

木耳機械化乾燥方式之研究

A Study of Drying Jew's Ear

國立臺灣大學農機系講師

李庭槐

Ting-Whai Lee

摘 要

本省木耳價值高，外銷量亦逐年增加。以熱風乾燥木耳，可提高木耳之品質，並可增加外銷之潛力。

本研究係以棚架式熱風乾燥機之模型進行木耳之乾燥試驗。每隔兩個小時交替送風方向。熱風溫度分別為 40°C, 50°C 及 60°C。風量為 1.5 CMM。試驗結果顯示，60°C 熱風乾燥木耳所需之時間為 50°C 熱風乾燥所需時間之一半，而品質則一樣優良。

又比較垂直送風與平行送風兩種不同之乾燥方式，在同樣的溫度下，各層木耳乾燥之結果皆一樣均勻。而垂直交替送風乾燥所需時間較少，相對所需能源也減少。

Summary

A tray-dryer model was used for the study of Jew's ear drying. The results of the tests shows that the drying rate varies with air temperature. Jew's ear with 85% initial moisture content was dried to 15% moisture content within 7 hours with 60°C hot air, while 12 hours is needed with 50°C and 16 hours with 40°C hot air.

The vertical cross air flow with changing direction every two hours gives better drying result in each layer.

一、前 言

木耳生於朽木上，形狀像動物的耳朵因以得名。英文名 Jew's Ear⁽¹⁾。分佈於我國及日本。木耳含有人體所需要的膠質、蛋白質、無機鹽類及磷質。無特殊的氣味，可配合於任何菜肴中。以往都野生於山林中，由農家採摘出售，數量不多而且種類、品質及大小不一，價格無法穩定。近年來由於品種改良成功，用鋸木屑（俗稱太空包）栽培法可大量生產。除了供應國內市場外，並有大量外銷。根據統計，民國六十九年全省乾木耳之產量約五千公噸，值新臺幣十一億元。另根據海關資料，民國六十八年臺灣黑木耳之出口量為 472,870 公斤，值臺幣 68,149,000 元。六十九年之出口量為 418,038 公斤，值 82,551,000 元⁽²⁾。顯見木耳在內外銷市場上

都有相當雄厚的潛力。因此，必須採用現代化之栽培管理才能提高產量，確保品質。

本省氣候非常適合木耳之栽培，從農曆二月到十一月都能生長，新採收的木耳其水分含量約在 75% 到 85% 之間。由於水分含量高，如果不能及時送交市場批售，即必須立刻加以乾燥處理。否則很快即腐爛生霉，造成重大的損失。

木耳的菌傘表面有白色的茸毛，乾燥前必須先用水洗去茸毛再行乾燥。所以一般木耳在進行乾燥前，其初期含水率多高達 85% 以上。傳統的乾燥方法仍然以日晒為主。利用日光曝曬木耳，易受到場地及天候的限制。如果遇到天雨，收下的木耳不能攤開曬乾。木耳很快即會腐爛，造成農民重大的損失；而另一方面，在晒場上以日光曝曬，容易受灰塵、雜質、蚊繩的污染，影響其產品的品質。乾燥

後的木耳，不但可長期保存，亦可提高售價。一公斤鮮耳乾燥後約可得乾木耳 150 公克，而乾木耳及鮮耳的市價則差十餘倍。故木耳乾燥的機械化，不但有助於其貯藏、運輸及銷售，確保農民之收益，更可提高木耳的品質，增加外銷的潛力。

目前許多高水分含量的農產品如蘋果、梨、馬鈴薯等，早已採用熱風乾燥機乾燥之。本研究之目的即在探討以熱風乾燥機乾燥木耳之可行性，找出熱風溫度對乾燥速率及品質的影響，並研究木耳的堆積量及熱風風量對乾燥速率與品質的影響。以實驗室研究之成果，作為大型乾燥機乾燥木耳之參考。

二、乾燥原理之探討

1. 基本原理

使農產品乾燥或脫水的方法很多，但是其基本原理都相同，就是使農產品內部的水分移至表面而後蒸發；大部份的農產品，都是吸濕性 (hygroscopic) 的物體。假設有一濕的農產品在定溫下置於一密封的箱子內，將該箱子連接至一真空泵及一靈敏的壓力計。當真空泵將箱子抽成真空後，該壓力計上之壓力會降至很低，而後經過一段時間，當農產品蒸發出一部份水汽後，會使壓力升高到一個定值。此一定值即為該農產品在定溫及定含水率下的平衡水汽壓力。或者反過來說，當空氣中的溫度一定，水汽壓力一定（即相對濕度為定值）時，該農產品的水分含量稱為「平衡含水率」。

農產品內部水分之蒸發是由於其內部之水蒸汽壓大於周圍外界空氣中之蒸汽壓。此蒸汽壓差可由①加熱農產品或②減低外界空氣中之水汽壓力而造成。若上述①與②同時作用，則乾燥速率倍增，此即一般乾燥機以熱風乾燥農產品之基本原理。

2. 乾燥的理論

(1) 在低於沸點溫度下水分的蒸發：

假設一盤水暴露於大氣之中，如果空氣的溫度比水高，熱量由空氣傳導入水中而水則吸收熱量成為水蒸汽而由表面蒸發。當這兩項作用達到平衡時，熱傳遞的速率即等於蒸發的水量乘上每單位質量水的蒸發熱：

