

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 化學科

佳作

040216

甜蜜來「靛」--靛胭脂的氧化還原反應

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 李惟慈 高二 郭恩佳	指導老師： 江慧玉
---------------------------------	------------------

關鍵詞：化學振盪、氧化還原、反應速率

摘要

甜蜜來『靛』實驗俗稱振盪紅綠燈，是以氧氣作為氧化劑、葡萄糖為還原劑，使靛胭脂溶液在鹼性環境中因為氧化及還原產生不同顏色變化的可逆反應。我們發現葡萄糖濃度及溶液 pH 值會直接影響反應速率，其速率定律式為： $R_{\text{還原}} = k[\text{IC}]^0[\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6]^1[\text{OH}^-]^1$ ；若是振盪反應停止，可添加新鮮靛胭脂使其再生。此外，不同種類的還原劑會使此反應產生不同顏色，如還原力強的乙醛、丙醛會使溶液呈現橙色而不再變化。利用此振盪反應作為示範實驗的最佳化條件為：1.2% $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_{6(\text{aq})}$ 、0.5M $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$ 的溶液 50 mL，加入 2.0 mL、1.0% 靛胭脂溶液，第 1 次振盪時間約 12~15 分鐘，第 2 次循環開始其速率會增快，時間約縮短至 5~8 分鐘。

壹、研究動機

高一基礎化學課老師示範一個會變色的實驗，搖晃瓶子會呈現藍色，靜置後又會變成無色，我們覺得這個實驗相當有趣，因此上網搜尋得知這個變色實驗稱為藍瓶實驗。我們發現另一個類似的變色實驗，稱為紅綠燈振盪實驗，將靛胭脂加入氫氧化鈉和葡萄糖的混合溶液後，搖晃後會呈現綠色，靜置時顏色會逐漸變成紅色再變成黃色，我們好奇地重複做了幾次，發現每次變色間隔時間似乎都不太一樣，這讓我們相當好奇，究竟這個現象是什麼原因造成的呢？

- 高一 基礎化學(一) 第四章常見的化學反應(酸鹼、沉澱、氧化還原)
- 高二 基礎化學(二) 第二章有機化合物
- 高二 基礎化學(三) 第二章 反應速率、第三章化學平衡
- 高三 選修化學 第五章 氧化還原反應

貳、研究目的

- 一、探討反應振盪循環中，顏色變化與時間的關係
- 二、探討每次循環過程中，不同顏色之溶液中葡萄糖含量的變化
- 三、探討反應振盪循環中，不同種類之還原劑的影響
- 四、探討開放系統與密閉系統下，振盪反應的循環次數與差異
- 五、探討反應振盪循環中，葡萄糖、靛胭脂以及氫氧化鈉濃度變化與速率的關係
- 六、探討反應振盪循環中，溶液吸收光譜的變化
- 七、探討振盪反應之速率定律方程式
- 八、尋找反應溶液的條件極限與演示之最佳條件

參、研究設備及器材

一、器材：

名稱	數量	名稱	數量	名稱	數量
10 cc.量筒	3 個	50 cc 量筒	1 個	100 cc. 量筒	1 個
10cc 試管	30 個	20cc 試管	30 個	250 cc. 燒杯	2 個
500 cc.燒杯	2 個	錐形瓶	6 個	布氏漏斗	1 個
烘乾機	1 台	滴管	5 枝	試管架	1 個
瓶塞	6 個	玻棒	2 個	濾紙	1 盒
刮勺	3 支	秤量紙	1 盒	計時器	2 個
pH 測量儀	1 台	加熱攪拌機	2 台	電子秤	1 台



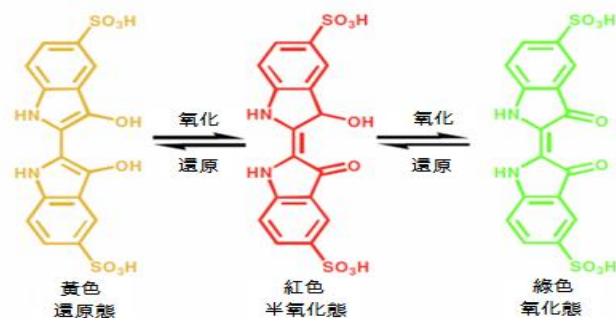
二、藥品：

氫氧化鈉(NaOH)	葡萄糖(C ₆ H ₁₂ O ₆)	果糖(C ₆ H ₁₂ O ₆)
靛胭脂(粉末)	斐林試劑(為糖度檢測劑)	蔗糖(C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁)
		
乙醛(CH ₃ CHO)	丙醛(C ₂ H ₅ CHO)	苯甲醛(C ₆ H ₅ CHO)
丙酮(CH ₃ COCH ₃)	二苯酮(C ₆ H ₅ COC ₆ H ₅)	
 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> 由左至右依序為乙醛、丙醛、苯甲醛、丙酮、二苯酮 </div>		

肆、研究過程或方法

一、反應原理：

將靛胭脂加入氫氧化鈉和葡萄糖的混合溶液中，搖晃數下後溶液呈現綠色，靜置時顏色會逐漸變成紅色再變成黃色，反應式如下所示：

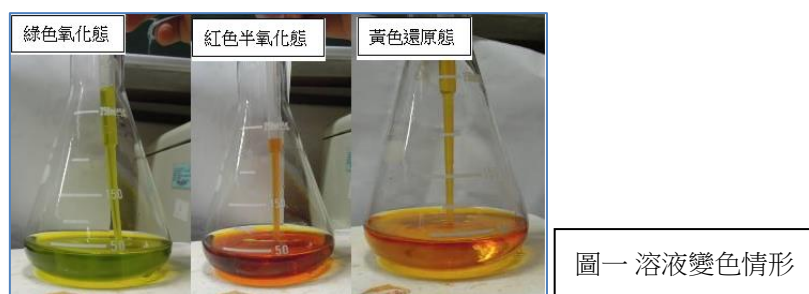


其中搖晃時氧氣進入溶液中氧化靛胭脂成為綠色氧化態，靜置過程中，溶液中的葡萄糖為還原劑將靛胭脂還原會先成為紅色半氧化態，進而呈現黃色還原態。

二、基礎試驗及探討

(一) 基礎試驗：十次循環振盪：

1. 配製 1.0 % 靛胭脂溶液：精稱 0.2 克靛胭脂粉末，以蒸餾水配成 20 mL 溶液，稱為甲液。
2. 精稱 1.0 克 NaOH 與 0.6 克 $C_6H_{12}O_6$ ，以蒸餾水配製成 50 mL 溶液，稱為乙液。
3. 以吸量管量取 2.0 mL 甲液加入 50 mL 乙液中，將混合溶液放置在磁攪拌機上，設定攪動速率為 7，使溶液先呈現綠色，再記錄溶液從綠色變至紅色的時間，以及從紅色變化至黃色之時間。



4. 重複上述操作，記錄 10 次振盪循環的時間。

(二) 檢測溶液中的葡萄糖：

1. 在基礎試驗的每一次循環中，當溶液變色時立即以吸量管吸取 1.0 mL 反應溶液，並以斐林試劑進行檢測溶液中葡萄糖含量的試驗。

2. 吸量管吸取 1.0 mL 反應溶液，加入 1.0 mL 斐林試劑，再以蒸餾水加至總體積 10 mL，如下圖二所示。利用水浴法將各試管隔水加熱，觀察試管中發生的現象。



圖二 綠色標籤表綠色氧化態，
粉色標籤為紅色半氧化態，藍色
標籤為黃色還原態

3. 試管溶液隔水加熱至完全沉澱後，取出溶液上方澄清液 4.0 mL，並將管中沉澱物以抽濾方法過濾，將沉澱物放入烘箱中，烘乾後稱重並記錄重量。

三、不同還原劑種類之影響：

針對基本實驗所使用的還原劑(葡萄糖)，選擇其他醣類(果糖、蔗糖)以及醛類(乙醛、丙醛以及苯甲醛)甚至酮類(丙酮、二苯酮)作為還原劑進行操作，比較其差異。

表(一)作為還原劑之物質種類

類別	醣 類		醛 類		酮 類	
名稱	葡萄糖、果糖	蔗糖	乙醛、丙醛	苯甲醛	丙酮	二苯酮
屬性	單醣	雙醣	脂肪醛	芳香醛	脂肪酮	芳香酮

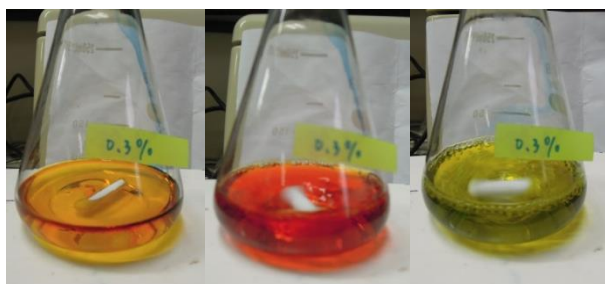
1. 進行實驗之各種還原劑的濃度，標示及編號如下表：

表(二)各種作為還原劑之濃度與編號

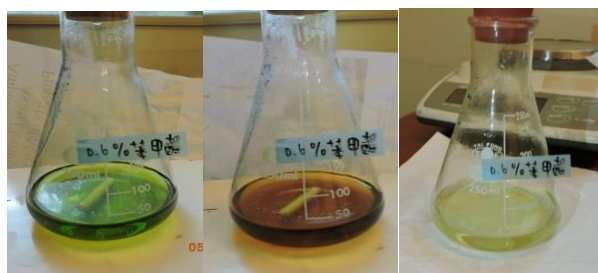
濃度	0.1%	0.3%	0.6%	1.2%	1.8%	2.4%
葡萄糖	A3	A4	A5	A6	A7	A8
果糖	B3	B4	B5	B6	B7	B8
蔗糖	C3	C4	C5	C6	C7	C8
乙醛	D3	D4	D5	D6	D7	D8
丙醛	E3	E4	E5	E6	E7	E8
苯甲醛	F3	F4	F5	*	*	*
丙酮	G1	G2	G3	G4	G5	G6
二苯酮	*	*	*	*	*	*

*：表示溶質已達其溶解度，無法配製成水溶液

2. 依表二之設計進行實驗，重複第二部分的(一)1~3，僅改變還原劑之種類與濃度，記錄溶液每一階段變色的時間，直到不再變色為止。
3. 探討循環過程中前 10 次振盪的變化與關係。



圖三：由左至右為果糖為還原劑時，脛脞脂其第一次循環時的顏色變化



圖四：由左至右為苯甲醛為還原劑時，脛脞脂其綠色氧化態、紅色半氧化態及最後不變色狀態

四、開放系與密閉系對振盪反應的影響：

(一) 開放系

1. 反應容器不加瓶蓋，直接接觸大氣。
2. 改變葡萄糖或脛脞脂含量：
 - (1) 改變反應中葡萄糖的濃度，進行振盪反應變色過程，直至溶液不再循環變色為止。
 - (2) 葡萄糖與脛脞脂濃度如下表所示：(O 表 open system)

表(三) 開放系統中葡萄糖與脛脞脂的濃度

組別	OC ₁	OC ₂	OC ₃	OC ₄
【C ₆ H ₁₂ O ₆ 】	0.6 %	1.2%	1.8%	2.4%
組別	OIC ₁	OIC ₂	OIC ₃	OIC ₄
【脛脞脂】	0.5 %	1.0%	1.5%	2.0%

- (3) 重複第二部分的(一)1~3，僅改變葡萄糖或脛脞脂濃度如表(三)，紀錄溶液每一階段變色的時間，直到不再變色為止。
- (4) 從實驗數據中擷取 10 次循環的結果進行討論。

(二) 密閉系

1. 反應容器塞上瓶蓋，使之成為密閉系統。

2. 改變葡萄糖含量：

(1) 改變反應葡萄糖的濃度，進行振盪反應變色過程，直至溶液不再循環變色為止。

(2) 葡萄糖濃度如下表所示：(A 表 airtight system)

表(四)密閉系統中葡萄糖、靛胭脂與氫氧化鈉的濃度						
組別	AC ₁	AC ₂	AC ₃	AC ₄		
【C ₆ H ₁₂ O ₆ 】	0.6 %	1.2 %	1.8 %	2.4 %		
組別	AIC ₁	AIC ₂	AIC ₃	AIC ₄		
【靛胭脂】	0.5 %	1.0 %	1.5 %	2.0 %		
組別	OH ₁	OH ₂	OH ₃	OH ₄	OH ₅	OH ₆
【NaOH】	0.004 M	0.02 M	0.05 M	0.1 M	0.5 M	2.0 M
pH 值	8.06	11.15	12.40	12.54	13.36	13.64

