

香菇微波冷凝乾燥系統研究

黃禮棟¹ 林建志² 邱相文^{2,*}

摘要

黃禮棟、林建志、邱相文。2015。香菇微波冷凝乾燥系統研究。台灣農業研究 64(3):196–203。

本研究目的旨在研發一套以時序控制之香菇微波冷凝乾燥系統。利用香菇乾燥特性，配合熱風、微波與冷凝等不同的乾燥方式，在不同的乾燥階段給予不同的乾燥條件，以確保乾燥品質並節省香菇乾燥時間與成本。以本研究開發之微波冷凝乾燥設備進行香菇乾燥試驗，並以香菇之溼基含水率 13% 為目標值。若欲達到此目標含水率，則熱風乾燥溫度設定 50°C 時，需作用 24 h，使用電能 89.8 度；加入時序控制後，四段式熱風乾燥須 20 h，消耗電能 74.9 度；若在與熱風乾燥相同操作條件下配合微波技術，則只需 7 h，使用能源為 28.5 度；如果同時使用微波與冷凝技術，亦只需 7 h，使用能源為 78 度。依據試驗結果得知，本計畫所研發具備時序控制功能之微波冷凝乾燥設備，可根據不同乾燥階段，改變乾燥策略，有效控制乾燥品質並節省人力；而微波乾燥比熱風乾燥可節省 7 成以上之乾燥時間。

關鍵詞：香菇、微波、乾燥。

前言

農產品收穫後在貯藏的過程中，常常因為微生物作用、酵素反應、成熟作用或生理病害等，導致農產品變質、腐爛或發霉，使農產品品質下降甚至於不堪食用，造成經濟損失。乾燥的目的在於降低農產品內的含水率，進而抑制微生物及酵素的作用，提高食品貯藏性，並減少農產品重量以增加運輸性。故經過乾燥後的農產品能增加儲藏期限以及運輸的便利性。

進行農產品乾燥時，溫度之控制是影響品質的主要因素之一，香菇對於溫度非常敏感，當乾燥溫度過高時，表面容易變黑 (Argyropoulos *et al.* 2008)。Komanowsky *et al.* (1970) 也提到若乾燥溫度在 83°C 以上時會破壞香菇品質。香菇為我國重要食用真菌類作物，由於鮮香菇含有破壞維生素的酵素，在室溫下品質衰退甚快。因此，乾燥香菇可以保有更多的營養成分，延長保存期限與維持良好品質。Song

(1993) 及 Du (1989) 指出，烘乾後之香菇含水率以 13% 為最佳。

在香菇乾燥過程中，一般菇農大都依照傳統方法或本身經驗來乾燥香菇。其乾燥方式如台中市霧峰區趙姓農友將香菇置於乾燥箱中，以常溫通風 2 h，然後用 40°C 烘 8 h，接著用 50°C 再烘 8 h，最後用 60°C 烘乾，共約 20 多小時；而台中市中興嶺菇農則視香菇之情況，先做剪菇柄、分級、淋洗及稍晾曬瀝乾表面等處理，接著就以 60°C 烘乾，約需 15 h；亦有菇農以 50、60、70 及 85°C 各乾燥 3 h 而烘乾者 (Lin 1988)。Lin *et al.* (2010) 也以平行強制送風的方式，以熱風乾燥方式對香菇進行四階段式之乾燥，第一階段為 50°C、第二階段為 55°C 及第三階段為 65°C 各 6 h，最後以 70°C 烘至含水率 13% 以下，共計約 20 h。從以上之資料顯示，無論選用何種乾燥方式，乾燥時間均須 18–24 h，除此之外為了兼顧品質，常需要多段式乾燥處

