

# 太陽熱能牧草乾燥室研發<sup>(1)</sup>

王紓愨<sup>(2)(3)</sup> 劉信宏<sup>(2)</sup> 游翠凰<sup>(2)</sup> 陳嘉昇<sup>(2)</sup>

收件日期：111 年 8 月 5 日；接受日期：112 年 3 月 9 日

## 摘 要

本研究的主要目的為進行小型牧草節能乾燥室研發，以豐富的太陽熱能為主要能量來源，減少石化能源與電力消耗，同時滿足高品質芻料調製與節能的需求。由實驗室乾燥建立基本資料作為系統條件之參照，在 50°C 下苜蓿鮮草經 8 小時可乾燥至含水率 15% 以下。雛型乾燥室之基本設計包括乾燥室主架構及與輸送設備，可半自動進行牧草進料、乾燥及出料作業。由乾燥室現場實測溫度變化情形，晴天上午 9 點當戶外溫度為 28°C 時，乾燥室內溫度已高達 50°C，且高溫可持續到下午 4 點，其間相對濕度低於 20%。熱風循環與排濕設計可提高室內環境之均勻度與乾燥效率，白天的苜蓿草平均乾燥速率可達 6.1%/h。太陽熱能乾燥室相對於電熱乾燥可節省 99% 的能源消耗與碳排放，在小規模牧草乾燥的應用上極具潛力，可以利用為寵物與實驗動物級等較優質且高單價之乾草生產。

關鍵詞：乾草、低碳能源、太陽熱能乾燥。

## 緒 言

牧草品質受多種因素影響，可概分為收穫前因素及收穫後因素。畜試所已進行多項大宗國產芻料品質研究，對季節、品系與收穫成熟度對品質的影響已充分認知 ( 陳及王, 2005 ; 2012 ; 陳等, 2018 )，對溫帶草種之苜蓿、燕麥等利基性牧草在本地環境下的收穫前品質變動亦有掌握 ( 王等, 2019 ; 陳等, 2021 )，然因海洋性高濕度環境之故，在沒有人工乾燥的輔助之下欲穩定獲得高品質乾草的難度極高。

Rees (1982) 表示乾物質損失是乾草調製過程無可避免的問題，損失的程度依調製過程而異，在潮濕氣候下的乾物損失可超過 30%。Fonnesbeck *et al.* (1986) 的研究發現，苜蓿乾草的調製過程估計有 9.7% 的產量損失是由可溶性養分的流失造成，其中 18.8% 為碳水化合物、10.2% 為蛋白質、19.8% 為脂肪、14% 為礦物質，同時，下雨對乾草品質的影響大於成熟度。由 Rotz and Muck (1994) 的回顧報告中也顯示，乾草調製過程的損失是必然的，在正常情況下損失約 10% 以下，但如遇雨則平均乾物損失可達 30%，在嚴重的情形下損失甚至可達 50%；不同作物的影響程度不一，此外，下雨對乾燥後期的影響大於對乾燥初期的影響。因此，牧草在田間乾燥的時間愈短愈好。然而牧草收穫時的含水率高，如何在短時間內使水分快速散失，利用人工能源輔助乾燥是許多食用農產品常用的手段，但其成本過高，對多數牧草生產而言並不適用。

太陽熱源是相對便宜的能源，然而直接的日曬乾燥受氣候條件的影響大，缺點已如前述，若以太陽熱源輔以其他聚熱或貯熱裝置，則可以成為相當有效的乾燥設施。Bal *et al.* (2010) 及 Sharma *et al.* (2009) 的回顧中提出多種太陽乾燥的利用方式與設計概念，包括直接與間接的利用。Tiris *et al.* (1995) 表示，其所研發之太陽熱能加熱裝置可以顯著改善多種農產品的乾燥時間與乾燥品質。Arinze *et al.* (1999) 則表示太陽能乾燥裝置可以應用於高品質商業乾草的生產。因此，本研究以太陽熱能輔以自動化機械流程，設計適用於生產高品質乾草之節能乾燥室，並以多批苜蓿乾燥效率作為驗證，達到提昇品質與能源節約的雙重目標。

