

圓包牧草乾燥機效能評估及與含水率、 重量關係之探討⁽¹⁾

陳嘉昇⁽²⁾⁽⁴⁾ 劉信宏⁽²⁾ 游翠凰⁽²⁾ 王紓愨⁽²⁾ 謝禮丞⁽³⁾

收件日期：112 年 8 月 21 日；接受日期：113 年 2 月 17 日

摘 要

為評估農業部畜產試驗所第三代圓包牧草乾燥雛型機(新型專利 M591608 號)之效能,探討牧草捆包乾燥所需之油耗與時間,本研究以圓形盤固草(*Digitaria decumbens* Stent.)草包為材料,進行不同調製條件的烘乾試驗,共計進行 14 批次,每批次 6 個草包,探討草包含水率、重量與乾燥效率的關係,並推估不同條件草包完成乾燥所需之油耗與時間。本研究參試材料各批次草包重量之平均值由 308.5 ± 9.4 kg 至 488.8 ± 23.5 kg,含水率由 16.0% 至 61.0%;乾燥時間由 4.3 至 37.4 hs,具廣泛的變異範圍,應足以進行研究目的之探討。參試方法為將 14 批測試依打包機械種類及有無導流,分為 Lely 組、Kuhn 組及無導流(No diversion, Nd)組,分組迴歸分析結果,Lely 組之每機組每小時耗油量、每小時蒸發水量及每公升柴油可移除水量分別為 5.03、43.10 及 8.6 L,Kuhn 組為 3.04、26.70 及 9.0 L。Lely 組與 Kuhn 組之油耗及蒸發水量與時間均有良好的線性關係,而 Lely 組耗油及水分蒸發量均比 Kuhn 組快,每公升柴油可移除水量則接近。無導流組效率低且變動關係不可預測(R^2 為 0.23)。合併 Lely 組與 Kuhn 組資料,以乾燥時間及草包重量為自變數對耗油量及蒸發水量進行複迴歸分析, R^2 分別為 0.96 及 0.90,可據以對不同條件草包所需乾燥時間及油料量進行預估,以含水率 30%、重量 340 kg 草包為例,乾燥至 12% 所需時間為 8.8 hs,每草包需耗 6.7 L 柴油。綜合上述結果,考量能源成本,以 40% 含水率以下的草包應用本乾燥系統較為適當。

關鍵詞：乾草、乾燥、圓形包,含水率。

緒 言

亞熱帶海洋性氣候是國內乾草生產面臨的基本問題,在牧草繁盛的多雨季節鮮有連續 4-5 天不降雨的機會,推遲收穫或乾燥不足衍生而來的老化與品質不穩定,減損其商品價值,讓國內存在已久的乾草產業受限,也讓國內草食動物業對進口乾草的依賴難以解除。

過去因國內、外乾草的價差小,經濟上缺乏後端加工的空間,而如今因人工及運輸成本增加,國內外牧草單價價差擴大,使收穫後機械乾燥的可行性浮現。因此,農業部畜產試驗所(以下簡稱畜試所)近年投入「乾草生產調製技術改良」,改良生產環節外,並與中興大學生物產業機電工程系合作研發牧草乾燥機組,以期在最低附加成本內完成乾草調製,克服生產限制。

乾燥機械的研發因生產條件而有不同的形式與效率,盧及陳(1997)曾研發散裝方式入料的連續式盤固拉草乾燥機,長 11.4 m、寬 3 m、高 2.3 m,以含水率 40 - 65% 原料,每小時可生產 540 kg 含水率 13% 之盤固草。Arinze *et al.* (1994) 設計一堆疊方型草包的乾燥設施,在 45°C 乾燥空氣之下,可將 40% 含水率的方包在 37 hs 內乾燥至含水率 15% 以下。Savoie and Descoteaus (2004) 開發一雙向熱風、適用中型方包的乾燥機械,可在 12 hs 內將初始含水率 30% 之草包乾燥至 12%。Carson and Kreider (1988) 乾燥 2 噸乾草需時 24 - 36 hs; Parker *et al.* (1992) 乾燥 4 - 8 公噸、密度 80 - 133 kg/m³ 方形包苜蓿需時 48 - 210 hs,但易發生不均勻及過度乾燥問題。因牧草體積大且單價不高,機械乾燥的效率與經濟性是產業應用的主要考量,散裝連續進料之設計高溫而快速,但進出料費工;批次捆包者乾燥速度慢但工序較簡,唯高密度者易有不均勻問題,不同研發設計各有優缺點,端視實務條件選擇。

(1) 農業部畜產試驗所研究報告第 2782 號。
(2) 農業部畜產試驗所南區分所。
(3) 國立中興大學生物產業機電工程學系。
(4) 通訊作者, E-mail: chencsg@mail.tlri.gov.tw。

牧草田間乾燥速度受日照強度、風速及大氣相對溼度影響 (Rotz and Muck, 1994; Digman *et al.*, 2011; Undersander and Saxe, 2013)，此外，牧草長短及剪草機種類也影響乾燥速度，朱等 (2017) 調查長草區、短草區以圓盤或調製型割草機刈割，於田間萎凋 30 hs 後之乾物率分別為 33.9、23.4、34.6 及 27.3%，調製型割草機能夠折斷草莖，使其較圓盤型割草機刈割之盤固草乾燥速度快。牧草刈割後的水分散失可大分為三階段，第一階段是剪草 (含水率約 80%) 至含水率 60% 左右，水分主要由葉面的氣孔蒸散 (刈割時氣孔是開啓的)，此時水分散失的速度最快；第二階段約略是含水率 60 至 25%，水分由葉面的氣孔及莖的斷面散出，由於氣孔逐漸關閉，水分散失的速度變慢；第三階段是含水率 25% 以下，由於膨壓降低使氣孔完全關閉，植體水分只能透過莖部角質層緩慢蒸發 (Undersander and Saxe, 2013)。而第三階段就是乾燥速度最慢，難以掌握天候的高風險時段。基於風險與成本考量，本乾燥機組定位在以人工乾燥補足田間乾燥，刈割後先於田間乾燥 1 – 2 天，當牧草含水率降至 35 – 25% 時，整捆草包上機，以簡化工序與節約廠房面積，再以導流設計減少熱氣損失，以將能源成本控制在較低範圍 (盧，2018；廖，2019)。