$$h_c A (T_a - T_s) = K_g A (H_s - H_a) \Delta H_v \quad \dots(1)$$

式中：

h_c = 水與空氣間的熱傳遞係數。

BUT/hr-ft²·°F

T_a = 空氣之乾球溫度。°F

T_s = 表面水之溫度。°F

A = 水之表面積。

K_g = 質量傳遞係數。lbs/hr-ft²

H_s = 在表面水溫度下之飽和空氣的絕對濕度。lbwater/lb dry air

H_a = 空氣的絕對濕度。

ΔH_v = 在 T_s 時水的蒸發熱。

質量傳遞係數 K_g ，根據實驗的結果，發現其與水蒸汽之比熱 C_s 有如下之關係：

$$\frac{h_c}{C_s} = K_g \text{ lbs/hr-ft}^2 \quad \dots(2)$$

而水蒸汽之比熱可由下式求出：

$$C_s = 0.24 + 0.45 H_s \text{ BTU/lb} \cdot \text{°F} \quad \dots(3)$$

由(2)、(3)兩式，在沒有其它已知條件的狀況下可求出質量傳遞係數。

空氣的絕對濕度則與空氣中水蒸汽之分壓有關：

$$H_s = \frac{18 \cdot P_{H_2O}}{29 \cdot (P_T - P_{H_2O})} - 0.6207 \frac{P_{H_2O}}{P_T - P_{H_2O}} \quad \dots(4)$$

式中： P_{H_2O} = 空氣中水蒸汽之分壓。

P_T = 大氣壓力。

(2) 農產品在恆率乾燥期時水分的蒸發：

農產品的乾燥大都可分為兩個時期，即恆率乾燥期 (Constant rate period) 及減率乾燥期 (Falling rate period)。當農產品之水分含量高時，水分在其表面蒸發，與自由水面的蒸發相似。此時水分的蒸發與熱量的傳遞達到平衡，乾燥速率維持一定。故恆率乾燥期之乾燥速率可由下式推算：

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{h_c A (T_a - T_s)}{\Delta H_v} = K_g A (H_s - H_a) \quad \dots(5)$$

式中：

W = 移去之水分。lb

θ = 乾燥時間。hr

當熱風平行吹過農產品表面時，熱傳遞係數為

$$h_c = 0.0128 G^{0.8} \quad \dots(6)$$

式中：

G = 空氣之質量流速。lbs/hr-ft²

或

$$G = V\rho = \frac{m}{s} \quad \dots(7)$$

式中：

V = 空氣流速。

ρ = 空氣密度。

m = 空氣質量流。

s = 風管之截面積。

當熱風垂直吹向農產品表面時，其熱傳遞係數為：

$$h_c = 0.37G^{0.37} \dots\dots\dots(8)$$

(3) 農產品在減率乾燥期時水分的蒸發：

當農產品內部水分移出速度低於其表面水分蒸發速度的時候，恒率乾燥期結束而進入減率乾燥期。此時乾燥速率決定於內部水分移出的速率而非表面水分蒸發之速率。另一方面，如果熱量傳入農產品的速率甚高，水分在內部即蒸發，則此時乾燥速率將決定於熱傳遞的速率。

影響內部水分移出速率的因素很多，綜合各家的理論，大約有下列四種：⁽⁵⁾

① 毛細管現象：

$$W_w = -AK_x \frac{dx}{ds}$$

式中：

W_w = 由毛細管移出之水重。

A = 農產品之截面積。

x = 水分含量。

K_x = 水分傳導係數。

s = 農產品厚度。

水分傳導係數 K_x 決定於毛細管的分佈，其數值亦因水分含量之不同而有很大的差異。

② 由於濃度差異而產生的擴散現象：

$$W_w = A\delta_c \frac{dc}{ds}$$

式中：

δ_c = 擴散係數，由濃度決定之。

c = 濃度。

③ 在固態物表面吸附的水層中的擴散作用：

$$W_w = U\delta_b \frac{dc_b}{ds}$$

式中：

U = 周邊孔隙度。

δ_b = 表面擴散係數，由濃度決定之。

c_b = 表面濃度。

④ 在孔隙中水蒸汽因壓力差而造成的擴散作用：

$$W_v = -\frac{A}{\mu} \frac{\delta}{R_v T} \cdot \frac{P}{P - P_v} \cdot \frac{dP_v}{ds}$$

式中：

δ = 水在空氣中的擴散係數。

R_v = 水蒸汽之氣體常數。

T = 絕對溫度。

P = 總壓力。

P_v = 水蒸汽分壓。

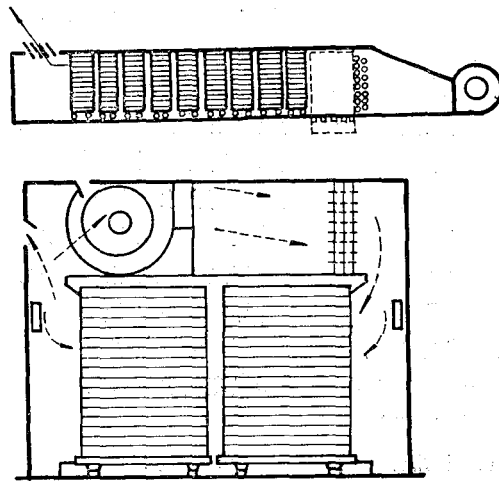
μ = 擴散阻力係數，定義為在農產品中擴散受到阻擋的次數較同樣厚度的純空氣中水分的擴散來得多。

在減率乾燥期間，上述四種水分移出的機構，可能單獨發生，也有可能有多項同時作用。當視農產品的組織及構造而定。

三、木耳乾燥方法之探討

木耳為高水分含量之農產品，且其內含有膠質，在乾燥之過程中，會有兩片以上之木耳黏在一起的現象；傳統的乾燥方法，係將木耳在晒場上攤開曝曬於日光下。而後每隔一段時間將其翻動一次，直至木耳之柄部變硬為止。一般將水分含量自90%降至13%左右約需兩個晴天。

常用於乾燥高水分含量農產品之乾燥機則有棚架式乾燥機 (tray drier) 及隧道式乾燥機 (tunnel drier) 兩種，如圖一所示。採用棚架式或隧道式乾燥機，送風的方式皆為橫向平行送風



