

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

團隊合作獎

030206

探討國中教材之酯化反應連結皂化反應的可行性與原理解析

學校名稱：桃園市立東興國民中學

作者： 國二 柯品聿 國二 羅帝揚 國二 官忠慶	指導老師： 陳竑廷 蔡宜謨
---	-----------------------------

關鍵詞：皂化反應、酯化反應、鹽析

摘要

本研究針對國中教材中酯化反應與皂化反應缺乏連結問題，設計並優化整合性實驗流程。在實驗中，發現皂化後鹽析存在「飽和點」，添加 100 mL 飽和食鹽水，十六酸鈉反應收率 193%，但增至 150 mL 時產量趨緩。為解析此現象，以 DLS 動態光散射技術，結果顯示十二酸鈉、十四酸鈉可形成微胞，十六酸鈉因溶解度低，微胞形成效果不佳。用 DLVO 理論分析粒子間作用力，補充教材的鹽析理論解釋。氫氧化鈉濃度影響方面，2 M 獲高反應收率（十二酸鈉 528%）但含水率較高，8 M 純度較佳但反應收率降低。以氯化鎂鹽析時生成脂肪酸鎂（反應收率 129%），顯示鹽類選擇亦影響最終產物。透過本研究建立了酯化、純化與皂化優化流程，期望為教材提供更具探究與應用性的參考。

壹、研究動機

在課程學習過程中，我們觀察到週遭同學未能清楚意識到：皂化反應的反應物，其實正是酯化反應所生成的酯類。酯化與皂化反應雖同為 108 課綱中八年級下學期的重要課程內容，且廣泛應用於生活中的香水、清潔劑等產品，但現行教材與教學設計多將兩者分開呈現，缺乏系統性的連結與整合，致使國中生難以建立完整的化學概念架構。

另一方面，隨著環保意識提升，我們想嘗試如何以更永續的方式設計實驗與教材。現行教材中的酯化實驗常產生香味濃烈且處理不易的副產物，若能將酯化產物直接銜接進行皂化反應，不僅有助於學生深化對反應原理及物質轉化歷程的理解，亦能降低實驗過程中的潛在污染，實踐綠色化學理念。基於此想法，我們希望探討國中教材中酯化反應與皂化反應的連結可行性，進一步解析其化學原理，並據此提出具體可行的教材改良方案，以期提升教學成效，增進學生科學素養，並融入永續教育的理念。

一、文獻回顧

透過文獻回顧，我們歸納先前研究方向大致為：「皂化條件」、「酯化條件」與「皂化製程改良」。然而，我們發現尚未有研究明確將「國中教材中的酯化反應」與「皂化反應」做出實驗性連結與整合設計。雖然有文獻針對酯化反應條件的最佳化進行探討（如《酯香醇》），但這些研究並未延伸至酯化產物如何直接轉化為皂化反應的原料，也未從課綱銜接或教材應用角度思考其可行性與價值，以下將分部分說明先前研究的貢獻與本研究的關聯性。

（一）皂化反應於科展的研究脈絡

皂化反應是常見於中學教育的教學設計中的實驗，在早期研究如《油脂皂化反應的實驗設計與探討》（吳誌偉與吳俞霖，2005）即針對皂化的各種實驗條件，如鹽析、脂肪酸與甘油分離、皂化值、酸值與碘值等化學性質進行詳盡分析，建立了皂化反應的基礎，在本研究中，我們參考其結果作為實驗設計的主體。

（二）針對皂化反應條件與肥皂品質的差異探討

許多研究著重於皂化原料、鹼液種類、操作方式與添加劑對皂化產物的影響。《清潔溜溜—理化課本（二）肥皂實驗的探討與改進》（李佳龍與李君薇，2002）針對課本上的皂化實驗進行改良，探討不同油脂（如橄欖油、葵花油、回鍋油）及鹼濃度對肥皂的 pH 值與去汙效果的差異，並強調鹽析與酒精添加的必要性。

而《豬油大變身--肥皂 DIY》（楊捷儒等，2006）則以豬油為主原料，詳細分析鹼量、酒精與添加劑（如糖與檸檬汁）對成皂效果與外觀的影響。該研究指出，豬油雖可皂化，但過程中會產生強烈氣味且產率不高，顯示原料選擇對實驗體驗與結果有重大影響。

（三） 皂化製程變化與再利用的應用研究

皂化反應的製程亦是研究重點之一。《乾坤再造不一樣的皂化》（楊沅蓁等，2016）對比傳統熱製、冷製與再生法的差異，發現加酸液能有效降低 pH 值，且再生皂製作的乳化與殺菌能力更穩定。此外，《打皂健康人生自製防疫抗菌手工皂》（程楷婕等，2020）則聚焦於油溫、鹼液溫差與油脂配比對成皂性與清潔力的影響，並成功製作出具抗菌效果的艾草與左手香手工皂。

除了成皂過程，皂的熟成期對品質也有重大影響。《會叫的孵皂箱~手工皂熟成之探究》（佚名，2021）設計自動控制的孵皂裝置，發現熟成八天內肥皂重量會下降近 6%，其硬度與清潔效果隨時間提升；這點補足許多研究忽略的「後處理」階段，強調環境穩定與晾皂技術的重要性，因此在本研究中固定相同的後處理階段。

（四） 文獻綜合比較

綜觀上述文獻，不論是對油脂來源、鹼液濃度、鹽析技術或熟成條件的探討，皆已為皂化反應的應用與教育建立起完整的知識脈絡。然而，目前相關研究大多聚焦於傳統油脂（如椰子油、豬油、回收油）與強鹼直接進行皂化的過程，或是在既有的皂化流程中加入變因進行優化，相關文獻比對表如下表一。

表一、相關文獻比對表

文獻名稱	關聯性說明	重要結論
油脂皂化反應的實驗設計與探討	詳細探討油脂與氫氧化鈉皂化過程，包含鹽析與產物分離，為本研究探討鹽析效應提供理論依據。	鹽析能有效分離皂與脂肪酸；進行反應級數與皂化值、碘值等分析。
清潔溜溜－理化課本(二)肥皂實驗的探討與改進	針對課本中的肥皂實驗改良，與研究目的相符，提供皂化原料與鹼液種類的差異比較。	不同油脂與鹼液濃度會影響肥皂形成與 pH 值；酒精與鹽析對產物有明顯影響。
豬油大變身--肥皂 DIY	以豬油進行皂化實驗，分析鹼量與添加劑（檸檬汁等）對產率與 pH 的影響。	豬油可用於皂化，但產率低且臭味重；鹼量影響皂化成功與否。

乾坤再造~不一樣的皂化	分析不同製皂法(冷製、熱製、再生法)與酸液添加對皂化影響，與研究中比較冷製與鹽析操作相近。	加酸液可降低 pH 值，再生法製皂效果最佳；皂與油混合的乳化與抗菌效果受製法影響。
打皂健康人生~自製防疫抗菌手工皂	探討手工皂製作過程中油溫與鹼水比例對成皂的影響，與本研究中的製皂操作條件相近。	油溫與鹼液溫差會影響成皂性與 pH 值變化；不同油脂與添加物會改變成皂的清潔力。
會叫的孵皂箱~手工皂熟成之探	聚焦手工皂的熟成條件與重量變化，補足研究中未探討的後期皂硬度與品質變化。	熟成時間越久，皂越硬，重量下降與含水量成反比；開發監控系統可提升製皂一致性。
回收油肥皂	探討回收油脂的皂化與鹽析對成皂效果之影響，與本研究的鹽析控制量討論高度吻合。	鹽析與攪拌是皂化成功關鍵；酒精非必要但可加速硬化。
酯香醇--酯化反應之最佳化探討	使用田口法探討酯化效率與催化條件，支持本研究強調酯化反應條件對後續皂化的重要性。	催化劑對酯化效率影響最大；溫度、過量反應物亦顯著影響生成率。
肥皂熟了，水知道	從熟成角度探討手工皂重量變化與鹽析效果，呼應本研究對鹽析濃度與析出量關係的關注。	熟成需控制環境濕度與溫度，鹽析濃度與熟成時間會影響最終品質與穩定性。

目前相關文獻中**尚未見**有研究將「國中自然科教材中的酯化反應」與「皂化反應」進行實際整合與實驗設計，本研究即是**針對此空白提出創新嘗試：以酯化反應所產生的長鏈脂肪酸酯為橋梁，實驗性地導入皂化反應流程**，並根據文獻，於後續研究中將攪拌次數、氫氧化鈉濃度、催化劑的種類與劑量做為控制變因。

二、 名詞解釋與定義

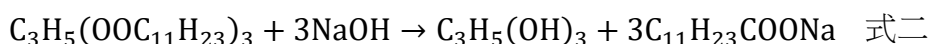
(一) 酯化反應

酯化反應的實驗原理基於酸催化的醇與羧酸反應，生成酯和水。這個過程是一個典型的脫水反應，並且是可逆反應。本研究中，會利用濃硫酸來加速反應並將水從反應體系中移除，以推動反應向酯的生成方向進行。其化學反應式如下式一（以乙酸和乙醇生成乙酸乙酯為例）：



(二) 皂化反應


皂化反應（Saponification）如式二，是當酯類化合物與鹼性物質反應時，將酯類化合物分解為脂肪酸鈉（即脂肪酸鈉）的反應。八年級教材中常以主要成分為三酸甘油酯的椰子油作為皂化的主要反應物，這是一種由一個甘油分子和三個脂肪酸分子結合而成的化合物。當椰子油與氫氧化鈉 (NaOH) 反應時，生成脂肪酸鈉（脂肪酸鈉鹽）和甘油，即皂化反應，在下式二中，我們以椰子油的主要成分三酸甘油酯為舉例。



(三) 鹽析

鹽析的基本原理是利用高濃度食鹽溶液，使某些溶質由溶液中沉降或析出。根據過往文獻，**在酯化反應與皂化反應後常加入飽和食鹽水**。在酯化反應中，混合物中除了生成的酯，還含有水、醇與酸，加入飽和食鹽水能降低酯類在水中的溶解度，幫助其分離出來，方便後續純化。在皂化反應中，肥皂原本分散於水中，加入大量食鹽後，肥皂變得難以溶解，形成固體或乳白色沉澱，便於過濾與收集，完成肥皂的製作。

(四) 不確定度分析

不確定度（Uncertainty）指的是測量結果的不精確性或變動範圍，不確定度用來描述測量值的可信度，並且是所有實驗和數據分析中的重要概念，式四中的 ΔX 代表不確定度， $\sigma_{\bar{x}}$ 代表平均標準差，而在以下圖表中則會以不確定度範圍 (error bar) 表示其不確定度，以圖示  表示，其中上下兩端粗體水平線即為不確定度範圍的上界與下界。

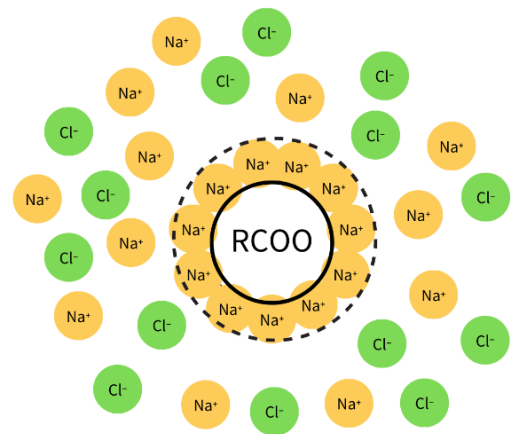
$$\Delta X = \sqrt{(\sigma_{\bar{x}})^2 + \left(\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)^2 \text{精密刻度}} \quad \text{式三}$$

相對不確定度（又稱：不確定度佔比）定義為對「平均數」與「不確定度」的商數取百分比，其科學意義為探討不確定度佔（實驗測量）平均數的百分比例，當百分比例越小時，即代表實驗結果越穩定，且測量值與真實值越接近，即比較兩筆相對不確定度：3% 與 40% 的實驗結果時，40% 實驗結果較受到影響而不穩定。

(五) 雙電層與屏蔽效應解析

脂肪酸鈉（ RCOO^-Na^+ ）在水中解離成 RCOO^- 與 Na^+ ，其中 RCOO^- 為具表面活性陰離子，易與水中陽離子形成雙電層結構。

這種雙電層可分為：緊密層（靠近粒子表面，由吸附性 Na^+ 構成）與擴散層（由鬆散分布的 Na^+ 和 Cl^- 離子構成）。雙電層會導致粒子之間產生靜電排斥力，進而影響粒子聚集與穩定性，如下圖一。



圖一、雙電層示意圖（作者自繪）

當加入越來越多飽和食鹽水溶液時，水中的離子總數會增加，這使得水中的離子強度（總離子莫爾數÷總體積）也會隨之增加，根據 Debye 長度的公式： $\kappa^{-1} = \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon k_B T}{2N_A q^2 I}\right)^{1/2} \rightarrow \kappa \propto \sqrt{I}$ 當離子強度增加時，Debye 長度會縮短，這使得膠體之間斥力範圍變小，因此進而增加吸引力，改由凡德瓦力主導，因此粒子更容易聚集在一起，使得雙電層被壓縮。

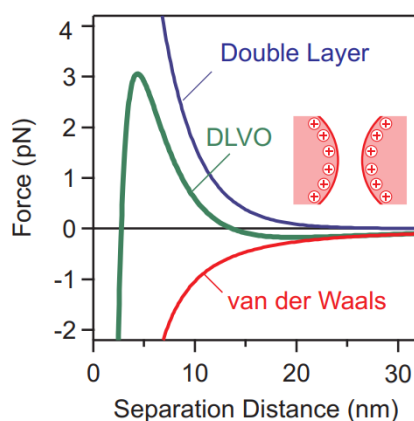
(六) 凡德瓦力與 DLVO 理論

凡德瓦力是一種普遍存在於所有粒子之間的弱吸引力，包括取向力、誘導力與倫敦分散力。取向力是指極性分子與極性分子之間交互作用的力，誘導力則是指極性分子與非極性分子之間交互作用的力，倫敦分散力則是指因為電子本身會繞著原子核移動，而在某一瞬間兩個原子中的電子會瞬間移動到特定位置，可使原子間相吸，同時，倫敦分散力也是三種凡德瓦力中最普遍存在的，雖然每對粒子間的凡德瓦力不強，但當聚集粒子數量變多時，整體吸引效應可達穩定聚集的程度。

對於脂肪酸鈉而言，因其親水端本身就帶負電，所以並不會形成明顯的凡德瓦力吸引，相反地其疏水尾端間可產生明顯的凡德瓦力吸引，有利於形成微胞、團聚甚至固態沉澱。

然而，粒子間不僅有吸引，還會因表面帶電（如 RCOO^- ）產生靜電排斥力。這種排斥力會阻礙粒子靠近，造成膠體穩定。在此基礎上，DLVO 理論（Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek theory）將膠體粒子間的總作用力視為「靜電排斥力」與「凡德瓦力吸引力」之總和。

DLVO 理論（Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek theory）說明粒子間作用能與距離的關係， x 軸為粒子間的距離（單位：nm）， y 軸為作用能（單位：pN），如下圖二，其中藍色曲線為靜電排斥力（雙電層排斥力），紅色曲線則為凡德瓦力，兩者疊加形成一個典型的能量曲線，如圖下的綠色曲線。



圖二、DLVO 理論中粒子間作用能與距離的關係

（圖片來源：Overview DLVO Theory）

1. 當粒子距離較遠（大於 15 nm）時，些微的凡德瓦力主導，系統穩定，粒子在此時在溶液裡緩慢漂浮，不聚集。
2. 當粒子在中等距離時（約 3~10 nm）時，靜電排斥力主導，出現能障，若顆粒無法克服能障，則會持續維持距離較遠的上述狀態，緩慢漂浮不聚集；若顆粒成功克服能障，則距離會快速縮短，使得粒子進入下個階段：強烈吸引力，脂肪酸鈉析出。
3. 當粒子之間的距離在短距離時（小於 3 nm）時，會形成強烈凡德瓦力，使得脂肪酸鈉被吸引聚集，因此析出。

(七) 固體產物總質量（產量）與反應收率定義

本研究所使用的反應收率，皆是將固體產物總質量（後稱產量）視為脂肪酸鈉。反應收率計算方式為：固體產物總質量 ÷ 脂肪酸鈉理想產量 × 100%

三、 前導實驗一

我們在校內科展探討不同酸類與乙醇製作酯類的可行性，並將他們做成脂肪酸鈉，發現皂化後並無法直接產生脂肪酸鈉固體，而須經過將水分去除的步驟，因而將實際研究鎖定於「使用長鏈酸製作長鏈酯所製作的脂肪酸鈉」，相關內容如下：

(一) 製作酯類

將乙酸乙酯、丁酸乙酯、戊酸乙酯、椰子油、十六酸乙酯分別由酸類與醇類 (各 10 mL) 混合，滴加 0.15 mL 濃硫酸，於 60°C 加熱 5 分鐘。反應後加入飽和食鹽水，靜置分層，取上層酯類。