(3) 重複第二部分的(一)1~3，僅改變葡萄糖或靛胭脂或氫氧化鈉濃度如表(四)，記錄溶液每一階段變色的時間，直到不再變色為止。

(4) 從實驗數據中擷取 10 次循環的結果進行討論。



圖五 不同【NaOH】下溶液的初始顏色(由左至右、依序為 OH₁-6)

五、測量溶液之吸收度的變化：

(一) 配製 1.0 % 靛胭脂溶液：精稱 0.2 克靛胭脂粉末，以蒸餾水配成 20 mL 溶液，稱為甲液。

(二) 精稱 1.0 克 NaOH 與 0.6 克 C₆H₁₂O₆，以蒸餾水配製成 50 mL 溶液，稱為乙液。

(三) 將甲液與乙液均勻混合於錐形瓶中，輕輕搖晃至綠色，以紫外/可見光分光光度計(BioMate 3S)測量溶液之吸收光譜。



圖六 紫外/可見光分光光度計(BioMate 3S)

(四) 實驗方法是利用儀器外的反應溶液與光度計石英槽中的溶液同步變化顏色，紀錄其顏色變化與吸收光譜

六、反應條件極限及最佳化條件之探討：

為求振盪反應之過程能在適當時間內循環，因此探討改變葡萄糖濃度，了解此反應之條件極限。

(一) 重複基礎試驗之實驗操作【第二部分(一)1~3】，依據表二中以採取之濃度進行濃度增高或降低之操縱，紀錄循環時的顏色及時間，如下表所示：

表(八)探討葡萄糖濃度的影響極限

組別	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
濃度	0.02%	0.05%	0.1%	0.3%	0.6%	1.2%	1.8%	2.4%	3.0%

(二) 了解濃度改變對振盪時間之影響，並歸納出最佳化之條件。

七、再生實驗

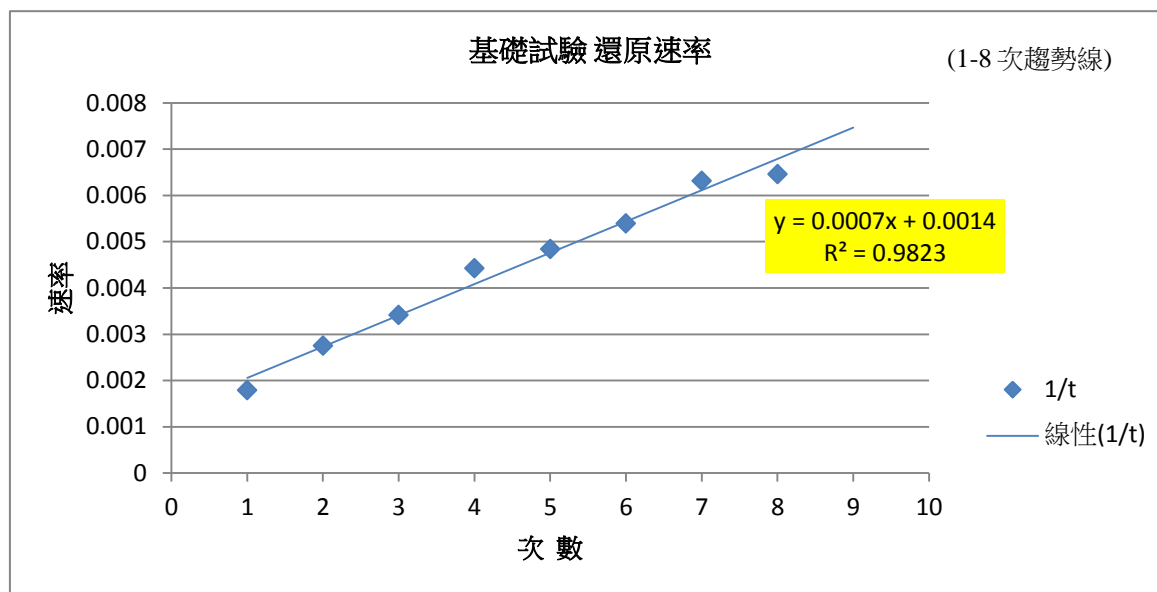
取最佳化條件進行此振盪實驗，當溶液不再變色後，選擇添加該條件下之靛胭脂溶液或葡萄糖溶液，觀察何者可使振盪反應再生；並紀錄其顏色的變化與時間。

伍、研究結果

一、十次循環振盪：

(一) 振盪循環變色時間

次數	綠→紅 (s)	紅→黃 (s)	綠→黃(完整還原) (s)	還原速率 (s-1)
一	114.3	443.7	558.0	1.79×10^{-3}
二	67.4	295.8	363.2	2.75×10^{-3}
三	77.4	215.1	292.5	3.42×10^{-3}
四	46.4	179.4	225.8	4.43×10^{-3}
五	62.2	144.4	206.6	4.84×10^{-3}
六	73.8	111.7	185.5	5.39×10^{-3}
七	44.4	114.0	158.4	6.31×10^{-3}
八	64.9	89.9	154.8	6.46×10^{-3}
九	102.2	599.0	701.2	1.43×10^{-3}
十	不變色			



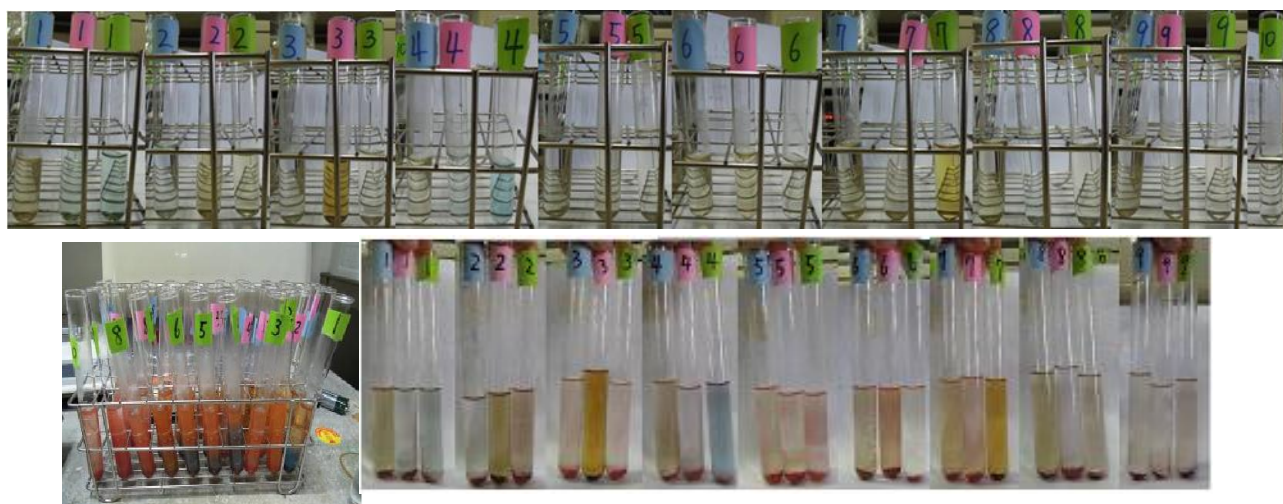
圖六：半綠半紅「陰陽海」狀態



圖七：最後不變色狀態

(二) 斐林試劑檢測含糖量

1. 加熱後溶液上方澄清液：



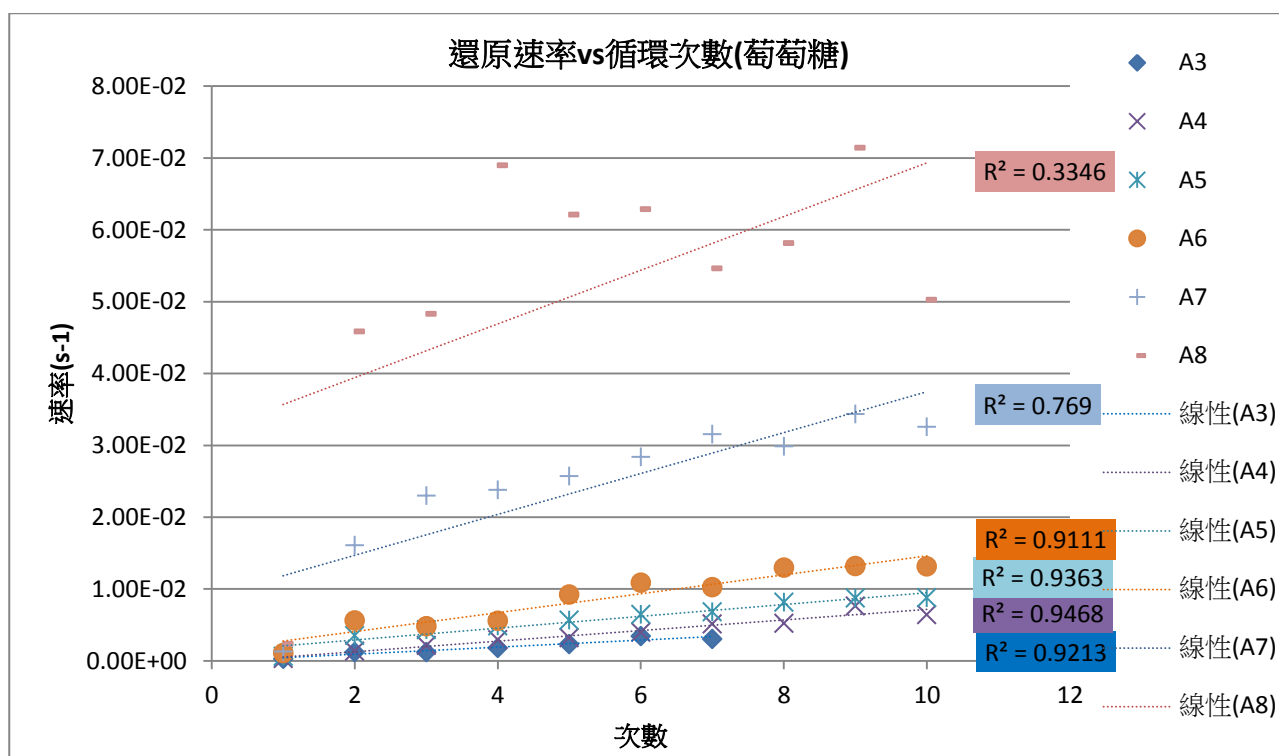
綠色標籤為綠色氧化態，粉色標籤為紅色半氧化態，藍色標籤為黃色還原態

次數	綠色時的沉澱重(克)	紅色時的沉澱重(克)	黃色時的沉澱重(克)
一	0.60	0.60	0.62
二	0.63	0.60	0.64
三	0.60	0.60	0.60
四	0.59	0.61	0.60
五	0.60	0.60	0.62
六	0.59	0.58	0.60
七	0.61	0.60	0.61
八	0.59	0.59	0.61
九	0.61	0.61	0.60
十	不變色		

二、不同還原劑種類

(一) 葡萄糖

還原速率	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Cycle1	2.98×10^{-4}	3.20×10^{-4}	6.28×10^{-4}	1.08×10^{-3}	1.31×10^{-3}	2.36×10^{-3}
Cycle2	1.23×10^{-3}	1.34×10^{-3}	3.54×10^{-3}	5.63×10^{-3}	1.61×10^{-2}	4.59×10^{-2}
Cycle3	1.23×10^{-3}	2.17×10^{-3}	4.33×10^{-3}	4.84×10^{-3}	2.30×10^{-2}	4.83×10^{-2}
Cycle4	1.80×10^{-3}	2.96×10^{-3}	4.87×10^{-3}	5.60×10^{-3}	2.38×10^{-2}	6.90×10^{-2}
Cycle5	2.34×10^{-3}	3.23×10^{-3}	5.66×10^{-3}	9.25×10^{-3}	2.57×10^{-2}	6.21×10^{-2}
Cycle6	3.44×10^{-3}	3.97×10^{-3}	6.50×10^{-3}	1.09×10^{-2}	2.84×10^{-2}	6.29×10^{-2}
Cycle7	3.04×10^{-3}	5.13×10^{-3}	6.82×10^{-3}	1.03×10^{-2}	3.15×10^{-2}	5.46×10^{-2}
Cycle8	---	5.24×10^{-3}	8.18×10^{-3}	1.30×10^{-2}	2.99×10^{-2}	5.81×10^{-2}
Cycle9	---	7.65×10^{-3}	8.73×10^{-3}	1.32×10^{-2}	3.44×10^{-2}	7.14×10^{-2}
Cycle10	---	6.42×10^{-3}	8.79×10^{-3}	1.31×10^{-2}	3.26×10^{-2}	5.03×10^{-2}
最高可循環次數	7	15	24	26	25	20



