



國立臺灣大學生物資源暨農學院園藝暨景觀學系

碩士論文

Department of Horticulture and Landscape Architecture

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master's Thesis

添加米蛋白對雞塊理化特性與感官特性之研究

Effect of Rice Protein Incorporation on the Physicochemical
and Sensory Properties of Chicken Nuggets

駱奕安

Yi-An Lo

指導教授：許輔博士

Advisor: Fuu Sheu, Ph.D.

中華民國 114 年 7 月

July, 2025

致謝

首先，衷心感謝我的指導教授 許輔老師，在研究過程中給予我細心的指導與寶貴的建議。不僅協助我順利完成論文，更在這段期間教會我許多思考的邏輯與表達方式，讓我深刻體會到：「站在聽者的角度思考，表達才能真正 make sense」。這樣的訓練改變了我看待問題與溝通表達的態度，也讓我在過程中獲得了寶貴的成長，也更有 confidence。我將銘記老師的教導，並帶著這份改變持續前行。

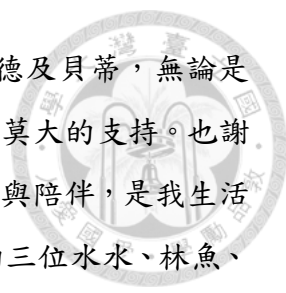
亦感謝口試委員 蘇南維老師與 周志輝老師撥冗參與本論文審查，並於口試過程中提供許多建議與指正，使本論文內容更加嚴謹、完整。謝謝兩位老師的鼓勵與指導，讓我獲益良多。

在雞塊製程方面，感謝碁富公司 古明靄博士於雞塊製作過程中提供技術指導，以及振誠公司 許庭禎老師提供肉類加工的務實建議與基礎知識，使我對肉製品製程有更深入的理解，也促使本研究能順利進行。

在實驗操作與儀器支援方面，感謝農學院共儀中心曾亭育小姐與獸醫系電子顯微鏡室張涵涵小姐的技術協助，亦感謝園藝系 吳思節老師、處理組 吳俊達老師、動科所 魏恒巍老師與食科所 丁俞文老師提供實驗所需設備與資源，也謝謝動科所東東學長與大寶學姊在實驗期間的協助。

實驗室生活方面，感謝詠欣與弘仁學長對實驗室日常事務的支持與維持。感謝思葶學姊與庭璋學姊分享許多米蛋白相關的實驗經驗與想法，讓我在研究過程中少走了許多彎路。謝謝智庭學長在論文撰寫與實驗設計上提供寶貴建議，使研究內容更加完整。感謝這兩年來實驗室一起努力的夥伴們，謝謝包容我在旁搭話碎唸的映映學姊，也感謝古月學姊、阿嬤學姊、彩薰學姊與秉奇學長，謝謝你們的陪伴，以及在我遇到實驗困難時的開導與協助。也謝謝總是帶來活力的夥伴沅宜，果然是史上。另外感謝一起生活的學妹們霈芷、亞臻、博媛、沂葭、鈺芸與玥玟，謝謝你們的陪伴，為實驗室增添了輕鬆愉快的氣氛。

亦感謝四研的琮閔、小白，處理室的阿酸、郁庭與楷智，花卉館的謝同學、森林系的 LW，以及所有協助雞塊品評的同學們，在實驗階段熱心參與品評並提供寶貴回饋，讓研究得以順利完成，誠摯感謝你們的幫忙與支持。



謝謝在碩士期間一路支持與鼓勵我的朋友們，特別感謝查德及貝蒂，無論是在我心情低落時的傾聽，還是在實驗與論文上的協助，都給了我莫大的支持。也謝謝一起考上台大的熊，作為室友與摯友，六年來不離不棄的照顧與陪伴，是我生活中最穩定且重要的依靠之一。謝謝死女團的死女們、沒事找 4 的三位水水、林魚、瑄與吳書帆，雖然你們不太懂我的實驗內容，卻總是給我滿滿的支持與情緒價值，讓我在低潮時仍有動力前行。

最後，感謝我的家人。謝謝想退休卻仍努力為駱老么打拼的爸爸；謝謝在生活中無條件給予精神與金錢支持的媽媽；謝謝總是讓我蹭飯並包容我的姐姐；也謝謝支持我的哥哥。謝謝你們讓我可以無後顧之憂地完成碩士學業。

感謝所有在碩士生活中幫助過我的人。因為有你們，這段旅程才能走得踏實且溫暖。

駱奕安 謹致於

國立臺灣大學園藝暨景觀學研究所

中華民國一百一十四年七月

摘要

隨著消費者對環境永續與健康飲食的議題關注度增加，肉類替代品的發展逐漸受到重視。由於植物肉品在質地與口感上與傳統肉品仍存在落差，因此，以植物蛋白部分取代動物性蛋白的混合肉製品逐漸受到關注，成為兼具感官接受度與永續性的折衷選擇。本研究選用具高消化率、低過敏性之米蛋白 (rice protein, RP)，探討其在不同應用方式下對雞塊質地與結構之影響，並進一步建立肌原纖維蛋白 (myofibrillar proteins, MP) 與水分比率 (MP/water ratio) 作為質地表現的關鍵指標。

研究首先設計以 RP 取代不同比例 (10%、20%、30%) 的雞肉，以評估其對雞塊品質之影響。結果顯示，隨取代比例增加，雞塊質地硬度顯著下降，整體感官接受度也隨之降低，微觀結構則呈現鬆散趨勢；但在低比例取代 (10%) 下，產品仍能維持與對照組相近之質地與感官表現。為改善取代應用中雞塊質地下降的情形，本研究進一步對 RP 進行去醯胺基處理，藉以提升其溶解性與其他功能性，期望強化其於取代雞肉應用中的質地表現穩定性。然而，經去醯胺基處理之 RP 實際應用於取代雞肉時，雞塊的質地與結構表現仍與使用未經修飾 RP 時相近，顯示其改善效果有限。研究進一步改採額外添加 RP (5、10、15%) 的方式，以評估其在不改變雞肉使用量與水分配方的條件下之應用效果，結果顯示隨添加量增加，雞塊硬度提升，微觀結構呈現排列雜亂但緊密之現象，顯示 RP 在此應用方式下具結構支撐效果。為釐清上述質地差異是否與雞肉用量下降與水分比例上升，進而導致 MP/water 比率變動並影響質地表現，本研究針對取代應用中之配方設定，設計不同補水條件之組別，以調整 MP/water 比率，並分析其與雞塊質地變化之關聯性。結果顯示，MP/water 比率與雞塊硬度呈高度正相關 ($r=0.931$)，證實該比率可作為雞塊質地表現之關鍵指標，提供混合肉製品開發之參考依據。

本研究驗證了米蛋白應用於雞塊等絞碎肉製品的可行性與潛力，並提出 MP/water 比率為影響質地表現之關鍵指標。未來植物蛋白於肉製品之應用開發中，建議除考量其功能特性外，也建議將 MP/water 比率納入考量，作為評估質地穩定性與配方設計之參考依據。

關鍵字：米蛋白、去醯胺基處理、雞塊、混和肉、肌原纖維蛋白、質地

Abstract

With increasing consumer awareness of environmental sustainability and healthy diets, the development of meat alternatives has received growing attention to support the reduced consumption of animal proteins. Although plant-based meats offer promise, they often struggle to replicate the texture and mouthfeel of conventional meat. As a result, hybrid meat products combining animal and plant proteins offer a compelling compromise that balances sensory appeal with sustainability.

This study investigated the application of rice protein (RP), known for its high digestibility and low allergenicity, in chicken nuggets through various incorporation strategies. In addition, the myofibrillar protein-to-water (MP/water) ratio was introduced as a key indicator for evaluating texture performance.

Three RP application methods were tested in this study. First, RP was used to replace chicken meat at 10%, 20%, and 30% levels. Results showed that as the replacement ratio increased, product hardness and overall sensory acceptance significantly declined, and the microstructure became looser. However, with 10% replacement, the products maintained comparable quality to the control. To improve texture under replacement conditions, RP underwent deamidation to enhance solubility and functionality. Nonetheless, deamidated RP performed similarly to the unmodified form, indicating limited improvement.

Given these constraints, RP was subsequently added as a supplementary ingredient (5%, 10% and 15%) without altering the amounts of chicken or water. This approach increased hardness and produced denser, though disorganized, microstructures, demonstrating RP's structural contribution. To determine whether these textural changes were associated with variations in MP/water ratio due to the changes in meat and water contents, water levels were adjusted under replacement conditions. A strong positive

correlation ($r = 0.931$) was observed between MP/water ratio and nugget hardness, confirming its role as a critical determinant for the nugget texture.

Overall, this study confirms the feasibility and potential of applying rice protein in comminuted meat products such as chicken nuggets and proposes the MP/water ratio as a reliable indicator of texture performance. Future formulation of plant-protein-based meat products should consider not only the intrinsic functional properties of the protein but also the impact on MP/water ratio, which may guide the optimization of texture stability and overall product quality.

Keywords: rice protein, deamidation, chicken nuggets, hybrid meat, myofibrillar protein, texture profile

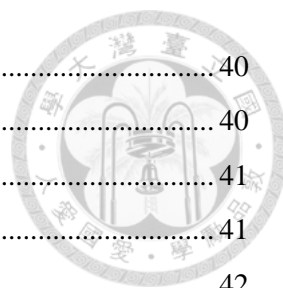
目次



致謝.....	I
摘要.....	III
Abstract.....	IV
目次.....	VI
表次.....	IX
圖次.....	X
縮寫表.....	XI
第一章 文獻回顧.....	1
1. 研究背景.....	1
2. 米蛋白 (rice protein).....	2
2.1 米蛋白之優勢.....	2
2.2 米蛋白之組成.....	3
2.3 米蛋白之加工功能性.....	4
3. 加工肉製品.....	7
3.1 肌肉蛋白之組成.....	7
3.2 凝膠機制.....	8
3.3 影響肌原纖維蛋白膠凝的因素.....	9
3.4 雞塊.....	13
4. 混合肉製品.....	14
4.1 混合肉製品的應用與技術挑戰.....	14
第二章 研究目的與動機.....	16
第三章 材料與方法.....	18
第一節 米蛋白及雞胸肉之基本組成分析.....	19
1.1 水分含量測定.....	19
1.2 粗蛋白含量測定.....	19
1.3 粗脂肪含量測定.....	20
第二節 取代原料功能性分析與雞塊製備.....	20
2.1 去醯胺基米蛋白製備.....	20
2.2 米蛋白及去醯胺基米蛋白之加工功能性.....	20
2.3 雞塊之製程.....	21

第三節 雞塊之品質及理化特性.....	22
3.1 烹煮損失.....	22
3.2 生肉漿及雞塊之水分含量測定.....	22
3.3 pH 值.....	22
3.4 質地分析.....	22
3.5 顏色測定.....	24
第四節 感官分析.....	24
第五節 雞塊之型態分析.....	24
5.1 掃描式電子顯微鏡.....	24
第六節 統計分析.....	25
第四章 研究結果.....	26
第一節 以不同米蛋白比例取代雞塊中雞肉蛋白質.....	26
1.1 雞塊製程建立.....	26
1.2 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之理化特性分析.....	27
1.3 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之質地分析.....	27
1.4 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之微觀結構分析.....	28
1.5 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之感官分析.....	29
第二節 去醯胺基米蛋白取代 20% 雞塊中雞肉蛋白質.....	30
2.1 去醯胺基米蛋白之理化性分析.....	30
2.2 20% 去醯胺基米蛋白雞塊之質地分析.....	30
2.3 20% 去醯胺基米蛋白雞塊之微觀結構分析.....	31
第三節 以不同米蛋白比例額外添加至雞塊中.....	31
3.1 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之理化特性分析.....	32
3.2 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之質地分析.....	32
3.3 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之微觀結構分析.....	33
第四節 探討影響雞塊質地之機制.....	33
4.1 水與米蛋白添加對雞塊之質地分析.....	34
4.2 減少補水量對米蛋白取代雞肉蛋白後質地影響之分析.....	35
第五章 討論.....	37
第一節 以不同米蛋白比例取代雞塊中雞肉之蛋白質.....	37
1.1 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之理化特性影響.....	37
1.2 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之質地影響.....	38
1.3 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之微觀結構影響.....	39

1.4 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之感官品評影響.....	40
第二節 去醯胺基米蛋白取代 20% 雞塊中雞肉之蛋白質.....	40
2.1 去醯胺基米蛋白之理化性影響.....	41
2.2 20% 去醯胺基米蛋白雞塊之質地與微觀結構影響.....	41
第三節 以不同米蛋白比例額外添加至雞塊中.....	42
3.1 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之理化影響.....	42
3.2 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之質地影響.....	43
3.3 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之微觀結構影響.....	43
第四節 探討影響雞塊質地之機制.....	44
4.1 水與米蛋白添加對雞塊之質地分析.....	44
4.2 減少補水量對米蛋白雞塊質地影響之分析.....	46
第六章 結語.....	48
參考文獻.....	49
TABLES.....	58
FIGURES.....	62
Appendix.....	79



表次



表 1、本實驗所使用的米蛋白與雞肉之基本成分分析結果	58
表 2、本研究中不同雞塊產品的配方表	59
表 3、不同組別雞塊樣品之 MP/water 比率與硬度表現	60
表 4、不同補水比例組別之 MP/water 比率與硬度表現	61

圖次



圖 1、實驗架構圖	62
圖 2、本實驗之雞塊製作流程圖	63
圖 3、米蛋白雞塊之理化特性分析	64
圖 4、米蛋白雞塊之色澤分析	65
圖 5、米蛋白雞塊之質地分析	66
圖 6、米蛋白雞塊之掃描電子顯微照片	67
圖 7、米蛋白雞塊之感官品評分析結果	68
圖 8、去醯胺基米蛋白之製作流程圖	69
圖 9、去醯胺化處理對米蛋白功能性之影響	70
圖 10、去醯胺基米蛋白、米蛋白雞塊之質地分析	71
圖 11、去醯胺基米蛋白、米蛋白雞塊之掃描電子顯微照片	72
圖 12、額外添加米蛋白的米蛋白雞塊之理化特性分析	73
圖 13、額外添加米蛋白的米蛋白雞塊之質地分析	74
圖 14、額外添加米蛋白的米蛋白雞塊之掃描電子顯微照片	75
圖 15、不同配方之米蛋白雞塊之質地分析	76
圖 16、不同補水比例下的米蛋白雞塊之質地分析	77
圖 17、雞塊樣品之硬度、MP/water 比率、MP 與水分含量相關性熱力圖	78

縮寫表



縮寫	全稱
RP	rice protein
DRP	deamidated rice protein
MP	myofibrillar proteins
WHC	water holding capacity
STPP	sodium tripolyphosphate
CL	cooking loss
SEM	scanning electron micrographs
RP10	samples with 10% chicken meat substituted by rice protein
RP20	samples with 20% chicken meat substituted by rice protein
RP30	samples with 30% chicken meat substituted by rice protein
E-RP5	samples enriched with 5% additional rice protein
E-RP10	samples enriched with 10% additional rice protein
E-RP15	samples enriched with 15% additional rice protein
MP/water ratio	myofibrillar protein to water ratio
con	control group
con+W	control group supplemented with additional water
con+W+RP	control group supplemented with additional water and rice protein
con+RP	control group supplemented with additional rice protein
RP20-RW1	RP20 group with 1% reduction in its original water supplementation.
RP20-RW3	RP20 group with 3% reduction in its original water supplementation.
RP20-RW5	RP20 group with 5% reduction in its original water supplementation.



第一章 文獻回顧

1. 研究背景

肉類為人類飲食中不可或缺的蛋白質來源，提供優質蛋白質與必需胺基酸，對於維持肌肉功能、修復組織及免疫調節具有重要作用。隨著全球人口持續增加，肉類消費需求大幅上升 (Henchion et al., 2014)。然而，傳統肉類生產需要消耗大量的資源與排放大量的溫室氣體，對環境造成負擔。為此，肉類替代品的發展逐漸受到重視 (Bohrer, 2019)。

植物性蛋白因具備低成本與高永續性等優勢，成為肉類替代原料選項之一。在肉類替代品中，以植物肉為主流產品，目前市售植物肉主要採用大豆、豌豆或小麥蛋白，經擠壓製程形成具纖維狀結構的組織化植物蛋白 (TVP)，用以模擬傳統肉品的質地與風味 (Bohrer, 2019; Kyriakopoulou et al., 2021)。然而，植物肉在口感與多汁性方面仍無法完全模擬動物肉的特性，進而影響消費者接受度 (Ismail et al., 2020)。因此，混合肉製品 (hybrid meat products) 被視為兼顧永續性與品質的折衷方案。透過植物蛋白部分取代動物性蛋白，不僅能減少環境負擔，也能保留一定程度之傳統肉品風味與質地。然而，混合不同蛋白質來源可能會改變肉品之質地特性，故選擇合適的植物蛋白原料非常重要。

米蛋白兼具營養豐富與低過敏性等優勢，是一種具潛力之植物性蛋白來源 (Zhao et al., 2020)。然而，植物蛋白與動物蛋白在溶解性與凝膠形成能力上存在顯著差異，可能影響肉製品的質地、口感及加工穩定性 (Chandler et al., 2022)。因此，本研究以米蛋白作為混合肉製品中部分取代動物性蛋白之原料，探討其不同取代比例對加工肉製品品質的影響，評估米蛋白應用於混合肉製品的可行性，並釐清其對產品質地形成之影響機制，期望能提升產品整體品質與市場接受度。



2. 米蛋白 (rice protein)

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是全球重要的穀物作物之一，主要分佈在亞洲地區，產量約占全球的 90% (Amagliani et al., 2017)。白米 (milled rice) 是稻米經過去除稻穀 (hull)、米糠 (rice bran) 及胚芽 (embryo) 後所得的產物，其中胚乳約占 70% (endosperm) 富含碳水化合物，而蛋白質比例約為 5.8% ~ 7.7% (Van Hoed et al., 2006; Hoogenkamp et al., 2017; Fukagawa and Ziska, 2019)。雖然米蛋白 (rice protein, RP) 的溶解性相對較低，但其具有高消化率 (protein digestibility)、低致敏性 (hypoallergenic) 及良好的營養特性，使其在食品加工領域仍具有潛在應用價值 (Amagliani et al., 2017)。

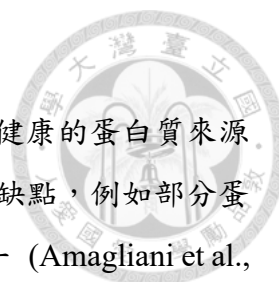
2.1 米蛋白之優勢

2.1.1 產量供應大且成本低廉

水稻是全球最重要的穀類作物之一，廣泛種植於超過 100 個國家，全球之每年總產量達約 7.69 億公噸，其中，亞洲地區占全球產量的 90% (Hoogenkamp et al., 2017; FS Pocketbook, 2019)。稻米作為亞洲國家的主要主食，每人每年平均的稻米攝取量約 100 公斤，為全球平均的 1.67 倍 (Hoogenkamp et al., 2017)。稻米的大規模種植與穩定高產量，使其成為可持續供應米蛋白的重要來源 (Redfern et al., 2012)。此外，米蛋白主要來自碾米與加工過程中的副產物，如米糠、碎米、米澱粉等的加工副產物，這些原料價格低廉，且透過加工技術可有效回收蛋白質 (Shih, 2003; Fabian et al., 2011)。相比動物性蛋白，米蛋白因為原料取得容易、加工成本較低，而具有較高的經濟效益，是個提供穩定且成本低的蛋白質來源 (Fabian et al., 2011)。

2.1.2 良好的營養價值

僅含胚乳之白米，其碳水化合物含量為 76.8% ~ 86.56%，蛋白質比例約為 5.8% ~ 7.7% (Paraman et al., 2006; Ghanghas et al., 2022)。雖然稻米的蛋白質含量僅為 7% ~ 9%，但其擁有良好的胺基酸組成與高消化率，尤其是富含人體必需胺基酸 (essential amino acid, EAA) 中的半胱胺酸 (cystine) 及甲硫胺酸 (methionine)，以及穀類作物中常缺乏的第一限制胺基酸-離胺酸 (lysine) (Kumar Singh et al., 2016)。因此，米蛋白不僅能提供基本營養，還能改善胺基酸攝取的平衡，使其成為一種具營養價值的蛋白質來源 (Zhao et al., 2020)。



2.1.3 低過敏性

植物性蛋白質因具有低脂肪及不含膽固醇等優點，是一種健康的蛋白質來源 (Eggum et al., 1993; Dai et al., 2023)。然而，植物蛋白也存在一些缺點，例如部分蛋白可能會引起過敏反應，其中，大豆蛋白即是常見的過敏源之一 (Amagliani et al., 2017; Zhao et al., 2020)。相比之下，米蛋白因其低過敏性，成為大豆蛋白過敏者的替代選擇。因此，米蛋白在提供營養的同時，降低了過敏風險，使其在食品應用上具有潛在優勢 (Zhao et al., 2020)。

2.2 米蛋白之組成

米蛋白可依照不同的溶解度分成四大類，按比例由小到大排序，依次為醇溶性之醇溶蛋白 (prolamin)、水溶性之白蛋白 (albumin)、鹽溶性之球蛋白 (globulin) 以及溶於酸或鹼溶液的穀蛋白 (glutelin)。它們分別占白米蛋白質的 3%~6%、5%~10%、7%~17%、75%~81% (Amagliani et al., 2017)，其中穀蛋白約占稻米總蛋白質的 80%，為白米中最主要之蛋白質成分，同時也是影響米蛋白溶解度的關鍵因素 (Hoogenkamp et al., 2017)。

2.2.1 白蛋白

白蛋白屬於水溶性蛋白，占總米蛋白的 4%~6% (Baxter et al., 2010)。其結構主要由 α -螺旋結構組成，且幾乎不含雙硫鍵 (disulfide bonds)，因此不會因雙硫鍵之交聯而產生聚集 (Landers et al., 1994)。再者，白蛋白帶有足夠的表面淨電荷 (surface charge)，可在水中形成穩定的溶液 (Landers et al., 1994)。由於缺乏雙硫鍵交聯與帶有足夠的表面電荷，白蛋白擁有較好的水溶性。在分子特性上，其等電點 (isoelectric point, PI) 約為 4.1，分子量約為 10~200 kDa (Hamada, 1997)。此外，在胺基酸組成上，白蛋白富含離胺酸、組胺酸 (histidine) 及多種必需胺基酸，因此具有較高的營養價值 (Guo et al., 2006)。然而，白蛋白的特性可能因稻米品種、提取方式和分析技術的不同而有所差異 (Ghanghas et al., 2022)。

2.2.2 球蛋白

球蛋白為鹽溶性蛋白，占總米蛋白的 6%~13%，主要溶於稀鹽溶液 (Hamada, 1997)。其結構主要由 α -螺旋結構組成，且表面帶有靜電荷，因此其溶解度相對較佳 (Adebiyi et al., 2009)。在分子特性上，球蛋白的等電點約為 4.3 和 7.9，分子量範圍為 16~130 kDa (Amagliani et al., 2017)。而在胺基酸組成上，球蛋白富含甲硫



胺酸與半胱胺酸 (cysteine)，但離胺酸含量相對較低 (Ellepola et al., 2006)。此外，由於其溶解度受 pH 和離子強度影響，在不同加工條件下會表現出不同的功能特性 (Ellepola et al., 2006)。

2.2.3 穀蛋白

穀蛋白是米蛋白中含量最多但溶解性最差的蛋白，占總米蛋白的 66%~78% (Takaiwa et al., 1999)。其分子量範圍為 30 ~ 35 kDa 與 19 ~ 25 kDa (Zhao et al., 1983)，其結構主要由 β 折疊與無規則捲曲結構組成，且含有大量疏水性胺基酸，如麩醯胺酸 (glutamine)、脯胺酸 (proline)，這些側鏈容易聚集，使蛋白質分子形成疏水核心，導致溶解度下降 (Hamada, 1997)。穀蛋白也含有半胱胺酸 (cysteine)，可在分子間形成雙硫鍵交聯，進一步提升其聚合結構之穩定性 (Paraman et al., 2007)。相較於其他蛋白類型，穀蛋白表面所帶淨電荷較低，在中性條件下靜電排斥力不足，導致蛋白質分子間更易聚集而沉澱 (Li et al., 2022)。此外，其肽鏈也可透過糖基化等交聯方式強化蛋白質間的連結，進一步抑制其溶解行為 (Hamada, 1997)。綜合以上因素，穀蛋白具備高疏水性、雙硫鍵交聯性與低表面電荷等特性，使其在中性水溶液中幾乎不溶，進而限制了整體米蛋白在食品加工中的應用潛力。

2.2.4 醇溶蛋白

醇溶蛋白是米蛋白中含量最少的成分，占總米蛋白的 2%~7% (Takaiwa et al., 1999)。其具有獨特的溶解特性，不溶於水，但可溶於 60 ~ 80% 乙醇溶液。其等電點範圍為 6.0 至 6.5，主要分子量分布在 10、13 和 16 kDa (Kubota et al., 2010)。醇溶蛋白含有較高比例的麩醯胺酸、精胺酸 (arginine)、甘胺酸、丙胺酸 (alanine)，這些胺基酸的存在加強了蛋白質的疏水性 (Hibino et al., 1989)。此外，其分子量範圍為 33 ~ 150 kDa，但主要集中在 105 kDa，顯示其可能形成較大的聚集體 (Hamada, 1997)。然而，與穀蛋白相比，醇溶蛋白的硫胺基酸含量較低，可能影響其交聯程度，進而減少其聚集行為 (Hamada, 1997)。

2.3 米蛋白之加工功能性

蛋白質在食品中的應用取決於其功能特性，而這些功能特性主要受到蛋白質本身的性質，以及其與水或其他成分的相互作用而影響。其中，溶解度是決定蛋白質功能性表現的關鍵，因為好的溶解度能增加蛋白質在溶液中之分散性，增加蛋白質之相互作用，進一步能提升蛋白質乳化性 (emulsifying)、凝膠性 (gelling)、保水

性 (water-holding capacity) 等，進而影響食品的加工特性 (Grossmann et al., 2019)。此外，除了溶解度，蛋白質的保水、保油性也會直接影響最終產品的質地與口感 (Yang et al., 2023a)。因此，提升米蛋白的溶解度，能有效增強其在食品加工中的應用潛力，進一步改善產品品質 (Li et al., 2009)。

2.3.1 溶解性

蛋白質的溶解性是指蛋白質在液體溶劑中溶解形成均一溶液的狀態，主要取決於蛋白質與蛋白質以及蛋白質與溶劑之間的相互作用 (Gao et al., 2024)。蛋白質的溶解度受到內在與外在的多種因素影響。內在因素包括胺基酸組成、蛋白質結構及鍵結方式，外在因素則受 pH 值、溫度、鹽濃度、碳水化合物等其他食品成分的影響 (Grossmann et al., 2019)。在米蛋白中，占比最大的穀蛋白因雙硫鍵結構、疏水作用及交聯作用導致溶解性較低，進而影響整體蛋白的應用性 (Zhao et al., 1983)。

