

中華民國第 57 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 化學科

最佳團隊合作獎

030216

「氣」化了沒？烏濕一把罩－探討氯化亞鐵和氯化鐵在課堂實驗的可行性

學校名稱：基隆市立銘傳國民中學

作者： 國二 林肯韞 國二 張聿捷	指導老師： 陳金善
-------------------------	--------------

關鍵詞：氯化亞鐵、雙氧水、亞甲藍液

摘要

本研究以自製暗箱和arduino感測器全程監控雙氧水在各種條件下催化分解的反應，實驗主要分兩種模式：

一、比色法定性分析顏色

溶液注射於比色管中 → 放至暗箱外 → 啟動計時器 → 觀察顏色和溫度 → 分析比較資料

二、Arduino與暗箱定量分析濕度、透光度、溫度

溶液注射於比色管中 → 放至暗箱內外 → 啟動燈光 → arduino監控視窗 → 讀取數據 → 分析資料

不同以往課堂實驗的二氧化錳催化及排水集氣法觀察雙氧水分解氧氣的實驗，經過本研究反覆測量和比較之後，結果顯示：氯化亞鐵和氯化鐵加上亞甲藍液可透過顏色、反應速率、溫度、濕度、質量和透光性等多元性質，讓同學更有感的理解雙氧水的催化分解反應，同時以少量藥品達到綠色化學的目的。

壹、研究動機

在小學曾做過雙氧水加二氧化錳的實驗，當時上網查過資料後，文獻顯示二氧化錳跟氫離子和雙氧水反應後，會被還原成錳離子以及產生氧氣，同時還發現氧氣會跟亞甲藍液反應，使亞甲藍液變成無色透明。這種現象引發我們的好奇心，於是請教老師可以做什麼樣的實驗來幫助我們理解雙氧水的反應機制。雖然以雙氧水分解實驗為主題的研究有很多，但測量方式都是探討氧氣體積與時間的關係，進而測量反應速率，以及相關物理量。剛好我們在科學實驗課學到 arduino 和 3D 列印，所以我們思考如何運用這些簡易且費用不貴的工具來探討雙氧水反應，藉由自製的 arduino 監測工具直接量測微量數據，以分析雙氧水的變化特性。同時透過顏色、透光度和濕度的變化，結合課本雙氧水氣體收集的方式，比較觀測不同性質的方便性和異同，並試圖將操作方法教材化和微量化，使雙氧水實驗可以多樣性的在國中或高中實驗室裡進行小組的比較和探討。

貳、研究目的

- 一、比色法定性分析氯化亞鐵和氯化鐵的催化反應
- 二、Arduino與暗箱定量分析氯化亞鐵與氯化鐵催化反應的濕度、透光度、溫度
 - (一) 比較顯色溶液（亞甲藍液和廣用試劑）對雙氧水反應的影響
 - (二) 環境溫溼度對雙氧水反應的影響
 - (三) 探討雙氧水濃度對反應速率的影響
 - (四) 探討氯化亞鐵與氯化鐵濃度對雙氧水反應速率的影響

參、研究設備及器材

暗箱	網路設計軟體 Tinkercad、Fider 3D 列印機、PLA(塑料)
監測工具	Arduino UNO 主機板、Arduino 擴充板、光敏電阻、DHT11 溫溼度感測器、杜邦線、USB 線
實驗主體	藥品：CHONEYE-雙氧水、CHONEYE-氯化鐵、CHONEYE-氯化亞鐵、長壽牌亞甲藍染色劑、廣用試劑、純水
	器材：塑膠比色管（4.5ml、10*10*45mm、波長 340~800nm）、LED 燈、0.5ml 針筒、3ml 針筒、電子秤、秤量紙、刮杓、燒杯、量筒、濾紙、洗滌瓶、溫度計、玻璃棒、玻璃罐、滴管、吹風機、電風扇

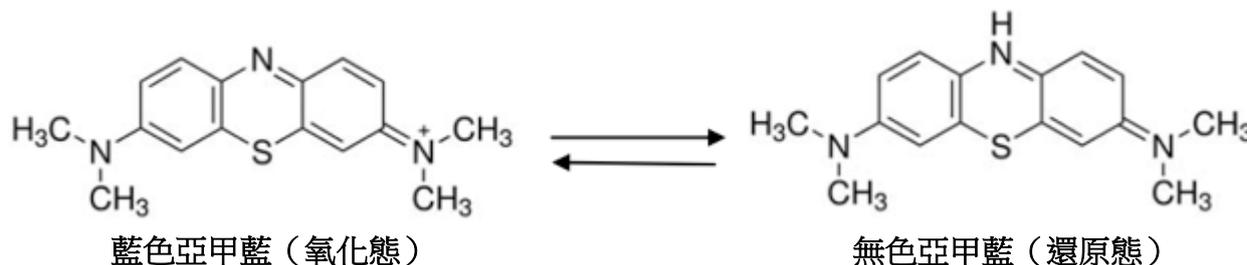
肆、文獻探討

一、過氧化氫（H₂O₂）的化學反應

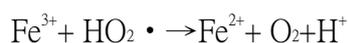
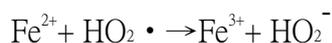
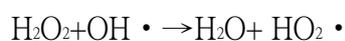
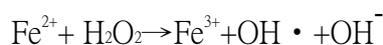
過氧化氫（H₂O₂）本身會自發分解為水和氧氣，其水溶液呈弱酸性，在化學反應中，不僅可當氧化劑，亦可當還原劑，用作還原劑時產物為氧氣；用作氧化劑時產物則為水。與本研究主要相關的氧化還原反應有：

(一) 自發反應： $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

(二) 亞甲藍反應： $\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{ClS}$ (氧化態，藍色) $\xrightarrow{\text{血液}}$ $\text{O}_2 + 2\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{ClS}$ (還原態，無色)



(三) 亞鐵離子和鐵離子的催化反應：



亞鐵離子與雙氧水不僅發生氧化還原的反應，同時在反應中扮演催化劑。經查化學半反應式，可知亞鐵離子因氧化而產生鐵離子，同時生成自由基(OH·、HO₂·)，使得反應產生連鎖效應，進而加速分解反應，又鐵離子與雙氧水作用會再還原成亞鐵離子，如此反覆作用。反之亦然，鐵離子先反應成亞鐵離子和自由基，之後也是進入連鎖催化反應。

二、 歷屆科展重點摘要（數字代表第幾屆）

- (一) 42' 以自製反應儀器研究雙氧水分解反應的影響：因反應產生氧氣使得排水量增加，藉由自製彈簧裝置檢測水量算出反應速率。實驗結果顯示與 SO_4^{2-} 或 Cl^- 結合的條件下，亞鐵離子的反應速率皆大於鐵離子，且研究結果也顯示三價鐵鹽中， $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 和 FeCl_3 的催化效果最好，屬於爆發型。
- (二) 46' 速戰速決—以雙氧水的分解探討反應速率：以測量壓力的方法檢測分析雙氧水在不同催化劑作用下的反應級數，資料顯示氯化亞鐵當催化劑時，對反應物 H_2O_2 而言，反應為一級。
- (三) 51' 刑案現場大發現-那是血嗎?：利用比色法，觀察顏色變化時間，提出亞甲藍能夠取代酚酞初步檢驗血液的做法，亞甲藍液溶於酒精配成0.005%，加入6%雙氧水，以1：7的比例即可辨識。
- (四) 53' 「氧」眉吐氣：以排水集氣法得知0.005mole氯化物晶體在17.5% 50ml雙氧水中的反應速率是 $\text{Fe}^{2+} > \text{Fe}^{3+}$ 。
- (五) 54' 彙而不費：以分光光度計測量亞甲藍液在 $\lambda = 665\text{nm}$ 處雙氧水中降解後的吸收度。根據資料顯示：在液相鐵試劑催化下，亞甲藍液最佳降解的反應條件在 $\text{pH}=3\sim 4$ ，當雙氧水濃度與鐵離子濃度太高時，反而不利降解，褪色效果變差，此外，鐵離子形成氫氧化鐵時，也會降低降解的效果。(此處的亞甲藍液模擬廢液)
- (六) 54' 快氧加鞭-催生一對氧：以排水集氣法比較分析反應速率和活化能，得知適用在低溫與室溫環境的催化劑分別是二氧化鉛及碘化鉀，適當搭配酸鹼值溶液，可作為氧氣急救包的參考。

伍、 研究方法及流程

一、 準備溶液

甲、A組雙氧水濃度：

- (1) 取 30%雙氧水 10g，加入純水 02g，稀釋配製成 25%雙氧水溶液
- (2) 取 30%雙氧水 10g，加入純水 05g，稀釋配製成 20%雙氧水溶液
- (3) 取 30%雙氧水 10g，加入純水 10g，稀釋配製成 15%雙氧水溶液
- (4) 取 30%雙氧水 10g，加入純水 20g，稀釋配製成 10%雙氧水溶液
- (5) 取 30%雙氧水 10g，加入純水 50g，稀釋配製成 5%雙氧水溶液

乙、B組雙氧水濃度：

- (1) 取 35%雙氧水 10g，加入純水 25 g，稀釋配製成 $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=10:25$ (10%)雙氧水溶液
- (2) 取 35%雙氧水 10g，加入純水 30 g，稀釋配製成 $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2=10:30$ (約 9%)雙氧水溶液
- (3) 取 35%雙氧水 10g，加入純水 35 g，稀釋配製成 $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2=10:35$ (約 8%)雙氧水溶液
- (4) 取 35%雙氧水 10g，加入純水 40 g，稀釋配製成 $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2=10:40$ (7%)雙氧水溶液
- (5) 取 35%雙氧水 10g，加入純水 50 g，稀釋配製成 $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2=10:50$ (約 6%)雙氧水溶液
- (6) 取 35%雙氧水 10g，加入純水 60 g，稀釋配製成 $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2=10:60$ (5%)雙氧水溶液

丙、氯化鐵水溶液：

- (1) 秤取 1.35 克氯化鐵 (FeCl_3) 加水至 50ml，配成 0.1M 濃度備用。
- (2) 取 0.1M 氯化鐵 (FeCl_3) 5ml 加水至 10ml，配成 0.05M 濃度備用。
- (3) 取 0.1M 氯化鐵 (FeCl_3) 5ml 加水至 20ml，配成 0.025M 濃度備用。
- (4) 取 0.1M 氯化鐵 (FeCl_3) 5ml 加水至 50ml，配成 0.01M 濃度備用。

丁、氯化亞鐵水溶液：秤取 0.99 克氯化亞鐵 (FeCl_2) 加水至 50ml，配成 0.1M 濃度備用。
稀釋方式同氯化鐵。

戊、亞甲藍溶液：取 0.1% 亞甲藍原液 5ml 稀釋成 0.005% 亞甲藍液 100ml 備用。

己、廣用試劑：取 0.1% 廣用試劑原液 5ml 稀釋成 0.005% 亞甲藍液 100ml 備用。

備註 1：每次進行新的實驗，雙氧水、氯化亞鐵與氯化鐵濃度皆重新配製。

備註 2：為了方便標記，將氯化亞鐵簡稱亞鐵，氯化鐵簡稱鐵，亞甲藍液簡稱亞，廣用試劑簡稱廣。

二、 比色法定性分析

(一) 模仿階段：在查詢以前的科展報告，看到有人用紗布沾血(參考歷屆科展(三))泡雙氧水來觀察顏色的變化。我們採用相同比例在白板上效仿，發現注射後形狀不規則，環境也會影響顏色判斷，而且，後半期的顏色接近，不易辨別，如圖 5-1 所示：

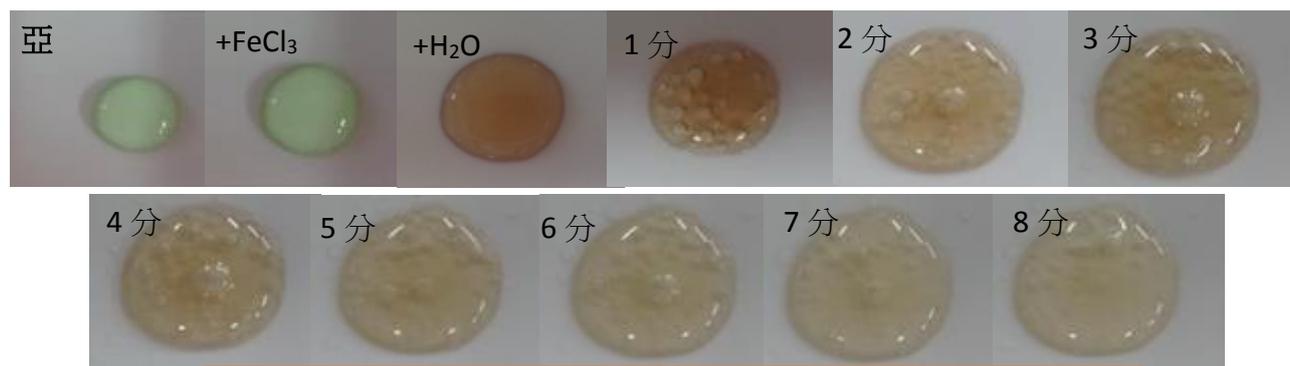


圖 5-1 氯化鐵在亞甲藍液中催化雙氧水後，顏色變化的歷程

(二) 初探階

段：換成



圖 5-2 氯化亞鐵和氯化鐵在溶液中的顏色 (10% H_2O_2 濕度 57%，25°C)

比

色

管，找出最適合辨別的顯色溶液：

- (1) 將氯化亞鐵 (左三管) 和氯化鐵 (右三管) 分別放入等體積的水、亞甲藍液和廣用試劑，如圖 5-2 所示，初始顏色可明顯區分者以亞甲藍液最適合：氯化亞鐵(藍)和氯化鐵(綠)，其次是水，氯化亞鐵(淡黃)和氯化鐵(深黃)，在實驗室裡，可幫助同學辨認。

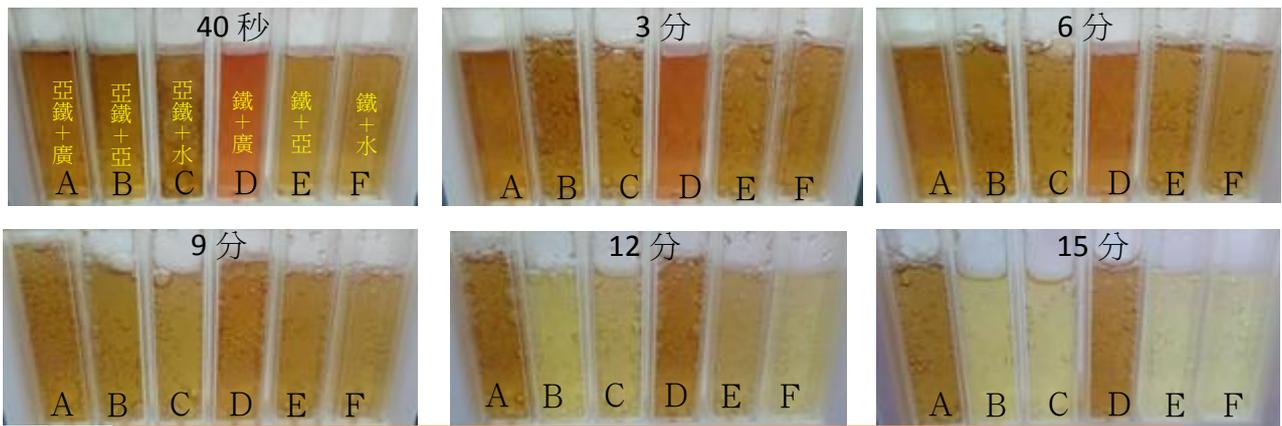


圖 5-3 顯色溶液中催化反應的變色現象 (5% H_2O_2 濕度 70%，室溫 20°C)

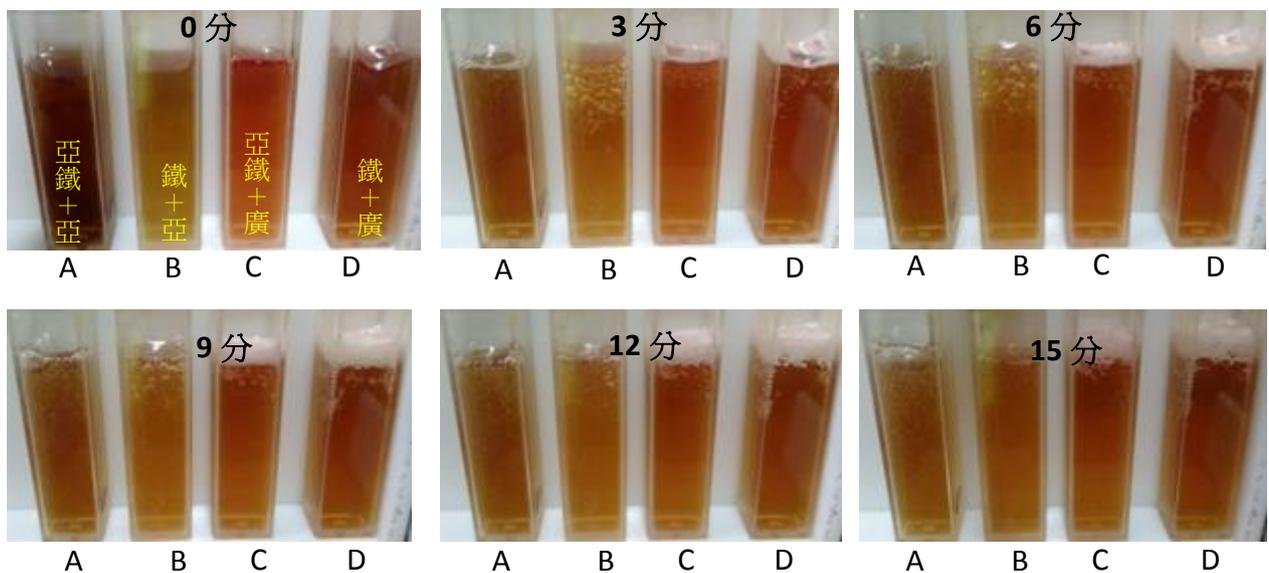


圖 5-4 顯色溶液中催化反應的變色現象濕度 (10% H_2O_2 濕度 49%，室溫 17°C)