本研究以 14 批次 (每批 6 個) 的圓形盤固草包為材料，探討本雛型機 (圖 1) 之乾燥效能，及草包含水率、重量與乾燥效率的關係，並進一步推估不同含水率、重量之草包完成批次乾燥調製所需之油耗與時間，以做為產業界運用之參考。

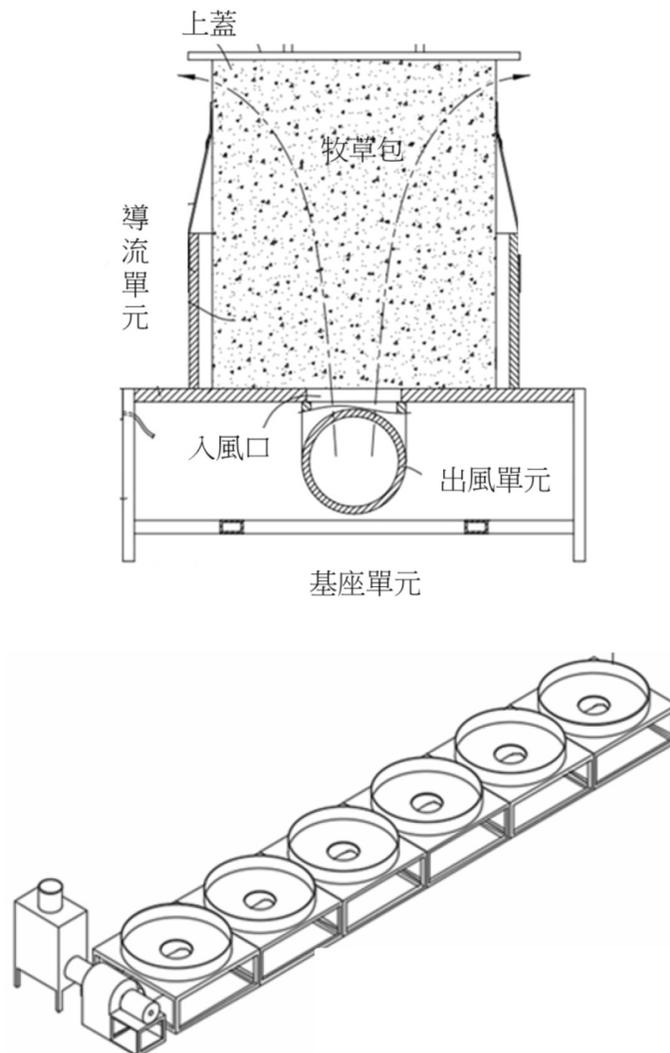


圖 1. 圓包乾燥機之基座單元 (上)，由熱風爐、加壓風機及六個基座單元串聯之機組示意圖 (下)。

Fig. 1. Diagram of round bale dryer (lower) composed by six units of stand (upper), heater, and pressurized fan.

材料與方法

I. 乾燥設備

本測試對象之乾燥機組為設置於畜試所南區分所之第三代雛型機 (圖 1，新型專利 M 591608 號)。乾燥機

組每批次可乾燥 6 個圓型草包，單元機座及機組串接模式，包含：(i) 柴油熱風爐：熱出力 60 kw/h、三相電壓 220 v、最高使用溫度 75°C。(ii) 加壓風機：進氣口與熱風爐熱風出口連接、額定功率 15 KW、三相電壓 220 v、風壓 220 m³/min、靜壓 280 MMAQ 以上，風機出風口與基座單元連接直徑 40 cm。(iii) 六孔基座：每孔基座約為 2.56 m²，與加壓風機出口連接、下方通氣出風單元直徑 40 cm，基座單元之間的出風單元相連串接。在基座平面上定位筒直徑 150 cm、高 50 cm、厚 0.4 cm，定位筒與入風口同中心點。外圍設置包覆氣密軟導流帳。

II. 田間乾燥與捆包

以南區分所多年生草地之盤固草為材料，單次割草面積 2 – 10 公頃，為模擬可能的批次間不同草包密度與含水率，每批次田間作業條件不一：i. 刈割後田間萎凋時間分別由 6 至 60 hs；ii. 翻草或無翻草；iii. 打包機：分別以 Lely RP245 (寬 123 cm、直徑 110 cm)、Kuhn FB3135 (寬 122 cm、直徑 120 cm) 二廠牌打包機進行捆包。捆包前取樣測定牧草含水率 (80°C 烘乾 48 小時)，捆包後每草包分別秤重，隨即上機進行乾燥。本盤固草乾燥測試共進行 14 批次，每批次 6 個乾草包，其中以 Lely RP245 機型捆包 9 批次，以 Kuhn FB3135 機型捆包 5 批次，上機前之初始含水率介於 46 – 18% (表 1)。試驗期間為 111 年 1 月至 112 年 4 月。

表 1. 批次測試之草包重量、時間、耗油量及含水率

Table 1. Weight of bale, operation time, consumed diesel oil, and moisture for the 14 tested batches of round bales

