

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 化學科

040213

費先生的堂表兄弟姐妹朋友

學校名稱：國立花蓮高級中學

作者： 高二 王耀增 高二 李維則 高二 霍義仁 高二 江恆真	指導老師： 李俊賢 李俊穎
---	-----------------------------

關鍵詞：Fenton 氧化法、金屬離子、碘光度法

費先生的堂表兄弟姊妹朋友

壹、摘要

Fenton 反應是雙氧水被亞鐵離子催化產生自由基的過程，藉自由基強烈的氧化能力，可氧化許多有機物，常用於處理工業污染物。本實驗試著找出是否有其他金屬離子能引起類似 Fenton 反應(Fenton-like)的效果，藉由環境染料在光譜儀中測量其吸收度，如果染料氧化在特定波長下吸收度會改變，想藉此量測金屬離子催化雙氧水產生自由基的情形。但實驗中發現金屬離子可能與染料發生反應。所以我們再使用碘光度法：碘離子被氧化成碘分子並於水中生成三碘離子，使溶液呈黃色，並藉特定波長吸收度上升多寡或氧化速率來量測金屬離子催化雙氧水產生自由基的效果。最後發現在 pH = 7 中鈦離子(IV)及鋁離子有比亞鐵離子更強的催化能力。

貳、研究動機

在工業發達的現代社會中，污染物繁多，且極需處理。我們搜尋有關污染物的處理方法，發現了一種叫做 Fenton 反應，屬於高級氧化程序(Advanced Oxidation Process)中的一個分支。Fenton 反應可處理大多數污染物。Fenton 氧化法專指亞鐵離子催化雙氧水，但我們盼望是否能以簡單方法找出是否尚有其他金屬離子能有類似的催化效果(Fenton-like reagent)。

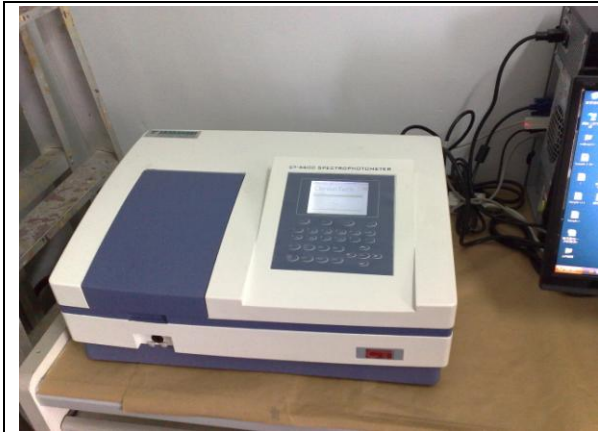
參、研究目的

- 一、探討染料被氧化的情形。
- 二、使用染料溶液吸收度法尋找類 Fenton 反應。
- 三、探討碘離子被氧化的情形。
- 四、使用碘光度法探討類 Fenton 反應。
- 五、找出特定環境中，哪些金屬離子能催化雙氧水產生類 Fenton 反應。

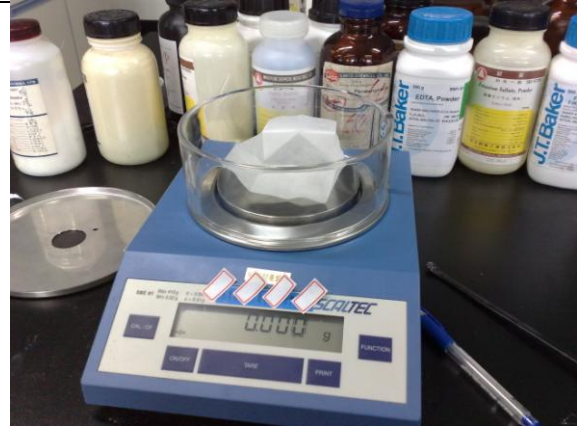
肆、研究設備及器材

藥品：雙氧水、硫酸鈉、硫酸鉀、硫酸鎳(II)、硫酸銅(II)、硫酸鋅、硫酸亞鐵、硫酸鐵(III)、硫酸錳(II)、硫酸鋁、硫酸鈦(IV)、硫酸鉻(III)、硫酸鈷(II)、硫酸、氫氧化鈉、桃紅染料(ACID DYE)、蒸餾水、碘化鉀、磷酸鹽緩衝液(pH = 3、7)。

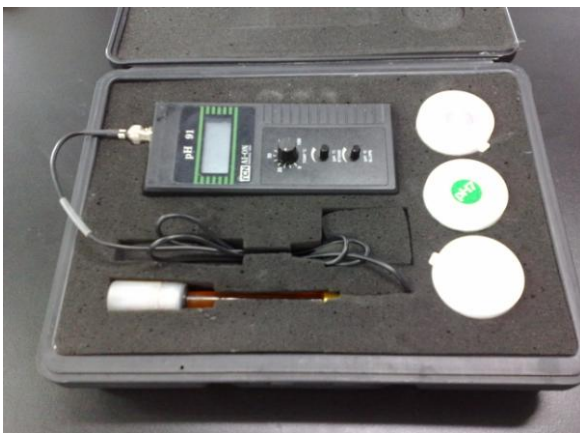
器材：UV 光譜儀(CT5600)、量瓶(100 ml)、燒杯(100 ml)、吸量管(10 ml)、安全吸球、微量吸管(10~100 μ l、100~1000 μ l)、滴管、塑膠瓶、玻璃樣品槽、拭鏡紙、電子天平、pH 計。



UV 光譜儀



電子天平



pH 計



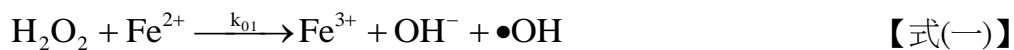
微量吸管

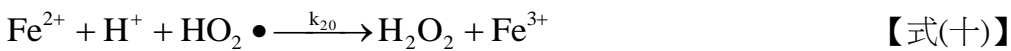
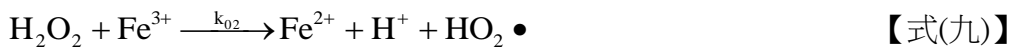
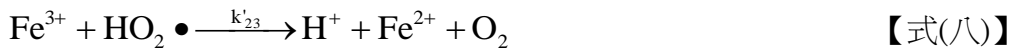
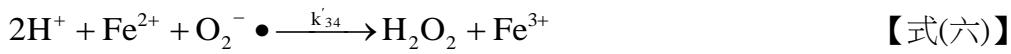
伍、研究過程及方法

一、文獻探討⁽³⁾

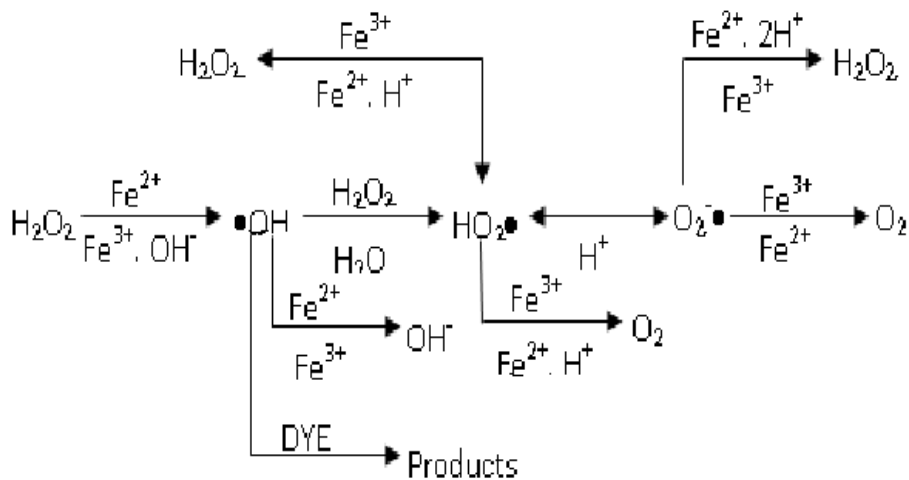
高級氧化處理程序(Advanced Oxidation Process, AOPs)為廢水處理程序之一，其氧化反應時，溶液中產生氫氧自由基(Hydroxyl Radical) (·OH) 等活性中間體，氫氧自由基具有未配對電子，故具有超強的氧化能力(標準還原電位為 2.33V)⁽¹⁾，由自由基的強氧化能力來分解目標污染物或其中間污染物。

Fenton 反應機構經過整理如下⁽³⁾：





Fenton 反應機制改寫成如下的反應網路⁽³⁾：



另一種和 Fenton 反應類似的 Fenton-like 反應，是以其他金屬離子來替代亞鐵離子，進行氫氧自由基的研究，此等氧化試劑被統稱為類 Fenton 反應(Fenton-like reagent)，其氧化機構與 Fenton 反應類似⁽³⁾。亦為我們的實驗主軸。其反應通式可寫成如下⁽¹⁰⁾：



二、 實驗步驟

(一)實驗一：觀察染料溶液濃度與吸收度的關係。

1. 以蒸餾水在 550 nm 吸收波長做空白校正(Blank)。
2. 取 100 ppm 的染料溶液稀釋成 50 及 25 ppm。
3. 分別取出染料溶液於玻璃樣品槽。
4. 於光譜儀中偵測其在 550 nm 的吸收度。

(二)實驗二：觀察同濃度桃紅染料溶液在不同 pH 值下的吸收度。

1. 同實驗一步驟 1。
2. 取 1000 ppm 染料溶液 10 ml 於燒杯中。
3. 使用硫酸溶液及氫氧化鈉溶液調整成 pH = 3，並加入蒸餾水將溶液加至 91 ml。
4. 取出 2.73 ml 步驟 3 的溶液於玻璃樣品槽中。
5. 步驟 4 溶液加入 0.27 ml 的蒸餾水。
6. 於光譜儀中以 550 nm 偵測各時段的吸收度。
7. 重複上述步驟 1 ~ 5，改變步驟 3 的 pH = 7 及 11。

(三)實驗三：觀察雙氧水在不同 pH 值下對染料作用的情形。

1. 同實驗二步驟 1 ~ 4。
2. 步驟 1 配置好溶液加入 0.18 ml 的蒸餾水。
3. 加入 0.09 ml 的雙氧水於玻璃樣品槽中，於光譜儀中以 550 nm 偵測各時段的吸收度。
4. 重複上述步驟 1 ~ 3，改變步驟 1 的染料 pH = 7 及 11。

(四)實驗四：觀察在不同 pH 值下於染料中進行 Fenton 反應的反應情形。

1. 同實驗二步驟 1 ~ 4。
2. 同時加入 0.09 ml 的雙氧水及 0.18 ml 的 10^2 M 硫酸亞鐵溶液於玻璃樣品槽中，於光譜儀中以 550 nm 偵測各時段的吸收度。
3. 重複上述步驟 1 ~ 2，改變步驟 1 的染料溶液的 pH = 7 及 11。