- (2) 圖 5-3 和圖 5-4，每隔三分鐘擷取雙氧水催化反應的照片：一開始，**氯化亞鐵**的顏色都比**氯化鐵**深，隨著反應時間加長，顏色漸漸變成黃(褐)色。當室溫較高時，反應時間縮短，顏色差異性會比較大，亦即濃度、室溫、顯色溶液會影響氯化亞鐵和氯化鐵催化雙氧水的反應時間，但顏色變化趨勢不變。
- (3) 選擇廣用試劑，是為了觀察酸鹼性，初期確實可顯示酸性，室溫 25°C 時，顏色皆為深紫紅 (如圖 5-2)，不易分辨，且前期反應不快，直到八分鐘後才有劇烈的反應，溫度可高達 90.2°C，遠比其他顯色溶液高。查資料，可知廣用試劑含有醇類，而我們也做了酒精 + 催化劑 + 雙氧水實驗，發現酒精會延遲雙氧水分解，但六七分鐘後就會劇烈反應，初步判斷，酒精相對是大分子，影響催化劑碰撞雙氧水的機會，使得反應延後，直到一定溫度，才使得雙氧水反應加速。
- (4) 同圖 5-2，含**廣用試劑**的比色管，其顏色依然偏紅，再次顯示雙氧水反應前酸性較強，反應之後，酸性漸弱。
- (5) 目測法顯示比色管中產生氣泡的速率是**氯化亞鐵 + 亞** > **氯化鐵 + 亞** > **氯化亞鐵 + 廣** > **氯化鐵 + 廣**，換句話說，**雙氧水在廣用試劑中的反應較亞甲藍液差**，意味著廣用試劑在前期會干擾雙氧水催化反應。

- (6) 亞甲藍液比較清澈，廣用試劑中的反應，都會產生細小氣泡，這是有趣又特別的現象。
- (7) 如圖 5-2，在水中（對照組），反應前氯化亞鐵淡黃色，氯化鐵深黃色，但反應後，顏色卻相反，意味著氯化亞鐵和氯化鐵不是單純的催化劑。

(三) 再探階段：找出最適合課堂辨別顏色的雙氧水濃度-1

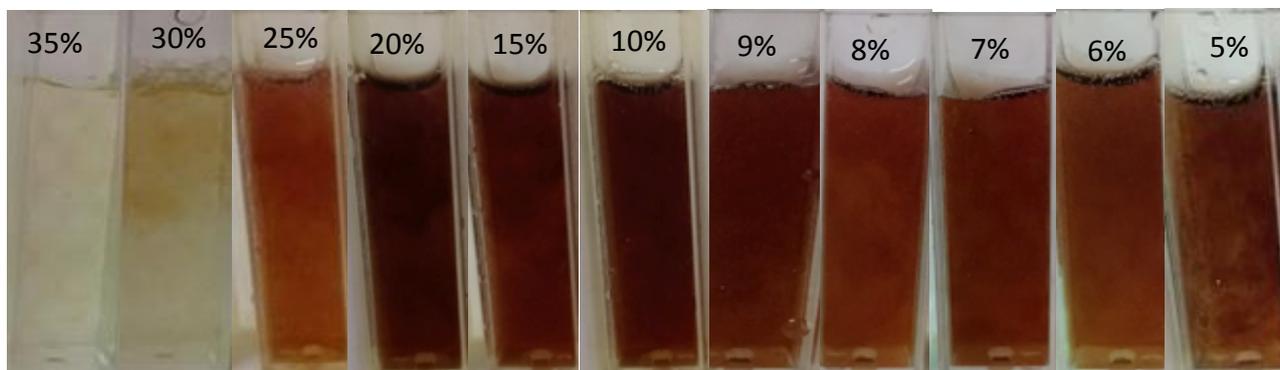


圖 5-5 不同濃度雙氧水在氯化亞鐵+亞甲藍水溶液中的起始顏色

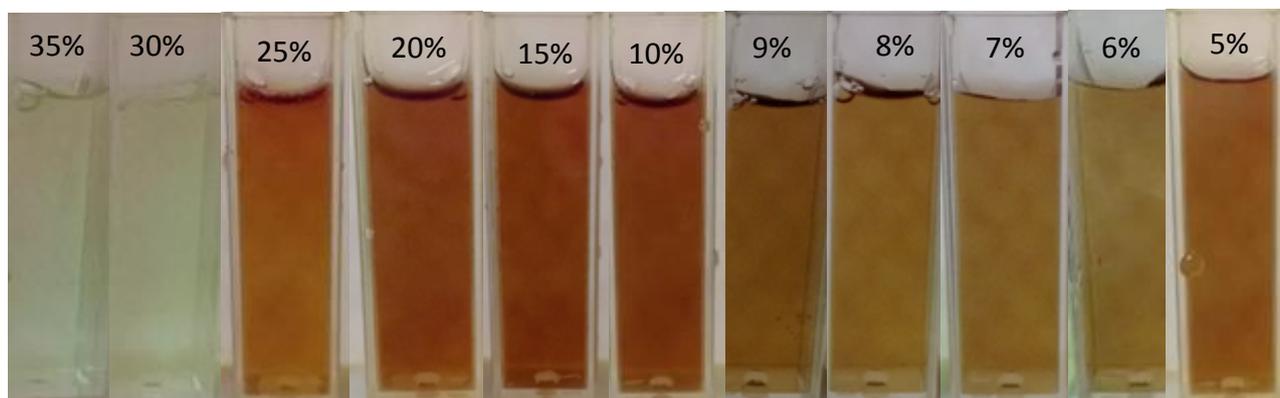


圖 5-6 不同濃度雙氧水在氯化鐵+亞甲藍水溶液中的起始顏色

- (1) 參考圖 5-5 和 5-6 左，注射雙氧水時，發現濃度越高，顏色未均勻變深，甚至近似透明。20%以上，常發現雙氧水未能與催化劑水溶液均勻混合，以致顏色未變深，有時還會出現上深下淺，如圖 5-6（20%雙氧水）。考慮密度造成的影響，於是我們計算密度，可得 10%雙氧水密度約 1.03g/ml，20%雙氧水密度約 1.04g/ml，氯化鐵約 2.39g/ml，氯化亞鐵約 1.98g/ml，其中 10%雙氧水密度較 20%小，溶液卻比 20%均勻，已知氯化鐵密度比雙氧水大，於是我們改變注射順序（如圖 5-7 右），但氯化鐵溶液不會下沉至底部，而且雙氧水濃度越高，分佈越不均勻，由此可見，溶液是否均勻與密度關係不大。



圖 5-7

- (2) 雙氧水與鐵離子或亞鐵離子作用會使顏色變深，已知過氧化氫相對鐵離子和亞鐵離子大，而且過氧化氫彼此間有氫鍵存在，根據碰撞理論，離子碰到大分子，必須方位和能量到位，才會碰撞成功，這意味著濃度越高，過氧化氫分子越多，反而影響離子碰撞過氧化氫分子的機會，因此推論，高濃度溶液不均勻與離子碰撞的機會有關。
- (3) 注射順序不同，不會影響末溫，但反應時間不同，上方產生泡泡的粗細也不同，若要進行大象牙膏實驗，建議催化劑後放，泡泡會比較細緻。

- (4) 15%以下溶液均勻，是進行實驗的基本要件，但 15%以上，反應激烈，會使溶液溢出比色管，因此大多數實驗濃度以 10%以下為主。
- (5) 顏色判斷易受環境和主觀影響，故改以暗箱觀察，以透光度和濕度作為探討方向。

(四) 輔助實驗：找出最適合課堂反應的雙氧水濃度-2

同學都知道雙氧水催化後都會產生氧氣，而氧氣有助燃性，只要是燃燒，同學都愛，因此我們用線香先做濃度初步的篩選，在課堂上進行燃燒實驗結果如下表 5-1 和圖 5-8：



圖 5-8 燃燒實驗

表 5-1 氧氣燃燒定性分析					
濃度					
催化劑	5%	10%	15%	20%	起火反應時間
氯化亞鐵	亮	起火	起火	起火	快(約 1 分至 2 分)
氯化鐵	亮	起火	起火	起火	慢(約 3 分)

- (1) 同樣的時間，線香起火的時間，並不因濃度大而縮短，這是因為高濃度雙氧水注射後，沒有均勻分布造成的，但只要時間夠長，高濃度的火焰並不小。
- (2) 不論是氯化鐵或氯化亞鐵，5%有亮，但產生的氧氣濃度不足以起火。
- (3) 氯化亞鐵起火的時間大都比氯化鐵快，以少量又有明顯效果者，以 10%雙氧水+0.1M 氯化亞鐵效果最佳。

三、 Arduino 與暗箱定量分析濕度、透光度、溫度

課堂上認識了 3D 列印以及 Arduino 和光敏電阻元件以及溫濕感測器，於是想做一個可以配合 Arduino 且不會受環境影響的裝置，因此製作暗箱進行後續的定量實驗。

(一)暗箱製作

- 5-3-1 在 <https://www.tinkercad.com/>提供的 3D 設計網頁繪製暗箱和蓋子。
- 5-3-2 將設計圖存成 box.stl 和 top.stl(如圖 5-9、5-10)儲存到 D 磁碟機。
- 5-3-3 將設計圖載入 3D 切片軟體 Flash print 以 box.gx 和 top.gx 儲存。
- 5-3-4 載入 3D 列印機列印成品，試用、修正至最後所需的暗箱。

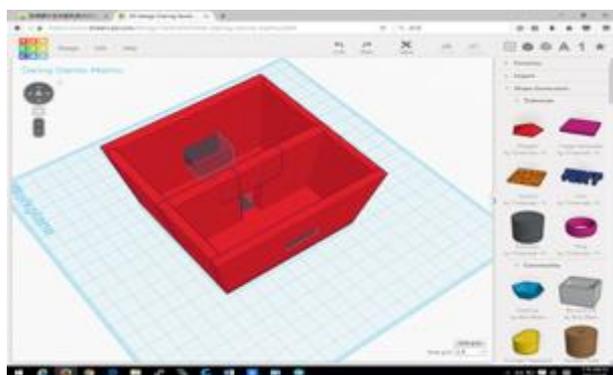


圖 5-9 暗箱本體

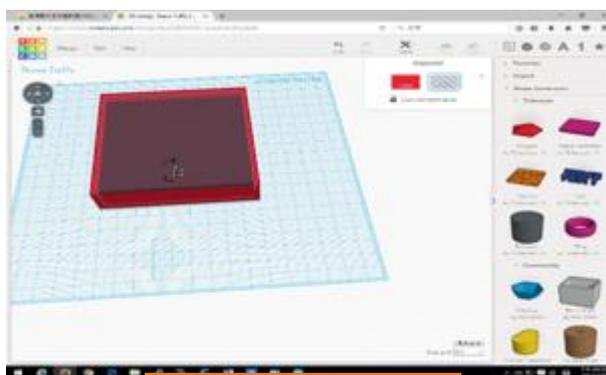


圖 5-10 暗箱蓋子



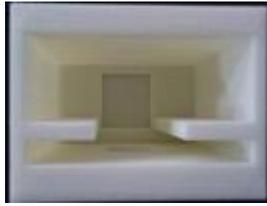
圖 5-11 暗箱列印



圖 5-12 暗箱樣品（完成品為黑色）



第一代暗箱



第二代暗箱



第三代暗箱（最終版）



前方開口



後方開口

圖 5-13 暗箱修改的過程

(二) 編寫 Arduino 程式

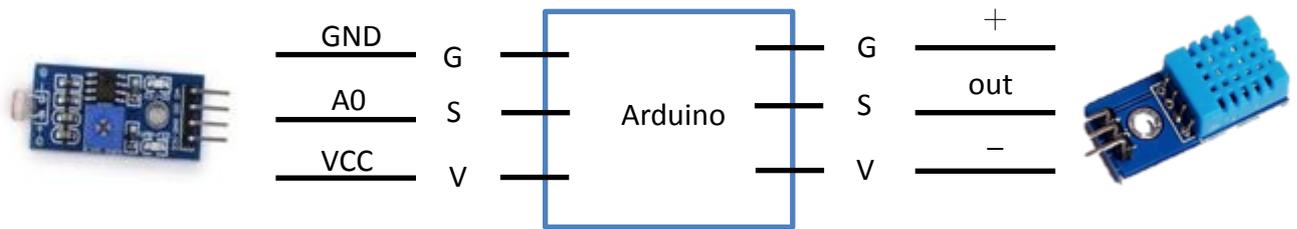


圖 5-14 電子元件接腳的對應關係

- 5-4-1 先將主機板和擴充板連接，在擴充板上，分別按照接腳的對應關係，安裝光敏電阻和溫濕感測器，如圖 5-14。
- 5-4-2 將元件連接好的 Arduino 電路板用膠帶固定在暗箱上，如圖 5-15、5-16、5-17。
- 5-4-3 參考 Cooper Maa 網站的 Arduino 筆記 - Lab8 和天花板隨記中溫濕感器的程式，並根據實驗改寫程式，如下方框內程式。
- 5-4-4 將 Arduino USB 插入電腦，開啟 Arduino 程式，調整序列埠，開啟監控視窗，進行實驗備用。



圖 5-15 暗箱俯視圖



圖 5-16 暗箱側視圖



圖 5-17 暗箱加蓋圖

```
// 2016sciencefair - 讀取光敏電阻 (%)和溫濕度
```

```
int photocellPin = 5; // 光敏電阻 (photocell) 接在 analog pin 5
int photopermeability= 0; // photocell variable

#include <dht.h>
#define dht_dpın A0 //定義訊號要從 Pin A0 進來
dht DHT;
void setup(){ Serial.begin(9600); }
void loop(){
photopermeability = analogRead(photocellPin);
float Vcđs = 5 * float(photopermeability) / 1023; //光敏電阻壓降
float Rcđs = 10000 * Vcđs / (5 - Vcđs); //光敏電阻值
int percent = map(photopermeability, 0, 1023, 100, 0);
Serial.print("photopermeability= "); Serial.print(photopermeability); Serial.print(" ");
Serial.print(percent); Serial.print("% ");

DHT.read11(dht_dpın); //去 library 裡面找 DHT.read11
Serial.print("Humidity= "); Serial.print(DHT.humidity); Serial.print("% ");
Serial.print("temperature= "); Serial.print(DHT.temperature); Serial.print("C");
Serial.print("\t "); Serial.print("Vcđs= "); Serial.print(Vcđs);
Serial.print("\t "); Serial.print("Rcđs= "); Serial.println(Rcđs);
delay(60000); } //每 60000ms 更新一次
```

(三) 實驗本體

(1) 實驗裝置



圖 5-18 實驗裝置示意圖

(2) 實驗步驟

實驗目的（一）：比較顯色溶液（亞甲藍液和廣用試劑）對雙氧水反應的影響

- 5-5-1 比色管依序注射體積皆為 0.48ml 的水（對照組）和氯化鐵溶液，再放入暗箱中。
- 5-5-2 接著，注射 2.4ml 10% 雙氧水溶液於比色管中，放上蓋子。
- 5-5-3 啟動 Arduino 監控視窗，每隔一分鐘讀取透光度、溼度和溫度，共進行 20 分鐘。
- 5-5-4 暗箱外放置一組相同條件的比色管，手機攝影以記錄顏色變化。
- 5-5-5 每隔一分鐘記錄暗箱外比色管內溶液的溫度。
- 5-5-6 實驗完後，用吹風機將暗箱濕度降低，並以電風扇降溫，直到回穩到相同溫濕度，以利下一個實驗進行。
- 5-5-7 整理數據，製成圖表並繪製關係曲線圖。
- 5-5-8 將溶液換成亞甲藍液和廣用試劑，分別重複 5-5-1~5-5-6 步驟。
- 5-5-9 同理，將氯化鐵換成氯化亞鐵，重複 5-5-1~5-5-8。

備註 3：室溫不同時，反應速率不同，因此監測時間會因室溫而調整成 10 秒或 30 秒，總時間也會縮短至五或十分鐘。

實驗目的（二）：環境溫溼度對雙氧水反應的影響

→方法同實驗目的（一）

實驗目的（三）：探討雙氧水濃度對反應速率的影響

(1) 將實驗目的（一）的 10% 雙氧水改成不同濃度的雙氧水，重複 5-5-1~5-5-9。

(2) 以雙氧水消耗量計算反應速率

- 5-6-1 先將比色管放在磅秤上稱重，記錄比色管質量。
- 5-6-2 將 0.48ml 水和 0.48ml 氯化亞鐵注射至比色管秤總重，備用。
- 5-6-3 注射 2.4ml 雙氧水於比色管中，紀錄總重。
- 5-6-4 每隔 30 秒記錄質量。
- 5-6-5 整理質量數據，並繪製與分析關係曲線圖。

