

複合熱源烘箱熱效率之研究

黃惟揚¹ 劉天麟^{1,*} 巫嘉昌² 林金池¹

摘要

本研究旨在開發複合熱源烘箱，以瓦斯燃燒熱為主熱源，電熱為控制溫度之熱源，改善電烘箱操作時耗電的問題。測試電烘箱及複合熱源烘箱之耗電量與瓦斯消耗量，設定溫度 90℃ 操作 3 小時，並記錄烘箱內部 24 個位置之溫度，3 重複試驗。結果顯示，電烘箱消耗電量為 6.67 度，上升時間 (Rise time) $T_r = 18$ 分鐘，穩定時間 (Settling time) $T_s = 30$ 分鐘，複合熱源烘箱消耗電量為 3.729 度，瓦斯消耗量為 0.533 公斤，上升時間 (Rise time) $T_r = 13$ 分鐘，穩定時間 (Settling time) $T_s = 18$ 分鐘，可以看出複合熱源烘箱升溫與溫度穩定時的控溫性能較好。由耗電量分析，複合熱源烘箱可減少 44% 的電量。由成本效益評估，複合熱源烘箱可減少 0.6 元的能源 (操作 3 小時之電費與瓦斯費) 費用。臺灣用電逐年增加，但近年政府無增設發電廠，未來將面臨限電危機，複合熱源烘箱的使用可減少用電量，改善部分用電危機。

關鍵字：複合熱源、烘箱、熱效率

前言

將原料除去水分之行為稱為乾燥。乾燥能抑制酵素及微生物的作用，延長食品的保存期限，同時減少重量，便於運輸，也能改善食品的風味。茶葉乾燥除了可去除水分、菁味及雜味，並藉由溫度改善茶湯滋味與顏色，是茶葉精製重要的過程。

現今用於茶葉乾燥的機器有甲種乾燥機與烘箱，甲種乾燥機的主要熱源為柴油或瓦斯，其耗電量為 2,000 – 3,000 瓦，其電能主要是用來驅動鼓風機與履帶運送。40 斤的電烘箱瓦數為 4,000 – 5,000 瓦，80 斤的電烘箱瓦數為 8,000 – 9,000 瓦，其耗電量遠高於甲種乾燥機，原因為烘箱的主要電能轉成熱能。利用熱能的經濟效益計算 (表一)，1 元的電費只能產生 587 千焦耳的熱能，1 元的汽油費能產生 1,529 千焦耳的熱能，1 元的瓦斯費能產生 1,560 千焦耳的熱能，而 1 元的柴油費則能產生 1,865 千焦耳的熱能，1 元的天然氣費能產生 3,163 千焦耳的熱能，故利用天然氣或是柴油做熱源其經濟效益遠比電能佳 (附件 1)。

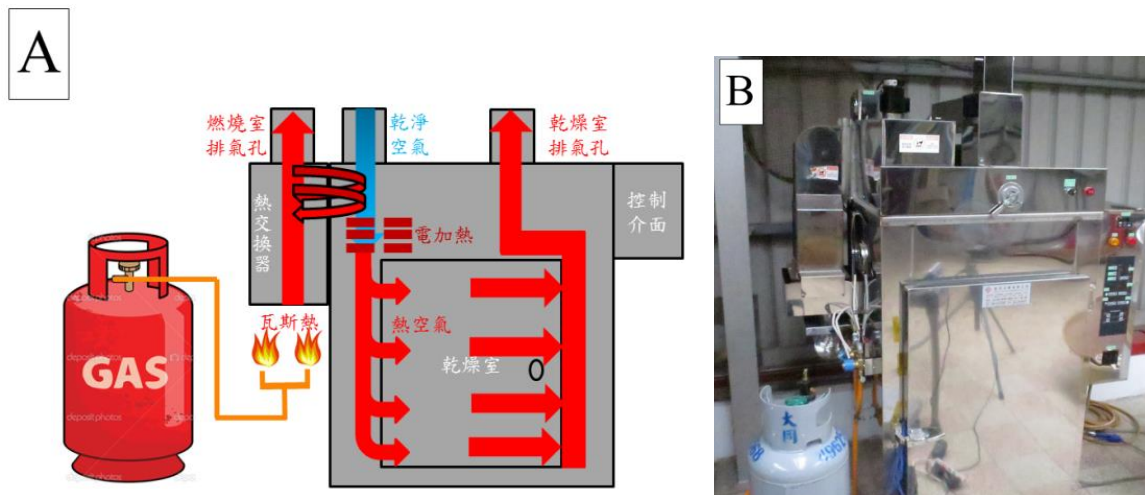
-
1. 行政院農業委員會茶業改良場 助理研究員、副研究員兼茶機課長、研究員兼產服課長。
台灣 桃園市。
 2. 國軍退役役官兵輔導委員會福壽山農場 場長。臺灣 台中市。
- *通訊作者。

表一、各種能源經濟效益

Table 1 The benefit of all kind of energies

能源種類	電	92 汽油	瓦斯	柴油	天然氣
熱能之經濟效益 (千焦/元)	587	1,529	1,560	1,865	3,163

由表一可以看到，雖然瓦斯的經濟效益比電高，但過去從未開發純瓦斯烘箱，主要因為瓦斯溫度控制相對不易，另外瓦斯桶會隨使用的時間而壓力降低導致流量減小，造成瓦斯燃燒的熱減少。電熱烘箱溫度控制簡單且穩定，但以能量的角度評估，經濟效益較低。為解決純瓦斯烘箱溫控不易的問題，開發「瓦斯」與「電」複合熱源烘箱，主要熱源由瓦斯燃燒提供，電熱控制烘箱內部溫度，示意圖與實機圖如圖一。