投稿日期：2014 年 8 月 8 日；接受日期：2015 年 1 月 28 日。

* 通訊作者：chiusw@tari.gov.tw

¹ 農委會農業試驗所農業工程組研究員。台灣 台中市。

² 農委會農業試驗所農業工程組助理研究員。台灣 台中市。

理，造成香菇乾燥成本與人力需求無法降低。

Lai *et al.* (1995) 嘗試以紅外線作為乾燥能源之可行性，雖所需乾燥時間為傳統燃燒燃料乾燥法之 1/3，但所需電費昂貴是該法最大之缺點。微波乾燥是一種能夠迅速的傳熱與傳質的方式，可保持低溫並且快速乾燥產品，結合熱風乾燥將可以大幅減少乾燥時間，優化能源效率和提高產品品質 (Argyropoulos *et al.* 2008)。Drouzas & Schubert (1996) 與 Erle & Schubert (2001) 研究指出，如果能提供合適的控制系統，微波技術可提供高品質的產品、減少營養損失、保留香氣、不變色和自然的外觀。Yonsawatdigul & Gunasekaran (1996) 與 Mujumdar & Law (2010) 利用微波進行試驗，其結果發現使用微波能減少乾燥時間將有益於顏色，多孔性，香氣，收縮及復水程度。Lombraña *et al.* (2010) 研究微波乾燥，以 240 W 火力並行 30 mm Hg 真空方式，溫度維持在 50°C 對磨菇進行微波乾燥，與一般熱風乾燥方式相比較，獲得較佳的品質。

微波技術也常應用於食品加工，Wu (2007) 將微波技術應用於咖啡乾燥，結果發現微波功率越高與咖啡豆研磨的越細，乾燥速率越快，越能達到節能減碳的效果。Varith *et al.* (2007) 將微波技術應用在龍眼乾燥，研究將龍眼乾燥過程分成兩個階段，第一階段使用 40°C 熱風配合 450 W 的微波作用 1.7 h，第二階段為 60°C 熱風配合 300 W 的微波作用 3.3 h，可以得到龍眼最佳的乾燥效率。若是與 65°C 的熱風乾燥比較，使用微波的乾燥過程大約減少 64.3% 的乾燥時間與 48.2% 的能源消耗。Sharma & Prasad (2001) 研究發現微波技術可以節省乾燥大蒜所需時間，並維持較佳的產品品質。Wang *et al.* (2004) 將微波技術應用在馬鈴薯乾燥，試驗發現當微波功率越強馬鈴薯質量損失越少、乾燥樣本的切片厚度越薄、脫水率 (dehydration rate) 增加以及減少消耗能源等優點。

本研究的目的為利用微波特性應用於香菇的乾燥作業，結合冷凝技術，發展一套可資利用之加工技術與機械設備，應用於國內香菇之乾燥加工與產品之調製，以期能利用微波乾燥

的優點特性來提升香菇乾燥品質，並提升乾燥速率，減少乾燥時間而達到降低生產成本與提高品質的目標。

材料與方法

微波冷凝乾燥系統之開發

微波冷凝乾燥系統主要分成乾燥艙、加熱器、冷凝器、微波發射器、拖盤轉速控制馬達與送風機等 5 個部分。乾燥艙內容積為 440 L，可承受 2 kgf cm⁻² 壓力，其內部有一托盤轉速馬達，馬達轉軸上有一簡單支架用於承載拖盤 (乾燥盤) 用，並利用頻率的方式控制其轉速，頻率越高轉速越快，上限為 60 Hz。乾燥艙上方加裝兩組微波發射器 (分別稱為微波發射器 A 及微波發射器 B)，兩組微波發射器係利用可程式控制系統進行微波輸出功率 (0–100% 調整) 與發射時間之可程式化調整控制。每組微波發射器功率為 1 kW，頻率為 2,450 MHz；機體後方裝置 1 組三相 220 V、功率 13 kW 之冷凝乾燥系統，機體內部有加熱器、冷凝器 (壓縮機功率為 4 kW) 及送風機 (風速範圍：0–60 m s⁻¹)。圖 1 為微波冷凝乾燥系統示意圖，開始時由加熱器產生乾的熱空氣，經由下通風管導入乾燥艙內，進行農產品乾燥作業。之後透過上通風管將濕的冷空氣帶出乾燥艙外並進入冷凝器內，利用冷凝的作用將空氣中含水率降低，使空氣變成乾的冷空氣，再輸送至加熱器內加溫使空氣變成乾的熱空氣進行循環。

