

# 專 論

## 穀物貯藏與乾燥(續)

### Grain Storage and Drying(II)

臺灣大學農工系教授

沈 國 文

Kou-Wen Shen

#### 乾燥速度：

穀物乾燥時由表面蒸發水分，表面水分減少後體內水分向表面擴散移動補充，此種現象繼續發生，直至乾燥終止，或穀物水分含量與乾燥空氣之相對濕度達到平衡為止。

乾燥開始穀物表面水分蒸發阻力很少，加熱空氣溫度 $t_a$ ，相對濕度 $\phi$ 下，乾燥速度維持一定，乾燥曲線為直線，通常稱之恆率乾燥期。穀物乾燥繼續進行，體內水分移動送達表面不足表面蒸發時，乾燥速度下降，乾燥曲線開始偏離原先直線，此時穀物水分含量稱之臨界水分含量，約當穀物之最大吸濕水分含量，此時為減率乾燥期開始。水分擴散移動，因水分含量而不同，因素複雜，又可分前期與後期。據 Fish (1958) 澱粉水分含量15%以上時擴散係數一定，15%以下時擴散係數僅為15%以上的 $\frac{1}{2}$ ，一般穀物約為 $\frac{1}{2}$ — $\frac{1}{3}$ 。水分擴散公式與熱傳遞公式相類似。

1. 恆率乾燥期：——穀物表面水分蒸發，外包一層空氣膜，蒸發水蒸氣需通過此空氣膜，方可進入外周氣氛，水分減少率為一定值，熱傳遞係數一定，物體溫度也是一定。常依擴散，溫度，乾燥空氣流速，氣流方向等左右。其乾燥速度為

$$\frac{dw}{dt} = k_g A (H_s - H_a) = \frac{hA(T_a - T_s)}{\Delta H_v} \dots (E)$$

式中：

$$\frac{dw}{dt} = \text{乾燥率, lb/hr (水分)}$$

$k_g$  = 水與水蒸氣間質量移動係數，lb./hr—sq. ft.

$h$  = 水與空氣膜間熱傳遞係數，Btu/hr—sq. ft—°F

$A$  = 表面積，sq. ft.

$T_a$  = 乾燥空氣乾球溫度，°F

$T_s$  = 物體表面溫度，即濕球溫度，°F

$H_s = T_s$  溫度時之飽和濕度，lb/lb

$H_a$  = 空氣濕度，lb/lb

$\Delta H_v$  = 溫度  $T_s$  下水分蒸發潛熱，Btu/lb.

\*  $k_g$  值無資料可以利用時，可由濕空氣比熱  $C_s$  之關係求出。

$$h_g = \frac{h}{C_s}, \text{ lb./hr—sq. ft.}$$

$$C_s = 0.24 + 0.45H_a, \text{ Btu/lb—°F}$$

$$H_a = 0.622 \frac{p}{p_B - p}$$

$p$  = 空氣中水蒸氣分壓力

$p_B$  = 壓力計大氣壓力

\*\*  $h$  值如通風方向與乾燥表面平行時為

$$h = 0.0128 G^{0.8} \quad (G = V\rho = \text{m/s})$$

$G$  = 空氣質量速度，(lb/hr—sq. ft.)

$V$  = 空氣速度

$\rho$  = 空氣密度

$m$  = 空氣質量流率，lb./hr

$s$  = 空氣通過間隙面積，ft<sup>2</sup>

$h$  值如通風方向與乾燥表面垂直時為

$$h = 0.37G^{0.37}$$

穀物乾燥係由輻射及對流加熱時，則為

$$\frac{dw}{dt} = \frac{hA(T_a - T_s)}{\Delta H_v} + \frac{h_r A(T_r - T_s)}{\Delta H_v}$$

$$= k_r A(H_s - H_a)$$

式中：

$h_r$  = 熱輻射係數

$T_r$  = 輻射面溫度，°F

乾燥經由傳導加熱，則為

$$\frac{dw}{dt} = \frac{h_c(T_a - T_s)}{\Delta H_v} = k_s A (H_s - H_a)$$

式中：

$$h_c = (h_c + h_r) \left[ 1 + \frac{A_u}{L(h_c + h_r)} \right]$$

$A_u$  = 與空氣接觸表面積與未接觸表面積之比

$L$  = 深度

$K$  = 熱傳導率

普通穀物乾燥如果乾燥空氣風速大，溫度高，濕度低所謂乾燥強度大，乾燥速度大，恆率乾燥期與減率乾燥期不很明顯。乾燥強度大時，穀物表層乾燥收縮，非常堅硬，水分封閉體內妨礙移出，形成所謂硬化表層。若穀物水分含量及體內溫度分布不均，變域很大時，形成內部應力，甚之碎裂，稱之應力碎裂。穀物淺層乾燥，空氣速度超過 10 ft/sec 時，影響乾燥速度很少。

2. 減率乾燥期：—— 穀物進行乾燥，由恆率乾燥期進入減率乾燥期，乾燥速度受穀物體內水分移送表面速度所限，熱傳遞係數繼續降低，逐漸接近乾體熱傳遞係數，物體溫度起初升高，達最大溫度後下降，物體表面溫度較物體內部為高，達最高溫度時，由於較周圍媒質溫度為高，而開始下降，然表面溫度仍較體內中央為高，繼續向體內中央進行加熱，中央溫度與物體表面溫度一樣時，則物體各層開始冷卻。表面溫度達最大溫度時，應立即停止乾燥，以免媒質中水分在穀物表面凝結。減率期中水分含量下降率繼續減少，假如穀物之熱傳送率很高時，水分會於體內蒸發，由水蒸氣移送表面洩出，乾燥速度全受熱傳送率所控制。減率乾燥期內水分移送原理據 Görling (1958) 稱

a. 穀物體內水分移動係由毛細管作用

$$\bar{W}_w = -AK_x \frac{dx}{ds}$$

式中：

$W_w$  = 毛細管中水分移動重量

$A$  = 穀物斷面積

$x$  = 水分含量

$k_x$  = 水分傳導率

$s$  = 厚度

\*  $k_x$  是依毛細管分布及水分含量多少而不同，後者影響較為顯著。

b. 穀物體內濃度差，發生水分擴散

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

式中：

$\bar{W}_w$  = 同前

$\delta_c$  = 濃度擴散係數

$C$  = 濃度

c. 固體與液層界面表面擴散

$$\bar{W}_w = U\delta_b \frac{dC_b}{ds}$$

式中：

$U$  = 孔泡周長

$\delta_b$  = 濃度表面擴散係數

$C_b$  = 表面濃度

d. 空氣孔泡因分壓差，發生水蒸氣擴散

據 Krischer (1938) 建議公式

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

式中：

$\delta$  = 空氣孔泡中水擴散係數

$R_v$  = 水蒸氣氣體常數

$T$  = 絕對溫度

$P$  = 總壓力

$P_v$  = 水蒸氣分壓力

$\mu$  = 擴散阻力因數，為相同厚度靜止空氣膜擴散阻力之倍數

e. 於理想狀態下，擴散率一定時，（事實上乾燥進行時常因水分含量，溫度，壓力及物體密度而變動）水分含量為時間的函數，公式為

$$\frac{W - W_s}{W_0 - W_s} = \frac{8}{\pi^2} (e^{-D\theta(\pi/2L)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D\theta(\pi/2L)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D\theta(\pi/2L)^2} + \dots)$$