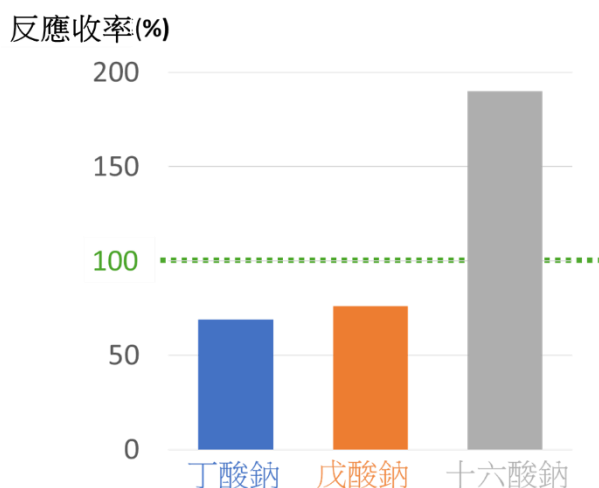
(二) 利用酯類進行皂化

取 5 mL 酯類，加入 10 mL 乙醇及 5 mL 8 M 氫氧化鈉，加熱 300 秒進行皂化，隨後加入食鹽水，撈取上層脂肪酸鈉，並檢驗其性質（如重量）。

(三) 前導實驗一：結果與討論（本段落數據圖皆由作者自繪）

不同酯類進行皂化反應的結果如圖三，我們在進行以上實驗時，發現皂化時間 10 分鐘並無法皂化出脂肪酸鈉，且皂化時間再怎麼拉長皆無法皂化出脂肪酸鈉，於是以下實驗結果皆是在皂化時將水份完全蒸發後取得的數據，但後來我們經思考後覺得將水分完全蒸乾並沒有產生真正的脂肪酸鈉，

意義不大，於是我們接下來的實驗皆是使用長鏈酸製作長鏈酯所製作的脂肪酸鈉，這樣才能準確地測量所產出的脂肪酸鈉。



圖三、加入不同酯類進行皂化的反應收率（作者自繪）

四、 前導實驗二

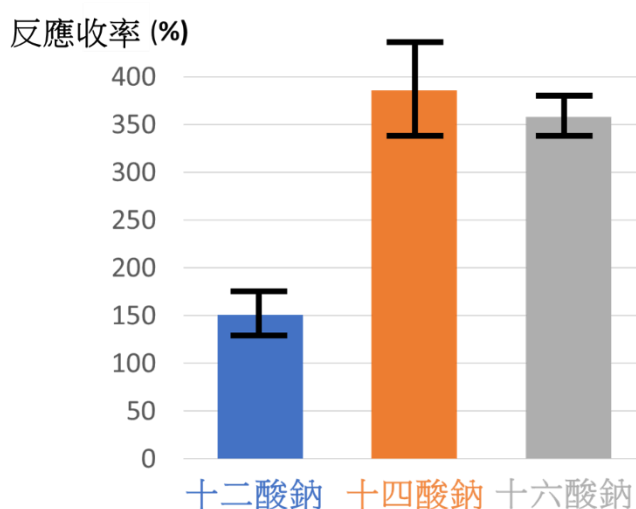
我們在校內科展階段，更發現加入食鹽水的量與結果有一定的關係，這促使了我們後續實驗流程的設計調整：**皂化反應後鹽析加入食鹽水量對產量的影響**，實驗如下：

(一) 利用十二酸乙酯、十四酸乙酯、十六酸乙酯製作脂肪酸鈉

將 0.04 mol 酯類（十二酸乙酯、十四酸乙酯、十六酸乙酯）與 10 mL 乙醇混合，加入 5 mL 8 M 氫氧化鈉，於 100°C 加熱 10 分鐘。反應後添加飽和食鹽水，靜置自然乾燥一天後秤重，取得脂肪酸鈉。

(二) 前導實驗二：結果與討論（本段落數據圖皆由作者自繪）

不同酯類進行皂化反應的結果如下圖四



圖四、不同酯類進行皂化反應之脂肪酸鈉產量（作者自繪）

根據前導實驗的結果指出，我們發現若沒有固定加入食鹽水體積時，實驗結果具有很大的不確定度（黑色線），真實結果在較大的範圍內，這代表實驗設計可能受到未知因素影響極大，在本次實驗中：我們**懷疑加入食鹽水的量與結果有一定的關係**，**因此我們在進行後續的實驗中會控制飽和食鹽水的量。**

此外，前導實驗中觀察到部分反應的反應收率大於 100%，推測鹽析後所得的固態產物中仍含有氫氧化鈉、氯化鈉或未反應完全的有機酸酯等雜質。因此，相較於現行教材中常見的國中操作流程，我們**認為應增加清洗步驟，以提升產品純度與數據準確性。**

貳、研究目的

為了探討酯化反應連結皂化反應的現象，針對不同的變因，進行文獻探討後，我們設計出六項研究目的。

- 一、探討不同酸類與乙醇製作酯類的可行性
- 二、探討皂化反應後加入不同體積飽和食鹽水對產量與反應收率之影響
- 三、探討不同清洗次數對皂化反應產量與反應收率之影響
- 四、探討以不同濃度氫氧化鈉進行不同長鏈酯類皂化反應對反應收率的影響
- 五、探討不同鹽類進行鹽析時對皂化反應產量與反應收率之影響
- 六、提出酯化反應連結皂化反應之實驗步驟改良及原理解析

參、研究設備及器材

本研究所需之實驗藥品包括：乙醇、2 M 氫氧化鈉、8 M 氫氧化鈉、十二酸、十四酸、十六酸及氯化鈉。實驗設備與器材包含：燒杯、25 mL 量筒、酒精燈、漏斗、濾紙、三腳架、陶瓷纖維網、刮杓、電子天平（精度 0.01 g）、玻棒、減壓吸濾裝置及電磁加熱攪拌器。



圖五、吸濾裝置（作者自行拍攝）

此外，為有效去除皂化產物中殘留之水分與雜質，本研究特別自製乾燥設備（以下簡稱自製烘箱），於皂化反應後進行乾燥處理，以獲得純淨的脂肪酸鈉，由塑膠袋、保麗龍盒及除濕機組成，樣品置於保麗龍盒內，透過除濕機去除水分。實際裝置如圖六所示。

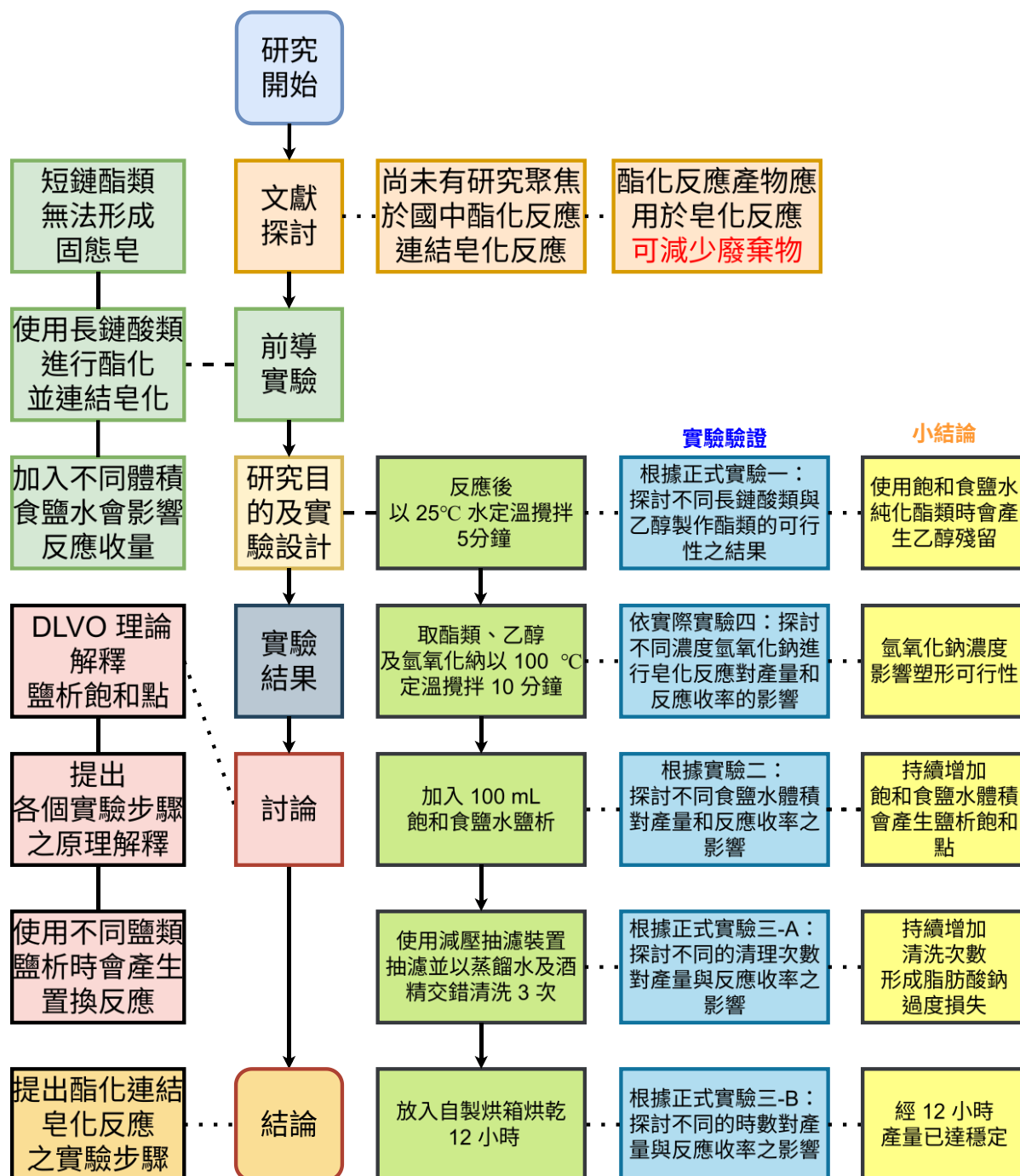


圖六、自製烘箱圖（運轉中）（作者自行拍攝）

肆、研究過程或方法

一、研究流程（本段落流程圖皆由作者自繪）

我們的研究流程圖如圖七所示，進行正式實驗前，依據前導實驗與文獻探討，進行實驗設計。



圖七、研究流程圖
(作者自繪)

二、 正式實驗一：探討不同長鏈酸類與乙醇製作酯類的可行性

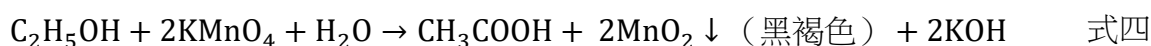
(一) 酯化反應後加入飽和食鹽水

本實驗以十二酸、十四酸、十六酸進行酯化反應，製備對應之酯類（十二酸乙酯、十四酸乙酯、十六酸乙酯）。參考文獻設定反應條件如下：

1. 各取 十二酸 200 g (1 mol)、十四酸 228 g (1 mol)、十六酸 256 g (1 mol)，分別加入 乙醇 46 g (1 mol) 及濃硫酸 0.75 mL（約 15 滴）。
2. 於電磁加熱攪拌器，60℃ 加熱 5 分鐘反應。
3. 反應後加入飽和食鹽水，並以分液漏斗純化酯類。

(二) 檢驗十二酸乙酯、十四酸乙酯、十六酸乙酯乙醇殘留度

由於酯化為可逆反應，且酯類與醇類互溶性高，我們推測所製得酯類中仍可能殘留乙醇。為確認皂化所用酯類之準確莫耳數，採用過錳酸鉀檢測乙醇殘留，若有乙醇的殘留，則會出現二氧化錳沉澱，反應式如下式四：



結果顯示，十二酸乙酯、十四酸乙酯、十六酸乙酯樣品皆產生二氧化錳沉澱（圖八），這代表本實驗操作分層的酯類仍有乙醇混合其中。

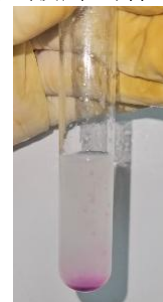
(三) 以加熱揮發法去除乙醇

我們考慮將乙醇揮發以獲得純酯類。

以十二酸乙酯為例，採用加熱揮發法進行測試，將十二酸乙酯於 90℃ 加熱，每 5 分鐘取樣（共 60 分鐘），滴加過錳酸鉀，觀察是否有二氧化錳沉澱，判斷乙醇是否殘留。結果顯示，即使加熱至第 60 分鐘，樣品中仍出現二氧化錳沉澱，說明酯類內仍含乙醇。



圖八、以飽和食鹽水純化之酯類滴入過錳酸鉀（作者拍攝）



圖九、以蒸餾水純化之酯類滴入過錳酸鉀（作者拍攝）

(四) 酯化反應後加入蒸餾水

我們改用乙醇溶於水的特性來去除乙醇，以得到酯類，相關討論撰於後文，醇化與檢驗乙醇殘留度的詳細實驗步驟如下：

1. 將蒸餾水加入酯化產物中，於 25℃ 攪拌 5 分鐘，使酯類中的乙醇溶於水。
2. 待分層後，使用分液漏斗分離上層酯類。
3. 滴入過錳酸鉀，檢測是否有二氧化錳沉澱。

三種酯類經過我們的測試皆未有二氧化錳沉澱，且過錳酸鉀與酯類完全不互溶，如圖九。因此我們便驗證成功得出純的酯類，得以進行後續的皂化反應。

因此我們後續研究的**酯化反應皆採用加入蒸餾水並攪拌的方式來去除乙醇**。

三、 正式實驗二：探討不同食鹽水體積對反應收率之影響

本實驗探討不同體積的飽和食鹽水（50 mL、100 mL 與 150 mL）對十二酸鈉鹽析效果之影響，操作步驟如下，並重複執行三次：

1. 取 0.04 mol 十二酸乙酯，加入 乙醇 10 mL，加入 8 M 氫氧化鈉溶液 5 mL (0.04 mol)，於 電磁加熱攪拌器，設定 100°C 加熱 10 分鐘。
2. 分別取 50 mL、100 mL 或 150 mL 飽和食鹽水進行鹽析。
3. 靜置自然乾燥一天後秤重

四、 正式實驗三：探討不同清洗次數對產量與反應收率之影響

本實驗評估**清洗次數**（蒸餾水與酒精，每 50 mL 為 1 次）對**脂肪酸鈉產量與反應收率**之影響，以優化清洗流程，步驟如下，並重複執行三次：

1. 取 十六酸乙酯 2.84 g (0.01 mol)、乙醇 10 mL，與 2 M 氫氧化鈉溶液 5 mL (0.01 mol)，於 100°C 攪拌 10 分鐘，加入 100 mL 飽和食鹽水鹽析。
2. 產物經減壓抽濾，並於抽濾期間，分別以蒸餾水與酒精進行 **3 次、5 次、7 次**清洗。
3. 將濾紙與產物移至培養皿，置入自製烘箱烘乾 12 小時，並秤量結果。

為確認水分是否充分去除，亦針對不同烘乾時長進行測試，結果顯示 **12 小時烘乾已接近自製烘箱除濕極限**，延長時間後樣品質量變化趨於穩定，詳見文後數據。

五、 正式實驗四：探討不同濃度氫氧化鈉進行皂化反應對產量與反應收率的影響

本研究以十二酸乙酯、十四酸乙酯、十六酸乙酯進行皂化，製備對應之脂肪酸鈉，並探討不同氫氧化鈉濃度（2 M 與 8 M）對產量與反應收率之影響。操作步驟基於前述實驗結果，進行優化，具體步驟如下，重複執行三次：

1. 秤取十二酸乙酯 2.28 g (0.01 mol)、十四酸乙酯 2.56 g (0.01 mol)、十六酸乙酯 2.84 g (0.01 mol)。
2. 量取乙醇 10 mL 與 氫氧化鈉溶液 0.01 mol（2 M 5 mL 或 8 M 1.25 mL）。
3. 將酯類與攪拌子置於電磁加熱攪拌器，加入乙醇與氫氧化鈉混合液，於 100°C 攪拌 10 分鐘。
4. 加入 100 mL 飽和食鹽水進行鹽析。

5. 產物經減壓過濾，（蒸餾冰水與酒精）清洗三次（各 150 mL）。
6. 將濾紙與產物移至培養皿，置入自製烘箱烘乾 12 小時。
7. 秤量乾燥後所得之脂肪酸鈉。

六、 正式實驗五：探討不同鹽類進行鹽析時對產量與反應收率之影響

本實驗基於前述之優化結果，進一步探討不同鹽類水溶液（氯化鈉與氯化鎂）進行鹽析時，對脂肪酸鈉（十二酸鈉、十四酸鈉、十六酸鈉）之產量與反應收率影響。受限於研究時間，本階段僅針對十六酸鈉進行分析，後續實驗將擴展至十二酸鈉與十四酸鈉。操作步驟如下：

1. 依優化後之皂化步驟，固定使用 2 M 氫氧化鈉製備十六酸鈉。
2. 分別將產物投入飽和氯化鈉水溶液或飽和氯化鎂水溶液中進行鹽析。
3. 依前述標準流程（正式實驗四）進行減壓過濾、交替清洗、烘乾，並進行產量與反應收率分析。