實驗目的（三）：探討氯化亞鐵與氯化鐵濃度對反應速率的影響

→將實驗目的（一）的 0.1M 氯化鐵濃度改成不同濃度的氯化鐵，重複 5-5-1~5-5-9。

陸、結果與討論

一、 定性分析的結果與討論

[結果與討論 6-1]根據研究方法中的比色法討論，將結果整理成下表，並標示最佳選擇順序：

催化劑	氯化亞鐵			氯化鐵			選擇
顯色溶液	未加 H ₂ O ₂	反應起點	反應終點	未加 H ₂ O ₂	反應起點	反應終點	
水	淡黃色	暗褐色	深黃色	深黃色	褐色	淡黃色	2
亞甲藍液	淺藍色	深褐色	深黃色	草綠色	褐色	淡黃色	◇
廣用試劑	紫紅色	紫紅色	深黃色	紫紅色	紫紅色	淡黃色	3

其實只有水就能區分氯化鐵和氯化亞鐵(如圖 6-1)，但亞甲藍液的顏色比較豐富，所以我們優先選擇亞甲藍液，其次才是水（對照組），而且顏色變化趨勢皆相同，不受環境溫濕度影響，但時間長短不同。至於廣用試劑，由於酸鹼性表現不突出，前期反應不明顯，反應時間稍長，所以不建議課堂上採用。

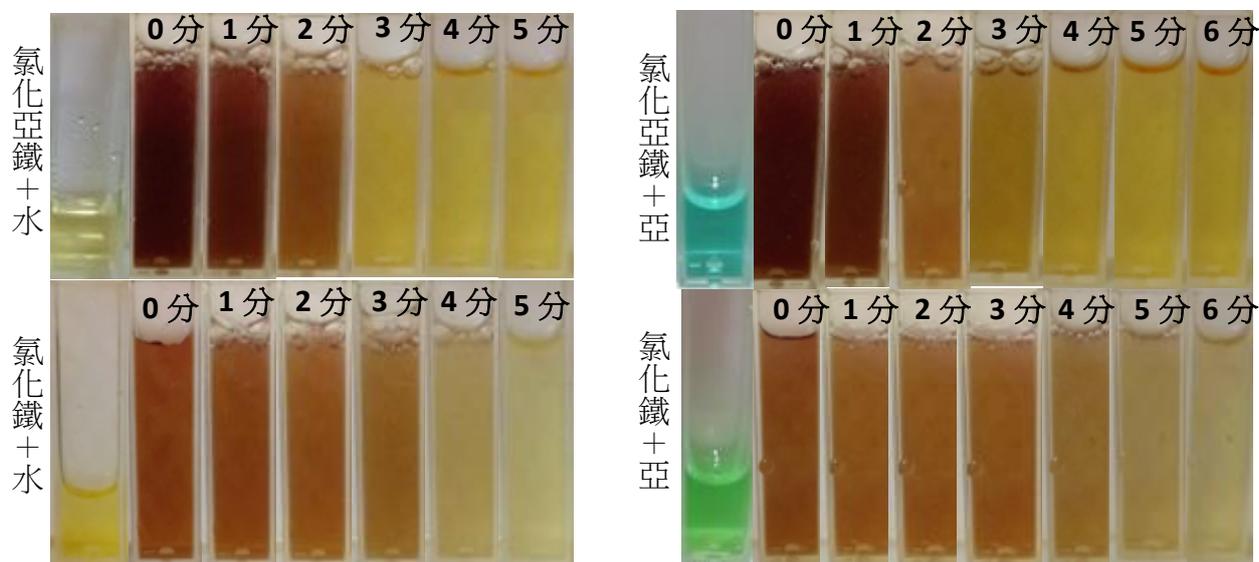


圖 6-1 氯化鐵和氯化亞鐵催化反應的顏色變化圖

[結果與討論 6-2]依據燃燒法觀察，雙氧水 5%產氧量只能讓線香發亮但不足以起火燃燒，10%以上皆可，但濃度太高，溶液不易均勻混合，且反應後會溢出比色管，效果反而不佳，所以定性篩選上以 10%雙氧水+亞甲藍液作為基本研究。

二、 Arduino 與暗箱定量分析透光度、濕度、溫度

實驗目的（一）：比較顯色溶液（亞甲藍液和廣用試劑）對雙氧水反應的影響

[結果與討論 6-3]定性上已可區分亞甲藍液和廣用試劑顯色的優劣，但我們還是希望能定量分析亞甲藍液和廣用試劑對實驗的影響，依序介紹透光度、濕度和溫度，本實驗目的主要以雙氧水 10%， $[\text{FeCl}_2]=[\text{FeCl}_3]=0.1\text{M}$ ， $[\text{亞甲藍液}]=[\text{廣用試劑}]=0.005\%$ 為進行的條件。

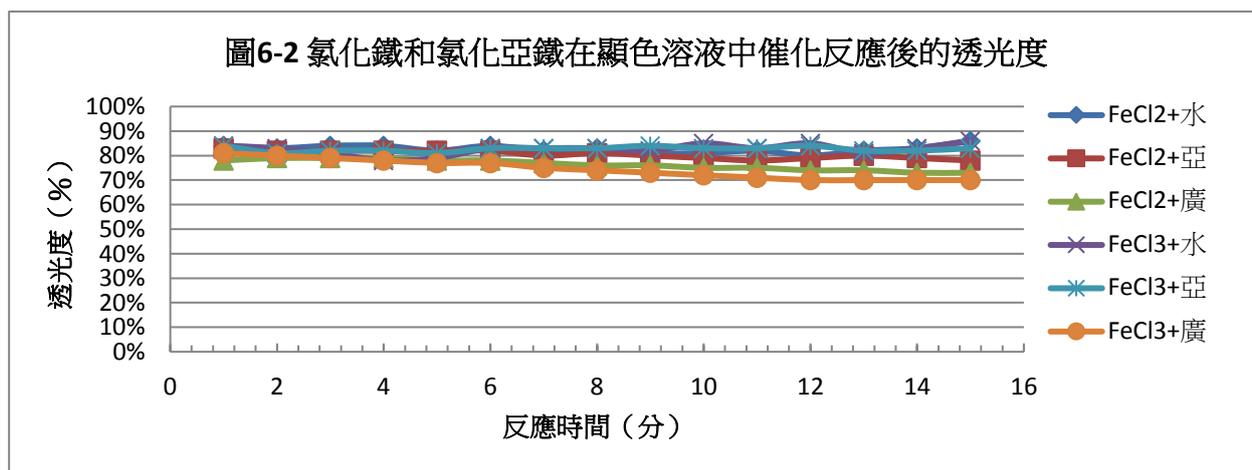
[透光度] 從實驗得知亞甲藍液和廣用試劑在雙氧水反應中，具有變色變淺的現象（參考研究方法的比色法分析），由於顏色易受外在環境亮度、照度的影響，而使得顏色判讀有落差，這學期剛好得知光敏電阻可量測亮度，於是我們想藉由光敏電阻來了解光經過比色管後的亮度變化，以作為觀察雙氧水變化的指標。

光敏電阻是一種對光敏感的電子元件，照光越強，電阻越小，電壓越小。輸入信號時，會被 Arduino 內建的類比至數位轉換電路轉成 0~1023 的數位值，為了方便理解光敏電阻所讀取的數據，於是我們將數位值 0~1023 轉成百分比，全暗時的透光度為 0%，全亮時則訂為 100%，希望透過百分比了解雙氧水反應之後，不同顏色呈現的透光度，以便建立觀察雙氧水變化的指標。

表 6-2 氯化鐵和氯化亞鐵在顯色溶液中催化反應後的透光度
 ([FeCl₂]=[FeCl₃]=0.1M, [H₂O₂]=10%, 亞=廣=0.005%, 室溫 20°C)

時間 (分)	FeCl ₂ +水	FeCl ₂ +亞	FeCl ₂ +廣	FeCl ₃ +水	FeCl ₃ +亞	FeCl ₃ +廣
1	84%	83%	78%	84%	84%	81%
2	83%	82%	79%	83%	81%	80%
3	84%	82%	79%	81%	82%	79%
4	84%	82%	79%	78%	82%	78%
5	82%	82%	78%	79%	81%	77%
6	84%	82%	78%	83%	83%	77%
7	82%	80%	77%	83%	83%	75%
8	83%	81%	76%	83%	83%	74%
9	81%	80%	76%	82%	84%	73%
10	81%	79%	75%	85%	83%	72%
11	82%	78%	75%	83%	83%	71%
12	80%	79%	74%	85%	84%	70%
13	82%	80%	74%	81%	82%	70%
14	83%	79%	73%	83%	82%	70%
15	86%	78%	73%	86%	83%	70%

表 6-2 是氯化鐵在亞甲藍液和廣用試劑中催化雙氧水反應時，所測得的透光度數據，將數據轉換成圖 6-2，可見透光度的數據變化不大，反應時間越長，其曲線近似水平，甚至下降（如廣用試劑溶液），無法呈現變淡的趨勢，推論其原因有二：（一）在反應過程中，顏色雖有變化，但同時在比色管中產生大量的氣泡，干擾光的行進，導致透光性變差。（二）查資料顯示光敏電阻與照度的變化關係並非線性，可能觀察區間恰落在變化不大的觀測範圍，故推論本實驗所選擇的光敏電阻不適合，導致無法比較差異。綜上所述，本實驗顯示不適合以光敏電阻來表現雙氧水在亞甲藍液或廣用試劑中變淡的特性。



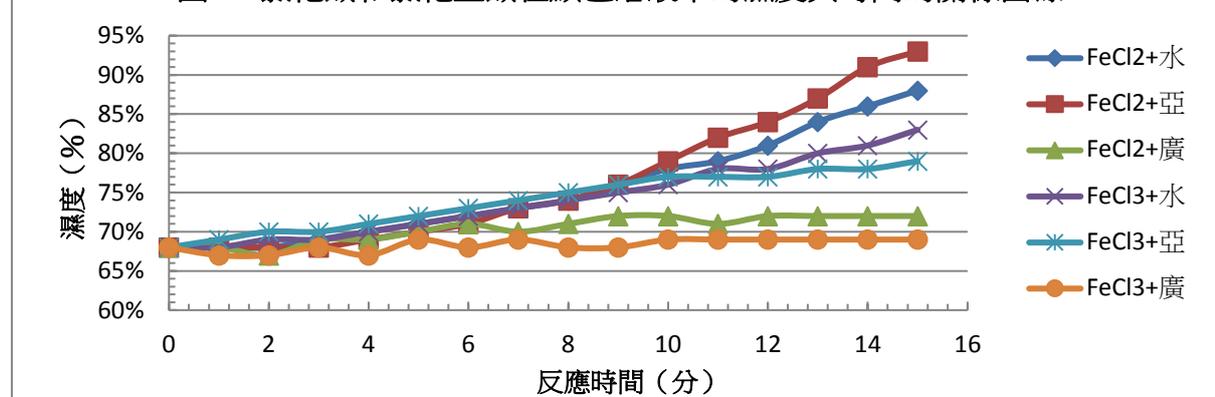
[濕度] 已知雙氧水分解反應會產生水和氧氣，其反應式為 $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + \text{熱}$ ，在很多的文獻裡，大多以氧氣當作反應的指標，藉由收集氧氣來了解反應速率。我們的裝置是一個裝有凸透鏡的暗箱，可以偵測濕度，因此我們想利用濕度來觀察雙氧水反應速率。將反應所得的濕度，整理成表 6-3，以及圖 6-3：

表 6-3 氯化鐵和氯化亞鐵在顯色溶液中催化反應後的濕度（室溫 20°C）

（濕度差 = 濕度₁₅ - 濕度₀；濕度變化率 = 濕度差 / 反應時間）

時間（分）	FeCl ₂ +水	FeCl ₂ +亞	FeCl ₂ +廣	FeCl ₃ +水	FeCl ₃ +亞	FeCl ₃ +廣
0	68%	68%	68%	68%	68%	68%
1	68%	68%	68%	68%	69%	67%
2	68%	68%	67%	69%	70%	67%
3	69%	68%	69%	69%	70%	68%
4	70%	69%	69%	70%	71%	67%
5	71%	70%	70%	71%	72%	69%
6	72%	71%	71%	72%	73%	68%
7	73%	73%	70%	73%	74%	69%
8	74%	74%	71%	74%	75%	68%
9	76%	76%	72%	75%	76%	68%
10	78%	79%	72%	76%	77%	69%
11	79%	82%	71%	78%	77%	69%
12	81%	84%	72%	78%	77%	69%
13	84%	87%	72%	80%	78%	69%
14	86%	91%	72%	81%	78%	69%
15	88%	93%	72%	83%	79%	69%
濕度變化率	1.33%/min	1.67%/min	0.27%/min	1.00%/min	0.73%/min	0.07%/min

圖6-3 氯化鐵和氯化亞鐵在顯色溶液中的濕度與時間的關係曲線



- (一) 從濕度觀察，以總反應時間來看，可得反應快慢： $\text{FeCl}_2+\text{亞} > \text{FeCl}_2+\text{水} > \text{FeCl}_3+\text{水} > \text{FeCl}_3+\text{亞} > \text{FeCl}_2+\text{廣} > \text{FeCl}_3+\text{廣}$ ，顯示（1）氯化亞鐵的反應速率比氯化鐵快（2）在亞甲藍液的反應速率比廣用試劑快，與前述比色法的結果相吻合。
- (二) 亞甲藍液對氯化亞鐵的反應有加分作用，但對氯化鐵則是減分作用，這現象值得再探究。
- (三) 觀察反應的影片，發現在廣用試劑的反應中，會在表面產生小泡沫，進而使液面上升，直到表面破裂才回復原先液面的高度，這意味著產生的氧氣和水蒸氣因表面張力而被包覆在溶液中，並未擴散到暗箱中，導致暗箱並未測到真正的水蒸氣含量，使得濕度數據受影響。反應產生的小泡沫是否與廣用試劑的有機物質有關係，有待釐清。
- (四) 廣用試劑的濕度變化不明顯，意味著廣用試劑可能會干擾催化反應，加上先前討論的透光性和顏色變化，亞甲藍液比廣用試劑適合作為雙氧水反應的指標。
- (五) 濕度的變化曲線比透光度明顯，因此，之後實驗探討將著重在濕度而非透光度。

[溫度]溫濕感測器量測的溫度，從開始到反應結束，溫差不大，頂多上升兩三度，亦即溫濕感測器量測到的是氣溫而非水溶液的溫度，所以僅供參考，主要用於了解暗箱內溫度變化的參考值。至於水溶液的溫度只好用傳統溫度計量測，剛開始，實驗過程中不開蓋，所以只測量初溫和末溫，將水、亞甲藍液和廣用試劑的溫度整理如表 6-4，可得：

表 6-4 氯化鐵和氯化亞鐵在顯色溶液中，暗箱內外反應 15 分的溫度數據
(室溫 19.5°C 濕度 68%；溫差=末溫-室溫；溫度變化率=溫差/反應時間，單位：°C/min)

溶液		FeCl ₂ +水	FeCl ₂ +亞	FeCl ₂ +廣	FeCl ₃ +水	FeCl ₃ +亞	FeCl ₃ +廣
暗箱內	末溫 (°C)	37.5	32.5	22	36	26.5	21
	溫差 (°C)	18	13	2.5	16.5	7	1.5
	溫度變化率	1.2	0.87	0.17	1.1	0.47	0.1
暗箱外	末溫 (°C)	35	31.5	21	36	24.5	21
	溫差 (°C)	15.5	12	1.5	16.5	5	1.5
	溫度變化率	1.03	0.8	0.1	1.1	0.33	0.1

- (一) 同條件下，在亞甲藍液中的溫度皆比廣用試劑高，顯示放熱反應比在廣用試劑中明顯。
- (二) 溫度變化率為：10%+亞 > 5%+亞 > 10%+廣 > 5%+廣。
- (三) 綜合所觀察的顏色、透光度、濕度和溫度的表現，亞甲藍液皆比廣用試劑佳。
- (四) 溫度隨時間變化的現象將合併在實驗（三和四）一起討論。

實驗目的（二）：環境溫溼度對雙氧水反應的影響

[濕度初論]不同環境溫溼度對雙氧水反應速率有明顯的差異，因為我們沒有控制溫濕度的設備，所以採取環境溫溼度作為操縱變因，在雙氧水及催化劑定量的情況下，其趨勢相近，如下表 6-5、表 6-6、圖 6-4 和圖 6-5：

表 6-6 氯化鐵和氯化亞鐵在亞甲藍溶液中催化反應後的濕度（室溫 25°C）

反應時間 (分)	FeCl ₂ +水	FeCl ₃ +水	FeCl ₂ +亞	FeCl ₃ +亞
0	54%	57%	57%	57%
1	54%	58%	58%	57%
2	55%	59%	60%	60%
3	61%	61%	63%	62%
4	64%	66%	71%	67%
5	68%	73%	80%	73%
6	73%	80%	86%	80%
7	80%	83%	88%	86%
8	82%	88%	90%	88%
9	86%	88%	90%	90%
10	87%	90%	90%	90%
11	89%	90%	91%	90%
12	89%	90%	91%	91%
13	91%	90%	91%	91%
14	91%	90%	91%	91%
15	91%	91%		91%
濕度變化率	2.8%	2.3%	3.1%	2.8%

表 6-5 氯化鐵和氯化亞鐵在亞甲藍溶液中催化反應後的濕度（室溫 27°C）

反應時間 (分)	FeCl ₂ +水	FeCl ₃ +水	FeCl ₂ +亞	FeCl ₃ +亞
0	63%	63%	63%	63%
0.5	63%	63%	63%	63%
1	64%	63%	64%	63%
1.5	65%	63%	65%	64%
2	69%	64%	67%	65%
2.5	75%	66%	71%	66%
3	80%	69%	77%	68%
3.5	83%	74%	81%	70%
4	88%	77%	85%	72%
4.5	88%	79%	88%	76%
5	90%	84%	88%	81%
濕度變化率	5.4%	4.2%	5%	3.6%