2.3.1.1 影響蛋白質溶解度的因素

2.3.1.1.1 pH 值

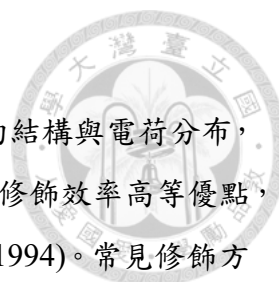
蛋白質的溶解度受 pH 值影響，當環境 pH 值等於蛋白質的等電點時，蛋白質的淨電荷為零，導致分子間缺乏靜電力 (electrostatic force) 的排斥，容易聚集形成沉澱，溶解度因此而降低。相反地，當 pH 值遠離等電點時，蛋白質分子帶有淨電荷，靜電排斥力增強，分子間的相互排斥能使蛋白質在溶液中維持分散狀態，從而提高溶解度 (Grossmann et al., 2019)。

2.3.1.1.2 溫度

溫度影響著蛋白質的結構穩定性與分子間相互作用，透過溫度的調整能進一步改變其溶解度，過高的溫度可能會引起蛋白質變性 (denature)，使其聚集形成沉澱，進而降低溶解度 (Pelegri and Gasparetto, 2005)。

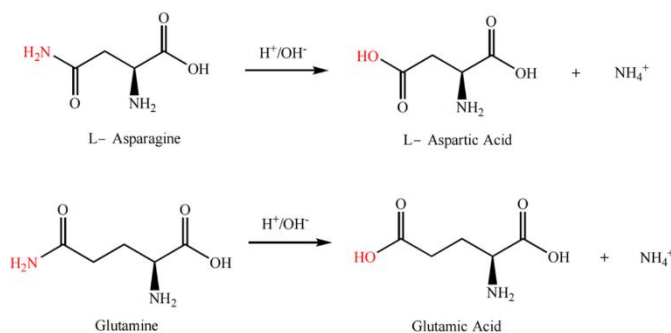
2.3.1.1.3 鹽濃度

鹽濃度影響蛋白質溶解度的機制可分成鹽析 (salting-out) 與鹽溶 (salting-in) 作用。在鹽析作用中，鹽分子與水分子競爭結合，使蛋白質可利用的水分減少，降低蛋白質的水合能力，導致蛋白質聚集並降低溶解度。相反地，在鹽溶作用中，適量的鹽離子可與蛋白質表面帶電基團相互作用，減少分子間的靜電吸引力，使蛋白質維持分散狀態，從而提高溶解度 (Murakami et al., 2017)。



2.3.1.1.4 化學修飾

化學修飾是透過蛋白質與化學試劑反應，改變其側鏈基團的結構與電荷分布，以改變蛋白質的理化與功能特性。此方法具操作簡單、成本低且修飾效率高等優點，廣泛應用於提升植物蛋白的水溶性、乳化性與起泡性 (Hamada, 1994)。常見修飾方式包括去醯胺化與還原反應 (Hamada, 1994 ; Avilés-Gaxiola et al., 2018)。其中，去醯胺化 (deamidation) ，是指在酸性或鹼性條件下，將蛋白質中不帶電的天門冬醯胺酸 (asparagine) 與麩醯胺酸轉化為帶負電的天門冬胺酸 (aspartic acid) 與麩胺酸，此轉變是將醯胺基脫除後，形成羧酸基 (圖一) ，使其於中性至鹼性環境中易解離為 -COO^- ，從而提升蛋白質表面淨負電荷、降低聚集傾向，最終改善其水溶性 (Hamada, 1994)。過去研究顯示，穀物與豆類蛋白中含有高比例的天門冬醯胺酸與麩醯胺酸，適合進行去醯胺化以強化功能特性 (Hamada, 1994)。



圖一、米蛋白去醯胺化反應。

Fig. 1. Deamidation reaction formula of rice protein (Adapted from Yang et al., 2023b)

2.3.2 保水性

保水性是指蛋白質受到壓力、離心或加熱等外力作用下，維持其自身與外加水分子之能力 (Hermansson, 1979)。保水性是影響蛋白質在食品應用中的重要因子，因為它會直接影響食品的質地、口感、穩定性及加工特性 (De Brier et al., 2015)，例如，在肉製品和烘焙產品中，保水性較高的蛋白質能維持水分，防止產品乾燥，提升產品品質 (Gupta et al., 2008)。保水性主要受到蛋白質的結構與蛋白質與水的相互作用之影響，其中包括氫鍵、靜電作用與蛋白質的側鏈組成與分佈 (Hermansson, 1979)。親水性基團中，如羧基和胺基，能夠與水分子形成氫鍵，提高保水能力 (Zayas, 1997)。此外，蛋白質的保水性與其溶解度密切相關，因為溶解度高的蛋白質能夠更均勻地分布於水中，使更多親水基團暴露於水分子周圍，從而

形成更多氫鍵與靜電作用，提高保水能力 (Gupta et al., 2008)。保水性也影響蛋白質在食品配方中的應用方式，例如，高保水性的蛋白質可能需先行水合，以確保其能充分吸收水分，而不會在產品配方中與其他成分競爭水分，進而影響最終產品的質地與品質 (Zayas, 1997)。米蛋白之保水性為 2.81 ~ 3.02 g/g，可於食品加工中發揮質地調節效果，展現良好應用潛力 (Zhao et al., 2012)。

2.3.3 凝膠性

蛋白質的凝膠性是指在特定條件下，蛋白質分子通過熱變性或其他物理、化學作用形成三維網狀結構的能力 (Arntfield et al., 1990)。其中，凝膠形成的關鍵因素之一為臨界蛋白質濃度 (critical protein concentration, CPC)，當蛋白質濃度低於此閾值時，無法形成穩定的凝膠結構 (Clark et al., 2002)。相較於動物性蛋白，植物蛋白的熱誘導凝膠能力較低，通常需要較高濃度 (約 5 ~ 15%) 才能形成凝膠 (Arntfield et al., 1990)。以米蛋白為例，其主要成分穀蛋白具有高度交聯結構與強疏水性，導致其溶解度低，進而限制其凝膠形成能力。這也是米蛋白在食品製品中應用時，常出現質地不穩定或結構支撐力不足的原因之一。然而，透過如酵素水解或與其他植物蛋白結合處理，可提升米蛋白的溶解度與功能性，有助於改善其凝膠性，進而擴展其在食品應用上的潛力 (Utsumi et al., 1981; Takaiwa et al., 1999)。

3. 加工肉製品

加工肉製品 (processed meat products) 是以肉類為主要原料，經物理、化學或酵素處理後所製成的食品，如香腸、肉丸與雞塊等 (Bessada et al., 2019; Kyriakopoulou et al., 2021)。這些產品的質地與功能性主要受肌原纖維蛋白 (myofibrillar proteins, MP) 之凝膠特性、蛋白質網絡的形成所影響 (Ismail et al., 2020)。肌原纖維蛋白透過加熱與鹽溶作用，形成穩定的三維凝膠結構，使加工肉製品具有良好的彈性、保水性與結構穩定性 (Bohrer, 2019)。

3.1 肌肉蛋白之組成

加工肉製品的質地與結構穩定性主要受肌肉蛋白的組成影響，其中肌肉蛋白可分為肌原纖維蛋白 (myofibrillar proteins)、肌漿蛋白 (sarcoplasmic protein) 和基質蛋白 (stroma protein) (Tornberg, 2005)。肌原纖維蛋白屬於鹽溶性蛋白 (salt-soluble proteins, SSP)，約占肌肉蛋白總量的 55%~60%。其中，肌原纖維蛋白是

由肌凝蛋白 (myosin) 與肌動蛋白 (actin) 兩種主要蛋白組成，這些蛋白質影響著加工肉製品的質地與結構穩定性 (Asghar et al., 1985)。

3.1.1 肌凝蛋白

肌凝蛋白占肌原纖維蛋白的 43%，其分子量為 470 kDa，被認為是影響膠凝特性的主要成分 (Asghar et al., 1985)。在肌原纖維結構中，肌凝蛋白主要位於粗肌絲內，當與鹽類作用時，離子強度的增加會破壞蛋白質間的靜電作用力，使肌凝蛋白被釋放出來 (Chen et al., 2018)。然而在熱誘導膠凝過程中，蛋白質會先部分變性與去摺疊，接著再透過雙硫鍵交聯來建立穩定的三維網絡結構 (Astihar et al., 1984; Smith et al., 1988)。

3.1.2 肌動蛋白

肌動蛋白約占肌原纖維蛋白的 20%，其分子量為 43 kDa，與肌凝蛋白共同組成肌原纖維結構 (Keever, 2012)。在熱處理時，肌動蛋白會影響蛋白質的交聯，進而影響加工肉製品的結構完整性與質地穩定性。雖然肌動蛋白膠凝能力不如肌凝蛋白，但仍能透過與肌凝蛋白的相互作用，提高凝膠的穩定性與加工肉製品的質地完整性 (Astihar et al., 1984)。

3.1.3 肌漿蛋白

肌漿蛋白約占總蛋白質的 30%~34%，為水溶性蛋白，主要影響肉色及酵素活性。雖然肌漿蛋白在膠凝過程中作用不如肌原纖維蛋白顯著，但在加工過程中能與其他成分相互作用，影響加工肉製品的風味發展，例如，某些肌漿蛋白中的酵素可促進脂肪氧化或蛋白質降解，進一步影響最終產品的感官特性 (Tornberg, 2005)。

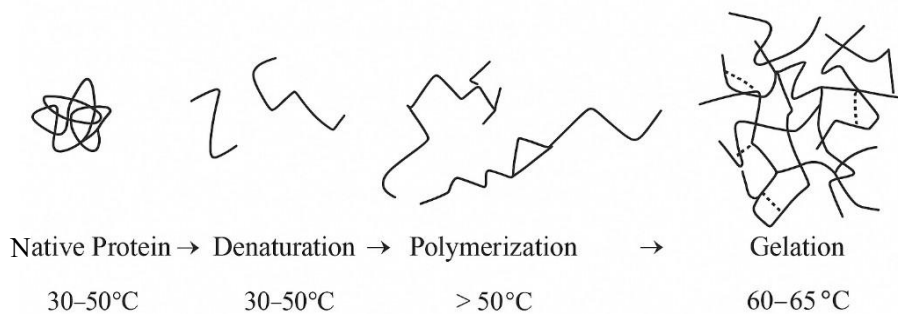
3.1.4 基質蛋白

基質蛋白約占總蛋白質含量的 10%~15%，主要由膠原蛋白 (collagen)、網狀蛋白 (reticulin) 和彈性蛋白 (elastin) 所組成，且不溶於水、酸、鹼及鹽類，使其在加工肉製品中的功能與其他蛋白質不同。

3.2 凝膠機制

凝膠 (gelation) 的形成主要來自肌凝蛋白在加熱過程中的變性、去摺疊及交聯作用。這些過程受到 pH 值、離子強度與水分含量等因素影響，進而決定凝膠的強度、彈性與持水性 (Tornberg, 2005)。膠凝化之過程可分為三階段，首先，當溫度達 30~50°C 時，肌凝蛋白逐漸變性，並因疏水作用而聚集。接著，當溫度升

高至 50°C 以上，蛋白質間開始產生交聯 (cross-linking)，逐漸形成穩定的三維網絡結構 (Astihar et al., 1984; Smith et al., 1988)。最終，在 60 ~ 65°C 時，完整的凝膠結構形成 (Keever, 2012 ; Chen et al., 2018) (圖二)。此凝膠結構的穩定性，對加工肉製品的質地與整體品質具有重要之影響 (Astihar et al., 1984; Smith et al., 1988)。



圖二、蛋白質凝膠化示意圖。

Fig. 2. Schematic diagram of protein gelation (Adapted from Sullivan et al., 2009)

3.3 影響肌原纖維蛋白凝膠的因素

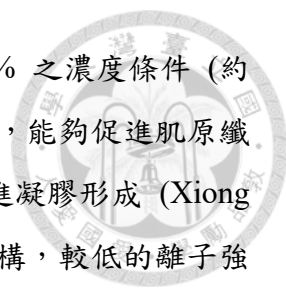
肌原纖維蛋白的凝膠形成受多種因素影響，包括 pH 值、離子強度 (ionic strength)、加熱條件與蛋白質濃度等 (Sun et al., 2011)。這些因素會影響肌凝蛋白的變性、去摺疊及交聯過程，進而影響凝膠的強度、穩定性及最終產品的質地。

3.3.1 pH 值

蛋白質之電荷分布與溶解度受到 pH 值影響，進而影響肌原纖維蛋白的凝膠形成能力。當 pH 接近肌原纖維蛋白的等電點 (pI 5.3) 時，蛋白質之間的靜電排斥力降低，導致蛋白質聚集，使其溶解度下降並降低凝膠形成能力 (Asghar et al., 1985)。然而，在 pH 6 時，肌原纖維蛋白具有最佳的熱誘導凝膠能力，形成的凝膠結構較為穩定且具有較高的保水性 (Asghar et al., 1985)。此外，當 pH 從 5.5 增加至 9.0 時，凝膠強度逐漸下降，顯示過高的 pH 可能降低肌原纖維之凝膠力，進而影響加工肉製品等肉製品的質地與口感 (O' Neill et al., 1993)。

3.3.2 離子強度

離子強度是影響肌原纖維蛋白凝膠形成的重要因素，其會影響蛋白質的溶解度與交聯能力，進而改變凝膠結構。商業肉製品中常見的氯化鈉 (NaCl) 和三聚磷酸鈉 (sodium tripolyphosphate, STPP) 在肌原纖維蛋白的溶解與凝膠形成中扮演重



要的角色 (Xiong and Brekke, 1991)。首先，NaCl 通常在 2%~3% 之濃度條件 (約 0.34 M 至 0.51 M) 是肌原纖維蛋白溶解度與功能性最佳的範圍，能夠促進肌原纖維蛋白的溶解，使肌凝蛋白從肌纖維結構中釋放出來，進而促進凝膠形成 (Xiong and Brekke, 1991)。此外，離子強度的變化也影響著凝膠微觀結構，較低的離子強度 (如 0.25 M NaCl) 會產生細緻且均勻的凝膠網絡，反之較高的離子強度 (如 0.6 M NaCl) 則促使蛋白質更緊密聚集，使凝膠更具韌性 (Hermansson, 1979)。再者，STPP 是肉製品常用的磷酸鹽之一，能夠螯合肌肉中的鈣離子 (Ca^{2+}) 和鎂離子 (Mg^{2+})，提升肌原纖維蛋白的溶解度與保水能力，進而改善凝膠結構。然而，過高的離子濃度可能會抑制蛋白質間之交聯作用，使凝膠結構鬆散 (Tornberg, 2005)。

3.3.3 加熱溫度與加熱速率

肌原纖維蛋白的凝膠形成受到加熱溫度與加熱速率的影響。適當的加熱溫度與加熱速率可促進蛋白質的變性與交聯，影響凝膠網絡的穩定性、均勻性與彈性。在凝膠形成的初始階段，肌凝蛋白因疏水作用而聚集。當溫度升高至 50°C 以上時，蛋白質開始發生交聯，並逐漸形成凝膠網絡 (Keever, 2012; Chen et al., 2018)。最終，當加熱溫度達到 60~65°C 時，完整的凝膠結構形成，使加工肉製品的質地更具緊實性與彈性 (Keever, 2012; Chen et al., 2018)。其中，溫度在 60~70°C 之間時，肌凝蛋白的凝膠形成最為穩定，該溫度範圍內的熱處理可有效提升肌原纖維蛋白的凝膠強度 (Ishioroshi et al., 1979)。除了加熱溫度，加熱速率也影響肌原纖維蛋白的凝膠結構，較慢的加熱速率可使蛋白質分子有較充分的時間發生變性與交聯，形成更均勻且彈性較佳的三維網絡結構 (Camou et al., 1989)，反之，過快的加熱速率可能導致蛋白質過度變性，使凝膠結構變得不均勻或較為脆弱，影響加工肉製品的最終質地。

3.3.4 蛋白質濃度

蛋白質濃度對熱誘導凝膠的形成具有重要影響。Ferry (1948) 提出最小膠凝濃度 (minimal gelation concentration) 理論，指出當蛋白質濃度低於某一臨界值時，無法形成連續的三維凝膠結構。這一理論後來被稱為膠凝形成的臨界蛋白質濃度。一般而言，植物蛋白需要 5%~15% 的蛋白質濃度才能形成凝膠，而肌原纖維蛋白僅需約 0.5% 的蛋白質濃度即可產生熱誘導凝膠 (Arntfield et al., 1990)。兩者之間的差異可能與蛋白質的分子結構與分子量大小有關。肌凝蛋白為長鏈分子，平均

分子量約 500 kDa (Clark et al., 2002)，明顯高於植物蛋白，例如大豆蛋白中的大豆球蛋白 (glycinin)，其分子量約為 340~375 kDa (Utsumi et al., 1981)。膠凝強度與硬度通常隨著蛋白質濃度的增加而提升 (Ishioroshi et al., 1979)。例如，在雞肉漿中，當蛋白質濃度從 4% 提高至 8% 時，膠凝強度顯著增加 (O'Neill et al., 1993)。較高的蛋白質濃度能促進蛋白質分子間的交聯作用，形成更緻密的凝膠網絡，進而提升膠凝物的硬度、咀嚼性及膠著性。由此，蛋白質濃度也是決定加工肉製品質地特性的關鍵因素之一。

3.3.5 其他添加物

在肉品製造過程中，通常會額外添加非肌肉蛋白 (non-muscle proteins, NM proteins) 作為功能性添加物，以調整產品之質地、保水性與結構穩定性。然而，NM 蛋白的添加，可能參與或干擾肌原纖維蛋白凝膠網絡的形成。Ziegler 等人 (1990) 提出五種 NM 蛋白於肌原纖維蛋白凝膠體系中可能影響其空間分佈之模式：

A. 可溶性填充模型 (soluble filler)：

NM 蛋白以溶解狀態存在於肌原纖維蛋白凝膠間隙液中，藉由增加液相黏度，間接提升整體剛性。文獻中以魚漿 (surimi) 與乳清蛋白濃縮物 (WPC) 混合系統為例，當肌原纖維蛋白已形成凝膠而乳清蛋白濃縮物尚未凝膠化時，乳清蛋白濃縮物仍可提升系統黏度與強度。

B. 不溶性填充模型 (particulate filler)：

NM 蛋白以顆粒狀分散於肌原纖維蛋白凝膠網絡中，主要作為物理填充物，還可能透過吸水膨脹增加產品硬度，代表性例子包括魚漿中分布的澱粉顆粒。

C. 複合交互模型 (complex-forming)：

NM 蛋白與肌原纖維蛋白產生非共價交互作用，例如：氫鍵、疏水作用等，影響肌原纖維蛋白凝膠的形成過程與網絡結構，魚肉中非肌漿蛋白與肌原纖維蛋白的共同作用為常見例子。

D. 共聚合模型 (copolymerized network)：

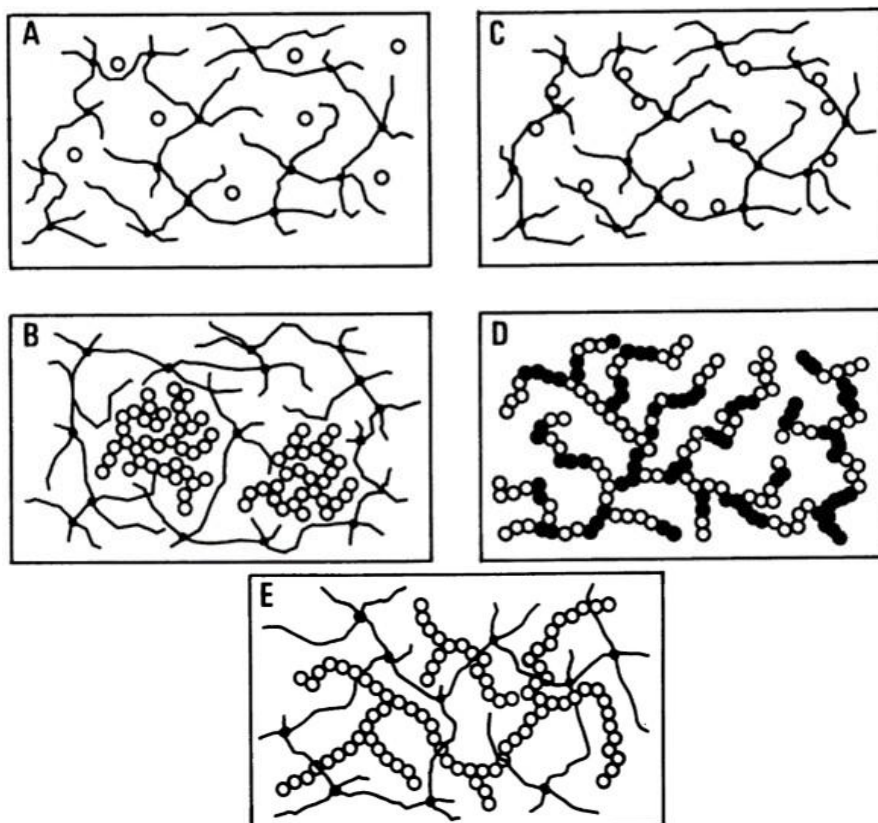
在特定條件下，NM 蛋白與肌原纖維蛋白共同組成單一異質凝膠網絡，但此類結構中之 NM 蛋白需具備與肌原纖維蛋白高度相容的結合位點與凝膠條件，因此目前多見於理論探討。



E. 互穿網絡模型 (interpenetrating networks) :

NM 與肌原纖維蛋白各自形成獨立的凝膠網絡，兩者雖無直接交互作用，卻因網絡增加與彼此纏繞，間接影響整體結構與穩定性，例如，當魚漿與乳清蛋白濃縮物同時凝膠時，即可能產生互穿網絡的結構行為。

此外，根據 Lanier (1991) 之觀點，非肌肉蛋白也可能透過競爭水合作用 (water competition effect) 進一步影響肌原纖維蛋白凝膠形成，尤其當 NM 蛋白以乾粉形式添加時，可能會競爭系統內的自由水，降低肌原纖維蛋白與水結合之能力，影響其凝膠形成。綜合而言，非肌肉蛋白可透過填充效應、結構交互作用與競爭水合作用等機制，改變肌原纖維蛋白凝膠結構，進而影響肉製品的質地與加工品質。因此，適當選擇與應用 NM 蛋白，有助於優化產品之感官特性與機能表現。



圖三、非肌肉蛋白與肌原纖維蛋白於凝膠系統中之五種空間分佈模型。

Fig. 3. Possible spatial partitioning models of non-muscle proteins (NM) in myofibrillar protein (MP) gel systems. (A) Soluble filler, (B) Particulate filler, (C) Complex-forming, (D) Copolymerized network, (E) Interpenetrating networks. (Adapted from Lanier, 1991)



3.4 雞塊

加工肉品根據製程與結構不同，可以分為四大類：(1) 整塊肉品 (whole muscle)，保有原始肌肉纖維結構，如熟火腿；(2) 絞碎肉品 (comminuted)，肉經絞碎但肉顆粒仍具可辨識性，如雞塊、漢堡排；(3) 乳化肉品 (emulsified)，肉經細碎乳化至肉顆粒無法辨識，其中蛋白與脂肪形成穩定凝膠網絡，如熱狗與貢丸；(4) 萃取物 (extracts)，如肉汁、肉湯等非固態濃縮品 (Cobos et al., 2015)。其中，雞塊屬於第二類之絞碎肉品，相較於乳化型肉製品，絞碎型產品保留較多的肉塊，由於其兼具結構特徵與加工彈性，因此在植物蛋白應用之相關研究中，也常被作為混合肉製品之模型產品。

雞塊是最常見的雞肉加工產品之一，因其便利性、良好風味以及速食市場的快速發展，深受消費者喜愛 (Sharima-Abdullah et al., 2018; Baéza, 2020)。隨著飲食習慣的轉變，即食食品逐漸成為主流，消費者也偏好雞肉加工產品，而非購買整隻雞進行烹調，因此，雞塊等產品逐漸取代傳統的雞肉 (Baéza, 2020)。雞塊最早於 1950 年代由 Robert Baker 博士開發，其提供了一種易於製備且適合商業化的雞肉加工產品 (Barbut, 2012)。然而，雞塊真正進入全球市場之原因是麥當勞於 1979 年取得麥克雞塊 (McNuggets) 專利，並將其標準化、生產工業化，使雞塊正式進入全球市場 (Barbut, 2012)。

3.4.1 雞塊之組成

雞塊通常由雞胸肉、調味料與外層麵糊組成，並開發出多種形狀與裹粉類型 (Huse et al., 2006 ; Barbut, 2012)。其中，雞胸肉因其低脂、高蛋白等特性，成為雞塊的主要原料，其成分約為 74% 水分、23% 蛋白質與 1.2% 脂肪 (Sams, 2001; Barutçu Mazi et al., 2017)。雞胸肉蛋白主要由 62.63% 之肌原纖維蛋白與 35.71% 之肌漿蛋白所組成 (Murphy et al., 1998)，其中肌原纖維蛋白決定雞塊的凝膠特性，在加熱過程中，肌凝蛋白發生變性與交聯，形成穩定的凝膠網絡，影響雞塊的質地與穩定性 (Smith et al., 1988)。

3.4.2 雞塊之製程

雞塊的製作過程包含肉品準備、調味與添加物混合、成型、裹粉、預炸與冷凍保存。其中，提升肉糜的保水性與結著性是確保雞塊質地與品質的關鍵，因此需添加食鹽、磷酸鹽及其他功能性成分 (Claus et al., 1989)。食鹽可溶解肌原纖維蛋

白，使其釋放出肌凝蛋白與肌動蛋白，增強凝膠結構，而磷酸鹽則藉由螯合金屬離子，提高蛋白質的溶解度與保水力 (Behrends et al., 2005)。此外，適當的裹粉層有助於提升產品的酥脆口感，而預炸過程則確保表層熟化，維持產品結構與感官特性 (Huse et al., 2006; Kim et al., 2015)。雞塊的配方可調整性高，使其成為混合肉製品的理想選擇，透過調整組成比例可降低動物性蛋白含量，同時兼顧營養與環境永續性 (Ventanas et al., 2010)。

4. 混合肉製品

隨著全球人口成長，人們對肉類需求增加，傳統肉類生產需要消耗大量的資源與排放大量的溫室氣體，對環境造成負擔 (Niva et al., 2017)，為此，肉類替代品的發展逐漸受到重視。然而，除了環境因素，公共健康風險也是驅動力之一。研究指出，紅肉與加工肉品的攝取與心血管疾病、大腸癌等慢性疾病風險上升有關，促使人們減少動物性蛋白攝取 (Feskens et al., 2013; Fiorentini et al., 2020)，而肉類替代品中，包括植物肉 (PBMA)、培養肉 (cultured meat)、昆蟲蛋白 (edible insects) 與混合肉製品 (hybrid meat products, HMPs) (Bonny et al., 2015; Lee et al., 2020)。其中，植物肉因技術成熟，成為目前主流選擇。然而，植物肉在口感、風味與多汁性上尚未完全模仿動物肉，影響消費者接受度 (Hartmann et al., 2017; Bohrer, 2019)。為解決此問題，混合肉製品是一個理想替代性選擇，透過部分取代動物性蛋白，在降低環境負擔的同時，保留肉類特性，提高消費者接受度 (Argel et al., 2022)。

