

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 化學科

佳作

080215

舒芙蕾的蓬鬆之謎：探索「舒服」的高度秘訣

學校名稱： 新北市土城區廣福國民小學

作者：	指導老師：
小五 蘇柏予	陳怡文
小五 黃丞均	黃翊婷
小五 吳冠儒	

關鍵詞： 蛋白質、舒芙蕾、蓬鬆劑

舒芙蕾的蓬鬆之謎：探索「舒服」的高度秘訣

摘要

本研究以舒芙蕾為膨脹模型，探討蛋白打發、配料及烘烤條件等多重因素。提高攪速促進蛋白質變性並包入空氣，形成穩定泡沫；糖分次加入可提升黏度和界面穩定性。食鹽增加離子強度，破壞蛋白靜電排斥，降低泡沫穩定；氯化鈣的 Ca^{2+} 使蛋白過度聚合，抑制起泡。檸檬汁有機酸調整蛋白電荷，提升穩定性。

低筋麵粉有助氣體膨脹，乳脂穩定氣泡界面，過量影響網狀結構。膨鬆劑方面，酵母產氣慢適合長時烘焙，小蘇打與強酸反應快易導致結構坍塌，建議搭配 $\text{pH} > 3$ 弱酸如酒石酸氫鉀，類似泡打粉，產氣速度平緩。烘烤溫度 150°C 佳，高溫長時使硬度增加、蓬鬆度下降。玻璃容器導熱慢有利麵糊膨脹成型。蛋白泡沫穩定性與膨鬆劑的協同作用是舒芙蕾成功膨脹的關鍵。

壹、前言

一、研究動機

2018 年，日本全家便利商店推出的首款「舒芙蕾布丁」，將蓬鬆舒芙蕾與入口即化布丁結合，迅速贏得市場好評，並在一年內銷量突破 1000 萬份。這一成功不僅顯示了舒芙蕾的市場潛力，也凸顯了其獨特的食材搭配與精緻製作工藝。舒芙蕾的輕盈質感和細膩風味吸引了大量消費者的關注，並激發了我們進一步探討其製作過程的興趣。

下圖圖片來源：
日本全家便利商店官網



儘管舒芙蕾的食材簡單，但其製作過程充滿挑戰。成功的舒芙蕾依賴精湛的烘焙技巧，尤其是蛋白打發程度、麵糊比例，以及烘焙的溫度與時間等細節，這些都會直接影響口感和質地。特別是蛋白打發必須達到理想的硬性發泡，才能實現穩定膨脹，達到輕盈且富有層次感的口感。

此外，麵粉、牛奶、糖等基本食材的比例對舒芙蕾結構和口感有重要影響，如何在蓬鬆質感中保持細膩與穩定是挑戰之一。透過研究這些細節，我們希望能夠深入了解舒芙蕾的烘焙原理，並優化其食材搭配和製作技巧。

本研究旨在探討舒芙蕾製作中的關鍵技術與食材搭配，並分析如何通過精確操作達到理想的蓬鬆效果，從而提升品質並增加消費者的接受度。本參展作品與教學單元之相關性有：

1. 國小康軒自然領域三上 第四單元 溶解度
2. 國小康軒自然領域五下 第三單元 水溶液的酸鹼性

二、研究目的

（一）蛋白打發的秘密

- 1-1 分析攪拌速率對蛋白打發效果的影響。
- 1-2 探討加入不同重量的糖對蛋白打發效果的影響。
- 1-3 探討加入不同重量的鹽類對蛋白打發效果的影響。
- 1-4 探討分批加入糖對蛋白打發效果的影響。
- 1-5 探討加入不同種的糖類對蛋白打發效果的影響。
- 1-6 探討加入酸性物質是否會對蛋白打發效果產生影響。

（二）添加物對舒芙蕾的影響

- 2-1 分析粉類（如低筋麵粉、中筋麵粉、高筋麵粉、玉米粉等）對麵糊結構與口感的影響。
- 2-2 研究乳製品（如低脂牛奶、全脂牛奶）對舒芙蕾成型的增強作用。
- 2-3 評估不同膨鬆劑（泡打粉、小蘇打粉、酵母粉）產氣效率對舒芙蕾成型的影響。
- 2-4 探討各類膨鬆劑產生氣體在舒芙蕾結構中的保留效果。

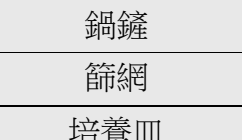
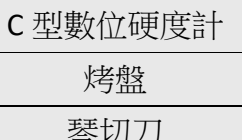
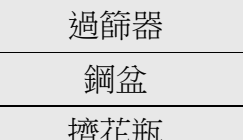
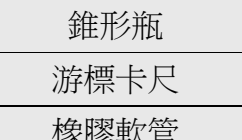
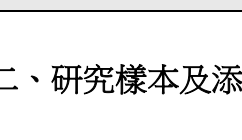
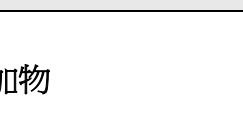
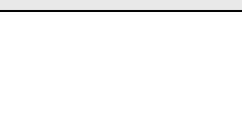
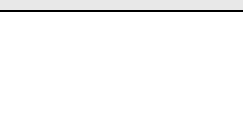
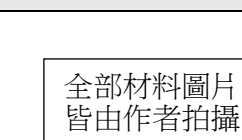
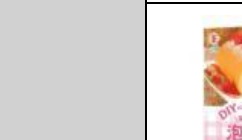
（三）烘焙條件對舒芙蕾的影響

- 3-1 探討不同烤箱溫度對舒芙蕾膨脹程度及質地的影響
- 3-2 研究舒芙蕾烘焙時間與內部結構、質地的關係，找出最佳烘焙時間。
- 3-3 分析不同材質烤模對舒芙蕾外觀和質地的影響。

貳、研究設備及器材

一、實驗儀器、器材

全部儀器圖片
皆由作者拍攝

				
30L 旋風電烤箱	電子秤	溫度計	雷射轉速計	50mL 滴定管
				
打蛋器	矽膠模具	玻璃模具	陶瓷模具	不鏽鋼模具
				
鍋鏟	水平儀	C 型數位硬度計	過篩器	錐形瓶
				
篩網	量杯	烤盤	鋼盆	游標卡尺
				
培養皿	分蛋器	琴切刀	擠花瓶	橡膠軟管
				
樣品瓶	鑷子	矽膠蓋	量筒	廣用試紙

二、研究樣本及添加物

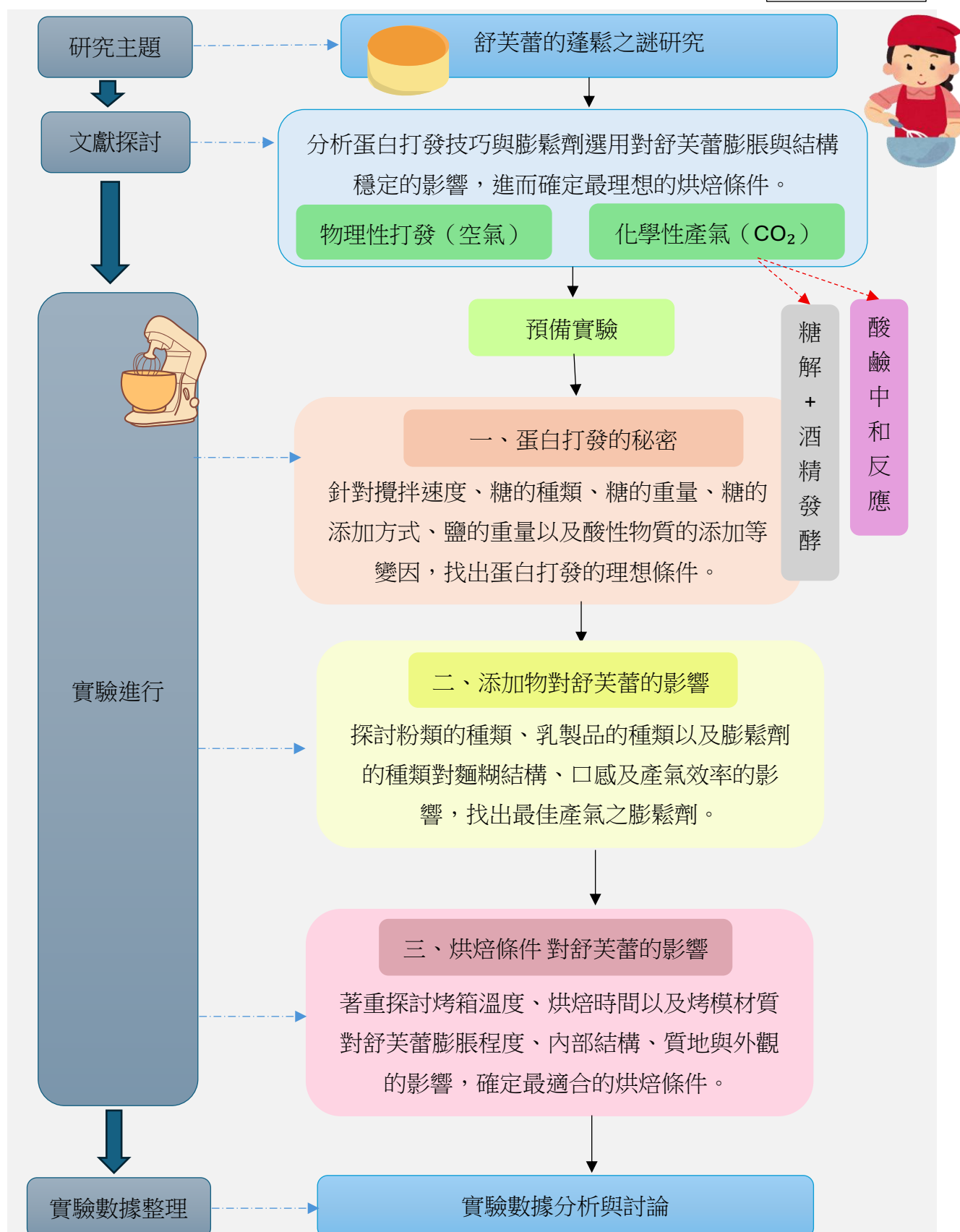
全部材料圖片
皆由作者拍攝

膨鬆劑	泡打粉		小蘇打粉		速發酵母粉		碳酸氫鈉		檸檬酸				
													
	冰醋酸		酒石酸氫鉀		試藥級酵母粉		塔塔粉		檸檬原汁				
													
舒芙蕾材料		白殼雞蛋			低脂牛奶			全脂牛奶					
粉類		低筋麵粉		中筋麵粉		高筋麵粉		玉米粉		太白粉		木薯粉	
添加物		葡萄糖		蔗糖		澱粉		精緻細砂		食鹽			
													

參、研究過程與方法

一、研究架構圖

架構圖由第一
指導老師繪製



一、文獻回顧：

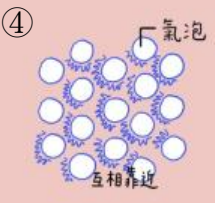
(一) 舒芙蕾蛋白質變性與氣泡形成原理（參考文獻資料一）

蛋白質變性是指蛋白質在外界因素影響下（如機械攪拌、加熱、pH 值改變等）其天然三維構型改變，導致分子間的疏水區域暴露，進而形成新的分子間作用力。

在打發蛋白的過程中，機械性攪拌會使蛋白的卵磷蛋白主鏈拉展，使親水與疏水基團重新排列，②變性後的蛋白質可吸附在空氣與水的界面，如同界面活性劑，形成穩定薄膜，包覆氣泡使泡沫內空氣不致外洩能包覆氣泡並防止其融合或崩解。③此外，適度的變性可使蛋白質之間形成柔軟而具彈性的網狀結構，有助於氣泡的穩定與整體體積的維持。

進一步加熱可氣泡因熱力而膨脹，加上水分蒸發，⑤這兩股力量可以慢慢將舒芙蕾撐起來、往上推高，使泡沫結構固定，完成膨脹與定型。

圖片皆由第一指導老師
參考文獻資料一繪製

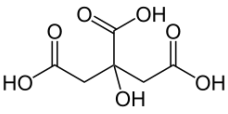
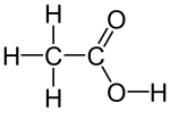
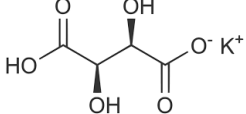
				
蛋白內的蛋白質有有親水性部分和疏水性部分，未變性前會捲成毛球狀。	打發蛋白時，蛋白質產生變性，解開變線狀。	大量氣泡進入蛋白，蛋白質以彈弓形狀將氣泡包裹。	蛋白質的親水性部分會互相靠近，漸漸形成豎立的泡沫型態。	溫度升高，蛋白質所包住的氣泡因受熱而膨脹，而把麵糊推高。

(二) 化學膨鬆劑的種類與反應說明（表格由第一指導老師繪製）

膨鬆劑	化學反應說明
泡打粉	泡打粉是一種化學膨脹劑，主要透過鹼性碳酸氫鈉（小蘇打粉）與酸性塔塔粉（酒石酸氫鉀）之酸鹼中和反應產生二氧化碳，促進麵糰膨脹。其配方中常含中性填充劑如玉米粉或樹薯澱粉，乾燥狀態下穩定，加入液體後才啟動反應。市售泡打粉多為雙效型，分別在遇水與加熱時釋放氣體，加速膨脹且受環境影響小。 反應方程式如下： $\text{KHC}_4\text{H}_4\text{O}_6 + \text{NaHCO}_3 \rightarrow \text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 + \text{CO}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O}$
碳酸氫鈉 $\text{Na}^+ \quad \text{O}-\text{C}-\text{OH}$ $\quad \quad \quad \parallel$ $\quad \quad \quad \text{O}$	碳酸氫鈉是強鹼與弱酸經中和作用後生成的酸式鹽，溶於水時呈弱鹼性。0.1 M 小蘇打水溶液 pH 值約為 11.5~ 12.0，與麵團中的酸性物質中和後即會產生鈉、水和二氧化碳。酸性物質與碳酸氫鈉反應如下： 反應方程式如下： $\text{NaHCO}_3 + \text{HA} (\text{酸}) \rightarrow \text{NaA} + \text{CO}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O}$

酵母粉  (上圖取自維基百科)	酵母為單細胞真菌，富含維生素 B 群，具營養與發酵功能。缺氧時，酵母透過糖酵解將葡萄糖轉成丙酮酸，再脫碳形成乙醛並釋放 CO₂，乙醛被 NADH 還原成乙醇並產生 ATP。烤麵包或蒸饅頭時，CO₂使麵團發酵，酒精揮發。有氧時，酵母經糖酵解和三羧酸循環代謝葡萄糖，生成 CO₂和水。 酵母發酵過程如下： 無氧：$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2\uparrow + 2ATP$ 有氧：$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2\uparrow + 6H_2O + 30(32)ATP$
---	---

(三) 與小蘇打反應的常用酸類化學特性總覽 (表格由第一指導老師繪製)

項目	檸檬酸	醋酸 (乙酸)	酒石酸氫鉀
化學式 (右圖片皆取自維基百科)			
類型	三元羧酸 (有三個 R-COOH)	一元羧酸 (有一個 R-COOH)	有機酸鹽 (部分離解的雙元酸鹽)
0.1 M 水溶液 pH 值	約 2.1	約 2.9	理論約為 2.6 - 2.8，但實際測得 pH 值落在 3.5 - 4.0
酸性強弱	弱酸，酸性較強 (因含多個羧基)	弱酸，K _a 小，僅部分離	弱酸性，酸性介於檸檬酸與醋酸之間
離解特性	可逐步釋放 3 個 H ⁺	電離程度低 (約 1% 電離)	部分離解為 H ⁺ 、酒石酸根離子與 K ⁺

(三) 膨鬆劑氣體收集方式比較 (表格由第一指導老師繪製)

收集方式	原理	適用氣體性質	CO ₂ 的特性	膨鬆劑氣體應用說明	優點
排水集氣法	氣體排開水收集於倒置容器中	不易溶於水、密度略大於空氣的氣體	稍微溶於水、密度大於空氣	✓ 適用於泡打粉或酵母反應產生的 CO ₂ ，常用於教學與基礎氣體收集實驗	可視化氣體量、結構簡單
向上排氣法	利用 CO ₂ 密度比空氣大，自容器底部置換空氣	密度大於空氣的氣體	密度約 1.5 倍於空氣	✓ 適合收集 CO ₂ ，不與水接觸，可避免溶解	不會因氣體溶於水而損失，可搭配乾式反應
向下排氣法	氣體由上方排出空氣 (適用密度小氣體)	密度小於空氣，如氫氣、氨氣	不適用，CO ₂ 密度大	✗ 不適用於膨鬆劑產氣，CO ₂ 會下沉導致逸散	無

★綜合考量二氧化碳的物理性質 (密度大於空氣、略溶於水) 與實驗操作的可行性，我們最終選擇使用**排水集氣法**進行氣體收集。此方法裝置簡便，能清楚觀察產氣過程與氣體體積變化，適合用於泡打粉或酵母發酵產生 CO₂ 的實驗設計。

(四) 舒芙蕾相關文獻之回顧分析 (表格由第一指導老師繪製)

目前尚無舒芙蕾相關研究，我們遂選擇蛋白霜與馬芬蛋糕等類似食譜進行文獻探討。

全國中小學科展歷屆優勝作品資料庫	研究題目	實驗目的與研究焦點	對本研究的啟發與差異處
全國第 54 屆國小組生活與應用科學科	蛋白棉花糖～蛋白霜之研究	本實驗研究蛋白打發過程中的物理變化，探討打發階段、最佳條件、酸鹼值和糖對蛋白霜質感、持久性與口感的影響，並分析乾性發泡對蛋白霜質地的改善。	本實驗建議使用自動打蛋器，借鑑影響蛋白打發的變因，並修正蛋白霜支撐性測定方法，提供精確的打發分析。舒芙蕾則強調蛋白打發、膨鬆劑選擇及烘焙條件的綜合影響。
新北市第 60 屆高級中等學校組農業與食品學科	吃軟不吃硬—探討麵粉與膨鬆劑對馬芬蛋糕結構的影響	本研究的目的是找出馬芬蛋糕的最佳配方，探索不同比例的泡打粉、酵母粉和麵粉種類對其影響。透過科學儀器和數據分析，找出最佳膨鬆劑和麵粉搭配，以達到最佳口感與結構。	儘管馬芬蛋糕和舒芙蕾的膨脹機制不同，前者更注重膨鬆劑和麵粉的配比，而後者則強調蛋白打發和烘焙條件的精確控制。這些差異幫助我們理解如何透過調整膨鬆劑和麵粉搭配，達到理想的結構和口感。

(五) 預備實驗

1. 探討蛋液打發的可能性 (表格由第一、第二及第三作者共同繪製)

攪拌物	水	蛋黃	蛋液	蛋白
實驗記錄 照片皆由作者拍攝				
原始平均高度 (cm)	0.4	0.8	0.3	0.5
攪拌 5min 後平均高 (cm)	0.4	1.4	0.9	3.5
放置 5min 後平均高 (cm)	0.4	0.6	0.7	3.0

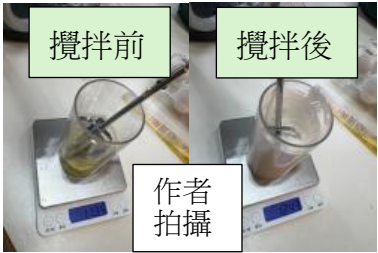
★實驗結果：攪拌後，蛋白的高度從 0.5 cm 增至 3.5 cm，顯示其能形成穩定且蓬鬆的泡沫。

蛋黃從 0.8 cm 增至 1.4 cm，顯示打發效果較差，泡沫不穩定。蛋液從 0.3 cm 增至 0.9 cm，顯示

蛋黃影響了打發效果。放置 5 分鐘後，蛋白維持在 3.0 cm，而蛋黃和蛋液泡沫分別降至 0.6

cm 和 0.7 cm，顯示蛋白的泡沫更穩定。因此，本實驗僅探討蛋白的打發效果。

在烘焙中，打發蛋白霜是關鍵步驟，但通常依賴經驗，難以以科學方式衡量。蛋白打發後體積會增大，但它能長時間保持蓬鬆嗎？加其他成分後，蛋白是否仍能維持打發狀態是一個挑戰。因此，我們設計了三種測量方法：起泡性、離水性和支撐性，用來科學地評估蛋白打發的程度。

測量方法	實驗步驟	實驗照片
蛋白的 起 泡性測定	1. 取 30 克的蛋白，使用自動攪拌器，持續攪拌至實驗所需時間。 2. 測量攪拌前和攪拌後包含攪拌棒的蛋白重量。 3. 量測三次，求平均值後用攪拌後增加高度除攪拌前高度，即可得到起泡性數值。 4. 起泡性越大代表起泡性越佳。	
蛋白的 離 水性測定	1. 同前步驟（一）。 2. 取適量打發蛋白放置 60ml 漏斗中，並將漏斗放在 10ml 量筒上，20 分鐘後觀察量筒裡的液體量。 3. 量筒裡的液體量即為「蛋白的離水性」，實驗三次求其平均值。 離水性數值越小越好。	

◎蛋白的支撐性測定演進過程（表格由第一指導老師繪製）

	第一代	第二代	第三代	第四代
實驗步驟+ 照片 示意 皆由作者拍攝	在蛋白霜上放置直徑約 5cm 的圓形布丁蓋作為支撐。放積木在布丁蓋上，直到蓋子下移。 	在蛋白霜上放置下圖瓶口黏上牙籤作為支撐。放方形積木在瓶口中，直到牙籤戳到瓶底。 	製作方形暗箱，將雷射筆固定在一側，放方形積木搭配雷射光輔助，直到蓋子下移。 	在固定高度放下圓柱體重物(彈珠)，使用水平儀觀察蛋白霜高度變化情形。 
缺點 改進	同時放置多個積木可能無法確定是哪一個積木造成瓶蓋下移，從而影響測量精確度。	放入積木會導致重量分佈不均、瓶口傾斜，影響結果的準確性。	積木擋住雷射光，會影響測量的準確性和一致性，導致無法準確判斷蓋子下移的時刻。	用自由落體可以更精確模擬蛋白霜的受力情況，提供更穩定且可重複的測量結果。
靈感來源	中華民國第 54 屆蛋白棉花糖～蛋白霜之研究	指導老師和學生討論後得出	指導老師和其他自然老師共同討論後得出	指導老師和學生討論後得出

2. 舒芙蕾口感的評斷指標

◎本實驗定義之「蓬鬆」包含以下兩大要素：

- 質地柔軟、組織均勻：呈現柔軟口感，整體**硬度低**，空氣分布均勻，間距細緻而柔軟。
- 發泡良好、結構穩定：具有**良好的發泡程度**，內部氣泡支撐結構完整，不易塌陷。

