

國立臺灣大學生物資源暨農學院食品科技研究所

碩士論文

Institute of Food Science and Technology

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master's Thesis

米基底植物奶開發及物化性質分析

Process development of rice-based milk and its
physicochemical characterizations

施佩綺

Pei-Chi Shih

指導教授：陳時欣 博士

Advisor: Shih Hsin Chen, Ph. D.

中華民國 114 年 5 月

May 2025



口試委員會審定書



國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

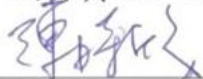
米基底植物奶開發及物化性質分析

Process development of rice-based milk and its physicochemical
characterizations

本論文係施佩綺 (R12641023) 在國立臺灣大學食品科技研究所完成之碩士學位論文，於民國 114 年 5 月 22 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Institute of Food Science and Technology on 22 May 2025, have examined the above-entitled Master's Thesis presented by the candidate, Pei Chi Shih (R12641023), and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:



(指導教授 Advisor)

蘇俊翰

吳俊毅 謝育子

羅翊禎

系（所、學位學程）主管 Director:

誌謝

完成碩士學位的這段旅程，對我而言是一場充滿挑戰與自我探索的歷練。能夠走到今天，除了自己所付出的努力外，也因為身邊許多人的陪伴與支持，讓我有勇氣和力量持續向前。在此，謹向所有幫助過我的人，致上最深的感謝。

誠摯感謝陳時欣老師的悉心教導。無論是學術研究或做人處事，老師總是以身作則，引導我們思考與成長。在研究的道路上雖然艱澀難行，但老師總是在我們迷惘時給予方向，讓我能夠堅持到最後，順利完成論文。也謝謝口試委員撥冗參與我的碩士論文口試，並給予寶貴的建議與指導，讓本研究更加完善，謹致誠摯謝意。

感謝實驗室學長姐們的幫助，尤其是芳如，謝謝你陪我挑米、在我實驗卡關時伸出援手，甚至在颱風天也一同協助實驗，真的非常感激。也謝謝泓維，總是耐心地教導我各項分析實驗，讓我能夠順利完成後續的研究內容，很謝謝你花了這麼多時間與心力。欣芳學姊、詩儀學姊、詩敏與珮毓，你們讓實驗室變得溫暖、有趣又充滿活力，謝謝有你們。一路上有芳妤與閔裕的陪伴也彌足珍貴，在實驗撞牆或情緒低落的時候，仍能在休息室歡笑，一起撐過困難的時刻。也感謝軍豪、恆汝與立和，謝謝你們總是默默為實驗室付出，在大家忙碌時主動協助與支援，真的幫了很多忙，非常感謝。

而在所有努力與堅持的背後，有一份無條件的愛與包容，始終默默地支撐著我，那就是我最重要的家人。感謝爸爸媽媽支持我進入研究所就讀，始終是我堅實且溫暖的後盾。也感謝姊姊、哥哥、大嫂、叡成，以及阿肥、寶寶、麻糬、文靜、妹妹、龍、白糖粿的陪伴與鼓勵。有你們，才有快樂的我。

最後，謝謝我自己。謝謝你總是不顧一切地努力向前，跨越重重難關。這段路走得不容易，未來也許還會遇到更多挑戰，但請記得並珍惜，這段你曾經全力以赴的時光。

施珮綺 謹誌於
國立臺灣大學 食品科技研究所
中華民國一一四年五月

摘要

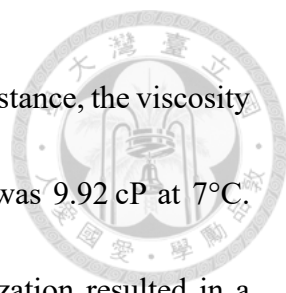
隨著消費者健康意識的提升、環境保護理念的普及和素食主義的興起，植物奶產品的市場需求迅速增長。然而，目前臺灣之植物奶市場主要依賴進口產品與原料，無法落實環保與永續理念。此外，臺灣稻米產業正面臨著消費量逐年下降及生產過剩問題。本研究旨在開發臺灣稻米為基底的植物奶，並探討不同加工製程對其物化性質及生理活性之影響。分別使用糙米、發芽糙米及預熟糙米作為原料，並著重探討酵素水解及均質製程對於米基底奶品質的影響，分析其黏度、色澤、抗氧化活性及總酚類化合物含量等，以尋求適當的製程條件。為提升全穀物利用率，實驗組樣品利用過篩製程，以保留米粒完整營養成分並改善物化特性。研究結果顯示，經過酵素水解及均質製程處理後，米基底植物奶之物化特性及營養價值均有顯著的提升。酵素水解能顯著降低樣品黏度，提升流動性，如實驗組預熟糙米奶樣品(E-PBERM)於 7°C 黏度為 9.92 cP。此外，結合酵素水解及均質製程，使樣品質地更為細緻，同時改善色澤特性。實驗組樣品之總色澤差異指數 $\Delta E^* < 10$ ，代表其色澤感官特性與市售產品相近。於生理活性方面，所有樣品中以 E-PBRM 表現最佳，其 DPPH 自由基清除能力達 61.51%、總酚類含量為 71.68 mg GAE/100 g DW。整體而言，本研究建立了三種稻米原料之植物奶製備流程，為國產米過剩問題提供了新的利用途徑，有望在一定程度上提升糧食自給率並減少食物里程，契合環境永續理念。然而，本研究發現經商業滅菌處理後，樣品之穩定性及風味仍須進一步改善，凸顯出未來研究應聚焦於加工技術及參數之最佳化，以促進米基底奶之商業化發展。

關鍵詞：米基底植物奶、預熟米、發芽米、米加工製程、全穀物利用。

Abstract



With the rising awareness of health, environmental concerns, and the growth of vegetarianism, the market demand for plant-based milk products has grown rapidly. However, the plant-based milk market in Taiwan currently relies heavily on imported products and raw materials, making it difficult to implement environmental protection and sustainability concepts. Additionally, Taiwan's domestic rice industry is facing the issues of decreasing consumption and overproduction. This study aims to develop plant-based milk using Taiwan's rice as the base and to investigate the effects of different processing methods on its physicochemical properties and physiological activities. Brown rice, germinated brown rice, and parboiled brown rice were used as raw materials. The focus was placed on examining the influence of enzymatic hydrolysis and homogenization processes on the quality of rice-based milk, with analyses covering viscosity, color, antioxidant activity, and total phenolic content to determine the optimal processing conditions. To enhance the utilization of whole grains, the experimental group samples underwent a sieving process to retain the complete nutritional components of rice and improve physicochemical properties. The results indicated that the physicochemical properties and nutritional value of the rice-based plant milk were significantly improved after enzymatic hydrolysis and homogenization. Enzymatic hydrolysis effectively



reduced the viscosity of the samples and enhanced their fluidity; for instance, the viscosity of the experimental parboiled brown rice milk sample (E-PBRM) was 9.92 cP at 7°C. Moreover, the combination of enzymatic hydrolysis and homogenization resulted in a finer texture and improved color characteristics. The total color difference index (ΔE^*) of the experimental group samples was less than 10, indicating that their color sensory characteristics were comparable to those of commercial products. In terms of physiological activity, the E-PBRM sample showed superior performance, with DPPH radical scavenging activity of 61.51%, and total phenolic compounds content of 71.68 mg GAE/100 g DW. Overall, this study established a processing framework for producing plant-based milk using three types of rice, offering a novel approach for utilizing surplus domestic rice. This approach may contribute to improved food self-sufficiency and reduced food miles, aligning with environmental sustainability goals. However, the findings also revealed that the stability and flavor of the samples still require improvement following commercial sterilization. This highlights the need for future research to focus on optimizing processing technologies and parameters to facilitate the commercialization of rice-based milk.

Keywords: rice-based milk, parboiled rice, germinated rice, rice processing, whole grain utilization.

縮寫檢索表



ABA	abscisic acid
ATP	adenosine triphosphate
CBM	carbohydrate-binding module
CSRs	conserved sequence regions
DOM	degree of milling
DPPH	2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl
DSC	differential scanning calorimetry
GABA	γ -aminobutyric acid
GA	gibberellic acid
GAD	glutamate decarboxylase
GI	glycemic index
GHs	glycoside hydrolases
GWP	global warming potential
HDL-C	high density lipoprotein cholesterol
HFCS	high-fructose corn syrup
JND	just-noticeable difference
LCA	life cycle assessment
LDL-C	low density lipoprotein cholesterol
NMR	nuclear magnetic resonance
PBMA	plant-based milk alternatives
RS	resistant starch
SEM	scanning electron microscope
SGAPs	starch granule-associated proteins

SP	swelling power
TE	Trolox equivalent
TIM	triosephosphate isomerase
WAI	water absorption index
WI	white index
WS	water solubility
XRD	X-ray diffraction
YI	yellow index

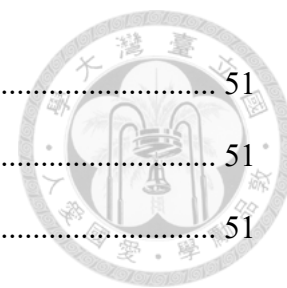


目次



誌謝	I
摘要	II
Abstract.....	III
縮寫檢索表	V
目次	VII
圖次	XII
表次	XIV
壹、前言	1
貳、文獻回顧	2
一、植物奶簡介	2
(一) 市場發展趨勢	2
(二) 健康益處	3
(三) 環境永續價值	4
(四) 米基底植物奶之發展潛力	7
二、稻穀簡介	9
(一) 稻穀種類	9
1. 秈稻	9
2. 粳稻	10
3. 糯稻	10
(二) 稻穀之結構	10
1. 稻殼	11
2. 米糠層	12
3. 糊粉層	12

4. 胚乳.....	12
5. 胚芽.....	13
(三) 稻米之營養組成.....	14
(四) 臺灣稻米之農業背景.....	18
三、發芽糙米.....	19
(一) 發芽機制.....	19
(二) 發芽製程.....	21
(三) 促發技術(priming).....	22
(四) 發芽糙米的物理特性.....	24
(五) 發芽糙米之營養價值.....	28
四、預熟糙米.....	35
(一) 預熟加工技術.....	35
(二) 預熟米之物理特性.....	39
(三) 預熟米之營養價值.....	42
五、加工米的食用安全性.....	45
六、樣品原料之性質分析.....	46
(一) 水合性質.....	46
(二) 吸水特性.....	47
七、酵素水解.....	48
(一) α -澱粉酶.....	48
1. 來源.....	48
2. 酵素之微細結構.....	48
3. 作用模式.....	50
4. 酵素之應用.....	50



(二) 葡萄糖澱粉酶	51
1. 來源	51
2. 葡萄糖澱粉酶之微細結構	51
3. 作用模式	52
4. 酵素之應用	53
參、實驗架構	54
一、實驗架構圖	54
二、實驗架構說明	56
(一) 發芽糙米製備流程	56
(二) 預熟糙米製備流程	57
(三) 實驗組米基底奶製備流程	58
肆、材料與方法	59
一、實驗材料	59
二、實驗試藥	59
三、儀器設備	60
四、實驗方法	63
(一) 糙米製程	63
(二) 發芽糙米製備	63
(三) 預熟糙米製備	63
(四) 對照組樣品製備	64
(五) 米基底植物奶製備	64
1. 米穀粉研磨製程	64
2. 糊化製程	65
3. 酵素水解製程	65

4. 均質製程.....	65
5. 商業滅菌製程.....	65
(六) 冷凍乾燥樣品製備	65
(七) 黏度分析	66
(八) 分散穩定性分析	66
(九) 色澤分析	67
(十) 光學顯微影像分析	67
(十一) 糖度分析	67
(十二) 基本成分分析	68
(十三) 抗氧化能力分析	69
(十四) 總酚類化合物含量分析	70
(十五) γ -胺基丁酸(GABA)含量分析	70
(十六) 感官品評	71
(十七) 數據統計分析	71
伍、結果與討論	72
一、實驗組製程參數之篩選	72
(一) 酵素水解製程	72
(二) 均質製程	77
二、米基底奶之物理性質	78
(一) 黏度特性	78
(二) 分散穩定性	81
(三) 色澤特性	84
三、米基底奶之化學性質	89
(一) 基本成分分析	89

(二) 糖度分析結果	95
(三) 抗氧化能力	97
(四) 總酚類化合物含量	100
(五) γ -胺基丁酸(GABA)含量	102
四、商業滅菌後之性質分析	104
五、米基底奶之品評結果	112
陸、結論與未來展望	115
一、質地與穩定性改善	115
二、色澤與感官特性提升	115
三、增強營養價值	115
四、預熟糙米作為原料之潛力	115
柒、參考文獻	116

圖次

圖一、不同影響指標計算每公升動植物奶對於環境的影響。	6
圖二、稻穀的碾磨製程。	11
圖三、稻穀的結構。	13
圖四、種子發芽的不同階段。	21
圖五、超音波處理之空穴現象與海綿效應示意圖。	24
圖六、糙米與發芽糙米澱粉的掃描式電子顯微鏡(SEM)影像圖。	25
圖七、糙米與不同發芽條件之糙米之糊化曲線圖。	26
圖八、糙米與不同發芽條件之糙米之 X-ray 繞射圖譜。	27
圖九、稻穀(GP)及糙米(GBR)在 18 至 72 小時發芽過程中的 GABA 含量。	33
圖十、不同浸漬條件下吸水性之變化。	36
圖十一、不同溫度與時間下稻米浸漬的磁振共振(NMR)影像圖。	37
圖十二、於不同溫度下浸漬後的稻米橫截面。	38
圖十三、營養成分於預熟製程中之遷移路徑。	43
圖十四、預熟米對於血糖調節的作用。	44
圖十五、糙米(BR)、發芽糙米(GBR)、預熟糙米(PBR)之浸漬水分含量(濕 基，%)。	47
圖十六、 α -澱粉酶的結構示意圖。	49
圖十七、葡萄糖澱粉酶的結構示意圖。	52
圖十八、實驗總架構圖。	55
圖十九、發芽糙米製備流程圖。	56
圖二十、預熟糙米製備流程圖。	57
圖二十一、實驗組米基底奶製備流程圖。	58
圖二十二、不同酵素劑量下米基底奶之分散穩定性。	72

圖二十三、米基底奶使用不同酵素劑量之分散穩定性(在 7°C 下放置一天)。...	76
圖二十四、樣品於不同均質溫度下之分散穩定性。	77
圖二十五、對照組樣品經染色後之光學顯微影像(比例尺 = 100 μm)。	80
圖二十六、實驗組米基底奶之分散穩定性。(A)不同時間下米基底奶之分散穩定性(%), (B)不同時間下米基底奶之外觀特性。	83
圖二十七、實驗組樣品於商業滅菌前與後之色澤外觀結果。	88
圖二十八、實驗組與商業滅菌組米基底奶與市售產品之糖度。	96
圖二十九、對照組與實驗組米基底奶之 DPPH 自由基清除率。	98
圖三十、對照組與實驗組米基底奶之 Trolox 當量。	99
圖三十一、對照組與實驗組米基底奶之總酚類化合物含量。	101
圖三十二、米基底奶之 GABA 含量。	103
圖三十三、米基底奶於商業滅菌前與後之分散穩定性。(A)不同時間下米基底奶之分散穩定性(%), (B)不同時間下米基底奶之外觀特性。	106
圖三十四、米基底奶於商業滅菌前與後其上清液之固形物含量。	108
圖三十五、米基底奶於商業滅菌前與後其外觀色澤結果。	110
圖三十六、實驗組米基底奶與市售產品之品評雷達圖。	114

表次

表一、糙米奶經酵素水解前與後之總酚類化合物含量及抗氧化能力	8
表二、糙米奶經酵素水解前與後之酵素抑制能力	8
表三、稻米在不同碾磨程度下之成分及色澤分析	15
表四、糙米、白米以及米糠之營養成分含量	17
表五、糙米與發芽糙米之烹煮特性	28
表六、不同稻米品種之白米、糙米以及發芽糙米之成分含量	30
表七、不同稻米品種之白米、糙米以及發芽糙米之生物活性物質含量及抗氧 化能力	31
表八、稻穀及糙米在 18 至 72 小時發芽過程中的酚類化合物及黃酮類化合物 含量	34
表九、不同預熟條件之物化性質分析	40
表十、非預熟、輕度預熟及重度預熟稻米之相對結晶度(%)	41
表十一、糙米(BR)、發芽糙米(GBR)、預熟糙米(PBR)之水合性質	46
表十二、不同酵素劑量下米基底奶之黏度特性	73
表十三、不同酵素劑量下米基底奶之黏度	75
表十四、米基底奶之黏度特性	80
表十五、米基底奶之色澤特性	87
表十六、米基底奶之基本成分分析結果：(a)濕基；(b)乾基	93
表十七、米基底奶於商業滅菌前與後其上清液之色澤特性	111
表十八、實驗組米基底奶與市售產品之品評結果	113

壹、前言

近年來，植物奶(plant-based milk)在全球市場的經濟價值逐漸升高，主要推動因素為消費者對環境永續的重視與健康意識的提升。植物奶因具備總熱量較低、飽和脂肪含量低且不含膽固醇等營養優勢而廣受關注。然而，相較於動物奶，目前市售植物奶產品仍存在醣類含量高、蛋白質含量較低以及營養成分來源較單一等缺陷。值得強調的是，植物奶的研發目的並非取代動物奶，而是為了拓展產品的多樣性，滿足不同消費族群的需求。儘管如此，目前臺灣市場上之植物奶產品多仰賴進口產品，或使用進口原料製成。這不僅增加了食品里程數，更未能落實環保及永續發展理念。同時，臺灣稻米產業正面臨消費需求逐年下降及供需失衡的問題，造成稻米生產過剩的現況，導致農業資源浪費與經濟效益降低(糧食平衡表，2024)。因此，需開拓新的應用途徑，以提升國產米的利用價值。開發出兼具營養、符合環保意識與經濟效益的新興食品。

臺灣擁有適宜稻米生長的氣候與農業政策支持，稻米品種多元，進一步提升稻米之營養價值與加工特性。近年來，發芽糙米(germinated brown rice, GBR)及預熟糙米(parboiled brown rice, PBR)的開發日益受到矚目。發芽糙米透過內源性酵素作用有效提升胺基酸及 γ -胺基丁酸(gamma-aminobutyric acid, GABA)等生物活性成分之含量(Beaulieu *et al.*, 2022)；預熟糙米則透過浸漬、蒸煮與乾燥等物理及水熱處理，將維生素與礦物質等營養成分由稻殼及米糠層擴散至胚乳，同時提升稻穀硬度，從而降低碾米過程的營養流失(Bhar *et al.*, 2020；Tian *et al.*, 2018)。

在全球植物奶市場蓬勃發展之趨勢下，已有許多植物基原料的應用，例如大豆、核桃、燕麥以及椰子等。然而，目前尚未有系統性的研究探討以發芽糙米及預熟糙米作為植物奶基底之製程與產品開發，並進行產品間差異性的比較。因此，本研究之動機在於使用臺灣國產稻米作為原料，透過酵素水解與均質製程等技術，建立以糙米(brown rice, BR)、發芽糙米與預熟糙米為原料之米基底植物奶製備流程，期望藉此提升米基底植物奶的感官品質與營養價值，進一步推動國產稻米的有效利用與永續發展。



貳、文獻回顧

一、植物奶簡介

植物奶，又稱植物性代乳品(plant-based milk alternatives, PBMA)，是以植物原料為基底，經過破碎、酵素水解及均質等程序製備而成的飲品(Sethi *et al.*, 2016)。在歷史與文化的演變中，植物奶的雛形在世界各地皆有記載，反映出地域性飲食文化的多樣性與適應性。

植物奶的起源可追溯至中國古代，在當時豆漿已廣為人知。《本草綱目》中記載豆漿具有「利水下氣，制諸風熱，解諸毒」等功效，其盛行與中國素食文化息息相關。在中世紀的歐洲與中東地區，基督教齋戒期間禁止食用牛奶和肉類，杏仁奶因此成為重要的乳製品替代品。在印度與東南亞，椰奶廣泛應用於日常飲食及傳統菜餚中，並深植於當地的飲食文化(Mäkinen *et al.*, 2015)。

植物奶的種類與製備方式因地域特性和飲食文化而異，既能滿足日常飲食需求，也在某些情境下承載著宗教與文化的意義。然而，在現代社會，植物奶的流行更多是受到健康考量的驅動，例如乳蛋白過敏、乳糖不耐症、膽固醇含量及熱量控制等。此外，動物福利及環境永續議題也成為消費者選擇植物奶的重要因素，進一步促進了植物奶市場需求的快速增長趨勢。

(一) 市場發展趨勢

全球植物性代乳品市場呈現出顯著增長趨勢，主要受益於消費者健康意識的提高、環保理念的普及以及素食主義的興起等因素。這些因素共同推動了植物性代乳品的需求，並造成市場快速擴展(Grau-Fuentes *et al.*, 2023)。根據全球市場研究報告(Global Market Insights, 2023)，植物性代乳品市場價值持續攀升；2023 年全球植物性代乳品市場的估值約為 20 億美元，預計到 2032 年將達到 45.87 億美元，年複合增長率約為 9.45%。這一增長率反映了市場對植物性代乳品的需求。



儘管市場需求持續增長，消費者的接受度仍是決定市場未來發展的重要因素。除了健康益處、營養價值與環境永續等議題外，產品的風味、口感與質地亦是影響消費者接受度的關鍵要素。根據 Kwok 和 Niranjan (1995) 的研究，豆類植物奶中由於內源性脂氧合酶的存在，可能產生豆腥味與油漆味等異味，降低了消費者接受度。此外，不溶性顆粒的存在亦可能影響消費者的接受程度(Durand *et al.*, 2003)。然而，Russell 和 Delahunty (2004) 的研究顯示，消費者對植物奶的接受度與其日常飲食習慣具有高度相關性。針對米基底植物奶的整體愉悅度進行評分，結果顯示，隨著飲用天數增加，消費者的喜好程度亦隨之提升，說明消費者可能在適應新食品風味後逐步提高其接受度。食品科技的進步促進了植物奶市場的發展。透過酵素水解製程、超高壓均質技術及營養強化等技術，可有效改善植物奶的風味、口感與營養價值(Aydar *et al.*, 2020)。隨著技術的不斷創新，植物性代乳品市場將持續擴展，並滿足更廣泛消費群體的需求。

(二) 健康益處

植物奶由不同植物基底製成，包括杏仁、黃豆、燕麥等，營養成分則因原料種類及加工方式而異。與牛奶相比，植物奶通常含有較低的飽和脂肪，並且不含膽固醇(Drewnowski *et al.*, 2021)。亦因其具有低飽和脂肪和高膳食纖維含量的特性，有助於降低慢性疾病風險(Jeske *et al.*, 2017)。例如，植物奶中之燕麥奶，由於含有豐富的 β -葡聚糖，能有效降低血漿中低密度脂蛋白膽固醇(low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)之濃度；同時，顯著提高血漿中高密度之蛋白膽固醇(high density lipoprotein cholesterol, HDL-C)之濃度，從而減少心血管疾病風險。此外，植物奶中豐富的植物固醇與抗氧化成分可減少體內之發炎反應，進一步降低癌症、肥胖與第 2 型糖尿病的罹患率(Vashisht *et al.*, 2024；Villasmil *et al.*, 2007)。

植物奶亦含有多種生物活性成分，例如異黃酮、植物固醇、多酚類及類黃酮

化合物等抗氧化性成分(Aydar *et al.*, 2020)。這些化合物可有效中和自由基，減少氧化壓力並降低發炎風險。例如，黃豆奶中的異黃酮被證實具有抗癌與降膽固醇的作用；杏仁奶中的維生素E則能減緩細胞老化(Chalupa-Krebzdak *et al.*, 2018)。

植物奶除了三大營養素以及生理活性物質之優勢以外，其不含乳糖及乳蛋白的特點，成為了乳糖不耐症及乳蛋白過敏者之理想替代選擇。乳糖不耐症(lactose intolerance)在全球廣泛存在，特別是在亞洲與非洲地區，其發生率較高(Storhaug *et al.*, 2017)。由於乳糖不耐症患者體內乳糖酶(lactase)活性較低，無法有效分解乳糖，在攝取乳製品後，乳糖在小腸不易消化分解而完整的進入遠端小腸和結腸，透過腸道菌相分解進而產生有機酸以及氣體(如氫氣、甲烷及二氧化碳等)，導致腹瀉及腹部脹氣等症狀(McFee *et al.*, 2024)。乳蛋白過敏(milk protein allergy)則是一種免疫反應。患者對於牛奶中的酪蛋白(casein)或乳清蛋白(whey protein)會產生過敏反應，可能導致皮膚搔癢、腸胃道不適甚至嚴重的休克現象(McFee *et al.*, 2024)。因此，植物奶因不含乳糖與乳蛋白，能提供乳糖不耐症與乳蛋白過敏者安全且營養的替代方案，減少潛在風險。

(三) 環境永續價值

隨著全球對環境保護和永續發展的重視，植物奶因其顯著的環境優勢，成為傳統動物奶的可行替代品。植物奶的環境永續價值主要體現在溫室氣體排放的減少、水資源的有效利用、土地使用效率的提升及其他環境影響的減少。Khanpit 等人(2024)的研究彙整了 70 篇關於動物奶與植物奶的生命週期評估(life cycle assessment, LCA)相關研究進行批判性回顧(critical review)。建立了一致的 LCA 模板，以標準化的方法比較各類動物奶(如乳牛、水牛、山羊和綿羊等)以及植物奶(如杏仁、燕麥、大豆和椰子等)對於各種環境指標之影響。LCA 可用以量化任何產品在其生命週期內對於環境之影響，廣泛應用於評估農業與食品生產製程之環

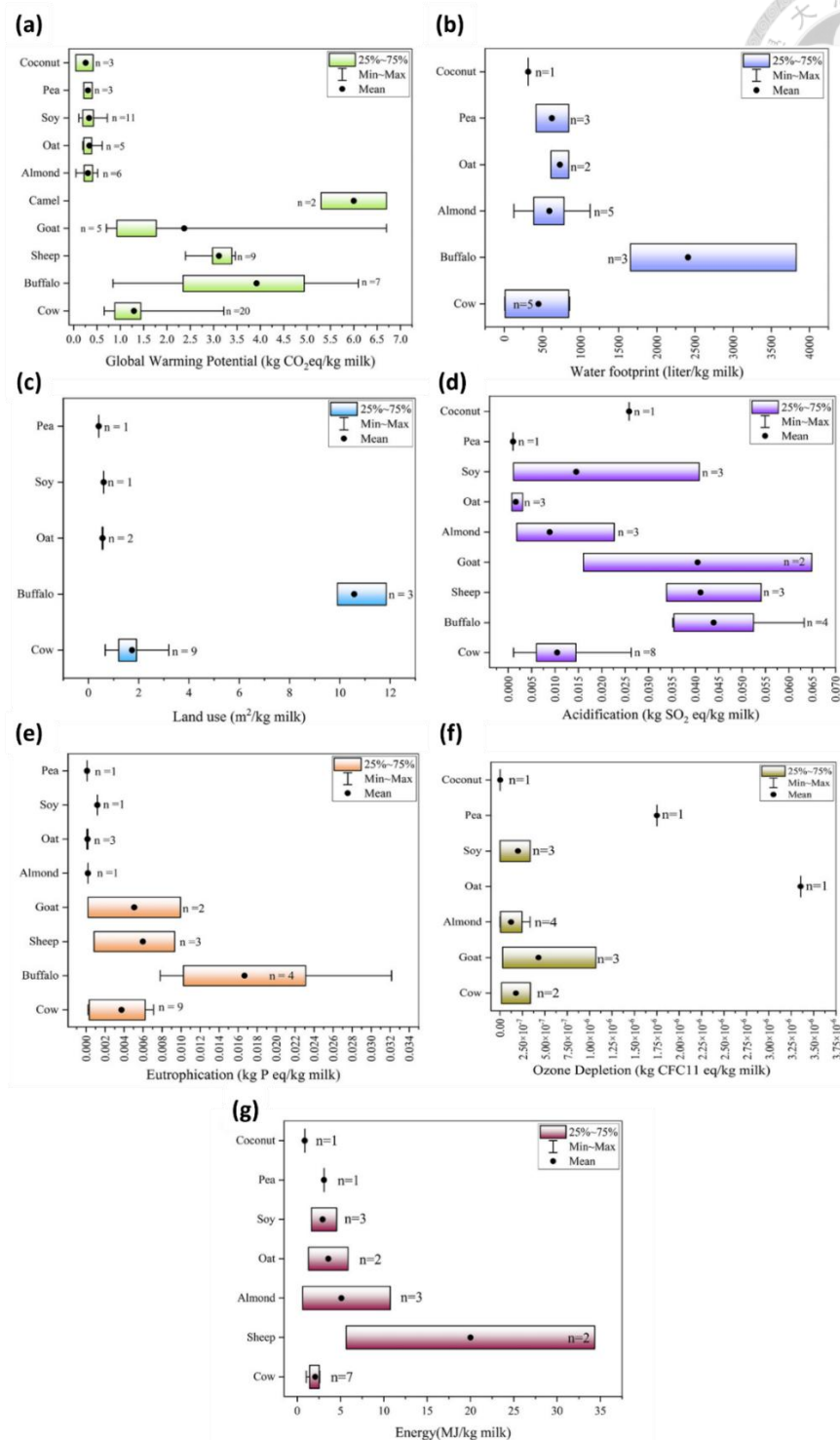
境永續性(Baldini *et al.*, 2017)。不同的環境影響指標如圖一所示。

首先，針對溫室氣體排放量進行探討，根據 LCA 研究，植物奶的生產相較於動物奶顯著降低了溫室氣體排放量。所有動物奶的全球暖化潛勢(global warming potential, GWP)平均高於 1 kg CO₂ eq/kg milk，例如牛奶之 GWP 平均為 1.29 kg CO₂ eq/kg milk。而植物奶的 GWP 平均低於 1 kg CO₂ eq/kg milk，例如椰奶之 GWP 僅為 0.257 kg CO₂ eq/kg milk (Khanpit *et al.*, 2024)。動物奶的高排放來源主要來自動物腸道發酵釋放的甲烷，以及飼料生產與運輸過程中的能源消耗。相比之下，植物奶原料(如大豆、燕麥、杏仁)在種植與加工過程中需要的能源消耗與溫室氣體排放量均顯著較低，代表著植物奶的生產過程碳足跡顯著低於動物奶，對於環境更具永續性。

另一個重要之影響指標為水足跡，其中除了動物飼養用水以及灌溉用水外，還包含了燃料、電力以及化學肥料等生產之用水。然而，根據 Winans 等人(2020)的研究中指出，杏仁因灌溉需求高進而增加了水足跡，每公斤杏仁需要 10,240 公升水。儘管如此，由於動物所需之飼料生產用水以及牲畜飲水需求等，相較於動物奶，植物奶的生產在水資源利用上仍然具有優勢。

土壤酸化與水質優養化亦為重要的環境影響指標。在動物奶生產過程中，牲畜所排放的氨(NH₃)以及飼料(如穀物、牧草和其他營養濃縮物等)生產所釋放的氮氧化物，是導致土壤酸化及水質優養化之主要來源(Bakken *et al.*, 2017)。相較之下，植物奶的環境負擔主要來自於原料種植過程中之農藥使用和生產能源消耗(Khanpit *et al.*, 2024)。然而，植物奶生產過程中之副產物，例如豆渣，仍可作為副食品或其他用途，進一步降低廢棄物量。

儘管植物奶在環境永續性方面具顯著優勢，但仍需針對某些植物原料的高水足跡及能源消耗進行改進。同時，推動食品加工技術與供應鏈優化，可進一步減少植物奶的碳足跡與能源消耗(Khanpit *et al.*, 2024)。



圖一、不同影響指標計算每公升動植物奶對於環境的影響。(a)全球暖化潛力(kg CO₂ eq/kg milk), (b)水足跡(liter/kg milk), (c)土地利用(m²/kg milk), (d)酸化(kg SO₂ eq/kg milk), (e)優養化(kg P eq/kg milk), (f)臭氧消耗(kg CFC11 eq/kg milk), (g)能量消耗(MJ/kg milk)。

Fig. 1. Environmental impact of animal and plant-based milk per liter using different impact indicators. (a) global warming potential (kg CO₂ eq/kg milk), (b) water footprint (liter/kg milk), (c) land use (m²/kg milk), (d) acidification (kg SO₂ eq/kg milk), (e) eutrophication (kg P eq/kg milk), (f) ozone depletion (kg CFC11 eq/kg milk), and (g) energy consumption (MJ/kg milk).

(Khanpit *et al.*, 2024)

(四) 米基底植物奶之發展潛力

米基底植物奶，特別是糙米奶(brown rice milk)，因其豐富的營養價值和健康益處，在植物奶之研究領域中展現出新興的發展潛力。糙米奶之製備過程通常包括將糙米研磨成細粉，然後與水混合進行糊化及酵素處理，逐步利用 α -澱粉酶(α -amylase)和葡萄糖澱粉酶(glucoamylase)來分解稻米澱粉，釋放出更多的酚類物質和其他功能性成分(Kittibunchakul *et al.*, 2021)。根據 Kittibunchakul 等人(2021)之研究顯示，糙米奶經過酵素水解後，其總酚類化合物含量顯著增加，例如生育酚、生育三烯酚及 γ -穀維素等主要抗氧化物質(如表一)。這些物質與抗氧化能力呈現正相關，能有效降低體內自由基活性，減少氧化壓力。糙米奶在抑制脂肪酶、 α -澱粉酶及 α -葡萄糖苷酶等與肥胖和糖尿病相關酵素方面亦展現出顯著效果(如表二)，能有效減緩膳食中脂肪吸收和碳水化合物分解，從而降低肥胖和高血糖風險(Kittibunchakul *et al.*, 2021)。其抗肥胖及抗糖尿病作用主要歸功於酵素水解的過程中使糙米中酚類物質之釋放，如阿魏酸、沒食子酸和丁香酸等。

目前的研究主要集中於以糙米為基底之植物奶開發，對於發芽米與預熟米在植物奶製程中的應用尚未有系統性的研究探討。發芽米因其在發芽過程中可提高 GABA 及抗氧化物質的含量，而預熟米則可能提升營養價值與風味特性，因此這兩種米原料作為植物奶基底的潛力值得進一步研究。

表一、糙米奶經酵素水解前與後之總酚類化合物含量及抗氧化能力

Table 1. Total phenolic compound content and antioxidant capacity of brown rice milk before and after enzymatic hydrolysis

Stage of production	TPC (mg GAE/ 100 mL)	Antioxidant activity (μmol TE/100 mL)		
		FRAP	ORAC	DPPH
Raw BRM	3.66 ± 0.86 ^a	34.53 ± 2.10 ^a	51.24 ± 8.03 ^a	0.01 ± 0.00 ^a
α-Amylase digestion	5.28 ± 0.86 ^b	38.59 ± 4.96 ^b	187.42 ± 56.90 ^b	0.03 ± 0.01 ^b
Glucoamylase digestion	23.44 ± 0.68 ^d	63.45 ± 1.13 ^d	532.27 ± 38.12 ^d	0.05 ± 0.01 ^c
YSB-fermentation	15.23 ± 4.15 ^c	58.33 ± 4.62 ^c	431.14 ± 42.72 ^c	0.05 ± 0.01 ^c

Data are shown as the mean ± SD of the experiments that were conducted at least in triplicate. Different superscripts within the same column indicate significant differences at $p < 0.05$. These comprised raw BRM, a mixture of rice flour and water; α-amylase digestion, BRM after α-amylase digestion; glucoamylase digestion, BRM after glucoamylase digestion; YSB-fermentation, YSB-BRM after fortification and fermentation by *L. pentosus* 9D3, followed by the pH adjustment. GAE: gallic acid equivalent; TE: trolox equivalent.

(Kittibunchakul *et al.*, 2021)

表二、糙米奶經酵素水解前與後之酵素抑制能力

Table 2. Enzyme inhibitory capacity of brown rice milk before and after enzymatic hydrolysis

Stage of production	% Inhibition		
	Lipase ¹	α-Amylase ²	α-Glucosidase ²
Raw BRM	1.33 ± 0.03 ^a	3.73 ± 0.15 ^a	1.18 ± 0.22 ^a
α-Amylase digestion	15.15 ± 0.70 ^b	15.09 ± 1.27 ^b	6.70 ± 2.17 ^b
Glucoamylase digestion	20.20 ± 4.72 ^c	58.39 ± 3.49 ^c	61.95 ± 4.34 ^c
YSB-fermentation	22.62 ± 2.75 ^c	61.97 ± 2.48 ^d	64.50 ± 2.22 ^d

Data are shown as the mean ± SD of experiments that were conducted at least in triplicate. Different superscripts within the same column indicate significant differences at $p < 0.05$. These comprised raw BRM, a mixture of rice flour and water; α-amylase digestion, BRM after α-amylase digestion; glucoamylase digestion, BRM after glucoamylase digestion; YSB-fermentation, YSB-BRM after fortification and fermentation by *L. pentosus* 9D3, followed by the pH adjustment. ¹ Final concentration = 100% (v/v); ² Final concentration = 10% (v/v).

(Kittibunchakul *et al.*, 2021)



二、稻穀簡介

稻米是全球重要的糧食作物之一，屬於一年生之禾本科植物(*Poaceae*)。其栽培範圍廣泛，涵蓋熱帶、亞熱帶和部分溫帶地區。作為超過一半世界人口的主食，稻米在維持糧食安全與提供營養來源方面具有舉足輕重的地位。稻米的生產主要集中於亞洲國家，包括中國、印度、越南、泰國和印尼等，這些國家大多位於季風氣候區，擁有豐沛的降雨量。亞洲地區的稻作產量占全球總產量的 90%以上(楊等人, 2012; FAO, 2021)。除了作為基本糧食來源外，稻米亦在文化、經濟及生態系統中發揮關鍵作用，影響世界各地的農業發展與社會結構。

(一) 稻穀種類

稻米屬於稻屬(*Oryza*)，由 21 個物種所組成，目前僅有 2 個物種廣為栽種，分別為亞洲型栽培稻種(*Oryza sativa*)和非洲型栽培稻種(*Oryza glaberrima*)。亞洲稻又通稱為「水稻」，水稻主要可分為秈稻(*O. sativa* subsp. *indica*)、粳稻(*O. sativa* subsp. *japonica*)和爪哇稻(*O. sativa* subsp. *javanica*)三個亞種。其中，秈稻與粳稻為最常見的栽培稻種(Kennedy & Burlingame, 2003)。根據 Malik 與 Chaudhary (2002) 的研究，全球栽培稻種中，秈稻品種佔總數的 80%。然而，臺灣稻作目前以粳稻為主，佔所有稻類的栽培面積 90%以上(農糧署, 2023)。除秈稻及粳稻外，臺灣的栽培稻種還有糯稻(*O. sativa* var. *glutinosa*)，其為秈稻與粳稻的黏性變種(Kennedy & Burlingame, 2003)。不同的水稻種類因其性質與特徵，以因應不同地區的飲食文化需求。在臺灣，稻米品種之多樣性反映了傳統米食文化之深厚基礎。以下為臺灣常見稻米品種：

1. 秈稻

秈稻多分布於熱帶地區，米粒細長，直鏈澱粉(amylose)含量高，因此其烹煮後黏性較低(Kennedy & Burlingame, 2003)。根據加熱後米粒的特性，可將其區分



為軟秈稻與硬秈稻。其中，軟秈稻亦有「泰國米」之稱，因其烹煮後呈現近似軟膠體的性質，口感較粳稻乾爽，適合製作為炒飯或東南亞米飯料理。硬秈稻又俗稱為「在來米」，由於其直鏈澱粉含量較高，加熱後口感更趨向硬膠體性質。在臺灣的飲食文化中，硬秈稻常經過浸泡、磨漿等加工過程，製作成碗粿、米苔目及粿條等傳統米食小吃(楊等人，2016)。

2. 粳稻

粳稻主要生長於溫帶與亞熱帶地區，其對寒冷溫度的耐受性較高，但對乾旱、昆蟲和疾病的耐受性較差(FAO, 1997)。米粒短圓且飽滿，煮熟後具有較高的黏性與柔軟口感(Kennedy & Burlingame, 2003)。粳米在臺灣俗稱為「蓬萊米」，然而，蓬萊米於不同時代背景有著不同的定義，現今概稱之蓬萊米意指著粳米和秈米的雜交種，多作為日常米飯之食用(楊等人，2016)。

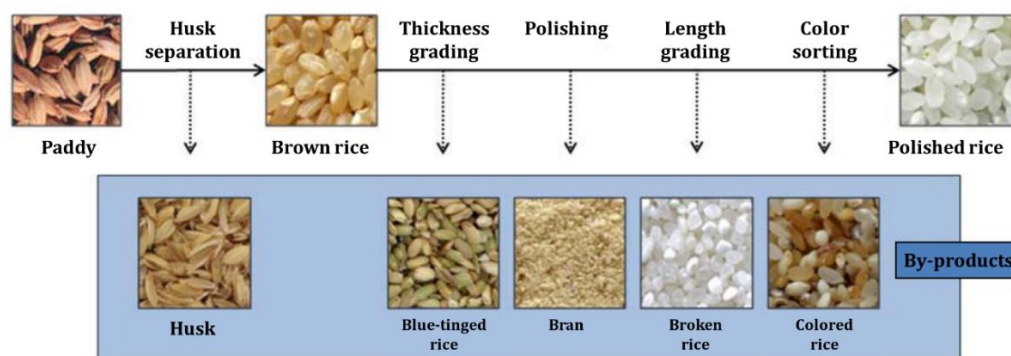
3. 糯稻

糯稻是稻米的自然變種，其胚乳澱粉幾乎由支鏈澱粉(amylopectin)構成，煮熟後呈現極高黏性(Kennedy & Burlingame, 2003)。糯稻可分為粳糯與秈糯，粳糯又稱為「圓糯」，其米粒形狀較短且圓，烹煮後黏性較高且口感柔軟，常製作為麻糬、湯圓以及年糕等甜品。秈糯又稱為「長糯」，米粒形狀較長，支鏈澱粉含量較粳糯低，烹煮後口感更為紮實且較不易軟爛，常用於製備飯糰、米糕以及肉粽等鹹食料理(楊等人，2016)。

(二) 稻穀之結構

稻穀之結構組成影響著加工及營養學等應用，從外層的稻殼(husk)到內部的米糠層(bran layer)、胚乳(endosperm)與胚芽(embryo)等，各部分結構不僅保護稻穀

在自然環境中的完整性，還決定了加工過程中的物理與化學特性，影響稻米最終產品的品質與用途。稻穀的碾磨製程如圖二，通常由砻穀程序開始，此步驟將脫去最外層且不可食用的稻殼，此時可得到糙米。然而，米糠層之風味和質地較差，因此通常透過碾磨去除糙米表面的糠層，進而獲得口感較佳之精白米。這些加工步驟不僅改變了稻米的營養價值，也決定了產品的儲存壽命與適用範圍。由於米糠層富含蛋白質、油脂、維生素及礦物質等成分，雖然精白米脫去米糠層後可擁有較長之架儲期，但也意味著其營養價值會隨著米糠層脫去而降低。



圖二、稻穀的碾磨製程。

Fig. 2. Milling process of paddy rice.