4.1 混合肉製品的應用與技術挑戰

研究顯示，當植物蛋白取代比例為 25% ~ 50% 時，產品仍能維持良好質地與風味，但當取代比例超過 75% 時，因動物蛋白減少，導致蛋白質網絡密度降低，使凝膠結構變得鬆散，進而影響產品的質地與口感，降低感官接受度 (Neville et al., 2017; Chandler et al., 2022)。因此，如何提升植物蛋白的應用，維持產品的質地與感官特性，成為產品開發的重要挑戰 (Bessada et al., 2019)。目前市場上以大豆與豌豆蛋白應用最為廣泛，米蛋白因具高的蛋白質消化率、低致敏性與成本低等優勢而具有潛力，但現階段相關研究與應用仍相對有限 (Kyriakopoulou et al., 2021)。為了更詳細地探討米蛋白在混合肉製品中的應用潛力，本實驗室先前已在乳化肉製品 (貢丸) 中對其進行研究，並初步證實其加工應用潛力 (張, 2023)。鑑於此基礎，

且考量到雞肉本身低脂、價格低廉且加工彈性大的特性，使其成為混合肉製品中最常見的動物蛋白來源 (Henchion et al., 2014)。因此，若要提升植物蛋白在混合肉製品中的應用，尤其是在雞肉產品中，需克服其溶解性較低的問題，並釐清其交互作用機制，以確保產品的質地穩定性與口感特性。



第二章 研究目的與動機

隨著人口成長與肉類需求增加，傳統肉品生產對環境造成的負擔，以及過度攝取動物性蛋白對人體健康的影響逐漸受到重視，促使人們減少動物性蛋白的攝取，進而推動肉類替代品的發展。目前以植物肉為主流選項，但其在口感質地方面與傳統肉製品仍有落差，限制其市場接受度。混合肉製品兼具永續性與較佳之感官接受度，被視為具發展潛力的折衷選擇。

在動物性蛋白來源中，雞肉因其脂肪含量低、成本相對低廉且加工彈性高，是混合肉製品中常見的基礎原料。其中，雞塊作為代表性的絞碎型肉製品，具有受消費者喜愛與加工靈活性之特性，因此本研究選擇以雞塊作為研究產品，探討植物蛋白應用於雞塊產品之效果。目前應用最廣的植物蛋白為大豆與豌豆蛋白，然而，米蛋白因具低致敏性、高營養價值與成本低廉等優勢，也具備作為替代蛋白的潛力。惟其溶解性低，可能影響其加工功能性，進而限制在肉製品中的應用表現。

本實驗室先前已有將米蛋白應用於乳化型肉製品（如貢丸）之研究經驗，顯示其具有一定的加工應用潛力。為延續先前之研究基礎並擴展至其他型態之肉製品，本研究進一步將米蛋白應用於絞碎型肉製品中，並探討不同應用方式下對雞塊質地與結構的影響。研究內容分為以下四個階段：

第一節：米蛋白取代雞塊中雞肉蛋白質之影響

本階段首先分析雞肉與米蛋白的基本成分，作為後續配方設計與計算之依據。接著，米蛋白分別取代雞塊中 10%、20%、30% 的雞肉蛋白質，並透過物理化學特性、微觀結構與感官接受度等分析，評估不同取代比例對產品品質之影響。

第二節：去醯胺基米蛋白取代雞塊中雞肉蛋白質之影響

考量米蛋白之低溶解性可能限制其加工功能，本階段進一步使用已被證實具較佳溶解性與功能性的去醯胺基米蛋白 (deamidated rice protein, DRP)，於 20% 取代比例下進行應用，評估功能性提升之米蛋白是否能改善取代應用中產品質地與結構之表現，並釐清 RP 功能性與產品結構形成之關聯性。



第三節：額外添加米蛋白對雞塊品質之影響

為探討米蛋白於其他應用方式之表現，本階段改採額外添加米蛋白 (5%、10%、15%，w/w) 之方式，並透過物理化學性質等評估指標，評估其在不改變雞肉與水分使用量條件下對雞塊品質的影響。

第四節：米蛋白與水的交互作用對雞塊質地的影響

基於前述不同應用方式所觀察到的質地差異，進一步設計調整水分條件之處理組，以釐清米蛋白與水分間的交互作用是否會改變肌原纖維蛋白之相對濃度 (MP/water 比率)，進而影響產品質地。並提出 MP/water 比率作為評估絞碎型肉製品質地的的重要指標，做為未來植物蛋白於混和肉製品之配方參考依據。

第三章 材料與方法



一、材料


1. 米蛋白: 本研究試驗之材料為台灣味丹國際集團越南廠 (Vedan (Vietnam) Enterprise Corp., Ltd) 生產之米蛋白濃縮物 (RP), 其以新鮮白米為原料, 經澱粉酶 (α -amylase) 去除稻米中的澱粉後, 取得的植物濃縮蛋白 (protein concentrate), 其蛋白質含量約為 80% (w/w)。
2. 雞胸肉: 產地台灣, 購自水源市場 (台北市, 台灣)。
3. 三聚磷酸鈉購自裕謙有限公司 (高雄市, 台灣)
4. 白胡椒粉 (純正白胡椒粉) 購自小磨坊國際貿易股份有限公司
5. 食鹽購自臺鹽實業股份有限公司

二、實驗藥品和試劑

鹽酸 (hydrochloric acid, HCl)、氫氧化鈉 (sodium hydroxide, NaOH) 購自 Sigma-Aldrich Co. (St. Louis, MO, USA)、BCA Protein Assays kit 購自 Thermo Fisher Scientific Inc. (Waltham, MA, USA)、Nile Blue A Sulfate 購自 Sigma-Aldrich Co. (St. Louis, MO, USA)、0.2% Nile Blue A Sulfate、0.2 M pH 7.0 phosphate buffer (PBS)、0.2 M KH_2PO_4 、0.2 M K_2HPO_4 、0.1 M PBS

三、器材

1. 烘箱: ED23 購自 BINDER Inc. (Shanghai, China)
2. 凱氏分解爐 K-436、氮素蒸餾裝置 K-350 購自 BUCHI (Krefeld, Germany)
3. 索式萃取裝置 Soxtec system (HT 1043 Extraction Unit, Tecator, Denmark)
4. pH 測定儀 (PB-10 pH) 購自 Satorious (Gottingen, Germany)
5. 電磁加熱攪拌器 (HTS-AL-HTS1003) 購自 LMS Co., Ltd (Tokyo, Japan)
6. 高速低溫離心機 AllegraTM X-22R Centrifuge 購自 Beckman Coulter, Inc. (Brea, CA, USA)
7. 酵素免疫分析儀 (EnSpire® 2300 Multimode Plate Reader) 購自 PerkinElmer, Inc. (Waltham, MA, USA)
8. 攪拌機 (3KSM95TCZ) 購自 KitchenAid (Benton, MI, USA)
9. 均質機 6640-022 10-Speed Blender 購自 Oster International Co., Ltd (Waverly, MN, USA)

- 
10. 質地分析儀 Texture Analyser, Model TA.XT Plus model 購自 Stable Micro Systems (Surrey, England) , 搭配直徑 25 mm 圓柱形探頭 (P/25, Stable Micro Systems)
 11. 桌上型色差儀 color meter NE4000 (Nippon denshoku industries Co., Tokyo, Japan)
 12. 臨界點乾燥機 Samdri-PVT-3B 購自 Tousimis (Rockville, MD, USA)
 13. 鍍金機 gold ion suppter E101 購自 Hitachi (Japan)
 14. 掃描式電子顯微鏡 Scanning Electron Microscope S-4800 購自 Hitachi (Japan)

第一節 米蛋白及雞胸肉之基本組成分析

1.1 水分含量測定

根據 AOAC (1990) 分析方法, 秤取 1 g 均質樣品於事先烘至恆重之坩鍋中, 放入 105 °C 烘箱中烘 18 小時, 待其冷卻後秤重, 水分含量之計算公式:

$$\text{水分含量 (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

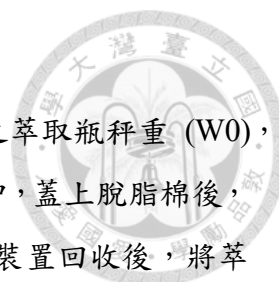
W1 為初始樣品重、W2 為水分揮發後之樣品恆重。

1.2 粗蛋白含量測定

根據 AOAC (1990) 之標準方法並加以修改。樣品經冷凍乾燥處理後, 秤取 0.3 g 之樣品於秤量紙中, 並置於消化管, 加入 10 mL 濃硫酸及 5 g 的催化劑 (硫酸銅 (CuSO₄·5H₂O:K₂SO₄ = 1:9), 將消化管於 450 °C 之電熱爐中加熱消化至澄清。冷卻後, 加入適量蒸餾水稀釋, 並加入 35% 80 mL NaOH 使溶液呈強鹼性, 以中和消化液中的酸性, 同時促使其中之 NH₄⁺ 轉化為氣態 NH₃。所生成之 NH₃ 經蒸餾後, 以 4% 25 mL 硼酸接收, 並添加混合指示劑作為滴定終點判別之依據。最後, 利用已標定力價之硫酸滴定, 計算空白試劑與待測物之滴定體積差值即可得出所釋放之 NH₃ 含量。米蛋白之粗蛋白質含量以乾基計算 (a), 並以 5.95 作為其含氮係數; 瘦肉之粗蛋白質含量以濕基計算 (b), 其含氮係數為 6.25。計算公式如下:

$$\text{a. 粗蛋白質含量 (protein content, \%)} = \frac{\text{總氮量}}{(1 - \text{水分含量}) \times \text{樣品重}} \times 5.95 \times 100$$

$$\text{b. 粗蛋白質含量 (protein content, \%)} = \frac{\text{總氮量}}{\text{樣品重}} \times \frac{\text{生肉之濕基重}}{\text{生肉之乾基重}} \times 6.25 \times 100$$



1.3 粗脂肪含量測定

依據 AOAC (1990) 分析方法並加以修改。將烘乾至恆重之萃取瓶稱重 (W_0)，倒入 50 mL 之石油醚。稱取 0.3~0.5 g 樣品 (W_1) 於圓筒濾紙中，蓋上脫脂棉後，以索式萃取裝置萃取 1~2 小時。將萃取瓶內之溶劑藉由回流裝置回收後，將萃取瓶放入 55 °C 烘箱中直至溶劑揮發，待冷卻後取出並稱重 (W_2)。粗脂肪計算公式如下，雞胸肉之粗脂肪需再乘以生肉之濕基重並除以生肉之乾基重，以換算濕基之粗脂肪含量：

$$\text{粗脂肪含量 (\%)} = \frac{W_2 - W_0}{W_1} \times 100$$

第二節 取代原料功能性分析與雞塊製備

2.1 去醯胺基米蛋白製備

實驗參考 Paraman 等人 (2007) 的方法並加以修改。取 2 g 米蛋白粉末加入 50 mL 的去離子水中，以 HCl 及 NaOH 調整 pH 值至 12，於 80 °C 溫度下加熱 30 分鐘後泡冰水冷卻，再調整至米蛋白等電點 pI 值 4.8，接著於室溫下離心 4500 g 15 分鐘後取沉澱，將其置於 -80 °C 之冷凍庫中 24 小時後進行冷凍乾燥。

2.2 米蛋白及去醯胺基米蛋白之加工功能性

2.2.1 水溶性測定

實驗參考 Smith 等人 (1985) 的方法並加以修改。稱取 0.25 g 米蛋白粉於 50 mL 去離子水中，在室溫下攪拌，以 HCl 及 NaOH 調整 pH 值至 7，並持續攪拌 30 分鐘後取樣。取 1 mL 米蛋白懸浮液於離心管中，在室溫下離心 4500 rpm 離心 15 分鐘，取其上清液並以 BCA 法測定其蛋白質之濃度。以 2 mg/mL Bovine Serum Albumin 溶液作為標準品，配製 0 (blank)、0.25、0.5、0.75、1、1.25、1.5、1.75 及 2 mg/mL 之蛋白濃度作為檢量線，取 10 μ L 樣品及標準品於 96 孔盤中，並加入 200 μ L 之 BCA 反應液，於 37 °C 下避光反應 30 分鐘。反應結束後，測定其於 562 nm 下之吸光值，並以 BSA 之濃度為 X 軸，吸光值為 Y 軸繪製檢量線。將待測樣品液之吸光值扣除 blank 值後，代入檢量線並求得樣品液之蛋白質濃度，進而計算樣品於 pH 7 下的水溶性，計算公式：

$$\text{Solubility (\%)} = \frac{\text{上清液之蛋白濃度}}{\text{樣品液之蛋白濃度}} \times 100$$



2.2.2 保水性

本實驗參考 Moreno 等人 (2020) 之方法並加以修改，秤量離心管之空重，秤取 0.1 g 樣品於離心管中，加入 10 mL 去離子水，於室溫下混合攪拌 24 小時，接著以 1400 g 離心 20 分鐘並去除上清液後秤重，此重量扣除離心管空重及樣品重，即為樣品吸收水分的重量。保水能力 (water holding capacity, WHC) 以每克樣品可吸附之水分重量 (g/g) 表示，其計算公式如下：

$$\text{保水能力 (WHC)} = \frac{\text{水分重量}}{\text{樣品重量}}$$

2.3 雞塊之製程

雞塊之製程參考 Shoaib 等人 (2018) 之方法並加以修改。原料之雞肉與雞皮於市場購買後，去除多餘雜質後分別以絞肉機進行絞碎處理，其中雞肉使用 2.5 cm 孔徑之絞盤絞碎，雞皮則使用 0.5 cm 孔徑絞盤絞碎。絞碎後之原料置於 -20°C 冷凍備用，並於使用前 1 小時退冰。本實驗對照組 (control) 之配方為 500 g 雞絞肉及 53.5 g 絞碎雞皮，其他非肉類成分包括：0.5% (g/100 g) 食鹽、0.3% (g/100 g) 三聚磷酸鈉 (sodium tripolyphosphate, STPP) 及 0.1% (g/100 g) 白胡椒，實驗組則依照表 1 中一般成分含量計算，針對雞肉減量所造成之水分與蛋白質損失進行補償，其中損失水分以額外添加水補足，使實驗組與對照組具有相同水分含量；損失之蛋白質則以米蛋白補充，其蛋白質含量為 80%，故米蛋白補充之蛋白質含量計算為米蛋白重量 (g) \times 80%。配方表及詳細的計算方式如表 2 與附錄 1 所示。製作過程開始時，先將解凍之雞絞肉與絞碎雞皮置入攪拌機中，以慢速攪拌 1 分鐘使其分散混合均勻。接著依序加入 STPP 與食鹽，並分別以中速攪拌 3 分鐘，使其充分混合並促進肌原纖維蛋白之萃出。隨後依據各組配方，加入白胡椒、預先秤重之米蛋白及對應比例之水，繼續以中速攪拌 3 分鐘，直至米蛋白與肉漿充分混合均勻。攪拌完成後，肉漿先置於 -20°C 冷凍庫靜置 1 小時，以利後續成型操作。取出後手動壓製成固定形狀之雞塊 (每顆約 20 g)，並均勻裹上麵粉與粉漿。完成後再次將雞塊置於冷凍庫冷凍 1 小時。油炸時，雞塊先以 $180^{\circ}\text{C} \sim 190^{\circ}\text{C}$ 油溫進行預炸 30 秒，炸至表面定型後撈起瀝油，再次置於 -20°C 冷凍保存，以備後續分析。樣品分析前，將預炸好之雞塊取出，使用氣炸鍋於 200°C 氣炸 8 分鐘，作為最終加熱處理條件，並進行各項物化性質分析。



第三節 雞塊之品質及理化特性

3.1 烹煮損失

根據 Dimitrakopoulou 等人 (2005) 之方法並加以修改，依照烹煮前後樣品之重量變化計算烹煮損失 (cooking loss, CL)，其結果以重量百分比 (%) 表示：

$$CL (\%) = \frac{\text{烹煮前樣品重} - \text{烹煮後樣品重}}{\text{烹煮前樣品重}} \times 100$$

3.2 生肉漿及雞塊之水分含量測定

根據 AOAC (1990) 分析方法並加以修改。秤取 1 g 均質樣品於事先烘至恆重之坩鍋中，放入 105 °C 烘箱中烘 18 小時，待其冷卻後秤重，水分含量之計算公式如下：

$$\text{水分含量} (\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100。$$

W1 為初始樣品重、W2 為水分揮發後之樣品恆重。

3.3 pH 值

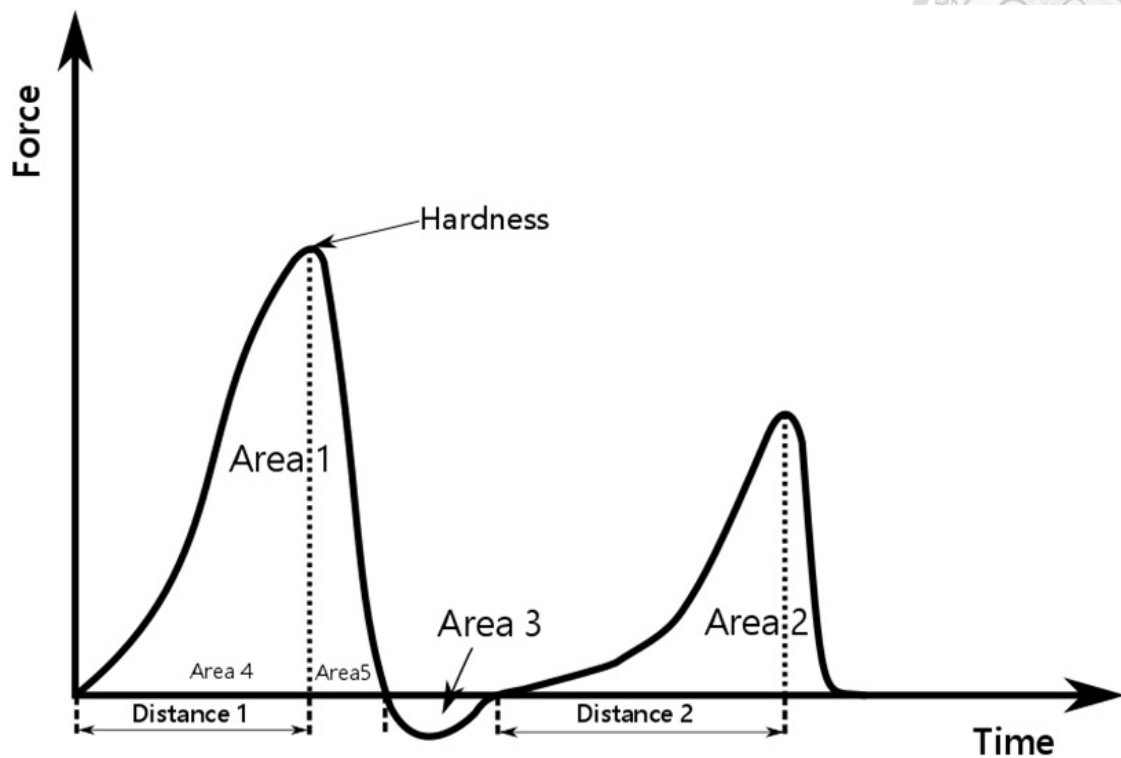
依據 Kim 等人 (2015) 之方法並加以修改。秤取 3 g 均質樣品至離心管中再加入 9 g 之蒸餾水，以均質機均質 10 秒後，以 pH meter 測定其 pH 值。

3.4 質地分析

參考 Liu 等人 (2015) 之方法並加以修改。每組隨機取樣 3 顆雞塊，將其切成 1.3×1.3×1.3 cm 之正立方體，並使用 P/25 探頭搭配質地分析儀進行雙重壓縮測試 (two-cycle compression)，以模擬人類咀嚼動作，透過兩次擠壓獲得質地分析曲線。結果中，橫軸代表時間，縱軸代表施加於樣品的力 (如圖四所示)，進而計算樣品之硬度 (hardness)、彈性 (springiness)、內聚性 (cohesiveness)、膠著性 (gumminess) 與咀嚼性 (chewiness)。各參數定義如下：

- 硬度 (g)：代表將樣品壓縮至特定變形所需的最大力量；
- 彈性：樣品在第一次壓縮後，於兩次壓縮時間間隔內能回復的高度比例；
- 內聚性：表示樣品結構抗裂程度，以第二次壓縮所需能量與第一次壓縮面積之比值 (A2/A1) 表示；
- 膠著性 (g)：定義為硬度 × 內聚性，為咀嚼前將樣品壓縮成團所需的總能量，常用以描述半固體食品之口感特性，其典型特徵為低硬度、高內聚性；

- 咀嚼性 (g)：為咀嚼食物至可吞嚥所需的總能量，為硬度 × 彈性 × 內聚性；

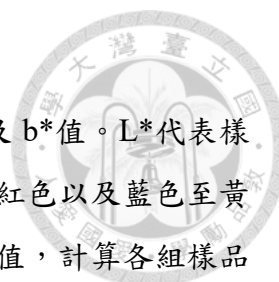


圖四、質地分析測試圖各參數區域示意圖。

Fig. 4. The interpretation of the results from the texture profile analysis test: adhesiveness: Area 3, cohesiveness: Area 2/Area 1, compressibility: Area 1, hardness: maximal force obtained after first deformation. (Adapted from Kulawik-Pióro et al., 2021)

本次試驗之質地分析儀條件設定如下：

pre-test speed	2.0 mm/s
test speed	1 mm/s
post-test speed	1 mm/s
distance	5.0 mm
time	5 s
trigger type	auto
trigger force	10 g



3.5 顏色測定

每組隨機取樣 3 顆雞塊，並以色差儀測定樣品之 L^* 、 a^* 及 b^* 值。 L^* 代表樣品之亮度分量，數值介於 0~100 間，而 a^* 及 b^* 分別為綠色至紅色以及藍色至黃色的色度分量，範圍介於 -120 ~ 120，並依據樣品之 L 、 a 、 b 值，計算各組樣品之彩度 (chroma, C^*)、色相角 (hue angle, h°)，以及實驗組 (L_2^* , a_2^* , b_2^*) 與 Control (L_1^* , a_1^* , b_1^*) 間之總色差 (ΔE)，其計算公式如下：

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

$$h^\circ = \arctan (b^*/a^*)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

第四節 感官分析

雞塊樣品於 -20°C 下儲藏，並於感官評估當日以氣炸鍋於 200°C 加熱 8 分鐘。實驗使用消費者接受性法 (consumer acceptance test)，招募 25 位年齡介於 19 至 26 歲、具雞塊消費經驗之受試者參與評估。樣品經剖半後隨機擺放於白色紙盤上，並以三位數亂碼進行編碼，所有樣品皆於同一場次完成品評，品評過程中提供飲用水以清潔口腔。受試者依照 9 分法 (9-Point hedonic test) 進行評分，評估項目包含外觀、香氣、風味、口味、餘味及整體喜好程度。評分標準如下：1 = 極度不喜歡；2 = 非常不喜歡；3 = 有點不喜歡；4 = 稍微不喜歡；5 = 沒有喜歡或不喜歡；6 = 稍微喜歡；7 = 有點喜歡；8 = 非常喜歡；9 = 極度喜歡。

第五節 雞塊之型態分析

5.1 掃描式電子顯微鏡

本實驗參考 Feng 等人 (2022)、Ye 等人 (2024)，以及 Zhang 等人 (2024) 之樣品前處理方法並加以修改。先將雞塊樣品切割為約 $1.2 \times 1 \times 0.3 \text{ cm}$ 的薄片，置於含有 2.5% (v/v) glutaraldehyde 之 0.1 M phosphate buffer (pH 7) 中固定過夜。固定後，利用相同緩衝液清洗三次以去除殘留的固定劑，再以含有 1% (v/v) Osmium tetroxide 之 0.1 M phosphate buffer (pH 7) 進行後固定處理三小時。隨後樣品再次清洗三次，接續進行梯度酒精脫水，濃度依序為 35%、50%、60%、70%、85%、90%、95% 及三次 100%，各階段均處理 10 分鐘。完成脫水後，樣品以液態二氧化碳進行臨界點乾燥，接著以雙面碳膠帶固定於鋁製載台，並進行金屬鍍膜

處理。處理完畢後，即可使用掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 觀察樣品之微觀結構。



第六節 統計分析

本試驗之各處理組皆進行三重複測定，且進行兩次或兩次以上的重複試驗，其實驗結果之數據以平均值 \pm 標準差 (standard deviation, SD) 表示，並以 Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., Cary, NC) 軟體進行 ANOVA (analysis of variance) 及 Bonferroni 事後檢定統計分析，比較組別間是否具有顯著性差異 ($p < 0.05$)。

第四章 研究結果

第一節 以不同米蛋白比例取代雞塊中雞肉蛋白質

1.1 雞塊製程建立

本研究所需雞塊之製程係參考 Shoaib 等人 (2018) 方法並加以修改。初期於配方設計與試做過程中，發現絞肉孔板之孔徑大小會影響產品的質地與口感。為驗證此影響，分別以細孔徑 (0.5 cm) 與粗孔徑 (2.5 cm) 之絞肉孔板來製備絞肉，並進行雞塊之質地分析與感官品評。結果如附錄圖 1 顯示，細孔徑絞肉孔板組之雞塊硬度為 1708.46 g，感官品評中口感喜好度為 6 分 (滿分 9 分)；而粗孔徑絞肉孔板組硬度為 1409.37 g，口感分數提升至 7 分，顯示其質地更柔軟、口感較自然，亦更接近市售雞塊之特徵。因此，確認絞肉機孔板之孔徑大小為影響雞塊質地與接受度之關鍵因素，後續實驗製程中選用 2.5 cm 粗孔徑絞肉孔板製備雞絞肉，以建立標準肉糜基礎。

製程中，解凍後之雞絞肉 (孔徑 2.5 cm) 與絞碎雞皮 (孔徑 0.6 cm) 先行混合，依序進行低速預混與中速攪拌，以促進肌原纖維蛋白溶出與成膠，隨後進行預凍定型、預炸與冷凍保存，並於分析前以氣炸鍋完成最終加熱處理 (圖 2)。

配方方面，對照組包含 500 g 雞絞肉與 53.5 g 絞碎雞皮，並添加 2.5g (0.5%) 食鹽、1.5g (0.3%) 三聚磷酸鈉與 0.5g (0.1%) 白胡椒，以促進肌原纖維蛋白溶出與風味穩定。各組皆以此為基礎進行調整。

實驗組中，當部分雞肉蛋白由 RP 取代時，為確保總蛋白與水分含量一致，需依據米蛋白之蛋白質含量 (80%) 補充對應之 RP 與水分量。計算依據為雞胸肉之近似組成 (水分 73%、蛋白質 23.3%) (表 1)，因此每 100 g 雞胸肉約含 23.3 g 蛋白質與 73 g 水分，其餘為脂肪與灰分可忽略。RP 之補充量以公式「 $RP(g) \times 80\% = \text{所需蛋白質補充量}$ 」換算，並依據雞肉原始水分含量補足其餘水分。例如，RP10 組中取代 10% 雞肉 (即 50 g)，需補足其中所含之 36.5 g 水分與 11.65 g 蛋白質，故使用 36.5 g 水與 13.5 g 米蛋白 (提供 10.8 g 蛋白質) 作為替代來源，以維持 50 g 雞肉所對應之總重量、蛋白質與水分含量一致之設計邏輯。雖然實際補充蛋白質量略低於計算值，但差異極小，對配方設計與實驗結果不具影響。RP20 與 RP30 組也依此方式進行設計，相關配方組成詳見表 2。



