

新竹市第四十四屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：生活與應用科學（二）

組 別：國小組

作品名稱：解密香噴噴控肉飯的科學魔法

關 鍵 詞：控肉、梅納反應、酵素反應

編 號：115PB - L005

解密香噴噴控肉飯的科學魔法

摘要

壹、前言

- 一、研究動機：為什麼想做出完美的控肉？
- 二、文獻回顧：成為「控肉小博士」的先修課
- 三、研究目的

貳、研究設備及器材

- 一、實驗材料與器材
- 二、實驗流程設計
- 三、數據收集與評分方法

參、溫度變因對肉質之影響

- 一、低溫環境實驗：68°C 的強韌表現與侷限
- 二、中溫環境實驗：80°C 的平衡點分析
- 三、高溫環境實驗：90°C 與 93°C 的軟化效果對比
- 四、小結：溫度與結締組織轉化的關聯性

肆、天然酵素對肉質嫩化之實驗

- 一、鳳梨汁酵素對肌肉纖維的作用機制
- 二、實驗異常現象分析：為何酵素組韌度反而上升？
- 三、酵素、酸性環境與蛋白質變性的交互影響
- 四、小結：酵素使用的雙面刃

伍、梅納反應與烹飪手法分析

- 一、炒砂糖（梅納反應）對風味與保水性的貢獻
- 二、烹飪時間與肉質「柴化」的相關性研究
- 三、樣本 A（炒糖）與樣本 B（直煮）的數據差異對比
- 四、小結：手法優於素材

陸、數據大解密與誤差探討

- 一、全變因試吃平均分數匯總雷達圖
- 二、誤差探討
- 三、實驗改良建議

柒、結論與生活應用

- 一、研究結論：控肉質地的黃金組合
- 二、實務應用：給家庭與專業廚房的烹飪秘訣
- 三、最佳成品檢驗標準
- 四、結語與未來展望

捌、研究心得與反思

玖、相關文獻參考

附錄

- 一、原始數據記錄表
- 二、統計分析圖表集
- 三、相關實驗照片紀錄

摘要

控肉飯是台灣常見的傳統美食，但同樣的食材在不同烹飪條件下，口感卻有顯著差異。本研究透過嚴謹的變因控制與感官評價，成功探討控肉的「黃金組合公式」：【80°C 恆溫燉煮】+【前置炒糖色】+【捨棄酵素添加】。實驗證實，影響控肉質地的關鍵排序為：溫度、前置手法、烹煮時間，最後才是酵素添加物。

80°C 為膠原蛋白轉化為滑順明膠的黃金平衡點，能將失重率控制在 15%，使肉質兼顧軟嫩與多汁。相較之下，68°C 因溫度不足以完全水解膠原蛋白，呈現多汁但咬不動的強韌狀態；93°C 雖能軟化組織達到最高嫩度，但失重率劇增至 29%，導致質地乾柴。

在前置手法上，炒砂糖能同時啟動焦糖化反應與梅納反應，在肉塊表面建立鎖水屏障，使多汁性評分從 2.29 顯著提升至 3.86 (+1.57)，嫩度亦提升 0.71 分，解決了長期以來「瘦肉乾柴」的結構性問題。在酵素添加物方面，天然鳳梨蛋白酶因最適作用溫度（約 50–60°C）與燉煮溫度不符，加上鳳梨汁酸性導致蛋白質預先收縮，使酵素組失重率達 23.6%、韌度反升至 3.5 分，效果遜於精準溫控。

實務應用上，建議廚房應遵循「先炒糖包覆、維持溫度約 80°C、準時關火」三大步驟。本研究成功將熱力學與食品化學原理轉化為可複製的烹飪準則，確保每盤控肉皆能穩定呈現「外皮 Q 彈、肉質軟嫩多汁」的口感。

壹、前言

一、研究動機：為什麼想做出完美的控肉？

在日常生活中，控肉是餐桌上常見的美食，但我們觀察到同樣的食材在不同烹飪條件下，口感卻有顯著差異：有的入口即化，有的卻乾柴難嚼。這引發了我們的好奇，到底是什麼科學力量決定了控肉的口感？本研究與國小自然科學課程具有高度關聯性：首先，連結四年級「水加熱了」與六年級「物質的變化」，我們探究熱能如何改變蛋白質狀態，並將溫度精確控制在膠原蛋白轉化為明膠的關鍵門檻；其次，結合六年級「物質的變化」單元，我們實驗「炒糖色」所誘發的梅納反應，觀察這種不可逆的化學變化如何為肉塊降低水分流失，進而

改善「瘦肉乾柴」的問題。

此外，本研究延伸教材內容「水溶液的酸鹼性質」，利用加入酸性鳳梨汁分析不同 pH 值，與滷汁滲透壓對肌肉纖維變性的交互影響。我們化身小科學家，運用這學期課程中強調的「變因控制法」，針對溫度、時間及添加物進行系統性實驗，將廚藝經驗轉化為可量化的科學數據。透過科學實驗，我們不僅希望能破解完美控肉的黃金公式，更期許能實踐「從觀察到假設，從實驗到驗證」的科學精神，在餐桌與實驗室之間找尋真相。

二、 文獻回顧：成為「控肉小博士」的先修課

肉品品質為影響消費者接受度與市場價值之重要因素，其中以嫩度、多汁性與風味最為關鍵 (Meilgaard et al., 2016)。嫩度主要受肌原纖維蛋白與結締組織結構影響；加工過程中的蛋白質變性程度與保水能力，與最終品質密切相關 (Tornberg, 2005)。因此，透過適當加工技術提升肉品品質，一直是食品科學的重要研究課題。控肉飯以豬五花肉為主原料，經長時間燉煮賦予肉品軟嫩黏口的獨特口感，是本研究探討的主要內容。

在嫩化技術方面，外源性植物蛋白酶，如木瓜蛋白酶、鳳梨蛋白酶與牛角瓜蛋白酶，可水解肌原纖維蛋白與膠原蛋白，有效降低剪切力並提升肉品嫩度 (Rawdkuen et al., 2012；Sullivan & Calkins, 2010)。然而，若酵素濃度過高或作用時間過長，可能導致肌肉組織過度分解，使肉質變的鬆散，反而降低品質與保水性 (行政院農業委員會，2020；Rawdkuen et al., 2012)，顯示嫩度提升與質地穩定性間需取得平衡。

加熱過程同樣會深刻影響肉品品質。蛋白質熱變性與膠原蛋白轉化會改變組織結構與多汁性 (Tornberg, 2005)，而梅納反應則為熟肉香氣與色澤生成之主要機制 (Van Boekel, 2006；McGee, 2004)，由胺基酸與糖在加熱條件下發生一連串複雜反應所導致。醬油中富含游離胺基酸與葡萄糖等還原糖，在燉煮過程中強化梅納反應，豐富控肉飯的風味與色澤表現。因此，酵素前處理與加熱條件之交互作用，可能同時影響控肉質地與風味表現。