式中：

$W$  = 時間  $\theta$ ，物體平均水分含量

$\theta$  = 經過時間

$W_0$  = 原始水分含量, lb/lb (d. b.)

$W_e$  = 乾燥終了水分含量, (d. b.)

$D$  = 水分擴散率, sq. ft/hr.

$L$  = 扁平乾燥物厚度之半, 圓形物之半徑,  
橢圓物相當半徑

穀物深層乾燥恆率乾燥期可用 (E) 式計算乾燥率, 直至乾燥層 (drying zone) 或稱前鋒達到穀物頂面表層為止。一旦乾燥前鋒達到穀物頂面時, 減率乾燥期開始, 可用下式

$$\theta_f = \frac{\rho_s L \Delta H_v (W_0 - W_e)}{h_c (T_a - T_s)} \ln \frac{W_0 - W_e}{W - W_e}$$

式中:

$\theta_f$  = 減率乾燥期所歷時間

$\rho_s$  = 乾物密度

$L$  = 物體厚度, 兩側加熱時為物體厚度之半

$W$  = 時間  $\theta_f$  水分含量

$W_0$  = 臨界水分含量

$W_e$  = 平衡水分含量, 或最終水分含量。

貯槽乾燥深層乾燥常易發生乾燥空氣通過不均, 某些部分幾無空氣流動, 此種情況採用擋板矯正。

### 乾燥效率

空氣溫度  $T_a$ , 濕度  $H_a$ , 加熱後空氣溫度  $T_b$ , 濕空氣比熱  $C_s = 0.24 + 0.45H_a$ , 空氣流量  $W_a$ , lb/hr, 加熱所需之熱量為  $C_s W_a (T_b - T_a)$ , 水分蒸發量  $W$ , lb/hr, 分水蒸為潛熱  $\Delta H_v$ , Btu/lb, 蒸發有效利用的熱量為  $W \Delta H_v$ , 乾燥效率為

$$\eta = \frac{W \Delta H_v}{C_s W_a (T_b - T_a)}$$

常溫通風乾燥時熱效率為無窮大, 於乾燥空氣溫度低, 濕度高而適當加熱之弱乾燥強度之熱效率常可超過100%。

商品穀物乾燥機之容量規格常以每小時可以除去穀物水分含量 5% 之穀物容量蒲式耳數。一般約為 200-1500 Bu/hr, 其效率可以根據廠商說明而測定之。可由燃燒燃料的所產生之熱量與風扇每分鐘供給空氣量 Cu. ft/min 之關係計算。例如某乾燥機每小時乾燥 1000 蒲式耳穀物, 由水分含量 20% 乾燥達 15%, 每蒲式耳除去水分約 3.5 磅, 每磅水分蒸發需熱 1100 Btu/lb, 假設乾燥的總熱效率為 55%, 每磅水分蒸發需熱量為 2000 Btu, 加熱空氣由溫度 70°F 升高為 200°F

除水總量 = 1,000 bu/hr × 3.5 lb/bu = 3500 lb/hr

$$\begin{aligned} \text{蒸發所需總熱量} &= 3500 \text{ lb/hr} \times 2000 \text{ Btu/lb} \\ &= 7,000,000 \text{ Btu/hr.} \end{aligned}$$

加熱空氣之熱量與空氣流量及空氣溫度之近似關係為

$$\begin{aligned} \text{Btu/hr} &= \text{cfm} \times \text{temperature rise } ^\circ\text{F} \times 1.1 \\ \therefore \text{空氣流量} &= \frac{\text{Btu/hr}}{1.1 \times \text{temperature Rise } ^\circ\text{F}} \\ &= \frac{7,000,000}{1.1 \times (220 - 70)} = 42,400 \text{ cfm.} \end{aligned}$$

各種燃料的含熱量

Fuel	Btu per gal.	Btu per cu. ft.
Natural gas.....	.....	1,000
Butane .....	104,000	3,400
Propane.....	92,000*	2,570
Kerosene .....	114,000	
Gasoline.....	117,000	
Fuel oil .....	130,000	
Distillate .....	135,000	

\* Vapor per gallon of liquid at 60°F. and 30 in. mercury = 36.4 cu. ft.

測定排出空氣量是否相當, 至於熱效率可由乾燥後溫度下降的度數與加熱部份空氣升高之度數之比而證實廠商所標之熱效率是否相等。又每小時燃燒燃料量, 亦可計算供給熱量為多少與每小時蒸發水分量所需之熱量之比為熱效率。

### 乾燥方法

由於穀物乾燥有許多限制因素, 如乾燥溫度過高損及發芽力。改變理化性, 濕度過低生理上產生不良變化, 穀物乾燥高度過高, 除對穀物產生壓力或變形, 且使通風阻力增大, 流動性差的穀物不適於利用重力連續乾燥, 此等均應注意。

1. 空氣乾燥:

a. 空氣溫度與穀物表面溫度; ——空氣中所含水蒸氣分壓力  $p_a$  一定, 穀物表面溫度之飽和水蒸氣壓力  $p_g$ , 兩者之差稱之飽差 (Saturation deficit)。乾燥空氣溫度增加, 飽差同時增加, 因而乾燥速度增加。

b. 空氣流量與乾燥速度: ——乾燥空氣流量增加, 穀物因蒸發水分而降低溫度變化減少, 乾燥空氣中因蒸發增加水蒸氣的影響小, 所以飽差大, 空氣流量增加, 水分蒸發容易, 乾燥速度因而加速。