測量範圍：0~100
分辨率：0.5
測量單位：HC



上圖圖片來源：
蝦皮購物商品照片

(1) C 型硬度計適用範圍：

橡塑並用 / 泡棉 / 海綿 / 塑料材質中含有發泡劑製成的微孔材料等。

(2) 測量方式：壓針垂直壓入測量材質→壓針和測量材質接觸 1 秒內讀取數據

→在不同（相距約 6mm 以上）測量硬度值 5 次，取其平均值

→配有 H (HOLD) 數值保留鍵與 ZERO 數值清零鍵，可依需求使用

發泡程度(蓬鬆度)—Image J 軟體（表格由第一指導老師繪製）

步驟	圖片皆由作者拍攝	步驟圖示	步驟說明
步驟一			用手機拍下舒芙蕾剖面照片，利用 word 圖片格式進行背景移除。
步驟二			使用 Image J 影像軟體開啟圖片，將影像改為 8-bit 的影像。
步驟三			利用 Image-->Adjus-->Threshold，調整上下兩列的捲軸，使紅色的面積剛好覆蓋在舒芙蕾中的孔隙部份。
步驟四			以 Analyze>Measure 工具得到量測結果、計算內的孔隙所佔的面積。這些氣孔總面積，與整個剖面總面積比例，就是「蓬鬆度」。

(一) 蛋白打發的秘密

1-1 分析攪拌速率對蛋白打發效果的影響。

實驗目的：了解蛋白在打發過程中的物理變化，探討蛋白從液態到固態的轉變，並分析影響蛋白打發效果的因素。

實驗變因：電動攪拌器的攪拌速率

實驗步驟：

1. 用鐳射轉速計測量鍋寶電動攪拌器機器上的 1 到 7 速，每分鐘有幾轉(RPM)。
2. 準備相同量（20 公克）的蛋白，並確保蛋白無油水。

3. 使用自動攪拌器，將蛋白分別以不同速度（1-7）攪拌，每次攪拌時間為 6 分鐘。
4. 每隔 1 分鐘觀察並記錄蛋白的外觀變化，特別是體積、氣泡大小及打發程度。
5. 在不同攪拌速度下，測量並記錄蛋白的體積變化率。
6. 當蛋白達到乾性發泡時，測量其離水性、支撐性、重量變化。
7. 重複實驗，記錄不同速度下的蛋白打發結果，並進行比較分析，探討不同速度對蛋白打發效果的影響。

 皆由作者拍攝		
使用鐳射轉速計確認轉速	使用自動攪拌器打發蛋白	測試打發蛋白之離水性

1-2 探討加入不同重量的糖對蛋白打發效果的影響。

實驗目的：探討加入的砂糖量對蛋白打發過程中的影響，分析其對蛋白質結構、穩定性及打發效果的作用。

實驗變因：糖加入的量（0 公克、5 公克、10 公克、15 公克）

實驗步驟：

1. 準備相同量（20 公克）的蛋白，並確保蛋白無油水。
2. 將蛋白分為兩組，第一組為一次性加入糖，第二組為分批加入糖。
3. 對兩組蛋白分別使用自動攪拌器，將其打發至乾性發泡階段，並將糖分別加入。
4. 每分鐘觀察並記錄蛋白的外觀變化，特別是體積、氣泡大小及打發程度。
5. 當蛋白達到乾性發泡時，測量其重量、離水性及支撐性，並記錄數據。
6. 比較一加入糖量不同對蛋白打發效果的影響，分析兩種方式對蛋白霜穩定性、持久性及外觀的不同。

1-3 探討加入不同重量的鹽類對蛋白打發效果的影響。

實驗目的：探討加入的氯化鈉、氯化鈣量對蛋白打發過程中的影響，分析其對蛋白質結構、穩定性及打發效果的作用。

實驗變因：氯化鈉、氯化鈣加入的量（0g、5g、10g、15g）

實驗步驟：同實驗 1-2。

1-4 探討分批加入糖對蛋白打發效果的影響。

實驗目的：探討分批加入糖對蛋白打發過程中的影響，分析其對蛋白質結構、穩定性及打發效果的作用，並比較一次性加入與分批加入的差異。

實驗變因：糖加入方式（一次性加入 vs. 分批加入）

實驗步驟：

1. 準備相同量（20 公克）的蛋白，並確保蛋白無油水。
2. 將蛋白分為兩組，第一組為一次性加入糖，第二組為分批加入糖。
3. 對兩組蛋白分別使用自動攪拌器，將其打發至乾性發泡階段，並將糖分別加入：
 - (1) 一次性加入：在打發初期將所有糖加入蛋白中。
 - (2) 分批加入：在打發過程中，將糖分 2-4 次加入。
4. 每分鐘觀察並記錄蛋白的外觀變化，特別是體積、氣泡大小及打發程度。
5. 當蛋白達到乾性發泡時，測量其重量、離水性及支撐性，並記錄數據。
6. 比較一次性加入糖與分批加入糖對蛋白打發效果的影響，分析兩種方式對蛋白霜穩定性、持久性及外觀的不同。

1-5 探討加入不同種的糖類對蛋白打發效果的影響。

實驗目的：探討不同糖類（單醣、雙糖、多糖）對蛋白打發效果的影響，分析糖類種類對蛋白結構、穩定性及打發速度的作用。

實驗變因：糖類種類（單醣—葡萄糖、雙糖—蔗糖、多糖—澱粉）

實驗步驟：

1. 準備相同量（30 公克）的蛋白，並確保蛋白無油水。
2. 分別將每種糖加入三組蛋白中，每組加入相同糖量（例如：每組加入 10 公克的糖）。
3. 使用自動攪拌器，將蛋白打發至乾性發泡階段，並在打發過程中加入相應的糖類。
4. 每分鐘觀察並記錄蛋白的外觀變化，特別是體積、氣泡大小、穩定性等。
5. 當蛋白達到乾性發泡時，測量其重量、離水性及支撐性，並記錄數據。

1-6 探討加入檸檬汁是否會對蛋白打發效果產生影響

實驗目的：探討加入檸檬汁對蛋白打發過程中的影響，分析檸檬汁對蛋白霜穩定性、打發速度及結構的作用。

實驗變因：是否加入檸檬汁（有/無）

實驗步驟：

1. 準備相同量（30 公克）的蛋白，並確保蛋白無油水。
2. 準備兩組蛋白：不加入檸檬汁/加入 1 滴檸檬汁
3. 使用自動攪拌器，將兩組蛋白分別打發至乾性發泡階段。
4. 在攪拌過程中觀察兩組蛋白的變化，記錄打發速度、體積變化及氣泡的大小。
5. 當蛋白達到乾性發泡時，測量其重量、離水性及支撐性，並記錄數據。

（二）添加物對舒芙蕾的影響

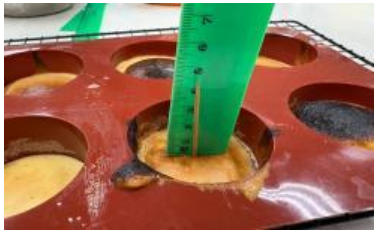
2-1 分析粉類（如低筋麵粉、中筋麵粉、高筋麵粉、玉米粉等）對麵糊結構與口感的影響。

實驗目的：分析不同粉類對麵糊結構、口感和烘焙後產品質地的影響，探討粉類的選擇如何影響舒芙蕾的質感和結構。

實驗變因：粉類種類（低筋麵粉、中筋麵粉、高筋麵粉、太白粉、玉米粉、木薯粉）

實驗步驟：

1. 根據實驗一結果，準備相同基底蛋白霜，加入 20g 粉類，並充分混合。
2. 分別將兩組麵糊裝入模具中，進行相同的烘焙條件（時間、溫度等）。
3. 烘焙後，記錄每組舒芙蕾的外觀、口感、質地等，並對比兩者的膨脹效果、結構和柔軟度。
4. 分析粉類對麵糊結構的影響，並探討其對口感和口感持久性的影響。

 皆由作者拍攝		
盛裝不同粉類準備實驗	牙籤輔助，測量舒芙蕾高度	利用游標卡尺測量厚度

2-2 研究乳製品（如低脂牛奶、全脂牛奶）對舒芙蕾成型的增強作用。

實驗目的：研究奶油和牛奶在舒芙蕾中的作用，分析其對口感、柔軟度、風味增強及整體質感的影響。

實驗變因：乳製品種類（低脂牛奶、全脂牛奶）

實驗步驟：

1. 根據實驗一結果，準備相同基底蛋白霜，分成兩組。
2. 在每組麵糊中加入相同量的乳製品，並與其他成分混合。
3. 使用相同的烘焙條件（時間、溫度等）對兩組進行烘焙。
4. 分析乳製品對舒芙蕾結構、口感、濕潤感和風味增強的影響。

2-3 評估不同膨鬆劑（泡打粉、小蘇打粉、酵母粉）產氣效率對舒芙蕾成型的影響。

實驗目的：探討不同膨鬆劑（泡打粉、小蘇打粉、酵母粉）對舒芙蕾膨脹、口感及結構的影響，了解各膨鬆劑的效果差異。

實驗變因：CO₂產生劑（泡打粉、小蘇打粉、酵母粉）、檸檬酸、醋酸、酒石酸氫鉀

實驗步驟：

1. 根據實驗一結果，準備相同基底蛋白霜，分為三組。
2. 在每組麵糊中，加入相同量的膨鬆劑，並充分混合。
3. 使用相同的烘焙條件（時間、溫度等）對三組進行烘焙。
4. 分析不同膨鬆劑對舒芙蕾的影響，並比較其對膨脹、質地、柔軟度及口感的效果。

		
添加不同膨鬆劑並攪拌均勻	放入烤箱進行烘烤	測試舒芙蕾之硬度

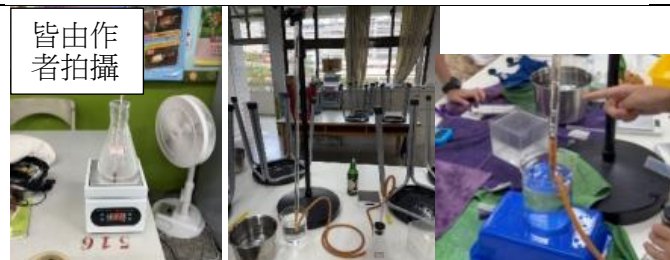
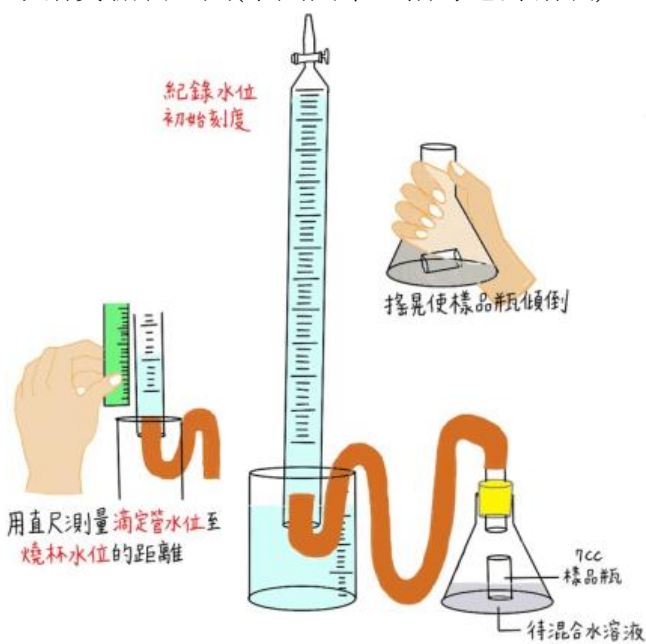
2-4 探討各類膨鬆劑產生氣體在舒芙蕾結構中的保留效果。

實驗目的：探討不同膨鬆劑（泡打粉、小蘇打粉、酵母粉）對舒芙蕾膨脹、口感及結構的影響，了解各膨鬆劑的效果差異。

實驗變因：膨鬆劑種類（泡打粉-碳酸氫鈉+酒石酸氫鉀、碳酸氫鈉+酸性物質、酵母粉）

實驗步驟：

手繪實驗裝置圖(下圖由第一指導老師繪製)



1. 調配 0.1M 碳酸氫鈉、檸檬酸、酒石酸氫鉀、醋酸水溶液。
2. 使用滴定管作為氣體容器，並確保氣體不漏出。在滴定管中裝滿水，用手指堵住滴定管管口，將滴定管倒置，沒入燒杯水面下。
3. 將樣品瓶裝入不同體積的酸性溶液用鑷子夾取，放進裝有碳酸氫鈉水溶液的錐形瓶內 / 將樣品瓶裝入不同體積的醣類水溶液用鑷子夾取，放進裝有酵母粉的錐形瓶內。
4. 取橡膠軟管，將軟管插入滴定管內部，另一頭插入矽膠塞上方的玻璃管，最後把矽膠塞塞進錐形瓶。
5. 搖晃錐形瓶使兩溶液混合。
6. 觀察滴定管水位變化並記錄，錐形瓶持續搖晃至水位不再變化為止。
7. 用直尺量測滴定管水位至燒杯水面的距離，即為氣體排開體積高度。
8. 重複步驟 1-7，搭配加熱板改變錐形瓶中溫度。

(三) 烘焙條件對舒芙蕾的影響

3-1 探討不同烤箱溫度對舒芙蕾膨脹程度及質地的影響

實驗目的：探討不同烤箱溫度對舒芙蕾膨脹程度、顏色變化及口感的影響，找出適合舒芙蕾烘焙的最佳溫度範圍。

實驗變因：烤箱溫度（150℃ 到 200℃）

實驗步驟：

1. 準備相同配方的舒芙蕾麵糊，分為三組。
2. 每組麵糊在不同的烤箱溫度下（150℃、160℃、170℃、180℃、190℃、200℃）進行烘焙。
3. 記錄每組舒芙蕾的膨脹程度和表面顏色變化，並觀察其烘焙時間及烘焙後的外觀。
4. 分析烤箱溫度對膨脹效果、顏色和口感的影響，找出最佳溫度條件。

3-2 研究舒芙蕾烘焙時間與內部結構、質地的關係，找出最佳烘焙時間

實驗目的：研究不同烘焙時間對舒芙蕾內部結構、口感和整體品質的影響，並確定最佳烘焙時間。

實驗變因：烘焙時間（5 分鐘到 10 分鐘）

實驗步驟：

1. 準備相同配方的舒芙蕾麵糊，分為三組。
2. 每組麵糊在相同的烤箱溫度下，進行不同的烘焙時間（5 分鐘、6 分鐘、7 分鐘、8 分鐘、9 分鐘、10 分鐘）。
3. 烘焙後，觀察每組舒芙蕾的膨脹情況、內部結構及顏色變化。
4. 分析不同烘焙時間對舒芙蕾的結構、膨脹效果及口感的影響，確定最佳烘焙時間。

3-3 分析不同材質烤模對舒芙蕾外觀和質地的影響

實驗目的：分析不同材質的烤模對舒芙蕾外觀、膨脹程度及口感的影響，確定最適合的烤模材料。

實驗變因：烤模材質（使用矽膠、不鏽鋼、陶瓷、玻璃材質）

實驗步驟：

1. 裝 50mL 水推算該容器升溫效率，並準備相同配方的舒芙蕾麵糊，分為三組。
2. 分別使用不同材質的烤模（使用矽膠、不鏽鋼、陶瓷、玻璃材質）進行烘焙。
3. 記錄每組舒芙蕾的膨脹程度、外觀顏色及結構。
4. 分析不同材質烤模對舒芙蕾外觀和膨脹的影響，找出最適合的烤模材質。

肆、研究結果

本研究會使用以下四項物理性質量測指標，作為評估舒芙蕾品質之依據：

- ★「離水性」是指：打發完的蛋白霜靜置 20 分鐘後，從蛋白霜中稀出的液體體積（mL）。
- ★「支撐性」是指：從 20 公分高度垂直落下 10 克重物後，蛋白霜被擠壓後的最終高度（cm）。
- ★「起泡性」是指： $(\text{最終泡沫高度} - \text{初始液體高度}) \div \text{初始液體高度} \times 100\%$ 。
- ★「蓬鬆度」是指： $\text{舒芙蕾內部孔隙總面積} \div \text{舒芙蕾剖面總面積}$ 。

1-1 分析攪拌速率對蛋白打發效果的影響。

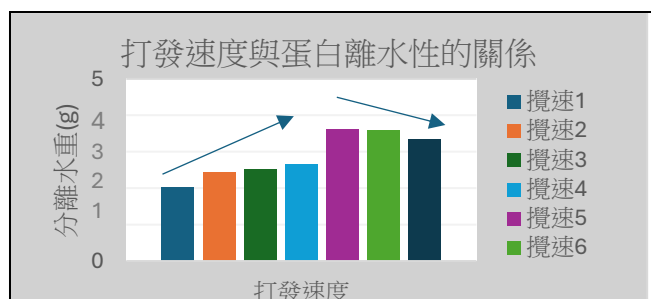
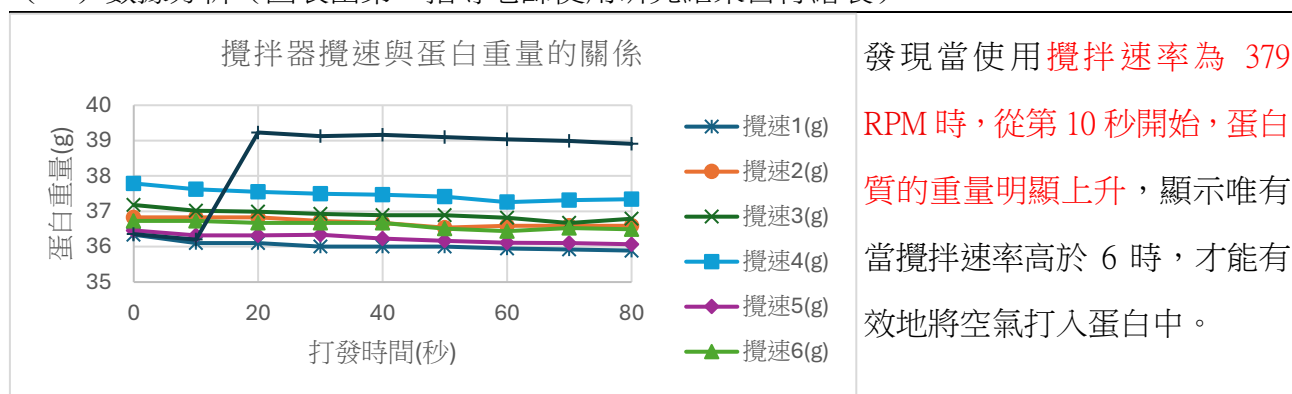
（一）實驗結果（表格由第一、第二及第三作者共同繪製）

蛋白狀態	攪速 1	攪速 2	攪速 3	攪速 4	攪速 5	攪速 6	攪速 7
轉速(RPM)	128	206	221	262	316	330	379
濕性發泡(m:s)	08:01	07:46	04:36	02:31	02:26	01:39	02:05
硬性發泡(m:s)	10:03	09:26	05:33	03:32	03:27	02:36	02:47
乾性發泡(m:s)	13:54	12:28	07:37	05:38	05:17	03:32	03:26

蛋白狀態		攪速 1	攪速 2	攪速 3	攪速 4	攪速 5	攪速 6	攪速 7
離水性	水量(ml)	2.008	2.418	2.500	2.656	3.616	3.580	3.340
	標準差	0.0148	0.0110	0.01	0.0219	0.0152	0.0122	3.34
支撐性	高度(cm)	3.30	2.86	2.72	3.60	2.98	3.10	3.06
	標準差	0.0139	0.009	0.008	0.009	0.012	0.0110	0.008

時間 速度	0 秒	10 秒	20 秒	30 秒	40 秒	50 秒	60 秒	70 秒	80 秒
攪速 1(g)	36.34	36.10	36.10	36.00	36.00	36.00	35.95	35.92	35.89
攪速 2(g)	36.83	36.83	36.83	36.73	36.67	36.54	36.59	36.59	36.59
攪速 3(g)	37.18	37.02	36.99	36.93	36.89	36.89	36.82	36.67	36.79
攪速 4(g)	37.79	37.62	37.55	37.50	37.47	37.42	37.26	37.32	37.34
攪速 5(g)	36.46	36.32	36.32	36.34	36.23	36.17	36.11	36.10	36.07
攪速 6(g)	36.73	36.73	36.67	36.67	36.67	36.51	36.44	36.53	36.49
攪速 7(g)	36.36	36.20	39.23	39.13	39.16	39.10	39.04	38.99	38.91

(二) 數據分析 (圖表由第一指導老師使用研究結果自行繪製)



攪速 1 到 4 之間，蛋白分離出來的水量逐漸增加；當攪拌速率為 5 時，蛋白分離出來的水量達到最多；而在攪拌速率 6 至 7 時，蛋白分離出來的水量則逐漸減少。



其中，攪拌速率 1 和 4 的支撐高度較高，支撐性介於 2.72 至 3.3 之間，且不同攪拌速率間的差異較小。

1-2 探討加入不同重量的糖對蛋白打發效果的影響。

1-3 探討加入不同重量的鹽類對蛋白打發效果的影響。

$$\text{安定性}(\%) = \frac{\text{泡泡質量} - \text{水分質量}}{\text{泡泡質量}} \times 100$$

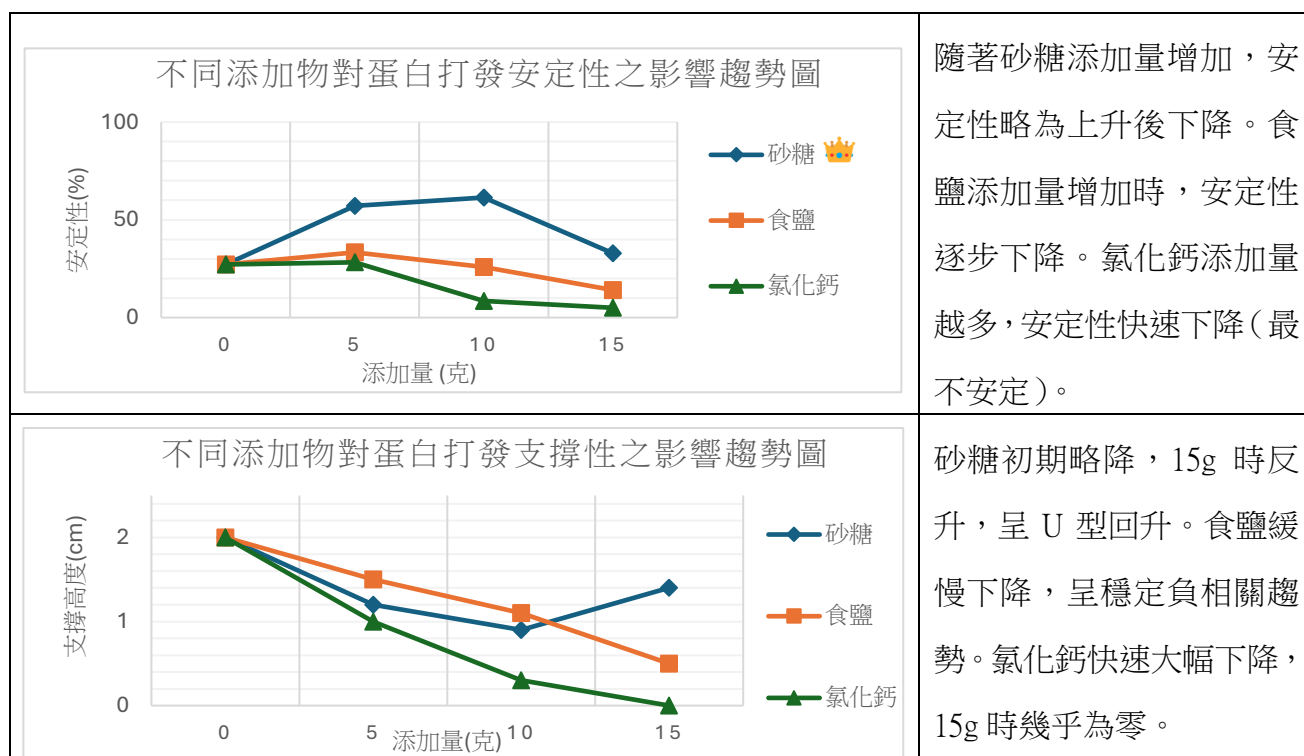
(一) 實驗結果 (表格由第一、第二及第三作者共同繪製)