Batch no.	Baler brand	Air diversion	Initial wt./bale	End wt./bale	Time	Disel/set	Initial moisture	End moisture
			kg	kg	h	L	%	%
1	Lely	Yes	413.3 ± 12.2	282.5 ± 15.6	19.5	90.8	37.0	8.7 ± 2.9
2	Kuhn	Yes	324.7 ± 5.7	295.6 ± 6.3	4.3	19.5	18.9	10.6 ± 0.6
3	Lely	Yes	488.8 ± 23.5	204.5 ± 20.3	37.4	193.0	61.0	7.2 ± 4.5
4	Kuhn	Yes	441.4 ± 6.2	318.4 ± 6.8	24.0	73.5	35.6	10.8 ± 1.8
5	Kuhn	Yes	462.2 ± 4.6	330.8 ± 15.6	32.5	95.1	35.0	10.0 ± 3.5
6	Kuhn	Yes	375.5 ± 1.4	326.0 ± 10.5	9.5	31.7	21.5	9.7 ± 0.4
7	Lely	Yes	308.5 ± 9.4	264.1 ± 4.7	8.3	27.4	25.4	12.4 ± 2.1
8	Kuhn	Yes	393.4 ± 9.4	292.7 ± 21.7	23.3	72.8	32.1	8.5 ± 1.6
9	Lely	Yes	313.5 ± 6.5	257.8 ± 4.6	7.0	37.5	26.2	10.0 ± 1.1
10	Lely	Yes	349.1 ± 8.0	245.6 ± 6.3	17.0	88.6	34.5	6.1 ± 3.1
11	Lely	No	321.5 ± 9.5	282.3 ± 7.2	21.6	93.7	30.2	20.3 ± 2.5
12	Lely	No	350.0 ± 9.1	292.8 ± 7.6	20.3	97.3	23.9	9.1 ± 1.5
13	Lely	No	320.5 ± 13.5	256.0 ± 13.0	19.3	79.3	22.3	8.0 ± 1.2
14	Lely	No	343.8 ± 15.9	313.6 ± 16.3	10.0	45.8	16.0	7.7 ± 0.4

III. 圓包批次乾燥

每批次 6 個乾草包，以天車吊掛置於乾燥機臺進行機械烘乾。機組熱風溫度設定 50°C、風量 220 m³/min。14 批次中，僅第 11 批次未完成乾燥即關機外，其餘均以熱像儀 (FLIR TG165) 偵測草包各部位熱風通氣均勻後，確認完成乾燥再予以關機。以 Lely 捆包者之其中 4 批次未使用導流裝置 (no diversion, Nd)，其餘均使用導流裝置 (圖 1)，以比較導流裝置效果。分別於烘乾前、後取樣測定含水率，並紀錄柴油消耗量與乾燥時間，進行乾燥成本估算。

IV. 統計分析

- (i) 組間差異比較：以打包機型與有無導流將 14 批次分為 3 組：Lely 組 (Lely 打包機有導流)、Kuhn 組 (Kuhn 打包機有導流) 及 Nd 組 (no diversion, Lely 打包機無導流)，以 SAS (SAS, 2002) 進行單因子變方分析，主效應為固定型，組間平均值 F-test 以 SAS 之 GLM (general linear model) 進行，以鄧肯氏法測驗 (Duncan's test)，比較處理間的差異顯著性。
- (ii) 乾燥時間與耗油量、蒸發水量的關係探討：由前述 3 組資料各別進行，以 Excel 軟體進行耗油量與乾燥時間、蒸發水量與乾燥時間及耗油量與蒸發水量間的單因子迴歸分析及趨勢線；繼而以 Lely 組及 Kuhn 組分別進行乾燥時間、蒸發水量與草包上機前初始含水率間之單因子迴歸分析及趨勢線。

- (iii) 完成乾燥所需時間及耗油量的推估：合併 Lely 組及 Kuhn 組資料，進行以乾燥時數及草包重量兩因子為自變數，耗油量及蒸發水量為隨變數之複迴歸分析，再進行以初始含水率及草包重量兩因子為自變數，達 12% 含水率所需時間及耗油量為隨變數之複迴歸分析。二因子複迴歸分析以 SAS(SAS, 2002) 之 GLM/REG(regression) 程式進行。

結果與討論

參試 14 批草包依試驗日期先後編號，其草包初始重量、乾燥後重量、含水率、所需乾燥時間及機組耗油量如表 1。每批草之 6 個草包間重量存在差異，各批次草包初始重量之平均值由 308.5 ± 9.4 至 488.8 ± 23.5 kg，初始含水率由 16.0 至 61.0%；所需乾燥時間由 4.3 至 37.4 hs，每批 (6 個) 草包之耗油量由 19.5 至 193.0 L，乾燥後草包重量 204.5 ± 20.3 至 330.8 ± 15.6 kg；乾燥後含水率除第 11 批為 20.3%，其餘均在 6.1 – 12.4% 之間，屬過度乾燥狀況。本研究之 14 批測試材料具廣泛的變異範圍，適宜進行乾燥效能與變異因素間關係的探討。

I. 組間差異比較

由 Kuhn 機型打包之草包較 Lely 打包者直徑大 10 cm，Kuhn 機型打包之草包乾燥後重量 292.7 – 330.8 kg，高於 Lely 之 204.5 – 313.6 kg，同機型內重量差異亦大，乃由於田間狀況及打包機密度調整之故。兩機型之草包重量有差異，但密度平均值分別 214.8 及 224.9 kg/m³，並無顯著差異 (表 2)。

表 2. 分為三組乾草包所蒸發之水量、乾燥後密度，每小時油量、乾燥效率及每公斤乾草之所需油量

Table 2. Water evaporated, bale density, diesel oil consumed per hour, drying efficiency, and diesel oil per kg hay for the three groups of batches