七、 正式實驗六：動態光散射（DLS）分析

為進一步探討不同鏈長脂肪酸鈉（十二酸鈉、十四酸鈉、十六酸鈉）之水中溶解性與微胞形成行為，本研究以氯化鈉鹽析所得脂肪酸鈉樣品作為檢測對象，進行動態光散射（DLS）分析。為提升樣品分散度，檢測前先進行超音波震盪處理，再以 DLS 儀器進行測量微胞尺寸，每組樣品進行 100 次重複測試，並同步記錄肉眼觀察樣品溶解情形。

伍、研究結果

在本研究中，我們假定皂化反應後的產物全為脂肪酸鈉，以此進行產量與反應收率的探討。

一、正式實驗一：探討不同長鏈酸類與乙醇製作酯類的可行性

經過正式實驗一，我們發現可以透過酯化完畢的酯類中加入蒸餾水並攪拌的方式來使酯類中的乙醇被完全去除，以得到純淨的酯類，我們成功製作出純淨的十二酸乙酯、十四酸乙酯、十六酸乙酯，得以繼續後續皂化實驗。

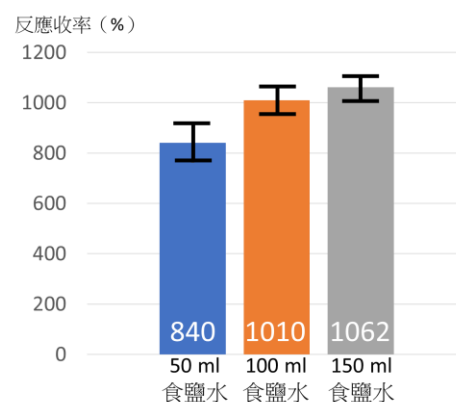
二、正式實驗二：不同食鹽水體積鹽析之十二酸鈉反應收率

十二酸乙酯進行皂化反應後加入不同量的食鹽水的結果，如下表二與圖十。

表二、不同體積食鹽水鹽析之十二酸鈉反應收率

飽和食鹽水體積 (mL)	平均反應收率 (%)
50	840 ± 76.4
100	1010 ± 53.3
150	1062 ± 45.6

我們依據上表二繪製成數據圖，如下圖十，其中各顏色代表加入不同體積的食鹽水，長度代表鹽析後的產量。



結果顯示，隨著食鹽水體積增加，反應收率上升，但增幅逐漸減少，顯示十二酸鈉可能有飽和值。同時，不確定度佔比降低，數據穩定性提高。這表明食鹽水有助於更多固體的析出並使結果更一致，但過量可能效果趨緩。

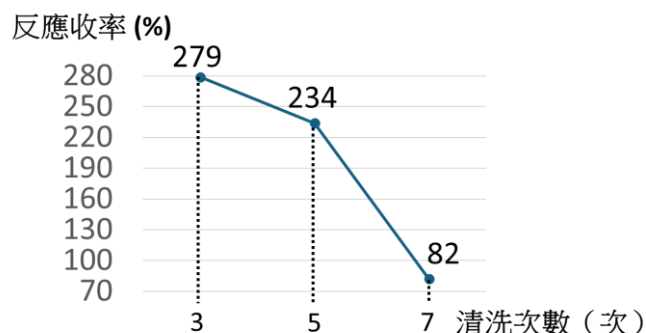
圖十、不同體積飽和食鹽水鹽析十二酸鈉反應收率比較圖（作者自繪）

三、正式實驗三-A：探討不同清洗次數對產量與反應收率

表三是使用十六酸乙酯進行皂化反應，進行不同清洗次數的結果，我們依據表三繪製成數據。

表三、不同清洗次數進行皂化反應之產量和反應收率

清洗次數	產量 (g)	理論產量 (g)	反應收率 (%)
3	6.19	2.22	279
5	5.20	2.22	234
7	1.81	2.22	82



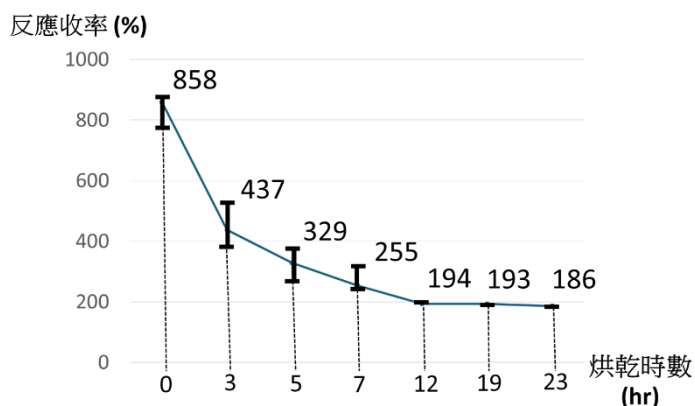
圖十一、不同清洗次數的產量（作者自繪）

四、正式實驗三-B：探討不同烘乾時數對產量與反應收率

以下是使用十六酸乙酯長鏈酯類進行皂化反應（使用 2 M 氫氧化鈉），進行不同烘乾時數的結果，如下表四及圖十二，可見 **12 小時烘乾已接近自製烘箱除濕極限**。

表四、不同烘乾時數的產量與反應收率

烘乾時數 (hr)	產量(g)	反應收率(%)
0	23.86 ± 0.07	858
3	12.16 ± 2.43	437
5	9.14 ± 1.44	329
7	7.09 ± 1.65	255
12	5.38 ± 0.25	194
19	5.36 ± 0.09	193
23	5.16 ± 0.18	186



圖十二、十六酸鈉使用不同鹽類鹽析時的反應收率（作者自繪）

五、正式實驗四：探討不同濃度氫氧化鈉進行皂化反應對產量與反應收率

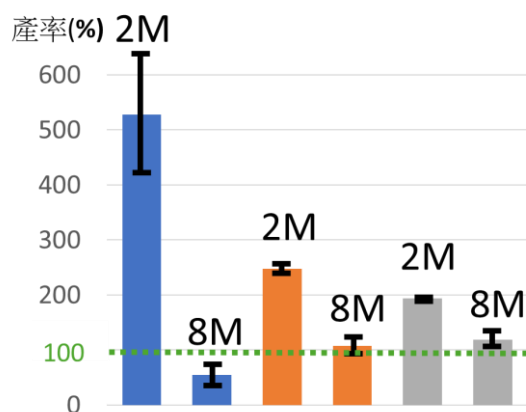
本實驗針對不同長鏈酯類進行皂化反應，探討氫氧化鈉濃度（2 M 與 8 M）對脂肪酸鈉產量與反應收率之影響，實驗結果如下表五與圖十三。

表五、以不同濃度氫氧化鈉進行皂化反應之脂肪酸鈉產量與反應收率

產物	2 M 氫氧化鈉		8 M 氫氧化鈉		理論產量 (g)
	平均產量 (g)	平均反應收率 (%)	平均產量(g)	平均反應收率(%)	
十二酸鈉	11.73 ± 2.43	528	1.22 ± 0.42	55	2.22
十四酸鈉	6.19 ± 0.53	248	2.69 ± 0.07	108	2.50
十六酸鈉	5.38 ± 0.254	194	3.30 ± 0.33	119	2.78

實驗觀察發現，使用 8 M 氫氧化鈉時，反應速度極快，燒杯內瞬間凝固，推測因反應過於劇烈，形成未完全反應的凝膠狀物，導致反應收率偏低，且無法確認反應完全性。改用 2 M 氫氧化鈉後，雖反應速度較慢，但過程均勻可控，鹽析後產量明顯提升。

推測較低濃度下，肥皂液維持液態，有利於完全反應，倒入飽和食鹽水時，液



圖十三、不同濃度氫氧化鈉皂化後不同脂肪酸鈉的反應收率（作者自繪）

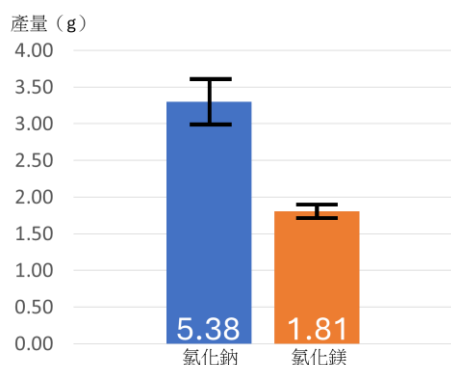
態肥皂液包覆較多水分與氯化鈉，進一步提高產量。後續需分析產品純度，確認是否有水分或雜鹽殘留。

六、正式實驗五：探討不同鹽類進行鹽析時對產量與反應收率

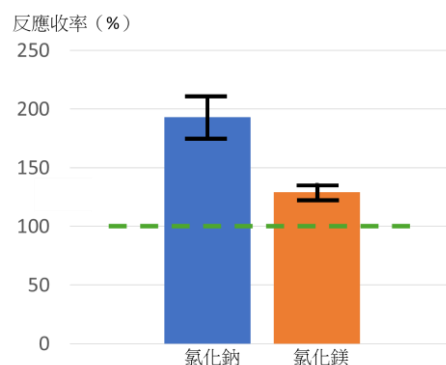
以下是使用十六酸鈉進行皂化反應，並且進行不同鹽類鹽析的產量與反應收率，如下表六與圖十四、圖十五。

表六、皂化反應後鹽析加入不同鹽類鹽析的產量

鹽析時鹽類	產量 (g)	反應收率 (%)
氯化鈉	5.38	193
氯化鎂	1.81	129



圖十四、十六酸鈉使用不同鹽類鹽析時的產量（作者自繪）



圖十五、十六酸鈉使用不同鹽類鹽析時的反應收率（作者自繪）

七、正式實驗六：探討不同鹽類進行鹽析時對產量與反應收率

（一）肉眼觀察

十二酸鈉、十四酸鈉樣品於水中可完全溶解，形成透明溶液。十六酸鈉樣品則觀察到大量懸浮顆粒，超音波處理後仍殘留不溶物，高速離心後上清液仍易吸取到顆粒。

（二）DLS 檢測結果

十二酸鈉樣品檢測到分佈訊號約為 207 nm，十四酸鈉樣品主要分佈於 350-560 nm，偶見少量大顆粒訊號，但小顆粒佔優勢，數據穩定。十六酸鈉樣品數據品質低，訊號不穩定，重複性差，多次測試無穩定微胞訊號出現，與其低溶解性表現一致。

陸、討論

一、 探討不同酸類與乙醇製作酯類與皂化的可行性

(一) 飽和食鹽水無法純化酯類的原因

本實驗初期依據文獻操作，於酯化反應後使用**飽和食鹽水**進行萃取，期望分離酯類與乙醇，結果發現三種酯類中仍有大量乙醇殘留，滴加過錳酸鉀後均產生明顯二氧化錳沉澱。

這是因為**乙醇於食鹽水中的溶解度降低**，無法被飽和食鹽水溶解，我們透過直接將乙醇加入飽和食鹽水時，便可看到明顯分層，故證明飽和食鹽水反而加重乙醇殘留，造成酯類純化失敗。

(二) 加熱揮發法無法去除乙醇的原因

針對乙醇殘留問題，我們亦嘗試以加熱揮發法處理。操作中將十二酸乙酯加熱至 90℃，持續取樣檢測，結果即使加熱 60 分鐘，仍出現二氧化錳沉澱。分析其失敗原因如下：

酯化反應為可逆反應。依據勒沙特列原理，加熱過程中乙醇雖部分揮發，但同時驅動反應逆向生成新的乙醇，導致乙醇濃度無法持續下降。因此，加熱揮發法亦無法有效去除乙醇。

(三) 教材昔用飽和食鹽水之迷思：應改用蒸餾水進行純化

若目的是純化酯類，不宜使用飽和食鹽水，因鹽析效應使乙醇殘留於酯類層，形成乙醇與酯類的混合物，影響後續反應並導致滴加過錳酸鉀時誤判未純化。教材昔用飽和食鹽水，僅為方便觀察分層，實際上無法有效純化。反之，蒸餾水萃取法利用乙醇易溶於水、不溶於酯類的特性，成功去除乙醇，經驗證為更正確且高效的純化方式（圖八）。

二、 長鏈脂肪酸與短鏈脂肪酸皂化反應收率與性質之比較與差異及原理解析

(一) 長鏈脂肪酸產量普遍較多的原因

經過實驗我們發現長鏈脂肪酸皂化後的產量普遍較短鏈脂肪酸多，短鏈脂肪酸產量則相對較少我們推測是因為在皂化反應中，脂肪酸與氫氧化鈉（NaOH）反應，生成相應的脂肪酸鈉（脂肪酸鈉）。脂肪酸鈉分子結構通常由兩部分組成：

1. 親水性極性端（-COONa）：可以與水分子形成氫鍵，使其溶解於水。
2. 疏水性非極性端（碳鏈 R）：能與油脂分子相互作用，形成去污效果。

(二) 親水端與疏水端比例對脂肪酸鈉溶解性與界面形成的影響

脂肪酸分子的親水端 ($-\text{COO}^-$) 與疏水端 (碳鏈) 的比例, 會顯著影響其在水中的溶解性及是否能形成穩定的疏水性界面。

短鏈脂肪酸 (如: 乙酸、丁酸) 的碳鏈較短, 極性部分在整個分子中佔比較大, 因此其脂肪酸鈉 (如丁酸鈉、己酸鈉) 較容易與水分子形成氫鍵, 導致水溶性較高, 不易聚集形成疏水性界面, 較難生成穩定的固體脂肪酸鈉, 通常用於液體皂製品。

長鏈脂肪酸 (如: 十四酸、十六酸) 具有較長的碳鏈, 使得整體分子偏向疏水性, 其脂肪酸鈉 (如十六酸鈉) 在水中的溶解度較低, 更容易聚集形成疏水性界面並生成穩定的固體脂肪酸鈉, 常用於固體皂的製作。

(三) 脂肪酸鈉的鏈長對溶解性與微胞形成之影響

脂肪酸鈉鏈長對其水中溶解性與微胞形成能力具顯著影響。十二酸鈉與十四酸鈉於水中具良好溶解性, 可穩定形成微胞, 且鏈長增加時微胞尺寸略增, 亦可觀察到微胞間可能形成的大尺寸聚集體。

十六酸鈉則因疏水性碳鏈比例增加, 對水的溶解度下降, 因此未形成穩定微胞, DLS 數據呈現低品質與高變異性。

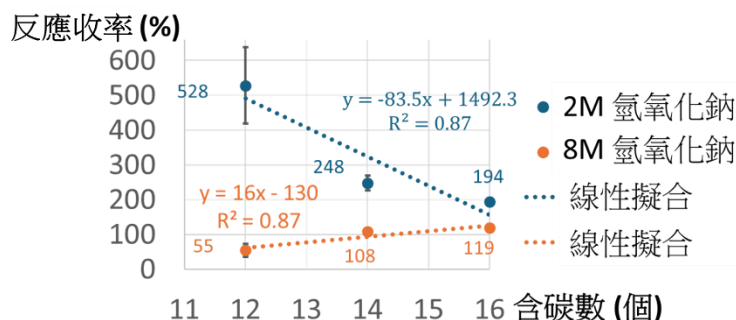
(四) 2M 與 8M 氫氧化鈉反應收率變化趨勢之影響

1、2M 氫氧化鈉的變化趨勢 (本段落數據圖皆由作者自繪)

我們可以發現當使用 2M 氫氧化鈉時, 碳鏈數自十二增加到十六 (十二酸鈉到十六酸鈉) 時, 反應收率呈線性下降關係 (圖十六), 我們推測是因為使用 2M 氫氧化鈉時反應時速率較慢, 當 2 M 氫氧化鈉倒入時, 並不會馬上產生固化, 而碳鏈越長越容易凝固, 因此當碳鏈較少的脂肪酸鈉被倒入飽和食鹽水進行鹽析時, 較多脂肪酸鈉還未凝固, 因此包住較多的水分與食鹽, 碳鏈較長的脂酸鈉反之, 因此當使用 2M 氫氧化鈉時, 便會呈現出而碳鏈越長, 反應收率越少的趨勢。

2、 8M 氫氧化鈉的變化趨勢

根據圖十六的橘點，我們可以發現當使用 8M 氫氧化鈉時，碳鏈數從十二增加到十六（十二酸鈉到十六酸鈉）時，反應收率有明顯線性遞增的趨勢，我們推測是因為當 8M 的氫氧化鈉倒入肥皂液時，肥皂也便會馬上凝固，鹽析時，當肥皂液倒入飽和時鹽水時，肥皂液大多已經凝固，不論碳鏈長度，肥皂液皆不會包太多的水分和食鹽，因此肥皂的反應收率便會依照理論產量，呈現出上升的趨勢。