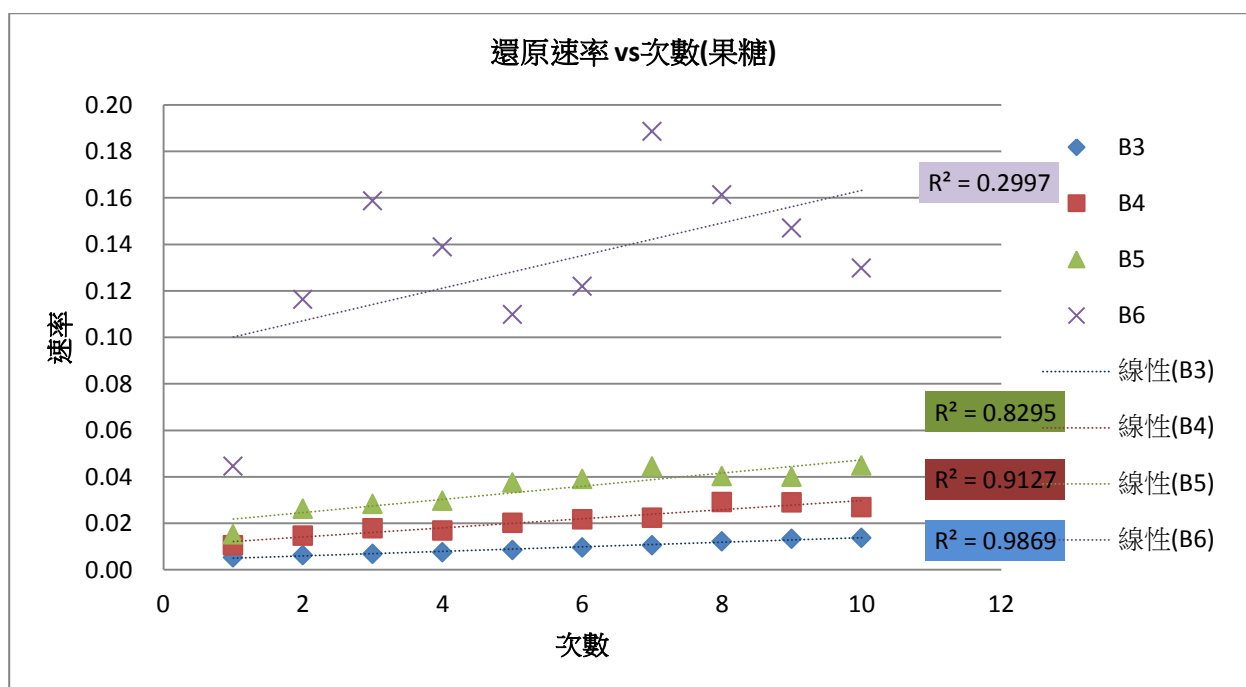
小結：1.葡萄糖濃度愈高，還原速率愈快，但高濃度時呈現混亂不規律。

2.隨著循環次數增加，還原速率也會增加，且呈現線性關係。

3.較低濃度時，可循環次數較少，未達 10 次。

(二) 果糖

還原速率	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Cycle1	5.38×10^{-3}	1.06×10^{-2}	1.52×10^{-2}	4.46×10^{-2}	2.20×10^{-2}	1.94×10^{-2}
Cycle2	6.37×10^{-3}	1.47×10^{-2}	2.63×10^{-2}	1.16×10^{-1}	---	---
Cycle3	6.94×10^{-3}	1.80×10^{-2}	2.84×10^{-2}	1.59×10^{-1}	---	---
Cycle4	7.60×10^{-3}	1.70×10^{-2}	2.97×10^{-2}	1.39×10^{-1}	---	---
Cycle5	8.52×10^{-3}	2.02×10^{-2}	3.76×10^{-2}	1.10×10^{-1}	---	---
Cycle6	9.70×10^{-3}	2.17×10^{-2}	3.91×10^{-2}	1.22×10^{-1}	---	---
Cycle7	1.06×10^{-2}	2.25×10^{-2}	4.44×10^{-2}	1.89×10^{-1}	---	---
Cycle8	1.23×10^{-2}	2.92×10^{-2}	4.03×10^{-2}	1.61×10^{-1}	---	---
Cycle9	1.34×10^{-2}	2.91×10^{-2}	4.00×10^{-2}	1.47×10^{-1}	---	---
Cycle10	1.38×10^{-2}	2.70×10^{-2}	4.48×10^{-2}	1.30×10^{-1}	---	---
最高可循環次數	16	19	22	12	1	1



小結：1.濃度較高時(B7、B8)，進行一次循環後，便無法再變色。

2. 隨濃度增加，還原速率亦增快；但高濃度時呈現混亂不規律。

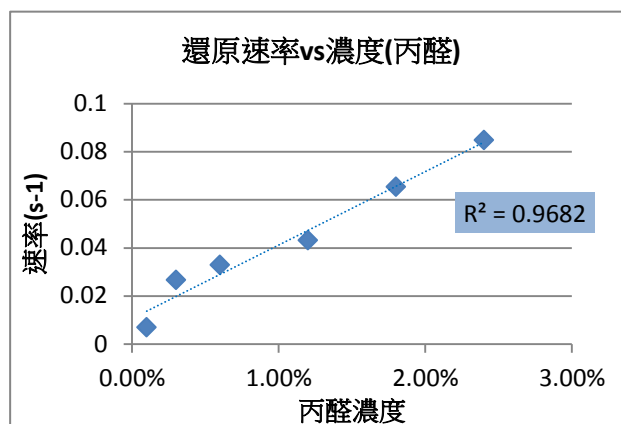
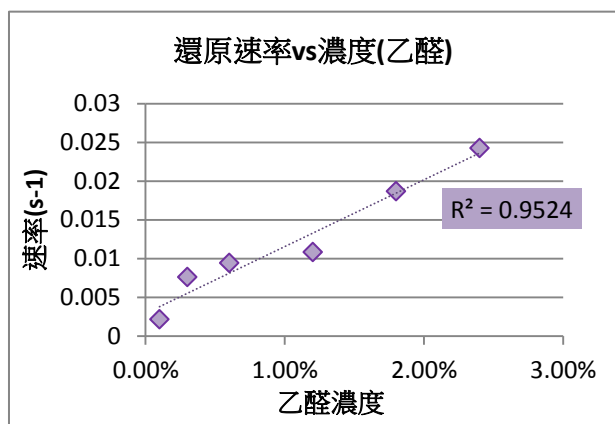
(三) 蔗糖：以蔗糖作為還原劑時，無論在何種濃度，皆無反應、不變色。

(四) 乙醛

還原速率	D3	D4	D5	D6	D7	D8
Cycle1	2.15×10^{-3}	7.58×10^{-3}	9.40×10^{-3}	1.08×10^{-2}	1.87×10^{-2}	2.42×10^{-2}
最高可循環次數	1	1	1	1	1	1

(五) 丙醛

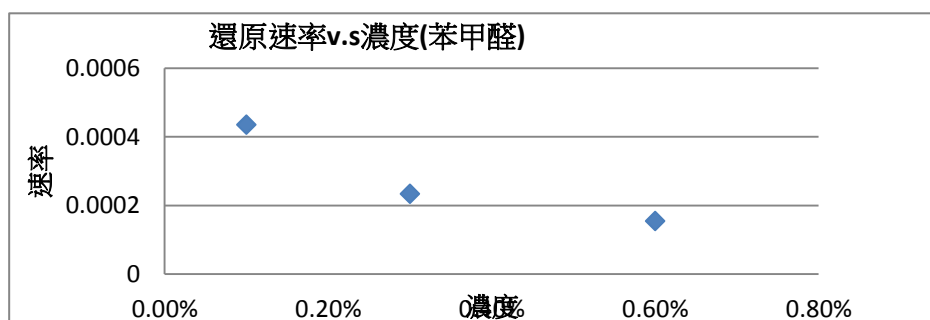
還原速率	E3	E4	E5	E6	E7	E8
Cycle1	6.93×10^{-3}	2.65×10^{-2}	3.29×10^{-2}	4.31×10^{-2}	6.54×10^{-2}	8.48×10^{-2}
最高可循環次數	1	1	1	1	1	1



小結：乙醛、丙醛的濃度愈高，還原速率愈快，且呈現線性關係

(六) 苯甲醛

還原速率	F3	F4	F5	F6	F7	F8
cycle 1	4.35×10^{-4}	2.34×10^{-4}	1.55×10^{-4}	*	*	*
最高可循環次數	1	1	1	1	1	1



小結:1.溶液由綠色氧化態靜置，變化至紅色半氧化態，接著變化成黃綠色，便停止反應。

2.濃度越低，還原反應有漸快的趨勢

(七) 丙酮：以丙酮作為還原劑時，無論在何種濃度皆不變色。

(八) 二苯酮：二苯酮不溶於水，無法配製成水溶液進行實驗。

三、開放系統與密閉系統

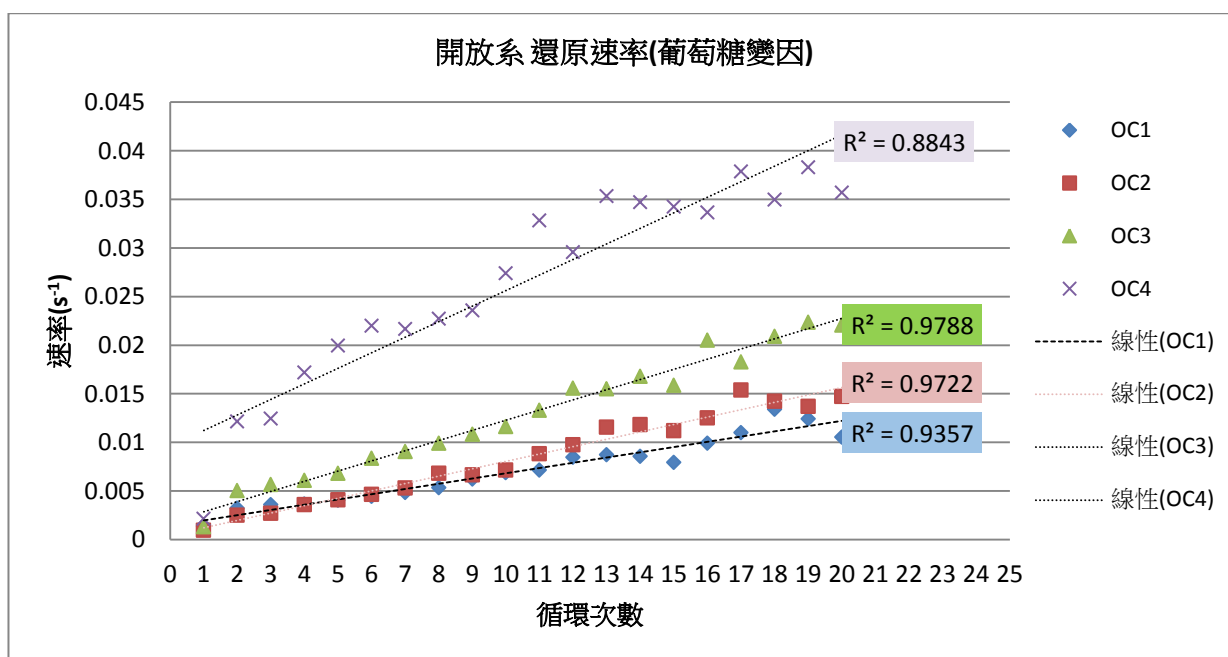
(一) 開放系統與密閉系統的最終不變色次數

開放系	OC ₁	OC ₂	OC ₃	OC ₄	平均
次數	24	25	23	25	24
密閉系	AC ₁	AC ₂	AC ₃	AC ₄	平均
次數	24	26	25	20	23