## 材料與方法

### I. 牧草乾燥基礎資料建立

(1) 行政院農業委員會畜產試驗所研究報告第 2737 號。

(2) 行政院農業委員會畜產試驗所恆春分所。

(3) 通訊作者，E-mail: smwang@mail.tlri.gov.tw。

利用熱風循環烘箱 (臺製, 內部空間 210 × 190 × 80 cm) 進行苜蓿草乾燥模式模擬, 設定固定溫度 (50°C, 依溫室內多次晴天日間溫度平均) 及進料厚度 (10 cm, 依溫室進料厚度), 乾燥期間間隔每小時取樣, 調查水分含量變化, 直至含水率低於安全貯存水分以下 (15%), 繪製牧草含水率變化的時間曲線, 做為系統設計及乾燥作業參考。

## II. 乾燥系統設計及建置

依牧草特性、乾燥模擬資料、配合現場作業需求設計乾燥系統, 包含乾燥室、內外物料輸送及通風系統以調控溫、濕度及排濕。以圓頂塑膠型溫室為基本主體之乾燥室架設於畜產試驗所恆春分所試驗區, 跨距 8 m、長 50 m、高 3 m, 設置方向為東西向, 被覆材料為聚乙烯。內部設計自動輸送層架 4 座, 層架為 4 層構造, 寬 1.6 m、長 40 m。建置完成後於乾燥室屋頂、各層之前、中、後區段 (約距層架前端 7、20 及 33 m 處) 與室外架設溫、濕度記錄器 (Hobo temp/RH logger), 調查各種天候下不同時間的溫、濕度變化。

## III. 乾燥效率比較

為測試通風排濕循環系統之效果, 分為啟動與不啟動通風系統下各進行二批次的苜蓿草乾操作業。每批次作業於下午 5 時完成進料, 並於上、中、下層架之前、中、後區段共 9 個位置, 放置內裝 300 g 新鮮苜蓿的網袋 (將苜蓿自然平鋪約 10 cm 厚) 5 個, 翌日 10:30 起每隔一小時取一袋秤重, 至 14:30 止, 測定苜蓿含水率變化。

## IV. 資料處理及統計

- (i) 苜蓿含水率變化與乾燥效率: 將不同乾燥時間取樣的樣品稱重, 再將樣品烘乾至恆重, 計算各取樣點之含水率, 將含水率與取樣時間資料以 excel 軟體作圖並進行多項式迴歸, 另以含水率變化除以乾燥時間計算單位時間內的含水率變化。
- (ii) 溫室內外溫濕度變化為將記錄器資料匯入 excel 軟體作圖。

# 結果與討論

## I. 牧草乾燥基本資料

圖 1 為鋪設厚度 10 公分、含水率 80% 的苜蓿鮮草在 50°C 烘箱中的含水率變化情形, 由烘箱數據可以得到  $y = -0.0004x^3 + 0.0152x^2 - 0.1828x + 0.8$  ( $y =$  含水率,  $x =$  乾燥時間,  $R^2 = 0.9564$ ) 的乾燥曲線模式, 在溫度 50°C 的條件下, 乾燥約 6 – 7 小時即可達到目標含水率 (15% 以下), 起始 1 小時的含水率降低速度快, 高達 16.8%/h, 第 2 小時的降低為 14.0%/h, 隨乾燥時間增加含水率減少的速度遞減。依烘箱乾燥之溫度條件及含水率曲線作為系統設計及操作的參考。