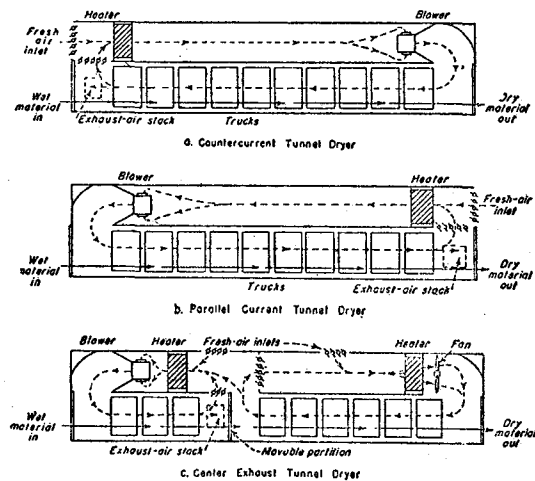
c. 空氣濕度與飽和濕度：——每磅乾空氣中所含  
水蒸氣重  $W$  ( $W = 0.622 \frac{P}{P_B - P}$ ，與相同溫度及壓力  
下空氣之飽和濕度  $W_s$  之比，稱之飽和度 ( $\mu = \frac{W}{W_s}$   
Degree of saturation)。飽和度小者，可能吸受  
容納濕度能力大，乾燥速度大。

d. 空氣乾燥設備：——

(1) 箱型乾燥機：——乾燥室內適當配置，加熱通風  
，調節空氣濕度及溫度，使分隔各層之穀物，特別流  
動性差之農產品乾燥情況一致，乾燥水分蒸發，溫度  
降低，濕度增高，飽差逐漸變小時應即排氣。間歇作  
業裝卸原料，熱量損失較多，需要勞力亦增。連續式  
可與次節作用相同，每箱形成一節，通過熱風流動區  
間，均勻乾燥。

(2) 隧道式乾燥機：——乾燥隧道中吹送熱風，穀物  
通過時加熱蒸發乾燥，作業連續，熱風有由隧道外之  
加熱器產生加熱空氣，亦有利用含氧稀少之燃燒氣體  
代替熱風。進氣排氣均利用風扇。普通依空氣及穀物  
流向可分三種型式。

(A) 同流式：——空氣與穀物流動的方向一致，  
入口乾燥空氣高溫低濕，與含水量高的穀物接觸，  
立即發生加熱蒸發乾燥，大部份乾燥現象發生於初期  
，後期由於飽差小，乾燥速度慢，出口排氣濕度接近  
飽和狀態，平均溫度差低，熱效率低乾燥空氣溫度可  
以稍高，水分蒸發所需供給之空氣量因而減少，然粒  
狀穀物乾燥，溫度不宜升高太多。



圖(26) 同流(a)，同流(b)及混流(c)隧道式乾燥機

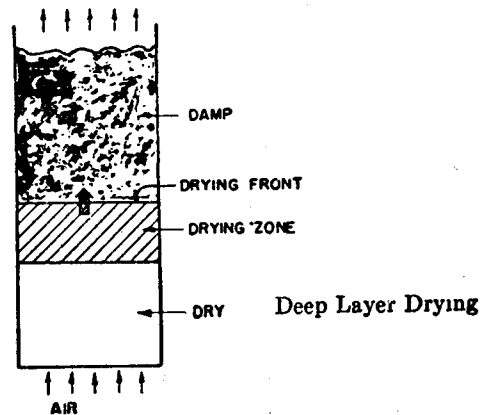
(B) 向流式：——乾燥空氣流向與穀物流向相反  
，進入高溫低濕的空氣與已進行乾燥及水分含量減少  
之穀物接觸，加速蒸發剩餘水分，後期乾燥速度迅速

，排氣出口處即穀物入口處之空氣濕度高溫度低，有  
時與水分含量高穀物接觸，會於穀物表面凝結水氣，  
故宜大量送風或減少穀物流量，避免此種現象發生，  
初期乾燥飽差小，乾燥速度慢。乾燥空氣溫度不宜太  
高，否則穀物過熱，蒸發水分需供空氣量多，然熱效  
率較同流式為高。

(C) 交流式 (Cross-flow tyse)：——一般乾  
燥穀物靜止而空氣流動者屬之。貯槽乾燥等均納此類  
，熱效率介於向流與同流者之間，優點缺點亦在兩者  
之間。

(D) 向流同流式：——據 Van Arsdel (1951)  
加熱乾燥空氣由穀物出口處送入，與乾燥後期穀物流  
向相反，乾燥途中半途排洩乾燥空氣，而將之導入  
穀物入口處與水分含量高之穀物流向相同，此種方法  
熱傳導能力最大，穀物水分含量通過乾燥後最低，有  
向流及同流者之優點，熱效率高。

(3) 貯槽乾燥機：——利用穀物貯槽而行乾燥，常易  
發生空氣流動不均，空氣通過穀物乾燥後，溫度降低  
，濕度增高，再經過其他部份穀物，遇冷凝結水分，  
反可促進黴菌發生於乾燥前鋒 (drying front) 未達  
之時，如將乾燥空氣溫度提高，使排氣尚有適當乾燥  
能力，則進口空氣加熱溫度過高，穀物過熱。又如增  
加通風量，即增加風速，則阻力增加所需動力增加更  
多。風速增加一倍，壓力增加 2.8 倍，動力增加 5.6 倍  
，熱效率降低，不合經濟原則。