圖一 棚架式及隧道式乾燥機

。主要的缺點為各層棚架上的農產品乾燥不易均勻；此乃因為與棚架平行的熱風在乾燥室內的分佈並不平均。尤其在靠近牆壁處及各層棚架間的空隙，風的流速較快，而穿過農產品間隙及經過農產品表面的風速則較慢。另外，由於熱風的溫度漸減，濕度漸增，在同一層棚架上的木耳，會有前後水分含量不均勻的現象。

如果棚架式乾燥機採用垂直送風的乾燥方式。則由前述之乾燥理論得知，乾燥熱風垂直吹向農產品表面者，其熱傳係數要比在同一風速下平行於農產品表面之熱風的熱傳係數要高，也就是乾燥速率會較快。但是，如果熱風一直維持由下往上的方向前進時。當乾燥機前峰到達最頂層時，也許最底層的農產品已經過度乾燥了。爲了避免上下層棚架上農產品水分含量的差異度過大，將乾燥機熱風交替換向；即每隔一段時間，風向改成由上往下。如此上下交替送風，可減少上下層農產品水分含量的差異。臺大農機系馮丁樹先生曾經以交替換向的方式來乾燥稻穀⁽³⁾。根據試驗的結果證實此一方法用於乾燥稻穀可使上下穀層間水分之差異度減至最小，而乾燥之品質亦比單向送風的結果爲佳。故本研究即採用此一垂直交替換向送風的方式來進行木耳乾燥之試驗。

四、試驗設備及試驗方法

1. 試驗設備

試驗的設備如圖二。乾燥主機係由離心風扇、電熱器及自藕變壓器組成，離心風扇之送風量大小可由風機進口之大小加以調節。電熱器由兩組電熱絲組成，一組接自藕變壓器，另一組則無，自藕變壓器可用以調節熱風之溫度。

乾燥箱之構造如圖三及圖四。圖三爲垂直交替送風之乾燥箱，其熱風流動之方向如圖所示。圖四則爲平行送風之乾燥箱；木耳置於以鋁網製成之托盤上。進氣口及排氣口的風溫以熱偶溫度計 (thermo-couple) 量測之，每一層托盤之間都有一熱偶溫度計用以測量通過各層木耳後之風溫。所有之熱偶線 (thermocouple wire) 皆連接於溫度

記錄儀上。在乾燥過程中自動記錄各層木耳溫度變化的情形。

風量的測定係以皮氏管量取進氣管中熱風的動壓及靜壓差。據此推出其流速及流量。木耳水分含量之測定，係將木耳置於烤箱中，以 95°C 24小時烘乾之。測其失去的水分，即可得知其含水量。在乾燥過程中水分含量的測定係分別秤量各層木耳的重量。其減輕的部份即是失去的水重，如此即可求得在乾燥過程中各層木耳之平均水分含量。

2. 試驗方法：

本試驗分兩組進行，在每一組試驗中各有五層托盤。第一組的每一層托盤上木耳之堆積量爲 0.5 公斤，也就是其堆積量爲 5 公斤/平方米。初期含水率約爲 90%，乾燥熱風之風量爲 1.5CMM，每隔兩小時變換送風方向一次。熱風溫度分別爲 40°C、50°C 及 60°C；平行送風式乾燥箱則以 60°C 之熱風，三層托盤之木耳進行乾燥試驗，以作對照之用。在第二組試驗中，同樣是五層托盤。但是每層托盤上木耳之堆積量則爲 1 公斤。相當於 10 公斤/平方米之堆積量。其初期含水率亦在 90% 左右。熱風風量爲 2.5CMM，溫度分別爲 50°C、60°C 及 75°C 三種，同樣每隔兩小時變換一次送風之方向，試驗之結果討論如後。

五、結果與討論

1. 熱風溫度與乾燥速率之關係：

表一所列爲第一組試驗所得之結果。熱風風量固定爲 1.5CMM。每一層托盤上濕木耳重爲 0.5 公斤。每隔兩小時變換送風方向一次。並以平行送風乾燥架，60°C 熱風做一对照試驗。由表一可看出，在熱風溫度爲唯一變數，而其它因素不變的條

表一 第一組試驗，木耳乾燥之結果風量 1.5 CMM，堆積量 5kg/m²

編號	風溫 °C	初期含水率 W. b. %	最終含水率 W. b. %	乾燥時間 hr	乾燥速率 W. b. % /hr	試驗日期
1-1	60	87	13.4	6.5	11.3	4月25日
1-2	50	87	12	12.0	6.25	2月18日
1-3	40	87	15.4	16.0	4.47	2月22日
1-4	60	91.7	11.1	7.0	11.52	4月19日
1-5	50	91.5	12.6	10.0	7.9	4月21日
1-6*	60	88	14	13.5	5.44	3月2日

* 平行送風對照試驗

件下，60°C 熱風之乾燥速率最快，50°C 次之，40°C 最慢。在乾燥時間而言，60°C 熱風需時約僅為 50°C 熱風所需時間之一半；60°C 與 50°C 熱風之乾燥速率的差異遠大於 50°C 與 40°C 熱風乾燥速率之差異。此表示以 60°C 熱風乾燥堆積量為 5kg/m³ 的木耳五層，其所需要的乾燥時間，燃油及電力的消耗都是最少的。

在表一中，平行送風式乾燥架以 60°C 熱風進行試驗的結果。其所需之時間幾為垂直交替送風的兩倍。顯示此種送風方式所得之乾燥效果較差。

表二所列為第二組試驗所得之結果。熱風風量固定為 2.5CMM，每一層托盤上濕木耳重量為 1 公斤。每隔兩小時變換送風方向一次。由表二可看出，在同樣的堆積量及風量下。60°C 熱風之乾燥效率仍為最高。當溫度提昇至 75°C 時，其乾燥速率並未增加，反有減小之趨勢。此一特殊之現象，仍有待進一步之研究。當熱風溫度為 50°C 時，所需之乾燥時間為 60°C 熱風之兩倍。可見乾燥木耳時，進口熱風溫度設在 60°C，無論是就乾燥速率或是乾燥成本而言，都是最佳的選擇。