(五)實驗五：觀察雙氧水及不同種類的金屬硫酸鹽類，在不同 pH 值下與染料的反應情形。

1. 同實驗二步驟 1 ~ 4。
2. 同實驗四步驟 2。
3. 重複上述步驟 1 ~ 2，並改變的染料溶液的 pH = 7 及 11。
4. 重複上述步驟 1 ~ 3，再改變步驟 2 的硫酸亞鐵溶液為硫酸銅、硫酸鎳(II)、硫酸鋅、硫酸錳(II)、硫酸鈦(IV)、硫酸鈷(II)溶液；改變步驟 2 硫酸亞鐵溶液為硫酸鈉、硫酸鉀、硫酸鐵、硫酸鋁、硫酸鉻溶液並改變上述 5 種溶液加入量改為 0.09 ml 且加蒸餾水 0.09 ml。

(六)實驗六：觀察各種金屬離子在不同 pH 值中與染料反應後吸收度。(實驗五對照組)

- 1.同實驗二步驟 1 ~ 4。
- 2.同時加入 0.09 ml 的雙氧水及 0.18 ml 的 10^{-2} M 硫酸亞鐵溶液於玻璃樣品槽中，靜置許久之後觀察溶液顏色。
- 3.重複上述步驟 1 ~ 2，並改變的染料溶液的 pH = 7 及 11。
- 4.重複上述步驟 1 ~ 3，再改變步驟 2 的硫酸亞鐵溶液為硫酸銅、硫酸鎳(II)、硫酸鋅、硫酸錳(II)、硫酸鈦(IV)、硫酸鈷(II)溶液；改變步驟 2 硫酸亞鐵溶液為硫酸鈉、硫酸鉀、硫酸鐵、硫酸鋁、硫酸鉻溶液並改變上述 5 種溶液加入量改為 0.09 ml 加蒸餾水 0.09 ml。

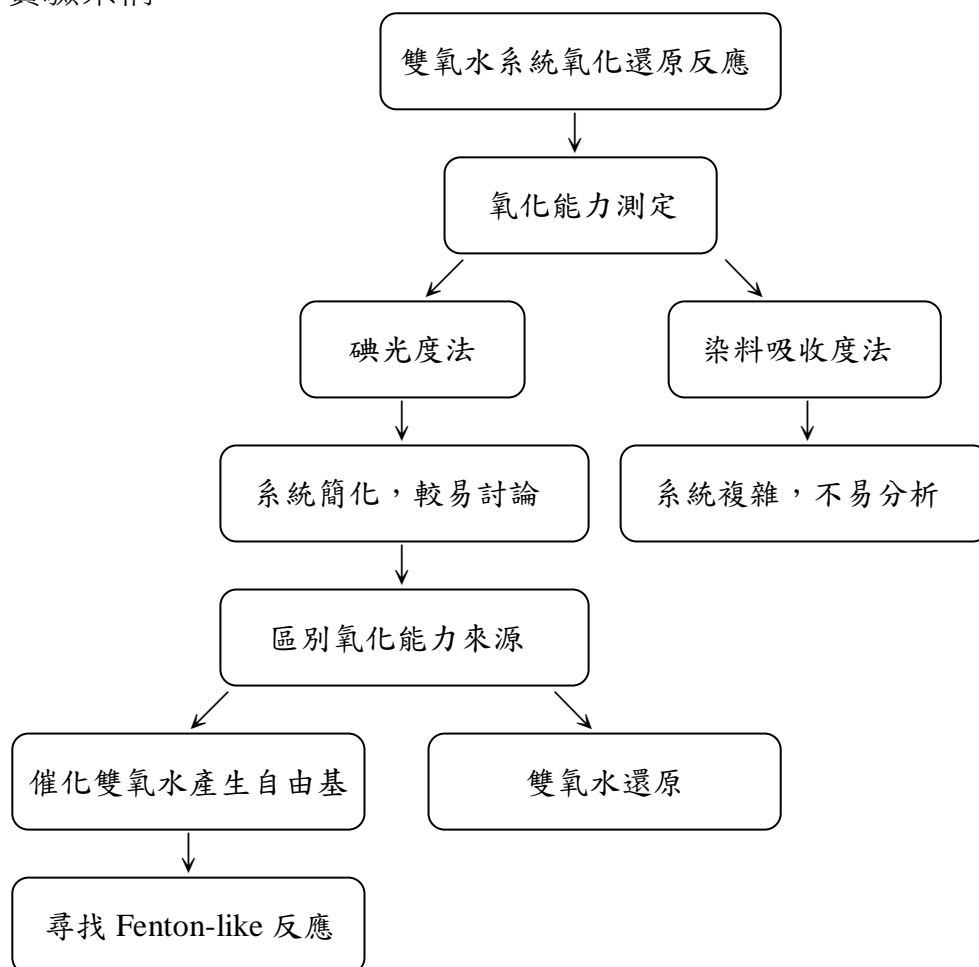
(七)實驗七：觀察雙氧水及不同種類的金屬硫酸鹽類，在 pH = 3 及 7 下與碘化鉀的反應情形。

1. 以 1000 ppm 碘化鉀溶液在 353 nm 吸收波長做空白校正(Blank)。
2. 取 10000 ppm 碘化鉀溶液 10 ml 於燒杯中。
3. 加入蒸餾水將溶液加至 91 ml，再使用少量緩衝溶液調整成 pH = 3。
4. 取出 2.73 ml 步驟 3 的溶液於玻璃樣品槽中。
5. 同時加入 0.09 ml 的雙氧水及 0.18 ml 的 10^{-2} M 硫酸亞鐵溶液於玻璃樣品槽中，於光譜儀中以 353 nm 偵測各時段的吸收度。
6. 重複上述步驟 1 ~ 5，改變步驟 3 的 pH = 7。
7. 重複上述步驟 1 ~ 6，改變步驟 5 的硫酸亞鐵溶液為硫酸銅、硫酸鎳(II)、硫酸鋅(II)、硫酸鈦(IV)、硫酸鈷(II)溶液；改變步驟 5 硫酸亞鐵溶液為硫酸鐵、硫酸鋁、硫酸鉻溶液並改變上述 3 種溶液加入量改為 0.09 ml 加蒸餾水 0.09 ml

(八)實驗八：觀察金屬硫酸鹽類，在 pH = 3 及 7 下和碘化鉀的反應情形。(實驗七對照組)

1. 同實驗七步驟 1~4
2. 加入 0.09 ml 的水及 0.18 ml 的 10^{-2} M 硫酸亞鐵溶液於玻璃樣品槽中，於光譜儀中以 353 nm 偵測各時段的吸收度。
3. 重複上述步驟 1 ~ 2，改變點化鉀溶液 pH = 7。
4. 重複上述步驟 1 ~ 3，改變步驟 2 的硫酸亞鐵溶液為硫酸銅、硫酸鎳(II)、硫酸鋅(II)、硫酸鈦(IV)、硫酸鈷(II)溶液；改變步驟 2 硫酸亞鐵溶液為硫酸鐵、硫酸鋁、硫酸鉻溶液並改變上述 3 種溶液加入量改為 0.09 ml 加蒸餾水 0.09 ml