註：濕度變化率單位為 %/min

圖6-4 氯化鐵和氯化亞鐵在對照組和亞甲藍液中的濕度與時間關係曲線圖 (27°C)

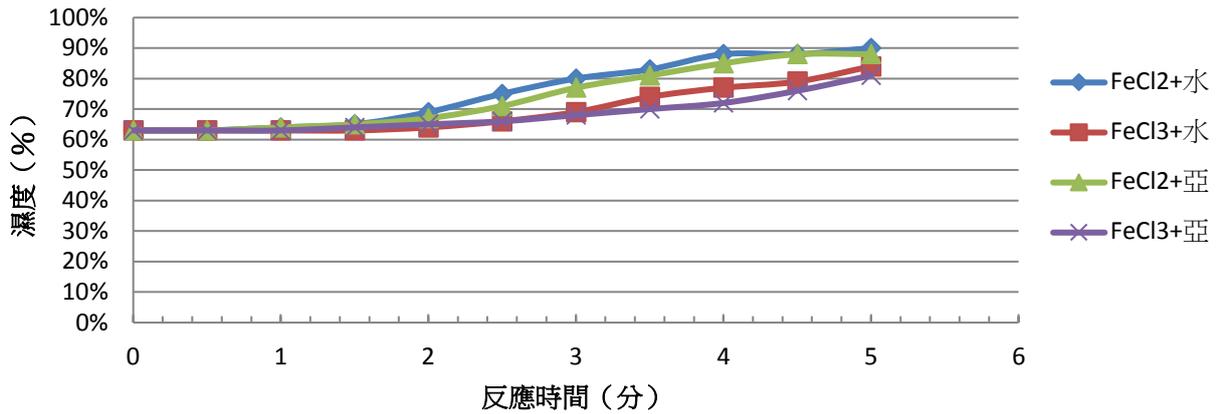


圖6-5 氯化鐵和氯化亞鐵在對照組和亞甲藍液中的濕度與時間關係曲線圖 (25°C)

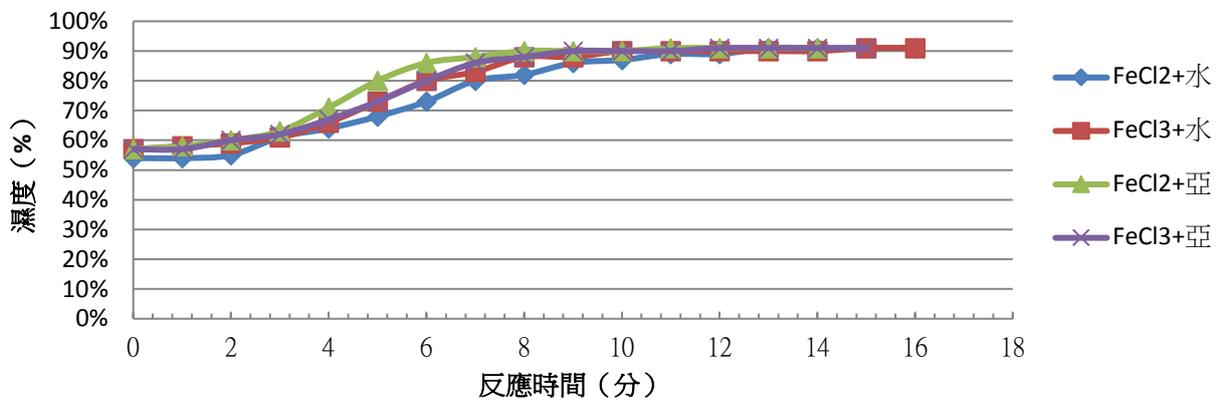
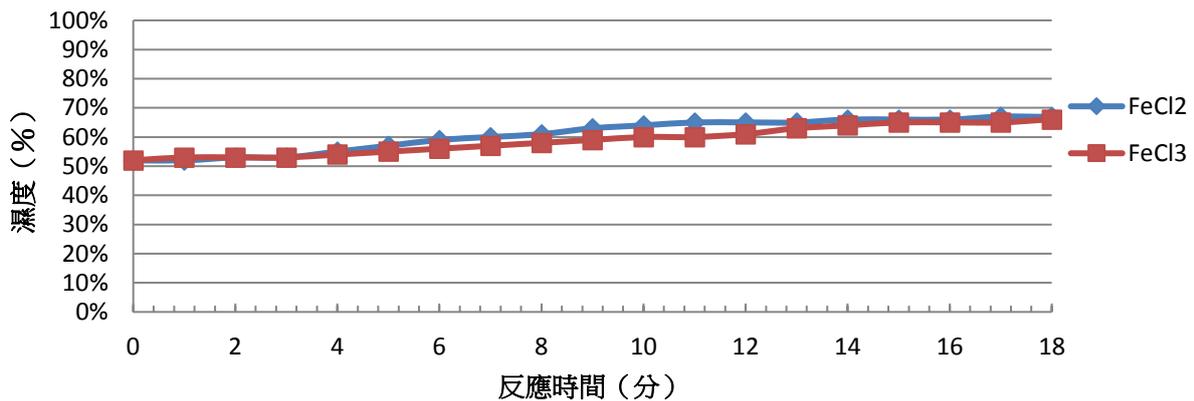


圖6-6 氯化鐵和氯化亞鐵在亞甲藍液中的濕度與時間關係曲線圖 (15°C)



在多次的實驗裡，可得

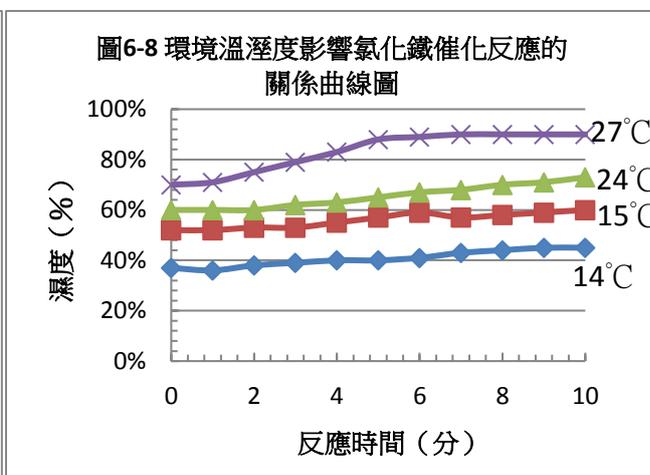
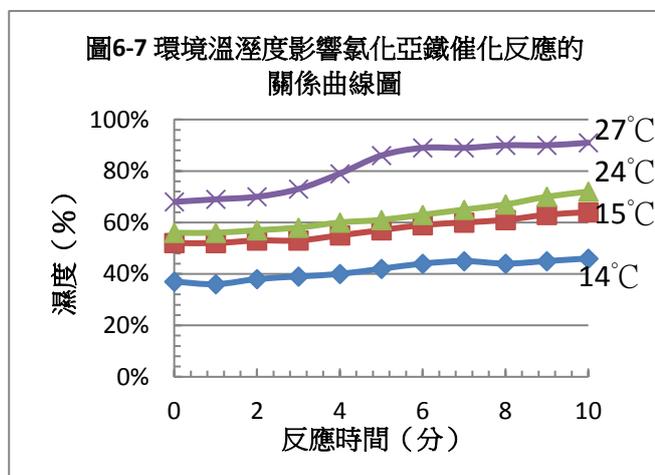
- (一) 室溫高時，反應時間縮短，畫了曲線(圖 6-4)後，發現圖形雖然可以看出氯化亞鐵和氯化鐵反應的差異，但無法看出最後平衡的狀態，於是又將觀測時間拉長 (圖 6-5)，以便了解更多資訊。
- (二) 反應快慢的順序大多是 $\text{FeCl}_2+\text{水} > \text{FeCl}_2+\text{亞} > \text{FeCl}_3+\text{水} > \text{FeCl}_3+\text{亞}$ 。

(三) 不論何種溶液，分解反應皆趨近相同濕度，意味著反應平衡不受氯化鐵或氯化亞鐵和顯色溶液影響，換句話說，由此可推論氯化鐵或氯化亞鐵扮演催化劑的角色。

(四) 高溫時 3~8 分鐘之間，濕度變化率比開始和結束大；低溫時，反應時間加長(如圖 6-6)，溫度變化率最明顯的差距則拉長至 3~15 分鐘，使得氯化亞鐵和氯化鐵的反應速率差距變小。在冬天，雖然反應時間加長，依然可在課堂上進行。

[濕度續論]將從冬天到春夏，不同環境下的反應濕度整理如下表 6-7、圖 6-7 和圖 6-8：

表 6-7 環境溫溼度對雙氧水反應影響的數據 (亞甲藍液)								
催化劑	氯化鐵				氯化亞鐵			
反應時間	14°C	15°C	24°C	27°C	14°C	15°C	24°C	27°C
0	37%	52%	60%	70%	37%	52%	56%	68%
1	36%	52%	60%	71%	36%	52%	56%	69%
2	38%	53%	60%	75%	38%	53%	57%	70%
3	39%	53%	62%	79%	39%	53%	58%	73%
4	40%	55%	63%	83%	40%	55%	60%	79%
5	40%	57%	65%	88%	42%	57%	61%	86%
6	41%	59%	67%	89%	44%	59%	63%	89%
7	43%	57%	68%	90%	45%	60%	65%	89%
8	44%	58%	70%	90%	44%	61%	67%	90%
9	45%	59%	71%	90%	45%	63%	70%	90%
10	45%	60%	73%	90%	46%	64%	72%	91%
濕度變化率(%/min)	0.8%	0.8%	1.3%	2.0%	0.9%	1.2%	1.6%	2.3%



(五) 由表 6-7 可知氯化亞鐵和氯化鐵在高濕高溫的反應速率大於低濕低溫。依據碰撞理論，當溫度提高，分子能量增加，使有效碰撞增加，導致原子鍵易被打斷，也容易生成，使反應速率變快。然而我們在課堂上學到溫度提高不利於放熱反應，同學常會以為溫度提高，放熱反應速率要變差，本研究的雙氧水是放熱反應的一種，可善用此例讓同學知道溫度增加對正逆反應都有幫助，只是增加幅度不同，所以即使是放熱反應，溫度提高，反應速率還是會增加。

表 6-8 室溫相同濕度不同的影響數據
(亞甲藍液, 27°C)

催化劑	FeCl ₂		FeCl ₃	
反應時間	"68%"	"63%"	"70%"	"61%"
0	68%	63%	70%	61%
1	69%	64%	71%	61%
2	70%	67%	75%	63%
3	73%	77%	79%	66%
4	79%	85%	83%	70%
5	86%	88%	88%	79%
6	89%	90%	89%	85%
7	89%	91%	90%	89%
濕度變化率	3.0%	4.0%	2.9%	4.0%

表 6-9 濕度相同室溫不同的影響數據
(亞甲藍液)

催化劑	FeCl ₂		FeCl ₃	
反應時間	"27°C "	"20°C "	"24°C "	"17°C "
0	68%	68%	60%	60%
1	69%	68%	60%	60%
2	70%	68%	60%	61%
3	73%	68%	62%	61%
4	79%	69%	63%	62%
5	86%	70%	65%	63%
6	89%	71%	67%	64%
7	89%	73%	68%	66%
濕度變化率	3.0%	0.7%	1.1%	0.9%

圖6-9 濕度對反應速率的影響 (FeCl₂)

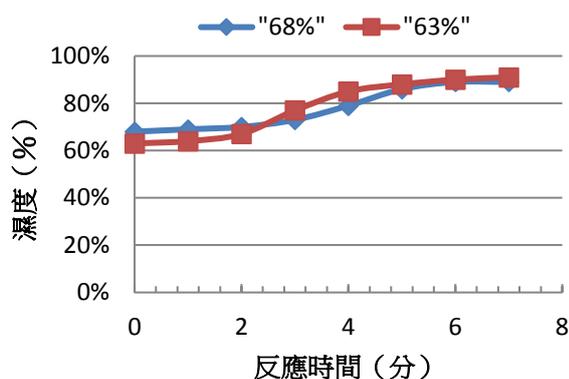


圖6-10 濕度對反應速率的影響 (FeCl₃)

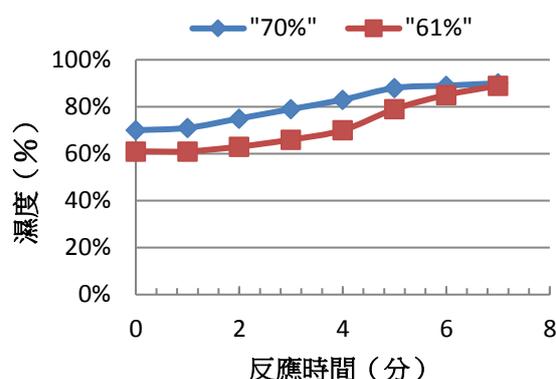


圖6-11 溫度對反應速率的影響 (FeCl₂)

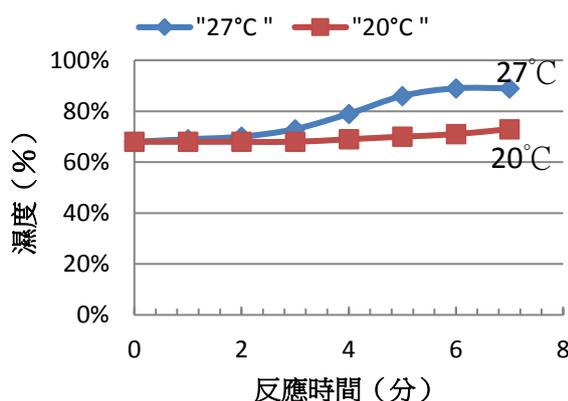
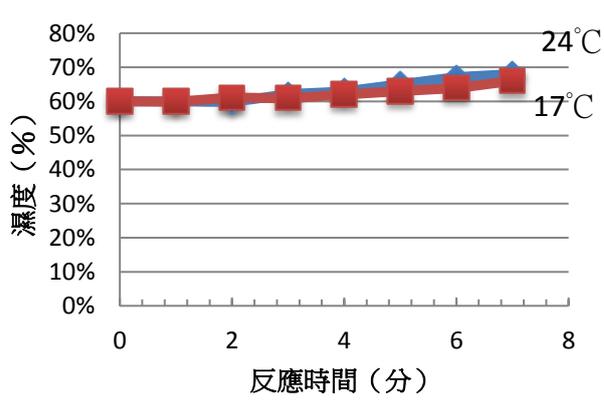


圖6-12 溫度對反應速率的影響 (FeCl₃)



[濕度再論-環境濕度變因]

(六) 為釐清溫度和濕度各自造成的影響，我們將室溫相同濕度不同的數據整理如表 6-8、圖 6-9 和圖 6-10：已知雙氧水反應會產生水，其化學反應式為 $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ ，依據勒沙特列原理，生成物少時，有助於反應向生成物 (H_2O) 方向進行，濕度就是測量水氣的指標，因此空氣中的水氣較多時，反而會使反應速率下降。本研究顯示低濕變化率較高濕變化率大，符合勒沙特列原理論述。

[濕度再論-環境溫度變因]

(七) 將濕度相同室溫不同的數據整理如上表 6-9 和圖 6-11、圖 6-12：

- (1) 顯見氯化亞鐵的反應速率比氯化鐵容易受溫度影響。依據化學動力論，分子動能 $\frac{1}{2}mv^2$ 與絕對溫度T成正比，又碰撞頻率與 \sqrt{T} 成正比，當溫度從 20°C 上升至 27°C，意味著碰撞頻率只增加 $\sqrt{\frac{300}{293}} - 1 = 0.012 = 1.2\%$ ，如果只是單一離子的碰撞，不會造成氯化亞鐵的化學反應速率變為 4.3 倍（表 6-9：3%/0.7%），顯示氯化亞鐵的碰撞頻率比氯化鐵複雜，這可能是亞鐵離子比鐵離子不穩定造成的，查文獻，已知亞鐵離子對雙氧水會進行分解產生自由基，再透過自由基連鎖碰撞，提高有效碰撞的機率（參考第二頁），溫度越高，能量越大，促使自由基連鎖+有效碰撞機率大增，因此氯化亞鐵反應比氯化鐵更明顯。
- (2) 將氯化亞鐵催化反應套入阿瑞尼士溫度與反應速率理論，其關係式：

$$\log\left(\frac{k_1}{k_2}\right) = \log\frac{k_1[H_2O_2]^x[FeCl_2]^y}{k_2[H_2O_2]^x[FeCl_2]^y} = \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right) = -\frac{E_a}{2.303R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right),$$

將表 6-9 濕度反應速率和溫度（同濃度）代入，可得：

氯化亞鐵催化對應的活化能為 $E_a(FeCl_2) = \log 4.3 * 2.303 * 8.314 * 1 / (\frac{1}{293} - \frac{1}{300}) = 121.3 \text{ kJ/mol}$

同理，將氯化鐵的濕度反應速率和溫度代入，可得：

氯化鐵催化對應的活化能 $E_a(FeCl_3) = \log 1.2 * 2.303 * 8.314 * 1 / (\frac{1}{290} - \frac{1}{297}) = 30 \text{ kJ/mol}$