Group	Batch no.	Water evap./bale L	Bale den-sity kg/m ³	Disel/hr/bale L	Wa-ter/hr/bale L	Water/ Disel L	Disel / hay kg L
Lely	1	130.8 ± 8.7	241.8	0.79	6.7	8.5	0.054
	3	284.3 ± 14.6	226.1	0.86	7.6	8.8	0.157
	7	43.5 ± 7.5	175.1	0.55	5.3	9.5	0.017
	9	55.7 ± 4.1	220.7	0.89	7.9	8.9	0.024
	10	103.5 ± 10.2	210.3	0.86	6.1	7.1	0.060
	mean		214.8	0.79 ^a	6.7 ^a	8.6 ^a	
Kuhn	2	29.1 ± 1.3	229.1	0.76	7.9	8.9	0.011
	4	123.0 ± 6.9	237.9	0.53	5.1	9.7	0.038
	5	131.4 ± 12.6	234.5	0.48	4.0	8.4	0.048
	6	49.5 ± 1.7	212.6	0.55	5.2	9.5	0.016
	8	100.7 ± 7.2	210.5	0.52	4.3	8.3	0.041
	mean		224.9	0.57 ^b	5.3 ^b	9.0 ^a	
No diversion	11	39.2 ± 3.0	241.5	0.72	1.8	2.5	0.055
	12	57.2 ± 7.6	250.6	0.79	2.8	3.6	0.055
	13	65.4 ± 5.6	219.8	0.69	3.4	4.9	0.052
	14	30.2 ± 2.5	268.5	0.76	3.0	4.0	0.024
	mean		245.0	0.74 ^a	2.8 ^c	3.8 ^b	

為初步探討草包大小、含水率、是否導流等變動因子與油耗、時間之關係，將 14 批次測試分為 Lely 組、Kuhn 組及 Nd 組，其中 Nd 組均由 Lely 機型所打包，各組測試結果如表 2。由每草包蒸發之水量計算每草包、每小時之蒸發水量，Lely 組平均為 6.7 L，顯著高於 Kuhn 組之 5.3 L，也高於 Nd 組之 2.8 L，表示草包輕者水分散失較快，而無導流者失水速度不及有導流者之半。每小時之油耗量則 Lely 組 (0.79 L/bale) 與 Nd 組 (0.74 L/bale) 差異不顯著，但顯著高於 Kuhn 組 (0.57 L/bale)，表示每小時之油耗量可能與草包重量有關，而有無

導流並不影響每小時油耗量。再計算每公升柴油可蒸發水量，Lely 組平均為 8.6 L 與 Kuhn 組平均 9.0 L 間差異不顯著，而無導流者僅 3.8 L，顯示無導流者能源效率低落 (表 2)。

由上述結果，Lely 組與 Kuhn 組之每公升柴油可蒸發水量差異不顯著，但每小時之油耗量及每小時之蒸發水量有別，為定量油耗、時間、蒸發水量與初始含水率等之關係，本文繼而分組進行變數間之單因子迴歸分析。

II. 乾燥時間與耗油量、蒸發水量的關係

分三組個別探討乾燥時間與每機組油耗量的關係 (圖 2 上)，由設定截距為 0 之直線迴歸趨勢線可知 Lely 組之每機組油耗量為 5.03 L/h，Kuhn 組為 3.04 L/h， R^2 均高達 0.98，表示每小時的耗油量穩定，組間之差異可能為 Kuhn 組草包較重，風阻較大，因而減少單位時間的耗油量。Nd 組為 4.43 L/h，低於 Lely 組， R^2 亦達 0.94。

每小時之蒸發水量方面 (圖 2 下)，Lely 組每機組蒸發水量 43.10 L/h，Kuhn 組 26.70 L/h，Nd 組之速度慢，僅 15.79 L/h，且 R^2 極低 (0.29)。

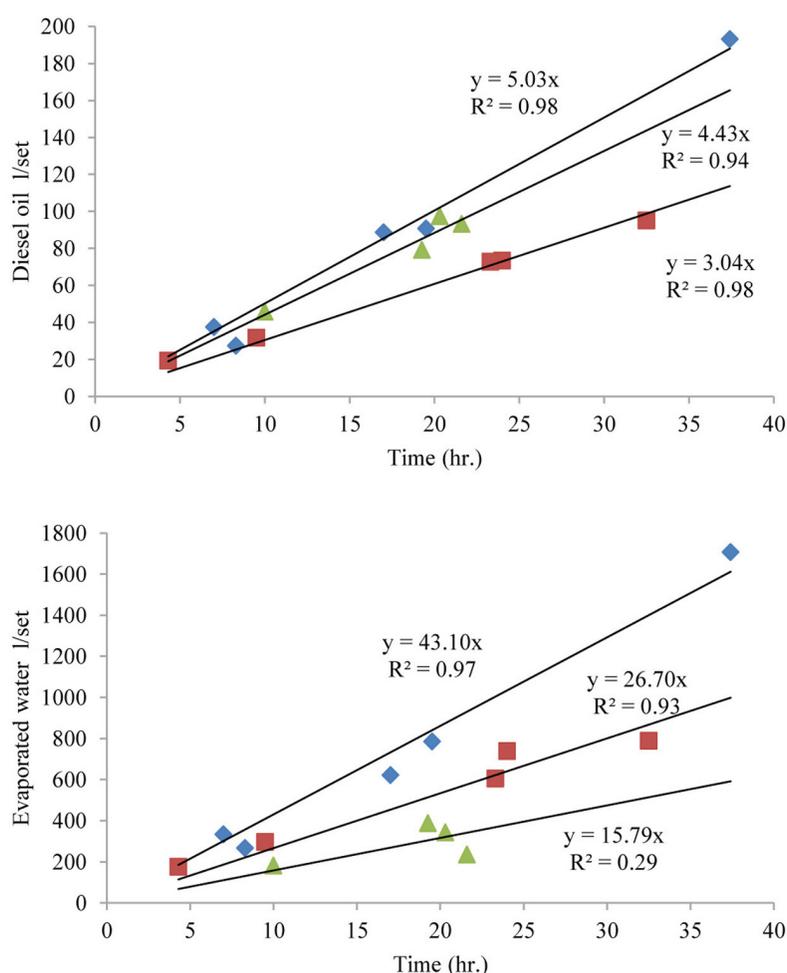


圖 2. 油耗量與水分蒸發量隨乾燥時間之直線回歸。◆ Lely ■ Kuhn ▲ Nd。

Fig. 2. The linear regression of diesel oil on operation time (upper) and evaporated water on operation time (lower). ◆ Lely ■ Kuhn ▲ Nd.