圖十六、不同濃度氫氧化鈉皂化後反應收率與碳數關係（作者自繪）

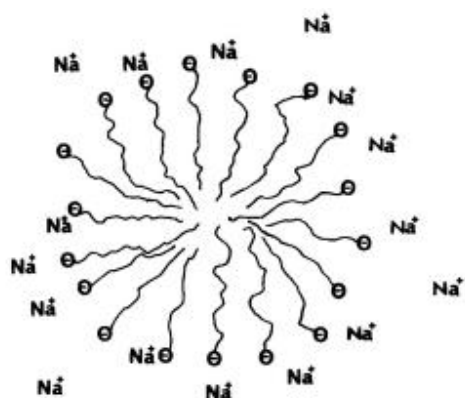
三、 加入不同體積飽和食鹽水對反應收率的影響

在探討食鹽水對反應收率的影響時，數據顯示，食鹽水量的增加能提升脂肪酸鈉產量。當食鹽水從 50 mL 增加至 100 mL 時，脂肪酸鈉反應收率顯著提升，而 150 mL 時產量略微提升，顯示食鹽水在適量範圍 (50 mL ~100 mL) 內有助於提高脂肪酸鈉析出量。這與鹽析機制吻合，因為增加食鹽濃度會降低脂肪酸鈉在水中的溶解度，使更多脂肪酸鈉析出，我們推測原因如下：

在本研究中，我們觀察到一個與傳統鹽析理解有所不同的現象：當我們在皂化反應完成後的混合液中，逐漸加入同樣濃度的飽和食鹽水時，脂肪酸鈉（即肥皂）最初會逐漸析出，但當飽和食鹽水加入達到特定體積後，析出的肥皂量不再增加，產量趨於穩定，呈現明顯的「鹽析飽和點」。

（一） 從巨觀角度解釋

當肥皂（脂肪酸鈉）溶於水中時，因其具備兩性結構（親水頭與親油尾），在溶液中會自發形成稱為微胞（micelle）的球狀聚集體，如圖十七。這些微胞以親水端朝外、親油端朝內的方式排列，進而在水相中形成穩定的膠體結構。若微胞中包覆的是空氣，即形成微小氣泡；若包覆的是甘油或其他非極性液體，則形成微小液滴。



圖十七、微胞示意圖

(圖片出處：劉廣定 永續化學與生物 衣物清潔劑 (一))

然而，當 Na^+ 離子數量太多的時候，使得中央 RCOO^- 的電荷量不敷使用，不足以吸引更多帶正電的 Na^+ 時就會停止鹽析。但 Lin 等人 (2005) 發現，隨 NaCl 濃度上升，脂肪酸鈉的溶解度下降，即出現顯著的鹽析效應。不過，該研究也指出，即使在高鹽濃度條件下，水相中仍可偵測到微量的脂肪酸鈉，顯示析出停止並非來自材料的完全耗盡，而是可能受到溶液中微觀離子環境與粒子間作用力平衡的限制。

(二) 從微觀角度解釋——從實驗觀察到鹽析飽和點：挑戰線性鹽析理論

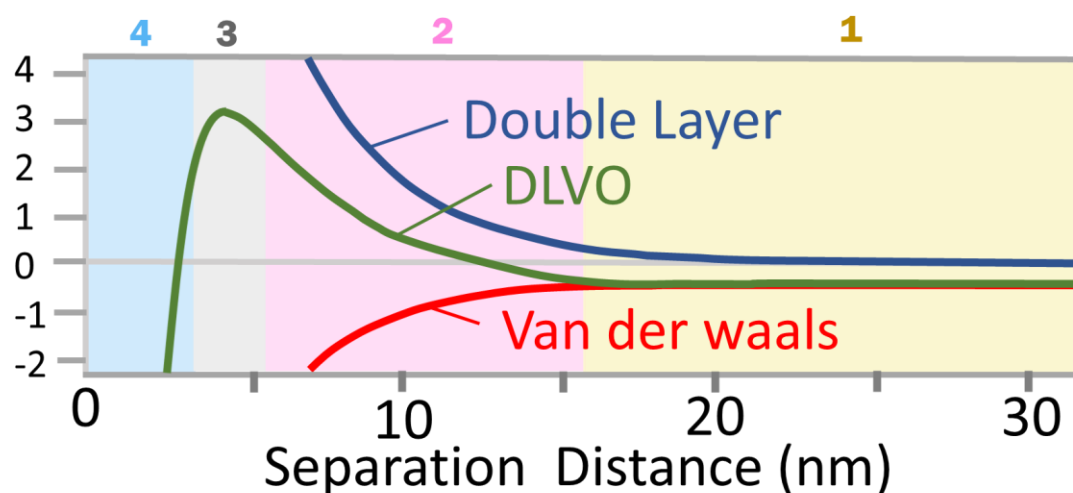
鹽析飽和點與既有文獻中「電解質濃度增加會促進鹽析」的線性推論並不相符。傳統上認為，鹽析是由於鹽中的離子 (Na^+ 、 Cl^-) 與水分子形成強水合作用，擠出原本與水分子結合的脂肪酸鈉，使其溶解度下降並析出。然而，我們的研究結果指出，當飽和食鹽水濃度不變、僅體積增加時，析出行為仍會飽和（停止析出脂肪酸鈉），顯示析出量受到其他因素限制，而不僅是離子數量或濃度。為理解此現象，我們認為可以從微觀層次的粒子間作用力切入，進一步引入凡德瓦力、離子屏蔽效應與 DLVO 理論作為解析架構。

(三) 如何以凡德瓦力與 DLVO 理論詮釋皂化反應鹽析的飽和點

Linetal.(2005)指出,即使在高鹽濃度下,脂肪酸鈉仍可能部分保留於水相,說明析出停止是由微觀粒子間的相互作用決定,而非脂肪酸鈉全數析出,故我們認為析出並非完全由鹽量或離子強度單方面推動,而受到粒子間微觀作用力與能量障礙的制約。皂化反應後脂肪酸鈉的鹽析現象,理論分析如下表七,並在後文中詳細介紹各階段現象:

表七、理論分析

各個階段	真實現象	對應理論	凡德瓦力 / 靜電排斥 比較
第一階段	初期加入些微飽和食鹽水,膠體穩定,粒子不聚集,析出	DLVO 理論中粒子間作用能接近 0,有些微凡德瓦力,膠體穩定	凡德瓦力 \approx 靜電排斥 (吸引力些微大於排斥力)
第二階段	持續加入飽和食鹽水,溶液中離子數量增加,壓縮雙電層厚度,降低能障,粒子漸漸吸引在一起	DLVO 理論中粒子間的作用能漸漸爬上能障	凡德瓦力 $<$ 靜電排斥 (排斥力勝)
第三階段	有些粒子的熱運動能量夠高,足以跨越能障,進入吸引區,粒子聚集,析出	DLVO 理論中有些粒子間的作用能跨越能障,進入能谷,粒子聚集析出	凡德瓦力 $>$ 靜電排斥 (吸引力勝)
第四階段	有些粒子沒有足夠的熱運動能量,不足以跨越能障,因此回到第一階段,持續膠體穩定,粒子不聚集,析出	DLVO 理論中粒子間作用能回到第一階段,接近 0,有些微凡德瓦力,膠體穩定	凡德瓦力 \approx 靜電排斥 (吸引力些微大於排斥力,聚集停止)



圖十八、DLVO 理論中粒子間作用能與距離的關係圖
(圖片來源：作者改繪自 Overview DLVO Theory)

第一階段：膠體穩定，粒子不聚集析出

在初期階段，當系統中僅加入少量的飽和食鹽水時，膠體系統仍維持穩定狀態。此時膠體粒子彼此間的距離尚未被顯著改變，粒子表面帶電所形成的雙電層未被有效壓縮，因此靜電排斥力依然能夠發揮作用，使粒子保持分散，不會聚集沉澱或析出。根據 DLVO 理論，此時粒子之間的總能量曲線接近於零，代表微弱的吸引力（凡德瓦力）與顯著的靜電排斥力仍可抵銷，使膠體處於穩定狀態。此階段中吸引力與排斥力勢均力敵，凡德瓦力 \approx 靜電排斥力（吸引力些微大於排斥力），但尚未足以造成粒子聚集。

第二階段：降低能障，粒子逐漸吸引聚集

隨著更多飽和食鹽水的加入，溶液中的離子濃度大幅提升，導致膠體粒子表面的雙電層逐漸被壓縮，其靜電排斥能力減弱，詳細原因在 p23 有詳細解釋，使得粒子之間的排斥力下降。這時 DLVO 理論中的作用能曲線會出現一個的「能障」（energy barrier）趨勢，意味著顆粒之間的相互作用能降低了原本阻止聚集的屏障。由於作用能降低， RCOO^-Na^+ 將開始受到凡德瓦力吸引，漸漸地向彼此靠攏、形成暫時的聚集。這個過程並非瞬間凝聚，而是呈現粒子「緩慢滑入上能障」的狀態，代表部分粒子可能暫時黏合卻尚未完全穩定沉澱。力學比較上則為「凡德瓦力 $<$ 靜電排斥力（排斥力勝）」，但排斥力已無法完全阻止吸引。

第三階段：粒子跨越能障、聚集析出

當加入的食鹽水足夠，使膠體中離子濃度高到足以顯著壓縮雙電層，此時部分粒子獲得的熱能可跨越能障，進入 DLVO 理論中所謂的「吸引能谷」區域。這表示粒子進入穩定聚集區，會被強烈的凡德瓦力吸引在一起，最終形成可觀察到的沉澱現象。這一階段代表析出正式發生，膠體系統的穩定性遭到破壞。在作用力比較方面，凡德瓦力已顯著大於靜電排斥力，「凡德瓦力 $>$ 靜電排斥力（吸引力勝）」，這是粒子聚集、析出的關鍵點。

第四階段：無法跨越能障，膠體重新穩定

系統中並非所有粒子都具備足夠的熱運動能量，能夠順利跨越能障。對於這些動能不足的粒子而言，它們無法進入吸引能谷，因此不會參與凝聚，反而仍保持分散狀態。這些粒子會回到與第一階段相似的穩定區域。從 DLVO 理論觀點來看，這些粒子間的作用能量接近 0，因此系統部分膠體仍舊穩定。力學比較為「凡德瓦力 \approx 靜電排斥力（吸引力些微大於排斥力，聚集停止）」，代表膠體部分恢復穩定，析出行為暫止。

四、 酯化反應連結皂化反應之實驗步驟改良、優化及原理解析

(一) 清洗次數增加可有效去除殘留雜質，但產量同步下降

結果顯示，隨清洗次數由 3 次增加至 7 次，產量由 6.19 g 降至 1.81 g，反應收率由 279% 降至 82%。研究發現，當清洗次數超過 5 次時，濾液中開始出現明顯白色混濁，推測為微細脂肪酸鈉顆粒隨洗液流失所致，進一步降低產量。

因此，雖然適度清洗（約 3 次）可有效去除殘留雜鹽或氫氧化鈉，但過多清洗反而會造成脂肪酸鈉損失。綜合考量純度與產量，建議清洗次數以 3 次以內為宜，即可達到去除雜質的效果，同時維持較高的脂肪酸鈉回收率。

(二) 反應產物性質之差異

在 2 M 氫氧化鈉條件下，反應結束後混合物多呈液態，鹽析過程中液態肥皂易吸收大量飽和食鹽水，最終所得肥皂質地柔軟，且含有較多雜質（如氯化鈉及殘留酒精）。使用 8 M 氫氧化鈉時，反應初期即形成固態脂肪酸鈉，鹽析過程中不易吸收水分，所得肥皂純度較高，質地堅硬，但較難以塑造特定形狀。

(三) 肥皂產量與純度分析

低濃度 (2 M) 氫氧化鈉所得肥皂雖產量較高，但實際上包含較多水分與雜質，與理論產量有偏差；高濃度 (8 M) 氫氧化鈉雖產量略低，但純度更高，成品重量更接近理論值。兩者在肥皂純度與實用性上各有優缺點。

(四) 高濃度氫氧化鈉 (8 M) 使局部提早固化，降低反應效率

使用 8 M 氫氧化鈉時，皂化反應速度明顯提升，燒杯內迅速形成固態脂肪酸鈉，推測因反應過快，初期生成的脂肪酸鈉在尚未完全轉化時即形成固態，包覆未反應的酯類，阻礙其與氫氧化鈉的進一步接觸與反應，造成反應不完全。此效應亦反映於實驗數據，8 M 條件下脂肪酸鈉反應收率皆低於 2 M，且部分如十二酸鈉僅 55%，甚至低於 100%，顯示高濃度氫氧化鈉雖可加速反應，但反應速率過快反而降低最終反應收率。

(五) 低濃度氫氧化鈉 (2 M) 反應更均勻，反應收率提升但水分殘留較高

相較之下，使用 2 M 氫氧化鈉時，反應速率和緩，有利於酯類與氫氧化鈉充分接觸與轉化，整體反應更均勻完整。不過，因反應較溫和，產生的脂肪酸鈉保持液態狀態，於鹽析過程中容易包覆較多水分，且受限於本研究自製烘箱的乾燥能力，部分水分難以完全去除，造成反應收率明顯高於理論值。

（六） 製程選擇與應用建議

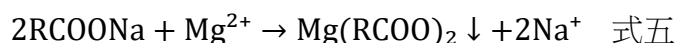
根據不同濃度特性，若追求高純度「硬質肥皂」，宜選用高濃度氫氧化鈉（如 8 M）；若需易塑型或特殊質感肥皂，則可選用低濃度氫氧化鈉（如 2 M）。因此，氫氧化鈉濃度應依據產品需求靈活調整，以達最佳製程效果。

五、 不同鹽類進行鹽析時對產量與反應收率之差異分析

（一） 產物觀察與脂肪酸鎂生成推測

本實驗雖以皂化法製備脂肪酸鈉，但當改以氯化鎂水溶液進行鹽析時，最終所得產物並非脂肪酸鈉常見之凝膠或塊狀形態，而是呈現細緻粉末狀，具酥性與潤滑感，且不易溶於水。此特性與文獻中脂肪酸鎂之描述相符，推測在鹽析過程中，發生了由脂肪酸鈉轉變為脂肪酸鎂的離子置換反應。

在脂肪酸鈉與氯化鎂混合時，二者離子存在於水中，鈉離子與鎂離子會共同競爭水分子形成水合離子。由於 Na^+ 的更易與水分子形成穩定水合離子，故 Mg^{2+} 較難維持穩定水合狀態，進而更傾向與 RCOO^- 結合，形成脂肪酸鎂 $\text{Mg}(\text{RCOO})_2$ ，並析出為不溶於水的固體粉末，如下式五。



實驗數據顯示，氯化鎂鹽析反應收率降至 129%，顯著低於氯化鈉鹽析之 193%。若發生脂肪酸鎂生成，因其形成需兩個脂肪酸陰離子 RCOO^- 與一個 Mg^{2+} 結合，理論上生成單位質量產物所需脂肪酸鈉數量增加，總質量回收率應下降，此次反應收率降低現象與該反應計量關係吻合，進一步支持產物為脂肪酸鎂之推論。

另外我們若是用脂肪酸鎂來計算使用氯化鎂鹽析之反應收率，算得反應收率約為 129%，我們推測因為脂肪酸鎂中的一個鎂離子必須接著兩個具備疏水性的 RCOO^- ，因此脂肪酸鎂較脂肪酸鈉更不容易溶於水中，因此鹽析時所包的水分和食鹽量皆較少，反應收率便較脂肪酸鎂還要來的低。

六、 綜合分析與未來方向

本研究發現不同碳數脂肪酸鈉的溶解性差異明顯。十六酸鈉因碳鏈較長、疏水性強，溶解度低於十二酸鈉和十四酸鈉，且不易形成穩定微胞。我們聯想到市售界面活性劑普遍採用十二碳長鏈，可能與清潔效果相關。未來希望進一步探討不同碳數脂肪酸鈉（C10~C18）的清能力，透過界面張力、去汙效果及泡沫穩定性測試，了解碳鏈長度對性能的影響。同時，也能讓酯化—皂化反應的教學更貼近生活應用，幫助學生建立化學與日常用品間的連結，提升學習興趣。

柒、結論

本研究創新之處在於透過文獻探討，**針對研究空白提出：以酯化反應所產生的長鏈脂肪酸酯導入皂化反應流程**，探討不同脂肪酸酯類在皂化反應中的反應收率及其影響因素，可考慮用長碳鏈的純有機酸進行酯化反應，並透過巨觀實驗與微觀理論分析鹽析過程中的飽和現象。

一、 探討不同酸類與乙醇製作酯類的可行性

本研究成功以十二酸、十四酸與十六酸與乙醇進行酯化反應，製備出相應酯類。然而初期採用飽和食鹽水萃取法無法有效去除乙醇，反而因鹽析效應導致乙醇殘留，進而影響後續皂化準確性。後續改採蒸餾水萃取法，利用乙醇易溶於水的特性，能有效去除乙醇，驗證蒸餾水為更正確且高效之酯類純化方式，亦修正了教材中常用飽和食鹽水純化的迷思。

二、 探討皂化反應後加入不同體積飽和食鹽水對產量與反應收率之影響

實驗結果顯示，適量增加飽和食鹽水體積可有效提升脂肪酸鈉析出量，50 mL 至 100 mL 範圍內產量顯著提升，150 mL 則趨於飽和，驗證鹽析存在「飽和點」，並非線性提升。該現象可透過 DLVO 理論解釋，析出停止乃因粒子間作用力達平衡所致，並非原料耗盡，提供對皂化鹽析過程更細緻的理解。