顯示氯化亞鐵催化對應的活化能大約是氯化鐵的四倍！！

活化能高時，溫度一旦提高，反應速率會變化更明顯，

也就說氯化亞鐵比氯化鐵易受溫度影響，圖 6-11 和圖 6-12 恰好可說明此現象！！

計算表 6-9 的濕度變化率，溫度升高，氯化亞鐵反應變化率增加約為氯化鐵的 3.58 倍，因溫度略有不同，但接近理論的四倍。

意味著溫度提高，使分子跨過活化能門檻，參與反應的機率提高四倍左右！！

備註 4：表 6-9 不同溫度的濕度變化率計算：

$FeCl_2 : 3\%/0.7\% = 4.3$ $FeCl_3 : 1.1\%/0.9\% = 1.22$ $FeCl_2/FeCl_3 = 4.3/1.22 = 3.58$

(八) 觀察圖 6-7 和圖 6-8，高溫曲線不同於低溫曲線，意味著環境溫溼度不同，雙氧水的反應級數不同。

(九) 總結：在濕度應變變因的討論之下，可得

- (1) 氯化亞鐵催化的反應速率比氯化鐵大。
- (2) 濕度增加，催化反應速率會變慢。
- (3) 室溫增加，催化反應速率會變快。

[質量] 課堂上，老師有教我們反應速率 = $\frac{\text{反應物消耗量}}{\text{時間}} = \frac{\text{生成物產量}}{\text{時間}}$ ，前面已試圖用濕度來探討反應速率，為了比較差異，所以我們又選擇了雙氧水消耗質量作為探討的應變變因（質量變化率，單位為 g/min），所得結果如下表 6-10、表 6-11 和圖 6-13、圖 6-14：

表 6-10 雙氧水在不同條件下的剩餘質量（克） (室溫 25°C 濕度 69%)				
水溶液				
時間（分）	FeCl ₂ +水	FeCl ₃ +水	FeCl ₂ +亞	FeCl ₃ +亞
0	2.42	2.465	2.46	2.487
1	2.388	2.450	2.443	2.484
2	2.335	2.422	2.393	2.464
3	2.308	2.380	2.353	2.429
4	2.298	2.358	2.338	2.387
5	2.295	2.345	2.333	2.362

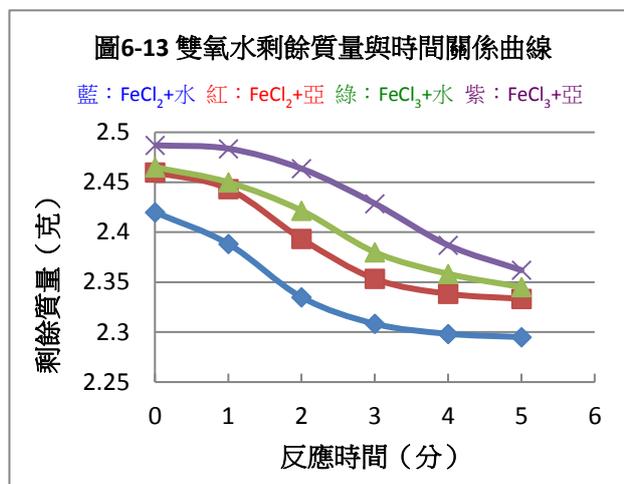
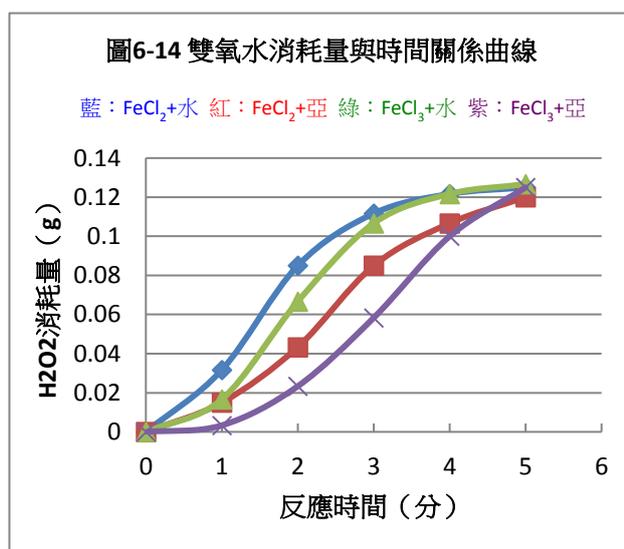


表 6-11 雙氧水在不同條件下的消耗質量（克） (室溫 25°C 濕度 69%)				
水溶液				
時間(分)	FeCl ₂ +水	FeCl ₂ +亞	FeCl ₃ +水	FeCl ₃ +亞
0	0	0	0	0
1	0.032	0.017	0.015	0.003
2	0.085	0.067	0.043	0.023
3	0.112	0.107	0.085	0.058
4	0.122	0.122	0.107	0.100
5	0.125	0.127	0.120	0.125
質量變化率	0.025	0.025	0.024	0.025



- (一) 圖 6-13 顯示雙氧水經過一段時間後的剩餘質量，各自觀察氯化亞鐵和氯化鐵的曲線，雖然起始質量不相同（操作誤差），但可看見曲線近似平行，意味著**相同催化劑反應速率的趨勢不受亞甲藍液影響**。
- (二) 由圖 6-14 的切線斜率觀察，可見氯化亞鐵的反應速率隨著時間增加而漸減（曲線開口向下）；氯化鐵則相反（曲線開口向上），隨著時間增加是漸增，此現象與圖 6-4 和圖 6-5 的濕度曲線相似，但消耗質量曲線更明顯，這些圖形在在說明**氯化亞鐵和氯化鐵的催化機制不相同**。
- (三) 依據文獻，雙氧水反應屬一級反應，然觀察圖 6-13 和圖 6-14 質量變化，曲線並非線性，是否意味著反應級數不是一級反應？由於反應過程中會不斷地產生氣泡，影響體積的量化，於是我們將在下一個實驗目的，以雙氧水和催化劑的初始濃度，計量反應速率，試圖找出反應級數，結果請參考實驗目的（三）。

實驗目的（三）：探討雙氧水濃度對反應速率的影響

[濕度-氯化鐵]實驗初期，還在摸索階段，再加上氯化亞鐵變質很快，為避免造成材料的浪費，所以早期實驗數據大多以氯化鐵為主。將不同雙氧水濃度所得的濕度整理如下表 6-12、表 6-13 和圖 6-15、圖 6-16、圖 6-17，其中濕度差 = 濕度₂₀ - 濕度₀；濕度變化率 = 濕度差 / 反應時間：

表 6-12 氯化鐵在不同雙氧水濃度反應下的濕度數據（[FeCl₃]=0.1M，亞=0.005%，室溫 19°C）

雙氧水濃度（體積百分比）									
反應時間（分）	20%	10%	5%	2.5%	反應時間（分）	20%	10%	5%	2.5%
0	65%	66%	65%	66%	11	73%	85%	75%	72%
1	65%	66%	65%	66%	12	74%	86%	77%	73%
2	66%	66%	65%	67%	13	75%	89%	79%	74%
3	66%	69%	66%	67%	14	77%	91%	80%	74%
4	67%	70%	66%	68%	15	79%	93%	81%	75%
5	68%	71%	67%	69%	16	80%	92%	82%	75%
6	69%	74%	69%	69%	17	83%	94%	82%	76%
7	69%	75%	70%	70%	18	85%	94%	84%	76%
8	70%	79%	72%	71%	19	86%	94%	85%	77%
9	71%	82%	73%	71%	20	89%	94%	86%	77%
10	72%	83%	74%	72%	濕度變化率	1.2	1.4	1.0	0.55

表 6-13 氯化鐵在不同雙氧水濃度反應下的濕度數據（[FeCl₃]=0.1M，亞=0.005%，室溫 19°C）

雙氧水濃度（體積百分比，H ₂ O ₂ :H ₂ O 左至右濃度漸小）													
反應時間	10:25	10:30	10:35	10:40	10:50	10:60	反應時間	10:25	10:30	10:35	10:40	10:50	10:60
0	65%	65%	65%	65%	65%	65%	11	85%	80%	78%	76%	75%	75%
1	65%	65%	65%	65%	65%	65%	12	86%	82%	81%	77%	76%	77%
2	67%	65%	65%	66%	65%	66%	13	89%	84%	82%	79%	79%	79%
3	68%	65%	66%	67%	66%	66%	14	90%	85%	86%	81%	80%	80%
4	69%	67%	67%	68%	66%	66%	15	91%	88%	86%	82%	83%	81%
5	71%	68%	67%	70%	67%	67%	16	92%	90%	89%	84%	85%	82%
6	72%	69%	69%	71%	69%	68%	17	92%	90%	91%	85%	86%	82%
7	74%	71%	71%	72%	70%	69%	18	94%	91%	93%	88%	86%	84%
8	76%	72%	72%	73%	72%	71%	19	94%	91%	93%	90%	89%	85%
9	80%	75%	74%	74%	73%	73%	20	94%	92%	94%	90%	89%	86%
10	83%	78%	75%	74%	74%	74%	濕度變化率	1.45	1.35	1.45	1.25	1.2	1.0

(一) 在比色法分析裡，已知高濃度雙氧水以相同方式注射後，溶液並未均勻混合(如圖 6-15)，因此表 6-13 的 20%濃度並未正常表現，導致所得的濕度變化率反而比 10%小，因此 20%以上實驗僅作參考。



圖 6-15

圖6-16 氯化鐵在不同雙氧水濃度反應下的濕度數據(19°C 65%)

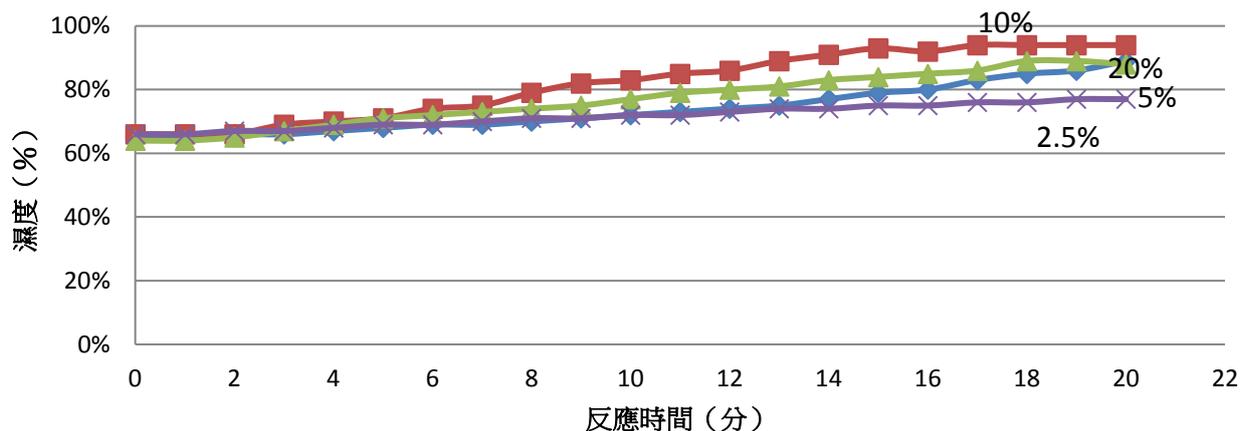
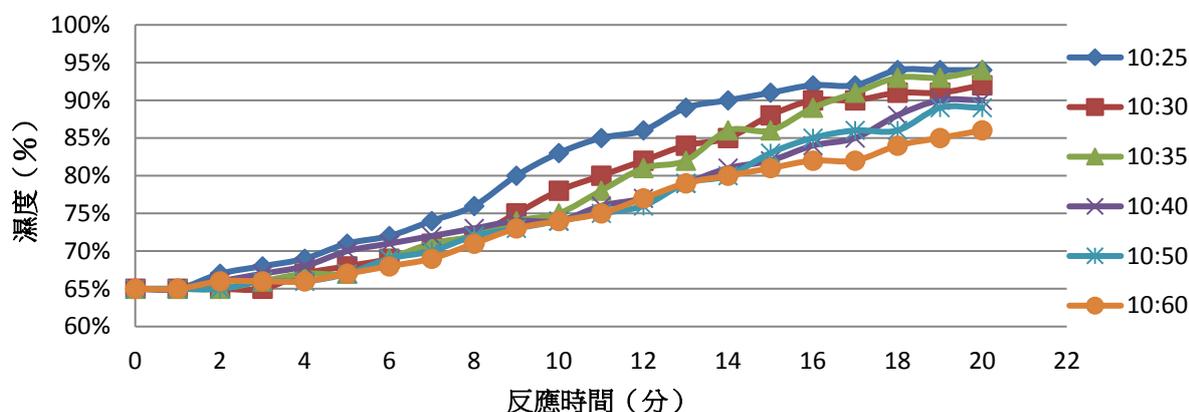


圖6-17 氯化鐵在不同雙氧水濃度反應下的濕度數據(19°C 65%)



(二) 經過兩分鐘後，室溫 20°C 以下，10%以下的雙氧水濃度，實驗大都呈現線性，若要讓同學理解線性和非線性的反應速率，這是很好的例子。

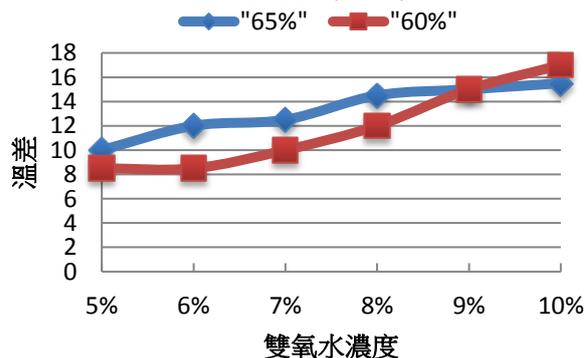
(三) 依據反應速率理論，濃度越高，反應速率越大，由表 6-12 和表 6-13 確實可看見此趨勢，但平均濕度變化率並沒有呈比例增加，推究其原因，是因為我們一開始使用的是體積百分比，但查歷年來的實驗，大都以重量百分比或體積莫耳濃度表示，因此，本實驗未能按比例改變。由於，當時溫度偏低，反應時間過長，所以後來就沒再繼續進行濃度的比較。

[溫度-氯化鐵]

表 6-14 比較 FeCl₃ 催化不同濃度(體積百分比) 雙氧水後的溫度變化(20°C) 單位: °C

雙氧水濃度	
環境濕度	10:60 10:50 10:40 10:35 10:30 10:25
"65%"	10 12 12.5 14.5 15 15.5
"60%"	8.5 8.5 10 12 15 17

圖6-18 比較FeCl₃催化不同濃度雙氧水後的溫度變化(20°C)



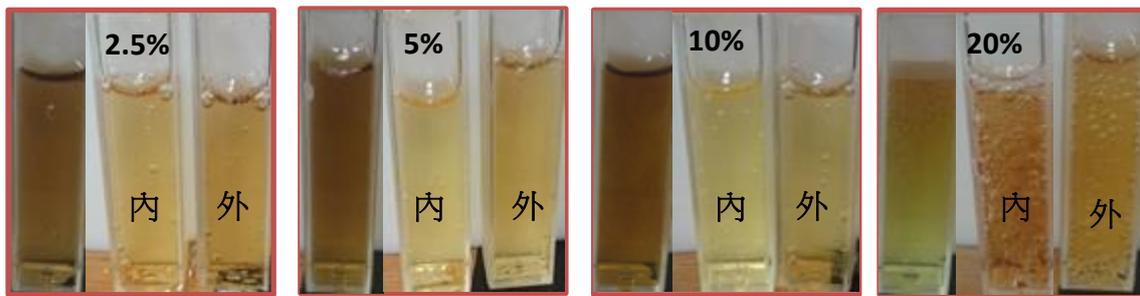


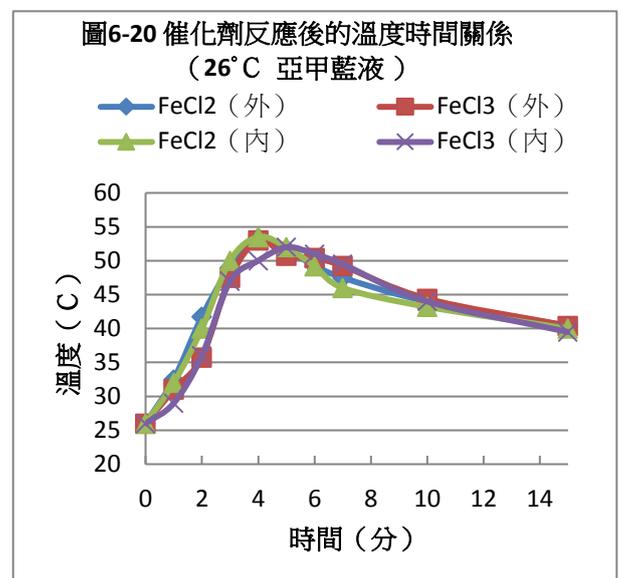
圖 6-19 FeCl₃ 在暗箱內外催化不同濃度雙氧水的顏色變化
 ([FeCl₂]=0.1M, 亞甲藍液=0.005%, 濕度 60%, 室溫 17°C)

- (一) 表 6-14 討論 20 分鐘後的溫度變化，可知濃度越高，溫度也越高。
- (二) 經過相同反應時間後，每一次暗箱內的反應皆比暗箱外激烈，溫度有時比外面高，推論可能的原因有二：(1) 時間差，由於時間差幾秒，溫度就會上升或下降，導致數據會又落差。(2) 暗箱是封閉的，可能會有聚熱效果，使溫度更高，反應更快，顏色更淡（如圖 6-19）。

[溫度-催化劑和暗箱內外比較]