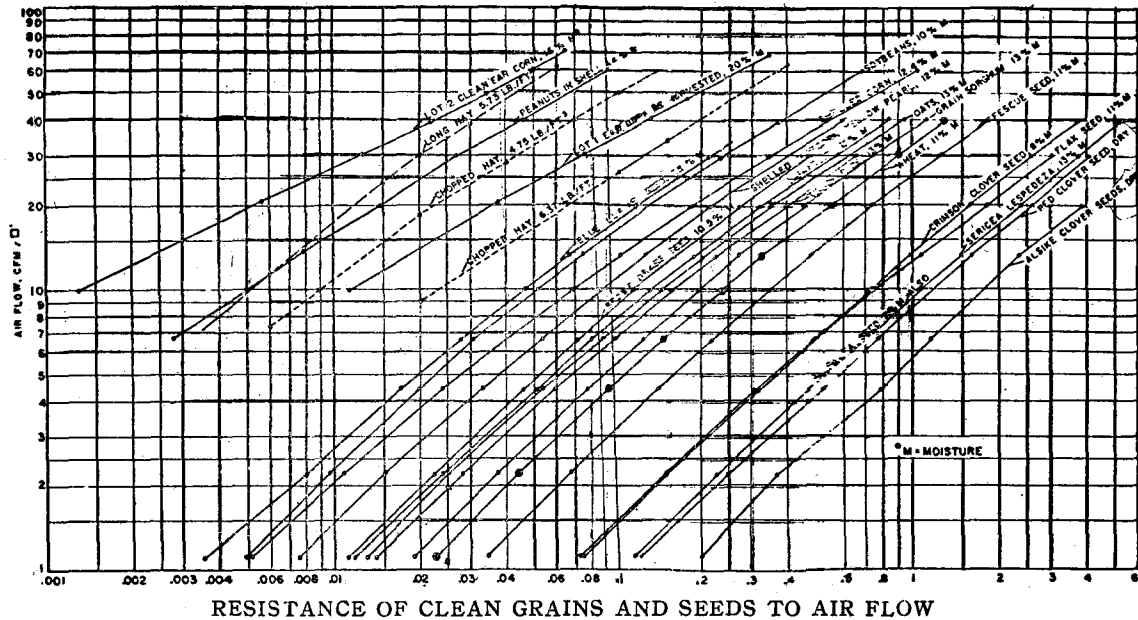


圖(27) 穀物深層乾燥及貯槽乾燥

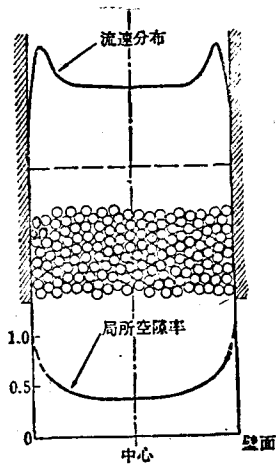
空氣流量與穀物阻力之關係，據 Shedd 圖(28)理  
論上空氣為層狀流向上流動，實際上空氣於穀物空隙  
間流速較迅速，且沿槽壁更為迅速見圖(29)。Shedd  
資料係對乾淨穀物而言，如果乾燥穀物疎鬆裝入水分

含量高者，減少壓力僅為圖值的80%，壓實狀況下減少壓力可增加圖值50%，含雜物多者阻力增力壓力降低。實際上內具孔底槽及送風管送風，空氣流並非直線流更非層狀流，問題更為複雜，圖示數值僅可參考，宜實際觀測。

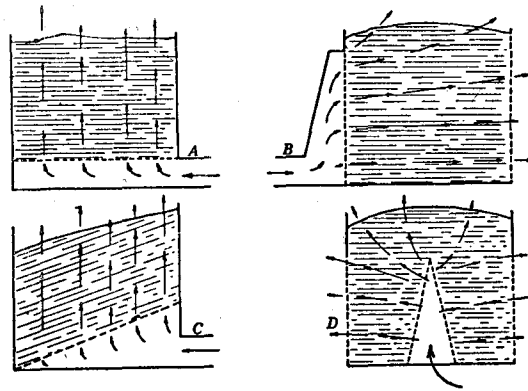
- (A) 採用實用最低乾燥空氣溫度。
- (B) 採用可能最大空氣流量。
- (C) 貯槽穀物水分含量平均值達到標準時，移裝他槽充分均勻混合，通風冷後方能安全貯藏穀物，圖(30)各式貯槽。



圖(28) 穀物空氣流的阻力



圖(29) 貯槽內空氣流速分布

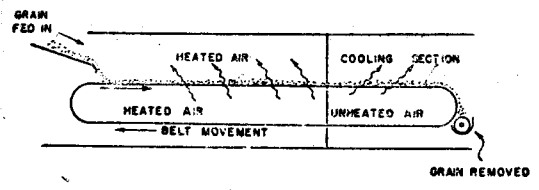
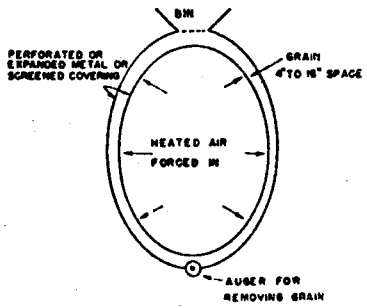
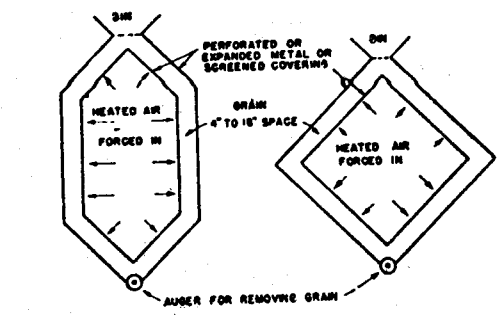


Some deep-bed drying arrangements.

圖(30) 各式貯槽乾燥方法

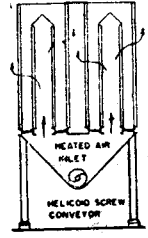
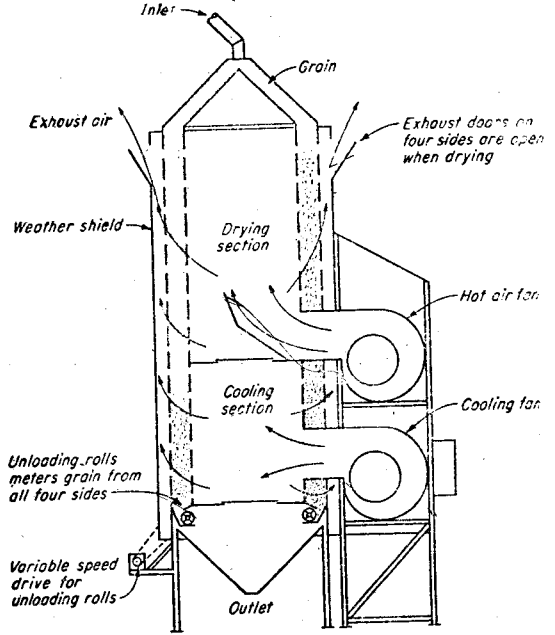
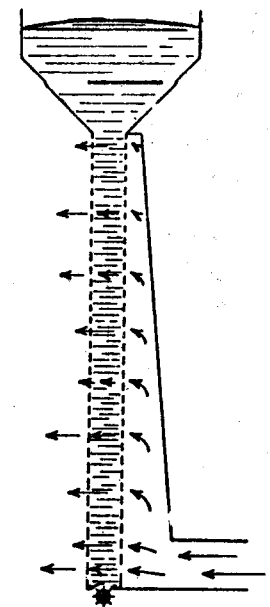
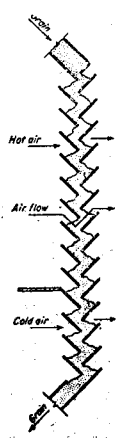
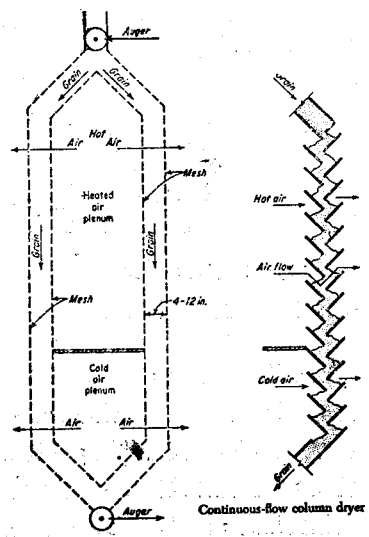
(4) 連續重力式乾燥機：——粒狀穀物流動容易，利用重力下降途中，吹送熱風而乾燥，穀物於有孔或網狀隔板間通過，有時加裝擋板，有時隔板通路傾斜，有時利用空氣流向等控制穀流速度，或乾燥時間，一般均取直立式，同時吹送熱風及冷風，後者有乾燥