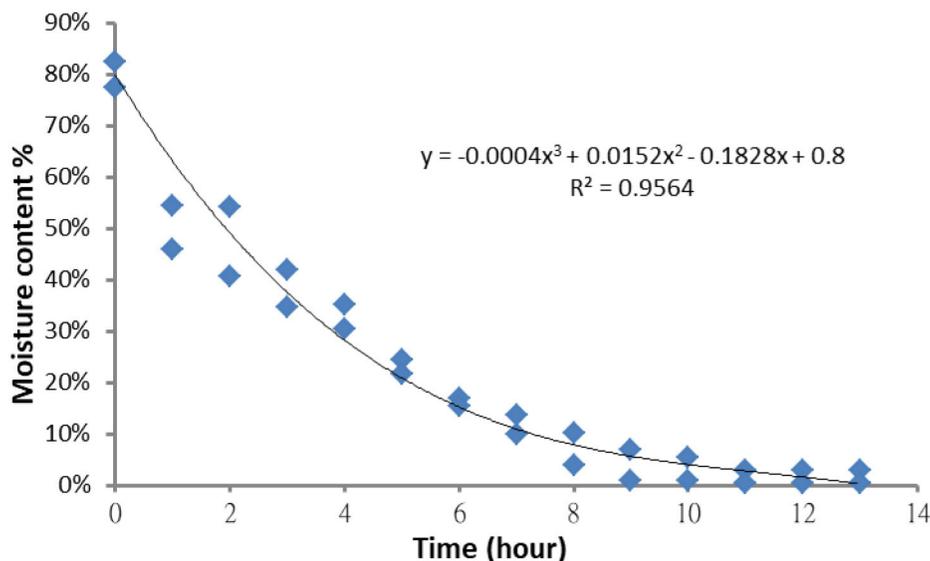


圖 1. 10 cm 厚苜蓿草層於 50°C 烘箱下的乾燥曲線。

Fig. 1. The drying curve of 10 cm thick alfalfa straw placed in an oven at 50°C.

## II. 乾燥系統設計及建置

考慮牧草收穫時的高含水率及膨鬆體積，以及避免因乾燥時間過長及不均勻的不良影響，本系統以薄層乾燥模式進行設計。乾燥系統採熱風靜置式，牧草批次進料後靜置於乾燥室內，以乾燥室聚集太陽光輻射產生的熱能進行連續乾燥，直到牧草含水率低於安全保存範圍。為提高作業效能，系統設計包含乾燥室外之進、出料輸送設備、室內層架及層網翻轉系統（提高進、出料便利性），可半自動進行牧草之進料、出料及乾燥（圖 2）。作業時可依當時太陽聚熱情形設定送風循環時間，提高乾燥效能。為減少乾燥系統的碳排放，本系統之電力來自太陽能光電板及風力發電。本系統各部分之功能獨立，可簡化應用於不同產品時需求之調整與修改，利於推廣使用。

建置完成之乾燥室占地面積 200 m<sup>2</sup>，前門配合輸送機設計門寬，做為人員、物料及維修用出入口，乾燥室後方設置送風風扇。系統操作電力為 220 V 三相，各層輸送設備配置原動力 1/2 馬力之 50：1 減速機及設置限制開關控制相對位置，輸送設備可運作入料、乾燥、翻轉、出料等過程動作。完成之乾燥室批次作業量為 1,000 – 1,200 kg 之鮮草，視牧草種類及收穫時條件而異。



圖 2. 乾燥室外觀（左），右上為輸送系統（操作電力為 220 V 三相，各層輸送設備配置原動力 1/2 馬力之 50：1 減速機及設置限制開關控制相對位置），右下為風扇。

Fig. 2. The appearance of the drying room (left), the upper right is the conveying system (the operating power is 220 V three-phase, the conveying equipment on each floor is equipped with a 50:1 reducer with a driving force of 1/2 horsepower and the relative position is controlled by a switch), and the lower right is the fan.

### III. 乾燥室之溫、濕度變化調查

乾燥室架構完成後於室外及室內不同位置進行溫、濕度測定，做為乾燥室調整參數與加強烘乾效率之依據。圖 3 為室內及室外連續 7 天的監測結果，圖 4 為室內不同高度在日間 12 小時的變化。圖 3 及圖 4 結果顯示乾燥室內的溫度與相對濕度變動幅度大於大氣環境。測量期間室外的溫度變化介於 17 – 37°C，平均溫度為 24°C，相對濕度介於 41 – 95%，平均相對濕度為 78%，日照時數介於 0.6 – 9 h。夜間，乾燥室內溫度與相對濕度的變化趨勢與室外一致，且差距不大；日間，室內較室外有極明顯的溫度上升及濕度降低的現象，溫度與濕度二者變化趨勢相反，溫度由日出後開始漸漸升溫，大約在上午 9 點左右溫度快速上升，至中午左右達日最高溫（介於 58 – 73°C，除一天外，均在 60°C 以上）及最低相對濕度（介於 9 – 22%），之後溫度下降，相對濕度上升，至下午 5 點之後變動幅度減緩，夜間溫度接近大氣溫度而相對濕度可高達 90%。基本上，每日間的變化情形大致相似（圖 3），而其變動幅度與每日的日輻射變化相應，因當時的日照條件而改變。