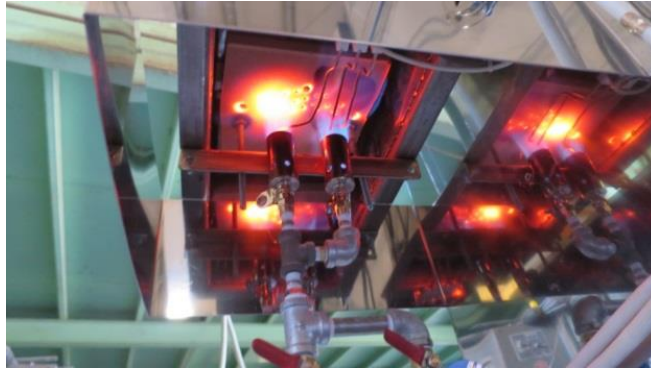
圖一、複合熱源烘箱設計 (A：示意圖，B：實際運作情形)

Fig. 1. Hybrid dryer (A: diagram; B: practical operating situation)

材料與方法

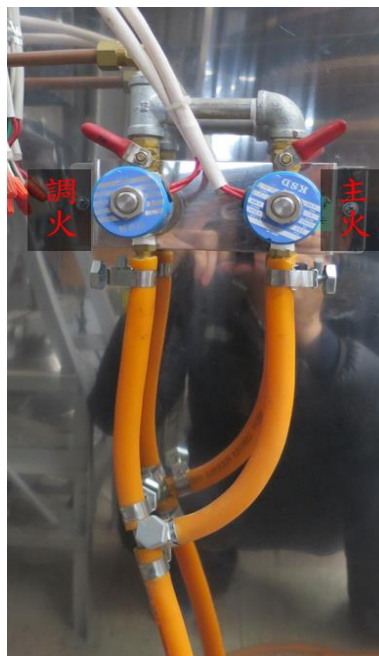
一、設計複合熱源烘箱：

本研究改裝 40 斤的電烘箱 (圖一B)，外部尺寸長 83 (cm) × 寬 74 (cm) × 高 163 (cm)，內部 (乾燥室) 尺寸長 58 (cm) × 寬 59 (cm) × 高 98 (cm)，層盤尺寸長 50 (cm) × 寬 55 (cm) × 高 3.5 (cm)。操作電源為單相 220V，風車馬力為 1/4 HP，烘箱最高瓦數為 4,200 瓦。瓦斯燃燒室如圖二，為避免乾燥物被瓦斯燃燒廢氣汙染，瓦斯燃燒熱以熱交換器間接方式進入乾燥室。加設瓦斯流量控制器 (圖三) 來微調燃燒室溫度。右閥為主火，主要瓦斯熱源由右閥供應；左閥為調火，溫度過低開啟調火，溫度過高關閉調火，以控制燃燒室的溫度。在操作複合熱源烘箱的過程中，若臨時斷電或燃燒室的火焰意外消失，瓦斯控制器會強制停止供應瓦斯，不讓瓦斯外洩避免危險。



圖二、瓦斯燃燒室

Fig. 2. The firebox of gas energy



圖三、瓦斯熱控制器

Fig. 3. The flow rate controller of gas

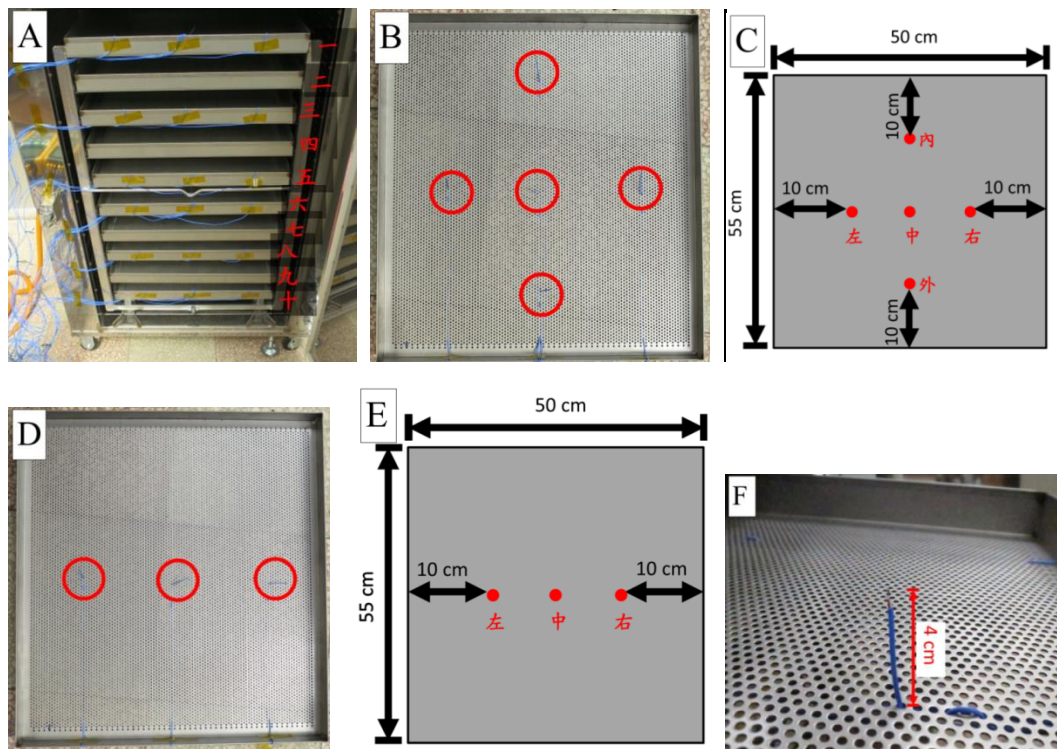
二、烘箱內部溫度、電量與瓦斯消耗量之量測記錄：

在乾燥室內布置 24 個量測溫度點，量測位置如圖四。利用 K-type 熱電偶（量測範圍 200 – 1,370℃，解析度 0.1℃）量測溫度，並利用溫度記錄器（型號 BTM-4208SD）（圖五）記錄烘箱在操作過程中每秒溫度。

