

## 熱泵冷凝乾燥應用研究

黃禮棟<sup>1</sup> 林建志<sup>2,\*</sup> 邱相文<sup>2</sup> 蔡致榮<sup>3</sup>

### 摘要

黃禮棟、林建志、邱相文、蔡致榮。2015。熱泵冷凝乾燥應用研究。台灣農業研究 64(3):189–195。

國際能源價格持續上漲聲中，節能及提升能源效率已成為焦點。熱泵吸取空氣中或水體中的熱能，經過 vapor-compression refrigeration cycle 之蒸發、壓縮、冷凝及膨脹等過程，將熱能由較低處移往較高處，效率高又節能。因此，使用熱泵取代柴油或瓦斯以節省能源支出，已使熱泵成為熱門之工具。熱泵系統運轉時同步產生冷氣及熱氣，因此其能源效率極高，依介質區分型式為空氣對水與水對水 2 種，本研究使用水對水熱泵系統。利用其產生之熱氣乾燥農產品及冷氣凝結乾燥過程中產生的水蒸氣，此乾燥方式可使農產品呈現良好色澤，除了提升乾燥農產品品質外，也提升能源利用效率，為節能減碳的有效利用方式。本所設置完成之熱泵系統冷凝乾燥機，經熱交換器交換後之乾燥熱風溫度可達 65°C，冷水溫度達到 12°C，總能源效率 (COP) 值達到 3.6 以上。

**關鍵詞：**熱泵、冷凝乾燥、能源效率。

### 前言

台灣能源 96% 必須仰賴進口，在今日氣候變遷劇烈及石化能源日益枯竭致使燃油價格高漲之情形下，原以燃料油、柴油等做為冬季加溫燃料及乾燥用能源之成本也越來越高。於是，各種節能技術逐一被運用，以提高能源利用效率、降低生產成本兼顧溫室氣體二氧化碳排放減量目的，保護地球環境與生態，而俱高效節能功效之熱泵應用遂成為再生能源中一個重要的研究領域。熱泵 (heat pump; HP) 之作用原理為熱力學之蒸氣壓縮冷凍循環，由壓縮機、冷凝器、膨脹閥與蒸發器等 4 個主要元件以管路連接組成，以冷媒為傳導介質，以產生移動熱能的作用。其原理為藉由輸入電能驅動壓縮機，經環路中冷媒之吸熱、放熱作用，熱能在蒸發器處被吸收，而後於冷凝器處被排出收集，形成移動熱能的效果，達成製冷、製熱

目的。經熱交換後之冷、熱氣經風管輸送，可應用於溫室、住家等的加溫或降溫，除節省能源費用支出之外，更因在沒有燃燒的情況下運轉，不會產生二氧化碳及製造多餘廢熱，具有節能、無汙染且運轉費用低之特點。熱泵應用在同時需要冷氣 (或是冷水) 與暖氣 (或是熱水) 的地方，其節能效應更為可觀，像是旅館、飯店、理髮美容、SPA 業者、養殖業、農業、食品加工等，當同時使用冷氣與暖氣時，其總能源效率 (COP) 值可高達 9–11 (Fang 2010)。

農產品乾燥後可延長保存期限並紓解盛產期滯銷與價格暴跌問題，故長期以來業者及農政單位持續研究改進乾燥方法，以期除了乾燥的基本功能外，並能保存農產品的風味、產生良好色澤而又節省能源。冷凝乾燥系統利用到加熱及冷凝兩個子系統，乾燥之農產品除了呈現優良色澤外也因乾燥筒較為封閉，對香氣保