(Sun *et al.*, 2011)

1. 稻殼

位於稻穀之最外層，約占稻穀總重量的 16%至 28%，由內稃(palea)和外稃(lemma)所構成，經由鉤狀結構緊密結合，於稻穀成熟後形成堅硬結構包覆整個穎果(caryopsis)，並且具有高度的木質化和矽化細胞，進而提供保護效果，帶來耐儲存、防止蟲害及黴菌侵襲的功能(Juliano & Tũaño, 2019)。一旦去除稻殼，則容易在儲存過程中破壞米糠層而釋出脂肪酶，進行脂肪水解和氧化作用，進而導致酸敗味、苦味和肥皂味等(Mitchell, 2009)。



2. 米糠層

米糠層為稻穀脫殼後的次外層結構，由果皮(pericarp)、種皮(seed coat)及核殼層(nucellus)組成，覆蓋於胚乳與胚芽外層。其中，種皮屬於保護組織，具有較厚之角質層，且有色米中之色素通常存在於果皮或種皮中，可於碾磨製程中觀察出差異(Juliano & Tũaño, 2019)。此外，核殼層亦具有較厚之角質層，並且與種皮之間之結合能力較弱，因此常於加工過程中分離(Bechtel & Pomeranz, 1977)。

3. 糊粉層

位於胚乳之最外層，根據稻米的品種不同，糊粉層之厚度也會有所不同，可能具有 1-7 層的細胞厚度，並完全包覆著胚乳及胚芽(Juliano & Tũaño, 2019)。糊粉層之細胞又稱為糊粉細胞(aleurone cells)，儲存著稻米中之脂質體、蛋白質體以及植酸鹽儲存體(Tanaka *et al.*, 1973)。

4. 胚乳

胚乳為稻米主要儲存能量之組織，以澱粉形式儲存，占稻穀總重約 70%。主要由亞糊粉層(subaleurone layer)和澱粉核心層(starchy endosperm core)所組成。亞糊粉層富含蛋白質體和脂質體，且澱粉顆粒較小並分布均勻。澱粉核心層則為胚乳主要之組成，由多邊形之澱粉顆粒構成，具有高比例之澱粉含量，為稻米之主要能量來源(Juliano & Tũaño, 2019)。

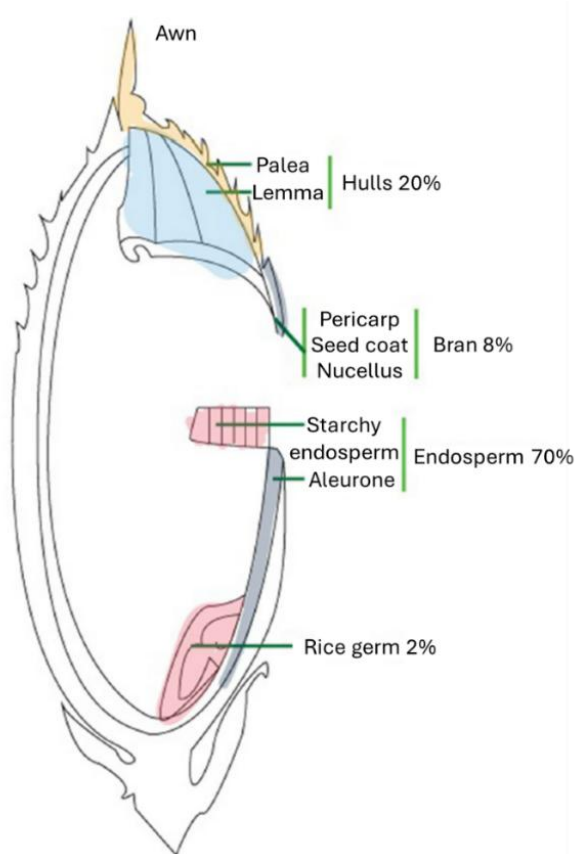
稻米澱粉為直鏈澱粉和支鏈澱粉之共聚物，影響著米澱粉的理化特性，尤其是糊化性質，支鏈澱粉有助於澱粉顆粒膨脹和糊化，而直鏈澱粉和脂質則抑制膨脹(Singh *et al.*, 2006)。直鏈澱粉屬於線性聚合物，幾乎完全由 α -1,4-D-glucose 所組成，含有少量的 α -1,6-D-glucose (約佔 0.3-0.5%)。直鏈澱粉之結構呈現螺旋狀，內部可與脂肪酸(游離或甘油酯型態)形成籠狀複合物。支鏈澱粉由 α -1,4-D-glucose



所組成，具有高度的支鏈結構(α -1,6 鍵結約佔 5-6%)。支鏈澱粉分子量高，並具有高度的分支化，構成澱粉顆粒的骨架(Wani *et al.*, 2012)。

5. 胚芽

位於稻米的基部，主要由胚軸(embryonic axis)和盾片(scutellum)所組成，占稻穀總重 2%至 3%。為稻米中營養最密集的部分，富含油脂、蛋白質、維生素和礦物質等(Juliano & Tuanó, 2019)。其中，胚軸包括胚根(radicle)和胚芽鞘(coleoptile)，負責種子萌發後根部連接至地面之生長。盾片則為胚乳和胚芽間的聯繫通道，於種子萌發時可做為養分運輸之管道(Kik, 1954)。



圖三、稻穀的結構。

Fig. 3. Structure of paddy rice.

(Panahabadi *et al.*, 2021)



(三) 稻米之營養組成

稻米可根據碾白程度的不同可分為糙米、胚芽米與精白米。碾磨程度(degree of milling, DOM)是指從糙米中所去除的米糠層佔糙米的重量百分比，這一指標決定了米糠層與胚芽的保留程度，並可用於確立稻米的精白程度。DOM 會影響稻米的整米率(head rice yield)、營養價值和感官品質等方面(Gujral *et al.*, 2002)。根據 Li 等人(2025)的文獻指出 DOM 為 22.5%時，米糠含量僅剩 0.5%，為市場上常見的精白米標準。DOM 對稻米的營養成分具有顯著影響，特別是膳食纖維、維生素、礦物質與生物活性成分的含量，因此不同類型的稻米擁有不同的營養價值。

糙米保留完整的米糠層與胚芽，因而富含蛋白質、脂質、膳食纖維、維生素及抗氧化物質。相較之下，精白米經過高度碾磨後，大量的米糠層與胚芽被去除，造成營養成分之含量大幅下降(Saleh *et al.*, 2019)。根據 Li 等人(2025)的研究(如表三)，隨著 DOM 的增加，灰分、脂質、蛋白質、膳食纖維及總酚類含量均有下降趨勢，而澱粉含量則相對提高，此結果反映出米糠層與胚芽去除所導致的營養多元性下降及損失。

糙米的蛋白質主要集中在米糠層與胚乳外層，因此其蛋白質含量高於精白米(Kim *et al.*, 2022)。此外，糙米的脂質含量也較高，因為脂質大多存在於米糠層，但在碾磨過程中幾乎完全流失，導致精白米的脂質含量顯著降低(Saleh *et al.*, 2019)。除了蛋白質和脂質等巨量營養素外，糙米還富含其他有益健康的成分。膳食纖維可維持人體腸道健康與血糖調節作用，糙米與胚芽米含有較高的總膳食纖維，其中不溶性膳食纖維占比最高(Li *et al.*, 2025)。



表三、稻米在不同碾磨程度下之成分及色澤分析

Table 3. Composition and color analysis of rice at different milling degrees

	Y0	Y2	Y4	Y6	Y8	Y10	Y12	Y14	Y16	Y18	Y20
DOM (%)	0	2.1	4.4	6.6	9.2	11.4	13.3	15.4	18.2	20.1	22.5
<i>Composition of rice samples in g/100 g (dry weight)</i>											
Ash	1.51 ± 0.03 ^a	1.40 ± 0.03 ^b	1.27 ± 0.05 ^c	1.12 ± 0.01 ^d	0.97 ± 0.04 ^e	0.84 ± 0.04 ^f	0.76 ± 0.02 ^g	0.71 ± 0.01 ^{gh}	0.69 ± 0.04 ^{gh}	0.68 ± 0.01 ^h	0.68 ± 0.03 ^h
Lipid	2.16 ± 0.03 ^a	1.92 ± 0.05 ^b	1.56 ± 0.05 ^c	1.24 ± 0.04 ^d	0.95 ± 0.04 ^e	0.71 ± 0.02 ^f	0.51 ± 0.03 ^g	0.40 ± 0.03 ^h	0.34 ± 0.03 ^{hi}	0.28 ± 0.01 ⁱ	0.26 ± 0.03 ⁱ
Protein	8.51 ± 0.05 ^a	8.39 ± 0.05 ^b	8.22 ± 0.04 ^c	8.07 ± 0.05 ^d	7.88 ± 0.01 ^e	7.71 ± 0.01 ^f	7.58 ± 0.03 ^g	7.49 ± 0.02 ^g	7.41 ± 0.02 ^h	7.39 ± 0.03 ^h	7.36 ± 0.02 ^h
Starch	79.56 ± 0.85 ^a	81.75 ± 0.66 ^d	82.51 ± 0.84 ^d	84.64 ± 0.27 ^c	86.89 ± 0.51 ^b	87.76 ± 0.10 ^{ab}	88.01 ± 0.40 ^{ab}	88.06 ± 0.15 ^{ab}	88.11 ± 0.20 ^a	88.15 ± 0.20 ^a	88.16 ± 0.08 ^a
Amylose	15.23 ± 0.15 ^h	15.72 ± 0.06 ^{gh}	16.03 ± 0.08 ^g	15.87 ± 0.36 ^{gh}	16.72 ± 0.31 ^f	17.57 ± 0.26 ^e	18.36 ± 0.34 ^d	18.93 ± 0.17 ^c	19.50 ± 0.12 ^{bc}	19.83 ± 0.24 ^{ab}	20.12 ± 0.15 ^a
Amylopectin	77.64 ± 0.35 ^a	74.94 ± 0.22 ^b	74.13 ± 0.82 ^{cd}	74.67 ± 0.65 ^{bc}	73.94 ± 0.71 ^{de}	73.43 ± 0.49 ^e	72.64 ± 0.44 ^f	71.39 ± 0.11 ^g	70.27 ± 0.24 ^h	68.64 ± 0.36 ⁱ	68.02 ± 0.41 ⁱ
TDF	1.88 ± 0.01 ^a	1.74 ± 0.01 ^b	1.67 ± 0.02 ^c	1.51 ± 0.02 ^d	1.38 ± 0.01 ^e	1.16 ± 0.02 ^f	0.97 ± 0.05 ^g	0.82 ± 0.04 ^g	0.78 ± 0.03 ^g	0.76 ± 0.02 ^g	0.75 ± 0.04 ^g
IDF	1.63 ± 0.04 ^a	1.53 ± 0.01 ^b	1.48 ± 0.01 ^c	1.37 ± 0.02 ^d	1.24 ± 0.03 ^e	1.06 ± 0.02 ^f	1.00 ± 0.02 ^g	0.93 ± 0.02 ^g	0.86 ± 0.01 ^g	0.81 ± 0.03 ^g	0.83 ± 0.01 ^g
Total phenol (mg GA/100 g DW)	113.71 ± 12.23 ^a	98.34 ± 4.75 ^b	85.03 ± 5.13 ^c	72.59 ± 4.46 ^d	66.81 ± 7.07 ^e	60.44 ± 3.53 ^f	56.44 ± 5.87 ^g	51.74 ± 5.57 ^h	50.33 ± 5.48 ^h	49.48 ± 1.28 ^h	46.16 ± 6.64 ^{hi}
<i>Mineral composition</i>											
P (mg/g)	3.24 ± 0.10 ^a	2.99 ± 0.17 ^b	2.63 ± 0.07 ^c	2.26 ± 0.11 ^d	1.96 ± 0.05 ^e	1.72 ± 0.07 ^f	1.54 ± 0.05 ^g	1.38 ± 0.06 ^g	1.27 ± 0.07 ^g	1.3 ± 0.08 ^g	1.26 ± 0.07 ^g
K (mg/g)	1.86 ± 0.06 ^a	1.74 ± 0.04 ^b	1.57 ± 0.06 ^c	1.35 ± 0.04 ^d	1.12 ± 0.02 ^e	0.97 ± 0.10 ^f	0.89 ± 0.07 ^f	0.82 ± 0.08 ^g	0.78 ± 0.08 ^g	0.76 ± 0.04 ^g	0.75 ± 0.12 ^g
Mg (mg/g)	0.86 ± 0.02 ^a	0.79 ± 0.13 ^b	0.7 ± 0.06 ^c	0.59 ± 0.11 ^d	0.51 ± 0.01 ^{de}	0.45 ± 0.02 ^{ef}	0.4 ± 0.02 ^{ef}	0.37 ± 0.06 ^{fg}	0.34 ± 0.04 ^{fg}	0.33 ± 0.06 ^{fg}	0.32 ± 0.05 ^{fg}
Zn (µg/g)	26.53 ± 0.22 ^a	25.94 ± 0.35 ^b	25.23 ± 0.14 ^c	24.33 ± 0.56 ^d	23.25 ± 0.24 ^e	22.47 ± 0.62 ^f	21.96 ± 0.53 ^g	21.53 ± 0.91 ^g	20.93 ± 0.22 ^h	20.39 ± 0.66 ^h	19.83 ± 0.45 ⁱ
Fe (µg/g)	6.49 ± 0.03 ^a	6.12 ± 0.06 ^b	5.83 ± 0.07 ^c	5.59 ± 0.06 ^d	5.36 ± 0.07 ^e	5.14 ± 0.03 ^f	5.01 ± 0.08 ^g	4.84 ± 0.08 ^{gh}	4.71 ± 0.03 ^h	4.68 ± 0.04 ^h	4.66 ± 0.06 ^h
<i>Chromaticity values</i>											
L*	89.16 ± 0.14 ^g	90.87 ± 0.71 ^f	91.46 ± 0.83 ^f	92.45 ± 0.59 ^e	93.15 ± 0.30 ^{de}	93.70 ± 0.12 ^d	95.20 ± 0.20 ^c	95.53 ± 0.26 ^{bc}	96.22 ± 0.10 ^{ab}	96.47 ± 0.10 ^a	96.67 ± 0.10 ^a
a*	1.64 ± 0.04 ^a	1.52 ± 0.03 ^b	1.34 ± 0.01 ^c	0.88 ± 0.03 ^d	0.79 ± 0.03 ^e	0.74 ± 0.03 ^{ef}	0.68 ± 0.02 ^g	0.61 ± 0.01 ^{gh}	0.56 ± 0.02 ^{ghi}	0.49 ± 0.04 ^{hi}	0.47 ± 0.02 ⁱ
b*	11.72 ± 0.08 ^a	11.18 ± 0.06 ^{ab}	10.62 ± 0.04 ^b	9.62 ± 0.01 ^c	9.35 ± 0.06 ^c	9.02 ± 0.06 ^{cd}	8.61 ± 0.04 ^d	8.46 ± 0.02 ^d	7.80 ± 0.04 ^e	7.52 ± 0.03 ^e	7.29 ± 0.07 ^e

TDF: total dietary fiber, SDF: soluble dietary fiber, IDF: insoluble dietary fiber, P: phosphorous, K: potassium, Mg: magnesium, Zn: zinc, Fe: iron, L*: lightness, a*: redness, b*: yellowness.

Different superscripts indicate a significant difference ($p < 0.05$) among the sample groups.

(Li *et al.*, 2025)



生物活性物質方面，糙米則富含了酚酸、黃酮類化合物與 γ -穀維素等成分，具有良好的抗氧化能力(Gong *et al.*, 2017)。然而，這些化合物大多集中在米糠層(如表四)，隨著碾磨程度的增加，精白米的抗氧化活性顯著降低(Pang *et al.*, 2018)。在微量營養素方面，糙米與胚芽米的維生素 B 群與維生素 E 含量較高，特別是硫胺素和 γ -生育酚，這些營養素主要存在於米糠層與胚芽(Saleh *et al.*, 2019)。碾磨過程會顯著降低這些維生素的含量，導致精白米的營養價值下降。此外，糙米還富含礦物質，如磷、鉀、鎂、鋅與鐵，這些礦物質有助於維持人體的代謝與生理功能。然而，由於這些礦物質大多分布於米糠層與胚芽，因此精白米的礦物質含量顯著較低。

隨著生活型態的改變，臺灣的飲食文化對於稻米的需求也跟著改變。從農村社會追求的「吃飽」到現今社會強調的「吃巧」，即攝取足夠的營養。反映出消費者對於稻米品質的重視程度不斷提升。這也促使食品產業更積極地進行研究與開發，讓稻米加工品朝向兼具美味與健康的方向發展。綜合上述文獻回顧內容，可以得知稻米的營養價值與其碾磨程度密切相關。糙米因保留了完整的米糠層與胚芽，因而富含蛋白質、脂質、膳食纖維、抗氧化物質、維生素與礦物質，具有較高的營養價值。然而，儘管糙米在營養價值方面優於精白米，由於其保留著米糠層而具有較粗糙的口感，目前大多數的消費者仍偏好食用精白米，這也使得白米在現今的飲食習慣中依然佔據主導地位。



表四、糙米、白米以及米糠之營養成分含量

Table 4. Nutritional composition of brown rice, milled rice, and rice bran

Nutrients	Brown rice	White rice (milled)	Rice bran
Protein (g/100 g)	7.1–8.3	6.3–7.1	11.3–14.9
Crude fat (g/100 g)	1.6–2.8	0.3–0.5	15.0–19.7
Available carbohydrates (g/100 g)	73–76	77–78	34–62
Crude fiber (g/100 g)	0.6–1.0	0.2–0.5	7.0–11.4
Crude ash (g/100 g)	1.0–1.5	0.3–0.8	6.6–9.9
Energy (kcal)	363–385	349–373	399–476
Thiamine (mg/100 g)	0.29–0.61	0.02–0.11	1.20–2.40
Riboflavin (mg/100 g)	0.04–0.14	0.02–0.06	0.18–0.43
Niacin (mg/100 g)	3.5–5.3	1.3–2.4	26.7–49.9
Vitamin E (mg/100 g)	0.90–2.50	0.075–0.30	2.60–13.3
Nicotinic acid (mg/100 g)	4.4–6.2	0.8–2.6	–
Pantothenic acid (mg/100 g)	0.66–1.86	0.34–0.77	–
Ca (mg/100 g)	10–50	10–30	30–120
Na (mg/100 g)	3.1–17.6	2.2–8.5	–
K (mg/100 g)	120–340	14–120	–
Fe (mg/100 g)	0.7–5.4	0.2–2.7	8.6–43.0
Mn (mg/100 g)	1.3–4.2	1.0–3.3	–
Zn (mg/100 g)	1.5–2.2	0.3–2.1	4.3–25.8
P (g/100 g)	0.17–0.43	0.08–0.15	1.1–2.5

(Saleh *et al.*, 2019)



(四) 臺灣稻米之農業背景

稻米為臺灣重要的糧食作物，不僅滿足國人日常飲食需求，更承載著農業經濟、文化傳承與糧食安全的多重意義。根據行政院農業委員會的統計資料，臺灣稻米栽培面積約為 25 萬公頃，年產量約 150 萬公噸，產值達 370 億元新台幣，展現稻米在臺灣農業中的核心地位(楊等人，2016)。

儘管臺灣稻米生產量充足，糧食平衡表顯示稻米消費量逐年下降，從 1984 年的每人每年 84.4 公斤降至 2023 年的 42.1 公斤(王等人，2019；農糧署，2024)。飲食習慣改變、外食人口增加與多元主食選擇是導致消費量下降的主要原因。此外，臺灣稻米供需失衡現象亦顯著，即使國內生產過剩，仍須進口稻米以履行國際貿易義務(農糧署，2024)。進一步分析，臺灣小麥自給率極低(小於 1%)，並且每年進口量超過 100 萬公噸。相較之下，稻米自給率雖高，但因國人消費量減少並且須配合政策性進口，進而造成糧食自給率逐年降低，同時卻面臨國產米庫存過剩的矛盾現況(農糧署，2024)。

面對供需失衡，政府推動多項政策以促進稻米消費及提升糧食自給率(王等人，2019)，包括：1. 推廣米食文化與多元化產品開發：鼓勵開發米製加工品，如米麵包、米粉絲與米餅，以擴大消費市場；2. 鼓勵轉作與契作制度：透過契作機制，穩定稻米價格，減少過剩產量，並鼓勵農民轉作高經濟價值作物；3. 提升稻米品質與國際競爭力：育成具備食味佳、抗病性強及適應性廣的新稻米品種，滿足多元化的消費需求(楊等人，2016)。

臺灣稻米產業面臨消費量下降、供需失衡與進口壓力等挑戰。然而，透過政策調整、品種創新及消費市場多元化的推廣，臺灣稻米具備維持糧食安全與促進農業永續發展的潛力。在全球糧食危機潛在風險下，維持稻米自給能力仍是臺灣農業政策的重要課題。



三、發芽糙米

水稻的生命週期起始於種子發芽，隨後經歷幼苗生長、分蘖、抽穗、開花以及種子成熟等階段(Fu *et al.*, 2025)。當種子吸收水分後進入發芽階段，誘發了生理與生化機制，活化內源性酵素之反應，如 α -澱粉酶、蛋白酶及脂肪酶等，這些酵素能有效分解儲存於種子中的澱粉、蛋白質及脂質，轉化為胚芽和幼苗所需的可利用養分(Nascimento *et al.*, 2024)。除了基礎營養成分的釋出外，發芽過程中尚有其他內源性酵素參與生物活性化合物的分解與生合成，例如酚類化合物以及 GABA 等，這些化合物具有抗氧化、降血壓及神經調節等潛在健康效益(Wu *et al.*, 2013)。因此，發芽技術不僅能應用於農業領域，有助於提升種子萌芽率、增強作物抗逆性及促進生長，更因其良好的營養價值，在食品工業中展現出廣泛的應用潛力。

(一) 發芽機制

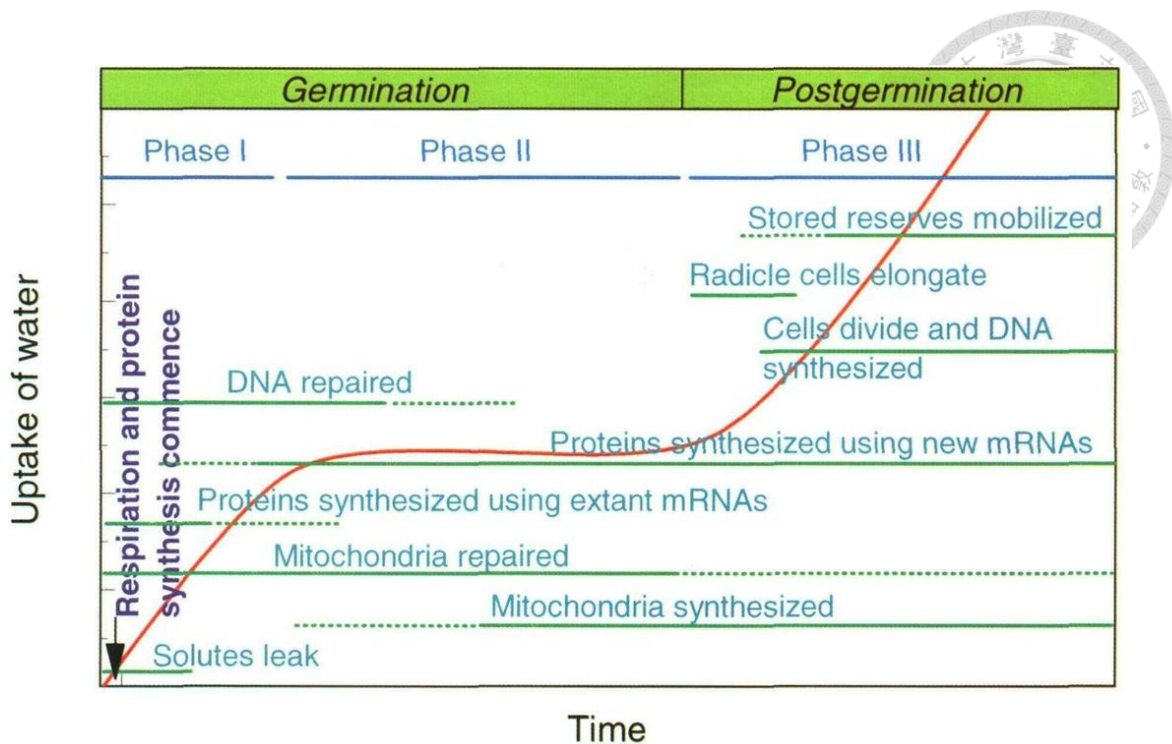
浸漬逆境(submergence stress)為誘發稻穀種子發芽之重要環境因素之一(Pucciariello, 2020)。當稻穀長時間浸漬於水中時，將導致環境中的氧氣供應不足，進而改變稻穀之生理與生化機制，觸發一系列發芽相關的適應性反應，這使得稻穀能在缺氧環境下發芽並持續生長。這種適應性有別於小麥、大麥和燕麥等其他穀物(Pucciariello, 2020)。正是因為稻米這一特殊的生理機制，解釋了為何以稻米為主食的國家大多位於亞洲國家，這些國家多數處於季風氣候區，經常面臨洪水或山洪暴發等極端氣候事件。在這樣的環境下，稻米的適應性使其成為亞洲國家的主要糧食來源。

根據 Perata 等人(1992)的研究，即使在缺乏氧氣的條件下，稻穀仍可將儲存的澱粉水解為葡萄糖，進而進入糖解作用(glycolysis)產生少量的能量，如腺苷三磷酸(adenosine triphosphate, ATP)。在無氧環境中，糖解作用所產生的還原態輔酶

NADH 會透過乙醇發酵進行再氧化作用，轉換為 NAD^+ ，以維持糖解作用的持續進行，確保細胞的能量供應。

稻穀之發芽機制依據吸水特性分為三個階段(如圖四)。第一階段屬於吸水期(imhhibition phase)，起始於乾燥種子吸收水分，進行細胞膜的修復並且活化粒線體，以啟動初步的呼吸作用。此時，水分的滲透啟動了細胞內初步的代謝機制，例如酵素活化，特別是與能量代謝相關之酵素，為後續發芽階段提供所需能量(Fu *et al.*, 2025)。第二階段為代謝啟動期(lag phase)，此階段為代謝活動之高峰期，主要包含大分子營養成分(如澱粉、蛋白質和脂質等)的分解、DNA 修復與細胞分解等生理生化機制。這些代謝機制受到內源性植物激素所調控。例如，在此階段活化了吉貝素(gibberellic acid, GA)訊號路徑，促進了 α -澱粉酶的釋放，進一步分解澱粉轉化為雙醣和單醣，供應發芽所需的能量。同時，促使脫落酸(abscisic acid, ABA)的濃度下降，解除其促進種子休眠之作用(Rajjou *et al.*, 2012)。第三階段則為胚根突破期(radicle emergence phase)，於第二階段所產生的能量在此階段用於細胞分裂，最終胚根突破種皮，完成發芽過程。並且，GA 訊號路徑的作用在此階段中達到高峰，促進細胞壁鬆弛與細胞延展，利於胚根之生長。根據 Rajjou 等人(2012)之研究可以得知，在發芽的生化機制中，GA 和 ABA 路徑互為重要之拮抗關係，共同調節種子的發芽與休眠平衡。GA 訊號路徑主要功能為解除種子之休眠狀態、促進胚根生長與發芽作用。而 ABA 訊號路徑則具有促進種子休眠並且抑制發芽的作用。GA 和 ABA 的濃度比例為種子進入休眠或啟動發芽之關鍵因素。

根據 Pucciariello (2020)的研究，稻穀能夠在缺氧環境中生存並生長，原因除了稻穀能夠透過厭氧發酵而產生能量外，另一重要因素是稻穀的結構特徵。胚芽鞘的中空結構使氧氣能夠由水面進入稻穀內部，這一特性稱為通氣管效應(snorkel effect)，助於稻穀在淹水環境中逃避生存壓力。因此，胚芽鞘成為稻穀中細胞分裂最活躍的部位，對於稻穀的發芽機制相當重要。



圖四、種子發芽的不同階段。

Fig. 4. Different phases of seed germination.

(Bewley, 1997)

(二) 發芽製程

發芽製程是一個複雜且受到多項環境因子調控的生理過程，主要包括濕度、溫度、光照、氧氣供應及發芽時間等重要參數，這些因素會直接影響種子的代謝機制與發芽率 (Li & Yang, 2020; Vicente *et al.*, 2020)。由於植物進行新陳代謝之基本功能會需要水分，若缺乏水分則可能因為較高之礦物質濃度進而降低細胞間營養物質及代謝廢物之運輸機能。然而，若水分過多，則亦可能稀釋營養物質之濃度，例如鉀、鈉和鈣離子等，進而抑制了發芽之生理機制 (Vicente *et al.*, 2020)。

另外，很重要的環境因素為溫度，稻米的最佳發芽溫度範圍為 25°C 至 35°C (Li & Yang, 2020)。若溫度低於 10°C 則將降低內源性酵素之活性，進而導致發芽率降低；反之，若溫度過高，則可能造成穀物內脂質之過氧化作用 (Li & Yang, 2020)，



損害細胞膜結構並抑制種子生長。

光照在稻米發芽過程中具有調控作用。紅光可透過光敏色素(phytochrome)的活化來促進發芽。然而，遠紅光則會抑制發芽，主要因為其會增加脫落酸(ABA)的濃度，進而延遲發芽進程(Vicente *et al.*, 2020)。此外，即使稻穀處於理想的環境參數下，亦需要至少 15 小時之後才會出現可見的變化(Liu *et al.*, 2016)。

(三) 促發技術(priming)

超音波是頻率高於人耳可聽見範圍(頻率 18 kHz 以上)的聲波所產生的能量，根據頻率與能量的不同，可分為高頻低能量超音波，即為聲強(sound intensity)低於 1 W/cm^2 、頻率大於 100 kHz；以及低頻高能量超音波，即為聲強大於 1 W/cm^2 、頻率介於 18–100 kHz (Nowacka & Wedzik, 2016)。低能量超音波於食品領域常應用於提升活細胞之活性、食品表面清潔、萃取、過濾、乳化以及肉類嫩化之輔助工具(Knorr *et al.*, 2004)。高能量超音波則用以破壞細胞結構，以促進或抑制食品中之物理及化學反應，例如誘導氧化/還原反應及結晶成核。此外，高能量超音波也用於種子發芽製程之促發技術。超音波促發技術透過超音波波動產生的能量場，改變細胞內外的物理與化學環境，以促進植物生長並提升生物活性物質的合成，已被證實能夠透過非生物性誘導機制(abiotic induction mechanisms)，促進植物體內初級代謝物與次級代謝物的合成與累積(Velázquez *et al.*, 2017)。其中，初級代謝物包括碳水化合物、蛋白質與脂質；次級代謝物則為多酚類、類黃酮及 γ -胺基丁酸(GABA)等生物活性成分(Silva & Dobrañski, 2014)。超音波處理的效果取決於聲音輻射的頻率、強度和持續時間(Nowacka & Wedzik, 2016)，因其能夠在種子與液體介質中產生劇烈的空穴效應(cavitation effect)，進而促進水合作用並提升細胞通透性(Chemat *et al.*, 2011)。適當的參數調整可強化其對植物生長與營養成分累積的影響(Nowacka & Wedzik, 2016)。

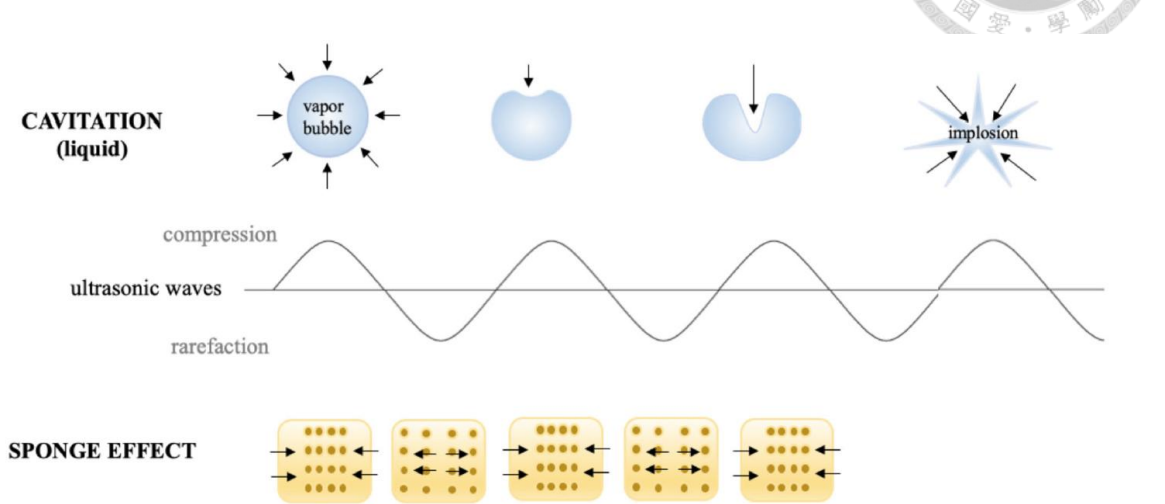


當超音波作用於植物細胞時，會引發細胞快速壓縮與膨脹，進而形成大量氣泡。這些氣泡在超音波能量驅動下持續振盪並最終爆裂，導致局部壓力與溫度的劇烈變化，促使細胞壁破裂並形成微通道，使細胞內的營養成分與次級代謝物更容易釋放(Silva & Dobrañnski, 2014)。此外，超音波的物理擠壓效應能夠影響細胞內部的自由基反應，進一步影響細胞膜的通透性與酵素活性(Nowacka & Wedzik, 2016)。這些物理與化學效應最終促使水分、氧氣與營養物質更有效地滲透至細胞內部，進而加速發芽過程並提升種子的發芽率(Lee *et al.*, 2006)。研究顯示，在超音波頻率 40 kHz 下，功率範圍於 0.137–0.344 W/cm² 之間，隨著超音波功率的增加，植物的發芽速率與生長均有顯著提升(Lee *et al.*, 2006)。此外，在發芽前對穀物施加 25 kHz、1.25 W/cm²的超音波處理，可顯著提高發芽紅米中的 GABA 與其他健康相關代謝物(Ding *et al.*, 2018)。這些結果證明了超音波在促進植物代謝活性方面的潛力，尤其是對於 GABA 累積的影響，可能與麩胺酸脫羧酶(glutamate decarboxylase, GAD)活性提升有關(Ding *et al.*, 2018)。

超音波的效應可透過兩種主要機制來解釋(如圖五)，即空穴效應與海綿效應(sponge effect)。空穴現象指當超音波通過液體時，因高頻震盪產生的壓力變化，進而造成局部高溫與高壓，並釋放強烈的微射流與剪切力，能夠破壞種皮蠟質層與細胞壁，提升水合作用，加快發芽速度(Nowacka *et al.*, 2012)。另一方面，海綿效應則發生於多孔性材料，如植物細胞，超音波的機械壓縮與膨脹，可促使細胞內部液體與氣體的流動，如同海綿吸收水分與釋放水分的過程，加快種子吸水速率，進而提升發芽之均一性，並促進細胞間隙擴大，加速氧氣與營養物質滲透(Chatchavanthatr *et al.*, 2020)。

因此，將超音波的促發技術應用於發芽製程，不僅可以提升稻穀發芽的一致性，有利於確保大量生產時產品品質之穩定性，還能促進具有生物活性的代謝物

質合成。此外，透過調節不同的能量和時間參數，能夠達成特定的發芽目標，進一步改良發芽米的質地特性與營養價值。



圖五、超音波處理之空穴現象與海綿效應示意圖。

Fig. 5. Schematic diagram of cavitation phenomenon and sponge effect in ultrasonic treatment.

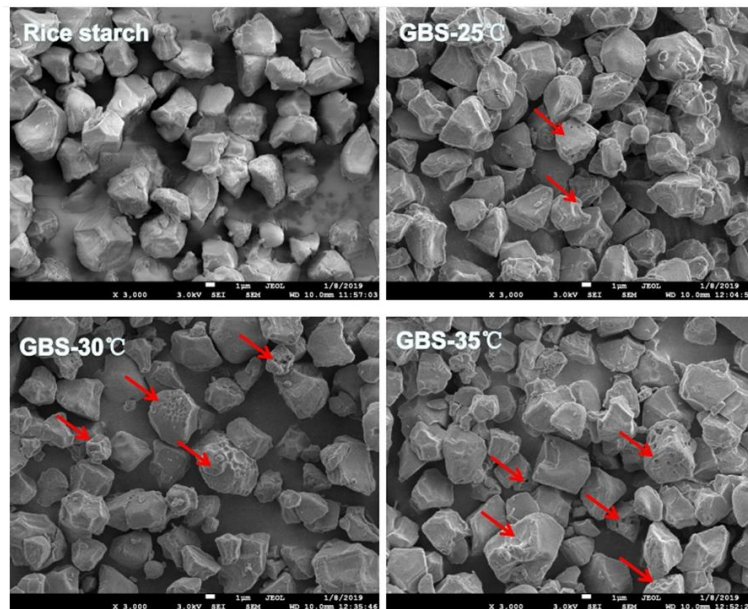
(Redín *et al.*, 2021)

(四) 發芽糙米的物理特性

示差熱掃描儀(differential scanning calorimetry, DSC)常用於評估澱粉的熱性質，特別是用以確定澱粉的糊化溫度範圍。此分析可測得起始溫度、峰值溫度及結束溫度，進而反映在糊化過程中，破壞澱粉結構中的氫鍵所需的熱能(Nascimento *et al.*, 2024)。Wang 等人(2020)利用 DSC 研究發芽米中澱粉的熱性質，結果顯示，隨著發芽溫度的升高，澱粉的糊化溫度亦隨之上升。此現象可歸因於發芽過程中 α -澱粉酶的活化，該酵素主要分解無定型區(amorphous region)，促使剩餘的結晶區域進行分子重組，形成排列更緊密且結構更穩定的結晶區，進而提升澱粉顆粒的熱穩定性，造成需要更多的熱能才能破壞其分子結構。

在稻米發芽過程中， α -澱粉酶的活性是決定澱粉水解程度的關鍵因素。Wang 等人(2020)指出，當發芽溫度達 35°C 時， α -澱粉酶的活性顯著高於發芽溫度 30°C 及 25°C 的組別。隨著發芽溫度的升高， α -澱粉酶的活性也隨之增強(活性範圍為 0.04–3.19 U/g)。酵素活性的提升加速了澱粉的水解作用，促進澱粉分解為結構較簡單的醣類，進而改變發芽糙米的物理與化學特性，包括質地與消化性。

透過掃描式電子顯微鏡(scanning electron microscope, SEM)觀察可發現(如圖六)，稻米在發芽過程中其澱粉顆粒的形態發生明顯變化。發芽後的澱粉顆粒呈現不規則且大小不一致的形態，且隨著發芽溫度的升高，其表面粗糙度也有所增加。此變化與 α -澱粉酶的活性提升密切相關，由於發芽過程中，酵素會滲透至澱粉顆粒內部進行水解作用，從而導致顆粒表面產生孔洞與裂縫。該研究也針對發芽糙米中米澱粉的粒徑分布進行分析。結果顯示，隨著發芽溫度越高，則形成更小、更不均勻的澱粉顆粒，這與 SEM 的研究結果相符(Wang *et al.*, 2020)。

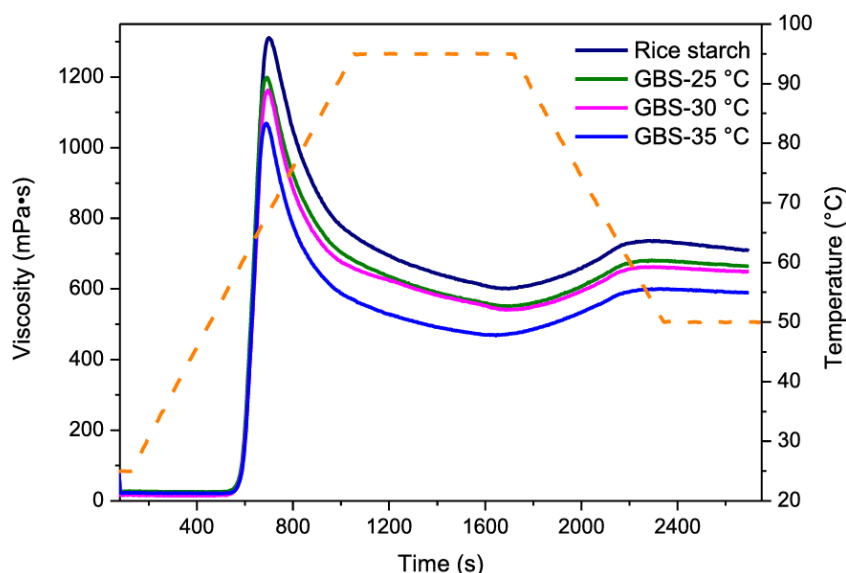


圖六、糙米與發芽糙米澱粉的掃描式電子顯微鏡(SEM)影像圖。

Fig. 6. SEM images of starches from native and germinated brown rice.

(Wang *et al.*, 2020)

糊化溫度是指澱粉顆粒開始膨脹並產生黏性的溫度，決定了澱粉基底產品的應用特性。根據圖七的糊化曲線圖，可觀察到發芽處理對米澱粉的糊化溫度雖略有影響，但整體糊化曲線與未發芽糙米相似，並且黏度有明顯下降的趨勢。此變化主要與內源性酵素對澱粉的水解作用有關，導致支鏈澱粉的降解與直鏈澱粉的釋放。此外，發芽處理降低了米澱粉的崩解值(breakdown value, BV)，BV 是指澱粉糊化過程中，當黏度達到峰值，在持續加熱以及剪切作用力之下，黏度下降的幅度。因此，BV 反映了澱粉膠體的穩定性，較高的 BV 代表澱粉在加熱後容易崩解，而較低的 BV 代表澱粉結構較為穩定，較不易受到熱和機械力等影響而崩解。此結果代表著發芽處理可增強澱粉的熱穩定性。此外，隨著發芽溫度的升高，澱粉的回凝程度減弱，可能與澱粉分子鏈之間的相互作用力下降有關。在發芽過程中，直鏈澱粉及支鏈澱粉的分子鏈長度縮短，降低了澱粉分子重新排列結晶的機會，進而影響其黏度與回凝特性(Wang *et al.*, 2020)。

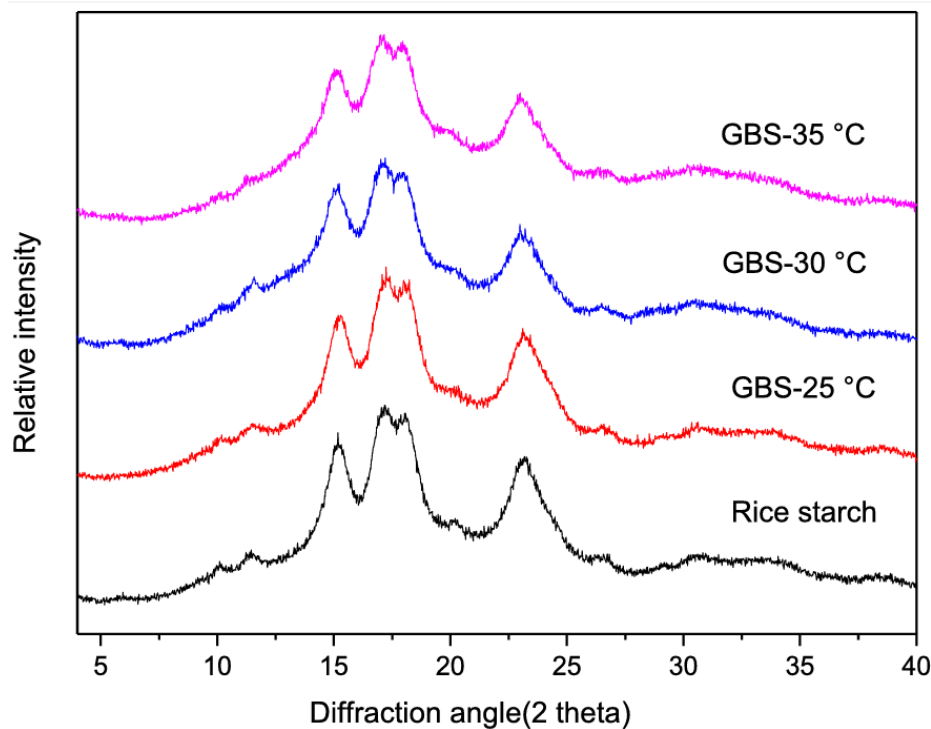


圖七、糙米與不同發芽條件之糙米之糊化曲線圖。

Fig. 7. Pasting curves of starch from brown rice and germinated brown rice under different germination conditions.