微波冷凝乾燥系統自動控制程式之開發

本機之農產品乾燥屬於長時間多段式處理，為便於操作，本研究開發一套配合本設備之自動控制軟體，利用觸控式平板電腦開發人機介面。圖 2 為本研究所開發之微波冷凝乾燥系統人機介面，配合 PLC 以控制本設備其他重要元件，控制項目分成微波發射器 A、微波發射器 B、冷凝系統、熱風溫度、風速以及托盤轉速等 6 項。圖 3 為微波冷凝乾燥系統之自動控制配電盤，左上方有一開關可控制外部電源是否流入電源供應器內並作過負載保護，電源供應器提供控制系統穩定電流使系統能正常作用；右上方有 2 組微波產生器用於產生微波

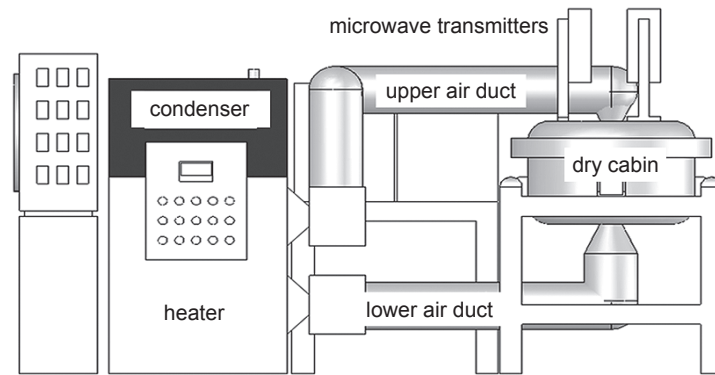


圖 1. 微波冷凝乾燥系統示意圖。

Fig. 1. Schematic diagram of the microwave condensation drying system.



圖 2. 微波冷凝乾燥系統人機介面。

Fig. 2. The man-machine interface of the microwave condensation drying system.

並控制微波功率，PLC 以 Sequential Function Chart (SFC) 方式撰寫程式控制各元件啟動與作用的時間，配合繼電器即可控制其他元件作動。

微波冷凝乾燥系統之功能測試

微波功率分布試驗：微波能源效率試驗，係為了測試乾燥艙內微波功率吸收效率與分布情形。試驗前在乾燥艙內擺放 38 個塑膠容器，每個盛裝溫度 26°C 之清水 500 mL，並依序編號，其擺放情形如圖 4 所示。本試驗利用 100% 微波功率，作用時間 10 min 對水進行加熱，計算各部位所吸收的熱量，尋找乾燥艙內各點微波吸收功率的情形，並用於評估本乾燥系統之能源效率。