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

\* 通訊作者：linjianjih@tari.gov.tw

<sup>1</sup> 農委會農業試驗所農業工程組研究員。台灣 台中市。

<sup>2</sup> 農委會農業試驗所農業工程組助理研究員。台灣 台中市。

<sup>3</sup> 農委會農業試驗所研究員兼副所長。台灣 台中市。

存十分良好，為目前最佳的乾燥方法之一。Colak & Hepbasli (2009a, 2009b) 研究指出熱泵乾燥系統 (heat pump drying; HPD) 已經行之有年，發展出許多不同種類的 HPD，可以配合各種不同的乾燥產品特性，尤其是熱敏感度高的產品，選擇適合的 HPD 進行乾燥，常應用在乾燥蔬菜、水果以及生物材料上。HPD 不會對環境排放氣體或是廢棄物，是一種環保的加工方式，其優點為擁有較高的能源效率與較佳的產品品質 (Perera & Rahman 1997)。Erbay & Icier (2009) 利用 HPD 配合反應曲面法 (response surface methodology; RSM) 以溫度、風速與乾燥時間做為因子，進行橄欖葉乾燥最佳化試驗，試驗結果發現，橄欖葉乾燥試驗最佳化之設定為：溫度  $53.43^{\circ}\text{C}$ ，風速  $0.64\text{ m s}^{-1}$ ，乾燥時間為  $288.32\text{ min}$ 。Prasertsan & Saen-saby (1998) 將 HPD、直接火烤乾燥 (direct-fired dryer) 與電熱加熱乾燥 (electrically-heated hot air dryer) 應用在橡木與香蕉的乾燥，結果發現 HPD 較其他兩者所需的操作費用低。本所研究將熱泵產生之熱氣及冷氣經熱交換器交換後設計應用於冷凝乾燥機並試驗其乾燥農產品之效果，並利用 HIOKI-3197 型電力品質分析儀及電子式溫度計等儀器量測計算其效率值。

## 材料與方法

本研究使用之熱泵冷凝乾燥機 (圖 1) 係由 1 台使用 R134A 環保冷媒及常用工作壓力設定為  $24\text{ bar}$  (最大壓力可達  $30\text{ bar}$ )，可產生最高溫度為  $80^{\circ}\text{C}$  溫熱水之 5 USRT 冰熱雙效 (multi-effect heat pump) 熱泵主機、1 個  $500\text{ L}$  之熱水儲水桶、1 個  $300\text{ L}$  之冷水儲水桶，1 台裝置冷水/冷氣交換器、熱水/熱氣交換器之冷凝乾燥箱體、水閥門、控制電路及冷、熱水管路與馬達等組成。熱泵主機以電壓  $220\text{ V}$  之三相電輸入電能推動，當啟動後，將熱水桶之水漸漸加熱至預定溫度，一般乾燥使用時由實際使用經驗得知，只需待熱水桶內水溫加熱至高於所需之熱風溫度  $5^{\circ}\text{C}$ ，即可經銅管熱交換器產生所需要之熱風，亦即  $70^{\circ}\text{C}$  熱水經熱交換可產生  $65^{\circ}\text{C}$  之熱風供乾燥用。而熱泵加熱之同時，冷水桶之水溫也隨之漸漸降低，可低至  $12^{\circ}\text{C}$  以下。

為探討無乾燥物狀態下乾燥箱內溫溼度的變化及各點溫度之差異，試驗之前先在乾燥箱內擺放 9 個 MicroLog PRO-EC750 溫溼度感測器 (圖 2，其在  $-30\text{--}90^{\circ}\text{C}$  範圍內之解析度優於  $0.3^{\circ}\text{C}$ ，精確度在  $1^{\circ}\text{C}$  以內)，於調整時間及數據歸零後啟動置入乾燥箱體上層之 4 個角落，

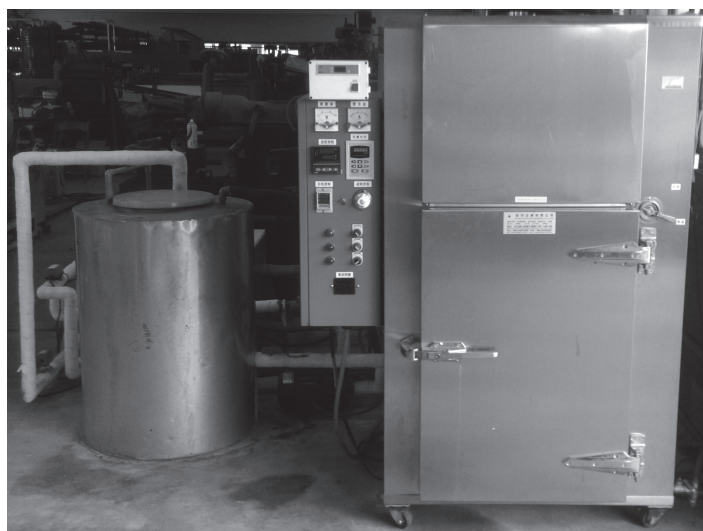


圖 1. 熱泵乾燥系統。

Fig. 1. Heat pump drying system.