1.2 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之理化特性分析

為評估 RP 取代雞肉蛋白質對雞塊品質之影響，本研究針對不同取代比例組別進行理化特性分析，包含水分含量 (生/熟)、pH 值、烹煮損失 (cooking loss, CL) 與色澤等指標。熟後樣品的水分含量不僅會影響產品之烹煮產率，也影響食用時的質地與多汁性 (juiciness) (Matulis et al., 1995)；烹煮損失反映樣品經加熱後，水分與脂肪的流失程度，通常用來評估產品的結構穩定性與加工效率 (Yogesh et al., 2013)。此外，產品之外觀色澤也是影響消費者接受度之重要感官因子，RP 添加可能改變雞塊色澤表現，故本研究進一步分析其對色澤參數之影響 (Santos et al., 2022)。

結果如圖 3 所示，各組生肉漿之水分含量約為 73.67~74.80% (圖 3a)，整體變異幅度小，整體含水量趨近一致。熟肉之水分含量則隨 RP 取代比例增加而呈下降趨勢 (圖 3b)，RP10 組為 67.64%，RP20 組為 66.75%，而 RP30 組最低，僅為 64.94%，但組間差異不顯著。烹煮損失方面 (圖 3c)，control 為 20.34%，RP10 為 22.55%，RP20 為 23.62%，RP30 則顯著上升至 28.81% ($p < 0.05$)，顯示高比例 RP 取代會導致熟後水分流失明顯增加。pH 值方面 (圖 3d)，各組樣品介於 6.41~6.46 間，無顯著差異，顯示 RP 添加對 pH 值影響不大。

色澤分析方面如圖 4 所示，彩度隨 RP 添加而呈上升趨勢，control 為 17.52，RP10 為 18.39，而 RP20 和 RP30 顯著上升至 19.34 和 20.06 ($p < 0.05$) (圖 4b)。色相角則隨 RP 添加而略微下降，由 control 的 94.83 依次下降至 RP10 之 94.35、RP20 之 93.12 以及 RP30 之 92.45 (圖 4c)，僅 RP30 組顯著低於 control ($p < 0.05$)，整體色調仍維持於黃色區間。總色差值方面，RP 各組與 control 間之 ΔE 依次為 RP10 的 1.84、RP20 的 2.49、RP30 的 4.16 (圖 4d)，其中 RP30 之變化已明顯可由肉眼觀察辨識 ($\Delta E > 3.0$)，顯示其與 control 間具明顯外觀差異 (Mokrzycki et al., 2011)。

整體而言，RP10 組在各項理化指標表現穩定，與 control 組相近；而 RP30 組則在各項理化指標表變化上最為顯著，顯示高比例取代對產品品質具較大影響。

1.3 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之質地分析

質地為加工肉品之重要物理性質，不僅影響消費者的咀嚼體驗與接受度，更代表著蛋白質網絡形成與產品結構穩定性 (Liu et al., 2015)。因此，為評估 RP 取

代雞肉蛋白質對雞塊品質之影響，本研究針對不同取代比例組別進行質地分析。本研究分析了五項主要質地指標，包括硬度、彈性、內聚性、膠著性與咀嚼性，藉此探討 RP 添加對雞塊之口感質地的影響。

質地分析結果如圖 5 所示，隨著 RP 取代比例增加，雞塊之硬度呈現顯著下降 ($p < 0.05$) (圖 5a)，由 control 組的 1294.08 g 分別降至 1111.14 g (RP10)、989.11 g (RP20) 與 973.76 g (RP30) 組。此結果顯示，RP 取代雞肉蛋白會顯著降低產品的結構穩定性。

在彈性方面，各組數值皆介於 0.79~0.84 間 (圖 5b)，組間無顯著差異，顯示 RP 添加對產品回彈性影響有限。內聚性方面，各組落在 0.66 至 0.70 間 (圖 5c)，同樣無顯著差異。膠著性方面則呈現整體下降趨勢，由 control 組的 883.84 g 降至 RP30 組的 647.99 g (圖 5d)，顯示雞塊在口中更容易分解，需較少的咀嚼。咀嚼性方面，control 組為 667.87 g，隨 RP 添加比例上升而下降依次為 544.72 g、511.65 g 與 571.06 g (圖 5e)，表示米蛋白雞塊在咀嚼時所需的力氣與時間較少，更容易吞嚥，但各組間之差異未達顯著水準。

整體而言，RP 添加對雞塊之硬度與咀嚼性影響最為明顯，而對彈性、內聚性與膠著性等其他質地特性則影響較小。其中硬度與咀嚼性變化趨勢一致，且為評估雞塊結構與口感表現之主要指標，其中，RP10 組之質地表現最為接近 control 組，其硬度與咀嚼性保留較多原有結構與口感特性，顯示在低比例取代下，仍可兼顧產品之結構穩定性與咀嚼性。相對而言，RP20 組之硬度、膠著性與咀嚼性下降幅度較大，呈現質地偏鬆散、口感較軟之特性，整體質地表現不如其他組別。

1.4 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之微觀結構分析

肉品製品的品質 (如質地、持水性與穩定性) 受到其內部之蛋白質凝膠網絡結構影響。這些微觀結構代表著產品整體的緊密程度與機械強度。因此，透過掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察蛋白質網絡的排列方式、孔隙大小與脂肪分布，能有效評估其結構穩定性，結果如圖 6 所示。

為評估 RP 取代雞肉蛋白質對雞塊品質之影響，本研究針對不同取代比例組別進行微觀結構分析。在 SEM 之觀察結果顯示，隨著 RP 取代量的增加，蛋白質網絡結構出現明顯改變。於 50× 放大倍率下，control 組展現出緊密、有序且連續均一的凝膠網絡結構；然而，隨著 RP 取代比例的增加，凝膠結構逐漸變得鬆

散與不連續，網絡中出現明顯的斷層。進一步說明，RP10 組相較於 control，出現局部孔洞與斷裂層，凝膠網絡略顯鬆散；RP20 組則呈現更明顯的孔隙擴大與結構斷層，網絡變得不規則且分布不均；至於 RP30 組，整體結構更為鬆散、表面粗糙，缺乏完整的連續網絡，顯示 RP 在高比例取代下無法有效形成穩定的蛋白質凝膠結構。另外在 800× 放大倍率下觀察，control 組樣品表面呈現部分平滑區之結構，但隨著 RP 的取代，樣品表面逐漸出現粗糙化之現象。

綜合上述結果，不同比例的 RP 取代所形成的結構性質與完全由肌原纖維蛋白 (myofibrillar protein, MP) 所形成之結構明顯不同。RP 取代導致的蛋白質網絡排列不均與結構斷層，顯示其在形成穩定凝膠網絡方面不同於肌原纖維蛋白，經 RP 取代之處理後，會改變肉品製品的微觀結構與外觀特性。

1.5 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之感官分析

感官品評 (sensory evaluation) 是一種透過人類感官 (如視覺、嗅覺、味覺與觸覺) 對產品特性進行評估的方法 (Matulis et al., 1995)。本研究進行感官評估，評分項目包含外觀 (appearance)、香氣 (aroma)、風味 (flavor)、質地 (texture)、餘味 (aftertaste) 與整體接受度 (overall)，其結果如圖 7 所示。

在整體接受度方面，control 組獲得最高分為 6.3 分，而 RP10 組略低為 5.5 分，RP20 與 RP30 組皆為 4.9 分，顯示隨著 RP 取代比例提升，整體接受度呈下降趨勢。各感官項目中，以質地與風味的變化最為明顯。質地評分方面，control 組為 6.2 分，RP10 組為 5.5 分，而 RP20 與 RP30 組則顯著下降至 4.5 分。風味評分也由 control 組的 6.5 分下降至 RP10 的 5.6 分、RP20 的 4.9 分及 RP30 的 5.1 分，顯示 RP 添加對風味表現產生負面影響。外觀分數上之變化相對較小，介於 5.3~5.8 分之間，其中 control 組為 5.8 分，RP30 組為 5.4 分。香氣與餘味方面，評分介於 6.4~5.5 分與 6.3~4.7 分，其中 control 組分別為 6.4 與 6.3 分，而 RP30 組為 5.6 與 4.7 分。

整體而言，隨著 RP 取代比例增加，各感官項目評分普遍下降，特別是在 RP20 與 RP30 組中，整體、質地與風味得分均低於 5 分，顯示高比例取代可能對產品的適口性與消費者接受度產生不利影響。



第二節 去醯胺基米蛋白取代 20% 雞塊中雞肉蛋白質

2.1 去醯胺基米蛋白之理化性分析

為提升 RP 在雞塊中的應用功能性，本研究採用化學修飾中的去醯胺化處理製備去醯胺基米蛋白 (DRP)(圖 8)。去醯胺化處理後使不帶電之天門冬醯胺酸與麩醯胺酸轉化為帶負電之天門冬胺酸與麩胺酸，增加蛋白質分子表面之淨負電荷，進而改善其水溶性與分散性。由於蛋白質的溶解度會影響其在食品系統中之凝膠、乳化與保水等功能特性，因此，提升植物蛋白之水溶性有助於增進植物蛋白於食品系統中的應用性 (Hamada, 1994)。

實驗結果如圖 9 所示，DRP 的溶解度明顯高於未處理之 RP，在 pH 7 下，溶解度分別為 28.73% 與 2.89%，證實去醯胺化處理能有效改善米蛋白於中性條件下之溶解性。此外，保水力也由 RP 的 3.02 g/g 增加至 DRP 的 6.47 g/g，顯示其保水性明顯增強，與過去文獻所述結果一致 (Meenmanee et al., 2022; 吳, 2023)。

整體而言，DRP 在溶解性與保水性兩項關鍵功能指標上皆優於 RP，顯示其具潛力應用於需保持水分與蛋白質結構的肉製品系統中。後續將進一步評估此理化性之提升是否能實質改善其在雞塊質地應用之表現。

2.2 20% 去醯胺基米蛋白雞塊之質地分析

基於第一節實驗結果顯示，當 RP 取代比例達 20% 時，觀察到質地的變化，因此本階段選擇 20% 取代比例作為代表組別，進一步比較 RP 與 DRP 兩者作為取代蛋白之效果。本研究針對 control、RP20 與 DRP20 組別進行質地分析，包括硬度、彈性、內聚性、膠著性與咀嚼性等指標，結果如圖 10 所示。

control 組之硬度為 1111.70 g，顯著高於 RP20 (694.49 g) 與 DRP20 (637.14 g) 兩組 (圖 10a)，顯示以米蛋白取代雞肉後，雞塊整體硬度明顯下降，顯示 RP 與 DRP 取代雞肉後，雞塊整體質地變軟。彈性與內聚性方面，各組間數值變異幅度小，介於 0.71~0.90 與 0.62~0.70 (圖 10b、10c)，顯示米蛋白取代雖導致硬度下降，但未造成內部結構結合力的明顯改變。膠著性與咀嚼性則分別由 control 的 761.35 g、586.59 g 降低至 RP20 的 484.67 g、433.87 g 與 DRP20 的 413.85 g、308.55 g (圖 10d、10e)，呈現一致地下降趨勢，反映產品在口感強度與咀嚼性方面略為減弱。



整體而言，儘管 DRP 經去醯胺化後，其溶解性與保水性有所提升，但仍未改善以米蛋白取代雞肉後所造成的質地下降結果，顯示其功能性提升不足以有效維持產品結構。

2.3 20% 去醯胺基米蛋白雞塊之微觀結構分析

肉製品的質地與穩定性受其內部蛋白質凝膠網絡結構所影響。為探討不同蛋白質來源對雞塊內部結構的影響，本研究以掃描式電子顯微鏡 (SEM) 分析 control、RP20 與 DRP20 三組樣品的凝膠網絡排列與孔隙特徵，結果如圖 11 所示。

在 SEM 50× 放大倍率下，control 組呈現緊密且均勻的蛋白質網絡結構；RP20 組則顯示網絡鬆散、孔隙明顯。DRP20 組與 RP20 外觀結果相似，同樣觀察到不規則的排列、結構斷層與孔洞，顯示去醯胺基處理對改善結構穩定性效果有限。進一步於 800× 放大倍率下觀察，control 組表面仍保有平滑區域，而 RP20 與 DRP20 組則皆呈現粗糙表面，並伴隨多處斷裂與裂痕。整體來看，DRP20 中 DRP 雖然經過去醯胺基處理，但其微觀結構與 RP20 無明顯差異，顯示此處理方式對改善結構穩定性效果有限。

綜合以上結果，RP 與 DRP 取代後皆無法重現完全以肌原纖維蛋白所形成的穩定凝膠結構，說明去醯胺基化雖能改善 RP 之理化性質，但在蛋白質網絡之形成表現上仍存有限制性。

第三節 以不同米蛋白比例額外添加至雞塊中

根據前兩節實驗之結果，儘管藉由去醯胺化提升了 RP 之溶解性與保水性，但其作為雞塊之取代蛋白時，仍無法有效改善產品之質地變化，顯示 RP 在功能性上無法取代雞肉之肌原纖維蛋白 (myofibrillar protein, MP) 所具備之結構支撐能力。因此，本節進一步探討 RP 在不改變對照組配方的情況下，額外添加不同比例的 RP，以評估其對雞塊品質的影響。本研究設計三組實驗樣品，分別添加 5%、10%、15% (w/w) RP，命名為 E-RP5、E-RP10 與 E-RP15，接著進行理化特性分析，包含水分含量 (生/熟)、pH 值與烹煮損失 (cooking loss, CL) 等指標，藉以系統性探討，在不改變肌原纖維蛋白含量的前提下，RP 是否仍能透過其他機制對雞塊品質產生影響。



3.1 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之理化特性分析

為進一步探討 RP 在額外添加下對雞塊品質之影響，本研究針對不同添加比例組別進行理化特性分析，評估項目包括水分含量（生/熟）、烹煮損失（cooking loss, CL）與 pH 值。

結果如圖 12 所示，生肉漿水分含量方面，隨 RP 添加比例增加，肉漿之含水量顯著下降($p < 0.05$) (圖 12a)，其中 control 組為 75.0%，E-RP5 為 72.1%，E-RP10 與 E-RP15 分別為 69.5% 與 68.0%。熟肉水分含量也呈現相同趨勢 (圖 12b)，由 control 組的 68.6%，下降至 E-RP5 的 67.6%，以及 E-RP10 與 E-RP15 的 66.0% 與 64.6%。其中，E-RP15 與 control 間達顯著差異 ($p < 0.05$)。然而，烹煮損失結果顯示組間差異未達顯著，但隨 RP 添加比例增加而呈上升趨勢 (圖 12c)，依序為 16.55%、18.56%、19.36% 與 22.39%。pH 值方面 (圖 12d)，樣品介於 6.27~6.46 之間，隨 RP 添加量上升略呈下降趨勢，但四組間皆無明顯差異，顯示額外添加 RP 對肉漿酸鹼性影響有限。

整體而言，額外添加 RP 雖未顯著影響 pH 值與烹煮損失，但在生、熟樣品之水分含量上皆呈現下降趨勢。其中，以 E-RP5 與 control 組在各項理化特性上較為相近，顯示低比例添加時對產品物理化學特性影響較小。

3.2 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之質地分析

為評估額外添加米蛋白對雞塊質地之影響，本研究針對 control、E-RP5、E-RP10 與 E-RP15 組別進行質地分析，包含硬度、彈性、內聚性、膠著性與咀嚼性等指標，結果如圖 13 所示。

硬度方面，隨著 RP 添加比例增加，雞塊之硬度呈現上升趨勢 (圖 13a)。control 組硬度為 1277.34 g，E-RP5 與 E-RP10 組增加至 1518.64 g 與 1640.28 g，E-RP15 組則顯著增加為 1869.37 g ($p < 0.05$)，顯示高比例 RP 添加提升雞塊之硬度結構。在彈性與內聚性方面 (圖 13b、13c)，各組數值介於 0.81~0.84 及 0.68~0.73 間，變異幅度小，組間差異未達顯著，表示額外添加 RP 對雞塊之彈性與結構黏結力影響有限。膠著性與咀嚼性方面 (圖 13d、13e)，皆隨著 RP 添加比例增加而呈上升趨勢，control 組膠著性為 865.27 g，E-RP5 與 E-RP10 組增加至 1106.57 g 與 1211.16 g，而 E-RP15 組則進一步顯著提升至與 1332.73 g ($p < 0.05$)；咀嚼性方面，control 組為 699.52 g，E-RP5 組上升至 913.41 g，而 E-RP10 與 E-

RP15 組分別為 1020.66 g 與 1097.73 g，其中 E-RP15 顯著高於 control 組，表示高比例 RP 添加有助於提升雞塊之口感強度與整體結構密實度。而 E-RP5 組在統計上尚未達顯著，但在所有指標皆呈提升趨勢，顯示低比例添加 RP 也可以增進雞塊結構與口感強度。

整體而言，在質地表現上 E-RP10 與 E-RP15 組表現最為顯著，E-RP5 組則與 control 組結果相近。表示額外添加 RP 之方法有別於部分取代雞肉之設計，在不減少肌原纖維蛋白含量的前提下，可提升雞塊之硬度、膠著性與咀嚼性等質地特性。

3.3 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之微觀結構分析

透過掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察蛋白質網絡的排列情形、孔隙大小與表面特性，能夠評估肉製品之結構穩定性，結果如圖 14 所示。

在 SEM 之 50 \times 放大倍率下觀察，control 組有著連續且均一的凝膠網絡結構，而隨著 RP 的額外添加，各組結構上之部分區域仍保有與 control 類似的緊密結構，但整體網絡出現不均一的變化。在 800 \times 放大倍率下，control 組表面結構保有部分平滑區域，而隨著添加比例的提高 (E-RP10 與 E-RP15)，樣品表面呈現出較為粗糙與不均現象。

整體而言，額外添加米蛋白之方式並未改變肌原纖維蛋白的網絡結構，仍保有一定穩定性與支撐性，但隨著 RP 添加比例之增加，其在微觀結構中所造成的分布不均，可能對產品質地與表面性狀產生影響，因此其添加量仍需控制，以維持製品整體結構均衡與穩定。

第四節 探討影響雞塊質地之機制

本研究前三節顯示，米蛋白 (RP) 在不同應用形式下對雞塊質地的影響具有明顯差異，當 RP 作為雞肉蛋白的部分取代時，雞塊的硬度下降 (如第一、二節)；反之，在額外添加 RP 的情況下，則觀察到質地硬度上升 (如第三節)。本研究推測，此差異可能與系統中肌原纖維蛋白 (myofibrillar protein, MP) 相對於水分的比例變化有關，進而影響蛋白質網絡之形成與產品質地表現。因此，本節進一步提出 MP 與水分的比率 (MP/water 比率) 作為影響雞塊質地的關鍵變因，並設計兩階段實驗，系統性探討 RP 的添加、水分比例與 MP/water 比率對雞塊質地之影響。

第一階段 (4.1)設計 con(control) 、con+RP、con+W 與 con+W+RP 四組處理組，探討 RP 與水分之獨立與交互作用；第二階段 (4.2) 則以 RP20 為基礎組，設計三組逐漸減少補水量的樣品 (RP20-RW1、RW3、RW5) ，以調整 MP/water 比率，進一步驗證其與雞塊硬度之間的關聯性。為統一比較基礎，各組樣品之 MP 含量、水分含量與 MP/water 比率皆依據表 1 中雞胸肉基本組成進行估算，並整理於表 3 與表 4。

4.1 水與米蛋白添加對雞塊之質地分析

本階段設計四組處理組，分別為對照組 (con)、單純添加 RP(con+RP)、單純添加水分 (con+W) 以及同時添加 RP 與水 (con+W+RP)。為使本節配方設計與第一節中 RP30 組保持一致，並確保各組在 MP 含量一致的前提下進行比較，本節統一將各組雞肉用量設定為 350 g，作為本節配方之基準。其中，con+W+RP 組是依據 RP30 組的補償邏輯設計，在 350 g 雞肉中加入 73 g 水與 13.5 g RP，以模擬 RP 取代雞肉時補入水分的應用。相對地，con+RP 與 con+W 組則分別單獨添加 13.5 g RP 或 73 g 水。除上述之改變外，各組樣品其餘配方條件皆保持一致。各組樣品皆進行質地分析 (圖 15)，測試指標包括硬度、彈性、內聚性、膠著性與咀嚼性；並計算其肌原纖維蛋白 (myofibrillar proteins, MP) 含量、水分含量與 MP/water 比率。

在硬度方面 (圖 15a)，control 組為 1321.53 g，而 con+RP 組顯著上升至 2001.93 g，顯示額外添加 RP 可提升雞塊質地 ($p < 0.05$)。相對地，con+W 組之硬度顯著降至 946.28 g ($p < 0.05$)，con+W+RP 組為 1215.20 g，介於 control 與 con+W 之間。膠著性與咀嚼性也呈現相似趨勢 (圖 15d、15e)，control 分別為 902.11 g 與 755.56 g，con+RP 組則顯著提升至 1374.22 g 與 1126.02 g；con+W 與 con+W+RP 組則分別下降至 601.89 g、838.29 g 與 489.36 g、632.42 g。彈性與內聚性方面 (圖 15b、15c) 則無明顯差異，四組數值皆介於 0.78~0.83 與 0.64~0.69 之間。

為進一步釐清上述質地差異之原因，本研究整理各組 MP 含量、水分含量與 MP/water 比率數據 (表 3)。con(control) 組 MP 含量為 20.9%、水分為 65.4%，MP/water 比率為 31.9%，對應硬度為 1321.53 g。con+W 組 MP 含量降至 16.3%、水分上升至 73.0%，MP/water 比率降至 22.3%，硬度也下降至 946.28 g。

con+W+RP 組 MP 含量也較低 (15.1%)，水分含量為 67.4%，MP/water 比率同為 22.3%，硬度為 1215.20 g。相對地，con+RP 組未補充水分，MP 含量為 18.9%、水分為 59.3%，使比率維持在 31.9%，對應最高硬度 (2001.93 g)。整體而言，當 MP/water 比率由 31.9% 降至 22.3% 時，雞塊硬度顯著下降，顯示該比率可反映質地表現之關鍵參數。


整體趨勢顯示，MP/water 比率與雞塊硬度呈正向關係，當比率降低至 22.3% (如 con+W、con+W+RP) 時，雞塊硬度明顯下降；反之，當比率維持在 31.9% (如 control、con+RP) 時，硬度顯著較高，顯示 MP/water 比率可作為評估植物蛋白應用效果與質地預測的重要參考指標。

4.2 減少補水量對米蛋白取代雞肉蛋白後質地影響之分析

為進一步驗證第 4.1 節所觀察到之 MP/water 比率與雞塊質地變化之關聯性，本實驗以 RP 取代雞肉 20% (RP20 組) 為基礎，設計三組補水量逐步減少之處理組，分別為 RP20-RW1、RP20-RW3 與 RP20-RW5，探討調整 MP/water 比率對質地的影響。

RP20 組為補足雞肉減量所失之總蛋白與水分，額外添加 27 g 米蛋白與 73 g 水分，以維持與 control 組相同的總蛋白與 65.4% 之總水分。RW1、RW3 與 RW5 組則分別減少補水量至 48.6 g、24.3 g 與 0 g，對應總水分含量為 63.8%、62.1% 與 60.2%。各組樣品皆進行質地測試，並同步分析其 MP 含量、水分含量與 MP/water 比率，以探討上述參數與雞塊質地間之關聯性。

實驗結果如圖 16 所示，RP20 組之硬度為 799.00 g，顯著低於 control 組的 1282.16 g ($p < 0.05$) (圖 16a)。隨著補水量的逐漸減少，RP20-RW1、RP20-RW3 與 RP20-RW5 組之硬度依序上升至 1024.48 g、1278.06 g 與 1555.71 g ($p < 0.05$)，其中 RP20-RW5 組之硬度已高於 control 組。咀嚼性也呈相似之變化趨勢 (圖 16e)，RP20 組為 488.54 g，低於 control 組的 735.82 g，而 RP20-RW1、RP20-RW3 與 RP20-RW5 組分別上升至 610.43 g、792.24 g 與 947.41 g，顯示減少補水有助於提升產品之咀嚼強度。相較之下，彈性與內聚性指標於各組間之變異幅度較小，彈性範圍介於 0.81~0.85、內聚性介於 0.70~0.73 (圖 16b、16c)，整體差異不顯著，顯示補水量之調整對產品回彈性與內部結合力之影響相對有限。



進一步整理各組之 MP 含量、水分含量與 MP/water 比率 (表 4)，結果顯示，RP20 組 MP/water 比率僅為 25.5%，對應最低硬度。隨著補水量減少，MP/water 比率相對提升至 27.4%、29.5%與 31.9%，對應之硬度也同步上升。當 MP/water 比率回升至與 control 組相同之水準時 (31.9%)，硬度也回升至最高。

為驗證 MP/water 比率與雞塊硬度變化間之關聯性，進一步針對本節樣品進行 Pearson 相關分析 (圖 17)，結果顯示二者具有高度正相關 ($r = 0.931$)，顯示 MP/water 比率為反映蛋白質網絡穩定性與質地強度之關鍵參數 (Hardness (g) 和 MP/water ratio (%)) 交匯處的深紅色區塊，表示強烈的正相關性)。

整體而言，當 RP 取代雞肉後補入相同比例水分，將導致 MP 相對濃度下降，進而降低 MP/water 比率，使雞塊硬度下降；反之，透過調整水分比例提升 MP/water 比率，可使雞塊硬度恢復至與 control 組相近。本節結果進一步驗證了 MP/water 比率為植物蛋白應用於雞塊產品時影響質地穩定性之關鍵指標，並可作為後續配方設計與應用之重要參考。

第五章 討論

第一節 以不同米蛋白比例取代雞塊中雞肉之蛋白質

為發展更具永續性與成本效益之肉製品，植物蛋白被應用於混合肉製品 (hybrid meat products) 中，其中米蛋白 (rice protein, RP) 因具備良好的營養價值與來源穩定性，具有應用潛力。然而，植物蛋白的結構與功能特性與動物性蛋白具有明顯差異，可能會在應用上影響產品品質。

因此，本研究設計以不同比例之 RP 部分取代 10%、20%、30% 雞塊中雞肉蛋白質，並評估其對雞塊品質之影響。為釐清其影響機制，本章分別從理化特性、質地特性、微觀結構及感官品評結果進行討論，並結合相關文獻，探討 RP 在雞塊中所扮演之角色與其可能影響品質的原因。