綜合上述結果，Lely 組與 Kuhn 組之油耗及蒸發水量與時間均有良好的線性關係，而 Lely 組耗油快，水分蒸發亦快；Kuhn 組耗油慢，水分蒸發亦慢。因此以油耗為因變數、蒸發水量為隨變數獲得迴歸線如圖 3。設定截距為 0，Lely 組每公升柴油可移除水分 8.56 L，Kuhn 組每公升柴油可移除水分 8.80 L，其間差異小，且 R^2 高達 0.98 及 0.96。Nd 組每公升柴油可移除水 3.55 L，且 R^2 極低 (0.23)，Nd 組效率低且變動關係不可控，結果如預期不具效率，擬不再進行後續探討。

III. 初始含水率與完成乾燥所需時間、耗油量的關係

初始含水率與完成乾燥所需時間亦有良好的線性關係，Lely 組與 Kuhn 組之 R^2 分別為 0.91 及 0.98，分組狀

況下，可據以概估完成乾燥所需時間 (圖 4 上)。初始含水率與耗油量的關係亦然，Lely 組與 Kuhn 組之耗油量與完成乾燥時間， R^2 分別為達 0.99 及 0.92 (圖 4 下)。此結果可知在 Lely 組與 Kuhn 組分別估算之下，由初始含水率即可概估完成乾燥所需時間及所消耗的油量，然為了能適用於一般性草包的預估 (而非特定機型的重量或體積)，機型所造成差異必須加入考量。

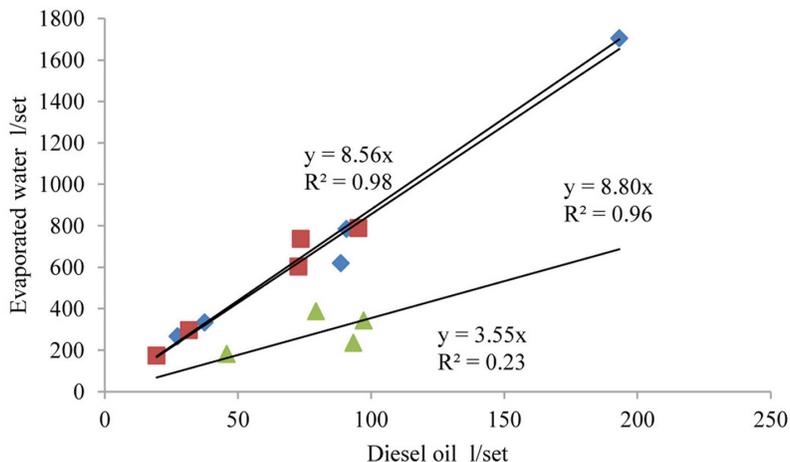


圖 3. 油料量與蒸發水量之關係。◆ Lely ■ Kuhn ▲ Nd。

Fig. 3. The linear regression of evaporated water on consumed diesel oil. ◆ Lely ■ Kuhn ▲ Nd.

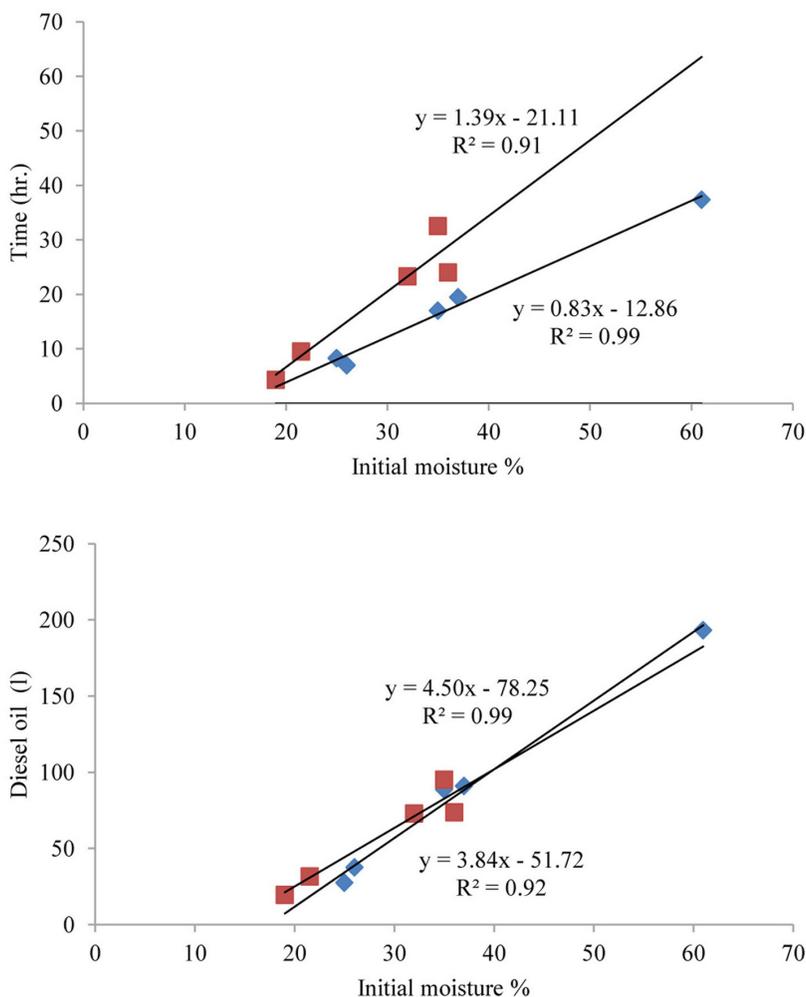


圖 4. 完成乾燥時間、耗油量隨初始含水率的直線迴歸。◆ Lely ■ Kuhn。

Fig. 4. The linear regression of operation time on initial moisture (upper) and consumed diesel oil on initial moisture (lower).
◆ Lely ■ Kuhn.