圖 2. MicroLog PRO-EC750 及溫度探針。  
Fig. 2. MicroLog PRO-EC750 hygrometer and probe.

中層之中央位置及下層之 4 個角落 (圖 3)。並在控制器上設定其冷熱風之循環方式為加溫達 45°C 後，改為冷風降溫至 40°C，再變為熱風模式之循環。本次試驗進行之冷熱風循環 1 次約需 20 min，共進行 3 次約 70 min。

另一次試驗除了量測各參數如熱水溫度、冷水溫度、用電度數 (係利用圖 4 之 HIOKI-3197 電力品質分析儀進行量測) 等參數與時間之變化以換算為總能源效率之外，也利用鮮香菇及厚度約 3 mm 之山藥片 2 種材料試驗乾燥效果。

2011 年 11 月中，於白天室內最高溫 28°C，夜間最低溫 22°C 條件下，以熱泵冷凝乾燥機進行山藥薄片乾燥試驗。將熱水溫度設定為 55°C，乾燥箱內溫度由 43°C 開始以熱氣循環加溫乾燥，至 52°C 後切換成冷氣循環進行冷凝除溼，待溫度降至 43°C 時再進行熱氣循環。

鮮香菇之含水率一般為 85–90% 之間，本試驗香菇乾燥方式分為 2 種：(1) 2 段式乾燥法，係以 45°C 乾燥 8 h 後，再以 65°C 乾燥 9 h；(2) 3 段式乾燥法，係以 40°C 乾燥 6 h，再以 55°C 乾燥 6 h，最後以 70°C 乾燥 5 h。試驗時將鮮香菇 20 kg 均勻分佈於層架式乾燥盤上，乾燥之冷熱氣循環交換模式設定為：送熱風至乾燥箱使

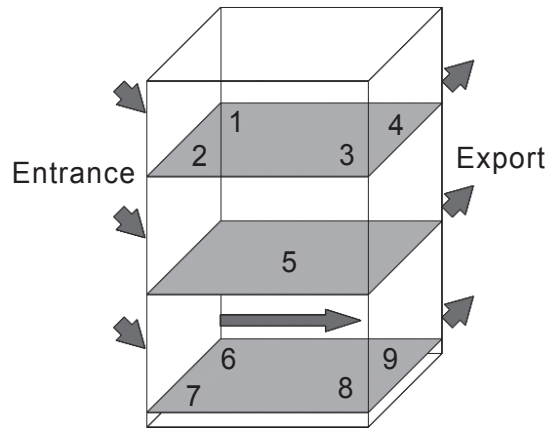


圖 3. 感測器位置示意圖 (面 1、2、6、7 為進風側)。  
Fig. 3. Schematic diagram of hygrometer locations (Planes 1, 2, 6, and 7 are the entrances).



圖 4. HIOKI-3197 電力品質分析儀。  
Fig. 4. HIOKI-3197 power quality analyzer.

箱內空氣達到預定溫度後，轉為送冷風使乾燥箱降溫至設定溫度，降溫過程同時將乾燥產生之水蒸氣凝結成水滴，之後再通熱風乾燥，如此循環至農產品水分達到含水率 13% 為止。

## 結果與討論

以 HIOKI-3197 型電力品質分析儀量測記錄用電情形，在大氣溫度 21–22°C 之條件下量測之 COP 值，在熱水出水溫度為 30–40°C 之範圍時，COP 值為 4.2；40–50°C 之範圍，COP 值為 4.0；50–60°C 之範圍，COP 值為 3.6 (表 1)，其計算方法為將水加熱升溫所需之熱量 (水質量 × 比熱 × 溫差) 與所使用之電能，經公式 (1)、(2) 及 (3) 等計算而得。

表 1. 熱泵效率測試資料。

Table 1. Performance data of heat pump coefficients.

