

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 化學科

佳作

030211

草酸鐵鉀晶體的生長密碼：探討添加劑對晶體生
成效率的影響

學校名稱： 靜心學校財團法人臺北市私立靜心高級中
等學校

作者：

國二 黃詠淇

國二 陳品霏

國二 許智森

指導老師：

黃碧瑩

陳俊逖

關鍵詞： 草酸鐵鉀、晶體、界面活性劑

摘要

本研究以草酸鉀 ($K_2C_2O_4$) 與氯化鐵 ($FeCl_3$) 反應生成的草酸鐵鉀晶體為主題，探討其成核與結晶機制，並分析多項影響因素，包括溫度、反應物比例、酸鹼、有機溶劑與界面活性劑等。實驗結果顯示，低溫可降低晶體溶解度、提升過飽和狀態，有助於增加晶體產量；其中， $FeCl_3$ 與 $K_2C_2O_4$ 以 2:7 比例混合可獲得最佳結晶效果。界面活性劑方面，卵磷脂表現尤佳，不僅促進晶體生成，亦提升晶體完整度與致密度。進一步使用無糖豆漿、牛奶、雞蛋等天然食材取代純卵磷脂，亦能達到相似成效，顯示其具成本效益與實用性。此外，本研究亦發現草酸鐵鉀具光還原性，能在光照下迅速將亞甲藍還原為無色，展現其在水處理與環保應用上的潛力。

壹、前言

一、研究動機：

在健康教育課程中，我們了解到生物體內可能形成腎結石或膽結石，這些其實就是生物體內的晶體結構。這讓我們對晶體的生長機制產生了濃厚興趣，特別是它們如何在不同環境條件下形成。我們發現生物體環境難以進行研究，因此我們決定從較為簡單的化學方式入手，選擇合成草酸鐵鉀晶體，透過實驗探討影響晶體成長的因素。草酸鐵鉀晶體具有顯著的色彩與明顯的形態，使其成為理想的觀察與分析對象。我們希望透過本研究，初步了解晶體形成的條件與規律，為日後進一步探索生物體中的結晶現象建立基礎。

二、研究目的：

- (一) 探討不同冰浴時間及是否有放置室溫再冰浴對於晶體質量的影響
- (二) 探討不同溫度條件對於草酸鐵鉀晶體析出的影響
- (三) 探討草酸鉀與氯化鐵的比例如何影響草酸鐵鉀晶體的生成
- (四) 探討反應物濃度對草酸鐵鉀晶體形成的影響
- (五) 探討不同化學添加物對晶體析出的影響
- (六) 探討界面活性劑的種類和添加量對晶體生成的影響
- (七) 探討食品界面活性劑添加對晶體生成的影響
- (八) 探討草酸鐵鉀廢液的生活應用

三、文獻回顧：

【表 1】文獻摘要與討論

研究題目	研究摘要
微量化學實驗：小綠綠 晶體與藍印術微量實驗 (周芳妃等人，2016)	以微量實驗合成草酸鐵鉀晶體，探討濃度比例、冷卻與遮光等變因對晶體生成的影響。結果指出，最佳條件為使用 2.0 M FeCl_3 與 2.0 M $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ (1:3 比例)，反應後靜置並經冰水冷卻 10 分鐘，同時全程遮光。此條件下可培養出透明且完整的大晶體，並進一步應用於藍印術創作，對晶體養殖具有參考價值。
實驗一：草酸根合鐵 (III) 酸鉀的製備及表徵 (網路資源)	探討草酸根合鐵 (III) 酸鉀的製備方法及其結構特性。透過混合草酸鉀與氯化鐵溶液，生成三草酸合鐵 (III) 酸鉀沉澱，並經過過濾與乾燥獲得晶體。實驗利用紅外光譜 (infrared) 與 X 射線繞射 (X-ray diffractometer) 分析晶體結構，確認其分子組成與配位模式。此外，研究不同溫度、濃度及反應條件對晶體生長的影響，結果顯示適當的溫度與飽和度可提升晶體品質。本研究為草酸根合鐵 (III) 酸鉀的合成與應用提供重要參考。
晶晶相擁—探究多樣態 結晶及顯微縮時攝影在 結晶之應用 (魏呈亦等人，2020)	探討多種因素對晶體生長的影響，並運用顯微縮時攝影技術動態記錄結晶過程。透過實驗培養不同類型的明礬晶體，發現特定條件下可形成融合結晶與包心結晶，並進一步優化其生長參數。利用顯微攝影與測量技術，精確計算晶體生長速率與晶面角度，提升對晶體成長機制的理解。本研究不僅成功培養出更大型且具層次結構的晶體，也證實顯微縮時攝影在結晶研究的應用價值，為未來晶體工程與材料科學研究提供參考。
Differential Thermal Analysis of Potassium Oxalate (Tatsuo Higashiyama 、 Shigeo Hasegawa ， 2006)	本研究利用差熱分析 (Differential Thermal Analysis) 與熱重分析 (Thermogravimetric Analyzer) 研究草酸鉀的熱分解行為，並透過 X 射線繞射技術確定其三種晶型。實驗顯示，草酸鉀在加熱過程中經歷脫水、分解成碳酸鉀與氧化鉀的階段，並在不同溫度範圍內呈現不同的熱效應。研究確定了草酸鉀的熱分解機制，並發現結晶水的存在會影響其分解溫度與結構轉變。這些結果有助於理解草酸鉀的熱穩定性，並可為相關材料的熱處理與應用提供科學依據。

貳、研究設備及器材

一、實驗藥品：

藥品名稱	藥品名稱	藥品名稱
硫酸 (H_2SO_4)	蒸餾水 (H_2O)	異丙醇 ($(CH_3)_2CHOH$)
硝酸 (HNO_3)	氯化鐵 ($FeCl_3$)	碳酸氫鈉 ($NaHCO_3$)
鹽酸 (HCl)	碳酸鈉 (Na_2CO_3)	非離子型界面活性劑 (Triton X-100)
醋酸 (CH_3COOH)	草酸鉀 ($K_2C_2O_4$)	陽離子型界面活性劑 ($CH_3(CH_2)_{15}N(Cl)(CH_3)_3$)
丙酮 ($(CH_3)_2CO$)	丙三醇 ($C_3H_8O_3$)	十二烷基硫酸鈉 ($NaC_{12}H_{25}SO_4$)
乙醇 (C_2H_5OH)	氫氧化鈉 ($NaOH$)	亞甲藍液
赤血鹽 ($K_3[Fe(CN)_6]$)		

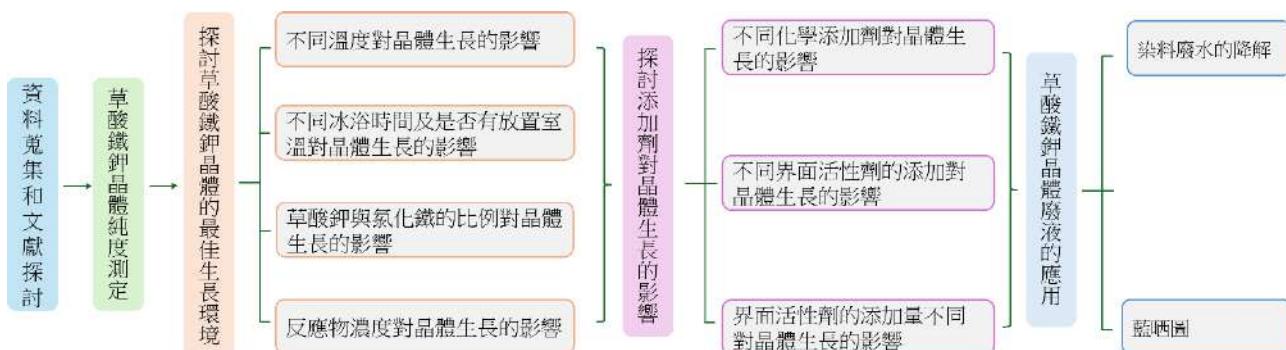
二、實驗器材：

器材名稱	器材名稱	器材名稱	器材名稱
燒杯	滴定管	塑膠滴管	玻棒
濾紙	計時器	電子天平	樣品瓶
漏斗	溫度計	200 μL 微量滴管	熱重分析儀
刮杓	秤量紙	1000 μL 微量滴管	麥克筆
冰塊	容量瓶	PASCO SPECTROMETER	夾鏈袋
試管	錐形瓶		

三、其他材料：無糖豆漿、牛奶、雞蛋、洗碗精、大豆卵磷脂。

參、研究過程或方法

一、實驗流程與架構（如圖 1、圖 2）：



【圖 1】實驗架構圖



【圖 2】實驗流程示意圖

二、預備實驗：草酸鐵鉀晶體定性分析

(一) 過錳酸鉀滴定

1. 原理：以過錳酸鉀滴定法測定樣品中草酸根含量的反應原理為氧化還原反應。

在酸性條件下，過錳酸根離子（MnO₄⁻）是一種強氧化劑，能夠將草酸根氧化成二氧化碳（CO₂），而自身被還原成淡粉紅色的二價錳離子（Mn²⁺）。當反應完成後，過量的 KMnO₄ 會使溶液呈現淡紅色，並在 30 秒內不消退，即達滴定終點。根據過錳酸鉀的用量，反推出結晶水的含量。

2. 化學反應式： $2\text{MnO}_4^- + 5\text{C}_2\text{O}_4^{2-} + 16\text{H}^+ \rightarrow 2\text{Mn}^{2+} + 10\text{CO}_2 \uparrow + 8\text{H}_2\text{O}$

3. 實驗步驟：

(1) 精確樣品 0.10 ~ 0.15 g，進行三重覆以提高準確度，取其平均值。

(2) 將樣品置於 125 mL 錐形瓶中，加入 25.0 mL 水與 5.0 mL 1.00 M 硫酸。

(3) 先滴入約 8.0 mL 的 0.02 M 過錳酸鉀標準溶液，然後加熱至 75°C。

(4) 紫紅色消失後，繼續用 KMnO₄ 滴定，直到溶液出現微紅色並持續 30 秒

不褪色為終點並記錄滴定所消耗的 KMnO₄ 標準溶液總體積。

$$\text{計算方式 : } \frac{W_{\text{樣品}}}{M} \times 3 \times 2 = C_M \times V_{\text{MnO}_4^-} \times 5$$

4. 結果：

(1) 養晶樣品（未烘乾）

(2) 養晶樣品（烘乾條件：70°C， 24 hr）

【表 2】未烘乾樣品滴定數據

	W _{樣品} (g)	V _{MnO₄} (mL)	M (莫耳質量)
一	0.150	18.4	489.1
二	0.150	18.3	491.8
三	0.146	17.9	492.1
平均			491.1

【表 3】烘乾樣品滴定數據

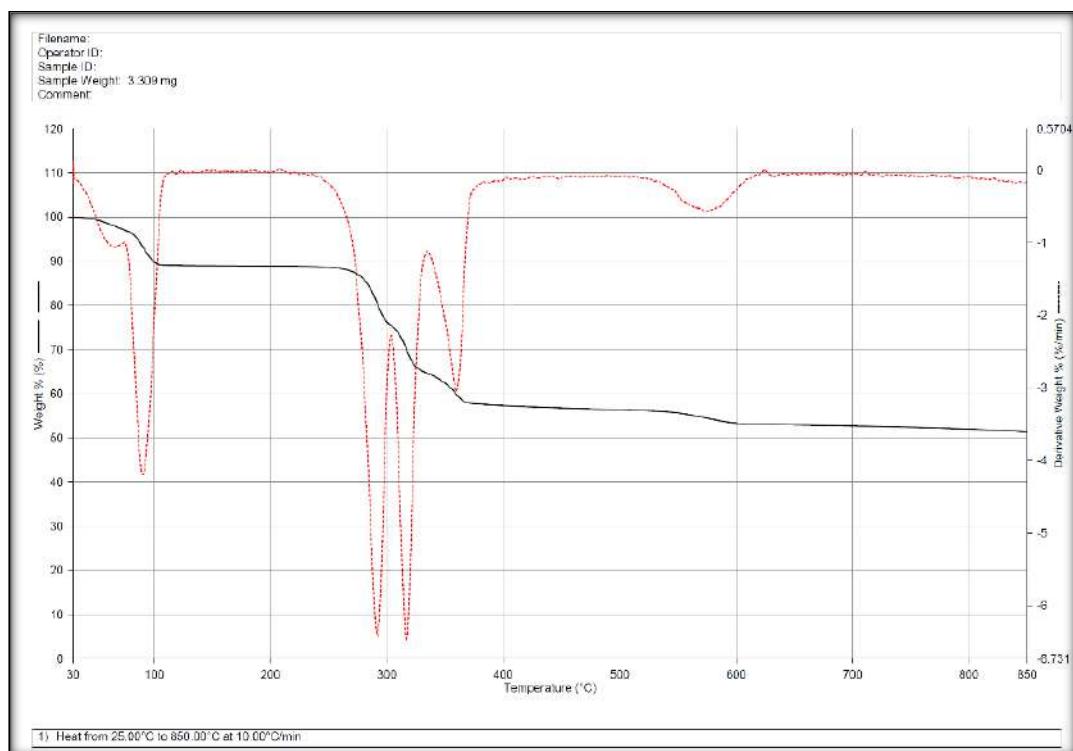
	W _{樣品} (g)	V _{MnO₄} (mL)	M (莫耳質量)
一	0.150	20.5	439.0
二	0.143	19.7	435.5
三	0.149	20.4	438.2
平均			437.5

未烘乾樣品有結晶水，因此它的莫耳質量理論值為 491，與本實驗平均值一致；而烘乾樣品沒有結晶水，因此它的莫耳質量理論值為 437，實驗結果與之相差不大。整體而言，兩種樣品皆呈現高度純度，顯示實驗操作具有良好再現性與準確性。

(二) 熱重分析 (TGA 和 DTA 曲線)

1. 原理：熱重分析曲線 (Thermogravimetric Analysis curve, TGA) 是一種用於測量物質隨著溫度變化所引起的質量變化的技術。熱差分析曲線 (Differential Thermal Analysis, DTA) 則幫助判斷樣品是否有吸/放熱反應，找出反應或轉變的特徵溫度，搭配 TGA 分析樣品的熱行為、穩定性與反應性。當物質在特定的溫度範圍內加熱或冷卻時，質量會隨著物理或化學過程（如揮發、分解、氧化還原等）而改變。該過程中，物質的質量變化會被精確記錄並轉化為 TGA 曲線，以此來分析物質的熱穩定性、組成、分解溫度、揮發物含量等。

2. 結果：



【圖 3】養晶樣品之 TGA 和 DTA 曲線

本儀器操作參數為樣品重量 3.309 mg、升溫速率為 10 °C/min，從 25°C 加熱到 850 °C。熱重分析有助於了解樣品成分、含水量、有機/無機比例、熱穩定性等資訊。

【表 4】TGA 和 DTA 曲線分析結果

溫度範圍	TGA 曲線變化	DTA 曲線峰型	可能的解釋
50-100°C	微幅失重	吸熱峰	水分揮發
280-400°C	劇烈失重	多個吸/放熱峰	有機物分解或草酸分解
>500°C	緩慢失重	放熱或吸熱峰	碳氧化、金屬氧化物轉變

實驗結果顯示，草酸鐵鉀加熱至約 80°C 時會失去結晶水，約 280°C 時，草酸根會分解產生 CO₂ 和 CO，最終在 500°C 以上形成 Fe₂O₃與 K₂CO₃等無機殘渣。透過各階段的質量變化，可推估樣品組成與純度。

三、統計分析：

所有實驗皆進行三重複，輔以 Microsoft Office Excel versions 2501 進行數據分析及繪圖。

實驗結果皆以「平均值 ± 標準差」呈現，繪製相關圖表比較其異同。

四、研究方法：

(一) 探討不同冰浴時間及是否有放置室溫對於晶體質量的影響

1. 實驗目的：在進行其他實驗前，我們先研究冰浴時間及在冰浴前是否先行放置室溫對於晶體質量的影響，來決定後續實驗冰浴的時間及是否要放置室溫。

2. 實驗步驟：

(1) 取 14.0 mL 2.0 M K₂C₂O₄(aq) 與 4.0 mL 2.0 M FeCl₃(aq)，加入各組樣品瓶中。

(2) 在冰浴前有放置室溫組，將各三個樣品瓶放置於室溫下，靜置 10 分鐘，再放入冰浴環境中開始冷卻析出結晶，每 10、20、30、40、50 及 60 分鐘進行分析與取樣；在冰浴前未放置室溫組，將各三個樣品瓶直接冰浴，開始冷卻結晶，與有放置室溫組相同的六種取樣時間。

(3) 以濾紙過濾，再以冰水沖洗晶體。

(4) 將處理好的濾紙與晶體放置在培養皿上並放置室溫自然風乾 24 小時。

(5) 用電子天平測量晶體質量並比較不同冰浴時間及是否放置室溫的數據。

(二) 探討不同溫度條件下，草酸鐵鉀晶體的質量變化

1. 實驗目的：主要探討不同溫度對草酸鐵鉀晶體成長的影響，觀察並比較各溫度下晶體質量的變化，找出最佳結晶條件。

2. 實驗步驟：

- (1) 取 14.0 mL 2.0 M $K_2C_2O_4(aq)$ 與 4.0 mL 2.0 M $FeCl_3(aq)$ ，加入各組樣品瓶中。
- (2) 將各三個樣品瓶分別放至於冰浴 ($0^{\circ}C$) 中與室溫 ($25^{\circ}C$) 中 40 分鐘，使用溫度計測量溫度。
- (3) 承上，重複相同步驟處理晶體，並測量晶體的質量。

(三) 探討草酸鉀與氯化鐵的添加比例如何影響草酸鐵鉀晶體的生成量

1. 實驗目的：實驗旨在探討不同量的草酸鉀和氯化鐵混合比例，對草酸鐵鉀晶體的生成量、大小和形態的影響。草酸鉀溶液：氯化鐵溶液的添加體積比為 2 : 7、1 : 5、7 : 2，將有助於研究反應物的添加比例如何影響草酸鐵鉀晶體的結晶。
2. 實驗步驟：

- (1) 取不同毫升數的 2.0 M $FeCl_3(aq)$ 與 2.0 M $K_2C_2O_4(aq)$ ，比例分別為 2 : 7、1 : 5 及 7 : 2，加入各組樣品瓶中。
- (2) 將各三個樣品瓶放至於冰浴 ($0^{\circ}C$) 中冷卻 40 分鐘。
- (3) 承上，重複相同步驟處理晶體，並測量晶體的質量。

(四) 探討反應物濃度對草酸鐵鉀晶體形成的影響

1. 實驗目的：研究不同濃度的反應物對草酸鐵鉀晶體結晶過程的影響，包括結晶速率和晶體大小。透過添加不同量的蒸餾水 (0 mL、1.0 mL、2.0 mL、3.0 mL、4.0 mL) 來改變溶液的濃度，觀察蒸餾水的添加量如何影響草酸鐵鉀晶體的生成。