為分析複合熱源烘箱與傳統電烘箱的耗電量與瓦斯消耗量，並從能源面探討是否節能省碳，從經濟面探討是否能減少金錢的支出。烘箱操作的過程中藉由功率計（型號：KEW 6305）（圖六）記錄消耗電量，並藉由磅秤（型號 JB-60Y，量測範圍 0 – 60kg，解析度 2g）（圖七）記錄瓦斯消耗重量。

烘箱變頻器的風量設定統一為 50 (圖八)，由風量計量測 (型號 AM-4206)(圖九)，其風量為 $3 \text{ (m}^3\text{/min)}$ ，烘箱溫度設定 90°C ，運作 3 小時，每次試驗前烘箱需冷卻 2 小時以上，每次 3 重複試驗，紀錄如下。

- (一) 傳統電烘箱 (對照組)：紀錄耗電量與各點溫度值。
- (二) 複合熱源烘箱 (試驗組)：紀錄耗電量、瓦斯消耗量與各點溫度值。



圖四、乾燥室內之溫度量測與說明

(A：熱電偶在烘箱的佈線狀況 (共十層)，B：熱電偶在第一、六、十層托盤的佈線狀況，C：熱電偶在第一、六、十層托盤的佈線示意圖，D：熱電偶在第三、五、八層托盤的佈線狀況，E：熱電偶在第三、五、八層托盤的佈線示意圖，F：量測托盤上側 4 cm 的溫度)

Fig. 4. The distributions of temperature measurement in the dryer box. (A: The thermal couple installed in the dryer. B: The thermal couple installed the on first, sixth and tenth tray. C: The diagram of the thermal couple installed on the first, sixth and tenth tray. D: The thermal couple installed on the third, fifth and eighth tray. E: The diagram of the thermal couple installed on the third, fifth and eighth tray. F: Measure the temperature above 4 cm the tray.)



圖五、溫度記錄器 (型號：BTM-4208SD)
Fig. 5. Temperature recorder (model: BTM-4208SD)



圖六、功率計 (型號：KEW 6305)
Fig. 6. Power meter (model : KEW 6305)



圖七、磅秤 (型號：JB-60)
Fig. 7. Scale (model : JB-60)



圖八、風量控制器
Fig. 8. Fan controller



圖九、風量計
(型號：AM-4206M)
Fig. 9. Air flow meter (model:
AM-4206M)

三、焙茶試驗與處理

比較複合熱源烘箱和傳統烘箱之烘焙性能，試驗茶樣為臺茶 20 號茶，每層盤放 5 斤茶乾，共放 2 層做焙火試驗，每 2 小時取樣品評。

為比較複合熱源烘箱與傳統烘箱，做輕度烘焙的烏龍茶，每 2 小時官能品評調整烘箱溫度，其溫度設定與作業時間如表二。另外比較重度烘焙的烏龍茶，每 4 小時調整烘箱溫度，其溫度設定與作業時間如表三。

表二、輕度烘焙溫度與作業時間

Table 2 The temperature and hours for light roasting

電烘箱	溫度 (°C)	80	85	90	95
	時間 (hr)	4	4	3	1
複合熱源烘箱	溫度 (°C)	80	85	90	95
	時間 (hr)	4	4	2	1

表三、重度烘焙溫度與作業時間

Table 3 The temperature and hours for heavy roasting

電烘箱	溫度 (°C)	100	105	110	115	120
	時間 (hr)	4	4	4	4	4
複合熱源烘箱	溫度 (°C)	100	105	110	115	120
	時間 (hr)	4	4	4	4	4

四、茶葉品質感官品評

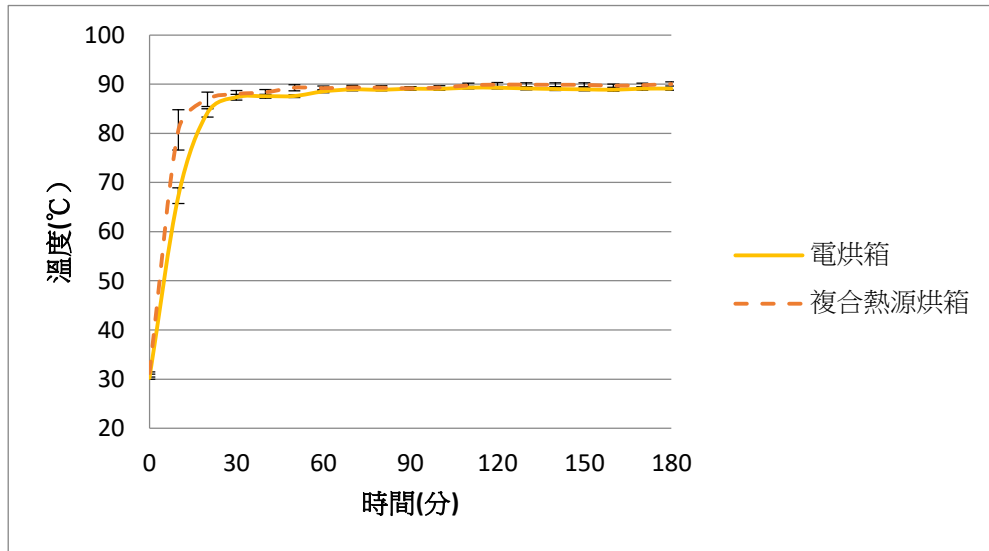
取樣 3 公克，以 150 毫升沸水沖泡 5 分鐘，進行官能品評，比較傳統烘箱與複合熱源烘箱的烘焙性能差異。