表二 第二組試驗，木耳乾燥之結果風量 2.5 CMM，堆積量 10kg/m²

編號	溫度	初期含水率	最終含水率	乾燥時間	乾燥速率	試驗日期
	°C	W. b. %	W. b. %	hr	W. b. % /hr	
2-1	75	90.6	7.7	7.5	11.0	7月28日
2-2	62	91.3	8.0	6	13.9	7月22日
2-3	50	90.7	13.0	10	7.7	8月18日

表三所列為 75°C 及 50°C 熱風乾燥木耳後，其投影面積收縮的情形以及在浸水還原過程中其面積變化的情形。由表三可知，木耳在 75°C 熱風或 50°C 熱風下乾燥後，浸水 80 分鐘至 100 分鐘即可恢復至其乾燥前的面積，表示在 75°C 的熱風溫度下連續乾燥 7.5 小時。木耳之組織不會遭到嚴重的破壞。

2. 熱風溫度與乾燥均勻度之關係：

圖五至圖十為表一所列各次試驗所得之乾燥率曲線圖。圖十一至圖十三則為表二所列各次試驗所得之乾燥速率曲線圖。圖中所標示之 1, 2, 4, 4, 5 分別為五層木耳由上而下排列順序。每一圖之左邊為

水分含量對應於乾燥時間之變化情形，即為乾燥速率。右邊則為每一層木耳之水分含量變化圖。為乾燥過程中各層木耳之含水率的分佈情形。

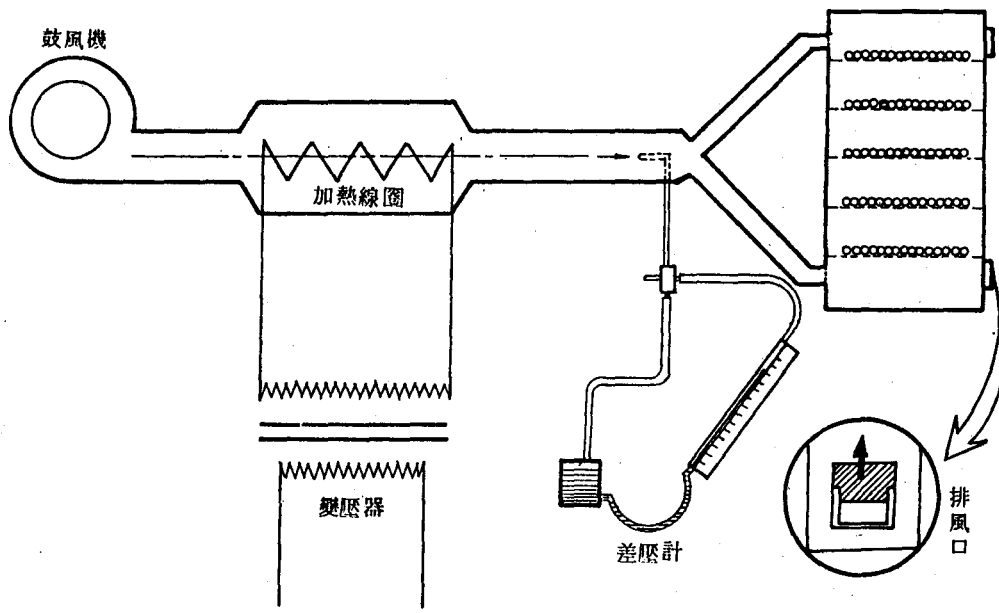
由第一組試驗之圖五至圖九可看出以垂直交替送風方式乾燥堆積量 5kg/m² 的木耳五層，其各層木耳之水分含量在乾燥過程中並沒有很大的差異。第一層及第五層由於首先與乾燥熱風接觸，所以乾燥速率比中間各層來得快。但是到乾燥末期時由於木耳的收縮，擴大了木耳之間的空隙。增快乾燥速率，使乾燥的結果相當均勻。各層木耳水分含量之差異在 10% 以內。