2. 實驗步驟：

- (1) 取 14.0 mL 2.0 M $K_2C_2O_4(aq)$ 與 4.0 mL 2.0 M $FeCl_3(aq)$ ，加入各組樣品瓶中。
- (2) 分別加入蒸餾水 1.0 mL、2.0 mL、3.0 mL、4.0 mL 於各組樣品瓶中，並以無添加作為對照組。
- (3) 承上，重複相同步驟處理晶體，並測量晶體的質量。

(五) 探討不同化學添加物對晶體質量的影響

1. 實驗目的：在經過實驗一～四後，我們想探討不同化學添加物對草酸鐵鉀晶體生長過程及晶體形態的影響，特別是要研究這些添加劑的 pH 值是否對晶體生長有顯著影響。這些添加劑可能會改變溶液的化學環境，從而影響草酸鐵鉀晶體的結晶過程、大小、形態及結晶質量。

2. 實驗步驟：

- (1) 取 14.0 mL 2.0 M $K_2C_2O_4(aq)$ 與 4.0 mL 2.0 M $FeCl_3(aq)$ ，加入各組樣品瓶中。

- (2) 酸、鹼組中分別加入 2.0 mL 1.0 M NaOH(aq)、HCl(aq)、H₂SO₄(aq)、HNO₃(aq)、CH₃COOH(aq)、Na₂CO₃(aq)、NaHCO₃(aq)於各組離心管中；有機溶劑組中分別加入 2.0 mL 的純乙醇、丙酮、丙三醇及異丙醇於各組離心管中。
- (3) 承上，重複相同步驟處理晶體，並測量晶體的重量。

(六) 研究界面活性劑的添加對晶體形狀、大小以及晶體生成的影響

1. 實驗目的：在搜尋資料的過程中，我們發現界面活性劑對晶體生成具有一定影響。因此，選擇了陽離子型、陰離子型、非離子型與兩性界面活性劑，探討界面活性劑對草酸鐵鉀晶體生成量的影響。
2. 實驗步驟：
 - (1) 取 14.0 mL 2.0 M K₂C₂O₄(aq) 與 4.0 mL 2.0 M FeCl₃(aq)，加入各組樣品瓶中。
 - (2) 分別加入 2.0 mL 0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0% 的陽離子型界面活性劑、陰離子型界面活性劑、非離子型界面活性、兩性型界面活性，並使溶液充分混合。
 - (3) 承上，重複相同步驟處理晶體，並測量晶體的重量。

(七) 研究食品界面活性劑對晶體生成的影響

1. 實驗目的：在實驗六的結果中，我們發現卵磷脂對草酸鐵鉀晶體的生成具有最明顯的促進效果。然而，由於卵磷脂價格較高，若要在實際應用中使用可能不具成本效益。因此，我們進一步思考是否能以市售中含有卵磷脂的食品來取代純卵磷脂，並探討這些食品對晶體生成量的影響，以評估其可行性與效益。
2. 實驗步驟：
 - (1) 取 14.0 mL 2.0 M K₂C₂O₄(aq) 與 4.0 mL 2.0 M FeCl₃(aq)，加入各組樣品瓶中。
 - (2) 分別加入 2.0 mL 無糖豆漿、蛋黃、牛奶，並使溶液充分混合。
 - (3) 承上，重複相同步驟處理晶體，並測量晶體的重量。

(八) 研究食品中的界面活性劑對晶體生成的影響

1. 實驗目的：我們發現某些食品中的界面活性劑（如卵磷脂）會影響草酸鐵鉀晶體的生成量。為了進一步了解其影響力，我們決定以實驗七的最佳結果—無糖豆漿進行實驗，來探討食品中的界面活性劑是否也會對晶體生成產生影響。
2. 實驗步驟：
 - (1) 取 14.0 mL 2.0 M K₂C₂O₄(aq) 與 4.0 mL 2.0 M FeCl₃(aq)，加入各組樣品瓶中。
 - (2) 分別加入無糖豆漿 1.0 mL、2.0 mL、3.0 mL、4.0 mL，並使溶液充分混合。

(3) 承上，重複相同步驟處理晶體，並測量晶體的重量。

(九) 探討界面活性劑對於晶體型態和大小之影響

1. 實驗目的：比較不同電性界面活性劑對草酸鐵晶體的成核、樣貌與尺寸的影響，以評估其調控晶體生長的潛力。

2. 實驗步驟：

(1) 以縫衣線懸吊一枚晶體作為晶種，並將線的一端固定於樣品瓶瓶蓋內側。

(2) 於每組樣品瓶中分別加入 21.0 mL 2.0 M $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4(\text{aq})$ 與 6.0 mL 2.0 M $\text{FeCl}_3(\text{aq})$ 。

(3) 對照組：不額外添加任何試劑。

實驗組：依序加入 3.0 mL

a. 陽離子界面活性劑：十六烷基三甲基氯化銨 [$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{NCl}(\text{CH}_3)_3$]

b. 陰離子界面活性劑：十二烷基硫酸鈉 [$\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$]

c. 非離子界面活性劑：Triton X-100 [$\text{C}_{14}\text{H}_{22}\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$]

d. 兩性界面活性劑：卵磷脂

(4) 將瓶蓋旋緊，確保晶體完全浸沒於溶液中，並靜置 24 小時。

(5) 取出晶體，記錄其形貌並進行觀察。

(十) 探討草酸鐵鉀廢液在光照下對亞甲藍溶液之還原速率

1. 實驗目的：探討草酸鐵鉀廢液是否具備還原能力，能在光照條件下將亞甲藍溶液還原為無色，並以此初步評估其作為還原劑於生活中對染料降解、污水處理等應用的可行性。

2. 實驗步驟：

(1) 於四支透明試管中分別量取：

對照組：水 15.0 mL。

實驗組：

a. 草酸鐵鉀廢液 15.0 mL

b. 草酸鐵鉀廢液 7.5 mL+蒸餾水 7.5 mL

c. 草酸鐵鉀廢液 5.0 mL+蒸餾水 10.0 mL

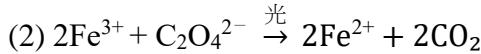
d. 草酸鐵鉀廢液 3.75 mL+蒸餾水 11.25 mL

(2) 各試管加入 2.0 mL 亞甲藍溶液，輕搖混勻。

(3) 將試管置於同一光源下反應；依不同時間取樣，以分光光度計測定吸光度。

3. 原理：

(1)亞甲藍溶液在氧化態與還原態之間的可逆性進行觀察。當亞甲藍處於氧化態時呈藍色，若加入具有還原性的物質，便會將亞甲藍還原為無色。



在光照下，草酸鐵錯合物 ($[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$) 會分解，釋放出 Fe^{2+} 與 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ ，並伴隨 CO_2 氣體的產生。此過程屬於光還原反應， $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 在光的作用下提供電子，將 Fe^{3+} 還原為 Fe^{2+} 。

(3)氧化態亞甲藍 + 還原劑 ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) → 還原態亞甲藍 + 氧化產物

草酸鐵鉀作為還原劑時，能將藍色亞甲藍還原為無色，反映出草酸鐵鹽的光還原能力，也說明其在水處理或檢測系統中可作為還原反應的觸媒或電子供體。

(十一) 探討草酸鐵鉀廢液在藍晒應用

1. 實驗目的：探討草酸鐵鉀廢液是否具備運用於藍晒之應用能力，能在光照條件下產生普魯士藍變色，並且探討其生活中應用的可行性。

2. 實驗步驟：

(1)取一個小夾鏈袋，用黑色油性筆在袋子上畫圖案，作為遮光罩。

(2)夾鏈袋加入 1.0 mL 0.1 M H_2SO_4 (aq) 和 1.0 mL 2.0 M 鐵氰化鉀溶液。

(3)將各組的草酸鐵鉀廢液 1.0 mL 加入夾鏈袋並將一張濾紙放入吸取溶液。

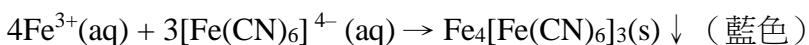
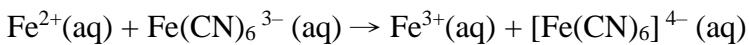
(4)在室外陽光下放置到出現深藍色後，停止曝曬。

(5)小心取出濾紙並以紙巾將濾紙上的水吸乾，觀察實驗結果。

3. 原理：草酸鐵鉀是一種含有 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 與 Fe^{3+} 的錯合物，常被用於藍晒感光液的製備。在酸性環境中，草酸根會生成 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 或 HC_2O_4^- ，此時失去配位能力，但仍具有還原性。受到光照時，草酸分子會還原 Fe^{3+} 為 Fe^{2+} ，並釋放出 CO_2 氣體，為一種典型的光化學反應，反應速度會因光照而大幅提升。反應式如下：



當這些反應產生的 Fe^{2+} 與鐵氰化鉀 ($\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) 接觸後，會生成一種深藍色的沉澱物--普魯士藍 (Prussian blue)。這種沉澱具有極佳的遮光性與化學穩定性，是藍晒圖案顯影的關鍵成分。



肆、研究結果

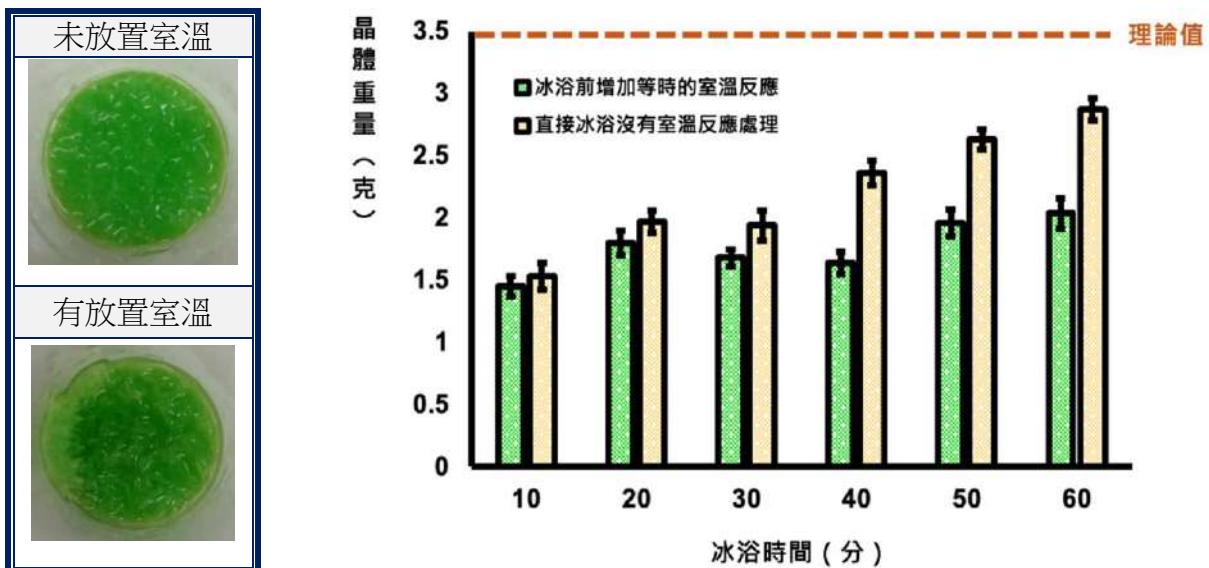
一、不同冰浴時間及是否有放置室溫對於晶體質量的影響

(一) 結果：

【表 5】不同冰浴條件及是否放置室溫下收集到的晶體質量及產率

冰浴時間(分鐘)	室溫 10 分鐘(g)	室溫 10 分鐘產率(%)	直接冰浴(g)	直接冰浴產率(%)
10	1.45 ± 0.08	41.43	1.53 ± 0.11	43.71
20	1.80 ± 0.10	51.43	1.97 ± 0.09	56.29
30	1.68 ± 0.07	48.00	1.94 ± 0.12	55.42
40	1.64 ± 0.09	46.86	2.36 ± 0.10	67.42
50	1.96 ± 0.11	56.00	2.63 ± 0.08	75.14
60	2.04 ± 0.12	58.29	2.87 ± 0.09	82.00

【表 6】冰浴前是否放置室溫晶體照片



【圖 4】不同冰浴條件及冰浴前是否放置室溫對晶體的影響

(二) 結果分析：

1. 反應初期（10 ~ 20 分鐘）：

兩組差異不大。冰浴前有放置室溫組在 10 分鐘時晶體產量為 1.26 g，沒放置室溫組為 1.33 g。隨後 20 分鐘時產量皆上升，但沒放置室溫組產量較高。顯示快速冰浴冷卻能快速形成過飽和溶液，促進初期晶體生成。

2. 反應中期（30 ~ 40 分鐘）：

冰浴前沒放置室溫組產量持續上升，從 1.67 g 增加至 2.05 g；而有放置室溫組則從 1.45g 微幅下降至 1.43g。可能是因室溫冷卻速率較慢，過飽和程度不夠，成核速率降低，部分晶體可能溶解或再結晶，導致整體產量變化不大甚至略降。

3. 反應後期（50 ~ 60 分鐘）：

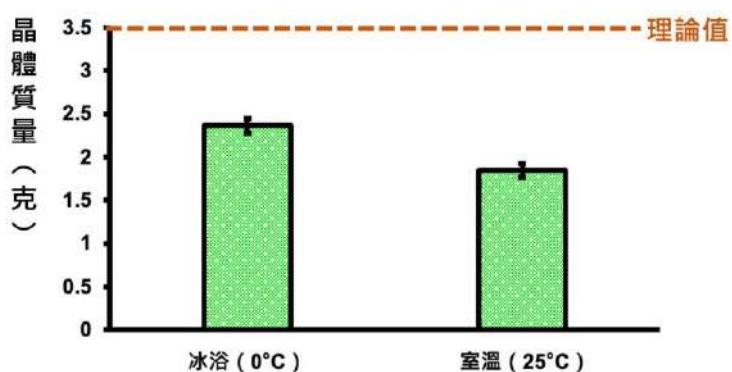
冰浴前沒放置室溫組晶體量持續增加至最高值 2.49 g，有放置室溫組則增至 1.77 g，兩者差距明顯。這顯示長時間冰浴對晶體持續生長有顯著效果，未經室溫處理的溶液能快速並持續維持高飽和度，使晶體產量穩定增加。

二、不同溫度條件下，草酸鐵鉀晶體的質量變化

(一) 結果：

【表 7】不同溫度條件下收集到的晶體質量

	冰浴 (0°C)	室溫 (25°C)
烘乾 2 小時照片		
晶體質量 (g)	2.36 ± 0.09	1.85 ± 0.08
晶體產率 (%)	67.43	52.86



【圖 5】不同溫度條件對晶體質量的影響

(二) 結果分析：

- 由表六及圖四可知雖然兩者收集到的晶體質量差異不算極大（約 0.21 g），但仍可觀察到冰浴條件較有利於晶體的生成。我們發現低溫可以產生更多晶體，冰浴條件可降

低草酸鐵鉀的溶解度，使晶體較易析出並減少重新溶解的狀況。

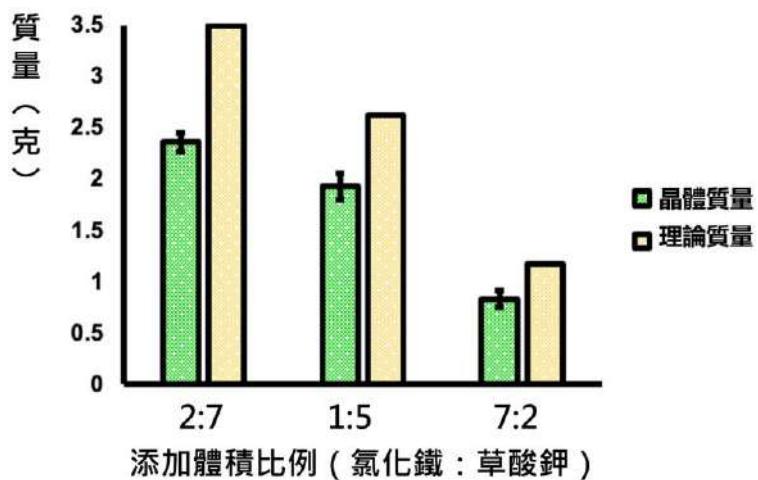
- 較低溫度時，由於溶解度降低，溶液更容易達到過飽和狀態，促使晶體快速析出，形成數量較多但尺寸較小的晶體。而較高溫度則提升了分子運動速率，使溶解度增加，減緩過飽和的形成，使得晶體生長較慢但尺寸較大。

三、草酸鉀與氯化鐵的添加比例如何影響草酸鐵鉀晶體的生成量

(一) 結果：

【表 8】不同體積的氯化鐵溶液與草酸鉀溶液所收集到的晶體質量

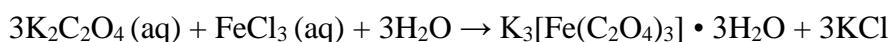
體積比 ($\text{Fe}^{3+} : \text{C}_2\text{O}_4^{2-}$)	2 : 7 (1 : 3.5)	1 : 5	7 : 2 (1 : 0.3)
烘乾 2 小時照片			
晶體質量 (g)	2.36 ± 0.09	1.36 ± 0.06	0.51 ± 0.04
產率 (%)	67.43	51.91	43.58



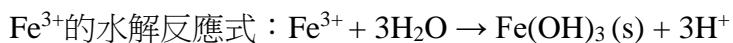
【圖 6】不同體積比的氯化鐵與草酸鉀對晶體質量的影響

1.結果分析：

我們想探討氯化鐵與草酸鉀不同添加比例對草酸鐵鉀晶體產量的影響。其化學反應式：



(1) FeCl_3 過量時 (7 : 2)，會使晶體產量大幅下降，根據化學反應方程式，若 FeCl_3 過量但 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 不足，則無法形成足夠的 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]$ ，導致晶體產量明顯降低。我們推測過多 Fe^{3+} 可能與水作用，生成氫氧化鐵沉澱，影響晶體純度與產量。



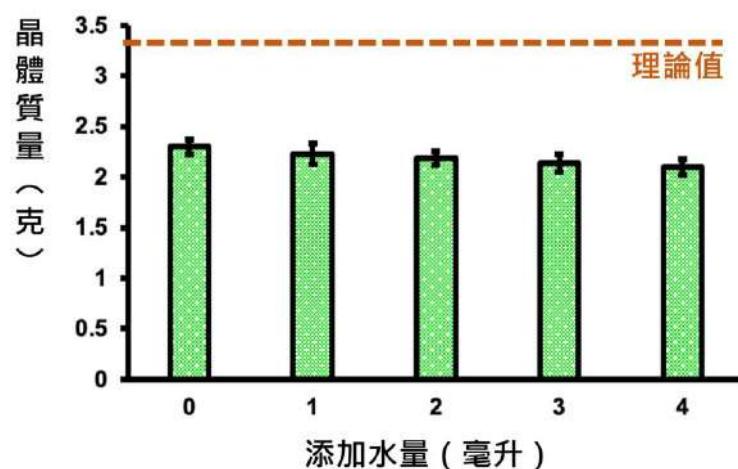
- (2) 體積比 2 : 7 比例的產量最高，此比例與化學方程式的理論莫耳數比 1 : 3 含有更多的 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ，使 Fe^{3+} 更容易與 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 結合形成 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]$ ，提高產量。過量的 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 可能有助於維持較佳的溶解度，避免副產物影響晶體形成，且微過量的 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 可以使產物重量提升。1 : 5 這個比例草酸根大過量，但略低於理論值，顯示過量太多較不利於晶體生成。
- (3) 較高的草酸鉀比例能夠提升晶體的析出量，但可能導致晶體形態較為細小且易碎。適當的氯化鐵比例有助於形成較穩定且規則的晶體結構，而當氯化鐵比例過高時，則可能影響草酸鉀的結晶過程，使晶體產量下降，甚至形成雜質沉澱。調整草酸鉀與氯化鐵的比例能夠有效控制晶體的生長品質與形態。