五、茶湯製備

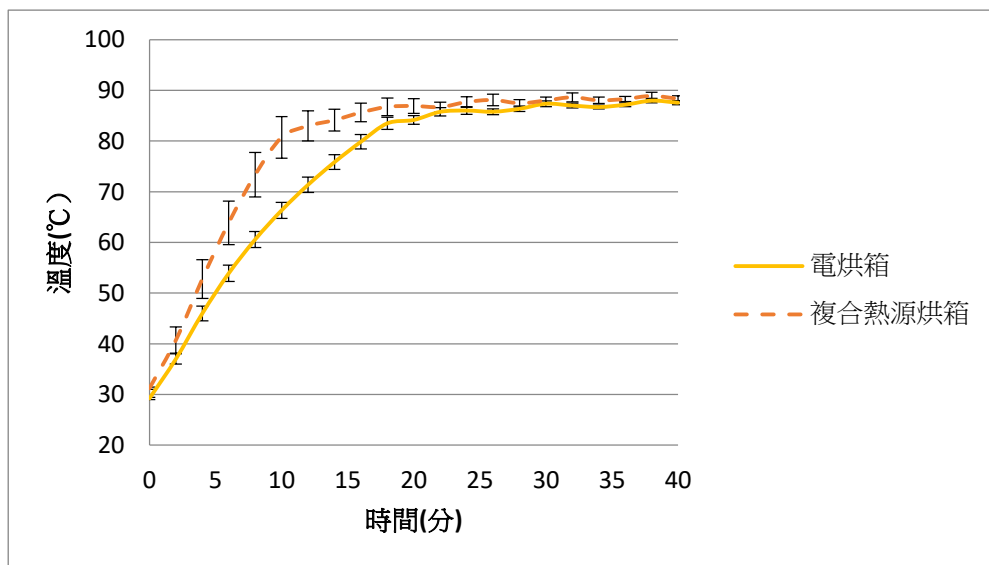
秤取 3 公克茶葉置於標準評鑑杯中，加入 150mL 沸水，靜置 5 分鐘後，倒入審查碗中，品評第一泡茶湯。

結果與討論

一、烘箱溫度隨時間變化情形



圖十、電烘箱和複合熱源烘箱運作 3 小時的整體平均溫度隨時間的變化情形
 Fig. 10. Compared with the average temperature of the electric dryer and hybrid dryer worked 3 hours



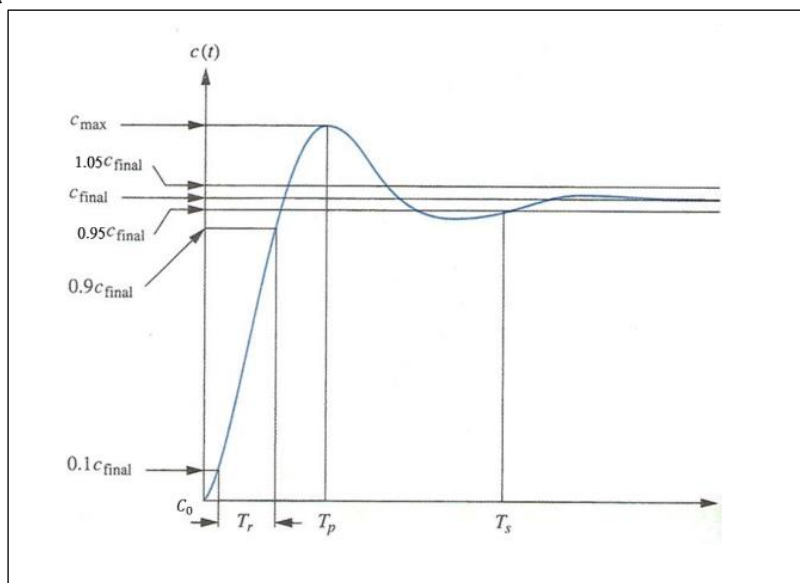
圖十一、電烘箱和複合熱源烘箱運作前 40 分鐘的整體平均溫度隨時間的變化情形
 Fig. 11. Compared with the average temperature of the electric dryer and hybrid dryer worked 40 minutes

圖十為電烘箱和複合熱源烘箱運作 3 小時的溫度隨時間的變化情形，圖十一為電烘箱和複合熱源烘箱運作前 40 分鐘的溫度隨時間的變化情形，可看出複合熱源烘箱升溫速度較快，但升溫過程溫度的均勻性較差，複合熱源烘箱前 20 分鐘（初始不計）整體溫度標準差範圍為

1.47 – 4.38，傳統電烘箱前 20 分鐘升溫過程整體溫度標準差範圍為 0.87 – 1.60。溫度穩定時 (操作 1 小時到 3 小時) 複合熱源烘箱整體溫度標準差範圍為 0.34 – 0.46，而傳統電烘箱整體溫度標準差範圍為 0.24 – 0.33，傳統電烘箱在溫度穩定時溫度均勻性略優於複合熱源烘箱。

二、烘箱溫控性能與升溫性能說明與比較

為說明烘箱升溫的速度快慢與控溫性能，簡單介紹自動控制理論 (Control theory) 的爬升時間 (Rise time, 簡稱 T_r) 和穩定時間 (Settling time, 簡稱 T_s) 的定義 (圖十二) 來說明烘箱性能。



圖十二、二階阻尼響應圖

Fig. 12. Underdamped response diagram

(一) 爬升時間 (Rise time, T_r)

烘箱從初始溫度 C_0 爬到設定溫度 C_{final} 的 10% 爬到 90% 所需要的時間，此參數可解釋烘箱加熱器的升溫性能， T_r 時間愈短烘箱升溫速度愈快。

C_{final} 為設定溫度 90℃， C_0 為初始溫度 30℃。

10% 的溫度為 $30 + 0.1(90 - 30) = 36^\circ\text{C}$ 。

90% 的溫度為 $30 + 0.9(90 - 30) = 84^\circ\text{C}$ 。

表四、爬升時間 T_r 所需參數

Table 4 The parameter of the rise time (T_r).