在品質評估方面，小組感官品評，在相同測試條件下做重複性測試，結合標準化感官分析與物理測定 (ISO 11036, 2020；ISO 13299, 2016；Meilgaard et al., 2016)。蛋白酶雖能改善嫩度，但其對保水性與風味發展之整體影響仍待整合探討。

三、 研究目的

本研究不僅是為了做出好吃的控肉，更是運用「變因控制法」這項重要的科學探究技能，探討溫度、時間、添加物等獨立變因，解決生活中「瘦肉乾柴」的觀察現象。我們希望藉由量化的科學數據，如質地分析儀剪切度測試，實踐「從觀察到假設，從實驗到驗證」的科學素養，將餐桌上的料理變成實驗室裡的科學命題。

貳、研究設備與器材

一、 實驗材料與器材

核心食材與配料

- 主料： 豬肉塊（每塊約 200g - 300g）
- 滷汁基底： 水、醬油、米酒
- 辛香料： 蔥、薑、蒜、紅蔥頭、五香粉
- 調味糖類： 砂糖或葡萄糖
- 關鍵添加物：鳳梨汁（含有蛋白酶酵素）

實驗設備

- 加熱儀器： 烤箱（模擬四周均勻受熱）、IH 爐（底部加熱）、蒸爐
- 測量工具：
 - 電子秤： 測量肉塊與滷汁重量（Before/After）
 - pH 試紙： 檢測滷汁的酸鹼值變化
 - 鹽度計： 記錄滷汁濃度
 - 質地分析儀：使用華納—布拉茨勒剪切力測試（WBSF）的倒 V 型刀片，仿牙齒，透過機器穩定的力量垂直切斷肉塊纖維。測量切斷肉塊所需的最高力量（剪切力），數值越高代表肉質越韌；數值越低則代表肉質越軟嫩。

- 溫度計： 測量烹煮溫度

二、 實驗流程設計

實驗設計的核心在於「公平測試」，我們透過控制不同的時間與變因來觀察結果。

步驟 1：標準化準備（控制變因）

- 精確配比： 每一鍋的滷汁配方（水、醬油、酒、葡萄糖或蔗糖）必須嚴格按照比例調配。
- 初始測量： 滷煮前，記錄下肉塊的原始重量、滷汁的 pH 值與鹽度作為「基準點」。
- 在溫度與酵素實驗中，選擇化學活性高的葡萄糖作為變因，是因為它屬於還原糖，能在 80°C 的低溫環境下直接參與反應，有助在短時間內（1 小時）快速誘發化學變化，藉此集中觀察肉質韌度與失重率的精確差異，並排除蔗糖需先水解才能反應的變因干擾。在梅納反應實驗中選擇蔗糖，則是為了模擬真實烹飪情境，觀察糖分在「上色」過程中產生的焦糖化保護膜如何減緩水分流失，並追蹤其在長達 2 小時的滷煮下，如何隨著 pH 值下降而逐漸轉化，進而研究風味與保水性的長期趨勢。

步驟 2：設定加熱環境（操縱變因 A）

- 實驗組：全採用「實際測得溫度」作為分類依據，區分為 68°C、80°C、90°C 與 93°C 四組。因烤箱、IH 爐與蒸爐等設備之加熱模式不同，導致設備設定值與實際溫度存在些許誤差，故研究數據均以儀器實測溫度為準。
- 目的： 比較不同溫度對肉質表現之差異。

步驟 3：加入酵素變因（操縱變因 B）

- 實驗組（有酵素）：在滷汁中加入 30g 鳳梨汁。

- 對照組（無酵素）：使用相同水量但不添加鳳梨汁。
- 目的：觀察植物酵素是否能幫助分解豬肉中的膠原蛋白，讓肉質更快變軟。

步驟 4：上糖色處理（操縱變因 C）

- A 組（炒糖組）：先將 15g 砂糖加熱至琥珀色，放入肉塊翻炒掛色，再倒入滷汁。
- B 組（對照組）：肉塊僅在乾鍋加熱 30 秒，糖直接加入滷汁中，不進行炒糖程序。
- 目的：觀察「炒糖色」產生的保護膜，對肉塊失重率（保水度）是否有幫助。

步驟 5：時間觀察點（操縱變因 D）

- 1 小時：取出 A1、B1 鍋，進行測量。
- 2 小時：取出 A2、B2 鍋，觀察長時間滷煮後的變化。

步驟 6：數據採集與分析（應變變因）

- 觀察 pH 值：追蹤梅納反應與調味物質反應後的酸鹼趨勢。
- 計算失重率：比較肉塊減少的重量。
- 測量剪切力：儀器測量肉質纖維的韌度變化，確認肉質是否達到「軟嫩」的目標。

三、數據收集與評分方法

（一）口感評分指標說明（嫩度、韌度、多汁性、柴感）

為了量化主觀的試吃感受，本實驗定義了四項關鍵口感指標，並採用 1（極低）至 5（極高）的評分制：

- 肉質嫩度：指牙齒咬入肉塊時的阻力。高分代表肉質鬆軟、易斷裂；低分則代表肉質堅硬。
- 肉質韌度/耐嚼性：指肉塊在口中反覆咀嚼時的彈性與回饋。適度的韌度能提供「Q 彈感」，但過高則會導致「咬不動」。
- 多汁性：指咀嚼過程中分泌的肉汁與油脂感。這是判斷控肉「乾不乾」的關

鍵。

- 柴感/顆粒感：這是一項負面指標。指纖維過於明顯、有如乾草般的粗糙感受。分數越低代表越好入口。

(二) 試吃評分標準與方法

- 樣本準備：所有樣本均選用同批次、同部位之豬五花肉，切至相同規格（如 3x3 公分）。
- 盲測流程：由 4-7 位評審組成試吃小組，在不知道烹飪條件的情況下進行盲測評分。
- 環境控制：試吃前統一以溫開水漱口，以確保味覺不被前一個樣本干擾。
- 數據統計：採集所有評審的分數後，計算其算術平均值（Mean），作為該變因的最終表現指標。

參、溫度變因對肉質之影響

一、 低溫環境實驗：68°C 的韌度表現與侷限

在 68°C 的長時間低溫烹調下，數據呈現出極其特殊的結果：

- 關鍵數據：肉質韌度（試吃）達 3.67，儀器量測更高達 9.86，為所有實驗組之冠；肉質嫩度僅 2.33。
- 現象分析：此溫度雖能維持較高的多汁性 3.40，但因為溫度不足以使肌肉中的膠原蛋白產生完全變性與水解。
- 結論：在此溫度下，肌肉纖維雖然保水，但「結締組織」依然堅硬，導致成品呈現一種「多汁但咬不動」的強韌狀態，不符合傳統控肉「入口即化」的期待。