實驗方法穩定後，將氯化亞鐵一起加入探討，經過 20 分鐘之後，發現溫度卻比氯化鐵低，不合常理，我們推論是因為氯化亞鐵反應提早完成，以致熱量無法集中逸散至環境中，導致溫度下降，於是後來將實驗方法改成兩種方式，一種是每隔一分鐘記錄一次溫度，以及測量反應的最高溫。為了進一步了解催化反應後的溫度表現，我們每隔一分鐘紀錄溫度一次，同時紀錄內外的溫度，所得結果如表 6-15 和圖 6-20：

時間 (分)	FeCl ₂ (外)	FeCl ₃ (外)	FeCl ₂ (內)	FeCl ₃ (內)
0	26	26	26	26
1	32.5	31.0	32	29
2	41.8	35.8	40	36
3	49.0	47.5	50	47
4	53.4	53.0	53.5	50
5	51.8	50.8	52	52
6	49.3	50.4	49.2	51
7	47.5	49.3	46	49.5
10	44.0	44.4	43.2	44
15	40.4	40.4	40	39.5



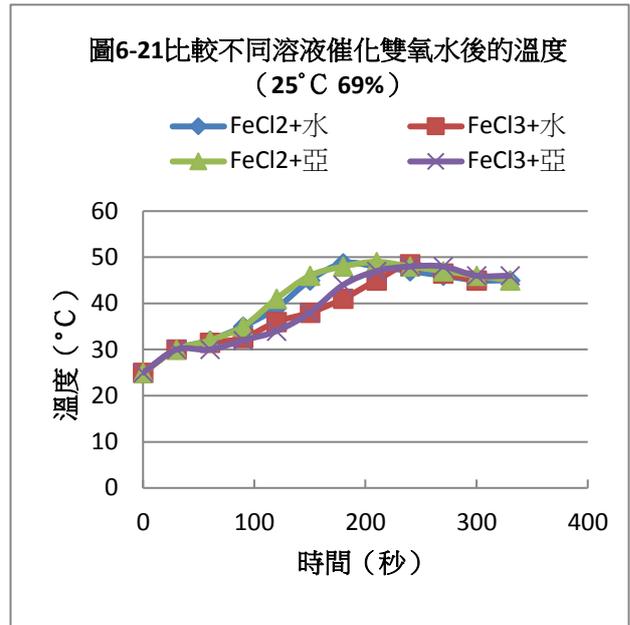
觀察結果可知：

- (一) 反應到最高溫前，氯化亞鐵溫度高於氯化鐵，顯示溫度也可作為判斷催化劑快慢的指標。
- (二) 初期反應，氯化亞鐵溫度上升比氯化鐵快，再次推論兩者反應機制不同。
- (三) 最高溫度差異不大，顯示最高溫度幾乎不受催化劑種類影響。

[溫度-溶液比較]

表 6-16 比較不同溶液催化雙氧水後的溫度
(25°C 69%) 單位：°C

時間 (分)	FeCl ₂ +水	FeCl ₃ +水	FeCl ₂ +亞	FeCl ₃ +亞
0	25	25	25	25
30	30	30	30	30
60	32	31.5	32	30
90	35	32.5	35	32
120	39	36	41	34
150	45	38	46	38
180	48.7	41	48	44
210	48	45	49	47
240	47	48.5	48	48
270	46	46.5	47	48
300	45	45	46	46
330	45		45	46



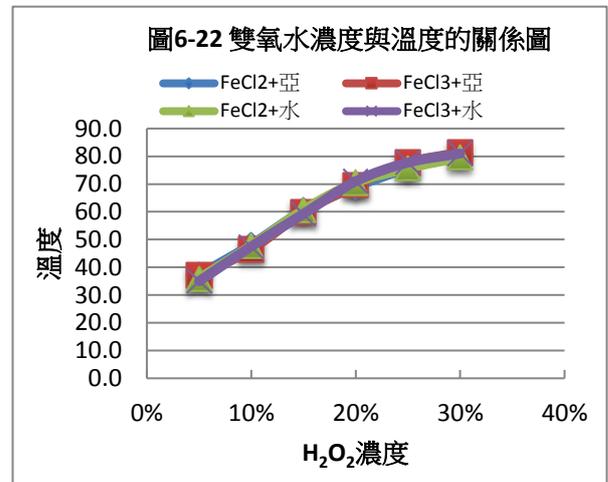
除了觀察暗箱內外的差異，我們還比較不同溶液的溫度與反應時間關係：

- (一) 在溫度表現上，依舊顯示氯化亞鐵反應比氯化鐵快。
- (二) 亞甲藍液不影響雙氧水反應後的最大溫度，與前述的濕度、質量討論的結果一致。

[溫度-濃度比較]

表 6-17 比較不同溶液催化不同濃度(重量百分比)
雙氧水後的最高溫度(室溫 24°C，單位：°C)

水溶液				
H ₂ O ₂ 濃度	FeCl ₂ +亞	FeCl ₃ +亞	FeCl ₂ +水	FeCl ₃ +水
30%	80.8	81.4	79.6	81.0
25%	75.7	77.6	75.8	77.8
20%	69.1	69.6	70.5	71.0
15%	60.5	59.9	60.7	59.3
10%	48.2	46.5	47.8	47.5
5%	37.3	37.0	36.0	35.0



- (一) 根據表 6-17 和圖 6-22，可明顯看出雙氧水濃度 20%以內，雙氧水反應後的最高溫度與濃度幾乎成正比，濃度越高，溫度越高。
- (二) 氯化亞鐵和氯化鐵不影響反應後的最高溫度，可說明氯化亞鐵和氯化鐵具有催化劑特徵，此結果與濕度討論相呼應。
- (三) 綜合前述圖 6-20、圖 6-21、圖 6-22 的探討，顯示最大溫度與氯化鐵、氯化亞鐵和亞甲藍液無關。

[反應級數]為了進一步了解氯化亞鐵和氯化鐵的反應機制，於是我們想用反應級數來討論：根據反應速率理論，可將催化劑作用下的雙氧水分解的反應速率表示成：

反應速率 $R(\text{FeCl}_2) = k[\text{H}_2\text{O}_2]^x[\text{FeCl}_2]^y$ 和 $R(\text{FeCl}_3) = k[\text{H}_2\text{O}_2]^m[\text{FeCl}_3]^n$ ，由於反應過程中質量和體積都會改變，難以濃度表示，故以初濃度和初反應速率來決定反應級數，並將實驗所得資料整理如表 6-18 和表 6-19：

反應時間 (分)	10% H_2O_2	5% H_2O_2	10% H_2O_2	10% H_2O_2	5% H_2O_2	10% H_2O_2
	0.1M FeCl_2	0.1M FeCl_2	0.05M FeCl_2	0.1M FeCl_3	0.1M FeCl_3	0.05M FeCl_3
0	2.48	2.44	2.51	2.47	2.47	2.47
1	2.44	2.42	2.50	2.43	2.46	2.46
2	2.37	2.39	2.49	2.37	2.44	2.45
3	2.35	2.38	2.48	2.34	2.42	2.44
4	2.34	2.37	2.47	2.33	2.41	2.43
5	2.34	2.36	2.45	2.33	2.41	2.42

反應時間 (分)	10% H_2O_2	5% H_2O_2	10% H_2O_2	10% H_2O_2	5% H_2O_2	10% H_2O_2
	0.1M FeCl_2	0.1M FeCl_2	0.05M FeCl_2	0.1M FeCl_3	0.1M FeCl_3	0.05M FeCl_3
1	0.04	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01
2	0.07	0.03	0.01	0.06	0.02	0.01
3	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01
4	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
5	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01

將資料代入相關式，則：

$$\text{H}_2\text{O}_2 : \frac{0.04}{0.02} = 2 = \frac{[10\% \text{H}_2\text{O}_2]^x}{[5\% \text{H}_2\text{O}_2]^x} = \left[\frac{2}{1}\right]^x, \log 2 = x \log 2, x=1;$$

$$\text{FeCl}_2 : \frac{0.04}{0.01} = 4 = \frac{[0.1M \text{FeCl}_2]^y}{[0.05M \text{FeCl}_2]^y} = \left[\frac{2}{1}\right]^y, \log 4 = y \log 2, y=2$$

$R(\text{FeCl}_2) = k[\text{H}_2\text{O}_2][\text{FeCl}_2]^2$ ，總反應級數為 $1+2=3$ ；

$$\text{H}_2\text{O}_2 : \frac{0.04}{0.02} = 2 = \frac{[10\% \text{H}_2\text{O}_2]^m}{[5\% \text{H}_2\text{O}_2]^n} = \left[\frac{2}{1}\right]^m, \log 2 = m \log 2, m=1$$

$$\text{FeCl}_3 : \frac{0.04}{0.01} = 4 = \frac{[0.1M \text{FeCl}_3]^n}{[0.05M \text{FeCl}_3]^n} = \left[\frac{2}{1}\right]^n, \log 4 = n \log 2, n=2$$

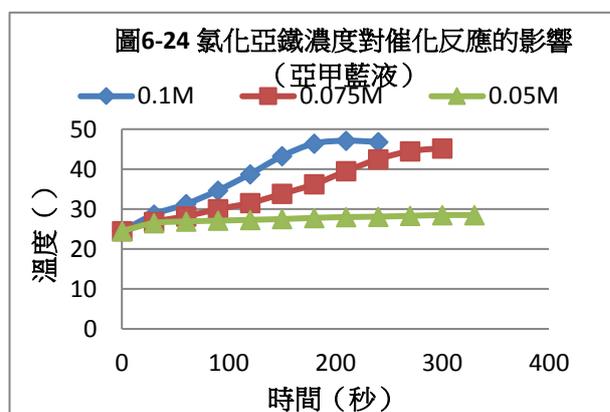
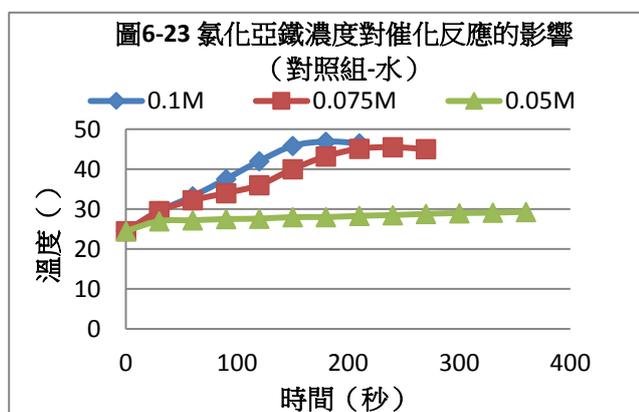
$R(\text{FeCl}_3) = k[\text{H}_2\text{O}_2][\text{FeCl}_3]^2$ ，總反應級數為 $1+2=3$ ；

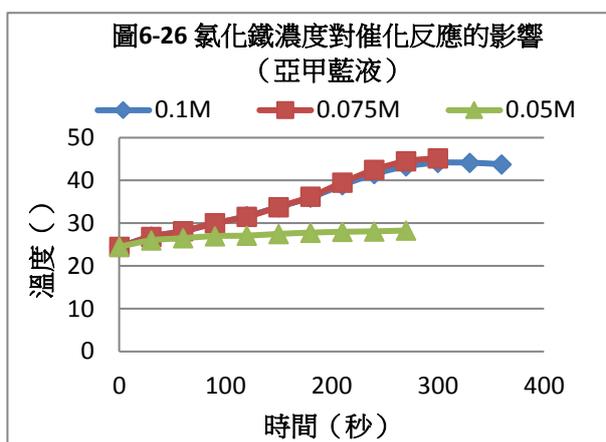
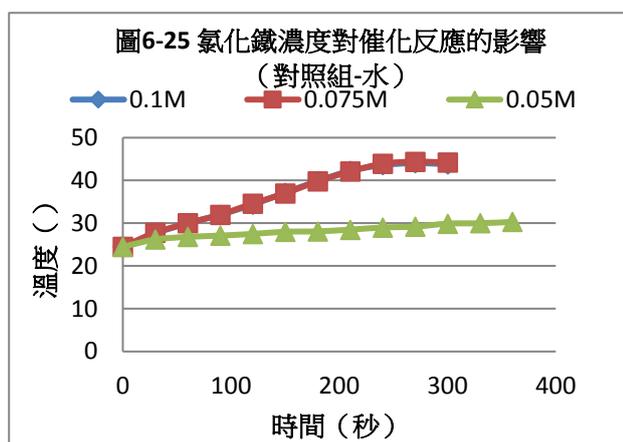
- (一) 經過實驗和計算後，不論是氯化亞鐵或氯化鐵催化雙氧水分解反應，雙氧水濃度對反應速率的影響，都是一級，與第46屆科展文獻速戰速決—以雙氧水的分解探討反應速率的結論相同。
- (二) 氯化亞鐵和氯化鐵對雙氧水分解反應的速率都是二級，表示氯化亞鐵和氯化鐵不僅具有催化劑的角色，還兼當反應物，這種現象恰可說明他們催化反應後的顏色皆與原來不同（請參考圖6-1）。

實驗目的（四）：探討氯化亞鐵與氯化鐵濃度對雙氧水反應速率的影響

根據實驗目的（三）得知氯化亞鐵和氯化鐵對雙氧水的分解反應是二級反應，於是我們又著手探討相同雙氧水濃度，不同催化劑濃度造成的影響，由於濕度不易調整，故此處只列出溫度應變變因，將結果整理如表 6-20、圖 6-23、圖 6-24、圖 6-25 和圖 6-26：

催化劑	FeCl ₂						FeCl ₃					
	水			亞			水			亞		
	0.1M	0.075M	0.05M	0.1M	0.075M	0.05M	0.1M	0.075M	0.05M	0.1M	0.075M	0.05M
時間 (秒)	0.1M	0.075M	0.05M	0.1M	0.075M	0.05M	0.1M	0.075M	0.05M	0.1M	0.075M	0.05M
0	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5
30	29.5	29.5	27	28.7	26.8	26.5	27.7	27.8	26.2	26.9	26.8	26
60	33.2	32.2	27.2	31.3	28.2	26.9	30.0	30	26.8	28.1	28.2	26.5
90	37.5	34	27.5	34.7	30	27.1	32.0	32	27.1	30.0	30	27
120	42	36	27.6	38.8	31.5	27.3	34.4	34.6	27.5	31.7	31.5	27.1
150	45.8	40	28	43.3	33.8	27.5	37.2	37	28	33.8	33.8	27.5
180	46.9	43.2	28	46.4	36.2	27.8	39.9	39.8	28.1	36.0	36.2	27.8
210	46.5	45.1	28.3	47.1	39.5	28	42.3	42.1	28.5	38.9	39.5	28
240		45.5	28.5	46.8	42.5	28.1	43.6	43.9	29	41.5	42.5	28.1
270		45	28.8		44.5	28.3	44.1	44.4	29.2	43.3	44.5	28.3
300			29		45.2	28.5	43.8	44.2	29.9	44.2	45.2	
330			29.1			28.5			30	44.2		
360			29.3						30.3	43.8		
第一分鐘 溫度變化率 (°C/分)	8.7	7.7	2.7	6.8	3.7	2.4	5.5	5.5	2.3	3.6	3.7	2





觀察圖 6-23~圖 6-26，可見：

- (一) 不同濃度對雙氧水分解反應的影響，氯化亞鐵比氯化鐵明顯。
- (二) 濃度 0.1M 比 0.05M 反應大很多，計算第一分鐘初濃度所產生的溫度變化率，其中氯化亞鐵在對照組中的比率最大，約 3.2 倍，氯化鐵則為 2.4 倍。所得數據與反應級數推論出來的結果有一些落差，我們認為原因可能是本研究屬於微量實驗，在秤重上，雖然可測到小數點第三位，但依然會有誤差，評估所看到的實驗結果如濕度，溫度等，在在告訴我們氯化亞鐵反應比氯化鐵快，所以我們認為氯化鐵的級數，可能不是 2 而是 1，而這部分還有待實驗釐清。
- (三) 從濕度、質量和溫度等各種定量和顏色的分析，亞甲藍液雖不影響最終平衡，但會干擾反應時間和速率。推論亞甲藍液和廣用試劑會影響反應速率，可能是因為他們都是大分子，阻礙有效碰撞，使碰撞機率降低，導致反應速率變慢。

柒、結論

本研究在雙氧水分解實驗過程中，經過反覆觀察探究，可總結如下：

- 一、顯色溶液的雙氧水反應中，對照組水最好，又亞甲藍液優於廣用試劑。
- 二、從濕度、溫度、質量計算而得的反應速率：氯化亞鐵優於氯化鐵。
- 三、氯化亞鐵比氯化鐵易受室溫影響，溫度越高，反應越快。
- 四、環境濕度高，氯化亞鐵和氯化鐵的反應速率皆會變慢。
- 五、亞甲藍液和廣用試劑會干擾雙氧水分解反應並降低反應速率。
- 六、氯化亞鐵、氯化鐵和亞甲藍液的最高溫度雷同，也不影響最終平衡。
- 七、雙氧水濃度 20% 以下，最高溫度與雙氧水濃度成正比。
- 八、以反應級數來看，氯化亞鐵和氯化鐵都是二級，雙氧水只有一級。
- 九、課堂上進行實驗的最佳條件：0.005% 亞甲藍液、0.1M FeCl_2 或 FeCl_3 、10% 雙氧水。
- 十、氯化亞鐵或氯化鐵反應時間不長易操作，可讓同學在課堂上進行比較，並從中學習計算理論的反應速率和反應級數，以及催化劑的概念，同時達到定性又定量的多元綠色化學。

