

# 不同微波乾燥發芽糙米之研究

范盛廣<sup>1</sup>、陳淑德<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> 國立宜蘭大學生物資源學院碩士在職專班

<sup>2</sup> 國立宜蘭大學食品科學系

## 摘要

發芽糙米 (GBR) 比糙米具有更好的營養成分和消化吸收特性，糙米的發芽也增加  $\gamma$ -胺基丁酸 (GABA) 等生物活性化合物的含量，提高保健功能。本研究先將有機台中秈10號糙米進行浸泡於0.2%氯化鈣溶液中6 h，再繼續發芽至42 h，此時的水分含量增加為33.5%，再分別研究使用攪拌式和吊籃式的微波乾燥機及微波真空乾燥機進行乾燥至14%以下的水分含量，方可儲藏。結果顯示，1 kg發芽糙米使用冷風乾燥需270 min，使用1 kW和2 kW微波攪拌式乾燥機需36 min和18 min，使用1 kW和2 kW微波吊籃式乾燥機，只需24 min和12 min，使用1 kW微波真空乾燥機，則需35 min，所以微波功率愈大能夠成比例縮短乾燥時間。以食味計分析冷風乾燥的發芽糙米，食味值達到84分，而以攪拌式微波乾燥、吊籃式微波乾燥及真空微波乾燥的發芽糙米，食味值最高能有82分。故微波乾燥發芽糙米可以克服熱傳障礙，提高乾燥速率，達到省時節能的效果。

**關鍵詞：**發芽糙米、微波乾燥、乾燥時間、水分含量

\*通訊作者。E-mail: sdchen@niu.edu.tw

# Study on Different Microwave Drying of Germinated Brown Rice

Sheng-Kuang Fan<sup>1</sup>, Su-Der Chen<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Master Program, College of Bioresources, National Ilan University

<sup>2</sup> Department of Food Science, National Ilan University

## Abstract

Germinated brown rice (GBR) has better nutrient composition and digestive and absorption characteristics than brown rice, and germination of brown rice also increases the content of bioactive compounds such as  $\gamma$ -amino butyric acid (GABA), which improves health functions. In this study, organic Taichung Sen No. 10 brown rice was first soaked in 0.2% CaCl<sub>2</sub> solution for 6 h, and then germinated for 36 h. At this time, the moisture content was increased to 33.5% and then dried to less than 14% moisture content before storage by using stirring-type and basket-type microwave dryer and a microwave vacuum dryer, respectively. The results showed that it took 270 min to dry 1 kg of germinated brown rice with cold air, 36 min and 18 min with 1 kW and 2 kW stirring microwave dryers, 24 min, and 12 min with 1 kW and 2 kW basket microwave dryers, and 35 min with 1 kW microwave vacuum dryer, respectively. Therefore, the higher the microwave power, the shorter the drying time with proportional relationship. The taste values of cold air dried germinated brown rice analyzed by taste meter were 84 points. Germinated brown rice was dried by stirring microwave dryer, basket microwave dryer, and microwave vacuum dryer, those above the taste value could achieve up to 82 points. In summary, microwave drying germinated brown rice can overcome the heat transfer barrier, improve the drying rate, and achieve time-saving and energy-saving effects.

**Keywords:** Germinated brown rice, Microwave drying, Drying time, Moisture content

\*Corresponding author. E-mail: sdchen@niu.edu.tw

## 壹、前言

稻米作為全球最重要的主食之一，主要作為米飯食用。糙米比精白米含有更豐富的營養成分 (Pandey et al., 2017)，還含有更多的生物活性成分，這些成分主要存在於胚芽和米糠層中 (Wu et al., 2013)。發芽糙米是通過將糙米浸泡在水中促進發芽而產生的， $\gamma$ -胺基丁酸 ( $\gamma$ -aminobutyric acid, GABA) 在這個過程中持續增加 (Hussain et al., 2020)。發芽是一種有效的技術，可以改善糙米的品質和營養物質的生物利用率 (Wu et al., 2013)。糙米用於發芽，可以在發芽糙米中獲得較少的植酸含量和較高的 GABA 含量 (Wu et al., 2022)。在 25°C 下浸泡 6 小時加上發芽 36 h，總共 42 h 的發芽糙米 GABA 含量為最高，為 29.03 mg/100 g，是未發芽糙米的 3 倍 (吳等，2024)。

在浸泡過程中添加氯化鈣 (calcium chloride, CaCl<sub>2</sub>) 時，鈣離子位於細胞質中與鈣調蛋白 (calmodulin, CaM) 結合，使得麩胺酸脫羧酶 (glutamate decarboxylase, GAD) 的活性增加，將麩胺酸 (glutamic acid, Glu) 轉化為 GABA，同時也提升了發芽糙米當中多酚類產生。其中發芽糙米的多酚類化合物的累積，主要是由參與苯丙烷代謝中的苯丙胺酸解胺酶 (tyrosine ammonia lyase, TAL) 和酪胺酸解胺酶 (phenylalanine ammonia lyase, PAL) 的酶活性增加引起的，從而導致多酚和類黃酮化合物的產生，後續測得糙米發芽後 TAL 和 PAL 酶活性顯著增加 (Choe et al., 2021)。糙米之製備以浸泡在 0.2% 氯化鈣 CaCl<sub>2</sub> 溶液 6 h 再繼續發芽至 42 h，從發芽糙米產生生物活性化合物之 GABA 含量可達 29.03 mg/100g，而使用超高壓加工 (High Pressure Processing, HPP) 處理亦會影響 GABA 的含量 (吳等，2024)，但超高壓的設備較昂貴，故本研究將採用糙米只以浸泡在 0.2% 氯化鈣溶液。