二、 中溫環境實驗：80°C 的平衡點分析

80°C 被視為一個重要的過渡溫度：

- 數據表現：嫩度提升至 3.00 左右，柴感降至 2.17。
- 現象分析：此溫度下肉質受熱有兩股力量在拉扯。肌原纖維蛋白（瘦肉）愈熱愈

硬，而結締組織（膠原蛋白）愈熱愈軟。

- 結論：80°C 提供了一種相對平衡的質地，使水分在可控範圍內流失，適合不喜歡過於軟爛、偏好適度咀嚼感的客群，是兼顧大眾口味的最佳選擇。

三、 高溫環境實驗：90°C 與 93°C 的軟化效果

當溫度進入 90°C 以上的高溫區間，質地發生了劇烈的正面轉化：

- 數據對比：嫩度達 2.86，且失重率劇增至 28%。此區間的失重率攀升至 28%~29%，代表肉塊內部的肉汁已被大量擠壓排出。
- 現象分析：肌纖維的極度收縮（熱脫水），高溫是一把雙面刃，雖然軟化了結締組織，但同時也驅使肌原纖維蛋白（瘦肉纖維）產生劇烈收縮。此時的肉質雖然「軟爛」（韌度低），但因缺乏水分支撐，咀嚼時會產生明顯的「乾柴感」與「顆粒感」。
- 結論：單純提高溫度雖能解決「咬不動」（韌度下降）的問題，卻會造成「乾柴」的新問題。

四、 小結：溫度與結締組織轉化的關聯性

本章實驗證實了「溫度」是決定控肉靈魂的主因：

- （一） 韌度遞減律：隨著溫度由 68°C 提升至 93°C，試吃韌度由 3.67 下降至 3.29（儀器量測更從 9.86 驟降至 8.72）。
- （二） 多汁性的瓶頸：雖高溫有利於嫩化，但若缺乏油脂補足，水分流失會隨溫度上升而加劇。
- （三） 黃金轉化點：80°C 這個溫度剛好超過了膠原蛋白大量轉化為明膠的門檻，能讓原本堅韌的筋膜變得入口即化；不會像接近沸騰的 100°C 那樣劇烈收縮。

肆、天然酵素對肉質嫩化之實驗

一、 鳳梨汁酵素對肌肉纖維的作用機制

鳳梨汁含有豐富的鳳梨蛋白酶，理論上能有效分解豬肉中的蛋白質纖維與結締組織，

但在數據中，酵素組的韌度評分卻高達 3.5（相較於中溫組的 3.0）：

- 預期效應：透過酵素的催化作用，將堅硬的肌原纖維蛋白斷裂，從而大幅提升嫩度並縮短燉煮時間。
- 實驗設計：將樣本浸泡於適量鳳梨汁中進行前處理，並與「無酵素組」及進行口感對比。
- 酵素活性與溫度的衝突：鳳梨酵素的最適活性溫度約在 50°C 至 60°C 若加熱過程過快，酵素在尚未充分水解膠原蛋白前就因高溫失活，導致其軟化功能失效。
- 蛋白質受熱收縮：當酵素失去活性，肉塊僅剩下在高溫下的物理反應。數據顯示酵素組的失重率達 23.6%，這代表肌肉纖維在酸性與熱能的雙重壓力下產生了劇烈收縮，形成「結構鬆散但纖維感增加」的現象。

二、 酵素、酸性環境與蛋白質變性的交互影響

- 酸變性：鳳梨汁的酸性使蛋白質結構預先緊縮。
- 熱變性：高溫進一步擠壓纖維，排出肉汁。
- 結構支撐力喪失：雖然酵素可能微幅破壞了部分結締組織，但因為水分（多汁性）流失過快，剩下的肌肉纖維變得像「乾草」一樣，導致感官評分上的「細緻度」降至全組最低的 2.0。

三、 小結：酵素使用的雙面刃

本章實驗結果提醒了烹飪者，天然嫩化劑的使用需具備極其精準的配套條件：

- （一） 非絕對軟化：酵素並非「放了就會嫩」，濃度、浸泡時間與加熱速度的配合至關重要。
- （二） 韌度風險：在本實驗配置下，不添加酵素的天然燉煮反而能獲得較理想的嫩度。
- （三） 應用限制：若無法精確控制酵素活性，單純依賴「溫控」與「手法（梅納反

應)」是更為保險且效果更穩定的做法。

伍、梅納反應與烹飪手法分析

一、炒砂糖（焦糖化與梅納反應）對風味與保水性的貢獻

在本實驗中，我們觀察到烹飪炒糖色對肉質產生了關鍵的物理與化學轉化。這涉及了兩個看似相近、實則不同的科學過程：

1. 焦糖化反應（Caramelization）：純糖的轉化

現象分析：當我們在鍋中單獨加熱砂糖並加入少量水時，砂糖（蔗糖）在達到約 160°C 以上的高溫後開始分解。砂糖受熱後會產生琥珀色的聚合物。這層具備黏性的焦糖能均勻包覆在肉塊表面，形成一個物理性保護膜。

結論：在後續燉煮時，這層焦糖保護層能緩衝高溫對肌肉纖維的直接衝擊，進而鎖住肉汁。

2. 梅納反應（Maillard Reaction）：蛋白質與糖的結合

現象分析：當已經焦糖化的糖分與肉塊表面的蛋白質（胺基酸）接觸並持續翻炒時，會啟動更複雜的梅納反應建立化學屏障：梅納反應生成的類黑精（Melanoidins）薄膜比單純的焦糖膜更穩定。數據顯示，樣本 A（炒糖組）的多汁性評分（3.86）遠高於樣本 B（直接滷煮組）的 2.29。

結論：梅納反應不僅賦予控肉特有的香味，更在「鎖水」上立了大功，解決了瘦肉部位因受熱收縮而變得乾柴的問題。

二、烹飪時間與肉質「柴化」的相關性研究

樣本 B 提供了一個反面案例，探討了「燉越久真的越好嗎？」的科學爭議：

- 現象觀察：樣本 B 雖然經過長時間燉煮，但其柴感/顆粒感得分為 3.00（偏高），且多汁性僅 2.29。
- 科學解釋：當烹飪時間超過臨界點後，雖然肉質會變「爛」，但蛋白質纖維會因為過度收縮而將內部的肉汁擠壓殆盡。這種現象稱為「熱收縮引起的脫水」，使肉質

呈現出一種纖維感明顯、入口即碎但卻乾渴難嚥的「柴化」狀態。

- 結論：長時間燉煮並不能取代精準的時間掌控，過度烹飪是造成多汁性驟降的主因。

三、 樣本 A（炒糖）與樣本 B（直煮）的數據差異對比

透過數據直接對比，可以清晰看出手法對質地的影響力：

- 嫩度差異 (+0.71)：梅納反應組不僅比較多汁，其嫩度也比直煮組更高。
- 多汁性巨大鴻溝 (+1.57)：這是整份實驗報告中數值落差最大的一項，證明了「前置處理手法」對保水性的決定性作用。
- 口感平衡：樣本 A 在韌度上維持在 3.71（具Q彈感），而樣本 B 雖然韌度較低 (3.43) 但伴隨高柴感，顯示其口感結構已經瓦解。