Item	30–40°C		40–50°C		50–60°C	
	Hot water temperature (°C) <sup>z</sup>	Electric power (kW) <sup>y</sup>	Hot water temperature (°C)	Electric power (kW)	Hot water temperature (°C)	Electric power (kW)
Time (min)						
0	34.3	4.12	42.3	4.51	51.4	5.51
15	38.0	4.38	48.3	5.22	56.9	6.31
25	42.3	4.51	51.4	5.51	60.8	6.50
COP	4.2		4.0		3.6	

<sup>z</sup> Ambient temperature: 21–22°C.<sup>y</sup> Power measured with HIOKI-3197 analyzer.

$$\text{COP}_h = (Q + W)/W \quad (1)$$

$$\text{COP}_c = Q/W \quad (2)$$

COP：熱泵之總能源效率

COP<sub>h</sub>：熱泵製熱能源效率COP<sub>c</sub>：熱泵製冷能源效率

Q：水加熱得到之熱能或冷卻移除之熱能

W：熱泵消耗之電能

因此型熱泵應用於冷凝乾燥，所製熱水與冷水均有利用，故此雙效熱泵總能源效率 (COP) 之值可由公式 (1) 與 (2) 之和演算而得，即

$$\text{COP} = \text{COP}_h + \text{COP}_c = 2 \text{COP}_h - 1 \quad (3)$$

由於能源價格攀升，利用熱泵製熱具有更高利因，熱泵之節能效益 (設 COP = 3.6) 與其他熱源之比較經計算後列於表 2 供參考。

圖 5 為空車時乾燥箱內中間層中點溫濕度圖。本次試驗過程熱風冷風循環 3 次，左邊 Y 軸代表溫度 (◆, °C)；右邊 Y 軸代表濕度 (×, %)；X 軸代表時間 (min)；而兩條直線代表本次試驗所設定的溫度範圍。由表 3 所示之各測點溫度資料得知，乾燥箱內各部位溫度的差異不大，可歸因於乾燥箱內內循環風扇產生擾流之助，故可視乾燥箱內為一均溫均濕的環境。當熱泵乾燥機系統升溫時乾燥箱內濕度會下降；反之，當熱泵乾燥機系統降溫時乾燥箱內濕度會上升。茲將同一時間各測點第 1 個熱冷循環之最高溫與最低溫之資料列於表 3 供參考，其中測點 8 之溫度數據顯示離譜 (有些溫度記錄達 90°C)，推測係溫度探針損壞或轉換電路故障導致，故不予採計。

本系統功能測試完成後進行農產品乾燥測試，以熱泵冷凝乾燥機進行山藥薄片乾燥試驗，經 21 h 將 18.6 kg 含水率 75% 厚度 3 mm 之山藥切片乾燥至含水率 6–8%，且品質與市

表 2. 節能效益。

Table 2. Energy saving efficiency<sup>z</sup>.

Energy source	Energy category	Unit price	Heat content	Energy convert efficiency	Heat NT <sup>1</sup>	Heat cost ratio
Electric heat	Electricity	3.6 NT kWh <sup>-1</sup>	860 kcal kWh <sup>-1</sup>	95%	226 kcal NT <sup>1</sup>	3.78
Natural gas	Natural gas	21.1 NT kg <sup>-1</sup>	9,000 kcal m <sup>-3</sup>	90%	384 kcal NT <sup>1</sup>	2.27
Diesel burner	Diesel fuel	33.4 NT kg <sup>-1</sup>	8,800 kcal L <sup>-1</sup>	85%	224 kcal NT <sup>1</sup>	3.82
Oil burner	Fuel oil	23.5 NT L <sup>-1</sup>	9,200 kcal L <sup>-1</sup>	85%	333 kcal NT <sup>1</sup>	2.57
Heat pump	Electricity	3.6 NT kWh <sup>-1</sup>	3,098 kcal kWh <sup>-1</sup>	100%	856 kcal NT <sup>1</sup>	1.00
(COP = 3.6)	Off-peak electricity	1.8 NT kWh <sup>-1</sup>	3,098 kcal kWh <sup>-1</sup>	100%	1,721 kcal NT <sup>1</sup>	0.50

<sup>z</sup> Data source: Website data of National Petroleum Company Limited and Taiwan Power Company, respectively. Visit on 09/02/2012.