類別	升到 36℃	升到 84℃
	所需時間 (min)	所需時間 (min)
電烘箱	2	20
複合熱源烘箱	1	14

傳統電烘箱溫度從 36°C 升到 84°C 的爬升時間為 $T_r = 20 - 2 = 18 \text{ min}$

複合熱源烘箱溫度從 36°C 升到 84°C 的爬升時間為 $T_r = 14 - 1 = 13 \text{ min}$

從表四可看出複合熱源烘箱升溫時間比電烘箱短，開始升溫電烘箱與複合熱源烘箱的電熱器為全載加熱，但是複合熱源烘箱有瓦斯額外提供的熱能，故可以升溫的更加快速。

(二) 穩定時間 (Settling time, T_s)

烘箱從初始溫度 C_0 爬到設定溫度 C_{final} 95% 和 105% 間震盪所需的時間，此參數可說明烘箱升溫到達穩定所需要的時間， T_s 時間愈短說明穩定所需的時間愈短。

95% 的溫度為 $30 + 0.95(90 - 30) = 87^{\circ}\text{C}$ 。

105% 的溫度為 $30 + 1.05(90 - 30) = 93^{\circ}\text{C}$ 。

表五、穩定時間 T_s 所需參數

Table 5 The parameter of the settling time T_s .

類別	升到 87°C 所需時間 (min)	升到 93°C 所需時間 (min)
電烘箱	30	無
複合熱源烘箱	18	無

電烘箱與複合熱源烘箱溫度超過 87°C 後就趨於穩定，但就沒再升溫超過 93°C (表五)，故只需要計算電烘箱與複合熱源烘箱升溫到達 87°C 所需時間。

傳統電烘箱溫度升到 87°C 的穩定時間 $T_s = 30 \text{ min}$ 。

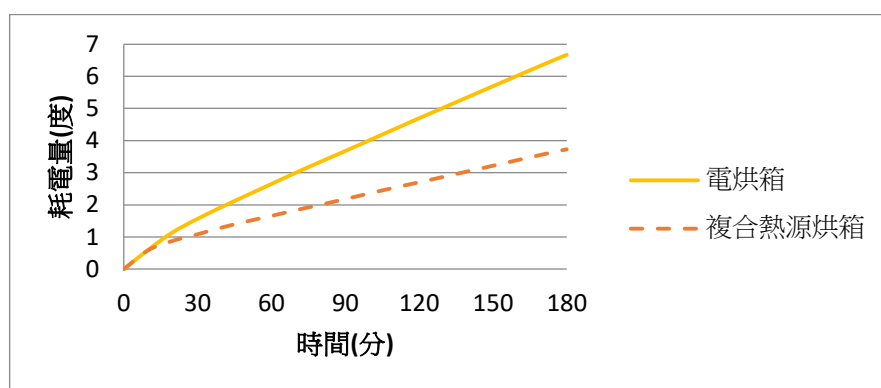
複合熱源烘箱溫度升到 87°C 的穩定時間 $T_s = 18 \text{ min}$ 。

可以看出複合熱源到達 T_s 的時間較短，代表溫度到達設定值且穩定的時間較短，控制性能較好。

三、傳統電烘箱與複合熱源烘箱耗電量與瓦斯消耗量比較與分析

(一) 耗電量與瓦斯消耗量比較

電烘箱與複合熱源烘箱設定 90°C ，運作 3 個小時，耗電量與瓦斯消耗量如圖十三與表六所示。電烘箱消耗 6.63 度的電量，而複合熱源烘箱消耗 3.73 度的電量和 0.53 公斤的瓦斯。比較耗電量，複合熱源烘箱節省 43.76% 的電費。



圖十三、電烘箱與複合熱源烘箱耗電量比較圖

Fig. 13. Comparison between with the electricity of the electric dryer and hybrid dryer worked 3 hours

表六、電烘箱與複合熱源烘箱操作 3 小時消耗的電量與瓦斯量

Table 6 The consumption of electricity and gas of the electric dryer and hybrid dryer worked 3 hours

烘箱	能源	消耗量
電烘箱	電	6.63 度
	瓦斯	0 公斤
複合熱源烘箱	電	3.73 度
	瓦斯	0.53 公斤

(二)經濟效益分析

1. 電烘箱能源消耗經濟效益分析

表七、非營業用累計電費度數

Table 7 The cumulative electricity bill

每月用電度數分段	夏月 (元)	非夏月 (元)
120 度以下	1.63	1.63
121 – 330 度	2.38	2.10
331 – 500 度	3.52	2.89
501 – 700 度	4.61	3.79
701 – 1000 度	5.42	4.42
1001 度以上	6.13	4.83

註：夏月為 6 月 1 日至 9 月 30 日。

(資料來源：臺灣電力公司，2016 年 4 月 1 日實施)

夏月 1,000 度的電費：

$$120 \times 1.63 + (330 - 120) \times 2.38 + (500 - 330) \times 3.52 + (700 - 500) \times 4.61 + (1,000 - 700) \times 5.42 = 3,841.8 \text{ 元}$$

非夏月 1,000 度的電費：

$$120 \times 2.1 + (330 - 120) \times 2.68 + (500 - 330) \times 3.61 + (700 - 500) \times 4.48 + (1,000 - 700) \times 5.03 = 3,211.9 \text{ 元}$$