(Wang *et al.*, 2020)

X 射線繞射(X-ray Diffraction, XRD)分析可用於觀察澱粉的結晶結構(如圖八)，澱粉的結晶型態可依照繞射圖譜分為 A 型、B 型、C 型及 V 型結晶結構。天然米澱粉呈現典型的 A 型結晶結構，具有 15° 、 17° 、 18° 及 23.5° 等特徵繞射峰。Wang 等人(2020)研究發現，儘管發芽處理不會改變澱粉的主要結晶類型，但會顯著降低其相對結晶度。此現象可能是由於 α -澱粉酶作用於澱粉顆粒的結晶區域，破壞澱粉分子的雙螺旋結構以及分子間的排列，進而改變晶體結構並提升晶體表面能。這些變化不僅降低了結晶度，也改變了 XRD 圖譜中繞射峰的強度。此結果代表著發芽處理使澱粉結晶構造發生變化，需要更多熱能才可以破壞其增強的澱粉分子結構，進一步提高了澱粉分子的熱穩定性(Wang *et al.*, 2020)。



圖八、糙米與不同發芽條件之糙米之 X-ray 繞射圖譜。

Fig. 8. X-ray diffraction patterns of starch from brown rice and germinated brown rice under different germination conditions.

(Wang *et al.*, 2020)

發芽處理可顯著縮短糙米的烹煮時間(如表五)，此效果主要歸因於澱粉水解酶(包括 α -澱粉酶、 β -澱粉酶、去支酶及葡萄糖澱粉酶等)的作用，這些酵素能夠分解澱粉顆粒，破壞其內部結構，使其更容易吸水並加速糊化過程。Jiamyangyuen 與 Ooraikul (2008)的研究顯示，發芽糙米的烹煮時間較未發芽糙米顯著縮短，且隨著發芽時間的延長，其所需烹煮時間進一步減少。

表五、糙米與發芽糙米之烹煮特性

Table 5. Cooking properties of brown rice and germinated brown rice

Soaking time (h)	Germinating time (h)	Cooking time (min)	Width expansion (%)	Length expansion (%) ^{ns}	Water uptake %	Volume expansion %
6	Ungerminated	19.2	37.1 ^a ±1.7	18.9±0.74	74.4	67.4
	0	15.2	65.7 ^c ±2.5	19.1±0.1	74.1	73.7
	6	14.8	69.5 ^d ±1.6	18.0±0.0	71.8	74.0
	12	13.6	71.8 ^c ±2.8	19.0±0.1	70.6	66.4
	18	13.2	77.9 ^a ±1.3	18.5±0.2	68.7	63.6
12	24	12.8	78.0 ^a ±1.8	18.8±0.1	65.1	61.7
	0	14.8	66.5 ^c ±2.7	18.1±0.7	71.5	66.7
	6	14.2	76.1 ^b ±1.1	19.0±0.7	70.7	65.2
	12	13.6	77.0 ^{ab} ±0.1	19.0±0.0	70.1	64.1
	18	13.4	77.7 ^{ab} ±0.2	18.3±0.1	67.0	59.9
	24	12.8	78.6 ^a ±0.3	18.6±0.1	65.2	59.6

(Jiamyangyuen & Ooraikul, 2008)

(五) 發芽糙米之營養價值

稻穀經脫殼處理後可獲得糙米，其主要組成包括米糠層、胚芽及胚乳。然而，由於糙米之口感質地較為粗糙，降低了消費者接受程度。因此於現今之飲食文化中，往往透過精白處理製得白米，但同時也因此流失豐富的膳食纖維、維生素、礦物質及生物活性物質(Juliano & Tuanó, 2019)。發芽技術可助於米糠層之軟化，透過改善糙米的質地，提高消費者之接受度(Oliveira *et al.*, 2025)。發芽製程亦能顯著提升稻米之營養價值。一旦乾燥的稻穀浸漬於水中，會誘發其發芽之生理與生化反應，增強種子的代謝活性。在發芽過程中，種子消耗水分及氧氣，透過內源性酵素分解複雜結構之化合物為較簡單之結構，同時也透過內源性酵素將抗營

養物質分解，以促進營養成分之利用，供應種子發芽所需的養分(Wu *et al.*, 2013)。

Wu 等人(2013)的研究指出，發芽技術對於糙米中三大營養素的含量具有顯著影響。首先，發芽後糙米之總澱粉含量下降，並且可溶性醣類含量增加，以提供發芽幼苗所需的能量。根據 Veluppillai 等人(2009)之研究，發芽過程可顯著提升糙米內游離胺基酸與可溶性蛋白質之含量。然而，對於游離脂肪酸之含量則受到內源性脂解酶的水解作用與稻穀內的轉化作用所影響，在發芽過程中呈現上升或下降(Wu *et al.*, 2013)。如表六，根據 Ukpong 等人(2023)之研究指出，發芽技術可顯著提升糙米之總膳食纖維含量，這可能是發芽過程中透過生理機制以合成新生的細胞壁所致(Lee *et al.*, 2019)。植酸(phytic acid)作為一種螯合劑，會與稻穀中之鐵、鋅和鈣等二價金屬離子形成強複合物，影響礦物質之生物利用率(Kumar *et al.*, 2017)。此外，植酸可透過靜電交互作用力與蛋白質形成複合物，導致酵素之反應活性、蛋白質水解消化率以及溶解度等降低(Cheryan & Rackis, 2009)。透過發芽技術，促進內源性植酸酶之活性提升，進而降低了稻米中之植酸含量，從而增強礦物質之生物利用率(Ukpong *et al.*, 2023)。

發芽可促進內源性酵素之活化作用，顯著改變糙米之營養成分，提高其生物活性成分含量(如表七)，並改善口感與消化性。根據 Oliveira 等人(2025)的研究，發芽可提升糙米中多種生物活性化合物的含量，特別是 GABA、酚類物質(如阿魏酸、辛辣酸及對香豆酸)等。這可能是透過發芽過程中內源性酵素分解營養成分，破壞細胞結構，釋放出游離酚類與複合酚類化合物，進一步提升總酚類化合物含量(Wu *et al.*, 2013)。此外，在發芽過程中受到外在逆境因子所誘導，促進 GAD 的活性提升，增加其催化麩胺酸轉化為 GABA 的能力。GABA 為一種非蛋白質類胺基酸，廣泛存在於植物、動物與微生物中。在人體內作為中樞神經系統的抑制性神經傳導物質，具有舒緩情緒、調節生理晝夜節律和焦慮狀態等生理功能(Koh *et al.*, 2023)。



表六、不同稻米品種之白米、糙米以及發芽糙米之成分含量

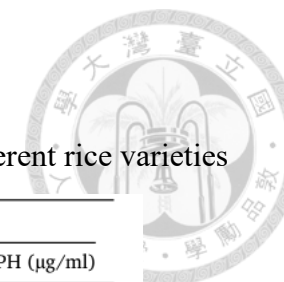
Table 6. Composition content of white rice, brown rice, and germinated brown rice from different rice varieties

Sample	Proximate, energy, total starch, amylose, total reducing Sugars Compositions (%)									
	Protein	Ash	Dietary fibre	Moisture	Fats	Total CHO	Energy (J)	Total Starch	Amylose	Total Reducing Sugars
FARO 44 CULTIVAR										
NMR	10.16 ^b ±1.17	1.26 g ± 0.01	5.20 ^f ±1.05	10.46 ^b ±1.11	1.00 ^c ±0.00	77.15 ^a ±5.41	1,498,876.16 ^b ±210.09	76.06 ^a ±4.21	35.87 ^a ±2.31	2.16 ^f ±0.95
NBR	10.99 g ± 1.20	1.32 ^g ±0.03	8.20 ^e ±1.14	12.50 ^a ±1.20	2.46 ^b ±0.09	72.49 ^b ±4.99	1,489,755.04 ^e ±190.09	67.09 ^b ±5.21	35.10 ^a ±3.01	1.67 ^f ±0.10
GBR ₁₂	11.56 ^f ±1.31	1.97 ^e ±0.07	8.91 ^{bc} ±1.11	10.65 ^b ±1.26	2.98 ^a ±0.12	70.83 ^{bc} ±4.10	1,491,093.92 ^d ±187.11	59.18 ^c ±4.90	25.68 ^{cd} ±2.57	3.50 ^e ±0.97
GBR ₂₄	11.87 ^{ef} ±1.22	2.74 ^d ±0.08	9.00 ^b ±1.12	10.98 ^b ±1.20	2.95 ^a ±0.10	65.91 ^{de} ±5.00	1,412,811.28 ^k ±219.15	58.07 ^{cd} ±3.11	24.17 ^d ±2.70	10.11 ^{bc} ±1.20
GBR ₃₆	12.00 ^{de} ±1.10	2.80 ^d ±0.10	9.29 ^a ±1.16	10.60 ^b ±1.30	2.95 ^a ±0.13	63.00 ^e ±4.23	1,366,285.20 ^l ±167.23	56.00 ^d ±4.96	21.95 ^e ±2.29	5.71 ^d ±1.27
ĪGBR	11.81	2.50	9.07	10.74	2.96	66.58	1,423,396.80	57.75	23.93	6.44
ĪF ₄₄	11.32 _C	2.02 _B	8.12 _B	11.04 _A	2.47 _A	69.88 _A	1,451,764.32 _B	63.28 _A	28.55 _A	4.63 _B
FARO 57 CULTIVAR										
NMR	10.18 ^b ±1.17	1.26 g ± 0.01	5.25 ^f ±1.05	10.46 ^b ±1.10	1.00 ^c ±0.00	76.88 ^a ±4.98	1,494,692.16 ^c ±210.09	76.10 ^a ±5.12	36.01 ^a ±2.31	2.10 ^f ±0.95
NBR	11.05 g ± 1.19	1.38 ^f ±0.04	8.25 ^e ±1.14	12.48 ^a ±1.20	2.35 ^b ±0.09	72.45 ^b ±5.10	1,485,947.60 g ± 189.90	67.03 ^b ±4.57	35.05 ^a ±2.68	1.79 ^f ±0.14
GBR ₁₂	14.54 ^b ±1.40	3.36 ^c ±0.12	9.23 ^a ±1.18	10.90 ^b ±1.23	2.90 ^a ±0.10	71.09 ^{bc} ±4.11	1,542,306.08 ^a ±233.00	60.92 ^c ±4.98	28.14 ^b ±2.71	5.14 ^d ±1.10
GBR ₂₄	14.77 ^{ab} ±1.10	3.82 ^b ±0.12	9.25 ^a ±1.19	10.88 ^b ±1.23	2.92 ^a ±0.10	66.99 ^{cd} ±4.12	1,478,290.88 ⁱ ±190.51	57.24 ^c ±5.17	26.72 ^c ±2.46	11.23 ^{ab} ±1.81
GBR ₃₆	15.01 ^a ±1.51	3.98 ^a ±0.11	9.31 ^a ±1.17	10.86 ^b ±1.27	2.93 ^a ±0.12	64.21 ^{de} ±5.00	1,436,158.00 ^j ±214.93	55.80 ^d ±3.97	22.05 ^e ±2.59	8.88 ^c ±1.52
ĪGBR	14.77	3.72	9.26	10.88	2.92	67.43	1,485,571.04	57.99	25.64	8.42
ĪF ₅₇	13.11 _A	2.76 _A	8.26 _A	11.12 _A	2.42 _A	70.32 _A	1,487,495.68 _A	63.42 _A	29.59 _A	5.83 _{AB}
NERICA-8 CULTIVAR										
NMR	10.16 ^b ±1.16	1.24 g ± 0.01	5.20 ^f ±1.06	10.46 ^b ±1.12	1.05 ^c ±0.00	77.00 ^a ±5.71	1,498,248.56 ^b ±200.00	76.08 ^a ±4.52	35.60 ^a ±2.31	2.00 ^f ±0.88
NBR	11.00 g ± 1.23	1.33 ^g ±0.05	8.10 ^e ±1.15	12.45 ^a ±1.20	2.33 ^b ±0.07	72.57 ^b ±5.00	1,486,366.00 ^f ±216.01	67.00 ^b ±4.38	34.00 ^a ±2.81	1.71 ^f ±0.02
GBR ₁₂	12.03 ^{de} ±1.26	1.95 ^e ±0.09	8.61 ^d ±1.15	10.81 ^b ±1.25	2.53 ^b ±0.09	71.00 ^{bc} ±4.21	1,484,859.76 ^h ±226.08	60.95 ^c ±5.00	29.12 ^b ±2.74	6.15 ^d ±0.97
GBR ₂₄	12.23 ^d ±1.29	2.75 ^d ±0.10	8.72 ^{cd} ±1.19	10.87 ^b ±1.20	2.51 ^b ±0.10	67.94 ^{cd} ±4.88	1,436,241.68 ^j ±195.40	57.65 ^c ±5.48	27.45 ^{bc} ±2.88	12.55 ^a ±1.99
GBR ₃₆	12.70 ^c ±1.20	2.78 ^d ±0.10	8.93 ^b ±1.08	10.79 ^b ±1.23	2.52 ^b ±0.13	62.01 ^e ±4.09	1,345,239.68 ^m ±177.84	54.91 ^d ±4.46	22.01 ^e ±3.02	9.01 ^c ±1.17
ĪGBR	12.32	2.49	8.75	10.82	2.52	66.98	1,422,099.76	57.84	26.19	9.24
ĪN ₈	11.62 _B	2.01 _B	7.91 _C	11.08 _A	2.19 _B	70.10 _A	1,450,174.40 _C	63.32 _A	29.64 _A	6.28 _A

Each value is the mean ± standard deviation of three replicates. Values with the same superscripts or subscripts in each column are not significant difference at $p>0.05$.

NMR= non-germinated parboiled milled rice; NBR= non-germinated brown rice; GBR= germinated brown rice; subscripts 12, 24 and 36 are germination durations (h); ĪGBR = means of germinated brown rice; ĪF₄₄, ĪF₅₇ and ĪN₈ = means of each cultivar.

(Ukpong *et al.*, 2023)



表七、不同稻米品種之白米、糙米以及發芽糙米之生物活性物質含量及抗氧化能力

Table 7. Bioactive compound content and antioxidant activity of white rice, brown rice, and germinated brown rice from different rice varieties

Sample	Bioactive compounds and antioxidant activity			
	GABA (mg/100 g)	TPC (mgGAE/g dry weight)	TFC (mgCE/g dry weight)	DPPH (μg/ml)
FARO 44 CULTIVAR				
NMR	0.60 ⁱ ±0.02	0.50 ^c ±0.03	0.02 ^b ±0.01	0.05 ^h ±0.02
NBR	2.10 g ± 0.07	1.01 ^b ±0.08	0.10 ^a ±0.05	1.25 g ± 0.09
GBR ₁₂	3.92 ^f ±1.00	1.10 ^b ±0.07	0.09 ^{ab} ±0.05	2.97 ^f ±1.00
GBR ₂₄	5.98 ^d ±1.09	1.27 ^a ±0.06	0.08 ^{ab} ±0.01	3.10 ^{ef} ±1.09
GBR ₃₆	7.90 ^b ±1.22	1.30 ^a ±0.09	0.12 ^a ±0.04	5.61 ^c ±1.23
ĀGBR	5.93	1.22	0.10	3.89
ĀF ₄₄	4.10 _B	1.04 _A	0.08 _A	2.60 _B
FARO 57 CULTIVAR				
NMR	0.65 ⁱ ±0.04	0.55 ^c ±0.03	0.03 ^b ±0.01	0.07 ^h ±0.02
NBR	2.57 g ± 0.15	1.00 ^b ±0.01	0.08 ^{ab} ±0.03	1.93 g ± 0.08
GBR ₁₂	5.48 ^{de} ±1.09	1.06 ^b ±0.07	0.06 ^{ab} ±0.02	4.95 ^d ±1.09
GBR ₂₄	6.90 ^c ±1.21	1.08 ^b ±0.09	0.08 ^{ab} ±0.03	5.87 ^c ±1.15
GBR ₃₆	9.10 ^a ±1.74	1.07 ^b ±0.07	0.10 ^a ±0.04	9.05 ^a ±1.10
ĀGBR	7.16	1.07	0.08	6.62
ĀF ₅₇	4.94 _A	0.95 _A	0.07 _A	4.37 _A
NERICA-8 CULTIVAR				
NMR	0.46 ⁱ ±0.05	0.50 ^c ±0.04	0.02 ^b ±0.00	0.05 ^h ±0.02
NBR	1.85 ^h ±0.12	0.95 ^{bc} ±0.09	0.05 ^{ab} ±0.02	1.80 g ± 0.08
GBR ₁₂	3.57 ^f ±0.99	1.06 ^b ±0.08	0.08 ^{ab} ±0.02	4.00 ^{de} ±1.10
GBR ₂₄	5.20 ^e ±1.00	1.07 ^b ±0.08	0.08 ^{ab} ±0.03	4.55 ^d ±1.03
GBR ₃₆	7.27 ^c ±1.10	1.08 ^b ±0.06	0.11 ^a ±0.02	7.38 ^b ±1.02
ĀGBR	5.35	1.07	0.09	5.31
ĀN ₈	3.67 _C	0.93 _A	0.07 _A	1.43 _C

Each value is the mean ± standard deviation of three replicates. Values with the same superscripts or subscripts in each column are not significant difference at $p>0.05$.

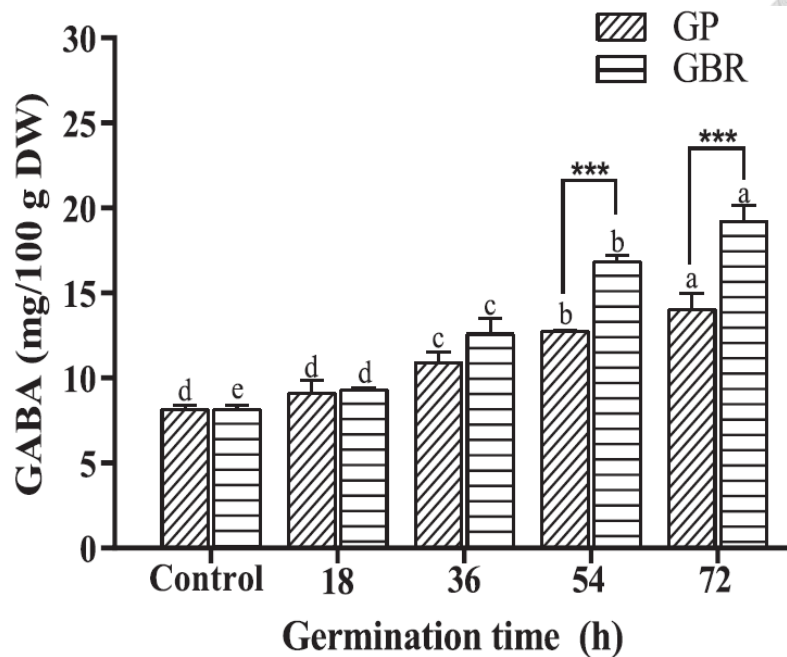
NMR= non-germinated parboiled milled rice; NBR= non-germinated brown rice; GBR= germinated brown rice; subscripts 12, 24 and 36 are germination durations (h); ĀGBR = means of germinated brown rice; ĀF₄₄, ĀF₅₇ and ĀN₈ = means of each cultivar.

TPC = Total phenolic content; TFC = Total flavonoid content; DPPH = 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl assay; GABA = Gamma amino butyric acid.

(Ukpong *et al.*, 2023)

根據 Miura 等人(2006)之研究可得知，發芽糙米可透過調節膽固醇之代謝作用，例如抑制 HDL-C 濃度的下降，以及減緩 LDL-C 之氧化作用，進而降低罹患高膽固醇血症之風險。此外，發芽糙米已被證實具有多種健康效益，包括抗高血脂症、抗高血壓、降低癌症罹患率，以及減少糖尿病、心血管疾病和阿茲海默症等疾病風險(Wu *et al.*, 2013)。這些生理功能可能歸因於發芽糙米較高之生物活性成分，例如膳食纖維、GABA、 γ -穀維素以及其他抗氧化成分。

以稻穀或糙米作為發芽原料所產生的營養價值並不相同。發芽製程包括浸漬、發芽及乾燥等階段，其中在浸漬與發芽過程中，營養素會由稻穀及米糠層擴散至胚乳內(Bhar *et al.*, 2022)。因此，不同的原料選擇會直接影響最終產品的營養價值。根據 Wu 等人(2022)的研究，以糙米進行發芽之 GABA 含量在發芽 36 小時後明顯高於稻穀發芽組別(如圖九)。推測原因可能是稻穀在發芽過程中會阻礙水分吸收，延緩發芽的生理反應，進而降低 GAD 的活性，造成 GABA 的合成量下降。然而，若比較總酚類含量、總黃酮類含量及抗氧化能力等指標，則稻穀發芽組別皆優於糙米發芽組別(如表八)。推測可能是稻穀具有保護米粒免於環境因素影響的功能，減少了營養素的降解或流失(Wu *et al.*, 2022)。然而，利用稻穀進行發芽，其成品之碎米率較高。因此，大多數業者會選擇使用糙米進行發芽，以提高整米率。由於本研究會將原料磨成米穀粉，因此碎米率並不影響最終成品。同時，考量到原料之營養價值，故本研究使用稻穀進行發芽程序。



圖九、稻穀(GP)及糙米(GBR)在 18 至 72 小時發芽過程中的 GABA 含量。

Fig. 9. The GABA contents of the brown rice germinated in the form of paddy (GP) and the brown rice (GBR) for 18–72 h germination.

***($p < 0.001$) was considered statistically extremely significant between GP and GBR at the same germination time.

(Wu *et al.*, 2022)



表八、稻穀及糙米在 18 至 72 小時發芽過程中的酚類化合物及黃酮類化合物含量

Table 8. The phenolic and flavonoids content of the rice germinated in the form of paddy and brown rice for 18 – 72 h germination

Sample	Germination Time (h)	Phenolics (mg GAE/100 g DW)			Flavonoids (mg RE/100 g DW)		
		Free	Bound	Total	Free	Bound	Total
GP	Control	52.43 ± 0.91 ^{dE}	16.45 ± 0.28 ^{dGH}	68.88 ± 1.02 ^{dH}	28.54 ± 1.65 ^{cG}	20.74 ± 0.39 ^{cF}	49.28 ± 1.31 ^{cG}
	18	75.19 ± 0.63 ^{cD}	15.54 ± 0.69 ^{dH}	90.73 ± 0.40 ^{cG}	47.15 ± 1.40 ^{bC}	24.33 ± 0.71 ^{bDE}	71.48 ± 0.93 ^{bD}
	36	113.47 ± 4.09 ^{aA}	22.33 ± 0.24 ^{cF}	135.80 ± 4.06 ^{aB}	61.71 ± 0.83 ^{aA}	33.26 ± 2.09 ^{aB}	94.97 ± 2.82 ^{aA}
	54	110.84 ± 1.69 ^{aA}	27.96 ± 1.23 ^{bE}	138.80 ± 0.93 ^{aA}	55.23 ± 1.83 ^{aB}	32.12 ± 0.25 ^{aBC}	87.35 ± 1.93 ^{aB}
	72	81.58 ± 1.33 ^{bC}	34.21 ± 0.48 ^{aD}	115.79 ± 1.29 ^{bF}	30.85 ± 1.05 ^{cF}	24.87 ± 0.20 ^{bD}	55.72 ± 1.02 ^{cF}
GBR	Control	52.43 ± 0.91 ^{dE}	16.45 ± 0.28 ^{dGH}	68.88 ± 1.02 ^{eH}	28.54 ± 1.65 ^{cG}	20.74 ± 0.39 ^{dF}	49.28 ± 1.31 ^{cG}
	18	72.49 ± 0.96 ^{cD}	17.44 ± 0.94 ^{dG}	89.93 ± 0.43 ^{dG}	33.98 ± 1.18 ^{bE}	31.20 ± 0.30 ^{bC}	65.18 ± 1.22 ^{bE}
	36	85.87 ± 1.84 ^{aB}	37.63 ± 0.77 ^{cC}	123.51 ± 1.59 ^{bD}	44.40 ± 1.48 ^{aD}	37.04 ± 1.12 ^{aA}	81.43 ± 2.55 ^{aC}
	54	80.91 ± 1.37 ^{bC}	48.18 ± 0.54 ^{aA}	129.08 ± 1.68 ^{aC}	35.01 ± 0.44 ^{bE}	32.43 ± 0.93 ^{bBC}	67.45 ± 0.67 ^{bE}
	72	73.19 ± 1.21 ^{cD}	45.66 ± 0.46 ^{bB}	118.86 ± 1.62 ^{cE}	20.41 ± 0.74 ^{dH}	23.14 ± 0.49 ^{cE}	43.54 ± 1.21 ^{dH}

GP: the rice germinated in the form of paddy, GBR: the rice germinated in the form of brown rice. Values are presented as mean ± standard deviation (n = 4). Different lowercases indicate significant differences of the data among the different germination hours in the same group (GP or GBR) ($p < 0.05$), and different capital letters indicate significant differences of the data between germinated paddy and germinated brown rice in the same column ($p < 0.05$). GAE: gallic acid equivalent. RE: rutin equivalent. DW: dry basis weight.

(Wu *et al.*, 2022)



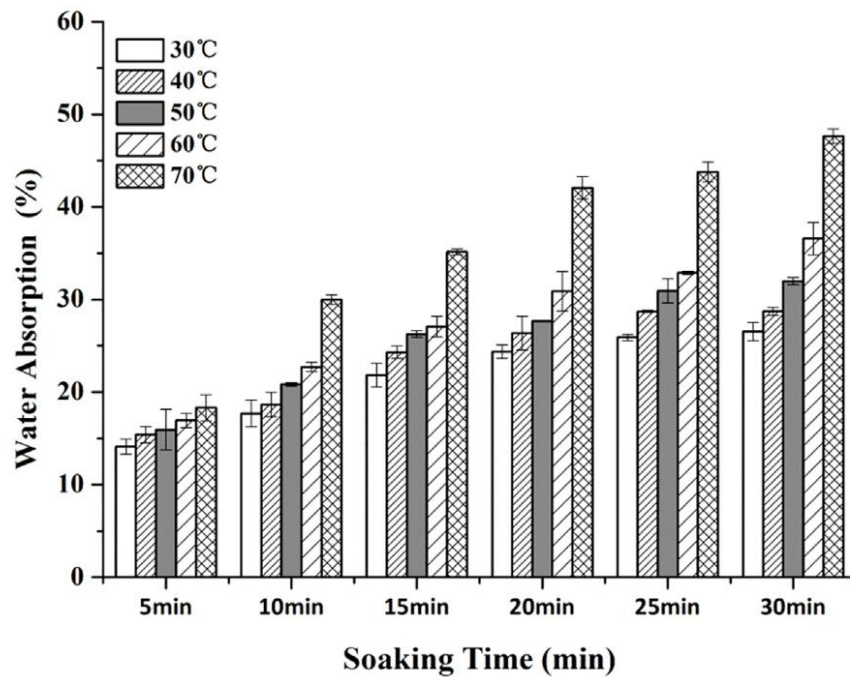
四、預熟糙米

預熟製程(parboiling process)為一種經過浸漬、蒸煮及乾燥的穀物加工製程，屬於水熱處理(hydrothermal treatment)的一種。此製程旨在提升稻米的營養價值、加工特性及健康效益(Bhar *et al.*, 2022)。在加工特性方面，預熟處理能改善稻米的感官性質、提高整米率，並提升稻米的儲藏穩定性(Jittanit & Angkaew, 2020)。除了改善糙米的粗糙口感外，預熟製程還能提升稻米的營養價值，使其優於精白米。即使精白米為全球最常見的加工米種類，但預熟處理方式廣泛應用於亞洲、非洲和部分西方國家(Taleon *et al.*, 2020)。

(一) 預熟加工技術

預熟米的製程主要包含浸漬、蒸煮與乾燥三個製程(Derycke *et al.*, 2005)。首先，會先將稻穀浸漬於水中，使水分滲透至澱粉顆粒內部，並在米粒表面與中心形成水分梯度，促使水溶性化合物，如礦物質與水溶性維生素，由稻殼與米糠擴散至胚乳表層(Bhar *et al.*, 2022)。浸漬過程的水溫對水合作用有顯著影響(Li *et al.*, 2024)，浸漬初期(5 分鐘)不同溫度下的稻米含水量差異不大，但隨著時間延長，高溫組別(特別是 60°C 與 70°C)，水分滲透速度加快，並於 20 分鐘後達穩定狀態。因此，如圖十，溫度越高，水分滲透的速度就越快。在較低溫度下，水合作用則受到限制(Zhu *et al.*, 2019)。透過核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)之研究(如圖十一)，隨著浸漬溫度和時間的增加，使得更多水分滲透到穀物中心並形成更均勻的水分分布(Zhu *et al.*, 2019)。此外，米粒內的裂縫是水分滲透的主要通道，研究顯示，稻米之垩白結構與低水分含量會增加寬裂縫形成的可能性(Zhang *et al.*, 2017)。利用 SEM 分析發現(如圖十二)，浸漬之溫度條件亦影響著米粒中裂縫形成，低溫條件下裂縫較寬，隨著浸漬溫度的提升，裂縫變得更細且密集，使組織更為疏鬆(Li *et al.*, 2024；Zhu *et al.*, 2019)。當稻米之水分含量達到 25-35%時，則進行

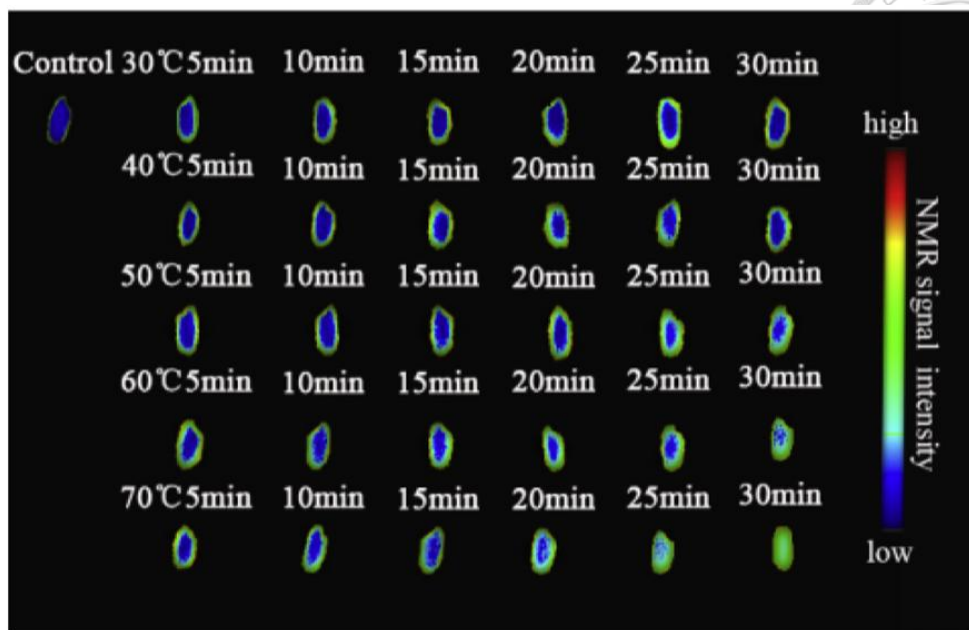
蒸煮，此過程可提高水的動能，使營養素於澱粉糊化過程中進入米粒內部。蒸煮完成後，經乾燥使糊化澱粉進行回凝作用(retrogradation)，再次結晶形成緻密結構，提高米粒硬度，使營養素不會因為脫殼、碾白等製程而流失，進而保留較多的營養成分(Bhar *et al.*, 2022)。



圖十、不同浸漬條件下吸水性之變化。

Fig. 10. Changes in water absorbency at different soaking conditions.

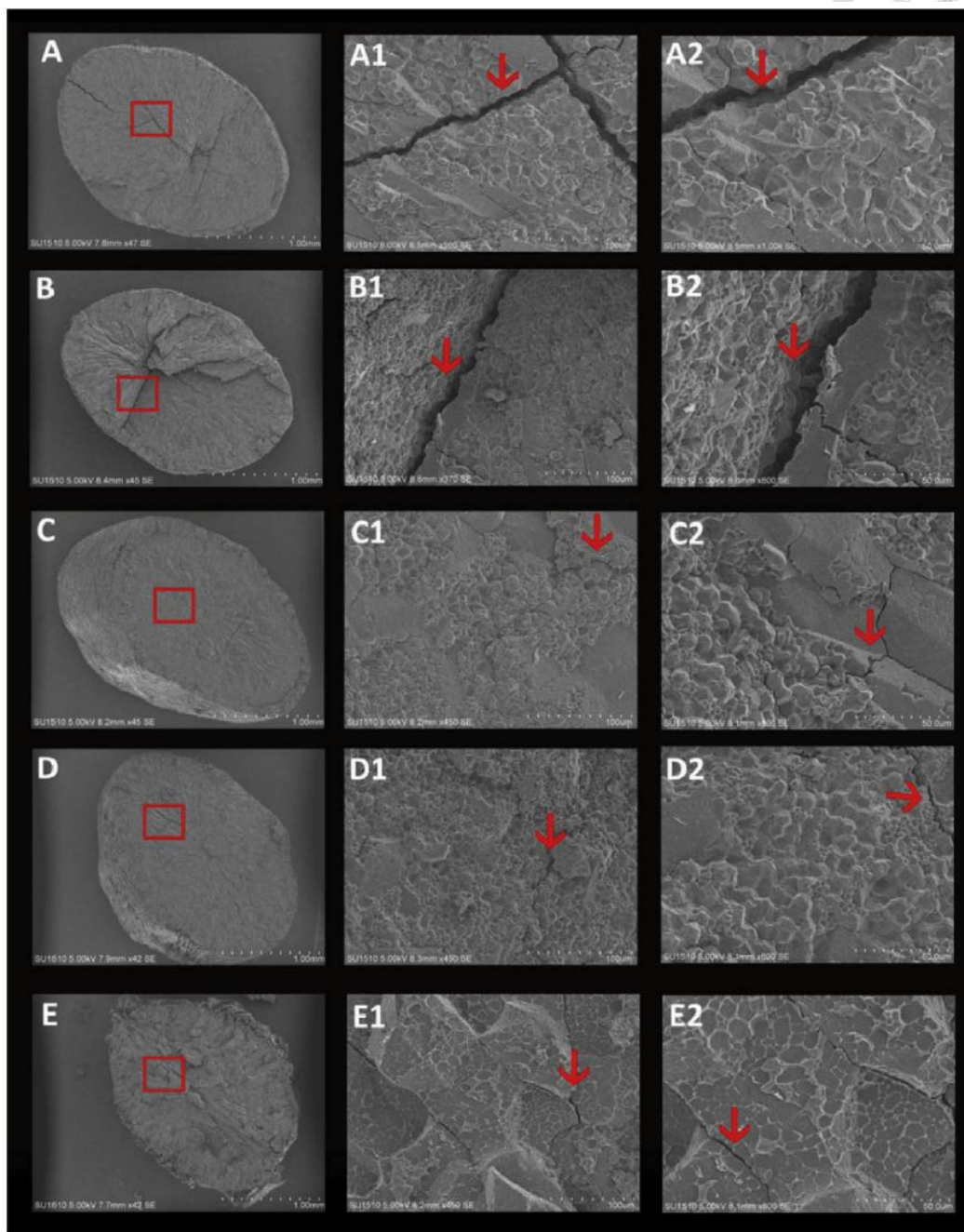
(Zhu *et al.*, 2019)



圖十一、不同溫度與時間下稻米浸漬的磁振共振(NMR)影像圖。

Fig. 11. NMR images of rice soaking at different temperatures and times.

(Zhu *et al.*, 2019)



圖十二、於不同溫度下浸漬後的稻米橫截面。A–E 對應於經 30–70°C 浸漬 30 分鐘後稻米橫截面。比例尺：A–E 為 1 mm，A1–E1 為 100 μm，A2–E2 為 50 μm。

Fig. 12. Transverse sections of rice grains soaked at different temperatures. A–E correspond to transverse sections of rice grains after soaking at 30–70°C for 30 min. Scale bars: 1 mm for A–E, 100 μm for A1–E1, and 50 μm for A2–E2.

(Zhu *et al.*, 2019)



(二) 預熟米之物理特性

預熟米在物理性質上呈現明顯變化，特別是在顏色、澱粉結構和晶體型態方面。不同預熟條件下的物化性質分析如表九。浸漬過程中，稻殼與米糠層的色素會向胚乳內部擴散，改變米粒的顏色。此外，由於高溫與高壓處理，發生酵素性褐變與非酵素性梅納反應，進而影響米粒的外觀色澤(Villanova *et al.*, 2017)。根據 Onmankhong 等人(2020)之研究顯示，黃色度(yellowness)隨著浸漬溫度與時間的增加而上升，蒸煮溫度的提高同樣促進黃色度的增加。除了色澤性質以外，垩白程度亦為稻米重要的感官特性。垩白米粒的定義為米粒中不透明的白色區域佔總面積 50%以上的米粒。研究顯示，預熟製程可顯著降低稻米的垩白程度，且垩白程度取決於預熟製程中過熱蒸氣之溫度(Jittanit & Angkaew, 2020)。由於食品的外觀對消費者的接受度具有直接影響，因此在預熟製程中，應在提升營養與生理功能性的同時，適當控制色澤變化，以確保產品的市場接受度。

Jittanit 和 Angkaew (2020)的研究指出，經過預熟製程後，不同品種的稻米整米率均提高了 50%以上。此結果可能源於預熟過程中，澱粉在糊化作用下，直鏈澱粉由澱粉顆粒中膨潤並釋出於外部空間形成網狀結構。同時，水熱處理使蛋白質發生變性，進而促進米粒內部裂縫的密合。隨後，乾燥處理使糊化澱粉進行回凝作用，進一步提升稻米的整體硬度，並有助於提高稻米的精白產率。

烹煮後的質地特性為重要的感官性質。根據 Onmankhong 和 Sirisomboon (2021)的研究顯示，預熟米於烹煮過後，硬度(hardness)及韌度(toughness)均顯著高於白米飯。此結果的原因，除了澱粉的結晶重排作用以及抗性澱粉的形成外，稻米中的蛋白質也造就了此質地特性。由於蛋白質的玻璃轉化溫度低於澱粉，在糊化過程中，蛋白質的結構變化會阻止水分向澱粉內部構造遷移。此外，預熟過程中的蛋白質水解及變性作用，促使雙硫鍵形成網狀構造，進而提升米粒結構的硬度。由於上述原因，預熟米在烹煮過後的硬度及韌度均高於白米。



表九、不同預熟條件之物化性質分析

Table 9. Physicochemical properties analysis under different parboiled conditions

Rice variety	Treatment conditions	Moisture content (% w.b.)	Head rice yield (%)	Color			
				L*	a*	b*	ΔE*
Ayutthaya 1	Raw paddy	12.5 ^b ± 0.42	33.54 ^a ± 1.09	78.71 ^e ± 0.62	-0.72 ^a ± 0.05	13.65 ^a ± 0.26	—
	120 °C	25.4 ^d ± 0.90	69.82 ^d ± 0.39	46.64 ^c ± 0.44	10.82 ^c ± 0.20	31.19 ^c ± 0.62	38.33
	140 °C	17.8 ^c ± 0.52	67.46 ^c ± 0.19	45.35 ^b ± 0.25	12.60 ^d ± 0.25	31.89 ^c ± 0.42	40.29
	160 °C	9.8 ^a ± 0.46	65.18 ^b ± 0.30	42.73 ^a ± 0.33	15.01 ^e ± 0.55	31.25 ^c ± 0.72	43.03
	Conventional parboiling	10.1 ^a ± 0.10	67.23 ^c ± 0.15	52.16 ^d ± 1.25	6.10 ^b ± 0.57	27.62 ^b ± 0.23	30.77
Khao Bahn Nah 432	Raw paddy	12.2 ^b ± 0.07	10.20 ^a ± 0.84	78.93 ^e ± 0.38	-0.77 ^a ± 0.13	13.02 ^a ± 0.26	—
	120 °C	20.7 ^d ± 0.40	58.20 ^c ± 3.56	41.97 ^b ± 1.01	10.17 ^c ± 0.30	26.25 ^b ± 0.66	40.75
	140 °C	16.8 ^c ± 0.01	52.07 ^{b,c} ± 6.86	44.71 ^c ± 1.22	11.89 ^d ± 0.24	30.29 ^d ± 0.85	40.37
	160 °C	13.1 ^b ± 0.03	50.79 ^{b,c} ± 4.43	40.87 ^a ± 0.99	15.00 ^e ± 0.42	29.17 ^c ± 0.76	44.25
	Conventional parboiling	9.1 ^a ± 0.01	46.94 ^b ± 1.62	54.37 ^d ± 1.23	5.55 ^b ± 0.40	25.64 ^b ± 0.56	28.33
Plai Ngahm Prachin Buri	Raw paddy	13.3 ^b ± 0.49	6.19 ^a ± 0.75	77.23 ^c ± 0.44	-0.75 ^a ± 0.18	12.60 ^a ± 0.30	—
	120 °C	23.8 ^c ± 0.30	69.18 ^d ± 0.10	43.86 ^a ± 1.21	9.56 ^c ± 0.48	27.75 ^c ± 0.65	38.08
	140 °C	14.4 ^b ± 0.03	66.67 ^c ± 0.55	42.75 ^a ± 1.05	11.10 ^d ± 0.33	29.07 ^d ± 0.82	40.01
	160 °C	8.1 ^a ± 0.85	67.17 ^c ± 0.57	42.19 ^a ± 1.28	12.94 ^e ± 0.52	30.98 ^e ± 0.85	41.88
	Conventional parboiling	9.2 ^a ± 0.05	41.74 ^b ± 1.16	55.44 ^b ± 1.28	5.28 ^b ± 0.48	26.61 ^b ± 0.49	26.60
Prachin Buri 2	Raw paddy	12.0 ^a ± 0.42	29.46 ^a ± 0.65	75.38 ^c ± 0.60	-0.55 ^a ± 0.06	13.02 ^a ± 0.22	—
	120 °C	24.4 ^c ± 0.77	70.25 ^d ± 0.27	42.89 ^a ± 1.10	9.54 ^c ± 0.33	27.15 ^c ± 0.62	36.83
	140 °C	16.2 ^b ± 0.51	69.59 ^{c,d} ± 3.17	41.26 ^a ± 0.99	10.61 ^d ± 0.29	27.02 ^c ± 0.49	38.53
	160 °C	13.3 ^a ± 0.23	66.64 ^c ± 2.26	44.13 ^a ± 0.87	11.54 ^e ± 0.56	29.85 ^d ± 0.82	37.49
	Conventional parboiling	11.1 ^a ± 0.16	60.93 ^b ± 1.48	55.33 ^b ± 1.26	5.35 ^b ± 0.55	25.84 ^b ± 0.25	24.51

Remark: Mean (±SD) values in the same column and same variety followed by different letters are significantly ($p < 0.05$) different.

