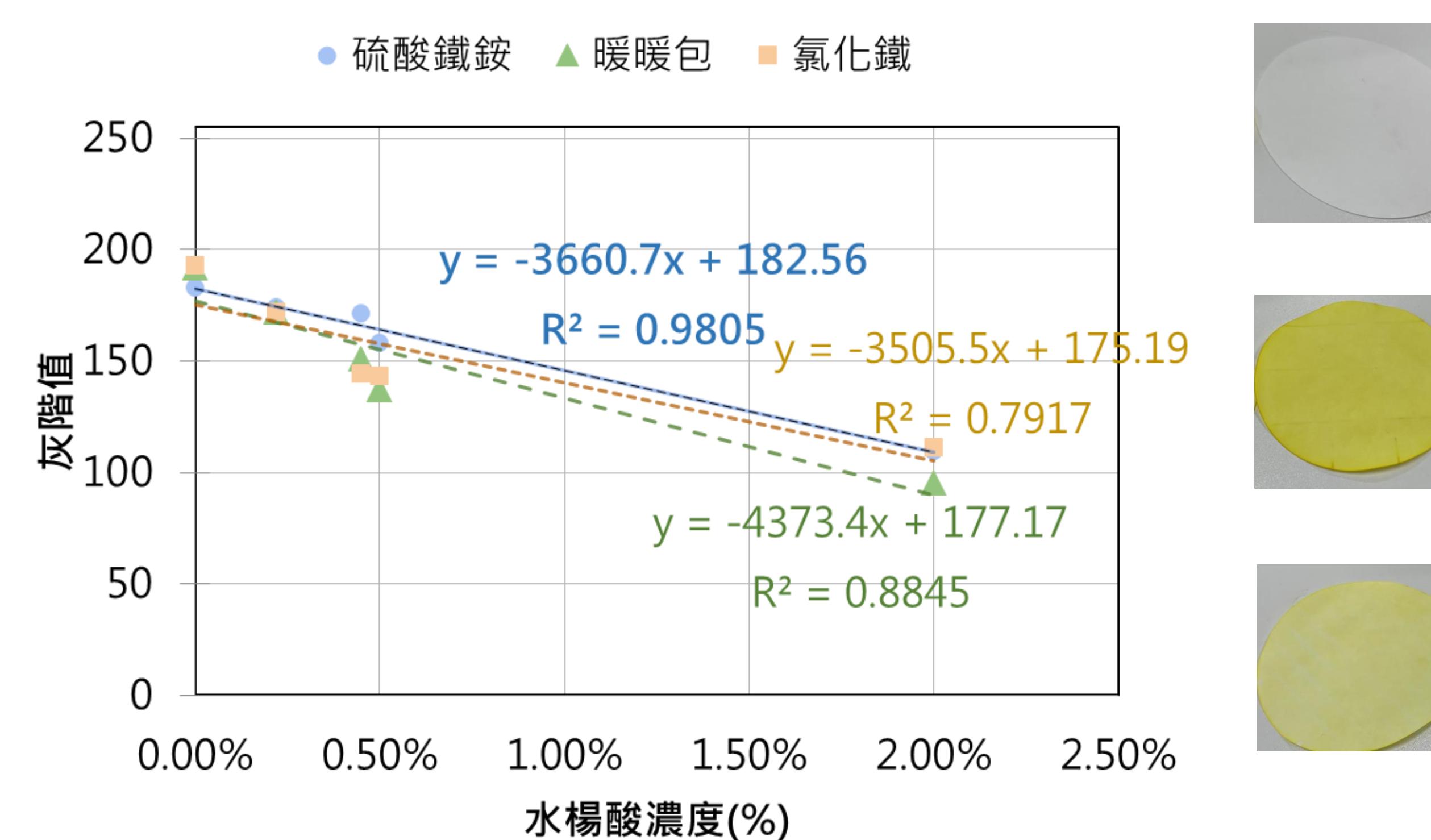
## 6.試紙性質比較與探討



顯色度(顯色能力)：黃色試紙>白色試紙



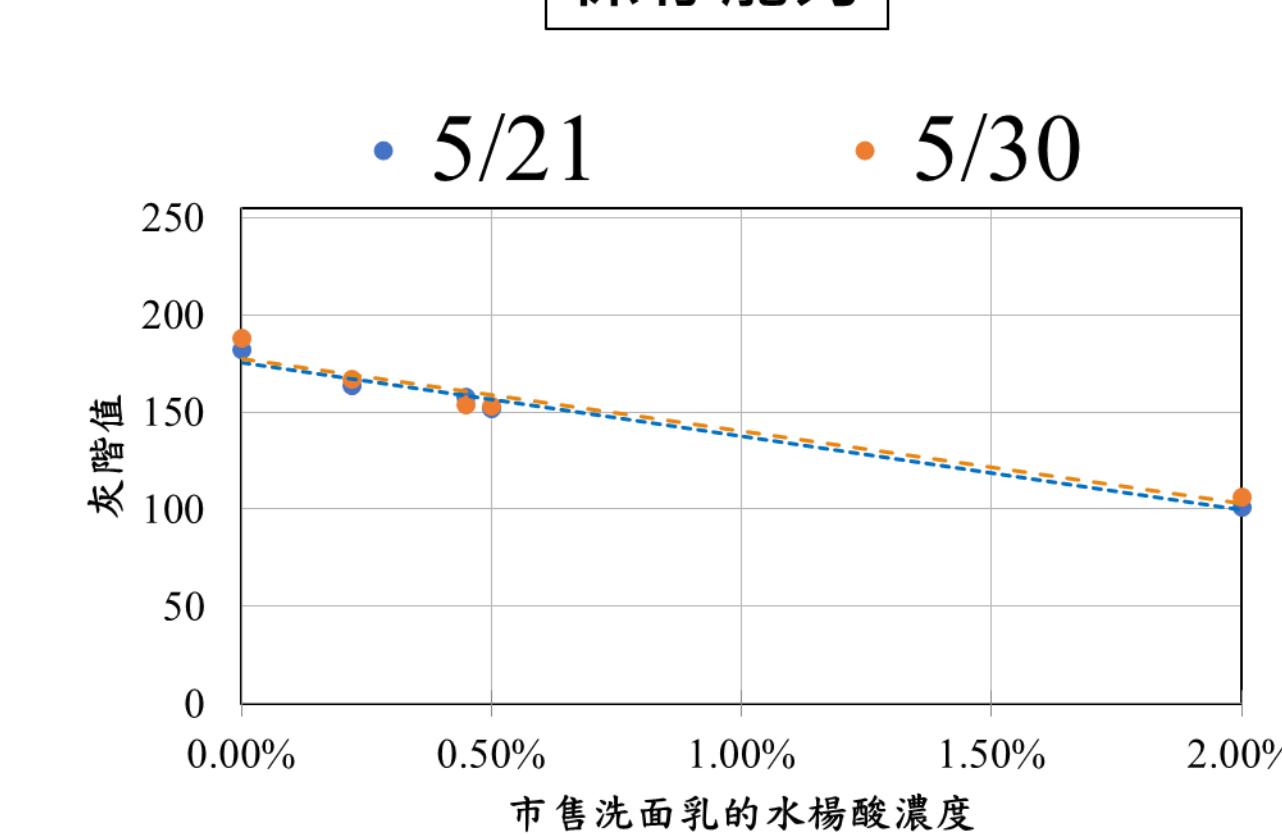
色效性(褪色現象)：黃色試紙>白色試紙



白色試紙可用於定量；黃色試紙較適合用於半定量

## 7.試紙保存與製作成本

保存能力



【圖】放置9天前後之試紙用於檢測洗面乳的數值

成本

以廢棄暖暖包的氧化鐵來製作：  
廢棄暖暖包\$0