(二) 開放系統

1. 改變葡萄糖濃度

時間(sec)	OC ₁		OC ₂		OC ₃		OC ₄	
次數	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠
1	709.4	155.8	1046.3	235.6	750.4	399.8	463.8	637.9
2	308.4	148.8	396.7	166.4	198.2	200.8	82.1	125.3
3	278.1	70.0	366.9	137.4	175.6	149.4	80.3	267.1
4	273.2	66.0	277.7	181.4	164.1	138.8	58.1	106.9
5	245.9	58.1	243.8	181.8	146.1	154.7	50.1	297.7
6	223.7	49.5	214.4	175.9	119.3	83.0	45.4	47.8
7	206.2	39.3	187.7	258.3	110.2	87.9	46.1	40.0
8	186.8	35.8	146.2	159.8	100.8	68.3	48.2	33.6
9	160.6	30.7	150.3	132.6	92.3	68.5	46.3	29.8
10	145.2	26.6	139.8	118.5	85.9	48.6	36.5	22.2
11	139.9	23.8	113.1	119.0	75.0	60.5	28.7	20.7
12	117.8	19.3	102.3	110.0	64.2	47.4	33.8	25.1
13	114.4	18.0	86.3	93.4	64.4	43.9	28.3	23.8
14	116.8	17.2	84.6	59.7	59.5	38.1	28.8	21.9
15	148.1	17.3	89.2	63.3	62.9	57.2	35.4	18.3
16	100.8	14.6	79.8	67.4	48.7	38.5	33.7	20.3
17	90.9	12.2	64.9	47.2	54.7	34.4	26.4	19.8
18	74.6	10.7	70.3	37.8	47.8	28.8	36.0	11.5
19	80.4	11.4	102.8	41.2	44.7	25.4	26.1	12.4
20	94.9	9.0	67.9	48.8	45.3	21.4	28.0	8.8



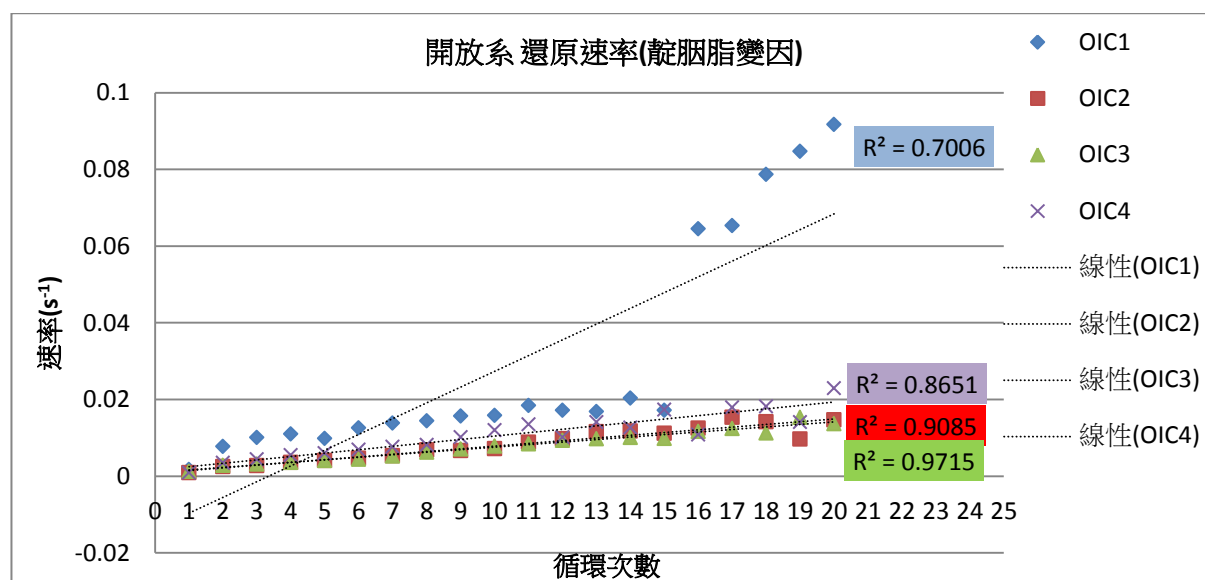
小結：

- (1) 開放系統中，葡萄糖濃度愈高，還原速率愈快；循環次數愈多次，還原速率亦漸快
- (2) 葡萄糖濃度較高時，不論是氧化或還原，其循環過程的速率變化皆較不穩定。

2. 改變酰脲脂濃度

時間(sec)	IC1		IC2		IC3		IC4	
次數	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠
1	571.3	184.7	1046.3	235.6	788.4	271.6	1081.5	257.9
2	129.1	108.9	396.7	166.4	355.2	161.5	286.5	179.3
3	98.7	87.0	366.9	137.4	313.6	112.1	224.0	147.1
4	90.9	72.8	277.7	181.4	278.0	99.8	180.4	132.3
5	101.0	58.3	243.8	181.8	243.8	97.2	166.9	88.6
6	79.4	49.5	214.4	175.9	223.5	96.6	144.1	100.7
7	71.9	36.9	187.7	258.3	189.0	144.2	130.4	63.1
8	69.3	41.1	146.2	159.8	158.8	127.2	122.4	70.5
9	63.6	33.9	150.3	132.6	141.1	145.3	98.0	53.6
10	62.9	31.3	139.8	118.5	127.7	56.3	83.2	53.0
11	54.2	29.1	113.1	119.0	118.4	62.6	73.7	59.6
12	58.0	28.6	102.3	110.0	106.7	53.6	98.0	39.9
13	59.3	26.1	86.3	93.4	102.3	41.9	70.7	34.3
14	49.1	19.2	84.6	59.7	99.2	43.4	78.9	29.6
15	58.1	26.6	89.2	63.3	101.2	51.7	57.6	34.2

16	15.5	40.1	79.8	67.4	85.4	48.7	91.9	33.2
17	15.3	41.4	64.9	47.2	80.6	37.4	55.6	18.8
18	12.7	35.3	70.3	37.8	88.7	33.8	54.9	15.6
19	11.8	33.3	102.8	41.2	65.1	31.1	70.8	13.6
20	10.9	32.5	67.9	48.8	73.2	36.1	43.5	15.6



小結：

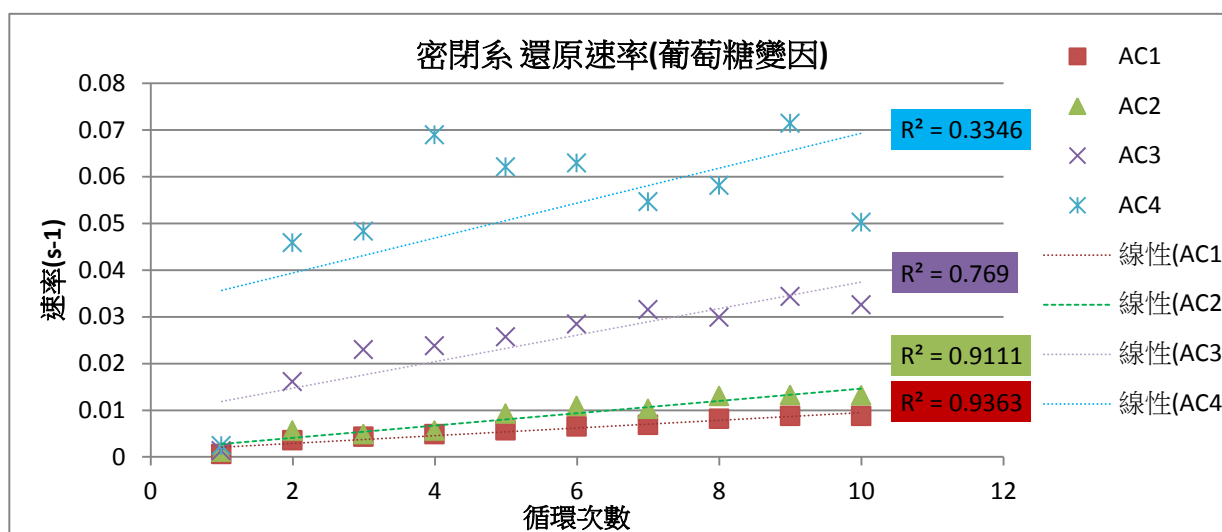
- (1) 改變醣脂的含量，對於氧化或還原速率都無一定趨勢的影響。
- (2) 醣脂濃度較低時，循環多次後其還原速率會突增。

(三) 密閉系統

1. 改變葡萄糖濃度

時間(sec)	AC ₁		AC ₂		AC ₃		AC ₄	
次數	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠
1	1593.4	62.0	926.2	135.9	764	534.2	423.3	1857.8
2	282.4	46.0	177.6	51.8	62.1	79.8	21.8	21.3
3	231.2	36.5	206.7	101.8	43.5	48.8	20.7	83.2
4	205.3	34.2	178.5	82.1	42.0	94.0	14.5	16.2
5	176.7	30.9	108.1	43.7	38.9	35.2	16.1	15.2
6	153.9	25.9	91.8	29.4	35.2	29.8	15.9	12.4
7	146.6	19.9	97.5	27.0	31.7	27.8	18.3	21.4
8	122.3	17.0	77.0	19.6	33.5	23.4	17.2	8.8
9	114.5	15.7	75.8	18.5	29.1	18.8	14.0	11.3

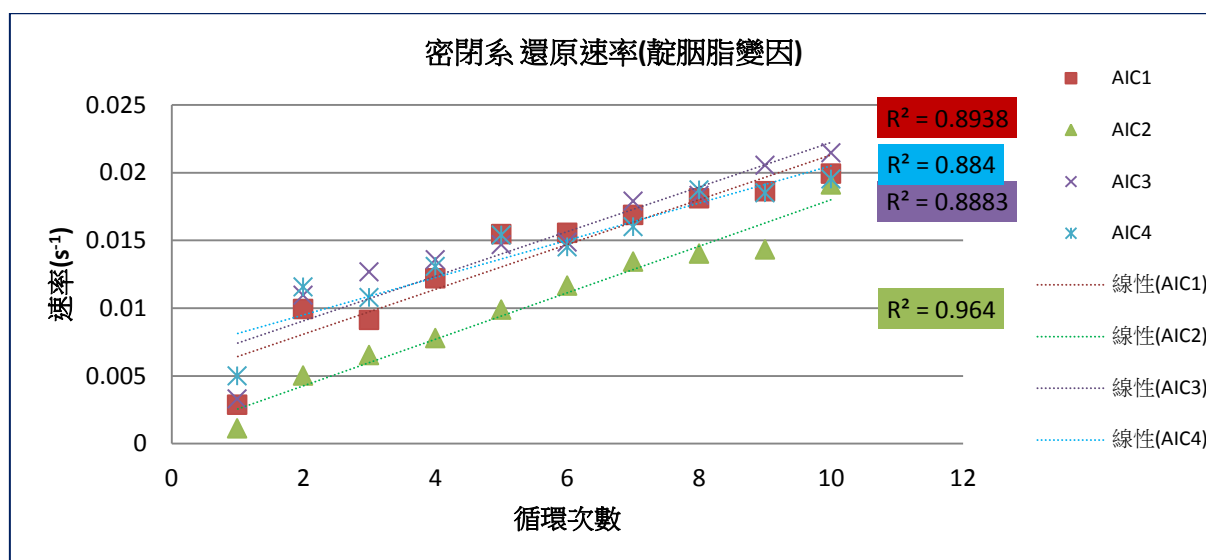
10 113.8 15.4 76.1 16.1 30.7 30.3 19.9 26.6