三、實驗架構



四、實驗環境

於自行測量後，並由文獻做參考，選出適合環境，以便觀察、實驗。

實驗一至實驗八的共通實驗環境：

[金屬離子] = 0.0006 M

[H_2O_2] = 0.0003 M

溫度 20°C

實驗一至實驗六：

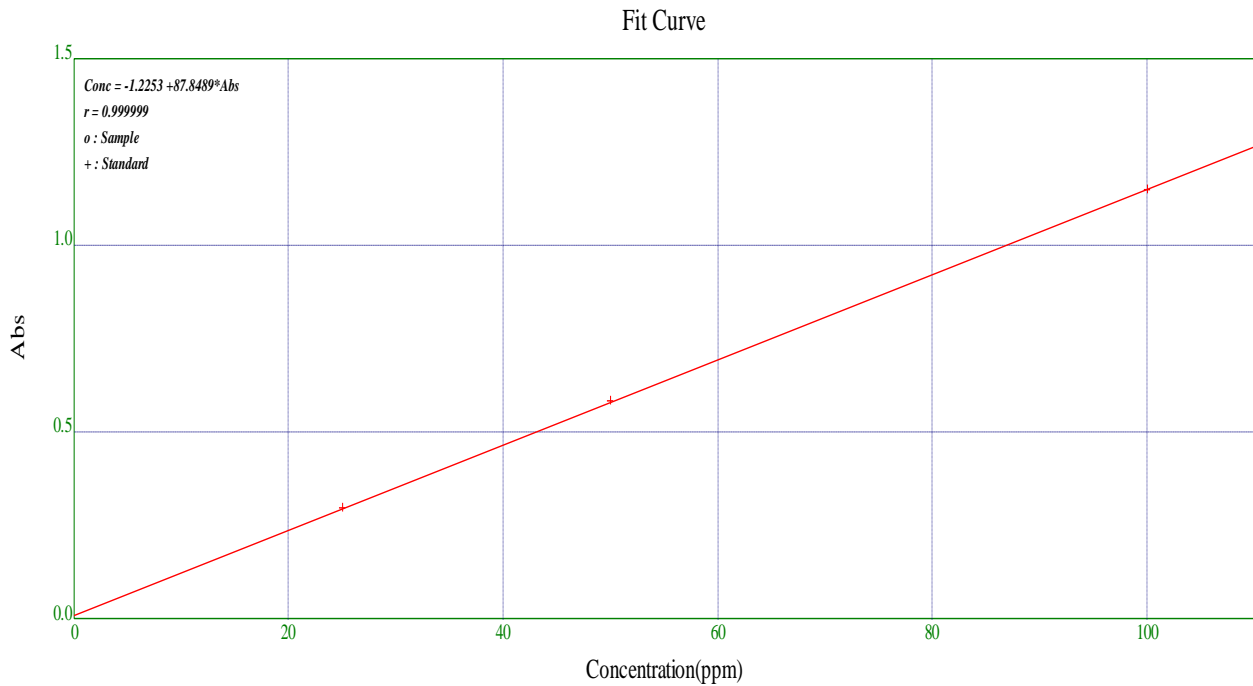
[染料] = 100 ppm，以 550 nm 測量吸收度

實驗七、八：

[KI] = 1000 ppm，以 353 nm 測量吸收度

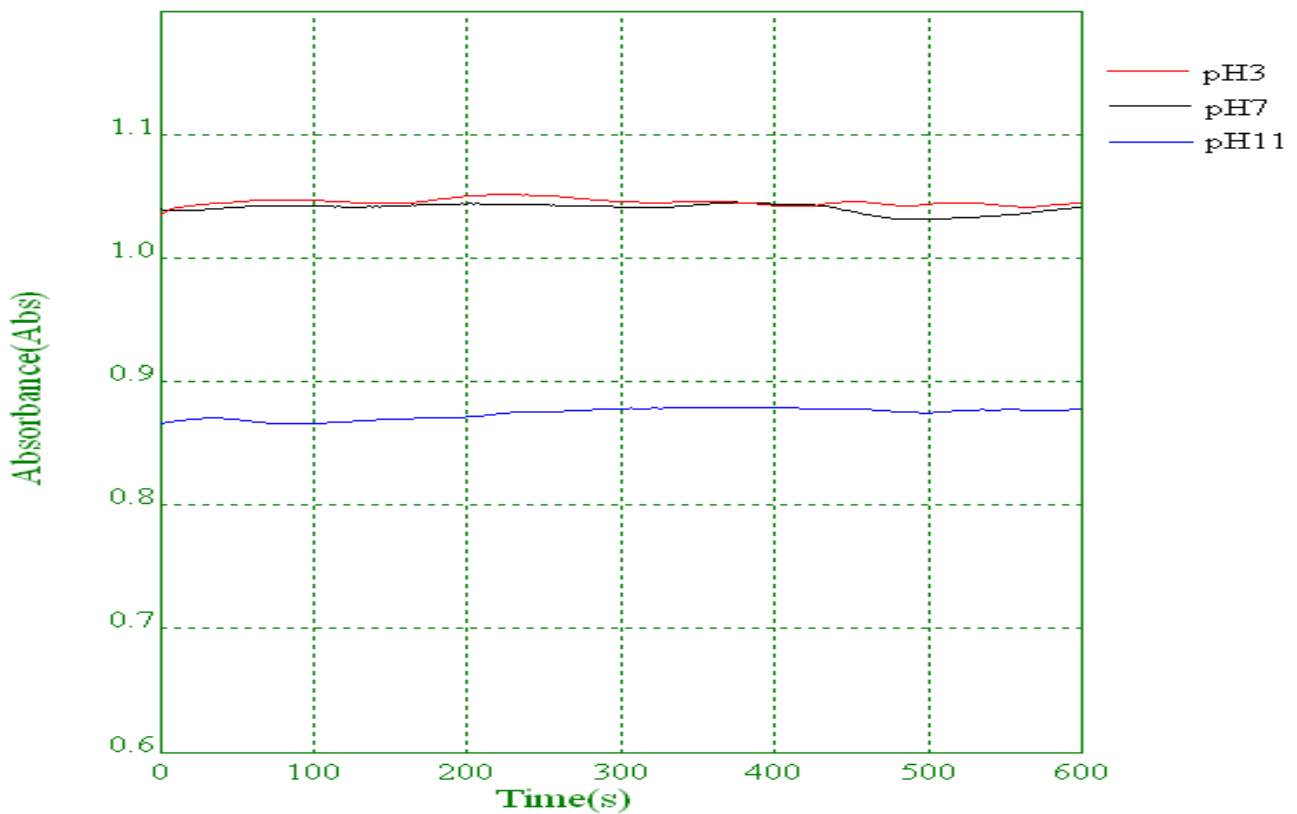
陸、研究結果

一、實驗一：觀察染料溶液濃度和吸收度的關係。



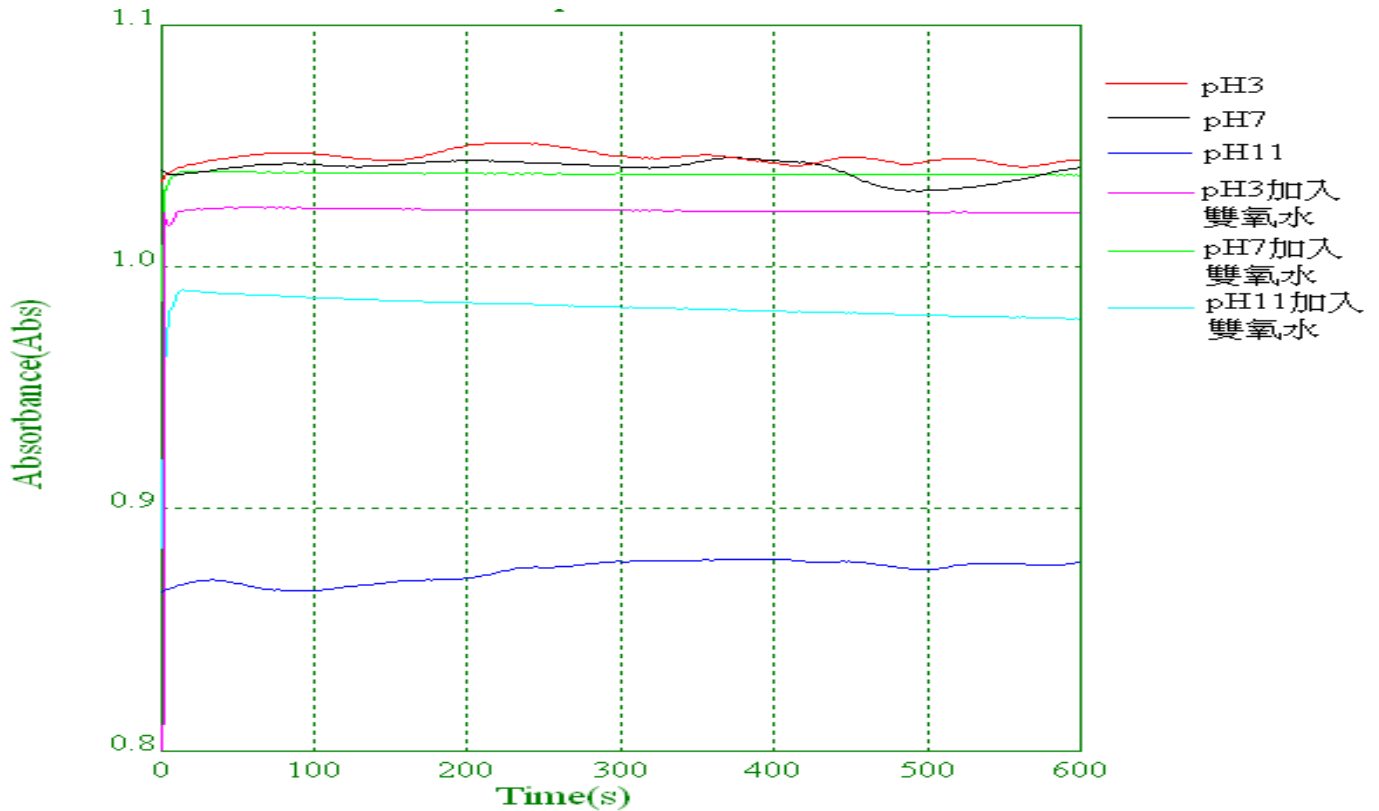
【圖(一)：不同濃度桃紅染料溶液在 550 nm 的吸收度。】

二、實驗二：觀察同濃度桃紅染料溶液在不同 pH 環境下的吸收度。