一般米飯的食味品質檢定方式可分為兩種，第一是以官能品評的方式直接進行檢定，此方式需要有經驗豐富的品評員協助；第二是檢測與食味有關的理化特性 (水分含量、直鏈澱粉、蛋白質、脂肪酸含量)。為了快速有效的檢測稻米食味品質，早期市面上已有稻米成分測定器被開發用於稻米食味品質之檢測。農業部法規 CAS (台灣優良農產品標章) 食米類驗證規範，也定義生產 CAS 良質米工廠宜設置食味計，檢測項目包括米粒之水份、蛋白質、直鏈性澱粉、脂肪酸等含量及稻米食味分數。有些米廠如台東池上米，透過食味計所測得的食味值，作為訂定稻穀收購價格之參考，有助於提昇國產稻米的分級品質。以宜蘭縣三星鄉公所「三星米」註冊證明標章使用管理規範為例，定義生產稻米的品質需食味值達 65 分 (含) 以上。近紅外線分析法的食味計，主要測定原理

是以糙米或白米為材料，利用近紅外線照射測試樣品後的吸收光譜進行各種化學成分含量分析，利用特定波長光線的吸收程度可對不同化學成分進行含量的估算。在測得影響米飯食味品質有關之化學成分含量後，藉由已開發的科學模式，計算出對應的食味值(楊，2020)。

各種乾燥技術，都可以應用於發芽糙米的乾燥，例如：日曬乾燥、熱風乾燥、流化床乾燥及微波乾燥。曬乾是一種傳統天然乾燥方法，利用太陽能的日曬乾燥能夠降低蔬菜和水果產品的水分含量。它是一種低成本的技術，但它有幾個缺點，如：產品暴露在環境汙染中，乾燥速度難以監測，需要大空間的環境，由於乾燥速度而耗時，高度依賴於天氣 (Ahmed et al., 2013)。

熱風乾燥是利用熱空氣以恆定的流量和溫度去除生物材料中的水分。在這種技術中，水蒸氣的方向是從食物的內部到外部，但乾燥時間長可能會破壞敏感的營養化合物。熱風乾燥為最為普遍的人工乾燥方法，它能控制熱風的溫度將原料乾燥，熱風乾燥食物所需的時間消耗更多能量，因為即使熱風利用熱對流將熱傳至食品表面，但仍需要利用熱傳導由食品表層至食品內部，使水分蒸發，且由於食品表層的水分蒸散，所產生的空洞的傳導係數更低，隨著乾燥後期熱傳導至食品內部更加困難，而在臨界水分量後，進入減率乾燥期，使乾燥減緩，而使乾燥時間增長。近年來，漸漸使用低溫低濕的冷風乾燥機，基本是將乾燥機內部的較低溫空氣在烘箱內進行除濕，而改善質傳，有利於由食品蒸散的水蒸氣排除，由於空氣的溫度只有 35-45°C，故乾燥後的食品品質較傳統利用不斷的空氣加熱成為 50-70°C 熱風乾燥佳，不過二者的乾燥時間都稍長，能耗亦高。此外，在熱風烘箱乾燥機上施加真空會使食物中的水分在低於大氣條件的溫度下蒸發，從而節約能源和加快加工速度，並通過高溫限制生物材料的品質變質 (Ahmed et al., 2013)。

微波是指波長介於紅外線和無線電波之間的電磁波。加熱使用頻率範圍為 300 MHz 至 300 GHz 的電能，為避免通訊干擾，美國聯邦通訊委員會特別規定在工業、醫學、學術研究可使用的微波頻率為 915 及 2450 MHz。915 MHz 是工業用，其中 2450 MHz 是最常用的頻率，微波的功能有微波加熱、微波烹飪、微波乾燥、微波萃取 (Nguyen and Songsermpong, 2022)。微波利用食品中水、極性分子等具有高介電常數以吸收微波頻率產生分子內振動而摩擦生熱，使水分轉成水蒸氣。微波乾燥較傳統熱傳的優點：能量只被加熱樣品所吸收，能量較少散失在空氣，熱源穿透力強，克服傳統熱風乾燥的熱傳障礙，可大幅增加加熱效率及加熱均勻性 (Khodifad & Dhamsaniya, 2020)。

微波之所以受大家所使用的原因是在其加熱的原理機制有別於對流加熱方式，因為

傳統加熱處理透過熱傳導和對流來傳遞熱量，由食品表面緩慢將熱傳至食品內部，速度較慢；而在微波加熱處理食品時由於食品當中含有極性的水分子或離子，在電磁場的作用下，物料中的極化水分子迅速旋轉和離子交變，相互摩擦而產生熱量，進而加熱物料使水分蒸發而成為乾燥物料，用微波對物料進行乾燥，致使食品內部能夠快速達到升溫加熱（Gude et al., 2013）。

Shen 等（2021）曾利用改造家用微波爐中乾燥 200 g 新鮮發芽糙米，並分析乾燥過程中的水分的變化。隨著微波功率增加，發芽糙米的水分含量在 1 W/g 下逐漸下降，而在 5 W/g 時出現了急劇的線性下降。此外，在 1 W/g 下達到 13.0% -14.5%的目標含水量的總乾燥持續時間為 36 min，2 W/g 為 12 min，3 W/g 為 8 min，4 W/g 為 6 min，5 W/g 為 5 min，這說明增加微波強度可加快乾燥過程，並顯著地縮短乾燥時間。但由於所使用的 200 g 發芽糙米的重量稍少，常發生放置在旋轉盤中間的發芽糙米因過熱而燒焦的情形，另外部分發芽糙米的最終水分含量未能保持在 14%，且 GABA 含量亦會受到微波乾燥操作條件影響。

在本研究將分別採用三種微波乾燥設備，攪拌式和吊籃式的微波乾燥機及微波真空乾燥機，以期降低傳統發芽糙米乾燥的時間，提升發芽糙米的品質，幫助農民改善生產較高營養價值的發芽糙，進而做到提高能源效率，達到節能減碳的目的及未來應用於食品工業界。

## 貳、材料與方法

### 一、材料

市售有機糙米（*Oryza sativa* subsp. *Indica*）為台中秬 10 號，112 年第一期稻作，購自紀元農莊（宜蘭縣，台灣），氯化鈣（ $\text{CaCl}_2$ ）購自日本和光純藥工業株式會社（大阪，日本）。