經瞭解茶農在茶季或是在焙茶時期，每月電費高達上萬元，故耗電量至少 1,001 度以上，故每度電花費以 6.13 元計算。故電烘箱操作 3 小時，消耗電量為 6.63 度，電費為 $6.63 \times 6.13 = 40.6$ 元。

2. 複合熱源烘箱能源消耗經濟效益分析

由經濟部能源局資料得知，2016 年 20 公斤的桶裝瓦斯的平均價格為 644 元，故平均 1 公斤的瓦斯需花費 32.2 元，故複合熱源烘箱操作 3 小時，消耗瓦斯量為 0.53 公斤，瓦斯費為 $0.53 \times 32.2 = 17.1$ 元，消耗電量為 3.73 度，故電費為 $3.73 \times 6.13 = 22.9$ 元。瓦斯費與電費合計為 $17.1 + 22.9 = 40$ 元。

3. 電烘箱與複合熱源烘箱不同能源消耗經濟效益分析比較

由上述分析計算，將數據整理成表八，可以看到電烘箱與複合熱源烘箱的能源費（電費+瓦斯費），雖然電烘箱與複合熱源烘箱的能源費差異不大，但是複合熱源烘箱減少了 4 成的電費（電量）。

表八、電費與瓦斯費的組成比例（運作 3 小時）

Table 8 The proportion of the electricity bill and the gas bill (3 hours)

烘箱	能源	消耗量	費用(元)	總額(元)	電費比例
電烘箱	電	6.63 度	40.6	40.6	100%
	瓦斯	0 公斤	0		
複合熱源烘箱	電	3.73 度	22.9	40.0	57.25%
	瓦斯	0.53 公斤	17.1		

註：電費(元) = 電量(度) $\times$ 6.13

瓦斯費(元) = 瓦斯量(公斤) $\times$ 32.2

總額 = 電費 + 瓦斯費

$$\text{電費比例} = \frac{\text{電費}}{\text{電費} + \text{瓦斯費}}$$

複合熱源烘箱的燃燒熱源不是只能選擇瓦斯，天然氣、柴油與汽油也可做為燃燒能源（圖一 A 左）。由燃燒的瓦斯熱能可以粗估到燃燒天然氣、柴油與汽油的消耗量，比較不同燃燒能量的經濟效益。

複合熱源烘箱運作 3 小時瓦斯燃燒能量（千焦）= $0.53(\text{kg}) \times 50,232 (\text{kJ/kg}) = 26,623 \text{ kJ}$ 。

瓦斯燃燒能換算成天然氣燃燒能之效益評估：

天然氣的燃燒熱約為 54,000 kJ/kg，故瓦斯換算成天然氣消耗 26,623(kJ)/ 54,000 (kJ/kg) = 0.49kg。

從表一得知天然氣的燃燒經濟效益為 3,163 (kJ/元)，故瓦斯換算成天然氣 26,623 (kJ) / 3163(kJ/元)=8.4 元。

瓦斯燃燒能換算成柴油燃燒能之效益評估：

柴油的燃燒熱約為 44,800 kJ/kg，故瓦斯換算成柴油消耗 26,623(kJ)/ 44,800 (kJ/kg) = 0.59kg。

從表一得知柴油的燃燒經濟效益為 1,865 (kJ/元)，故瓦斯換算成柴油 26,623(kJ) / 1,865 (kJ/元)=14.3 元。

瓦斯燃燒能換算成汽油燃燒能之效益評估：

汽油的燃燒熱約為 47,300 kJ/kg，故瓦斯換算成汽油消耗 26,623(kJ)/ 47,300 (kJ/kg) = 0.56kg。

從表一得知汽油的燃燒經濟效益為 1,529 (kJ/元)，故瓦斯換算成汽油 26,623(kJ) / 1,529 (kJ/元)=17.4 元。

表九、推算天然氣、柴油與汽油用於複合烘箱之經濟效益分析 (運作 3 小時)

Table 9 The cost assessment of the natural gas, diesel oil and the gasoline used in hybrid dryer (3 hours)

烘箱	能源	消耗量	能源費 (元)	總額 (元)	電費比例
天然氣烘箱	電	3.73 度	22.9	31.3	73.16%
	天然氣	0.49 公斤	8.4		
柴油烘箱	電	3.73 度	22.9	37.2	61.56%
	柴油	0.59 公斤	14.3		
汽油烘箱	電	3.73 度	22.9	40.3	56.82%
	汽油	0.56 公斤	17.4		

總額 = 電費 + 能源費

電費比例 = $\frac{\text{電費}}{\text{電費} + \text{瓦斯費}}$

由表九可以看到，利用天然氣作為主要熱能，則能源費總和最低。傳統電烘箱的能源費 40.6 元，天然氣烘箱的能源費為 31.3 元，解省了 23%。但天然氣的運送需要管路，才能到家庭用戶使用，故在臺灣並不是十分流行，只有名間部分茶農使用天然氣當作能源。其他茶區的燃燒能主要是液態 (桶裝) 瓦斯 (炒菁機) 或是柴油 (甲種乾燥機)，可用貨車運送到偏遠地區，且存放安全。但液態瓦斯快用完時，瓦斯壓力不夠，會造成炒菁機溫度下降。

(三) 能量效益分析

從熱力學的角度來看，電能轉熱能的效率為 100%，複合熱源烘箱的熱能除了電能轉換以外，還利用瓦斯燃燒熱來提供烘箱熱能，避免瓦斯燃燒汙染食材，利用熱交換器傳送瓦斯燃燒的熱能到烘箱內，故熱交換器的傳熱能力影響瓦斯燃燒熱的作業效率，需計算熱交換器的熱轉換效率，評估是否還有提高熱效率的空間。