顯著效果及較佳的穀物品質，而以高度控制加熱及冷卻時間，流量可以隔板數及寬度之增減而控制，通過時伴有拌和作用而可視為淺層乾燥，穀物靜靜下降可視為深層乾燥。此法操作機械化，勞力節省，佔地面積少，僅建築費用高，圖(31)各式連續乾燥裝置。

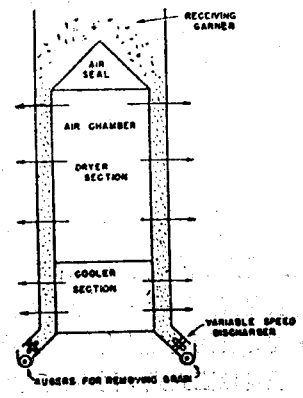


Courtesy of Agr. Consulting Assoc.

Continuous Flow Drier, Horizontal Belt



Batch farm drying chamber, column type



圖(31) 各式連續穀物乾燥裝置

(5) 回轉乾燥機 (Rotary driers) : — 設備費較高, 佔地面積廣, 乾燥空氣流動方向與穀物流動方向有分同流式, 向流式及還流式, 後者常利用雙層轉筒, 穀物可流經內筒或內筒與外筒間, 由同流向的熱空氣間接加熱而預熱, 再與間接加熱後流向相反之排氣相遇, 直接加熱, 穀物不會過熱, 熱效率高, 適用於流動性差而連續乾穀回轉不會損壞的農產品時採用, 應先考慮其他型式乾燥機。轉筒內裝揚起板 (lifting flights), 抬起乾穀物, 達一定高度落下通過熱風中, 普通有直接燃燒加熱。轉筒速度及傾斜度為決定乾燥時間, 以獲得品質均勻水分含量標準之產品。

乾燥容量能力, lb/hr, 依穀物最終水分含量, 乾燥常數, 空氣流量及轉筒之轉速及尺寸大小而定。普通水分含量高之作物採用高乾燥空氣溫度, 乾燥速度迅速。例如青刈紫花苜蓿使用 1500°F 之高溫乾燥。

據熱量及質量平衡關係如下

$$\Delta H = H_0 - H_1 = \frac{W_d v}{6,000 V A \theta} (M_1 - M_2)$$

式中:

$\Delta H$  = 濕度變化, 向流式取(-), 同流式取(+)

$H_0$  = 排氣濕度

$H_1$  = 進氣濕度

$M_1$  = 最初水分含量

$M_2$  = 最終水分含量

$v$  = 空氣中所含濕氣體積, Cu ft/lb dry air

$V$  = 空氣流量率, Cu. ft/min - sq ft.

$A$  = 面積, ft<sup>2</sup>

$W_d$  = 乾重, lb

$\theta$  = 時間, hr

轉筒轉速高時穀物與空氣接觸機會增加, 乾燥能力增加, 回轉速度增加, 離心力使穀物附着筒壁, 不易落離, 常有一限制值。

$$(A) \text{ 回轉數 } n = \sqrt{\frac{60^2 g}{2\pi^2 D}} = \frac{43}{\sqrt{D}}$$

式中:

$n$  = 轉速 rpm

$D$  = 轉筒直徑 (m)

$$(B) \text{ 離心力 } f_c = mr\omega^2 = mv^2/r$$

式中:

$f_c$  = 離心力, Kg

$\omega$  = 角速度 =  $\frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}$ , radian

$r$  = 轉筒半徑, m

$m$  = 質量, Kg

$v$  = 周速度, =  $\omega r$ , m/sec

$$* f_c = \frac{m\pi^2 r \omega^2}{900}$$

$$** z = f_c/mg = \text{穀物離心力與重力比} = \frac{n^2}{900}$$

$$r = \frac{\pi^2 r n^2}{900g}$$

$$(C) n = \frac{42.3}{\sqrt{D}}, \text{ 實用上轉筒迴轉速度約為此值之半}$$

$$* \text{ 設計時可用 } n = \frac{25}{\sqrt{D}}$$

\*\* 轉筒內裝揚起板者,  $n = 1 - 10$  rpm

轉筒迴轉數少節省動力, 過少時穀物集中低位移動, 加裝揚起板可解善此種現象。

轉筒直徑  $D$  常依通過熱風之流量及速度而決定, 一般轉筒圓周速度為

最終水分含量低者用 1 m/sec

最終水分含量普通者 4-5 m/sec

轉筒長度  $l$  常依乾燥時間而定, 迅速乾燥時間約需 10-15 分, 緩慢乾燥者約為 30-40 分鐘

$$l = nst$$

式中:

$l$  = 轉筒長度, m

$n$  = 轉筒迴轉數, rpm

$s$  = 轉筒回轉一次, 穀物移動的距離, m

$t$  = 穀物在轉筒內乾燥停留時間, min

轉筒傾度: — 迅速乾燥用 1/10, 緩慢乾燥用 1/30-1/40

轉筒每一迴轉穀物前進之距離, m

$$s = h \tan \theta$$

式中:

$s$  = 移動距離, m

$h$  = 穀物上場高度, m

$\theta$  = 轉筒的傾角

加熱溫度: — 大氣壓力下, 90°-100°C (154°-212°F), 真空下 30°-50°C (86°-122°F), 過高時常易使穀物過熱燒焦。

2. 日光乾燥: — 是傳統乾燥方法之一, 穀物通常鋪於地面或水泥晒場上, 需要面積較大, 曝曬日光, 經常需要翻拌, 使乾燥均勻, 利用夜晚冷卻, 次日再行曝曬, 如此操作縮短乾燥時間。日光乾燥利用直接輻射傳熱及周圍空氣熱對流而加熱穀物, 熱能抵達地

面之能量大約為 350 Btu/hr-sq. ft. Hall (1957) 稱利用 500 sq. ft. 太陽能收集器，可發生相當於 41 Kw 之電力，或每小時 1.5 加侖之燃料能量，乾燥穀物。

太陽輻射能量與地方緯度、陰晴、照射時間以及方向等有關。於晴天緯度 40° 的某地之太陽輻射能量 (Kcal/m<sup>2</sup>-hr) 的數值如下：

太陽輻射能量 (Kcal/m<sup>2</sup>-hr)

時 間	垂 直 平 面			水 平 面
	東 向	南 向	西 向	
上 午 6 時	195	—	—	40
上 午 9 時	525	70	—	580
中 午 12 時	—	210	—	815
下 午 3 時	—	70	525	580
下 午 6 時	—	—	470	40

日光乾燥、穀物之溫度依水分蒸發之大氣溫度及濕度而定，周圍熱傳遞率約為 5-20 Btu/hr-sq. ft.

理論上太陽與地球可視為兩個互相平行體，太陽直徑約為 864,000 mi，太陽與地球相距約 93,000,000 mi，據輻射公式

$$q_{1-2} = \sigma F_{1-2} A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

式中：

$q_{1-2}$  = 熱輻射傳遞率

$\sigma$  = Stefan-Boltzmann 常數 = 1730  $\times 10^{-12}$  Btu/(sq. ft-hr-°R)

$T_1$  = 太陽輻射面之溫度假設為 10,000° F = 10000 + 460° R

$T_2$  = 地球大氣溫度假為 80° F = 80 + 460° R

$F_{1-2}$  = 幾何因素 =  $1 \times 10^{-4}$ ，每單位面積為  $(1 \times 10^{-4})/A$

代入各值

$$q = 1730 \times 10^{-12} \times \frac{1 \times 10^{-4}}{A} (A) (10460^4 - 540^4) \\ = 1 \times 10^{-4} [(1.046 \times 10^4)^4 - (0.540)^4] \\ = 1800 \text{ Btu/hr-sq. ft.}$$

此值通過大氣層傳達地面可能減少一半約為 900 Btu/hr-sq. ft. 計算時假設太陽為完全輻射體，熱能通過空間不被吸收，對地面為垂直輻射，事實上據 Abetti (1957) 稱太陽並非完全輻射體，許多假設與事實不符。

3. 冷凍乾燥：——使水分凍結，然後使冰昇華變成水氣外洩。乾燥室內除去水氣最為困難但很重要，因為一旦水蒸氣壓力升高，冰之昇華溫度同樣升高，對

凍結部份熱傳遞率降低。冷凍乾燥係表層冰凍部份吸熱使冰昇華洩出水蒸氣而形成乾燥層，次後通過乾燥層向內部冰凍部份繼續熱傳遞供熱，冰面昇華之水蒸氣透過乾燥層洩出體外，逐漸增加乾燥層之厚度，乾燥速度係由水蒸氣擴散率及至冰面熱傳遞率所限制。若冰面溫度達到冰融點，冰即融化，冰之昇華作用完全停止，乾燥室內水蒸氣壓力等於冰融點時之水蒸氣壓力則有阻止冰昇華作用，室內蒸氣壓力似嫌過高。冰凍乾燥加熱方法有輻射及直接傳導加熱，供給冰昇華潛熱，由冰直接昇華為水蒸氣。水蒸氣通過孔質穀物移動方式可分兩種。

a. 孔質穀物之孔徑大於水蒸氣分子平均自由途程，水蒸氣係依 Poiseuille's 公式移動，稱之卜氏流線移動。

b. 若水蒸氣分子平均自由途程大於穀物孔徑，蒸氣分子前後撞擊孔壁，且無彈性，分子離去孔壁與原先運動又無關係存在，乃屬一種擴散現象，稱之為分子流。據 Kraus, et al (1953) 水蒸氣流量公式中含有上述兩種氣流型式為

$$Q = K_1 A \frac{\Delta P}{\Delta L} = \left( \frac{dw}{d\theta} \right)_v$$

式中：

$$K_1 = a\bar{P} + b$$

$$a = (\epsilon')^3 / k (1 - \epsilon')^2 S_0 \eta RT, \text{ 為 Poiseuille's 部份。}$$

$$b = (k_1 (\epsilon')^2) / [(1 - \epsilon') S_0 (2\pi MRT)^{1/2}], \text{ 為 Kundsens 部份。}$$

$$k_1 = 48/13\pi$$

$k$  = 結構因子

$K_1'$  = 透氣率

$\epsilon'$  = 孔隙率

$\bar{P}$  = 平均壓力

$M$  = 蒸氣分子量

$R$  = 氣體常數

$T$  = 溫度

$\eta$  = 蒸氣粘度

又可以下式表之

$$\left( \frac{dw}{d\theta} \right)_v = K_1' A \left( \frac{P_i - P_r}{x} \right)$$

式中：

$$\left( \frac{dw}{d\theta} \right)_v = \text{水蒸氣移動率}$$

$K_1'$  = 透氣率

$P_i$  = 冰面水蒸氣平衡壓力

$P_r$  = 乾燥室間總壓力

$x$  = 乾燥層之厚度



冰面平衡蒸氣壓力與乾燥室內壓力差大時，水蒸氣移動依水力學原理流動，如果壓力差小時，係由擴散作用控制水蒸氣移動。乾燥期中壓力差時在變動，透氣率低乾燥初期，水蒸氣移動受擴散作用所支配，當乾燥層增厚，壓力差變大時水力流控制乾燥過程。乾燥進行期中應防止冰面溫度達到冰之融點，中止冰昇華為水蒸氣的作用。據 Meryman (1960) 利用微波加熱，可使中央部份溫度高過乾燥外層，應用輻射加熱外層溫度高於中央部份。乾燥層增厚蒸氣透氣率減小，熱傳遞率同樣減小。