### 二、發芽糙米製備和乾燥

#### (一)製備發芽糙米

參考吳等（2024）的方法，將糙米浸泡於 0.2%氯化鈣（ $\text{CaCl}_2$ ）的水溶液，以糙米:水溶液（1000g:1000 mL）1:1 方式浸泡 6 h 後，瀝出多餘浸泡液體，將糙米平鋪在洗衣袋中，溫度 25°C 下進行發芽，靜置發芽時間為 36 h，每 12 h 將洗衣袋進行上下翻面，發芽糙米能均勻透氣。

#### (二)冷風乾燥發芽糙米

將發芽的糙米秤取 1 kg 均勻平舖在鐵盤上約 1 cm 的厚度，將裝有發芽糙米置於的鐵盤，放入 45°C 冷風乾燥機 (YK-112RS，主典興業股份有限公司，台中市，台灣) 進行冷風乾燥。每隔 60 min 記錄樣品之重量和溫度變化，至最終發芽糙米的水分含量約為 14%，使用紅外線熱像儀 (Testo 104-IR，德斯特儀器有限公司，新北市，台灣) 測量發芽糙米的表面溫度，繪製升溫和乾燥曲線。

### (三)微波攪拌乾燥發芽糙米

將發芽的糙米秤取 1 kg，置於微波攪拌乾燥機 (MLE-3KW-BS-A，美林能源科技股份有限公司，高雄市，台灣) 進行微波攪拌乾燥實驗，微波功率控制分別在 1 kW 和 2 kW，每隔 3 min 分析溫度，至發芽糙米的水分含量達 14%，使用紅外線熱像儀測量發芽糙米的表面溫度，計算樣品之水分含量，以繪製升溫和乾燥曲線。

### (四)微波吊籃乾燥發芽糙米

將發芽的糙米秤取 1 kg，置於微波吊籃乾燥機 (CF-003A，台灣鑼泰企業有限公司，桃園市，台灣) 中進行乾燥實驗，在設定微波乾燥機上限溫度為 100°C，下限 90°C，微波功率控制為 1 kW 和 2 kW，中每 3 min 紀錄溫度及取樣品秤重，至最終水分含量為 14%，繪製升溫和乾燥曲線。

### (五)微波真空乾燥發芽糙米

將發芽的糙米秤取 1 kg 放置於微波真空乾燥機 (TYFDM-50003，台溢實業股份有限公司，新北市，台灣) 中進行微波真空乾燥實驗，在設定微波乾燥機加熱啟動壓力為 -40 kPa，上限溫度為 45°C，微波功率控制為 1 kW，每 5 min 紀錄溫度及秤重，直至發芽糙米的水分含量達 14%，繪製升溫和乾燥曲線。

## 三、分析方法

### (一)水分含量

乾燥後發芽糙米的水分含量測定是精秤 5 g 樣品，置於 105°C 的烘箱 (Channel DCM45，珂化有限公司，宜蘭縣，台灣) 中乾燥至恆重，損失重量為水分的重量，每組處理做三重複，再計算其水分含量 (%)。計算乾燥樣品的乾基水分含量，由公式 (1) 計算水分比率 (moisture ratio, MR)，其中， $M_t$  為不同乾燥時間下樣品的乾基水分含量， $M_i$  為起始樣品的乾基水分含量，而  $M_e$  為平衡時樣品的水分含量。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (1)$$

## (二)水活性

水活性是用來預測細菌、酵母菌和黴菌的生長，要使食品在不依賴冷藏儲存的情況下也能有較長的保存期，就必須控制其水活性（Sandulachi, 2012）。而水活性測定是將樣品放入水活性測定儀（HP23-AW-A，Rotronic，瑞士）測定水活性，重複三次，取平均值。

## (三)顏色

使用色差儀（Sph900，ColorLite，德國），發芽糙米的顏色分析是使用色差儀測定不同加工處理的樣品之  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值。每個樣品測 10 次，取平均值，比較處理前後的顏色差異。其中， $L^*$  代表亮度：黑色（0）-白色（100）， $a^*$  值代表紅色（+）-綠色（-）， $b^*$  值代表黃色（+）-藍色（-）。色差（ $\Delta E^*$ ）由公式（2）計算，這是一個被廣泛用於發芽糙米在加工過程中顏色變化的參數。其中  $L_0^*$ 、 $a_0^*$  和  $b_0^*$  是對照組冷風乾燥發芽糙米的顏色值； $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  是發芽糙米在指定時間處理後的顏色值。

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (2)$$

## (四)營養成分分析和食味值

委託宜蘭縣農糧署東區分署以食味計（TM-3500，靜岡製機株式會社，靜岡縣，日本）分析不同實驗的糙米，每組處理做三重複，取平均值。食味計原理為近紅外線透過方式在連續波長 500 nm-1010 nm 下測試對照組及實驗組的乾燥發芽糙米之水分、蛋白質含量、直鏈澱粉含量、游離脂肪酸及食味值。

## 四、統計分析

試驗結果重複性，以平均值  $\pm$  標準差表示之，數據使用 Statistical Package for Social Science（SPSS, SPSS INC. 宏德國際軟體諮詢顧問股份有限公司）20.0 統計套裝軟體進行統計分析，以多元全距檢定分析（Duncan's Multiple Range Test），以顯著水準為  $\alpha = 0.05$ ，比較其差異之顯著性。

# 參、結果與討論

## 一、微波乾燥發芽糙米製程之研究

圖1顯示45°C 冷風乾燥1 kg發芽糙米的乾燥曲線。根據初步測試結果，在45°C 冷風乾燥的 1 kg新鮮發芽糙米樣品中，達到低於14%（wb）的目標含水量所需的總乾燥時間為270 min，其乾基水分含量為0.16 g水/g乾物。在45°C冷風乾燥過程中發芽糙米的溫度

由25°C 升至約35°C，保持在低溫的狀態，1 kg發芽糙米平鋪於鐵盤中，所以它們的乾燥曲線尚可以維持在恆率乾燥期，但乾燥速率非常低，造成乾燥時間長，此也會增加能耗。