(Jittanit & Angkaew, 2020)

預熟米的澱粉經過水合作用、加熱後達到糊化溫度以上，隨後在冷卻與乾燥過程中發生回凝作用，使澱粉重新結晶(Derycke *et al.*, 2005)。在此過程中，預熟米的晶體結構也產生變化，如表十，原本主要為 A 型結晶的稻米，經蒸煮與乾燥製程後轉變為 A 型、B 型與 V 型之複合結構(Derycke *et al.*, 2005)。其中，B 型結晶結構為糊化澱粉進行回凝作用所形成，而 V 型結構則可能歸因於直鏈澱粉-脂質複合物之形成(Dutta *et al.*, 2016)。此外，蒸煮條件的強度影響最終晶型分布，例如輕度蒸煮(112°C，90 秒)主要保留 A 型結晶，然而較高溫度(121°C，360 秒)則會增加 V 型結晶的比例。澱粉之結晶結構決定了預熟米之最終質地(Derycke *et al.*, 2005)。此外，根據 Yin 等人(2023)之研究結果表示，預熟製程之條件中，高溫浸泡或長時間蒸煮可降低升糖指數(glycemic index, GI)，當預熟米在 120°C 之下蒸煮 10 分鐘，其 GI 值為 61.19，屬於中 GI 範圍(56-69)。這可能是由於預熟處理後，米澱粉內部形態變為緊密且光滑，進而影響其消化率(Yin *et al.*, 2021)。此外，根據 Guo 和 Kong (2022)之研究，認為水熱處理促進 V 型晶體之形成，可提高澱粉之抗消化性，進而助於餐後血糖之調節。

表十、非預熟、輕度預熟及重度預熟稻米之相對結晶度(%)

Table 10. Relative crystallinities (%) of the non-parboiled, mildly and severely parboiled rice

	Sample	A-type (%)	V _h -type (%)	B-type (%)
Puntal	Non-parboiled	34	4	0
	Mildly parboiled	15	7	3
	Severely parboiled	3	12	8
Jacinto	Non-parboiled	41	3	3
	Mildly parboiled	21	7	6
	Severely parboiled	13	10	7

(Derycke *et al.*, 2005)



(三) 預熟米之營養價值

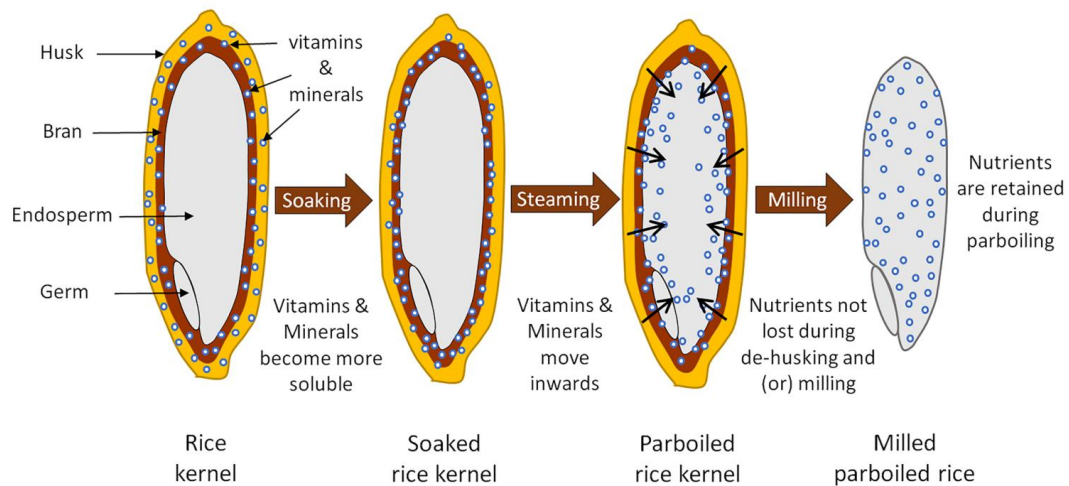
預熟製程主要包含浸漬、蒸煮及乾燥等三個主要程序，稻米經由預熟製程後，其營養成分、抗氧化活性、總酚類含量與類黃酮含量等方面均顯示出顯著的改善。這是由於營養素在預熟製程中，會從稻殼及米糠層擴散進入胚乳(如圖十三)。亦即預熟米的加工方式能提高營養素的遷移與保留，使其比一般糙米與白米含有更多的膳食纖維、不飽和脂肪、維生素、礦物質與酚類化合物等(Bhar *et al.*, 2022)。

根據 Bagchi 等人(2023)的研究指出，在不同的稻米加工方式中，蛋白質含量的結果顯示出預熟米的蛋白質含量最高。相比之下，其他形式加工米之蛋白質含量皆下降。此結果代表稻米中的蛋白質並不會因為預熟製程之高溫高壓處理而降解，反而提升蛋白質含量。

預熟米在抗氧化活性方面亦表現出顯著的增強。根據 FRAP 分析，預熟米的抗氧化活性顯著高於其他樣品，其活性值達到了 1.03 trolox eq/g，較生米增加了 42.75%。這一結果顯示，預熟過程中的水熱處理有助於促進抗氧化成分的釋放和米粒結構的改變，使其具有更強的抗氧化能力。此外，DPPH 分析結果也顯示出，預熟米具有較高的抗氧化活性。預熟製程使米粒中的抗氧化成分由稻殼及米糠層向胚乳遷移，進而中和 DPPH 自由基。酚類化合物是稻米中主要的抗氧化物質，例如生育酚、生育三烯酚以及 γ -穀維素。因此總酚類化合物通常會與抗氧化活性成正相關。研究顯示，預熟米的總酚類含量明顯高於其他形式的米，且相較於生米，預熟米的總酚類物質含量增加了 25.17%。進一步加強了稻米的抗氧化活性，並有助於保護細胞免受自由基所造成的損傷(Bagchi *et al.*, 2023)。

預熟米亦含有較高含量的抗性澱粉(resistant starch, RS)，其中第三型抗性澱粉(retrograded starch, RS3)來自糊化後的回凝作用，其次，第五型抗性澱粉(amylose-lipid complex, RS5)則為直鏈澱粉與脂質形成的複合物(Wahengbam *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2022)。這些特性使預熟米具有較低的 GI 值，根據 Kumar 等人(2022)

之研究顯示，無論是預熟糙米或預熟米均屬於低 GI 的範圍，這是因為預熟米的抗性澱粉含量高，而抗性澱粉在人體小腸無法被消化酵素分解吸收，可延緩餐後血糖上升，進而降低糖尿病風險。此外，預熟米的植酸含量較糙米低，可能是因為浸漬過程中活化內源性植酸酶，促進植酸的降解，使鈣、鐵、鋅等礦物質的生物利用率提高(Kumar *et al.*, 2022)。

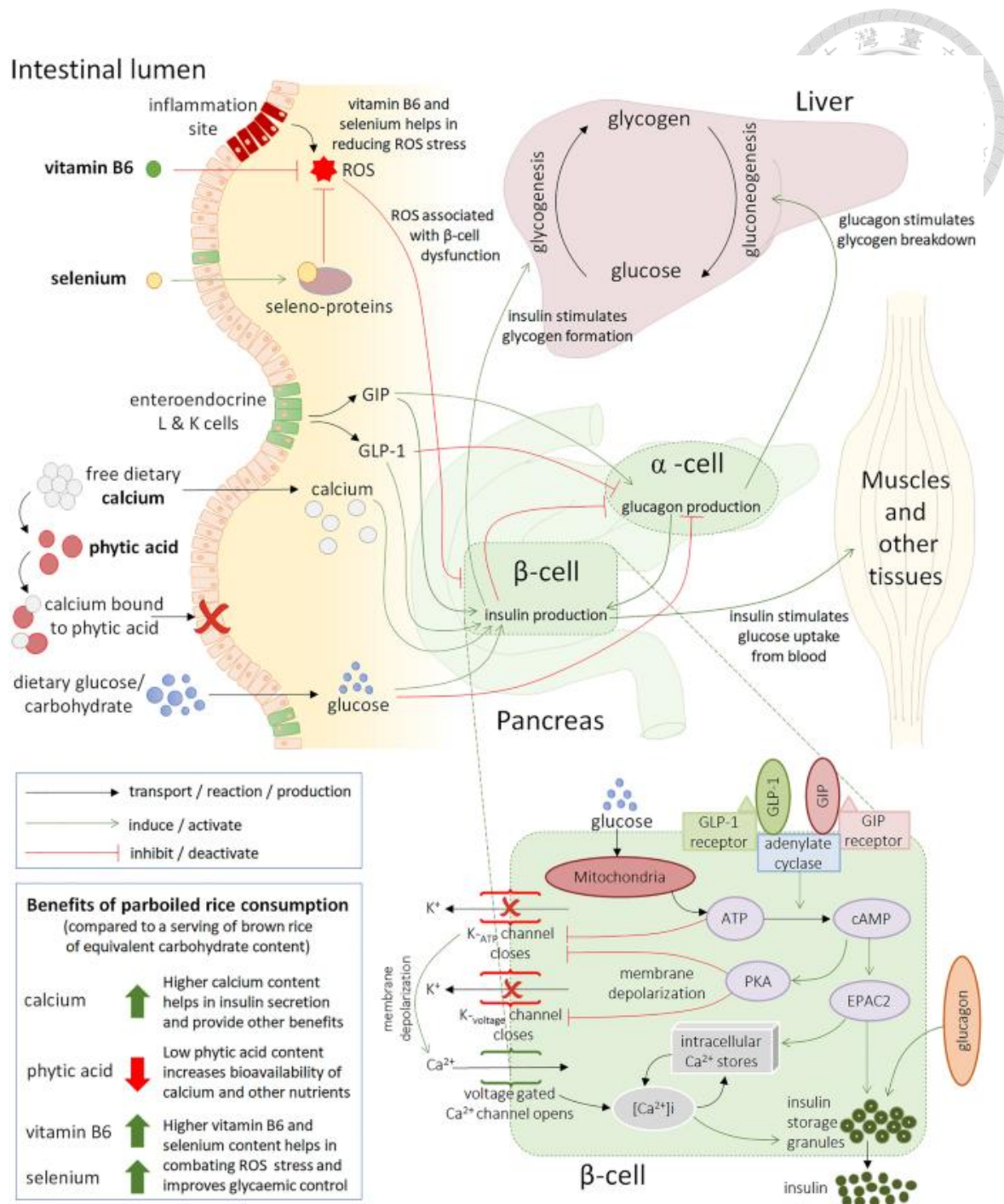


圖十三、營養成分於預熟製程中之遷移路徑。

Fig. 13. Migration pathways of nutrients during the parboiling process.

(Bhar *et al.*, 2022)

在血糖調控方面(如圖十四)，預熟米含有較高的鈣與硒，鈣可維持胰島 β 細胞的功能，調節胰島素之分泌作用，進而改善餐後血糖(postprandial blood glucose)之浮動；硒則能與蛋白質結合形成硒蛋白，減少氧化壓力與發炎反應，改善體內免疫反應及抗癌機制，減緩自體免疫疾病及慢性發炎之發生風險(Bhar *et al.*, 2022)。此外，維生素 B₆與硒的協同作用亦能降低氧化壓力，保護胰島 β 細胞免受氧化損傷(Bhar *et al.*, 2022)。抗氧化能力方面，與白米相比，預熟米 DPPH 與 FRAP 抗氧化活性較高，這與酚類化合物在預熟製程中向胚乳遷移有關(Bagchi *et al.*, 2023)。



圖十四、預熟米對於血糖調節的作用。

Fig. 14. Effect of parboiled rice on glucose regulation.

(Bhar *et al.*, 2022)



五、加工米的食用安全性

雖然本研究使用有機稻米作為原料，但稻米中的農藥殘留問題仍持續受到消費者的關注。耕種稻米常見的農藥主要分為殺蟲劑(insecticides)、殺菌劑(fungicides)以及除草劑(herbicides)三大項目。其中，殺蟲劑是為了防治害蟲，如稻飛蟲、螟蟲、稻葉蟬等；殺菌劑則是為了防治稻熱病、紋枯病等真菌疾病；最後，除草劑是為了防治雜草(Teló *et al.*, 2017)。

Saraswati 等人(2025)採集了包含預熟米等 90 種加工米樣品，並按照標準化驗證方法針對 79 種農藥進行分析，以評估加工米中農藥的最大定量殘留量。結果顯示，所有加工米樣品的農藥含量均低於歐盟規定的最大殘留限量。由於預熟製程中高溫及高壓的環境，造成農藥的降解、熱分解以及揮發，進而降低了預熟米中的農藥殘留量(Kaushik *et al.*, 2009)。根據 Teló 等人(2017)的研究指出，高溫加工製程可影響稻米中農藥殘留的持久性，降低稻殼上農藥濃度約達 38%。

由於稻米於發芽過程中進行強烈的呼吸作用，使得活性氧屬(reactive oxygen species, ROS)大量產生，進而誘導了稻米中穀胱甘肽轉移酶(glutathione S-transferases, GSTs)的活性上升，使其產生大量的還原態抗壞血酸及穀胱甘肽，與 ROS 結合以降低氧化壓力(Li *et al.*, 2024)。根據 Cummins 等人(2011)的研究指出，稻米中的 GST 家族(尤其 Φ -class 和 T-class GSTs)會與除草劑結合，促進農藥的生物降解，進一步達到減少植物組織內農藥殘留之作用。同時，植物中 GSTs 之 H-site 主要由疏水性殘基所構成，使其能與多種疏水性外來物質結合，達到解毒作用。包含了有機鹵化物、芳烴氧化物、環氧化物、有機硝酸酯和有機硫氰酸酯等物質(Cummins *et al.*, 2011)。因此，發芽之生理與生化機制可促進種子的代謝活性，將農藥轉化為無毒或毒性較低之代謝產物，進而減少稻米中農藥的殘留。

此外，透過後續的礱穀程序，可將大部分附著於稻殼上的農藥去除。因此，預熟米與發芽米具有相當程度的食用安全性，適合作為植物奶的原料選擇。



六、樣品原料之性質分析

(一) 水合性質

糙米(BR)、發芽糙米(GBR)以及預熟糙米(PBR)之水合性質結果如表十一。吸水指數(water absorption index, WAI)代表樣品對於水分子吸附的強弱，亦可代表樣品之保水能力。膨潤力(swelling power, SP)則表示樣品吸水後膨脹之程度，與吸水指數成正相關。溶解度(water solubility, WS)為澱粉分子由澱粉顆粒溶出至水中的比例。結果顯示，預熟糙米之 WAI、SP 以及 WS 均顯著高於發芽糙米及糙米。根據 Parnsakhorn and Noomhorm (2008)研究指出，稻米經由預熟製程使澱粉經歷糊化以及回凝作用，此類回凝澱粉於再次加熱時更容易吸水膨脹，進而增加膨潤力。此外，發芽糙米 WAI 及 SP 均些微高於糙米。根據 Wu 等人(2013)研究指出，在發芽的過程中由於內源性酵素的活性提升，促使澱粉水解造成更多小分子糖類釋出，同時使得澱粉結晶構造變為鬆散且具多孔性，致使小分子糖類除了被胚芽吸收利用外，也會因為發芽過程中的清洗作用而流失，所以導致 WS 的下降。此外，此鬆散的多孔結構，雖然可以使水分更容易進入米粒內部，但是卻不易被保留，所以 WAI 和 SP 數值略有提升但是卻與 BR 樣品不具顯著差異。

表十一、糙米(BR)、發芽糙米(GBR)、預熟糙米(PBR)之水合性質

Table 11. Hydration properties of brown rice (BR), germinated brown rice (GBR), and parboiled brown rice (PBR)

Sample	WAI (g/g)	WS (%)	SP (g/g)
BR	2.00 ± 0.02^b	4.05 ± 0.07^b	2.30 ± 0.02^b
GBR	2.09 ± 0.03^b	3.58 ± 0.08^c	2.41 ± 0.03^b
PBR	4.12 ± 0.02^a	4.32 ± 0.02^a	4.79 ± 0.02^a

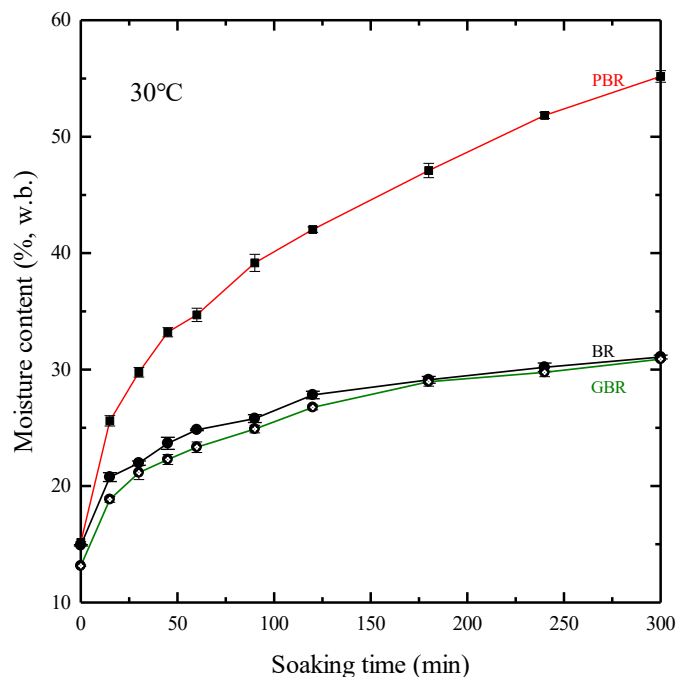
*Values represent Mean $\pm$ SD (n=3).

**Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

(陳，2024)

(二) 吸水特性

圖十五顯示了糙米(BR)、發芽糙米(GBR)和預熟糙米(PBR)在不同浸漬時間的濕基水分含量變化。結果顯示，在相同時間下，PBR 的水分含量顯著高於 BR 和 GBR。歷經 300 分鐘浸漬後，PBR 的水分含量達到約 55%，然而 BR 和 GBR 則約為 30%。初始浸漬期間，PBR 的水分含量增加速度遠高於 BR 和 GBR。PBR 的吸水能力明顯高於 BR 和 GBR，這與 PBR 因為經過蒸煮而含較高的糊化澱粉有關；糊化使澱粉顆粒崩解而釋出直鏈及支鏈澱粉，從而提高其水結合能力。相關文獻亦指出預熱過程能改變米粒的結構，增強其吸水和膨脹能力(Parnsakhorn and Noomhorm, 2014)。然而，GBR 和 BR 之水分含量變化趨勢相近，這表示發芽過程對於水合特性的影響較小，這個主要原因是澱粉顆粒受到發芽作用的傷害較為有限；未經糊化的澱粉顆粒結構完整，酵素較難作用。



圖十五、糙米(BR)、發芽糙米(GBR)、預熟糙米(PBR)之浸漬水分含量(濕基，%)。
Fig. 15. Soaking moisture content (% w.b.) of brown rice (BR), germinated brown rice (GBR), and parboiled brown rice (PBR).

(陳，2024)



七、酵素水解

(一) α -澱粉酶

醣苷水解酶(glycoside hydrolases, GHs)是一類能夠催化醣苷鍵水解之酵素，其中 α -澱粉酶(α -amylase; α -1,4-glucan-4-glucanohydrolases; EC 3.2.1.1)為 GHs 家族成員之一，主要屬於 GH13、GH57 和 GH119 家族(Paul *et al.*, 2021)。隨著生物科技的發展， α -澱粉酶被廣泛應用於食品、發酵、紡織和造紙工業等領域。 α -澱粉酶廣泛分布於動物、植物和微生物界中，其中以微生物為主要的工業生產來源。由於工業化生產技術的進步， α -澱粉酶已取代了傳統食品工業中利用化學法進行澱粉水解之作業(Gupta *et al.*, 2003)。

1. 來源

α -澱粉酶廣泛分布於植物、動物以及微生物界，其中微生物產生的胞外 α -澱粉酶因其較高的經濟價值與規模化生產的可行性，成為工業酵素生產的主要來源。利用微生物進行酵素生產可確保品質之穩定性，同時可降低生產成本(Paul *et al.*, 2021)。其中，又以真菌和細菌為主要的生產菌株(Pandey *et al.*, 2000)。

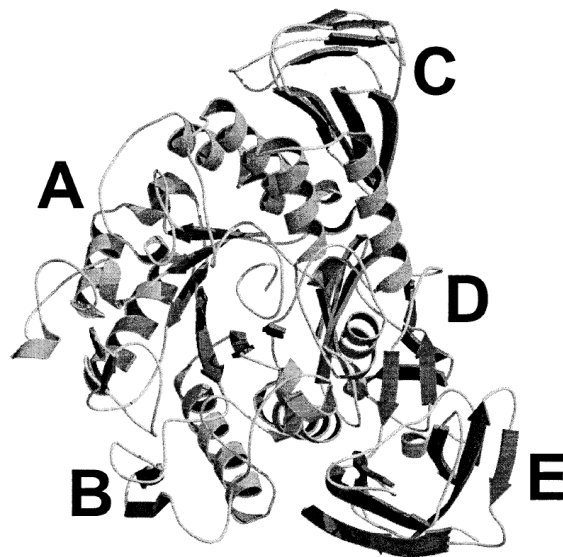
2. 酵素之微細結構

α -澱粉酶的結構通常為 TIM 桶狀結構(triosephosphate isomerase barrel, TIM barrel)，以 $(\beta/\alpha)_n$ 表示。其中， β 代表著 β -折疊片段(β -strand)，形成桶狀結構之核心；而 α 代表著 α -螺旋結構(α -helix)，環繞在核心外圍以提供結構之穩定性。GH13 家族的 α -澱粉酶典型的結構為 $(\beta/\alpha)_8$ ，代表由八個 β -折疊片段與八個 α -螺旋結構組成。如圖十六，結構域 A 即為 $(\beta/\alpha)_8$ 桶狀結構。

保守序列區(conserved sequence regions, CSRs)指的是不同酵素結構中，高度相似或完全相同的胺基酸序列區域，通常與酵素的功能具有高度相關性。例如相同

酵素種類在不同的物種中其胺基酸序列大致相同。代表這些序列及結構對於生物體的生理功能極為重要，因此在演化過程中能夠維持其穩定性。GH13 家族之 α -澱粉酶中，活化位點包含多個 CSRs，其中，具有高度保守性之催化三聯體 (catalytic triad) 由天冬胺酸 (aspartic acid, Asp)、麩胺酸 (glutamic acid, Glu) 以及另一 Asp 催化殘基所構成。其中，Asp (β_4) 作為催化親核體，負責觸發水解反應；Glu (β_5) 提供質子用以參與水解機制；Asp (β_7) 穩定過渡態，可促進基質水解 (MacGregor *et al.*, 2001)。

大多數的 α -澱粉酶屬於金屬依賴型酵素 (metalloenzyme)，最常見的穩定因子為鈣離子 (Ca^{2+})。金屬離子的結合有助於維持酵素核心結構之完整性，提高其對於溫度與酸鹼環境的適應性，以穩定酵素的催化活性。



圖十六、 α -澱粉酶的結構示意圖。

Fig. 16. Schematic diagram of the structure of α -amylase.

(MacGregor *et al.*, 2001)



3. 作用模式

α -澱粉酶屬於內切澱粉酶(endoamylase)的一種，可隨機水解澱粉分子之 α -1,4-D-糖苷鍵，能夠迅速降低澱粉溶液之黏度，並產生低聚糊精、麥芽三糖、麥芽糖及葡萄糖等(Windish & Mhatre, 1965)。 α -澱粉酶之催化機制採用雙取代親核機制(double displacement mechanism)，該機制首要為基質結合(substrate binding)，當澱粉分子進入活化位點，由胺基酸催化殘基進行定位。次要為親核攻擊(nucleophilic attack)，由 Asp 殘基攻擊糖苷鍵，進而形成過渡態。最後步驟則為水合作用(hydrolysis)，此時由 Glu 殘基提供質子，完成糖苷基的斷裂並釋出產物。

4. 酵素之應用

α -澱粉酶於食品工業中，可用於糖製品、麵包烘焙製品以及啤酒釀造等產業應用。 α -澱粉酶可將澱粉水解為小分子糖類，如麥芽糖和糊精，這些糖類可進一步轉化為葡萄糖或果糖，應用於高果糖糖漿(high-fructose corn syrup, HFCS)之生產。 α -澱粉酶透過水解作用產生游離糖，可以被酵母菌利用進行發酵，進而改善麵糰質地並提高麵包的口感及色澤品質(Trabelsi *et al.*, 2019)。在啤酒釀造中，利用 α -澱粉酶將澱粉降解為雙糖及單糖，從而提高發酵效率以改善產品品質及產量(Gupta *et al.*, 2003)。此外，根據 Wang 等人(2011)的研究中 α -澱粉酶被證實可促進益生菌(*Lactobacillus paracasei* subsp. *paracasei* TKU010)之生長，可進一步增強益生元之保健效果。

α -澱粉酶於生質能源之領域中應用於澱粉基乙醇之生產；將澱粉分解為可發酵糖，作為生產乙醇之原料(Pereira *et al.*, 2017)。在環保議題之下， α -澱粉酶亦可應用於廢水處理。製藥、食品和紡織業等產業排放之廢水往往富含有機污染物，降低了溶氧量，進而造成了水生生物之生存危機。因此， α -澱粉酶可用以分解廢水中之有機物，進而提升溶氧量、改善環境(Suribabu *et al.*, 2014)。於紡織、皮革

以及造紙工業等， α -澱粉酶可用於水解澱粉漿料(Paul *et al.*, 2021)。



(二) 葡萄糖澱粉酶

葡萄糖澱粉酶(γ -amylase; 1,4- α -D-glucan glucoamylase, EC 3.2.1.3)屬於 GHs 家族成員之一，能夠從澱粉及其衍生物的非還原端水解 α -1,4-糖苷鍵，並且具有一定程度的 α -1,6-糖苷鍵水解能力，可催化生成游離葡萄糖(β -D-glucose)。在工業應用中，葡萄糖澱粉酶通常與 α -澱粉酶搭配使用，以提高對澱粉水解的效率(Sauer *et al.*, 2000)。

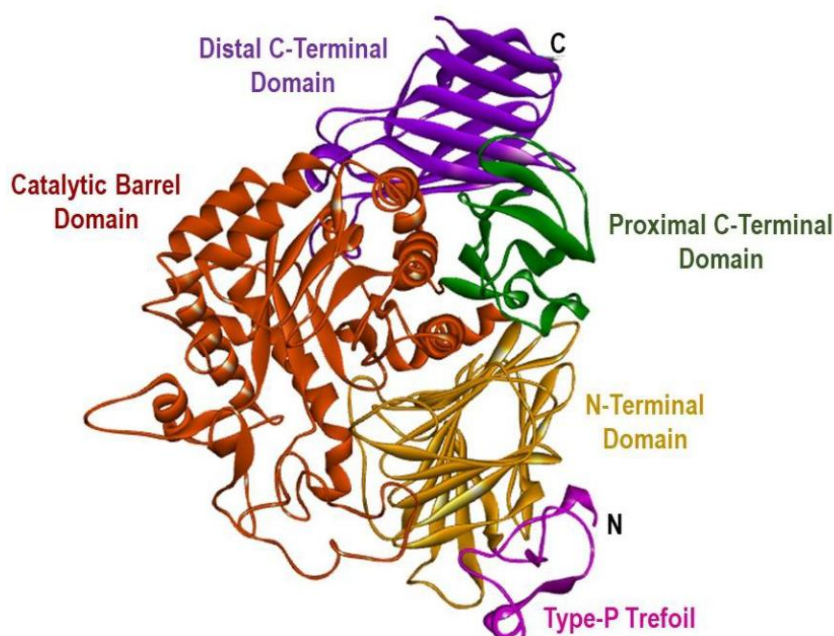
1. 來源

葡萄糖澱粉酶廣泛存在於動物、植物及微生物中，但目前工業生產主要依賴微生物來源，因為微生物的發酵生產可提供較高的酵素產量，且較易純化，能有效降低生產成本。目前，工業上常用的微生物來源包括真菌、細菌及酵母菌，其中，以 *Aspergillus niger* 產生的葡萄糖澱粉酶具有較高之工業價值，因其在酸性條件(pH 4.5-5.5)下仍具有良好的催化活性，並且催化穩定性高(Sun *et al.*, 2008)。其他常見的微生物來源包括 *Aspergillus awamori*、*Saccharomycopsis fibuligera*、*Bacillus spp.*和 *Saccharomyces cerevisiae*，於不同產業適用不同菌株所生產出之酵素(Zong *et al.*, 2021)。

2. 葡萄糖澱粉酶之微細結構

葡萄糖澱粉酶為一種多域酵素(multidomain enzyme)，如圖十七。其結構通常包含催化區(catalytic domain)、糖結合模組(carbohydrate-binding module, CBM)以及 O-糖基化連接區(glycosylated linker region)，這些結構共同影響酵素的穩定性與催化效率(Kumar & Satyanarayana, 2009)。催化區負責水解澱粉分子，屬於 GH15 家

族。CBM 則能提高酵素對基質的親和力，確保葡萄糖澱粉酶能夠更有效率地作用於澱粉分子。連接區通常富含 O-醯基化的序列，有助於維持酵素之穩定性，特別是在高溫或不同酸鹼環境中反應時，減少催化區受到變性影響(Jørgensen *et al.*, 2008)。在葡萄糖澱粉酶的活性位點中，催化機制主要依賴於催化三聯體，包括 Glu400 (催化質子供體)、Asp176 (穩定基質)以及 Tyr116、Trp120 (幫助過渡態穩定化)。這些關鍵胺基酸殘基使酵素能夠有效進行水解作用，並且提高酵素對基質的專一性(Sierks & Svensson, 1996)。



圖十七、葡萄糖澱粉酶的結構示意圖。

Fig. 17. Schematic diagram of the structure of glucoamylase.

(Davella & Mamidala, 2021)

3. 作用模式

葡萄糖澱粉酶屬於外切型澱粉酶(exoamylase)，可由澱粉或糊精的非還原端水解並釋放葡萄糖。其催化機制主要依靠親核攻擊(nucleophilic attack)來水解 α -1,4-

糖苷鍵，並在一定程度上作用於 α -1,6-糖苷鍵，但水解速率較慢(James & Lee, 1997)。葡萄糖澱粉酶的作用機制第一步為酵素與基質之結合，此步驟反應快速但結合能力較弱，並可能受到 Glu180 之影響。第二步由基質複合物進行重排以形成更加緊密之中間體。第三步則為糖苷鍵之水解作用，由 Glu179 提供質子。若為麥芽低聚糖之水解反應，則部分與 Glu400 結合的水分子提供親核羥基攻擊糖苷鍵。最後一個步驟為速率限制步驟，為釋放還原端之葡萄糖鏈(Sierks & Svensson, 1996)。

4. 酵素之應用

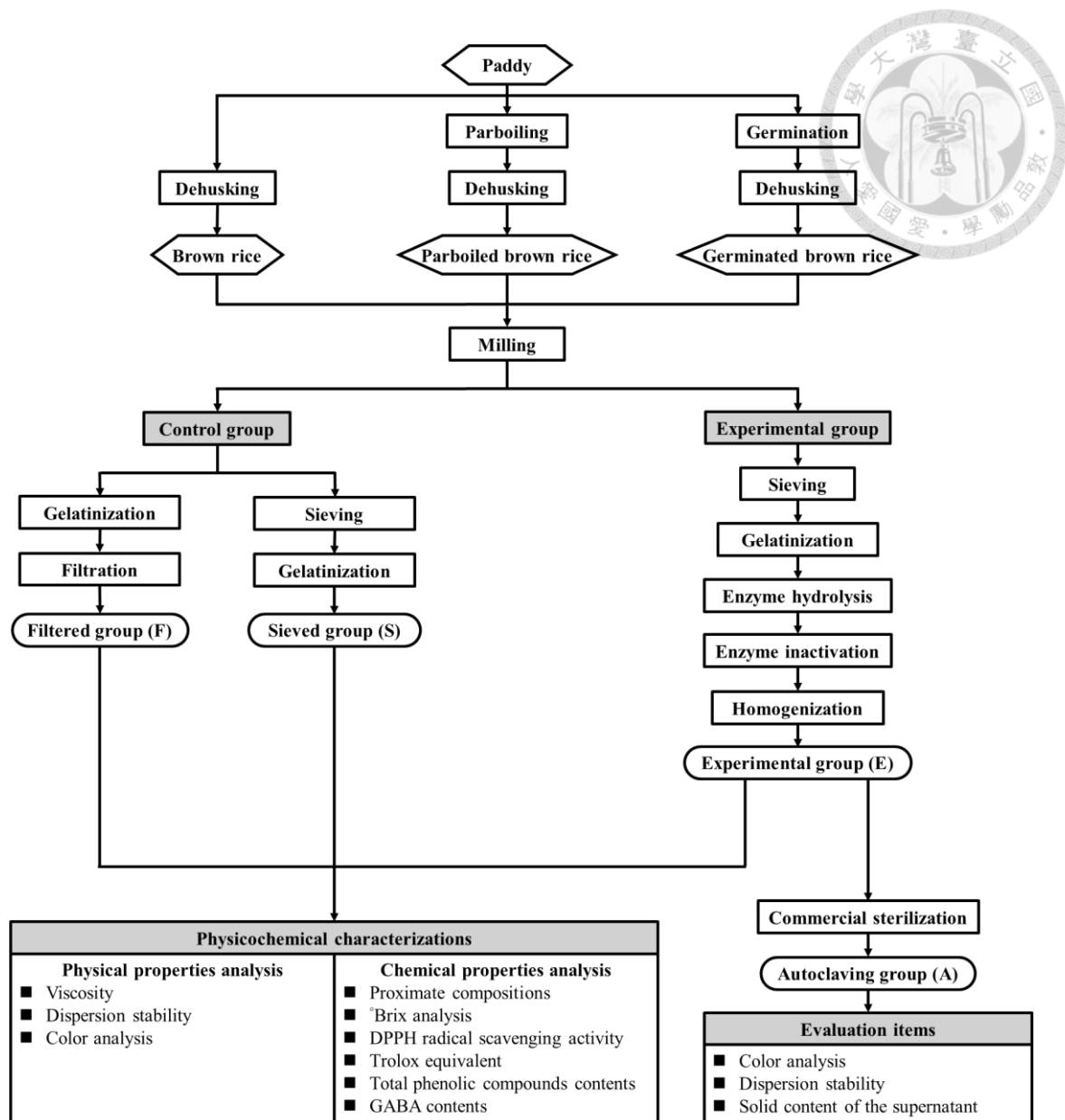
由於澱粉的結構較為複雜，因此在各產業之應用需使用不同之澱粉分解酵素進行反應。葡萄糖澱粉酶又稱為糖化酵素，可作為糖化劑運用在葡萄酒、麴胺酸鈉、醋及酒精等發酵工業。亦可用於生產以葡萄糖為基底之各種物質，如有機酸、胺基酸、維生素等(Kumar & Satyanarayana, 2009)。

參、實驗架構



一、實驗架構圖

本研究旨在開發以臺灣稻米為基底的植物奶，並探討不同加工方法對其物化性質及生理活性之影響。分別使用了糙米、發芽糙米及預熟糙米作為原料，經過研磨製程後製得米穀粉。為了確立實驗組之糊化製程，將對照組分為過濾組(F)和過篩組(S)，並進行物化性質分析，以選定最佳前處理流程。在確認對照組之物化性質後，實驗組選用過篩組別之糊化製程進行前製備。為了使實驗組米基底植物奶之口感質地更接近於市售植物奶，故本研究開發酵素水解製程以及均質製程(E)，加以改善米基底植物奶之口感質地及分散穩定性。在完成實驗組之製程開發後，進行一系列物化性質分析，並將三個組別進行比較。實驗組經商業滅菌處理後(A)分析感官特性。實驗總架構如圖十八。



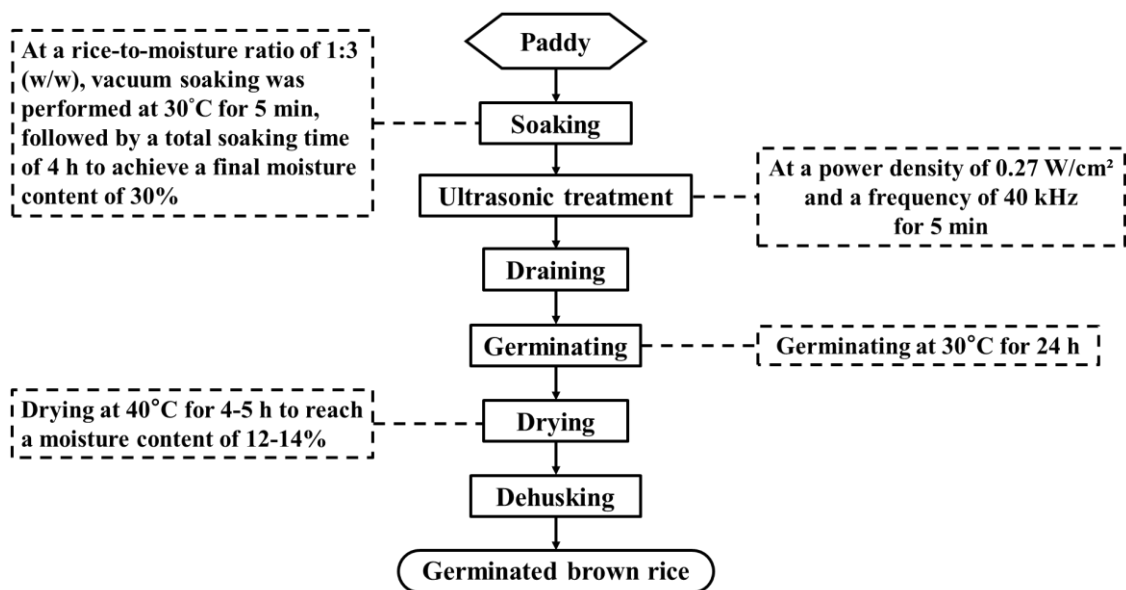
圖十八、實驗總架構圖。

Fig. 18. Overall experimental framework diagram.

二、實驗架構說明

接續將分別呈現各製程之詳細流程圖。首先針對原料米之加工製程進行探討(圖十九；圖二十)，本研究選用國產米臺梗九號，並分別製備為糙米、發芽糙米以及預熟糙米。原料米製備完成後將進行米基底植物奶之製備(圖二十一)，為了改善植物奶之物理性質，本研究使用過篩製程，以提升米穀粉顆粒之均一性，進而改善糊化漿液之性質。此外，開發適當之酵素水解以及均質製程，使米基底植物奶有別於傳統米漿飲品，進一步改善其口感質地及分散穩定性。

(一) 發芽糙米製備流程

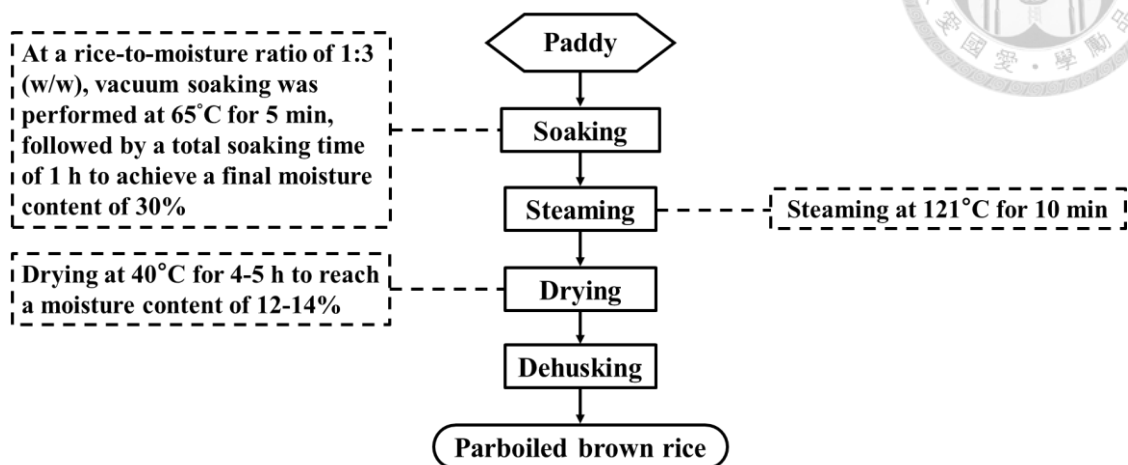


圖十九、發芽糙米製備流程圖。

Fig. 19. Flowchart of germinated brown rice preparation.



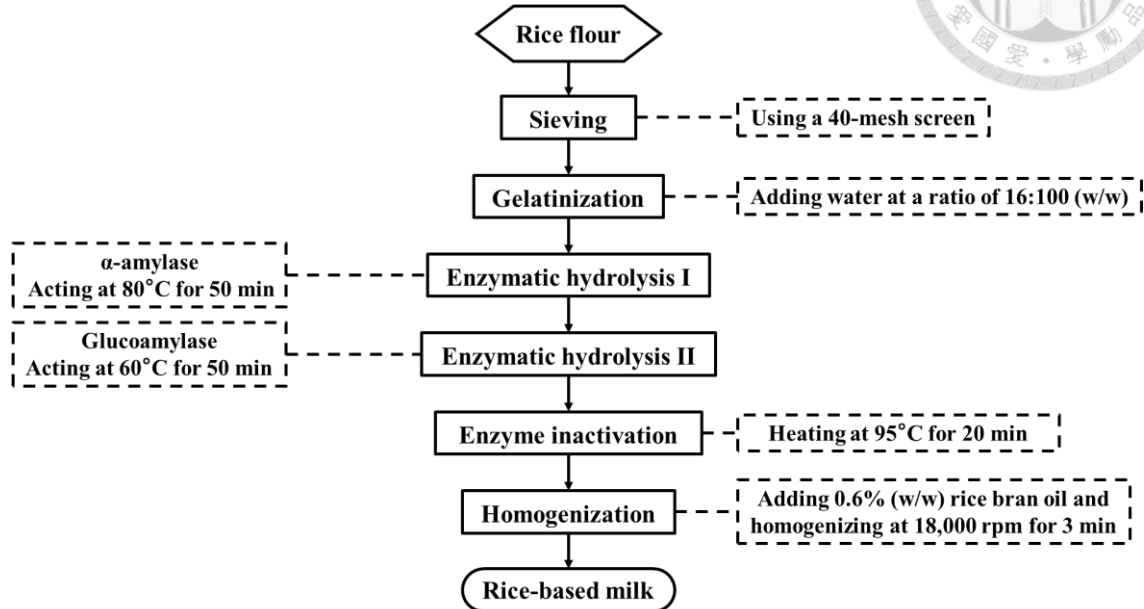
(二) 預熟糙米製備流程



圖二十、預熟糙米製備流程圖。

Fig. 20. Flowchart of parboiled brown rice preparation.

(三) 實驗組米基底奶製備流程



圖二十一、實驗組米基底奶製備流程圖。

Fig. 21. Flowchart of experimental group rice-based plant milk preparation.