四、 小結：手法優於素材

本章實驗顯示，即便使用相同的肉材，不同的烹飪手法會產生完全不同的結果：

- （一） 前置炒糖：是鎖住肉汁、提升嫩度的魔法。
- （二） 時間管控：燉煮需「適可而止」，一旦進入柴化階段，口感將無法回溯。
- （三） 技術結論：理想的控肉應該是透過梅納反應封存肉汁，並在纖維軟化與脫水之間取得黃金平衡。

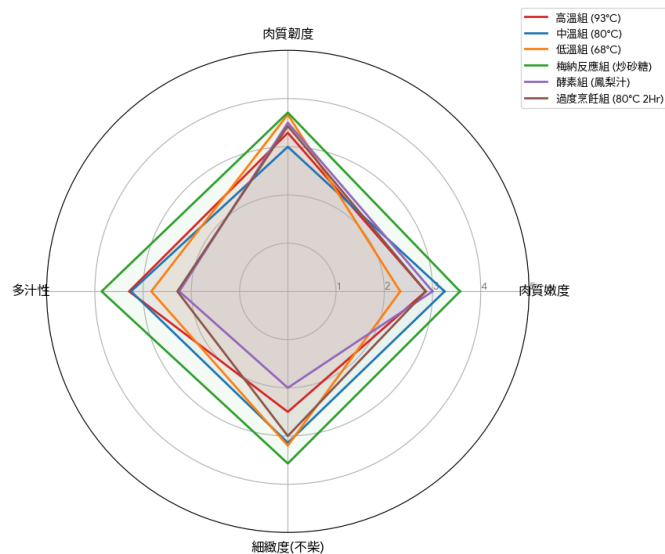
陸、數據大解密與誤差探討

一、全變因試吃平均分數匯總雷達圖

為了找出「完美控肉」的蹤跡，我們將四大指標整合為雷達圖。為了讓圖表直觀易懂，我們將負面指標「柴感」轉換為正面指標「細緻度」（分數越高越不柴）。

實驗組別	試吃口感				量測數據		綜合評價
	肉質嫩度	肉質韌度	多汁性	細緻度(不柴)	剪切力	失重%	
高溫組 (93°C)	2.86	3.29	3.29	2.5	8.72	28%	結構瓦解口感柴
中溫組 (80°C)	3.25	3.00	3.25	3.14	4.92	15%	表現最均衡
低溫組 (68°C)	2.33	3.67	2.83	3.2	9.86	7%	熟化程度不足
梅納反應組 (炒砂糖)	3.57	3.71	3.86	3.57	4.59	13.7%	最佳口感組合
酵素組 (有鳳梨汁)	3	3.5	2.25	2	5.26	23.6%	質地最為強韌
過度烹組 (80°C 2Hr)	2.86	3.43	2.29	3.0	4.28	21%	最乾柴、口感差

【口感雷達圖分析結果】



圖一：口感雷達圖

全方位領先：梅納反應組（炒砂糖）

- 數據特徵：在「多汁性 (3.86)」、「嫩度 (3.57)」與「細緻度 (3.57)」三項指標均為全組最高。
- 科學解讀：該組量測剪切力 (4.59) 與失重率 (13.7%) 均維持在優異水平，證實了梅納反應形成的薄膜能有效鎖水並優化肉質纖維。

均衡表現：中溫組 (80°C)

- 數據特徵：各項指標分佈最為均勻，韌度 (3.00) 與失重率 (15%) 展現了良好的舒肥平衡點。
- 科學解讀：綜合評價為「表現最均衡」，是維持肉質軟嫩且不乾柴的基礎溫度。

質地失衡與崩塌：高溫、酵素與過烹組

- 高溫組 (93°C)：雖然韌度數值尚可，但失重率高達 28%，導致細緻度 (2.5) 顯著偏低，呈現結構瓦解但口感柴的特徵。
- 酵素組 (鳳梨汁)：多汁性 (2.25) 與細緻度 (2.0) 均跌至全組最低，且韌度評分達 3.5。數據顯示酵素並未達成軟化，反而因酸性環境導致水分流失與質地強韌。
- 過度烹飪組 (2 小時)：多汁性 (2.29) 與 93°C 組接近，顯示長時間加熱會跨越柴化期門檻。

二、 誤差探討

在科學實驗中，誤差是不可避免的，我們發現了以下幾個可能影響數據的因素：

- 主觀感官誤差：試吃評分屬於「感官檢驗」，每位評委對「嫩度」的耐受度不同。雖然我們取平均值來降低誤差，但人的味覺疲勞仍可能是影響因素。
- 樣本一致性誤差：雖然都選用五花肉，但每塊肉的「肥瘦比例」不盡相同。肥肉較多的塊體在多汁性評分上天然較佔優勢，這可能導致部分數據的微幅波動。

- 設備精準度限制：家用烤箱或蒸爐的控溫不如實驗室精密。在開蓋取樣或添加調味料時，鍋內溫度會短暫下降，這可能微幅影響到膠原蛋白水解的速率。
- 酵素活性變量：鳳梨汁的酸鹼值與存放時間會影響酵素活性。本次實驗中「有酵素組」表現異常，可能是因為鳳梨汁的酸性導致蛋白質先產生「酸變性」硬化，而非單純的酵素軟化。

三、 實驗改良建議

若要進行下一次更完美的實驗，建議可以：

- 增加樣本數 (N)：增加評審人數（如擴大到 20 人）以減少個人主觀影響。
- 標準化切割：實驗前統一將樣本修切為固定比例（如 3:7 肥瘦比）。
- 微觀觀察：透過顯微鏡深入觀察肉質纖維。分析在不同溫度衝擊下，肌肉纖維如何由緊密轉向斷裂與鬆散；這些微觀上的結構改變，正是決定口感「乾柴」或「軟嫩」的生物學關鍵。
- pH 值調整處理：縮短醃漬時間或調整鳳梨汁濃度中性（pH 約 6.0-7.0）。

柒、結論與生活應用

一、 研究結論：控肉質地的黃金組合

經過一系列變因測試與數據比對，本研究成功破解了完美控肉的「美味密碼」。要達成「外皮Q彈、肉質軟嫩、咬下多汁」的口感，其核心變因的影響力排序為：烹飪溫度 > 前置手法 > 烹煮時間 > 添加物。