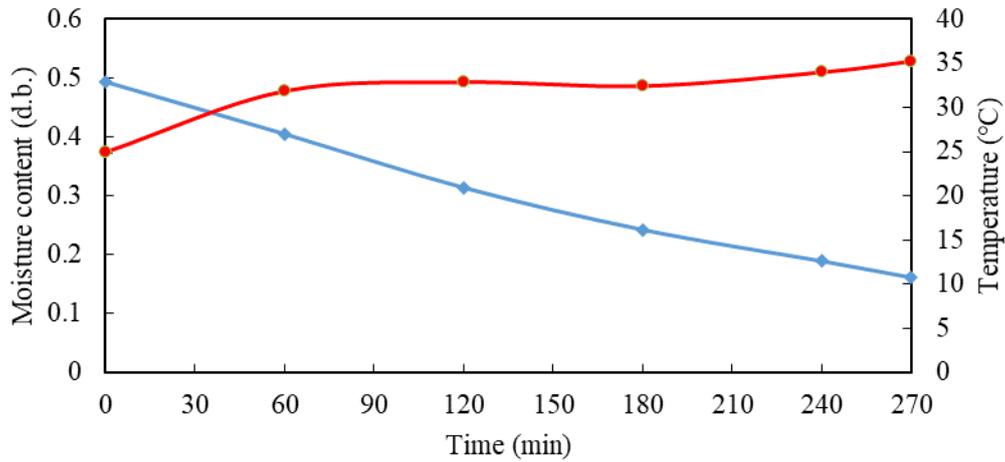


圖 1. 45°C 冷風乾燥 1 kg 發芽糙米乾燥曲線。

Fig. 1. The drying curve of germinated brown rice by 45°C cold air drying. Data were expressed as mean  $\pm$  S.D. (n=3).

圖2顯示1 kW和2kW微波攪拌乾燥1 kg 發芽糙米乾燥及升溫曲線。根據初步測試結果，達到低於14% (wb) 的目標含水量，在1 W/g和2 W/g微波攪拌乾燥分別需36 和18 min，且二者的乾燥曲線皆呈現恆率乾燥期，且微波功率的加倍，剛好縮短為一半的乾燥時間。不過1 kg 發芽糙米在1 kW和2 kW微波攪拌乾燥的溫度是由最初的25°C 分別升到46°C和56°C。所以增加微波功率雖會縮短乾燥時間，但亦會造成樣品的溫度升高，不過在此次的研究中，乾燥的溫度並未超過60°C，相較60°C熱風乾燥，尚不致於造成發芽糙米的品質影響。

圖3顯示1 kW和2 kW微波吊籃乾燥1 kg 發芽糙米乾燥及升溫曲線，達到低於14% (wb) 的目標含水量，所需乾燥時間分別為24 和12 min。二者的乾燥曲線呈現恆率乾燥期，微波功率的加倍，亦剛好縮短為一半的乾燥時間，且1 kg 發芽糙米在1 kW和2 kW吊籃式微波攪拌乾燥的溫度是由25°C分別升到82°C和102°C，溫度稍高，此由於發芽糙米平鋪具有孔洞的吊籃中，更有利於水分的散失，且設定偵測樣品的溫度為達到100°C時，立即停止微波輸出，而此次操作微波乾燥樣品的溫度不致於高於100°C太多，可以使微波持續加熱，故乾燥效率較攪拌式微波乾燥機佳。

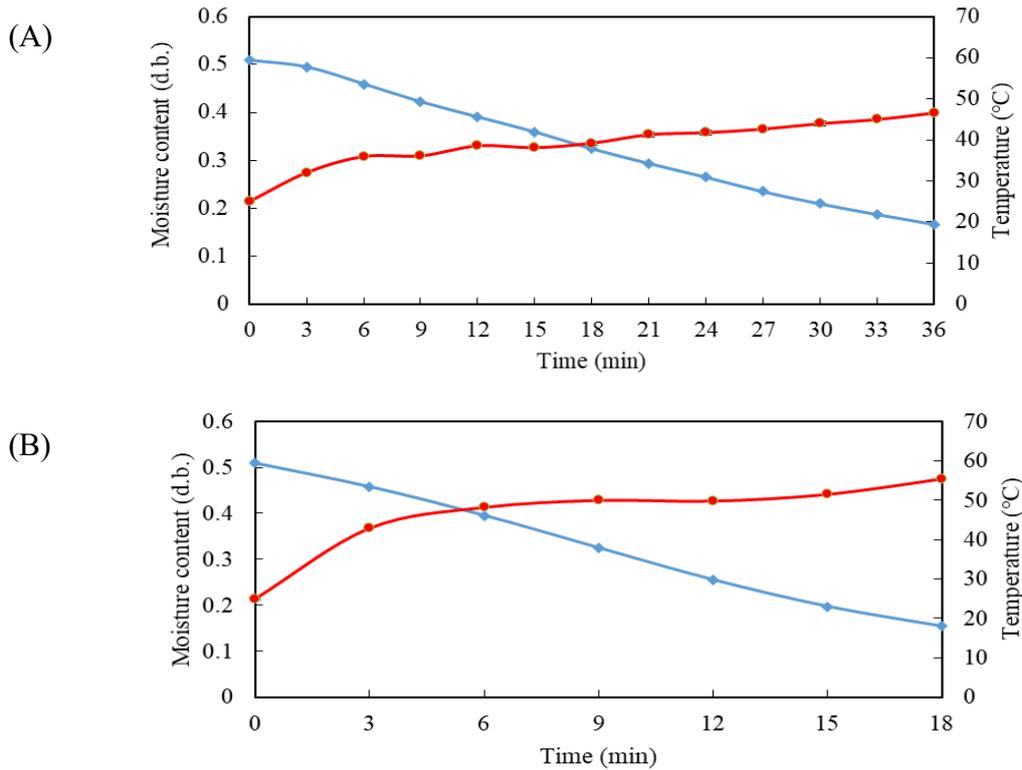


圖2、1 kW (A) 和2 kW (B) 微波攪拌機乾燥1 kg 發芽糙米乾燥及升溫曲線。  
 Fig. 2. The drying curve and temperature profile of 1 kg germinated brown rice by 1 kW (A) and 2 kW (B) stirring microwave drying. Data were expressed as mean  $\pm$  S.D. (n=3).