砂糖量(g)	泡沫高度 (cm)	離水性(ml)	起泡性(%)	安定性(%)	支撐性(cm)	打發
0	3.18	6.75	27.2	27.18	2.0	✓
5	3.93	4.29	57.2	57.06	1.2	✓
10	4.03	4.00 🏰	61.2 🏰	61.39 🏰	0.9	✓
15	3.32	6.00	32.8	32.96	1.4	✗

氯化鈉量(g)	泡沫高度 (cm)	離水性(g)	起泡性(%)	安定性(%)	支撐性(cm)	打發
0	3.18	6.75	27.2	27.18	2.0	✓
5	3.67	6.00	46.8	33.33	1.5	✓
10	3.45	6.30	38.0	25.88	1.1	✓
15	2.95	6.70	18.0	14.10	0.5	✗

氯化鈣量(g)	泡沫高度 (cm)	離水性(g)	起泡性(%)	安定性(%)	支撐性(cm)	打發
0	3.18	6.75	27.2	27.18	2.0	✓
5	3.20	6.10	28.0	28.24	1.0	✓
10	2.70	6.40	8.0	8.57	0.3	✗
15	2.63	5.51	5.2	5.00	0.0	✗

(二) 數據分析 (圖表由第一指導老師使用研究結果自行繪製)



1-4 探討分批加入糖對蛋白打發效果的影響。

(一) 實驗結果 (表格由第一、第二及第三作者共同繪製)

紀錄 \ 糖量	一次全加	一次後加	分 2 次加	分 3 次加	分 4 次加
原始高度(cm)	1.5	0.8	0.8	0.8	1.0
打發後高度(cm)	2.5	2.6	2.7	2.4	2.7
起泡性 (%)	66.67	225	237.5	200	170
打發時間(s)	195	151	150	168	303
支撐性(cm)	2.0	2.5	2.0	2.5	3.5
離水性(g)	6.8	5.5	5.7	6.0	4.8

(二) 數據分析 (圖表由第一指導老師使用研究結果自行繪製)

起 泡 性	分批加入糖的蛋白打發高度變化率	分批加入糖 (特別是分 2 次加) 帶來較高的高度變化率 (237.5%)，比一次性加入 (66.67%) 明顯更高，顯示分批加入有助於更有效的打發。
離 水 性	分批加糖的蛋白打到乾性所需時間	分次加糖能明顯降低離水性，提升泡沫的水分保持與穩定性。分 4 次加入效果最佳，減少液體流失，有助舒芙蕾泡沫持久穩定。一次全加則液體流失較多，穩定性較差。
支 撐 性	分批加入糖的蛋白支撐性高度	支撐性方面，分 4 次加糖的支撐性最高 (3.5cm)，而一次性加入的支撐性較低 (2cm)。這表明分批加入糖有助於提升泡沫的穩定性和結構。

1-5 探討加入不同種的糖類對蛋白打發效果的影響。

(一) 實驗結果 (表格由第一、第二及第三作者共同繪製)

糖的種類	單糖—葡萄糖	雙糖—蔗糖	多糖—澱粉
蛋白重量變化率 (%)	-9.0	2.5	-8.7
蛋白霜的起泡性 (%)	340	120	300
蛋白霜的離水性 (g)	1.3	0.7	0.2
蛋白霜的支撐性 (g)	2.1	0.0	0.3

（二）數據分析

根據實驗數據，葡萄糖在打發蛋白時表現最佳，能顯著提升蛋白高度和支撐性，並且離水性較好。相比之下，蔗糖對蛋白霜的效果較差，特別是在支撐性方面。

1-6 探討加入檸檬汁是否會對蛋白打發效果產生影響。

（一）實驗結果（表格由第一、第二及第三作者共同繪製）

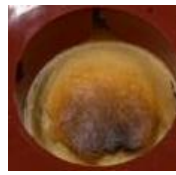
比較 紀錄	加糖打發 不加檸檬汁	加糖打發 加檸檬汁	沒加糖打發 不加檸檬汁	沒加糖打發 加檸檬汁
原始高度(cm)	1.5	1.0	1.0	0.8
打發後高度(cm)	2.5	3.0	2.5	2.8
起泡性(%)	66.67	200	150	250
打發時間(s)	475	366	171	152
支撐性(cm)	2.0	3.5	2.8	3.0

（二）數據分析（圖表由第一指導老師使用研究結果自行繪製）

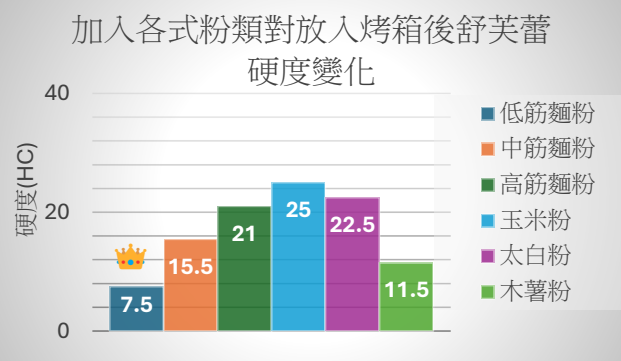
起 泡 性	加入檸檬汁對蛋白打發的高度變化 高度變化率(%) ■ 加糖打發不加檸檬汁 ■ 加糖打發加檸檬汁 ■ 沒加糖打發不加檸檬汁 ■ 沒加糖打發加檸檬汁	加糖打發加檸檬汁的起泡性最好（200%），顯示檸檬汁能有效增強泡沫結構。沒加糖打發加檸檬汁的變化率也很高（250%），顯示檸檬汁對蛋白質結構的影響較顯著。
打 發 時 間	加入檸檬汁對蛋白打發所需的時間 打發時間(s) ■ 加糖打發不加檸檬汁 ■ 加糖打發加檸檬汁 ■ 沒加糖打發不加檸檬汁 ■ 沒加糖打發加檸檬汁	沒加糖打發不加檸檬汁需要最長時間（475 秒），顯示加糖和檸檬汁能顯著加速打發過程。加糖打發加檸檬汁需要的時間最短（366 秒），說明檸檬汁能進一步提高打發效率。
支 撐 性	加檸檬汁對蛋白打發的支撐性高度 支撐高度(cm) ■ 加糖打發不加檸檬汁 ■ 加糖打發加檸檬汁 ■ 沒加糖打發不加檸檬汁 ■ 沒加糖打發加檸檬汁	加糖打發加檸檬汁的支撐性最佳（3.5 cm），顯示糖和檸檬汁共同作用下，泡沫結構最穩定。加糖打發不加檸檬汁的支撐性較低（2.0 cm），顯示檸檬汁在提升穩定性方面具有重要作用。

2-1 分析粉類（如麵粉、玉米粉）對麵糊結構與口感的影響。

（一）實驗結果（表格由第一、第二及第三作者共同繪製）

粉類選擇	低筋麵粉	中筋麵粉	高筋麵粉	玉米粉	太白粉	木薯粉
照片 皆由作者拍攝						
原始高度	0.3	0.6	0.2	0.5	0.6	0.5
起泡性(%)	266	266	350	160	200	260
硬度(HC)	7.5	15.5	21	25	22.5	11.5
蓬鬆度(%)	28.4	19.4	10.3	14.1	8.4	11.8

（二）數據分析（圖表由第一指導老師使用研究結果自行繪製）

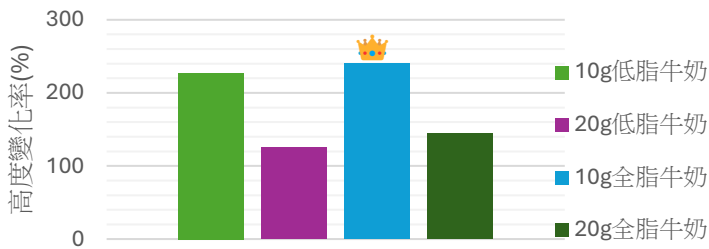
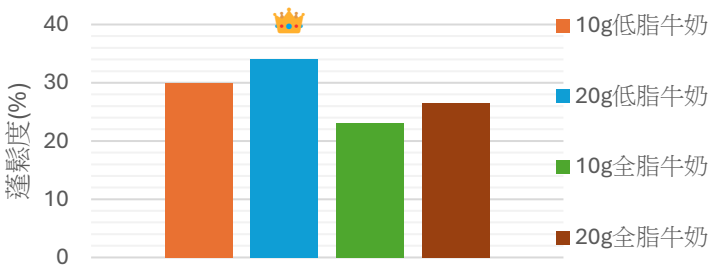
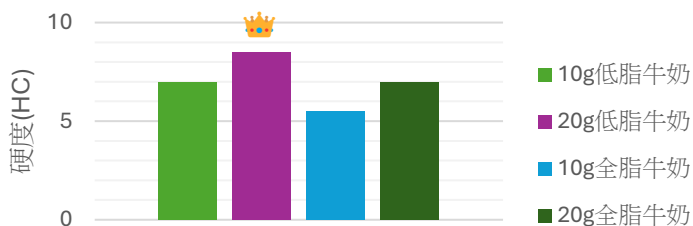
起 泡 性	加入各式粉類對放入烤箱後舒芙蕾高度變化  高度變化率(%) ■ 低筋麵粉 ■ 中筋麵粉 ■ 高筋麵粉 ■ 玉米粉 ■ 太白粉 ■ 木薯粉	1.高筋麵粉的高度變化率最高（350%），顯示它能最有效地提供結構支撐和膨脹。 2.低筋麵粉和中筋麵粉的高度變化率相同（266%），兩者在提升體積方面表現相似。 3.玉米粉的高度變化率最低（160%），顯示其打發效果較弱。
硬 度	加入各式粉類對放入烤箱後舒芙蕾硬度變化  硬度(HC) ■ 低筋麵粉 ■ 中筋麵粉 ■ 高筋麵粉 ■ 玉米粉 ■ 太白粉 ■ 木薯粉	1.低筋麵粉的硬度最低（7.5），顯示它打發的泡沫最柔軟。 2.玉米粉硬度最高（25），顯示其泡沫結構最硬，不易膨脹，高筋麵粉和太白粉硬度也高於20。
蓬 鬆 度	加入各式粉類對放入烤箱後舒芙蕾蓬鬆度變化  蓬鬆度(%) ■ 低筋麵粉 ■ 中筋麵粉 ■ 高筋麵粉 ■ 玉米粉 ■ 太白粉 ■ 木薯粉	1.低筋麵粉的蓬鬆度最高（28.4%），這有助於製作更輕盈、鬆軟的結構。 2.中筋麵粉和木薯粉蓬鬆度較低，分別為（19.4%和11.8%）。 3.太白粉的蓬鬆度最低（8.4%），顯示其在提升蓬鬆效果上較差。

2-2 研究乳製品（低脂、全脂牛奶）對舒芙蕾成型的增強作用。

（一）實驗結果（表格由第一、第二及第三作者共同繪製）

紀錄	比較	10g 低脂牛奶	20g 低脂牛奶	10g 全脂牛奶	20g 全脂牛奶
照片	皆由作者拍攝				
麵糊高度(cm)		1.5	2.0	1.5	2.0
烤後高度(cm)		4.9	4.5	5.1	4.9
起泡性(%)		227	125	240	145
蓬鬆度(%)		29.9	34.1	23.0	26.5
硬度(HC)		7.0	8.5	5.5	7.0

（二）數據分析（圖表由第一指導老師使用研究結果自行繪製）

起 泡 性	探討低脂、全脂牛奶對舒芙蕾的改變  高度變化率(%) 10g低脂牛奶 20g低脂牛奶 10g全脂牛奶 20g全脂牛奶	10g 全脂牛奶最能夠提供最佳的起泡性，顯示出在此量下的舒芙蕾膨脹效果最好，而過多的牛奶則可能導致膨脹效果下降。
蓬 鬆 度	探討低脂、全脂牛奶製作之舒芙蕾蓬鬆度  蓬鬆度(%) 10g低脂牛奶 20g低脂牛奶 10g全脂牛奶 20g全脂牛奶	低脂牛奶的蓬鬆度普遍高於全脂牛奶，尤其是在 10g 的情況下。增加牛奶的量（從 10g 增加到 20g）也有助於提升蓬鬆度，特別是在低脂牛奶的情況下。
硬 度	探討低脂、全脂牛奶對舒芙蕾的改變  硬度(HC) 10g低脂牛奶 20g低脂牛奶 10g全脂牛奶 20g全脂牛奶	實驗結果顯示，10g 全脂牛奶的硬度最低（5.5），表現出最佳的柔軟度，而 20g 低脂牛奶的硬度最高（8.5）。

2-3 探討加入膨鬆劑（泡打粉、小蘇打粉、酵母粉）產氣效率對舒芙蕾成型的影響。

（一）實驗結果（表格由第一指導老師繪製）

比較 紀錄	1g 小蘇打+1g 醋	2g 小蘇打+1g 醋	1g 小蘇打+1g 酒	2g 小蘇打+1g 酒	1g 小蘇打+1g 檸	2g 小蘇打+1g 檸	1g 泡打粉	2g 泡打粉
麵糊高度(cm)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
烤後高度(cm)	2.45	3.6	4.6	4.0	2.3	3.06	3.4	2.8
靜置高度(cm)	2.4	2.4	3.3	2.2	1.74	2.23	3.0	2.49
硬度(HC)	3.0	4.5	0.5	1	1.0	2.0	0.	1

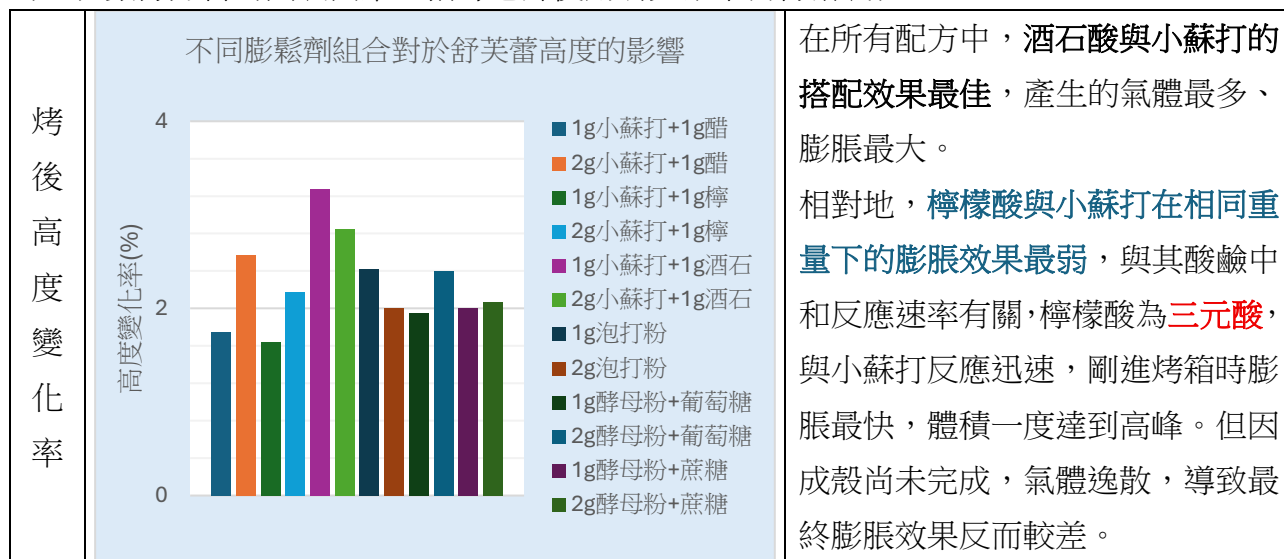
◎酒：0.1M 酒石酸氫鉀水、檸：0.1M 檸檬酸水、醋：0.1M 醋酸水、小蘇打：0.1M 小蘇打水

比較 紀錄	1g 酵母粉+葡萄糖	2g 酵母粉+葡萄糖	1g 酵母粉+蔗糖	2g 酵母粉+蔗糖
麵糊高度(cm)	1.0	1.0	1.4	1.4
烤後高度(cm)	1.95	2.4	2.8	2.9
靜置高度(cm)	1.90	2.28	2.4	1.9
硬度(HC)	12.0	20.5	9.0	7.0

◎葡萄糖：葡萄糖飽和水溶液、蔗糖：蔗糖飽和水溶液

克數(g) 高度(cm) 膨鬆劑	0			2			4			6		
酵母粉	1.8	1.8	1.8	3.1	3.3	3	3.5	3.6	3.2	4.1	4.3	3.9
	平均:1.8			平均:3.13			平均:3.43			平均:4.1		
小蘇打粉	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	2.0	2.9	2.8	2.5	2.5	2.4
	平均:1.8			平均:1.8			平均:2.56			平均:2.47		
泡打粉	1.8	1.8	1.8	4.3	4.4	4.5	4.3	3.7	3.5	2.5	2.5	1.7
	平均:1.8			平均:4.4			平均:4.17			平均:2.33		

（二）數據分析（圖表由第一指導老師使用研究結果自行繪製）



膨鬆劑穩定性	不同膨鬆劑靜置30分鐘後高度變化 高度(cm) 0g 2g 4g 6g 酵母粉 小蘇打粉 泡打粉	酵母粉：隨添加量增加，膨脹高度穩定上升。 小蘇打粉：0g 與 2g 高度相同（1.8），至 4g 有明顯上升（2.56），6g 略降（2.47）。 泡打粉：在 2g 達最高值（4.4），之後逐漸下降（4.17 → 2.33）。
硬度	不同膨鬆劑後舒芙蕾的硬度比較 硬度(HC) 1g小蘇打+1g醋 2g小蘇打+1g醋 1g小蘇打+1g檸檬 2g小蘇打+1g檸檬 1g小蘇打+1g酒石 2g小蘇打+1g酒石 1g泡打粉 2g泡打粉 1g酵母粉+葡萄糖 2g酵母粉+葡萄糖 1g酵母粉+蔗糖 2g酵母粉+蔗糖	最硬配方：2g 酵母 + 葡萄糖→ 發酵完全、結構密實。 最軟配方：1g 泡打粉→ 發泡快但結構支撐弱。 酵母粉類：硬度遠高於其他類，適合需要結構支撐的烘焙品。 小蘇打類：與酸反應產氣快，若穩定性不足容易塌陷。

2-4 探討各類膨鬆劑產生氣體在舒芙蕾結構中的保留效果。

（一）實驗結果（表格由第一指導老師繪製）

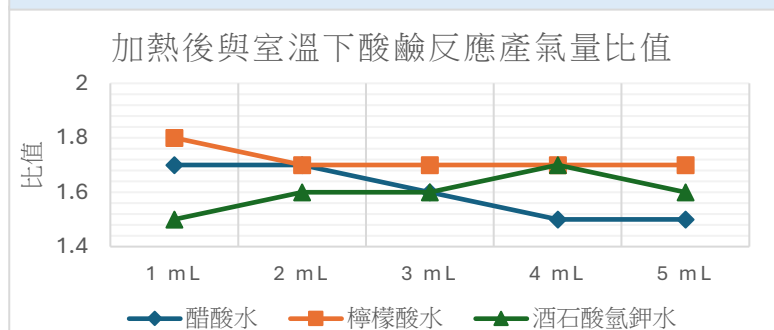
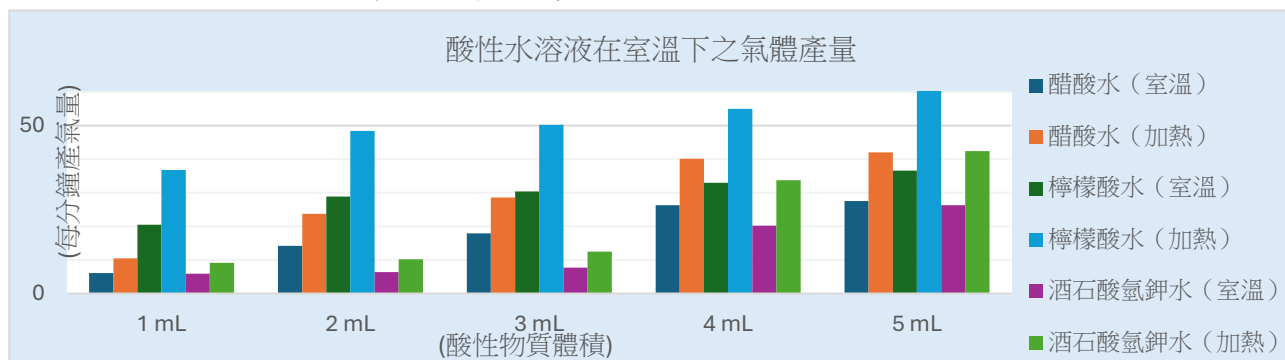
1. 酸類+碳酸氫鈉模擬泡打粉和碳酸氫鈉遇酸產氣一分鐘內平均產氣速率（單位：mL / min）

體積 (mL)	醋酸水 (室溫)	醋酸水 (加熱)	檸檬酸水 (室溫)	檸檬酸水 (加熱)	酒石酸氫鉀水 (室溫)	酒石酸氫鉀水 (加熱)
1 mL	6.1	10.5	20.5	36.8	5.9	9.1
2 mL	14.2	23.7	28.9	48.4	6.4	10.2
3 mL	17.9	28.6	30.4	50.2	7.7	12.5
4 mL	26.3	40.1	33.0	55.0	20.2	33.7
5 mL	27.5	42.0	36.6	61.3	26.3	42.4

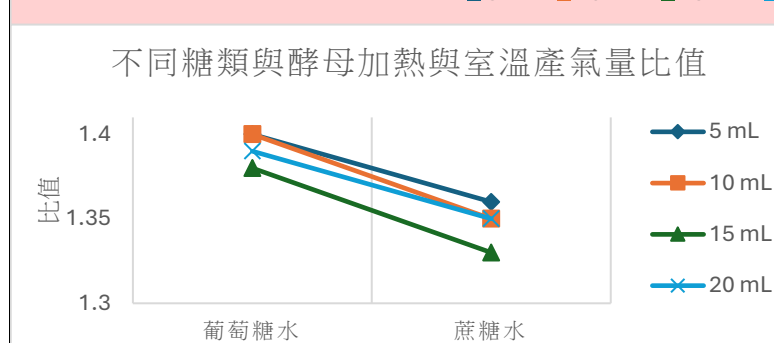
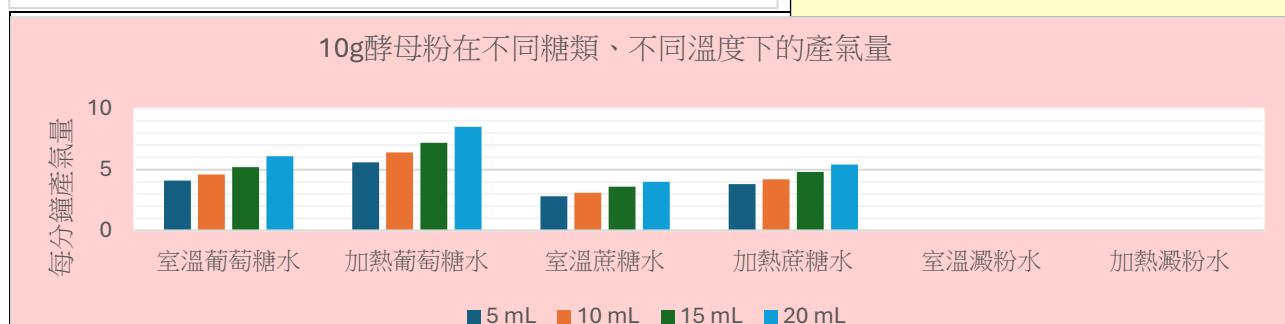
2. 10g 酵母分遇到不同糖種水溶液糖解產氣一分鐘內平均產氣速率（單位：mL / min）