小結：葡萄糖濃度越高，還原速率愈快；濃度較高時會呈現不規則

2. 改變鹼脂濃度

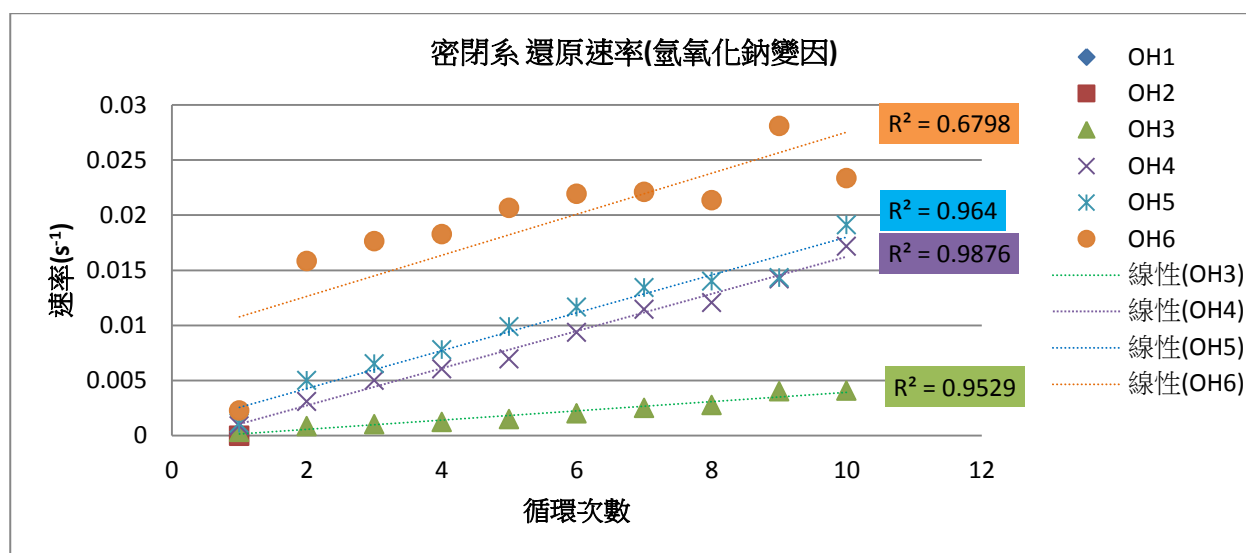
時間(sec)	AIC ₁		AIC ₂		AIC ₃		AIC ₄	
次數	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠
1	346.3	64.1	926.2	135.9	301.8	69.9	200	82.4
2	100.6	59.5	177.6	51.8	91.3	56.3	86.4	64.6
3	109.5	36	206.7	101.8	78.9	43.6	92.6	47.3
4	82	62.8	178.5	82.1	73.7	35	76.5	31.4
5	64.7	20.9	108.1	43.7	68.1	37.6	65	28.5
6	64.3	18.3	91.8	29.4	67.2	29.3	68.9	23.96
7	59.2	17.6	97.5	27	55.9	20	62.5	22.2
8	55.2	15.7	77	19.6	54.6	22.2	53.4	19.1
9	53.7	16.2	75.8	18.5	48.7	20.3	54	16.5
10	50.2	13.8	76.1	16.1	46.6	16.5	51.2	16.4



小結：靛胭脂濃度最低時，反應速率明顯較快；但無規律性。

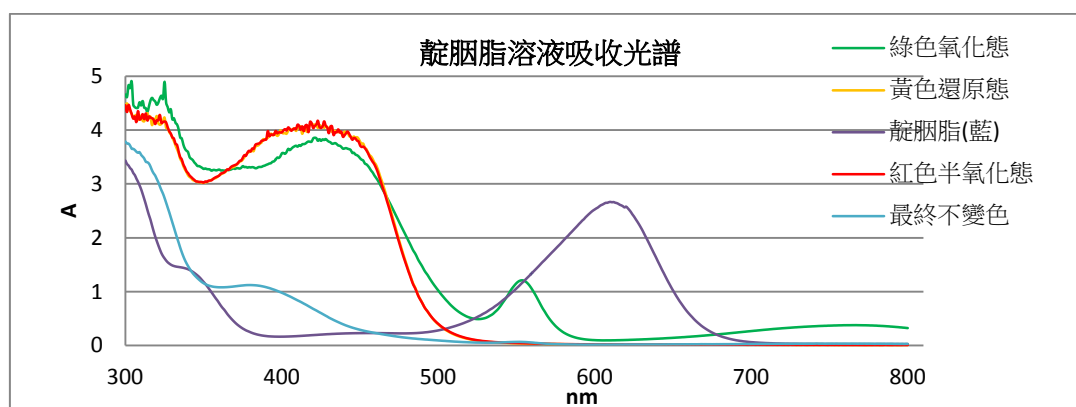
3. 改變氫氧化鈉濃度

時間(sec)	OH ₃		OH ₄		OH ₅		OH ₆	
次數	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠	綠→黃	黃→綠
1	346.3	64.1	926.2	135.9	301.8	69.9	200	82.4
2	100.6	59.5	177.6	51.8	91.3	56.3	86.4	64.6
3	109.5	36	206.7	101.8	78.9	43.6	92.6	47.3
4	82	62.8	178.5	82.1	73.7	35	76.5	31.4
5	64.7	20.9	108.1	43.7	68.1	37.6	65	28.5
6	64.3	18.3	91.8	29.4	67.2	29.3	68.9	23.96
7	59.2	17.6	97.5	27	55.9	20	62.5	22.2
8	55.2	15.7	77	19.6	54.6	22.2	53.4	19.1
9	53.7	16.2	75.8	18.5	48.7	20.3	54	16.5
10	50.2	13.8	76.1	16.1	46.6	16.5	51.2	16.4



小結：氫氧化鈉濃度愈高，還原反應速率愈快、氧化速率卻漸慢。

四、溶液的吸光度比較



- (一) 靛胭脂水溶液在波長 610 nm 處有吸收峰。
- (二) 綠色氧化態的靛胭脂吸收峰在波長 420 及 559 nm 附近。
- (三) 紅色半氧化態及黃色還原態的靛胭脂吸收峰約在相同波長(410 nm)處。
- (四) 最終不變色的溶液，其吸收峰約在 396 nm 附近，但是在 559 nm 處亦有較小的吸收峰。

五、反應條件極限及最佳化

葡萄糖濃度(A1~A9)與還原速率(s⁻¹)

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1.57×10^{-4}	2.00×10^{-4}	2.98×10^{-4}	3.20×10^{-4}	6.28×10^{-4}	1.08×10^{-3}	1.31×10^{-3}	2.36×10^{-3}	3.86×10^{-3}
---	---	1.23×10^{-3}	1.34×10^{-3}	3.54×10^{-3}	5.63×10^{-3}	1.61×10^{-2}	4.59×10^{-2}	4.35×10^{-2}
---	---	1.23×10^{-3}	2.17×10^{-3}	4.33×10^{-3}	4.84×10^{-3}	2.30×10^{-2}	4.83×10^{-2}	4.48×10^{-2}
---	---	1.80×10^{-3}	2.96×10^{-3}	4.87×10^{-3}	5.60×10^{-3}	2.38×10^{-2}	6.90×10^{-2}	7.81×10^{-2}
---	---	2.34×10^{-3}	3.23×10^{-3}	5.66×10^{-3}	9.25×10^{-3}	2.57×10^{-2}	6.21×10^{-2}	8.40×10^{-2}

---	---	3.44×10^{-3}	3.97×10^{-3}	6.50×10^{-3}	1.09×10^{-2}	2.84×10^{-2}	6.29×10^{-2}	8.93×10^{-2}
---	---	3.04×10^{-3}	5.13×10^{-3}	6.82×10^{-3}	1.03×10^{-2}	3.15×10^{-2}	5.46×10^{-2}	1.79×10^{-1}
---	---	---	5.24×10^{-3}	8.18×10^{-3}	1.30×10^{-2}	2.99×10^{-2}	5.81×10^{-2}	---
---	---	---	7.65×10^{-3}	8.73×10^{-3}	1.32×10^{-2}	3.44×10^{-2}	7.14×10^{-2}	---
---	---	---	6.42×10^{-3}	8.79×10^{-3}	1.31×10^{-2}	3.26×10^{-2}	5.03×10^{-2}	---

最高可循環次數

葡萄糖	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
	1	1	7	15	24	26	25	20	7
果糖			B3	B4	B5	B6	B7	B8	
			16	19	22	12	1	1	

葡萄糖與果糖第一次循環反應時間表

A1			A2			A3		
還原	氧化	加總	還原	氧化	加總	還原	氧化	加總
6378.5	35.5	6414	4996.9	32.7	5029.6	3354.3	27.1	3381.4
A4			A5			A6		
還原	氧化	加總	還原	氧化	加總	還原	氧化	加總
3120.9	83.1	3204	1593.4	62	1655.4	926.2	135.9	1062.1
A7			A8			A9		
還原	氧化	加總	還原	氧化	加總	還原	氧化	加總
764	534.2	1298.2	423.3	1857.8	2281.1	258.9	1868.1	2127
B3			B4			B5		
還原	氧化	加總	還原	氧化	加總	還原	氧化	加總
185.8	92.3	278.1	94.2	451.8	546	65.6	715.6	781.2
B6			B7			B8		
還原	氧化	加總	還原	氧化	加總	還原	氧化	加總
22.4	1970.1	1992.5	45.5	3189.6	3235.1	51.5	2127.3	2178.8

(一) 反應條件極限：以葡萄糖作為還原劑

小結：1.濃度較高或較低時，可循環次數皆較少，未達 10 次。

2.大部分濃度循環時間主要由還原過程來決定，且葡萄糖濃度愈高，還原速率愈快。

(二) 最佳化條件：以葡萄糖及果糖作為還原劑

小結：1.溶液變化顏色最為鮮明：葡萄糖

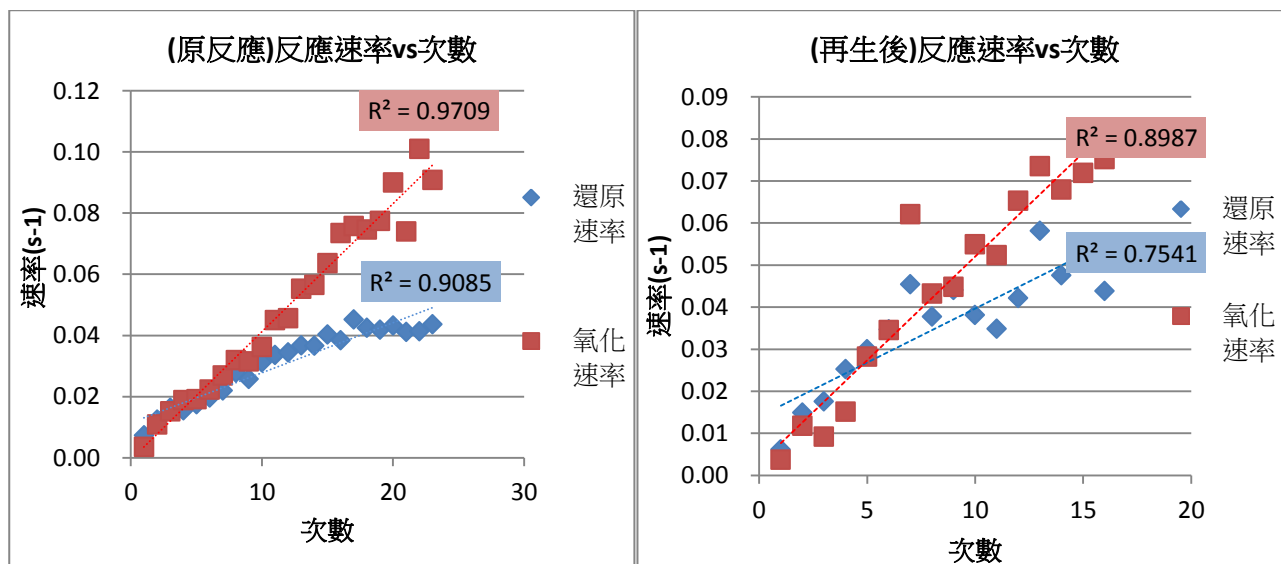
2.最高可循環次數：葡萄糖 A6 濃度最多次，果糖以 B5 濃度最多次

3.第一次循環：葡萄糖中 A6 濃度最快，果糖中 B3 濃度最快

六、再生實驗

(一) 再加入靛胭脂

原反應			再生後	
循環次數	還原速率	氧化速率	還原速率	氧化速率
1	7.36×10^{-3}	3.60×10^{-3}	6.22×10^{-3}	3.73×10^{-3}
2	1.25×10^{-2}	1.09×10^{-2}	1.49×10^{-2}	1.18×10^{-2}
3	1.64×10^{-2}	1.52×10^{-2}	1.76×10^{-2}	9.26×10^{-3}
4	1.55×10^{-2}	1.89×10^{-2}	2.53×10^{-2}	1.52×10^{-2}
5	1.75×10^{-2}	1.92×10^{-2}	3.00×10^{-2}	2.82×10^{-2}
6	1.97×10^{-2}	2.23×10^{-2}	3.47×10^{-2}	3.46×10^{-2}
7	2.20×10^{-2}	2.70×10^{-2}	4.55×10^{-2}	6.21×10^{-2}
8	2.79×10^{-2}	3.19×10^{-2}	3.77×10^{-2}	4.33×10^{-2}
9	2.58×10^{-2}	3.15×10^{-2}	4.41×10^{-2}	4.48×10^{-2}
10	3.13×10^{-2}	3.62×10^{-2}	3.82×10^{-2}	5.49×10^{-2}
11	3.37×10^{-2}	4.50×10^{-2}	3.48×10^{-2}	5.24×10^{-2}
12	3.45×10^{-2}	4.57×10^{-2}	4.22×10^{-2}	6.54×10^{-2}
13	3.68×10^{-2}	5.52×10^{-2}	5.81×10^{-2}	7.35×10^{-2}
14	3.66×10^{-2}	5.65×10^{-2}	4.76×10^{-2}	6.80×10^{-2}
15	4.03×10^{-2}	6.37×10^{-2}	5.24×10^{-2}	7.19×10^{-2}
16	3.85×10^{-2}	7.35×10^{-2}	4.39×10^{-2}	7.52×10^{-2}
17	4.52×10^{-2}	7.58×10^{-2}		
18	4.26×10^{-2}	7.46×10^{-2}		
19	4.18×10^{-2}	7.75×10^{-2}		
20	4.33×10^{-2}	9.01×10^{-2}		
21	4.12×10^{-2}	7.41×10^{-2}		
22	4.13×10^{-2}	1.01×10^{-2}		
23	4.37×10^{-2}	9.09×10^{-2}		