根據數據分析，我們推導出控肉的黃金組合公式：

【 80°C 恆溫燉煮 】+ 【 前置炒糖色（焦糖化+梅納反應） 】+ 【 捨棄酵素添加 】

- 溫度的力量（關鍵門檻）：實驗證實 80°C 是軟化肉質的開關。此溫度能最能維持質地與保水量的最佳平衡點。

- 手法的重要性（多汁救星）： 焦糖化+梅納反應（炒糖色）是降低水分流失關鍵因素。它能建立化學屏障，讓多汁性評分從乾澀的 2.29 分躍升至豐盈的 3.86 分，解決「外爛內柴」的痛點。
- 反直覺的發現（精準勝於添加）： 雖然大眾認知的酵素（如鳳梨）具嫩肉效果，但在本實驗條件下，酵素反而使肉質纖維變得強韌（試吃韌度 3.5 分，量測韌度高達 5.26）。因此，精準溫控比依賴添加物更為可靠。

二、 實務應用：給家庭與專業廚房的烹飪秘訣

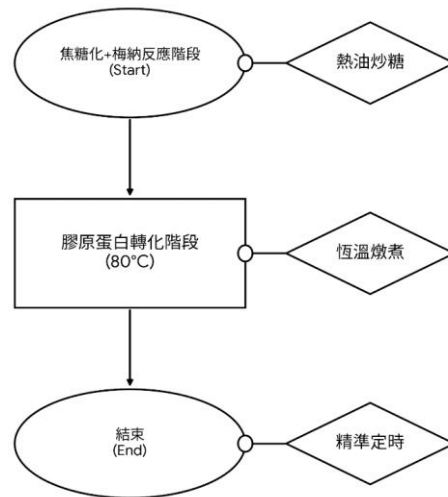
我們將科學數據轉化為「三步驟秘訣」，讓研究成果能真正落實在餐桌上：

- （一） 先炒糖，後封肉（延緩水分流失）： 燉煮前，先用小火將砂糖炒至琥珀色焦糖化，再下肉塊翻炒上色。這不只是為了增色，亦可透過梅納反應形成表層結構，有助於減少燉煮過程中的水分流失，進而鎖住肉汁。
- 預期效果：多汁性顯著提升（由 2.29 升至 3.86 分）。
- （二） 80°C 恆溫精準熟成： 建議使用厚實鑄鐵鍋或具備控溫功能的電器來維持定溫。
- 80°C 是肉質轉化的黃金平衡點，能啟動膠原蛋白轉化為明膠的「軟化」過程，同時避免肌原纖維蛋白因高溫劇烈收縮而導致的「硬化」此恆溫技術能確保失重率控制在較低水準（約 15%），達成多汁口感。
- 預期效果：韌度分數大幅下降（降至 3.29 分）。
- （三） 避開「柴化期」，定時監控： 燉煮並非「越久越好」。當肉質達到軟嫩且具備 Q 度時應立即關火。這能防止肉質進入「柴化期」，保住最後的鮮美。
- 預期效果：保住肉塊最後的鮮美肉汁，維持外皮 Q 彈、肉質入口即化的最佳狀態。
- （四） 流程說明：
1. 梅納反應階段：
 - 關鍵動作： 熱油炒糖、肉塊下鍋翻炒。
 - 科學目的： 啟動梅納反應會在肉表面形成一層結構，幫助鎖住水分，讓肉質更為多汁。
 2. 膠原蛋白轉化階段 (80C)：

- 關鍵動作： 恆溫微沸。
- 科學目的： 催化膠原蛋白變性為「明膠」，徹底軟化肉質。

3. 質地守護階段：

- 關鍵動作： 精準定時、定溫。
- 科學目的： 透過定時、定溫避免纖維劇烈收縮，保住最後的鮮美肉汁。



圖二：控肉科學烹飪流程圖

三、 最佳成品檢驗標準

一份符合本研究「樣本 A + 80°C」標準的高品質控肉應具備：

- 視覺： 琥珀色澤飽滿，外皮呈現半透明潤澤感。
- 觸覺： 筷子可輕易穿透，但肉塊結構依然完整不散碎。
- 口感： 肥肉部分入口即化而不油膩，瘦肉部分多汁（Juiciness > 3.5）且無明顯纖維感。

四、 結語與未來展望

本實驗證實了高品質控肉並非偶然，而是熱力學與化學反應精密配合的結果。科學讓我們不只是在煮飯，更是在探索世界的規律。

未來研究方向：

- 醣類差異：探討黑糖、冰糖或麥芽糖產生的梅納反應對風味層次的影響。
- 品種差異：測試黑豬肉與白豬肉在相同溫度（80°C）下的表現一致性。
- 掌握「高溫轉化、手法延緩水分流失」的核心原則，即可穩定產出符合專業標準的科學美味。希望這份研究能讓每個家庭的餐桌上，都有一盤具備科學靈魂的完美控肉！

捌、研究心得與反思

一、多汁性的定量分析：從「失重率」到「保水率」

為了精準定義肉塊的「多汁程度」，我們發現單靠失重率是不夠的，更應該引入「保水率」的計算法評估邏輯，旨在模擬牙齒咬合時肉塊鎖住水分的能力：

- 保水率 = $\frac{W(\text{生肉重量}) - W(\text{煮後擠壓重量})}{W(\text{生肉重量})} \times 100\%$
- 實驗反思與精進：人手擠壓的力量難以標準化，未來應採用「固定壓力壓榨法」，利用標準重物於固定時間壓製肉塊，測量濾紙吸水量，以精確百分比定義多汁程度

二、質感測量的標準化：取代抽象形容詞

我們以儀器測得的「韌度數值」取代「入口即化」等抽象描述。數據證實，溫度對膠原蛋白轉化為明膠具決定性影響：

- 舒肥原理的驗證：80°C 被證實為質地與保水量的最佳平衡點。此溫度能催化膠原蛋白變性為明膠，且能防止肌纖維因高溫劇烈收縮而「柴化」。
- 高溫瓦解現象：雖然 93°C 能使結構極度軟化，但失重率攀升至 29%，導致肉質雖軟卻乾澀難嚥。這證明了 80°C 的恆溫熟成更能守護肉質的完整性。

三、化學屏障的建立：梅納反應與焦糖化的協同作用

實驗數據顯示，前置「炒糖色」手法對保水性有顯著貢獻：

- 焦糖化：砂糖受熱形成的焦糖層，賦予外皮琥珀色澤與 Q 彈觸感。
- 梅納反應：糖與肉類蛋白質反應生成的類黑精薄膜，建立了有效的鎖水屏障。這使炒糖組的多汁性評分（3.86）顯著優於直煮組（2.29）。

四、難以完全排除的自然變因：樣本生理差異

在實驗時，發現五花肉的油花與瘦肉比例無法精準一致。肥肉融化釋出的油脂提供了潤滑感，而瘦肉纖維則因受熱產生結構性收縮。這種生物組織天生的不均勻性，會對質地分析儀讀數與失重率產生微小干擾，這讓我們明白，樣本的標準化篩選（如固定肥瘦比例）與實驗步驟同樣關鍵。