平行送風乾燥架以 60°C 熱風乾燥木耳時，由

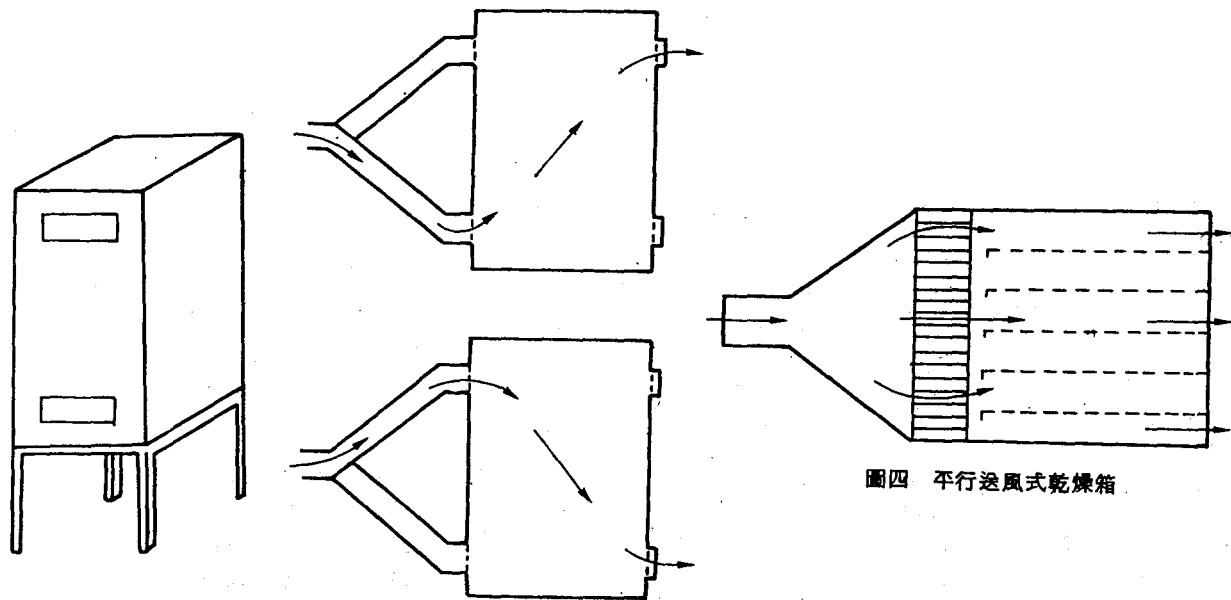
表三 第二組試驗，木耳面積之收縮與還原

熱風溫度	75°C					50°C				
	層次	1	2	3	4	5	1	2	3	4
乾燥前	165.4	173.4	195.7	157.3	170.3	94.6	91.7	83.9	133.1	115.5
乾燥後	83.5	36.1	26.5	27.0	36.5	20.0	17.8	9.1	17.8	11.7
浸水 20 分	140.3	149.0	120.5	127.3	131.6	76.4	64.6	63.9	116.2	84.1
浸水 40 分	150.3	168.0	133.6	159.3	151.6	87.3	76.3	75.8	134.1	103.9
浸水 80 分	159.8	186.4	148.0	173.1	164.5	89.8	86.1	81.5	140.0	115.4
浸水 100 分	169.1	187.3	153.4	180.9	179.4	92.6	89.5	84.4	143.2	117.5