捌、未來展望

雖然我們從七下就開始進行探討，但依然還有很多實驗未完成，希望未來能比較微量和巨觀所呈現的（1）反應物活化能（2）反應級數的差異，以便建立一個完整的資料庫。

玖、參考資料

- 一、過氧化氫 維基百科 <https://zh.wikipedia.org/wiki/过氧化氢>
- 二、呂凱筠、林侑瑩，2002，以自製反應儀器研究雙氧水分解反應的影響。中華民國第 42 屆全國中小學科學展覽會作品。
- 三、林建諭、張紘齊、詹柏呈，2012，「刑案現場大發現-那是血嗎？」臺灣國際科學展覽會作品。
- 四、賴品任、鐘晨瑋與張慶驊，2014，「快氧加鞭-催生一對氧」。中華民國第 54 屆全國中小學科學展覽會作品。
- 五、蘇邗、郭家豪與張元誠，2014，「彙而不費」。中華民國第 54 屆全國中小學科學展覽會作品。
- 六、蔡皓羽、謝伊婷、蒙惠玲、劉家慈，2002，「氧樂多-雙氧水的研究及新反應器的研製」第42屆全國中小學科學展覽會作品。
- 七、鍾雅晴、江翊宏、蘇強升，2013，「氧眉吐氣」。第53屆全國中小學科學展覽會作品。
- 八、「速戰速決-以雙氧水的分解探討」，2006。中華民國第46屆中小學科學展覽會作品。
- 九、「e世代的製氧法」，2002。中華民國第42屆中小學科學展覽會作品。
- 十、雙氧水分解的級數和反應速率
http://tpub.scu.edu.tw/scutwebpub/website/DocUpload/CourseTeaching/fjkuo20082261488_1.pdf
- 十一、水解 https://market.cloud.edu.tw/content/vocation/food_production/tn_ag/unit/chapter10.htm
- 十二、維基百科 亞甲藍 <https://zh.wikipedia.org/wiki/亞甲藍>
- 十三、網路 3D 設計軟體 Tinkercad <https://www.tinkercad.com/>
- 十四、Arduino 範例 19：利用 DHT11 抓取溫度和濕度 Ming' s blogger
<http://ming-shian.blogspot.tw/2014/05/arduino19dht11.html>
- 十五、Arduino 筆記-Lab8 使用光敏電阻控制 LED 燈
<http://coopermaa2nd.blogspot.tw/2010/12/arduino-lab8-led.html>
- 十六、Arduino 光敏電阻測試 小狐狸事務所
<http://yhhuang1966.blogspot.tw/2015/10/arduino.html>
- 十七、感測器使用-光線亮度 自造者時代-文盛老師的創意天空
<http://dshps.blogspot.tw/2015/03/blog-post.html>
- 十八、ARDUINO 筆記(九)：DHT11 溫濕度感應偵測與 LCD 顯示 天花板隨記
<http://atceiling.blogspot.tw/2013/04/arduino11lcd.html#.WDAsOotnCXg>
- 十九、半導體光導元件 <http://www2.wunan.com.tw/download/5D51-05.pps#288,31>(檢索日期 2009/03/27)。
- 二十、顧達昀、謝坪錡，「亮不亮由我決定 -光敏電阻」。台北市立內湖高級工業職業學校。

【評語】 030216

本研究是一個很深入的研究，但是～超越國中生的作品，而且才七年級。3D 列印與光敏電阻不是重點、實驗意義與目的。有哪些地方超越歷屆科展？這個東西要應用在課堂的哪個部分？實驗有哪些突破？還是可預知的結果？本實驗裝置 arduino 微控制器和 3D 列印設計偵測裝置饒富創意，可以從中看出指導教師及同學之用心，同時針對實驗反應級數進行探討有助於同學了解較進階之化學領域知識。作品較缺乏實際應用之研究，惟對實用性進行深入探討將可使報告更加出色。所設計之儀器可推廣至各國中院校，讓國中生了解吸收儀器的設計原理。作品說明書建議增加目錄以利查閱實驗數據。建議結論用敘述的方式串連整個實驗所觀察到結果，不要用條列的方式。實驗內容觀察詳盡豐富。有詳細交代歷年相關題目的研究內容。

作品海報

摘要

本研究以自製暗箱和arduino感測器全程監控雙氧水在各種條件下催化分解的反應，實驗主要分兩種模式：

一.比色法定性分析顏色

二.Arduino與暗箱定量分析濕度、透光度、溫度

不同以往課堂實驗的二氧化錳催化及排水集氣法觀察雙氧水分解氧氣的實驗，經過本研究反覆測量和比較之後，結果顯示：氯化亞鐵和氯化鐵加上亞甲藍液可透過顏色、反應速率、溫度、濕度、質量和透光性等多元性質，讓同學更有感的理解雙氧水的催化分解反應，同時以少量藥品達到綠色化學的目的。

壹、研究動機

在課堂上學習使用二氧化錳來催化雙氧水反應，雖然二氧化錳可讓我們快速看到反應，但了解催化劑特質就不是很方便，所以我們思考如何運用簡易且費用不貴的工具來探討雙氧水反應，因此，藉由自製的arduino監測工具直接量測微量數據，以分析雙氧水的變化特性。同時透過顏色、透光度和濕度的變化，結合課本雙氧水氣體收集的方式，比較觀測不同性質的方便性和異同，並試圖將操作方法教材化和微量化，使雙氧水實驗可以多樣性的在國中或高中實驗室裡進行小組的比較和探討。

貳、研究目的

一.比色法定性分析氯化亞鐵和氯化鐵的催化反應

二.Arduino與暗箱定量分析氯化亞鐵與氯化鐵催化反應的濕度、透光度、溫度

(一) 比較顯色溶液（亞甲藍液和廣用試劑）對雙氧水反應的影響

(二) 環境溫溼度對雙氧水反應的影響

(三) 探討雙氧水濃度對反應速率的影響

(四) 探討氯化亞鐵與氯化鐵濃度對雙氧水放熱反應的影響

參、研究設備及器材

一、暗箱：網路設計軟體Tinkercad、Fider 3D列印機、PLA(塑料)

二、監測工具：Arduino UNO板、Arduino擴充板、光敏電阻、DHT11溫溼度感測器、杜邦線、USB線

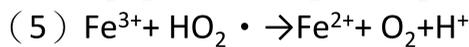
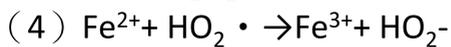
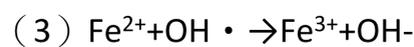
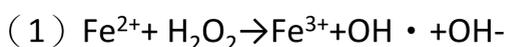
三、實驗主體：

(一) 藥品：CHONEYE-雙氧水、CHONEYE-氯化鐵、CHONEYE-氯化亞鐵、長壽牌亞甲藍染色劑、廣用試劑、純水

(二) 器材：塑膠比色管（4.5ml、10*10*45mm、波長340~800nm）、LED燈、0.5ml針筒、3ml針筒、電子秤、秤量紙、刮杓、燒杯、量筒、濾紙、洗滌瓶、溫度計、玻璃棒、玻璃罐、滴管、吹風機、電風扇

肆、文獻探討

◇ 亞鐵離子和鐵離子的催化反應：



伍、研究方法及流程

一、準備溶液

(一) A組雙氧水濃度：取30%雙氧水10g，加入純水02g，稀釋配製成25%雙氧水溶液，同方法依序稀釋成20%、15%、10%、5%等溶液。

(二) B組雙氧水濃度：方法同A組，將雙氧水改成35%，依序稀釋成 $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=10:25$ （10%）、10:30（約9%）、10:35（約8%）、10:40（7%）、10:50（約6%）、10:60（5%）等溶液。

(三) 氯化鐵水溶液：稱取1.35克氯化鐵（ FeCl_3 ）加水至50ml，配成0.1M濃度備用。濃度0.05M、0.025M、0.01M依此類推。

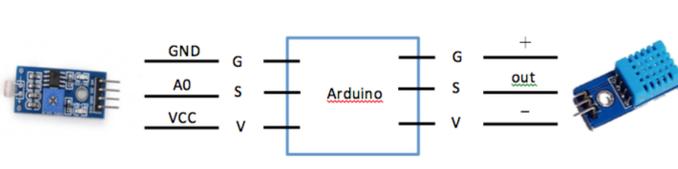
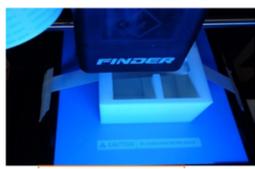
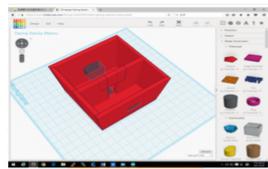
(四) 氯化亞鐵水溶液：稱取0.99克氯化亞鐵（ FeCl_2 ）加水至50ml，配成0.1M濃度備用。稀釋方式同氯化鐵。

(五) 亞甲藍溶液：取0.1%亞甲藍原液5ml稀釋成0.005%亞甲藍液100ml備用。

(六) 廣用試劑：取0.1%廣用試劑原液5ml稀釋成0.005%亞甲藍液100ml備用。

備註：為了方便標記，將氯化亞鐵簡稱亞鐵，氯化鐵簡稱鐵，亞甲藍液簡稱亞，廣用試劑簡稱廣。

二、實驗設備的建立及操作步驟



(1)暗箱製作

(2)暗箱列印

(3)連接電子元件接腳

(4)Arduino裝在暗箱上

(7)實驗主要步驟（提供實驗目的（一））

- 比色管依序注射體積皆為0.48ml的水（對照組）和氯化鐵溶液，再放入暗箱中。
- 接著，注射2.4ml 10%雙氧水溶液於比色管中，放上蓋子。
- 啟動Arduino監控視窗，每隔一分鐘讀取透光度、溼度和溫度，共進行20分鐘。
- 暗箱外放置一組相同條件的比色管，手機攝影以記錄顏色變化。
- 每隔一分鐘記錄暗箱外比色管內溶液的溫度。
- 實驗完後，用吹風機將暗箱濕度降低，並以電風扇降溫，直到回穩到相同溫濕度，以利下一個實驗進行。
- 整理數據，製成圖表並繪製關係曲線圖。
- 將溶液換成亞甲藍液和廣用試劑，分別重複1~7步驟。
- 同理，將氯化鐵換成氯化亞鐵，重複1~7。

備註3：室溫不同時，反應速率不同，因此監測時間會因室溫而調整成10秒或30秒，總時間也會縮短至五或十分鐘。

(5)編寫程式

(6)實驗裝置



圖5-18實驗裝置示意圖

陸、結果與討論

本研究實驗結果主要分兩種模式討論：

一、比色法定性分析

(一) 模仿階段：

注射後**形狀不規則**，環境會影響**顏色判斷**，且不易辨別**反應終點**。

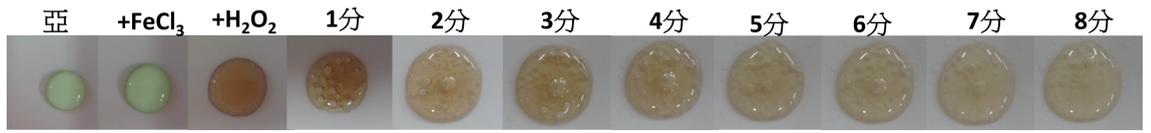


圖5-1 氯化鐵在亞甲藍液中催化雙氧水後，顏色變化的歷程

(二) 初探階段：選擇適合的顯色溶液。亞甲藍液使反應顏色多樣性，有吸睛和辨認的作用。



圖5-2 氯化亞鐵和氯化鐵在溶液中的顏色 (10% H₂O₂ 濕度57%，25°C)

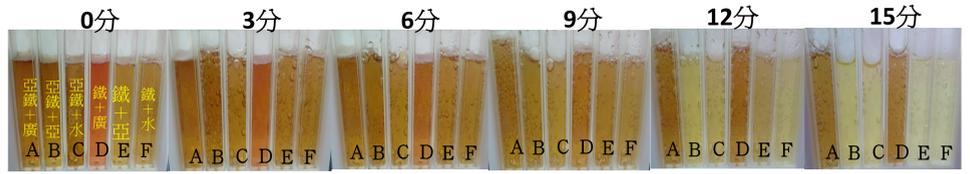


圖5-3 顯色溶液中催化反應的變色現象 (5% H₂O₂ 濕度70%，室溫20°C)

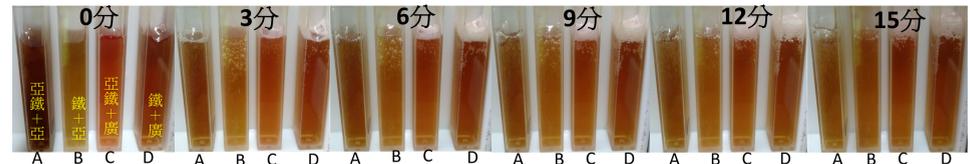


圖5-4 顯色溶液中催化反應的變色現象 (10% H₂O₂ 濕度49%，室溫17°C)

催化劑	氯化亞鐵			氯化鐵			選擇
	未加 H ₂ O ₂	反應起點	反應終點	未加 H ₂ O ₂	反應起點	反應終點	
水	淡黃色	暗褐色	深黃色	深黃色	褐色	淡黃色	2
亞甲藍液	淺藍色	深褐色	深黃色	草綠色	褐色	淡黃色	◇
廣用試劑	紫紅色	紫紅色	深黃色	紫紅色	紫紅色	淡黃色	3

- 在水中，氯化亞鐵淡黃色，氯化鐵深黃色；在亞甲藍液中，氯化亞鐵藍色，氯化鐵綠色，因此，**初始顏色可明顯區分者以亞甲藍液最適合**，其次是水，在實驗室裡，可幫助同學辨認。
- 反應初期，氯化亞鐵的顏色都比氯化鐵深，都會從深褐色變成淺黃色。反應終了，氯化亞鐵顏色比氯化鐵淺，**意味著氯化亞鐵和氯化鐵不是單純的催化劑**。
- 環境溫度越低，反應時間越長，顏色變化也越不明顯。
- 目測法顯示比色管中**產生氣泡的速率是氯化亞鐵+亞>氯化鐵+亞>氯化亞鐵+廣>氯化鐵+廣**。
- 雙氧水在廣用試劑中的反應較亞甲藍液差，**意味著廣用試劑在前期會干擾雙氧水催化反應**。
- 廣用試劑的比色管，其顏色依然偏紅，**再次顯示雙氧水反應前酸性較強，反應之後，酸性漸弱**。
- 亞甲藍液比較清澈，廣用試劑中的反應，都會產生細小氣泡。

(三) 再探階段：選擇適合的雙氧水濃度。10%雙氧水反應時間短，顏色變化明顯，適合課堂實驗。

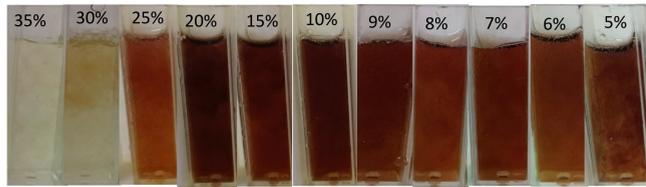


圖5-5 不同濃度雙氧水在氯化亞鐵+亞甲藍水溶液中的起始顏色

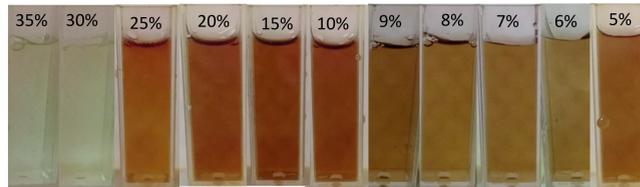


圖5-6 不同濃度雙氧水在氯化鐵+亞甲藍水溶液中的起始顏色

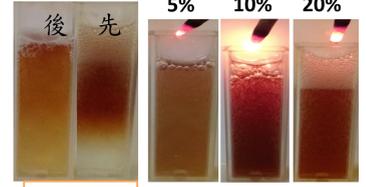


圖5-7 雙氧水注射順序

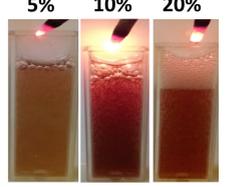


圖5-8 燃燒實驗

- 濃度太高，顏色反而未均勻變深，甚至近似透明，實驗操作順序顯示溶液是否均勻與密度關係不大。
- 注射順序不同，不影響末溫，但反應時間不同，上方產生泡泡的粗細也不同。
- 15%以上雙氧水反應後，會溢出比色管。
- 濃度低，反應時間加長，顏色變化較小。
- 催化劑後放，適合做大象牙膏實驗。

催化劑	濃度				起火反應時間
	5%	10%	15%	20%	
氯化亞鐵	亮	起火	起火	起火	快(約1分至2分)
氯化鐵	亮	起火	起火	起火	慢(約3分)