除時間的變動外，圖 4 顯示，室內不同高度的溫度不同，愈接近頂部溫度愈高。一般晴天下，由上午 9 時至下午 3 時之間，乾燥室內環境可維持在相對穩定的高溫、低濕條件（溫度為 50°C 上下、相對濕度為 20% 左右），是理想的乾燥時段。烘箱的試驗結果顯示維持 50°C 的條件下，苜蓿的含水率可以在 6 – 7 小時內完成乾

燥，然而由實測期間資料了解，每日的較適乾燥時間是變動的(圖3的結果介於3.5 – 6小時)，如果考慮位置的影響則變動更大，因此利用乾燥室進行乾燥所需的時間會隨實際的天候狀況而改變。

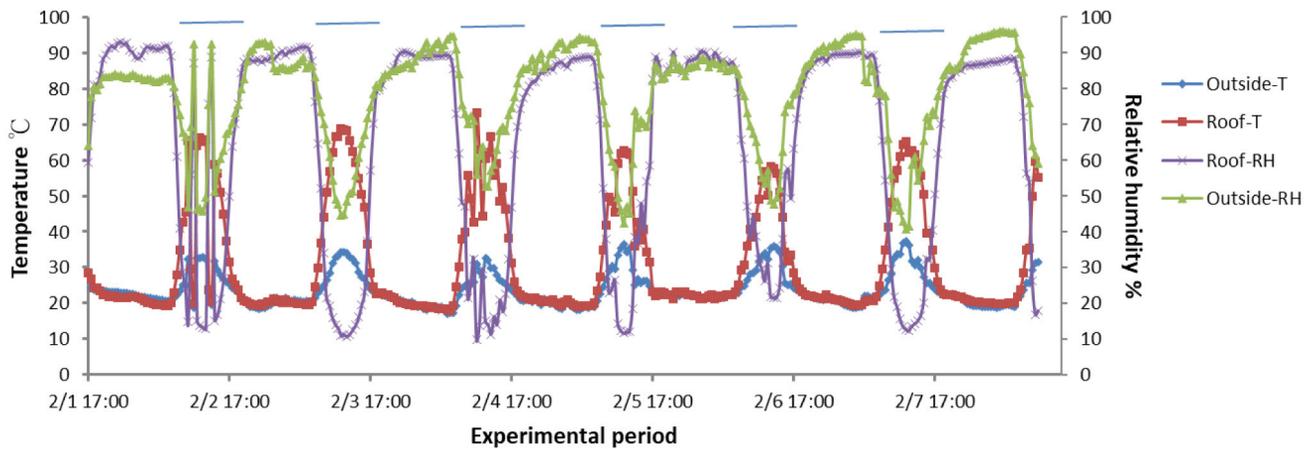


圖 3. 乾燥室內外溫濕度變化 (7 天)。T = 溫度 (°C)、RH = 相對濕度 (%)。圖中線段表示日間時間。

Fig. 3. The changes of temperature and relative humidity at outside and roof of the solar dryer during 7 days of experimental period. T = temperature (°C), RH = relative humidity (%), the line segment in the figure represents the day time.