1.1 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之理化特性影響

雞塊之理化特性，如水分含量、pH 值與烹煮損失，會直接影響其質地與品質穩定性，因此是肉製品品質評估的重要參數 (Matulis et al., 1995)。本研究設計以 RP 取代雞肉時，依據雞胸肉中蛋白質與水分之原始比例，採用同步補充 RP 與水的方式來維持各組配方之總蛋白與總水量一致。根據圖 3a 之分析，各組生肉漿樣品之含水量相近，顯示此補償設計確實有效維持配方水分的一致性。烹煮損失率隨 RP 取代比例增加而上升，其中 RP10 組與 control 組相近，顯示低比例取代對雞塊於加熱過程中的水分保留影響較小。此現象可能與兩項因素有關。首先，為補足 RP 取代雞肉後所減少的總蛋白與水分，各組配方中額外補充了水分，但 RP 與水的結合能力相對較低，導致這部分補充的水分在加熱過程中較易釋出，進而提高烹煮損失 (Chandler et al., 2022)。其次，植物蛋白如 RP 具溶解性差與凝膠能力有限等特性，限制其於加熱過程中參與穩定蛋白質網絡的能力，導致所形成的蛋白網絡結構較為鬆散，進一步降低系統的保水與保油能力，使水分及其他物質於加熱時更容易流失。此現象也與前人研究中植物蛋白取代肉類後會降低最終成品含水量之觀察一致 (Santos et al., 2022)。

pH 值方面，各組樣品間差異不大，顯示不同 RP 取代比例對雞塊之 pH 影響有限。與文獻結果相符，植物蛋白本身的 pH 值可能影響肉製品之 pH 表現，但實際影響程度仍與其添加比例與食品本身條件有關 (Kim et al., 2015; Santos et

al., 2022)。本研究所添加之 RP 比例為 10~30%，因此推測對整體肉糜系統之 pH 值影響有限，也反映於本研究中 pH 變動幅度小。

產品色澤是影響消費者選擇食品時最直觀的感官特性之一。文獻指出，混合肉製品的外觀色澤主要受到兩項因素影響，一為肉品本身的原始色調，決定產品的基本色澤，二為植物蛋白原料的色澤，會進一步影響最終產品的視覺表現 (Santos et al., 2022a)。本研究結果如圖 4 顯示，隨 RP 取代比例增加，雞塊之彩度與總色差上升，色相角則略有下降，但整體色調仍維持於黃色區間。RP10 組與 control 組之色澤差異小，顯示低比例取代對色澤影響有限 (Mokrzycki et al., 2011)。這些色澤變化可歸因於 RP 原料本身呈淡黃色，隨取代比例提高，對產品色澤之影響度增加，與文獻所述植物蛋白能改變混合肉製品外觀色調之結果一致 (Santos et al., 2022a)。

綜合上述分析，以 RP 高比例取代雞肉蛋白之情況下，烹煮損失與色澤等方面皆出現明顯變化，顯示高比例取代對產品理化特性影響較大。反之，RP10 組在多數理化特性上與 control 組表現相近，顯示 10% 為可接受之取代比例，兼顧了植物蛋白應用性與產品品質穩定性，具未來產品開發潛力。

1.2 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之質地影響

產品質地是加工肉品中重要的品質指標之一，因其影響著結構穩定性與消費者對口感的接受度 (Liu et al., 2015)。質地通常透過多項參數來評估，其中硬度與咀嚼性反映蛋白質網絡的形成與穩定程度；彈性、內聚性與膠著性則分別代表產品的回彈力、內部結合力與咀嚼時的黏附特性，這些指標共同影響肉製品的結構完整性與口感 (Kulawik-Pióro et al., 2021)。

本研究結果如圖 5 顯示，隨著 RP 取代比例的增加，雞塊之硬度、咀嚼性與膠著性皆呈現下降趨勢。其中以 RP20 與 RP30 組的變化最為明顯，而 RP10 組與 control 則無顯著差異。此結果顯示，高比例 RP 取代雞肉時，產品的結構穩定性與口感強度皆有所減弱。

造成上述質地變化的可能機制主要有兩個：首先，在 RP 取代雞肉的配方設計中，會同步減少雞肉使用量，導致可參與熱誘導凝膠網絡形成之肌原纖維蛋白 (myofibrillar protein, MP) 總量下降。MP 在加熱過程中可變性展開並產生交聯反應，形成穩定的三維網絡，是支撐肉製品結構與維持質地的關鍵成分 (Matulis et al.,

1995)。再者，RP 本身的分子特性也限制其參與網絡構建的能力。文獻指出，RP 主要由 glutelin 組成 (約佔 80%)，此類蛋白為不溶於中性環境的高度聚合物，蛋白質間會以雙硫鍵與疏水作用維持穩定的聚合結構 (Paraman et al., 2007)。因此在本研究之條件下，RP 難以有效參與熱誘導網絡的形成，進而降低結構穩定性。

整體質地結果也與前人研究一致，當植物蛋白 (如蠶豆、鷹嘴豆) 於混合型肉製品中取代比例偏高時，產品的硬度、內聚性與彈性皆會顯著下降；但若取代比例於較低範圍時，其質地表現仍可接近純肉製品之水準 (Chandler et al., 2022)。此結果與本研究中 RP10 組與 control 組質地表現相近的觀察一致，顯示低比例取代具有實際可行性，未來可望應用於產品開發。

1.3 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之微觀結構影響

本研究透過掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察不同 RP 取代比例對雞塊微觀結構之影響，結果如圖 6 所示，隨著 RP 取代比例增加，雞塊中蛋白質凝膠網絡結構逐漸由緊密均一轉變為鬆散不連續，甚至出現斷層與表面粗糙等現象，顯示高比例 RP 取代對凝膠結構形成具有負面影響。

在 50× 放大倍率下，control 組顯示緊密且連續之三維網絡結構，對應其質地中的硬度與咀嚼性較高之表現，顯示肌原纖維蛋白於加熱過程中形成穩定的凝膠結構。然而，隨著 RP 取代比例提高 (RP20 與 RP30 組)，網絡結構趨於鬆散、不連續，顯示 RP 難以維持雞肉中原有網絡的完整性，導致整體穩定性下降。

此結果可歸因於植物蛋白與 MP 在分子形態與凝膠形成機制上的本質差異。MP 在加熱過程中可變性展開並產生交聯反應，形成穩定的三維網絡，是支撐肉製品結構與維持質地的關鍵成分，而 RP 主要由 glutelin 組成，其為不溶於中性環境的聚合物，蛋白質間以雙硫鍵與疏水作用聚集穩定 (Paraman et al., 2007)。因此，在本研究所採用的條件下，RP 無法與 MP 共同形成穩定的熱誘導網絡，導致結構連續性與緻密度下降 (Clark et al., 2002)。

於 800× 放大倍率下進一步觀察，control 組樣品表面呈現部分平滑區之結構，但隨著 RP 的取代，樣品表面逐漸出現粗糙化之現象。這些結果與文獻顯示一致，當植物蛋白取代比例較高時，凝膠網絡容易出現斷裂與不連續現象，進而降低結構穩定性與質地強度 (Santos et al., 2022)。

綜合觀察結果與質地分析可知，RP 難以形成如 MP 所建構之穩定三維蛋白質網絡，進而影響雞塊之微觀排列與整體結構表現。未來若欲提升其應用效果，仍需針對 RP 的功能特性進行修飾或強化，以改善其凝膠能力並提升結構穩定性。

1.4 不同米蛋白比例之米蛋白雞塊之感官品評影響

感官品評為消費者評估肉製品接受度之關鍵指標，因此本研究針對不同取代比例之樣品進行感官分析，結果如圖 7 顯示，隨 RP 取代比例增加，雞塊之整體接受度呈現下降趨勢。整體而言，control 組之各項評分最高，RP10 組略低，而 RP20 與 RP30 組則明顯下降，顯示高比例 RP 取代雞肉蛋白後，可能降低產品之口感特性與整體接受度。其中以風味與質地兩項指標下降幅度較大，推測可能與植物蛋白本身帶有之豆味與粉感有關，加上 RP 難以形成如 MP 般穩定的凝膠網絡，導致雞塊結構鬆散、咀嚼性降低，進而影響整體感官評價。

本研究結果與 Shoaib 等人 2018 文獻結果一致，當以豌豆蛋白 (pea protein) 或米蛋白作為肉製品配方之原料時，隨添加量增加，感官特性皆呈下降趨勢，顯示高比例植物蛋白之添加將對產品的感官品質造成負面影響，進一步降低消費者接受度。

整體而言，雖然植物蛋白具備環境永續與營養替代之潛力，但其在肉製品中的應用仍需適量調整，以避免對感官品質造成不良影響。現階段透過降低添加比例雖可初步改善產品之接受度，但對於其在質地與結構穩定性上的限制，仍有待改善。為克服此限制，本研究後續將進一步探討將 RP 進行去醯胺基處理 (deamidation)，以提升其溶解性與功能性，並評估去醯胺基米蛋白 (DRP) 作為替代蛋白對雞塊質地與結構穩定性之影響，期能提升植物蛋白於加工肉製品中的應用潛力。

第二節 去醯胺基米蛋白取代 20% 雞塊中雞肉之蛋白質

為進一步探討修飾後之米蛋白對雞塊應用之影響，本研究以去醯胺基米蛋白取代雞塊中 20% 的雞肉，並以相同取代比例之米蛋白 (RP) 雞塊作為比較對照。由於文獻以及本研究室之前人研究發現，去醯胺化處理可提升米蛋白之溶解性與功能性 (吳, 2023)，因此預期可改善其於肉製品系統中的應用表現。本節先進行 RP 與 DRP 之理化性質分析，以確認去醯胺化處理確實提升其功能性，接著利用 RP

與 DRP 進行雞塊中雞肉之部分取代，透過質地與微觀結構分析，並結合相關文獻，進一步釐清 DRP 在產品中的作用機制，並與 RP 之應用效果進行比較。

2.1 去醯胺基米蛋白之理化性影響

在食品加工中，蛋白質的溶解度為影響其加工功能性的關鍵因素之一。較高的溶解度有助於蛋白質在食品系統中均勻分散，進而提升其保水、乳化與凝膠等功能性 (Grossmann et al., 2019)。因此，蛋白質之功能性對食品有著重要的影響。然而，米蛋白在中性條件下溶解度低，主要原因在於其主要成分穀蛋白 (glutelin) 的分子結構特性。穀蛋白含有半胱胺酸殘基，易形成雙硫鍵交聯，增加分子間穩定性並降低其在水中的分散能力；此外，穀蛋白富含疏水基團且表面淨電荷不足，這些因素使其易在水中聚集與沉澱，導致整體溶解性偏低，進而限制米蛋白在食品加工中的應用潛力 (Hamada, 1994; Takaiwa et al., 1999)。

為解決上述米蛋白之低溶解性所帶來的應用限制，本研究採用常見之化學修飾方式——去醯胺化處理。此處理可將蛋白質中的天門冬醯胺酸 (Asn) 與麩醯胺酸 (Gln) 轉化為帶負電的天門冬胺酸 (Asp) 與麩胺酸 (Glu)，進而增加蛋白質表面之負電荷、降低疏水聚集之作用，促進其於水中的分散與溶解。透過此機制，有助於提升蛋白質的各項功能性，進一步改善米蛋白在中性環境中之功能表現 (Hamada, 1997; Avilés-Gaxiola et al., 2018; Meenmanee et al., 2022)。因此，本研究針對去醯胺基米蛋白之理化特性進行分析，並與未修飾米蛋白比較，以驗證修飾效果及評估其實際應用效果。

本研究結果證實，經去醯胺化處理後之米蛋白在溶解性與保水性上表現明顯提升 (圖 9)，顯示處理後之米蛋白具備更好的水溶性與水分結合能力，進而提升其在食品中的應用潛力。與文獻結果一致，椰子蛋白 (coconut protein, CP) 經去醯胺化處理後，在 pH 3、5 與 7 條件下，其溶解度由原本約 10% 提升至 30~40%，顯示去醯胺化處理能提升植物蛋白之功加工功能性，進而增加其在食品中的應用潛力。後續將進一步探討其對雞塊最終質地的具體影響，評估其應用可行性 (Meenmanee et al., 2022)。

2.2 20% 去醯胺基米蛋白雞塊之質地與微觀結構影響

延續第一節觀察到 RP 於 20% 取代比例下所造成質地下降的結果，本節進一步比較未修飾 RP 與 DRP 對雞塊質地與微觀結構的影響，評估 DRP 對雞塊

質地與結構穩定性的應用效果與改善潛力。結果顯示，即使 DRP 經去醯胺基處理後具較佳之功能性，但雞塊之硬度與咀嚼性仍下降 (圖 10)，顯示即使功能性提升，仍難以有效恢復雞塊在未取代條件下所具備的質地強度與結構完整性。微觀結構觀察也與此結果一致，DRP 雞塊樣品同樣出現蛋白質網絡斷裂、排列不連續與孔隙明顯等現象，顯示 DRP 在取代應用中無論於質地或結構穩定性方面，皆未顯著改善 RP 取代後所造成質地下降的結果。

此現象可歸因於兩項關鍵機制，首先，RP 與 MP 在分子形態與凝膠機制上存在差異，即使各項功能性提升後，其參與三維網絡的形成表現仍受限 (Chandler et al., 2022)。再者，RP 作為取代蛋白時，雞肉使用量同步下降，導致 MP 含量減少，無法提供足夠的蛋白質網絡支撐力 (Matulis et al., 1995)。上述兩點皆已於第一節中觀察並推論，本節結果也進一步印證之。

因此，若欲提升植物蛋白於肉製品中的應用效果，建議未來除提升其功能性外，也應保留一定比例之 MP，以維持蛋白質網絡之完整性與產品質地穩定性。

第三節 以不同米蛋白比例額外添加至雞塊中

由先前結果得出，當以 RP 或 DRP 部分取代雞肉時，將不可避免地降低肉品中肌原纖維蛋白 (myofibrillar protein, MP) 含量，進而減弱產品原有的三維網絡結構與質地穩定性。因此，為進一步探討在不影響 MP 含量的前提下，米蛋白對雞塊品質之影響與應用潛力，本節設計以額外添加方式，分別添加 5%、10%、15% 之 RP 於雞塊配方中，並從理化特性、質地表現與微觀結構等方向分析，以評估其在額外添加條件下對雞塊品質之影響與應用潛力。

3.1 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之理化影響

在加工肉品中，理化特性為影響其質地、結構穩定性與消費者接受度之關鍵因素 (Matulis et al., 1995)。本研究進一步探討額外添加米蛋白 (RP) 對雞塊理化特性之影響。結果圖 12 顯示，pH 值與烹煮損失在各組間變化不大。然而，在水分含量之表現顯示，隨著 RP 添加比例提高，生肉漿或熟肉產品之水分含量皆略微下降。此現象可能與 RP 為乾粉形式添加有關，RP 在配方中會與 MP 競爭水合作用，導致總含水量下降。此結果也與文獻相符，Lanier (1991) 指出，當非肌肉蛋白 (non-muscle protein, NM protein) 以乾粉狀態加入肉糜系統時，會與 MP 競

爭系統內的水，產生所謂之競爭水合作用 (water competition effect)，進而影響 MP 凝膠形成與產品之水分含量。

整體而言，雖然 RP 在額外添加之應用下不會明顯改變產品之 pH 值與烹煮損失，但在添加量較高時，會對樣品水分含量造成影響。相較之下，E-RP5 組與 control 組在各項理化指標上表現最為相近，顯示於低比例添加 RP 下對產品影響性較小，具應用潛力。

3.2 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之質地影響

為探討額外添加 RP 對雞塊質地的影響，本研究針對 control、E-RP5、E-RP10 與 E-RP15 組進行質地分析。結果如圖 13 所示，隨著 RP 添加比例提高，雞塊之硬度、膠著性與咀嚼性皆顯著提升 ($p < 0.05$)，顯示 RP 添加有助於增強產品之結構密度與咀嚼強度。相較之下，各組在彈性與內聚性上的差異不明顯，表示 RP 的添加並不明顯改變蛋白網絡的彈性或黏附特性，其主要影響機制為結構性之填充，使整體質地更有支撐性。

此結果與 Lanier (1991) 所提出之填充效應模型 (filled gel models) 概念一致。根據其理論，當非肌肉蛋白 (non-muscle protein, NM protein) 以顆粒形式分散於 MP 所形成之網絡中，這些 NM 蛋白可作為填充物填充在凝膠網絡間的空隙 (interstitial spaces) 中，並透過吸水膨脹或物理充填效應提升凝膠之結構穩定性。本研究以額外添加之方式補充 RP，在未減少雞肉之用量與 MP 含量之條件下，更確定 RP 是在 MP 網絡中發揮類似 filled gel models 之填充效應，提升產品之結構強度與質地表現。

整體而言，本研究結果顯示，RP 以額外添加方式應用於雞塊中，有助於提升其結構強度與口感表現。E-RP10 與 E-RP15 組之硬度與咀嚼性皆顯著提升，顯示高比例添加有助於增強產品口感；而 E-RP5 組則與 control 組差異不大，顯示低添加量對質地影響有限。此結果支持 RP 作為填充物能增強質地，未來可依產品需求調整添加比例，以平衡口感與品質表現。

3.3 不同米蛋白比例額外添加至雞塊中之微觀結構影響

本研究透過掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察不同 RP 添加比例對雞塊微觀結構之影響。結果圖 14 顯示，隨著 RP 添加量增加，產品內部蛋白質網絡仍保有與 control 組相似的緊密與連續特性，但整體排列逐漸呈現雜亂之現象。高比例添加

下，蛋白質網絡排列呈現更明顯的混亂現象，推測可能與 RP 顆粒於系統中分布不均、部分聚集有關，進而干擾蛋白質網絡排列的一致性。此現象也與 Feng 等人 (2022) 研究結果一致，當馬鈴薯膳食纖維 (potato dietary fiber, PDF) 額外添加至雞肉餅中時，會破壞原有蛋白質網絡之連續性，使其結構變得雜亂不一。

整體而言，RP 以額外添加方式應用時，雖然不會造成網絡結構斷裂，但在高比例添加下，仍可能導致蛋白質網絡排列雜亂。相較之下，當 RP 作為替代蛋白使用時，為維持水分與蛋白質含量一致，需補充水分並同步減少 MP 含量，導致網絡密度下降，產生明顯的斷層與結構中斷等破壞現象。因此，RP 在肉製品中的應用應根據其添加方式來評估其對微觀結構與產品穩定性的影響。

整體而言，額外添加之應用方法雖然不會造成質地下降等現象，但其添加量仍應控制在適當範圍內，以維持產品所需之結構均衡性與感官品質。

第四節 探討影響雞塊質地之機制

本研究前三節分別探討米蛋白 (RP) 以部分取代與額外添加方式應用於雞塊中的效果，結果顯示 RP 的應用方式對雞塊質地具不同之影響。根據文獻指出，肌原纖維蛋白 (myofibrillar protein, MP) 為肉製品中形成凝膠網絡的主要蛋白，其在系統中的相對濃度對產品質地具有關鍵影響 (Claus et al., 1989; Matulis et al., 1995)。因此，為釐清 RP 應用後對雞塊質地造成不同影響結果之背後潛在機制，本節提出 MP 與水分之比率 (MP/water ratio) 為關鍵變因，並設計兩階段實驗加以探討。

第一階段 (4.1) 比較 RP 與水分之獨立與共同添加對 MP/water 比率與質地表現之影響；第二階段 (4.2) 則在固定 MP 含量的條件下，透過調整補水量改變 MP/water 比率，以進一步驗證該比率對雞塊質地的關鍵性影響。各組 MP 含量、水含量與 MP/water 比率皆根據雞胸肉基本組成 (表 1) 進行計算，並整理於表 3、表 4 與圖 17，作為本節探討 RP 應用機制的依據。

4.1 水與米蛋白添加對雞塊之質地分析

為探討 RP 不同應用方式 (額外添加與取代) 對雞塊質地與 MP/water 比率之影響，本節設計四組處理條件：control、con+RP、con+W 與 con+W+RP，分別探討 RP 與水分之單獨或共同添加之效應。所有組別皆統一使用 350 g 雞肉，以

確保 MP 含量基礎一致。其中，con+RP 組僅添加 RP 而不補水，con+W 組僅補水不加 RP，con+W+RP 組則同時補水與添加 RP，以模擬 RP 與水分同時存在之條件。經由這些成分添加之設計導致各組間 MP 與水分的比例不同，進一步探討 MP/water 比率是否為影響蛋白質網絡之穩定性與雞塊質地表現之關鍵。

實驗結果顯示，con+RP 組硬度最高，con+W 組最低，con+W+RP 介於兩者之間，顯示 RP 添加與水分變化對結構穩定性具明顯影響。因此，為釐清此差異背後之機制，後續將分別探討 RP 添加對結構的影響與 MP/water 比率之角色。

4.1.1 RP 單獨添加之填充效應

結果圖 15 顯示，con+RP 組在不補充水分的條件下單獨添加 RP 能有效提升雞塊硬度，與第三節額外添加 RP 之結果一致。此現象可由 Lanier(1991) 提出之填充效應模型 (filled gel model) 解釋，當非肌肉蛋白如 RP 以乾粉顆粒形式分佈於 MP 所形成之凝膠網絡間隙中，雖然不直接參與交聯反應，但可藉由體積佔據及顆粒充填，間接增強蛋白質網絡之支撐性，提升最終產品之結構密度與口感強度。

4.1.2 MP/water 比率為質地硬度表現之關鍵因素

實驗結果顯示 (表 3)，雞塊之硬度與 MP/water 比率具有高度正相關性。當 MP/water 比率由 con 組之 31.9% 下降至 22.3% (如 con+W 與 con+W+RP 組) 時，雞塊硬度顯著下降；反之，當比率維持於 31.9% (如 con 與 con+RP 組) 時，樣品硬度則顯著較高，顯示 MP/water 比率提升有助於增強蛋白質網絡的穩定性與質地強度。此現象與 Matulis 等人 (1995) 指出之機制一致，該研究指出 MP 經加熱後會形成三維凝膠網絡，其是肉製品中維持結構與質地的關鍵蛋白來源，因此，MP 在系統中的相對濃度為決定質地表現的關鍵因素。

在本研究中，MP 的相對濃度以 MP/water 比率表示，該指標整合了 MP 與水分含量的相對關係。當 MP/water 比率因水分添加而降低時，蛋白質間的交聯效率與凝膠網絡密度會下降，導致結構鬆散、質地變軟。此推論也與 Ishioroshi 等人 (1979) 和 O'Neill 等人 (1993) 研究一致，其指出蛋白質之相對濃度愈高，膠凝強度與硬度表現也隨之提升，強調蛋白質濃度在肉製品質地形成中是關鍵的角色。

此外，水分在系統中的比例也為影響質地的關鍵因素。根據 Matulis 等人 (1995) 與 Claus 等人 (1989) 之觀點，當配方中水分比例過高時，蛋白質分子中的

親水區域會優先與水結合，而非與其他蛋白進行交聯反應，進而減弱分子間之相互作用，導致凝膠網絡密度下降、結構穩定性下降。本研究之結果也與上述機制一致，con+W 與 con+W+RP 組皆因為水分的添加導致 MP/water 比率由 control 組之 31.9% 下降至 22.3%，其對應硬度也顯著下降，顯示水分的添加會使 MP/water 比率下降，進一步減弱蛋白網絡之形成與支撐性。

相較之下，con+W+RP 組之硬度略高於 con+W 組，推測可能與 RP 顆粒進入系統後所產生的體積佔據作用有關。RP 雖無法參與 MP 的交聯反應，但其顆粒可分布於 MP 凝膠網絡中，透過體積佔據與吸水作用，降低系統中水分過量所導致之 MP 稀釋效應，從而緩解蛋白質網絡結構的鬆散程度，進而維持一定的硬度表現。

綜合上述結果，MP/water 比率能有效整合 MP 含量與水分比例，是反映蛋白質網絡穩定性與雞塊質地變化之重要指標。結果顯示，雞塊硬度與 MP/water 比率呈現正相關，當比率降低時（如 con+W、con+W+RP），雞塊硬度明顯下降；反之，當比率維持不變時（如 control、con+RP），硬度表現較高。此結果支持 MP/water 比率是判斷植物蛋白應用條件對產品質地影響的重要指標，後續將進一步設計實驗驗證此關聯性。

4.2 減少補水量對米蛋白雞塊質地影響之分析

前述實驗結果顯示，米蛋白 (RP) 在不同應用方式下對雞塊質地表現有不同之影響。當 RP 作為雞肉蛋白的取代時會降低雞塊之硬度，額外添加時則可提升其硬度。為釐清造成此差異的原因，並驗證 MP/water 比率對雞塊質地影響，本節以第一節中之 RP20 組（補充 73 g 水與 27 g RP）為基準，設計三組逐步減少補水量的樣品（RP20-RW1、RW3 與 RW5），藉以提升 MP/water 比率，進一步觀察其與雞塊質地變化之關聯性。

結果如圖 16 所示，隨著補水量逐漸減少，雞塊樣品的硬度與咀嚼性皆呈上升趨勢，顯示 MP/water 比率的提升有助於恢復蛋白質網絡的結構穩定性，並驗證其對雞塊質地具有關鍵之影響。為進一步釐清 MP/water 比率與雞塊硬度間的關聯性，本研究進行 Pearson 相關分析（圖 17），結果顯示兩者間具有高度正相關（ $r=0.931$ ），支持 MP/water 比率為影響雞塊質地的重要參數。

進一步觀察發現，RP20-RW5 組之硬度略高於 control 組，推測除了是

MP/water 比率回升所帶來的效果外，也可能與 Lanier (1991) 提出的填充效應模型 (filled gel model) 有關。根據該模型，非肌肉蛋白如 RP，雖然不直接參與熱誘導交聯反應，但其顆粒可分布於 MP 凝膠網絡的間隙中，透過物理性體積佔據產生填充作用，進而提升蛋白質網絡的密度與支撐性。本研究第 4.1 與 3.2 節之結果也支持此推論，顯示 RP 顆粒的存在可間接增強雞塊的咀嚼性與結構強度，在 MP/water 比率回升的情況下，能進一步提升質地之表現。

綜合上述實驗結果可知，雖然 RP 本身無法如 MP 般參與穩定凝膠網絡的交聯反應，但其對雞塊質地的影響不僅與其自身功能性有關，更受到 MP 含量與水分比例交互變化的影響。其應用效果可依使用方式分為兩種情境：

1. RP 單獨添加 (無補水): 在 MP 含量與水分比例不變的條件下，RP 顆粒可分布於 MP 凝膠網絡中並發揮填充效應，提升結構密度與硬度 (第 4.1 與 3.2 節)。

2. RP 與水同時存在 (等量取代): 為補足 RP 取代雞肉後所減少的總蛋白與水分，配方中需同時補入 RP 與水分。然而，這樣的調整雖補足總量，卻也導致雞肉用量減少，使系統中肌原纖維蛋白 (MP) 相對濃度下降，且水分比例上升，進一步造成 MP/water 比率降低。此比率下降表示降低了 MP 的有效濃度，減弱蛋白質間的交聯反應與凝膠網絡的形成能力，最終導致雞塊質地硬度的下降 (第 4.1 與 4.2 節)。

綜合而言，本研究提出 MP/water 比率作為整合 RP 添加方式、水分變化與 MP 濃度變因之關鍵指標。未來植物蛋白應用於肉製品配方時，除了考量其本身功能性外，也須評估其對 MP/water 比率與蛋白質網絡形成的間接影響，可透過水分比例的調整與配方優化，提升產品質地穩定性與整體品質表現。

第六章 結語


本研究探討米蛋白於雞塊中以取代或額外添加兩種應用方式對其質地與品質之影響，並成功確立肌原纖維蛋白/水比率 (MP/water 比率) 為評估雞塊質地變化的關鍵指標。研究結果顯示，以 RP 取代雞肉時，由於雞肉使用量減少，導致 MP 含量下降，進而使 MP/water 比率降低，削弱蛋白質網絡之結構穩定性，使雞塊質地變軟。相對地，在維持 MP/water 比率不變的條件下額外添加 RP，則可透過物理填充效應增加產品硬度。

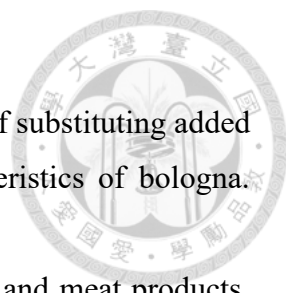
綜合上述結果，本研究釐清了 RP 添加方式、水分比例與 MP 含量三者之交互關係，並提出 MP/water 比率作為質地評估之指標，為混合肉製品的配方設計提供具體參考。未來植物蛋白應用於混合肉製品時，建議同時考量其與動物蛋白之交互影響及水分調控，並可進一步將 MP/water 比率之概念延伸至其他植物蛋白與肉製品型態之開發，以發展出兼具感官接受度與永續性之產品。

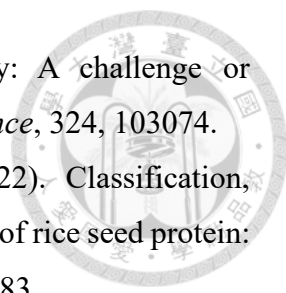
參考文獻



- 吳文楷. (2023). 化學性修飾方法之組合以提升米蛋白水溶性及功能性. 國立臺灣大學園藝暨景觀學系學位論文.
- 張庭璋. (2023). 米蛋白取代部分瘦肉對貢丸理化和感官特性之研究. 國立臺灣大學園藝暨景觀學系學位論文.
- Adebiyi, A. P., Adebiyi, A. O., Hasegawa, Y., Ogawa, T., & Muramoto, K. (2009). Isolation and characterization of protein fractions from deoiled rice bran. *European Food Research and Technology*, 228, 391–401.
- Amagliani, L., O'Regan, J., Kelly, A. L., & O'Mahony, J. A. (2017). The composition, extraction, functionality and applications of rice proteins: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 64, 1–12.
- AOAC, M. (1990). Association of official analytical chemists. Official methods of analysis. *Official Methods of Analysis*, 1, 69-90.
- Argel, N. S., Lorenzo, G., Domínguez, R., Fraqueza, M. J., Fernández-López, J., Sosa, M. E., Campagnol, P. C. B., Lorenzo, J. M., & Andrés, S. C. (2022). Hybrid meat products: incorporation of white bean flour in lean pork burgers. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12.
- Arntfield, S. D., Murray, E. D., & Ismond, M. A. H. (1990). Dependence of thermal properties as well as network microstructure and rheology on protein concentration for ovalbumin and vicilin. *Journal of Texture Studies*, 21, 191–212.
- Asghar, A., Samejima, K., & Yasui, T. (1985). Functionality of muscle proteins in gelation mechanisms of structured meat products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 22, 27–106.
- Astihar, A., Morita, J. I., Samejima, K., & Yasui, T. (1984). Biochemical and functional characteristics of myosin from red and white muscles of chicken as influenced by nutritional stress. *Agricultural and Biological Chemistry*, 48, 2217–2224.
- Avilés-Gaxiola, S., Chuck-Hernández, C., Rocha-Pizaña, M. del R., García-Lara, S., López-Castillo, L. M., & Serna-Saldívar, S. O. (2018). Effect of thermal processing and reducing agents on trypsin inhibitor activity and functional properties of soybean and chickpea protein concentrates. *LWT*, 98, 629–634.
- Baéza, E. (2020). Characteristics of processed poultry products. *World's Poultry Science Journal*, 76, 719–741.