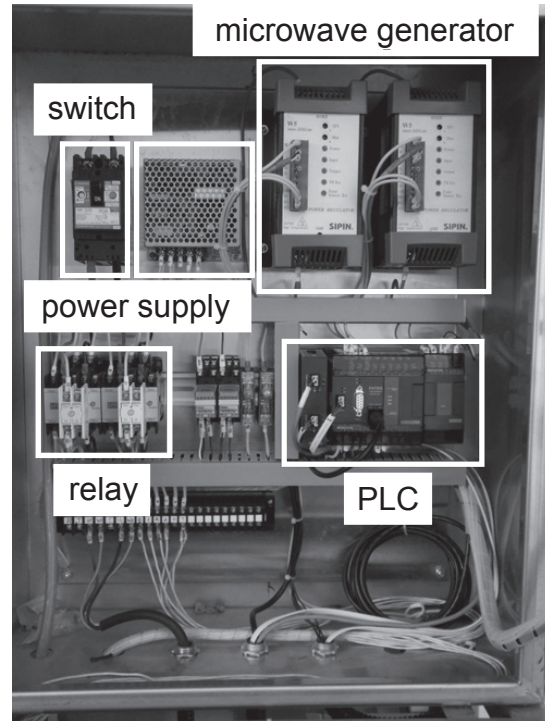


圖 3. 微波冷凝乾燥系統之自動控制配電盤。

Fig. 3. The automatic control switchboard of the microwave condensation drying system.

香菇乾燥試驗：本試驗香菇含水率係以 Denver Instrument 之 Denver IR120 moisture balance 測定，該儀器溫度設定範圍為 40–120°C，可承載最大重量 120 g，含水率精度為 0.01%。量測含水率時乾燥香菇溫度設定為 105°C，儀



圖 4. 乾燥艙內容器擺放情形。

Fig. 4. Containers in the drying chamber.

器每 5 min 會自動記錄數據，直至含水率 (或重量) 恆定為止。

利用 4 種不同乾燥模式對香菇進行乾燥試驗，每次試驗之前對香菇進行淋洗與瀝乾等前處理，完成後以每批次 6 kg 之新鮮香菇平鋪在托盤上進行乾燥試驗。本試驗之乾燥模式分別為定溫熱風乾燥 (熱風溫度設定為 50°C)、四段式熱風乾燥、微波乾燥 (發射微波 10 min 後停止 50 min 之週期循環) 以及微波冷凝乾燥 (發射微波 10 min 後停止，繼之以冷凝 50 min 之循環週期)。試驗中設定之風速為 50 m s⁻¹，完成乾燥之香菇含水率設定為 13%，試驗時一併記錄香菇乾燥至 13% 所需的時間。

四段式熱風乾燥係利用開發之時序控制程式進行階段性自動控制，其控制策略為第一階段以 50°C 熱風乾燥 6 h，第二階段 55°C 熱風乾燥 6 h，第三階段 65°C 熱風乾燥 6 h，第四階段 70°C 熱風乾燥至含水率降至 13%。

熱風微波乾燥法係在乾燥過程中，每 1 h 內發射 2 kW 微波功率加熱 10 min 後停止 50 min，而熱風全程供給之模式持續進行，直至香菇含水率降至 13% 為止。於最初加熱之 10 min，菇體因飽含水分 (90% 左右)，依每次 6 kg 鮮菇及微波發射器效率 86% 推估菇體溫度約略上升 45°C。

微波冷凝乾燥係發射微波加熱 10 min 後停止微波，繼而開啟冷凝設備 50 min 以除去

乾燥過程蒸發之水分，以如此方式循環直至乾燥完成。

消耗功率與成本：表 1 為乾燥系統之各種乾燥設備消耗功率表，利用表各設備之消耗功率數據、試驗過程中量測數據以及香菇乾燥試驗時間及結果，可得到各種乾燥處理過程消耗之電能，配合台灣電力公司所公布之每度電電費，即可計算各種乾燥過程之乾燥成本。

表 1. 各乾燥設備消耗功率表。

Table 1. Power consumption of each device.

Device	Power (kW)
Hot air heater	3.00
Condenser	5.32
Tray motor	0.75
Microwave heater	1.00

結果與討論

微波冷凝乾燥系統自動控制程式之開發

圖 3 所示為微波冷凝乾燥系統之自動控制配電盤。本設備係利用工業用平板電腦配合 PLC 將控制指令傳送至各作動元件，進行加熱器溫度控制、冷凝器作動、微波發射器功率調整以及托盤轉速控制等。除此之外，尚具備時序控制功能，也就是階段性控制功能，便於進行多階段性的乾燥試驗。