已知 1 度電 = $1\text{kW}\cdot\text{h} = 1\text{kJ}\cdot\text{h} = 3,600\text{ kJ}$ ，消耗 1 度電會產生 3,600 kJ (千焦) 的熱能。液化瓦斯的燃燒熱為 50,232 kJ/kg，消耗 1 公斤的瓦斯會產生 50,232 kJ 的熱能。將表十整理後，運作 3 小時的電熱與瓦斯產生的熱能數據如表十。已知

$$\text{瓦斯燃燒熱交換傳遞效率} = \frac{\text{電烘箱電能} - \text{複合熱源烘箱電能}}{\text{複合熱源燃燒熱能}} = 39.2\%，\text{而臺電 2016 年電能傳到}$$

用戶的發電效率為 39.85% (表一)，臺電發電效率還略勝 0.65%，複合熱源效率的瓦斯熱效率還有進步空間。

表十、電費與瓦斯能量的組成比例 (運作 3 小時)

Table 10 The proportion of the electricity energy and the gas energy. (3 hours)

烘箱	能源	消耗量	熱能 (千焦)	總熱能 (千焦)	熱能傳入烘箱效率
電烘箱	電	6.63 度	23,868	23,868	100%
	瓦斯	0 公斤	0		--
複合熱源烘箱	電	3.73 度	13,428	40,051	100%
	瓦斯	0.53 公斤	26,623		39.2%

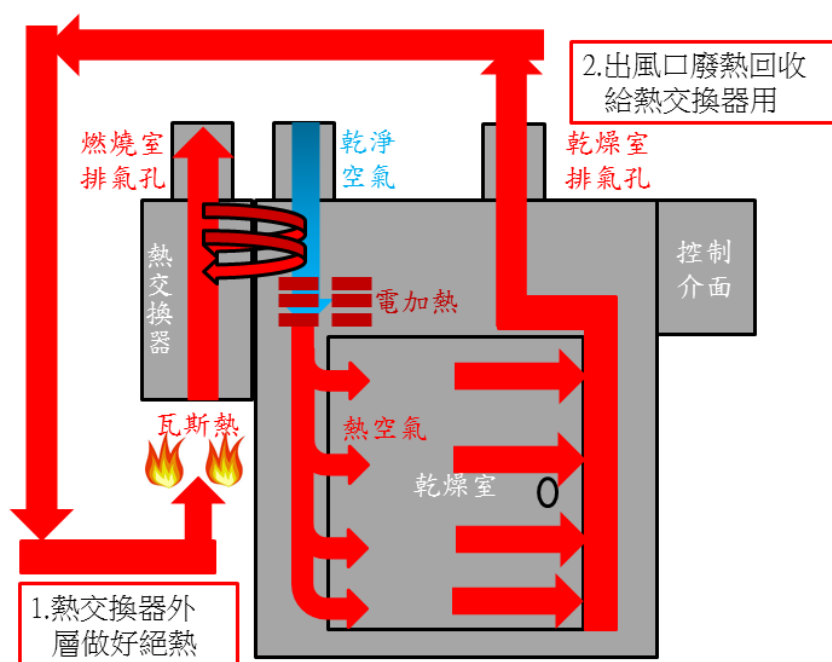
註：電熱 (千焦) = 電量 (度) $\times$ 3,600

瓦斯熱 (千焦) = 瓦斯量 (公斤) $\times$ 50,232

總熱能 (千焦) = 電熱 + 瓦斯熱

$$\text{瓦斯燃燒熱傳遞效率} = \frac{\text{電烘箱電能} - \text{複合熱源烘箱電能}}{\text{複合熱源燃燒熱能}} = \frac{23,868 - 13,428}{26,623} = 0.392 = 39.2\%$$

為提高瓦斯的熱交換器效率，目前有兩種做法。將熱交換器和燃燒爐外層覆蓋隔熱海綿，可以減少瓦斯熱氣的散失，提高熱效率 (圖十四)。另外熱交換器的燃燒爐是從環境溫度 30℃ 開始升溫，故需要大量的瓦斯燃燒能來做熱交換，可將烘箱出風口的廢熱 (約有 90℃) 回收給熱交換器使用，減少升溫所需的瓦斯量 (圖十五)。



圖十四、改良複合熱源烘箱示意圖

Fig. 14. The diagram of the improved hybrid dryer



圖十五、燃燒爐與熱交換器外側需要覆蓋隔熱棉

Fig. 15. Add the insulated cotton on the firebox

四、感官品評

表十一為輕度烘焙之臺茶 20 號球形烏龍茶，由感官品評可知，電烘箱烘焙滋味隨時間改善。複合熱源烘箱烘焙滋味會從清轉澀，茶湯轉澀時時需要升溫到下一階段，最後結束在設定溫度為 95℃。比較電烘箱輕度烘焙 90℃ 的品質與複合熱源烘箱烘焙到 95℃ 的品質，複合熱源烘箱的滋味略為清淡且為菁澀，初步判斷複合熱源烘箱風量較大，焙清的速度快。初步建議複合熱源烘箱後期風速調降，滋味才不會偏淡，且能降低菁澀感。表十二為重度烘焙之臺茶 20 號球形烏龍茶，結果顯示複合熱源烘箱烘焙出的茶葉較為甜。

表十一、輕度烘焙之感官品評結果

Table 11 Sensory evaluation of two treatments for light roasting

電烘箱	溫度(℃)	80	80	85	85	90	90
	時間(hr)	2	2	2	2	2	1
	滋味描述	隨時間逐漸改善					清
複合熱源 烘箱	溫度(℃)	80	80	85	85	90	95
	時間(hr)	2	2	2	2	2	1
	滋味描述	清	澀*	清	澀*	澀*	清