*面積單位為 cm²

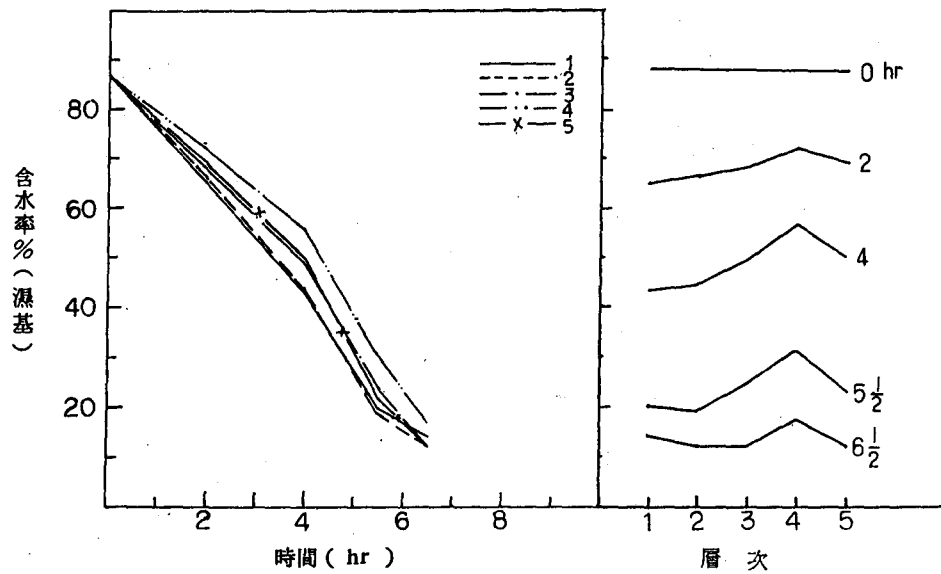


圖二、乾燥試驗設備配置圖

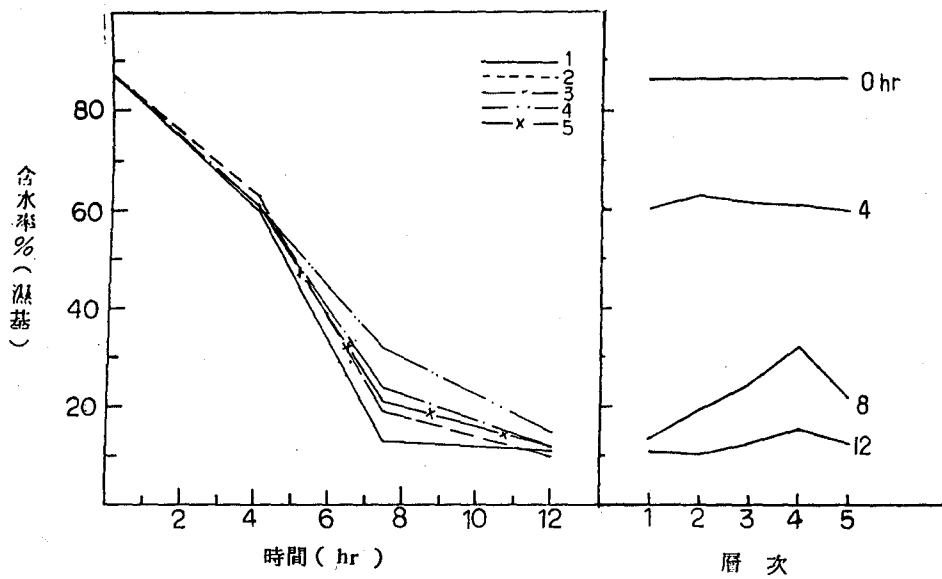


圖三 乾燥箱之構造

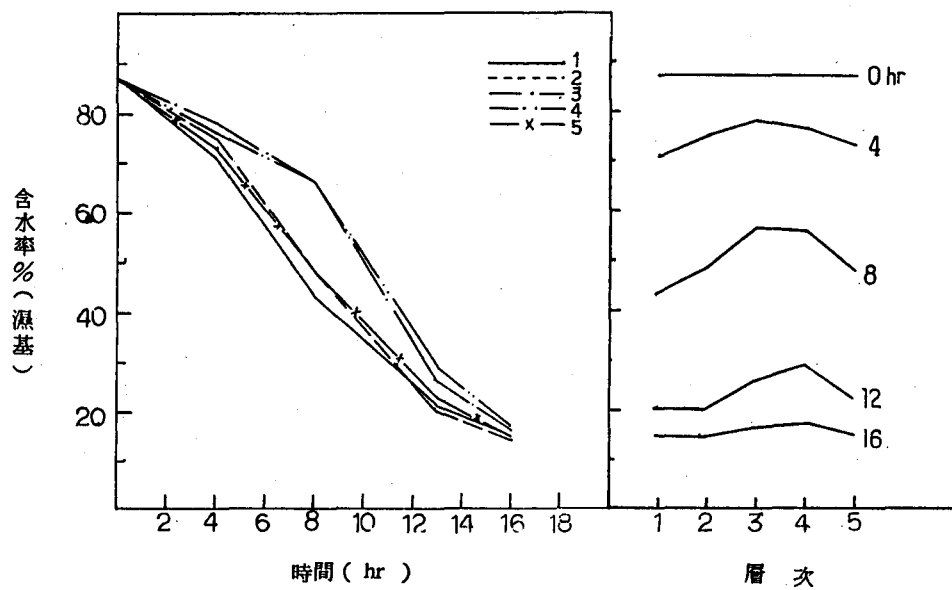
圖四 平行送風式乾燥箱



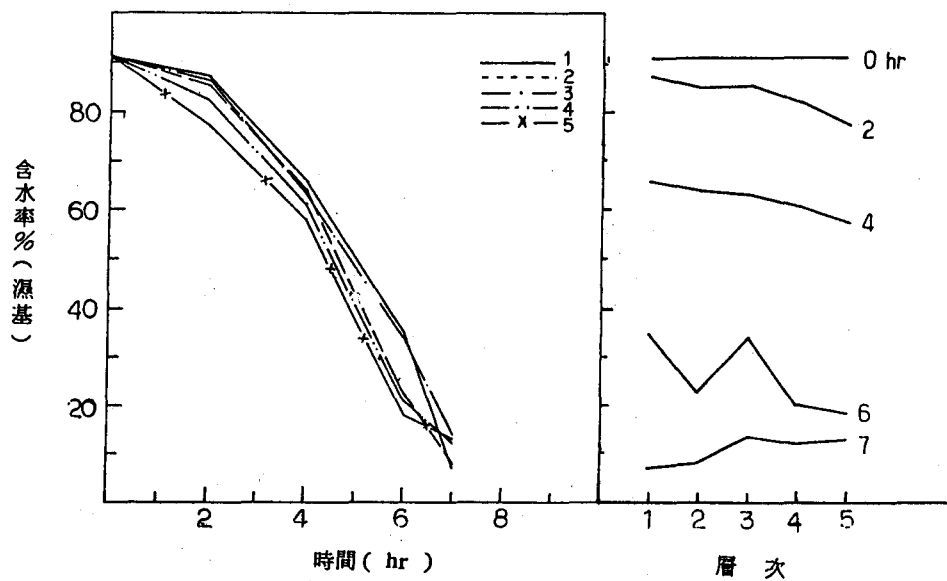
圖五、 5 kg/m^3 ， 60°C 垂直交替送風乾燥典線圖(1-1)



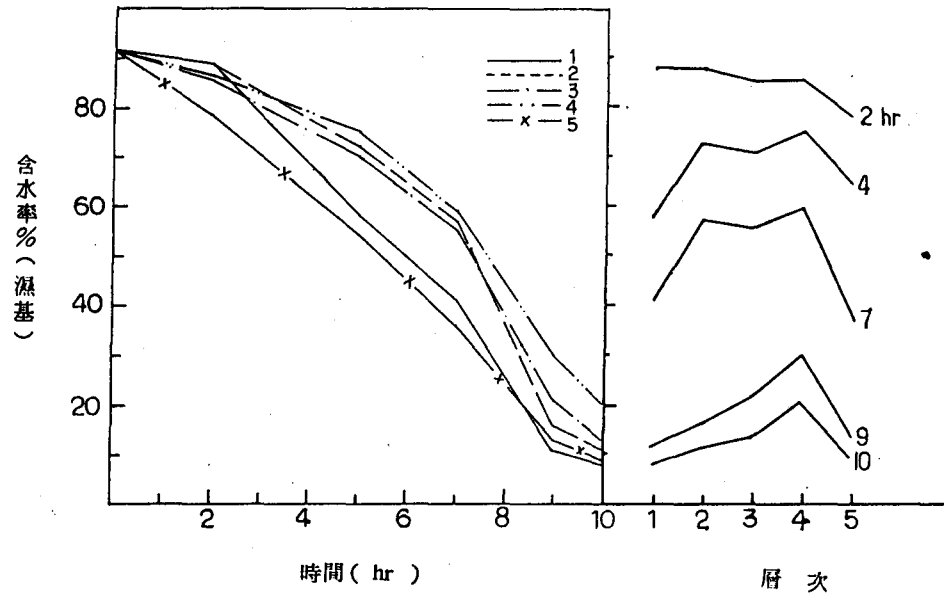
圖六、 5 kg/m^3 ， 50°C 垂直交替送風乾燥曲線圖(1-2)