肆、材料與方法

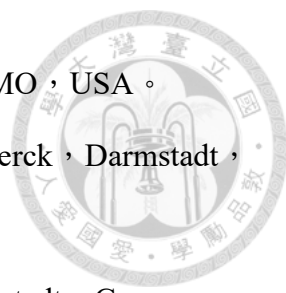


一、實驗材料

1. 稻穀：臺梗9號有機稻穀(111年第一期稻作)，以38.22元/公斤自花蓮縣富里鄉之銀川永續農場購入。
2. α -澱粉酶：衍生自地衣芽胞桿菌之基因改良菌株，屬於食品級酵素，活性單位6500-7100 units/g。以750元/公升自彰化縣社頭鄉汎球國際貿易公司購入。
3. 葡萄糖澱粉酶(Glucoamylase)：衍生自地衣芽胞桿菌之基因改良菌株，屬於食品級酵素，活性單位260-300 units/g。以850元/公升自彰化縣社頭鄉汎球國際貿易公司購入。
4. 米糠油(rice bran oil)：原產地來自泰國，以179元/公升自高雄市大社區維義事業股份有限公司購入。
5. Oatly 咖啡師燕麥奶：原產地來自瑞典，以185元/公升自家福股份有限公司購入。

二、實驗試藥

1. 乙腈(acetonitrile)：HPLC grade，CAS No. 75-05-8，HP412，Spectrum chemical (Gardena, New Brunswick, CA, USA)。
2. 甲醇(methyl alcohol)：HPLC grade，CAS No. 67-56-1，HP702，Spectrum chemical (Gardena, New Brunswick, CA, USA)。
3. 甲酸(formic acid)：LC-MS grade，CAS No. 64-18-6，F0654，TCI，Tokyo，Japan。
4. 95%酒精：景明化工，Taiwan。
5. 4-胺基丁酸(4-aminobutyric acid)：CAS No. 56-12-2，A0282，TCI，Tokyo，Japan。

- 
6. 碘(iodine)：CAS No. 7553-56-2，207772，Sigma-Aldrich，MO，USA。
 7. 碘化鉀(potassium iodine)：CAS No. 7681-11-0，Merck，Darmstadt，Germany。
 8. 鹽酸(hydrochloric acid)：CAS No. 7647-01-0，Merck，Darmstadt，Germany。
 9. 硫酸(hydrochloric acid)：CAS No. 7664-93-9，30721，Honeywell，NC，USA。
 10. 醋酸(acetic acid glacial)：CAS No. 64-19-7，Fisher Scientific，Loughborough，UK。
 11. 硼酸(boric acid)：CAS No. 10043-35-3，31146，Honeywell，NC，USA。
 12. 碳酸鈉(sodium carbonate)：CAS No. 497-19-8，A356892，Merck，Germany。
 13. 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)：CAS No. 1898-66-4，G7384，Sigma-Aldrich，MO，USA。
 14. 沒食子酸(gallic acid)：CAS No. 149-91-7，D9132，Sigma-Aldrich，MO，USA。
 15. 水溶性維生素 E (Trolox)：CAS No. 53188-07-1，238813，Sigma-Aldrich，MO，USA。
 16. 福林酚試劑(Folin & Ciocalteu's phenol reagent)：F9252，Sigma-Aldrich，MO，USA。
 17. 石油醚(petroleum ether)：CAS No. 8032-32-4，24553，Honeywell，NC，USA。

三、儀器設備

1. 精密天秤：AL-204，Mettler-Toledo，Switzerland。
2. 電子天秤：PL-3002，Mettler-Toledo，Switzerland。



3. 精密烘箱：DOS45，頤樺科技股份有限公司，Taiwan。
4. 新型高速磨粉機：RT-N08，榮聰精密科技有限公司，Taiwan。
5. 泰勒篩網：KUANGYANG，規格 60 mesh 和 40 mesh，Taiwan。
6. 礱穀機：FC2K，竹下農機股份有限公司代理，Japan。
7. 精密恆溫水浴槽：WB212-B1，雙鷹企業有限公司，Taiwan。
8. 往復式震盪水浴槽：WBS-M，頤華科技代理，Taiwan。
9. 高速離心機：Rotina 35R，Hettich Zentrifugen，Germany。
10. 電磁加熱攪拌器：SP131325，Thermo Fisher Scientific，USA。
11. 酸鹼度計(pH meter)：PB-10，Sartorius，Germany。
12. 超音波振盪機：DC400H，DELTA，Taiwan。
13. 分光光度計(ELISA reader)：ELx808，BioTek，USA。
14. 光學顯微鏡：CH20，Olympus，Japan。
15. 色差儀：NE 4000，Nippon Denshoku，Japan。
16. 高效液相層析儀：JASCO，Japan。
 - (1) 高壓幫浦：PU-2089
 - (2) 自動進樣器：AS-4050
 - (3) 偵測器：UV-2075
17. 碳十八管柱(C18 column, particle size 5 μ m, 4.6 $\times$ 250 mm)：Inspire，Taiwan。
18. 乾式消化爐(Chamber Furnace)：CWF 12/13 1200c，CARBOLITE，England。
19. 水流抽氣泵浦：A-1000S，EYELA，Japan。
20. 岐管式冷凍乾燥機：CFD-4.5-LT，頤樺科技股份有限公司，Taiwan。
21. 手持式糖度計：ORA-B，益瀚國際科技股份有限公司，Germany。
22. 高壓蒸汽滅菌釜：TM325，Tomin，Taiwan。
23. 布氏黏度計：DV2T，Brookfield，USA。

24. 均質機：T25 digital ULTRA TURRAX，China。
25. 流變儀：HR-20，Waters TA Instruments，USA。
26. 六孔萃取裝置：SoxtecTM2055 Fat Extraction System，FOSS，Denmark。
27. 無刷式攪拌機：LG-100DH，Newlab Instruments，Taiwan。





四、實驗方法

(一) 糙米製程

稻穀利用礱穀機將稻殼去除，礱穀完成後將糙米裝入夾鏈袋中保存於冷藏 4°C 備用。

(二) 發芽糙米製備

根據 Ding 等人(2018)之製備方法並加以調整。利用米:水為 1:3 之比例，事先秤取 540 g 之逆滲透水於廣口血清瓶中，並放置於 30°C 恆溫水浴槽中。秤取 180 g 稻穀，倒入抽氣過濾瓶中，並且倒入血清瓶中 30°C 之逆滲透水，開始浸漬製程。總浸漬製程所需時間為 4 h。浸漬製程結束後，將稻穀瀝乾並倒回血清瓶中，放置於恆溫 30°C 之水浴槽中，開始進行發芽製程。發芽時間為 24 h，過程中總共洗滌 2 次，以避免微生物孳生而產生異味。發芽製程結束後，將稻穀倒於鐵盤上，並利用熱風乾燥箱以 40°C 進行乾燥約 3 h，直至最終水分含量 12-14% (w.b.)。烘乾完成後，利用礱穀機將稻殼去除，礱穀完成後，將發芽糙米裝入夾鏈袋中，保存於冷藏 4°C 備用。

(三) 預熟糙米製備

根據林(2017)之製備方法並加以調整。利用米:水為 1:3 之比例，事先秤取 540 g 之逆滲透水於廣口血清瓶中，平衡 1 h。秤取 180 g 稻穀，倒入抽氣過濾瓶中，並且倒入血清瓶中 65°C 之逆滲透水，開始浸漬製程。總浸漬製程所需時間為 1 h。浸漬製程結束後，將稻穀瀝乾放置於鐵網中並移入滅菌釜中，以 121°C 蒸氣(錶壓 1 kgw/cm²)進行蒸煮，結束後取出放置於鐵盤中，並利用熱風乾燥箱以 40°C 進行乾燥約 3 h，直至最終水分含量 12-14% (w.b.)。烘乾完成後，利用礱穀機將稻殼去除，礱穀完成後，將預熟糙米裝入夾鏈袋中保存於冷藏 4°C 備用。



(四) 對照組樣品製備

為了確立實驗組之前製程，故在對照組中訂定了過濾組與過篩組的製程，用以比較樣品的物化特性，選擇較適當的前製備流程。過濾組製程旨在模擬傳統米漿製程，在糊化製程後利用濾布進行過濾，以確保樣品具有較好的流動性和均勻性。過篩組則利用 40 篩目之泰勒篩網將米穀粉過篩，以降低顆粒大小。

過濾組樣品(filtered group, F)將原料米進行單一階段研磨，流程為研磨約 40 s，中間設備休息 1 min，再進行研磨 40 s。以米穀粉進行糊化，完成後以濾布進行過濾。完成後保存於冷藏 4°C 備用。

過篩組樣品(sieved group, S)則是將原料米進行兩階段的研磨，流程為研磨約 40 s，中間設備休息 1 min，再進行研磨 40 s。第一階段磨粉完成後，利用 40 mesh 之泰勒篩網進行過篩。將第一次未過篩網之粗顆粒再進行一次研磨 40 s，結束後利用 40 mesh 之泰勒篩網進行過篩。總共進行兩次過篩，未過篩網之樣品即丟棄，過篩產率約 90%。過篩後以米穀粉進行糊化，完成後保存於冷藏 4°C 備用。

(五) 米基底植物奶製備

1. 米穀粉研磨製程

實驗組樣品(Experimental group, E)採用對照組中之過篩組別之製程進行前製備流程。將不同的米原料利用高速磨粉機進行研磨，先研磨約 40 s，中間設備休息 1 min，再進行研磨 40 s。第一階段磨粉完成後，利用 40 mesh 之泰勒篩網進行過篩。將第一次未過篩網之粗顆粒再進行一次研磨 40 s，結束後利用 40 mesh 之泰勒篩網進行過篩。總共進行兩次過篩，未過篩網之樣品即丟棄，過篩產率約 90%。將過篩完成後之米穀粉裝入夾鏈袋，並保存於冷藏 4°C 備用。



2. 糊化製程

參考 Feng 等人(2024)之糊化製程並加以修改。將米穀粉利用恆溫水浴槽進行隔水加熱，並使用無刷式攪拌機(LG-100DH)進行攪拌，以改善澱粉漿液之受熱均勻度。

3. 酵素水解製程

根據 Kittibunchakul 等人(2021)之製程並加以調整。先將往復式振盪水浴槽預熱至 80°C，將糊化完成之樣品加入 α -澱粉酶，進行酵素水解反應。反應完成後將水浴槽及樣品降溫，加入葡萄糖澱粉酶，進行酵素水解反應 50 min，振盪轉速設定為 115 rpm。反應完成後進行酵素失活程序。

4. 均質製程

將酵素失活後的樣品降溫，倒入 400 mL 高型燒杯，添加 0.6%w/w 米糠油，使用均質機(T25 digital ULTRA TURRAX)以 18000 rpm 之轉速進行均質。均質完成後利用保鮮膜完整包覆並保存於冷藏 4°C 備用。

5. 商業滅菌製程

將實驗組米基底植物奶裝入廣口血清瓶中，並移入滅菌釜中，以 121°C(錶壓 1 kgw/cm²)進行滅菌 15 min，完成後保存於冷藏 4°C 備用。採用商業滅菌樣品(Autoclaved group, A)分散穩定性剩餘 80%時之上清液進行感官特性分析。

(六) 冷凍乾燥樣品製備

利用蒸餾水將樣品進行雙倍稀釋後，放入-20°C冷凍庫進行冷凍一日。冷凍完成後，利用冷凍乾燥機進行乾燥 24 h。凍乾樣品利用高速磨粉機進行研磨約 40

s，完成後利用 60 mesh 之泰勒篩網進行過篩。完成後將凍乾粉狀樣品放入防潮箱備用。化學性質分析使用凍乾粉狀樣品進行。



(七) 黏度分析

對照組樣品由於其黏度較高，故使用布式黏度計(DV2T, Brookfield)進行分析。根據 Seong 等人(2022)的方法加以修改，以布式黏度計分析樣品的黏度。將 400 mL 樣品裝至 600 mL 燒杯中，使用 LV-07 轉子以 50 rpm 的轉速運轉 5 min，並讀取數值。實驗組樣品由於其黏度較低，已超越布式黏度計可偵測範圍，故使用流變儀(HR-20, Waters TA Instruments)以及同心圓筒系統，測量樣品的黏度性質。參考 Jeske 等人(2017)與 Yao 等人(2022)之分析流程並加以調整。以靜態剪切測定，使用剪切速率範圍 $1\text{--}100\text{ s}^{-1}$ 進行測量，記錄樣品在不同剪切速率下的黏度變化。為進行樣品間的黏度比較，選取剪切速率為 100 s^{-1} 時的黏度數據作為分析依據，以模擬樣品在流動狀態下的實際加工性能與應用特性。所有樣品均分別於 7°C 及 45°C 下進行黏度分析，加以瞭解樣品於不同溫度下之應用性。

(八) 分散穩定性分析

根據 Feng 等人(2024)的方法加以修改，將樣品倒入 10 mL 量筒，於 4°C 下進行儲存，觀察樣品的視覺外觀及沉降高度，分別於 1、2、4、8、16、24、48、72、96、120、144、168 h 進行觀察。分散穩定性(dispersion stability, DS)越高代表樣品之性質越穩定，在長時間的儲藏之下，不會發生沉降的現象。越低則代表樣品性質不穩定，容易在儲存過程中產生沉降，進而降低消費者感官品質。DS 可透過下列公式計算：

$$DS = \frac{\text{sedimentation height}}{\text{total sample height}} \times 100\%$$



(九) 色澤分析

使用色差儀(Nippon Denshoku, NE-400)分析米基底奶樣品之顏色變化，可得知其 L^* 、 a^* 、 b^* 值。測定前需以標準黑蓋及白蓋校正，接著將樣品放入石英杯進行測量。 L^* 值代表明亮度(lightness)，當 L^* 是 100 時為全白，0 時為全黑； a^* 值代表紅綠顏色，當 a^* 為正值代表偏紅色，若為負值代表偏綠色； b^* 值代表黃藍色，當 b^* 為正值代表偏黃色，若為負值代表偏藍色。藉由 L^* 、 a^* 、 b^* 值計算出白色度(white index; WI)，當 WI 值越大表示顏色越白，另外參考 Pathare 等人(2013)使用 b^* 與 L^* 計算出黃度(yellow index, YI)，當 YI 值越大表示顏色越黃。最後，透過勾股距離(Euclidean distance)，意即各組樣品之 L^* 、 a^* 、 b^* 值與標準樣品(市售產品)之 L^* 、 a^* 、 b^* 值之差異，計算出 ΔE^* 值，此值代表著兩個顏色之間的最小可覺差值(just-noticeable difference, JND)，藉由色澤分析差異，作為樣品之市場接受度判定標準之一。白色度(WI)、黃度(YI)及 ΔE^* 計算公式如下：

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$$

$$YI = 142.86(b^*/L^*)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

(十) 光學顯微影像分析

參考 Bauer 等人(2004)以及 Santacruz 等人(2005)之實驗方法。配製碘溶液，於 100 mL 蒸餾水中加入碘 0.2 g 和碘化鉀 2 g。將製備好的樣品進行 100 倍稀釋，在 2 mL 的樣品中添加 0.4 mL 碘溶液，進行染色 15 min。完成後取 10 μ m 於載玻片上，利用光學顯微鏡(CH20, Olympus)以適當倍率進行觀察。

(十一) 糖度分析

參考 Salee 等人(2024)之實驗方法。取 0.5 mL 樣品滴入手持式糖度計(ORA-B)進行測量，每樣品三重複，以 $^{\circ}$ Brix 表示。



(十二) 基本成分分析

1. 水分含量

參照 AACC 44-19 (2000) 之方法。精秤 5 g 樣品置於 105°C 烘箱，進行乾燥至恆重，並紀錄重量。減少的水分即為蒸散的水分重量，經計算後可得樣品之水分含量。

2. 粗蛋白質含量

參照 AACC 44-13 (2000) 之方法—Kjeldahl 法。精秤 0.5 g 樣品和 5.5 g 催化劑 ($\text{CuSO}_4 : \text{K}_2\text{SO}_4 = 1 : 10$) 於秤量紙中置入分解管。再緩慢地加入 15 mL 濃硫酸 (H_2SO_4)。分解管置於分解裝置加熱到 400°C，當分解液呈現淡藍色後取出分解管，冷卻 20 分鐘。接著將分解管置入粗蛋白蒸餾裝置。取 20 mL 硼酸至錐形瓶中，蒸餾以獲得檢液，檢液以 0.01 N H_2SO_4 滴定測量總含氮量，將總含氮量乘以米穀奶的含氮係數即為粗蛋白質含量。委託宜蘭大學生物資源產品檢測暨技術推廣中心進行一重複檢測。

3. 粗脂肪含量

參照 AACC Method30-10 (2000) 之方法。油脂萃取杯於 105°C 下烘乾 1 小時後取出置於乾燥皿中冷卻 1 小時，秤重紀錄重量。再烘 30 分鐘後取出於乾燥皿中冷卻 30 分鐘，紀錄重量，重複上述步驟直至恆重(W_0)。使用六孔萃取裝置 SoxtecTM2055 Fat Extraction System (FOSS, Denmark)。精秤 1 g 樣品(W)，並利用濾紙、圓筒濾紙以及脫脂棉將樣品固定於套筒中。將 70 mL 石油醚倒入油脂萃取杯，並將圓筒濾紙放入油脂萃取杯中浸泡 1 小時，使油脂滴入油脂萃取杯中。再進行萃取 2 小時後，重新浸漬 20 分鐘，再進行萃取 25 分鐘。取出萃取杯置於抽氣櫃中風乾 1 小時。萃取杯放入 100°C 烘箱中，烘乾 1 小時後取出並置於乾燥皿中冷卻 1 小時，秤重並重複步驟至恆重(W_1)。



4. 灰分含量

參照 AACC 08-01 (2000)之方法。坩鍋先置於 105°C烘箱乾燥至恆重(W0)。精秤 5 g 樣品(W)，置於乾燥恆重之坩鍋中。接著以 105°C烘箱進行初步乾燥後再放入灰化爐內，於 200°C加熱 2 小時，再將溫度提高至 550 – 600°C灰化 5 – 10 小時，降溫至 200°C以下，將樣品取出移至乾燥皿中，冷卻後秤重至恆重(W1)。

5. 碳水化合物含量

以扣除法直接計算，公式如下：

$$(1) \text{ 總碳水化合物}(\%, \text{w.b.}) = 100\% - \text{粗蛋白質}(\%) - \text{粗脂質}(\%) - \text{粗灰分}(\%) - \text{水分}(\%)。$$

$$\text{總碳水化合物}(\%, \text{d.b.}) = 100\% - \text{粗蛋白質}(\%) - \text{粗脂質}(\%) - \text{粗灰分}(\%)。$$

(十三) 抗氧化能力分析

1. 樣品萃取

根據 Qiu 等人(2010)的方法加以修改，秤取 1 g 樣品粉末置於 15 mL 離心管中加入 10 mL 80%甲醇，室溫震盪萃取 1 h，於 1430g 離心 5 min，將上清液取出置於 15 mL 離心管中，置於-20°C儲藏備用。

2. DPPH 自由基清除能力

根據 Zeng 等人(2019)的方法加以修改，於避光環境下取 50 μ L 甲醇萃取溶液至呈色管，加入 450 μ L DPPH 試劑 (0.1 mM)。靜置 30 min 於 515 nm 下測定吸光值。

3. 標準曲線的製作

取 0.02 g Trolox(水溶性維生素 E)溶解至 20 mL 80%甲醇中，配製成 1000 ppm 的 Trolox 溶液，再配製濃度分別為 0, 5, 10, 25, 30, 50 和 100 ppm。



(十四) 總酚類化合物含量分析

根據 Johari & Khong (2019)加以修改。吸取 1 mL 80% 甲醇萃取溶液(樣品萃取液)至 15 mL 離心管中，避光環境下加入 2 mL 10% Folin-Ciocalteu 試劑，並震盪混合均勻，再加入 8 mL 7% 碳酸鈉，再次震盪混合均勻，反應 2 小時後，取 200 μ L 至 96 well plate 中(三重複)，於 750 nm 波長測定吸光值。標準曲線則取 1 mg 沒食子酸溶解於 10 mL 80% 甲醇中，配製成 100 ppm 的沒食子酸溶液，再稀釋配製濃度分別為 0, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 90 ppm。

(十五) γ -氨基丁酸(GABA)含量分析

依據 Jannoey 等人(2010)的方法加以修改。

1. 樣品萃取

取 1 g 樣品粉末加 4 mL 80% 乙醇，於室溫下震盪萃取 10 min，再於 4°C 下以 10000g 離心 10 min，收集上清液，含有沉澱物之離心管再加入 3 mL 之 80% 乙醇，重複上述再萃取一次，共 3 次，將 3 次收集之上清液混合，以 0.22 μ m 濾膜進行過濾，過濾之上清液以 80% 乙醇定量至同等體積，儲存於 4°C，待其分析。

2. 衍生化

準備 2 mL 微量離心管，先加入 0.5 mL 硼酸緩衝溶液(pH 8)和 0.5 mL 0.1% HN 衍生試劑，再加入 1 mL 過濾之萃取液，置於 80°C 水浴反應 10 分鐘進行衍生化。最後再以 0.22 μ m 濾膜過濾至 2 mL 褐色 vial 瓶，隨後上機分析。

3. HPLC 分析條件

以 C₁₈ 管柱及 UV 偵測器進行分析，偵測波長 330 nm，進樣體積 10 μ L，移動相流速 1 mL / min，移動相分別為 A: 0.1% 甲酸(formic acid)、B: 100% 乙晴(acetonitrile, ACN)，沖提梯度 0–5 min (65–60% A)、5–10 min (60–55% A)、10–20 min (55–65% A)、20–30 min (65–65% A)、30–35 min (65–60% A)、35–40 min (60–

55% A)、40–50 min (55–65% A)。



(十六) 感官品評

根據 Sipos 等人(2025)的方法加以修改。樣品包含市售產品(Oatly)、A-BRM、A-GBRM 以及 A-PBRM。使用無氣味並乾淨的空杯，倒入約 10 mL 樣品，並隨機標示組別代碼。每個樣品由 10 位小組成員進行品評測驗，並且在 30 分鐘內完成感官品評。品評成員年齡介於 23 至 60 歲之間，其中包含 6 位女性和 4 位男性。

品評成員將根據 6 種指標進行評分，分別是香氣、甜度、濃稠度、滑順度、後味以及色澤。並且使用了九分量表進行評分(1 分 = 極度不喜歡；2 分 = 非常不喜歡；3 分 = 中度不喜歡；4 分 = 輕微不喜歡；5 分 = 既不喜歡也沒有喜歡；6 分 = 有點喜歡；7 分 = 中度喜歡；8 分 = 非常喜歡；9 分 = 極度喜歡)。

(十七) 數據統計分析

實驗數據以 SPSS 統計分析軟體，進行變異數分析(analysis of variance, ANOVA)，並以 Duncan's 多變異法(multiple range test)進行差異性比較。實驗結果之相關性分析也以 SPSS 統計分析軟體進行。

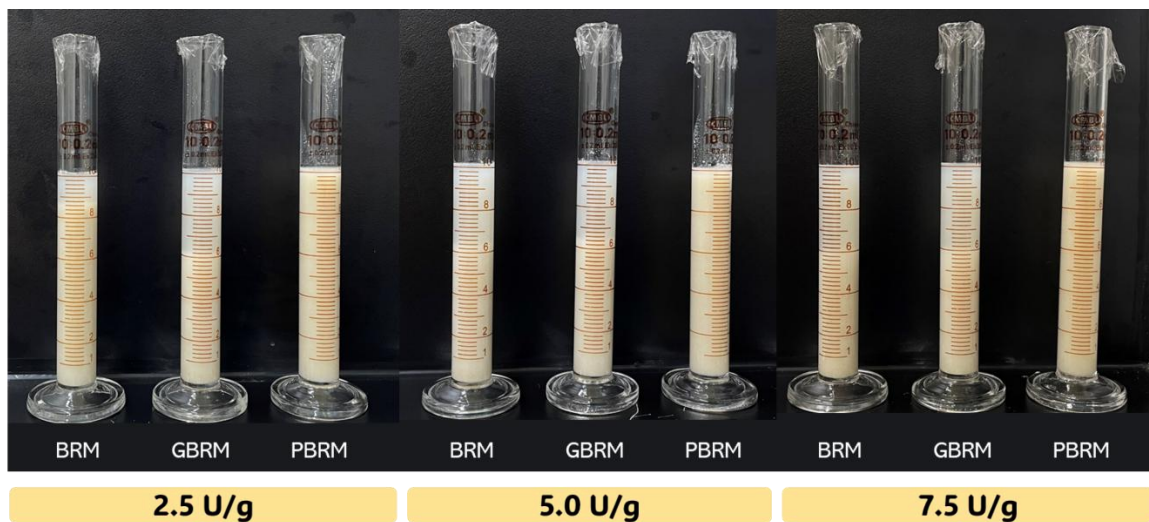
伍、結果與討論



一、實驗組製程參數之篩選

(一) 酵素水解製程

在實驗組製程建立初期，先使用酵素(α -澱粉酶和葡萄糖澱粉酶)分別以 2.5、5.0、7.5 U/g rice flour 的劑量進行酵素水解預實驗。從實驗結果可以得知，單純使用酵素水解製程，所製得的樣品其分散穩定性不佳(如圖二十二)。放置一天後，糙米奶(BRM)和發芽糙米奶(GBRM)之分散穩定性降至 56-90%不等。其中，預熟糙米奶(PBRM)由於其黏度高(139.67-187.00 cP)，故無分層現象，並且，可觀察到隨著酵素劑量越高，樣品之分散穩定性越差。此外，如表十二所示，所有組別之黏度均高於目標值(黏度 < 10 cP)。根據 Kittibunchakul 等人(2021)之研究顯示，透過均質製程可增加樣品的穩定性及白度指數。基此，後續將提高酵素劑量，並納入均質製程之參數進行開發。



圖二十二、不同酵素劑量下米基底奶之分散穩定性。

Fig. 22. Dispersion stability of rice-based milk under different enzyme dosages.



表十二、不同酵素劑量下米基底奶之黏度特性

Table 12. Viscosity of rice-based milk under different enzyme dosages

Enzyme dosage (U/g)	Sample	Viscosity (cP)
2.5	BRM	13.90 ± 0.35 ^d
	GBRM	10.63 ± 0.21 ^g
	PBRM	187.00 ± 9.64 ^a
5.0	BRM	11.47 ± 0.15 ^{ef}
	GBRM	12.00 ± 0.10 ^e
	PBRM	144.33 ± 5.86 ^b
7.5	BRM	11.27 ± 0.06 ^f
	GBRM	10.63 ± 0.15 ^g
	PBRM	139.67 ± 2.89 ^c

*Values represent Mean ± SD (n=3).

*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

透過酵素水解作用，可使糊化澱粉漿液中的懸浮顆粒變小且分散均勻，有利於後續均質製程之進行，使油滴在乳液系統中的分散性更為穩定，不易因大顆粒碰撞而產生聚集。此外，黏度為決定乳液穩定性之關鍵因素之一。較高的連續相黏度可減緩顆粒的沉降速度。根據史托克定律(Stokes' law)，沉降速率與液體黏度成反比，並且與顆粒之粒徑平方成正比。當液體黏度增加一倍則可使沉降速率減半。因此，由樣品之黏度分析結果可推測其分散穩定性。

進行不同酵素劑量之參數調整，酵素劑量是根據先前之預實驗結果以及對照組之黏度數據所訂定之。首先，針對糙米奶(BRM)和發芽糙米奶(GBRM)進行探討。分別使用了 10、20、30、40 及 50 U/g rice flour 之酵素劑量進行水解製程，並添加 0.6% (w/w)米糠油進行均質。由圖二十三可觀察到，低酵素劑量組別(10 U/g rice flour)，兩者樣品皆較為均勻，幾乎無明顯分層，代表其分散穩定性較佳。然而，逐漸提高酵素至 20、30 U/g 時，分層開始出現，上層出現較清澈或稀薄的液



相；當劑量達 40、50 U/g 時，明顯可見上下層分離，上清液增多且呈現混濁狀。米穀粉漿液之結構主要來自於澱粉顆粒的糊化與膠體網狀結構(Zhang *et al.*, 2025)。當使用 α -澱粉酶及葡萄糖澱粉酶進行酵素水解反應時，使大分子澱粉分解為較小分子之糊精及游離糖。隨著酵素劑量的增加，漿液中之結構崩解程度越高，進而使其穩定性降低(Deswal *et al.*, 2013)。同時，較高的酵素劑量亦釋出更多的游離糖，進而使上清液含有較高濃度之溶質而更為混濁。由表十三可得知酵素水解製程大幅降低了樣品之黏度，並且隨著酵素劑量的增加，樣品黏度下降越多。此結果與原料米之水合性質結果相符，由於糙米和發芽糙米之膨潤力及吸水指數並無顯著差異(陳，2024)，代表其水合性質相似。因此，經過水熱處理後，兩者的乳液特性亦呈現相似的表現。根據分散穩定性及黏度分析結果，選擇使用酵素劑量 10 U/g rice flour 作為 BRM 和 GBRM 之使用劑量。此劑量使樣品適度水解，且黏度達目標範圍(< 10 cP)，同時分散穩定性佳。

根據對照組之黏度分析結果可得知，預熟糙米組別之黏度顯著高於糙米與發芽糙米組別。因此，調整酵素劑量至 50、60、70、80、90 U/g rice flour 進行實驗。根據圖二十三，低酵素劑量組別之樣品(50-70 U/g rice flour)，其分散穩定性均佳，在放置一天後，均無分層現象發生。然而，提高酵素劑量後(如 80 和 90 U/g rice flour)，樣品具有不均勻且在中間層產生分層的現象。這可能是由於酵素的水解作用，使澱粉結構崩解所導致(Deswal *et al.*, 2013)。此外，透過表十三可觀察到，在酵素劑量 50-80 U/g rice flour 區間，隨著酵素劑量增加而黏度隨之降低。然而，使用酵素劑量 90 U/g rice flour 的樣品其黏度反而上升。此現象在糙米奶與發芽糙米奶亦可觀察之，BRM 與 GBRM 在使用酵素劑量 60 U/g rice flour 時，其黏度亦有上升趨勢(分別上升至 4.26 和 4.66 cP)。推測可能是由於在高劑量的酵素處理下，導致過度水解而造成更多的短鏈糖類形成，透過氫鍵作用增加交互作用力，促進了具有高黏度之寡糖或其他聚糖類分子的形成，並形成膠體結構進而增加乳液黏

度(Zarski *et al.*, 2024)。根據分散穩定性的結果，篩選酵素劑量範圍為 50-70 U/g rice flour；又從黏度分析結果得知，酵素劑量 70 U/g rice flour 的樣品其黏度特性達目標值(< 10 cP)。因此，預熟糙米奶(PBRM)之酵素劑量訂為 70 U/g rice flour。在此酵素劑量反應下，樣品的黏度符合目標(< 10 cP)，並且分散穩定性佳。

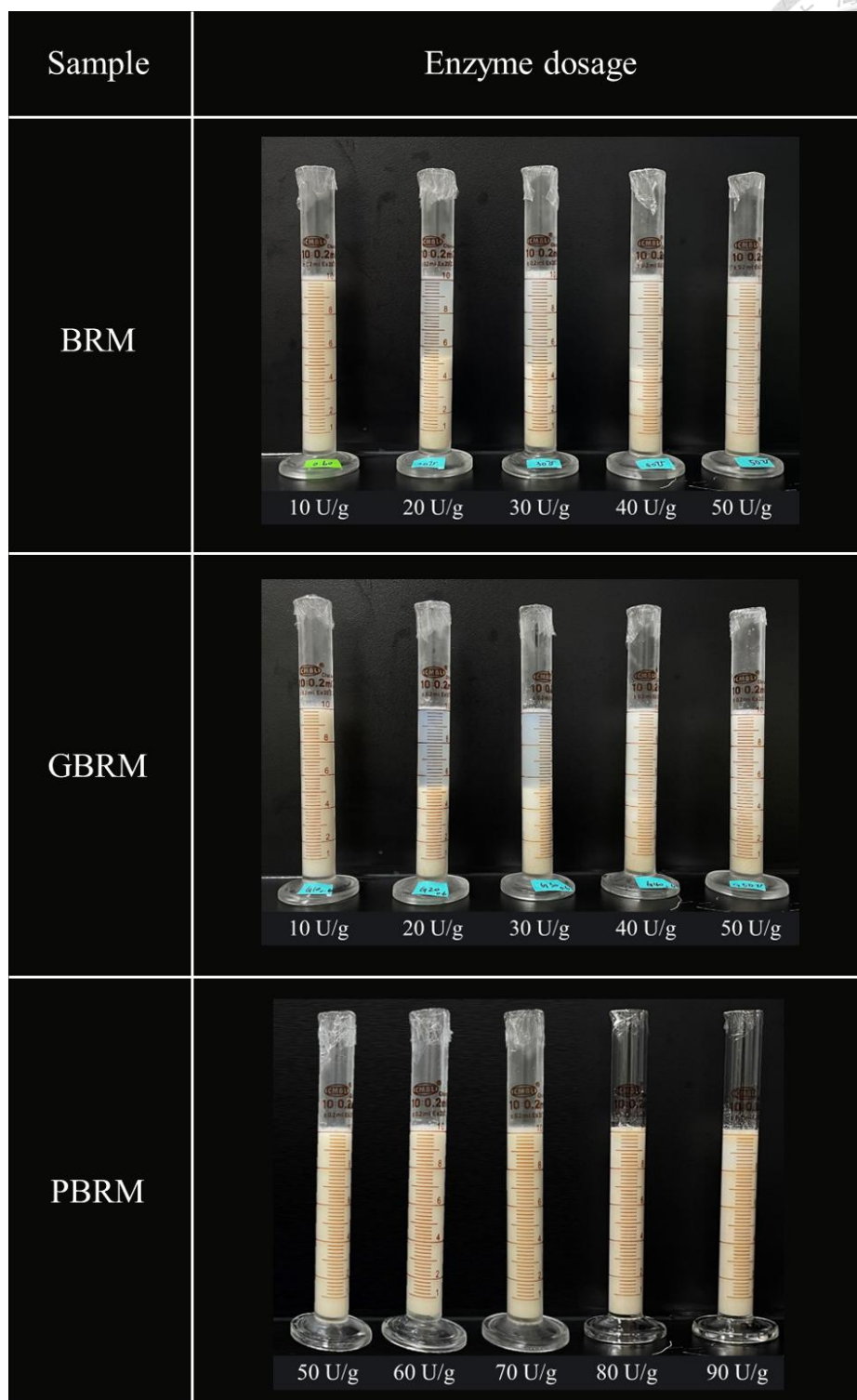
表十三、不同酵素劑量下米基底奶之黏度

Table. 13. Viscosity of rice-based milk at different enzyme dosages

Enzyme dosage (U/g)	Viscosity (cP)		Enzyme dosage (U/g)	Viscosity (cP)
	BRM	GBRM		PBRM
10	6.80	6.77	50	10.36
20	4.92	5.76	60	10.17
30	4.66	5.33	70	8.33
40	4.16	4.59	80	9.12
50	3.75	4.24	90	10.71
60	4.26	4.66	100	14.72

*Samples were determined at 7°C for one day.

*BRM, GBRM, and PBRM: brown rice milk, germinated brown rice milk, and parboiled brown rice milk, respectively.



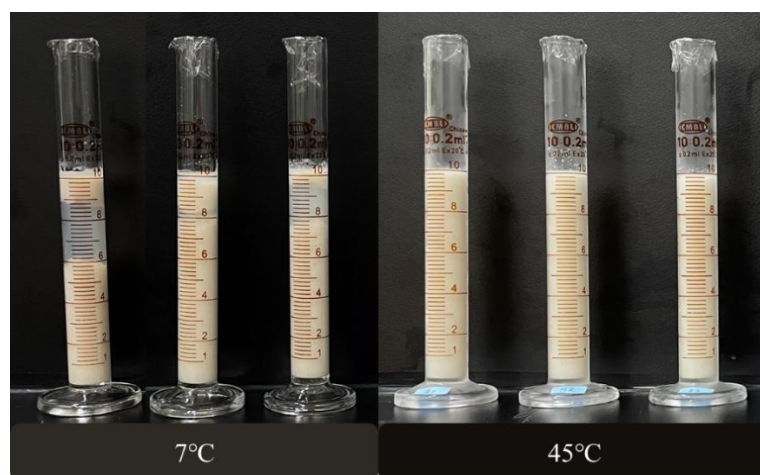
圖二十三、米基底奶使用不同酵素劑量之分散穩定性(在 7°C 下放置一天)。

Fig. 23. Dispersion stability of rice-based milk at different enzyme dosages (stored at 7°C for 1 day).

(二) 均質製程

均質製程使分散顆粒數量增加以及顆粒粒徑減小，導致液滴間之阻力增加，進而提升乳液的黏度(Tao *et al.*, 2024)。此時，黏度越大，使液滴的運動速度減慢，從而延緩絮凝和聚結之現象發生，使乳液性質穩定(Lin *et al.*, 2025)。接續實驗參考 Veijalainen 等人(2024)的研究結果，添加米糠油 0.6% w/w 以 18000 rpm 進行均質 3 min。

均質製程中，溫度亦為重要之影響參數。樣品的溫度將改變乳化劑的吸附能力、乳液的界面張力和黏度等，進而影響乳液之理化特性。當樣品溫度較高時，由於黏度和界面張力降低，進而利於乳化作用進行(Rosdi *et al.*, 2018)。此外，高溫下，分散液會傾向於克服連續相的淨吸引力。因此，會使乳液中的顆粒尺寸減小，進而提升分散穩定性(Chen & Tao, 2005)。然而，溫度急遽升高或降低，則易使顆粒凝聚，導致乳液性質劣化(Rosdi *et al.*, 2018)。因此，本研究分別實驗了樣品於 7°C 與 45°C 下之分散穩定性，結果與上述文獻相符(如圖二十四)。在 7°C 下，樣品具有明顯的分層現象，並且在 45°C 下均質具有較好的穩定性。根據此結果，本研究將樣品之均質溫度訂為 45°C 進行。



圖二十四、樣品於不同均質溫度下之分散穩定性。

Fig. 24. Dispersion stability of the samples at different homogenization temperatures.



二、米基底奶之物理性質

(一) 黏度特性

黏度特性為植物奶口感質地之重要指標。表十四為市售產品(Oatly)、對照組樣品(過濾組和過篩組)以及實驗組樣品之黏度分析結果。本研究分析了樣品在低溫下(7°C)和高溫下(45°C)之黏度特性，以確認樣品的應用多樣性，使其可運用在更廣泛的產品領域。為了建立實驗組之預備製程，故設計兩組對照組進行比較。首先，為了使樣品之固形物含量與市售產品接近，因此提高米穀粉所佔的比例(1:6.25)，進而提高樣品黏度。

針對對照組之黏度特性進行比較。整體而言，無論是過濾組或過篩組別，預熟糙米奶(PBRM)之黏度特性均高於糙米奶(BRM)及發芽糙米奶(GBRM)。此結果可利用圖二十五之光學顯微影像中觀察，PBRM 之澱粉結構較為鬆散，不同於 BRM 和 GBRM 較為緊實。由於預熟製程破壞澱粉之部分結晶構造，使許多親水性官能基暴露出來，進而易與水結合而形成氫鍵。因此，預熟米穀粉在加水後能快速吸水膨潤(To *et al.*, 2020)。根據陳(2024)的研究中，可以得知預熟糙米(PBR)之吸水指數(WAI)以及膨潤力(SP)，均較糙米(BR)及發芽糙米(GBR)來得高，且 WAI 和 SP 之趨勢相同。此結果與 Kraithong 等人(2018)的研究結果相符合，該研究認為較大的澱粉顆粒會降低 WAI，進而降低黏度。代表著原料之 WAI 以及 SP 會與米基底奶樣品之黏度呈現正相關。因此，在黏度分析中，BRM 與 GBRM 的數據較為接近，且不同於 PBRM。根據 7°C 下所測得的結果，過篩組的糙米奶(S-BRM)及發芽糙米奶(S-GBRM)之黏度分別為 180 p 及 183 p，高於過濾組樣品(分別為 F-BRM 144 p 及 F-GBRM 166 p)。過篩樣品保留了所有細微之懸浮顆粒，包含澱粉膠體結構以及非澱粉固形物(如糠層)，此類懸浮顆粒增加漿液中之摩擦阻力，進而提升黏度。反之，針對預熟糙米而言，則為過濾組之黏度高於過篩組(分別為 F-PBRM 350 p 及 S-PBRM 294 p)。這是由於預熟米之澱粉顆粒透過預糊化處理，在過篩組及過濾組中均以膠化之懸浮顆粒形式存在。在過篩組中保留所有糠層等非澱粉顆粒，且大多為澱粉凝膠所包裹固定，僅有小部分為自由懸浮；反之，過濾組移除部分較大之非澱粉顆粒，使得系統中之顆粒尺寸較小且較均勻，進而提

升黏度(Koca *et al.*, 2018)。換言之，預熟米的預糊化性質，使其在過篩或過濾處理後之顆粒懸浮型態較為接近，差異僅在非澱粉顆粒之含量多寡，進而影響澱粉膠體之黏滯性。

經升溫至 45°C所測得的結果顯示樣品的黏度均大幅下降至 7°C時黏度之一半不到；過篩組(S)的黏度降幅比過濾組(F)顯著。此升溫造成的黏度下降現象與澱粉冷成膠性質相關。根據 Chakraborty 等人(2023)之研究可以得知，氫鍵結合屬於極性鍵結，其結合需透過放熱，因而在高溫環境下，會阻礙氫鍵之形成。反之，於低溫下，澱粉分子擁有較低的動能，因此，將會促使氫鍵鍵結且較穩定，保留水分子於結構之中，進而形成凝膠、增加黏度。因此，由 7°C升溫至 45°C時，高溫破壞了因澱粉分子小而形成之穩定凝膠結構。此時的黏度特性取決於溶質濃度(Chenlo *et al.*, 2002)。根據後續之基本成分分析可得知，BRM 和 GBRM 之過濾組固形物含量高於過篩組；PBRM 之過篩組固形物高於過濾組。因此，黏度特性亦呈現此趨勢。

實驗組之參數是根據樣品之黏度及分散穩定性所訂定之，目標是希望貼近市售植物奶產品的黏度值(< 10 cP)。由黏度結果可以得知，經由酵素水解製程後，有效降低了米基底奶樣品之黏度特性，並且黏度值接近於市售產品(Oatly)，代表其口感特性亦接近於市售產品，進而提升其經濟價值。透過實驗組的黏度特性，可觀察到三種米原料經過不同的製程後(過濾、過篩、酵素水解及均質)，其黏度特性之趨勢均相同，依序為預熟糙米奶高於發芽糙米奶和糙米奶。此結果呼應了上述提及的原料米之水合性質所造成之結果。

表十四、米基底奶之黏度特性

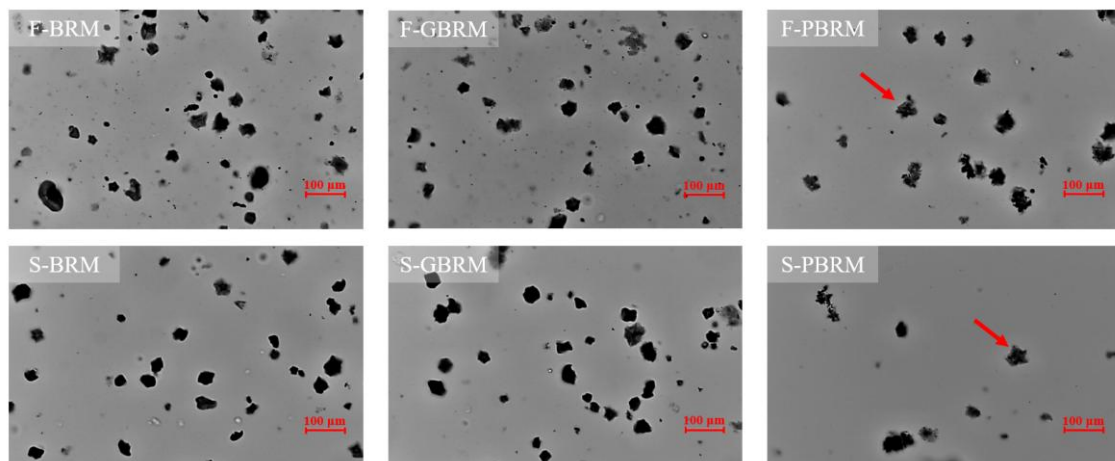
Table 14. Viscosity characteristics of rice-based milk

Sample	Viscosity (cP)	
	7°C	45°C
Oatly	5.48 ± 0.02 ^g	3.75 ± 0.02 ^g
F-BRM	14403.33 ± 15.28 ^f	5918.33 ± 7.64 ^c
F-GBRM	16636.67 ± 15.28 ^c	7808.33 ± 7.64 ^c
F-PBRM	34966.67 ± 5.77 ^a	15503.33 ± 5.77 ^a
S-BRM	18000.00 ± 10.00 ^d	5761.67 ± 12.58 ^f
S-GBRM	18313.33 ± 11.55 ^c	7308.33 ± 7.64 ^d
S-PBRM	29363.33 ± 5.77 ^b	12416.67 ± 5.78 ^b
E-BRM	7.15 ± 0.05 ^g	3.90 ± 0.01 ^g
E-GBRM	8.79 ± 0.20 ^g	5.04 ± 0.02 ^g
E-PBRM	9.92 ± 0.06 ^g	5.15 ± 0.01 ^g

*Values represent Mean ± SD (n=3).

*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

*F-, S-, and E- represent filtrated, sieved, and experimental samples.



圖二十五、對照組樣品經染色後之光學顯微影像(比例尺 = 100 μm)。

Fig. 25. Optical microscopy image of the stained control group (scale bar = 100 μm).