- 
- Barbut, S. (2012). Convenience breaded poultry meat products - New developments. *Trends in Food Science and Technology*, 26, 14–20.
- Barutçu Mazi, I., & Mazi, B. G. (2017). Mikroalgada kızartmanın tavuk göğüs eti miyofibriler ve sarkoplazmik proteinleri üzerine etkileri. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 27, 496–506.
- Baxter, G., Zhao, J., & Blanchard, C. (2010). Albumin significantly affects pasting and textural characteristics of rice flour. *Cereal Chemistry*, 87(3), 250–255.
- Behrends, J. M., Goodson, K. J., Koohmaraie, M., Shackelford, S. D., Wheeler, T. L., Morgan, W. W., Reagan, J. O., Gwartney, B. L., Wise, J. W., & Savell, J. W. (2005). Beef customer satisfaction: USDA quality grade and marination effects on consumer evaluations of top round steaks. *Journal of Animal Science*, 83(3), 662-670.
- Bessada, S. M. F., Barreira, J. C. M., & Oliveira, M. B. P. P. (2019). Pulses and food security: Dietary protein, digestibility, bioactive and functional properties. *Trends in Food Science and Technology*, 93, 53–68.
- Bohrer, B. M. (2019). An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products. *Food Science and Human Wellness*, 4, 320–329.
- Bonny, S. P. F., Gardner, G. E., Pethick, D. W., & Hocquette, J. F. (2015). What is artificial meat and what does it mean for the future of the meat industry? *Journal of Integrative Agriculture*, 14(2), 255–263.
- Camou, J. P., sebranek, J. G., & Olson, D. G. (1989). Effect of heating rate and protein concentration on gel strength and water loss of muscle protein gels. *Journal of Food Science*, 54, 850–854.
- Chandler, S. L., & McSweeney, M. B. (2022). Characterizing the properties of hybrid meat burgers made with pulses and chicken. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 27.
- Chang, H. S., Feng, Y., & Hultin, H. O. (2001). Role of pH in gel formation of washed chicken muscle at low ionic strength. *Journal of Food Biochemistry*, 25(5), 439–457.
- Chen, X., Tume, R. K., Xiong, Y., Xu, X., Zhou, G., Chen, C., & Nishiumi, T. (2018). Structural modification of myofibrillar proteins by high-pressure processing for functionally improved, value-added, and healthy muscle gelled foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58, 2981–3003.
- Clark, K. A., McElhinny, A. S., Beckerle, M. C., & Gregorio, C. C. (2002). Striated muscle cytoarchitecture: An intricate web of form and function. *Annual Review of Cell and*

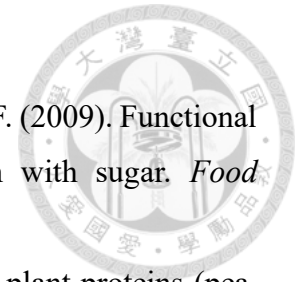
- 
- Developmental Biology*, 18, 637–706.
- Claus, J. R., Hunt, M. C., Kastner, C. L., & Hall, W. (1989). Effects of substituting added water for fat on the textural, sensory, and processing characteristics of bologna. *Journal of Muscle Foods*, 1(1), 1-21.
- Cobos, Olga Díaz, & Ángel. (2015). Chemical composition of meat and meat products. *Handbook of Food Chemistry*, 1, 471–510.
- Dai, H., Zhan, F., Chen, Y., Shen, Q., Geng, F., Zhang, Z., & Li, B. (2023). Improvement of the solubility and emulsification of rice protein isolate by the pH shift treatment. *International Journal of Food Science and Technology*, 58, 355–366.
- De Brier, N., Gomand, S. V., Celus, I., Courtin, C. M., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2015). Extractability and chromatographic characterization of wheat bran protein. *Journal of Food Science*, 80, 967–C974.
- Dimitrakopoulou, M. A., Ambrosiadis, J. A., Zetou, F. K., & Bloukas, J. G. (2005). Effect of salt and transglutaminase (TG) level and processing conditions on quality characteristics of phosphate-free, cooked, restructured pork shoulder. *Meat Science*, 70, 743–749.
- Eggum, B. O., Cabrera, I. Z., & Juliano, B. O. (1993). Protein and lysine digestibility and protein quality of cooked Filipino rice diets and milled rice in growing rats. *Plant Foods for Human Nutrition*, 43, 163-170.
- Ellepola, S. W., Choi, S. M., Phillips, D. L., & Ma, C. Y. (2006). Raman spectroscopic study of rice globulin. *Journal of Cereal Science*, 43, 85–93.
- Fabian, C., & Ju, Y. H. (2011). A review on rice bran protein: Its properties and extraction methods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51, 816–827.
- Feng, J., Kong, B., Sun, F., & Xia, X. (2022). Effect of potato dietary fiber on the quality, microstructure, and thermal stability of chicken patty. *Foods*, 11(24), 3978.
- Ferry, J. D. (1948). Protein Gels. *Advances in Protein Chemistry*, 4, 1–78.
- Feskens, E. J. M., Sluik, D., & Van Woudenberg, G. J. (2013). Meat consumption, diabetes, and its complications. *Current Diabetes Reports*, 13, 298–306.
- Fiorentini, M., Kinchla, A. J., & Nolden, A. A. (2020). Role of sensory evaluation in consumer acceptance of plant-based meat analogs and meat extenders: a scoping review. *Foods*, 9(9), 1334.
- Fukagawa, N. K., & Ziska, L. H. (2019). Rice: Importance for Global Nutrition. *Journal of nutritional science and vitaminology*, 65.

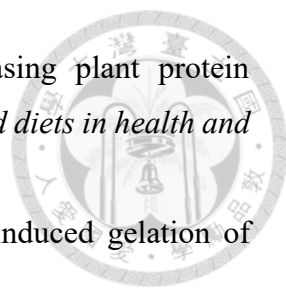
- 
- Gao, K., Rao, J., & Chen, B. (2024). Plant protein solubility: A challenge or insurmountable obstacle. *Advances in colloid and interface science*, 324, 103074.
- Ghanghas, N., M. T, M., Sharma, S., & Prabhakar, P. K. (2022). Classification, composition, extraction, functional modification and application of rice seed protein: a comprehensive review. *Food Reviews International*, 38, 354–383.
- Grossmann, L., Hinrichs, J., & Weiss, J. (2019). Solubility and aggregation behavior of protein fractions from the heterotrophically cultivated microalga *Chlorella protothecoides*. *Food Research International*, 116, 283–290.
- Guo, X., & Yao, H. (2006). Fractionation and characterization of tartary buckwheat flour proteins. *Food Chemistry*, 98, 90–94.
- Gupta, S., Chandi, G. K., & Sogi, D. S. (2008). Effect of Extraction Temperature on Functional Properties of Rice Bran Protein Concentrates. *International Journal of Food Engineering*, 4.
- Hamada, J. S. (1994). Deamidation of Food Proteins to Improve Functionality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 34, 283–292.
- Hamada, J. S. (1997). Characterization of protein fractions of rice bran to devise effective methods of protein solubilization. *Cereal Chemistry*, 74, 662–668.
- Hartmann, C., & Siegrist, M. (2017). Consumer perception and behaviour regarding sustainable protein consumption: A systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 61, 11–25.
- Henchion, M., McCarthy, M., Resconi, V. C., & Troy, D. (2014). Meat consumption: Trends and quality matters. *Meat Science*, 98, 561–568.
- Hermansson, A.-M. (1979). Aggregation and Denaturation Involved in Gel Formation. *Functionality and protein structure*, 92, 81-103.
- Hibino, T., Kidzu, K., Masumura, T., Ohtsuki, K., Tanaka, K., Kawabata, M., & Fujii, S. (1989). Amino acid composition of rice prolamin polypeptides. *Agricultural and Biological Chemistry*, 53, 513–518.
- Hoogenkamp, H., Kumagai, H., & Wanasundara, J. P. D. (2017). Rice protein and rice protein products. *Sustainable Protein Sources*, 47–65
- Huse, H. L., Hung, Y.-C., & Mcwatters, K. H. (2006). Physical and sensory characteristics of fried cowpea paste formulated with soy flour and edible coatings. *Journal of food quality*, 29(4), 419-430.
- Ishioroshi, M., Jima, K. same, & Yasui, T. (1979). Heat-induced gelation of myosin:

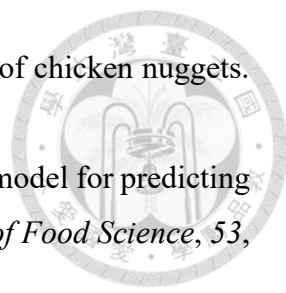
- factors of pH and salt concentrations. *Journal of Food Science*, 44, 1280–1284.
- Ismail, I., Hwang, Y.-H., & Joo, S.-T. (2020). Meat analog as future food: a review. *Journal of animal science and technology*, 62(2), 111.
- Keever, B. D. (2012). Salt concentration and species affects protein extractability and processed meat characteristics core view metadata, citation and similar papers at core.ac.uk provided by illinois digital environment for access to learning and scholarship repository. Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Kim, H. Y., Kim, K. J., Lee, J. W., Kim, G. W., Choe, J. H., Kim, H. W., Yoon, Y., & Kim, C. J. (2015). Quality evaluation of chicken nugget formulated with various contents of chicken skin and wheat fiber mixture. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 35, 19–26.
- Kubota, M., Saito, Y., Masumura, T., Kumagai, T., Watanabe, R., Fujimura, S., & Kadowaki, M. (2010). Improvement in the in vivo digestibility of rice protein by alkali extraction is due to structural changes in prolamin/protein body-I particle. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 74, 614–619.
- Kulawik-Pióro, A., Drabczyk, A. K., Kruk, J., Wróblewska, M., Winnicka, K., & Tchórzewska, J. (2021). Thiolated silicone oils as new components of protective creams in the prevention of skin diseases. *Materials*, 14(16), 4723.
- Kumar Singh, A., Singh, R., Subramani, R., Kumar, R. Wankhede, D. (2016). Molecular Approaches to Understand Nutritional Potential of Coarse Cereals. *Current Genomics*, 17, 177–192.
- Kyriakopoulou, K., Keppler, J. K., & van der Goot, A. J. (2021). Functionality of ingredients and additives in plant-based meat analogues. *Foods*, 10(3), 600.
- Landers, P. S., & Hamaker, B. R. (1994). Antigenic properties of albumin, globulin, and protein concentrate fractions from rice bran, 409-411.
- Lanier, T. C. (1991). Interactions of muscle and nonmuscle proteins affecting heat-set gel rheology. *Interactions of food proteins*, 454, 268-284.
- Lee, H. J., Yong, H. I., Kim, M., Choi, Y. S., & Jo, C. (2020). Status of meat alternatives and their potential role in the future meat market — A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 33(10), 1533.
- Li, Ya, Zhang, C., Liang, Y., Wang, L., & Xiong, W. (2022). Solubility and conformational characterization of rice glutelin after high temperature treatment. *International*


Journal of Biological Macromolecules, 223, 1720–1726.

- Li, Yue, Lu, F., Luo, C., Chen, Z., Mao, J., Shoemaker, C., & Zhong, F. (2009). Functional properties of the Maillard reaction products of rice protein with sugar. *Food Chemistry*, 117, 69–74.
- Lin, W., & Barbut, S. (2024). Hybrid meat batter system: effects of plant proteins (pea, brown rice, faba bean) and concentrations (3–12%) on texture, microstructure, rheology, water binding, and color. *Poultry Science*, 103.
- Liu, R., Wang, N., Li, Q., & Zhang, M. (2015). Comparative studies on physicochemical properties of raw and hydrolyzed oat β -glucan and their application in low-fat meatballs. *Food Hydrocolloids*, 51, 424–431.
- Liu, W., & Lanier, T. C. (2016). Rapid (microwave) heating rate effects on texture, fat/water holding, and microstructure of cooked comminuted meat batters. *Food Research International*, 81, 108–113.
- Matulis, R. J., Mckeith, F. K., Sutherland, J. W., & Brewer, M. S. (1995). Sensory Characteristics of Frankfurters as Affected by Fat, Salt, and pH. *Journal of Food Science*, 60, 42–47.
- Meenmanee, S., Rattananukrom, A., Thaiphanit, S., & Suppavorasatit, I. (2022). Improvement of solubility, foaming, and emulsification properties of coconut (*Cocos nucifera L.*) protein by non-enzymatic deamidation. *LWT*, 153.
- Mokrzycki Cardinal Stefan, W., & Tatol, M. (2011). Color difference Delta E-A survey Colour difference ΔE -A survey. *Mach. Graph. Vis*, 20(4), 383-411.
- Moreno, H. M., Domínguez-Timón, F., Díaz, M. T., Pedrosa, M. M., Borderías, A. J., & Tovar, C. A. (2020). Evaluation of gels made with different commercial pea protein isolate: Rheological, structural and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 99.
- Murakami, S., Hayashi, T., & Kinoshita, M. (2017). Effects of salt or cosolvent addition on solubility of a hydrophobic solute in water: Relevance to those on thermal stability of a protein. *Journal of Chemical Physics*, 146.
- Murphy, R. Y., Marks, B. P., & Marcy, J. A. (1998). Apparent Specific Heat of Chicken Breast Patties and their Constituent Proteins by Differential Scanning Calorimetry. *Journal of Food Science*, 63, 88–91.
- Neville, M., Tarrega, A., Hewson, L., & Foster, T. (2017). Consumer-orientated development of hybrid beef burger and sausage analogues. *Food Science and Nutrition*, 5, 852–864.



- 
- Niva, M., Vainio, A., & Jallinoja, P. (2017). Barriers to increasing plant protein consumption in Western populations. *Vegetarian and plant-based diets in health and disease prevention*, 157-171.
- O'neill, E., Morrissey, P. A., & Mulvihill, & D. M. (1993). Heat-induced gelation of actomyosin. *Meat Science*, 33(1), 61-74.
- Paraman, I., Hettiarachchy, N. S., Schaefer, C., & Beck, M. I. (2006). Physicochemical properties of rice endosperm proteins extracted by chemical and enzymatic methods. *Cereal Chemistry*, 83(6), 663–667.
- Paraman, I., Hettiarachchy, N. S., & Schaefer, C. (2007). Glycosylation and deamidation of rice endosperm protein for improved solubility and emulsifying properties; glycosylation and deamidation of rice endosperm protein for improved solubility and emulsifying properties. *Cereal Chemistry*, 84(6), 593-599.
- Paraman, I., Hettiarachchy, N. S., Schaefer, C., & Beck, M. I. (2007). Hydrophobicity, solubility, and emulsifying properties of enzyme-modified rice endosperm protein; hydrophobicity, solubility, and emulsifying properties of enzyme-modified rice endosperm protein. *Cereal chemistry*, 84(4), 343-349.
- Pelegrine, D. H. G., & Gasparetto, C. A. (2005). Whey proteins solubility as function of temperature and pH. *LWT-Food Science and Technology*, 38(1), 77-80.
- Redfern, S. K., Azzu, N., & Binamira, J. S. (2012). Rice in Southeast Asia: facing risks and vulnerabilities to respond to climate change. *Build Resilience Adapt Climate Change Agri Sector*, 23(295), 1-14.
- Sams, A. R. . (2001). Poultry meat processing. CRC Press.
- Santos, M. dos, Rocha, D. A. V. F. da, Bernardinelli, O. D., Oliveira Júnior, F. D., de Sousa, D. G., Sabadini, E., da Cunha, R. L., Trindade, M. A., & Pollonio, M. A. R. (2022). Understanding the performance of plant protein concentrates as partial meat substitutes in hybrid meat emulsions. *Foods*, 11.
- Sharima-Abdullah, N., Hassan, C. Z., Arifin, N., & Huda-Faujan, N. (2018). Physicochemical properties and consumer preference of imitation chicken nuggets produced from chickpea flour and textured vegetable protein. *International Food Research Journal*, 25(3), 1016-1025.
- Shih, F. F. (2003). An update on the processing of high-protein rice products. *Food/Nahrung*, 47(6), 420-424.
- Shoaib, A., Sahar, A., Sameen, A., Saleem, A., & Tahir, A. T. (2018). Use of pea and rice

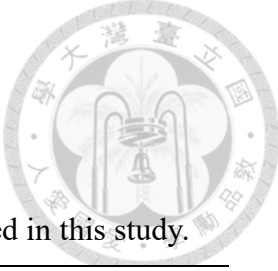
- 
- protein isolates as source of meat extenders in the development of chicken nuggets. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42.
- Smith, D. M., Alvarez, V. B., & Morgan, R. G. (1988). A generalized model for predicting heat-induced chicken myofibrillar protein gel strength. *Journal of Food Science*, 53, 359–362.
- Smith, P. E., Krohn, R. I., Hermanson, G. T., & Mallia, A. K. (1985). Measurement of protein using bicinchoninic acid. *Analytical Biochemistry*, 150, 76–85.
- Sullivan, S. T., Khan, S. A., & Eissa, A. S. (2009). Whey proteins: functionality and foaming under acidic conditions. *Whey Processing, Functionality and Health Benefits*, 99–132.
- Sun, X. D., & Holley, R. A. (2011). Factors influencing gel formation by myofibrillar proteins in muscle foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10, 33–51.
- Takaiwa, F., Ogawa, M., & Okita, T. W. (1999). Rice Glutelins. *Seed Proteins*, 401–425.
- Tornberg, E. (2005). Effects of heat on meat proteins - Implications on structure and quality of meat products. *Meat Science*, 70(3), 493-508.
- Utsumi, S., Inaba, H., & Mori, T. (1981). Heterogeneity of soybean glycinin. *Phytochemistry*, 20, 585–589.
- V. Van Hoed, G. Depaemelaere, & J. Vila Ayal. (2006). Influence of chemical refining on the major and minor components of rice brain oil. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 83(4), 315-321.
- Ventanas, S., Puolanne, E., & Tuorila, H. (2010). Temporal changes of flavour and texture in cooked bologna type sausages as affected by fat and salt content. *Meat Science*, 85, 410–419.
- World food and agriculture statistical pocketbook 2019*. (2019). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Xiong, Y. L., & Brekke, C. J. (1991). Protein extractability and thermally induced gelation properties of myofibrils isolated from pre- and postrigor chicken muscles. *Journal of Food Science*, 56, 210–215.
- Yang, J., Meng, D., Wu, Z., Chen, J., & Xue, L. (2023a). Modification and Solubility Enhancement of Rice Protein and Its Application in Food Processing: A Review. *Molecule*, 28(10), 4078.
- Ye, T., Chen, X., Li, Q., Chen, Z., Lin, L., Zheng, Z., & Lu, J. (2024). Towards more

- 
- sustainable surimi gels: Deciphering the hybrid gelation of myofibrillar/plant proteins. *Food Hydrocolloids*, 146.
- Yogesh, K., Ahmad, T., Manpreet, G., Mangesh, K., & Das, P. (2013). Characteristics of chicken nuggets as affected by added fat and variable salt contents. *Journal of Food Science and Technology*, 50, 191–196.
- Zayas, J. F. , & Z. J. F. (1997). Water holding capacity of proteins. *Functionality of proteins in food*, 76-133.
- Zhang, F., Li, X., Liang, X., Kong, B., Sun, F., Cao, C., Gong, H., Zhang, H., & Liu, Q. (2024). Feasibility of *Tenebrio molitor* larvae protein to partially replace lean meat in the processing of hybrid frankfurters: Perspectives on quality profiles and in vitro digestibility. *Food Research International*, 176.
- Zhao, H., Shen, C., Wu, Z., Zhang, Z., & Xu, C. (2020). Comparison of wheat, soybean, rice, and pea protein properties for effective applications in food products. *Journal of Food Biochemistry*, 44.
- Zhao, Q., Selomulya, C., Xiong, H., Chen, X. D., Ruan, X., Wang, S., Xie, J., Peng, H., Sun, W., & Zhou, Q. (2012). Comparison of functional and structural properties of native and industrial process-modified proteins from long-grain indica rice. *Journal of Cereal Science*, 56, 568–575.
- Zhao, W. M., Gatehouse, J. A., & Boulter, D. (1983). The purification and partial amino acid sequence of a polypeptide from the glutelin fraction of rice grains; homology to pea legumin. *FEBS Letters*, 162, 96–102.
- Ziegler, G. R., & Foegeding, E. A. (1990). The gelation of proteins. *In Advances in food and nutrition research*, 34. 203-298.

TABLES

表 1、本實驗所使用的米蛋白與雞肉之基本成分分析結果

Table 1. Proximate composition of rice protein and chicken breast used in this study.



Ingredients	Content (g/100g)					
	Moisture		Protein		Fat	
Chicken breast	73.00	± 1.40	23.30	± 0.60	1.90	± 0.00
Rice protein	5.72	± 0.00	81.46	± 0.84	5.72	± 0.23

Data were presented as mean ± SD (n=3).

*The composition of lean meat was adapted from the food composition database of Food and Drug Administration, Taiwan.



表 2、本研究中不同雞塊產品的配方表

Table 2. Formulations of different chicken nugget products used in this study.

Ingredients (g)	Treatment														
	Control	RP10	RP20	RP30	DRP20	E-RP5	E-RP10	E-RP15	con+W	con+W+RP	con+RP	RP20-RW1	RP20-RW3	RP20-RW5	
Chicken breast	500	450	400	350	400	500	500	500	350	350	350	400	400	400	
Chicken skin	53.3	53.3	53.3	53.3	53.3	53.3	53.3	53.3	37	37	37	53.3	53.3	53.3	
Rice protein	-	13.5	27	40.5	-	25	50	75	-	40.5	40.5	27	27	27	
DRP	-	-	-	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Water	-	36.5	73	109.5	73	-	-	-	109.5	109.5	-	48.6	24.3	-	
Salt	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	1.75	1.75	1.75	2.5	2.5	2.5	
STPP	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.05	1.05	1.05	1.5	1.5	1.5	
Pepper	1	1	1	1	1	1	1	1	0.7	0.7	0.7	1	1	1	
Total weight	558.3	558.3	558.3	558.3	558.3	583.3	608.3	633.3	500	540.5	431	533.9	509.6	485.3	

Abbreviations: STPP, sodium tripolyphosphate; DRP, deamidated rice protein.



表 3、不同組別雞塊樣品之 MP/water 比率與硬度表現

Table 3. Calculated water content, myofibrillar protein (MP) content, MP/water ratio, and corresponding hardness of chicken nugget samples.

	con	con +W	con + W +RP	con + RP
Hardness(g)	1321.53	946.28	1215.20	2001.93
RP (%)	0	0	5.7	6.8
Myofibrillar Protein (%)	20.9	16.3	15.1	18.9
Water (%)	65.4	73.0	67.4	59.3
MP/water ratio (%)	31.9	22.3	22.3	31.9

Note:

con = control group; W = water; RP = rice protein; MP = myofibrillar protein.

The myofibrillar protein (MP) content and water content were estimated based on the proximate composition of chicken breast, with MP content = meat amount \times 0.233 and water content = meat amount \times 0.73.

MP/water ratio was calculated as (MP content/water content) \times 100 and expressed as %MP/water.



表 4、不同補水量組別之 MP/water 比率與硬度表現

Table 4. Calculated MP content, water content, MP/water ratio, and corresponding hardness of chicken nugget samples with adjusted water levels.

	control	RP20	RP20-RW1	RP20-RW3	RP20-RW5
Hardness(g)	1282.16	799.00	1024.48	1278.06	1555.71
Myofibrillar Protein (%)	20.9	16.7	17.5	18.3	19.2
Water (%)	65.4	65.4	63.8	62.1	60.2
MP/water ratio (%)	31.9	25.5	27.4	29.5	31.9

Note:

RP20 = 20% chicken meat replaced by rice protein (RP); RW = reduced water. The number indicates the percentage reduction in added water compared to the RP20 formulation (e.g., RW1 = 1% less added water than RP20).