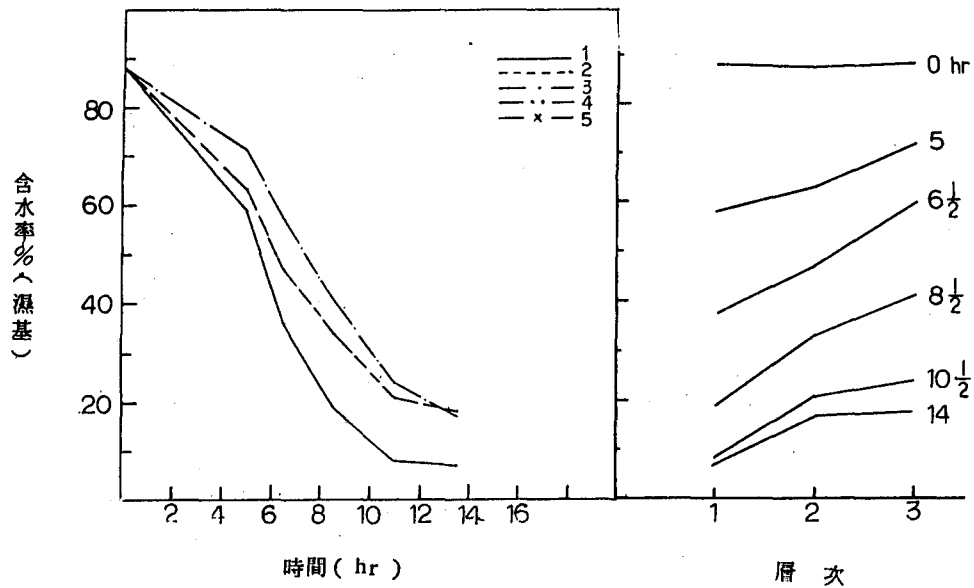
圖七、 $5 \text{ kg}/\text{m}^2$ ， 40°C 垂直交替送風乾燥曲線圖(1-3)



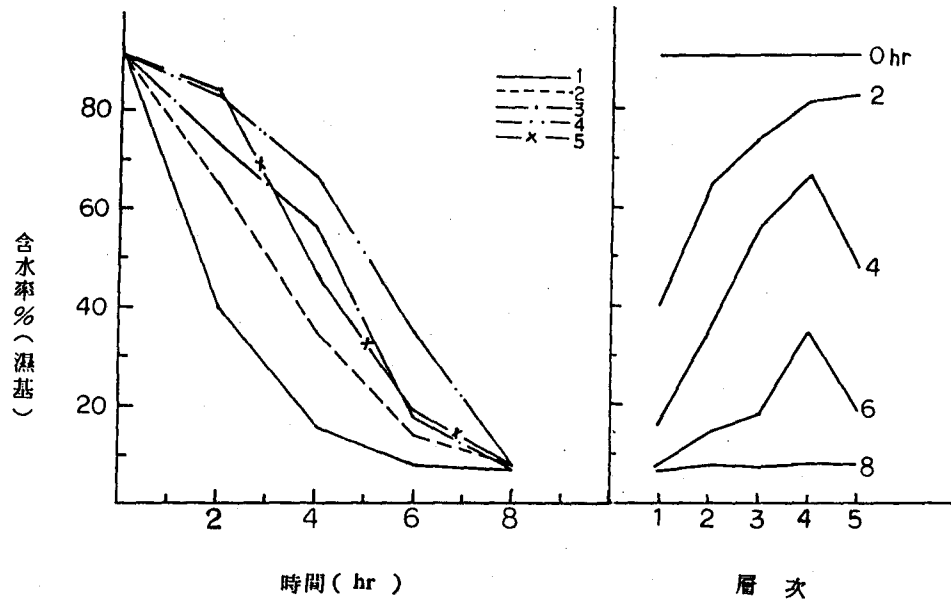
圖八、 $5 \text{ kg}/\text{m}^2$ ， 60°C 垂直交替送風乾燥曲線圖(1-4)



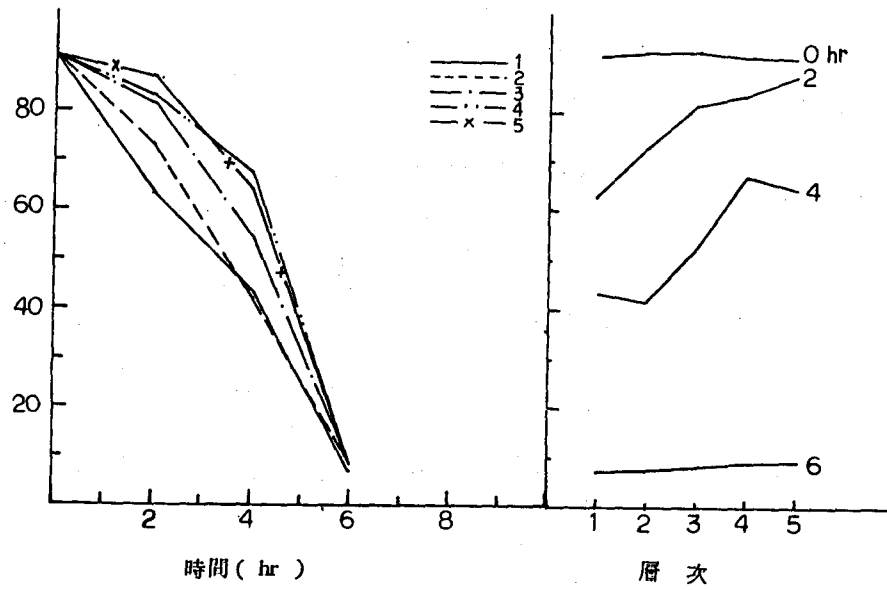
圖九、 5 kg/m^2 ， 50°C 垂直交替送風乾燥曲線圖(1-5)