溫度	糖類	5 mL	10 mL	15 mL	20 mL
室溫 (約 25°C)	1M 葡萄糖水	4.1	4.6	5.2	6.1
	1M 蔗糖水	2.8	3.1	3.6	4.0
	澱粉水	0	0	0	0
加熱 (約 35°C)	1M 葡萄糖水	6.2	6.9	7.8	9.15
	1M 蔗糖水	4.2	4.65	5.4	6.0
	澱粉水	0	0	0	0

(二) 數據分析 (圖表由第一指導老師使用研究結果自行繪製)



加熱後，三種酸性物質與膨脹劑反應產氣量皆明顯上升。檸檬酸水反應最劇烈，平均增幅約 1.7 倍，其次為醋酸水與酒石酸氫鉀水。表示溫度上升可有效加速酸鹼反應，提升產氣效率。



加熱至 35°C 可明顯提升酵母產氣量，葡萄糖水增加約 1.35 至 1.4 倍，蔗糖水增加約 1.33 至 1.36 倍。澱粉水無氣體產生，顯示酵母需直接利用可發酵糖類，且室溫促進代謝。

3-1 探討不同烤箱溫度對舒芙蕾膨脹程度及質地的影響。

(一) 實驗結果 (表格由第一、第二及第三作者共同繪製)

溫度(°C)	150	160	170	180	190	200
測試項目						
麵糊高度(cm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
烤後高度(cm)	2.4	2.9	3.3	3.4	3.4	3.2
高度變化率(%)	60	93	120	127	127	113
蓬鬆度 (%)	35.3	23.0	22.1	16.7	14.5	10.3
硬度(HC)	3.0	4.5	6.7	10.5	13.0	15.0

(二) 數據分析 (圖表由第一指導老師使用研究結果自行繪製)

高度變化率	不同溫度對舒芙蕾高度的差別 <table><tr><th>溫度 (°C)</th><th>高度變化率 (%)</th></tr><tr><td>150</td><td>~60</td></tr><tr><td>160</td><td>~90</td></tr><tr><td>170</td><td>~120</td></tr><tr><td>180</td><td>~130</td></tr><tr><td>190</td><td>~127</td></tr><tr><td>200</td><td>~113</td></tr></table>	溫度 (°C)	高度變化率 (%)	150	~60	160	~90	170	~120	180	~130	190	~127	200	~113	隨著溫度升高，高度變化率逐步增長，達 127%（180°C、190°C），然後在 200°C 時略微下降至 113%。
溫度 (°C)	高度變化率 (%)															
150	~60															
160	~90															
170	~120															
180	~130															
190	~127															
200	~113															
蓬鬆度	不同溫度對舒芙蕾內部蓬鬆度的差別 <table><tr><th>溫度 (°C)</th><th>蓬鬆度 (%)</th></tr><tr><td>150</td><td>~40</td></tr><tr><td>160</td><td>~25</td></tr><tr><td>170</td><td>~22</td></tr><tr><td>180</td><td>~18</td></tr><tr><td>190</td><td>~15</td></tr><tr><td>200</td><td>~12</td></tr></table>	溫度 (°C)	蓬鬆度 (%)	150	~40	160	~25	170	~22	180	~18	190	~15	200	~12	150°C→氣泡穩定且分佈良好。 160 – 170°C 快速下降，結構開始因高溫提早定型。180 – 200°C 蓬鬆度逐漸降低，內部孔洞被擠壓、結構塌陷。
溫度 (°C)	蓬鬆度 (%)															
150	~40															
160	~25															
170	~22															
180	~18															
190	~15															
200	~12															
硬度	不同溫度對舒芙蕾內部硬度的差別 <table><tr><th>溫度 (°C)</th><th>硬度 (HC)</th></tr><tr><td>150</td><td>3</td></tr><tr><td>160</td><td>4.5</td></tr><tr><td>170</td><td>6.7</td></tr><tr><td>180</td><td>10.5</td></tr><tr><td>190</td><td>13</td></tr><tr><td>200</td><td>15</td></tr></table>	溫度 (°C)	硬度 (HC)	150	3	160	4.5	170	6.7	180	10.5	190	13	200	15	從 150°C 的 3 逐步增加至 160°C 的 4.5，170°C 時為 6.7，180°C 達到 10.5，190°C 為 13，最終在 200°C 時達到最高的 15，顯示高溫會顯著增加硬度。
溫度 (°C)	硬度 (HC)															
150	3															
160	4.5															
170	6.7															
180	10.5															
190	13															
200	15															

3-2 研究舒芙蕾烘焙時間與內部結構、質地的關係，找出最佳烘焙時間。

(一) 實驗結果 (表格由第一、第二及第三作者共同繪製)

時間(分)		5	6	7	8	9	10
測試項目	照片						
皆由作者拍攝							
麵糊高度(cm)		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
烤後高度(cm)		3.1	3.2	3.4	4.5	4.1	3.8
高度變化率(%)		107	113	127	200	173	153
是否沾黏竹籤		是	是	否	否	否	否

(二) 數據分析 (圖表由第一指導老師使用研究結果自行繪製)

高度變化率

舒芙蕾烘焙時間與內部結構、質地的關係

時間 (分)	高度變化率 (%)
5分	107
6分	113
7分	127
8分	200
9分	173
10分	153

隨著時間增加，高度變化率逐步增加，達 200% (8 分)，後續在 9 分和 10 分時略微下降至 173% 和 153%。

3-3 分析不同材質烤模對舒芙蕾外觀和質地的影響。

$$\text{升溫速率} = \frac{T_{\text{終}} - T_{\text{初}}}{\text{時間}}$$

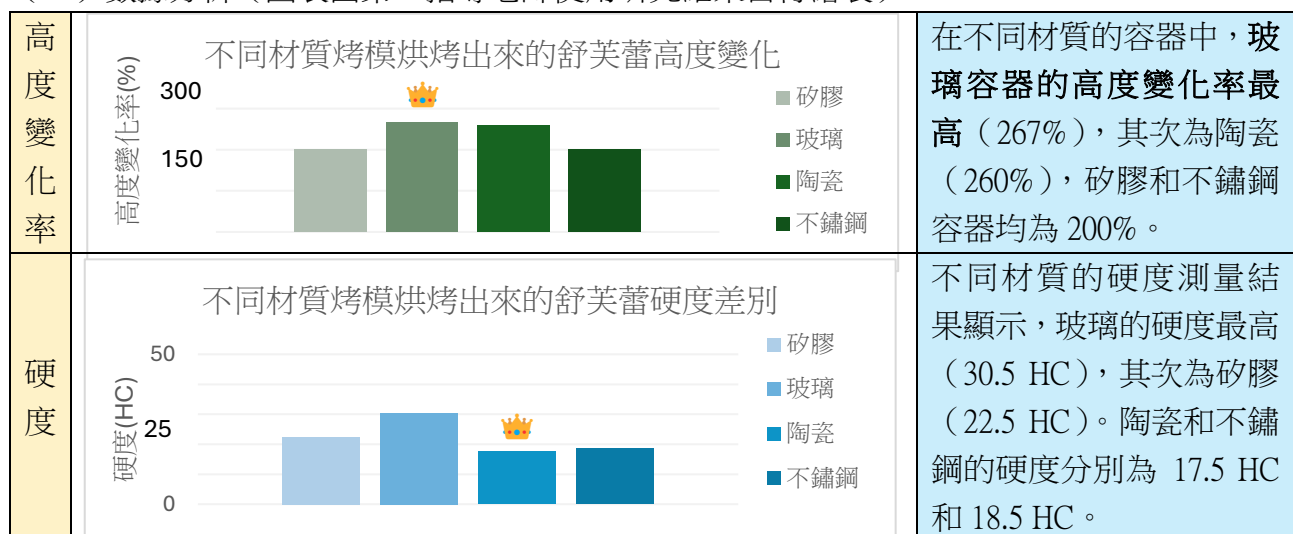
(一) 實驗結果 (表格由第一指導老師繪製)

測試項目 \ 材質種類	矽膠	玻璃	陶瓷	不鏽鋼
照片 皆由作者拍攝				
麵糊高度(cm)	0.6	0.3	0.5	0.5
烤後高度(cm)	1.8	1.1	1.8	1.5
高度變化率(%)	200	267	260	200
硬度(HC)	22.5	30.5	17.5	18.5
底面積(cm ²)	24.6	30.6	24.3	21.1

水溫 \ 加熱時間	0 分鐘	2 分鐘	4 分鐘	6 分鐘	8 分鐘	10 分鐘
矽膠	25.1℃	33.6℃	52.7℃	78.0℃	95.0℃	97.0℃
玻璃	25.6℃	34.1℃	50.0℃	70.0℃	85.0℃	90.0℃
陶瓷	25.4℃	37.8℃	76.3℃	90.0℃	98.0℃	99.4℃
不鏽鋼	25.6℃	30.6℃	64.5℃	70.0℃	80.0℃	85.3℃

材質	矽膠	玻璃	陶瓷	不鏽鋼
升溫速率 (°C/min)	7.19	6.44	7.40	5.97
每單位面積的升溫效率 (°C/cm ²)	2.92	2.10	3.04	2.82
排名	2	4	1	3

(二) 數據分析 (圖表由第一指導老師使用研究結果自行繪製)



伍、討論

一、蛋白打發的秘密

- (一) 蛋白因為含有豐富的蛋白質和水分，能打發成穩定的泡沫，形成蓬鬆的蛋白霜。蛋黃含有脂肪和少量水分，難以像蛋白那樣打發成棉花狀質地。即使將蛋液一起打發，泡沫穩定性較差，質地較粗糙。因此，發泡主要成分來自蛋白。
- (二) **高轉速可促進蛋白質展開（變性），增大表面積形成穩定氣泡（降低表面張力）。**然而過快導致氣泡破裂、蛋白質網絡不穩，降低泡沫支撐性與結構強度。
- (三) 查詢文獻資料八發現，糖或鹽的添加量超過蛋白質的 50%，會**提高滲透壓並降低水活性，使蛋白質表面水分被抽離、難以展開變性。**糖過度穩定蛋白質結構，延遲形成泡沫網絡，鹽則因提高離子強度，削弱靜電排斥，**導致蛋白質提前聚集沉澱，泡沫不穩定。**
- (四) 分次加糖比一次性加入糖更能提高蛋白的支撐力。因為分次加糖可以讓糖逐漸與蛋白充分結合，幫助穩定蛋白霜的結構，並減少糖過多時對打發效果的影響。
- (五) 沒加糖加檸檬汁的變化率為 250%，顯示檸檬汁對蛋白質結構影響大。未加糖且無檸檬汁的打發時間最長，而加糖加檸檬汁的時間最短。**加糖加檸檬汁的泡沫支撐性最佳**（3.5 cm），顯示較高穩定性。查詢文獻資料九，LWT (2007)發現，在中性環境打發蛋白時，打發過程中氣泡分佈較均勻，且泡泡壁由蛋白質交織形成的網狀結構具有適當的彈性與支撐力，提升最終體積與穩定性。

二、添加物對舒芙蕾的影響

- (一) 本實驗顯示，粉類的麩質含量明顯影響舒芙蕾的膨脹與質地。高筋麵粉膨脹率最高（350%），具良好支撐力，但口感偏實。低筋麵粉因麩質低，蓬鬆度最高（28.4%）、硬度最低（7.5），適合柔軟口感。玉米粉與太白粉無麩質，膨脹差（約 160%）、蓬鬆度低，但玉米粉硬度最高（25），可能因其易乾硬、缺乏氣孔支撐。**顯示麩質與膨脹、蓬鬆、硬度密切相關。**
- (二) **10g 全脂牛奶提供最佳膨脹效果，過多牛奶會降低膨脹效果。**低脂牛奶在相同量下（10g）蓬鬆度較高，且增加牛奶量（10g 至 20g）能提升低脂牛奶的蓬鬆度。硬度方面，10g 全脂牛奶最柔軟（5.5），而 20g 低脂牛奶硬度最高（8.5）。

- (三) 酵母粉屬於慢速但持續產氣，最適用於長時間加熱。小蘇打粉呈現遲滯型反應，且高劑量反而略降，可能因氣體過量逸出。泡打粉屬於速效型反應，高劑量可能導致氣泡過多、結構不穩，最終膨脹下降。
- (四) 從實驗 2-3 與 2-4 的數據可見，**高產氣不等於高蓬鬆**。檸檬酸與小蘇打反應雖產氣量最高，但蓬鬆高度不如產氣量較低的酒石酸氫鉀組合，推測因強酸性可能破壞蛋白結構，導致支撐力下降。**膨脹效果最佳的是產氣適中且能穩定保留氣體的組合**。
- (五) **加熱能顯著提升酸性物質與碳酸氫鈉 (NaHCO₃) 的中和反應速率**，三種酸類以檸檬酸水與的產氣效果最為明顯，碳酸氫鈉屬於限量試劑，此反應在加熱下加速進行，促進氣體生成，pH 決定速率快慢，酒石酸氫鉀的 pH 值高於理論值，主因在於其溶解度低、解離有限與呈緩衝溶液(buffer solution)特性，使溶液的酸鹼性質呈現較穩定的狀態。
- (六) 酵母對葡萄糖的利用率高於蔗糖。在缺氧條件下，酵母進行酒精發酵，蔗糖需先水解為葡萄糖與果糖，反應較慢，且澱粉無法被酵母直接利用，顯示**酵母發酵活性明顯受糖種與溫度影響**。
- (七) 與市售泡打粉相比，**自製泡打粉（酒石酸氫鉀+碳酸氫鈉）成分天然、單純，不含鋁鹽或工業酸鹽，較無健康疑慮**。市售泡打粉常含鋁成分（如硫酸鋁鈉），長期攝取可能與神經退化、腎臟負擔有關，即便爭議未定，仍應審慎攝取。
- (八) **舒芙蕾的外層會因加熱而形成硬殼，這個過程稱為「成殼」，本研究氣體產生速率與酸性物質 pH 值有關，成殼速率與溫度有關**，以下為舒芙蕾成殼速率與膨脹關係整理表：

情況	說明	結果	本研究之例子
成殼速率太快	表面迅速凝固，內部氣體尚未充分產生或擴散。	內壓不足→無法撐開殼→膨脹受限，高度較低。	1. 檸檬酸搭配碳酸氫鈉 $\frac{1}{3}\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 + \text{NaHCO}_3 \rightarrow \frac{1}{3}\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$ 2. 醋酸搭配碳酸氫鈉 $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{NaHCO}_3 \rightarrow \text{CH}_3\text{COONa} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$
理想情況	成殼與產氣同步，表面在氣體高峰後定型，內部結構得以撐起整體。	維持高膨脹與穩定性→ 高度最佳 。	1. 市售泡打粉 2. 酒石酸氫鉀+碳酸氫鈉 $\text{KC}_4\text{H}_5\text{O}_6 + \text{NaHCO}_3 \rightarrow \text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$
成殼速率太慢	保持柔軟，膨脹初期順利。但若時間過長，氣體逸散、泡沫坍塌。	結構無法固定 → 膨脹後下陷 → 最終高度下降。	1. 酵母粉+葡萄糖 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \xrightarrow{\text{酵母}} 2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2\text{CO}_2 \uparrow$ 2. 酵母粉+蔗糖 $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{酵母}} 2\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 4\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 4\text{CO}_2 \uparrow$

三、烘焙條件對舒芙蕾的影響

- (一) 隨著溫度升高，高度變化率逐步增加，達 127%（180°C、190°C），但在 200°C 時略微下降至 113%，顯示過高溫度會限制膨脹。硬度則隨著溫度的升高顯著增強，150°C 時硬度低、內部蓬鬆度佳。
- (二) 隨著烘烤時間增加，高度變化率逐漸提升，達 200%（8 分），但在 9 分和 10 分時略有下降，顯示過度烘烤可能影響膨脹效果。5 到 6 分鐘時，麵糊尚未熟透，膨脹效果較弱。
- (三) 當容器導熱效率過高時，如不鏽鋼，底部與側邊迅速升溫，導致氣泡過早膨脹，蛋白質與澱粉尚未凝固即產生結構撐開，最終表面膨脹後塌陷、內部濕軟，造成整體結構鬆弛、硬度偏低。此外，快速升溫使加熱集中於局部，表面無法均勻脫水成殼，失去支撐力；膨鬆劑反應過快產生氣體逸散，也難以穩定膨脹；蛋白質未完全變性亦影響組織形成，導致舒芙蕾蓬鬆但不結實，硬度下降。以上皆顯示，過快的導熱雖促進膨脹，卻不利於穩定結構的建立，因此應選擇導熱效果較差如陶瓷、玻璃容器盛裝舒芙蕾麵糊。

陸、結論

- 一、攪拌轉速越快，蛋白越容易打發，將空氣輕易打入蛋白中，但高速攪拌的蛋白因密度低、結構不穩，較容易離水，支撐性也較差，攪速應超過 380 RPM。
- 二、在 20 g 蛋白中適量添加砂糖（5~10g）與低濃度氯化鈉（5g）可有效提升蛋白泡沫的起泡性、穩定性與支撐性；但添加氯化鈣超過 5g 後，泡沫高度、支撐性與打發情形皆大幅下降，顯示其對蛋白泡沫結構具明顯抑制作用。
- 三、初期在打發蛋白時不加糖有助蛋白質自由展開，形成初始泡沫結構。多次分段加糖（3~4 次）可控制溶解速率，穩定界面張力，有效強化泡沫支撐力並避免局部結晶。少次加糖（2 次）雖可縮短打發時間，易達高蓬鬆度，但穩定性較差。
- 四、檸檬汁能提供弱酸性環境（pH 約 4.5~5.5），促進蛋白中蛋白質正負電荷平衡，有利形成穩定泡沫結構。與砂糖合用可縮短打發時間，提升泡沫的熱穩定性與氣泡黏附性。
- 五、高筋麵粉蛋白質約 13%，可形成強韌麩質網絡，支撐氣體生成與結構定型。低筋麵粉蛋白質約 8%，麩質弱，提供更柔軟鬆散組織，利於氣體膨脹。玉米粉/太白粉無麩質，缺乏網絡支撐，吸水快但無彈性，結構鬆散易塌陷。
- 六、重視柔軟度與口感均勻，且希望泡沫穩定不易塌陷，建議採用全脂牛奶，並控制用量在

適中（例如 10g 左右），以平衡脂肪對結構與柔軟度的影響。若偏重於發泡程度和膨脹高度，且能接受硬度稍高的口感，則可以選擇低脂牛奶。

七、酵母產氣慢且受溫控，有利蛋白成殼。小蘇打遇強酸（如醋酸、檸檬酸）產氣過快，恐導致舒芙蕾膨脹破裂。建議使用酸性較弱（ $\text{pH} > 3$ ，如酒石酸鉀）成分，以延緩產氣、配合蛋白穩定，有助膨脹均勻與結構完整。

八、市售泡打粉常用於烘焙業平衡產氣時機，但若含鋁或使用過量亦有風險。自製泡打粉成分單純、產氣可控，更符合健康與天然取向。

九、最適膨脹溫度為 150°C ：可促進氣體膨脹與蛋白質變性同步進行，結構穩定，硬度低。高於 150°C 會提升硬度，但氣體快速逸出或未能擴張完全，蓬鬆度下降。

十、容器導熱效率過高（如不鏽鋼）雖能促進舒芙蕾快速膨脹，但易造成蛋白質與澱粉尚未定型即撐開結構，導致表面塌陷、內部濕軟、硬度下降，整體支撐性與穩定性不佳；相較之下，導熱較慢的陶瓷與玻璃容器能促進均勻受熱與緩和膨脹，有助維持舒芙蕾的蓬鬆結構與完整成形。

柒、參考文獻資料

一、鬆軟梳乎厘 蛋白要打得準 慢速打發漸加快 適時收手

<https://today.line.me/hk/v2/article/RWWOoe>

二、大同大學化工與生物科技學系 普通化學實驗 氫氣的莫爾體積

（李雅晴、馮彩鳳 2023 製、林薇宣 2024 修正）

三、全國第 54 屆國小組生活與應用科學科蛋白棉花糖～蛋白霜之研究

<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/54/pdf/091407.pdf>

四、新北市第 60 屆高級中等學校組農業與食品學科吃軟不吃硬—探討麵粉與膨鬆劑對馬芬蛋糕結構的影響 <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/60/pdf/NPHSF2020-052209.pdf>

五、中華民國第 54 屆中小學科學展覽會國小組 生活與應用科學科 蛋白棉花糖～蛋白霜之研究 <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/54/pdf/080806.pdf>

六、中華民國第 60 屆中小學科學展覽會蛋白生"氣"了！~蛋白起泡性之探究

<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/60/pdf/NPHSF2020-080207.pdf>

七、蛋白老是打不發？這些常犯的小失誤一定要避開 <https://food.ltn.com.tw/article/7268>

八、Lopez-Malo, A., & Alzamora, S. M. (2015). Water activity and microorganism control: Past and future. In G. V. Barbosa-Cánovas, A. J. Fontana Jr., S. J. Schmidt, & T. P. Labuza (Eds.), *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications* (2nd ed., pp. 245 – 262). Springer.

https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1635-8_12

九、Tang, C.-H., Chen, L., & Li, X.-R. (2007). Foams and emulsions stabilized by soy protein isolate: Effects of high-pressure homogenization and pH. *LWT - Food Science and Technology*, 40(6), 1116 – 1123. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.07.010>

【評語】 080215

1. 本作品以舒芙蕾的「膨脹—成殼—定型」為研究核心，探討蛋白打發變因；配方與膨鬆劑交互作用；烘焙條件與模具導熱三大實驗面向。量測指標涵蓋起泡性、離水性、支撐性、蓬鬆度（孔隙分析）、硬度與 CO₂ 產氣速率等，展現科學探究精神與烘焙實作能力。
2. 建議每組實驗重複多次，並納入誤差分析或基本統計處理，提升數據說服力。
3. 以量筒量測之解析度受限，很難讀取到更精確數值，建議可使用刻度更精確之量筒、自動滴定管，或質量法搭配天平，以提升量測精度。
4. 從事科學研究與實驗設計時須留意安全，建議補充酸鹼液與酵母廢液處置 SOP，並列明個人防護措施，以符合實驗室安全規範。
5. 希望學生在從事科學研究的同時也同時學習正確的實驗紀錄（日誌）書寫方式，例如：每次記錄須標明日期與時間、避免使用鉛筆或電腦列印的方式、數據須標示單位，並注意實驗條件（如溫度、時間、使用的材料等）應詳實記錄、實驗步驟要明確，以方便後續比對與分析。這些習慣將有助於建立科學紀律，也讓成果更具可信度與可重現性。