The myofibrillar protein (MP) content and water content were estimated based on the proximate composition of chicken breast, with MP content = meat amount \times 0.233 and water content = meat amount \times 0.73.

MP/water ratio was calculated as (MP content/water content) \times 100 and expressed as %MP/water.



FIGURES

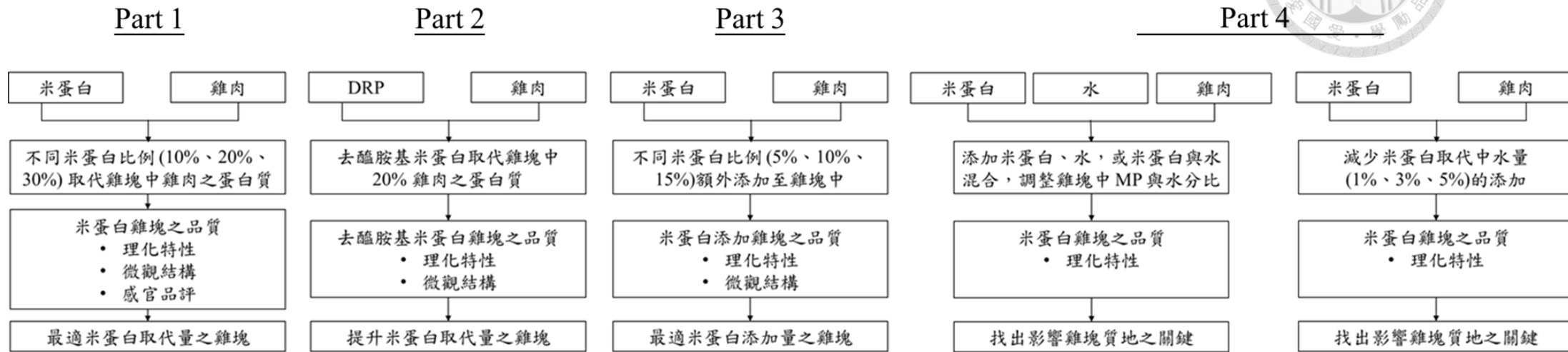


圖 1、實驗架構圖

Fig. 1. The scheme of the study.

Abbreviations: DRP, deamidated rice protein.



圖 2、本實驗之雞塊製作流程圖

Fig. 2. Flowchart of the chicken nugget preparation process used in this study.

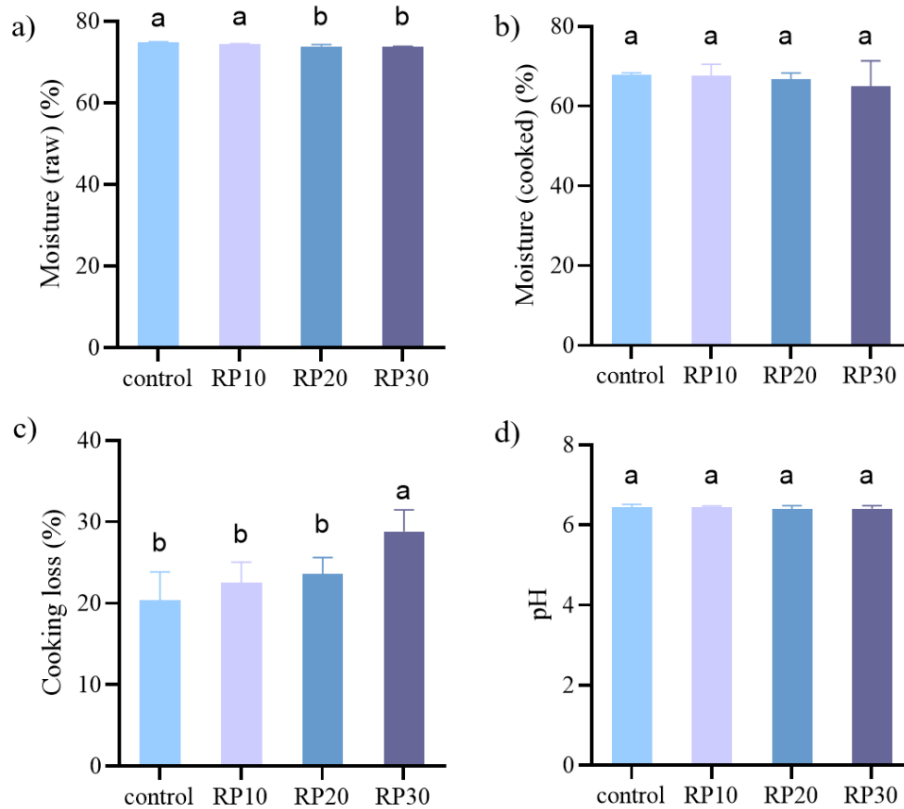


圖 3、米蛋白雞塊之理化特性分析

(a) 水分-raw (b) 水-cooked (c) 烹煮損失 (d) pH

Fig. 3. Physicochemical characteristics of rice protein-substituted chicken nuggets.

(a) moisture (raw), (b) moisture (cooked), (c) cooking loss, (d) pH.

Data were presented as mean \pm SD (n=6).

Different superscripts (a-c) in the same row indicated significant differences among groups (p < 0.05).

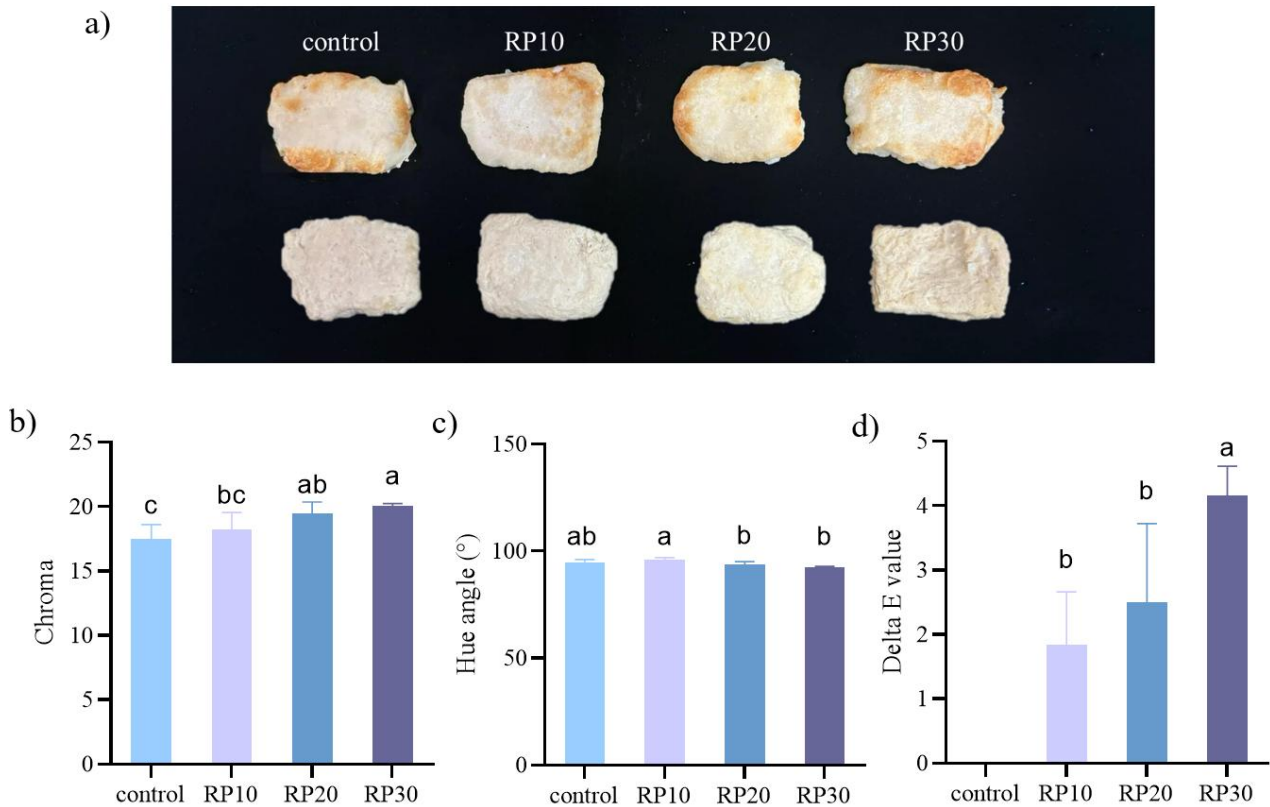


圖 4、米蛋白雞塊之色澤分析

(a) 帶皮和去皮外觀 (b) 彩度 (c) 色相角 (d) E Value.

Fig. 4. Instrumental color parameters of rice protein-substituted chicken nuggets.

(a) representative photos, (b) chroma, (c) hue angle, (d) delta E value.

Data were presented as mean \pm SD (n=5).

Different superscripts (a-c) in the same row indicated significant differences among groups ($p < 0.05$).

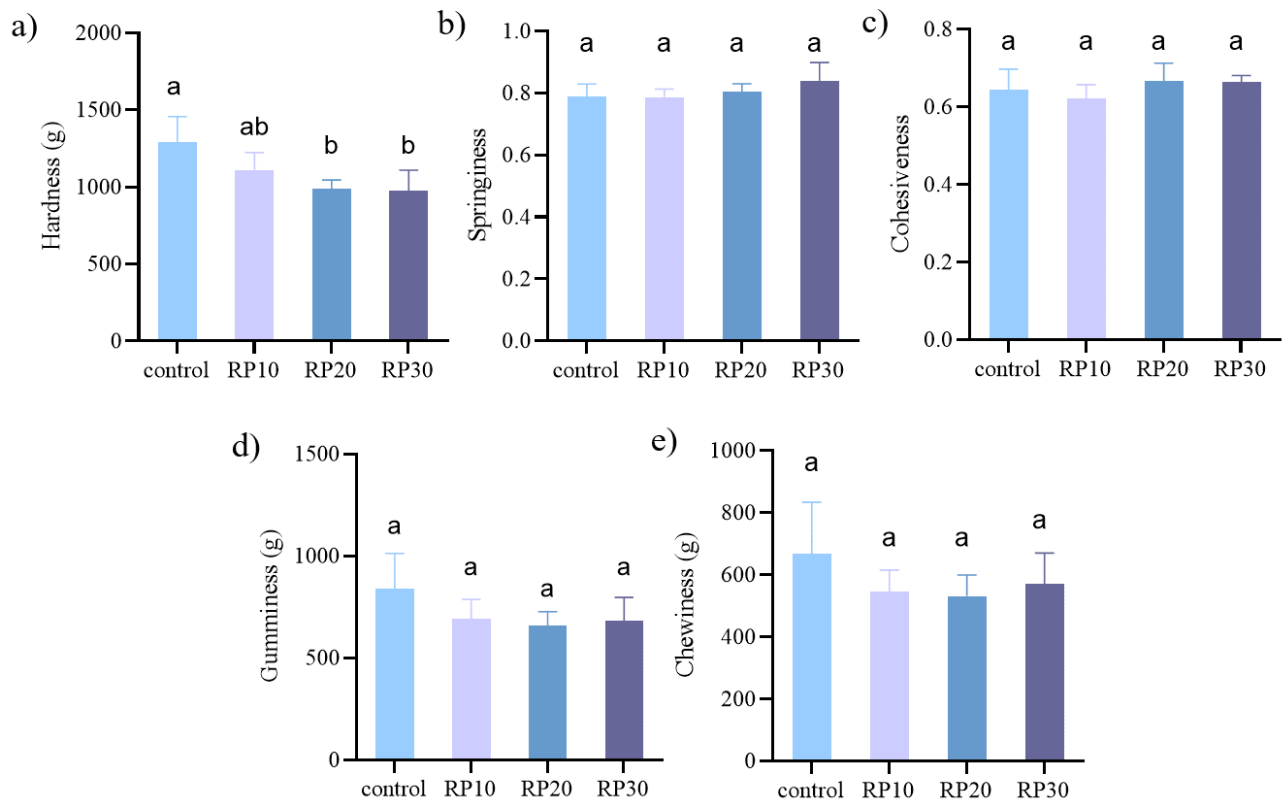


圖 5、米蛋白雞塊之質地分析

(a) 硬度 (b) 彈性 (c) 內聚性 (d) 膠著性 (e) 咀嚼性

Fig. 5. Texture profile analysis of rice protein-substituted chicken nuggets.

(a) hardness (g), (b) springiness, (c) cohesiveness, (d) gumminess, (e) chewiness(g).

Data were presented as mean \pm SD (n=6).

Different superscripts (a-c) in the same row indicated significant differences among groups ($p < 0.05$).

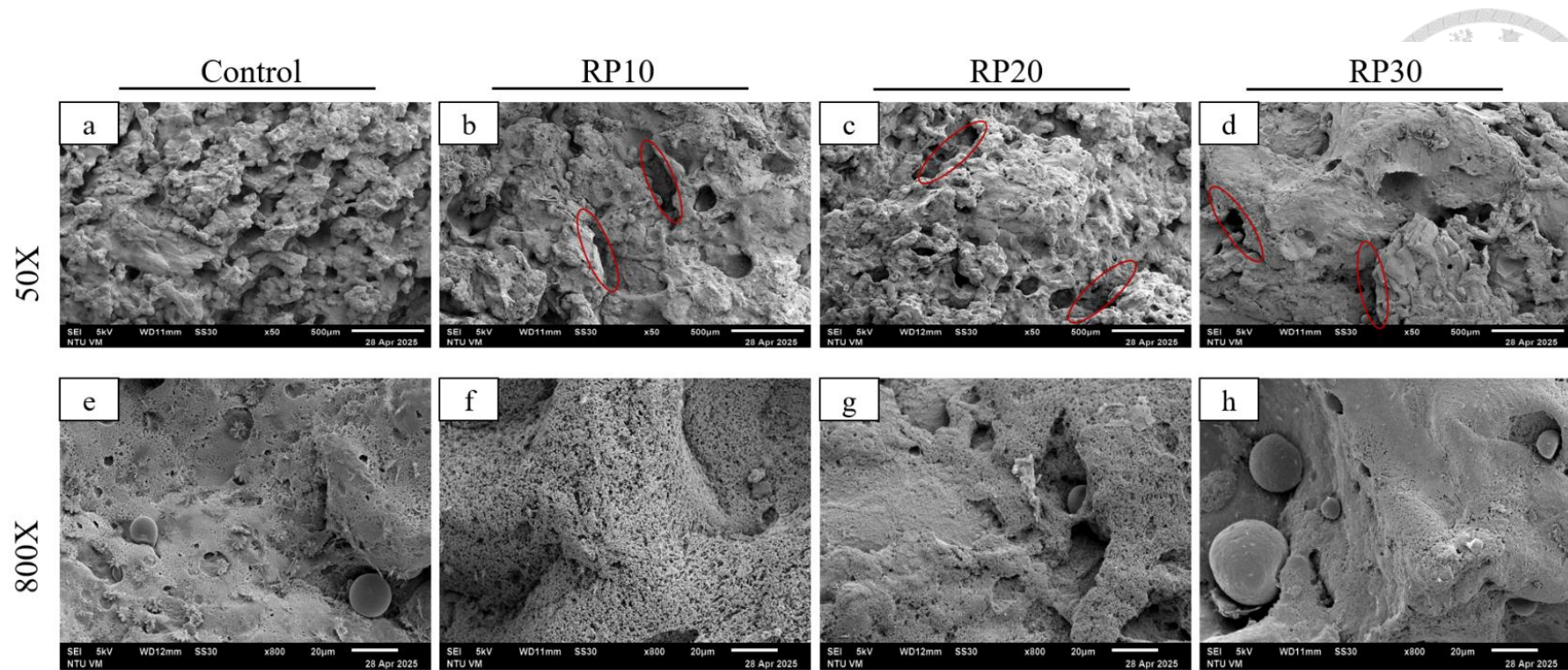


圖 6、米蛋白雞塊之掃描電子顯微照片

(a~d 為 50 倍；e~h 為 800 倍)

Fig. 6. Scanning electron micrographs of rice protein-substituted chicken nuggets.

Magnification of a – c -50× and d – f -800×, scale bar = 500 and 20 µm respectively.

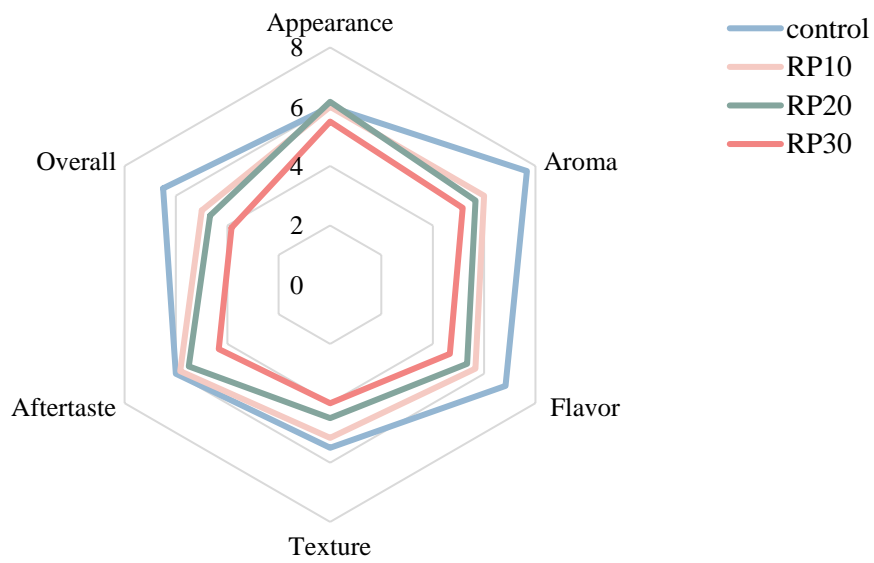


圖 7、米蛋白雞塊之感官品評分析結果

Fig. 7. Sensory analysis of rice protein-substituted chicken nuggets.

Data were presented as mean ± SD (n=25).

*Data is based on the 9-point hedonic scale. 1 = the least, 9 = the most.

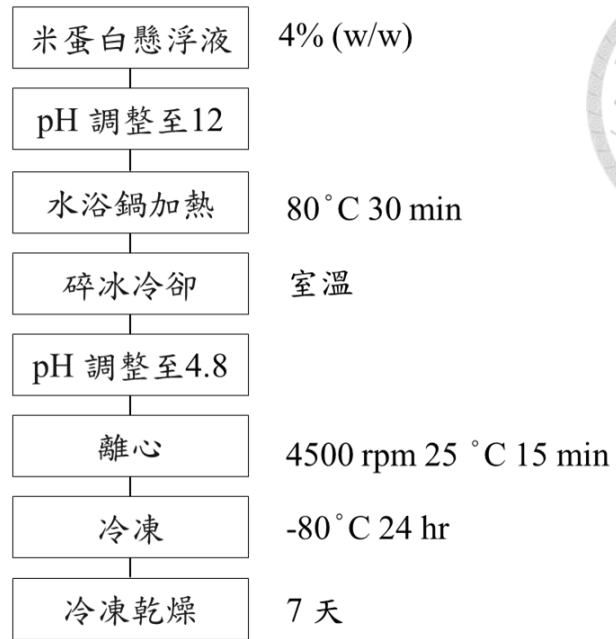


圖 8、去醯胺基米蛋白之製作流程圖

Fig. 8. The deamidation process of RP.

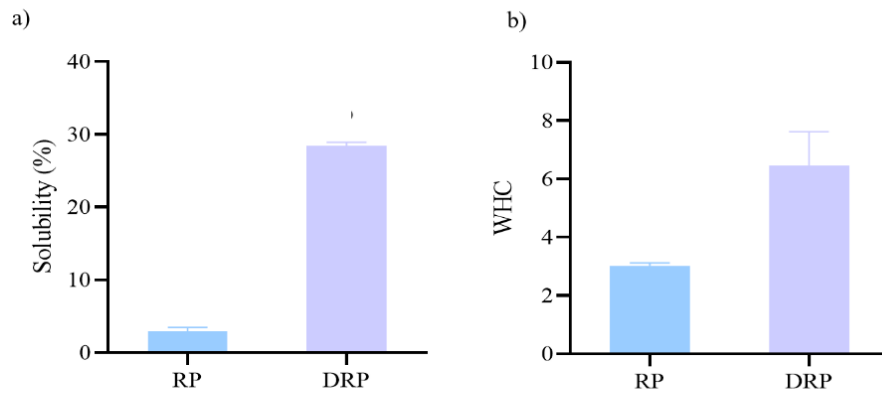


圖 9、去醯胺化處理對米蛋白功能性之影響

(a) 水溶性 (b) 保水性

Fig. 9. Functional properties of rice protein (RP) and deamidated rice protein (DRP).

(a) Solubility at pH 7, (b) Water holding capacity.

Data were presented as mean \pm SD (n=6).

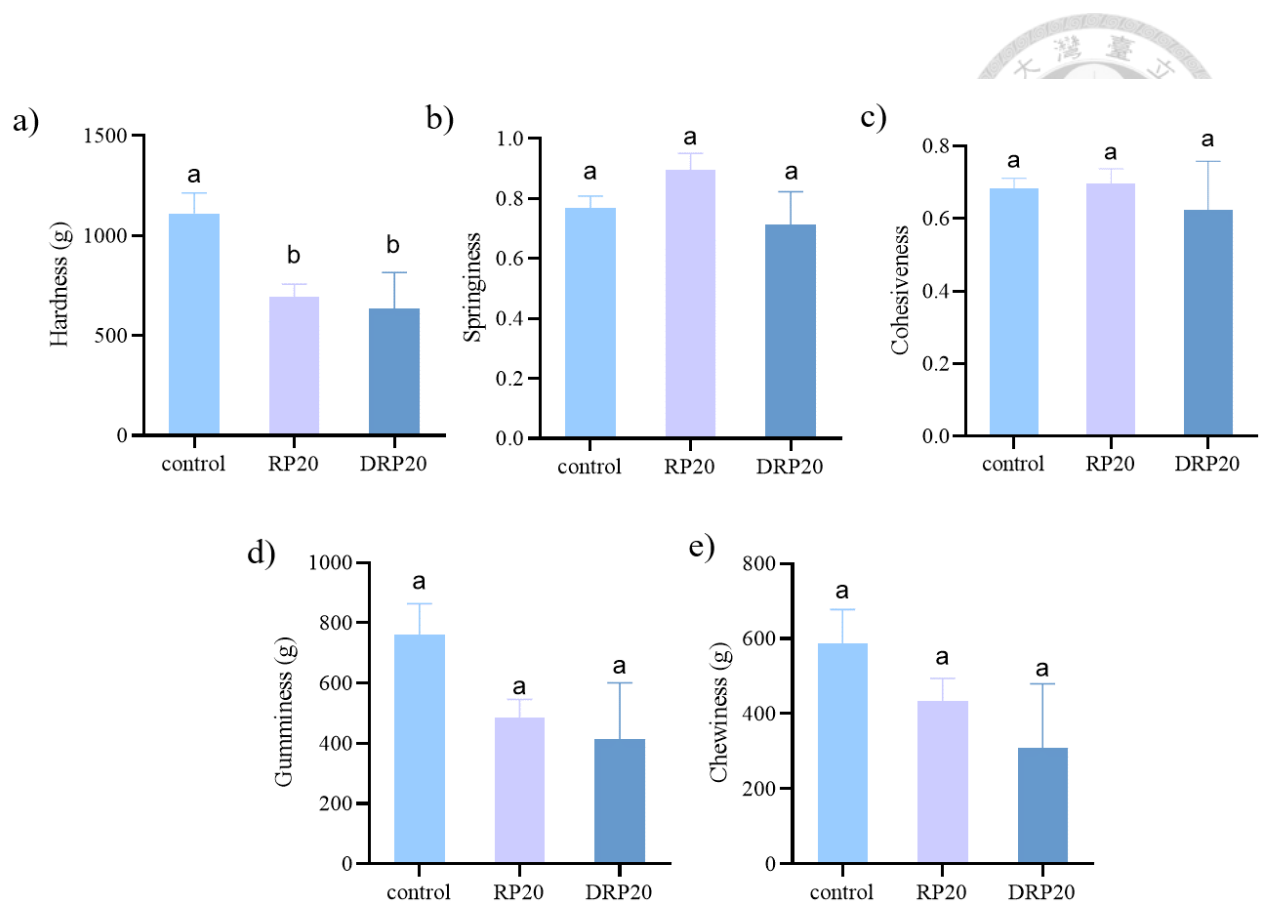


圖 10、去醯胺基米蛋白、米蛋白雞塊之質地分析

(a) 硬度 (b) 彈性 (c) 內聚性 (d) 膠著性 (e) 咀嚼性

Fig. 10. Texture profile analysis of chicken nuggets in which 20% of chicken meat protein was substituted with rice protein (RP) or deamidated rice protein (DRP).

(a) hardness (g), (b) springiness, (c) cohesiveness, (d) gumminess, (e) chewiness(g).

Data were presented as mean \pm SD (n=3).

Different superscripts (a-c) in the same row indicated significant differences among groups ($p < 0.05$).

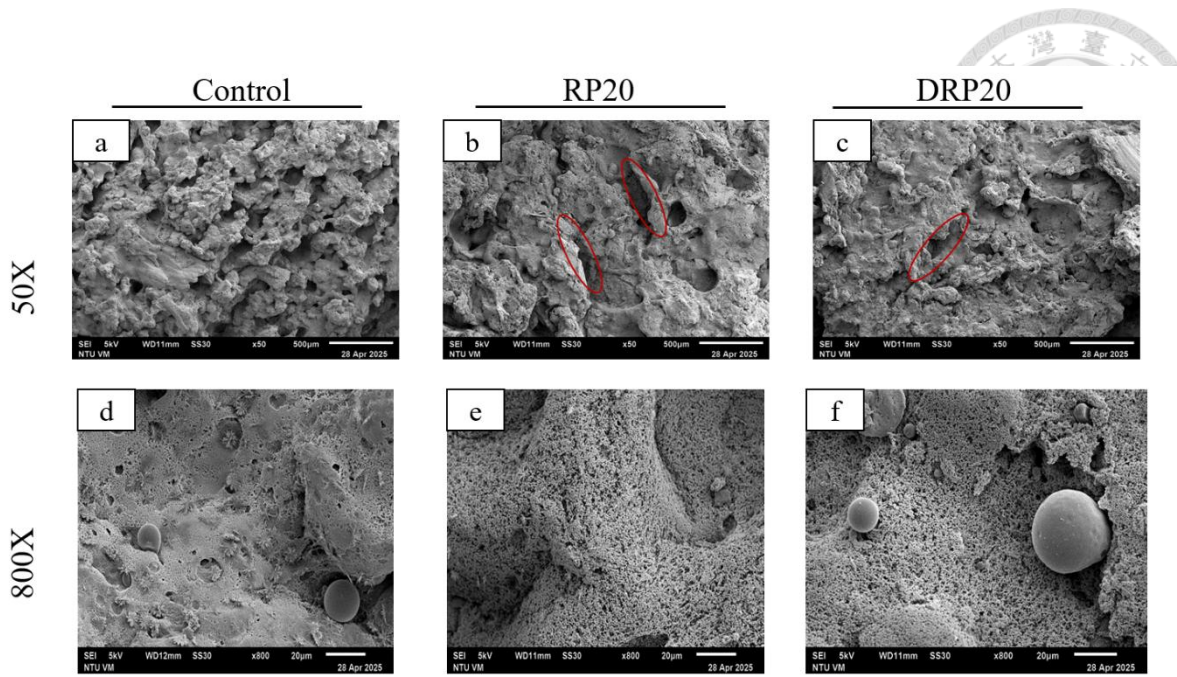


圖 11、去醯胺基米蛋白、米蛋白雞塊之掃描電子顯微照片

(a~c 為 50 倍；d~f 為 800 倍)

Fig. 11. Scanning electron micrographs of chicken nuggets in which 20% of chicken meat protein was substituted with rice protein (RP) or deamidated rice protein (DRP). Magnification of a – d -50 \times and e – h -800 \times , scale bar = 500 and 20 μ m respectively.