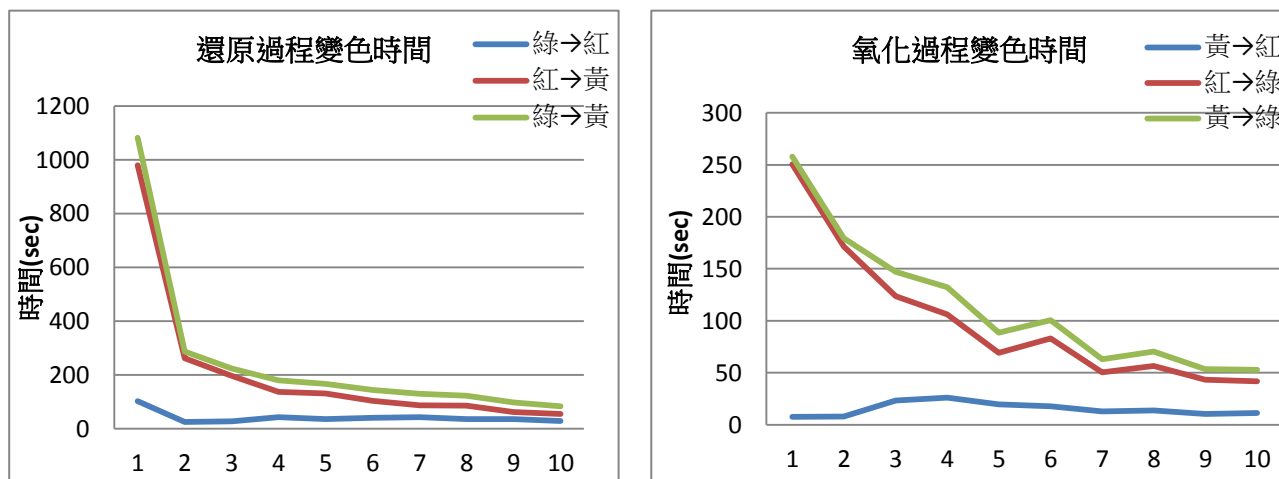


- 小結：1. 再生後顏色變化與原反應相同。
 2. 再生後可循環次數較原反應少。
 3. 再生後的速率線性規律較原反應紊亂。

(二) 再加入葡萄糖

小結：再加入葡萄糖後，溶液無法再變化顏色，實驗無法再生

陸、 討論

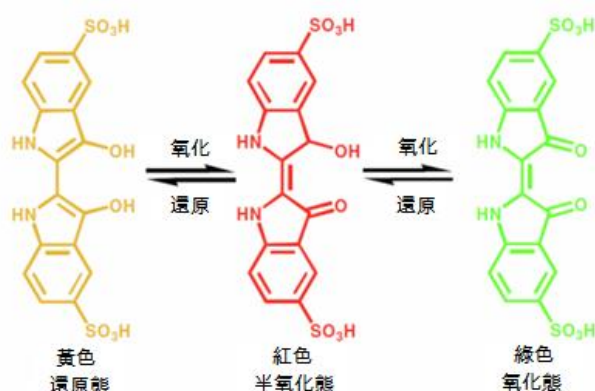


- (一) 從振盪循環的變色時間，我們發現：還原過程中綠色氧化態變成紅色半氧化態的時間幾乎一致，且反應較為快速；同樣地在氧化過程中，黃色還原態變成紅色半氧化態的時間也幾乎一樣。這表示靛胭脂的變色過程快慢主要取決於紅色半氧化態的轉變。靛胭脂的變色過程為氧化還原反應，也是可逆反應，如下圖所表示。

黃色還原態的靛胭脂分子上具有烯醇結構，因此容易被氧化成較穩定的羰基($C=O$)結構。

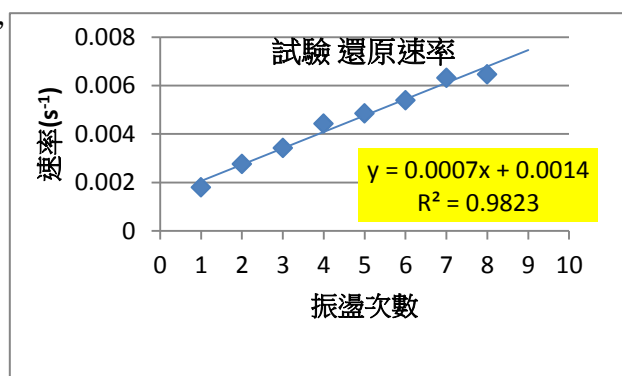
(二) 靛胭脂紅色半氧化態仍可被氧化，亦可被還原，此時為競爭反應，從實驗結果我們發現：紅變綠的時間明顯快於紅變黃的時間！這表示紅色半氧化態上的羥基($-OH$)被氧化成較穩定的羰基($C=O$)是優先進行的反應過程。

(三) 紅色半氧化態結構因氫鍵使結構穩定，卻也因為環狀結構中 O 原子及碳碳雙鍵的存在使得羥基($-OH$)的 H 原子更易離去而被氧化，因此形成綠色氧化態結構是較穩定的形式。

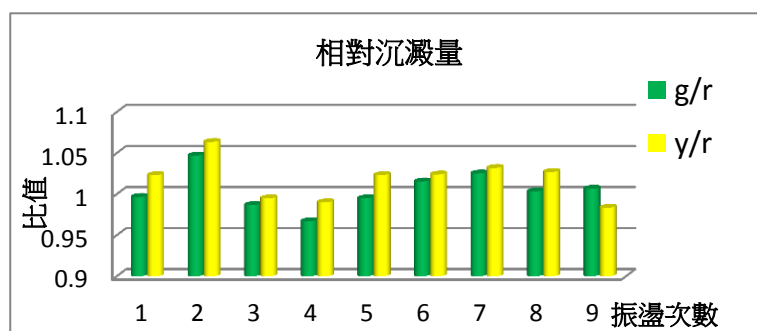


一、在十次振盪循環中，第 1~8 次明顯有漸快的趨勢，且呈線性關係。我們發現第 9 次循環時，顏色變化已不顯著，直到第 10 次顏色不變化，停留在綠色。我們認為溶液中大部分的靛胭脂已成為穩定的酮基結構，且葡萄糖含量已大幅度消耗減少，無法繼續進行還原過程。

二、使用斐林試劑檢測糖含量，沉澱量越多表示其中所含的葡萄糖越多。由於反應為可逆競爭過程，故以相對沉澱量來比較。

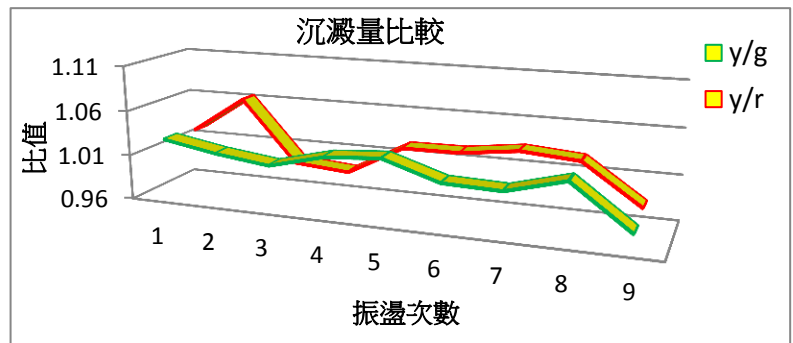


(一) 以紅色半氧化態(r)為基準，第 1~8 次循環時黃色還原態(y)下的葡萄糖含量總多於綠色氧化態(g)；然而在第 9 次振盪過程後，結果即相反，且第 10 次溶



液已不變色。這表示溶液中的葡萄糖含量已不足以將靛胭脂還原；即振盪反應要能反覆進行，溶液中的葡萄糖必須是過量、充足的條件。

- (二) 討論黃色還原態(y)與另兩種顏色的相對量，如下圖，此比值有**明顯相反**的趨勢。大致而言，黃色還原態沉澱量相對於紅色半氧化態為高【y/r】，然而相對於綠色氧化態則較低【y/g】，可看出綠色氧化態及紅色半氧化態的存在為一競爭反應；經第9次循環後，溶液中葡萄糖含量減少，黃色還原態產物銳減，此時出現一致的趨勢。

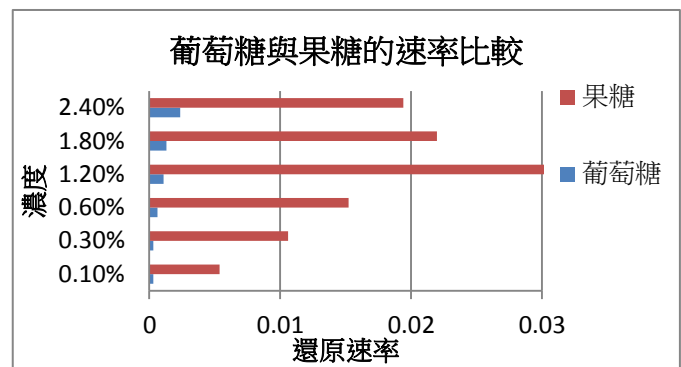


三、不同種類還原劑的比較：

(一) 醣類物質：葡萄糖、果糖、蔗糖

1. 葡萄糖與果糖可使靛胭脂變色，而蔗糖不會，證明蔗糖為不具還原力的糖。

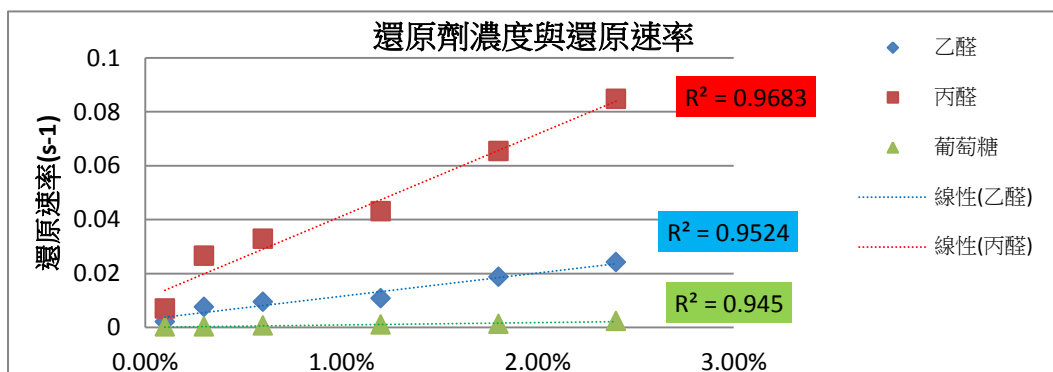
2. 在相同濃度下，比較還原速率明顯為果糖 >> 葡萄糖。顯示果糖的還原力較葡萄糖為強。



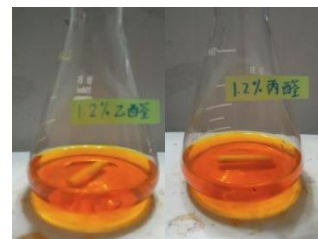
3. 濃度較低時(<1.2%)，果糖的循環次數較多於葡萄糖；濃度較高時(>1.2%)則相反，且高濃度的果糖僅只1次循環，還原速率也減慢。此顯示具強還原力的果糖在過量情況下，使得靛胭脂的氧化還原可逆趨勢僅會以還原過程為主。