作品海報

舒芙蕾的蓬鬆之謎：



探索「舒芙」的高度秘訣



摘要

本研究以舒芙蕾為膨脹模型，探討蛋白質打發、添加物及烘烤條件等多重因素。提高攪速促進蛋白質變性並包入空氣，形成穩定泡沫；糖分次加入可提升黏度和界面穩定性。NaCl會增加離子強度，破壞蛋白靜電排斥，降低泡沫穩定；CaCl₂中Ca²⁺促使蛋白過度聚合，抑制起泡。檸檬汁有機酸使蛋白膠體粒子凝聚，提升穩定性。低筋麵粉麩質低有助氣體膨脹，乳脂穩定氣泡界面，過量影響網狀結構。膨鬆劑方面，酵母產氣慢適合長時烘焙，小蘇打與強酸反應過快易導致結構坍塌，建議搭配pH>3弱酸如酒石酸鉀，類似泡打粉，平緩產氣速度。烘烤溫度以150℃佳，高溫長時使硬度增加、蓬鬆度下降。陶瓷容器導熱慢有利麵糊膨脹成型。蛋白泡沫穩定性與膨鬆劑的協同作用是舒芙蕾成功膨脹的關鍵。

研究動機



(取自日本全家官網)



(取自canva圖像)

研究目的

(一) 蛋白打發的秘密

攪拌速率、糖與鹽類添加量、添加時機、酸性物質添加

(二) 添加物對舒芙蕾的影響

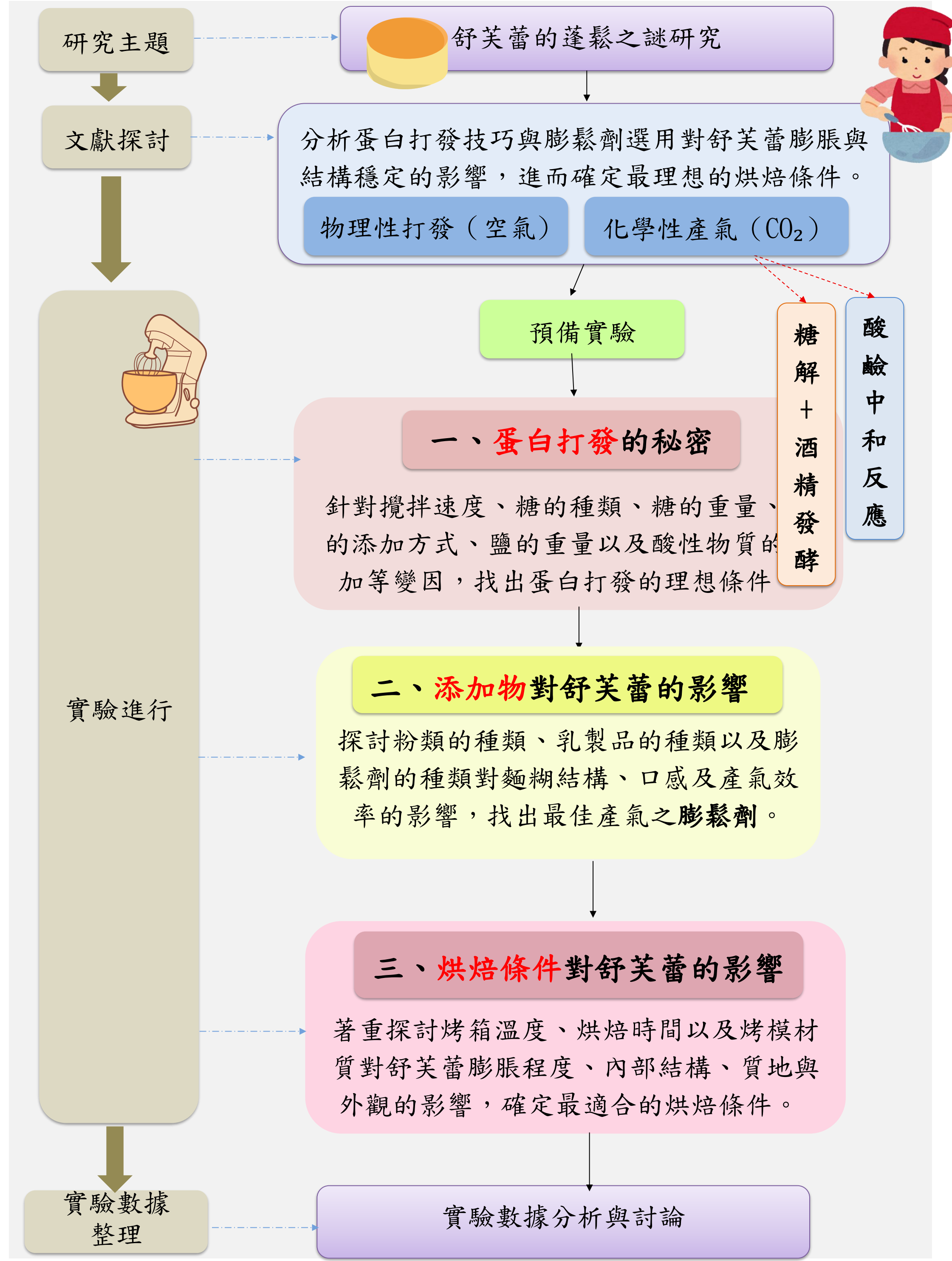
粉類種類、乳製品類型、膨鬆劑選擇

(三) 烘焙條件對舒芙蕾的影響

烤箱溫度、烘焙時間、烤模材質

研究架構

(以下表格均由第一指導老師繪製)



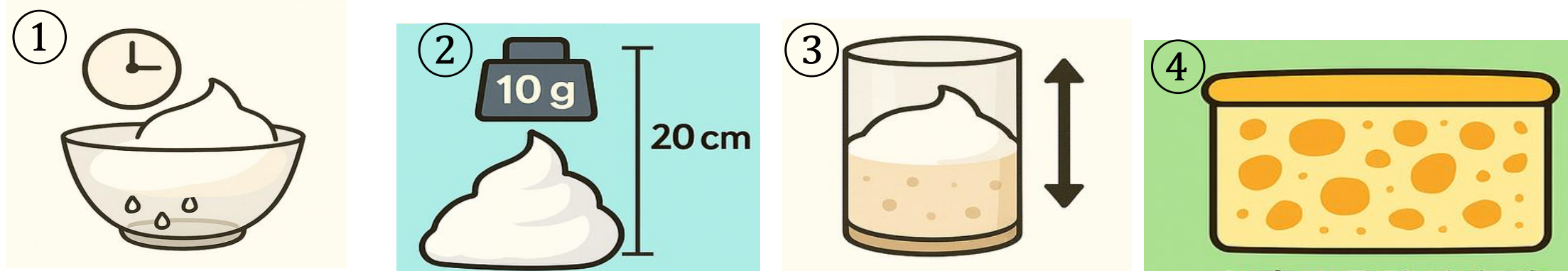
研究過程

(一) 檢測蛋白霜的方法

- 離水性：蛋白霜靜置20分鐘後析出液體體積(mL)
- 支撐性：10克重物自20公分高處落下後，蛋白霜壓縮後高度(cm)
- 起泡性： $[(\text{泡沫最終高度} - \text{初始液面高度}) \div \text{初始液面高度}] \times 100\%$
- 蓬鬆度：剖面中孔隙總面積 ÷ 剖面總面積

實驗示意圖

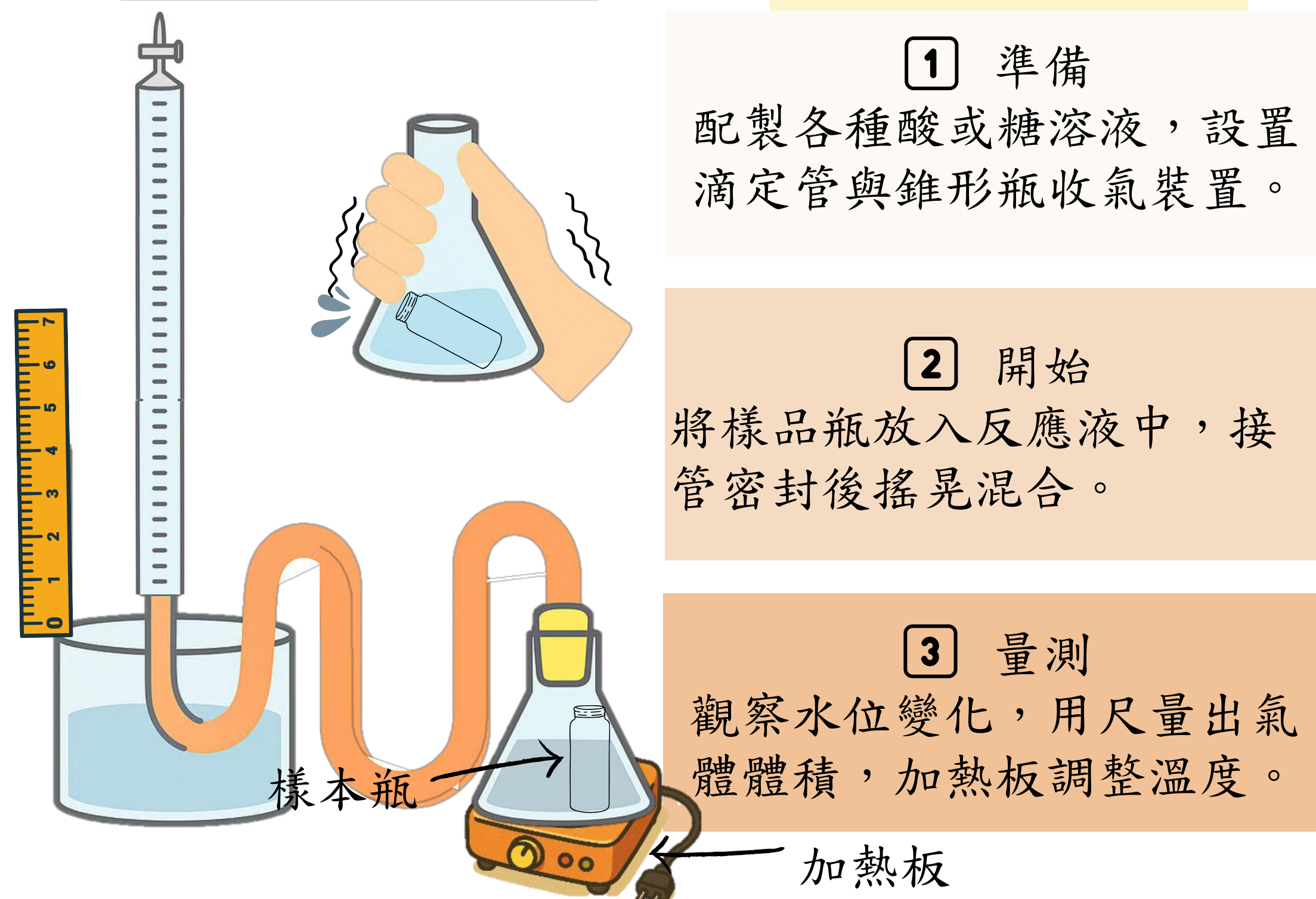
(ChatGPT協助繪製)



(二) 檢測蓬鬆劑產氣效率的方法(ChatGPT、Canva協助繪製)

實驗示意圖

實驗步驟

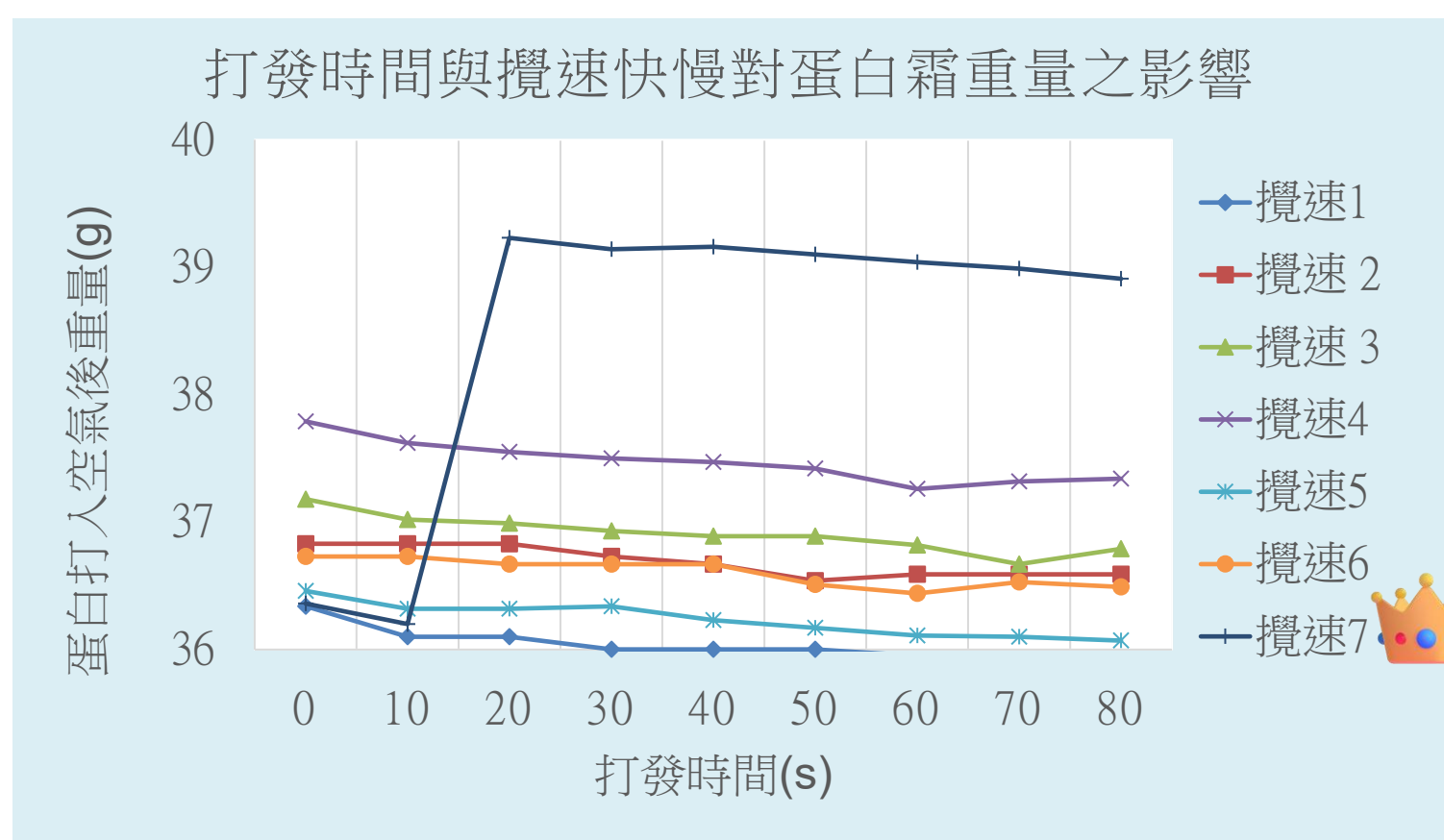


研究結果

(以下圖表均由第一、第二集及第三作者和第一指導老師繪製)

實驗1-1

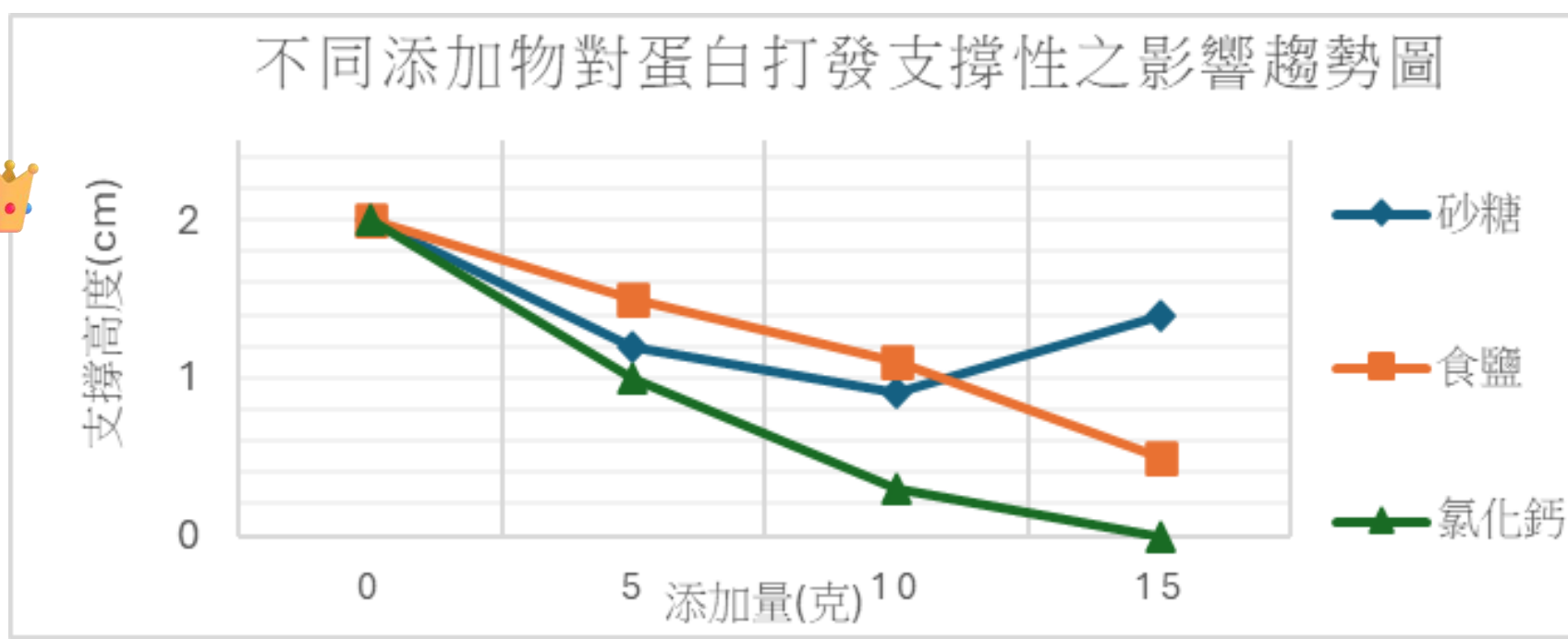
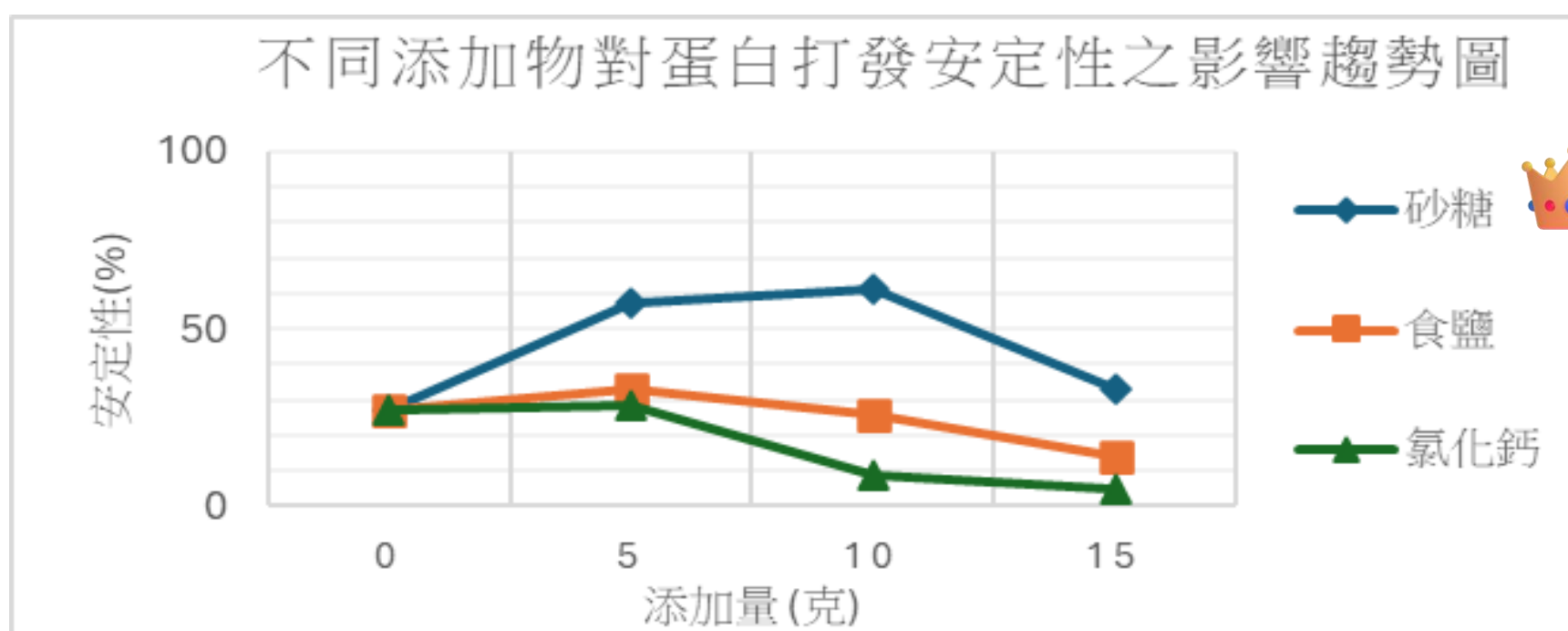
◇實驗目的：探討蛋白打發過程及攪拌速度對泡沫穩定性的影響。



◆實驗結果：打發效果明顯的是「攪速7」，是唯一明顯增加重量的速率，代表蓬鬆程度最強。離水量最低的是「攪速1」，但「攪速1」打發效果差，不夠蓬鬆，「攪速4」有最佳支撐性，攪速7打發快，但支撐性略差。折衷效果最佳為攪速7，離水量不是最高、足夠支撐且泡沫多。