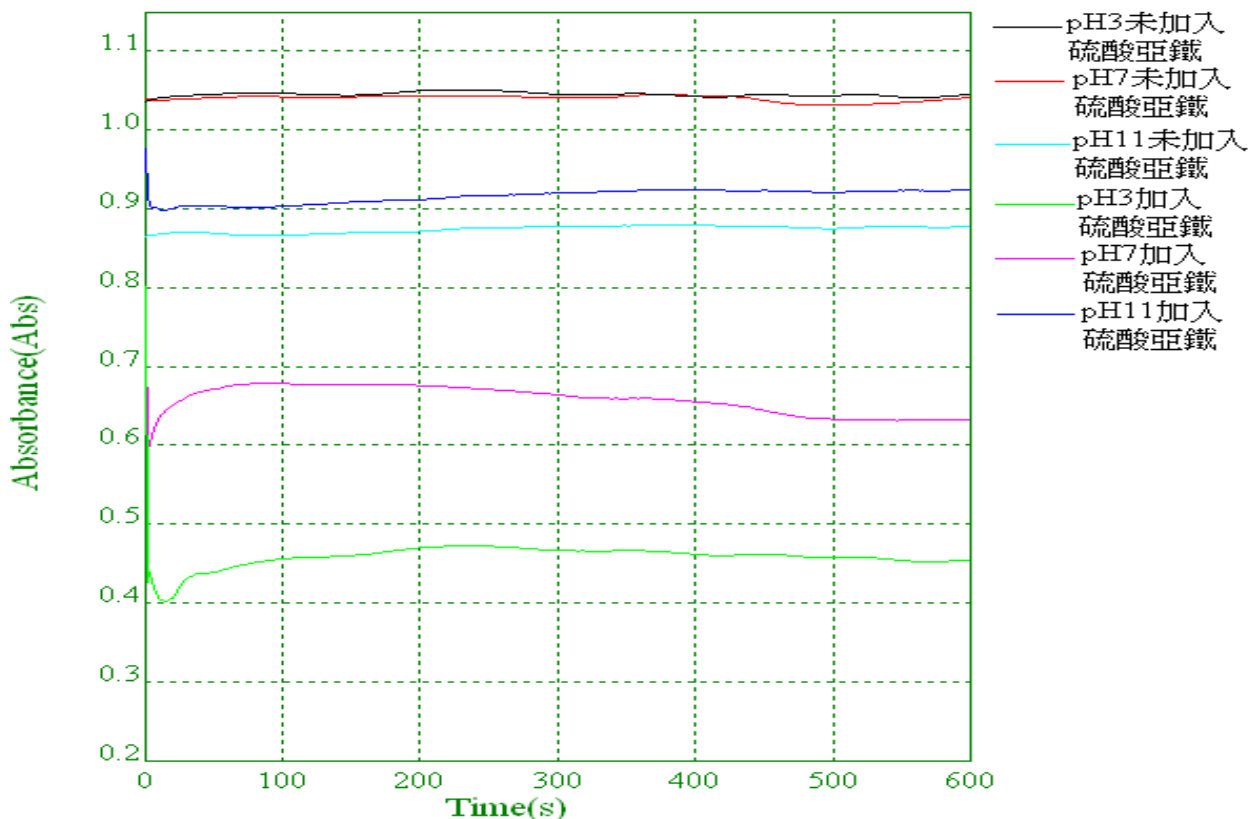
【圖(二)：不同 pH 值環境下桃紅染料溶液在 550 nm 各時段吸收度。】

三、實驗三：觀察雙氧水在不同 pH 值環境下對染料溶液作用的情形。



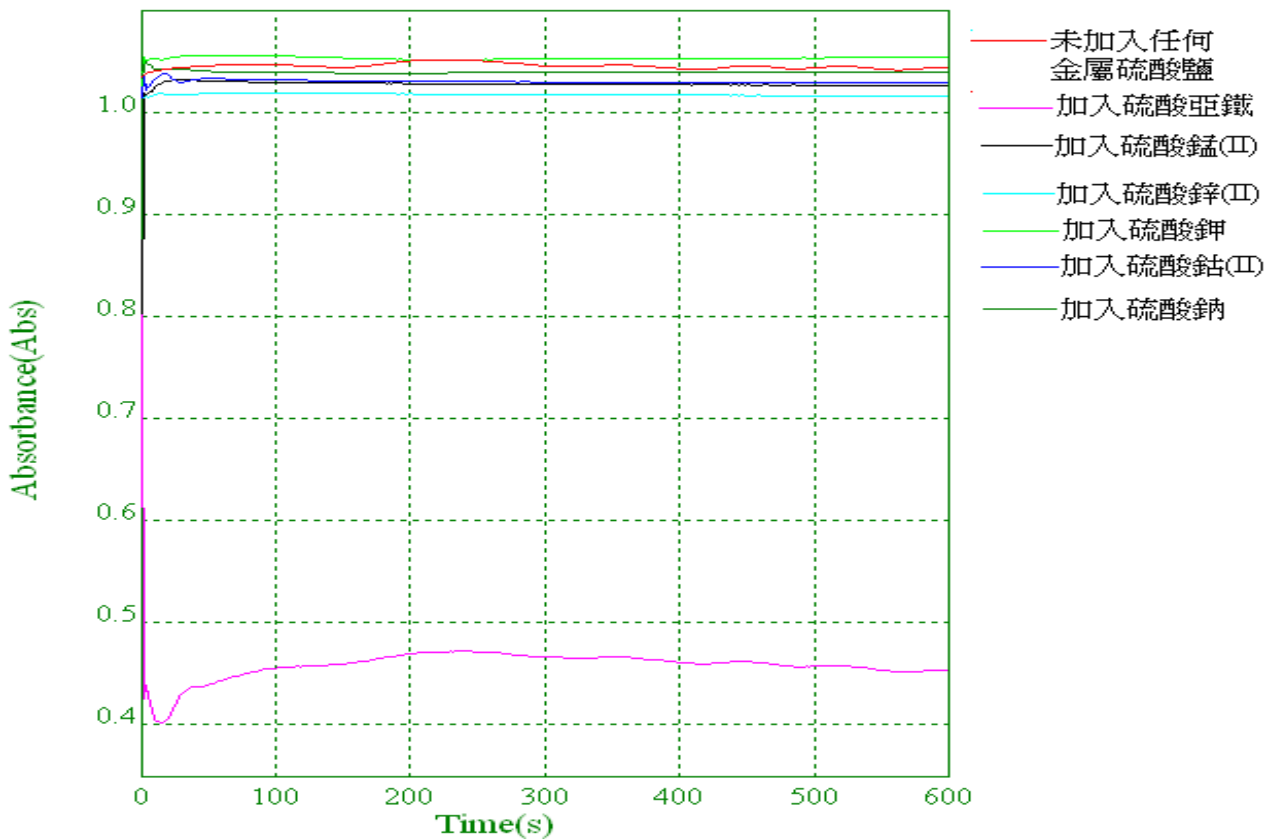
【圖(三)：雙氧水在不同 pH 值下對染料溶液的作用情形於 550 nm 各時段吸收度】

四、實驗四：觀察在不同 pH 值環境下於染料溶液中進行 Fenton 反應的情形。

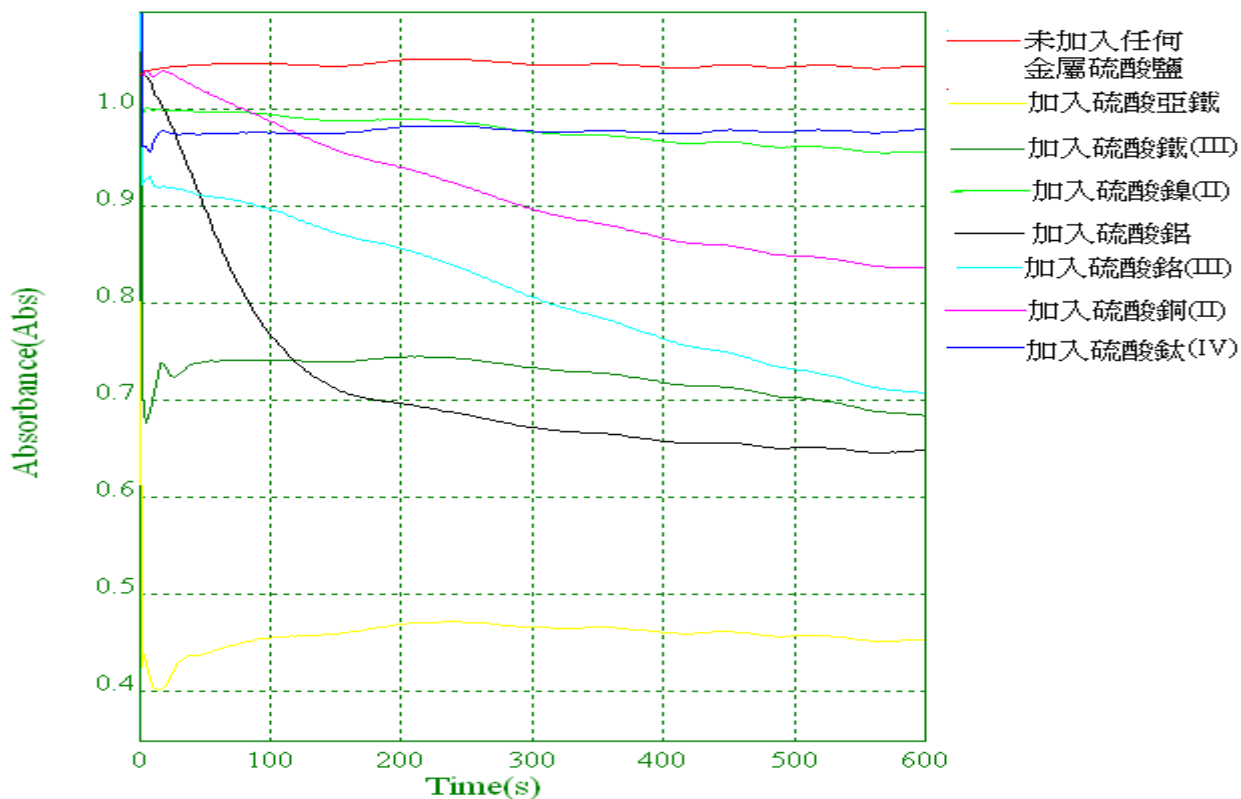


【圖(四)：不同 pH 值下於染料溶液中進行 Fenton 反應在 550 nm 各時段吸收度】

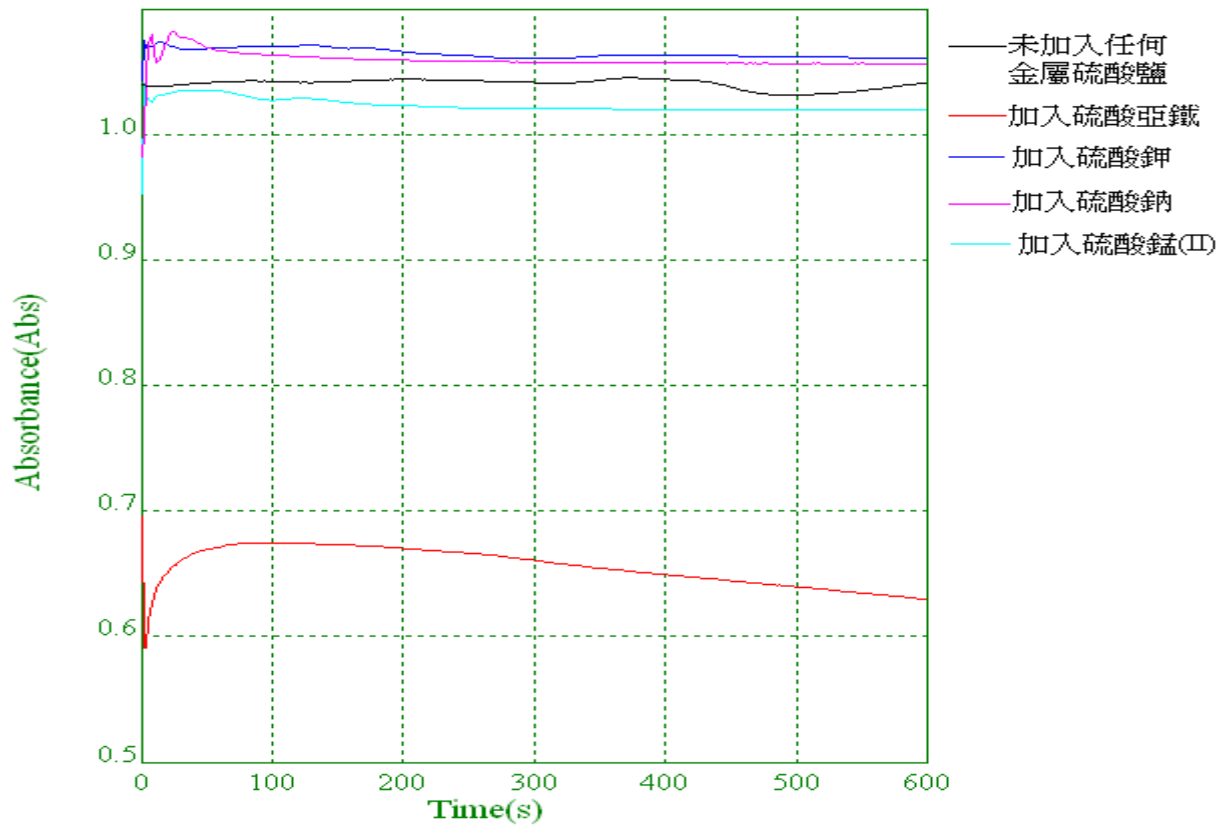
五、實驗五：觀察雙氧水及不同種類的金屬硫酸鹽類，在不同 pH 值環境下和染料溶液的反應情形。