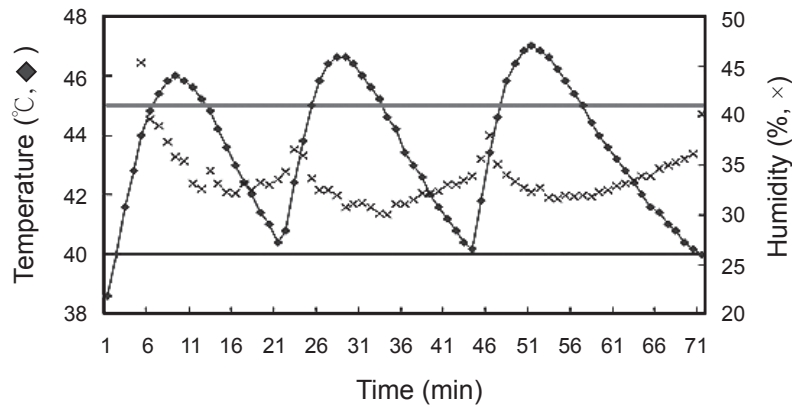


圖 5. 乾燥箱中間層中點 3 次循環溫、濕度變化。

Fig. 5. Temperature and humidity variation in three cycles at mid-point of the drying chamber.

表 3. 第一個循環各測點之最高溫度值及最低溫度值。

Table 3. The highest and lowest temperatures at each position of the 1st cycle.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	sd <sup>z</sup>
Highest temperature (°C)	45.6	45.8	45.8	45.2	46.0	45.0	45.2	-	44.6	0.48
Lowest temperature (°C)	40.4	40.2	40.2	40.4	40.4	40.8	40.4	-	41.0	0.28

<sup>z</sup> sd: standard deviation.

售之山藥類似。圖 6 為乾燥之香菇，含水率約為 11–14%，圖中顯示以此乾燥機乾燥之乾菇，無不良之烤焦、過度皺縮等表觀發生。另乾燥產生之水蒸氣經冷風凝結為水滴後匯集於排水槽，可直接排放或以容器收集。

## 結論

本所設置完成之熱泵系統冷凝乾燥機，經熱交換器交換後之乾燥熱風溫度可達 65°C，冷水溫度亦達到 12°C 以下，總能源效率 (COP) 值達到 3.6 以上。一般通熱風乾燥機乾燥香菇，發現乾燥時間不經濟且香味易散失，若改用本系統則可以有效改善香味散失之缺點。利用本系統乾燥之乾菇無不良之烤焦、皺縮過度等表觀發生。另乾燥產生之水蒸氣經冷風凝結為水滴後由排水槽收集，可直接排放或以容器收集。香菇之乾燥方式設定為 2 段式者，以 45°C 乾燥 8 h 後，再以 65°C 乾燥 9 h；香菇之乾燥方式設定為 3 段式時，以 40°C 乾燥 6 h，



圖 6. 乾香菇。

Fig. 6. Dried shiitake mushrooms.

再以 55°C 乾燥 6 h，最後以 70°C 乾燥 5 h。結果顯示 2 種乾燥方式之乾菇並無明顯之差別，且均無不良之表觀 (烤焦、皺縮過度等) 發生。本乾燥機因為組成零組件較多及需要配管空間等，需要相當面積與空間安裝設置。因熱泵冷凝乾燥機具有良好能源利用效果與乾燥產品品質，若能以較大容量之熱泵應用於個別控制之