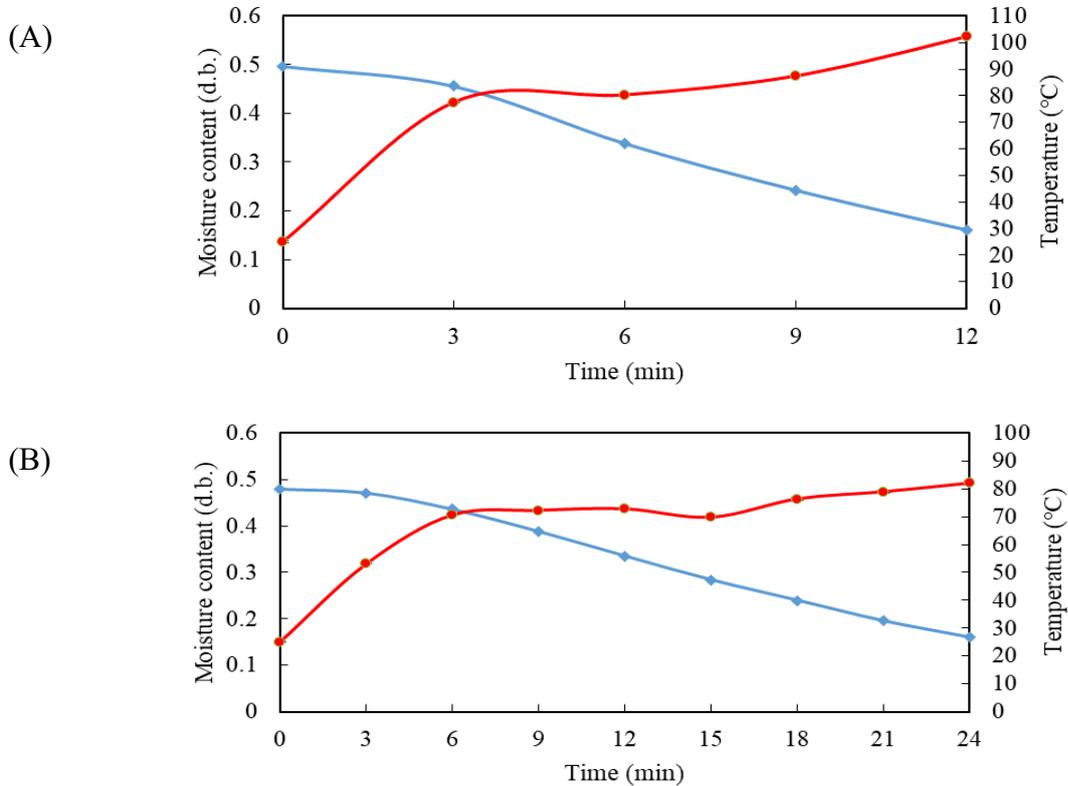


圖3、1 kW (A) 和2 kW (B) 微波吊籃乾燥1 kg 發芽糙米乾燥及升溫曲線。  
 Fig. 3. The drying curve and temperature profile of 1 kg germinated brown rice by 1 kW (A) and 2 kW (B) basket microwave drying. Data were expressed as mean  $\pm$  S.D. (n=3).

圖4顯示1 kW微波真空乾燥1 kg 發芽糙米乾燥及升溫曲線，根據初步測試結果，在1 W/g乾燥的1 kg新鮮發芽糙米樣品中，達到低於14% (wb)的目標含水量所需的總乾燥時間為35 min，且由於乾燥時發芽糙米的溫度維持在45°C，不會像常壓操作微波乾燥時，樣品的溫度會持續升高至乾燥完成，故此可以維持較佳的品質。因為微波真空乾燥的交變電磁波產生的能量導致水分子振動和快速旋轉，從而將這種能量轉化為熱。因此，產生的熱量導致食品基質中的水分蒸發，然後透過真空系統去除水分，從而降低乾燥室內的壓力。此外，低壓環境還降低了水的沸點，從而可以在較低的溫度下去除水分並縮短處理時間 (Shao et al., 2023)。

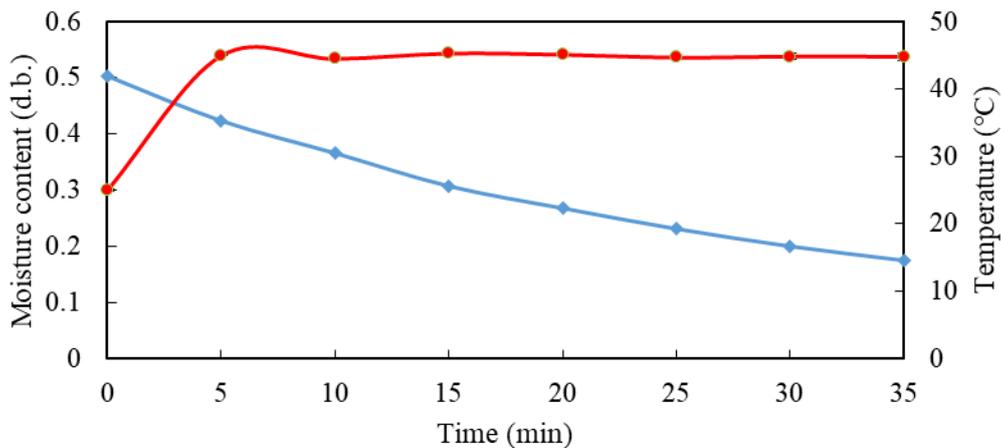


圖4、1 kW微波真空乾燥1 kg 發芽糙米乾燥及升溫曲線。

Fig. 4. The drying curve and temperature profile of 1 kg germinated brown rice by 1 kW microwave vacuum drying. Data were expressed as mean  $\pm$  S.D. (n=3).