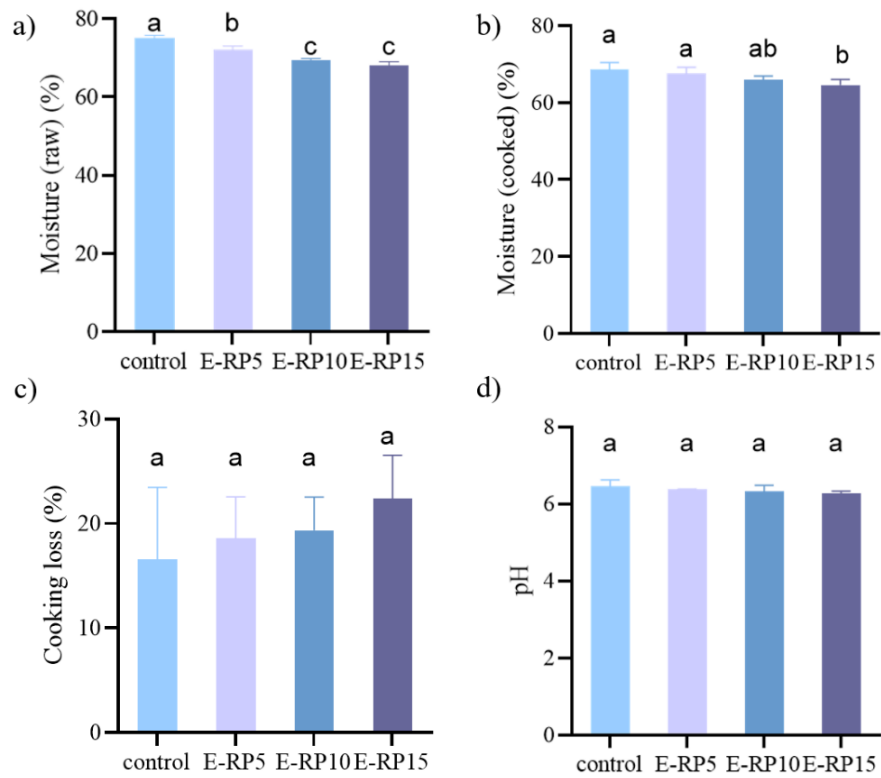
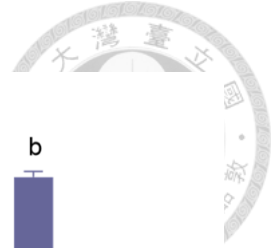


圖 12、額外添加米蛋白的米蛋白雞塊之理化特性分析

(a) 水分-raw (b) 水分-cooked (c) 烹煮損失 (d) pH

Fig. 12. Physicochemical characteristics of rice protein-enriched chicken nuggets.

(a) moisture (raw), (b) moisture (cooked), (c) cooking loss, (d) pH.

Data were presented as mean \pm SD (n=6).

Different superscripts (a-c) in the same row indicated significant differences among groups ($p < 0.05$).

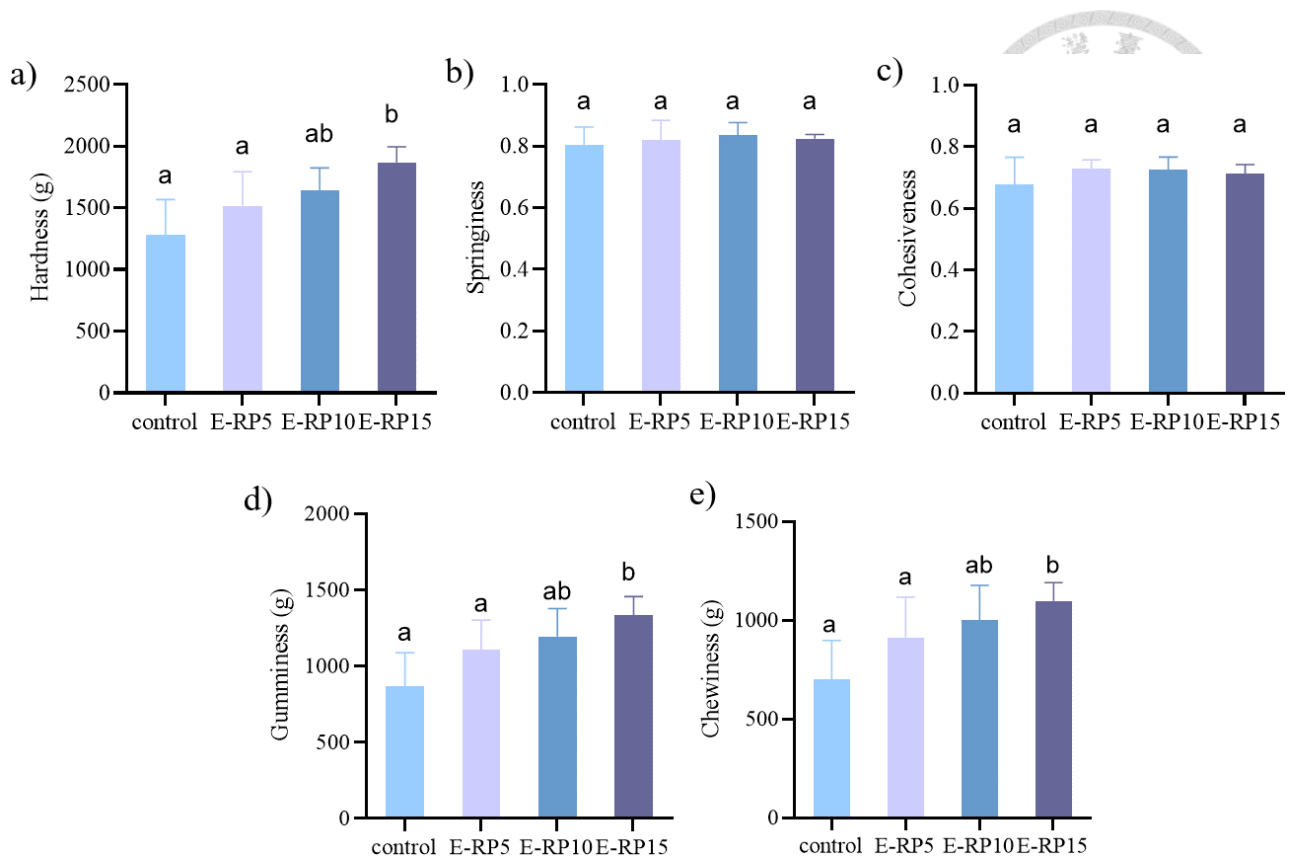


圖 13、額外添加米蛋白的米蛋白雞塊之質地分析

(a) 硬度 (b) 彈性 (c) 內聚性 (d) 膠著性 (e) 咀嚼性

Fig. 13. Texture profile analysis of rice protein-enriched chicken nuggets.

(a) hardness (g), (b) springiness, (c) cohesiveness, (d) gumminess, (e) chewiness(g)

Data were presented as mean \pm SD (n=6).

Different superscripts (a-c) in the same row indicated significant differences among groups ($p < 0.05$).

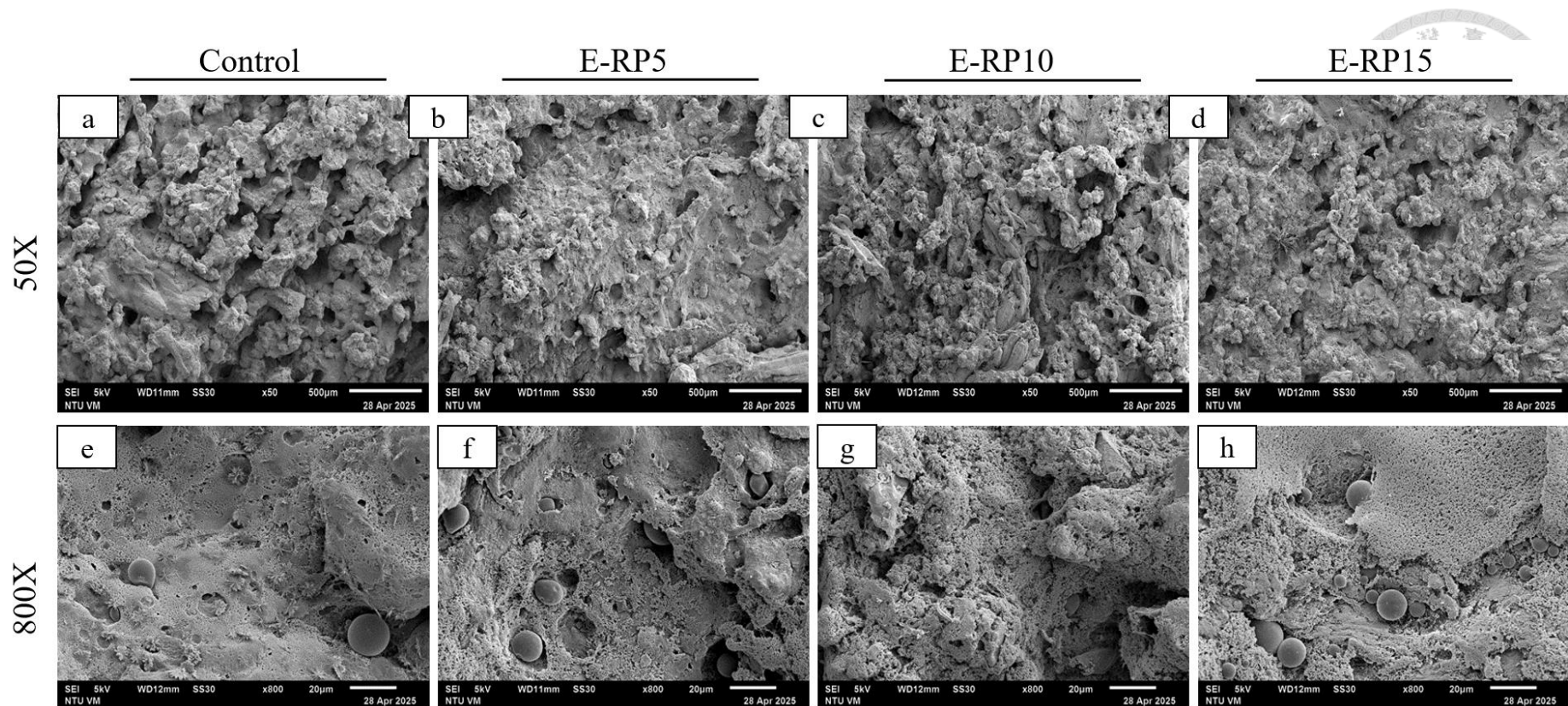


圖 14、額外添加米蛋白的米蛋白雞塊之掃描電子顯微照片

(a~d 為 50 倍；e~h 為 800 倍)

Fig. 14. Scanning electron micrographs of rice protein-enriched chicken nuggets.

Magnification of a – d -50× and e – h -800×, scale bar = 500 and 20 µm respectively.

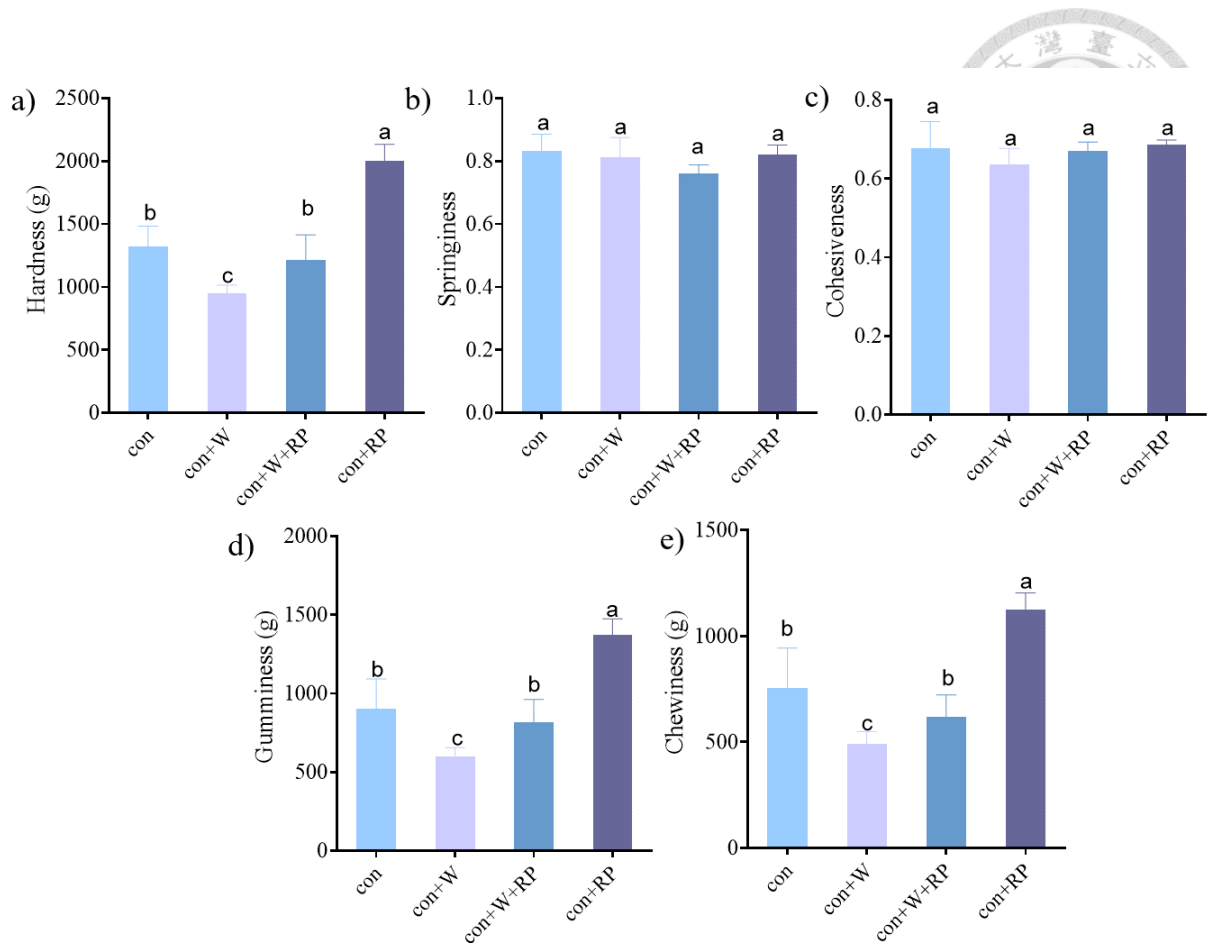


圖 15、不同配方之米蛋白雞塊之質地分析

(a) 硬度 (b) 彈性 (c) 內聚性 (d) 膠著性 (e) 咀嚼性

Fig. 15. Texture profile analysis of chicken nuggets formulated with different combinations of water and rice protein: con, con+RP, con+W and con+W+RP.

(a) hardness (g), (b) springiness, (c) cohesiveness, (d) gumminess, (e) chewiness(g)

Data were presented as mean \pm SD (n=6).

Different superscripts (a-c) in the same row indicated significant differences among groups ($p < 0.05$).

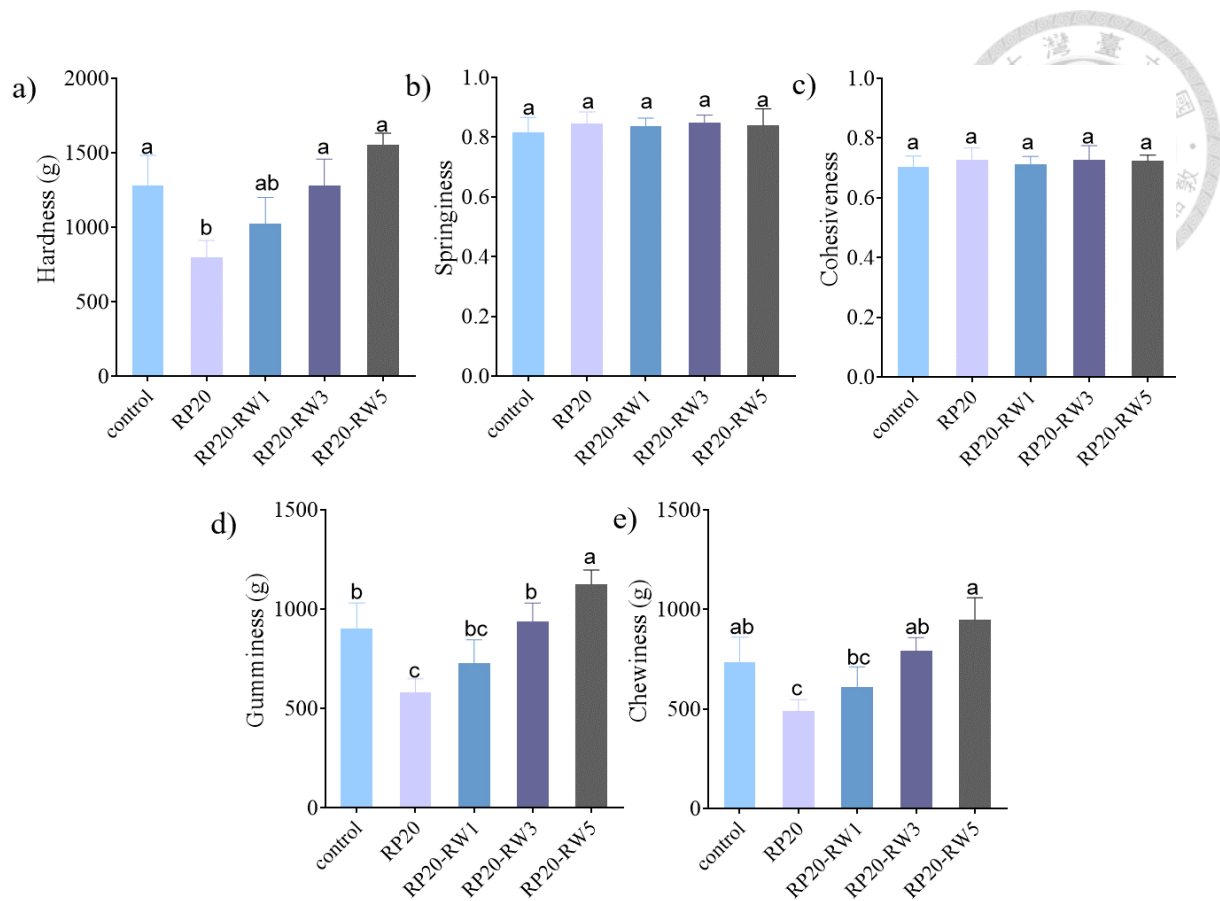


圖 16、不同補水比例下的米蛋白雞塊之質地分析

(a) 硬度 (b) 彈性 (c) 內聚性 (d) 膠著性 (e) 咀嚼性

Fig. 16. Texture profile analysis of chicken nuggets with 20% rice protein substitution under different water compensation levels: RP20 (full water compensation), RP20-RW1, RP20-RW3, and RP20-RW5.

(a) hardness (g), (b) springiness, (c) cohesiveness, (d) gumminess, (e) chewiness(g)

Data were presented as mean \pm SD (n=6).

Different superscripts (a-c) in the same row indicated significant differences among groups ($p < 0.05$).

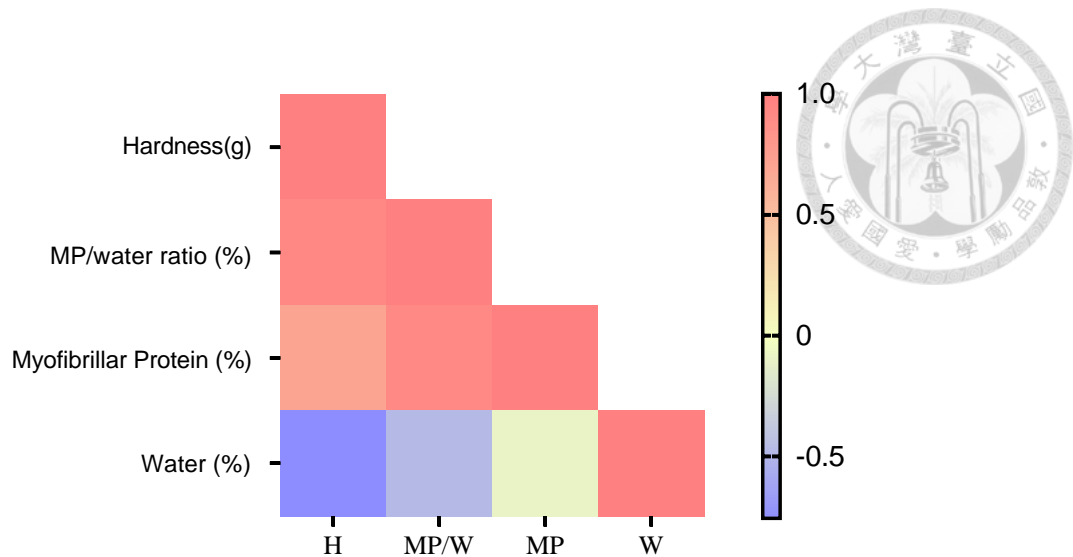


圖 17、雞塊樣品之硬度、MP/water 比率、肌原纖維蛋白含量與水分含量相關性熱力圖

Fig. 17. Correlation heatmap of hardness, MP/water ratio, myofibrillar protein content, and water content in chicken nugget samples.

Note:

H=hardness, MP/W=myofibrillar protein/water ratio, MP=myofibrillar protein, W=water. This figure is based on Pearson correlation analysis of data from selected samples in this study (Control, RP20, RP20-RW1, RP20-RW3, RP20-RW5). Color intensity and the color scale bar (right) represent the Pearson correlation coefficient (r) values, where red indicates positive correlation and blue indicates negative correlation.

Appendix



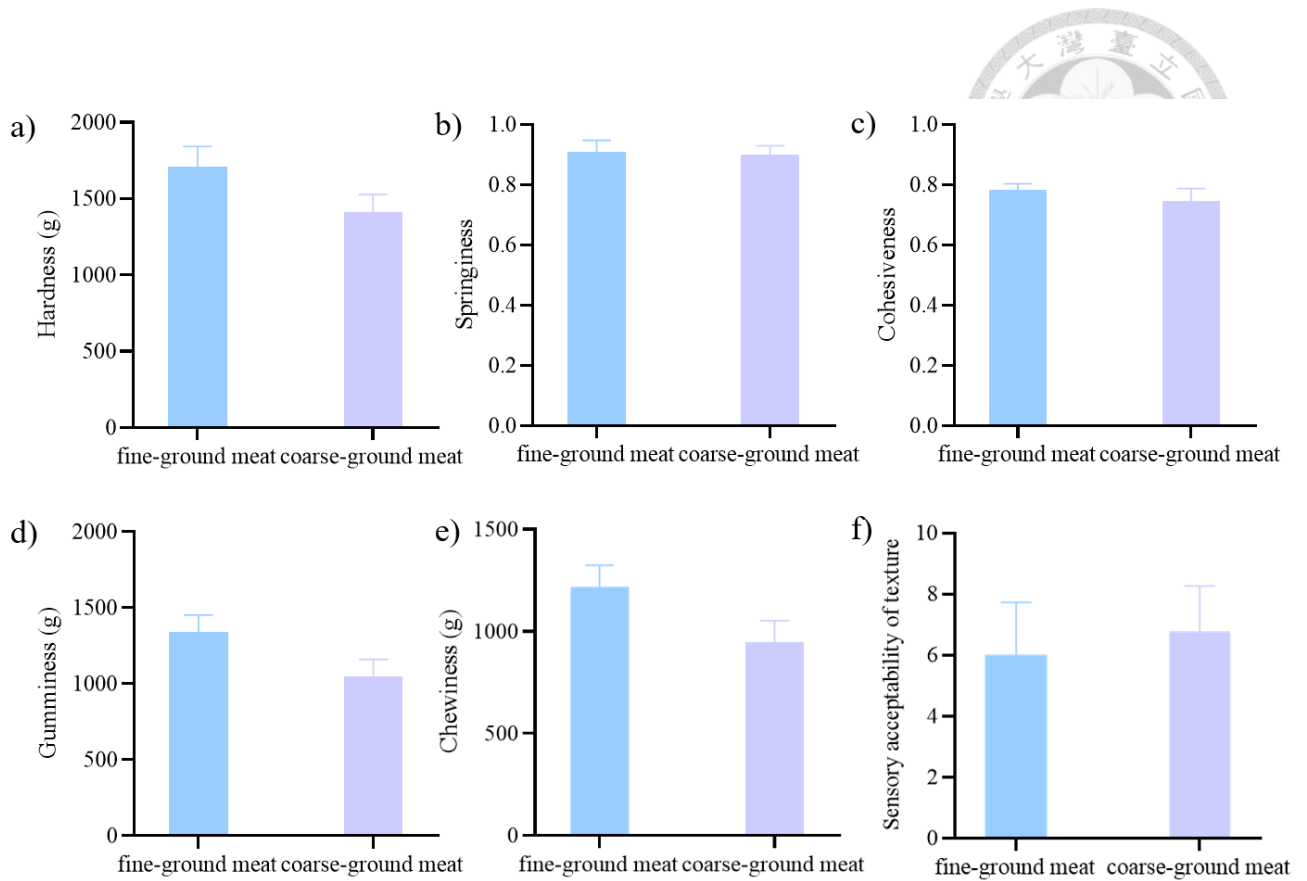
附錄表 1、米蛋白雞塊之感官品評分析結果

Fig. S1. Sensory analysis of rice protein-substituted chicken nuggets.

	Appearance	Aroma	Flavor	Texture	Aftertaste	Overall
control	5.8	6.4	6.5	6.2	6.3	6.3
RP10	5.5	5.6	5.6	5.5	5.0	5.5
RP20	5.3	5.5	4.9	4.5	5.3	4.9
RP30	5.4	5.6	5.1	4.5	4.7	4.9

Data were presented as mean \pm SD (n=25).

*Data is based on the 9-point hedonic scale. 1 = the least, 9 = the most



附錄圖 1、不同絞肉孔徑對雞塊質地與口感影響分析

(a) 硬度 (b) 彈性 (c) 內聚性 (d) 膠著性 (e) 咀嚼性 (f) 口感喜好度

Fig. S1. Effects of grinder plate diameter on the texture and sensory properties of chicken nuggets.

(a) hardness (b) springiness (c) cohesiveness (d) gumminess (e) chewiness (f) sensory acceptability of texture.

Data were presented as mean \pm SD (n=6).