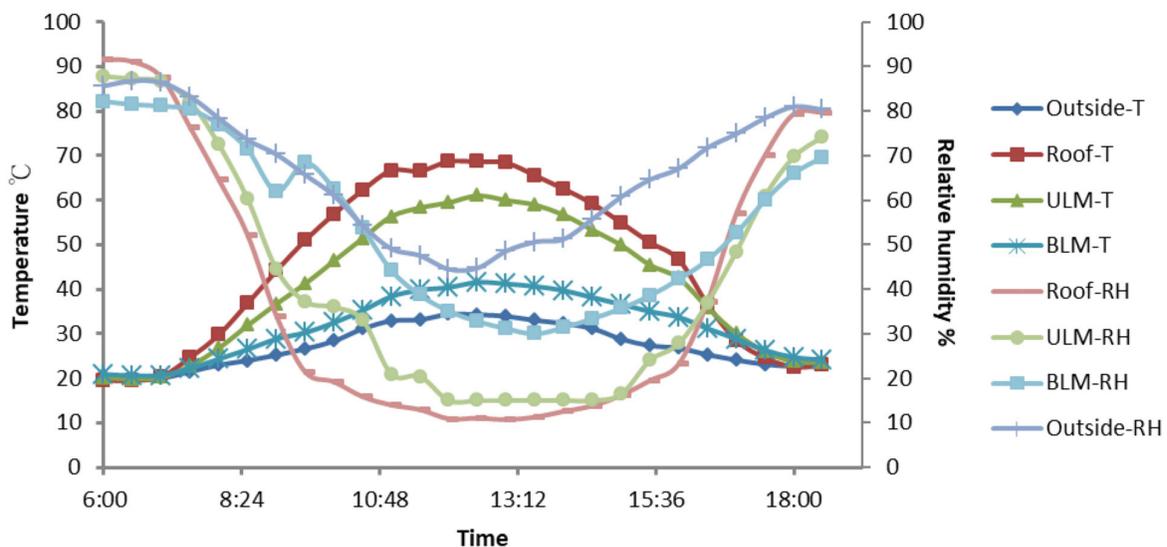


圖 4. 乾燥室不同位置之溫濕度變化 (12 小時—白天)。T = 溫度 (°C)、RH = 相對濕度 (%)。

Fig. 4. The changes of temperature and relative humidity at different locations of the solar dryer observed in 12 hours at day time. T = temperature (°C), RH = relative humidity (%), ULM: upper layer in middle section of dryer, BLM: bottom layer in middle section of dryer.

#### IV. 乾燥測試與效率比較

乾燥室的乾燥作業是依靠室內的高溫、低濕環境來促使牧草內的水分排出，如前所述，乾燥室內不同空間位置的溫、濕度條件是不均勻的(圖4)，由牧草乾燥作業實測的結果也顯示不同空間位置的乾燥速率也是不均勻的，然而乾燥的均勻度會影響批次乾燥的時間，必須在最低效率處完成乾燥才可視為整批乾燥完成。

為改善乾燥效率與均勻度，本乾燥室設計於乾燥室後端裝設送風系統，引導熱空氣循環及排濕，並進行啟動與不啟動送風系統的乾燥效率比較。圖5為不送風與送風狀況下，上層架首蓆在前、中、後段的含水率變化，不送風組的前段水分散失快而後段慢，區段間乾燥速率的差異較大；而送風的狀況下，中、後段的乾燥效率提高，區段的差異明顯降低，減少乾燥度不一的問題。

表1為統整四批次首蓆乾燥調查之乾燥速率參數，取樣點組成上、中、下層之前、中、後段共9個位置。不送風的情況下，乾燥室內各位置的差異大，二批次的乾燥速度變異範圍分別為1.4 – 5.4%/h與3.5 – 7.7%/h，平均乾燥率分別為2.9%/h與5.7%/h，變異係數為46.2%與25.5%；而送風的情形下，由變異範圍收窄

到 5.2 – 7.0%/h 與 5.5 – 6.7%/h，平均乾燥率均為 6.1%/h，變異係數為 14.0% 及 9.8%，顯示送風系統啟動後乾燥速率提升，而各位置間的變異性顯著降低，顯示送風系統對太陽熱能乾燥室均勻度與效率提升的重要性。

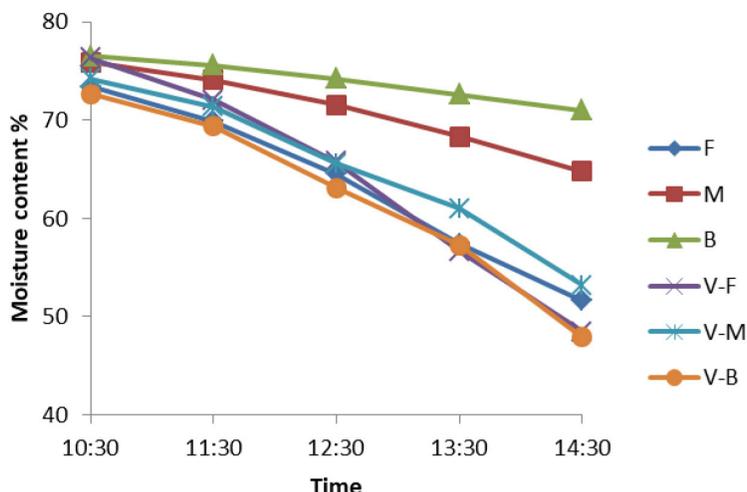


圖 5. 苜蓿在不通風與通風下的含水率變化。F 上層前段；M 上層中段；B 上層後段。V-F、V-M 及 V-B 為通風下前段、中段及後段。

Fig. 5. The changes of moisture contents of alfalfa under ventilated and non-ventilated conditions. F = front section of top layer, M = middle section of top layer, B = back section of top layer; V-F, V-M, V-B = front, middle and back section of top layer under ventilated condition.