IV. 對完成乾燥所需時間及耗油量的推估

因此，本研究繼而合併組間資料，加入乾燥後草包重量為另一自變數進行複迴歸分析，以乾燥時間及草包重量對耗油量及水分蒸發量之複迴歸分析結果如表 3， R^2 分別為為 0.96 及 0.90，表示合併考量乾燥時間及重量變數後，對不同組間耗油量及水分蒸發量亦具充分之解釋力。

在實務作業上，初始含水率及初始重量為上機乾燥前所能獲得的數據，若可據以推估完成乾燥所需時間及所需耗油量將有助於排程及成本預估，本文續以初始含水率及重量為自變數，對達 12% 含水率所需時間及所需耗的油量進行複迴歸分析，結果如表 4， R^2 分別為為 0.89 及 0.95，表示由初始含水率及重量為已知變數，對乾燥所需時間及耗油量進行預測具可行性，而預估乾燥所需時間的誤差高於耗油量。

表 3. 以乾燥時數及草包重量兩因子為自變數，耗油量及蒸發水量為隨變數之複迴歸分析參數

Table 3. The estimates of multiple regression of diesel oil consumed and evaporated water on operation time and bale weight

Dependent Variable	R-Square	Parameter	Estimate	Standard Error
Disel oil	0.96	Intercept	130.59	29.21
		h	3.81	0.37
		wt	-0.45	0.09
Water	0.90	Intercept	1,068.92	410.39
		h	34.90	5.31
		wt	-3.67	1.35

表 4. 以初始含水率及草包重量兩因子為自變數，達 12% 含水率所需乾燥時數及耗油量惟隨變數之複迴歸分析參數

Table 4. The estimates of multiple regression of operation time to 12% moisture and diesel oil consumed on initial moisture and bale weight

Dependent Variable	R-Square	Parameter	Estimate	Standard Error
H	0.89	Intercept	-47.73	14.28
		moisture	0.968	0.13
		wt	0.11	0.039
Disel oil	0.95	Intercept	-70.08	43.57
		moisture	3.90	0.40
		wt	0.02	0.12

為便於概估以本乾燥機烘乾草包所需之油耗及時間，本文經迴歸式計算結果圖示不同初始草包重量下，及不同初始含水率下乾燥至 12% 含水率時所需之油量 (圖 5 上) 與乾燥時間 (圖 5 下)。以初始含水率 30%、初始重量 340 kg 草包為例，依圖 5 所示，乾燥至 12% 所需時間為 8.8 hs，每草包需耗 6.7 L 柴油；乾燥至 12% 的草包重 270 kg，以目前國內高級柴油每公升 27.7 元計，該商品乾草之每公斤乾燥油料成本為 0.71 元。

為節約能源成本，40% 含水率以下為本乾燥系統之較適初始含水率，在此含水率下，初始重量 500 kg 為目前國內機型之極限值，亦即圖 5 涵蓋國內乾草產業適用範圍。

臺灣的乾草事業一直受天候的干擾，雖近年國際乾草市場不穩定及國內外價差擴大，後端加工空間浮現，然人工乾燥仍應以節能及彈性為首要考量，因而本機組設計之初即定位在以人工乾燥補足田間乾燥，並以批次機組為單元，適用於自產戶及大面積的專業區，可隨規模增加機組。

牧草收割後於田間萎凋的初期水分蒸發快速，30 hs 含水率即可降至 25 – 30%，後期水分降低速度減緩，需要額外 2 – 3 d 才能降至安全含水率 (15 – 18%) 以下，而這額外 2 – 3 d 即為不可控風險之所在，也是乾草調製困難的主因。如圖 5 所示，初始重量 340 kg、初始含水率 30% 草包為例，乾燥至 12% 所需時間為 8.8 hs，每公斤乾草油料成本為 0.71 元；初始含水率 40% 者則需時 14 hs，每公斤乾草油料成本為 1.25 元，無法於一天

內完成兩次調製，且油料成本增加 76%。從割草日起一兩天內氣象預測準確度高於後三天，且連續 5 天無降雨之機率極低，割草後於田間曝曬 1 – 2 d 再打包運至廠房人工乾燥，不僅降低淋雨風險，使收穫排程順暢，且可善用田間萎凋、節約能源。

產能方面，本機組長 11 m，寬 1.6 m，高 2.3 m，批次可乾燥 6 個草包，總重量約 1,700 kg，本系統機組可依需要配置機組數，同時運作，且不須連續進料人工及乾燥後再打包之工序。四座機組可乾燥 24 個草包，重量 6,800 kg，適為國內目前慣用乾草貨車之裝載量，若待乾燥之草包數較多，一天兩批次運作或擴充機組數即可提高產能。