五、總結與展望

科學是一個不斷排除主觀誤差、追求精確數據的過程。透過 **pH 值、失重率與剪切力數值**，我們成功建構了美味的科學公式。未來的研究中，我們希望能引入標準化的壓力測試儀器，並針對不同糖類（如冰糖、麥芽糖）產生的梅納反應深度進行探討，讓這套科學控肉邏輯更嚴謹。

玖、相關文獻參考

1. Rawdkuen, S., & Benjakul, S. (2012). Biochemical and microstructural characteristics of meat samples treated with different plant proteases. *African Journal of Biotechnology*, 11(76), 14088–14095. <https://doi.org/10.5897/AJB12.1587>
2. ISO 11036. (2020). *Sensory analysis — Methodology — Texture profile*. International Organization for Standardization.
3. ISO 13299. (2016). *Sensory analysis — Methodology — General guidance for establishing a sensory profile*. International Organization for Standardization.
4. McGee, H. (2004). *On food and cooking: The science and lore of the kitchen (Rev. ed.)*. Scribner.
5. Meilgaard, M. C., Carr, B. T., & Civille, G. V. (2016). *Sensory evaluation techniques (5th ed.)*. CRC Press.
6. Sullivan, G. A., & Calkins, C. R. (2010). Application of exogenous enzymes to beef. *Meat Science*, 85(4), 730–734
7. Tornberg, E. (2005). Effects of heat on meat proteins - Implications on structure and quality of meat products. *Meat Science*, 70(3), 493-508.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.11.021>
8. Van Boekel, M. A. J. S. (2006). Formation of flavour compounds in the Maillard reaction. *Biotechnology Advances*, 24(2), 230-233. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2005.11.004>
9. 行政院農業委員會 (2020)。肉品加工與品質管理相關資料。
10. 鳳梨醃肉比例終極指南：黃金比例讓肉質軟嫩不失敗的秘訣,
<https://benjamintrips.tw/read-2808>

附錄

一、原始數據記錄表

溫度對於肉質影響實驗

- 日期: 2025.12.14
- 實驗目的: 研究不同溫度下肉質的口感
- 滷汁配方

ABC 鍋			
水	600g	蔥	10g
醬油	90g	薑	10g
米酒	20g	蒜	5g
葡萄糖	15g	紅蔥頭	5g
五香粉	0.5g		

■ 實驗數據

樣本	A 鍋		B 鍋		C 鍋	
加熱儀器	蒸爐		烤箱		IH 爐	
設定溫度	100°C		90°C		80°C	
實際溫度	93°C		68°C		90°C	
時間	1hr		1hr		1hr	
	Before	After	Before	After	Before	After
滷汁 pH	4.91	6	4.79	6	4.88	6
滷汁鹽度	1.024	1.046	1.024	1.044	1.024	1.042
滷汁重量	705g	718g	705g	701g	700g	745g
肉塊韌度	NA	8.72	NA	9.86	NA	8.23
肉塊重量	300g	215g	300g	279g	300g	213g
失重率	28%		7%		29%	

酵素對肉質影響實驗

- 日期: 2026.01.01
- 實驗目的: 研究酵素對肉質的口感影響
- 滷汁配方

A 鍋			
水	560g	蔥	10g
醬油	110g	薑	10g
米酒	30g	蒜	5g
葡萄糖	25g	紅蔥頭	5g
五香粉	1g		
B 鍋			
水	530g	蔥	10g
醬油	110g	薑	10g
米酒	30g	蒜	5g
葡萄糖	25g	紅蔥頭	5g
五香粉	1g	鳳梨汁(酵素)	30g
C 鍋(補溫度實驗 80°C)			
水	600g	蔥	10g
醬油	90g	薑	10g
米酒	20g	蒜	5g
葡萄糖	15g	紅蔥頭	5g
五香粉	0.5g		

■ 實驗數據

樣本	A 鍋		B 鍋		C 鍋	
加熱儀器	烤箱		蒸爐		IH 爐	
設定溫度	75°C		75°C		80°C	
實際溫度	78.5°C		76.8°C		80.1°C	
時間	1hr		1hr		1hr	
	Before	After	Before	After	Before	After
滷汁 pH	5	5.5	4	4	4.8	5.5
滷汁鹽度	1.057	1.059	1.058	1.064	1.037	1.045
滷汁重量	724g	705g	725g	716g	725g	707g
肉塊韌度	NA	6.67	NA	5.26	NA	4.92
肉塊重量	300g	215g	300g	279g	300g	213g
失重率	17%		23.6%		15%	

梅納反應及時間對肉質的影響

- 日期: 2026.01.11
- 實驗目的: 研究梅納反應以及時間對口感影響
- 滷汁配方

A1/A2 鍋			
水	585g	蔥	10g
醬油	110g	薑	10g
米酒	30g	蒜	5g
五香粉	1g	紅蔥頭	5g
砂糖	30g (15g 炒 15g 進滷汁)		
<ul style="list-style-type: none"> • 炒製：在鍋中放入 15g 砂糖與 5g 水（引導受熱）。小火加熱至砂糖融化並轉為琥珀色，且開始冒出細微泡沫時，立即放入肉塊翻炒掛色（約 30-60 秒）。 • 混合：待肉塊表面上色後，倒入剩餘已混好的滷汁（內含另外 15 g 砂糖與水等），開始計時滷煮。 			
B1/B2 鍋			
水	530g	蔥	10g
醬油	110g	薑	10g
米酒	30g	蒜	5g
五香粉	1g	紅蔥頭	5g
砂糖	30g(直接進滷汁)		
先將肉塊在乾鍋內稍微翻熱 30 秒再倒滷汁，以模擬 A 鍋肉塊受熱的初始狀態			