表1說明1 kg發芽糙米在設定最終乾燥發芽糙米的水分含量為14%時，以不同乾燥方式的乾燥速率及預估乾燥時間，其中冷風乾燥的時間需要264 min，1 kW與2 kW微波攪拌乾燥時間分別為34.6和16.9 min，1 kW與2 kW微波吊籃乾燥時間分別為25和12.2 min，1 kW微波真空乾燥時間為33.5 min，且由乾基水分含量和乾燥時間作線性迴歸，其R2皆接近於0.99，此水分損失的動力學屬於零次反應，乾燥速率分別為0.9882, 0.9957, 0.9963, 0.9884, 0.9844和0.9671 (g water/g dry material min)，故使用微波乾燥呈現恆率乾燥期，充分顯示微波乾燥可克服熱風乾燥後期的熱傳障礙，而乾燥速率快，可以縮短乾燥時間，這也和熱風乾燥方法不同。

表2為在不同微波功率下發芽糙米的水分與乾燥時間的變化及最終溫度。微波攪拌1 W/g乾燥的時間需要36 min，水分含量為14.32%。微波攪拌2 W/g乾燥的時間需要18 min，水分含量為13.90%，微波吊籃1 W/g乾燥的時間需要24 min，水分含量為13.59%，微波吊

籃2 W/g乾燥的時間需要12 min，水分含量為13.69%，微波真空1W/g乾燥的時間需要35 min，水分含量為13.43%。

表 1、1 kg 發芽糙米以不同乾燥方式的乾燥速率及乾燥時間

Table 1. Drying rate and drying time of 1 kg of germinated brown rice by different drying methods

Drying methods	Linear regression equation	R <sup>2</sup>	Drying rate (g/min)	*Predicted drying time (min)
Cold Air	y = -0.8206x + 990.24	0.9882	0.8201	264.0
1 kW MW stirring	y = -6.6238x + 1002.3	0.9957	6.624	34.6
2 kW MW stirring	y = -13.607x + 1002.4	0.9963	13.607	16.9
1 kW MW basket	y = -9.775x + 1017.7	0.9884	9.775	25
2 kW MW basket	y = -19.733x + 1012.8	0.9844	19.733	12.2
1 kW MW vacuum	y = -6.1202x + 977.96	0.9671	6.120	33.5

<sup>1</sup> Where x is time (min), and y is the weight (g) during drying.

<sup>2</sup> Estimated drying time (min) required for the sample to reach 14% moisture content.

表 2、不同微波功率下發芽糙米的水分與乾燥時間的變化及最終溫度

Table 2. Drying curves of GBR at different microwave power variations of moisture ratio versus drying time and final temperature

Drying condition	Drying time (min)	Moisture (%)	Temperature (°C)
Cold Air	270	13.64 ± 0.003	35.22
MW stirring 1W/g	36	14.32 ± 0.001	46.56
MW stirring 2W/g	18	13.90 ± 0.004	56.68
MW basket 1W/g	24	13.59 ± 0.007	82.00
MW basket 2W/g	12	13.69 ± 0.003	102.11
MW vacuum 1W/g	35	13.43 ± 0.003	44.80

<sup>1</sup> Data were expressed as mean ± S.D. (n=3).

在整個乾燥過程中，以45°C 冷風乾燥1 kg 發芽糙米，最終溫度約為35.22°C。而使用1 kW和2 kW微波攪拌式乾燥機，最終溫度約為46.56°C 及 56.68°C。而使用1 kW和2

kW微波吊籃式乾燥機，最終溫度約為82.0°C 及 102.11°C，而使用1 kW微波真空乾燥機需35 min，最終溫度約為44.8°C。觀察到發芽糙米的乾燥速率在2 W/g時最高，而最小的是1 W/g。這可以解釋為，高微波強度導致顆粒層對微波能量的更高吸收。因此，微波強度越大，發芽糙米在微波乾燥的乾燥速率越高，唯在1 W/g微波真空乾燥發芽糙米，可以控制乾燥過程中發芽糙米的溫度在45°C，避免微波加熱造成發芽糙米的溫度過高的情形，有助於保持較佳的品質。不過相較於吊籃式和攪拌微波乾燥機，此微波真空乾燥機，除微波加熱系統外，尚需配合真空系統使乾燥腔體的壓力降低和冷凍的冷凝系統，使蒸發的水蒸氣立即冷凍，而不會進入真空泵中，所以設備較為昂貴。

整體而言，此次1 W/g發芽糙米所使用的攪拌式、吊籃式和真空微波乾燥時間分別為36、24和35 min，故以吊籃式微波乾燥的效果較佳，唯其溫度也較高，且針對這三種業者設計的微波設備乾燥發芽糙米，並沒有發生Shen等（2021）自組微波乾燥機會造成放置圓盤中間的發芽糙米燒焦的情形，出現加熱不均勻的情形。

## 二、乾燥發芽糙米的品質分析

表3為乾燥後發芽糙米之水分含量和水活性。乾燥發芽糙米的水分含量約控制在14%左右，水活性介於0.75-0.81，而根據水活性的範圍是0-1.0之間(Sandulachi, 2012)，水活性是防止或限制微生物生長的一個主要因素(Tapia et al., 2020)。若水活性高，易造成微生物生長，而乾燥的發芽糙米的水活性，不只細菌不能生長，連酵母菌和黴菌皆不易生長，故可以適合存放較長的時間。

表3、乾燥後發芽糙米之水分含量和水活性

Table 3. Moisture content and water activity of drying germinated brown rice

Drying methods	Moisture (%)	Water Activity
Cold Air	13.640 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.750 ± 0.005 <sup>d</sup>
1 kW MW stirring	14.320 ± 0.001 <sup>a</sup>	0.810 ± 0.002 <sup>a</sup>
2 kW MW stirring	13.900 ± 0.004 <sup>a</sup>	0.790 ± 0.005 <sup>b</sup>
1 kW MW basket	13.590 ± 0.007 <sup>a</sup>	0.760 ± 0.005 <sup>c</sup>
2 kW MW basket	13.690 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.750 ± 0.002 <sup>d</sup>
1 kW MW vacuum	13.430 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.750 ± 0.001 <sup>d</sup>

<sup>1</sup> Data are expressed as mean ± S.D. (n = 3).

<sup>2</sup> Means with different superscript letters in the same column are significantly different (p < 0.05).