圖 2 為本研究開發之人機介面，主要控制元件有微波發射器 A、微波發射器 B、冷凝、熱風控制以及托盤轉速等 5 項 (真空泵為預留選項，目前無作用)。其中觸控項目之微波發射器 A 及 B 之功能相同，僅控制微波發射功率大小、作用時間以及每小時作動頻率；冷凝觸控可啟動冷凝降溫除濕系統，將乾燥後濕熱空氣降溫，以將空氣中水分冷凝排出系統外；熱風控制為控制乾燥艙內溫度及風速。程式內設有保護機制，即當熱風開啟時，無法啟動冷凝功能 (但可以強制解除此功能)；托盤轉速觸控選項可調整乾燥艙內托盤之轉速。

本系統可依使用者需求，控制各乾燥階段所需的乾燥條件，圖 5 為四階段式時序控制

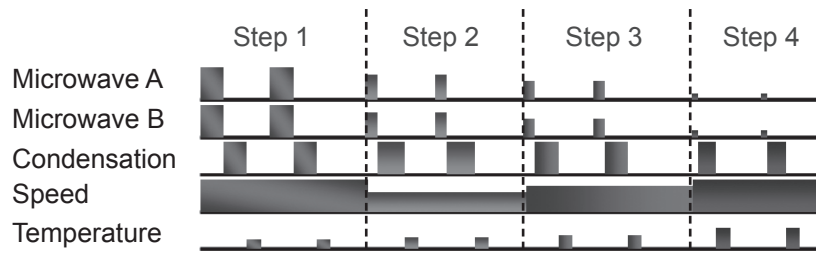


圖 5. 四階段式時序控制示意圖。

Fig. 5. The schematic diagram of the four-stage timing control.

示意圖，X 軸為時間，Y 軸為各元件使用功率大小。乾燥過程中使用者可以根據農產品的特性，擬定乾燥策略，在不同的時間點給予不同的乾燥條件，並對各作動元件下達命令控制其作動與否。

微波功率分布試驗

在乾燥艙內放置 38 個可微波之保鮮盒盛水 500 mL 水溫為 26°C，同時打開微波發射器 A 及 B，以全功率發射 10 min，量測結果中間區域之保鮮盒比周圍溫度平均高出 3.4°C，換算成熱量為 38.48 kcal h⁻¹，也就是說乾燥艙中間接收的功率比兩旁高出 38.48 kcal h⁻¹；另計算 38 個保鮮盒內水吸收的熱量，換算成系統微波加熱效率約為 86%。

香菇乾燥試驗

本試驗使用之香菇含水率平均在 92% 左右，對照組之熱風乾燥條件為熱風溫度 50°C，風速 50 m s⁻¹，使香菇含水率降至 13%。在相同的風速條件下分別以四段式熱風乾燥、熱風微波乾燥、熱風微波冷凝乾燥進行比較，其結果顯示於圖 6，其中 X 軸為時間 (h)，Y 軸為香菇含水率 (%)，圖 6 中各時間點之上圖為菇傘、下圖為菇柄之各處理含水率。由圖 6 可知，菇柄含水率皆高於菇傘含水率，代表菇柄較菇傘不易乾燥。

依據圖 6 得知，以熱風乾燥之香菇在 24 h 後含水率降至 13%；以 4 段式熱風乾燥之香菇在 20 h 後含水率降至 13%；以熱風微波乾燥以及熱風微波冷凝乾燥之香菇在 7 h 後即使含水率降至 13% 以下。圖 7 為各方式乾燥後之香菇情形，其品質是由菇傘與菇柄顏色作為判