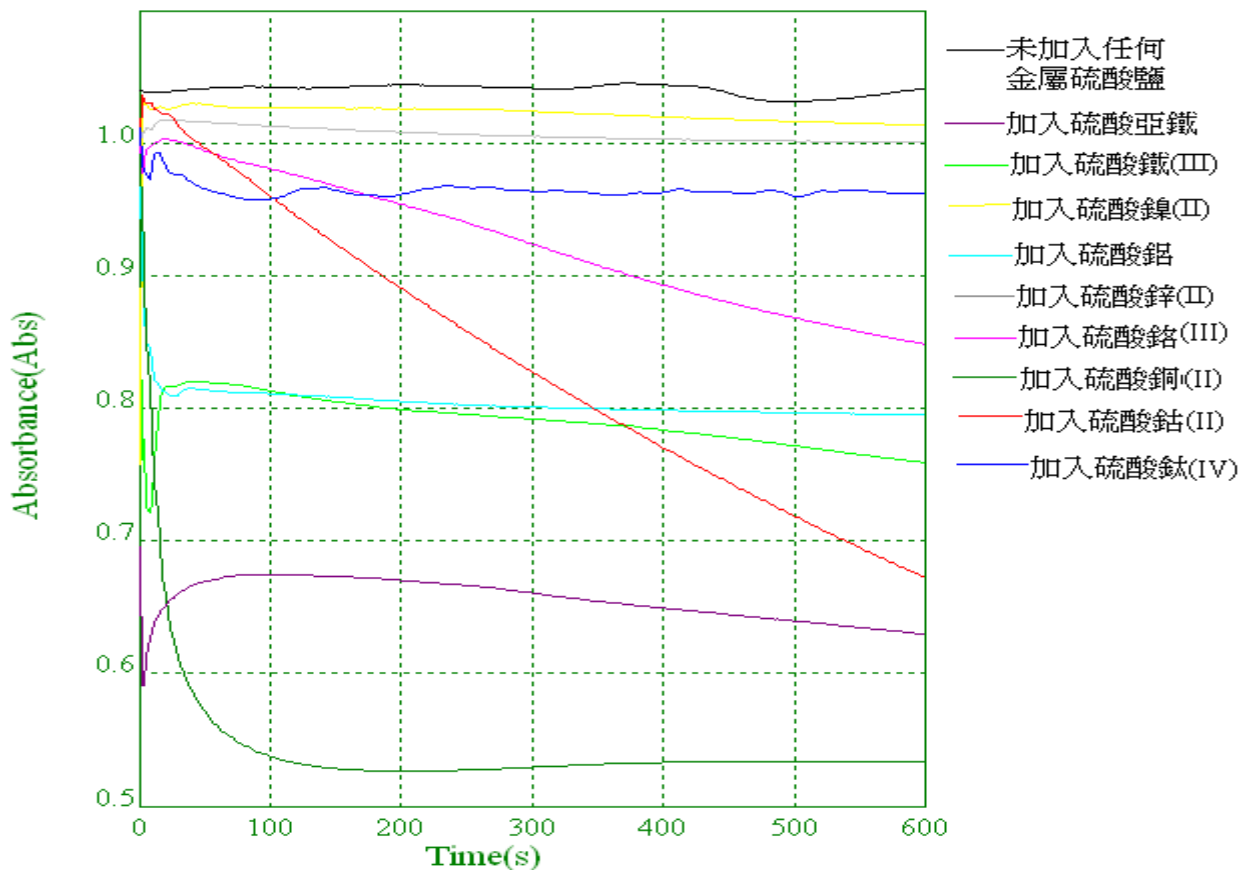
【圖(五)：pH = 3 下雙氧水與較無使吸收度下降的金屬硫酸鹽和染料溶液在 550 nm 下各時段吸收度】



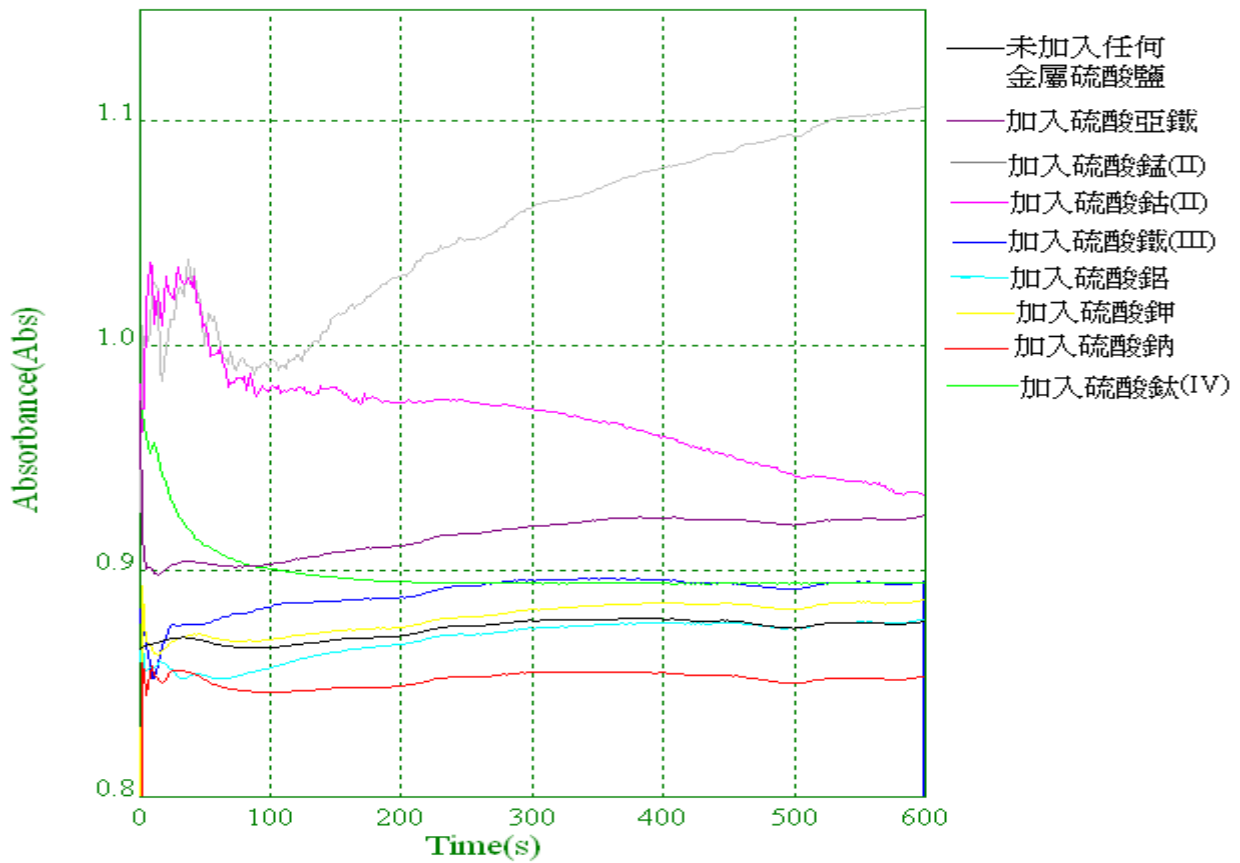
【圖(六)：pH = 3 下雙氧水與有使吸收度下降的金屬硫酸鹽和染料溶液在 550 nm 下各時段吸收度】



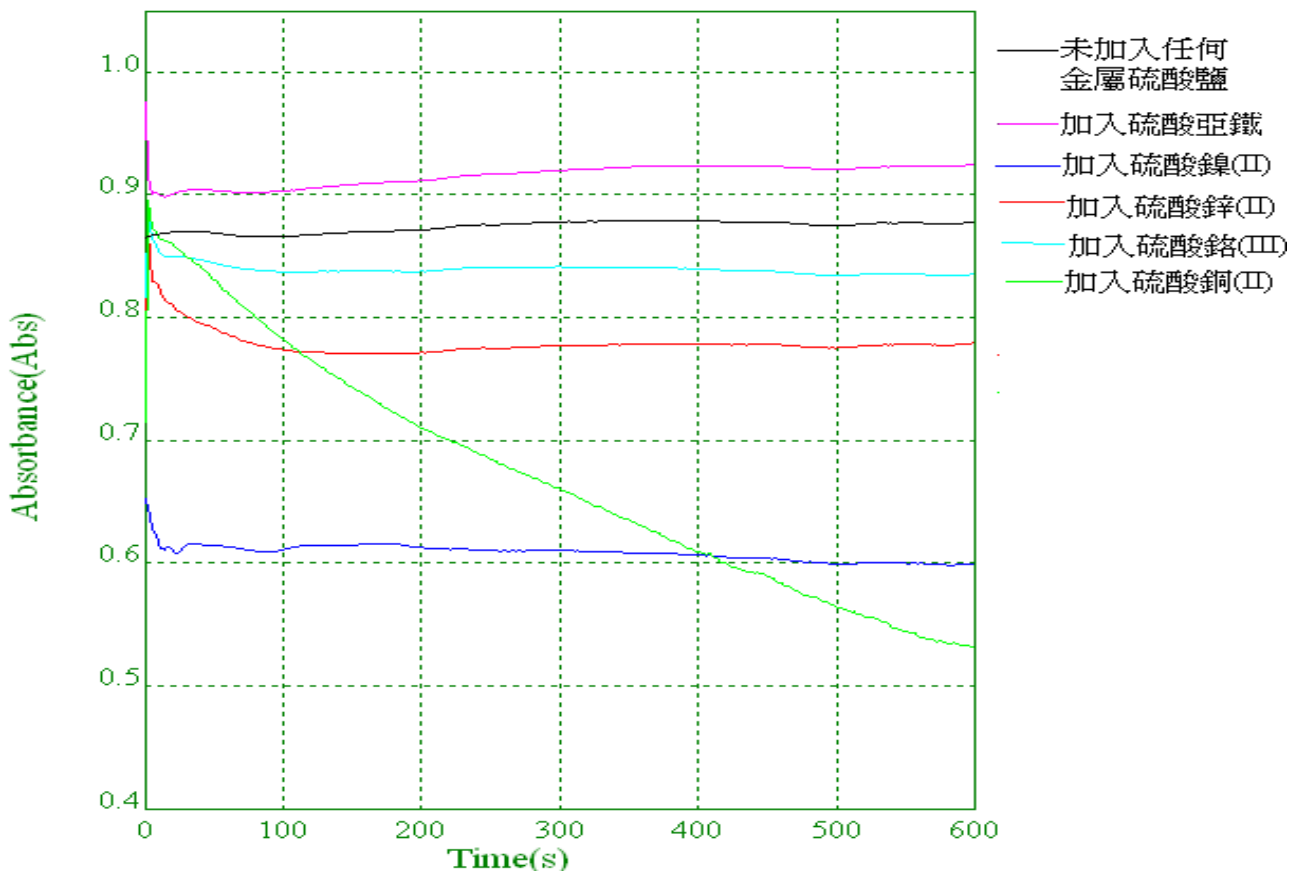
【圖(七)：pH = 7 下雙氧水與無使吸收度下降的金屬硫酸鹽和染料溶液在 550 nm 下各時段吸收度】