表4顯示乾燥條件對發芽糙米色澤的影響，微波乾燥影響發芽糙米的視覺顏色，L\*值在微波吊籃式乾燥的發芽糙米相比其他乾燥方式的數值較低，此明顯可知微波乾燥設備的溫度愈高，處理後的糙米白色度下降，a\*、b\*值彼此間沒有顯著性變化。比較這些微波乾燥發芽糙米和冷風乾燥糙米的 $\Delta E$ 相比，其實它們的 $\Delta E$ 差距並不大，只在2.4-4.9之間，除微波吊籃式乾燥的發芽糙米，會因為較暗，L\*值較低外，造成 $\Delta E$ 為4.9外，其他微波乾燥發芽糙米的 $\Delta E$ 為2.4-2.5。

表4、乾燥條件對發芽糙米色澤的影響

Table 4. Effect of drying condition on color of germinated brown rice

Drying methods	L*	a*	b*	$\Delta E^*$
Cold Air	57.70 ± 2.10 <sup>a</sup>	2.69 ± 0.32 <sup>a</sup>	19.36 ± 1.16 <sup>c</sup>	
1 kW MW stirring	59.18 ± 2.60 <sup>a</sup>	2.95 ± 0.57 <sup>a</sup>	21.33 ± 1.12 <sup>a</sup>	2.47
2 kW MW stirring	55.76 ± 6.05 <sup>ab</sup>	3.13 ± 0.54 <sup>a</sup>	20.77 ± 1.39 <sup>ab</sup>	2.44
1 kW MW basket	49.84 ± 1.82 <sup>c</sup>	3.13 ± 0.34 <sup>a</sup>	19.83 ± 0.74 <sup>bc</sup>	7.90
2 kW MW basket	53.04 ± 3.93 <sup>bc</sup>	3.01 ± 0.31 <sup>a</sup>	20.88 ± 2.16 <sup>ab</sup>	4.91
1 kW MW vacuum	58.55 ± 3.09 <sup>a</sup>	2.88 ± 0.42 <sup>a</sup>	21.69 ± 1.28 <sup>a</sup>	2.48

<sup>1</sup> Data are expressed as mean ± S.D. (n = 3).

<sup>2</sup> Means with different superscript letters in the same column are significantly different (p < 0.05).

圖5顯示各種不同乾燥方式的發芽糙米照片，圖5 (A) 是45°C 冷風乾燥後的發芽糙米照片，圖5 (B) 為微波攪拌乾燥後的發芽糙米照片。以裝載量固定1 kg之發芽糙米，進行功率1 kW 及2 kW 微波乾燥，乾燥後的糙米外觀有很多破裂的情形，判斷是乾燥攪拌的過程中造成糙米有裂痕，證實在使用較高的功率下乾燥速率越快，水分含量散失的越快，可以達到越快的乾燥效果，然而持續攪拌，容易造成米粒碎裂。圖5 (C) 為微波吊籃乾燥後的發芽糙米照片。以裝載量固定1 kg之發芽糙米，進行功率1 kW 及2 kW 微波乾燥，乾燥後的糙米顏色有接近黃褐色之情形，也證實在使用較高的功率下乾燥速率越快，溫度較高，水分含量散失的越快，可以達到越快的乾燥效果，可提供樣品能量使水分快速蒸發，進而縮短乾燥時間。圖5 (D) 為微波真空乾燥後的發芽糙米，乾燥後的發芽糙米外觀最接近45°C 冷風乾燥後的發芽糙米，由於乾燥時發芽糙米的溫度維持在45°C，故此可以維持較佳的品質。



圖5、在不同乾燥方式下乾燥後的發芽糙米相片。

Fig. 5. Photographs of germinated brown rice after drying under different drying methods.

因米飯感官品評需花大量人力及時間，可藉由食味計數值快速取得其米飯食味品質，食味值的高低主要受水分含量、直鏈澱粉、蛋白質、脂肪酸含量的影響（吳等，2007）。表5為發芽糙米以食味計測定分析不同乾燥方式的食味值比較。測定結果中發芽糙米水分含量約為13.4-17.4%，其中微波攪拌式乾燥的發芽糙米檢測出的水分偏高，研判是米粒經過乾燥攪拌破裂，導致光學檢測判定水分較高。蛋白質含量約為6.0-7.0%，數值最高的6.5及7.0，這是由於微波吊籃式乾燥的發芽糙米，溫度高於其他乾燥方式，所以影響蛋白質的成分。直鏈澱粉含量約為17.0-21.4%，微波攪拌式乾燥的發芽糙米含量為最高，顯示高溫處理過的發芽糙米會引起乾燥過程中發芽糙米內部澱粉顆粒的結構變化，影響了測試數值（Shen et al., 2021）。直鏈澱粉含量低的米柔軟且黏性高，含量高的米則口感較硬且黏性低（洪，2000）。脂肪酸含量18-24 mg/ 100 mg KOH，研究指出乾燥後的水含量影響脂肪酸度，這是因為穀物的高水分含量促進脂質水解產生游離脂肪酸並誘導脂質氧化產生氫過氧化物，從而導致較高的脂肪酸度（Kim et al., 2023）。食味計測定未發芽的糙米之食味值為83分，而乾燥後發芽糙米的食味值達到67-84。根據稻米食味分析

介紹說明影響米飯食味品質在蛋白質含量，指出在相同品系稻米中蛋白質含量較低相對有較佳的食味品質，彼此之間呈現負相關（楊，2020）。越來越多的研究表明，穀物蛋白質是繼澱粉之後影響食用品質的最重要因素（Lou et al., 2023）。總結以上的食味計測試結果，食味值高於65分以上，且最高能有82分，從池上稻米分級與收購制度的說明內容，食味值在80分以上是在食味計配分標準項目的滿分，這表示微波乾燥的時間比冷風乾燥縮短許多，發芽糙米的食味值也接近冷風乾燥的結果。

表5、食味分析計分析不同乾燥方法之發芽糙米（台中秈10 號）

Table 5. Comparison of taste value of different drying methods

Treatments	Moisture (%)	Protein (%)	Amylose (%)	Fatty acid (mg/100mg KOH)	Taste value
BR	13.2	6.3	18.9	16.0	83.0
Cold Air	15.9	6.0	17.1	18.0	84.0
1 kW MW stirring	17.4	6.2	17.0	24.0	82.0
2 kW MW stirring	16.4	6.3	17.5	21.0	80.0
1 kW MW basket	14.5	6.5	19.6	17.0	75.0
2 kW MW basket	13.4	7.0	21.4	17.0	67.0
1 kW MW vacuum	15.8	6.4	17.0	19.0	82.0

<sup>1</sup>Data are expressed as mean  $\pm$  S.D. (n = 3).