斷標準，以黃褐色品質為佳。由圖可知，熱風乾燥與四段式熱風乾燥的香菇品質較佳，其次為熱風微波冷凝乾燥，熱風微波乾燥之香菇品質最差。

使用能源與成本

消耗能源係依據香菇乾燥試驗後所得結果，配合表 1 各設備之消耗功率與乾燥時間計算所得。當香菇含水率降至 13% 時，熱風乾燥需要 24 h，消耗電能為電熱管與托盤馬達之功率和 3.746 kW 乘以使用時間 24 h 之積，即 89.8 度，所需成本為新台幣 88.6 元 kg⁻¹；四段式熱風乾燥需要 20 h，使用電熱管與托盤馬達之功率和為 3.746 kW，故消耗能源 74.92 度，所需成本約為新台幣 73.9 元 kg⁻¹；熱風微波乾燥需要 7 h，消耗能源 28.5 度，所需成本約為新台幣 28.1 元 kg⁻¹；熱風、微波及冷凝同時作用乾燥需要 7 h，消耗能源 78.0 度，所需成本約為新台幣 77.0 元 kg⁻¹。表 2 列出各處理過程的作用時間、消耗功率與成本分析結果。電費是以營業用電夏月最高單價新台幣 5.92 元度⁻¹ (kWh) 及每 kg 鮮香菇重作為計算基準。

結論

微波加熱為利用微波場使極性分子之偶極距隨著電磁場的高速振動而快速旋轉，造成分子摩擦而產生熱能被分子吸收的快速升溫，係直接以輻射方式傳遞微波能量而不必經過對流傳導過程。不僅可快速加熱，同時也可減少因傳導所導致的能量損失，因此相較於傳統加熱法，微波加熱法可以明顯大幅地縮短反應時間。利用微波加熱原理應用於農產品乾燥不但

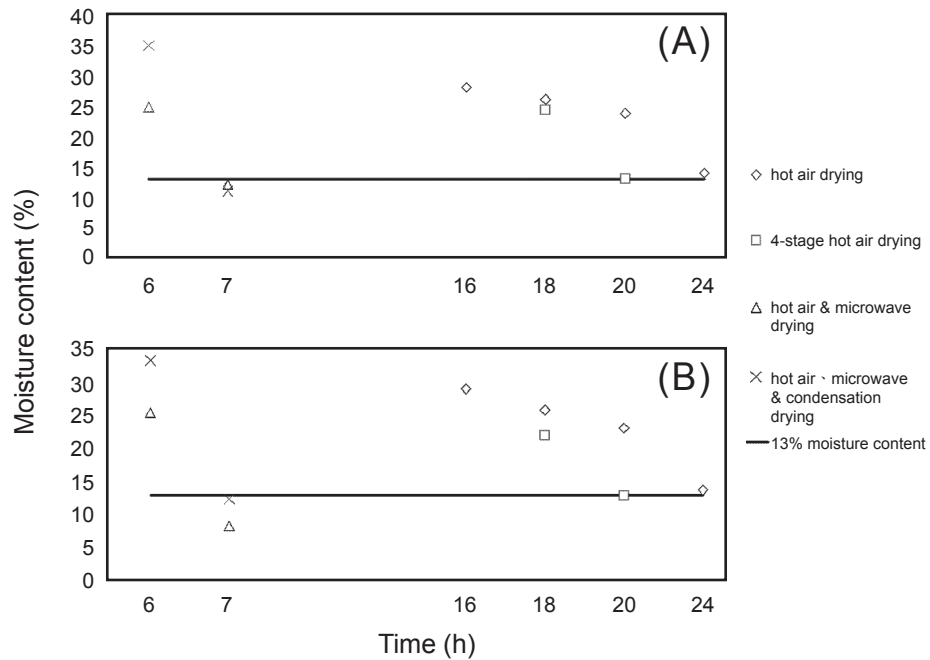


圖 6. 各乾燥過程含水率由約 35% 降至 13% 所需時間。(A) 菇傘；(B) 菇柄。

Fig. 6. Time required of each drying process from around 35% to 13% moisture content. (A) Mushroom cap; (B) Mushroom stem.