三、 探討不同清洗次數對皂化反應產量與反應收率之影響

清洗次數增加雖可有效去除殘留雜質，惟超過五次後濾液出現白色混濁，推測脂肪酸鈉細粒流失導致產量下降。綜合考量純度與回收率，建議清洗次數以三次為宜，兼顧雜質去除與脂肪酸鈉回收效果。

四、 探討以不同濃度氫氧化鈉進行不同長鏈酯類皂化反應對反應收率的影響

使用 8 M 氫氧化鈉時反應速度過快，導致初期脂肪酸鈉局部固化包覆未反應酯類，影響反應完全度，反應收率偏低；而 2 M 氫氧化鈉反應較為溫和均勻，能有效提升反應完全度，但所得脂肪酸鈉液態較易包覆水分，反應收率高於理論值。氫氧化鈉濃度應依產品需求調整，2 M 適合製備易塑型肥皂，8 M 適合製備高純度硬質肥皂。

五、 探討不同鹽類進行鹽析時對皂化反應產量與反應收率之影響

以氯化鎂鹽析十六酸鈉時，產物呈現粉末狀，具酥性與潤滑感，且不易溶於水，符合脂肪酸鎂之特性。推測鹽析過程中發生離子置換反應，鈉離子與鎂離子競爭水合作用時，鎂更易與脂肪酸陰離子結合生成脂肪酸鎂，反應收率亦因反應計量改變而下降。此結果顯示選擇不同鹽類可進一步控制產品型態與性質，具潛在應用價值。

六、 提出酯化反應連結皂化反應之實驗步驟改良及原理解析

本研究整合實驗結果，優化出穩定且高效率的「酯化—純化—皂化」流程，包括改採蒸餾水純化酯類、適量鹽析體積、建議清洗次數與氫氧化鈉濃度選擇原則，並透過 DLVO 理論解析鹽析飽和點現象，提供具理論支撐的製程優化方案，未來可作為相關實驗設計與教材應用之參考。

七、 未來展望

在這次研究中，除了建立酯化反應連結皂化反應的流程之外，我們也發現了許多課本上沒有提到的有趣現象。像是不同碳數的脂肪酸鈉在水中的溶解性差異很大。十六酸鈉因為碳鏈較長、疏水性強，不容易溶解，也難以穩定形成微胞。這讓我們聯想到，為什麼市售的界面活性劑（例如十二烷基硫酸鈉 SDS、十二烷基聚氧乙醚硫酸鈉 AES）大多選用十二碳長鏈，應該和清潔效果有很大的關係。

這樣的發現讓我們對於不同碳數脂肪酸鈉 (C10~C18) 的清潔能力產生了更大的興趣。未來希望能進一步進行界面張力測試、去汙效果評估、泡沫形成與穩定性分析，了解碳鏈長度對清潔性能的影響。此外，我們也想研究脂肪酸的飽和與不飽和程度，是否會影響皂化反應收率或肥皂的性質，進一步優化整個酯化與皂化流程。

我們覺得，這樣的延伸研究不但能讓「酯化連結皂化」學習變得更貼近生活，也能幫助未來國中教材設計出更整合、有應用價值的實驗活動。讓我們能從化學反應學習到生活中清潔用品的科學原理，提升學習興趣和動機，對化學產生更多的好奇心。

捌、參考文獻資料

1. 翰林出版事業股份有限公司。國民中學自然科學 2 上（再版二刷）
2. 賴慧娟、王瓊誼、許倍瑄、張詩苑（2006）。酯酯香醇--酯化反應之最佳化探討。全國第 46 屆中小學科展。
3. 吳誌偉、吳俞霖（2005）。油脂皂化反應的實驗設計與探討。台灣 2005 年國際科學展覽會。
4. 李佳龍、李君薇（2002）。清潔溜溜—理化課本（二）脂肪酸鈉實驗的探討與改進。全國第 42 屆中小學科展。
5. 楊捷儒、李佳玲、林穎真、謝孟儒（2006）。豬油大變身--脂肪酸鈉 DIY。全國第 46 屆中小學科展。
6. 楊沅蓁、黃歆芸、周筠芯（2016）。乾坤再造~不一樣的皂化。全國第 58 屆中小學科展。
7. 程楷媿、李維旎、吳奕萱、陳妍菲、蔡慕箴、林佑璋（2018）。打「皂」健康人生~自製防疫抗菌手工皂。全國第 60 屆中小學科展。
8. 佚名(2021)。會叫的孵皂箱~手工皂熟成之探究。新竹市第三十九屆中小學科展。
9. 林鈺霽、吳清鈺、陳韋如、江東隆、姚昌辰（2004）。回收油肥皂。全國第 46 屆中小學科展。
10. 陳旻琦、吳承諭、陳怡萱、楊子宜、孔妤瑄、陳立揚（2010）。肥皂熟了，水知道。全國第 50 屆中小學科展。
11. 翰林出版事業股份有限公司。高中化學 3 年級。
12. 林秀豪、鄭呈因、張銘傑、徐國誠、張智詠（2020）。普通型高級中學選修物理。龍騰文化事業股份有限公司。
13. 國立臺灣師範大學普通物理實驗講義編輯群（2020）。實驗數據的處理——不確定度簡介。國立臺灣師範大學物理學系。
14. 吳仁凱（2022）。0923_探究作圖練習_不確定度_Google 試算表。Youtube。（線上影片資源，<https://youtu.be/VwXPwpujaMw?si=qBdjSpu0ntd04-LZ>）
15. Lin, J.-J., Hsu, M.-F., Huang, C.-J., & Lin, S.-Y. (2005). Solubility of sodium soaps in aqueous salt solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 287(2), 450–456.
16. Gregor Trefalt and Michal Borkovec（2014）。Overview of DLVO Theory。

【評語】 030206

本研究針對國中教材中酯化與皂化反應缺乏連結問題，設計整合性實驗流程並進行優化。發現皂化鹽析存在「飽和點」，十六酸鈉因溶解度低，微胞形成不佳，影響產率。不同氫氧化鈉濃度與鹽類選擇亦影響純度與收率。研究結果補充教材理論，提升教學應用性。

皂化實驗雖然是一個已經被很多人做過的主題，但是本研究有非常清楚的將過去的科展作品做系統化的整理，並且提出本次工作與之前的差異性，值得嘉許，報告中有整理出許多專有名詞的定義，以及對其化學原理的了解，顯見在本次科展過程中學生得到了非常紮實的科學訓練，自行設計的烘乾裝置非常有趣，根據自身所做出的研究結果對教材的內容提出建議這一點也非常值得鼓勵，對於鹽析極限的討論以及最後膠體與作用力之間的反思鮮少見於其他的科展，皂化雖然是一個相對成熟的題目，但是本次的作品做出了不一樣的觀點，值得肯定。

作品海報

探討國中教材之

酯化反應連結皂化反應的可行性與原理解析

研究動機

酯化反應與皂化反應為國中有機化學的重要課程，為減少酯化廢棄物，我們直接皂化酯化產物，探討其步驟原理，改良製程，提出國中酯化連結皂化反應的可行方案，提升環保效益以符合綠色化學理念。