【圖(八)：pH = 7 下雙氧水與有使吸收度下降的金屬硫酸鹽和染料溶液在 550 nm 下各時段吸收度】

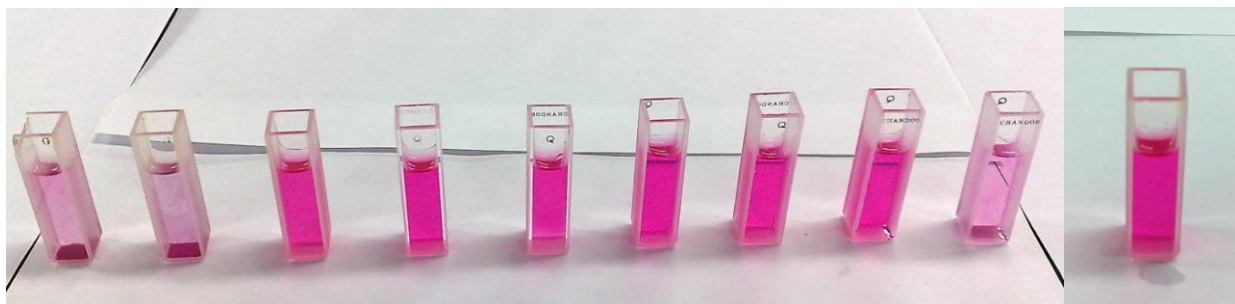


【圖(九)：pH = 11 下雙氧水與較無使吸收度下降的金屬硫酸鹽和染料溶液在 550 nm 下各時段吸收度】

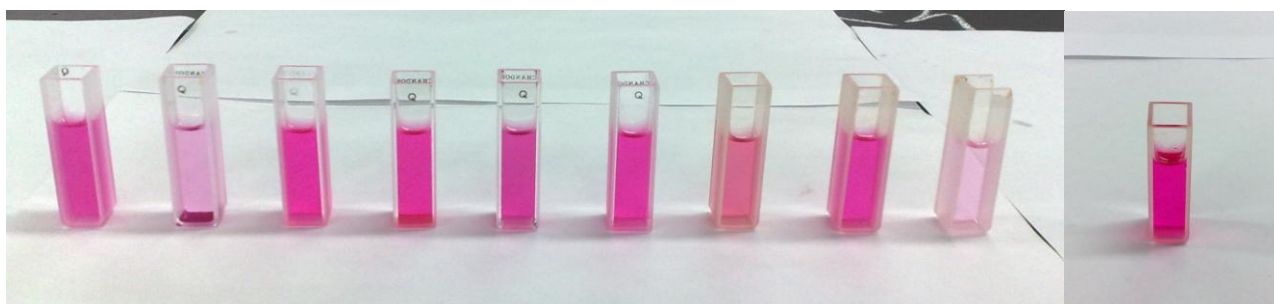


【圖(十)：pH = 11 下雙氧水與有使吸收度下降的金屬硫酸鹽和染料溶液在 550 nm 下各時段吸收度】

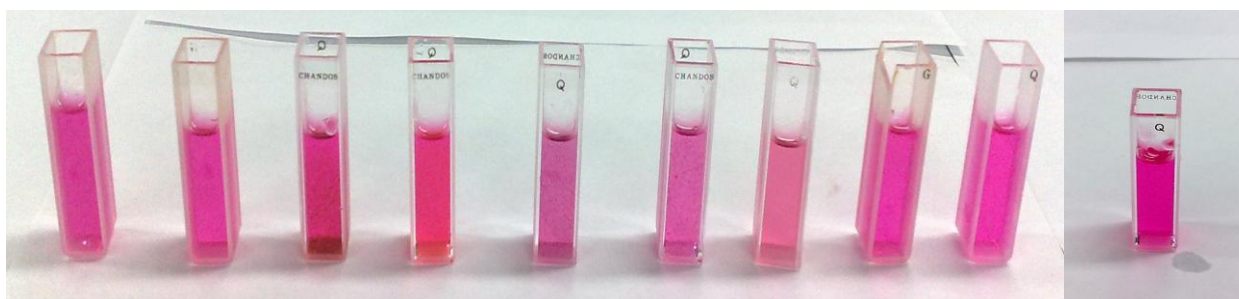
六、實驗六：觀察各種金屬離子在不同 pH 值環境下與染料溶液反應顏色。



【圖(十一)：染料溶液 pH = 3 ，由左至右分別加入 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Al^{3+} 、未加入金屬離子】

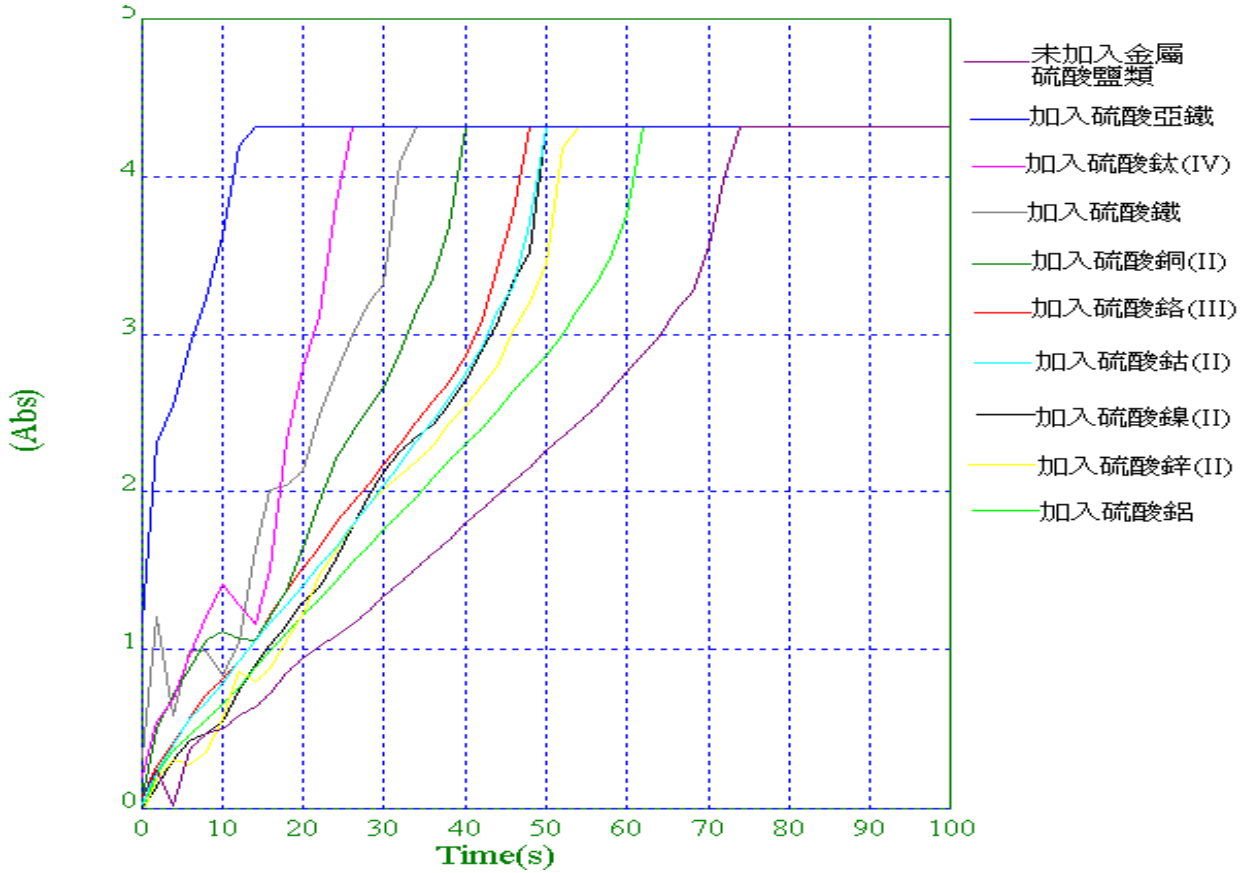


【圖(十二)：染料溶液 pH = 7 ，由左至右分別加入 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Al^{3+} 、未加入金屬離子】

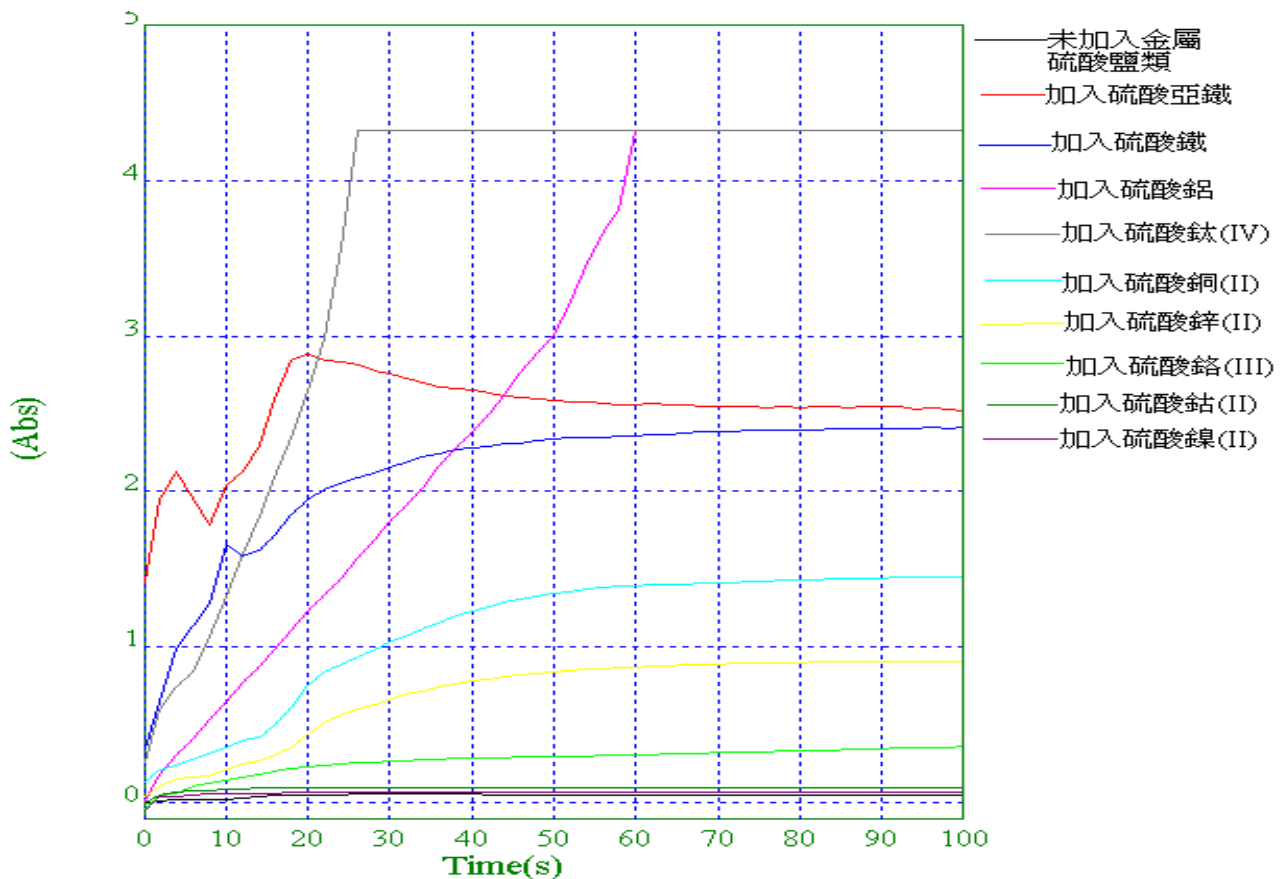


【圖(十三)：染料溶液 pH = 11 ，由左至右分別加入 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Al^{3+} 、未加入金屬離子】