1. 醛類物質：乙醛、丙醛、苯甲醛

2. 從實驗結果可知：乙醛、丙醛的濃度與還原速率成一定規律線性關係，且比較其還原能力：丙醛 > 乙醛 > 葡萄糖，如下圖所示。



3. 實驗過程中發現，靛胭脂從綠色變成橘色後即不再變色，無論靜置或攪拌都維持橘色，且僅有 1 次循環。由於乙醛和丙醛皆為活性高、分子結構小的化合物，在還原靛胭脂的過程中，醛分子易與紅色半氧化態上的羥基形成半縮醛，使得還原性大為降低，因此無法繼續將靛胭脂還原到黃色還原態，而持續停留在橘色。



4. 苯甲醛對水的溶解度不高，因此濃度與還原速率間的關係較無法呈現。然而在實驗過程中，發現溶液的變色較其他不同，我們認為苯甲醛易被氧化成苯甲酸，此酸性物質降低溶液的 pH 值，使得應在鹼性中進行的反應受到抑制。

(二) 酮類物質：丙酮、二苯酮

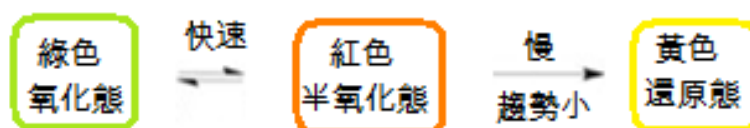
由實驗證明，不論是脂肪酮或芳香酮皆不具還原力。

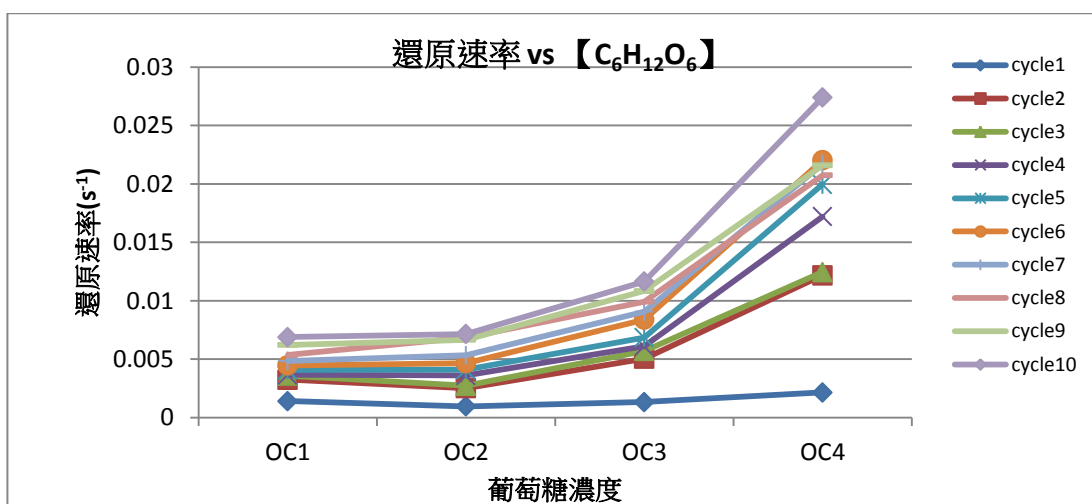
四、開放系與密閉系

- (一) 不論是開放系統或密閉系統，反應循環振盪至最後不變色的次數幾乎一致，表示此振盪反應可循環的次數與氧氣含量無關，僅與葡萄糖濃度有關。

(二) 葡萄糖濃度與反應速率：

1. 葡萄糖濃度愈高，還原速率愈快；循環次數愈多次，還原速率愈快。在還原過程中，葡萄糖作為還原劑反應物，其含量愈多，愈能驅使還原過程的進行，在動力學上反應趨勢傾向還原過程。
2. 由於第 1 次循環與其他循環相比較，其還原速率相當慢，顯示一開始靛胭脂結構穩定，不易被還原，可推知其還原反應的活化能較高，或其平衡常數(K 值)較小、趨勢較低。

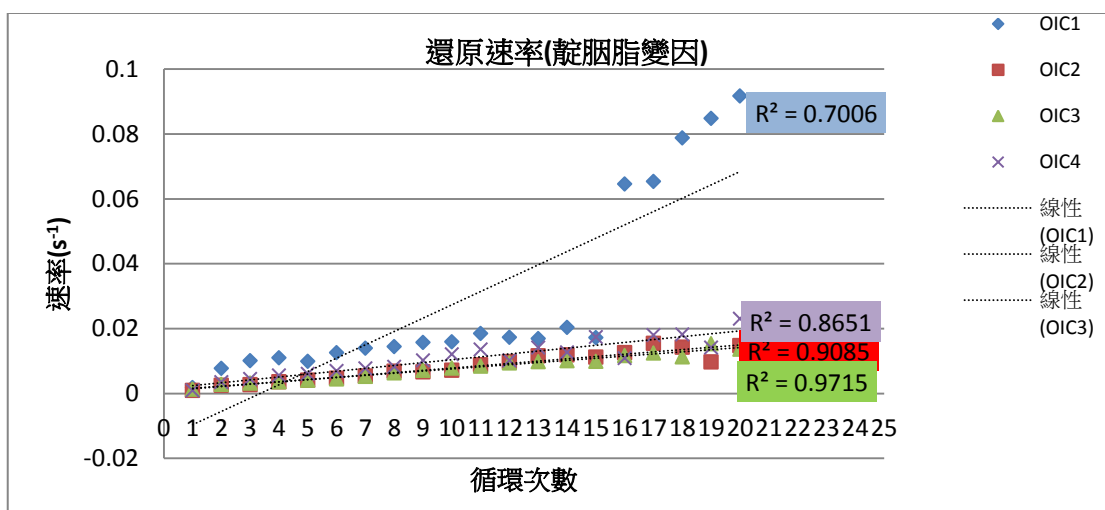




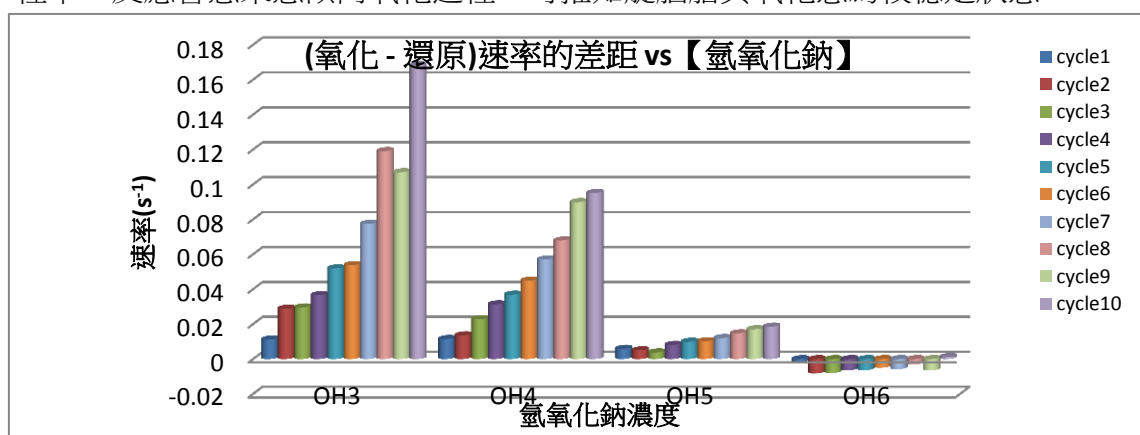
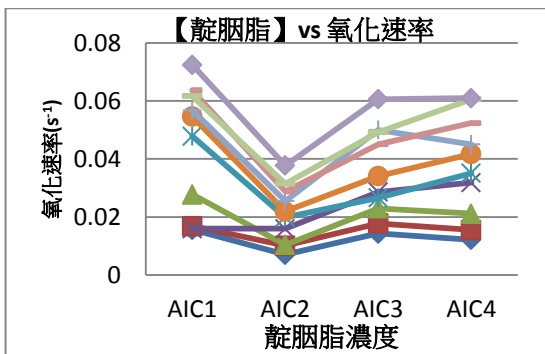
3. 我們發現葡萄糖濃度較低時(0.6%)，其還原速率相對其他來的更慢；我們認為要還原具酮基且較穩定結構的綠色醌脂是較為困難的，反之，此時相對氧化速率是較為快速的，顯示醌脂的氧化與還原過程互為競爭反應。

(三) 醌脂濃度與反應速率

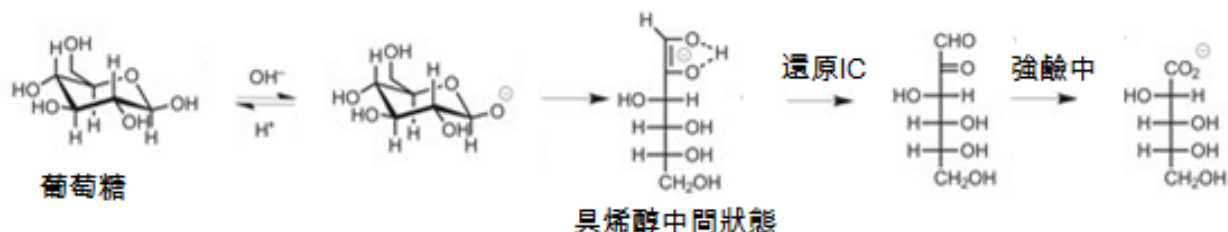
1. 不論在開放系或密閉系中，循環次數愈多次，還原速率都有漸快的趨勢；然而還原速率與醌脂濃度沒有一定的規律變化。
2. 在還原反應過程中，OIC₁~OIC₄的結果幾乎一致，顯示醌脂的含量不影響還原反應的過程。惟獨含量較少的醌脂(OIC₁)在較多次循環後(第 17 次)，其還原速率突然大幅度增加。我們推想在這條件下醌脂為少量、葡萄糖相對為多量，因此在多次振盪循環後，醌脂的自身結構已被鬆動(電子較易移動)，故速率突增。



3. 在氧化過程中，我們發現醌脂的氧化速率較為紊亂、不具規律性。密閉系統中含量較少的 AIC1 速率較快，振盪後期速率幾乎差不多，這是因為顏色界線已不易區別。等速搖晃使氧氣進入瓶中，氧氣含量皆是足量的，隨著循環次數增加，醌脂結構越易改變，故氧化速率有漸增的趨勢。



4. 續上圖，隨著氫氧化鈉濃度增加，氧化與還原速率差值漸縮短；由於 pH 值增加增強葡萄糖的還原力，因此還原趨勢漸強，甚至當氫氧化鈉濃度為 2.0 M(OH⁻)時，其還原速率已超過氧化速率，可知此時葡萄糖的還原力使得還原反應成為動力學有利的方向。

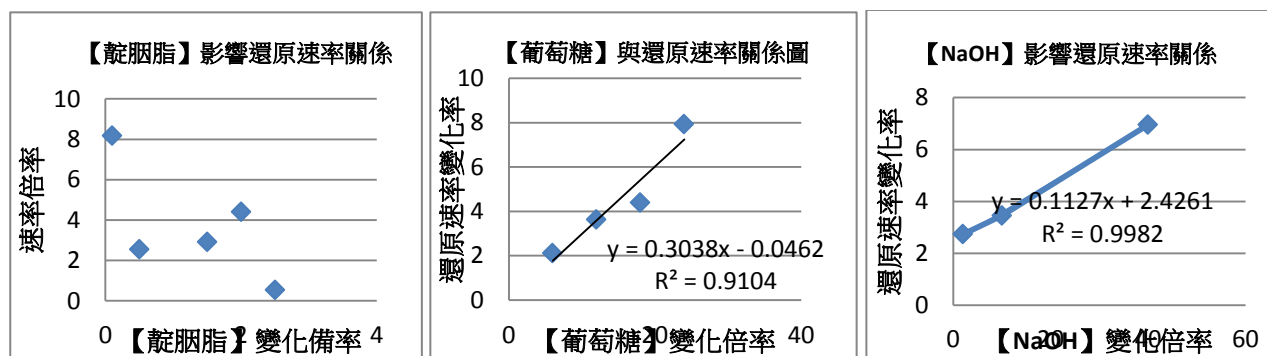


五、溶液的吸收光譜

- (一) 由吸收光譜圖得知，藍色靛胭脂水溶液成為綠色氧化態後，吸收波長從 610 nm 轉移到 420 及 559 nm；隨著還原反應的進行，紅色半氧化態與黃色還原態的吸收皆約落在 410 nm，最終呈現偏土綠色的溶液在 396 nm 附近吸收，在 559 nm 處亦有較小的吸收峰。
- (二) 反應最終不再振盪變色的溶液，其靛胭脂在多次氧化還原過程後已不再是原本的結構，不過從波長 559 nm 處的吸收可知，其最終成分中具有綠色氧化態的靛胭脂產物，其結構相對較為穩定。