實驗1-2、1-3

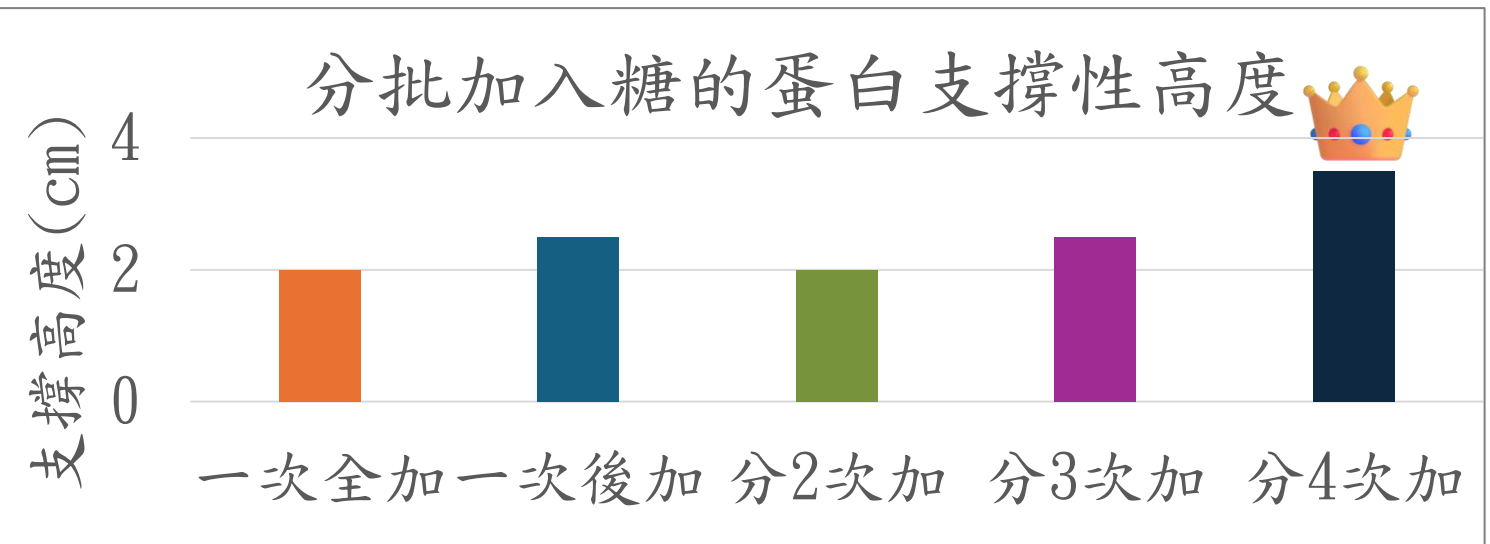
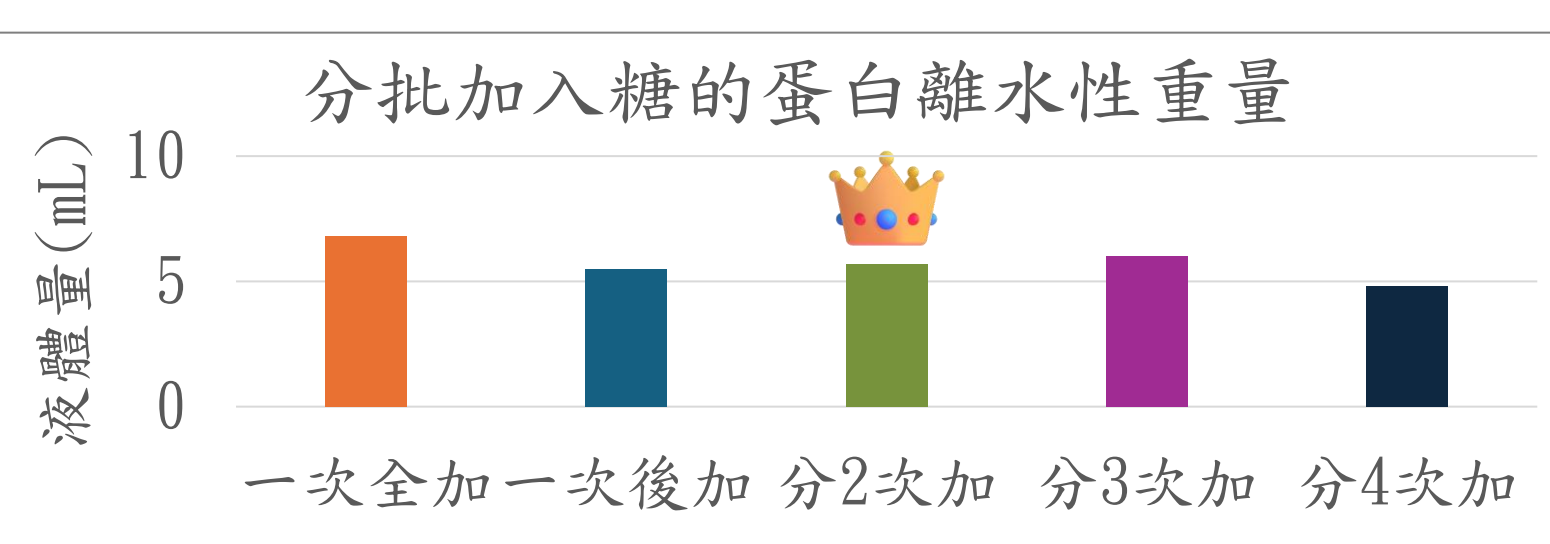
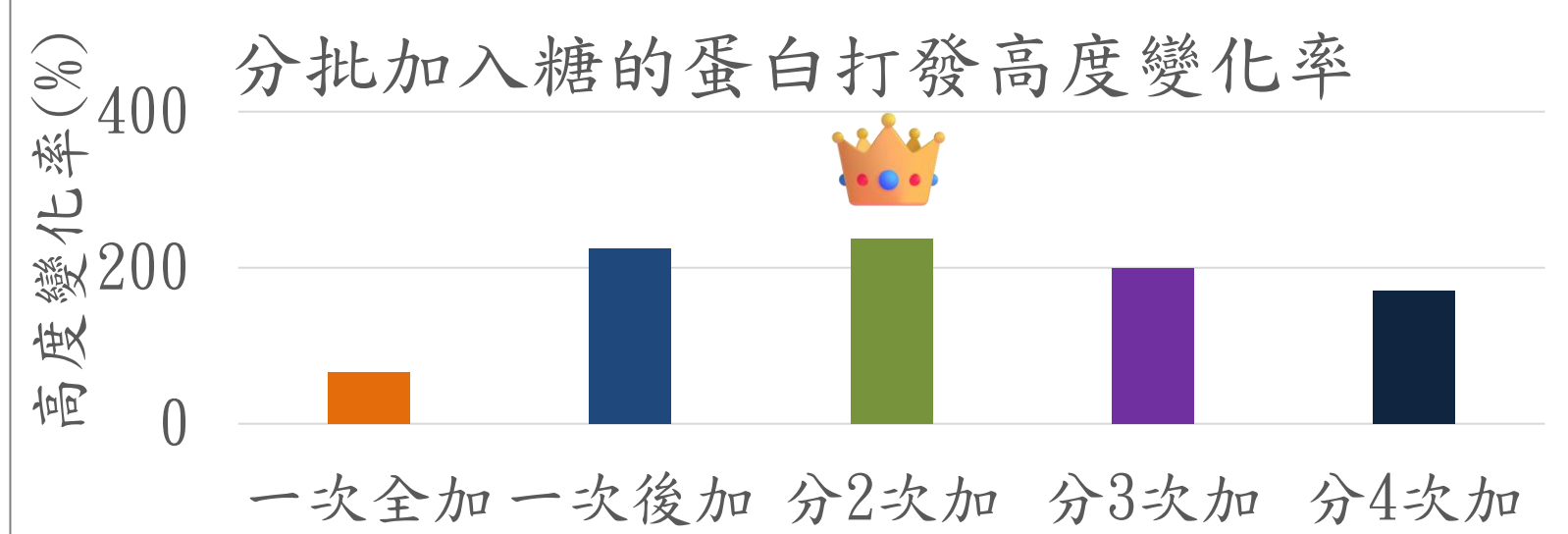
◇實驗目的：探討加入的砂糖、食鹽、氯化鈣量對蛋白打發過程中的影響，分析對蛋白質結構、穩定性及打發效果的作用。



◆實驗結果：隨著砂糖添加量增加，泡沫安定性呈現倒U型變化；而食鹽與氯化鈣的安定性普遍較差。雖然在5g與10g添加量下，食鹽的支撐性略高於砂糖，但差異不大。當氯化鈣添加量達15g時，泡沫完全崩解，支撐性降為0。

實驗1-4

◇實驗目的：探討分批加入糖對蛋白打發過程中的影響，分析其對蛋白質結構、穩定性及打發效果的作用，並比較一次性加入與分批加入的差異。



◆實驗結果：綜合起泡性、離水性與支撐性三項指標，「分四次加糖」的打發方式最為理想。雖然起泡性不是最高，但泡沫細緻穩定，離水最少，支撐性也最佳，能有效維持蛋白霜的蓬鬆高度。

實驗1-5

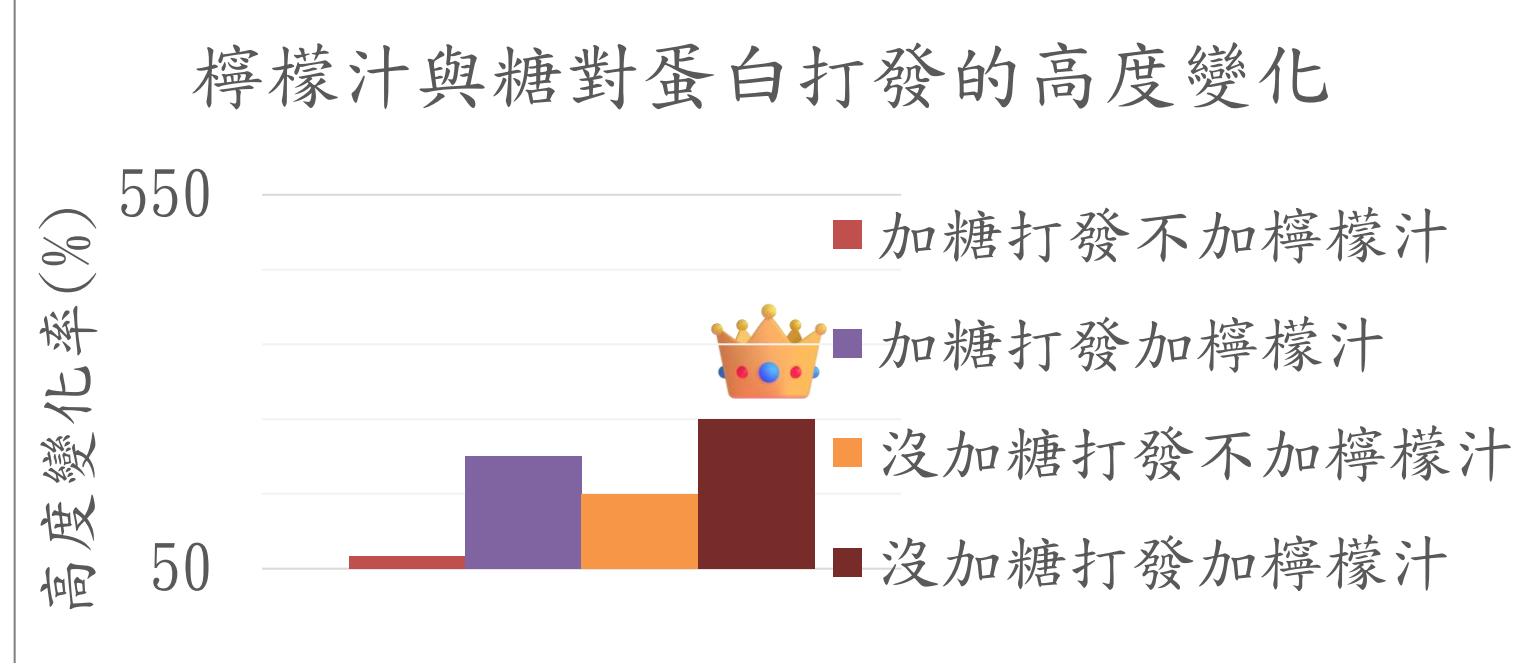
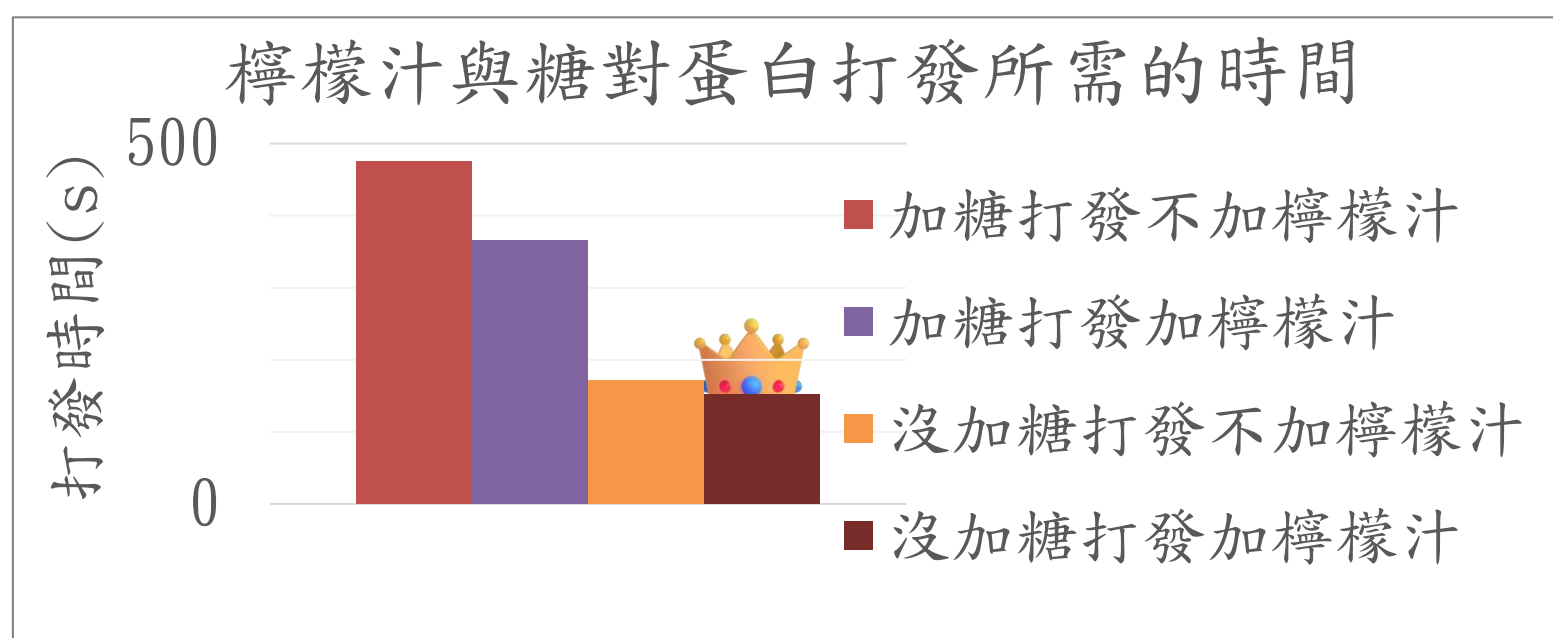
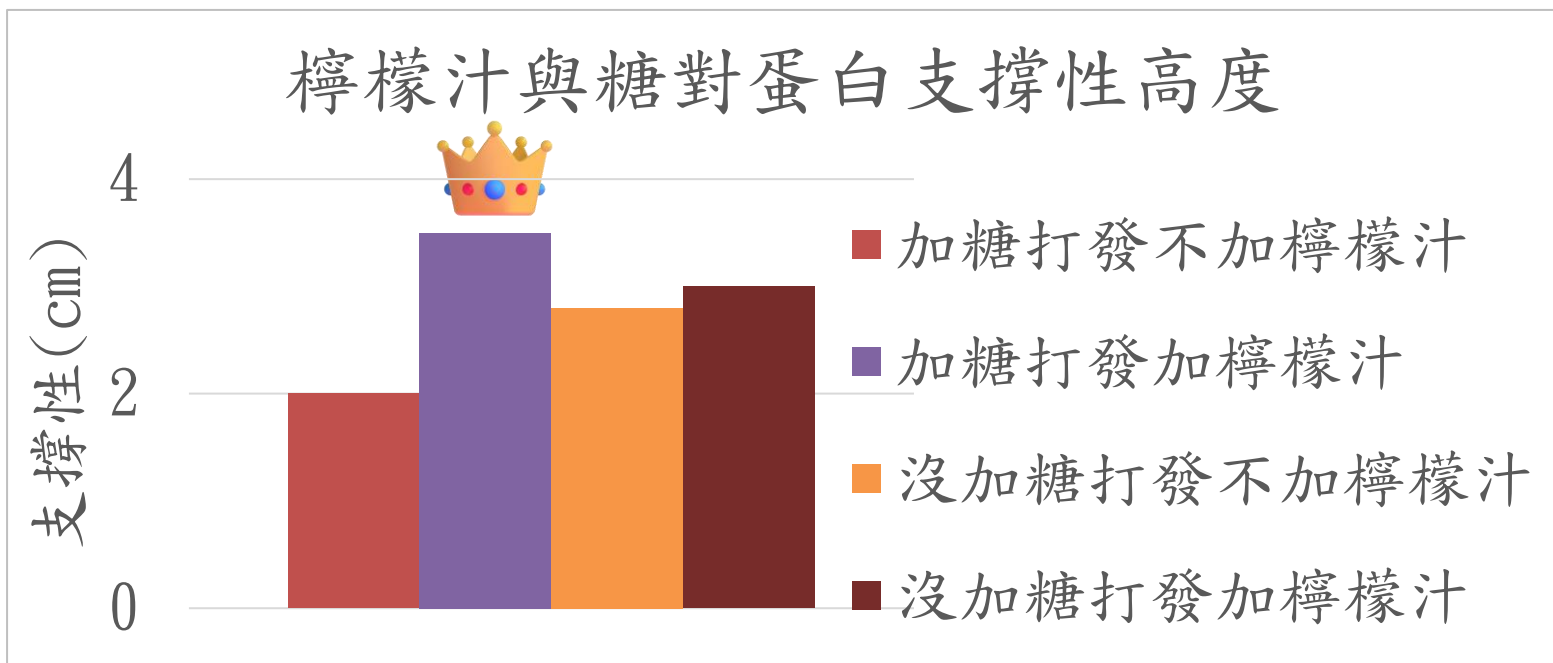
◇實驗目的：探討不同糖類（單醣、雙糖、多糖）對蛋白打發效果的影響，分析糖類種類對蛋白結構、穩定性及打發速度的作用。

糖的種類	單醣—葡萄糖	雙糖—蔗糖	多糖—澱粉
蛋白重量變化率（%）	-9	2.5	-8.7
蛋白霜的起泡性（%）	340	120	300
蛋白霜的離水性（g）	1.3	0.7	0.2
蛋白霜的支撐性（g）	2.1	0	0.3

◆實驗結果：葡萄糖最能提升蛋白霜高度與支撐性，離水性佳；蔗糖效果較差，支撐性最低。

實驗1-6

◇實驗目的：探討加入檸檬汁對蛋白打發過程中的影響，分析檸檬汁對蛋白霜穩定性、打發速度及結構的作用。



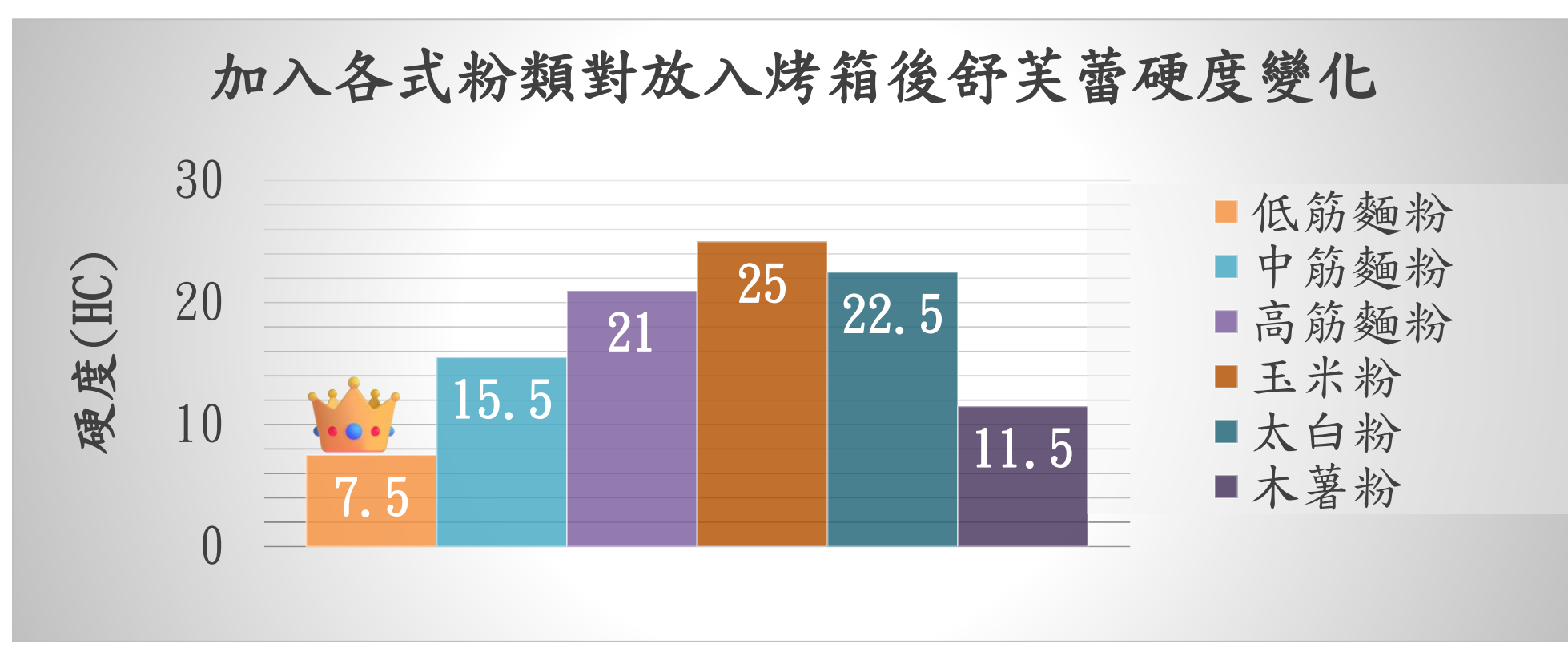
◆實驗結果：「加糖＋加檸檬汁」組合在起泡性（200%）、高度（3.0 cm）與支撐性（3.5 cm）表現穩定，最適合打發蛋白霜。「不加糖＋加檸檬汁」雖起泡性（250%）與高度（3.5 cm）更高，但支撐性較低（2.5 cm），較難維持蓬鬆。

實驗2-1

◇實驗目的：分析不同粉類對麵糊結構、口感和烘焙後產品質地的影響，探討粉類的選擇如何影響舒芙蕾的質感和結構。

粉類	麩質含量（約值）
低筋麵粉	7%～9%
中筋麵粉	9%～11%
高筋麵粉	11%～13.5%
玉米粉	0%（無麩質）
太白粉	0%（無麩質）
木薯粉	0%（無麩質）