四、反應物濃度對草酸鐵鉀晶體生成量的影響

(一) 結果：

【表 9】不同反應物濃度對晶體質量影響的實驗結果

蒸餾水添加量 (mL)	0	1.0	2.0	3.0	4.0
烘乾 2 小時照片					
晶體質量 (g)	2.30 ± 0.07	2.23 ± 0.10	2.19 ± 0.07	2.14 ± 0.09	2.10 ± 0.08
產率 (%)	65.71	63.71	62.57	61.14	60.00



【圖 7】不同反應物濃度對晶體質量的影響

(二) 結果分析：

- 從實驗結果我們可以了解，晶體重量的多寡依序為水量 $0 \text{ mL} > 1.0 \text{ mL} > 2.0 \text{ mL} >$

$3.0\text{ mL} > 4.0\text{ mL}$ 。推測原因是加水量影響草酸鐵鉀晶體的生成，添加 0 mL 水時（即為不加水時）溶液濃度最高，晶體生成量最多；隨著純水添加量增加，反應物濃度下降，使得收集到的晶體質量逐漸減少。因此，純水的添加量確實會影響反應物之濃度，造成晶體生長的質量發生變化。

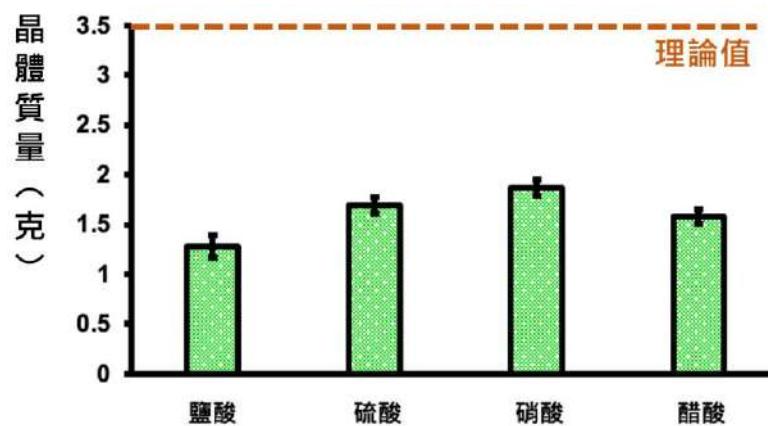
- 不同濃度的反應物對草酸鐵鉀晶體的結晶速率與大小產生影響。高濃度溶液能夠加速過飽和狀態的形成，使晶體快速析出，但同時可能導致晶體成核過快，形成較小且數量較多的晶體。相較之下，較低濃度的溶液能夠減緩結晶過程，使晶體生長較為緩慢，從而形成較大且較為完整的晶體。因此，控制適當的濃度有助於優化晶體的大小與品質，以確保晶體結構的穩定性。

五、化學添加劑對草酸鐵鉀晶體生成量的影響

(一) 結果：

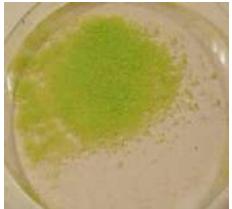
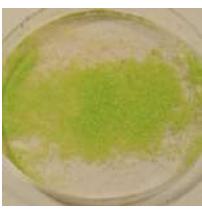
【表 10】不同酸性化學添加劑對晶體質量影響的實驗結果

酸種類 (2.0 mL)	鹽酸	硫酸	硝酸	醋酸
烘乾 2 小時照片				
晶體質量 (g)	1.28 ± 0.11	1.69 ± 0.08	1.87 ± 0.08	1.58 ± 0.07
產率 (%)	36.57	48.28	53.43	45.14

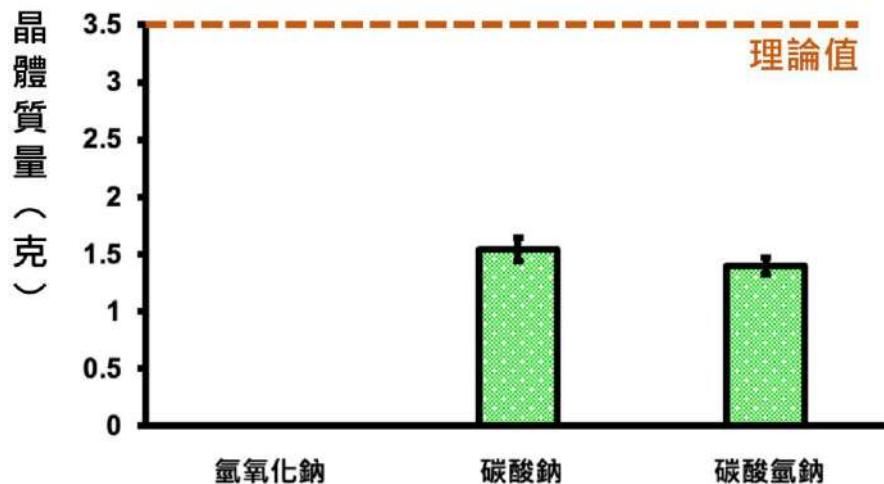


【圖 8】不同酸性化學添加劑對晶體質量的影響

【表 11】不同鹼性化學添加劑對晶體質量影響的實驗結果

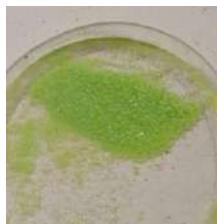
鹼種類 (2.0 mL)	氫氧化鈉	碳酸鈉	碳酸氫鈉
烘乾 2 小時照片	-----		
晶體質量 (g)	-----	1.54 ± 0.10	1.40 ± 0.07
產率 (%)	-----	44.00	40.00

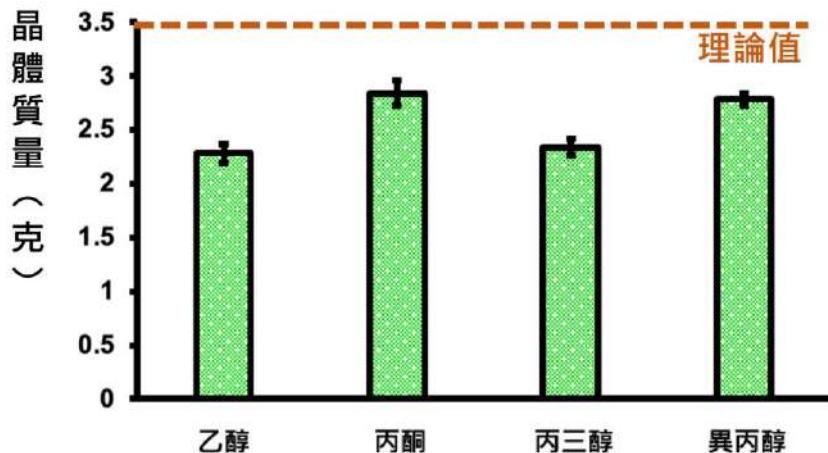
註：--代表無晶體析出



【圖 9】不同鹼性化學添加劑對晶體質量的影響

【表 12】不同有機溶劑添加劑對晶體質量影響的實驗結果

有機溶劑 (2.0 mL)	乙醇	丙酮	丙三醇	異丙醇
烘乾 2 小時照片				
晶體質量 (g)	2.28 ± 0.09	2.84 ± 0.12	2.34 ± 0.08	2.78 ± 0.06
產率 (%)	65.14	81.14	66.86	79.43



【圖 10】不同有機溶劑添加劑對晶體質量的影響。

(二) 結果分析：

- 我們發現溶液 pH 會改變草酸鐵鉀的結晶條件，我們配的草酸鐵鉀為中性。推測是由於酸性時， Fe^{3+} 較穩定，但 H^+ 會與 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 反應形成 HC_2O_4 或 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ，降低其配位能力，晶體難生成；鹼性時，去質子化的草酸根帶較多負電而穩定，但 Fe^{3+} 易和 OH^- 生成 $\text{Fe(OH)}_{3(s)}$ 沉澱，鐵離子不足，抑制結晶。由本研究可知，酸鹼環境皆不利於草酸鐵鉀晶體的形成，因此實驗結果皆比對照組差。
- 鹽酸 (Cl^-) 會與鐵離子形成 FeCl_4^- ，造成晶體不易析出。硝酸 (NO_3^-)、硫酸 (SO_4^{2-}) 能提供氫離子，維持酸性環境。相較之下，同濃度、同體積的硝酸解離出的氫離子莫爾數小於硫酸，對結晶過程的干擾較小，故硝酸組產率較高。醋酸 (CH_3COO^-) 為有機弱酸，除了氫離子的影響外，當需考慮有機化合物極性的作用，不利於晶體的生成。
- 在氯氧化鈉條件下，系統出現紅棕色沉澱，推測為高鹼性環境下金屬離子易形成氯氧化鐵或其他氧化物，導致無法產生預期的綠色晶體。碳酸鈉與碳酸氫鈉均可提供適中鹼性環境，有利於晶體穩定生成。
- 從結果中可以發現，晶體重量的排序為丙酮 > 異丙醇 > 丙三醇 > 乙醇。我們認為，有機溶劑可能會影響溶液的極性。極性愈低的溶液，會影響晶體溶解度，而使晶體的析出。
 - 丙酮偶極矩較大但黏度較低，會降低草酸鐵鉀的溶解度，使晶體容易析出。
 - 異丙醇可與水產生極性作用與氫鍵結合，因此同樣能促進晶體生成。
 - 丙三醇的極性較高，且其分子結構具有多個羥基，可形成較強氫鍵，使溶液黏稠度上升（黏度約為 1.41 cP），進而影響溶質的擴散速率與結晶行為。儘管其極性大於乙醇，但黏稠度可能對晶體析出產生抑制作用。

(4)乙醇，雖然黏度最低（1.20 cP），但極性相對仍高（1.69 D），且與水具有高度相溶性，可能使草酸鐵鉀在溶液中的溶解度增加，進而降低過飽和程度，減少晶體的析出量。

【表 13】有機溶劑黏度及偶極矩比較

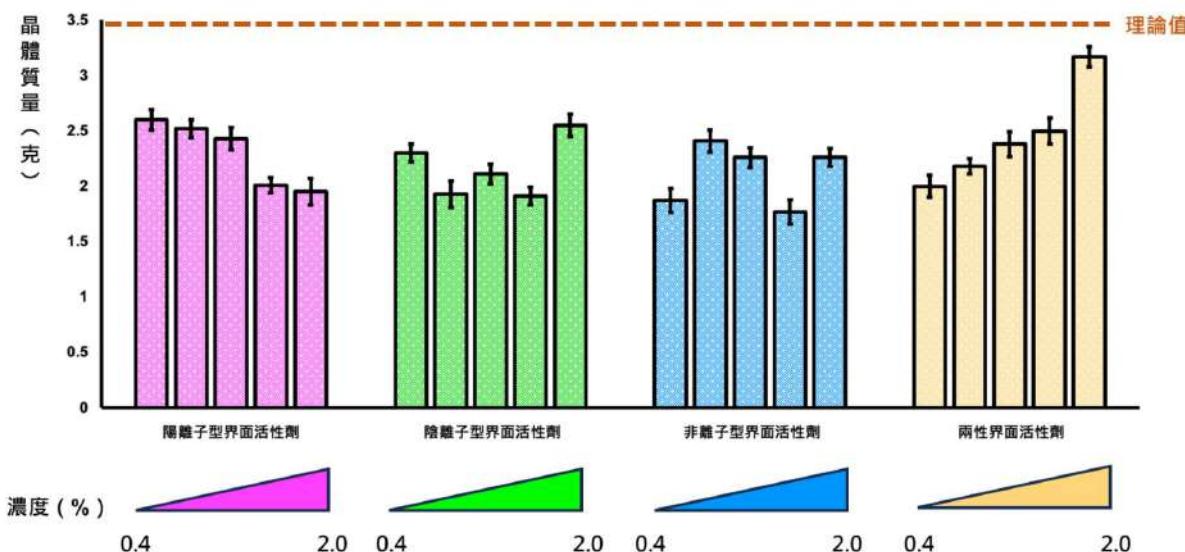
溶劑	黏度 (cP) (20°C)	偶極矩 (D)
水	0.89	1.85
丙酮	0.32	2.91
異丙醇	2.43	1.66
乙醇	1.20	1.69
丙三醇	1.41	2.61

六、界面活性劑對草酸鐵鉀生成量的影響

(一) 結果：

【表 14】不同界面活性劑及濃度對晶體質量影響的實驗結果

界面活性劑種類	陽離子型 (g)	陰離子型 (g)	非離子型 (g)	兩性 (g)
0.4%	2.60 ± 0.09	2.30 ± 0.08	1.87 ± 0.11	2.00 ± 0.10
0.8%	2.52 ± 0.08	1.93 ± 0.12	2.41 ± 0.10	2.18 ± 0.07
1.2%	2.43 ± 0.10	2.11 ± 0.09	2.26 ± 0.09	2.38 ± 0.11
1.6%	2.01 ± 0.07	1.91 ± 0.08	1.77 ± 0.11	2.50 ± 0.12
2.0%	1.95 ± 0.12	2.55 ± 0.10	2.26 ± 0.08	3.17 ± 0.09
最佳產率 (%)	74.29	72.86	68.86	90.57
照片				



【圖 11】不同界面活性劑及濃度對晶體質量的影響

(二) 結果分析：

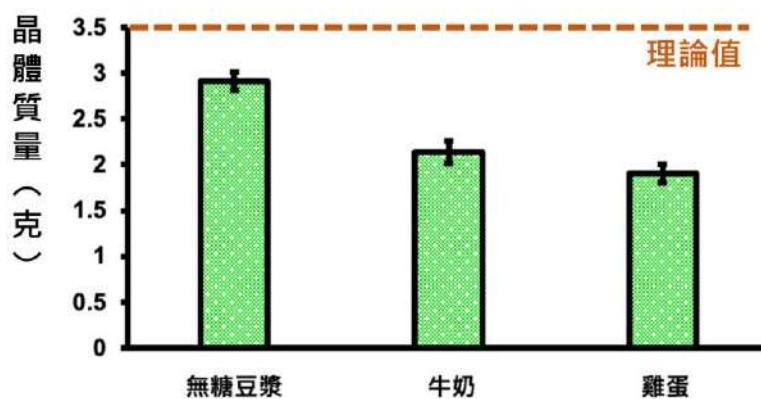
1. 陽離子型與陰離子型界面活性劑在高濃度時帶電原子團過度屏蔽或吸附於晶面，可能干擾離子在晶核表面的排列，導致產率下降或變動。
2. 非離子型界面活性劑以聚醚鏈與水相互作用，對生長動力影響較溫和，但當膠束飽和時，同樣可能阻礙晶體吸附生長。
3. 兩性界面活性劑在 2.0% 時，晶體產率高達 90.57%，遠優於其他類型；晶體外觀也最為均勻、緻密（圖中最右照片）。這可能因兩性分子在不同 pH 值和離子環境下可同時呈現正、負電荷，形成更有序的微乳或膠束結構，既能穩定溶質分子，又能緩慢釋放過飽和的離子，促進大尺寸、完整晶體的生長。由於兩性界面活性劑（卵磷脂）效果顯著，因此後續亦製備了濃度為 4.0% 的組別，探討卵磷脂在晶體形成過程中的重要性，實驗結果顯示，添加 4% 的卵磷脂，其晶體產率高達 96.86%，重達 3.39 克，進一步驗證其促晶效果。

七、食品中的天然界面活性劑對草酸鐵鉀生成量的影響

(一) 結果：

【表 15】不同含卵磷脂食品對晶體質量影響的實驗結果

含卵磷脂食品	無糖豆漿	牛奶	雞蛋
烘乾 2 小時照片			
晶體質量 (g)	2.91 ± 0.10	2.14 ± 0.12	1.91 ± 0.10
產率 (%)	83.14	61.14	54.57



【圖 12】不同含卵磷脂食品對晶體質量的影響

(二) 結果分析：

- 經過不同種類界面活性劑的比較後，我們發現界面活性劑會對晶體的生成產生影響，因此，選擇了食品中的界面活性劑（如：卵磷脂）進行實驗。從結果中可以看到，晶體生成的質量大小依序為無糖豆漿 > 牛奶 > 雞蛋，我們推測界面活性劑的含量會影響晶體析出。
 - 無糖豆漿，來自大豆的卵磷脂含量高，能夠降低表面張力，幫助晶體析出。
 - 牛奶，含有卵磷脂，但主要來自乳脂與酪蛋白，影響較溫和。
 - 雞蛋，蛋黃中含有大量卵磷脂，但因為脂肪含量更高，可能形成過於穩定的乳化液，影響晶體析出。無糖豆漿的卵磷脂影響較單純，幫助晶體析出，而雞蛋中脂肪與黏稠度影響晶體生成，使得晶體量最少。
- 我們認為乳化效應會影響晶體形成。在這個實驗中，我們推測豆漿的乳化能力較弱，不易形成穩定的乳化液，因此草酸鉀溶液與氯化鐵溶液仍能充分作用，晶體較容易析出。而牛奶較容易形成穩定的乳化液，影響離子的自由擴散，使晶體形

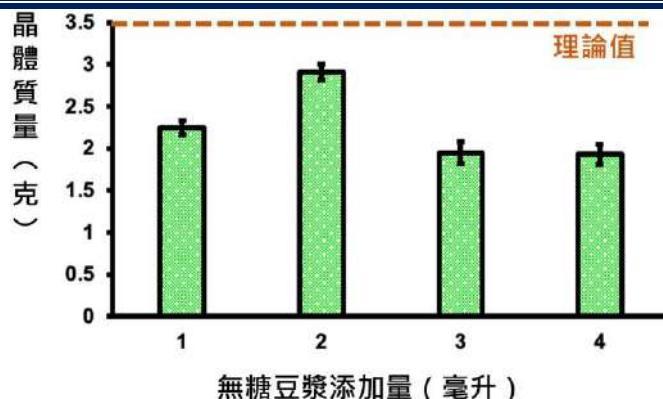
生成量較少。雞蛋（尤其是蛋黃）的乳化效果最強，使得晶體量最低。

八、無糖豆漿添加量對草酸鐵鉀生成量的影響

(一) 結果：

【表 16】無糖豆漿的添加量對晶體質量影響的實驗結果

無糖豆漿 (mL)	1.0	2.0	3.0	4.0
烘乾 2 小時 照片				
晶體重量 (g)	2.25 ± 0.08	2.91 ± 0.09	1.95 ± 0.13	1.93 ± 0.12
產率 (%)	64.28	83.14	55.71	55.14