4. 真空乾燥：——可稱為低溫乾燥，不發生污染、氧化問題。乾燥室內壓力依真空度而不同，穀物表面水蒸氣壓力高，兩者相差很大，水分容易沸騰蒸發，利用輻射或直接傳導加熱，以供給水分蒸發所需之熱量，表面水分蒸發量與由內部擴散移動表面水分相等，若供給熱量超過水分蒸發所需，常引起穀物過熱現象。故乾燥進行期中，應依表面水分含量大小調節供給熱量。真空乾燥設備費及運轉費較高，裝卸材料熱量損失，恢復真空度動力損失，一次乾燥容量有限，作業斷續，設備需氣密而最小能耐大氣壓力，熱效率低。然對蔬菜之冷却或穀物搶救，甚為可取。真空乾燥除去部份水分，降低穀物溫度，增加不變質的保藏期。恒率期一定真空度下穀物自由水分沸騰，溫度降低。減率乾燥期，穀物溫度接近加熱媒質之溫度。據 Marshall, et al (1950) 稱真空乾燥平均熱傳遞係數約為 1 Btu/hr-sq. ft.-°F 範圍內，乾燥率如下

$$\frac{dw}{d\theta} = h_t A (T_m - T_s)$$

式中：

$$h_t = (h_c + h_r) \left[ 1 + \frac{A_u}{L(h_c + h_r)} \right]$$

$A_u$  = 接觸空氣面積與未接觸空氣面積之比

$L$  = 物體深度

$K$  = 物體熱傳導率

$h_c$  = 熱傳遞係數

$h_r$  = 熱輻射係數

$$= 0.193e \frac{[0.01(T_1)^4 - 0.01(T_2)^4]}{(T_1 - T_2)}$$

\*  $e$  = 物體吸收率

$T_m$  = 加熱媒質溫度

$T_s$  = 真空下自由水分蒸發溫度

真空乾燥，物體內部水分蒸發，受熱傳遞內部

影響。乾燥時間與物體厚度之半的平方成正比。據 Friedman (1950) 稱乾燥時間與乾燥負荷深度的一次方與二次方之間成正比。

5. 紅外線乾燥：——熱射線波長 0.8—40 Microns 為電磁波，可視光線波長為 0.35—0.75 Microns，紅外線波長為 0.77—400 Microns ( $\mu = 10^{-6}m$ )，吸受輻射能後轉變為熱，波長 1—4 $\mu$  傳熱效果最佳，紅外線對不透明物體照射深度較淺，穀物水分含量對紅外線吸收亦多影響，用落水濾簾消除波長 1.4 $\mu$  以上光線，可穿透 10 mm 厚的水簾，小於 1.0 $\mu$  波長之紅外線可穿透人體皮膚約 10 mm，生馬鈴薯約 6 mm，小麥約 2 mm，紅外線照射孔質穀物幾全為物體所吸受，紅外線穿透深層，表面吹送冷風溫度下降，穿透愈深，表面溫度愈低，因之穀物中水分移動方向與因熱作用水分移動方向相同，增強乾燥效益。若間歇輻射加熱及送風冷却穀物表面，交互作用，效果更佳，但需注意輻射加熱時間應使穀物變熱為準 (Ginzburg 1969)，紅外線乾燥同時可以殺菌，使品質向上 (Jubitz 1963)。據 Tiller, et al (1942) 紅外線照射與溫度關係如下

$$\frac{T_m - T}{T_m - T_0} = e^{-Fh_c\theta / C_p\rho L}$$

式中：

$T$  = 時間  $\theta$  薄板溫度，°F

$T_0$  = 薄板原始溫度，°F

$h_c$  = 熱對流傳導係數，Btu/hr-sq. ft.-°F

$c_p$  = 薄板比熱

$\rho$  = 薄板密度

$L$  = 薄板厚度

$$T_m = T_a + \frac{3.41\alpha I}{Fh_c}$$

\*  $T_a$  = 大氣溫度，°F

$\alpha$  = 薄板輻射吸收率

$I$  = 板面輻射強度，watt/sq. ft.

紅外線照射物體，供給水分蒸發之熱量，照射部份溫度增加，水蒸氣壓力增加，乾燥速度加速。繼續進行乾燥，穀物水分含量降低，應調節紅外線照射量（曝光量），紅外線乾燥受大氣溫度影響小，適當排氣，維持大氣中水蒸氣分壓低下，增加乾燥速度。紅外線照射因照射方向及距離不同而曝光量不同，陰影部份全無照射，應設法如何均等加熱，即均等照射，適當配置或攪拌穀物，使乾燥一致。普通紅外線乾燥速度 2—6 倍於一般乾燥方法。據坪井氏 (1951) 稱

密閉爐中紅外線加熱近似溫度式如下：

$$T = \frac{P \times 10^3}{1.43V \times 9.6S}$$

式中：

T = 上升溫度，°C

P = 所耗電力，Kw

V = 爐內容積，m<sup>3</sup>

S = 接觸大氣爐壁面積，m<sup>2</sup>

估計紅外線乾燥所需電力為

$$P = \frac{(WC + wC')(T_b - T_r) + wH}{860 \eta_r \eta_o \sigma}$$

式中：

P = 所需電力，Kw

W = 穀物乾重，Kg

C = 穀物比熱，Kcal/Kg-°C，例如小麥<sup>1/2</sup>  
% m. c. 為 0.30 小麥 15% m. c. 為 0.40

w = 水分含量，Kg

c' = 水的比熱 = 1

T<sub>r</sub> = 穀物原始溫度，= °C + 273.16，°K

T<sub>b</sub> = 穀物平均加熱後溫度，°K

H = 水分蒸發潛熱，Kcal/Kg (= 539)

η<sub>r</sub> = 乾燥爐熱效率，密閉式為 50-65%，  
開啟式 25-35%。

η<sub>o</sub> = 輻射效率，60-80%

σ = 穀物輻射吸收率，50-60%。

6. 蒸氣乾燥：——應用飽和蒸氣加熱、加壓、驅除、蒸發穀物中大部份水分，然後減壓洩放蒸氣，形成渦流，使剩餘自由水分沸騰，消費原先物體內所蓄之熱量，據實地觀測部份水分是以液體狀態洩放。利用蒸氣加熱加壓乾燥，恆率期中物體平均溫度較用熱風時高達一倍，體內發生許多蒸氣發生中心，洩壓時物體溫度下降，水分沸騰，內部蒸氣壓力驅水外洩，水分含量減少速度增加，直至臨界水分含量，減率乾燥期開始，水分蒸發發生於體內，熱傳遞係數因媒質溫度及體表體內溫度差關係密切。體內熱傳遞係數 α<sub>o</sub> 約為體表 α<sub>s</sub> 的 1/2，可能因各層物質乾燥程度之增加，增加向內傳熱及內部水蒸氣向外移動的阻力所成。平均水分含量 15% 以下時 α<sub>s</sub> 值約為恆率期 α<sub>o</sub> 的 40-50%。