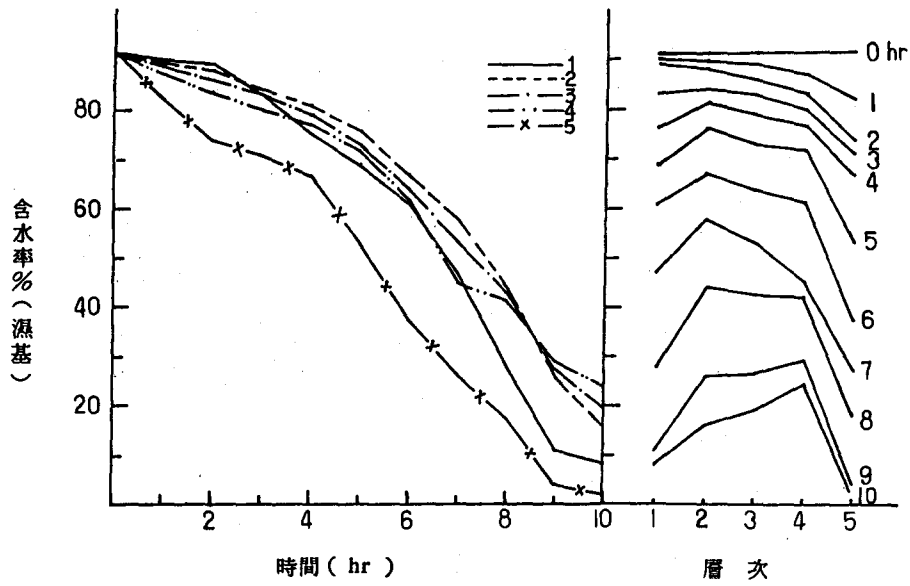
圖十、 5 kg/m^2 ， 60°C 平行送風乾燥曲線圖(1-6)



圖十一、 10 kg/m^2 ， 75°C 垂直交替送風乾燥曲線圖(2-1)



圖十二、 10 kg/m^2 ， 62°C 垂直交替送風乾燥曲線圖(2-2)



圖十三、 10 kg/m^2 ， 50°C 垂直交替送風乾燥曲線圖

加 速 國 家 建 設
厚 植 復 國 力 量

於第一層的風量較大，進出口熱風溫度之差異大，帶走之水分多。故其乾燥速率較第二、第三層為快。同時在每一層托盤上之木耳。靠近熱風進口處乾燥較快。顯示平行送風之棚架式乾燥機不易獲得均勻的乾燥效果。

在第二組試驗中，由於堆積量加倍，在乾燥過程中各層木耳水分含量之差異顯著的增加。然而到了乾燥末期時，各層木耳水分含量的差異却顯著的減少。可能亦由於在乾燥後期，木耳之間的空隙變大，增加了與熱風接觸的機會。因而得到均勻的乾燥效果。

由圖六、圖九及圖十三可看出，不論堆積量及風量為何。當以 50°C 之熱風乾燥木耳時，第四層木耳之含水率皆有偏高的趨勢。此一特殊的現象仍有待進一步之研究。

六、結論與建議

本研究以熱風溫度及堆積量為變數，分兩組進行試驗。由兩組之試驗結果得知以 60°C 熱風乾燥木耳，其所需之時間最少，乾燥速率亦最快。當熱風溫度為 75°C 時，乾燥速率反有減小之現象。而當熱風溫度為 50°C 時，所需之乾燥時間幾乎為 60°C 熱風所需時間之兩倍，故以大型乾燥機乾燥木耳時，如將溫度設定在 60°C ，將可得到最佳之經濟效益。

在試驗過程中，發現每一層托盤上，其前後排

木耳之水分含量都有不均勻的現象。顯示熱風在乾燥箱內之流動有偏向於後半部之趨勢。在做進一步試驗或以大型乾燥機乾燥木耳時，應加裝導風板使熱風能均勻的流過每一層棚架，以改進乾燥之效果。

本試驗以五層托盤進行木耳之乾燥試驗，證實堆積量為 $5\text{kg}/\text{m}^3$ 及 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 時，採用垂直交替送風方式乾燥木耳可獲得良好之結果。但是超過五層以上之托盤或棚架用垂直交替送風方式乾燥木耳是否仍能有此合理的效果則仍有待進一步之研究。以求增加木耳之乾燥能量，降低乾燥之成本。

七、謝 啓

本試驗承蒙張教授漢聖之指導，農林廳嘉義農業試驗分所林金鐵協助提供木耳。助理袁寶山先生及莊斌鎰、陳凱倫兩位同學協助試驗進行及資料之整理。謹此敬致謝意。

八、參考資料

- (1) 杜自彊，食用菇栽培技術，豐年社。
- (2) 熊中果，促進食用菇（菌）類生產之初步探討，行政院農發會。
- (3) 馮丁樹，靜置式稻谷乾燥機應用雙向送風乾燥之研究，農工學報26卷2期89-103。
- (4) Henderson Perry, Agricultural Process Engineering 2nd Ed.
- (5) Charm, Fundamentals of Food Engineering, 3rd, Ed, AVI.

(上接第 85 頁)

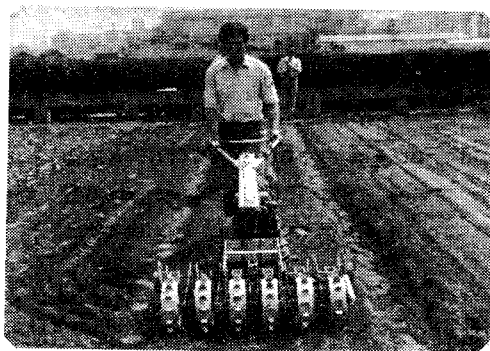


圖 1. 中耕機驅動蔬菜播種機

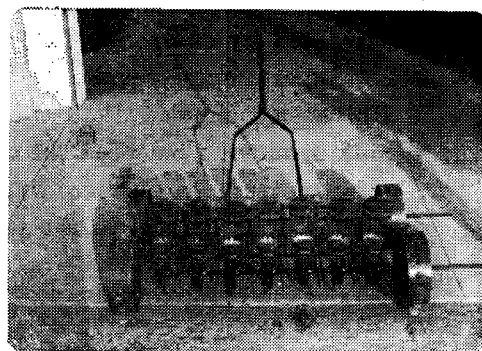


圖 2. 手拉式蔬菜播種機