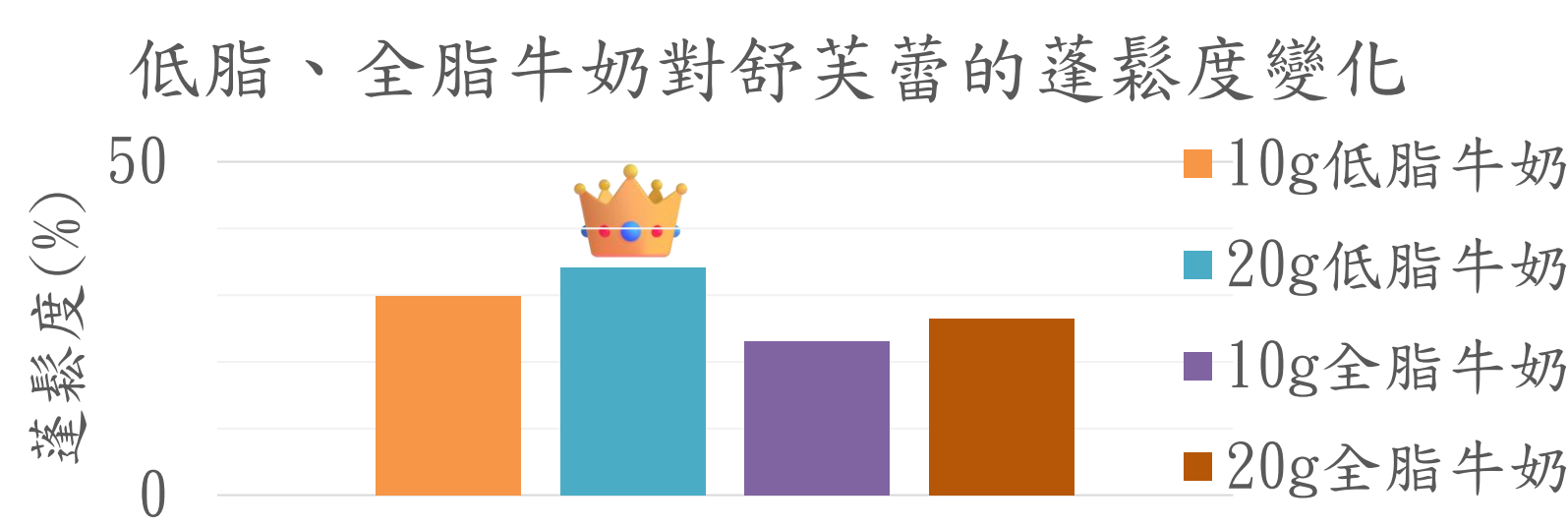
表一、常見粉類與麩質含量一覽表
(資料來源：美國農業部 USDA 食品資料庫)



◆實驗結果：低筋麵粉表現最佳，具最高蓬鬆度（28.4%）、低硬度（7.5 HC）與高起泡性（266%），最適合製作蓬鬆柔軟的產品。高筋麵粉雖起泡性最高（350%），但硬度高、蓬鬆度低，不利蓬鬆。木薯粉為次佳，起泡性與硬度適中，但蓬鬆度略低。

實驗2-2

◇實驗目的：研究全脂、低脂牛奶在舒芙蕾中的作用，分析其對口感、柔軟度、風味增強及整體質感的影響。



◆實驗結果：10g低脂牛奶表現最佳，起泡性高（227%）、蓬鬆度佳（29.9%）、硬度低（7.0 HC）。10g全脂牛奶雖起泡性高（240%），但蓬鬆度較低（23.0%）。20g低脂牛奶蓬鬆度高（34.1%），但起泡性差（125%）。因此，10g低脂牛奶為最佳選擇。

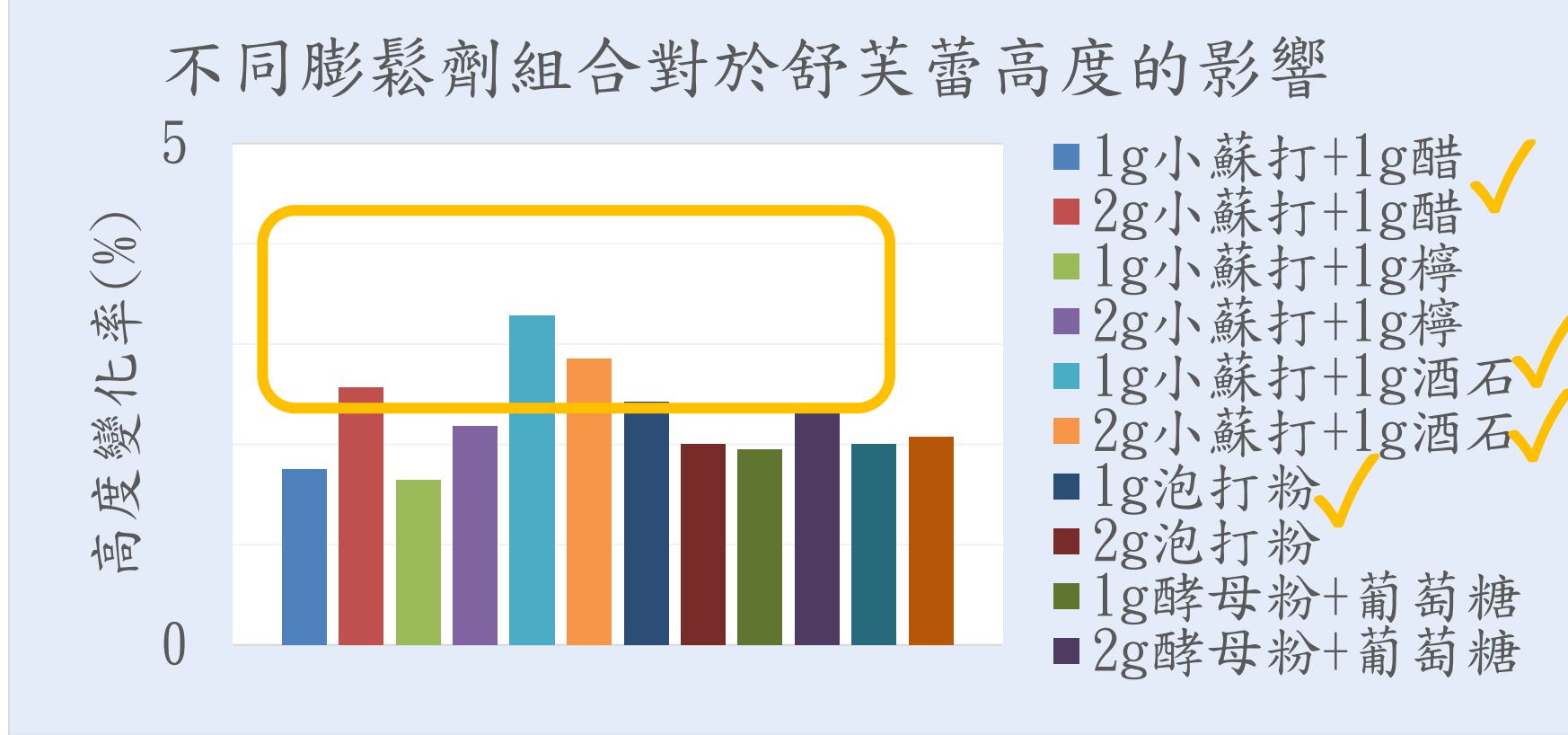
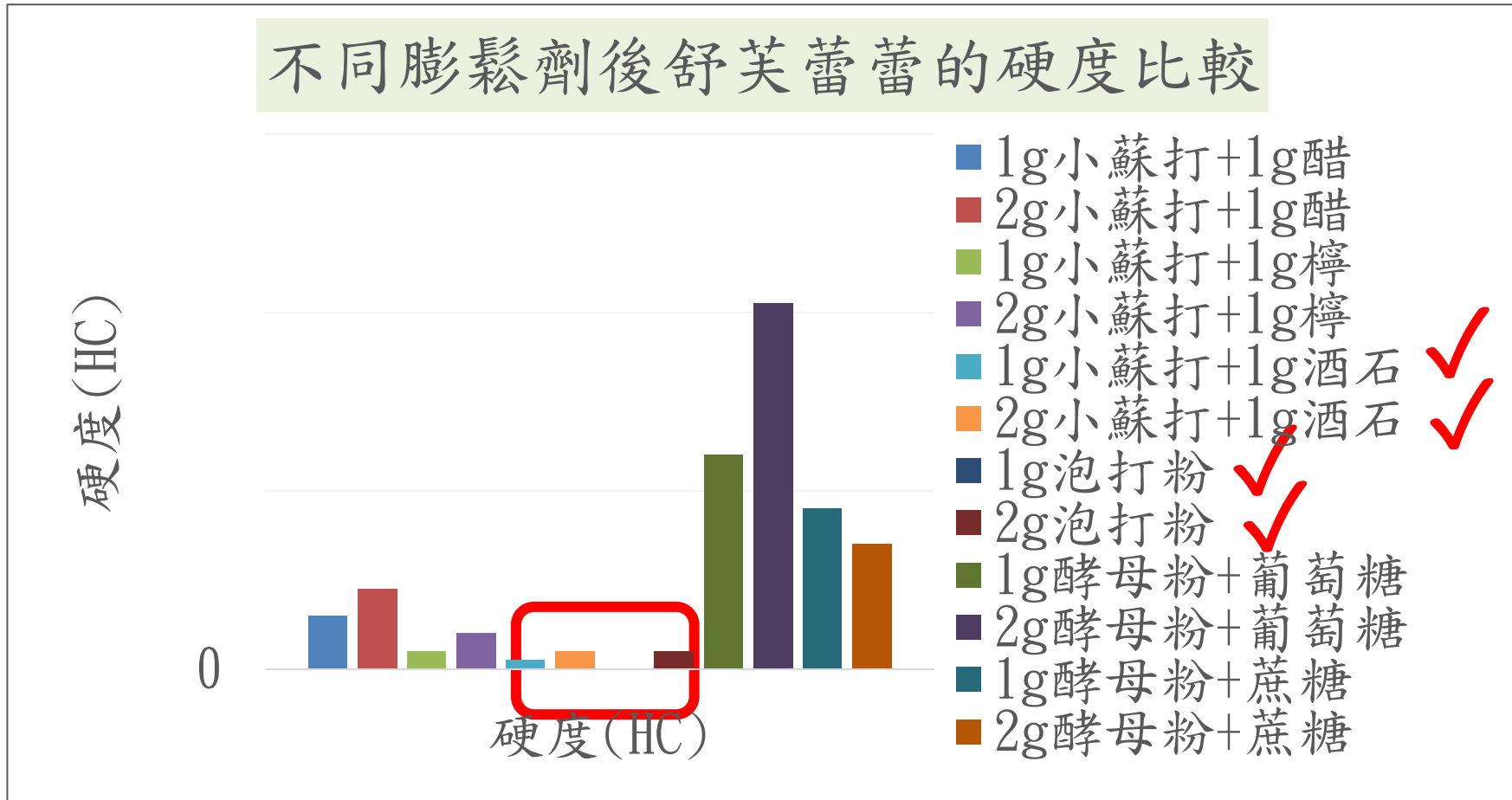
實驗2-3

◇實驗目的：探討不同膨鬆劑（泡打粉、小蘇打粉、酵母粉）產氣效率對舒芙蕾膨脹性與成型效果的影響。

項目	化學式	類型	0.1 M水溶液 pH 值	酸性強弱
檸檬酸	<chem>OC(=O)CC(O)(C(=O)O)C(=O)O</chem>	三元羧酸	約 2.1	1
醋酸	<chem>CC(=O)O</chem>	一元羧酸	約 2.9	3
酒石酸氫鉀	<chem>KC4C(O)(C(=O)O)C(O)C(=O)O4</chem>	有機酸鹽	約 2.6 - 2.8	2

表二、與小蘇打反應的三種酸類化學特性總覽表
(資料來源：維基百科)

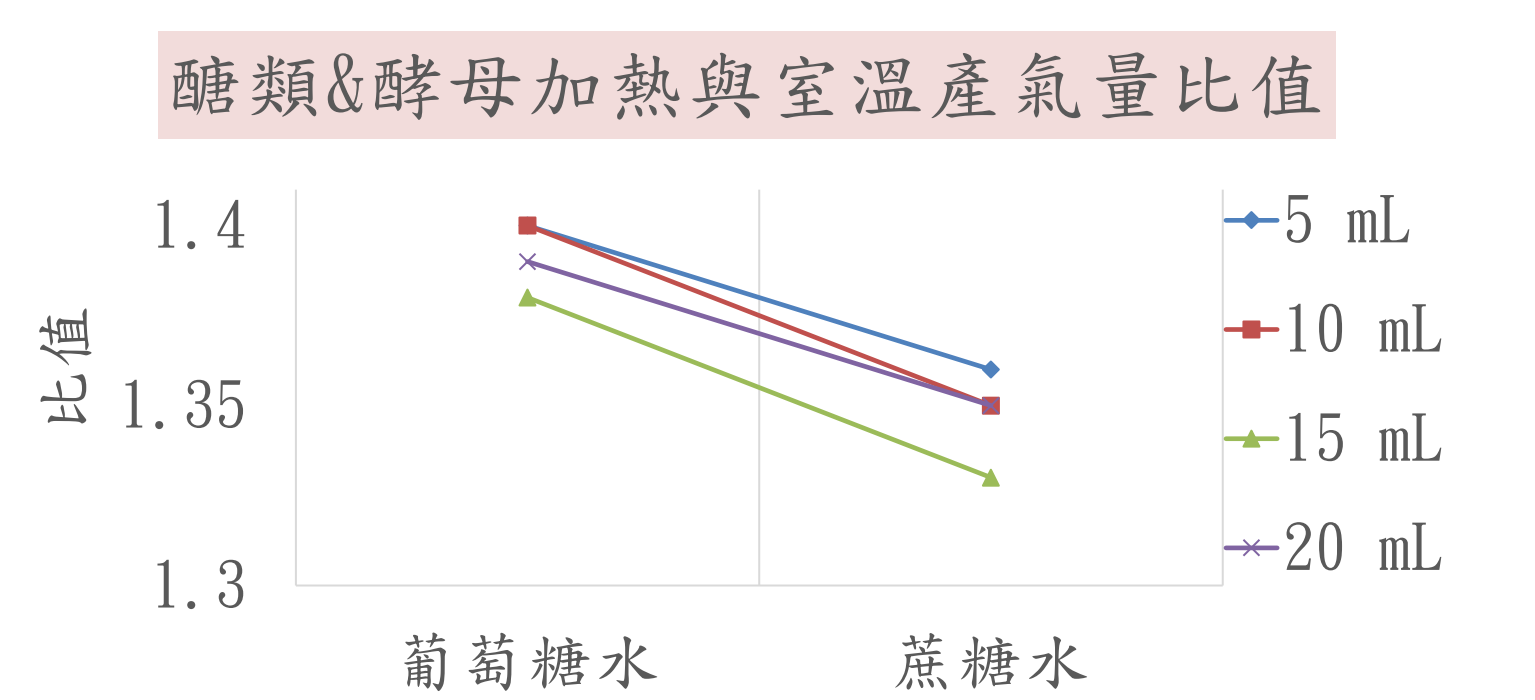
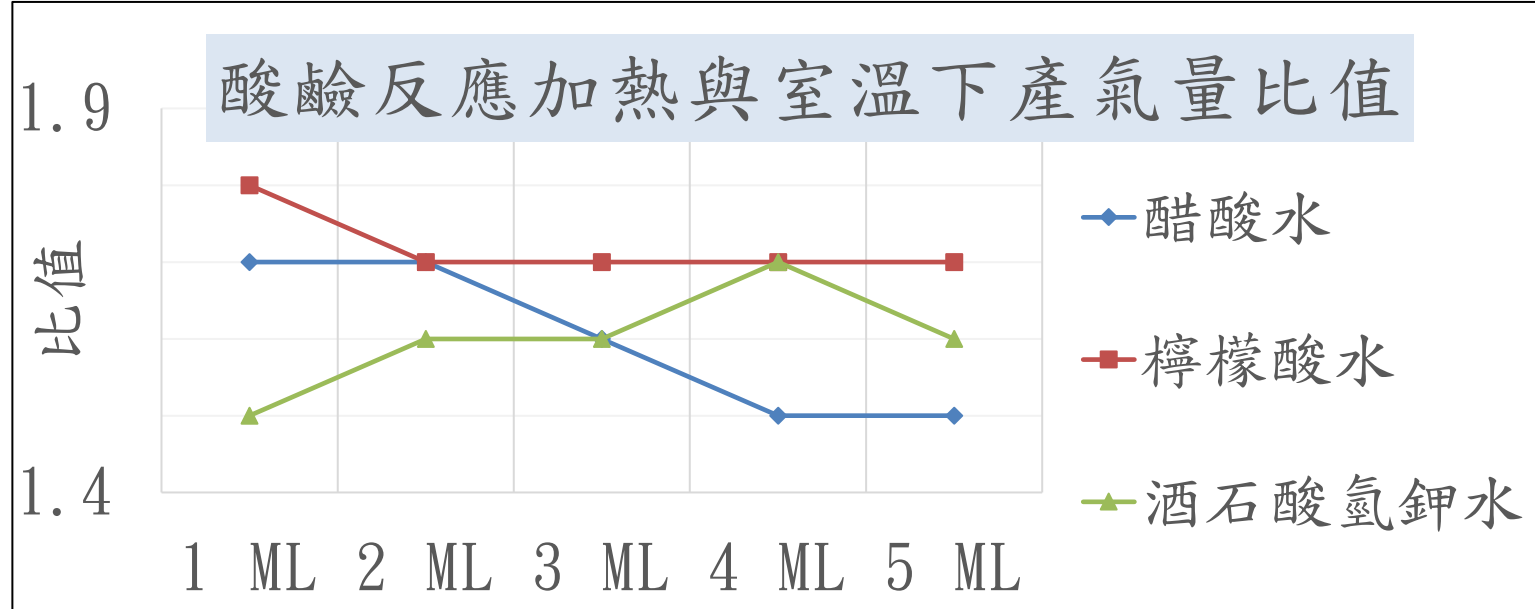
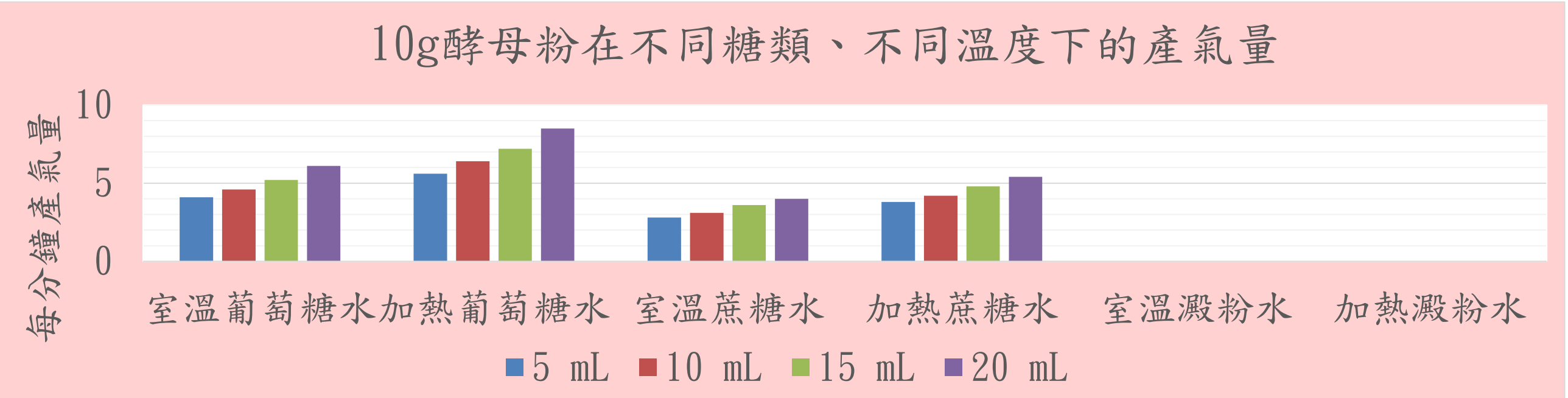
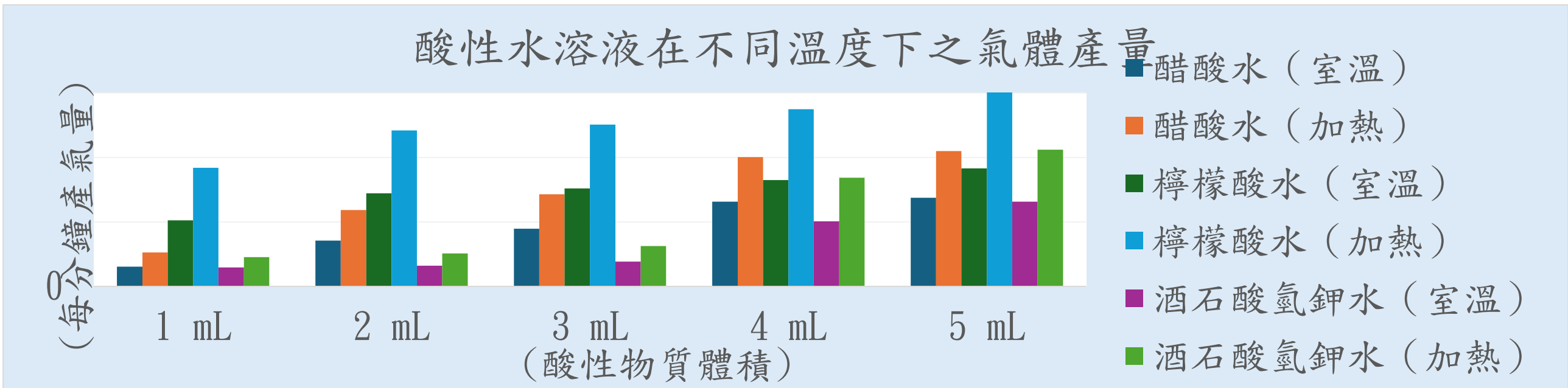
★在所有配方中，酒石酸與小蘇打的搭配效果最佳，產生的氣體最多、膨脹最大。相比之下，檸檬酸與小蘇打在相同重量下膨脹效果最弱，因檸檬酸為三元酸，與小蘇打反應迅速，膨脹一度達到高峰，但氣體逸散，最終膨脹效果較差。



◆實驗結果：硬度:1g小蘇打+1 g 酒 < 1g小蘇打+2g酒 < 1g泡打粉< 2g小蘇打+1g醋；高度前四名為1g小蘇打+1g酒>1g小蘇打+2g酒 > 2g小蘇打+1g醋 > 1g泡打粉。綜合來看，1g小蘇打+1g酒不僅在硬度（0.5 HC）上表現最佳，烤後高度（4.6 cm）也排名第一，顯示其氣泡結構穩定且輕盈。1g小蘇打+2g酒在硬度（1.0 HC）和烤後高度（4.0 cm）方面也表現良好，穩定性較高。