七、實驗七：觀察雙氧水及不同種類的金屬硫酸鹽類，在 pH 值 3 及 7 下和碘化鉀的反應情形。

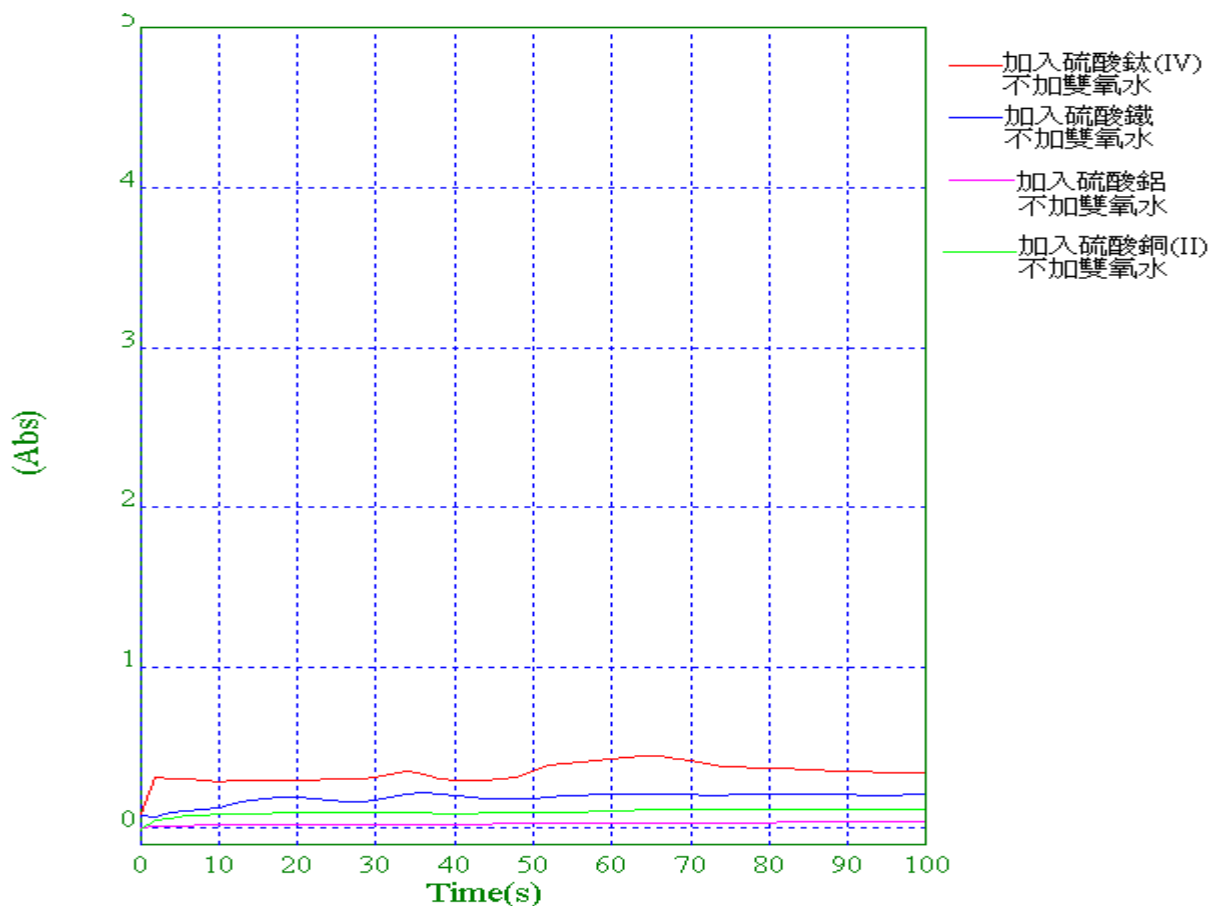


【圖(十四)：pH = 3 下雙氧水與金屬硫酸鹽和碘化鉀溶液在 353 nm 下各時段吸收度】

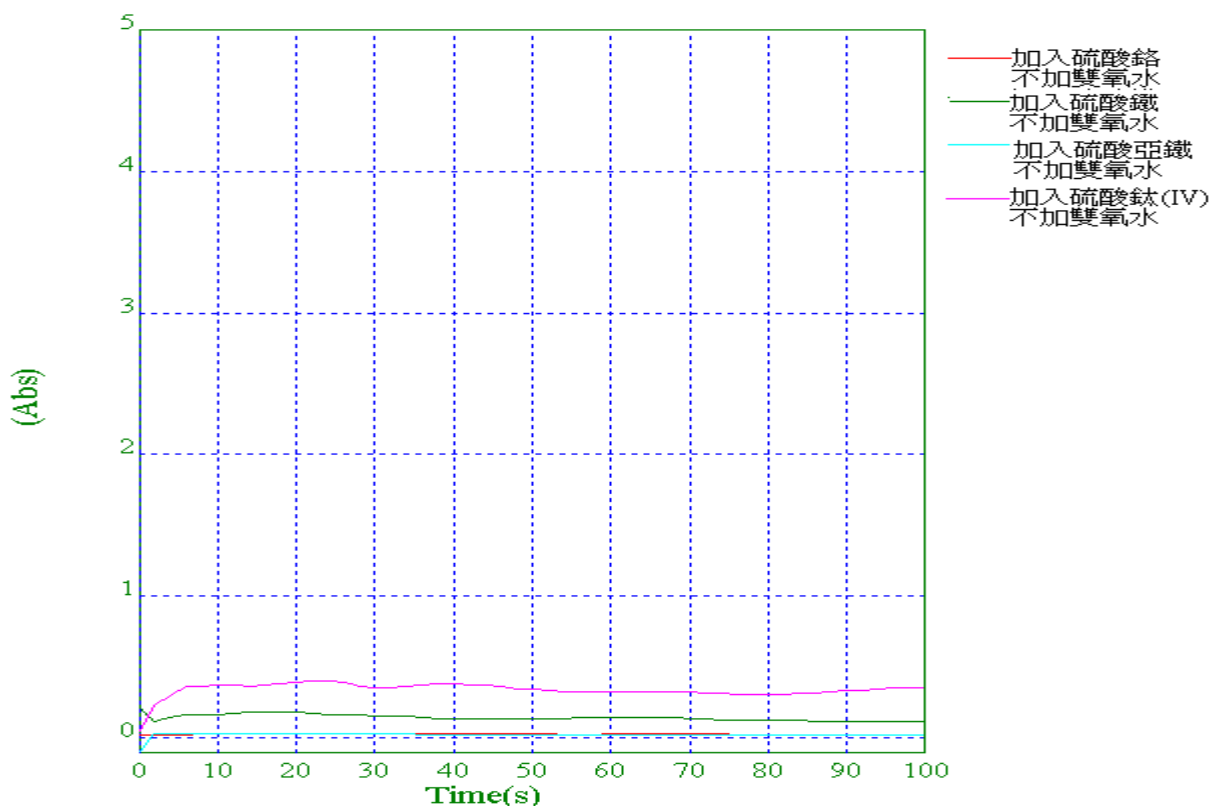


【圖(十五)：pH = 7 下雙氧水與金屬硫酸鹽和碘化鉀溶液在 353 nm 下各時段吸收度】

八、實驗八：觀察金屬硫酸鹽類，在 pH 值 3 及 7 下和碘化鉀的反應情形。(實驗七對照組)



【圖(十六)：pH = 3 下金屬硫酸鹽和碘化鉀溶液反應在 353 nm 下各時段吸收度】



【圖(十七)：pH = 7 下金屬硫酸鹽和碘化鉀溶液反應在 353 nm 下各時段吸收度】

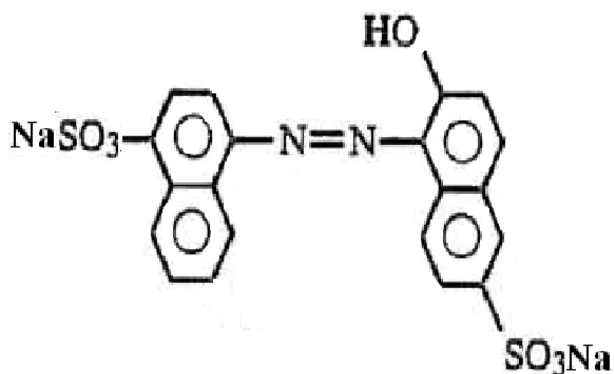
柒、討論

一、實驗一：觀察染料溶液濃度和吸收度的關係。

於最大吸收度下進行實驗量測，可降低其他物質的影響進一步降低誤差。實驗一得知染料吸收度正比於染料濃度，故報告中使用吸收度變化來代表濃度變化。染料吸收度下降愈多，初步判斷是染料含量改變愈多。

二、實驗二：觀察同濃度桃紅染料溶液在不同 pH 環境下的顏色。

實驗二發現同濃度的桃紅染料溶液【圖(十八)】在不同 pH 值環境，有不同吸收度，推測跟其它染料被當成酸鹼指示劑原因類似：染料有酸鹼型式。酸鹼環境改變使染料各型式含量不同，平衡後即為在 550 nm 下吸收度。由於各 pH 值環境的染料吸收度不同，故後續實驗使用相對 pH 值染料溶液吸收度做對照。



【圖(十八)、桃紅染料結構】

三、實驗三：觀察雙氧水在不同 pH 值環境下對染料溶液作用的情形。

實驗三發現雙氧水在酸性有較好氧化力，中性次之，鹼性環境甚至吸收度上升。因雙氧水在酸性環境下較穩定存在⁽⁷⁾，不易自身氧化還原，故氧化力較強。鹼性中吸收度上升，推測是雙氧水在鹼性環境下自身氧化還原【式(十四)】，使 pH 值下降，讓染料酸型式增加，由實驗二得知染料酸型式吸收度較高。我們也量測鹼性環境的染料溶液加入雙氧水後的 pH 值從 11.03 降為 9.73，符合推論。由於雙氧水加入會使得染料溶液吸收度改變，故後續實驗皆已扣除此影響。且由實驗三得知：雙氧水一般情況下，氧化力不足以將染料氧化。



四、實驗四：觀察在不同 pH 值環境下於染料溶液中進行 Fenton 反應的情形。

(一) 文獻中提到，pH = 11 時，雙氧水氧化力不強，且反應情形是數秒內分解少許染料後，便沒有明顯的分解情況產生，是因雙氧水在 pH 值 > 10 的環境中會自身氧化還原⁽³⁾，使得亞鐵離子催化的雙氧水量變少，自由基產生也減少，氧化力不強。pH = 7 時有明顯氧化效果出現，但 pH = 3 時有最好氧化效果，原因是因為當環境的 pH 值 > 4 時，氫氧自由基產生量就會漸漸減少⁽³⁾，而且 pH 值 > 4.6 時，亞鐵離子會以極快速率變成鐵離子，且鐵離子變成氫氧化鐵沉澱離開系統【式(十五)】⁽³⁾。由【圖(四)】知 pH = 3 及 7 中，Fenton 反應在短時間內吸收度有大幅下降，亦為文獻探討中提到產生氫氧自由基的情形。