## 肆、結論

本研究的核心在於探討微波乾燥對發芽糙米的乾燥特性和品質屬性。1 kg 發芽糙米的水分含量約為 33.5%，以 45°C 冷風乾燥 1 kg 發芽糙米，需 270 min 方使水分含量降至 13.64%，最終溫度約為 35.22°C。而使用 1 kW 和 2 kW 微波攪拌式乾燥機需 36 min 和 18 min，最終溫度約為 46.56°C 及 56.68°C。使用 1 kW 和 2 kW 微波吊籃式乾燥機，則只需 24 min 和 12 min，最終溫度約為 82.0°C 及 102.11°C。同時，使用 1 kW 微波真空乾燥機需 35 min，最終溫度約為 44.8°C。本實驗顯示了發芽糙米在微波乾燥過程中的時間和水分變化，若微波功率愈大，可大幅縮短乾燥時間，故微波乾燥發芽糙米可以克服熱傳障礙，提高乾燥速率，延長物料保存期限，減少重量，達到省時節能的效果。微

波乾燥適合現代化農業使用，同時也呼應了近年來眾人所關切的 ESG 碳權。不同微波的乾燥方式會影響食味值的分數，考慮到乾燥效率，發芽糙米乾燥中的溫度變化和的產品品質，以 1 kW 微波真空乾燥可能是最適合乾燥發芽糙米的微波乾燥處理方式，這項研究可作為微波乾燥發芽糙米的操作參考，具有發芽潛力。

## 誌 謝

感謝農糧署科技計畫 111 農科-11.1.1-糧-Z2(2)「微波複合電磁加熱高壓處理發芽米飯之研究」的經費支持，得以完成碩士論文研究，農糧署東區分署協助食味計的分析，以利實驗的完成。

## 參考文獻

- 吳永培、柯佩怡、許愛娜。2007。米食味模式之建立。臺中區農業改良場研究彙報，94: 1-13。
- 吳念庭、許馨云、陳淑德。2024。浸泡液和超高壓前處理對發芽糙米品質之影響。台灣農業化學與食品科學，62(3): 137-146。
- 洪梅珠。2000。米飯食味品質與澱粉特性間相關之研究。臺中區農業改良場研究彙報，69: 1-11。
- 楊智哲。2020。稻米食味分析介紹。臺南區農業專訊，114: 1-4。
- Ahmed, N., J. Singh, H. Chauhan, P. G. A. Anjum, and H. Kour. 2013. Different drying methods: their applications and recent advances. *Int. J. Food Nutr. Saf.* 4: 34-42.
- Choe, H., J. Sung, J. Lee, and Y. Kim. 2021. Effects of calcium chloride treatment on bioactive compound accumulation and antioxidant capacity in germinated brown rice. *J. Cereal Sci.* 101: 103294.
- Gude, V. G., P. Patil, E. Martinez-Guerra, S. Deng, and N. Nirmalakhandan. 2013. Microwave energy potential for biodiesel production. *Sustain. Chem. Process.* 1: 1-31.
- Khodifad, B. C., and N. K. Dhamsaniya. 2020. Drying of food materials by microwave energy- A review. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 9: 1950-1973.
- Kim, A. N., O. W. Kim, and H. Kim. 2023. A study about factors influencing rice palatability based on changes in sensory and physicochemical properties under different postharvest conditions. *Curr. Res. Food Sci.* 7: 100625.
- Lou, G., M. A. Bhat, X. Tan, Y. Wang, and Y. He. 2023. Research progress on the relationship

- between rice protein content and cooking and eating quality and its influencing factors. *Seed Biol.* 2: 16.
- Nguyen, T. P., and S. Songsermpong. 2022. Microwave processing technology for food safety and quality: A review. *Agric. Nat. Resour.* 56: 57-72.
- Pandey, S., K. R. Lijini, and A. Jayadeep. 2017. Medicinal and health benefits of brown rice. In Manickavasagan, A., C. Santhakumar and N. Venkatachalapathy (eds.), "Brown Rice" pp. 111-122. Springer, New York, USA.
- Sandulachi, E. 2012. Water activity concept and its role in food preservation. *Meridian Ing.* 4: 40-48.
- Shao, Z., Y. Song, Y. Hong, S. Tao, J. Sun, C. Liu, Z. Wu and L. Cao. 2023. The extension of vacuum microwave drying time improved the physicochemical properties, in vitro digestibility and antioxidant activity of brown rice flour. *LWT* 184: 115023.
- Shen, L., M. Gao, Y. Zhu, C. Liu, L. Wang, M. Kamruzzaman, C. Liu, and X. Zheng. 2021. Microwave drying of germinated brown rice: Correlation of drying characteristics with the final quality. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 70: 102673.
- Tapia, M. S., S. M. Alzamora, and J. Chirife. 2020. Effects of water activity (aw) on microbial stability as a hurdle in food preservation. In Barbosa-Cánovas, W G. V., A. J. Fontana Jr., S. J. Schmidt, and T. P. Labuza (Eds.) "Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications" pp. 323-355. Wiley-Blackwell, New Jersey, USA.
- Wu, F., N. Yang, A. Touré, Z. Jin, and X. Xu. 2013. Germinated brown rice and its role in human health. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 53: 451-463.
- Wu, N. N., R. Li, Z. J. Li, and B. Tan. 2022. Effect of germination in the form of paddy rice and brown rice on their phytic acid, GABA,  $\gamma$ -oryzanol, phenolics, flavonoids and antioxidant capacity. *Food Re. Int.* 159: 111603.

113年 5月 31日 投稿

113年 9月 20日 接受