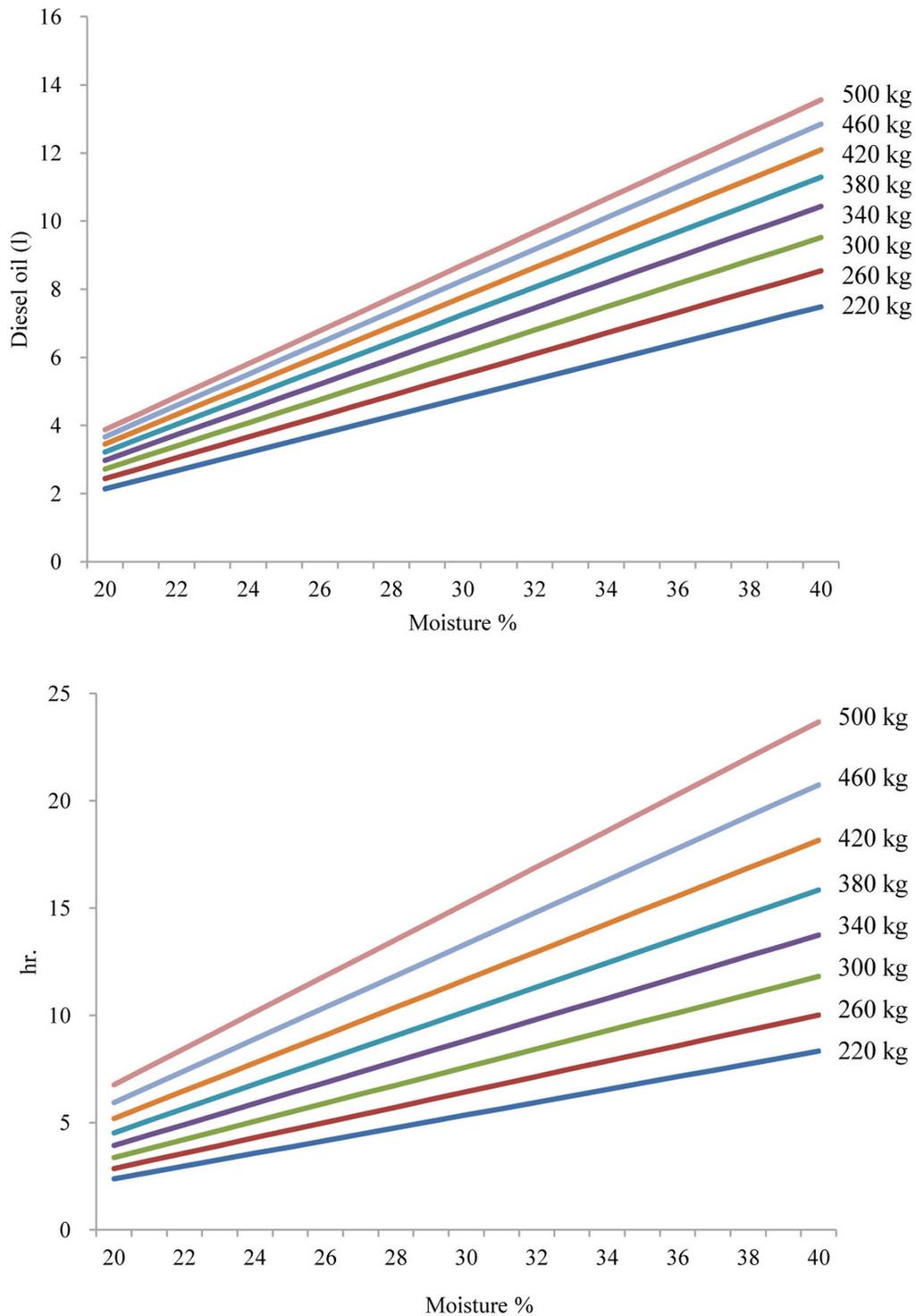


圖 5. 不同初始草包重量下，以不同初始含水率預估乾燥至 12% 含水率時所需之油量（上圖）與乾燥時間（下圖）。
Fig. 5. The predicted diesel oil consumed per bale (upper) and operation time by different initial moisture for the different initial bale weights (lower).

臺灣的乾草大都屬交易型，鬆軟草包不利裝載與運輸成本，然高密度草包有礙熱氣均勻傳導，導流裝置即為克服此問題而設計，此裝置不僅使乾燥均勻且減少乾燥過程熱空氣之流失，節約能源效果顯著。由試驗結果，Lely 組及 Kuhn 組每公升柴油可移除水量 8.56 及 8.80 L，且其直線迴歸之 R^2 高；Nd 組每公升柴油僅能移除水量 3.55 L，且 R^2 低，能源效率低且變動關係不可控。由此結果亦可知導流裝置的設計是本乾燥機組得以有效率運行的主要因素。

雖然一般狀況下，田間日曬萎凋 30 hs 含水率可降至 25 – 30%，然而受種種因素影響而有不小差異。草包重量亦然，不同機械間、鬆緊度的調整、乾草的粗細，都造成草包重量之差異。亦即實務上，批次草包間的重量及含水率不可避免的有一相當的變異範圍，因此本文乃涵蓋不同打包機型、重量、含水率，探討其影響因素與關係，並對不同草包條件乾燥所需時間及油料量等進行預估。為實務運作的需要，圖 5 提供由一個可能範圍已知條件所需乾燥時間及油料量的概估供參考。

具備生產「平價而優質」國產乾草的技術是筆者等執行「乾草生產調製技術改良」的總目標，除進行田間機械與倉貯改良的影響探討(朱等，2017；陳等，2021)，本乾燥機械的研發扮演一關鍵角色。本乾燥機由研發、改良至本文之測試與因素探討，驗證本機組可在「平價」之下完成乾草的調製，而「優質」則為本機組運作後的預期。因成熟度是影響牧草收穫前品質的最重要因素，不受天候干擾、不因延遲收穫而致過度老化是確保品質的第一步(陳及王，2005；陳等，2018)，而降低淋雨之可溶性物質流失，及因延長田間作業時間與乾燥度不足的微生物繁衍，均有助於維持營養價值；此外，減少陽光曝曬可使牧草不過度褪色，烘乾使產生更濃草香味等，均有助提高商品價值。從另一層面看，人工乾燥的導入克服純日曬的困難，讓禾豆混植、苜蓿、燕麥等高營養價值草種有機會成為國內可產業化的乾草。