(二) 分散穩定性

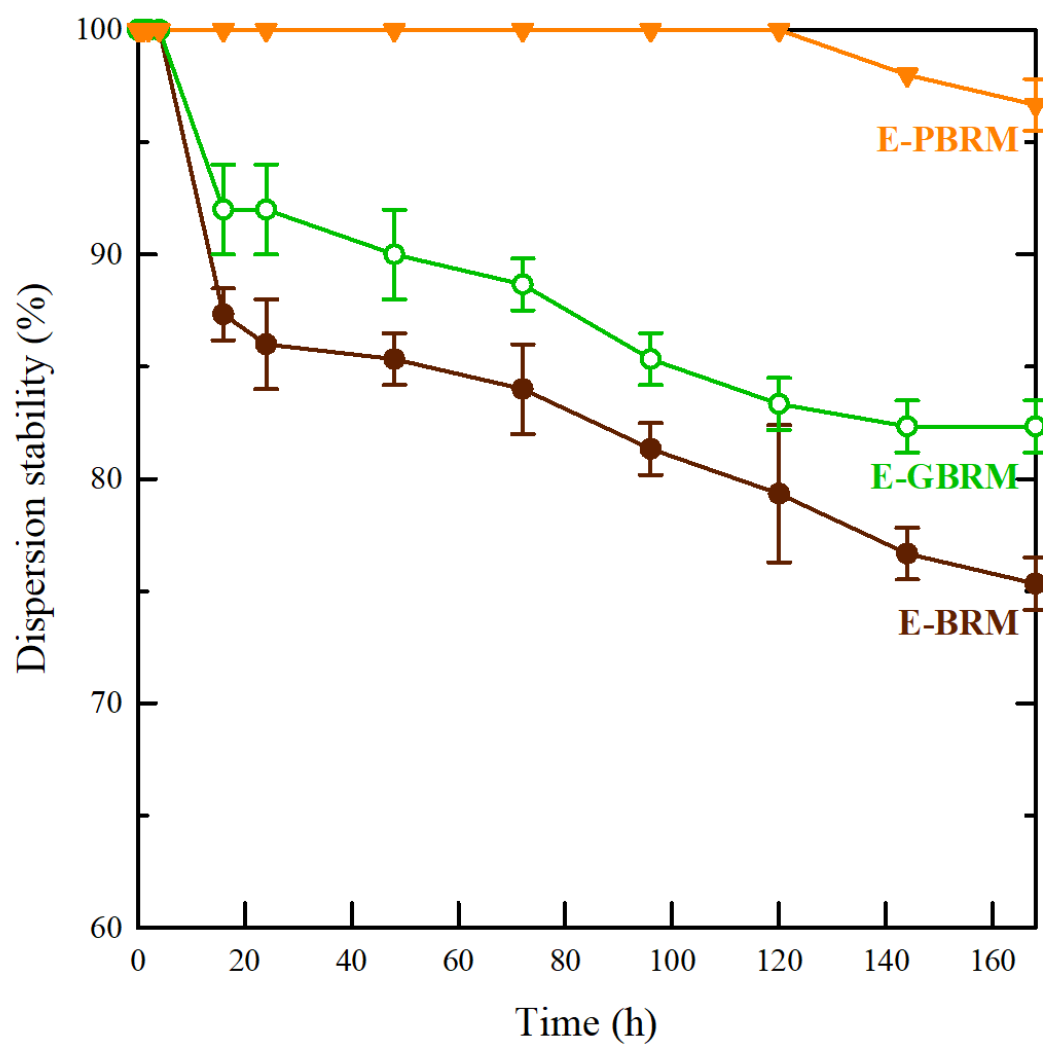
分散穩定性為判定飲料產品品質之重要分析項目，結果如圖二十六。本研究藉由均質製程加以改善樣品之分散穩定性，於研究過程中發現添加米糠油 0.6% w/w 以 18000 rpm 進行均質 3 分鐘，並於過程中控制樣品溫度於 40-50°C，可提高樣品之分散穩定性。藉由米糠油之添加增強了油水界面之穩定性；由 Aydar 等人 (2020) 之研究可得知植物基底乳品之穩定性與膠體分子間之靜電及疏水作用具有相關性。均質製程透過減小固形物顆粒的粒徑，使其更加均勻地分布在乳液中，減少脂肪漂浮現象，並且增強脂質和蛋白基質的相互作用，減少脂質聚集，進而提高了樣品之分散穩定性(Shao *et al.*, 2023)。

由圖二十六(A)可以得知，實驗組中預熟糙米奶之分散穩定性最佳，直至 144 小時，其分散穩定性仍高達 96.67%。然而，糙米奶(BRM)之穩定性較差，於放置 8 小時後已開始出現分層現象。該現象可能與樣品之黏度特性有關，根據 Feng 等人(2024)之研究指出，黏度較高之澱粉漿液其分散穩定性較佳。因此，在控管樣品黏度的同時，亦需確認該樣品之穩定性。由圖二十六(B)之外觀結果，進一步展示了樣品之分散穩定性，E-PBRM 在儲存期間未觀察到明顯的分層，然而 BRM 在 24 小時後，於外觀上已有明顯沉降現象。結果表示預熟糙米奶於均勻性與分散穩定性上具有顯著之優勢。

綜合黏度特性與分散穩定性之結果進行討論，以市售產品 Oatly 做為參考基準，可以觀察到 E-PBRM 不僅黏度特性接近市售產品，且在分散穩定性上具有良好之表現，代表著該樣品為本研究中口感及質地最佳之米基底植物奶。



(A)

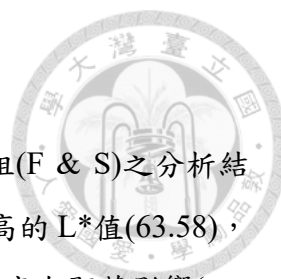


(B)

Time/sample	E-BRM	E-GBRM	E-PBRM	Time/sample	E-BRM	E-GBRM	E-PBRM
0 h				2 h			
Dispersion stability (%)	100	100	100	Dispersion stability (%)	100	100	100
4 h				8 h			
Dispersion stability (%)	100	100	100	Dispersion stability (%)	98	100	100
24 h				48 h			
Dispersion stability (%)	92	94	100	Dispersion stability (%)	87	91	100

圖二十六、實驗組米基底奶之分散穩定性。(A)不同時間下米基底奶之分散穩定性(%)，(B)不同時間下米基底奶之外觀特性。

Fig. 26. Dispersion stability of the experimental group. (A) Dispersion stability (%) of rice-based milk during different times, (B) The visual appearance of rice-based milk during different times.



(三) 色澤特性

米基底奶之色澤分析結果整理於表十五。首先，針對對照組(F & S)之分析結果進行比較。L*值代表著樣品的明亮度，其中 S-PBRM 具有最高的 L*值(63.58)，S-BRM 的 L*值則為最低(58.89)。不同加工處理方法對樣品的亮度有顯著影響($p < 0.05$)。過篩組樣品(S-PBRM 和 S-GBRM)整體上亮度較高，這可能是因為經過預熟加工後，澱粉糊化、回凝，使樣品更加透明，且稻殼和糠層上的色素因擴散作用而深入胚乳使色澤更加鮮明，從而增加亮度。此外，懸浮微粒較多也會提高光的散射進而使亮度提高。預熟處理後的樣品(F-PBRM 和 S-PBRM)的 L*值均較其他樣品高，特別是 S-PBRM 的 L*值達 63.58，顯著高於其他樣品。這可能與預熟處理後，澱粉回凝結晶有關；細小的結晶顆粒會提高光的散射。a*值反映了樣品的紅綠色調，所有樣品均為負值，表示帶有綠色調。其中，F-GBRM 的數值最低，這可能與發芽過程中酶的活化有關，導致葉綠素含量增加，使得樣品顏色偏綠；發芽過程中葉綠素和其他綠色色素由胚芽轉移至胚乳所致(Müller *et al.*, 2021)。整體而言，a*值較小，很難由肉眼判斷出差異。b*值反映了樣品的黃藍色調，S-PBRM 的 b*值最高(7.23)，F-GBRM 之 b*值則為最低(3.85)。過篩處理的樣品(尤其是 S-PBRM)的 b*值顯著高於其他樣品，表示其黃色調更強。這可能是由於過篩處理保留了更多的米糠成分，這些成分中含有較多的黃色色素，如類胡蘿蔔素。此外，發芽處理的樣品(尤其是 F-GBRM)在黃值(b*)和黃度(YI)方面相對較低，這可能與發芽過程中酵素的活化和色素分解有關，如多酚氧化酶(polyphenol oxidase)的活化。此外，發芽過程也會有清洗的動作，也會導致色素的流失。WI 值顯示了樣品的白度，S-PBRM 的 WI 值最高(62.85)，而 S-BRM 的 WI 值最低(58.61)。過篩處理的樣品(S-PBRM)的白度指數最高，這與其較高的亮度值具有一致性，表示過篩處理，能有效提高樣品的白度。YI 值顯示樣品的黃度，S-PBRM 的 YI 值也最高(16.25)，F-BRM 的 YI 值最低(9.12)。此外，預熟處理後的樣品在黃值(b*)和黃度(YI)方面也顯著增加，S-PBRM 的 b*值和 YI 值分別達到 7.23 和 12.67，這可能是由於預熟過程中高溫高壓處理使得色素釋放和轉化增加(Leethanapanich *et al.*, 2016)，此外，預熟過程的梅納反應也是造成 b*值和 YI 值提高的原因之一。整體而言，不同處理方法顯著影響了米基底奶之色澤參數。過篩處理能顯著提高樣品

的亮度和白度，但也會增加黃度；過濾處理則能使不同組別之樣品色澤更加均一。

實驗組(E)之加工製程(如酵素水解及均質製程)可顯著提升米基底奶之亮度(L^*)，使其色澤特性更接近市售產品，可能與酵素水解製程使結構更細緻並且減少顆粒之懸浮有關。此外，在酵素水解處理後，樣品之 a^* 值亦顯著提升，代表樣品由綠色調轉為紅色調，並且更趨近於市售產品。實驗組樣品中，E-BRM ($b^* 17.03$, $YI 32.83$)與 E-GBRM ($b^* 15.55$, $YI 30.09$)顯著高於對照組，表示酵素水解釋放更多色素化合物(如類胡蘿蔔素)。WI 值代表著樣品的白度，實驗組中，E-GBRM (69.46)與 E-BRM (68.91)顯著優於對照組數據，呼應了前述明亮度增強之結果，此外，根據 Shao 等人(2023)之研究指出，均質化透過改變固形物顆粒的粒徑與分布，增強了光線的散射效果，使樣品顏色更均勻且白度更高。對照組樣品的 WI 值最低，尤其是 S-BRM (58.61)。最後，針對總色澤差異指數(ΔE^*)進行探討， ΔE^* 數值越低，代表樣品的顏色越接近參考標準(Oatly)，由結果可以得知對照組樣品之 ΔE^* 相較於實驗組與參考標準差異較大(尤其是 S-BRM 之 ΔE^* 為 24.03，為所有樣品中差異最大的)，可能由於未經酵素水解及均質處理，導致樣品顏色較深且不均勻。實驗組樣品經酵素水解與均質處理後，顏色明亮度(L^*)顯著提升，且 a^* (紅綠色調)和 b^* (黃藍色調)更接近市售產品，整體而言，實驗組之加工方式顯著改善了色澤特性，進一步提升樣品之感官特性。

最後，針對商業滅菌樣品(A)進行探討。首先，針對外觀結果進行討論(如圖二十七)。在商業滅菌處理(121°C ; 15 min)後，樣品的外觀變得更為深色，並且三種米原料之樣品色澤有所差異。根據表十五的色澤分析結果進行更深入的探討。經過商業滅菌處理後，樣品之 L^* 值均顯著下降，代表著樣品經過高壓高熱處理後其明亮度顯著下降。這可能與高壓高熱條件下，使醣類進行焦糖化反應(caramelization)與梅納褐變反應，進而產生焦褐色且具香味化合物之物質，如梅納汀(melanoidins)及小分子醛、酮化合物，而造成樣品色澤變深之趨勢。此外， a^* 值在商業滅菌後顯著上升，並且相較於實驗組更趨近於市售產品。其紅色色調的增加，與上述之焦糖化反應相關。此外，在高溫處理之下，其梅納褐變之反應亦更為顯著，進一步使樣品紅色色調提升。 b^* 值和 YI 值均顯著高於實驗組樣品。在商業滅菌處理時促進了酵素性及非酵素性褐變，使樣品黃色度大幅增加，並且

較市售產品更高。也因為褐變反應，故樣品之白色度(WI)亦在商業滅菌處理後顯著下降。此結果象徵著此製程尚有需改善之處，或許將來的研究方向可藉由改善酵素失活製程，來趨緩樣品褐變反應之狀況，進而改善樣品之感官特性。



表十五、米基底奶之色澤特性

Table 15. Color characteristics of rice-based milk

Sample	L*	a*	b*	WI	YI	ΔE^*
Oatly	78.77 $\pm$ 0.02 ^a	5.82 $\pm$ 0.02 ^b	16.23 $\pm$ 0.02 ^b	72.78 $\pm$ 0.01 ^a	29.07 $\pm$ 0.03 ^d	-
F-BRM	60.79 $\pm$ 0.06 ^g	-1.26 $\pm$ 0.55 ^f	3.88 $\pm$ 0.09 ^d	60.58 $\pm$ 0.06 ^{gh}	9.12 $\pm$ 0.21 ^f	22.83 $\pm$ 0.20 ^{bc}
F-GBRM	60.15 $\pm$ 0.23 ^g	-1.44 $\pm$ 0.01 ^f	3.85 $\pm$ 0.07 ^d	59.94 $\pm$ 0.23 ^{hi}	9.14 $\pm$ 0.17 ^f	23.41 $\pm$ 0.18 ^{ab}
F-PBRM	62.30 $\pm$ 1.09 ^f	-1.29 $\pm$ 0.07 ^f	5.53 $\pm$ 0.06 ^d	61.87 $\pm$ 1.07 ^{fg}	12.67 $\pm$ 0.08 ^f	20.80 $\pm$ 0.92 ^d
S-BRM	58.89 $\pm$ 0.15 ^h	-1.35 $\pm$ 0.02 ^f	4.61 $\pm$ 0.12 ^d	58.61 $\pm$ 0.14 ⁱ	9.12 $\pm$ 0.21 ^f	24.03 $\pm$ 0.19 ^a
S-GBRM	60.72 $\pm$ 0.02 ^g	-1.10 $\pm$ 0.03 ^f	5.29 $\pm$ 0.04 ^d	60.35 $\pm$ 0.01 ^h	9.14 $\pm$ 0.17 ^f	22.11 $\pm$ 0.04 ^c
S-PBRM	63.58 $\pm$ 0.08 ^e	-1.04 $\pm$ 0.04 ^f	7.23 $\pm$ 0.08 ^c	62.85 $\pm$ 0.07 ^f	12.67 $\pm$ 0.08 ^e	18.85 $\pm$ 0.12 ^e
E-BRM	74.13 $\pm$ 0.13 ^b	2.68 $\pm$ 0.13 ^e	17.03 $\pm$ 0.48 ^b	68.91 $\pm$ 0.38 ^{bc}	32.83 $\pm$ 0.98 ^c	5.71 $\pm$ 0.11 ⁱ
E-GBRM	73.83 $\pm$ 0.16 ^b	2.34 $\pm$ 0.15 ^e	15.55 $\pm$ 0.68 ^b	69.46 $\pm$ 0.49 ^b	30.09 $\pm$ 1.38 ^{cd}	6.10 $\pm$ 0.02 ^{hi}
E-PBRM	71.99 $\pm$ 0.04 ^c	3.46 $\pm$ 0.09 ^d	15.98 $\pm$ 0.28 ^b	67.57 $\pm$ 0.18 ^{cd}	31.70 $\pm$ 0.57 ^{cd}	7.19 $\pm$ 0.01 ^{gh}
A-BRM	71.95 $\pm$ 0.61 ^c	5.41 $\pm$ 0.57 ^b	20.34 $\pm$ 1.50 ^a	64.92 $\pm$ 1.44 ^{de}	40.40 $\pm$ 3.31 ^{ab}	8.14 $\pm$ 1.24 ^g
A-GBRM	72.53 $\pm$ 0.86 ^c	4.68 $\pm$ 0.87 ^c	19.13 $\pm$ 2.47 ^a	66.18 $\pm$ 2.20 ^{de}	37.71 $\pm$ 5.28 ^b	7.31 $\pm$ 1.46 ^g
A-PBRM	69.00 $\pm$ 0.31 ^d	6.45 $\pm$ 0.52 ^a	20.29 $\pm$ 1.22 ^a	62.39 $\pm$ 1.00 ^f	42.02 $\pm$ 2.72 ^a	10.72 $\pm$ 0.77 ^f

Brightness, L; redness, a*; yellowness, b*; white index, WI; yellow index, YI.

*Values represent Mean $\pm$ SD (n = 3).

*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

*F-, S-, E-, and A- represent filtrated, sieved, experimental, and autoclaved experimental samples.

Sample	BRM	GBRM	PBRM
Experimental group (E)			
Autoclaved experimental group (A)			

圖二十七、實驗組樣品於商業滅菌前與後之色澤外觀結果。

Fig. 27. The color appearance results of the experimental group samples before and after commercial sterilization.



三、米基底奶之化學性質

(一) 基本成分分析

本研究的基本成分分析分別利用乾基與濕基含量百分比之方式呈現，適用於不同目的。濕基數據是基於樣品中包含水分的總量進行計算而得，適合用於樣品之實際狀態，例如更貼近於市售產品之營養標示呈現。然而，由於樣品含水量之差異，濕基數據的成分比例可能不直接反映樣品的實際營養成分含量，例如，水分高的樣品可能看似成分含量較低。乾基數據為去除水分後之計算結果，更準確地反映樣品之營養成分比例，較適用於分析不同加工製程對於樣品成分之影響及差異。但同時此呈現方法忽略了水分的影響，可能較不符合消費者實際使用狀態。因此，以下內容將分別針對濕基與乾基結果進行探討。

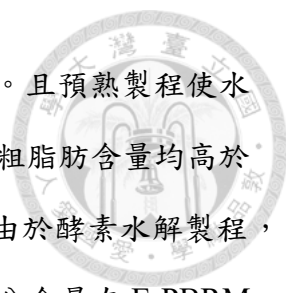
首先，針對表十六(a)之濕基結果進行討論。在對照組中，不論是過篩組或過濾組，其水分含量均接近 90%，以過篩組的 S-PBRM 樣品的水分含量最低(88.22%)，且具統計差異。推測可能由於過濾組於糊化後進行過濾，此步驟將較多之不溶於水之固形物過濾去除，進而提升過濾組的整體水分含量，但多數組別之水分含量不具顯著差異。由於粗蛋白含量測定為委託國立宜蘭大學檢驗中心所檢驗，採標準品同步檢測，故僅有一次試驗的結果。過篩組之粗蛋白質含量普遍高於過濾組，推測可能由於過濾製程中利用濾布進行，可能將較多的米糠層過濾去除，然而，米糠層為米粒中蛋白質含量最高之部分(Li *et al.*, 2025)，因此造成了此結果。濕基條件下，可觀察出 S-PBRM 之粗脂肪含量最高(0.25%)，這是由於稻米大部分之脂質以脂質體的型態儲存於米糠之糊粉層中(Li *et al.*, 2025)，於預熟過程中破壞脂質體進而使其裂解釋出脂肪於胚乳中。然而，經由過濾處理，將脂質複合體過濾去除進而降低其粗脂肪含量，進而造成了 F-PBRM 粗脂肪含量最低之結果(0.18%)。針對粗灰分含量之結果可得知，過篩組之粗灰分含量普遍高於過濾組，推測與過濾製程去除了部分米糠層有關。過濾組與過篩組的總碳水化合物含

量差異不大，但過篩組樣品稍低(如 S-GBRM 9.56%)，此結果可能與過濾製程去除部分固形物顆粒相關。

於實驗組(E)之結果中可觀察到，不論為對照組或實驗組，預熟糙米奶之水分含量均低於其他組別，推測可能因為預熟製程之高溫高壓處理，將破壞米粒之內部結構(如澱粉、蛋白質或纖維素構造)，進而釋放更多固形物，提升其固形物比例相關。粗蛋白含量在 E-PBRM (2.10%)中顯著最高，其次為 E-GBRM (1.41%)和 E-BRM (1.39%)，均高於對照組(0.78%至 0.88%)。稻米中澱粉和蛋白質常以複合形式存在，利用澱粉酶分解澱粉結構，使緊密結合在澱粉表面或間隙中的蛋白質得以釋放(Xiang *et al.*, 2023；Ye *et al.*, 2019)。因此，酵素水解製程之水熱處理，增加了可溶性蛋白質之含量，進而提升實驗組之粗蛋白質含量。此結果與 Babolanimogadam 等人(2022)之研究結果相符，經酵素水解處理之燕麥奶其蛋白質含量高於未處理組。由 Xiang 等人於 2023 年的研究中可以得知，米穀粉中有一類蛋白質存在於澱粉顆粒表面、通道狀微觀結構以及基質中，此類蛋白質稱作 starch granule-associated proteins (SGAPs)。研究結果顯示此類蛋白質由於緊密嵌入澱粉顆粒結構，無法透過鹼液及鹼性蛋白酶處理而去除。本研究使用澱粉酶直接破壞澱粉結構，推測可能使此類蛋白質釋出，進而提高樣品之蛋白質含量。此外，無論是對照組或是實驗組，預熟糙米奶之粗蛋白質含量均為最高者，可能是因為高溫及高壓處理，使水溶性蛋白質由米糠層擴散進入胚乳(Bhar *et al.*, 2022)，進而增加預熟糙米原料之蛋白質含量，因此提升了預熟糙米奶之粗蛋白含量。接續探討粗脂肪含量之結果，由結果可得知實驗組之粗脂肪含量均高於對照組，這是因為實驗組添加了 0.6% w/w 之米糠油，進而增加了樣品之粗脂肪含量。根據灰分含量之結果可以得知實驗組之灰分含量高於對照組，可能是因為酵素水解製程於分解澱粉的同時，也可能間接破壞礦物質結合的基質(如澱粉和蛋白質)，進一步釋放了米基底奶中的無機成分。此外，實驗組所添加之米糠油亦可能攜帶微量的無

機物質，這類成分一同計入灰分含量，進一步提高了實驗組之灰分含量。最後，碳水化合物含量則為實驗組高於對照組，這是由於酵素水解製程將大分子澱粉部分水解為低聚糖、麥芽糖或葡萄糖等，進而提高可溶性糖類之含量。此外，預熟製程透過糊化作用使澱粉結構更為鬆散，進而提升酵素對於澱粉之作用效率，從而提高了預熟糙米奶中之碳水化合物含量。

接續，針對表十六(b)之乾基結果進行討論。此呈現更可凸顯加工製程對於樣品營養成分含量之影響。首先，針對對照組之結果進行探討。水分含量結果與濕基結果趨勢相近。根據粗蛋白質含量之結果可得知，過篩組樣品均高於過濾組別，此趨勢與濕基結果相似。然而，不同原料米間的差異不同於濕基結果，此現象歸因於樣品水分含量對於成分之影響。從結果可得知 S-BRM 之粗蛋白質含量(7.55%)高於 S-PBRM (7.47%)，針對此結果推測是由於稻米經預熟製程後將提高其硬度，導致預熟米進行磨粉及過篩製程後，其糠層流失現象較過濾組嚴重，進而導致其粗蛋白質含量較低之結果。粗脂質含量則由 F-PBRM (1.70%)與 S-PBRM (2.12%)中可觀察出顯著差異，由此可知過濾組中較多的米糠層流失，將會導致樣品中粗脂質含量之損失。乾基灰分含量中，過篩組別普遍高於過濾組，推測可能亦為過濾處理將較大顆粒之固形物去除，進而使灰分流失。總碳水化合物含量在乾基條件下顯示出更明顯的差異，結果顯示過濾組別普遍高於過篩組別，此結果可能由於過篩製程可保留較多粗蛋白、粗脂肪及粗灰分等，進而降低了碳水化合物含量之比例。實驗組樣品之水分含量均低於對照組，經酵素水解製程後，破壞了部分澱粉構造，釋出更多可溶性碳水化合物，並且釋放原鑲嵌於澱粉構造中之蛋白質，進而提升樣品固形物含量，因此其水分含量呈現下降之結果。利用乾基含量百分比更凸顯了樣品之粗蛋白含量，由結果可得知 E-PBRM 之粗蛋白含量最高(15.24%)，其次為 E-GBRM (11.26%)和 E-BRM (10.47%)，且均高於對照組。此趨勢與濕基結果相近，酵素水解製程部分破壞澱粉基質，使鑲嵌於結構中之蛋白質



得以釋放(Xiang *et al.*, 2023)，進而提升實驗組之粗蛋白質含量。且預熟製程使水溶性蛋白質由米糠層擴散進入胚乳(Bhar *et al.*, 2022)。實驗組之粗脂肪含量均高於對照組，除了實驗組製程中額外添加米糠油之因素外，亦可能由於酵素水解製程，破壞漿液結構，進而導致脂肪之釋放 (Xiang *et al.*, 2023)。粗灰分含量在 E-PBRM (1.52%)中最高，其次為 E-GBRM (1.46%)和 E-BRM (1.43%)，均高於對照組，此趨勢接近於濕基結果。最後，則是針對總碳水化合物含量進行討論，從結果可得知乾基含量百分比中，實驗組之碳水化合物含量低於對照組，與濕基結果相反，這是由於樣品中水分含量會影響整體之比例。且可能由於酵素水解會使樣品之粗蛋白質、粗脂質及粗灰分含量增加，進而降低了碳水化合物之比例。

綜合上述結果，酵素水解製程可顯著提升樣品之粗蛋白質、粗脂質和粗灰分之含量，尤其於乾基條件下更為凸顯。此外，E-PBRM 於多項指標均表現出良好之結果，為後續植物奶產品開發提供重要之參考價值。



表十六、米基底奶之基本成分分析結果：(a)濕基；(b)乾基

Table 16. Proximate compositions of rice-based milk: (a) wet basis; (b) dry basis

(a) Wet basis (% w.b.)

Sample	Moisture	Crude protein	Crude fat	Crude ash	Total carbohydrate
F-BRM	88.94 ± 0.33 ^a	0.79	0.22 ± 0.02 ^{cd}	0.15 ± 0.01 ^e	9.90
F-GBRM	89.05 ± 0.52 ^a	0.79	0.19 ± 0.02 ^d	0.14 ± 0.00 ^g	9.83
F-PBRM	89.32 ± 0.32 ^a	0.68	0.18 ± 0.04 ^d	0.14 ± 0.00 ^{fg}	9.92
S-BRM	89.16 ± 0.55 ^a	0.82	0.22 ± 0.02 ^{cd}	0.15 ± 0.00 ^{ef}	9.65
S-GBRM	89.30 ± 0.37 ^a	0.78	0.20 ± 0.01 ^d	0.16 ± 0.00 ^e	9.56
S-PBRM	88.22 ± 0.09 ^b	0.88	0.25 ± 0.03 ^c	0.15 ± 0.00 ^d	10.54
E-BRM	86.72 ± 0.04 ^d	1.39	0.56 ± 0.01 ^a	0.19 ± 0.00 ^b	11.14
E-GBRM	87.45 ± 0.07 ^c	1.41	0.59 ± 0.01 ^a	0.18 ± 0.00 ^c	10.37
E-PBRM	86.19 ± 0.04 ^d	2.10	0.40 ± 0.01 ^b	0.21 ± 0.00 ^a	11.10

*Values represent Mean ± SD (n=3).

*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

*F-, S-, and E- represent filtrated, sieved, and experimental samples.



表十六、米基底奶之基本成分分析結果：(a)濕基；(b)乾基

Table 16. Proximate compositions of rice-based milk: (a) wet basis; (b) dry basis

(b) Dry basis (% d.b.)

Sample	Moisture	Crude protein	Crude fat	Crude ash	Total carbohydrate
F-BRM	804.29 ± 26.60 ^a	7.12	1.96 ± 0.19 ^{de}	1.36 ± 0.08 ^{de}	89.56
F-GBRM	814.56 ± 42.23 ^a	7.19	1.77 ± 0.19 ^{de}	1.27 ± 0.01 ^f	89.77
F-PBRM	837.21 ± 28.04 ^a	6.42	1.70 ± 0.33 ^e	1.35 ± 0.01 ^e	90.53
S-BRM	824.05 ± 46.00 ^a	7.55	2.02 ± 0.18 ^{de}	1.37 ± 0.01 ^{de}	89.06
S-GBRM	835.42 ± 32.14 ^a	7.26	1.85 ± 0.14 ^{de}	1.40 ± 0.01 ^{cd}	89.49
S-PBRM	748.91 ± 4.63 ^b	7.47	2.12 ± 0.29 ^d	1.34 ± 0.01 ^e	89.07
E-BRM	653.22 ± 2.28 ^{cd}	10.47	4.25 ± 0.09 ^b	1.43 ± 0.02 ^{bc}	83.85
E-GBRM	696.72 ± 4.33 ^c	11.26	4.67 ± 0.06 ^a	1.46 ± 0.02 ^b	82.61
E-PBRM	624.18 ± 1.97 ^d	15.24	2.87 ± 0.07 ^c	1.52 ± 0.02 ^a	80.37

*Values represent Mean ± SD (n=3).

*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

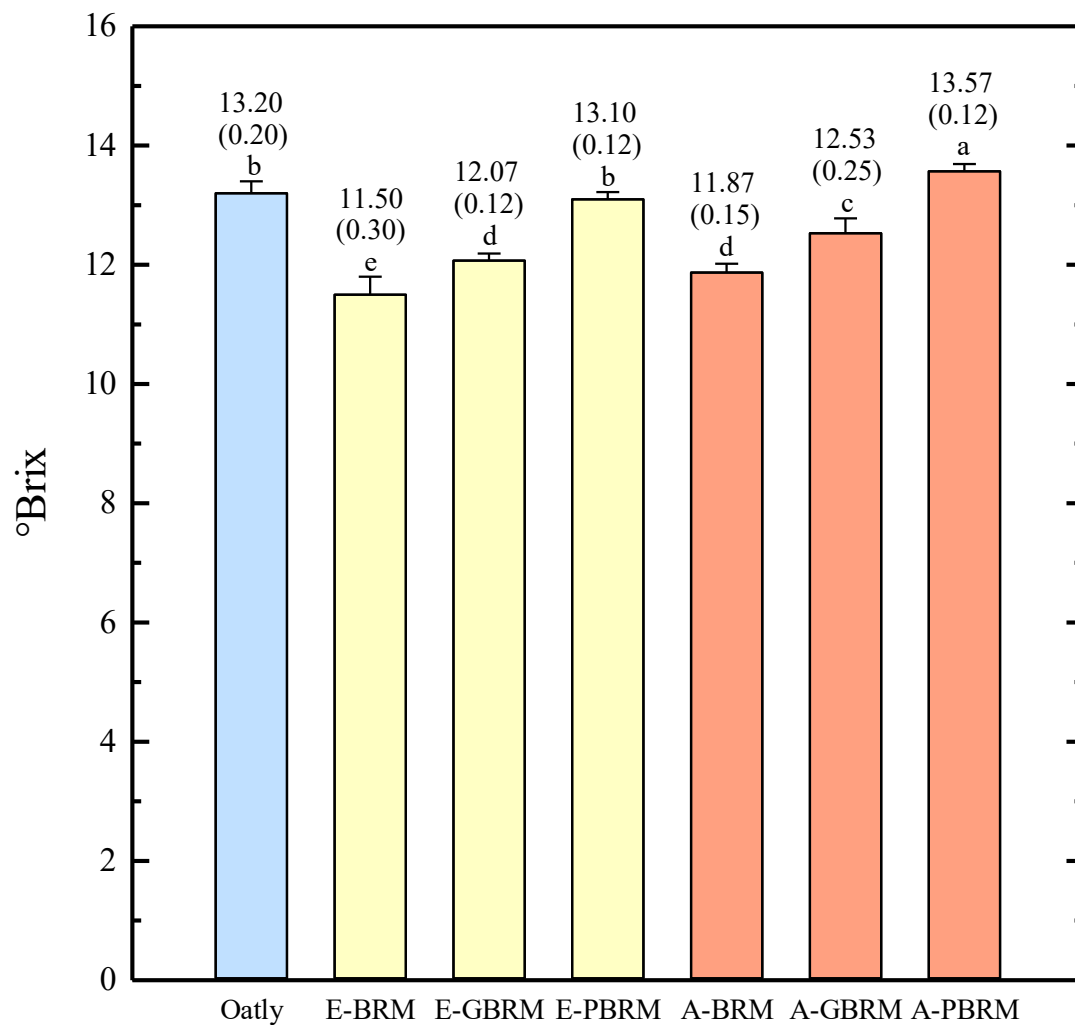
*F-, S-, and E- represent filtrated, sieved, and experimental samples.



(二) 糖度分析結果

糖度($^{\circ}\text{Brix}$)是衡量飲品糖度及可溶性固形物含量的關鍵指標，影響了樣品之口感與市場接受度。圖二十八為實驗組米基底奶與市售產品(Oatly)的糖度分析結果。由結果可以得知實驗組預熟糙米奶(E-PBRM 13.10°Brix)的糖度與市售產品(Oatly 13.20°Brix)相近。預熟處理能顯著提升糖度，可能與高溫高壓處理過程中澱粉糊化及回凝作用導致的醣類釋放有關(Kumar *et al.*, 2022)。同時，預熟製程使澱粉顆粒結構更為鬆散，助於提升酵素對於澱粉之作用效率，進一步提高了預熟糙米奶之糖度。酵素水解製程利用 α -澱粉酶與葡萄糖澱粉酶進行水解作用，將複合糖分解為雙醣及單醣(如麥芽糖與葡萄糖)，提高了米基底奶的可溶性固形物含量(Parnsakhorn & Noomhorm, 2008)。

經過商業滅菌處理後，可觀察樣品之糖度顯著提升(分別為 A-BRM 11.87、A-GBRM 12.53、A-PBRM 13.57°Brix)，整體數據更趨近於市售產品之糖度。推測原因是高溫高壓條件下，進一步破壞植物細胞結構，進而釋出更多的可溶性固形物至溶液中。此結果與 Khandpur 和 Gogate (2016) 的研究相符，該研究分析了胡蘿蔔汁利用不同殺菌方法對於糖度之影響，觀察到經過高溫處理後，胡蘿蔔汁之糖度顯著提升。因此，本研究透過酵素水解製程，分解澱粉分子，進一步釋放游離醣，顯著提升實驗組之糖度(Chakraborty *et al.*, 2023)。並藉由商業滅菌程序進一步提升糖度，使其更趨近於市售產品之口味。改善米基底植物奶之口感與風味，且無須額外添加糖或甜味劑，使產品更加貼近「無添加」的訴求。



圖二十八、實驗組與商業滅菌組米基底奶與市售產品之糖度。

Fig. 28. Comparison of °Brix between experimental, commercially sterilized rice-based milk samples, and commercial product.

*Values represent Mean $\pm$ SD (n=3).

*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).



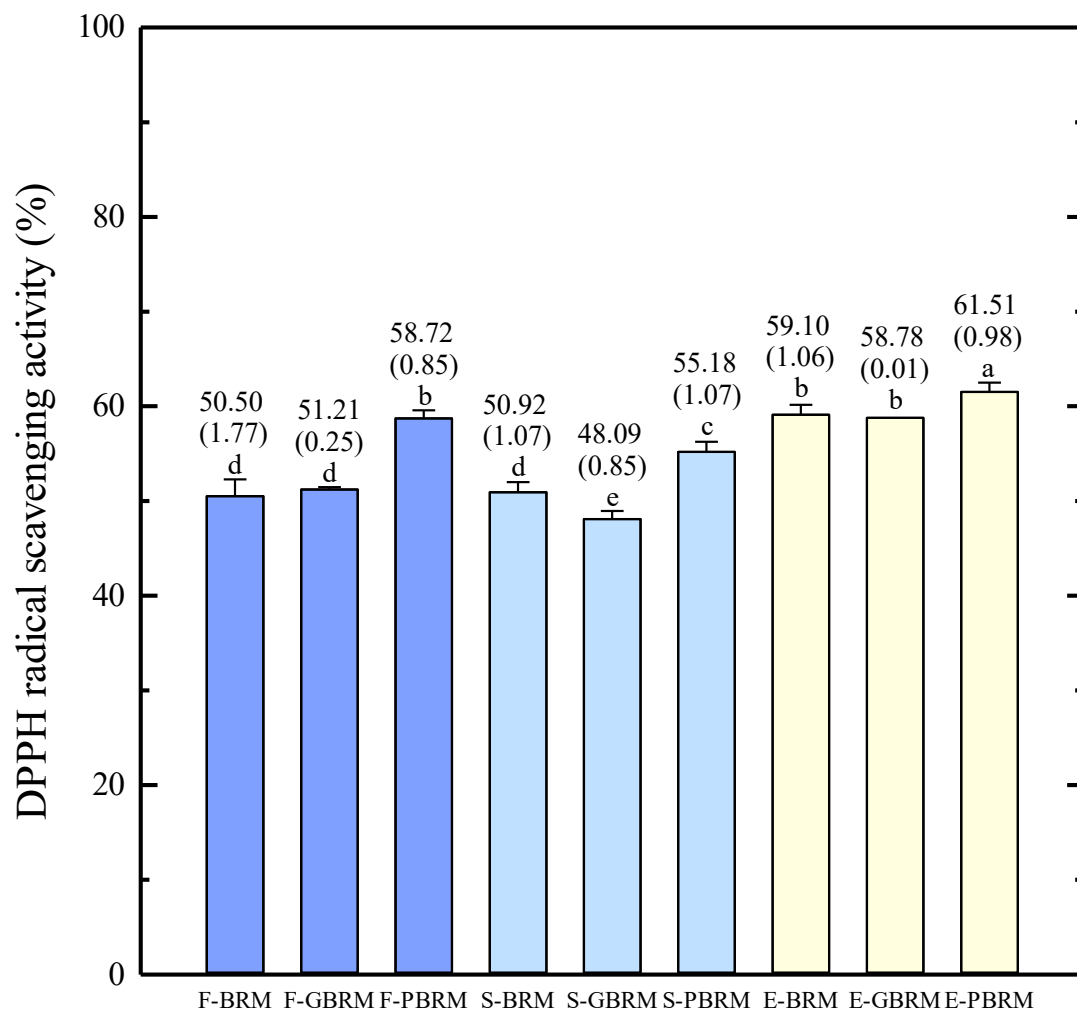
(三) 抗氧化能力

DPPH 自由基清除能力是評估抗氧化能力方法之一。DPPH 自由基與抗氧化物質作用後，抗氧化物質會提供氫質子而清除自由基，亦代表樣品清除 DPPH 自由基能力的強弱，結果整理於圖二十九。首先，針對對照組之結果進行探討。由結果可以得知，無論為過濾組或是過篩組，預熟糙米奶的抗氧化能力均高於發芽糙米奶以及糙米奶。預熟糙米奶之抗氧化能力分別為過濾組 58.72% 以及過篩組 55.18%。根據 Bhar 等人(2022)的研究指出稻穀經由預熟製程，可促使稻穀以及米糠層之營養成分滲透進入胚乳。其中，營養成分包含了酚類物質、維生素及其他抗氧化物質。因此，預熟糙米奶之抗氧化能力顯著高於其他樣品。且過濾組之預熟糙米奶(58.72%)以及發芽糙米奶(51.21%)之抗氧化能力顯著高於過篩組。推測可能由於過篩組經由二次研磨製程，機械處理產生局部熱與剪切力，使熱敏感性及氧化敏感性之抗氧化物受到破壞。

由結果可以得知，實驗組中 E-BRM (59.10%)、E-GBRM (58.78%)和 E-PBRM (61.51%)的自由基清除率均顯著高於對照組，代表著酵素水解製程可提升抗氧化能力，可能由於酵素水解將米基底奶中之結構破壞，如澱粉及蛋白質構造等，進而使酚類物質及其他抗氧化成分釋放。其中又以 E-PBRM 表現最佳($p < 0.05$)，無論為對照組或是實驗組，預熟糙米奶的抗氧化能力均高於發芽糙米奶以及糙米奶，此結果呼應了對照組之抗氧化能力結果。

Trolox equivalent (TE)為抗氧化能力之重要指標(如圖三十)，與 DPPH 自由基清除能力之結果趨勢一致。預熟糙米奶樣品無論是過濾組或過篩組之 TE 均顯著高於其他樣品。根據 Balbinoti 等人(2018)提出，預熟製程會產生較多的抗氧化化合物，例如酚類和黃酮類物質，這些化合物在 DPPH 自由基清除能力檢測中表現出較強的活性。此外，過濾組與過篩組相比，整體抗氧化能力無顯著差異，這顯示

過濾或過篩處理對於抗氧化成分的保留效果相近。實驗組之結果中，可觀察到 TE 之提昇更為顯著。實驗組之 TE 均顯著高於對照組，且預熟糙米奶之 TE 均顯著高於其他樣品。

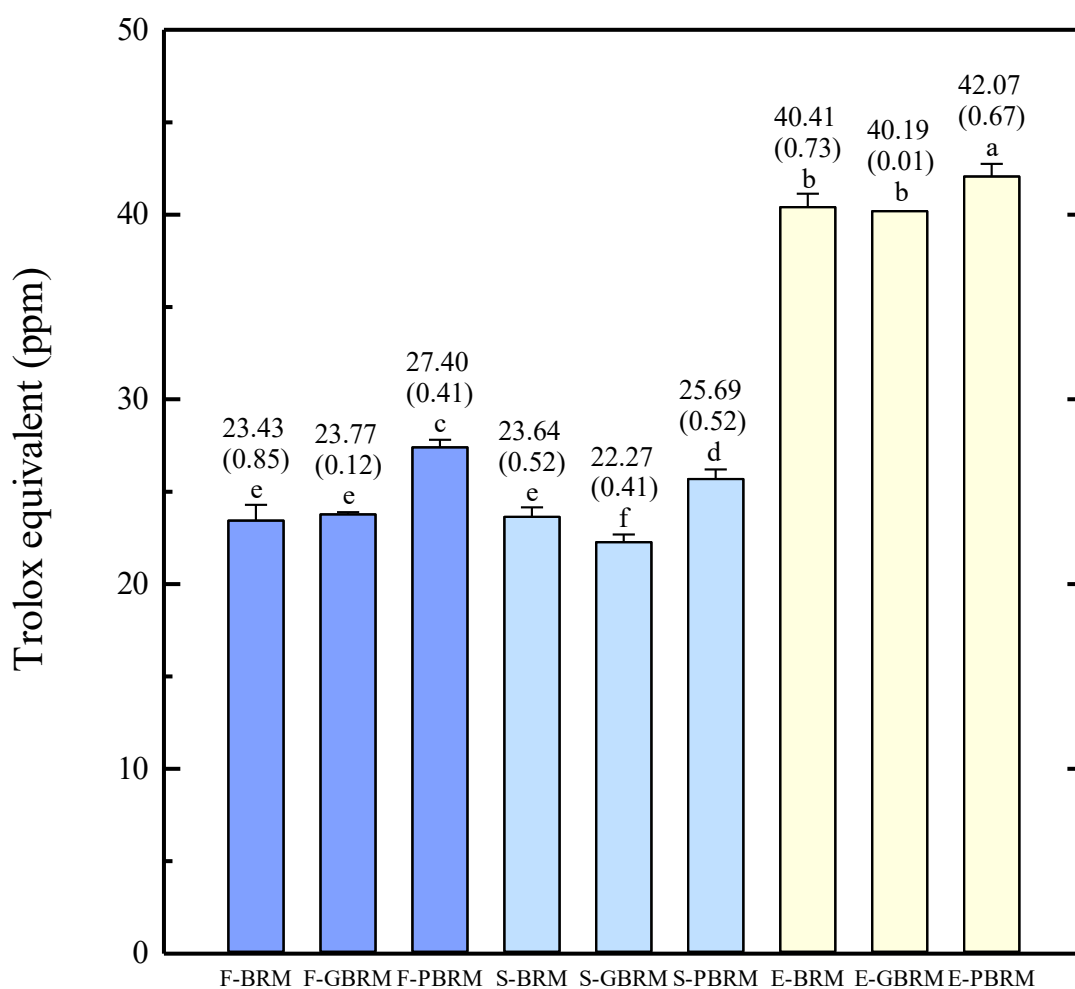


圖二十九、對照組與實驗組米基底奶之 DPPH 自由基清除率。

Fig. 29. DPPH radical scavenging activity of control and experimental groups.

*Values represent Mean $\pm$ SD (n=3).

*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).



圖三十、對照組與實驗組米基底奶之 Trolox 當量。

Fig. 30. Trolox equivalent of control and experimental groups.