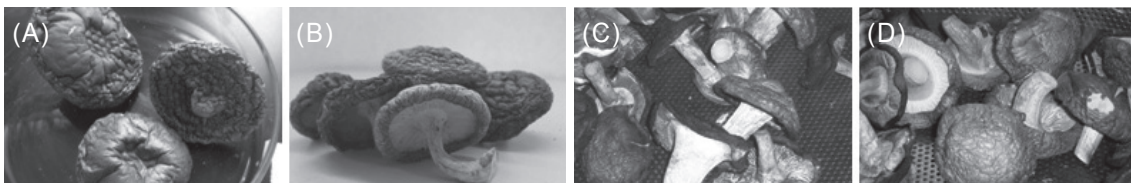


圖 7. 乾燥後香菇。(A) 熱風乾燥；(B) 四段式熱風乾燥；(C) 熱風微波乾燥；(D) 熱風微波冷凝乾燥。

Fig. 7. The dried shiitake mushroom appearance: (A) Hot air drying; (B) Four-stage hot air drying; (C) Hot air microwave drying; and (D) Hot air microwave condensation drying.

表 2. 各處理過程的作用時間、消耗能源與成本。

Table 2. Time, energy and unit cost of different drying method.

Drying method	Time (h)	Energy (kWh)	Unit cost (NT kg ⁻¹)
Hot air drying	24	89.8	88.6
Four-stage hot air drying	20	74.9	73.9
Hot air microwave drying	7	28.5	28.1
Hot air microwave condensation drying	7	78.0	77.0

可縮短反應時間，達到節省能源的目的，通常也可將產率提高、減少副產物、並降低傳統加熱法對環境所產生的衝擊，因此微波技術為一

種結合高速率、高產率、高選擇性及綠色能源的新科技應用領域。由於傳統香菇乾燥方式耗費過多加熱時程，造成國產香菇調製成本居高

不下，造成強大的進口香菇競爭壓力。因此，本研究開發成果的揭露，可適時為國內香菇乾燥加工提供一項新的利器。

本所研發之微波冷凝乾燥設備，具備時序控制功能，可根據不同乾燥期程，設定乾燥參數，以 PT-100 溫度感測器量測乾燥艙出風口溫度，以得到即時艙內溫度，有效控管品質並節省人力。乾燥艙整體微波吸收功率約為 86%，中間部分吸收之功率比兩旁高出 38.48 kcal h⁻¹，使得中間部分之香菇比兩旁容易焦黑(過度乾燥)。

香菇乾燥試驗中發現，微波乾燥比熱風乾燥節省 7 成以上之作業時間及降低 7 成成本左右，然而乾燥品質較差，其原因為微波乾燥較熱風乾燥難以控制乾燥溫度，常使香菇過度乾燥，導致部分香菇品質下降。以研究乾燥各階段微波作用時間及停止時間長短與比例之試驗以得到最佳乾燥品質之模式將為下一步研究目標。利用於其他高單價農產品，如冬蟲夏草菌絲體、紅花、薑黃等中草藥之乾燥調製，為此乾燥機之重要研究應用標的。