文獻回顧

尚未見有研究將國中自然科教材中的「酯化反應」與「皂化反應」進行實際整合與實驗設計

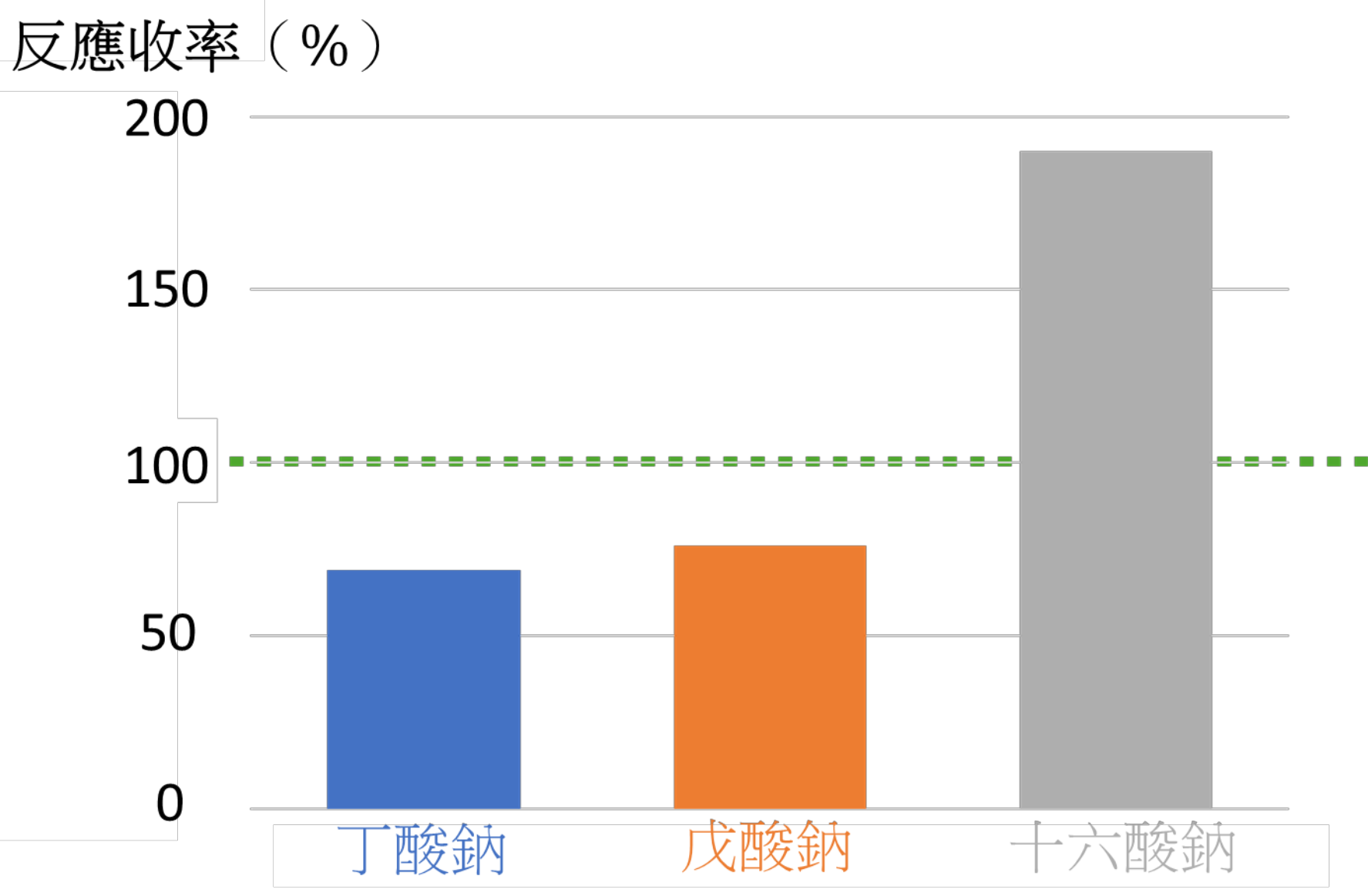
前導實驗結果

以酯化反應所產生的長鏈脂肪酸酯導入皂化反應流程

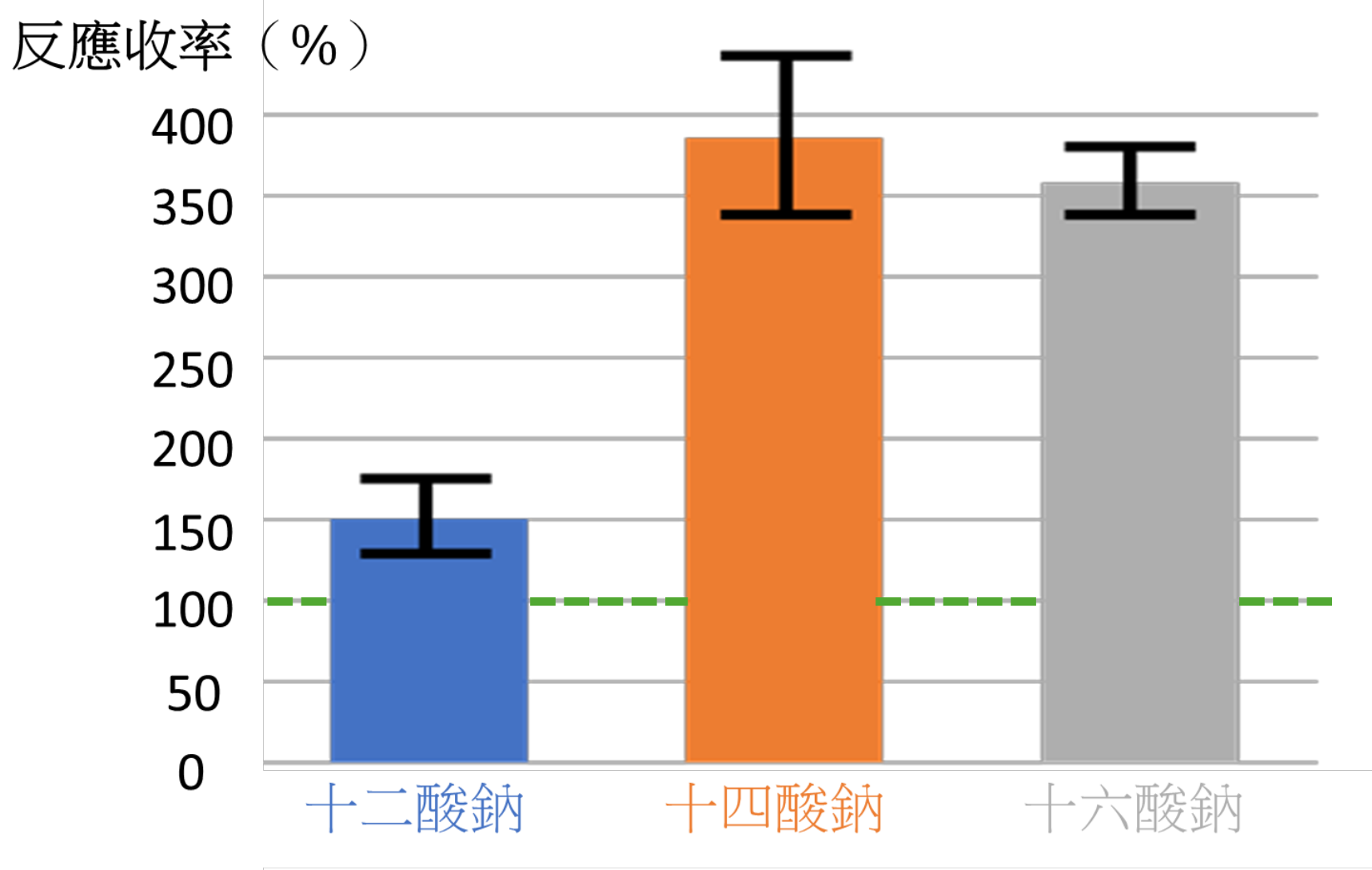
研究聚焦於長鏈酯類進行皂化反應

食鹽水體積是肥皂鹽析重要因素

前導實驗



長短鏈酯類皂化後反應收率



未固定鹽析食鹽水體積
各酯類皂化反應收率

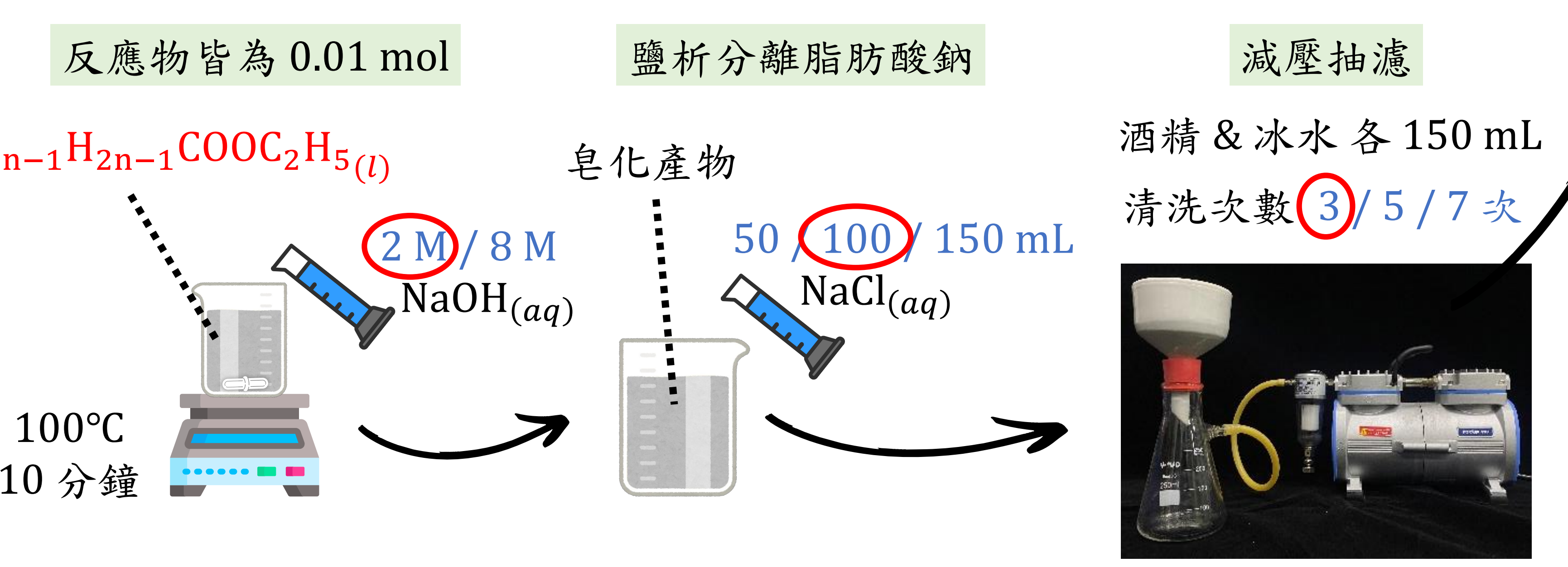
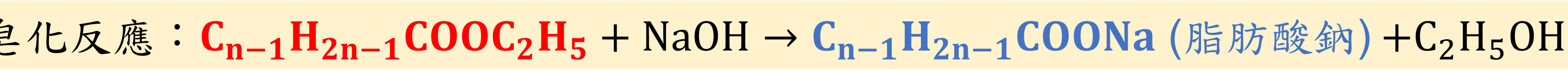
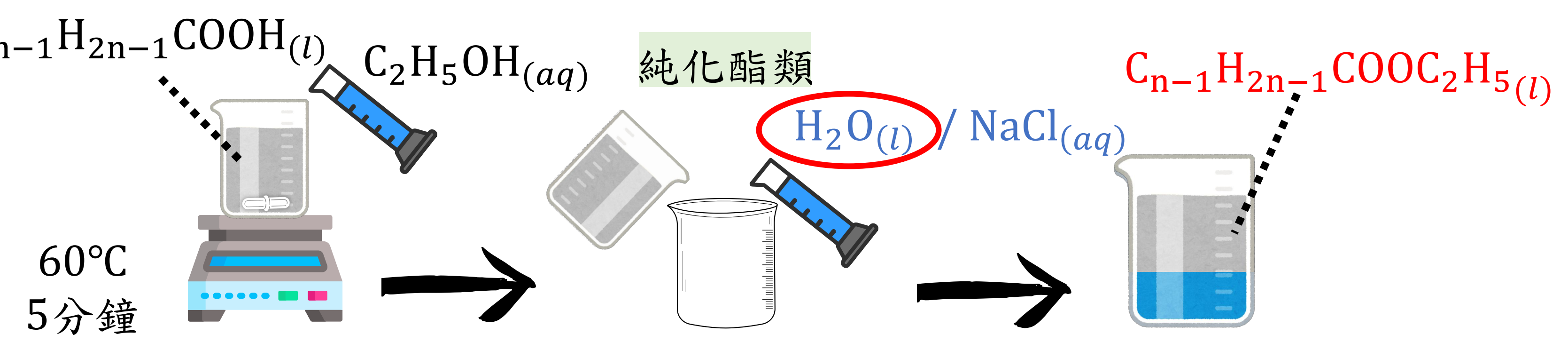
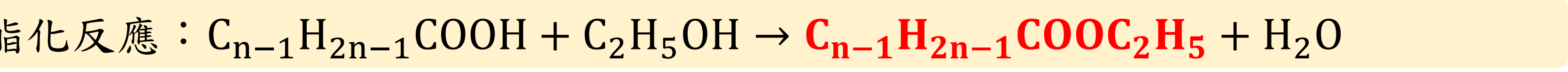
名詞解釋與定義

- 1.凡德瓦力與 DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek theory) 理論
凡德瓦力是一種普遍存在於所有粒子之間的弱吸引力，包括取向力、誘導力與倫敦分散力。DLVO 理論說明粒子間作用能與距離的關係。
- 2.固體產物總質量（產量）與反應收率定義
將固體產物總質量（後稱產量）視為脂肪酸鈉。
反應收率計算方式為：固體產物總質量 ÷ 脂肪酸鈉理想產量 × 100%

研究目的

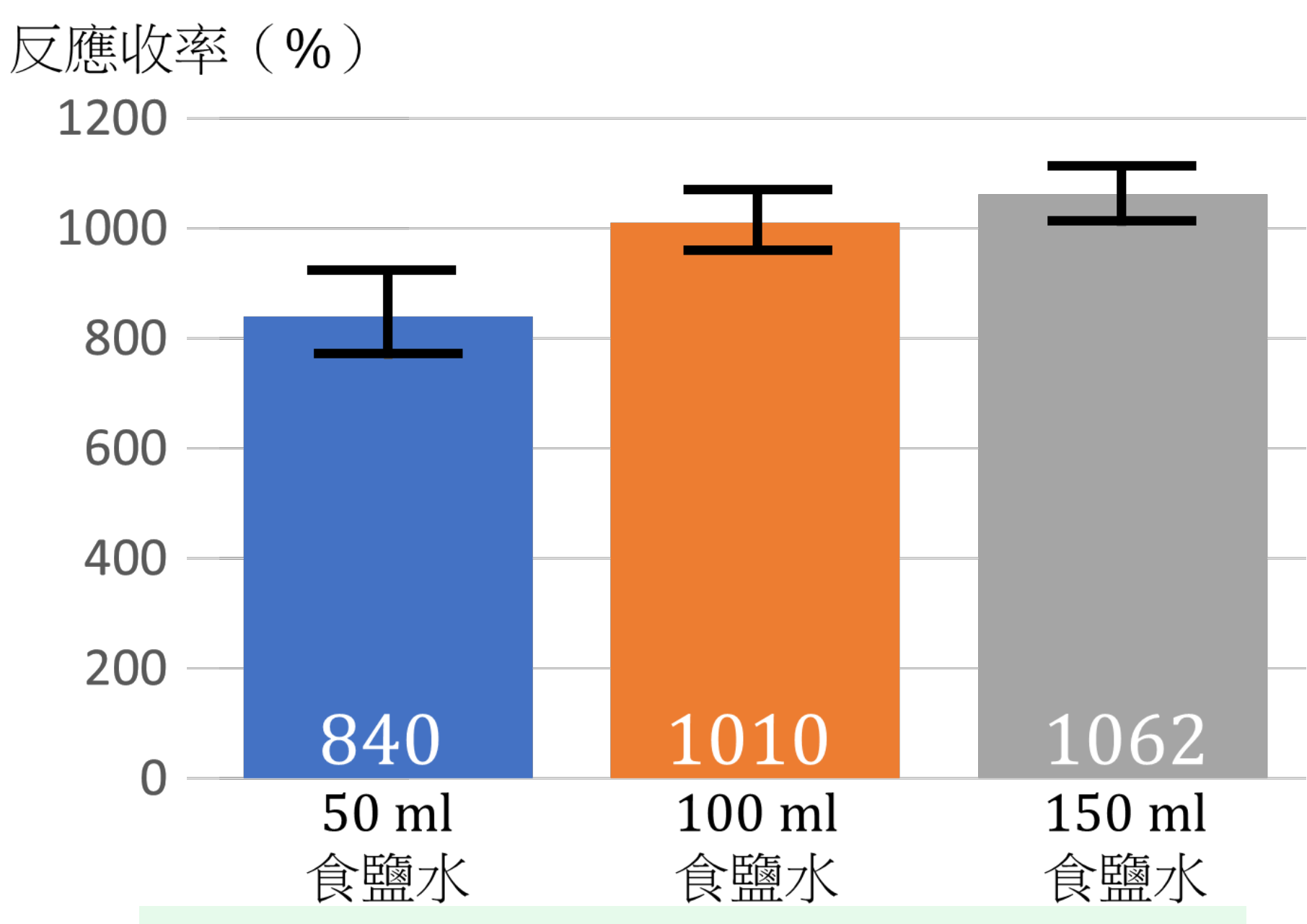
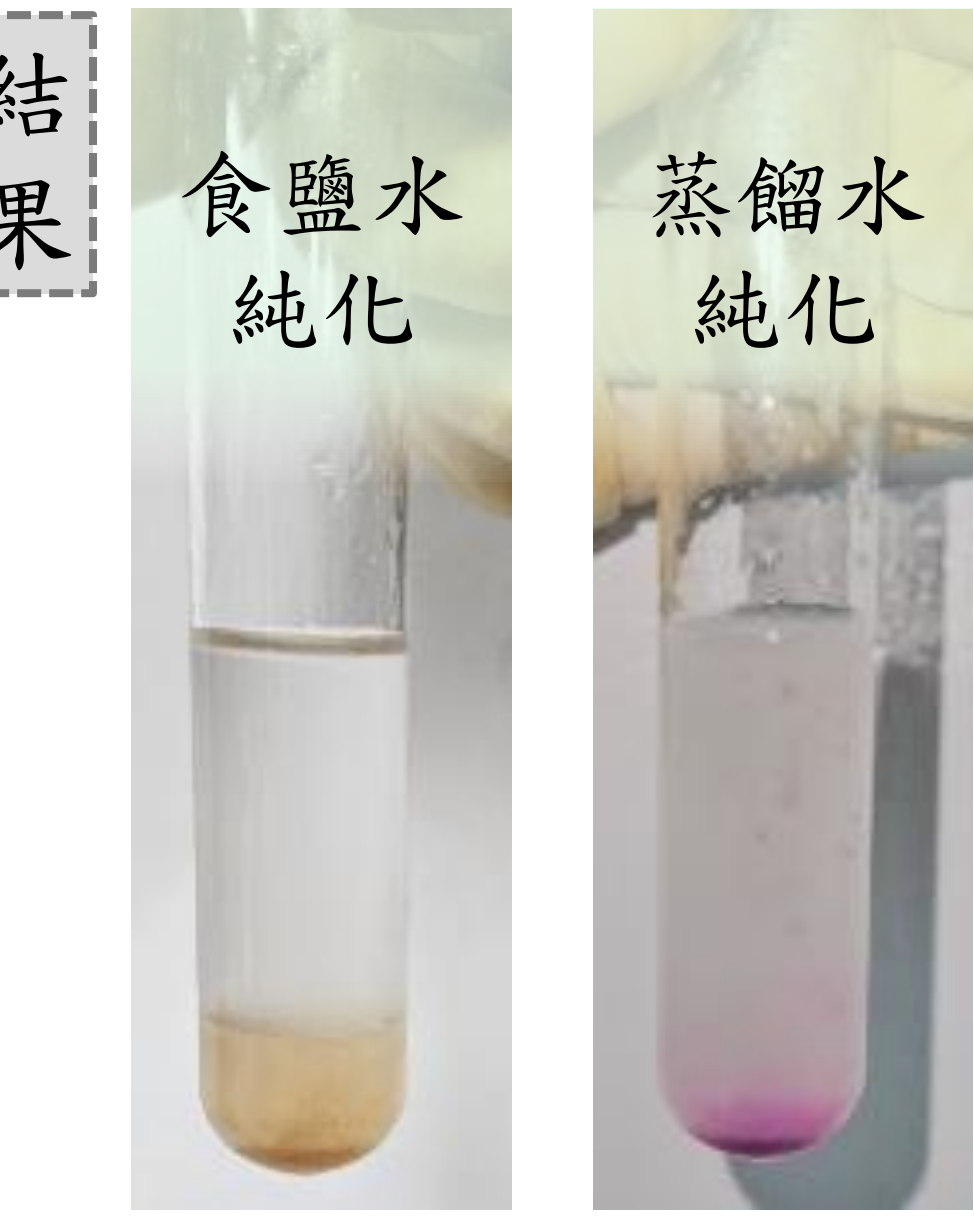
- 1. 探討不同酸類與乙醇製作酯類接著進行皂化的可行性
- 2. 探討不同清洗次數與烘乾時數對皂化反應對產量與反應收率之影響
- 3. 探討以不同濃度氫氧化鈉進行不同長鏈酯類皂化反應對反應收率影響
- 4. 探討不同鹽類進行鹽析時對皂化反應對產量與反應收率之影響
- 5. 探討皂化反應後加入不同體積飽和食鹽水對產量與反應收率之影響
- 6. 提出酯化反應連結皂化反應之實驗步驟改良及原理解析

研究過程及設計



研究結果及討論

一、探討不同酸類與乙醇製作酯類進行皂化的可行性



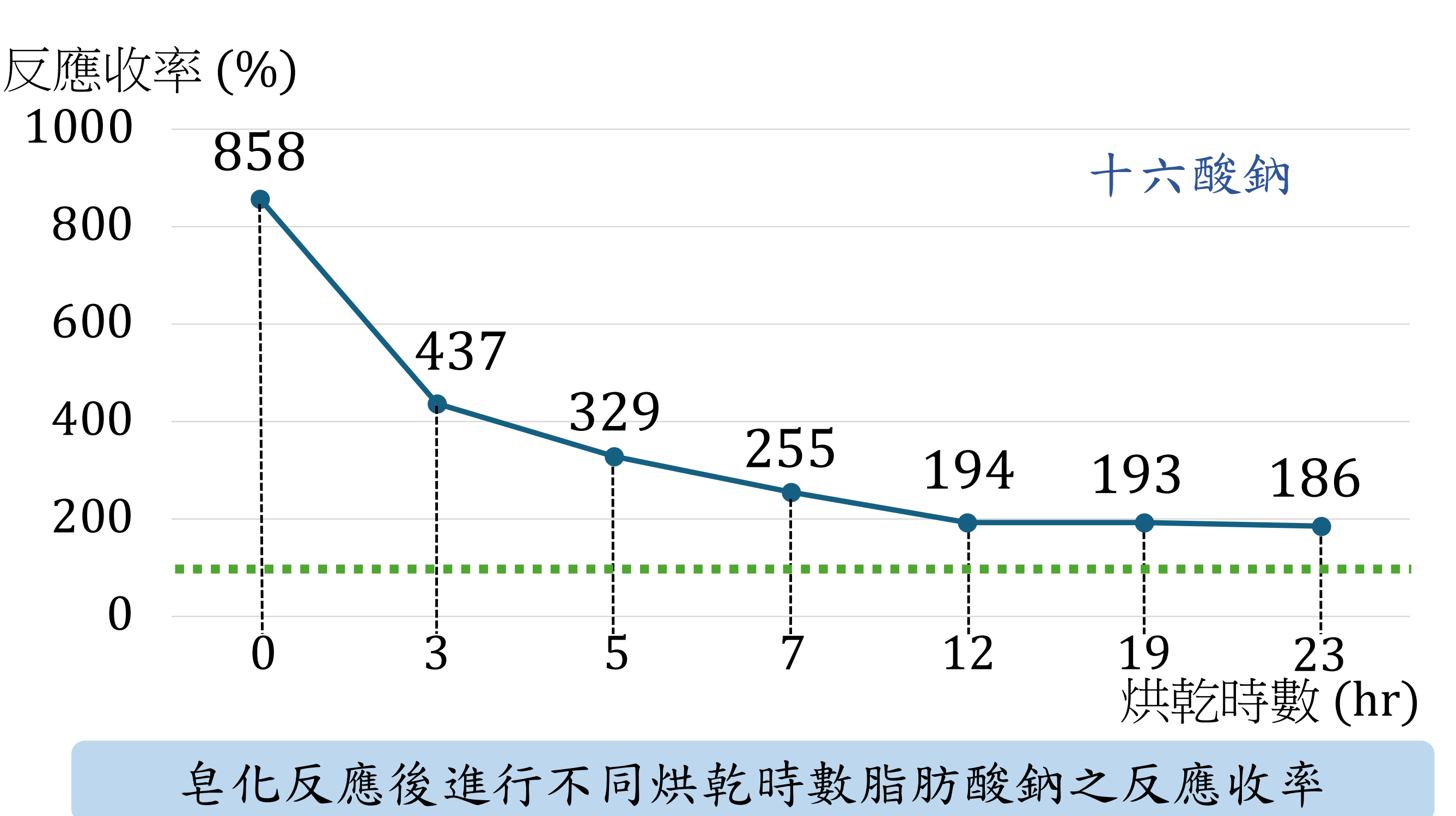
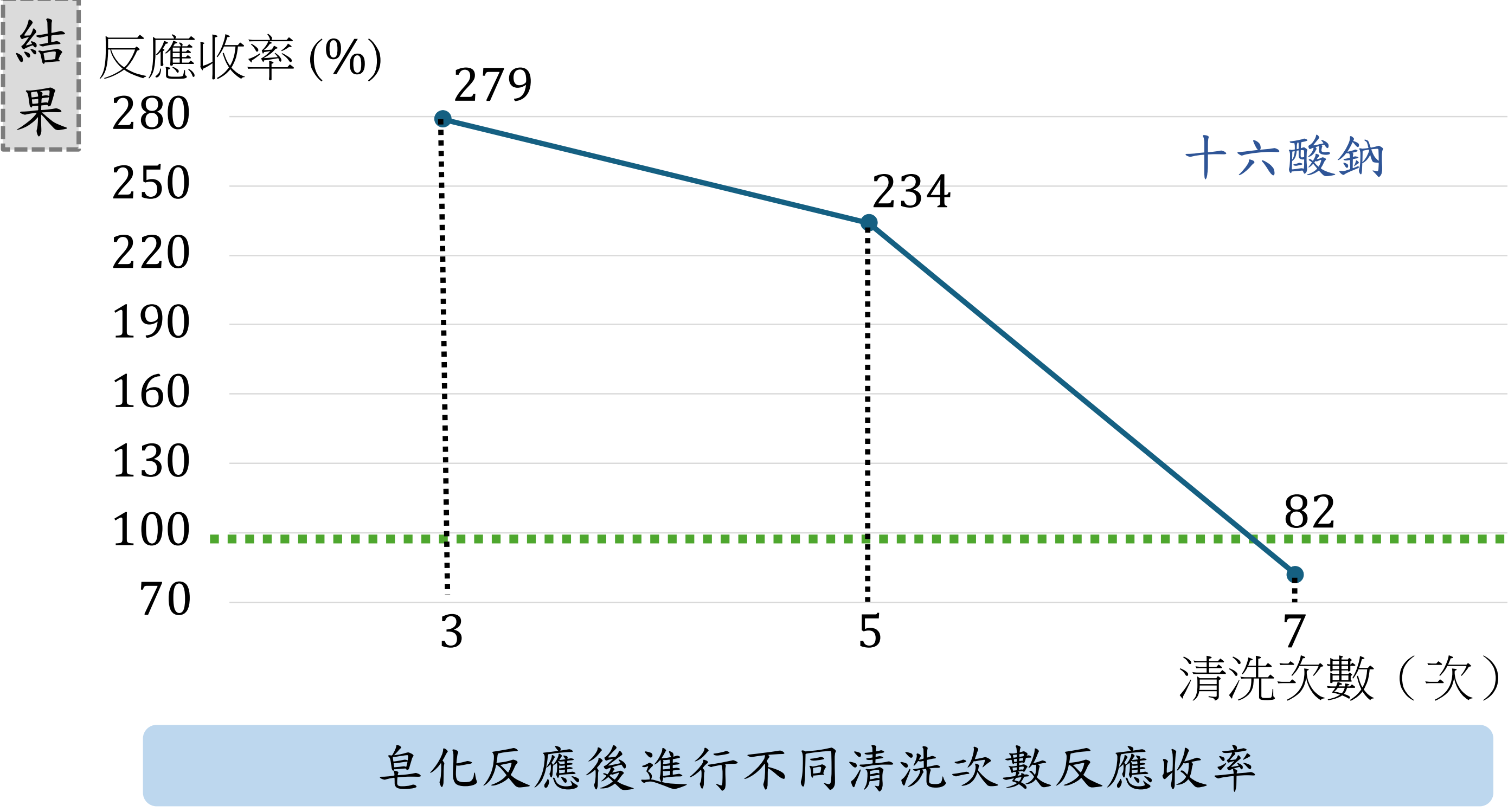
十二酸乙酯皂化時鹽析步驟
加入飽和食鹽水不同體積反應收率