【圖 13】無糖豆漿的添加量對晶體質量的影響

(二) 結果分析：

- 我們推測無糖豆漿含有卵磷脂，能影響晶體的生長，卵磷脂為兩性界面活性劑，能適度降低溶液的表面張力，使晶體更容易析出。若表面張力較低，溶質分子較容易聚集形成晶核，整體成核過程較為迅速，有利於晶體的生成與析出。此外，降低表面張力亦有助於溶液對晶體表面的潤濕作用，促進溶質分子附著於晶體表面，進一步推動晶體成長。當添加適量體積為 2.0 mL 時，形成最多的晶體量。當添加量較少 (1.0 mL) 時，卵磷脂的影響較弱，雖然仍能促進晶體形成，但效果不及 2 mL，因此晶體量較少。當添加過多 (3.0 mL、4.0 mL) 時，過量的卵磷脂可能會影響溶液的飽和狀態，使晶體形成受到抑制，導致晶體量下降。

2. 我們發現豆漿含有蛋白質、纖維素與脂肪，這些成分會影響溶液的黏度、極性、表面張力與乳化能力，進而影響晶體的析出。
- (1) 2.0 mL 的豆漿黏稠度較為適中，不影響離子擴散，晶體能夠順利生長。
 - (2) 1.0 mL 的豆漿黏稠度較低，影響不大，但卵磷脂濃度稍低，因此晶體生成質量稍少於 2.0 mL。
 - (3) 3.0 mL 與 4.0 mL 的豆漿的黏稠度增加，使得溶液變得較稠，離子擴散變慢，影響反應速率，晶體無法順利析出，導致晶體生成量下降。
3. 我們發現豆漿含有大豆蛋白與脂肪，這些成分會影響溶液的乳化狀態。添加適量 (2.0 mL) 時，乳化效果適中，晶體析出良好。過量 (3.0 mL、4.0 mL) 時，乳化效應過強，溶液變得穩定，影響晶體析出，使得晶體量減少。
4. 適量添加界面活性劑可降低表面張力，使草酸鐵鉀晶體均勻成長且結構完整；但濃度過高時，活性劑會競爭吸附、改變溶液環境，導致成核速率失衡，甚至抑制結晶，並可能生成樣貌畸變或缺陷較多的晶體。因而，精確挑選活性劑種類並控制其添加量，是獲得高品質草酸鐵鉀晶體的關鍵。

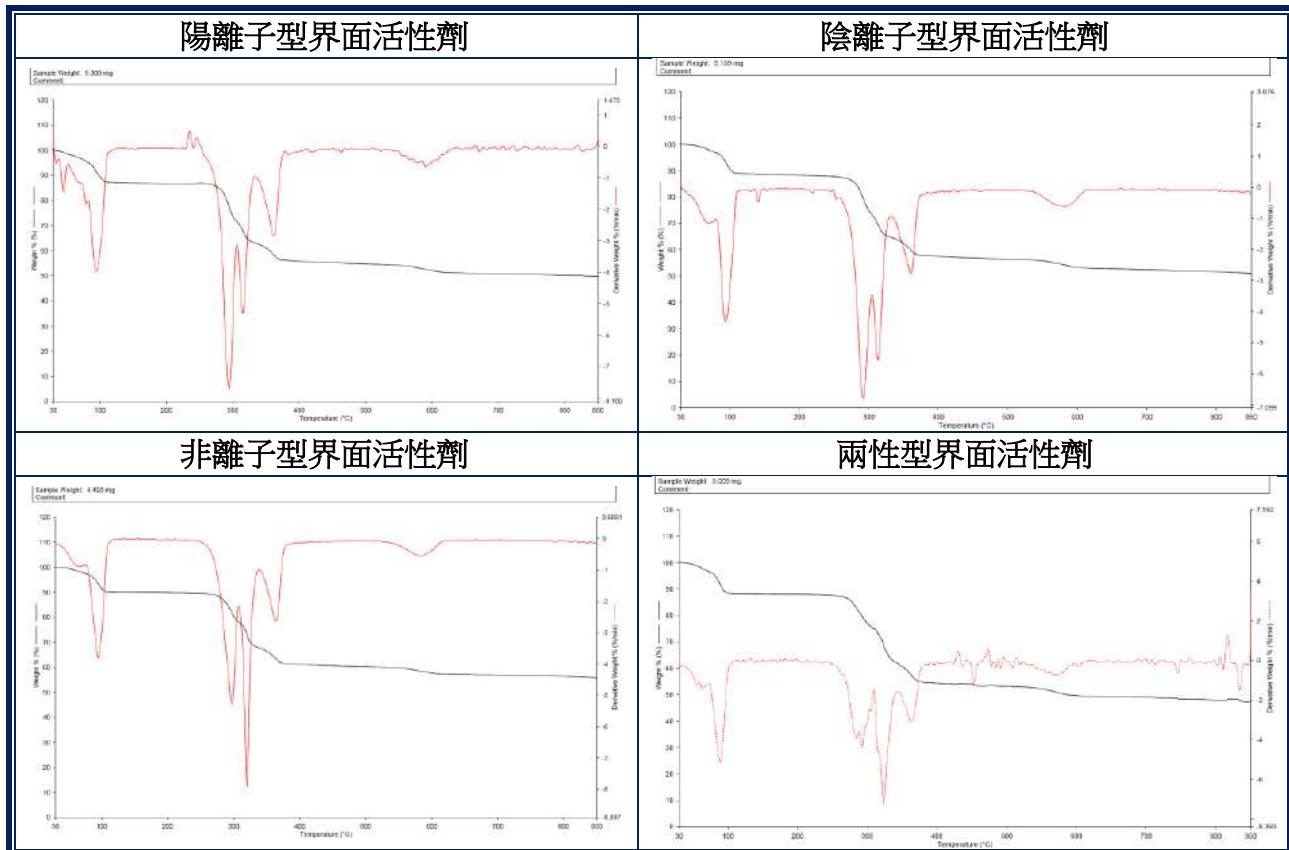
九、界面活性劑對於晶體型態和大小的影響

(一) 結果：

【表 17】養晶的照片及晶體外觀描述

	對照組	陽離子型 界面活性劑	陰離子型 界面活性劑	非離子型 界面活性劑	兩性型 界面活性劑
照片					
晶體 外型 描述	形狀規則，邊緣明顯，呈樹狀向下生長	晶體略細長但仍規則，表面較平整，尺寸略小	晶體較小、數量多，排列緊密但顆粒感強	結晶鬆散、不規則，部分區域模糊、變形	晶體大量密集叢生，呈放射花朵狀，立體感強

【表 18】不同界面活性劑對晶體的熱重分析 (DTA 和 TGA) 曲線



(二) 結果分析：

1. 陽離子型界面活性劑

在約 250°C 與 350°C 開始出現明顯的質量下降與導數峰，代表有兩階段的分解反應，且第二階段反應強烈，推測可能導致有機成分嵌入晶體結構中，熱穩定性中等，殘留量較高，顯示部分未完全分解的雜質或生成穩定的殘渣。

2. 陰離子型界面活性劑

在 250°C 與 450°C 之間顯現多個分解階段，導數曲線劇烈波動，顯示樣品的熱分解行為較複雜，可能形成多種中間產物或不同熱分解機制並存，殘留物比例較低，暗示有機物含量較高但揮發完全。

3. 非離子型界面活性劑（下左圖）

呈現最乾淨的兩段質量損失，主要發生在 250°C 與 370°C 附近，整體熱分解行為較簡單，導數變化也較穩定，代表晶體中的有機成分含量較均一，結構可能較為規則，顯示出良好的熱穩定性與分解一致性。

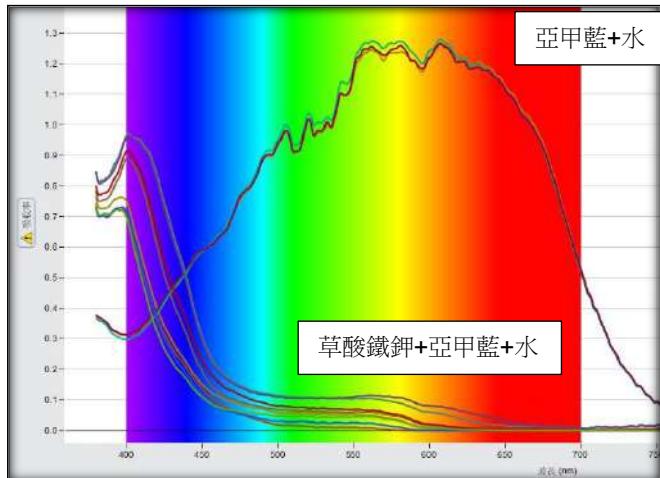
4. 兩性型界面活性劑（下右圖）

在整個升溫過程中質量損失曲線呈現多段明顯下降，尤其在 200°C 到 400°C 區間

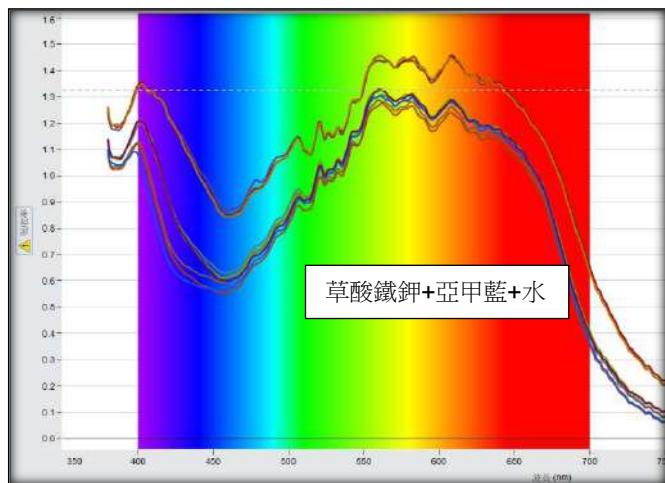
有劇烈反應，導數曲線極不穩定，顯示熱分解反應複雜性高，可能因界面活性劑與晶體形成複雜鍵結或包覆結構，導致整體穩定性最低。

十、草酸鐵鉀對亞甲藍之氧化還原反應

(一) 結果：



【圖 14】照光條件之分光光度計圖譜



【圖 15】無照光條件之分光光度計圖譜

【表 19】照光條件下，550~650 nm 之吸收率的實驗結果

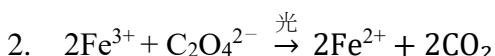
	草酸鐵鉀 (mL)	蒸餾水 (mL)	亞甲藍溶液 (mL)	吸收率	
				0 分鐘	1 分鐘
實驗組	15.00	0.00	2.00	0.113	0.102
	7.50	7.50	2.00	0.066	0.058
	5.00	10.00	2.00	0.049	0.044
	3.75	11.25	2.00	0.023	0.009
對照組	0.00	15.00	2.00	1.236	1.260

【表 20】無照光條件下，550~650 nm 之吸收率的實驗結果

	草酸鐵鉀 (mL)	蒸餾水 (mL)	亞甲藍溶液 (mL)	吸收率		
				0 分鐘	20 分鐘	40 分鐘
實驗組	15.00	0.00	2.00	1.437	1.442	1.444
	7.50	7.50	2.00	1.306	1.299	1.307
	5.00	10.00	2.00	1.297	1.282	1.269
	3.75	11.25	2.00	1.254	1.238	1.225
對照組	0.00	15.00	2.00	1.236	1.268	1.272

(二) 結果分析：

- 當反應在有光照條件下進行時，可以明顯觀察到吸光度與草酸鐵鉀濃度呈正相關。隨著草酸鐵鉀從 3.75 mL 增加至 15.0 mL，0 分鐘的吸光度從 0.023 增加至 0.113，顯示在光照下反應迅速啟動，生成的錯合物量越多，吸光度也越高，說明此系統對濃度變化相當敏感，適合做定量分析。此外，各組在反應 1 分鐘後吸光度略微下降，例如草酸鐵鉀 15.0 mL 組，吸光值從 0.113 降至 0.102，推測可能因配合物短暫形成後受光照影響產生部分分解，或是反應達到動態平衡。儘管如此，整體變化不大，在 1 分鐘內即完成主要反應，顯示有光照能加快反應速率。



草酸鐵鉀在光照下會生光還原反應，釋放出二價鐵離子 (Fe^{2+}) 與二氧化碳。 Fe^{2+} 具有還原性，能迅速將亞甲藍還原為無色態，使得反應在短時間內就完成，並產生清楚的顏色變化與吸光度變化。這種光誘導反應不僅提高反應速率，也使反應在濃度變化下呈現出良好的線性與可測性，利於快速且準確的分析。

- 在無光照條件下，反應進行速度顯著降低。從表格可見，即使反應經過 40 分鐘，吸光度的變化幅度也非常小。以 15.0 mL 草酸鐵鉀為例，其吸光值從 0 分鐘的 1.437 僅微幅上升至 1.444，變化僅為 0.007，顯示在黑暗中反應進行極為緩慢，錯合物形成有限。因此，與無光照條件相比，光照顯然是促進草酸鐵鉀還原與配合物生成的關鍵因素。

十一、草酸鐵鉀廢液在藍晒的應用

(一) 結果：

【表 21】不同界面活性劑養晶廢液的藍晒實驗結果

	對照組	陽離子型	陰離子型	非離子型	兩性
照片					
色碼	#164083	#7EA2BC	#478BBA	#4D83BA	#628BA9
色澤分析	深藍色	淺藍偏灰	近深藍色	顏色均勻但淡	灰藍色且混濁

(二) 結果分析：從照片觀察與色碼分析可見，對照組的藍色最深 (#164083)，代表光化

反應最為完整、還原效果最佳；其餘各組則呈現不同程度的顏色變淺，顯示這些添加物在某種程度上干擾了藍晒過程中的還原反應與沉澱生成。

1. 陽離子型界面活性劑（#7EA2BC）與兩性界面活性劑（#628BA9），顏色變化最為顯著，推測可能是因這些物質影響草酸鐵鉀錯合物的穩定性、或改變了光還原反應的速率與效率。
2. 陰離子型界面活性劑（#478BBA）與非離子型界面活性劑（#4D83BA）組雖然也有干擾，但顏色變化幅度較小，顯示其影響程度有限。整體而言，電解質的性質會改變藍晒反應的條件，進而影響最終顏色深淺與沉澱品質。
3. 以兩性界面活性劑為例，加入卵磷脂的處理組因晶體析出量較多，可能代表草酸鐵鹽被較大量吸附或反應，使得廢液中殘留的草酸鐵鹽濃度降低。當這些低濃度的廢液被用於藍晒時，反應中可產生的亞鐵離子數量減少，導致普魯士藍沉澱量下降，成像顏色變得明顯偏淺。這一現象不僅反映了卵磷脂在製程中的影響，也說明反應物濃度對藍晒品質具有關鍵性影響。

伍、討論

本研究將觀察時間設定為 40 分鐘，主要是基於動力學角度進行探討。我們關注的核心在於晶體生成的速率，而非僅關心最終產量。動力學研究的是反應進行的快慢與過程中的速率影響因素，因此選擇一段固定且可觀測的時間範圍，能夠有效比較不同條件（如溫度、濃度、pH 等）對晶體生成速度的影響。根據 Mullin (2001) 等人的說法，晶體生成涉及動力學與熱力學兩大面向，影響晶體的生成速率、最終質量和穩定性。動力學描述的是化學與物理過程進行的速度，而晶體生成過程中的成核與成長皆屬於典型的動力學行為。因此，透過在 40 分鐘內觀察晶體初步生成量，可評估不同條件下的結晶速率。

一、冷卻溫度對晶體生成的影響

在不同的溫度條件實驗中，我們發現與室溫（25°C）相比，冰浴（0°C）條件下的晶體析出效果較佳，顯示低溫環境能促進晶體的生成。草酸鐵鉀晶體的合成通常在低溫下進行，主要因為高溫會增加其溶解度，不利於晶體析出，同時草酸根在高溫下易分解，影響化合物的穩定性。此外， Fe^{3+} 在高溫環境下可能產生其他物質生成，因此本研究未採用高溫條件進行晶體合成。（Greenwood & Earnshaw, 1984）。

二、黏稠溶液的稀釋與晶體生成

在實驗過程中，我們也觀察到，某些溶液（如加入蛋液後的溶液）顯得特別黏稠，這

對晶體生成造成了顯著影響。當溶液較為黏稠時，草酸根與鐵離子之間的反應效率明顯降低，晶體生成速度也變慢。我們發現這個現象之後，利用洋菜丁來進行草酸鐵鉀的增稠實驗，我們發現晶體的生成量大幅下降，產率不到 40%，可證明草酸鐵鉀溶液被增稠後，晶體析出困難。

推測是因為當溶液黏度上升時，離子在溶液中的移動速率會減慢，從而降低離子之間的有效碰撞機率與配位反應速率。高黏度條件也會明顯降低溶液的導電度，自由離子的移動受到限制，使晶體生成的速率變得緩慢。在本研究中，我們特別注意溶液的黏稠度與水分比例，並透過適當調整，以確保反應能順利進行。

三、極性對於晶體生成的影響

草酸鐵鉀在水中的溶解度受到水的極性影響。然而，當丙酮等極性較低的有機溶劑被加入時，會降低溶液的整體極性，難以穩定帶電的 $[Fe(C_2O_4)_3]^{3-}$ 與 K^+ ，使得溶解度降低，有利於晶體形成。高極性溶劑在溶解樣品時通常會使溶解度較高，這樣在冷卻或乾燥過程中晶體析出的程度較低，對於需要控制結晶過程的實驗來說，這是一個有利的現象。而相反，極性較低的溶劑在飽和狀態下，由於溶解度變化較大，更容易導致晶體析出，這有助於提升產率，尤其是在需要高產率結晶的情況下。溶劑的極性對於溶解度和晶體析出過程的影響，直接決定了生成物的產率。

四、食品中的脂肪和蛋白脂對於晶體的影響

脂肪與蛋白質本身容易吸附在晶體表面，尤其是蛋白質具有豐富的官能基可與鐵離子或草酸根形成氫鍵或配位鍵，而干擾晶體生長面，使晶體無法規則堆疊，形貌不完整、尺寸變小，甚至抑制晶體形成。脂肪及高分子蛋白質可能在水中形成乳化或膠狀結構，增加溶液黏稠度，導致離子擴散速率下降，使草酸與鐵離子無法有效接觸與反應。另外，根據 Leister, N. (2020)，當溶液產生乳化現象時，會形成大量微小的液滴，使溶液變得不均勻。首先，乳化會阻礙溶質分子的移動與聚集，降低成核與晶體成長的效率，使晶體較難析出。其次，乳化液中可能夾帶雜質，導致晶體純度下降。此外，乳化會改變晶體的成長環境，造成晶體形貌不規則或大小不一，增加後續操作的困難。因此，在結晶過程中應避免過多的乳化現象，確保晶體生成順利且品質穩定。