鹽酸\$10/500 mL使用5 mL  $\square$  \$0.01

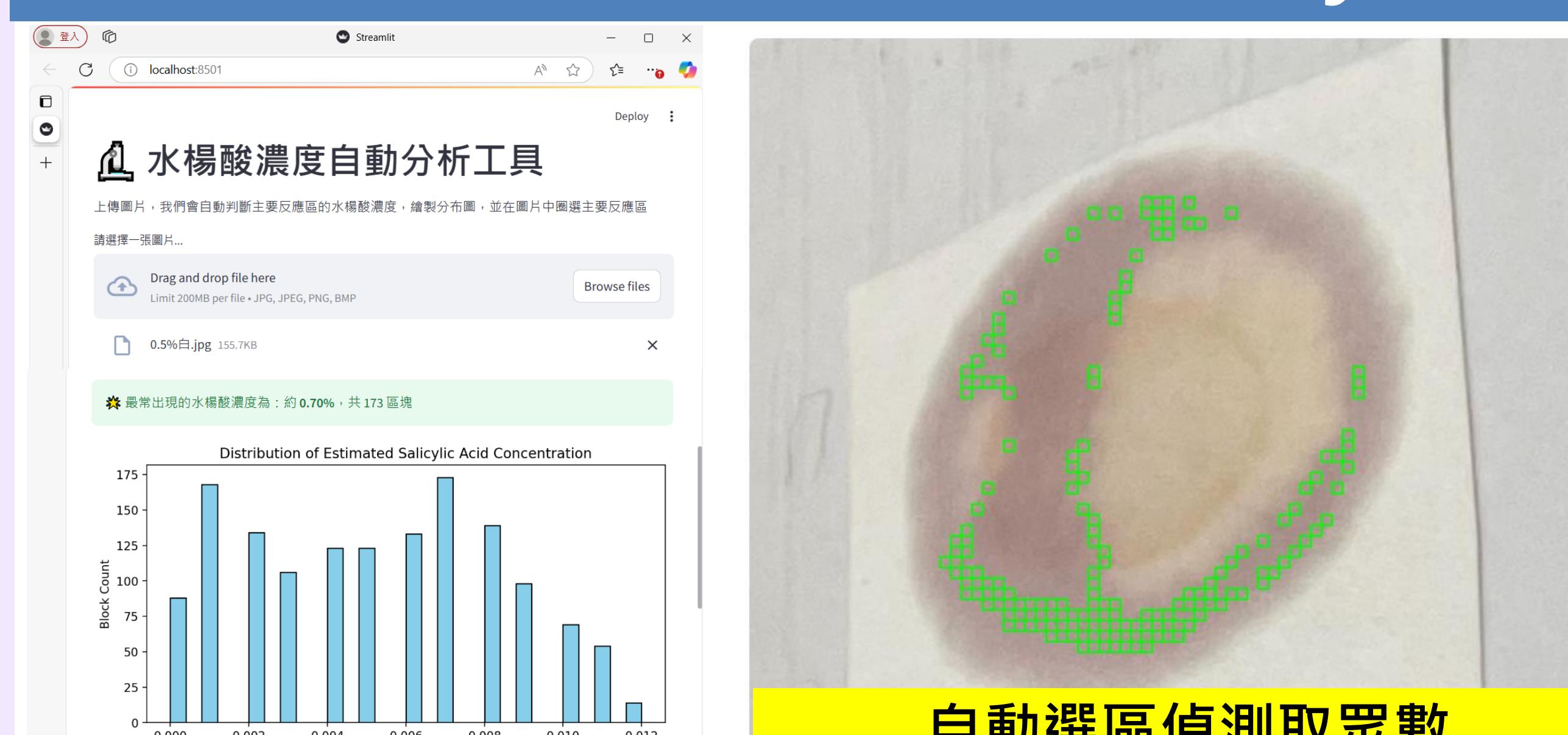
緩衝溶液(三氯乙酸)取1 mL  $\square$  \$0.09

濾紙1張  $\square$  \$2.5

總\$ : \$0.01 + \$2.5 + \$0.09 = 2.6元/張

本研究開發之試紙可存放一週不變質且成本低廉

## 8.檢測套裝工具開發(GPT+Python)



自動選區偵測取眾數

## 陸、結論

1. 本研究建立之水楊酸檢測液配方，標準檢量線達  $R^2=0.999$ ，測量純品之未知水楊酸濃度具有發展潛力，但測量混合物時則容易受到干擾。
2. 暖暖包鐵粉可成功替代試藥級鐵離子，廢棄暖暖包經鹽酸處理可釋出  $Fe^{3+}$ ，取代市售鐵離子，用於居家廉價檢測。
3. 本研究設計之“快篩試紙”存在時間褪色問題，約5-10分鐘內紫色會逐漸消退，建議即時判讀。
4. 試紙顯色轉成RGB、量化灰階值能成功「定量」洗面乳的水楊酸濃度，可突破基質效應的限制。
5. 本研究試紙成本低廉，具有發展潛力。
6. 發展應用程式輔助判讀；開發攜帶式水楊酸檢測套件。