- 討論

 - 1. 長鏈脂肪酸乙酯收率高，易形成穩定固體。
 - 2. 短鏈水溶性高，產物不易凝固。
 - 3. 飽和食鹽水無法完全純化酯類，也無法加熱去除乙醇。
 - 4. 蒸餾水可完全去除乙醇。
 - 5. 增加食鹽水體積，固態產物增多，推估含水量上升。
- 結論

 - 1. 以長碳鏈酸酯化製得酯類，並成功皂化出固態產物（肥皂）。
 - 2. 應以純水純化酯類，飽和食鹽水不適合，易殘留乙醇。
 - 3. 鹽析食鹽水體積增加會因含水使固態產物增多，需針對乾燥條件研究。

二、酯化反應連結皂化反應後，不同清洗次數與烘乾時數對反應收率的影響



- 討論
1. 過多清洗會導致產量明顯下降，建議清洗次數以 3 次以內。
 2. 烘乾達 12 小時反應收率便沒有明顯下降。

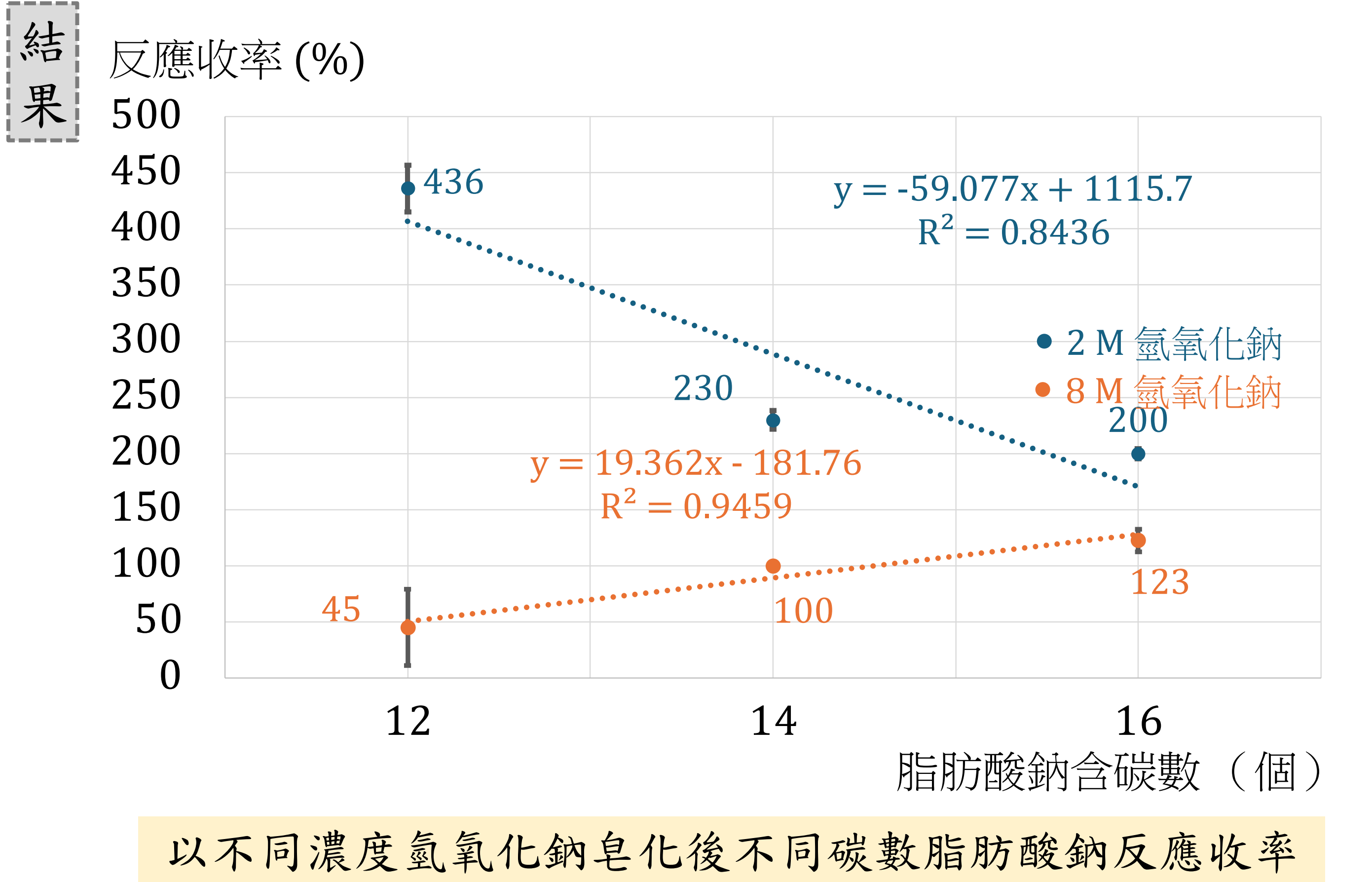
結論

後續實驗設計

烘乾 12 小時

清洗 3 次

三、探討氫氧化鈉以不同濃度進行不同長鏈酯類皂化反應對反應收率的影響



- 討論
1. 2 M 氫氧化鈉反應較均勻，產量高但含水分與雜質較多。
 2. 8 M 氫氧化鈉反應迅速，產物純度高且堅硬，但反應過快易導致反應收率降低

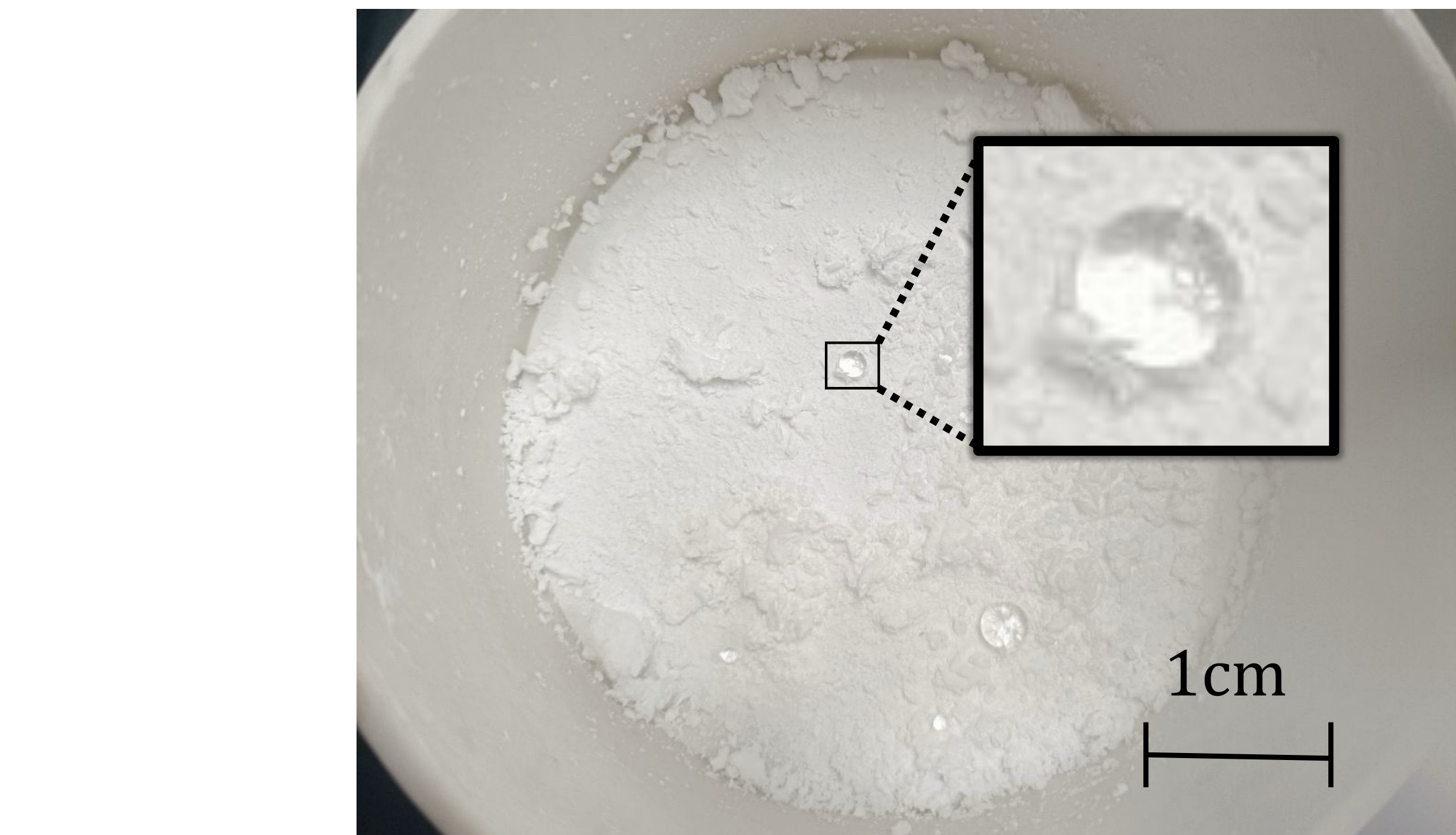
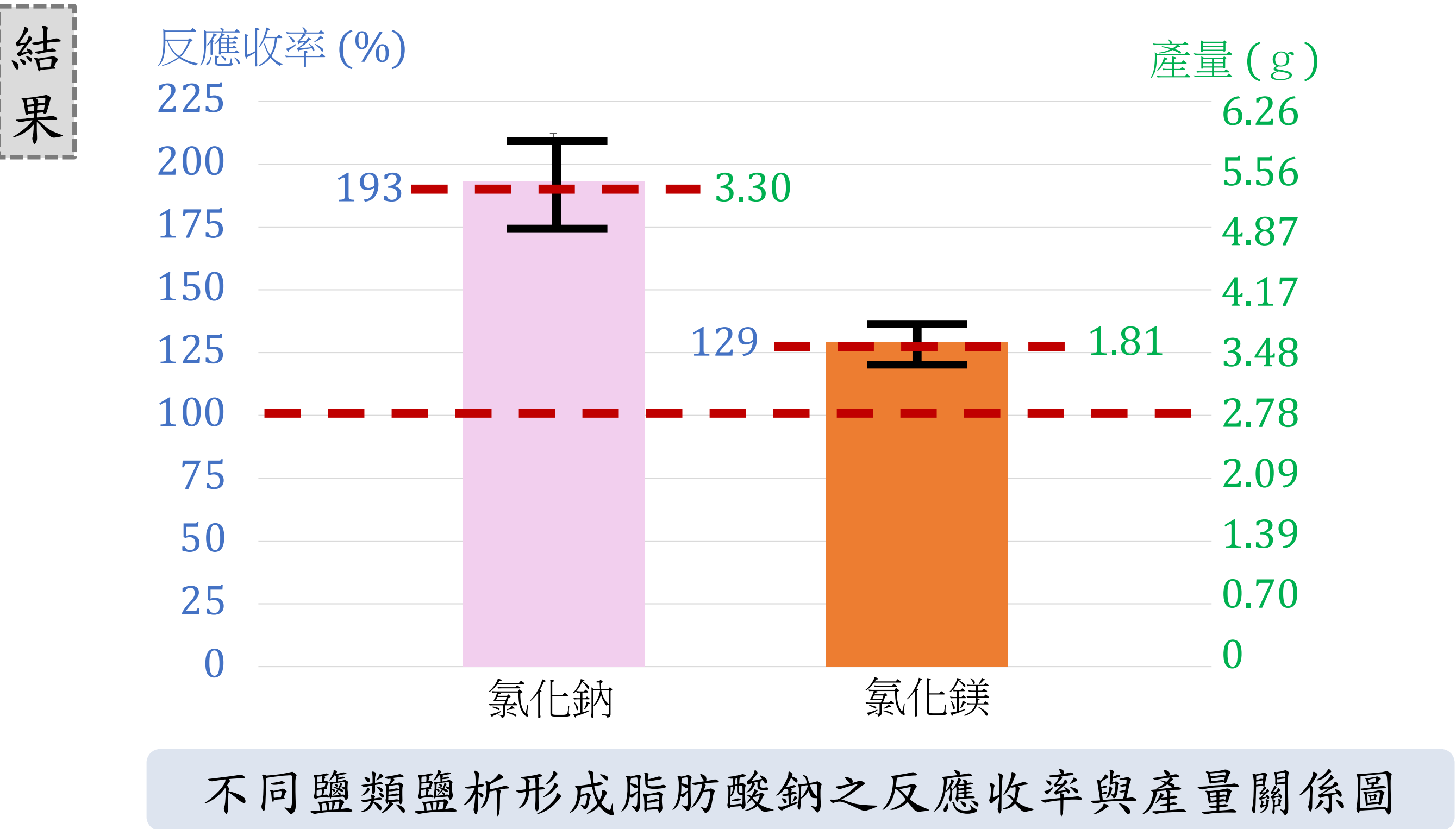
結論