表 1. 不通風與通風下苜蓿於乾燥室之乾燥速率平均值與變異性

Table 1. The means and variations of drying rates for alfalfa dried in the solar dryer under non-ventilated or ventilated condition

	Sample no.	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation
		----- %/h -----				
Non-ventilation-1	9	1.4	5.4	2.9	1.4	46.2
Non-ventilation-2	9	3.5	7.7	5.7	1.4	25.5
Ventilation-1	9	5.2	7.0	6.1	0.9	14.0
Ventilation-2	9	5.5	6.7	6.1	0.6	9.8

太陽熱能幾乎可以視之為不竭的能源，在今日全球倡議節能減碳的此時，重新考量其應用性具有相當重要的意義。Belessiotis and Delyannis (2011) 與 VijayaVenkataRaman *et al.* (2012) 回顧太陽乾燥設施的發展並討論其應用性，表示利用溫室聚集太陽熱能是一種相當節能的乾燥方式，但效率會受制於設置區域的氣候條件及設計，另方位、通風、貯能等均有影響。以太陽熱能乾燥牧草之前人研究較有限，Arinze *et al.* (1999) 開發可容納 130 個小型方包乾草之太陽能乾燥設施，苜蓿草包含水率由 33% 降至 13% 需 4 天，由 25% 降至 11% 需 3 天，入料之厚薄、密度及水分都影響乾燥效率。本試驗同樣顯示實際的乾燥條件受天氣的影響明顯。實際操作下乾燥完成時間介於 1.5 – 3.5 天。

節能減碳是太陽熱能乾燥的極大優點，但同時也具有易受限於氣候影響的缺點，本研究進行期間即發現晴天的乾燥效率極佳，陰天或雨天時則會延長乾燥時間。氣候因子的影響雖無可避免，但可以利用調整設計為合併太陽熱能與輔助加熱設備來改善 (Jha and Tripathy, 2021)。

## 結 論

本試驗依前人研究與乾燥原則，開發適用於牧草之散裝薄層較快速乾燥設施。由試驗結果顯示，畜試所開發之牧草乾燥室能有效利用太陽熱能進行牧草乾燥，晴天日照下乾燥室內呈現高溫、低濕環境，可以迅速地降低牧草含水率，乾燥時間為 8 – 12 小時，過程中除風扇電力外，可以完全不需人工能源，是非常節能的設計，此外，乾

燥層架設計為網格狀、可翻轉並搭配輸送機以提高進出料效率。本乾燥室的批次處理量為 1,000 – 1,200 kg 鮮草，如以 1,000 kg 含水率 80% 的鮮草乾燥至 15% 估算，過程中需去除 764 kg 的水分，由經濟部能源局案例資料，熱風乾燥機蒸發每公斤水分的耗能為 1,300 Kcal，每度電的單位熱值為 860 Kcal/度，效率為 0.9，換算有效熱值為 774 Kcal (860 × 0.9)，因此如果以電熱乾燥將耗電千度以上 ( $1,300 \text{ (Kcal/kg)} \times 764 \text{ (kg)} \div 774 \text{ (Kcal/度)} = 1,283 \text{ (度)}$ )，相當於排放 786 kg 之二氧化碳當量 (每度電 0.612 kg CO<sub>2</sub>e)，而本設施的主要耗能只有風扇，風扇的實測耗電量為 0.66 度/小時，即使連續操作 12 小時，消耗電能僅 7.92 度，相當於排放二氧化碳當量 4.84 kg，兩相比較之下，本設施可以較電熱乾燥節省 99% 的能源消耗與碳排放 ( $1 - 7.92/1283 = 99\%$ )。此外，本乾燥系統設計包含輸送設備，可以半自動化進行牧草進料、乾燥及出料作業，增加作業效率與方便性，適合於批次 1,000 kg 等較小規模的優質牧草乾燥，可以應用於實驗動物與寵物級的乾草生產。