實驗2-4

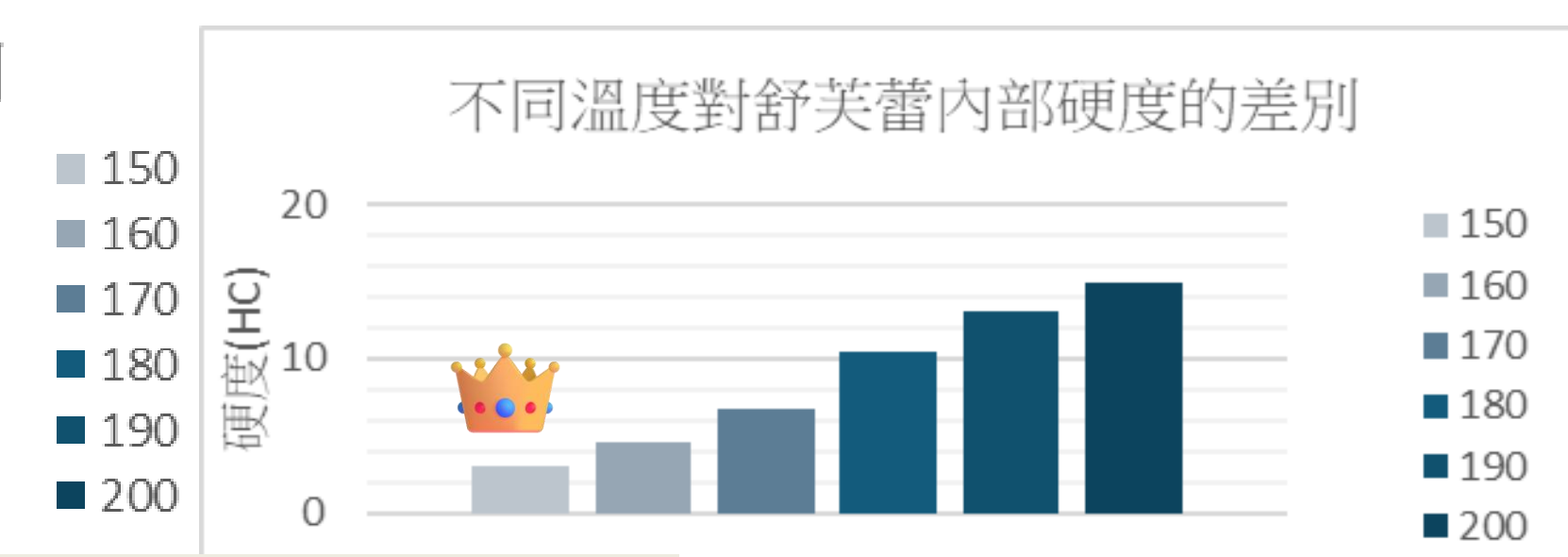
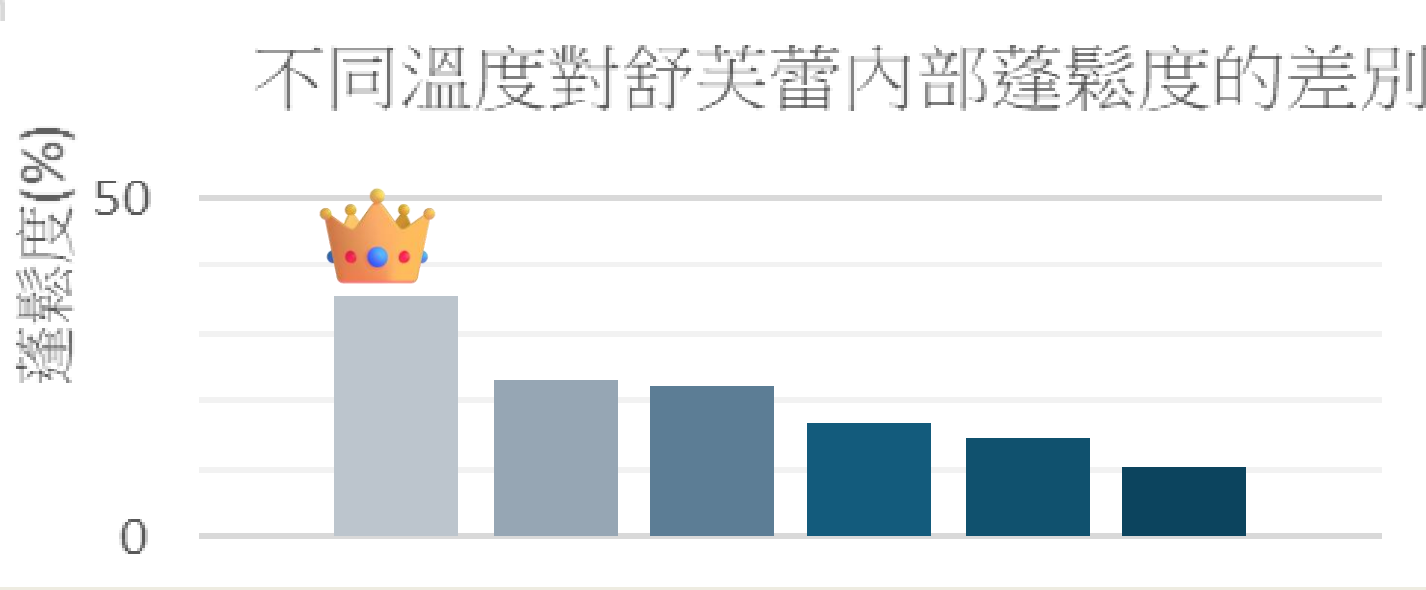
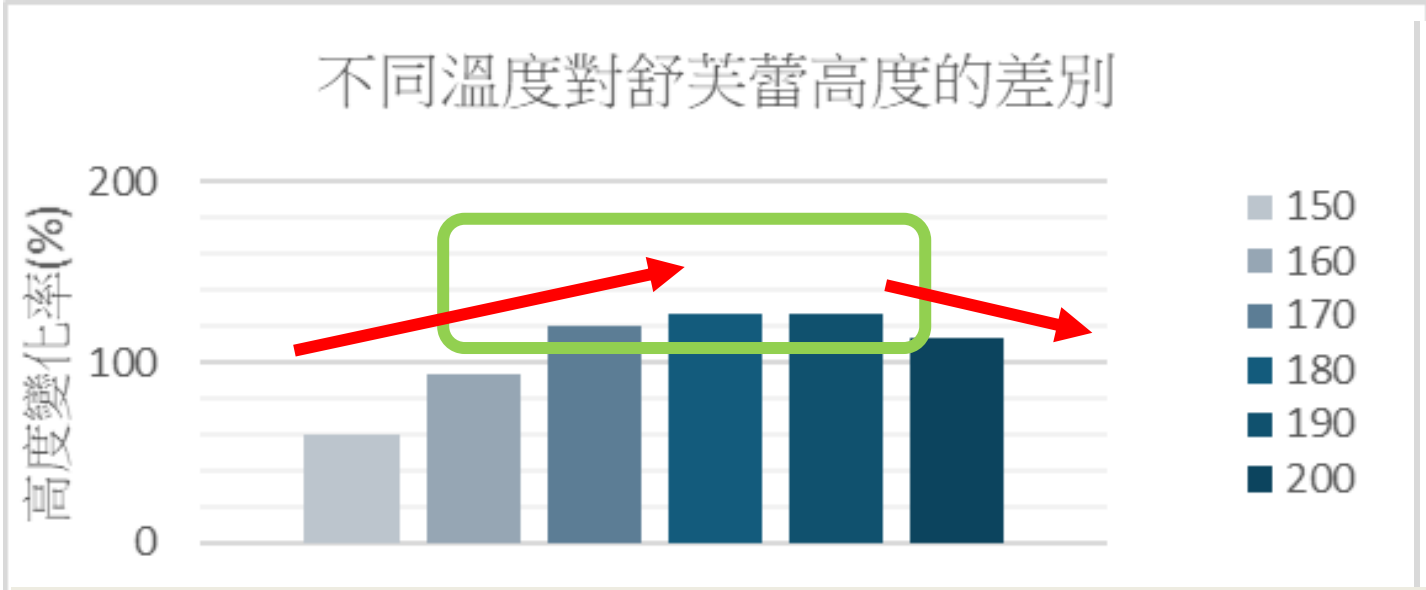
◇實驗目的：探討酸鹼反應及酵母在不同溫度和醣類條件下的一分鐘產氣速率。



◆實驗結果：1. 加熱能顯著加速酸鹼反應，提升產氣效率。檸檬酸反應最劇烈，產氣量增幅約1.7倍，其次為醋酸與酒石酸氫鉀。2. 加熱至35℃可提升酵母產氣量，葡萄糖與蔗糖水均增約1.35倍，澱粉水無產氣，顯示酵母需可發酵糖，且溫度促進代謝。

實驗3-1

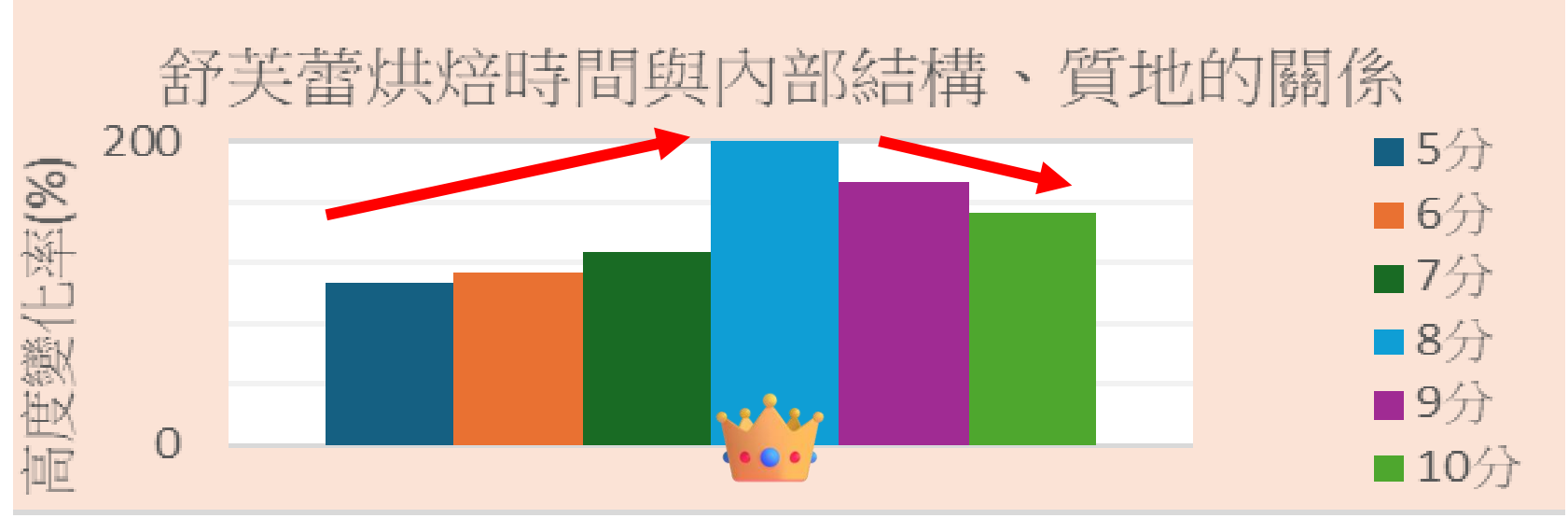
◇實驗目的：探討不同烤箱溫度對舒芙蕾膨脹、上色與口感的影響，找出最佳烘焙溫度。



◆實驗結果：隨溫度升高，膨脹先升後降，蓬鬆度降低，硬度則由3增至15，結構變硬易塌。

實驗3-2

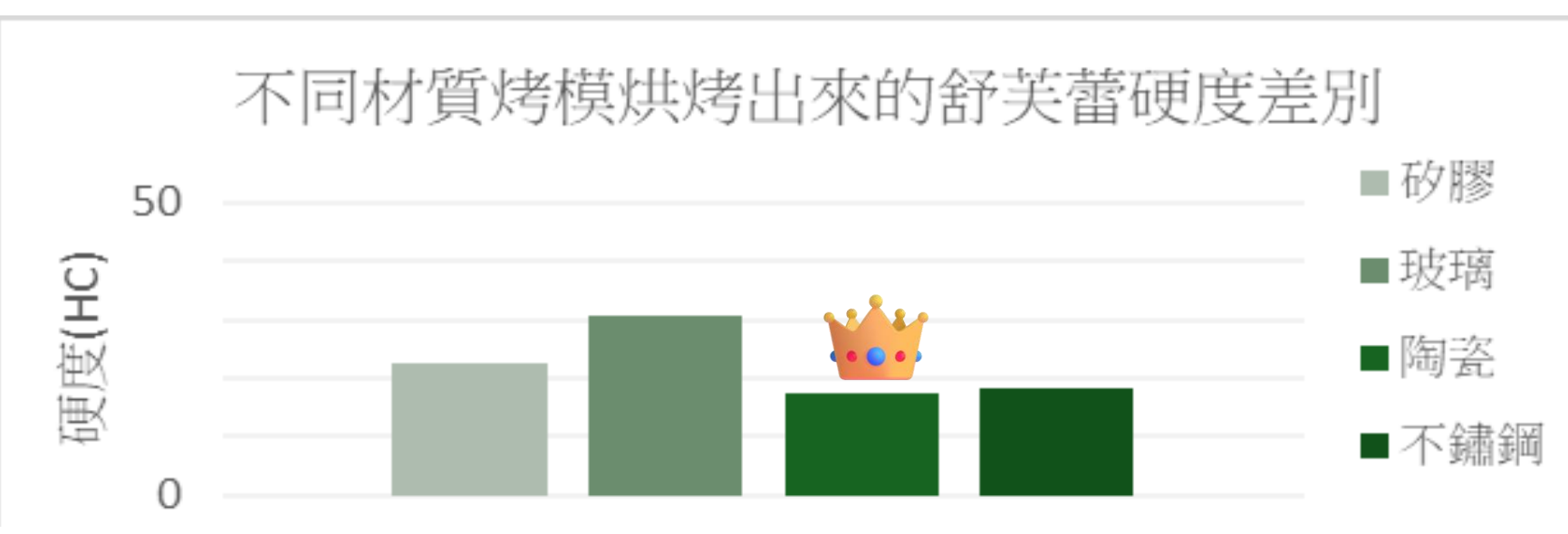
◇實驗目的：研究不同烘焙時間對舒芙蕾內部結構、口感和整體品質的影響，並確定最佳烘焙時間。



◆實驗結果：隨時間增加，高度變化率升至200%（8分），之後略降至173%（9分）與153%（10分）。

實驗3-3

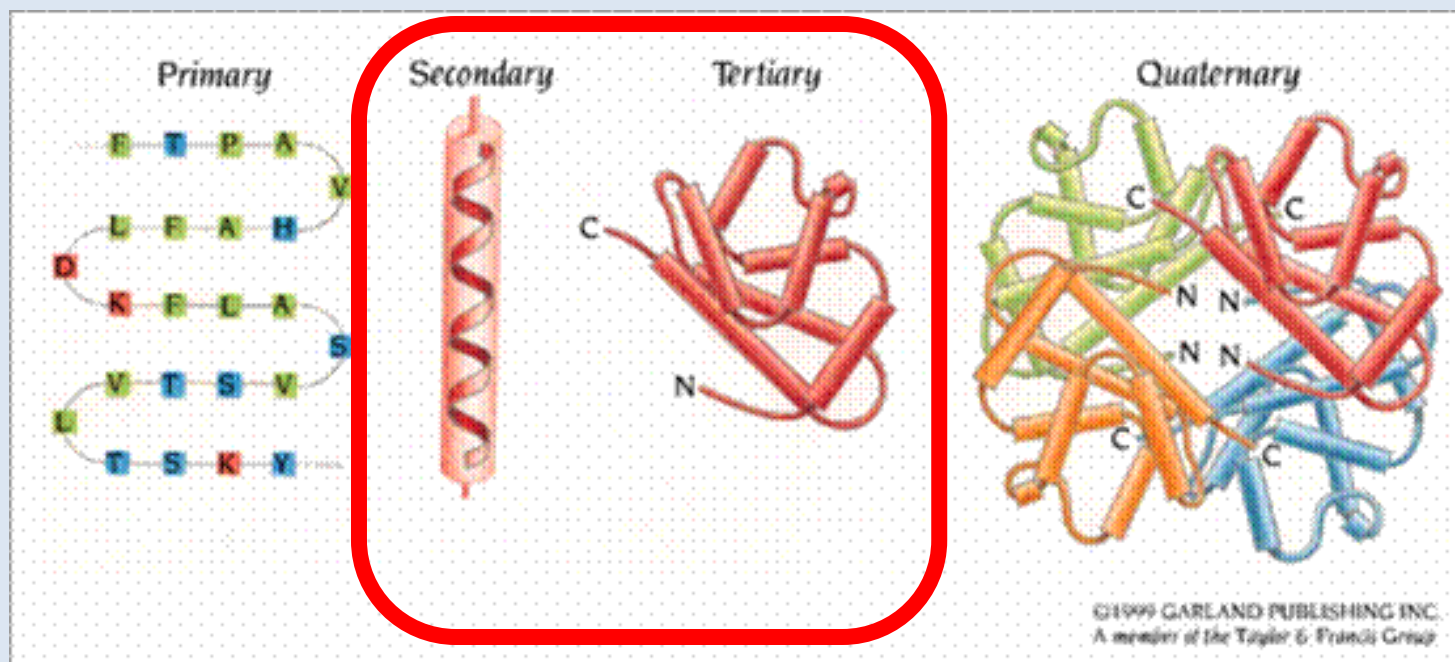
◇實驗目的：分析不同材質的烤模對舒芙蕾外觀、膨脹程度及口感的影響，確定最適合的烤模材料。



◆實驗結果：陶瓷高度變化率高、最鬆軟；玻璃高度變化率高但偏硬，矽膠與不鏽鋼表現一般。

討論

一、蛋白打發的秘密



圖一、蛋白質結構
(資料來源：蛋白質結構概論)

實驗編號	變性方法	結果描述
實驗1-1	機械處理	高速攪拌可產生剪切力促進蛋白質展開與變性
實驗1-2	有機化合物的水溶液／界面影響	糖改變水活性、滲透壓會抑制或促進變性
實驗1-3	金屬／電解質影響	離子改變蛋白質電荷與靜電交互作用
實驗1-4	有機化合物的水溶液／界面影響	分批加入可減少初期對蛋白質展開的阻礙
實驗1-5	有機化合物的水溶液	不同糖的分子大小與結構會改變泡沫穩定性
實驗1-6	pH值改變	酸性促進變性，使蛋白質更容易展開

表四、蛋白質變性的分類對照整理
(資料來源：公職食品技師高考-蛋白質變性)

二、添加物對舒芙蕾影響

- 為什麼不同麩質含量會對麵糊的膨脹與口感產生這麼大的影響？
麩質是**小麥中的蛋白質**，能形成網狀結構，捕捉氣體幫助麵糊膨脹。
- 牛奶脂肪與泡沫穩定性的關聯？
低脂牛奶與全脂牛奶的主要差異在於**脂肪含量**，低脂牛奶脂肪少，對蛋白質干擾小，有助於泡沫穩定；全脂牛奶脂肪多，會包裹蛋白質，降低泡沫穩定性，並使打發更難。
- 膨脹與發酵過程中的化學反應
(1)**酸鹼反應化學反應式**為：
 $\text{NaHCO}_3 + \text{H}^+(\text{酸}) \rightarrow \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O} + \text{Na}^+$
(2)**酵母糖解化學反應式**為：
 $n(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5) + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow n\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + n\text{CO}_2 \uparrow$
- 查詢資料後發現，市售麵包常用泡打粉來達到膨脹效果，但**許多泡打粉含有鋁成分（如鋁酸鋁）**。長期攝入含鋁的食品可能會對健康造成風險，尤其是對神經系統和腎臟健康。

三、烘焙條件對舒芙蕾的影響

- 溫度同時影響「產氣速率」與「結構形成速度」。
(1)**氣體生成速率**：根據阿瑞尼斯方程式，**溫度越高**，分子碰撞越頻繁，**反應越快**，產氣也越快。
$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

(2)**蛋白質凝固速度**：蛋白質受熱變性，從原本的捲曲結構展開並重新交聯，形成固態網狀結構。

圖二、蛋白質熱變性
(資料來源：烘焙的科學(四)蛋白質的熱變性)
- 陶瓷導熱最快，**讓氣泡快速膨脹但結構尚未穩定**，雖膨脹率高，**支撐力較弱**，成品反而最鬆軟。

結論

- 攪拌速率**：超過 379 RPM 有助蛋白打發。
- 添加物影響**：砂糖（5g、10g）與食鹽（5g）可提升泡沫穩定性；氯化鈣超過 5g 會抑制泡沫形成。
- 加糖方式**：分次加糖（2~4 次）可穩定泡沫，少次雖打發快速但結構不穩。
- 檸檬汁效果**：弱酸性環境可與糖協同作用，縮短打發時間、提高泡沫穩定性。
- 粉類選擇**：高筋麵粉支撐性佳但偏硬，低筋麵粉蓬鬆柔軟，無麩質粉結構鬆散、易塌陷。
- 乳品添加**：10g全脂牛奶適合追求細緻、濕潤口感的舒芙蕾，但若兼顧蓬鬆外觀與穩定性，仍以 10g低脂牛奶 為首選。
- 膨脹劑表現**：酵母膨脹緩慢但穩定，整體結構未明顯塌陷；小蘇打與檸檬酸反應劇烈，易造成破裂，搭配酒石酸氫鉀則較穩定。
- 泡打粉安全性**：本研究採用天然酸鹼成分製成泡打粉，反應單純，無鋁添加風險。
- 烘焙溫度**：150°C 為最佳膨脹溫度，溫度過高會降低蓬鬆度、增加硬度。
- 容器材質**：陶瓷與玻璃導熱慢，有助結構穩定；不鏽鋼導熱快，易導致塌陷。
- 未來展望**：可進一步探索無添加、有機來源的粉類與膨脹劑，結合健康與食安議題，提升應用價值。

蛋白打發的秘密



圖三、高度完美舒芙蕾之作法（Canva協助繪製）

情況	圖示	結果	本研究例子
成殼速率太快		內壓不足，無法撐開殼，膨脹受限、高度低	檸檬酸+碳酸氫鈉、醋酸+碳酸氫鈉
理想情況		高膨脹且穩定，高度最佳	市售泡打粉、酒石酸氫鉀+碳酸氫鈉
成殼速率太慢		結構不固定，膨脹後下陷，高度下降	酵母粉+葡萄糖、酵母粉+蔗糖

表四、成殼速度與舒芙蕾膨脹結果對照（ChatGPT協助繪製）

參考資料與其他

- 一、鬆軟梳乎厘 蛋白要打得準 慢速打發漸加快 適時收手<https://today.line.me/hk/v2/article/RWW0oe>
- 二、大同大學化工與生物科技學系 普通化學實驗 氮氣的莫爾體積（李雅晴、馮彩鳳 2023製、林薇宣 2024修正）
- 三、全國第54屆國小組生活與應用科學科蛋白棉花糖～蛋白霜之研究<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/54/pdf/091407.pdf>
- 四、新北市第60屆高級中等學校組農業與食品學科吃軟不吃硬—探討麵粉與膨鬆劑對馬芬蛋糕結構的影響<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/60/pdf/NPHSF2020-052209.pdf>
- 五、中華民國第 54 屆中小學科學展覽會國小組 生活與應用科學科 蛋白棉花糖～蛋白霜之研究<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/54/pdf/080806.pdf>
- 六、中華民國第 60 屆中小學科學展覽會蛋白生“氣”了！～蛋白起泡性之探究<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/60/pdf/NPHSF2020-080207.pdf>
- 七、蛋白老是打不發？這些常犯的小失誤一定要避開<https://food.ltn.com.tw/article/7268>
- 八、Lopez-Malo, A., & Alzamora, S. M. (2015). Water activity and microorganism control: Past and future. In G. V. Barbosa-Cánovas, A. J. Fontana Jr., S. J. Schmidt, & T. P. Labuza (Eds.), Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications (2nd ed., pp. 245–262). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1635-8_12
- 九、Tang, C.-H., Chen, L., & Li, X.-R. (2007). Foams and emulsions stabilized by soy protein isolate: Effects of high-pressure homogenization and pH. LWT – Food Science and Technology, 40(6), 1116–1123. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.07.010>