*備註：變澀為茶焙到滋味轉換，需升溫做下一階段的焙火。

表十二、重度烘焙之感官品評結果

Table 12 Sensory evaluation of two treatments for heavy roasting

電烘箱	溫度 (℃)	100	105	110	115	120
	時間 (hr)	4	4	4	4	4
	滋味描述	微火、清甜、澀	火、微悶雜、菁澀	火味、微悶雜、滋味飽滿、微悶	火味、菁澀	火味明顯、菁澀
複合熱源 烘箱	溫度 (℃)	100	105	110	115	120
	時間 (hr)	4	4	4	4	4
	滋味描述	微悶雜、火味、味淡	甜、味淡、澀感稍好	甜、微澀	甜、微澀	甜、菁澀

結 論

臺灣用電量有逐年增加的趨勢，早晚面臨限電危機。在製茶過程中會用到大量的電，又以烘箱的用電量最高，80 斤的烘箱高達 8,000 瓦。本試驗結合電熱易控制與瓦斯熱便宜的優點，開發複合熱源烘箱，成功的找到能源替代方案，減少 43% 的用電量，且加速烘箱的升溫速度與減少穩定時間。用經濟效益來評估，複合熱源操作 3 小時雖然只減少 0.6 元的能源費（電能+瓦斯能），但

未來電費漲價時，能源費能大幅減少；用能量效益來看，瓦斯熱交換器的效率只有 39.2%，還有提高熱交換器效率的機會，未來預計在熱交換器外添加隔熱層與回收熱風提高熱交換器的效率。從焙茶試驗可得知，複合熱源烘箱烘焙品質，微遜電烘箱烘焙品質，但可節省將近一半的電量，減少家庭用電的負擔。

參考文獻

1. 濟部能源局. 2019 年 10 月 30 日 取自 <https://www2.moeaboe.gov.tw/oil102/>
2. 維基百科. 燃燒熱. 2019 年 10 月 30 日，取自
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%87%83%E7%83%A7%E7%83%AD>
3. 臺灣中油公司油價. 2019 年 10 月 30 日 取自 https://price.nat.gov.tw/p/zh_tw/energy#E1
4. 陳和錦. 1974. 在世界經濟動盪中談台茶經營. 茶訊 p. 1。
5. 胡凡勳、朱朝煌、邱漢傑. 2011. 熱遞學. 高立圖書。

(附件一) 各種能源經濟效益之評估

一、電能轉熱能的效益分析：

1 度電 產生的熱為 3,600 kJ，又 1 度電的電費為 6.13 元。

1 元的電費可以產生 $3,600/6.13 = 587 \text{ kJ}$ 的熱量

二、天然氣轉熱能的效益分析：

天然氣的燃燒熱約為 54,000 kJ/kg，1 立方公尺的天然氣費為 12.24 元，密度約為 0.717 kg/m^3 。
(2017/07/02)

故 1 公斤的天然氣費為 $12.24/0.717=17.07$ 元

1 元的天然氣費可以產生 $54,000/17.07 = 3,163 \text{ kJ}$ 的熱量

三、瓦斯轉熱能的效益分析：

液化瓦斯的燃燒熱約為 50,232 kJ/kg，1 公斤的瓦斯費為 32.2 元。(2016 年的全國平均值)

1 元的瓦斯費可以產生 $50,232/32.2 = 1,560 \text{ kJ}$ 的熱量

四、汽油轉熱能的效益分析：

汽油的燃燒熱約為 47,300 kJ/kg，1 公升的 92 汽油費為 22.8 元，密度約為 0.737 kg/l
(2017/07/03)

故 1 公斤的汽油費為 $22.8/0.737=30.94$ 元

1 元的汽油費可以產生 $47,300/30.94 = 1,529 \text{ kJ}$ 的熱量

五、柴油轉熱能的效益分析：

柴油的燃燒熱約為 44,800 kJ/kg，1 公升的柴油費為 20.3 元，密度約為 0.845 kg/l (2017/07/03)

故 1 公斤的柴油費為 $20.3/0.845=24.02$ 元

1 元的柴油費可以產生 $44,800/24.02 = 1,865 \text{ kJ}$ 的熱量

The Research of the Thermal Efficiency of the Hybrid Dryer

Wei-Yang Hwang¹ Tien-Lin Liu^{1,*} Chia-Chang Wu² Jin-Chih Lin¹

Summary

The hybrid dryer was designed in the research to save the electric energy, which fire the gas to be the major heat and control the temperature by the electric energy. We compare with the electric and the gas consumption of the electric dryer and the hybrid dryer. The temperature of the dryer is 90°C and worked 3 hours. Record the temperature of the 24 position in the dryer 3 times. The results show that the electric power consumption of the electric dryer is 6.67 kWh, the rise time (T_r) is 18 min, and the settling time (T_s) is 30 min. The electric power consumption of the hybrid dryer is 3.729 kWh, the gas power consumption is 0.533 kg, the rise time (T_r) is 13 min, and the settling time (T_s) is 18 min. The hybrid dryer's performance of warming up and stability is better than those of electric dryer. By the electric power consumption analysis, the hybrid dryer can save 44% electric power consumption. By the cost-effectiveness analysis, the hybrid dryer may save 0.6 NT dollars (electricity bill and the gas bill for working three hours). In Taiwan, the electric power consumption is increasing, but the power plants are not constructed in recent years. In the future, the energy shortage crisis will happen, hybrid dryer might save the electric power consumption and solve the energy shortage crisis for tea farmers.

Key words: Hybrid dryer, Dryer, Thermal efficiency

1. Assistant Researcher, Senior Agronomist, Senior Agronomist, Tea Research and Extension Station, Taoyuan, Taiwan, R.O.C.

2. Director, Veterans Affairs Council Fushoushan Farm, Taichung, Taichung, R.O.C

*Corresponding author.