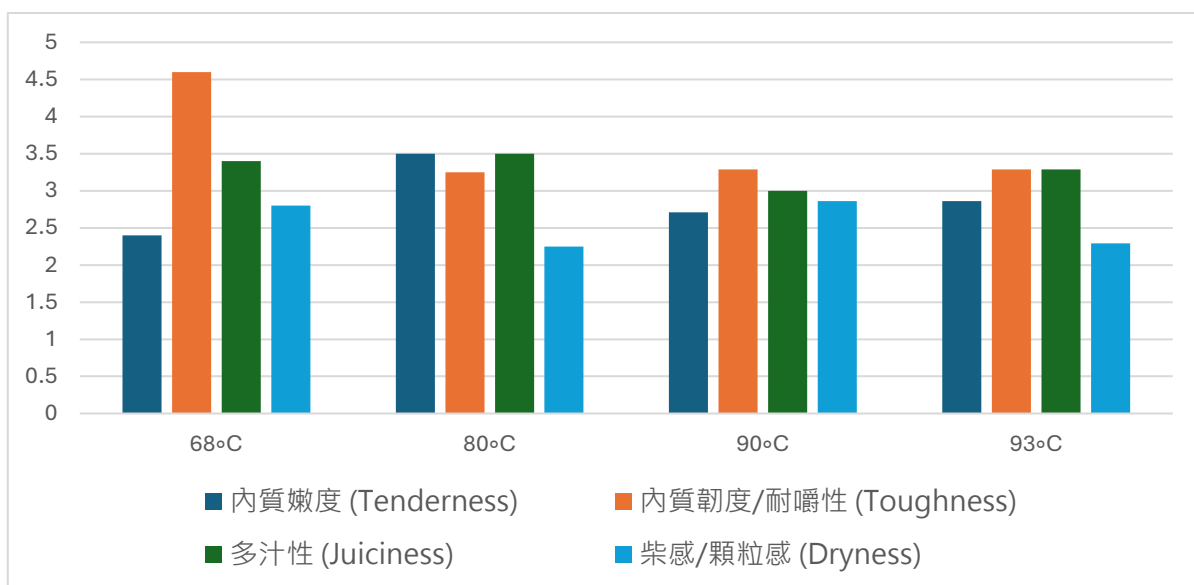
■ 實驗數據

樣本	A1 鍋		B1 鍋	
加熱儀器	烤箱		IH	
設定溫度	80°C		80°C	
實際溫度	80°C		79.8°C	
時間	1hr		1hr	
	Before	After	Before	After
滷汁 pH	6.5	6.9	6.5	6.9
滷汁鹽度	1.043	1.062	1.052	1.066
滷汁重量	757g	724g	755g	746g
肉塊韌度	NA	4.59	NA	3.34
肉塊重量	298.8g	258g	296g	237g
失重率	13.7%		20%	

樣本	A2 鍋		B2 鍋	
加熱儀器	烤箱		IH	
設定溫度	80°C		80°C	
實際溫度	80°C		80°C	
時間	2hr		2hr	
	Before	After	Before	After
滷汁 pH	6.9	5.5	6.9	5
滷汁鹽度	1.062	1.062	1.066	1.059
滷汁重量	724g	674g	744g	721g
肉塊韌度	NA	4.83	NA	4.28
肉塊重量	213g	213g	192g	190g
失重率	0%		1%	

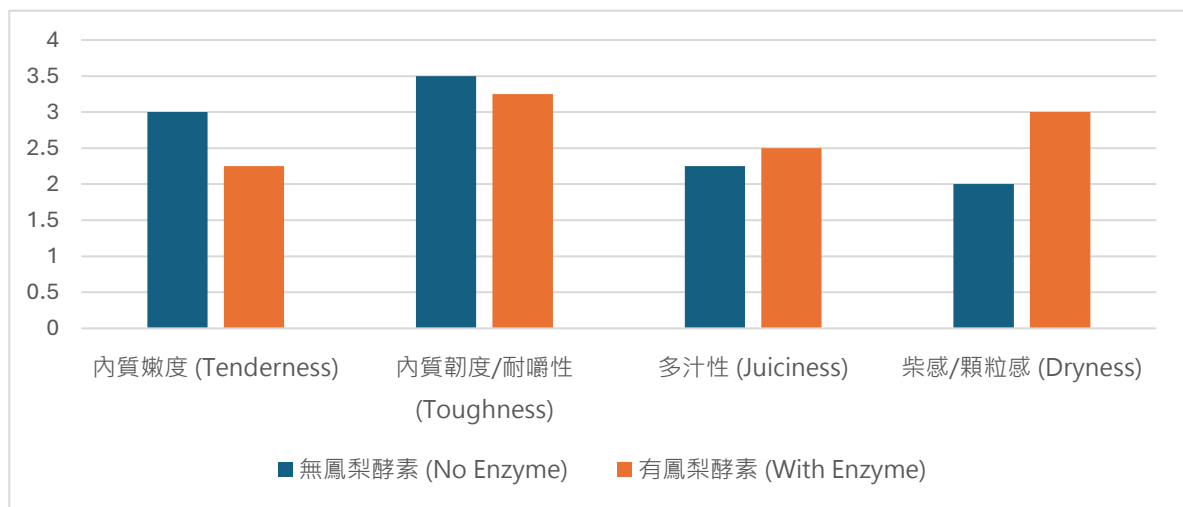
二、統計分析圖表集

評分項目	68°C	80°C	90°C	93°C	趨勢分析
肉質嫩度	2.4	3.5	2.71	2.86	80°C 表現最嫩，低溫或極高溫嫩度略降
肉質韌度/ 耐嚼性	4.6	3.25	3.29	3.29	68°C 顯著最韌，高溫有助於軟化肉質
多汁性	3.4	3.5	3.0	3.29	80°C 多汁性最佳，90°C 相對較乾
柴感/顆粒感	2.8	2.25	2.86	2.29	80°C 與 93°C 柴感最低（得分越低越好）



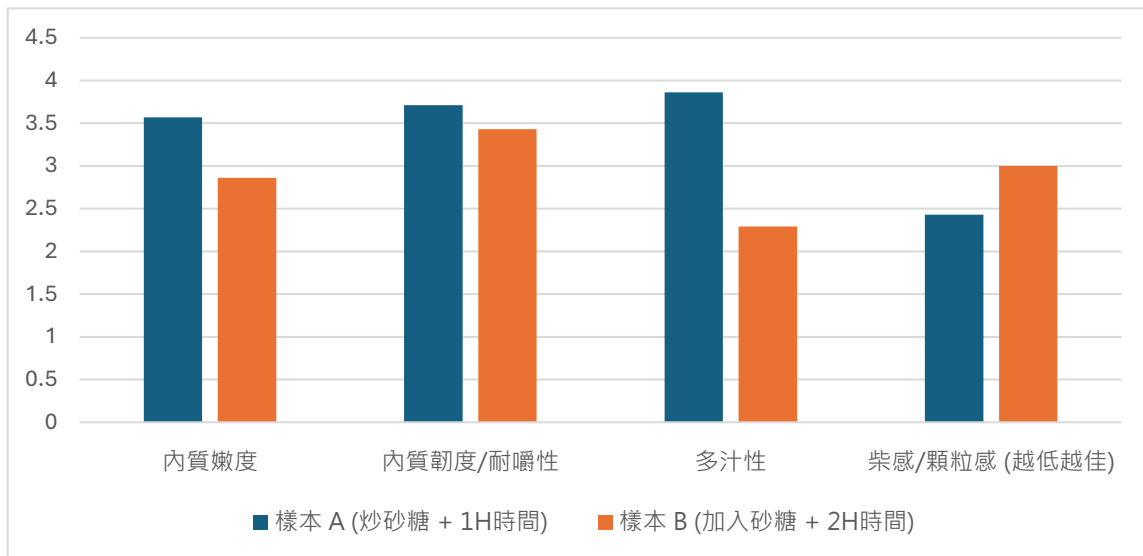
鳳梨酵素影響評分彙總表 (平均分)