依產品需求，選擇合適氫氧化鈉濃度

8 M 氫氧化鈉
反應快速
包覆未反應酯類
反應收率偏低
成品：硬質肥皂

2 M 氫氧化鈉
反應溫和均勻
完全度高
脂肪酸鈉易含水
成品：可塑型肥皂

四、以不同種鹽類鹽析對反應收率與固態產物性質之影響



氯化鎂鹽析後固態產物實際圖

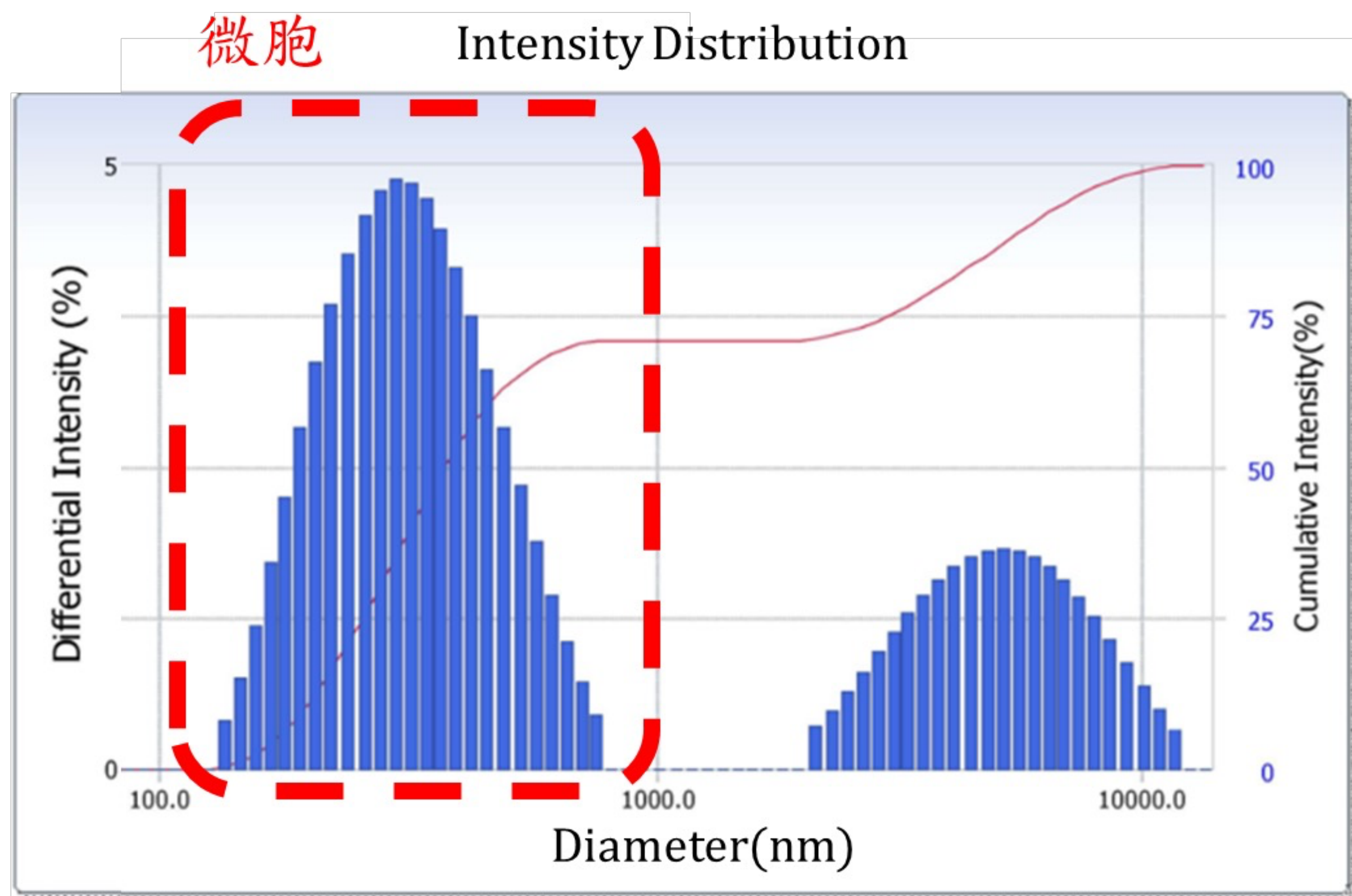
- 討論
- 以氯化鎂鹽析時，脂肪酸鈉與 Mg^{2+} 發生離子置換，生成不溶於水的脂肪酸鎂。
- $$2\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{Na} + \text{Mg}^{2+} \rightarrow (\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CO}_2)_2\text{Mg} + 2\text{Na}^+$$

結論

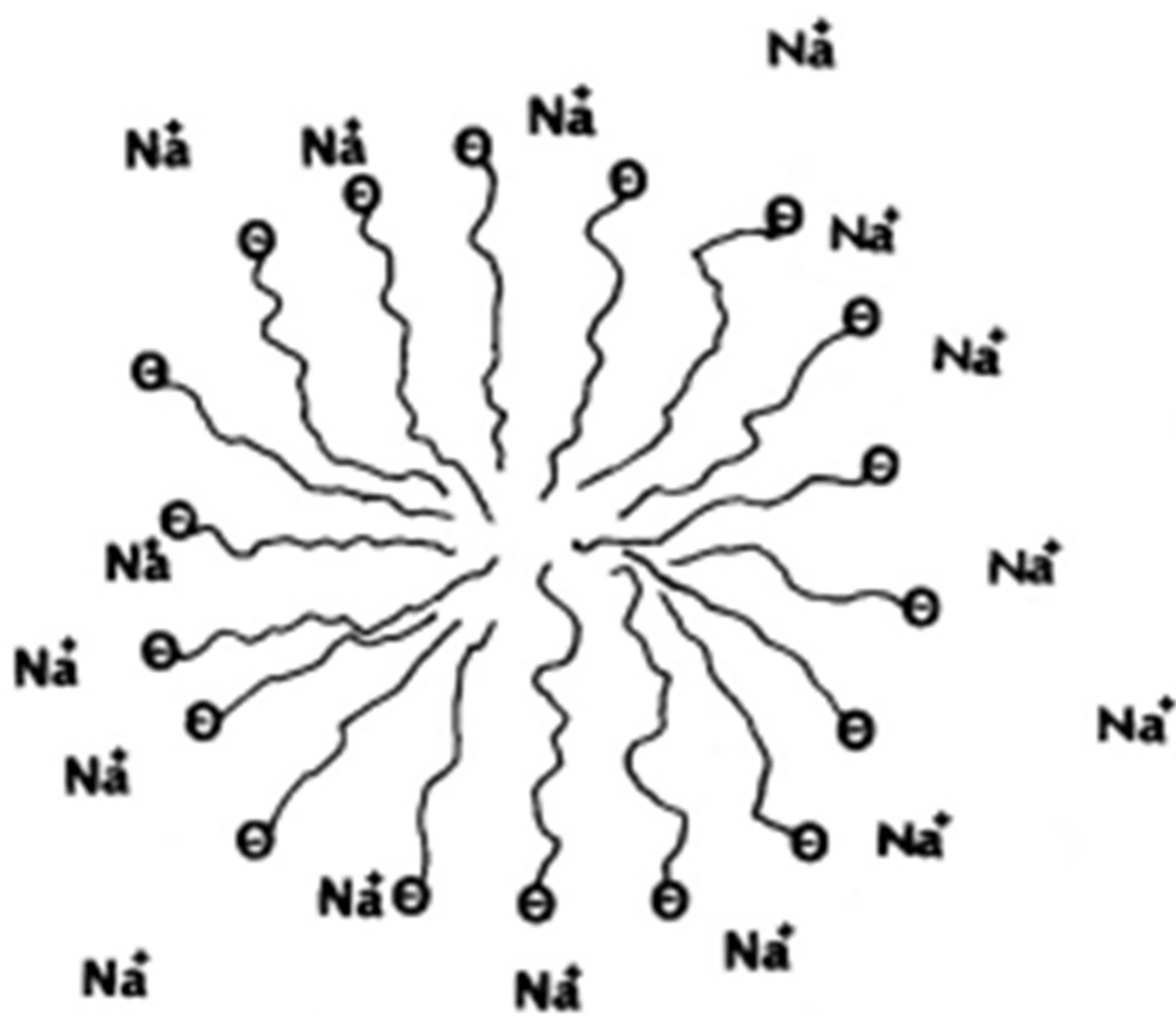
不同鹽類鹽析可調控產物型態與性質，具應用潛力。

五、動態光散射 (DLS) 分析驗證脂肪酸鈉微胞的形成

六、鹽析的巨觀機制



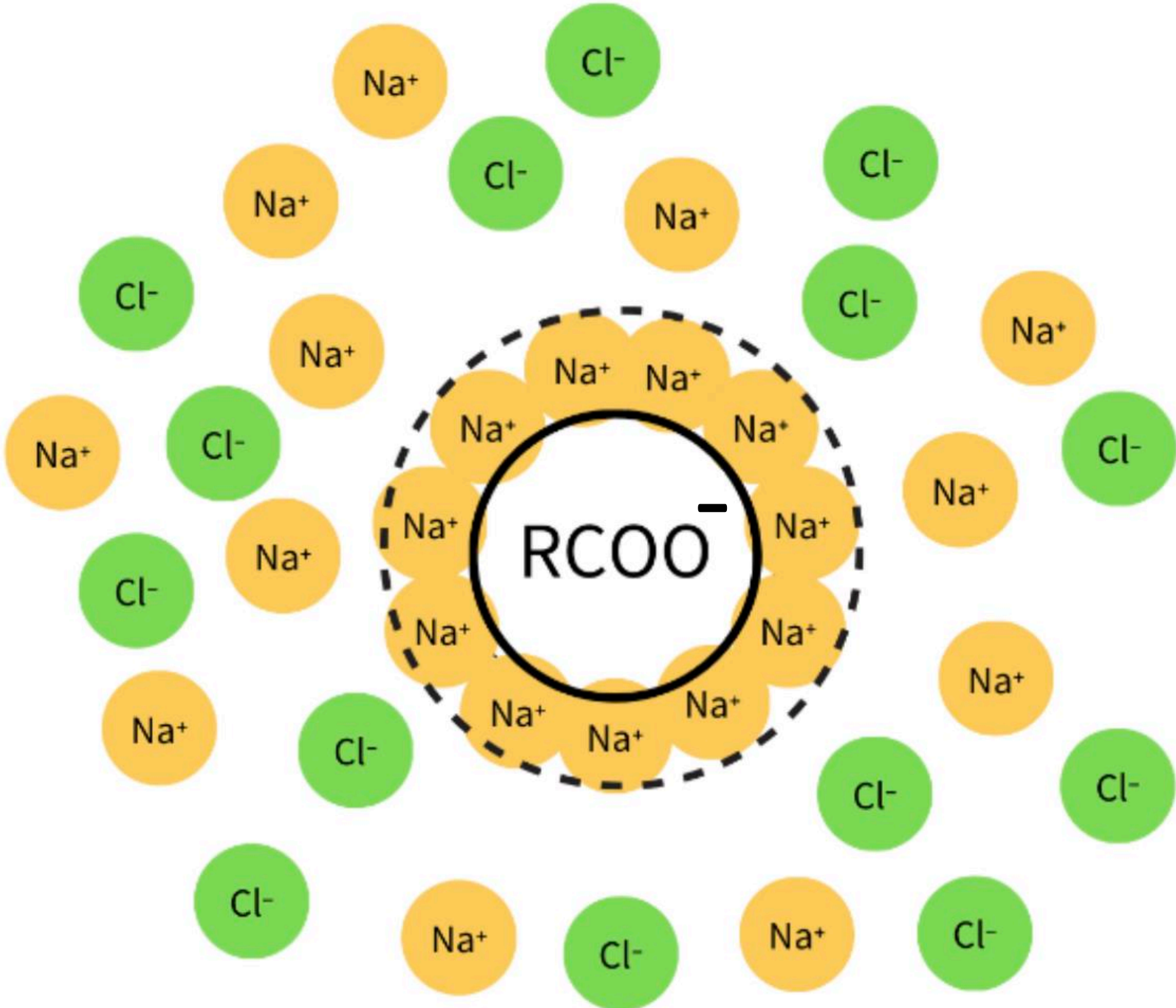
十四酸鈉 DLS 分析（紅框內為微胞數據）
（圖片出處：DLS 分析儀軟體產出）



微胞示意圖
（圖片出處：作者重繪自永續化學與生活(8)-衣物清潔劑（一））

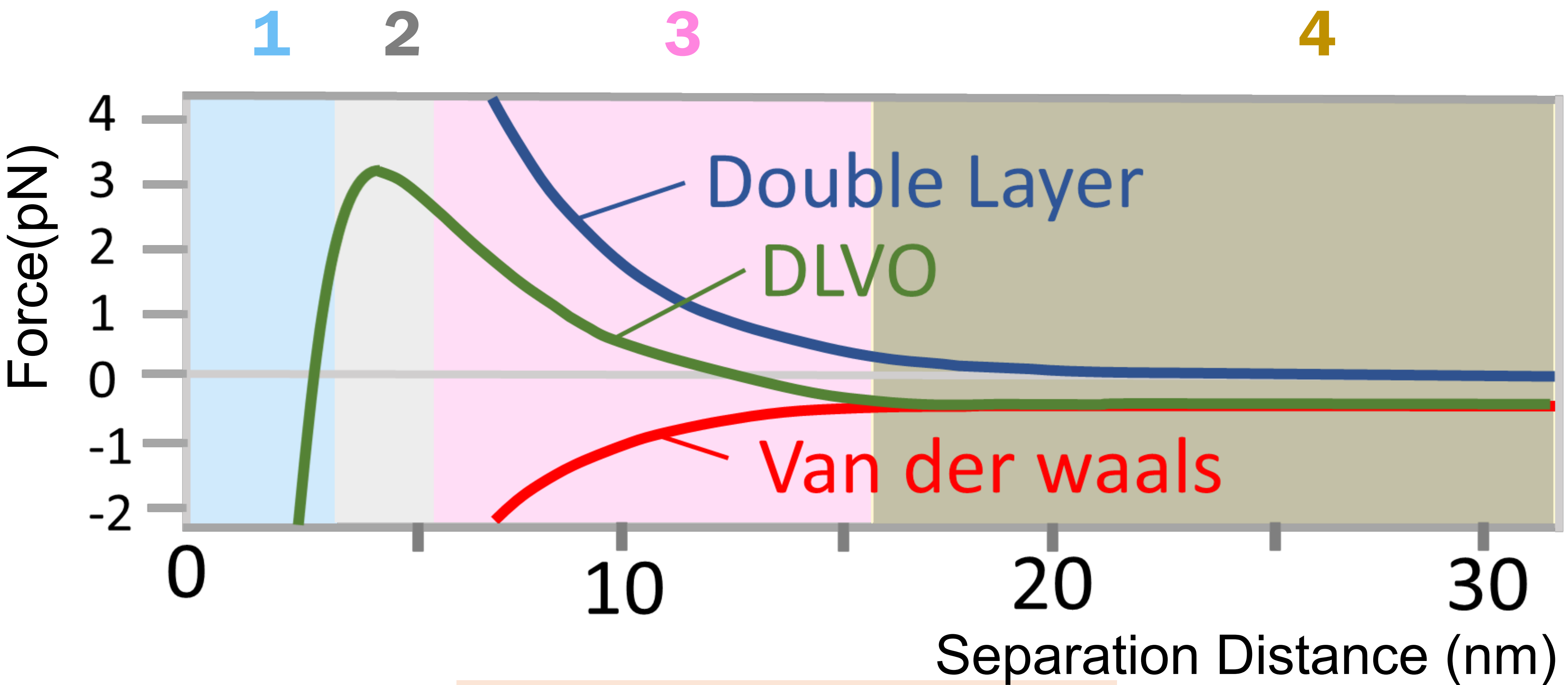
六. 鹽析現象的微觀機制-----雙電層和 DLVO 理論

雙電層可分為：緊密層（靠近粒子表面，由吸附性 Na^+ 構成）與擴散層（由鬆散分布的 Na^+ 和 Cl^- 構成）。雙電層會導致粒子之間產生靜電排斥力，進而影響粒子聚集與穩定性。



雙電層示意圖(圖片來源：作者自繪)

階段	理論說明	凡德瓦力 / 靜電排斥 比較
1	加入少許飽和食鹽水，膠體受凡德瓦力吸引，但受到雙電層排斥力，因此膠體仍穩定，此時粒子不聚集，故不析出	凡德瓦力 < 靜電排斥 (排斥力勝)
2	有些粒子的熱運動能量夠高，足以跨越能障	凡德瓦力 < 靜電排斥 (排斥力勝)
3	雙電層排斥力漸漸降低，粒子開始慢慢聚集，因此析出脂肪酸鈉	凡德瓦力 < 靜電排斥 (排斥力勝)
4	當飽和食鹽水達到能溶解脂肪酸鈉的最大量時，進入第四階段，粒子之間受到凡德瓦力吸引，肥皂的反應收率便停止上升	凡德瓦力 ≈ 靜電排斥 (吸引力些微大於排斥力)



DLVO理論中粒子間作用能與距離的關係圖
(圖片出處：作者改繪自Overview DLVO Theory)

結論與未來展望

結論

本研究提出酯化反應產生長鏈酯類連接皂化反應的可行性，並提出：改良酯類純化方式、皂化條件與鹽析體積，有效提升脂肪酸鈉的反應收率與純度，並釐清反應中關鍵變因的影響機制。本研究引入 DLVO 理論解析鹽析現象，補足教材中理論不足之處，並提出實驗教學的改良建議。

未來展望

本研究讓我們理解市售界面活性劑多選用十二碳鏈的原因。這激發我們探究脂肪酸鈉（ $\text{C}_{10}\sim\text{C}_{18}$ ）清潔能力的興趣，未來想進一步測試界面張力、去汙與泡沫表現，並探討飽和程度對皂化反應收率與性質的影響。

主要參考資料及圖片來源說明

圖片來源聲明：本研究圖片除另有說明外，皆由研究團隊自行製作、繪製或拍攝。

1. 賴慧娟、王瓊誼、許倍瑄、張詩苑（2006）。酯酯香醇--酯化反應之最佳化探討。全國第46屆中小學科展。

2. 吳誌偉、吳俞霖（2005）。油脂皂化反應的實驗設計與探討。台灣2005年國際科學展覽會。

3. Lin, J.-J., Hsu, M.-F., Huang, C.-J., & Lin, S.-Y. (2005). Solubility of sodium soaps in aqueous salt solutions. Journal of Colloid and Interface Science, 287(2), 450 - 456.

4. Gregor Trefalt and Michal Borkovec (2014)。Overview of DLVO Theory。

※其餘參考資料詳列於作品說明書※