五、界面活性劑的作用

根據前人的研究，界面活性劑對晶體的生成有顯著影響。科學網（2021）指出，界面活性劑透過降低溶液的表面張力，影響晶體的成核與生長速率，進而改變晶體的結構

與形狀。當溶液具有較高的表面張力時，分子間的內聚力較強，有助於穩定晶體界面，促進溶質分子有序排列並附著於晶核上，使晶體成長過程更為穩定。但若結晶過快會使晶體更小更細碎。這一特性在聚合物薄膜或無機晶體的生長中已有廣泛應用。在實驗中，我們選用了多種界面活性劑進行比較，並特別關注天然界面活性劑—卵磷脂，它能在溶液中形成微小的聚集體或膠束，進而影響晶體的結晶動力學。

卵磷脂在特定條件下可顯著提升晶體的生成效率，讓我們對其作用機制有更深入的認識。此外，適量的無糖豆漿也能促進晶體生長，可能是其中的卵磷脂分子穩定了晶體的成核點，使晶體生長更均勻。未來的研究可進一步探討天然界面活性劑如何改變結晶動力學，以更精確地掌握其在晶體生長中的潛力與限制。

六、乾燥方式對晶體完整性的影響

在文獻查詢中，我們發現多數研究使用自然風乾法。然而此方法受天氣影響大，且因結晶水殘留不一，易產生誤差。因此，我們改用烘箱乾燥，使樣品達到無水狀態，提高純度並加快速度。

然而，在過濾和烘箱烘乾的過程中，我們觀察到晶體出現碎裂的現象。我們推測是由於倒出過程中的撞擊或擠壓產生機械應力，破壞了晶體結構；此外，晶體附著在濾紙上時，隨著水分蒸發，晶體與濾紙的收縮速率不同也可能產生額外應力，導致破裂。若加熱速度過快，晶體內外溫度分布不均，會產生熱膨脹不一致的情況，造成內部張力。為降低破裂干擾，我們設計實驗九，該實驗中未進行烘乾或轉移，有助於保留晶體原貌，提升觀察與分析的準確性。

七、未來展望

本研究對應聯合國永續發展目標 SDG 9「工業、創新與基礎建設」及 SDG 12「責任消費與生產」。我們透過調整界面活性劑種類、濃度與反應條件，優化草酸鐵鉀晶體生成過程，提升原料使用效率並降低化學品浪費，實踐綠色製程理念。同時，選用天然界面活性劑如卵磷脂，探索其於低毒、環保結晶系統中的應用潛力，強化材料開發的永續性。另外，藉由亞甲藍光催化分解實驗驗證晶體系統的功能性，展現其在水質淨化與有機污染物處理方面的應用可能，擴展其環境工程價值。

未來，我們計畫模擬生物體內的結晶條件，探討 pH 值、離子濃度、體液成分等因素對晶體形成的影響，並研究各類抑制劑對晶體形成的控制效果。有助於深入理解如腎結石等生物體內的結晶機制，也具有應用於功能性材料開發與環境修復的潛力。此外，

本實驗中的廢液更可以導入藍晒技術，使實驗中的廢液能夠得到妥善應用與處理。

陸、結論

一、探討不同冰浴時間及是否有放置室溫對於晶體質量的影響

實驗結果顯示，直接進行冰浴冷卻的樣品在各時間點產量均優於經室溫靜置後再冰浴的樣品，60分鐘時分別為 2.49 g 與 1.77 g，產率差異明顯。未來可優化冰浴冷卻時間與操作流程，應用於需要快速結晶的製程中，以提升效率與產量。

二、探討不同溫度條件對於草酸鐵鉀晶體析出的影響

冰浴冷卻明顯有利於晶體產生，室溫冷卻則有利於生成粒徑較大之晶體，產率較低但晶體較完整。未來可根據晶體用途選擇適當冷卻策略，應用於需快速大量產出或追求結晶品質的不同產業場域。

三、探討氯化鐵與草酸鉀的比例如何影響草酸鐵鉀晶體的生成量

當 $\text{FeCl}_3(\text{aq}) : \text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4(\text{aq})$ 為 2 : 7 時產量最高，比例失衡會降低產率並可能產生副產物。未來可將比例最佳化結果應用於工業合成中，提升反應效率與產品純度，並減少副產物對環境的潛在影響。

四、探討反應物濃度對草酸鐵鉀晶體形成的影響

晶體產量隨加水量增加而下降，高濃度有利於形成過飽和溶液與快速析出。未來可導入濃度控制機制於微流體裝置或實驗自動化系統中，提升晶體生成效率並推動綠色化學製程。

五、探討不同化學添加物對晶體析出的影響

酸鹼溶液的添加會抑制晶體形成，對照組具有最佳產率與結晶完整性。未來可應用此發現於 pH 值敏感材料的製備與調控，設計更穩定的結晶環境，提升材料功能性與純度。

六、探討界面活性劑的種類和添加量對晶體生成的影響

4.0% 濃度之兩性型界面活性劑（卵磷脂）生成之晶體產率最高（96.86%）、結構最穩定，優於其他型態添加劑。未來可進一步開發其於藥物晶體、高功能材料製程等高端應用，優化晶體形貌與產出率。

七、探討食品界面活性劑添加對晶體生成的影響

2.0 g 無糖豆漿因含活性卵磷脂，晶體產率明顯優於其他添加物。未來可推廣天然食品級界面活性劑於環保型材料合成中，降低成本與毒性，應用於教育、實驗室或綠色化產業。

八、探討草酸鐵鉀廢液在光照下對亞甲藍之還原速率

光照條件可加速草酸鐵鉀廢液對亞甲藍溶液的還原反應，1分鐘內即完成，且濃度越高反應越明顯。未來可開發其於廢水處理、染料分解與藍晒應用，提升晶體副產物再利用的價值並拓展其光化學應用潛力。

柒、參考文獻資料

一、中文文獻

- [1] 周芳妃、李盈萱、陳靜瑋（2016）。微量化學實驗：小綠綠晶體與藍印術微量實驗。台灣化學教育。

https://chemed.chemistry.org.tw/wp-content/uploads/2016/07/本期專題_周芳妃等_小綠綠晶體與藍印術微量實驗_學生實驗手冊 V11.pdf

- [2] 实验一：草酸根合铁（III）酸钾的制备及表征。检索自

<https://fztr.file.gkfz.net/pdf/52d69667ce1bca9dc4b102eae7ba1fa4.pdf>

- [3] 魏呈亦、詹承恩、吳亞哲（2020）。晶晶相擁—探究多樣態結晶及顯微縮時攝影在結晶之應用。全國中小學科展第 60 屆。

<https://www.ntsec.edu.tw/science/detail.aspx?a=21&cat=16344&sid=16375&print=1>

二、英文文獻

- [1] Higashiyama, T., & Hasegawa, S. (2006). Differential thermal analysis of potassium oxalate. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 44(7). <https://academic.oup.com/bcsj/issue/44/7>

- [2] Chidambaram, R., Sequeira, A., & Sikka, S. K. (2019). Neutron diffraction study of the structure of potassium oxalate monohydrate. *The Journal of Chemical Physics*, 41(11), 3616-3622. <https://pubs.aip.org/aip/jcp/article-abstract/41/11/3616/81137>

- [3] Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1984). *Chemistry of the elements*. Pergamon Press.

- [4] Mullin, J. W. (2001). *Crystallization* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

- [5] Leister, N., & Karbstein, H. P. (2020). Evaluating the Stability of Double Emulsions—A

Review of the Measurement Techniques for the Systematic Investigation of Instability

Mechanisms. *Colloids and Interfaces*, 4(1), 8. <https://doi.org/10.3390/colloids4010008MDPI>

本研究所有圖表皆為研究者自行繪製與整理。

【評語】030211

本研究探討草酸鉀與氯化鐵反應生成草酸鐵鉀晶體的成核與結晶機制，分析溫度、反應物比例、酸鹼、有機溶劑及界面活性劑等因素。結果顯示低溫與 2:7 比例最佳結晶，卵磷脂及天然食材能提升晶體完整度與致密度。草酸鐵鉀具光還原性，能迅速還原亞甲藍，具水處理與環保應用潛力。

探討其成核與結晶機制，並分析多項影響因素，包括溫度、反應物比例、酸鹼、有機溶劑與界面活性劑等對草酸鐵鉀晶體成核與結晶機制的影響。實驗結果顯示，低溫可降低草酸鐵鉀溶解度、提升過飽和狀態，有助於增加晶體產量。其中，以 FeCl_3 與 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 以 2:7 比例混合可獲得最佳結晶效果。在界面活性劑方面，卵磷脂表現最佳，不僅促進晶體生成，亦提升晶體完整度與致密度。進一步使用無糖豆漿、牛奶、雞蛋等天然食材取代純卵磷脂，亦能達到相似成效，顯示天然食材具成本效益與實用性。此外，本研究亦發現草酸鐵鉀具光還原性，能在光照下迅速將亞甲藍還原為無色，展現其在水處理與環保應用上的潛力。

本實驗用到滴定、熱重分析、UV/Vis 吸收光譜等技術，對學生是不錯的訓練。雖然實驗簡單但結果有學術參考價值，如本實驗為何使用卵磷脂來做為其中一種界面活性劑的原因何在？用豆漿來代表卵磷脂是正確嗎，加入豆漿影響草酸鐵鉀的結晶，是因為豆漿中的卵磷脂嗎？草酸鐵鉀($\text{K}_3\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3$)中鐵與鉀莫耳比是 1:3，為何反應物中 $\text{FeCl}_{3(aq)}$ 與 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_{4(aq)}$ 莫耳比為 2:7 時有最高產率？這些都是問題，其所牽涉的參數很多。可能國中生無法了解，但也看到

看到討論，原因可能皆是不認識所用材料的化學結構。驗證了沒有充足的知識，容易被現象蒙蔽。

草酸鐵鉀的晶體在過去科展作品中有呈現過，本次作品探討的比較多項的變數，例如介面活性劑以及添加不同的酸鹼所造成的結晶現象，討論的層面更為廣泛，參數探討的成果多半以產生的結晶重量為依據，可以思考此方法是否有更好的探討參數。

作品海報

草酸鐵鉀晶體的生長密碼

探討添加劑對晶體生成效率的影響

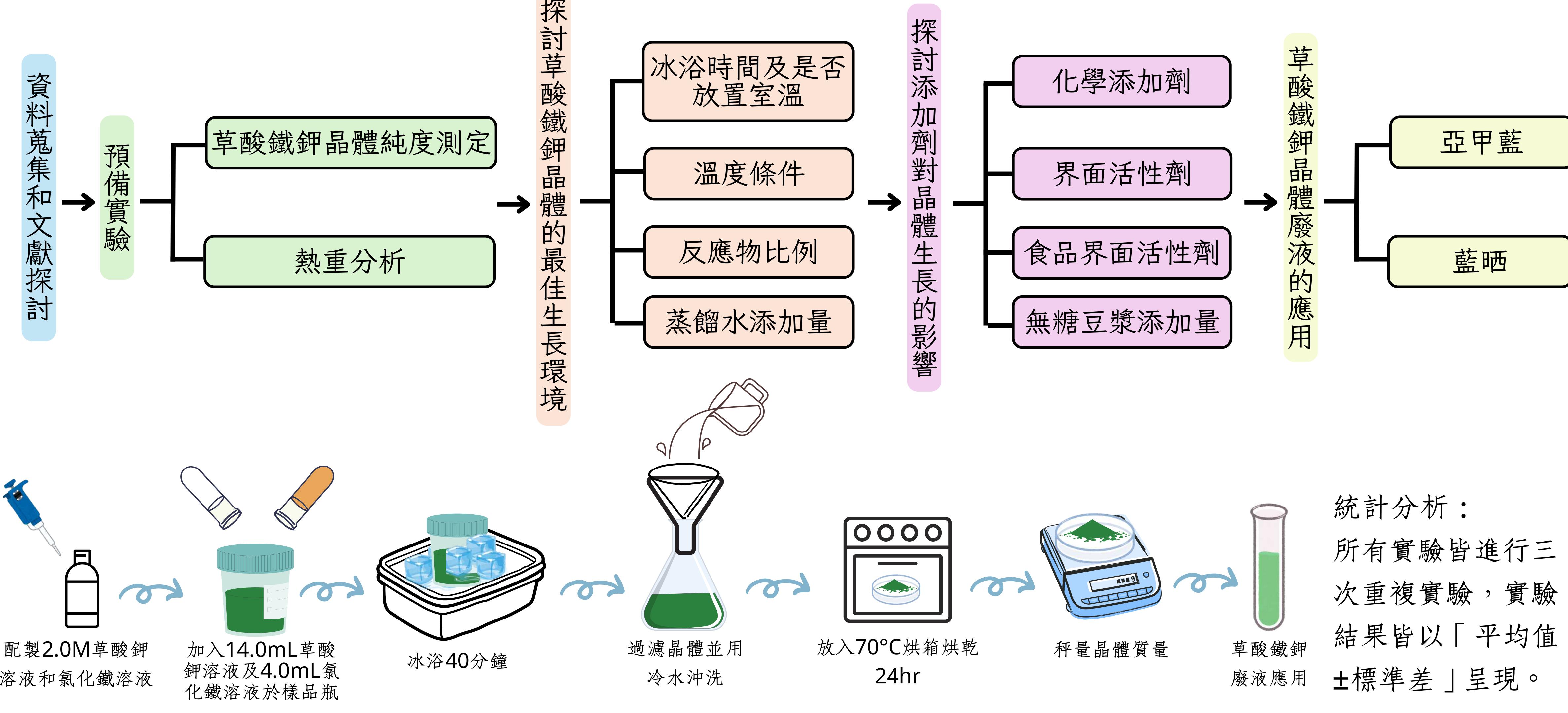
摘要

本研究以生物體內晶體形成機制為發想，選用易於觀察的草酸鐵鉀晶體作為模型，探討其生成條件，分析反應物比例、酸鹼、有機溶劑與界面活性劑等多項影響因素。實驗結果顯示，低溫可降低晶體溶解度、提升過飽和狀態，有助於增加晶體產量；其中， $\text{FeCl}_3(\text{aq})$ 與 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4(\text{aq})$ 以2:7比例混合可獲得最佳結晶效果。尤其界面活性劑中的卵磷脂，不僅促進晶體生成，亦提升晶體完整度與致密度。進一步以無糖豆漿等天然食材取代純卵磷脂，亦能達到相似成效，顯示其具成本效益與實用性。此外，本研究亦利用草酸鐵鉀的光還原性，光照下迅速將亞甲藍還原為無色，展現其在水處理與環保應用上的潛力。

壹、前言

在健康教育課程中，我們了解到生物體內可能形成膽結石--生物體內的晶體結構。這讓我們對晶體的生長機制產生了興趣，特別是它們如何在不同環境下形成。誕生物體環境難進行研究，因此我們決定從簡單的化學方式入手，以草酸鐵鉀晶體研究，探討影響晶體成長的因素。草酸鐵鉀晶體具有顯著的色彩，使其成為理想的分析對象。我們希望了解晶體形成的條件與規律，為日後進一步探索生物體中的結晶現象建立基礎。 $3\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4(\text{aq}) + \text{FeCl}_3(\text{aq}) + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_3[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3] \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{KCl}$

貳、研究過程或方法



預備實驗：草酸鐵鉀晶體純度測定

原理：



實驗目的：根據過錳酸鉀的用量，反推出晶體莫耳質量

結果：

未烘乾	W 樣品(g)	V _{MnO₄} (mL)	M(莫耳質量)
一	0.150	18.4	489.1
二	0.150	18.3	491.8
三	0.146	17.9	492.1
平均			491.1

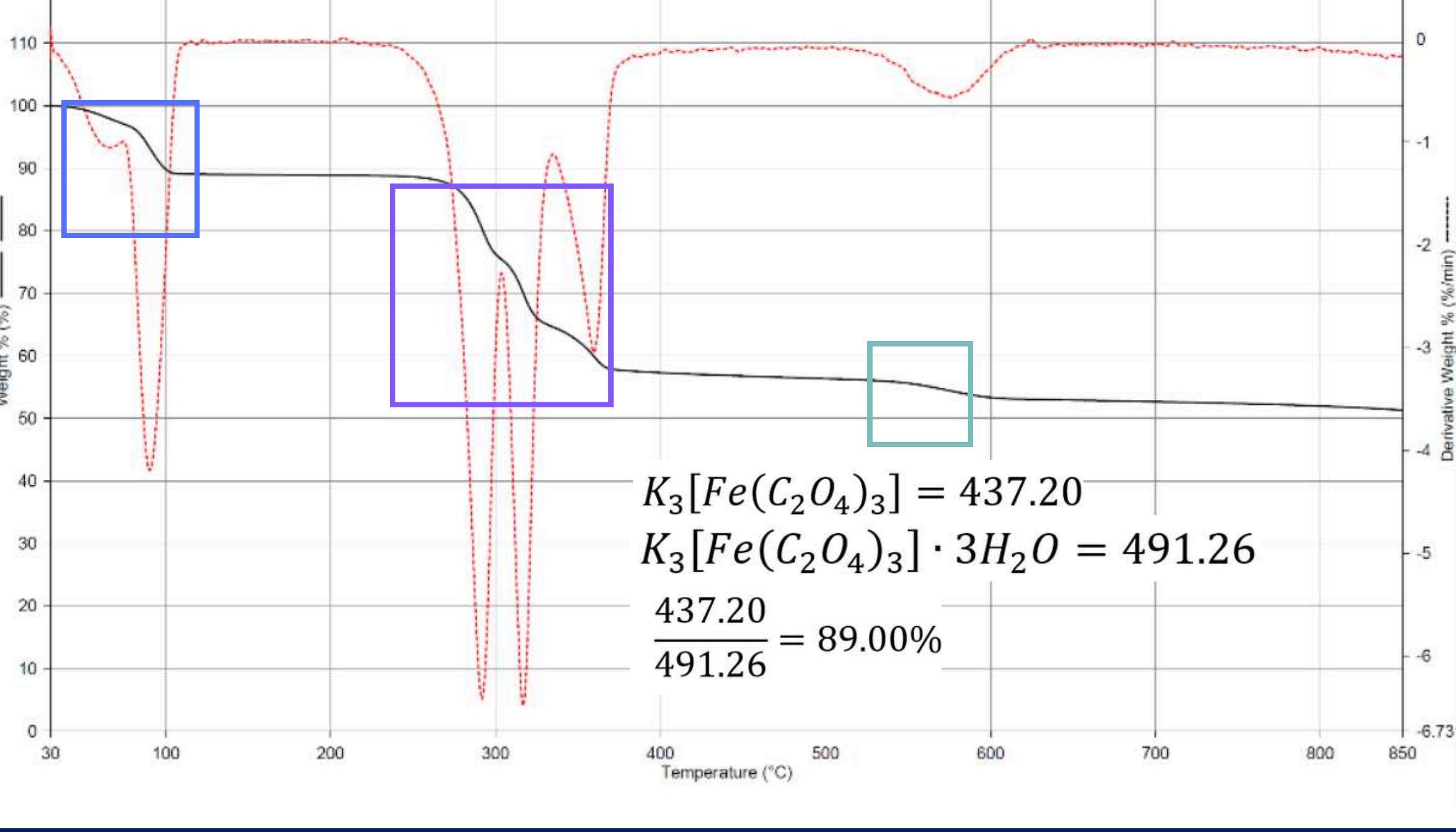
有烘乾	W 樣品(g)	V _{MnO₄} (mL)	M(莫耳質量)
一	0.150	20.5	439.0
二	0.143	19.7	435.5
三	0.149	20.4	438.2
平均			437.5