並聯乾燥機箱上並依不同乾燥農產品加以個別控制，除提升產品品質外也可發揮較佳節能效益。水溫較高時熱泵效率降低，除與熱力學理論吻合外，亦有研究 CO<sub>2</sub> 熱泵者依據其實驗結果擬合出，熱水溫度  $t$  在 65–95°C 之範圍， $COP_h = -0.0325t + 5.632$ 。而加強管路之絕熱披覆材質保溫效果也能降低熱量逸散，得到較佳能源效率。將乾燥箱內之冷、熱氣循環設定為送熱風以乾燥物品，並使箱內空氣上升達到預定溫度後轉換為送冷風以除去乾燥時產生之水蒸氣，並使溫度降低至設定溫度之循環模式，或者將乾燥倉及冷凝倉分開，同時送出熱風至乾燥倉及送冷風至冷凝倉。而乾燥倉之部分熱風，則抽送至冷凝倉除濕後再循環至乾燥倉。此二方法之優劣，為前者所需空間較小，而後者可直接利用冷凝器散熱之熱空氣及蒸發器吸熱後之冷空氣，減少不同介質之交換，但其技術仍待進一步研究探索。

## 引用文獻

- Colak, N. and A. Hepbasli. 2009a. A review of heat pump drying: Part 1- Systems, models, and studies. *Energ. Convers. Manage.* 50:2180–2186.
- Colak, N. and A. Hepbasli. 2009b. A review of heat-pump drying: Part 2- Application and performance assessments. *Energ. Convers. Manage.* 50:2187–2199.
- Erbay, Z. and F. Icier. 2009. Optimization of drying of olive leaves in a pilot-scale heat pump dryer. *Dry Technol.* 21:416–427.
- Fang, W. 2010. Artificial light with low energy consumption and efficient heat pump technology in agriculture research and development. p.70–76. *in: Proceedings of the Symposium on Agricultural Engineering and Technologies for Saving Energy and Reducing Carbon Emission.* October 27, 2010. Taichung, Taiwan. TARI, Taichung. (in Chinese)
- Perera, C. O. and M. S. Rahman. 1997. Heat pump dehumidifier drying of food. *Trends Food Sci. Tech.* 8:75–79.
- Prasertsan, S. and P. Saen-saby. 1998. Heat pump drying of agricultural materials. *Dry Technol.* 16:235–250.

## A Study on Heat Pump Condensation Drying System

Li-Duhng Huarng<sup>1</sup>, Jian-Jih Lin<sup>2,\*</sup>, Hsiang-Wen Chiu<sup>2</sup>, and Jyh-Rong Tsay<sup>3</sup>

### Abstract

Huarng, L. D., J. J. Lin, H. W. Chiu, and J. R. Tsay. 2015. A study on heat pump condensation drying system. *J. Taiwan Agric. Res.* 64(3):189–195.

As the energy prices continue to hike internationally, energy saving and efficiency improving will become the focal issues. Heat pumps absorb heat in the ambient air or water through the evaporation, compression and expansion process of the Vapor Compression Refrigeration Cycle. It transfers the heat energy in an opposite direction of spontaneous heat flow. The heat pump system is energy efficient and saves a lot of energy. The application of heat pumps has become a hot tool to replace the diesel or gas burner in order to save energy costs effectively. The operation of a heat pump system transfers heat from one place to another. It can provide both heat and cold water simultaneously with proper device. Therefore, it operates with high energy efficiency. According to the source that a heat pump absorbs heat from and the destination it flows heat to, the heat pumps can be categorized into air-water heat pumps and water-water heat pumps. A water-water heat pump system was adopted in this study. The application of its hot air in drying agricultural products and cold air in condensing water vapor generated in the drying process allows agricultural products using this drying method showing good color. In addition to improve the drying quality of agricultural products, it also promotes energy efficiency. It is an effective way to save energy and reduce carbon emission. The heat pump condensing dryer set up in Taiwan Agricultural Research Institute (TARI) can provide 65°C hot air for drying through the heat exchanger and the cold water temperature reaches as low as 12°C. The estimated total energy efficiency of the system (COP) is higher than 3.6.

**Key words:** Heat pump, Condensation drying, Energy efficiency.

---

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

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

<sup>1</sup> Research Fellow, Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

<sup>2</sup> Assistant Research Fellows, Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

<sup>3</sup> Research Fellow and Deputy Director General, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.