(二) 由實驗三和四得知，一般情況下雙氧水的氧化力不足以將染料氧化，而在 Fenton 反應中才能氧化染料。Fenton 反應中會產生自由基，推論有產生自由基才能使染料氧化，故後續實驗若有染料被氧化情形發生(吸收度下降)，初步推斷有產生自由基。

五、實驗五：觀察雙氧水及不同種類的金屬硫酸鹽類，在不同 pH 值環境下和染料溶液的反應情形。

(一) 由實驗五得知 IA 族金屬離子皆不發生類 Fenton 反應。根據【式(十二)】及【式(十三)】，金屬離子催化雙氧水產生自由基皆有此規律：催化過程中金屬離子價數可增加或是減少，同於金屬離子的游離能較低或擁有空軌域且電子親和力大。且若還原電位介於 0.695~1.776 V 之間則較有可能催化雙氧水⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。所以 IA 族金屬較不易發生類 Fenton 反應，而過渡金屬則較容易發生。

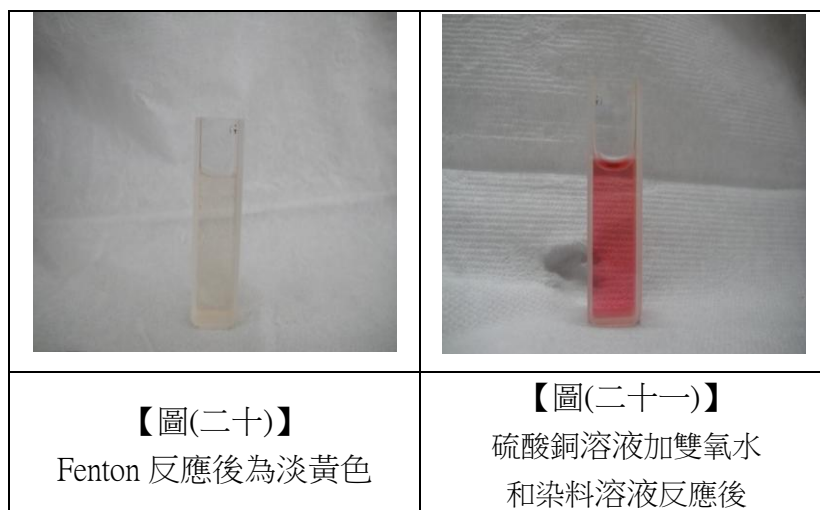
(二) 由討論四(一)得知其他金屬離子要有使吸收度瞬間大幅下降的情形，推測反應才可能為發生類 Fenton 反應。pH = 3 時，鐵離子、鎳離子(II)、鉻離子(III)、鈦離子(IV)；pH = 7 時，鐵離子、鎳離子(II)、鋁離子、鋅離子、銅離子(II)、鈦離子(IV)；pH = 11 時，鎳離子(II)、鋅離子(II)、鉻離子(III)。有使吸收度瞬間下降。

(三) 有些金屬離子前幾秒的吸收度下降比例較後幾秒低，是因樣品槽內染料並非均勻受到自由基的氧化，殘留染料受到產生的氣泡帶動而流至上層，使數據凸起，【圖(八)】的數據正是如此。但因上升不多，且不久後溶液已經均勻混合，故影響不大。【圖(十九)】



【圖(十九)】

(四) 某次實驗，我們發現硫酸銅溶液加入染料溶液後，未加入雙氧水前溶液的顏色就已發生變化，故認為實驗五中硫酸銅溶液的吸收度有大幅下降的原因是來自於此，而非發生類 Fenton 反應，而做了實驗六去觀察是否其他離子也有此現象。而且實驗五進行時發現【圖(八)】加入銅離子溶液使吸收度下降的較加入亞鐵離子溶液還多，但反應之後顏色卻仍呈現紅色【圖(二十一)】，與 Fenton 反應後呈現無色不同【圖(二十)】，代表染料可能並非被氧化。



六、實驗六：觀察各種金屬離子在不同 pH 的環境下和染料反應後顏色。(實驗五對照組)

實驗六發現許多金屬離子在未加入雙氧水前就會和染料反應而變色。故實驗五中不能完全推斷發僅生類 Fenton 反應。故實驗五的數據下降並不能完全代表是染料被氧化，亦無法精確找出能催化雙氧水產生類 Fenton 反應的金屬離子。

七、實驗七：觀察雙氧水與不同種類金屬硫酸鹽類，在 pH = 3 及 7 下和碘化鉀的反應情形。

實驗八：觀察金屬硫酸鹽類，在 pH 值 3 及 7 下和碘化鉀的反應情形。(實驗七對照組)

(一) 某次專題課程中做到關於碘離子被氧化進而生成三碘離子的實驗【式(十六)】【式(十七)】，不僅顏色從無色變黃，且不同離子吸收度應會不同。於是我們上網搜尋也找到碘光度法的氧化劑相關資料⁽¹²⁾，故拿其作為測試類 Fenton 反應的方法。唯實驗七、八和實驗一至六不同的是：吸收度愈高代表氧化能力愈強。



(二) 因金屬離子在鹼性環境中易形成金屬氫氧化物沉澱，讓溶液中金屬離子的量不同，將無法比較差異性，故我們只挑出 pH = 3 及 7 下有使染料溶液吸收度下降的金屬離子來進行實驗七。

(三) pH = 3 下，只加入雙氧水在 74 秒時已達吸收度穩定，之後金屬硫酸鹽加入實驗中也會發現吸收度皆達定值【圖(十四)】，是因碘化鉀溶液為 1000 ppm，碘離子為限量試劑，且雙氧水在酸性中氧化力較其強(如討論三)，足以將碘離子氧化，且達成【式(十七)】的平衡狀態。故要判斷氧化能力大小是以吸收度達平衡時吸收度且不再改變的所需時間，所需時間愈短，我們以此認定氧化能力愈強。加入金屬硫酸鹽後，到達平衡所需時間較僅加入雙氧水短，推測該金屬離子可能產生類 Fenton 反應。雖高價金屬離子會有些許氧化能力【圖(十六)】，但相對而言影響相當小，所以將其影響忽略。pH = 3 產生類 Fenton 反應的可能性排序為：鈦離子(IV) > 鐵離子 > 銅離子(II) > 鉻離子(III) > 鈷離子(II) > 鎳離子(II) > 鋅離子(II) > 鋁離子。

(四) pH = 7 下，只加入雙氧水幾乎不能氧化碘離子，而進行類 Fenton 反應實驗時會有明顯差別，但氧化量仍無法比 pH = 3 多，符合討論四(一)的情形。因大部分金屬離子加入後【圖(十五)】都無法使碘離子完全被氧化，所以判斷氧化力的強弱就由最後平衡後吸收度的值

來判斷，愈大則愈強。但鈦離子(IV)及鋁離子加入之後卻能夠使碘離子完全的被氧化，效果甚至大於 Fenton 反應。我們做了實驗八的對照組【圖(十七)】，發現單獨加入這兩種金屬離子時的氧化力仍是很小的，於是我們認定這兩種金屬離子在該環境中能有效產生類 Fenton 反應，其中鈦離子(IV)的催化果又大於鋁離子。pH = 7 金屬離子產生類 Fenton 反應可能性排序為：鈦離子(IV) > 鋁離子 > 鐵離子 > 銅離子(II) > 鋅離子(II) > 鉻離子(III)。鈷離子(II)及鎳離子(II)則無此能力。

捌、結論

- 一、 雙氧水於常溫常壓下，氧化力不足以氧化桃紅染料，需要有強氧化力的自由基出現，才能氧化。
- 二、 Fenton 反應的特徵是初始速率極快，數秒後就不再有明顯氧化能，在偏酸的環境能力愈強，鹼性環境時已完全無效。若金屬離子產生類 Fenton 反應，推測吸收度-時間圖需有大幅瞬間下降，才有算有效果。
- 三、 IA 的金屬離子不易發生類 Fenton 反應，過渡金屬較有可能發生。
- 四、 染料與金屬離子反應的系統複雜不易經確找出有催化類 Fenton 反應的金屬離子。但碘光度法卻能簡化反應情形，便於尋找有類 Fenton 效果的金屬離子。
- 五、 pH = 3 下，雙氧水的氧化力足以氧化所有碘離子，但以氧化速率差別可判讀其氧化力，產生類 Fenton 反應的可能性排序為：鈦離子(IV) > 鐵離子 > 銅離子(II) > 鉻離子(III) > 鈷離子(II) > 鎳離子(II) > 鋅離子(II) > 鋁離子。
- 六、 pH = 7 下，雙氧水幾乎不能氧化碘離子，可藉由碘離子被氧化量判斷氧化力。但鈦離子(IV)及鋁離子加入之後卻能夠使碘離子完全的被氧化，效果甚至大於 Fenton 反應，與對照組比較後顯示催化類 Fenton 反應的可能性極高。金屬離子產生類 Fenton 反應可能性排序為：鈦離子(IV) > 鋁離子 > 鐵離子 > 銅離子(II) > 鋅離子(II) > 鉻離子(III)。鈷離子(II)及鎳離子(II)則無此能力。
- 七、 最有可能發生類 Fenton 反應的金屬離子及環境為 pH = 7 鈦離子(IV)。
- 八、 鋁離子雖非為過渡金屬，但 pH = 7 中，亦可能有催化能力

玖、參考資料及其他

1. 司洪濤等人，氧化技術在高濃度 COD 廢水處理之應用，財團法人產業服務基金會。
2. 維基百科化合物溶解度表
3. 秦興國，FENTON 法應用於處理染料廢水之研究，大同大學化學工程學系專題研究報告，2003。
4. 周珊珊，演講內容，Fenton 家族高級氧化處理技術，財團法人工業技術研究院環境與安全

衛生技術發展中心。

5. Chern, J.M.; Helfferich, F.G. Effective kinetic modeling of multistep homogeneous reactions. *AIChE J.* **1990**, *36*, 1220.
6. 可見光，維基百科
7. 雙氧水介紹
<http://www.dfm.com.tw/dasp/dfaux/o09-p.htm>
8. 分析化學，李俊義 著。科技股份有限公司出版。
9. 蔡宏志，Photo-Fenton 法處理反應性偶氮染料 Black B 與酚之研究，國立成功大學化學工程研究所碩士論文，2005。
10. 呂凱筠、林侑瑩，第四十二屆國中小科學展覽說明書，以自製的反應儀器研究鹽類對雙氧水分解反應的影響。
11. 台灣大學化學系，高中化學教學網，二氧化錳催化雙氧水問題回答，鄭淑芬教授
12. 環保局水中殘餘氧化劑檢測，碘光度法。

【評語】 040213

本作品以 Fenton 試劑的反應探究其它離子的類似反應，以碘光度法檢驗卻不能確定鈦離子也有自由基產生，但直接以 Fenton 反應來說明，而歸類為 Fenton-like。