結 論

本研究顯示畜試所第三代圓包牧草乾燥雛型機(新型專利 M 591608 號)之應用對生產「平價優質」國產乾草具關鍵性，以 40% 含水率以下的草包應用本乾燥系統，為平衡乾草品質與考量能源成本的適當選擇。

參考文獻

- 朱明宏、張敏郎、劉信宏、游翠鳳、陳嘉昇。2017。耙式調製型割草機利用於盤固乾草生產之評估畜產研究。50：78-85。
- 陳嘉昇、王紓愨、游翠鳳、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、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、劉信宏、游翠鳳。2021。乾草倉儲通風改良對梅雨期盤固草圓形乾草包去濕效果測試。畜產研究 54：250-258。
- 廖翊丞。2019。捆裝牧草乾燥設備之研究。中興大學生物產業機電工程學研究所，碩士論文，臺中。
- 盧琛。2018。牧草圓包乾燥設備之自動化裝置與熱源供應系統研究。中興大學生物產業機電工程學研究所，碩士論文，臺中。
- 盧福明、陳育修。1997。連續式盤固拉草乾燥機之研究。農業機械學刊 6：29-40。
- Arinze, E. A., S. Sokhansanj, G. J. Schoenau and F. G. Trauttmansdorff. 1994. Design, evaluation and optimization of a heated-air batch hay dryer operated with automatic bale wagon. ASAE Paper No. 94-6033. St. Joseph, MI: ASABE.
- Carson, J. L. and B. J. Kreider. 1988. Forced heated air drying of hay. ASAE, St. Joseph, MI, Paper No. 88-6583.
- Digman, M., D. Undersander, K. Shinnors, and C. Saxe. 2011. Best practices to hasten field drying of grasses and alfalfa. University of Wisconsin-Extension. <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0145/8808/4272/files/A3927.pdf>.
- Parker, B. F., G. M. White, M. R. Lindley, R. S. Gates, M. Collins, S. Lowry, and T. C. Bridges. 1992. Forced-air drying of baled alfalfa hay. Transactions of the ASAE 35(2): 607- 615.
- Rotz, C. A. and R. E. Muck. 1994. Changes in forage quality during harvest and storage. In: Forage quality, evaluation, and utilization, Eds. G. C. Fahey, Jr. *et al.* Am. Soc. Agron., Madison, WI. pp. 828-868.
- SAS. 2002. SAS version 9.00. Statistical Analysis Institute, Inc., Cary, N.C. USA.

- Savoie, P. and S. Descôteaux. 2004. Artificial drying of corn stover in mid-size bales. *Canadian Biosystems Engineering /Le génie des biosystèmes au Canada*. 46: 2.25-2.34.
- Undersander, D. and C. Saxe. 2013. Field drying forage for hay and haylage. Univ. of Wisconsin Coop. Ext. Focus on Forage. <https://fyi.extension.wisc.edu/forage/files/2014/01/SwathDrying-FOF.pdf>.

Performance evaluation of the round bale hay dryer and investigating its relationships to moisture content and bale weight ⁽¹⁾

Chia-Sheng Chen ⁽²⁾⁽⁴⁾ Hsin-Hung Liu ⁽²⁾ Tsui-Huang Yu ⁽²⁾
Su-Min Wang ⁽²⁾ and Li-Cheng Hsieh ⁽³⁾

Received: Aug. 21,2023; Accepted: Feb. 17,2024

Abstract

In this study, 14 batches of 6 round bales of pangolagrass (*Digitaria decumbens* Stent.) were used as materials to evaluate the drying performance of the new hay dryer, and to investigate the relationships between the moisture content, weight and their drying efficiency. Oil consumption and time required for the completion of drying the bales of different conditions were further estimated. The test batches had a wide range of variation, with initial weight ranged from 308.5kg to 488.8kg, initial moisture content ranged from 16.0 to 61.0%, and the required drying time ranged from 4.3 to 37.4 hours. The 14 batches were divided into Lely group, Kuhn group and non-diversion (Nd) group according to baler and air diversion. The results of regression analysis showed that the fuel consumption per hour of the batch, the evaporated water per hour and the removed water per liter of diesel oil in the Lely group were 5.03, 43.1 and 8.56 liters, respectively. While in Kuhn group were 3.04, 26.7 and 8.80 liters, respectively. The fuel consumption and evaporated water volume had a good linear relationship with time in both the Lely group and the Kuhn group. While fuel consumption and water evaporated in Lely group were faster than those in Kuhn group, and the water that can be removed per liter of diesel oil were near. The Nd group was inefficient and the relationships between factors were unpredictable. Then, the data of Lely group and Kuhn group were combined, and the drying time and bale weight were used as independent variables to conduct a multiple regression analysis on the fuel consumption and evaporated water. The R^2 of the regressions were 0.96 and 0.90 respectively, which could be used to estimate the drying time and diesel oil required for bales of variable conditions. Taking bales with an 30% initial moisture content and an initial weight of 340kg as an example, it takes 8.8 hours to dry to 12% of moisture, and each bale consumes 6.7 liters of diesel oil. Considering the energy consumed, bales with initial moisture content below 40% are suggested for this drying system.

Key words: Hay, Drying, Round bale, Moisture content.

(1) Contribution No. 2782 from Taiwan Livestock Research Institute (TLRI), Ministry of Agriculture (MOA).

(2) Southern Region Branch, LRI, Pingtung 94644, Taiwan, R. O. C.

(3) Department of Bio-industrial Mechatronic Engineering, National Chung Hsing University, Taichung 402202, Taiwan, R. O. C.

(4) Corresponding author, E-mail: chencsg@mail.tlri.gov.tw.