(四) 輔助實驗：透過線香燃燒，強化課堂實驗效果，以10%雙氧水+0.1M氯化亞鐵效果最佳。

二、Arduino與暗箱定量分析透光度、濕度、溫度

實驗目的(一)：比較顯色溶液(亞甲藍液和廣用試劑)對雙氧水反應的影響

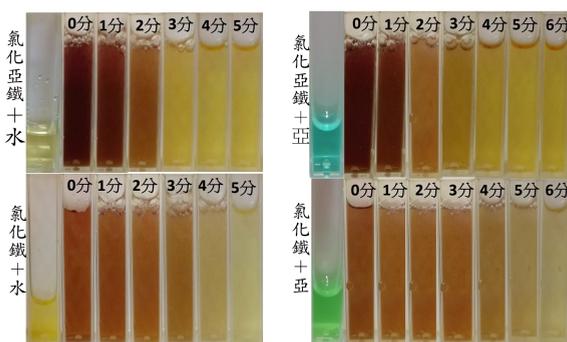


圖6-1 氯化鐵和氯化亞鐵催化反應的顏色變化圖

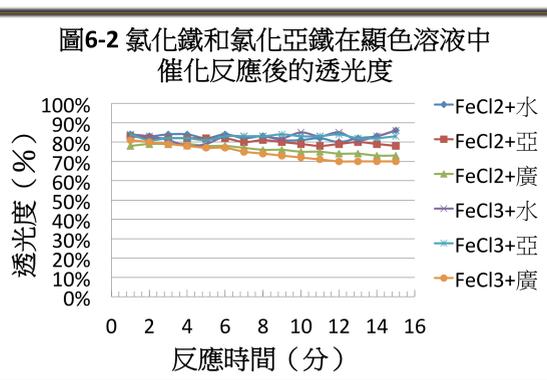


圖6-2 氯化鐵和氯化亞鐵在顯色溶液中催化反應後的透光度

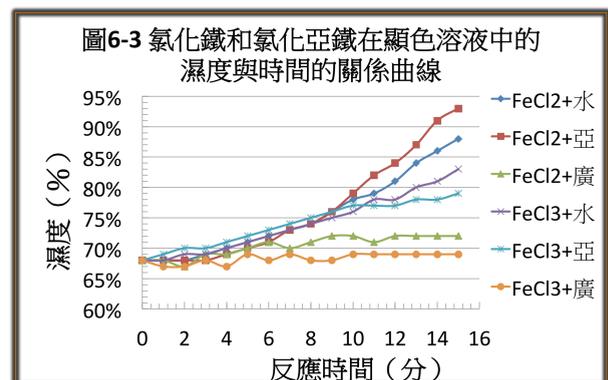


圖6-3 氯化鐵和氯化亞鐵在顯色溶液中的濕度與時間的關係曲線

- 本實驗顯示不適合以光敏電阻來表現雙氧水在亞甲藍液或廣用試劑中變淡的特性。
- 濕度觀察，可得反應快慢：**FeCl₂+亞 > FeCl₂+水 > FeCl₃+水 > FeCl₃+亞 > FeCl₂+廣 > FeCl₃+廣**。
- 濕度和溫度皆顯示氯化亞鐵的反應速率比氯化鐵快；在亞甲藍液的反應速率比廣用試劑快，與前述比色法的結果相吻合。

實驗目的(二)：環境溫溼度對雙氧水反應的影響

[濕度初論]

- 不論何種溶液，分解反應皆趨近相同濕度，**意味著反應平衡不受氯化鐵或氯化亞鐵和顯色溶液影響**，換句話說，由此可推論氯化鐵或氯化亞鐵扮演**催化劑**的角色。
- 冬天，雖然反應時間加長，依然可在課堂上進行。

溶液	FeCl ₂ +水	FeCl ₂ +亞	FeCl ₂ +廣	FeCl ₃ +水	FeCl ₃ +亞	FeCl ₃ +廣	
暗箱內	末溫(°C)	37.5	32.5	22	36	26.5	21
	溫差(°C)	18	13	2.5	16.5	7	1.5
	溫度變化率	1.2	0.87	0.17	1.1	0.47	0.1
暗箱外	末溫(°C)	35	31.5	21	36	24.5	21
	溫差(°C)	15.5	12	1.5	16.5	5	1.5
	溫度變化率	1.03	0.8	0.1	1.1	0.33	0.1

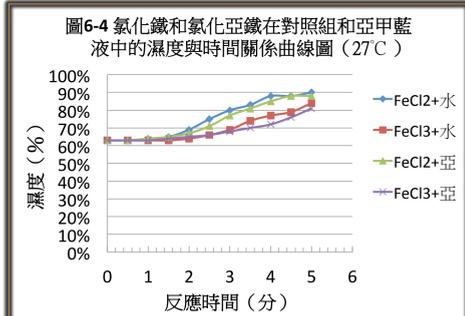


圖6-4 氯化鐵和氯化亞鐵在對照組和亞甲藍液中的濕度與時間關係曲線圖 (27°C)

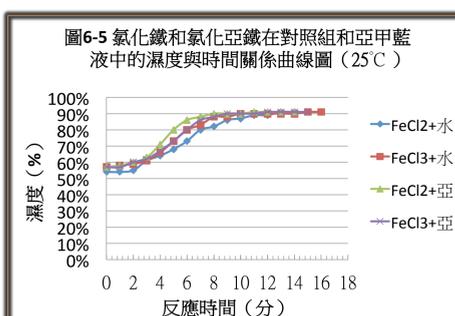


圖6-5 氯化鐵和氯化亞鐵在對照組和亞甲藍液中的濕度與時間關係曲線圖 (25°C)

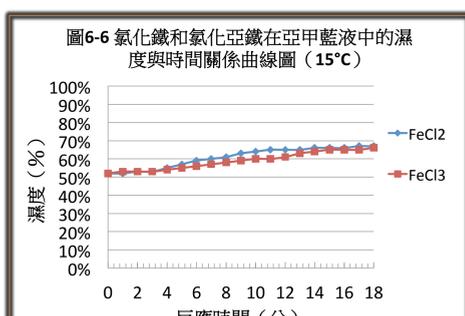
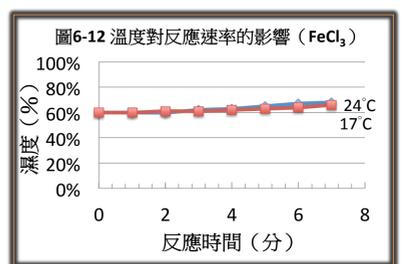
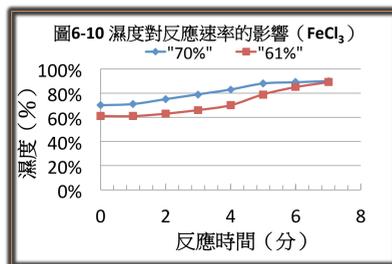
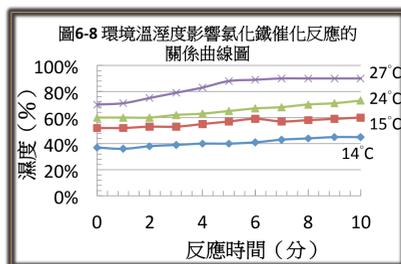
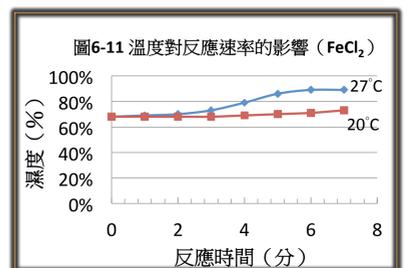
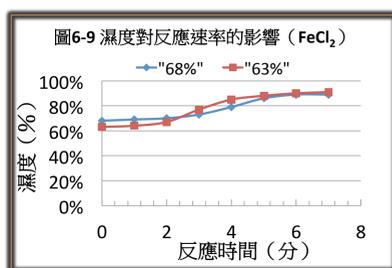
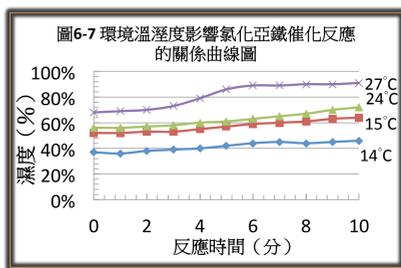


圖6-6 氯化鐵和氯化亞鐵在亞甲藍液中的濕度與時間關係曲線圖 (15°C)

[環境溫溼度]

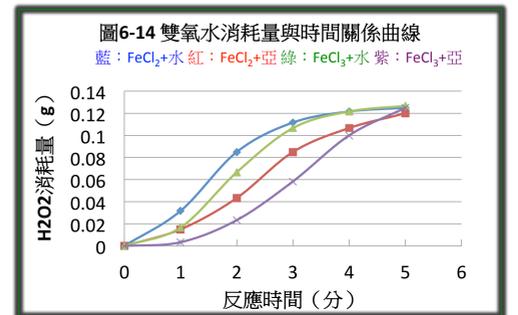
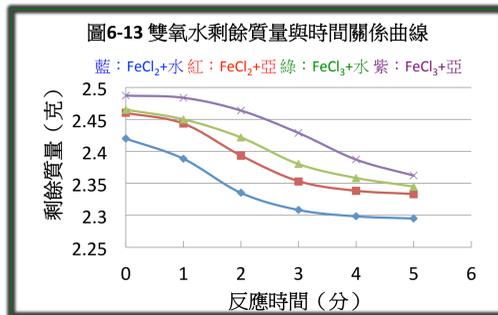
觀察濕度數據，可得

- (1) 氯化亞鐵催化的反應速率比氯化鐵大。
- (2) 濕度大，反應速率變慢，符合勒沙特列原理。
- (3) 室溫高，催化反應速率會變快。
- (4) 依據計算所得的活化能和圖6-11及圖6-12，顯而易見，氯化亞鐵比氯化鐵容易受溫度影響。



[質量]

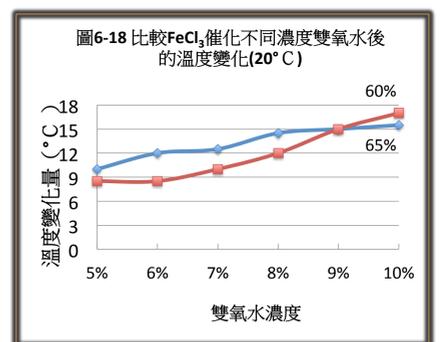
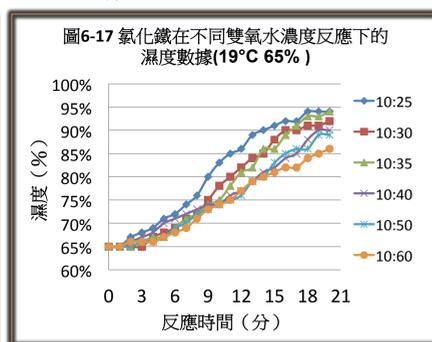
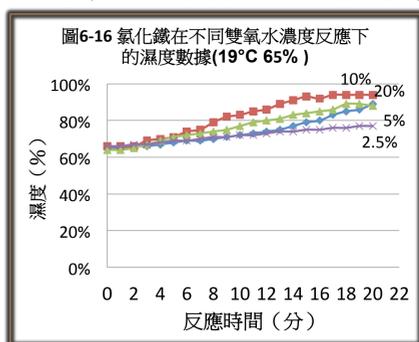
- (1) 圖6-13 曲線近似平行，意味著相同催化劑反應速率趨勢不受亞甲藍液影響。
- (2) 圖6-14 曲線開口方向不同，意味著氯化亞鐵和氯化鐵的催化機制不相同，亦即氯化亞鐵是先發型，而氯化鐵是後發型。



實驗目的(三)：探討雙氧水濃度對反應速率的影響

[定量氯化鐵]

- (1) 從圖6-16和圖6-17可知濃度與濕度和溫度變化量皆呈正相關。
- (2) 從圖6-18可知雙氧水濃度9%以下，可見濕度高的溫度變化量比低濕明顯。



[溫度]

- (1) 暗箱內的反應皆比暗箱外激烈。
- (2) 初期反應，氯化亞鐵溫度上升比氯化鐵快，亦即氯化亞鐵屬於爆發型，與前述實驗和文獻相符。
- (3) 最高溫度與濃度幾乎成正比，濃度越高，溫度越高且最高溫度幾乎不受催化劑種類影響。
- (4) 亞甲藍液不影響雙氧水反應後的最後溫度，與前述的濕度、質量討論的結果一致。

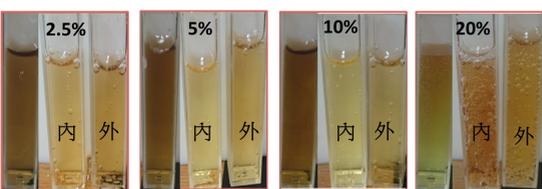
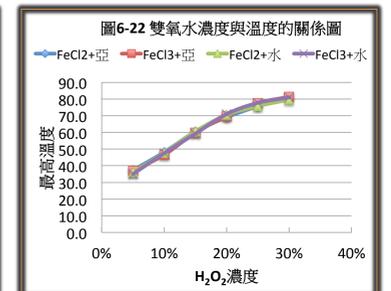
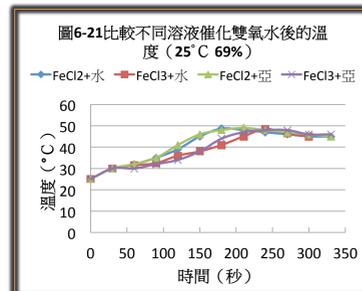
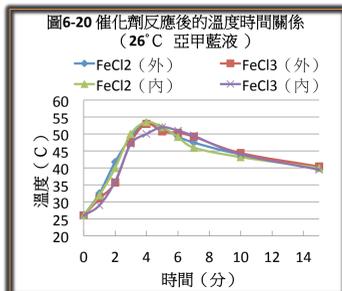
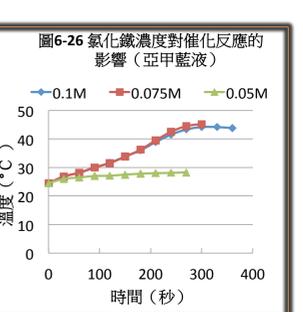
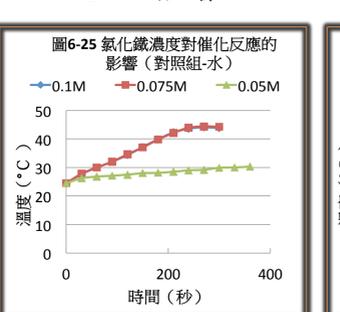
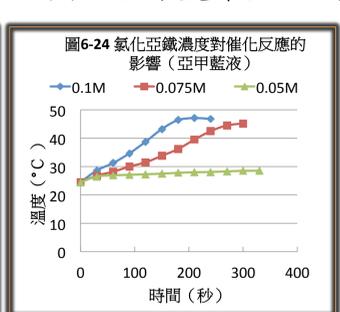
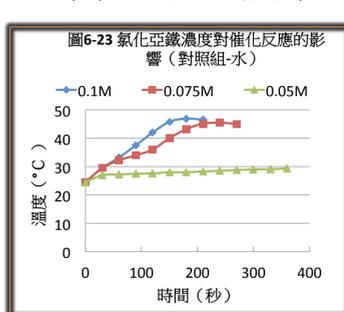


圖6-19 FeCl₃在暗箱內外催化不同濃度雙氧水的顏色變化 ([FeCl₂]=0.1M, 亞甲藍液=0.005%, 濕度60%, 室溫17°C)



實驗目的(四)：探討氯化亞鐵與氯化鐵濃度對雙氧水放熱反應的影響

- (1) 觀察溫度數據，不同濃度對雙氧水分解反應的影響，氯化亞鐵比氯化鐵明顯。
- (2) 觀察溫度-時間曲線，得知0.1M是課堂實驗的最佳濃度。



[反應級數]

- (1) $R(\text{FeCl}_2) = k_1[\text{H}_2\text{O}_2][\text{FeCl}_2]^2$ ，總反應級數為1+2=3； $R(\text{FeCl}_3) = k_2[\text{H}_2\text{O}_2][\text{FeCl}_2]^2$ ，總反應級數為1+2=3。
- (2) 以初濃度計算，不論是氯化亞鐵或氯化鐵催化雙氧水分解反應，雙氧水濃度對反應速率的影響，都是一級，與第46屆科展文獻速戰速決—以雙氧水的分解探討反應速率的結論相同。
- (3) 氯化亞鐵和氯化鐵對雙氧水分解反應的速率都是二級，表示氯化亞鐵和氯化鐵不僅具有催化劑的角色，還兼當反應物，這種現象恰可說明他們催化反應後的顏色皆與原來不同。

柒、結論

本研究在雙氧水分解實驗過程中，經過反覆觀察探究，可總結如下：

- (1) 課堂上進行實驗的最佳條件：0.005%亞甲藍液(其次是水)、10%雙氧水、0.1MFeCl₂或FeCl₃。
- (2) 氯化亞鐵或氯化鐵反應時間短，易操作，顏色變化明顯，易量化，可取代現行的二氧化錳實驗。
- (3) 實驗深度可及高中，讓同學從中學習反應速率、活化能和反應級數的理論計算。
- (4) 達到定性、定量且微量的多元綠色化學學習。

捌、參考資料

- 一. 呂凱筠、林侑瑩，2002，以自製反應儀器研究雙氧水分解反應的影響。中華民國第42屆全國中小學科學展覽會作品。
- 二. 林建諭、張紘齊、詹柏呈，2012，「刑案現場大發現-那是血嗎?」臺灣國際科學展覽會作品。
- 三. 賴品任、鐘晨瑋與張慶驊，2014，「快氧加鞭-催生一對氧」。中華民國第54屆全國中小學科學展覽會作品。
- 四. 蘇邗、郭家豪與張元誠，2014，「彙而不費」。中華民國第54屆全國中小學科學展覽會作品。
- 五. 蔡皓羽、謝伊婷、蒙惠玲、劉家慈，2002，「氧樂多-雙氧水的研究及新反應器的研製」第42屆全國中小學科學展覽會作品。
- 六. 鍾雅晴、江翊宏、蘇強升，2013，「氧眉吐氣」。第53屆全國中小學科學展覽會作品。
- 七. 「速戰速決-以雙氧水的分解探討」，2006。中華民國第46屆中小學科學展覽會作品。
- 八. 「e世代的製氧法」，2002。中華民國第42屆中小學科學展覽會作品。(僅列出科展文獻，其餘請參考紙本)