結果分析：

未烘乾樣品莫耳質量理論值 491、烘乾樣品莫耳質量理論值 437，實驗結果皆與之相差不大。兩種樣品皆呈現高純度。

預備實驗：熱重分析

本儀器操作參數為樣品重量 3.309 mg、升溫速率為 10°C/min，從 25 °C 加熱到 850 °C。熱重分析有助於了解樣品成分、含水量、有機/無機比例、熱穩定性等資訊。



溫度範圍	TGA 曲線變化	DTA 曲線峰型	推測
50-100°C	微幅失重 11.0%	吸熱峰	水分揮發
280-400°C	劇烈失重 33.0%	多個吸/放熱峰	有機物分解或草酸分解
>500°C	緩慢失重 5.0%	放熱或吸熱峰	碳氧化、金屬氧化物轉變

結果分析：

此TGA曲線顯示以70°C烘箱烘乾只會影響到是否有結晶水，並不會影響到晶體的固體成分。

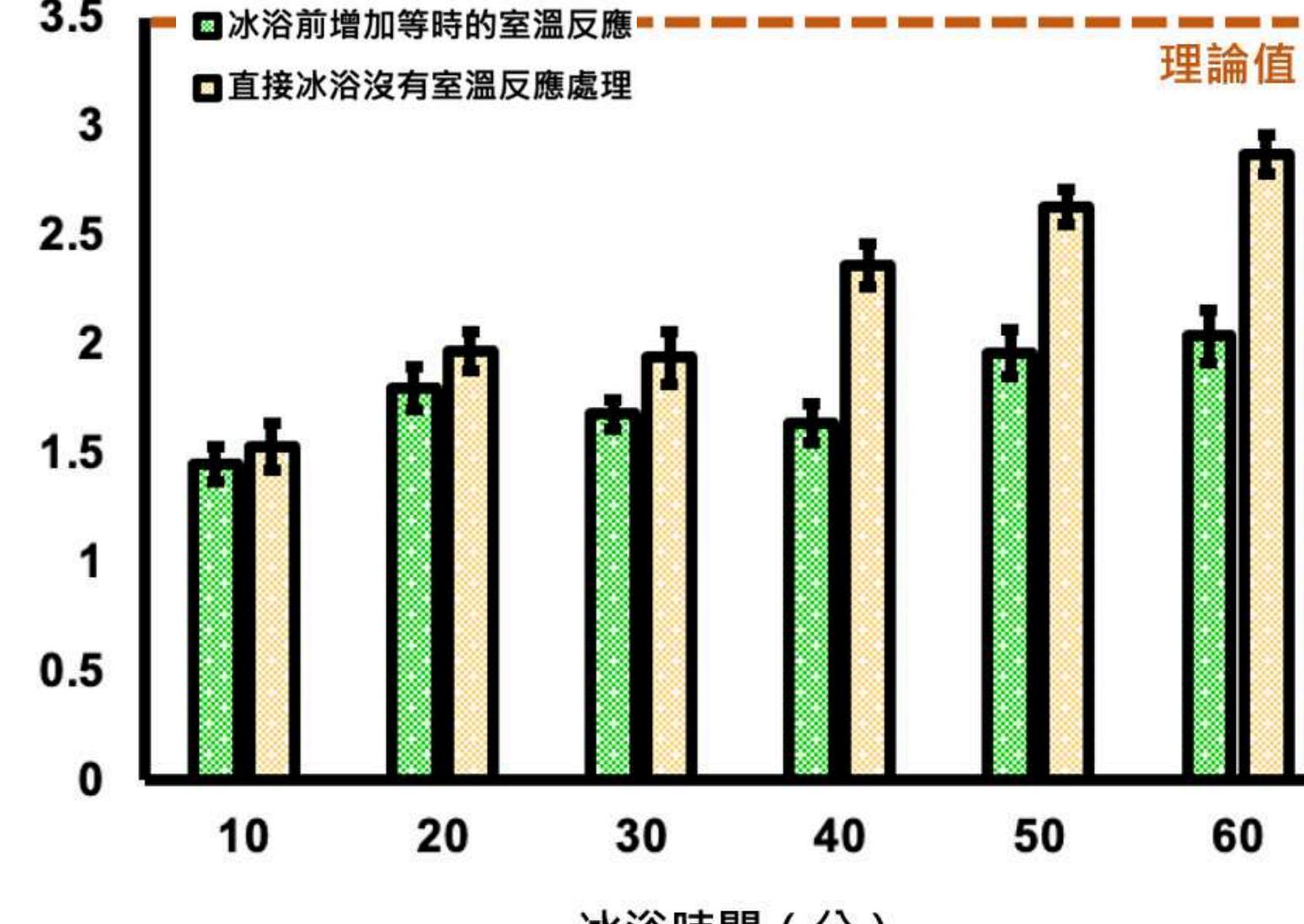
一、不同冰浴時間及放置室溫對於晶體產率的影響

實驗目的：研究冰浴時間及是否有放置室溫對晶體質量的影響
氯化鐵與草酸鉀混合→室溫10分鐘→冰浴（不同時間）→測產率

氯化鐵與草酸鉀混合→冰浴（不同時間）→測產率

結果：

冰浴時間(分鐘)	有放室溫(g)	有放室溫產率(%)	沒放室溫(g)	沒放室溫產率(%)
10	1.45±0.08	41.43%	1.53±0.11	43.71%
20	1.80±0.10	51.43%	1.97±0.09	56.29%
30	1.68±0.07	48.00%	1.94±0.12	55.42%
40	1.64±0.09	46.86%	2.36±0.10	67.42%
50	1.96±0.11	56.00%	2.63±0.08	75.14%
60	2.04±0.12	58.29%	2.87±0.09	82.00%



結果分析：

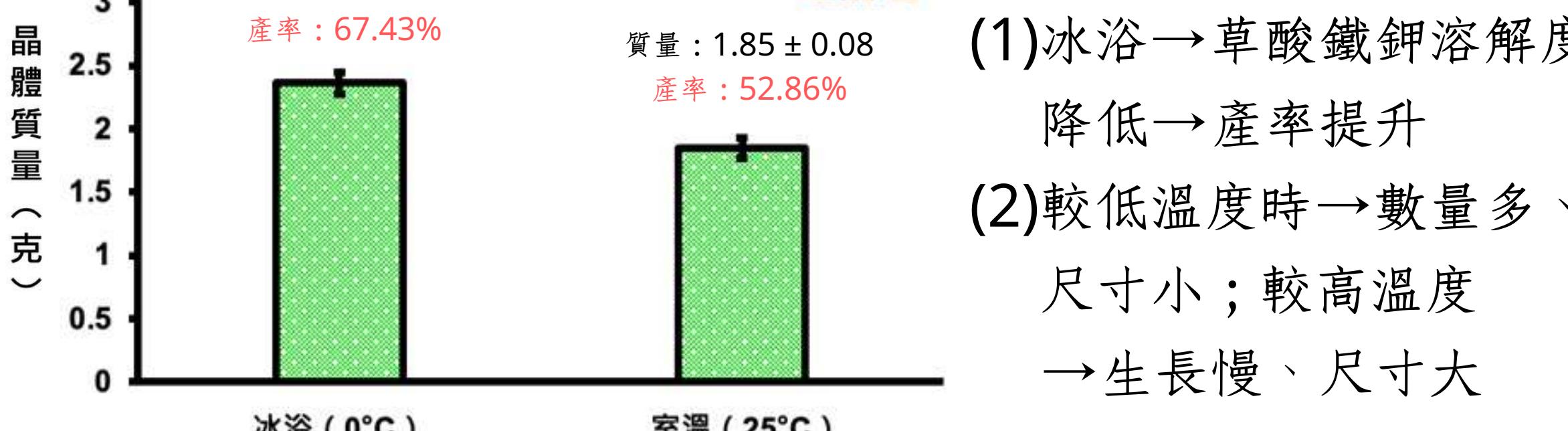
- 未經室溫處理、直接冰浴冷卻的樣品在各階段晶體產量較高，顯示快速冷卻促進過飽和形成。
- 隨冷卻時間延長，晶體產量持續上升，顯示結晶反應時間累積效應。
- 後續實驗以冰浴40分鐘進行。

二、不同溫度條件下，草酸鐵鉀晶體的產率變化

實驗目的：探討不同溫度對晶體生長的影響。

氯化鐵與草酸鉀混合→反應40分鐘（不同溫度）→測產率

結果：



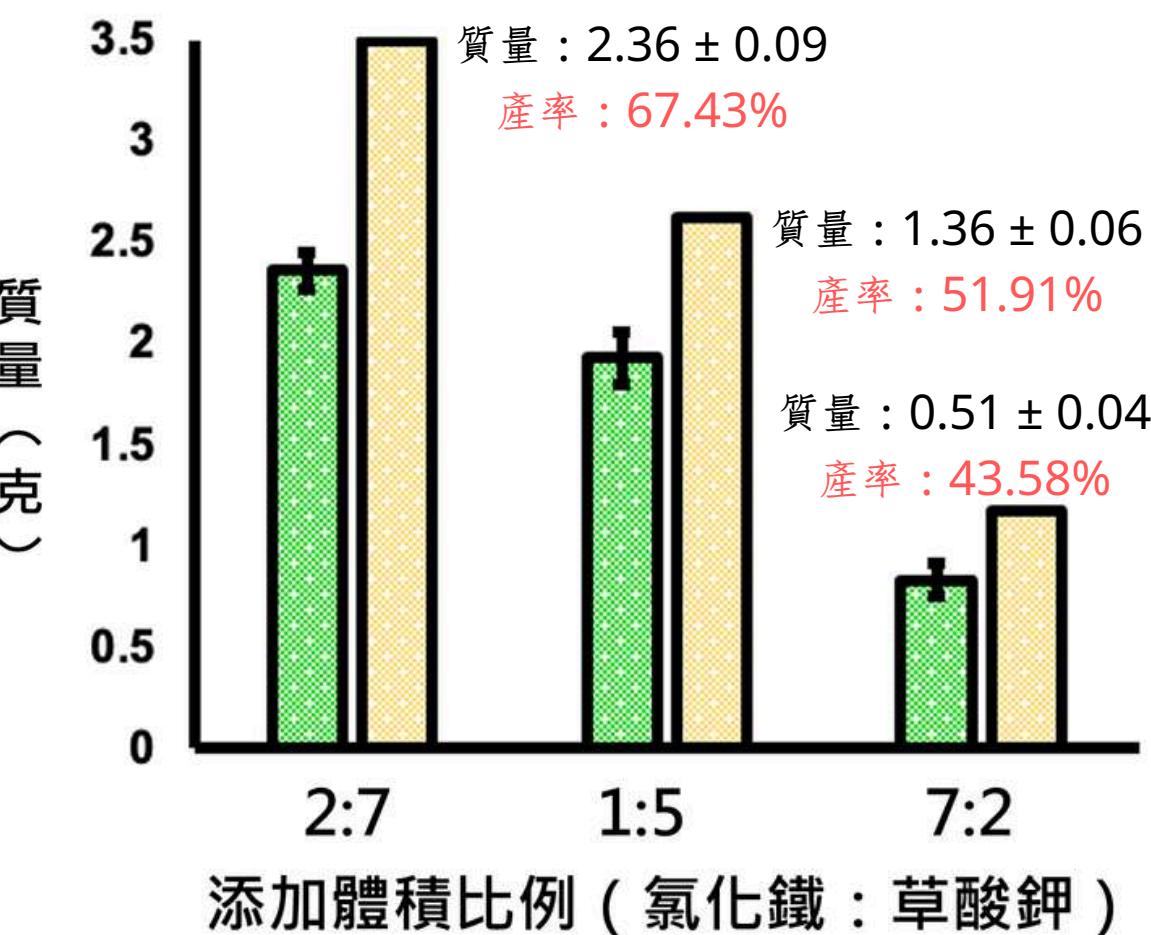
結果分析：

- 冰浴→草酸鐵鉀溶解度降低→產率提升
- 較低溫度時→數量多、尺寸小；較高溫度→生長慢、尺寸大

三、氯化鐵與草酸鉀的比例對草酸鐵鉀晶體產率的影響

實驗目的：探討不同量的反應物混合比例對晶體生成量的影響。

結果：氯化鐵與草酸鉀混合（不同比例）→冰浴40分鐘→測產率



結果分析：

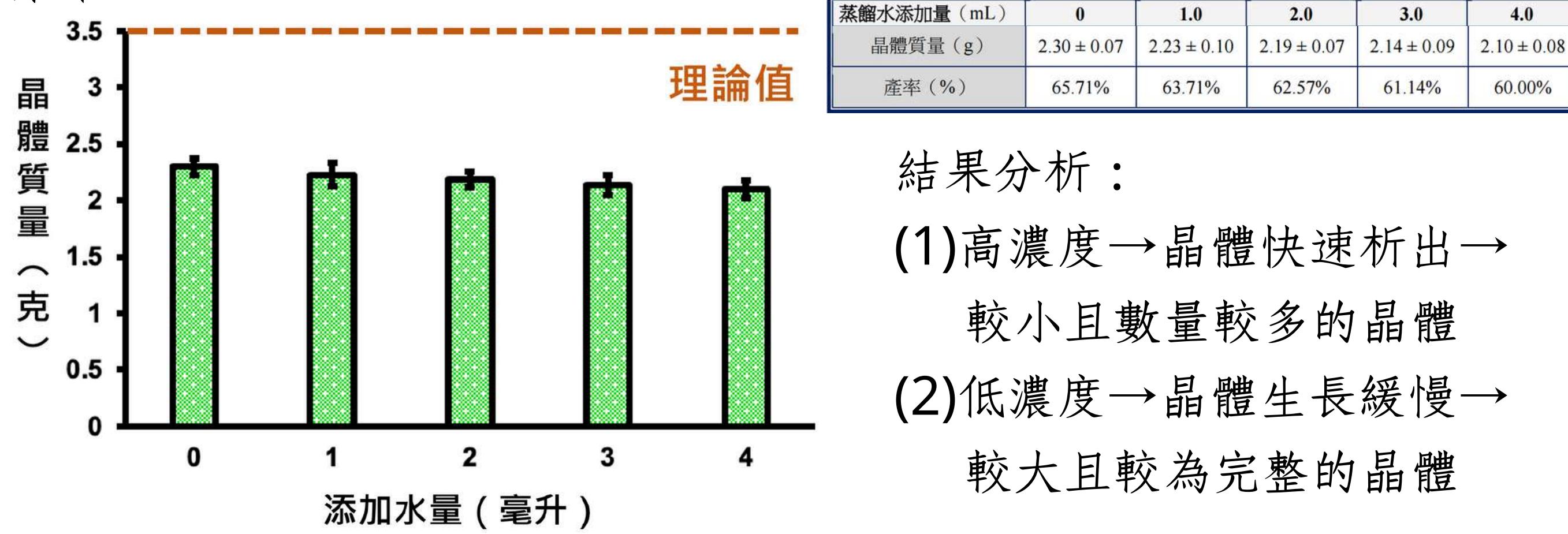
- (1) 溶液比例為 2:7 產量最高
- (2) 在 7:2 的組別中，氯化鐵過量，草酸鉀成為限量試劑，導致部分氯化鐵未參與結晶，降低產率並可能產生沉澱。