六、反應速率定律式的推導：依據濃度變因的倍率變化及速率改變的結果，我們試著推導此反應的速率定律式，以各濃度因素的第一次循環為主來計算初速率與濃度的關係：由下列圖示可知，還原速率與氫氧化鈉的濃度成正比，與葡萄糖濃度成指數方正比關係而與靛胭脂無關。

$$R_{\text{還原}} = k [IC]^0 [C_6H_{12}O_6]^2 [OH^-]^1$$



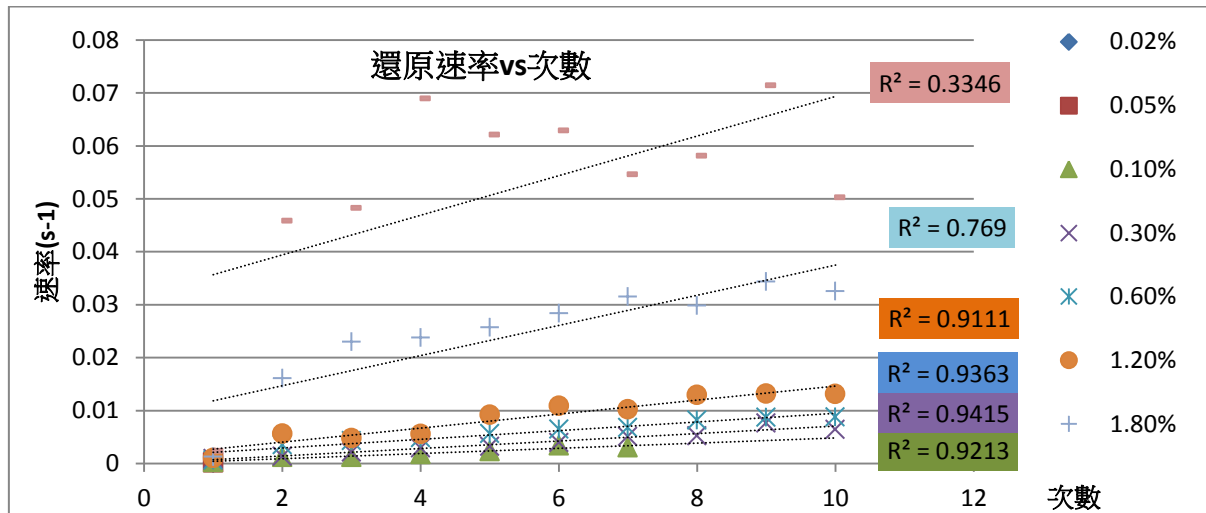
七、反應條件之極限與最佳化條件

(一) 葡萄糖濃度的極限值探討：

- 葡萄糖濃度越高，反應速率愈快，且循環次數愈多，反應速率愈快；然而當濃度 > 1.2%，還原速率呈現紊亂狀況；此外，等待氧化過程的時間過久(約 30 分鐘)，不利振盪反應的

循環。

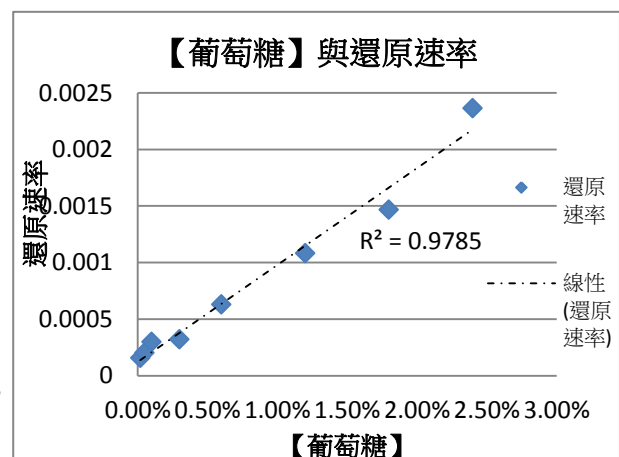
- 當葡萄糖濃度 $<1.2\%$ 時，振盪反應可循環的次數減少，且還原過程的時間過長，例如 0.02% 葡萄糖作用下，還原時間長達 1.5 小時，氧化時間僅 30 秒鐘。
- 當葡萄糖濃度為 1.2% 時，還原速率呈現線性規律，皆是隨著循環次數的增加而上升；此外，此濃度下的第 1 次循環時間最短，有利於觀察振盪現象。



(二) 最佳化之條件：依循下列三個面向歸納出此實驗的最佳化結果，：

- 顏色變化鮮明度：此實驗著重在靛胭脂反應過程中，發色基團結構變化所引發的顏色改變。在實驗嘗試的所有還原劑中，以葡萄糖系列的顏色變化最為鮮明易辨，且隨著循環次數增加，大約到第 $8\sim 9$ 次循環時顏色才會緩緩漸淡。果糖則是第 2 次循環時，顏色會急遽變淡，因此葡萄糖為顏色鮮明的最佳條件。
- 振盪反應時間適切：由實驗結果，雖然果糖濃度為 0.1% 時，其振盪總時間為最短，然而其第 2 次循環的顏色明顯變淡，不利觀察，因此選擇葡萄糖濃度 1.2% 此條件，較適合作為示範教學條件。
- 循環次數最多次：葡萄糖濃度為 1.2% 時有最多次數的循環，表示在此系統下，反應物質的含量適當使得可逆反應可以重複地發生，因此靛胭脂進行氧化或還原過程中，反應不會大幅度趨向氧化或還原，而是逐漸達到平衡穩定的狀態。

(三) 此實驗之應用：利用本實驗中探討葡萄糖濃度影響還原速率的關係，我們可以用來檢測未知溶液中的葡萄糖濃度。利用檢量線之線性關係(如下圖)，將未知糖溶液進行此振盪實驗，尤其反應時間得到還原



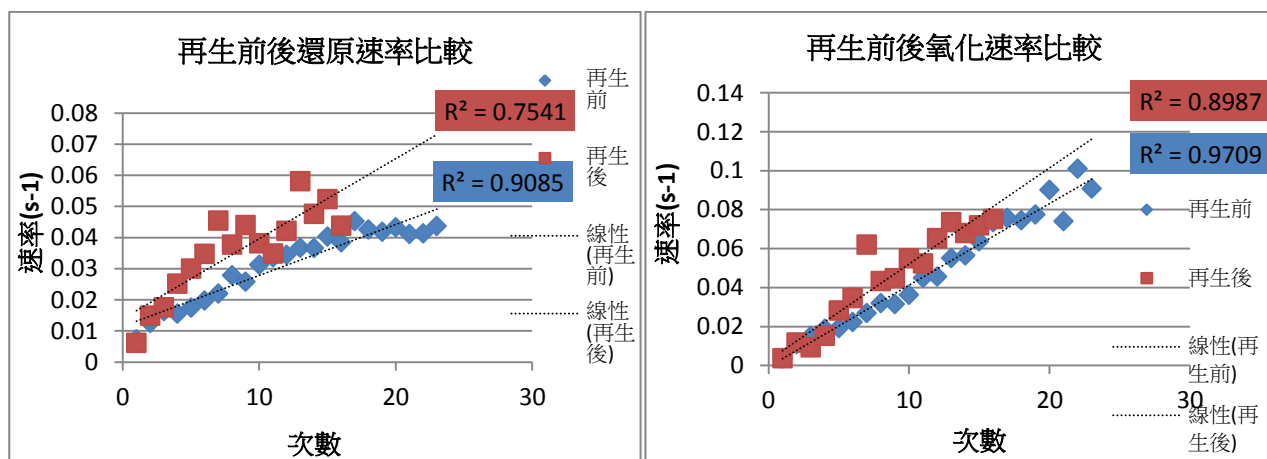
速率，即可對應出此糖溶液之濃度。

八、再生實驗的探討

壹、加入葡萄糖無法再生，但加入靛胭脂後即可再生振盪反應，可以推知反應循環至不再變色時，所消耗完的反應物為靛胭脂，葡萄糖仍為過量。

貳、再生反應可循環的次數少於原反應，由於葡萄糖在原反應中已被消耗，因此可進行循環的次數即較少。

參、再生反應的速率線性規律較原反應混亂，由於原反應中靛胭脂在重複循環過程中，已產生不同於原結構的物質存在溶液中，因而影響再生的氧化還原過程。



柒、結 論

一、在紅綠燈實驗中，當葡萄糖是充足或是過量的情況下，振盪反應能反覆出現。隨著振盪次數增加，還原速率與氧化速率皆會增加，大致呈線性關係。

二、靛胭脂結構在反覆的氧化還原過程中被破壞

(一) 在振盪循環中，靛胭脂其烯醇結構與酮基間的結構互變，直接影響氧化還原反應的速率。其結構因有反覆的氧化、還原而受到破壞，更易被葡萄糖還原，使反應速率有加快的傾向，因此在第一次的循環當中，還原及氧化的速率皆較慢，而在第二次的循環後則有明顯加快的現象。

(二) 進行吸收光譜時發現，靛胭脂溶液最初與最後的波長峰值有不同，隨著氧化還原的反應，其結構上的變異而出現新的物質，此物質不會被葡萄糖還原，使得振盪反應最終停止。若是再加入新鮮配製的靛胭脂溶液，則可使反應再生振盪循環。

三、綠色氧化態為靛胭脂在鹼性環境中的最穩定態

- (一) 靛胭脂在進行氧化還原時，從紅色半氧化態到綠色氧化態的時間(氧化)會比從紅色半氧化態到黃色還原態的時間(還原)還要短暫，由此可知，在變色的過程中，從紅色半氧化態到綠色氧化態為優先過程，表示綠色氧化態為其較穩定的狀態。
- (二) 從吸收光譜得知，最後不變色的溶液其吸收峰改變，但在 559 nm 仍有吸收(為綠色氧化態的吸收)，可以得知最終亦有綠色氧化態物質(靛胭脂在鹼性環境中的最穩定狀態)。
- 四、使用不同種類的還原劑，可以發現還原能力為：丙醛 > 果糖 > 乙醛 > 葡萄糖；然葡萄糖在各種濃度中皆有較穩定的一致性，是較為適合的還原劑。
- 五、在開放與密閉系統中，其氧化速率與還原速率趨勢一致，且可循環次數一致，由此可知，氧氣是充足的，並不會因開放或密閉而造成差別，氧氣並不是影響振盪反應的主因。
- 六、還原反應速率定律式： $R_{\text{還原}} = k[\text{IC}]^0[\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6]^1[\text{OH}^-]^1$
- (一) 葡萄糖濃度較低時，其還原速率 < 氧化速率慢，而當葡萄糖濃度漸增，則使還原速率 > 氧化速率。可知葡萄糖濃度是一項動力學因素，靛胭脂的還原與氧化為互相競爭的反應。
- (二) 氫氧化鈉的濃度增加會增強葡萄糖的還原力，加快還原速率，也會減緩氧化速率。這是因為葡萄糖在鹼性的環境發揮其還原力，使反應趨向還原過程。
- (三) 靛胭脂濃度與速率並未有明顯的關係，而且呈現不規律的狀況
- 七、此振盪反應作為示範實驗之最佳化條件為：1.2% $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{aq})$ 、0.5M $\text{NaOH}(\text{aq})$ 的溶液 50 mL，加入 2.0 mL、1.0% 靛胭脂溶液，第 1 次振盪(還原+氧化)時間約 15 分鐘，第 2 次循環開始其速率會變快，時間可縮短至 5~8 分鐘。

捌、參考資料及其他

【單篇文章】

陳韋丞、林佳萱、陳昱楹(民 100)。DCPIP 變色比一比。

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書。

【單篇文章】

陳英佳(民 100)。紅綠燈---氧化還原指示劑的變色反應。

中學化學示範實驗 Chemical Demonstrations for High School(民 100 年 4 月 13 日)

【評語】 040216

針對已知反應做更詳細的探討，並將研究的對象從葡萄糖擴展到其他的醛類，研究成果具參考價值。建議就靛胭脂在反應的過程中所發生的副反應多做研究，必可帶來新的發現。