評分項目	有鳳梨汁酵素	無鳳梨汁酵素	表現趨勢
肉質嫩度	3	2.25	-0.75
肉質韌度/耐嚼性	3.5	3.25	-0.25
多汁性	2.25	2.5	0.25
柴感/顆粒感 (低分佳)	2	3	1



梅納反應與時間影響評分表 (平均分)

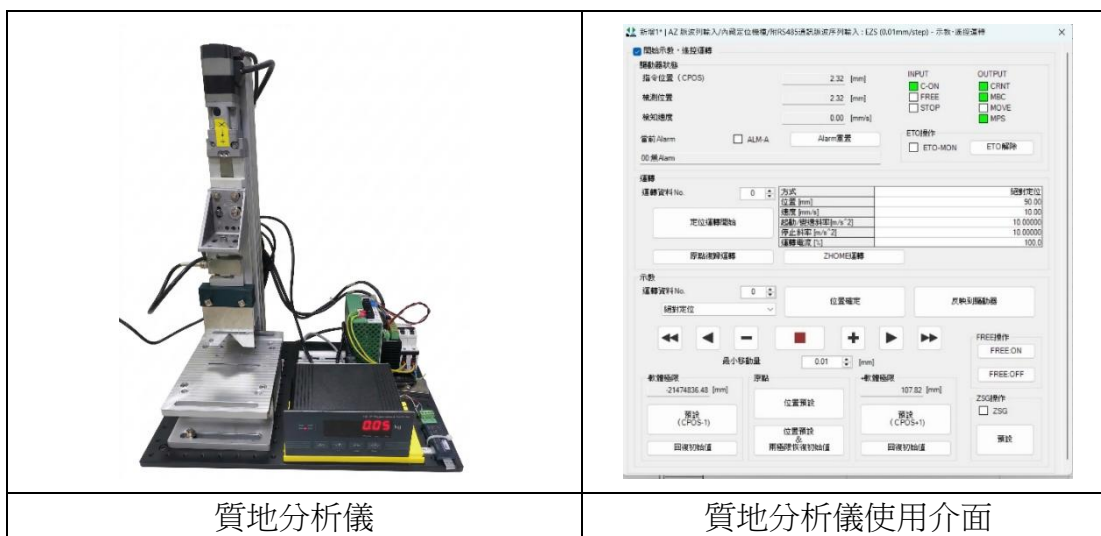
評分項目	樣本 A1 (炒砂糖 + 1H 間)	樣本 B1 (加入砂糖 + 2H 時間)	差異 (A-B)
肉質嫩度	3.57	2.86	0.71
肉質韌度/耐嚼性	3.71	3.43	0.28
多汁性	3.86	2.29	1.57
柴感/顆粒感 (越低越佳)	2.43	3	-0.57



三、相關實驗照片紀錄

- 實驗儀器

本照片呈現「溫度對於肉質影響實驗」所使用之實驗儀器與設備配置，包含溫度控制與量測相關裝置，用以確保實驗過程中溫度條件之準確性與穩定性。完整之儀器配置為後續肉質變化觀察與數據分析提供可靠的實驗基礎。

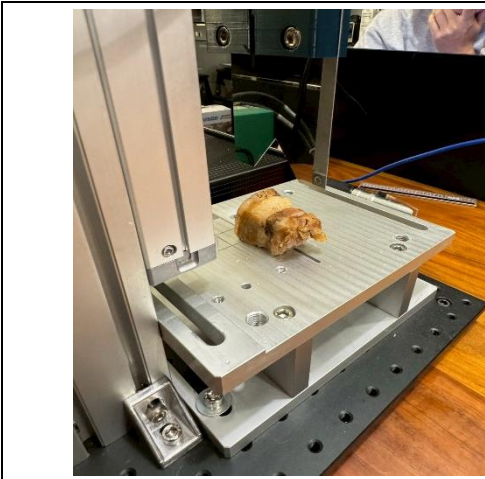


	
<p>實驗所使用的材料與調味原料</p>	<p>食物秤</p>
	
<p>烹煮器材 1-蒸爐</p>	<p>烹煮器材 2-IH 爐</p>
	
<p>烹煮器材 3-烤箱</p>	<p>鹽度計</p>
	
<p>溫度計</p>	<p>pH 值試紙</p>

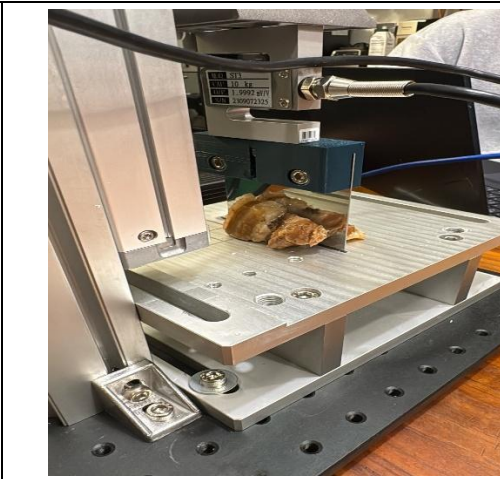
- 第一次實驗 115.12.14

本照片記錄第一次進行「溫度對於肉質影響實驗」之實驗過程，主要目的為建立不同溫度條件下肉質變化之初步觀察結果，並確認實驗流程與操作方法之可行性。透過本次實驗，完成基礎數據蒐集，作為後續實驗調整與比較之依據。

	
<p>三鍋實驗食材</p>	<p>準備食材(3 鍋)</p>
	
<p>A 鍋煮後照片</p>	<p>B 鍋煮後照片</p>
	
<p>C 鍋煮後照片</p>	<p>進行烹調前後的鹽度觀察</p>



進行剪切測試三層肉的韌度-1



進行剪切測試三層肉的韌度-2

• 第二次實驗 116.1.1

本照片為第二次實驗執行紀錄，本次實驗加入酵素處理條件，探討在不同溫度環境下，酵素作用對肉質結構與軟嫩程度之影響。透過酵素反應與溫度控制之比較，進一步分析溫度與酵素交互作用對肉質變化之影響趨勢，提升整體實驗結果之完整性與說服力。



2 鍋開始進行 1 小時烹調



準備進行 2 鍋實驗測試



3 鍋煮後照片

• 第三次實驗 116.01.11

本照片為第三次實驗之執行紀錄。本次實驗新增梅納反應實驗組，探討在不同溫度條件下，酵素作用對肉質結構與軟嫩程度之影響。透過比較各溫度環境中酵素反應結果，進一步分析溫度與酵素交互作用對肉質變化之影響趨勢，以提升整體實驗結果之完整性與說服力。



註：所有照片皆自行拍攝