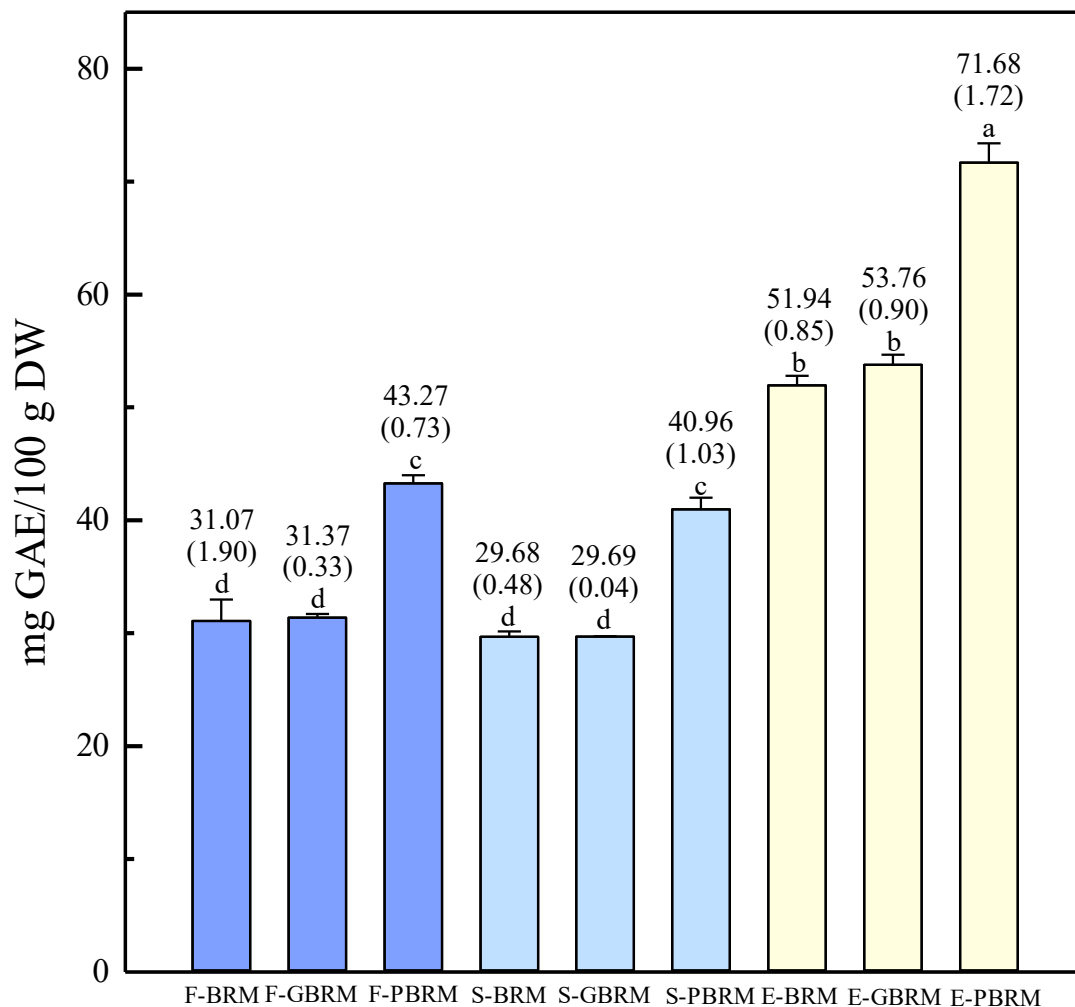
*Values represent Mean $\pm$ SD (n=3).

*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

(四) 總酚類化合物含量

酚類化合物可提供抗氧化、抗發炎之生理活性(Naheed *et al.*, 2017)。由圖三十一結果顯示，預熟糙米奶之總酚類化合物含量顯著高於其他組別。分別為過濾組 43.27 mg GAE/100 g DW 及過篩組 40.96 mg GAE/100 g DW。除了上述提及預熟製程可促使酚類化合物滲透進入米粒，進而增加預熟米之總酚類化合物含量以外，根據 Ukpong 等人(2023)之研究指出，預熟製程中之高壓及濕熱處理，使穀物結構產生變化並且有利於酚類物質與蛋白質進行複合作用，進而利於預熟米中之酚類物質經由後續之水熱處理後不易游離導致流失。此外，過篩組樣品之總酚類化合物含量均低於過濾組，推測可能是過篩組經由二次研磨製程，進而造成熱及氧化敏感性之酚類物質受到破壞(Sapna *et al.*, 2019)。

實驗組樣品的總酚類化合物含量均顯著高於對照組($p < 0.05$)。這可能是因為透過酵素水解後，破壞了纖維素和其他細胞壁多醣類結構，釋放了結構中所複合之酚類化合物(Chakraborty *et al.*, 2023)。其中，預熟糙米奶(E-PBRM 71.68 mg GAE/100 g DW)之含量顯著高於其他組別。此外，實驗組中發芽糙米奶之總酚類含量高於糙米奶。這是由於發芽製程使內源性酵素活化，進而促進酚類物質的合成(Leethanapanich & Noomhorm, 2016)。因此，酵素水解製程顯著增加了米基底奶的總酚類化合物含量，進而提升其營養價值。



圖三十一、對照組與實驗組米基底奶之總酚類化合物含量。

Fig. 31. Total phenolic compounds contents of control and experimental groups.

*Values represent Mean $\pm$ SD (n=3).

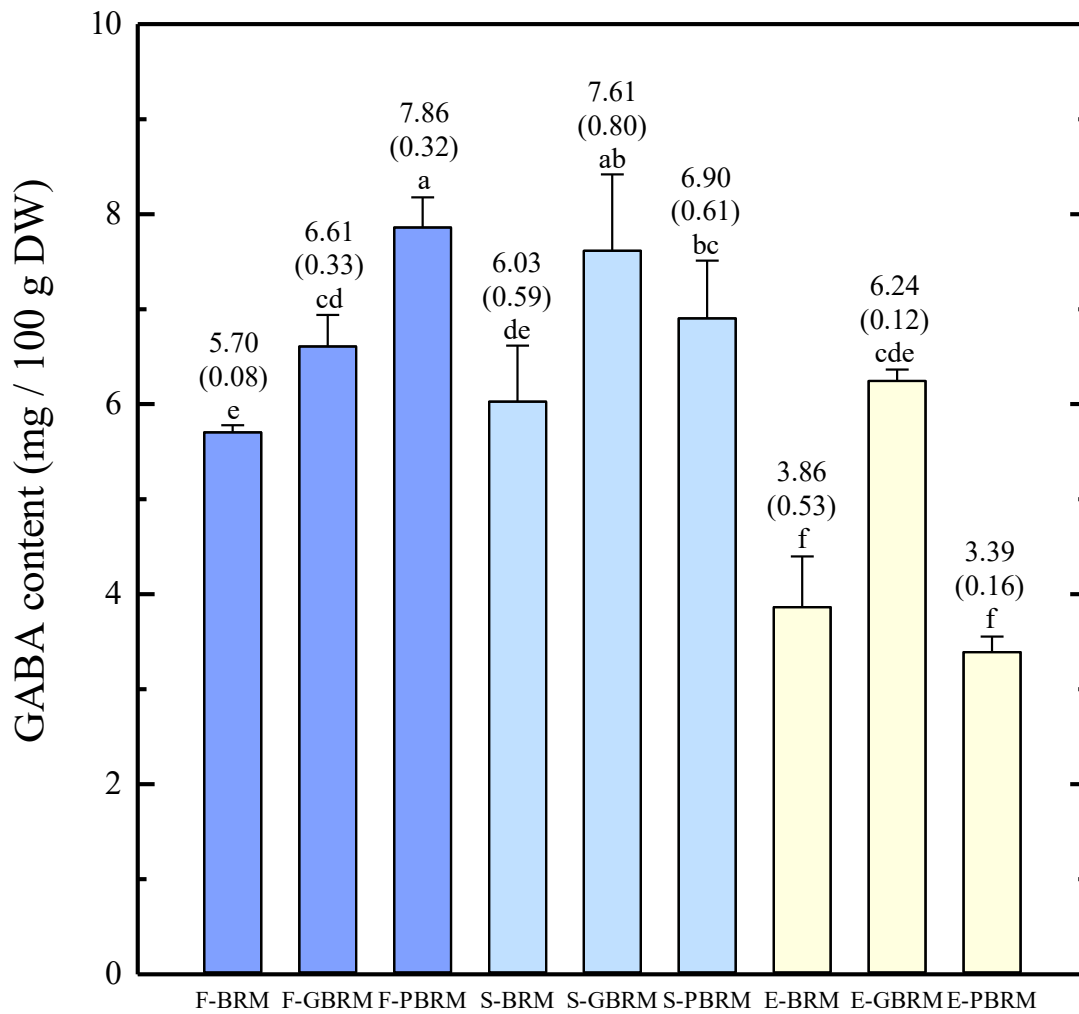
*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).



(五) γ -氨基丁酸(GABA)含量

圖三十二顯示了不同加工製程對於 BRM、GBRM 和 PBRM 其 GABA 含量的影響。首先，針對對照組之結果進行探討。F-BRM 的 GABA 含量為 5.70 mg/100 g，是所有樣本中最低的；S-BRM 的 GABA 含量為 6.03 mg/100 g，略高於 F-BRM，但仍低於其他樣品。代表著糙米奶由於未經發芽及預熟處理，進而其 GABA 含量為所有樣品中最低者。此外，因為過濾處理使部分米糠層經由過濾去除，進而更為降低 GABA 含量。F-GBRM 的 GABA 含量為 6.61 mg/100 g，略高於 F-BRM，S-GBRM 的 GABA 含量為 7.61 mg/100 g，代表著發芽過程能增加 GABA 含量。此結果與 Beaulieu 等人(2022)之研究結果相符，由於發芽過程中會提升內源性 GAD 之活性，進而提升發芽糙米之 GABA 含量。同時，由於過濾處理將部分糠層過濾去除，因而降低 F-GBRM 之 GABA 含量。預熟處理顯著提高了 GABA 的含量，無論是過濾組或過篩組。F-PBRM 的 GABA 含量為 7.86 mg/100 g 為所有組別中含量最高者，S-PBRM 的 GABA 含量為 6.90 mg/100 g。這表示預熟處理促進了 GABA 的形成或減少了其流失。雖然根據 Zhang 等人(2014)之研究指出，稻米中 GAD 之最適反應溫度為 40°C。然而本研究預熟處理之浸漬溫度為 65°C，相較於發芽處理之浸漬溫度為 30°C 高許多。推測可能是因為高溫處理可以使麩胺酸 (glutamate) 由結合態轉變為解離態，進而提升可利用性。並且透過高溫條件，可以加快生化反應之反應速率。整體而言，過篩組 GABA 含量高於過濾組，推測可能由於過濾處理會將部分米糠層過濾去除，減少了米糠層中所含之 GABA，進而降低過濾組之 GABA 含量。

針對實驗組與對照組之比較進行探討，可以得知經過酵素水解製程後，顯著地降低了樣品之 GABA 含量。可能由於酵素水解製程導致 GABA 結構及活性之不穩定性，進而降低其含量。並且，長時間的水熱處理亦可能導致 GABA 之降解及破壞(Le *et al.*, 2020)。



圖三十二、米基底奶之 GABA 含量。

Fig. 32. GABA contents of control and experimental groups.

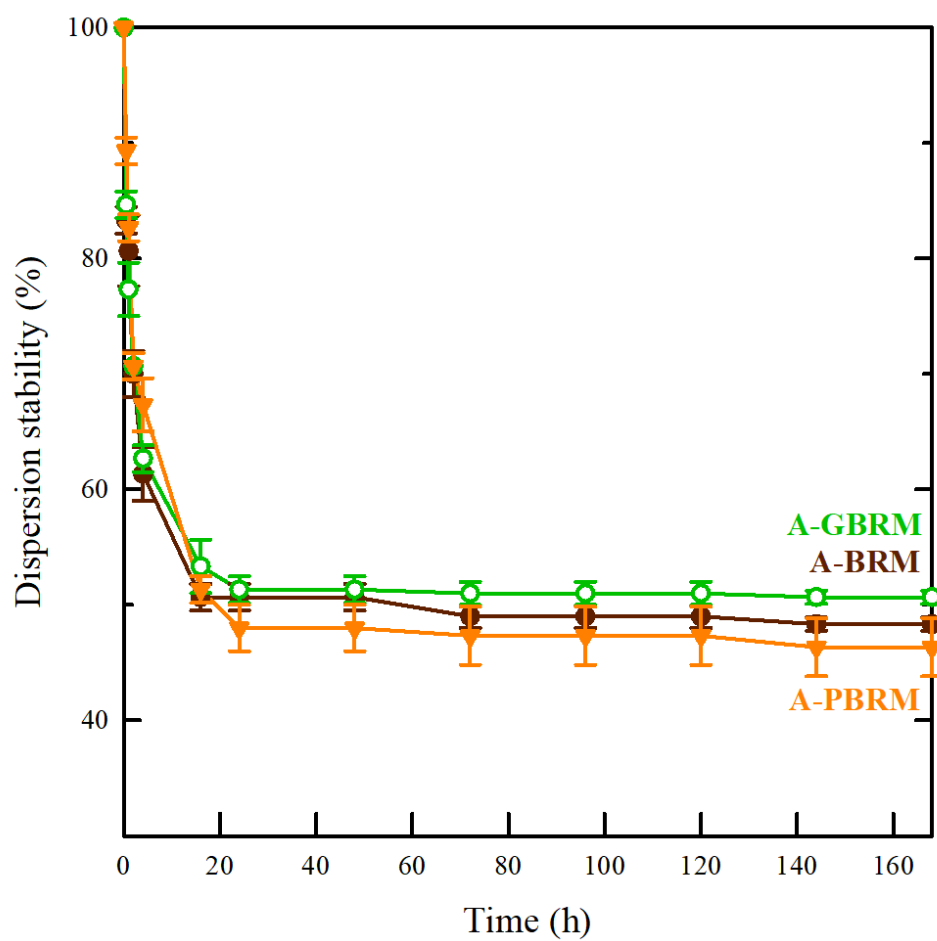
*Values represent Mean $\pm$ SD (n=3).

*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

四、商業滅菌後之性質分析

利用高熱與高壓環境(121°C；錶壓 1 kgw/cm²)進行商業滅菌，以延長樣品之保存期限。確保樣品可在常溫下保存，提升了銷售與流通之便利性。根據圖三十三的結果可得知，透過商業滅菌之高壓、高熱處理後，樣品的分散穩定性大幅降低。所有樣品均在放置一天後，穩定性降低至 50%左右。乳液的穩定性取決於液滴的大小和聚集特性，穀類基底植物奶是透過分解植物成分所製得，其顆粒的組成和大小不如牛奶之液滴均勻。因此，經由商業滅菌處理，對於乳液的熱破壞進一步導致穩定性下降(Durand *et al.*, 2003)。Durand 等人(2003)的研究同時探討了牛奶、豆奶、燕麥奶與米奶。發現乳液中的顆粒粒徑大小為米奶 > 燕麥奶 > 牛奶和豆奶，並且米奶和燕麥奶中具有較多的高密度顆粒(密度大於水)，這些結果解釋了米基底植物奶中顆粒的沉降行為。

(A)



(B)

Time/sample	A-BRM	A-GBRM	A-PBRM	Time/sample	A-BRM	A-GBRM	A-PBRM
0 h				2 h			
Dispersion stability (%)	100	100	100	Dispersion stability (%)	70	71	71
4 h				16 h			
Dispersion stability (%)	61	63	67	Dispersion stability (%)	51	53	51
24 h				48 h			
Dispersion stability (%)	51	51	48	Dispersion stability (%)	51	51	48

圖三十三、米基底奶於商業滅菌前與後之分散穩定性。(A)不同時間下米基底奶之分散穩定性(%), (B)不同時間下米基底奶之外觀特性。

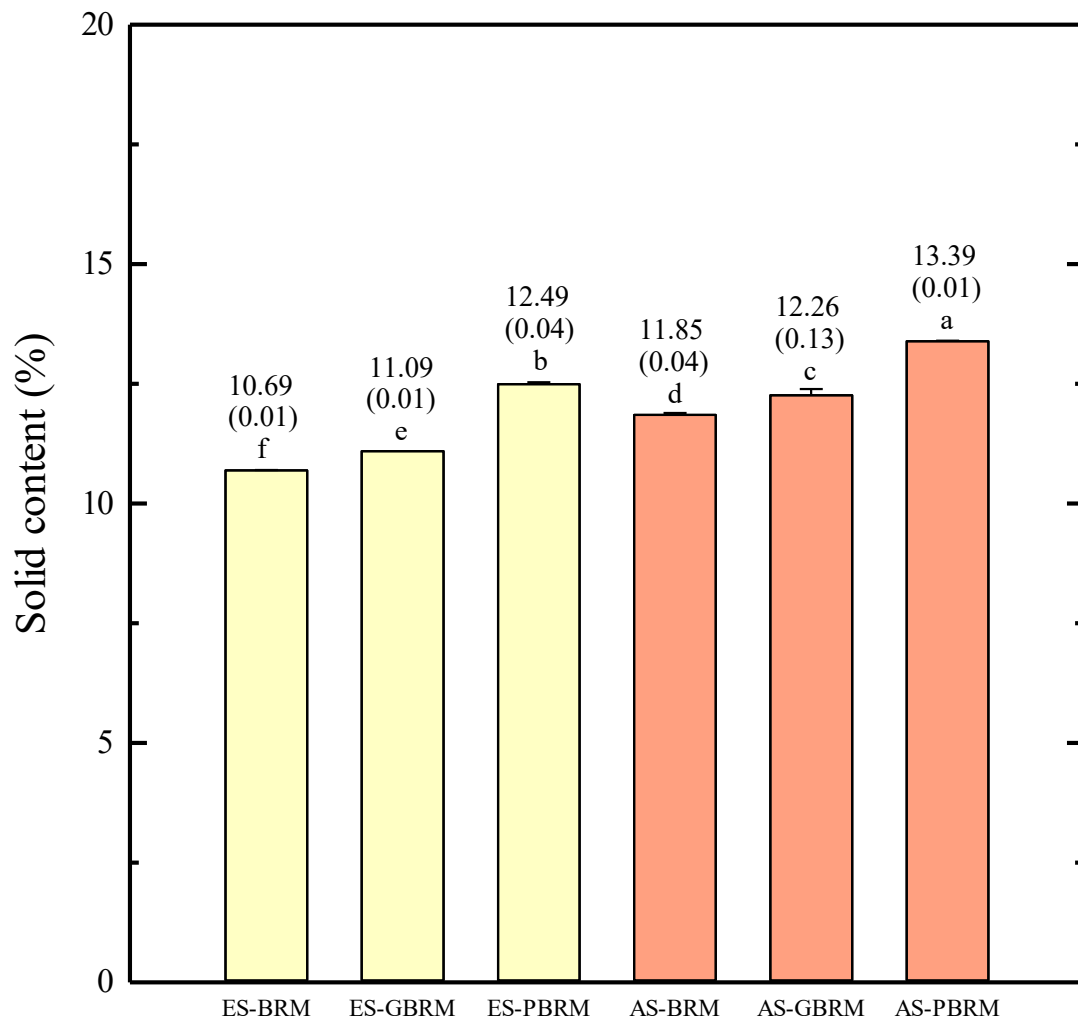
Fig. 33. Dispersion stability of rice-based milk before and after commercial sterilization.

(A) Dispersion stability (%) of rice-based milk during different times, (B) The visual appearance of rice-based milk during different times.



將米基底植物奶於商業滅菌前後，其分散穩定性剩餘 80%時之上清液收集並進行分析。由圖三十四可得知，經過商業滅菌後，樣品上清液之固形物含量顯著高於商業滅菌前。在高熱及高壓處理下，導致乳液中的蛋白質變性，使包埋於顆粒中的蛋白質進入水相，增加蛋白質在水相中的溶解度(Durand *et al.*, 2003)。高溫下導致澱粉結構的崩解，促使可溶性醣類之釋出，進而增加樣品上清液之固形物含量。

在商業滅菌後，樣品上清液的固形物含量較高，代表有較多的蛋白質與醣類分子保持在懸浮狀態，以降低整體分層現象。此結果顯示，即使在商業滅菌後，樣品的分散穩定性下降，但同時上層與下層液體之性質更為均一，代表著樣品在商業滅菌後具有更均勻的質地與口感。



圖三十四、米基底奶於商業滅菌前與後其上清液之固形物含量。

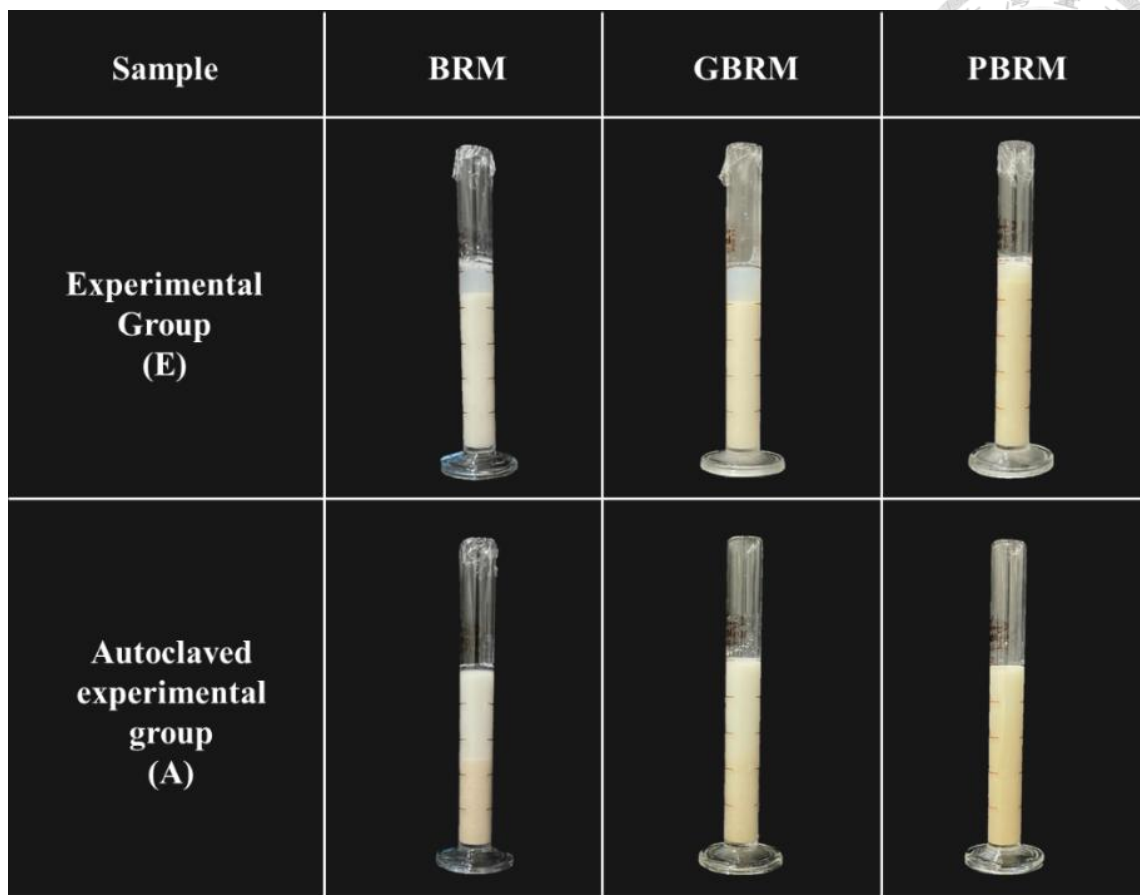
Fig. 34. Solid content in the supernatant of rice-based milk before and after commercial sterilization.

*Values represent Mean $\pm$ SD (n=3).

*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).



針對米基底奶(BRM、GBRM 和 PBRM)在商業滅菌前後之外觀色澤與上清液之色澤變化進行分析。根據圖三十五的結果可觀察到，樣品經過商業滅菌後，其上清液相較於商業滅菌前更為混濁，樣品的沉降現象在商業滅菌後具有明顯的改善。由色澤分析的數據可得知(如表十七)，所有樣品經過商業滅菌後，其外觀色澤均較滅菌前明亮，尤其 BRM 和 GBRM 組別在滅菌後，其 L*值分別從 30.84 與 35.23 提升至 73.61 與 72.60。經過高熱與高壓處理後，樣品中可溶性物質含量增加，進而提升上清液的固形物含量，同時，改善了上清液之色澤特性。此外，商業滅菌後樣品的 a*值與 b*值顯著增加，此結果與 Polpued 與 Khuenpet (2020)的研究一致，在高熱處理下，樣品進行梅納反應，產生了褐色物質，進而提升其紅色度與黃色度，改善上清液之色澤特性。商業滅菌亦明顯提升了樣品上清液的白色度(WI)與黃色度(YI)，代表著樣品上清液帶有乳白至淡黃色的色調，此色澤特性可能提高消費者對於植物奶之視覺接受度(Jeske *et al.*, 2018)。



圖三十五、米基底奶於商業滅菌前與後其外觀色澤結果。

Fig. 35. Appearance color results of rice-based milk before and after commercial sterilization.



表十七、米基底奶於商業滅菌前與後其上清液之色澤特性

Table 17. Color characteristics in the supernatant of rice-based milk before and after commercial sterilization

Sample	L*	a*	b*	WI	YI
ES-BRM	30.84 ± 0.11 ^f	-4.24 ± 0.06 ^c	-7.84 ± 0.12 ^c	30.27 ± 0.12 ^d	-36.33 ± 0.66 ^c
ES-GBRM	35.23 ± 0.01 ^c	-5.66 ± 0.01 ^f	-9.30 ± 0.01 ^f	34.32 ± 0.01 ^c	-37.72 ± 0.04 ^c
ES-PBRM	67.35 ± 0.01 ^d	-2.45 ± 0.18 ^d	3.46 ± 0.01 ^d	67.08 ± 0.02 ^b	7.34 ± 0.02 ^d
AS-BRM	73.61 ± 0.01 ^a	-0.13 ± 0.02 ^b	9.10 ± 0.02 ^b	72.08 ± 0.01 ^a	17.66 ± 0.04 ^b
AS-GBRM	72.60 ± 0.09 ^b	-1.21 ± 0.02 ^c	5.92 ± 0.02 ^c	71.94 ± 0.09 ^a	11.65 ± 0.05 ^c
AS-PBRM	71.24 ± 0.36 ^c	3.29 ± 0.34 ^a	16.92 ± 1.33 ^a	66.46 ± 1.01 ^b	33.93 ± 2.84 ^a

Brightness, L; redness, a*; yellowness, b*; white index, WI; yellow index, YI.

*Values represent Mean ± SD (n = 3).

*Values in a column for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

*ES- and AS- represent the supernatant of the experimental and autoclaved experimental samples.

五、米基底奶之品評結果

針對商業滅菌後之米基底奶(A-BRM、A-GBRM、A-PBRM)與市售燕麥奶(Oatly)進行感官品評分析。評估項目包含香氣(aroma)、甜度(sweetness)、黏稠度(thickness)、滑順特性(smoothness)、後味(aftertaste)及色澤(color)等指標。由表十八的數據及圖三十六之雷達圖結果可知，整體而言，市售燕麥奶(Oatly)於滑順性(8.30 分)與甜度(6.30 分)上明顯優於其他三種米奶樣品(A-BRM、A-GBRM、A-PBRM)，而後味(6.40 分)及黏稠度(6.30 分)亦獲得較高評價。米基底奶樣品則在香氣與後味面表現尚佳，特別是 A-BRM(6.10 分與 6.60 分)。然而，米奶的滑順性與甜度均低於市售燕麥奶，顯示米基底植物奶的口感與市售產品仍存在一定差距。

三種米奶樣品間具有顯著差異，發芽糙米奶(GBRM)於香氣指標得分最低(3.20 分)，可能與發芽過程中形成的特殊氣味或苦味物質有關(Zhou *et al.*, 2021)。相對地，A-BRM 表現較佳，代表著糙米本身的原始風味經滅菌處理後能維持較佳接受性。然而，A-PBRM 在各項評分中居中，此結果低於預期。商業滅菌處理雖能改善米奶的外觀穩定性，提升整體接受度，但米基底奶樣品仍需於滑順性及甜度等指標進行配方與製程之調整，以提高市場接受度與競爭力。

表十八、實驗組米基底奶與市售產品之品評結果

Table 18. Sensory evaluation of experimental group rice-based milk and commercial products

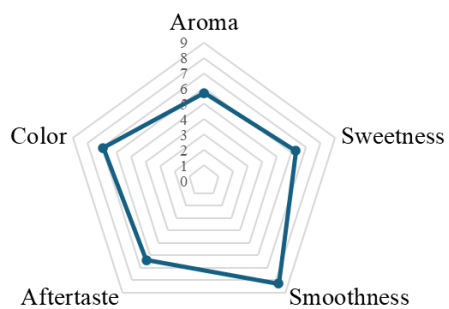
Evaluation criteria	Oatly	A-BRM	A-GBRM	A-PBRM
Aroma	5.70 ± 2.50 ^a	6.10 ± 2.69 ^a	3.20 ± 1.93 ^b	4.20 ± 2.39 ^{ab}
Sweetness	6.30 ± 2.41 ^a	3.70 ± 1.49 ^b	3.90 ± 1.91 ^b	4.00 ± 2.49 ^b
Thickness	6.30 ± 2.26 ^a	5.60 ± 1.65 ^a	4.90 ± 1.66 ^a	4.60 ± 1.43 ^a
Smoothness	8.30 ± 0.82 ^a	4.40 ± 1.96 ^b	4.30 ± 1.70 ^b	4.50 ± 0.71 ^b
Aftertaste	6.40 ± 1.96 ^a	6.60 ± 2.17 ^a	2.20 ± 1.69 ^b	2.50 ± 1.84 ^b
Color	6.90 ± 1.73 ^a	5.80 ± 1.81 ^{ab}	5.10 ± 2.08 ^b	5.30 ± 1.49 ^{ab}
Overall preference	6.50 ± 1.27 ^a	5.90 ± 1.52 ^a	3.50 ± 1.58 ^b	4.30 ± 1.70 ^b
Total score	46.40 ± 9.25 ^a	38.10 ± 7.91 ^b	27.10 ± 4.53 ^c	29.40 ± 7.82 ^c

*Brown rice milk, BRM; germinated brown rice milk, GBRM; parboiled brown rice milk, PBRM.

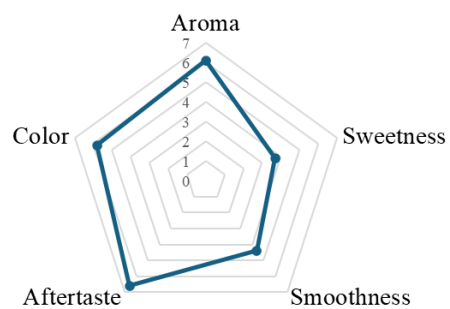
*Values represent Mean ± SD (n = 10).

*Values in a row for each sample with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

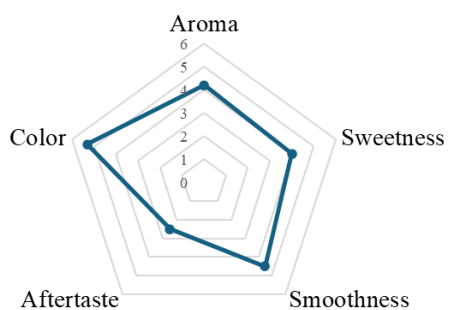
Oatly



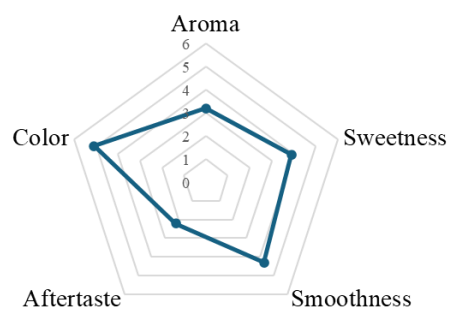
A-BRM



A-PBRM



A-GBRM



圖三十六、實驗組米基底奶與市售產品之品評雷達圖。

Fig. 36. Radar chart of sensory evaluation for experimental group rice-based milk and commercial products.

陸、結論與未來展望



本研究旨在開發以臺灣國產稻米為基底的植物奶，並深入探討糙米、發芽糙米及預熟糙米經酵素水解及均質處理後之物化特性與營養價值，期望透過植物奶製程開發，提升國產稻米的多元應用性及市場價值。以下為本研究的主要結論：

一、質地與穩定性改善

透過酵素水解與均質製程，顯著降低樣品之黏度並提升其分散穩定性，使實驗組樣品之質地接近於市售植物奶。尤其是預熟糙米奶(E-PBRM)的黏度(9.92 cP)與穩定性(放置 24 h 時 100%)表現最佳，滿足消費者對於植物奶口感的期待。

二、色澤與感官特性提升

透過酵素水解製程，並添加米糠油搭配均質製程，使實驗組樣品的色澤均勻且更接近於市售產品數值($\Delta E^* < 10$)，增強其感官特性。

三、增強營養價值

本研究證實，酵素水解製程可有效促進稻米內部結合態蛋白質和礦物質的釋放，顯著提升實驗組樣品的粗蛋白質(BRM、GBRM 以及 PBRM 分別為 1.39、1.41、2.10% w.b.)、DPPH 自由基清除率(59.10、58.78、61.51%)與總酚類化合物含量(51.94、53.76、71.68 mg GAE/100 g DW)，增強米基底奶之營養價值。

四、預熟糙米作為原料之潛力

預熟製程顯著提升米基底奶的分散穩定性、抗氧化能力及總酚類化合物含量。不僅改善了米基底奶的質地特性，使其具備更均勻的外觀與更穩定的分散性質。還藉由釋放更多抗氧化成分，進一步提升其營養價值與生理功能性。

本研究透過發芽、預熟處理及酵素水解和均質製程等技術，改善了樣品之質地、色澤及營養價值。然而，樣品於商業滅菌後仍存在穩定性下降及風味接受度不足的問題。未來研究可針對均質製程之參數條件進一步優化，以改善最終產品的品質穩定性與市場接受度。

柒、參考文獻



網頁：

Data Bridge Market Research. (2023). Plant-based milk market to perceive highest growth of USD 50,066.21 million by 2030. Retrieved from <https://reurl.cc/aeDyOX> (May, 2024)

Global Market Insights. (2023). Plant milk market size - By source, distribution channel, formulation, packaging, regional outlook & forecast, 2024–2032. Retrieved from <https://www.gminsights.com/industry-analysis/plant-milk-market> (May, 2024)

中文：

陳泓維。2024。陽離子滲透促發技術對預熟發芽米之營養組成影響，國立臺灣大學食品科技研究所碩士論文，台北，臺灣。

林靖雯。2017。預熟製程對稻米性質的影響。國立宜蘭大學食品科學系碩士論文。宜蘭，臺灣。

楊嘉凌、鄭佳綺、許志聖（2012）。亞洲國家稻米生產概況。臺中區農業專訊。第76期。

楊嘉凌、鄭佳綺、王柏蓉、吳以健（2016）。台灣多樣化的水稻品種及硬秈稻米生產現況。臺中區農業專訊。第94期。

王柏蓉、鄧執庸、陳明芬（2019）。提升糧食自給率之臺灣多元米製產品研發。臺中區農業專訊。第106期。

鄧執庸（2020）。稻米品質與營養。臺中區農業專訊。第111期。

鄭佳綺（2022）。水稻栽培有效的用水管理-精準整地與田區整備。農業新知。第269期。

吳以健（2023）。稻米生產如何減碳？加工碾米也有機會。臺中區農情月刊。

第281期。

糧食平衡表（2024）。農業部糧食供需年報。民國112年。



英文：

- AACC. (2000). *Approved method of the American Association of Cereal Chemists (10th ed.)*. Method 74-09. The Association, St. Paul, Minnesota, USA.
- Ahmed, Z., Forsido, S. F., Kuyu, C. G., & Keyata, E. O. (2023). Optimization of soaking conditions (temperature and time) on physicochemical properties of selected parboiled rice varieties grown in Eastern Ethiopia. *Food Science Nutrition*, 11 (6), 3171-3183. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3298>
- Arjharn, W., Chatchavanthatri, N., Junyusen, T., Moolkaew, P., Arjharn, W., Junyusen, P., Junyusen, P., Treeamnuk, T., & Junyusen, T. (2020). Effect of soaking and sprouting treatment on germination rate of paddy. *E3S Web of Conferences*, 187. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018704016>
- Asiah, N., David, W., Ardiansyah & Madonna, S. (2019). Review on pesticide residue on rice. *International Conference on Food Science and Technology*, 379, 012008. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/379/1/012008>
- Astrain-Redin, L., Alejandre, M., Raso, J., Cebrian, G., & Alvarez, I. (2021). Direct contact ultrasound in food processing: impact on food quality. *Frontiers in Nutrition*, 8, 633070. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.633070>
- Auteri, M., Zizzo, M. G., & Serio, R. (2015). GABA and GABA receptors in the gastrointestinal tract: From motility to inflammation. *Pharmacological Research*, 11, 21. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2014.12.001>
- Aydar, E. F., Tutuncu, S., & Ozcelik, B. (2020). Plant-based milk substitutes: Bioactive compounds, conventional and novel processes, bioavailability studies, and

health effects. *Journal of Functional Foods*, 70.
<https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103975>

- Babolanmogadam, N., Gandomi, H., Basti, A. A., & Taherzadeh, M. J. (2022). Nutritional, functional, and sensorial properties of oat milk produced by single and combined acid, alkaline, α -amylase, and sprouting treatments. *Food Science & Nutrition*, 10, 1002. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3171>
- Bagchi, T. B., Das, B., Kumar, A., Kumar, G., Banerjee, J., Gain, H., Adhikari, A. A., & Chattopadhyay, K. (2023). Impact of cooking, parboiling and fermentation on nutritional components, predicted glycemic index and pasting properties of rice. *Journal of Cereal Science*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103763>
- Bakken, A. K., Daugstad, K., Johansen, A., Hjelkrem, A.-G. R., Fystro, G., Strømman, A. H., & Korsæth, A. (2017). Environmental impacts along intensity gradients in Norwegian dairy production as evaluated by life cycle assessments. *Agricultural Systems*, 158, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.09.001>
- Balbinoti, T. C. V., Nicolin, D. J., de Matos Jorge, L. M., & Matos Jorge, R. M. (2018). Parboiled rice and parboiling process. *Food Engineering Reviews*, 10, 165–185. <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9177-y>
- Baldini, C., Gardoni, D., & Guarino, M. (2017). A critical review of the recent evolution of Life Cycle Assessment applied to milk production. *Journal of Cleaner Production*, 140, 421-435. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.078>
- Bauer, B. A., Hartmann, M., Sommer, K., & Knorr, D. (2004). Optical in situ analysis of starch granules under high pressure with a high pressure cell. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5 (3), 293-298. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2004.04.002>
- Beaulieu, J. C., Boue, S. M., & Goufo, P. (2022). Health-promoting germinated rice

- and value-added foods: A comprehensive and systematic review of germination effects on brown rice. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63, 11570–11603. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2094887>
- Bewley, J. D. (1997). Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*, 9, 1055–1066. <https://doi.org/10.1105/tpc.9.7.1055>
- Bhar, S., Bose, T., Dutta, A., & Mande, S. S. (2022). A perspective on the benefits of consumption of parboiled rice over brown rice for glycaemic control. *European Journal of Nutrition*, 61 (2), 615-624. <https://doi.org/10.1007/s00394-021-02694-x>
- Chakraborty, I., Govindaraju, I., Kunnel, S., Managuli, V., & Mazumder, N. (2023). Effect of storage time and temperature on digestibility, thermal, and rheological properties of retrograded rice. *Gels*, 9, 142. <https://doi.org/10.3390/gels9020142>
- Chatchavanthatri, N., Junyusen, T., Arjharn, W., Treeamnuk, T., Junyusen, P., & Pakawanit, P. (2021). Effects of parboiling and infrared radiation drying on the quality of germinated brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, 15892. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15892>
- Chemat, F., Zill e, H., & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrason Sonochem*, 18 (4), 813-835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Chen, B. J., Wang, X., Liu, H. R., Zhang, Y., Wu, S. H., Wang, C. F., Liu, C. X., & Qiao, Y. J. (2024). Effect of ultrasound-assisted enzyme pretreatment on γ -aminobutyric acid content, eating quality and starch properties of germinated brown rice. *Journal of Cereal Science*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103904>

Chen, G., & Tao, D. (2005). An experimental study of stability of oil–water emulsion. *Fuel Processing Technology*, 86 (5), 499-508.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.03.010>

Cheryan, M. (1980). Phytic acid interactions in food systems. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 13 (4), 297-335.
<https://doi.org/10.1080/10408398009527293>

Chenlo, F., Moreira, R., Pereira, G., Ampudia, A. (2002). Viscosities of aqueous solutions of sucrose and sodium chloride of interest in osmotic dehydration processes. *Journal of Food Engineering*, 54, 347352.
[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00221-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00221-7)

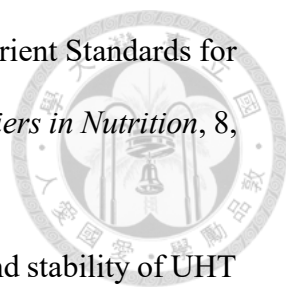
Cummins, I., Dixon, D. P., Freitag-Pohl, S., Skipsey, M., & Edwards, R. (2011). Multiple roles for plant glutathione transferases in xenobiotic detoxification. *Drug Metabolism Reviews*, 43 (2), 266-280.
<https://doi.org/10.3109/03602532.2011.552910>

Dang, Y., Otsubo, T., Iwamoto, S., & Katsuno, N. (2025). Unraveling the changes of physical properties and nanostructures of rice starch incorporated with pregelatinized rice starch paste during gelatinization. *Food Hydrocolloids*, 162.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110931>

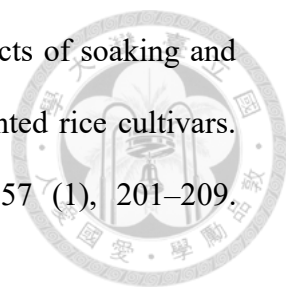
Dalbhat, C. G., Nithya, A., Mandliya, S., Vishwakarma, S., & Mishra, H. N. (2024). Effect of microwave drying and tempering on color attributes, fissure formation, and cooking characteristics of fortified rice kernels. *Journal of Food Science and Technology*, 61, 706–716. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05871-4>

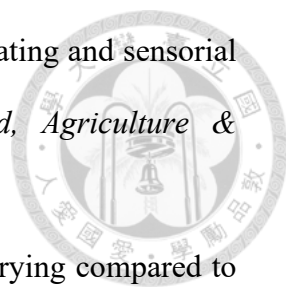
Das, M., Banerjee, R., & Bal, S. (2008). Evaluation of physicochemical properties of enzyme treated brown rice (Part B). *Food Science and Technology*, 41 (10), 2092–2096. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.11.018>

- da Silva, L. R., Velasco, J. I., & Fakhouri, F. M. (2023). Use of rice on the development of plant-based milk with antioxidant properties: From raw material to residue. *LWT*, 173, 114271. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114271>
- Derycke, V., Vandeputte, G. E., Vermeulen, R., De Man, W., Goderis, B., Koch, M. H. J., & Delcour, J. A. (2005). Starch gelatinization and amylose–lipid interactions during rice parboiling investigated by temperature resolved wide angle X-ray scattering and differential scanning calorimetry. *Journal of Cereal Science*, 42 (3), 334-343. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.05.002>
- Deswal, A., Deora, N. S., & Mishra, H. N. (2013). Optimization of enzymatic production process of oat milk using response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology*, 7 (2), 610-618. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1144-2>
- Ding, J., Ulanov, A. V., Dong, M., Yang, T., Nemzer, B. V., Xiong, S., Zhao, S., & Feng, H. (2018). Enhancement of gamma-aminobutyric acid (GABA) and other health-related metabolites in germinated red rice (*Oryza sativa* L.) by ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 791–797. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.029>
- do Nascimento, L. Á., Abhilasha, A., Singh, J., Elias, M. C., & Colussi, R. (2022). Rice Germination and Its Impact on Technological and Nutritional Properties: A Review. *Rice Science*, 29 (3), 201-215. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2022.01.009>
- do Nascimento, L. Á., Heberle, T., Wang, Y.-J., Vanier, N. L., Elias, M. C., Mesko, M. F., & Colussi, R. (2024). Rice grain germination: A review of its impact on technological properties and development of new food products. *Trends in Food Science & Technology*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104600>