## 參考文獻

- 王紓愨、劉信宏、游翠凰、陳嘉昇。2019。不同調製方式國產苜蓿之山羊適口性比較。畜產研究 52：146-152。
- 陳嘉昇、王紓愨。2005。盤固草試管真消化率的變動與預測。畜產研究 38：197-207。
- 陳嘉昇、王紓愨。2012。青割玉米營養成分的變動與相關性探討。畜產研究 45：287-302。
- 陳嘉昇、王紓愨、游翠凰、李璟好。2018。牧草適口性探討：II. 草種、乾燥度與調製法對山羊適口性的影響。中國畜牧學會會誌 47：197-207。
- 陳嘉昇、黃永芬、游翠凰、王紓愨。2021。芻料燕麥營養成分變動之探討。畜產研究 54：116-125。
- Arinze, E. A., G. J. Schoenau, and S. Sokhansanj. 1999. Design and experimental evaluation of solar dryer for commercial high-quality hay production. *Renew. Energy* 16: 639-642.
- Bal, L. M., S. Satya, and S. N. Nail. 2010. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14: 2298-2314.
- Belessiotis, V. and E. Delyannis. 2011. Solar drying. *Sol. Energy* 85: 1665-1691.
- Fonnesbeck, P. V., M. M. Garcia De Hernandez, J. M. Kaykay, and M. Y. Saiady. 1986. Estimating yield and nutrient losses due to rainfall on field-drying alfalfa hay. *Anim. Feed Sci. Tech.* 16: 7-15.
- Jha, A. and P. P. Tripathy. 2021. Recent advancements in design, application, and simulation studies of hybrid solar drying technology. *Food Eng. Rev.* 13: 375-410.
- Rees, D. V. H. 1982. A discussion of sources of dry matter loss during the process of haymaking. *J. Agric. Engin. Res.* 27: 469-479.
- Rotz, C. A. and R. E. Muck. 1994. Changes in forage quality during harvest and storage. In *Forage quality, evaluation and utilization*. ed. Fahey, Jr. G. C. American Society of Agronomy, Inc. Crop Science Society of America, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA pp. 828-868.
- Sharma, A., C. R. Chen, and N. V. Lan. 2009. Solar-energy drying system: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13: 1185-1210.
- Tiris, C., N. Ozbaita, M. Tiris, and I. Dincer. 1995. Thermal performance of a new solar air heater. *Int. J. Heat Mass Transf.* 22: 411-423.
- VijayaVenkataRamana, S., S. Iniyan, and R. Goic. 2012. A review of solar drying technologies. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 16: 2652-2670.

# Development of the drying room by solar thermal energy for hay production <sup>(1)</sup>

Shu-Min Wang <sup>(2)(3)</sup> Hsin-Hung Liu <sup>(2)</sup> Tsui-Huang Yu <sup>(2)</sup> and Chia-Sheng Chen <sup>(2)</sup>

Received: Aug. 5, 2022; Accepted: Mar. 9, 2023

## Abstract

The purpose of this study was to develop an energy-saving drying system for hay production by taking into account the forage quality and the energy efficiency. Solar thermal energy was a rich and green energy and was the major energy used in this drying system to reduce fossil energy and electricity consumption. From the result of drying simulation by laboratory oven, it showed that the moisture content of fresh alfalfa thatch with 10 centimeter thickness could be reduced to a safe storage standard level with moisture content 15% after 8 hours drying at 50°C in the solar dryer. The prototype drying system was designed to include forage loading, drying and unloading systems, and could be operated by semi-automatic way. According to the records in the drying room, the temperature in the drying room could reach 50°C and the high temperature could last until 4:00 pm, when the outdoor temperature was 28°C at 9:00 am. The relative humidity was below 20% during this period. The design of air circulation and dehumidification devices could improve the uniformity of the indoor environment and increase hay drying efficiency. The average drying rate of alfalfa during the day could reach 6.1%/h. Compared with electric drying, the drying room could save 99% of energy consumption and reduce carbon emission. It was suggested that the solar dryer might have used solar thermal energy with high potential applied in producing high quality hay for pets and experimental animals.

Key words: Hay, Low-carbon energy, Solar drying.

---

(1) Contribution No. 2737 from Livestock Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

(2) Hengchun Branch, COA-LRI, Pingtung 94644, Taiwan, R. O. C.

(3) Corresponding author, E-mail: smwang@mail.tlri.gov.tw.