四、反應物濃度對草酸鐵鉀晶體產率的影響：

實驗目的：研究不同濃度的反應物對草酸鐵鉀晶體結晶過程的影響。

氯化鐵與草酸鉀混合→加入蒸餾水（不同毫升）→冰浴40分鐘→測產率
結果：



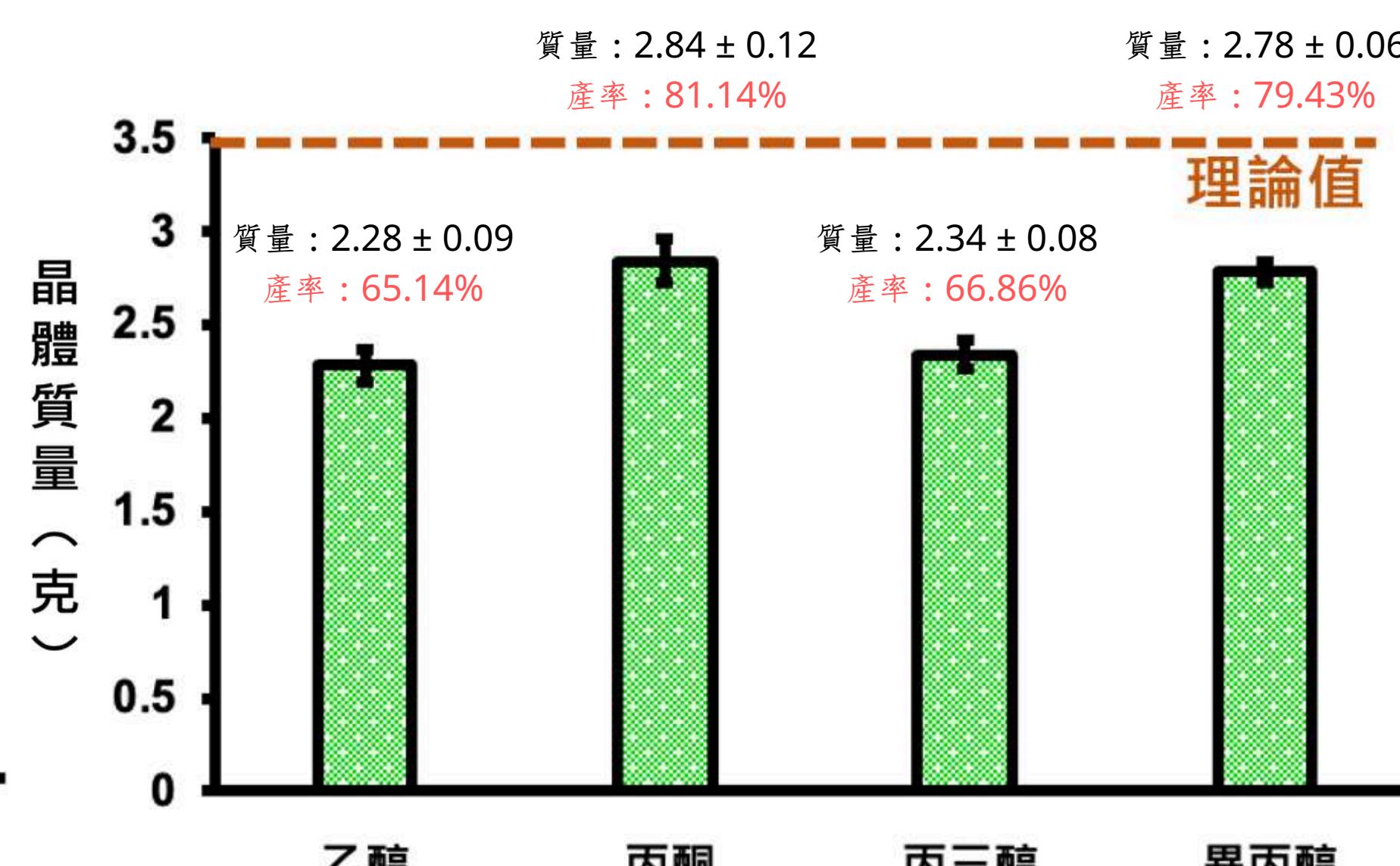
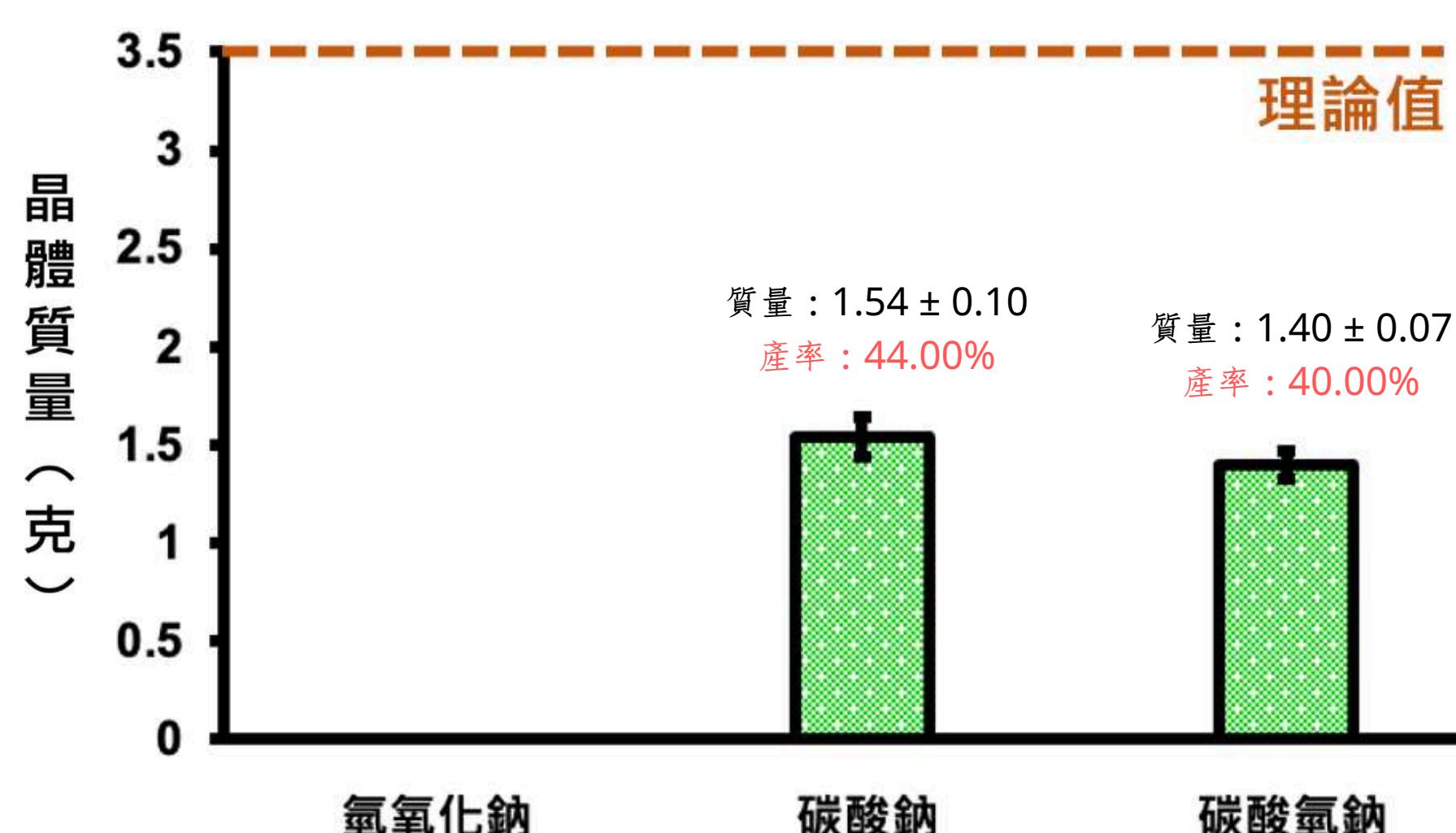
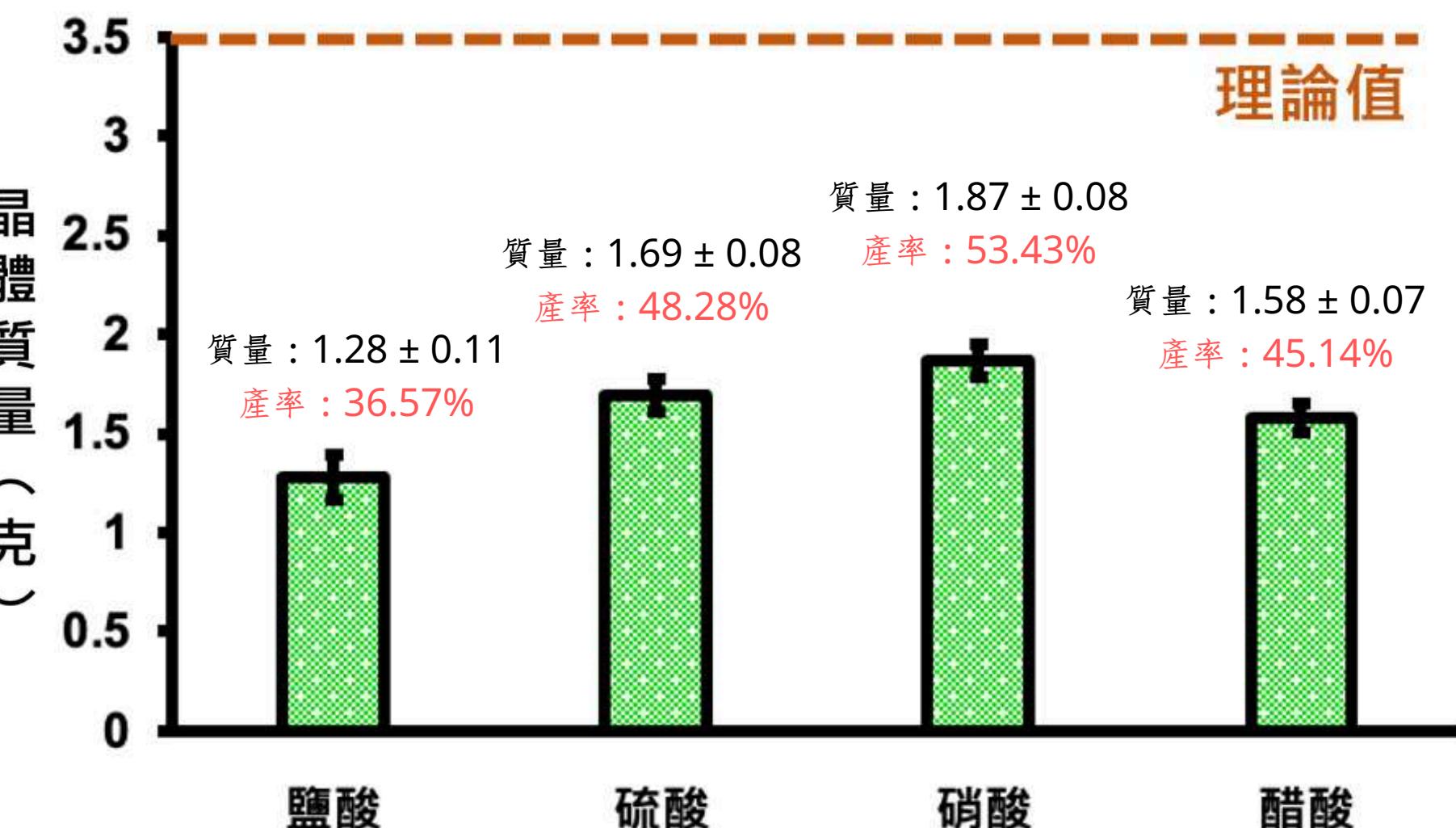
結果分析：

- (1) 高濃度→晶體快速析出→較小且數量較多的晶體
- (2) 低濃度→晶體生長緩慢→較大且較為完整的晶體

五、探討不同化學添加劑對晶體產率的影響

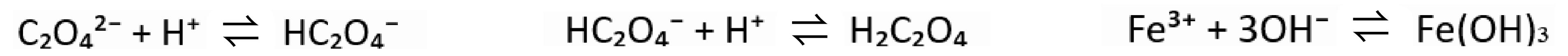
實驗目的：在經過實驗一～四後，我們想探討酸性、鹼性、有機溶劑對草酸鐵鉀晶體生長過程及晶體形態的影響，特別是要研究這些添加劑的 pH 值是否對晶體生長有顯著影響。氯化鐵與草酸鉀混合→加入不同化學添加劑→冰浴40分鐘→測產率

結果：



結果分析：對照組 (+2.0mL水) 產率：62.57%

- (1) 在酸性條件下， H^+ 與 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 反應，降低配位能力，鹽酸中的 Cl^- 會與 Fe^{3+} 形成錯離子，抑制晶體生成。
- (2) 強鹼使 Fe^{3+} 生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉澱，降低鐵離子濃度，抑制結晶；碳酸鹽提供溫和鹼性，較穩定。

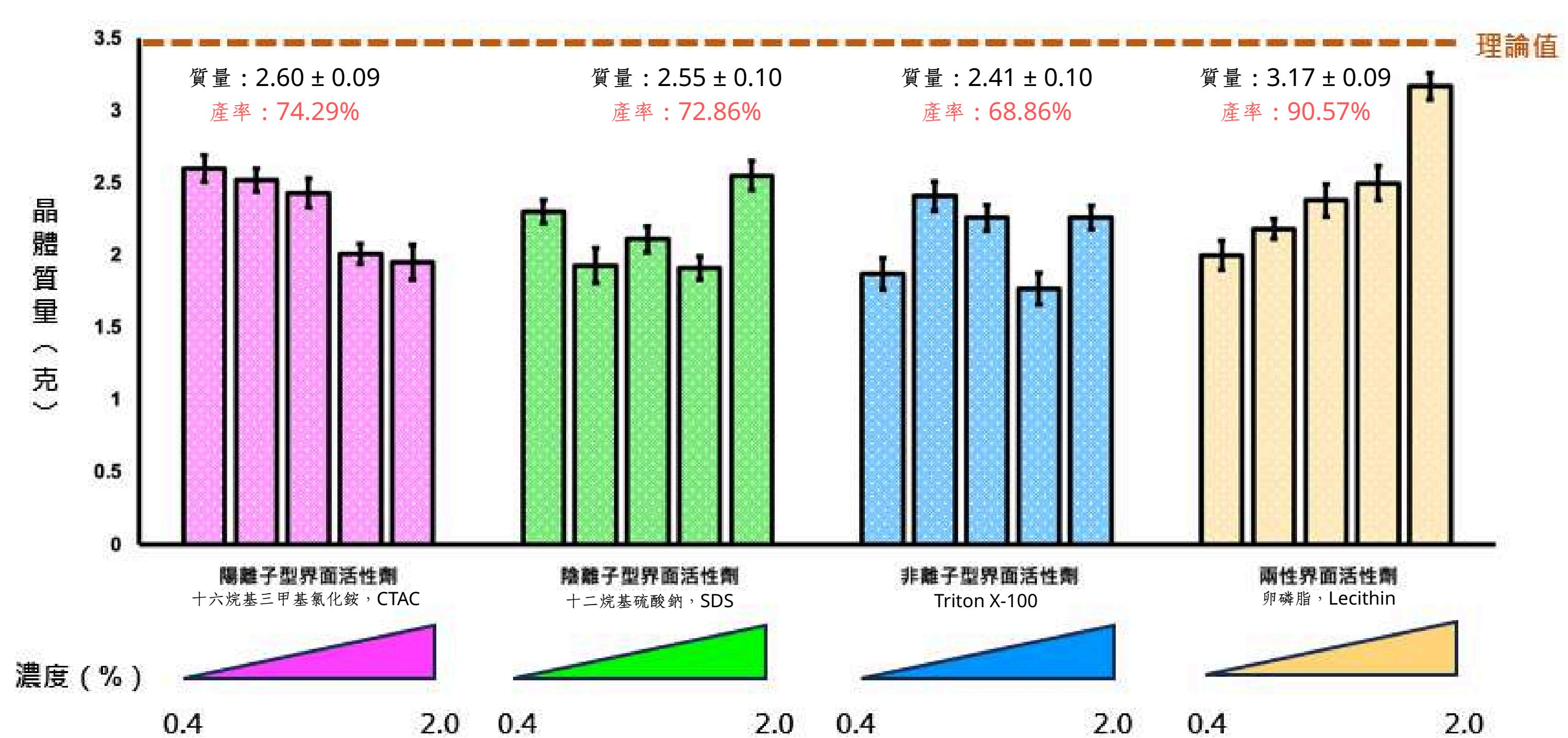


- (3) 丙酮與異丙醇極性低，有助晶體析出；丙三醇與乙醇極性高或黏稠，抑制晶體成長。
- (4) 結晶產量受pH值、酸鹼種類與溶劑極性等因素共同影響，過酸、過鹼或極性過高皆會抑制晶體析出。

六、研究界面活性劑的添加對晶體形狀、大小以及晶體產率的影響

實驗目的：在搜尋資料的過程中，我們發現界面活性劑對晶體生成具有一定影響。因此，選擇了陽離子型、陰離子型、非離子型與兩性界面活性劑探討界面活性劑對草酸鐵鉀晶體生成量的影響。氯化鐵與草酸鉀混合→加入不同界面活性劑→冰浴40分鐘→測產率

結果：



界面活性劑種類	陽離子型 (g)	陰離子型 (g)	非離子型 (g)	兩性 (g)
0.4%	2.60 ± 0.09	2.30 ± 0.08	1.87 ± 0.11	2.00 ± 0.10
0.8%	2.52 ± 0.08	1.93 ± 0.12	2.41 ± 0.10	2.18 ± 0.07
1.2%	2.43 ± 0.10	2.11 ± 0.09	2.26 ± 0.09	2.38 ± 0.11
1.6%	2.01 ± 0.07	1.91 ± 0.08	1.77 ± 0.11	2.50 ± 0.12
2.0%	1.95 ± 0.12	2.55 ± 0.10	2.26 ± 0.08	3.17 ± 0.09
最佳產率 (%)	74.29%	72.86%	68.86%	90.57%
照片				

結果分析：對照組 (+2.0mL水) 產率：62.57%

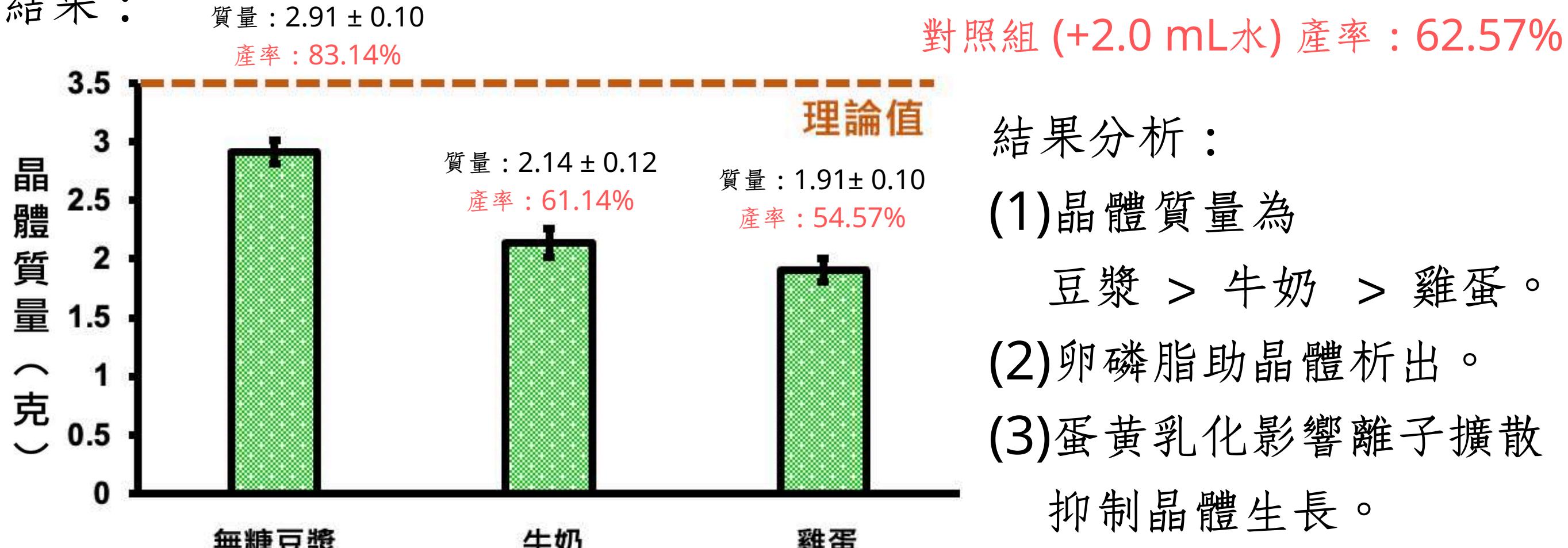
- (1) 陽離子型與陰離子型界面活性劑在高濃度下，其帶電基團可能過度吸附於晶面，造成晶核表面的離子排列受干擾，導致晶體成長受阻，產率降低或變異性增加。
- (2) 非離子型界面活性劑主要以聚醚鏈與水作用，干擾較為溫和；但當膠束形成並達飽和狀態時，會阻礙溶質分子在晶體表面的吸附與堆積，進而抑制晶體生長。
- (3) 兩性型界面活性劑（如卵磷脂）可隨pH值與離子環境變化展現雙電荷特性，形成穩定的膠束結構，有助於緩慢釋放離子，促進大尺寸、均勻且完整晶體的生成。
- (4) 當卵磷脂濃度為 2.0% 時，晶體產率高達 90.57%，晶體外觀也最為均勻緻密。這顯示適當比例的兩性界面活性劑能有效促進成核與晶體成長過程，穩定性優於其他類型。
- (5) 為驗證卵磷脂效果，進一步添加至 4.0% 濃度，結果晶體重量 3.39 克，產率高達 96.86%，顯示其促晶效果極為顯著，並具有實用價值，證明濃度控制對結晶影響重大。