誌謝

本計畫由行政院農業委員會農業試驗所 2011–2013 年度科技計畫經費支持，謹致謝忱。

引用文獻

- Argyropoulos, D., A. Heindl, and J. Müller. 2008. Evaluation of processing parameters for hot-air drying to obtain high quality dried mushrooms in the Mediterranean region. <http://www.tropentag.de/2008/abstracts/full/355.pdf> (visit on 3/18/2014)
- Drouzas, A. E. and H. Schubert. 1996. Microwave application in vacuum drying of fruits. *J. Food Eng.* 28:203–209.
- Du, Z. J. 1989. *Edible Mushroom Cultivation Techniques*. 6th ed. Harvest Farm. Taipei. 183 pp. (in Chinese)
- Erle, U. and H. Schubert. 2001. Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries. *J. Food Eng.* 49:193–199.
- Komanowsky, M., F. B. Talley, and R. K. Eskew. 1970. Air drying of cultivated mushrooms. *Food Technol.* 24:1020–1024.
- Lai, C. C., T. H. Chou, and L. S. Liang. 1995. Infrared drying of Shiitake mushroom and the development of a data acquisition and control system. *J. Agric. Res. China* 44:464–469. (in Chinese with English abstract)
- Lin, S. Y. 1988. Studies on the Characteristics of Taste-Active Components in Shiitake Mushroom and the Powderization of Its Concentrate. Master thesis, Department of Food Science and Biotechnology, National Chung Hsing University. Taichung, Taiwan. 65 pp. (in Chinese with English abstract)
- Lin, W. L., S. A. Yang, and C. H. Hung. 2010. The effect of different storage temperature and days on the color and quality of dried shiitake. *Fung. Sci.* 25:33–47.
- Lombraña, J. I., R. Rodríguez, and U. Ruiz. 2010. Microwave-drying of sliced mushroom. Analysis of temperature control and pressure. *Innov. Food Sci. Emerg.* 11:652–660.
- Mujumdar, A. S. and C. L. Law. 2010. Drying technology: Trends and applications in postharvest processing. *Food Bioprocess Technol.* 3:843–852.
- Sharma, G. P. and S. Prasad. 2001. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *J. Food Eng.* 50:99–105.
- Song, S. F. 1993. Sawdust Plastic Bag Mushroom Cultivation. Council of Agriculture & Taiwan Provincial Agriculture and Forestry Department. Taichung, Taiwan. 39 pp. (in Chinese)
- Varith, J., P. Dijknarakul, A. Achariyaviriya, and S. Achariyaviriya. 2007. Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *J. Food Eng.* 81:459–468.
- Wang, J., Y. S. Xiong, and Y. Yu. 2004. Microwave drying characteristics of potato and the effect of different microwave powers on the dried quality of potato. *Eur. Food Res. Technol.* 219:500–506.
- Wu, W. W. 2007. Study of Coffee Drying by Microwave Method. Master thesis, Department of Chemical Engineering, Feng Chia University. Taichung, Taiwan. 94 pp. (in Chinese with English abstract)
- Yonsawatdigul, J. and S. Gunasekaran. 1996. Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation. *J. Food Process. Preserv.* 20:145–156.

A Study on Microwave Condensation Drying of Shiitake Mushroom

Li-Duhng Huarng¹, Jian-Jhih Lin², and Hsiang-Wen Chiu^{2,*}

Abstract

Huarng, L. D., J. J. Lin, and H. W. Chiu. 2015. A study on microwave condensation drying of shiitake mushroom. *J. Taiwan Agric. Res.* 64(3):196–203.

The purpose of this study was to establish a sequence controlled microwave condensation drying system for shiitake mushroom drying. The utilization of hot air, microwave and/or condensation drying method in different drying periods coordinated with the drying characteristics of the shiitake mushroom will ensure the drying quality of the product as well as time saving and cost. The drying experiment of the microwave condensation dryer with only the hot air set at 50°C took 24 h to bring moisture level down to 13% and consumed 89.8 kWh electric power. If the sequence control was implemented, the four-stage hot air drying took 20 h to dry the shiitake mushroom to 13% moisture content and consumed 74.9 kWh electric power. If the hot air was set at 50°C with the microwave, the drying time was reduced to 7 h and consumed 28.5 kWh electric power. If the 50°C hot air accompanied by microwave and condensation, the drying time was 7 h but the electric energy consumption was 74.9 kWh. The experiment showed that the sequence controlled microwave condensation dryer developed in the research could adjust shiitake mushroom drying strategy in different drying periods to maintain the product quality and save the labor cost and drying time up to 70%.

Key words: Shiitake mushroom, Microwave, Drying.

Received: August 8, 2014; Accepted: January 28, 2015.

* Corresponding author, e-mail: chiusw@tari.gov.tw

¹ Research Fellow, Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

² Assistant Research Fellows, Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.