- 
- Drewnowski, A., Henry, C. J., & Dwyer, J. T. (2021). Proposed Nutrient Standards for Plant-Based Beverages Intended as Milk Alternatives. *Frontiers in Nutrition*, 8, 761442. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.761442>
- Durand, A., Franks, G. V., & Hosken, R. W. (2003). Particle sizes and stability of UHT bovine, cereal and grain milks. *Food Hydrocolloids*, 17 (5), 671-678. [https://doi.org/10.1016/s0268-005x\(03\)00012-2](https://doi.org/10.1016/s0268-005x(03)00012-2)
- Dutta, H., Mahanta, C. L., Singh, V., Das, B. B., & Rahman, N. (2016). Physical, physicochemical and nutritional characteristics of Bhoja chaul, a traditional ready-to-eat dry heat parboiled rice product processed by an improvised soaking technique. *Food Chemistry*, 191, 152-162. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.144>
- Feng, D., Yin, S., Wen, X., & Jing, P. (2024). Heat treatment improves the dispersion stability of rice bran milk through changing the settling behavior. *Food Chemistry*, 450, 139348. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139348>
- Fu, D., Wu, W., Mustafa, G., Yang, Y., & Yang, P. (2025). Molecular mechanisms of rice seed germination. *New Crops*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.ncrops.2024.100051>
- Ghosh, S., Datta, K., & Datta, S. K. (2019). Rice vitamins. In J. Bao (Ed.), *Rice* (4th ed., pp. 195–220). AACC International Press. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01526-7>
- Gong, E. S., Luo, S. J., Li, T., Liu, C. M., Zhang, G. W., Chen, J., Zeng, Z. C., & Liu, R. H. (2017). Phytochemical profiles and antioxidant activity of brown rice varieties. *Food Chemistry*, 227, 432-443. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.093>
- Gujral, H. S., Singh, J., Sodhi, N. S., & Singh, N. (2002). Effect of milling variables on

- the degree of milling of unparboiled and parboiled rice. *International Journal of Food Properties*, 5 (1), 193-204. <https://doi.org/10.1081/jfp-120015601>
- Guo, J., & Kong, L. (2022). Enhancement of enzymatic resistance in V-type starch inclusion complexes by hydrothermal treatments. *Food Hydrocolloids*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107533>
- Gupta, R., Gigras, P., Mohapatra, H., Goswami, V. K., & Chauhan, B. (2003). Microbial α -amylases: a biotechnological perspective. *Process Biochemistry*, 38 (11), 1599-1616. [https://doi.org/10.1016/s0032-9592\(03\)00053-0](https://doi.org/10.1016/s0032-9592(03)00053-0)
- Hoogenkamp, H., Kumagai, H., & Wanasundara, J. P. D. (2017). Rice protein and rice protein products. In S. R. Nadathur, J. P. D. Wanasundara, & L. Scanlin (Eds.), *Sustainable protein sources* (pp. 47–65). Academic Press. [10.1016/B978-0-12-802778-3.00003-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00003-2)
- Hu, Z., Shao, Y., Lu, L., Fang, C., Hu, X., & Zhu, Z. (2019). Effect of germination and parboiling treatment on distribution of water molecular, physicochemical profiles and microstructure of rice. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13 (3), 1898–1906. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00108-5>
- Hu, Z., Tang, X., Liu, J., Zhu, Z., & Shao, Y. (2017). Effect of parboiling on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated red rice. *Food Chemistry*, 214, 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.097>
- Hussain, S., Zheng, M., Khan, F., Khaliq, A., Fahad, S., Peng, S., Huang, J., Cui, K., & Nie, L. (2015). Benefits of rice seed priming are offset permanently by prolonged storage and the storage conditions. *Scientific Reports*, 5 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep08101>

- 
- Islam, M. Z., Shim, M. J., Jeong, S. Y., & Lee, Y. T. (2022). Effects of soaking and sprouting on bioactive compounds of black and red pigmented rice cultivars. *International Journal of Food Science & Technology*, 57 (1), 201–209. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15105>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Cuéllar-Villarreal, M. d. R., Welti-Chanes, J., Cisneros-Zevallos, L., Ramos-Parra, P. A., & Hernández-Brenes, C. (2017). Nonthermal processing technologies as elicitors to induce the biosynthesis and accumulation of nutraceuticals in plant foods. *Trends in Food Science & Technology*, 60, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.021>
- James, J. A., & Lee, B. H. (1997). Glucoamylases: microbial sources, industrial applications and molecular biology ? A review. *Journal of Food Biochemistry*, 21 (6), 1-52. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.1997.tb00223.x>
- Jannoey, P., Niamsup, H., Lumyong, S., Suzuki, T., Katayama, T., & Chairote, G. (2010). Comparison of gamma-aminobutyric acid production in Thai rice grains. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26 (2), 257–263. [10.1007/s11274-009-0168-2](https://doi.org/10.1007/s11274-009-0168-2)
- Jeong, E., Abdellaoui, N., Lim, J. Y., & Seo, J. A. (2024). The presence of a significant endophytic fungus in mycobiome of rice seed compartments. *Scientific Reports*, 14 (1), 23367. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73550-1>
- Jeske, S., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2017). Evaluation of physicochemical and glycaemic properties of commercial plant-based milk substitutes. *Plant Foods for Human Nutrition*, 72 (1), 26-33. <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0583-0>
- Jeske, S., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2018). Past, present and future: The strength of plant-based dairy substitutes based on gluten-free raw materials. *Food Research International*, 110, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.045>

- 
- Jiamyangyuen, S., & Ooraikul, B. (2008). The physico-chemical, eating and sensorial properties of germinated brown rice. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 6 (2), 119–124. <https://reurl.cc/0KeAR6>
- Jittanit, W., & Angkaew, K. (2020). Effect of superheated-steam drying compared to conventional parboiling on chalkiness, head rice yield and quality of chalky rice kernels. *Journal of Stored Products Research*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101627>
- Johari, M. A., & Khong, H. Y. (2019). Total phenolic content and antioxidant and antibacterial activities of *Pereskia bleo*. *Advances in Pharmacological and Pharmaceutical Science*, 7428593. <https://doi.org/10.1155/2019/7428593>
- Jorgensen, A. D., Nohr, J., Kastrup, J. S., Gajhede, M., Sigurskjold, B. W., Sauer, J., Svergun, D. I., Svensson, B., & Vestergaard, B. (2008). Small angle X-ray studies reveal that *Aspergillus niger* glucoamylase has a defined extended conformation and can form dimers in solution. *Journal of Biological Chemistry*, 283 (21), 14772-14780. <https://doi.org/10.1074/jbc.M801709200>
- Juliano, B. O., & Tũaño, A. P. P. (2019). Gross structure and composition of the rice grain. *Rice*, 31-53. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811508-4.00002-2>
- Kaushik, G., Satya, S., & Naik, S. N. (2009). Food processing a tool to pesticide residue dissipation – A review. *Food Research International*, 42 (1), 26-40. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.09.009>
- Khandpur, P. & Gogate, P. R. (2016). Evaluation of ultrasound based sterilization approaches in terms of shelf life and quality parameters of fruit and vegetable juices. *Ultrasonics Sonochemistry*, 337-353. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.10.008>
- Khanpit, V., Viswanathan, S., & Hinrichsen, O. (2024). Environmental impact of

- animal milk vs plant-based milk: Critical review. *Journal of Cleaner Production*, 449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141703>
- Kim, M. S., Ko, S. R., Le, V. T., Jee, M. G., Jung, Y. J., Kang, K. K., & Cho, Y. G. (2022). Development of SNP markers from GWAS for selecting seed coat and aleurone layers in brown rice (*Oryza sativa* L.). *Genes (Basel)*, 13 (10). <https://doi.org/10.3390/genes13101805>
- Kim, S. H., Yang, Y. J., & Chung, I. M. (2020). The effect of degree of milling on the nutraceutical content in ecofriendly and conventional rice (*Oryza sativa* L.). *Foods*, 9 (9). [10.3390/foods9091297](https://doi.org/10.3390/foods9091297)
- Kittibunchakul, S., Yuthaworawit, N., Whanmek, K., Suttisansanee, U., & Santivarangkna, C. (2021). Health beneficial properties of a novel plant-based probiotic drink produced by fermentation of brown rice milk with GABA-producing *Lactobacillus pentosus* isolated from Thai pickled weed. *Journal of Functional Foods*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104710>
- Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., & Lee, D.U. (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15 (5), 261-266. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.12.001>
- Koca, H. D., Doganay, S., Turgut, A., Tavman, I. H., Saidur, R., & Mahbubul, I. M. (2018). Effect of particle size on the viscosity of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1664-1674. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.016>
- Koh, W., Kwak, H., Cheong, E., & Lee, C. J. (2023). GABA tone regulation and its cognitive functions in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 24 (9), 523-539. <https://doi.org/10.1038/s41583-023-00724-7>
- Kraithong, S., Lee, S., & Rawdkuen, S. (2018). Physicochemical and functional

- properties of Thai organic rice flour. *Journal of Cereal Science*, 79, 259–266.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.10.015>
- Kumar, A., Lal, M. K., Kar, S. S., Nayak, L., Ngangkham, U., Samantaray, S., & Sharma, S. G. (2017). Bioavailability of iron and zinc as affected by phytic acid content in rice grain. *Journal of Food Biochemistry*, 41 (6).
<https://doi.org/10.1111/jfbc.12413>
- Kumar, A., Lal, K. M., Nayak, S., Sahoo, U., Behera, A., Bagchi, B. T., Parameswaran, C., Swain, P., & Sharma, S. (2022). Effect of parboiling on starch digestibility and mineral bioavailability in rice (*Oryza sativa* L.). *Food Science and Technology*, 156, 113026. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113026>
- Kumar, P., & Satyanarayana, T. (2009). Microbial glucoamylases: characteristics and applications. *Critical Reviews in Biotechnology*, 29 (3), 225-255.
<https://doi.org/10.1080/07388550903136076>
- Le, P. H., Le, T. T., & Raes, K. (2020). Effects of pH and heat treatment on the stability of γ -aminobutyric acid (GABA) in germinated soymilk. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44, e14301. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14301>
- Lee, J., Lim, K. T., Hong, J. H., Lee, Y. B., Rhee, C. O., Chung, J. H. (2006). Effects of ultrasound stimuli on acceleration of brown rice germination. *Journal of Biosystems Engineering*, 31 (6), 506-513. [10.5307/JBE.2006.31.6.506](https://doi.org/10.5307/JBE.2006.31.6.506)
- Lee, Y. R., Lee, S. H., Jang, G. Y., Lee, Y. J., Kim, M. Y., Kim, Y. B., Lee, J., & Jeong, H. S. (2019). Antioxidative and antidiabetic effects of germinated rough rice extract in 3T3-L1 adipocytes and C57BLKS/J-db/db mice. *Food & Nutrition Research*, 63. <https://doi.org/10.29219/fnr.v63.3603>
- Leethanapanich, K., Mauromoustakos, A., & Wang, Y. J. (2016). Impacts of parboiling conditions on quality characteristics of parboiled commingled rice. *Journal of*

Cereal Science, 69, 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.04.003>

Li, K., Hu, G., Yu, S., Tang, Q., & Liu, J. (2018). Effect of the iron biofortification on enzymes activities and antioxidant properties in germinated brown rice. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12 (2), 789–799. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9693-0>

Li, J., Yang, S., Zhong, Z., Xia, T., Zhou, W., Tu, Z., Chen, Z., Wang, H., Dai, Z., Jin, G., & Du, Y. (2025). Effects of degree of milling on bran layer structure, physicochemical properties and cooking quality of brown rice. *Food Chemistry*, 462, 140847. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140847>

Li, L., Li, B., Qu, H., Tian, S., Xu, Z., Zhao, L., Li, X., & Liu, B. (2024). A new method based on melatonin-mediated seed germination to quickly remove pesticide residues and improve the nutritional quality of contaminated grains. *PLOS One*, 19 (5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303040>

Li, P., Chen, Y. H., Lu, J., Zhang, C. Q., Liu, Q. Q., & Li, Q. F. (2022). Genes and their molecular functions determining seed structure, components, and quality of rice. *Rice*, 15 (1), 18. <https://doi.org/10.1186/s12284-022-00562-8>

Li, Q., & Yang, A. (2020). Comparative studies on seed germination of two rice genotypes with different tolerances to low temperature. *Environmental and Experimental Botany*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104216>

Li, X. F., Song, H. Y., & Chen, S. H. (2024). Impact of pressure and temperature on the hydration resistance of rice. *Lwt*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116759>

Li, Y., Liu, K., Chen, F., & Cheng, Y. (2018). Comparative proteomics analysis reveals the effect of germination and selenium enrichment on the quality of brown rice during storage. *Food Chemistry*, 269, 220–227.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.022>

Lin, Z., Zhou, P., Deng, Y., Liu, G., Li, P., Zeng, J., Zhang, Y., Tang, X., Zhao, Z., & Zhang, M. (2025). Impact of homogenization methods on the interfacial protein composition and stability of peanut oil body emulsion with sodium caseinate and maltodextrin. *Lwt*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117286>

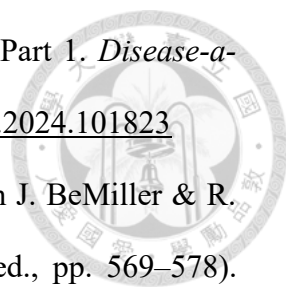
Loan, H. T. T., & Nhung, H. T. N. (2020). Effects of acid glutamic and lighting on GABA content in germinated brown rice. *Journal of Advanced Research in Food Science and Nutrition*, 3 (1), 11–15. <https://doi.org/10.24321/2582.3892.202002>

MacGregor, E. A., Janeček, Š., & Svensson, B. (2001). Relationship of sequence and structure to specificity in the α -amylase family of enzymes. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1546 (1), 1–20. [https://doi.org/10.1016/s0167-4838\(00\)00302-2](https://doi.org/10.1016/s0167-4838(00)00302-2)

Mahmood, N., Liu, Y., Saleemi, M. A., Munir, Z., Zhang, Y., & Saeed, R. (2023). Investigation of physicochemical and textural properties of brown rice by hot air assisted radio frequency drying. *Food and Bioprocess Technology*, 16, 1555–1569. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03001-8>

Makinen, O. E., Wanhalinna, V., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2016). Foods for special dietary needs: non-dairy plant-based milk substitutes and fermented dairy-type products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56 (3), 339–349. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.761950>

Martínez-Padilla, E., Li, K., Blok Frandsen, H., Skejovic Joehnke, M., Vargas-Bello-Pérez, E., & Lykke Petersen, I. (2020). In vitro protein digestibility and fatty acid profile of commercial plant-based milk alternatives. *Foods*, 9, 1784. <https://doi.org/10.3390/foods9121784>

- 
- McFee, R. B. (2024). Lactose intolerance - A practical approach, Part 1. *Disease-a-month*, 70 (12), 101823. <https://doi.org/10.1016/j.disamonth.2024.101823>
- Mitchell, C. R. (2009). Rice starches: Production and properties. In J. BeMiller & R. Whistler (Eds.), *Starch: Chemistry and Technology* (3rd ed., pp. 569–578). <https://reurl.cc/6KRooM>
- Miura, D., Ito, Y., Mizukuchi, A., Kise, M., Aoto, H., & Yagasaki, K. (2006). Hypocholesterolemic action of pre-germinated brown rice in hepatoma-bearing rats. *Life Sciences*, 79 (3), 259-264. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2006.01.001>
- Moongngarm A.& Saetung N. (2010). Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice. *Food Chemistry*, 122, 3, 782788. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.053>
- Müller, C. P., Hoffmann, J. F., Ferreira, C. D., Diehl, G. W., Rossi, R. C., & Ziegler, V. (2021). Effect of germination on nutritional and bioactive properties of red rice grains and its application in cupcake production. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 25, 100379. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100379>
- Naheed, Z., Cheng, Z., Wu, C., Wen, Y., & Ding, H. (2017). Total polyphenols, total flavonoids, allicin and antioxidant capacities in garlic scape cultivars during controlled atmosphere storage. *Postharvest Biology and Technology*, 131, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.05.002>
- Nascimento, L. A., Abihilasha, A. A., Singh, J., Elias, M. C., & Colussi, R. (2022). Rice germination and its impact on technological and nutritional properties: A review. *Rice Science*, 29 (3), 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2022.01.009>
- Nowacka, M., & Wedzik, M. (2016). Effect of ultrasound treatment on microstructure,

- colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. *Applied Acoustics*, 103, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.06.011>
- Nowacka, M., Wiktor, A., Śledź, M., Jurek, N., & Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*, 113 (3), 427-433. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.06.013>
- Ohanenye, I. C., Emenike, C. U., Mensi, A., Medina-Godoy, S., Jin, J., Ahmed, T., Sun, X., & Udenigwe, C. C. (2021). Food fortification technologies: Influence on iron, zinc and vitamin A bioavailability and potential implications on micronutrient deficiency in sub-Saharan Africa. *Scientific African*, 11, e00667. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00667>
- Oli, P., Ward, R., Adhikari, B., & Torley, P. (2014). Parboiled rice: Understanding from a materials science approach. *Journal of Food Engineering*, 124, 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.010>
- Oliveira, M. E. A. S., Santos, M. B., Gozzi, G., Fonseca Cechin, C. d., Gottschalk, L. M. F., Bassinello, P. Z., Colombari Filho, J. M., Kabuki, D. Y., de Carvalho, C. W. P., & Takeiti, C. Y. (2025). Performance of technological and microbiological quality characteristics of germinated rice: A comparative study of cooking techniques. *Food Control*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111164>
- Onmankhong, J., Jongyingcharoen, J. S., & Sirisomboon, P. (2021). The influence of processing parameters of parboiled rice on its physiochemical and texture properties. *Journal of Texture Studies*, 52 (2), 219-227. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12576>
- Onmankhong, J., & Sirisomboon, P. (2021). Texture evaluation of cooked parboiled

- rice using nondestructive milled whole grain near infrared spectroscopy. *Journal of Cereal Science*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103151>
- Oo, E. M., Ruamyod, K., Khowawisetsut, L., et al. (2020). Germinated brown rice attenuates cell death in vascular cognitive impaired mice and glutamate-induced toxicity in HT22 cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68 (18), 5093–5106. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07957>
- Panahabadi, R., Ahmadikhah, A., McKee, L. S., Ingvarsson, P. K., & Farrokhi, N. (2021). Genome-wide association mapping of mixed linkage (1,3;1,4)-beta-glucan and starch contents in rice whole grain. *Frontiers in Plant Science*, 12, 665745. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665745>
- Pandey, A., Nigam, P., Soccol, C. R., Soccol, V. T., Singh, D., & Mohan, R. (2000). Advances in microbial amylases biotechnol. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 31, 135-152. <https://doi.org/10.1042/ba19990073>
- Pang, Y., Ahmed, S., Xu, Y., Beta, T., Zhu, Z., Shao, Y., & Bao, J. (2018). Bound phenolic compounds and antioxidant properties of whole grain and bran of white, red and black rice. *Food Chemistry*, 240, 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.095>
- Parnsakhorn, S., & Noomhorm, A. (2008). Changes in physicochemical properties of parboiled brown rice during heat treatment. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 53648227. <https://reurl.cc/OYol7y>
- Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. J. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 6 (1), 36–60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
- Patil, S. B., & Khan, M. K. (2011). Germinated brown rice as a value-added rice product: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 48(6), 661–667.

<https://doi.org/10.1007/s13197-011-0232-4>



Paul, J. S., Gupta, N., Beliya, E., Tiwari, S., & Jadhav, S. K. (2021). Aspects and recent trends in microbial alpha-amylase: a review. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 193 (8), 2649-2698. <https://doi.org/10.1007/s12010-021-03546-4>

Peleg, M. (1998). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53 (4), 1216–1217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x>

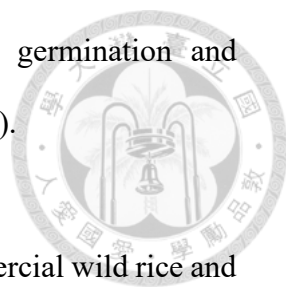
Perata, P., Pozueta-Romero, J., Akazawa, T., & Yamaguchi, J. (1992). Effect of anoxia on starch breakdown in rice and wheat seeds. *Planta*, 188, 611–618. <https://doi.org/10.1007/BF00197056>

Pereira, C. R., Resende, J. T. V., Guerra, E. P., Lima, V. A., Martins, M. D., & Knob, A. (2017). Enzymatic conversion of sweet potato granular starch into fermentable sugars: Feasibility of sweet potato peel as alternative substrate for α -amylase production. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 11, 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.07.011>

Polpued, R., & Khuenpet, K. (2020). Formulation of sweetened condensed rice-milk fortified with cereals in retortable pouch. *International Journal of Agricultural Technology*, 16 (2), 349–364. <https://reurl.cc/EVv3pa>

Popova, A., Mihaylova, D., & Lante, A. (2023). Insights and perspectives on plant-based beverages. *Plants (Basel)*, 12 (19). <https://doi.org/10.3390/plants12193345>

Prasad, K., Singh, Y., & Anil, A. (2012). Effects of grinding methods on the characteristics of Pusa 1121 rice flour. *Journal of Tropical Agriculture Food Science*, 40 (2), 193–201. <https://reurl.cc/Z4o0bQ>

- 
- Pucciariello, C. (2020). Molecular mechanisms supporting rice germination and coleoptile elongation under low oxygen. *Plants (Basel)*, 9 (8).
<https://doi.org/10.3390/plants9081037>
- Qiu, Y., Liu, Q., & Beta, T. (2010). Antioxidant properties of commercial wild rice and analysis of soluble and insoluble phenolic acids. *Food Chemistry*, 121, 140–147.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.021>
- Rajjou, L., Duval, M., Gallardo, K., Catusse, J., Bally, J., Job, C., & Job, D. (2012). Seed germination and vigor. *Annual Review of Plant Biology*, 63, 507-533.
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105550>
- Reyna-Villasmil, N., Bermúdez-Pirela, V., Mengual-Moreno, E., Arias, N., Cano-Ponce, C., Leal-Gonzalez, E., Souki, A., Inglett, G. E., Israili, Z. H., Hernández-Hernández, R., Valasco, M., & Arraiz, N. (2007). Oat-derived beta-glucan significantly improves HDLC and diminishes LDLC and non-HDL cholesterol in overweight individuals with mild hypercholesterolemia. *American Journal of Therapeutics*, 14 (2), 203–212.
<https://doi.org/10.1097/01.pap.0000249917.96509.e7>
- Romieu, I., Ferrari, P., et al. (2012). Dietary glycemic index and glycemic load and breast cancer risk in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC). *The American Journal of Clinical Nutrition*, 96 (2), 345–355.
<https://doi.org/10.3945/ajcn.111.026724>
- Rondanelli, M., Ferrario, R. A., Barrile, G. C., Guido, D., Gasparri, C., Ferraris, C., Cavioni, A., Mansueto, F., Mazzola, G., Patelli, Z., Peroni, G., Pirola, M., Razza, C., Tartara, A., & Perna, S. (2023). The glycemic index of Indica and Japonica subspecies parboiled rice grown in Italy and the effect on glycemic index of different parboiling processes. *Journal of Medicinal Food*, 26 (6), 422-427.

<https://doi.org/10.1089/jmf.2022.0120>

Ronie, M. E., Abdul Aziz, A. H., Mohd Noor, N. Q., Yahya, F., & Mamat, H. (2022).

Characterisation of bario rice flour varieties: Nutritional compositions and physicochemical properties. *Applied Sciences*, 12(18).

<https://doi.org/10.3390/app12189064>

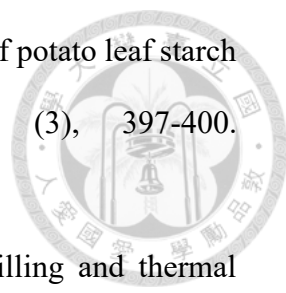
Rosdi, M. R. H., Ariffin, A., & Ishak, Z. A. M. (2018). Optimizing homogenization parameters for improving ethylene vinyl acetate emulsion stability in pour point depressant application. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 30 (2), 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.01.006>

Russell, K., & Delahunty, C. (2004). The effect of viscosity and volume on pleasantness and satiating power of rice milk. *Food Quality and Preference*, 15 (7-8), 743-750. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2003.07.005>

Saha, S., & Roy, A. (2020). Whole grain rice fortification as a solution to micronutrient deficiency: Technologies and need for more viable alternatives. *Food Chemistry*, 326, 127049. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127049>

Salee, N., Niranjana, K., Cheng, Q., Ghawi, S. K., Naruenartwongsakul, S., Chaiyana, W., Inpramoon, A., & Utama-ang, N. (2024). Influence of thermal processing on the physicochemical properties, stability and antioxidant activities of jasmine rice milk containing a co-encapsulated powder of black rice and green tea. *Food and Applied Bioscience Journal*, 12 (3): 1-21. <https://reurl.cc/W0o5Rk>

Saleh, A. S. M., Wang, P., Wang, N., Yang, L., & Xiao, Z. (2019). Brown rice versus white rice: nutritional quality, potential health benefits, development of food products, and preservation technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18 (4), 1070-1096. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12449>

- 
- Santacruz, S., Andersson, R., & Åman, P. (2005). Characterisation of potato leaf starch with iodine-staining. *Carbohydrate Polymers*, 59 (3), 397-400. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.10.001>
- Sapna, I., Kamaljit, M., Priya, R., & Jayadeep, P. A. (2019). Milling and thermal treatment induced changes on phenolic components and antioxidant activities of pigmented rice flours. *Journal of Food Science and Technology*, 56 (1), 273-280. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3487-1>
- Saraswati, M., Naik, R. H., Pallavi, M. S., Bheemanna, M., Paramasivam, M., Kumar, P., Poornima, G., Ratnamma, P., Sujay, H., Naik, M. N., Rao, N. S., & Prabhuraj, A. (2025). LC–MS/MS and GC–MS/MS quantification of pesticide residues in paddy grains and processed rice and dietary risk assessment. *Microchemical Journal*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113391>
- Sareepuang, K., Siriamornpun, S., Wiset, L., & Meeso, N. (2008). Effect of soaking temperature on physical, chemical and cooking properties of parboiled fragrant rice. *World Journal of Agricultural Sciences*, 4 (4), 409–415. <https://reurl.cc/XAbdGE>
- Sauer, J., Sigurskjold, B. W., Christensen, U., Frandsen, T. P., Mirgorodskaya, E., Harrison, M., Roepstorff, P., & Svensson, B. (2000). Glucoamylase: Structure/function relationships, and protein engineering. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1543 (2), 275–293. [https://doi.org/10.1016/S0167-4838\(00\)00232-6](https://doi.org/10.1016/S0167-4838(00)00232-6)
- Seong, W. J., Koo, W., & Min, E. H. (2022). Numerical and experimental study on free-surface wave generation by a submerged moving body in a towing tank. *Ocean Engineering*, 111200. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111200>
- Sethi, S., Tyagi, S. K., & Anurag, R. K. (2016). Plant-based milk alternatives an

emerging segment of functional beverages: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 53 (9), 3408-3423. [https://doi.org/10.1007/s13197-016-2328-](https://doi.org/10.1007/s13197-016-2328-3)

3

Shao, Y., Yuan, Y., Xi, Y., Zhao, T., & Ai, N. (2023). Effects of homogenization on organoleptic quality and stability of pasteurized milk samples. *Agriculture*, 13, 205. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010205>

Sierks, M. R., & Svensson, B. (1996). Catalytic mechanism of glucoamylase probed by mutagenesis in conjunction with hydrolysis of α -D-glucopyranosyl fluoride and maltooligosaccharides. *Biochemistry*, 35 (6), 1865–1871. <https://doi.org/10.1021/bi951738>

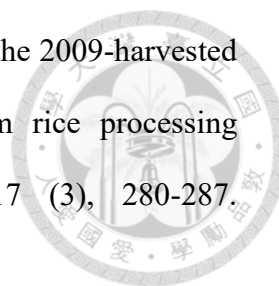
Silventoinen-Veijalainen, P., Sneek, A.-M., Nordlund, E., & Rosa-Sibakov, N. (2024). Influence of oat flour characteristics on the physicochemical properties of oat-based milk substitutes. *Food Hydrocolloids*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109402>

Singh, N., Kaur, L., Sandhu, K. S., Kaur, J., & Nishinari, K. (2006). Relationships between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. *Food Hydrocolloids*, 20 (4), 532-542. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.05.003>

Singh, S., Mackill, D. J., & Ismail, A. M. (2009). Responses of SUB1 rice introgression lines to submergence in the field: Yield and grain quality. *Field Crops Research*, 113 (1), 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.003>

Sipos, L., Agoston, K. C., Biro, P., Bozoki, S., & Csato, L. (2025). How to measure consumer's inconsistency in sensory testing? *Current Research in Food Science*, 10, 100982. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.100982>

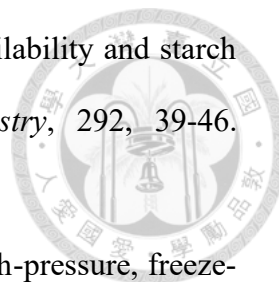
Son, S. W., Nam, Y. J., Lee, S. H., Lee, S. M., Lee, S. H., Kim, M. J., Lee, T., Yun, J.



- C., & Ryu, J. G. (2011). Toxigenic fungal contaminants in the 2009-harvested rice and its milling-by products samples collected from rice processing complexes in Korea. *Research in Plant Disease*, 17 (3), 280-287. <https://doi.org/10.5423/rpd.2011.17.3.280>
- Storhaug, C. L., Fosse, S. K., & Fadnes, L. T. (2017). Country, regional, and global estimates for lactose malabsorption in adults: A systematic review and meta-analysis. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, 2 (10), 738–746. [10.1016/S2468-1253\(17\)30154-1](https://doi.org/10.1016/S2468-1253(17)30154-1)
- Sun, H., Zhao, P., & Peng, M. (2008). Application of maltitol to improve production of raw starch digesting glucoamylase by *Aspergillus niger* F-08. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24 (11), 2613-2618. <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9785-4>
- Sun, Z., Li, A., Ji, S., Li, H., Li, Z., Gao, H., Wang, X., Li, X., Han, Y., & Zhao, D. (2025). A method for improving milling quality based on pre-milling in the combined rice milling process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103911>
- Suribabu, K., Govardhan, T. L., Hemalatha, K. P. J. (2014) Application of partially purified α -amylase produced by *Brevibacillus borostelensis* R1 on sewage and effluents of industries. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3 (7), 2319-7706. <https://reurl.cc/2KO2lv>
- Taleon, V., Gallego, S., Orozco, J. C., & Grenier, C. (2020). Retention of Zn, Fe and phytic acid in parboiled biofortified and non-biofortified rice. *Food Chemistry: X*, 8, 100105. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2020.100105>
- Tanaka, K., Yoshida, T., Asada, K., & Kasai, Z. (1973). Subcellular particles isolated from aleurone layer of rice seeds. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 155

- (1), 136–143. [https://doi.org/10.1016/S0003-9861\(73\)80016-5](https://doi.org/10.1016/S0003-9861(73)80016-5)
- Tao, L., Wang, H., Wang, J., Zhang, J., Yu, L., & Song, S. (2024). Characterization and emulsion stability of soybean protein isolate/soybean peptide and ginseng polysaccharide conjugates. *Lwt*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115860>
- Teixeira da Silva, J. A., & Dobránszki, J. (2014). Sonication and ultrasound: impact on plant growth and development. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 117 (2), 131-143. <https://doi.org/10.1007/s11240-014-0429-0>
- Teló, G. M., Marchesan, E., Zanella, R., Peixoto, S. C., Prestes, O. D., & Oliveira, M. L. (2017). Fungicide and insecticide residues in rice grains. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 39 (1). <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i1.30594>
- Tester, R. F., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). Starch—composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*, 39(2), 151-165. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.001>
- Tian, J., Cai, Y., Qin, W., Matsushita, Y., Ye, X., & Ogawa, Y. (2018). Parboiling reduced the crystallinity and in vitro digestibility of non-waxy short grain rice. *Food Chemistry*, 257, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.005>
- Trabelsi, S., Ben Mabrouk, S., Kriaa, M., Ameri, R., Sahnoun, M., Mezghani, M., & Bejar, S. (2019). The optimized production, purification, characterization, and application in the bread making industry of three acid-stable alpha-amylases isoforms from a new isolated *Bacillus subtilis* strain US586. *Journal of Food Biochemistry*, 43 (5), e12826. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12826>
- To, H. T., Karrila, S. J., Nga, L. H., & Karrila, T. T. (2019). Effect of blending and pregelatinizing order on properties of pregelatinized starch from rice and cassava. *Food Research*, 4 (1), 102-112. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(1\).245](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(1).245)

- Tsou, S. F., Hsu, H. Y., & Chen, S. D. (2024). Effects of different pretreatments on the GABA content of germinated brown rice. *Applied Sciences*, 14 (13). <https://doi.org/10.3390/app14135771>
- Ukpong, E. S., Onyeka, E. U., & Oladeji, B. S. (2023). Bioactive compounds, nutrients and pasting properties of parboiled milled rice, brown rice and germinated brown rice of selected cultivars and the effects of germination durations. *Food Chemistry Advances*, 2. 100234. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100234>
- Vashisht, P., Sharma, A., Awasti, N., Wason, S., Singh, L., Sharma, S., Charles, A. P. R., Sharma, S., Gill, A., & Khattri, A. K. (2024). Comparative review of nutritional and sensorial properties, health benefits and environmental impact of dairy (bovine milk) and plant-based milk (soy, almond, and oat milk). *Food and Humanity*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100301>
- Veluppillai, S., Nithyanantharajah, K., Vasantharuba, S., Balakumar, S., Arasaratnam, V. (2009) Biochemical changes associated with germinating rice grains and germination improvement. *Rice Science*, 16 (3), 240-242. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(08\)60085-2](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(08)60085-2)
- Vicente, M. J., Martínez-Díaz, E., Martínez-Sánchez, J. J., Franco, J. A., Bañón, S., & Conesa, E. (2020). Effect of light, temperature, and salinity and drought stresses on seed germination of *Hypericum ericoides*, a wild plant with ornamental potential. *Scientia Horticulturae*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109433>
- Vlaeminck, P., Jiang, T., & Vranken, L. (2014). Food labeling and eco-friendly consumption: Experimental evidence from a Belgian supermarket. *Ecological Economics*, 108, 180-190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.10.019>
- Wahengbam, E. D., Das, A. J., Green, B. D., Shooter, J., & Hazarika, M. K. (2019).



- Effect of iron and folic acid fortification on in vitro bioavailability and starch hydrolysis in ready-to-eat parboiled rice. *Food Chemistry*, 292, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.044>
- Wang, H., Wang, Q., Zhu, J., & Hu, G. (2022). Comparison of high-pressure, freeze-thaw cycles and germination-parboiling treatments on lipids digestibility and rancidity of brown rice. *Scientific Reports*, 12 (1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19272-8>
- Wang, H., Xiao, N., Ding, J., Zhang, Y., Liu, X., & Zhang, H. (2020). Effect of germination temperature on hierarchical structures of starch from brown rice and their relation to pasting properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 965-972. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.063>
- Wang, H., Zhu, S., Ramaswamy, H. S., Hu, F., & Yu, Y. (2018). Effect of high pressure processing on rancidity of brown rice during storage. *LWT-Food Science and Technology*, 93, 405–411. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.042>
- Wang, J., Zhang, D., Li, J., Zou, T., Wen, R., Hou, Y., Song, H., Li, H., Ma, H., & Shi, J. (2025). Aroma profiling of long shelf-life yoghurt from milk with varying acidity: Insights from sensory evaluation and instrumental analysis. *Food Chemistry: X*, 25, 102215. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102215>
- Wang, Q., Li, L., & Zheng, X. (2020). A review of milling damaged starch: Generation, measurement, functionality and its effect on starch-based food systems. *Food Chemistry*, 315, 126267. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126267>
- Wang, S. L., Liang, Y. C., & Liang, T. W. (2011). Purification and characterization of a novel alkali-stable α -amylase from *Chryseobacterium taeanense* TKU001, and application in antioxidant and prebiotic. *Process Biochemistry*, 46 (3), 745-750. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.11.022>

- Wani, A. A., Singh, P., Shah, M. A., Schweiggert-Weisz, U., Gul, K., & Wani, I. A. (2012). Rice Starch Diversity: Effects on structural, morphological, thermal, and physicochemical properties—A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 11 (5), 417-436. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00193.x>
- Wei, Y., Shohag, M. J. I., Wang, Y., Lu, L., Wu, C., & Yang, X. (2012). Effect of zinc sulfate fortification in germinated brown rice on seed zinc concentration, bioavailability, and seed germination. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60 (7), 1871-1879. <https://doi.org/10.1021/JF205025B>
- Wei, Y., Shohag, M. J. I., Ying, F., Yang, X., Wu, C., & Wang, Y. (2013). Effect of ferrous sulfate fortification in germinated brown rice on seed iron concentration and bioavailability. *Food Chemistry*, 138 (2), 1952–1958. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.134>
- Windish, W. W., & Mhatre, N. S. (1965). Microbial amylases. *Advances in Applied Microbiology*, 7, 273-304. [https://doi.org/10.1016/s0065-2164\(08\)70389-7](https://doi.org/10.1016/s0065-2164(08)70389-7)
- Wu, F., Chen, H., Yang, N., Wang, J., Duan, X., Jin, Z., & Xu, X. (2013). Effect of germination time on physicochemical properties of brown rice flour and starch from different rice cultivars. *Journal of Cereal Science*, 58, 263–271.
- Wu, F., Yang, N., Toure, A., Jin, Z., & Xu, X. (2013). Germinated brown rice and its role in human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53 (5), 451-463. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.542259>
- Wu, N. N., Li, R., Li, Z. J., & Tan, B. (2022). Effect of germination in the form of paddy rice and brown rice on their phytic acid, GABA, γ -oryzanol, phenolics, flavonoids and antioxidant capacity. *Food Research International*, 159, 111603. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111603>

- Wu, T., Wang, L., Li, Y., Qian, H., Liu, L., Tong, L., Zhou, X., Wang, L., & Zhou, S. (2019). Effect of milling methods on the properties of rice flour and gluten-free rice bread. *LWT*, 108, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.050>
- Wu, X., Guo, T., Luo, F., & Lin, Q. (2023). Brown rice: A missing nutrient-rich health food. *Food Science and Human Wellness*, 12 (5), 1458–1470. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2023.02.010>
- Xia, Q., Tao, H., Li, Y., Pan, D., Cao, J., Liu, L., Zhou, X., & Barba, F. J. (2020). Characterizing physicochemical, nutritional and quality attributes of wholegrain *Oryza sativa* L. subjected to high intensity ultrasound-stimulated pre-germination. *Food Control*, 108, 106827. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106827>
- Xiang, G., Li, J., Lin, Q., et al. (2023). The effect of heat-moisture treatment changed the binding of starch, protein and lipid in rice flour to affect its hierarchical structure and physicochemical properties. *Food Chemistry*, 100785. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100785>
- Yamuangmorn, S., Saenjurn, C., & Prom, U. T. C. (2024). Germination alters the bioactive compounds of pigmented and non-pigmented rice varieties in fresh and year-old stored seeds. *Food Chemistry: X*, 24, 102005. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102005>
- Yao, Y., He, W., Cai, X., Bekhit, A. E. D. A., & Xu, B. (2022). Sensory, physicochemical and rheological properties of plant-based milk alternatives made from soybean, peanut, adlay, adzuki bean, oat and buckwheat. *International Journal of Food Science & Technology*, 57 (8), 4868-4878. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15814>
- Ye, X., Zhang, Y., Corke, H., Sui, Z. (2019). Extraction and characterization of starch

- granule-associated proteins from rice that affect *in vitro* starch digestibility. *Food Chemistry*, 276, 754-760. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.042>
- Yin, X., Hu, Z., Zheng, Y., Chai, Z., Kong, X., Chen, S., Ye, X., & Tian, J. (2023). Multi-scale structure characterization and *in vivo* digestion of parboiled rice. *Food Chemistry*, 402, 134502. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134502>
- Yin, X., Zheng, Y., Kong, X., Cao, S., Chen, S., Liu, D., Ye, X., & Tian, J. (2021). RG-I pectin affects the physicochemical properties and digestibility of potato starch. *Food Hydrocolloids*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106687>
- Yu, X., Tu, X., Tao, L., Daddam, J., Li, S., & Hu, F. (2023). Royal jelly fatty acids: chemical composition, extraction, biological activity, and prospect. *Journal of Functional Foods*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105868>
- Zahra, N., & Jabeen, S. (2020). Brown rice as useful nutritional source. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 33 (10), 17582. <https://reurl.cc/eMoeox>
- Zarski, A., Kapusniak, K., Ptak, S., Rudlicka, M., Coseri, S., & Kapusniak, J. (2024). Functionalization methods of starch and its derivatives: from old limitations to new possibilities. *Polymers (Basel)*, 16 (5). <https://doi.org/10.3390/polym16050597>
- Zeng, Z., Hu, X., McClements, D. J., Luo, S., Liu, C., Gong, E., & Huang, K. (2019). Hydrothermal stability of phenolic extracts of brown rice. *Food Chemistry*, 271, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.180>
- Zhang, B., Wang, R.-M., Chen, P., He, T.-S., & Bai, B. (2022). Study on zinc accumulation, bioavailability, physicochemical and structural characteristics of brown rice combined with germination and zinc fortification. *Food Research*

- International*, 158, 111450. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111450>
- Zhang, C., Chen, S., Ren, X., Lu, Y., Liu, D., Cai, X., Li, Q., Gao, J., & Liu, Q. (2017). Molecular structure and physicochemical properties of starches from rice with different amylose contents resulting from modification of OsGBSSI Activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65 (10), 2222-2232. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b05448>
- Zhang, H., Wu, F., Xu, D., & Xu, X. (2021). Effects of milling methods on the properties of glutinous rice flour and sweet dumplings. *Journal of Food Science and Technology*, 58 (5), 1848–1857. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04696-9>
- Zhang, Q., Xiang, J., Zhu, X., Evers, J., Werf, W., Duan, L. (2014). Optimizing soaking and germination conditions to improve gamma-aminobutyric acid content in Japonica and Indica germinated brown rice. *Journal of Functional Foods*, 10, 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.06.009>
- Zhao, R., Ghazzawi, N., Wu, J., Le, K., Li, C., Moghadasian, M. H., & Yin, Z. (2018). Germinated brown rice attenuates atherosclerosis and vascular inflammation in low-density lipoprotein receptor-knockout mice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66 (17), 4512–4520. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00005>
- Zhang, S., Ma, Y., Ren, X., Wu, W., & Liao, L. (2025). Combined *Lactobacillus plantarum* fermentation and heat-moisture treatment: Correlation analysis of physicochemical properties of rice flour and quality of rice noodles. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2025.101120>
- Zhong, Y., Li, Z., Qu, J., Bertoft, E., Li, M., Zhu, F., Blennow, A., & Liu, X. (2021). Relationship between molecular structure and lamellar and crystalline structure

of rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 258, 117616.
<https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2025.101120>

Zhou, C., Zhou, Y., Hu, Y., Li, B., Zhang, R., Zheng, K., Liu, J., Wang, J., Zuo, M., & Liu, S. (2021). Integrated analysis of metabolome and volatile profiles of germinated brown rice from the Japonica and Indica subspecies. *Foods*, 10 (10).
<https://doi.org/10.3390/foods10102448>

Zhu, L., Cheng, L., Zhang, H., Wang, L., Qian, H., Qi, X., & Wu, G. (2019). Research on migration path and structuring role of water in rice grain during soaking. *Food Hydrocolloids*, 92, 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.051>

Zohoun, E. V., et al. (2018). Physicochemical and nutritional properties of rice as affected by parboiling steaming time at atmospheric pressure and variety. *Food Science & Nutrition*, 6, 638–652. <https://doi.org/10.1002/fsn3.600>

Zong, X., Wen, L., Wang, Y., & Li, L. (2022). Research progress of glucoamylase with industrial potential. *Journal of Food Biochemistry*, 46 (7), e14099.
<https://doi.org/10.1111/jfbc.14099>