七、研究食品界面活性劑對晶體產率的影響

實驗目的：卵磷脂對草酸鐵鉀晶體生成促進效果最明顯。由於卵磷脂成本較高，我們想探討是否能以市售含有卵磷脂的食品來取代純卵磷脂。

氯化鐵與草酸鉀混合→加入不同食品界面活性劑→冰浴40分鐘→測產率

結果：



結果分析：

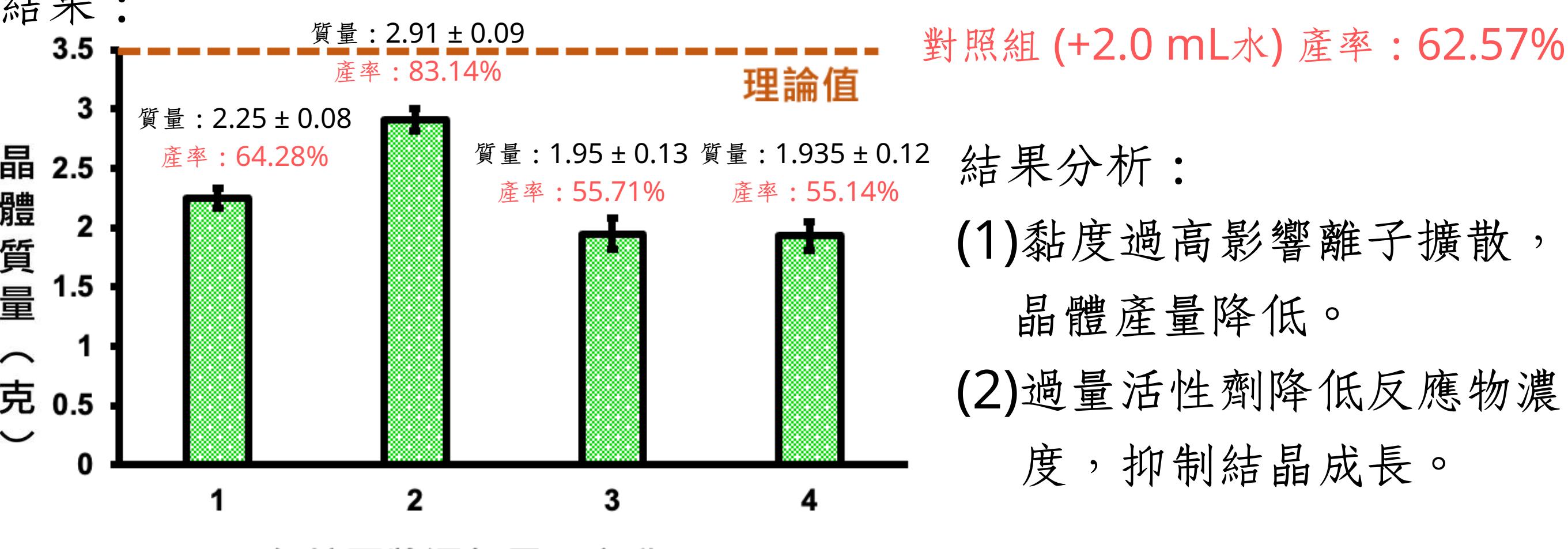
- (1) 晶體質量為豆漿 > 牛奶 > 雞蛋。
- (2) 卵磷脂助晶體析出。
- (3) 蛋黃乳化影響離子擴散抑制晶體生長。

八、研究食品界面活性劑添加量對晶體產率的影響

實驗目的：發現食品中的界面活性劑會影響草酸鐵鉀晶體的產率。因此以無糖豆漿進行實驗，探討食品界面活性劑添加量對晶體生成的影響。

氯化鐵與草酸鉀混合→加入無糖豆漿→冰浴40分鐘→測產率

結果：



結果分析：

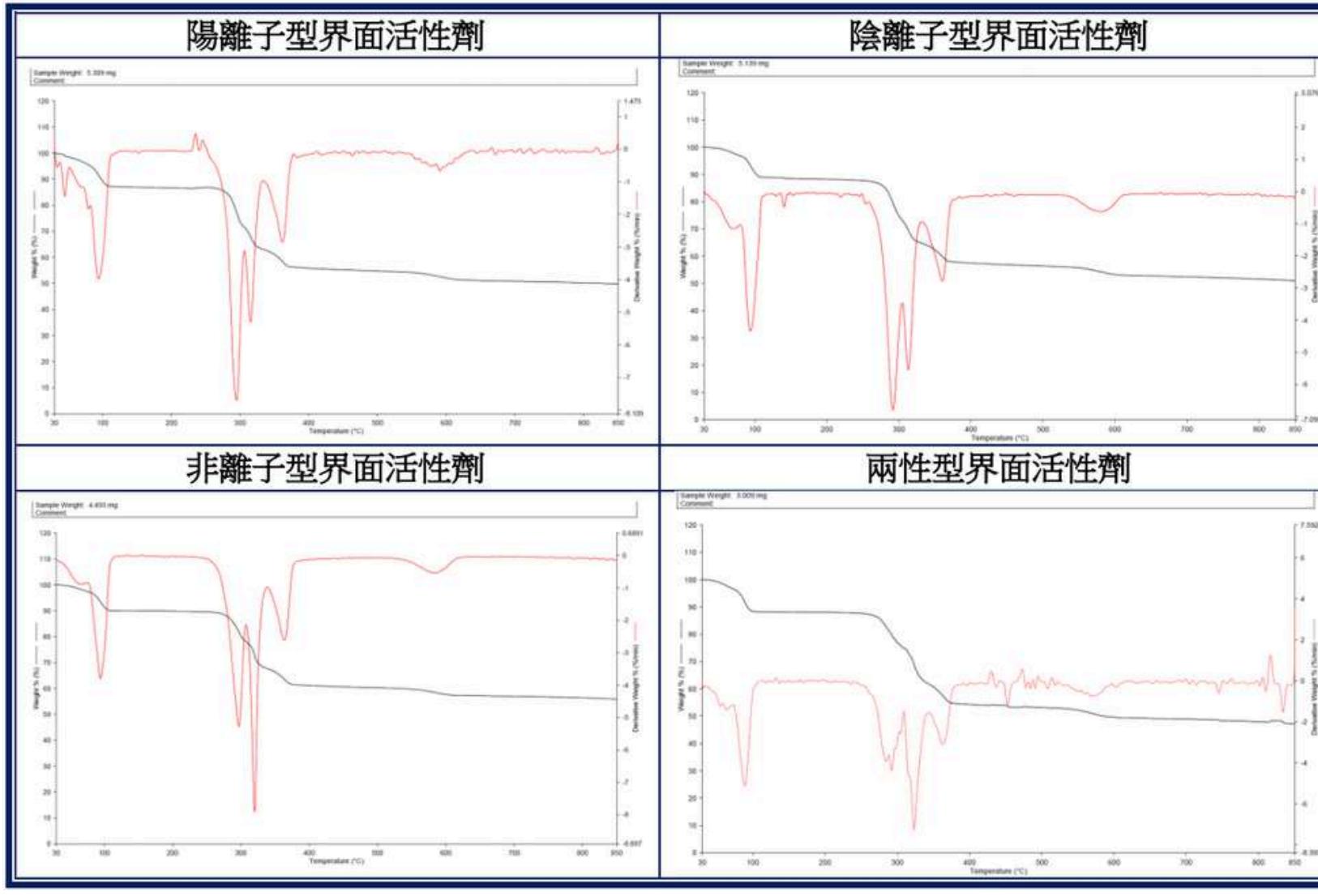
- (1) 黏度過高影響離子擴散，晶體產量降低。
- (2) 過量活性劑降低反應物濃度，抑制結晶成長。

九、界面活性劑對於晶體型態和大小的影響

實驗目的：比較不同界面活性劑對草酸鐵晶體的成核、樣貌與尺寸的影響，以評估其調控晶體生長的潛力。

結果：氯化鐵與草酸鉀混合→添加不同界面活性劑→放置室溫暗處→觀察

	對照組	陽離子型 界面活性劑	陰離子型 界面活性劑	非離子型 界面活性劑	兩性型 界面活性劑
照片					
晶體外型描述	形狀規則，邊緣明顯，呈樹狀向下生長	晶體略細長但仍規則，表面較平整，尺寸略小	晶體較小、數量多，排列緊密但顆粒感強	結晶鬆散、不規則，部分區域模糊、變形	晶體大量密集叢生，呈放射花朵狀，立體感強



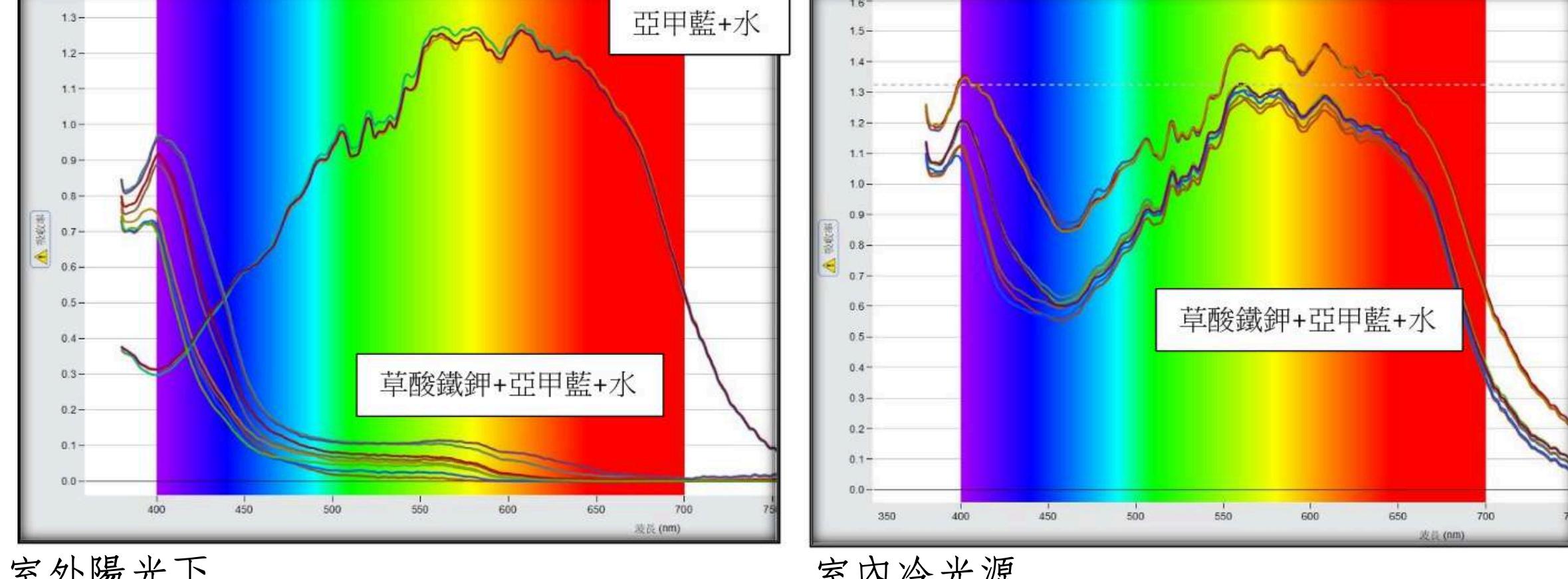
結果分析：

- (1)陽離子型界面活性劑分兩階段分解，熱穩定中等，殘留較多。
- (2)陰離子型界面活性劑熱分解複雜，多階段反應，殘留物少。
- (3)非離子型界面活性劑熱分解簡單，熱穩定性好，有機成分均一。
- (4)兩性型界面活性劑熱分解複雜，反應劇烈，穩定性最低。

十、草酸鐵鉀對亞甲藍之氧化還原反應

實驗目的：探討草酸鐵鉀廢液是否具備還原能力，能在光照條件下將亞甲藍溶液還原為無色，並以此初步評估其作為還原劑於生活中對染料與污水初步處理等應用的可行性。

結果： $2\text{Fe}^{3+} + \text{C}_2\text{O}_4^{2-} \xrightarrow{\text{光}} 2\text{Fe}^{2+} + 2\text{CO}_2$



實驗組	草酸鐵鉀 (mL)	蒸餾水 (mL)	亞甲藍溶液 (mL)	吸收率	
				0分鐘	1分鐘
	15.00	0.00	2.00	0.113	0.102
	7.50	7.50	2.00	0.066	0.058
	5.00	10.00	2.00	0.049	0.044
	3.75	11.25	2.00	0.023	0.009
對照組	0.00	15.00	2.00	1.236	1.260

實驗組	草酸鐵鉀 (mL)	蒸餾水 (mL)	亞甲藍溶液 (mL)	吸收率		
				0分鐘	20分鐘	40分鐘
	15.00	0.00	2.00	1.437	1.442	1.444
	7.50	7.50	2.00	1.306	1.299	1.307
	5.00	10.00	2.00	1.297	1.282	1.269
	3.75	11.25	2.00	1.254	1.238	1.225
對照組	0.00	15.00	2.00	1.236	1.268	1.272

十一、探討草酸鐵鉀廢液在藍晒應用

實驗目的：探討草酸鐵鉀廢液是否具備運用於藍晒之應用能力，能在光照條件下產生普魯士藍變色，並且探討其生活中應用的可行性。

結果：

	對照組	陽離子型	陰離子型	非離子型	兩性
照片					
色碼	#164083	#7EA2BC	#478BBA	#4D83BA	#628BA9
色澤分析	深藍色	淺藍偏灰	近深藍色	顏色均勻但淡	灰藍色且混濁



肆、討論

晶體的觀察：

熱力學

晶體生成過程中
的成核與成長

動力學
晶體生成的快慢
與影響因素

除產物產率，我們關注核心在晶體生成的速率。透過在 40 分鐘內觀察晶體初步生成量，可評估不同條件下的結晶速率。

黏稠溶液的稀釋與晶體生成：

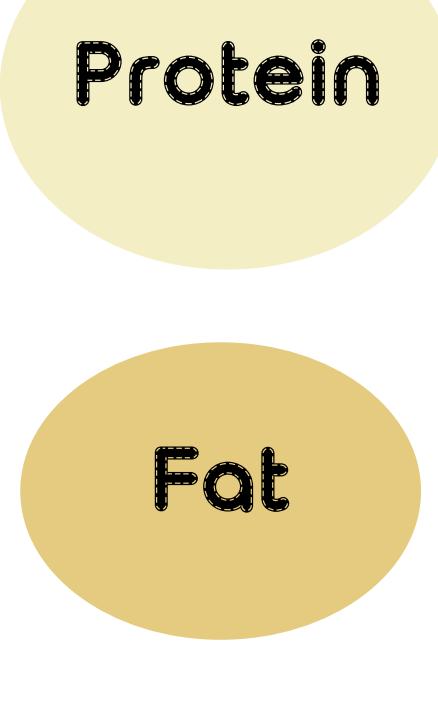


產率下降至
不到 40.0%

原因：

- 離子移動速率變慢，降低有效碰撞與反應速率
- 導電度下降，離子的移動受限

食品中的脂肪和蛋白質對於晶體的影響：



脂肪及高分子蛋白質可能在水中形成乳化或膠狀結構。乳化形成微小液滴，阻礙溶質移動與晶體成長，導致晶體形貌不規則，影響結晶品質，應避免過度乳化。

極性對於晶體生成的影響：

草酸鐵鉀在液體中的溶解度取決於其極性，如果添加丙酮這類極性較低的有機溶劑，會影響到整體溶液的極性，進而降低草酸鐵鉀或相關離子的溶解度下降，而促進沉澱形成。

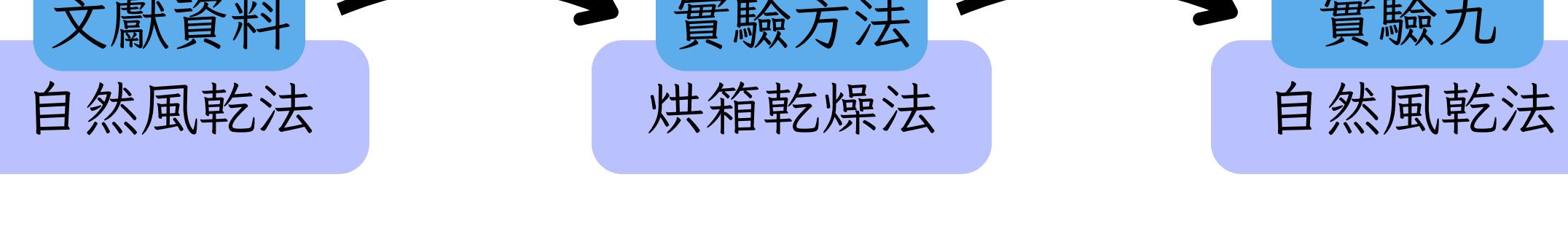
界面活性劑的作用：

- *界面活性劑→形成微小的聚集體或膠束(乳化作用)→降低溶液的表面張力→影響晶體成核與生長速率
- *高表面張力→分子間的內聚力強→穩定晶體界面→晶體成長穩定

乾燥方式對晶體完整性的影響：

受天氣影響大
→產生誤差

機械應力、晶體與濾紙收縮速率
不同、熱膨脹不一致→晶體碎裂



未來展望

實驗十
→
廢水處理
擴展環境工程價值

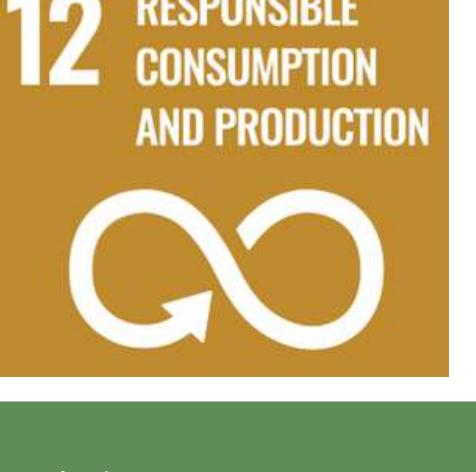
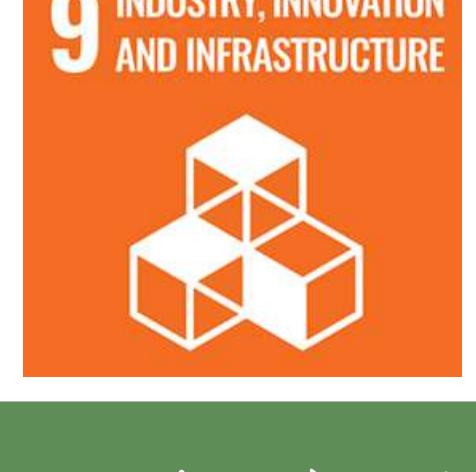
模擬生物體
內結晶條件

實驗十一
→
藍晒技術
研究各類抑制劑對
晶體形成控制效果

實驗十一
→
藍晒技術
實驗廢液能得到
妥善應用與處理

伍、結論

- 在 14.0mL 草酸鉀中加入 4.0mL 氯化鐵後，添加 4.0% 卵磷脂，或無糖豆漿後，放置冰浴 60 分鐘，即可達到最佳產率
- 添加酸鹼會抑制晶體形成，對照組具最佳產率與結晶完整性。
- 光照條件可加速草酸鐵鉀廢液對亞甲藍的還原反應，1 分鐘內即完成，且濃度越高反應越明顯。



綠色化學

- 提升原料使用效率並降低化學品浪費
- 天然界面活性劑→低毒環保結晶系統

陸、主要參考文獻

- 周芳妃、李盈萱、陳靜瑋。(2016)。微量化學實驗：小綠綠晶體與藍印術微量實驗。台灣化學教育。
- Chidambaran, R., Sequeira, A., & Sikka, S. K. (2019). Neutron diffraction study of the structure of potassium oxalate monohydrate. *The Journal of Chemical Physics*, 141(11), 3616-3622.