a. 媒質與物體溫度差減少，熱對流傳遞係數因而減少，溫度差由 100°C 減少為 10°C，則熱傳遞係數減少了

$$4\sqrt{\frac{100}{10}} = 1.77 \text{ 倍}$$

b. 輻射熱傳遞係數減少，設媒質與物體溫度差為 (t<sub>h</sub> - t<sub>m</sub>)，及容器壁溫度為 t<sub>w</sub> 較媒質為低時，則其關係如下

$$\alpha'_{r.a.d} = \alpha_{r.a.d} \frac{t_w - t_m}{t_h - t_m}$$

例如：t<sub>h</sub> = 150°C，t<sub>w</sub> = 140°C，物體溫度各為 100°C，120°C，及 130°C 時，則 α'\_{r.a.d}/α\_{r.a.d} = 0.8, 0.66 及 0.5。

由上可知總熱傳導率為兩係數之乘積，更形減少。

利用蒸氣乾燥，減少乾燥時間，殺死酵素 (100°C)。英國飼料 Grass cakes 調製已利用蒸氣製造，且具基礎。水稻乾燥似可引用，至少可搶救收穫期水稻損失。

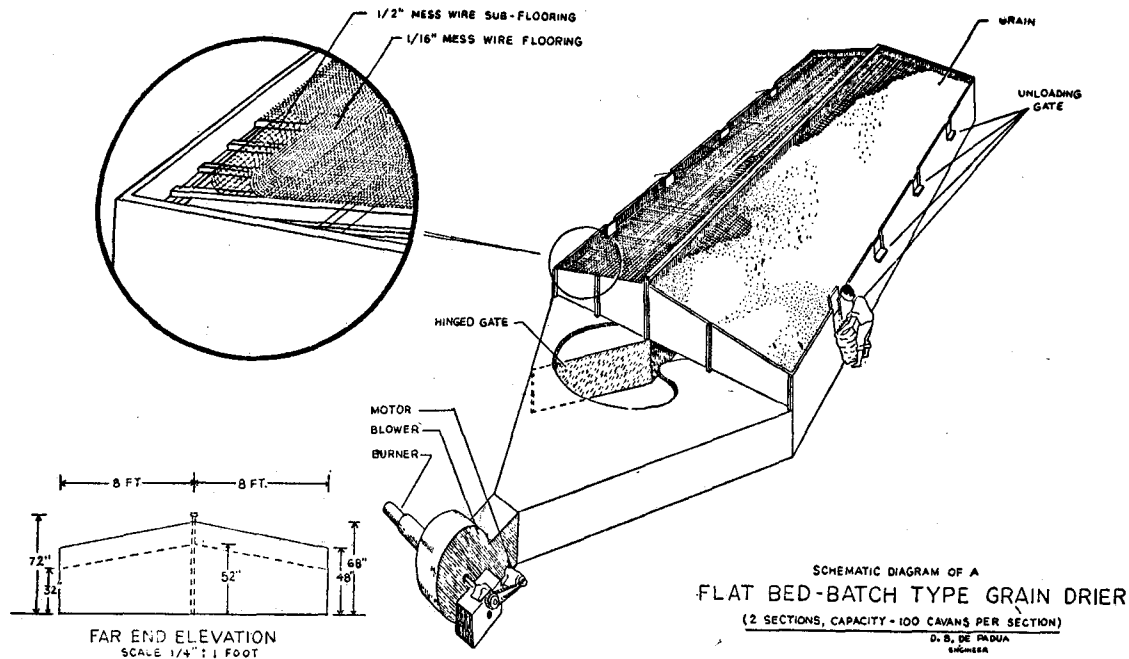
7. 吸濕乾燥 (Sorbent drying)：——應用適當物質吸受水分，形成結晶水，多孔質物體利用毛細管作用吸受水分，多孔質物體表面積大用界面活性吸着水分及氣體。改變理化性的稱吸收劑，固體的如氯化鋰、氯化鈣、液體的如濃硫酸及酒精等。不改變性質者稱吸着劑，固體的如活性氧化鋁、膠質矽砂及活性炭等均可採用除去穀物中水分含量，保持品質。

## 乾燥實例

1. 據菲律賓大學農工系報告採用 10 Hp 轉速 1750 rpm 風壓 1" 水柱，風量 10,000 CFM 之風扇，送風溫度為 110°F，供熱量 350,000 Btu/hr. 水稻乾燥深度 12"，一次一邊乾燥 4,400Kg，水分含量 18-21% 乾燥至頂面 14% 底層 13%，均質化時間約 4 小時，見圖(32)。

若每邊乾燥時間採用間歇性，每半小時切除熱源，吹送冷風半小時，再停止送風均質化一小時，如此左右兩邊交替切熱、冷卻、均質化，除可節省燃料，穀物乾燥速度可以增加，品質因曝熱量減少而向上。臺灣似可利用農村原有之動力，帶動風扇，若為引擎宜設法利用排氣餘熱，增加總效率。乾燥容量可按比例縮小。

2. 萬國農具公司現場乾燥方法，增加曳引機利用時數，值得提倡，單位時間內同時可以乾燥三個拖車穀物，拖車製作簡單只需兩個車輪，前有支脚着地，風管可以帆布或橡膠布製成，如此拖車可以載運穀物，亦可作為乾燥容器，實有利將來穀物增產後發生乾燥之問題之解決。



圖(32) 箱型淺層乾燥設備

3.美國強鹿公司移動式乾燥機以及日本金子公司類似型乾燥機，乾燥容量有限，熱效率低，不含經濟價值，特別於石油及機器進口地區，農產品價格不高時，更為顯著。主要配件一為熱風發生部份，及一乾燥裝置。

4.高溫同流向流乾燥機，熱風溫度高達495°F，面積96 ft<sup>2</sup>，每小時乾燥玉米16—28噸，玉米品質（包括味、香、硬、軟，碎粒以及成品產量）對熱非常敏感，每磅水分蒸發所耗熱量在1250—1450 Btu 熱效率很高，如以理論值為1,000 Btu/lb (water) 或1100 Btu/lb (water) 計算時，則熱效率為69—80%或76—88%。此種乾燥機不污染空氣。商品最適容量為每小時5000—6000蒲式耳。圖(33)為600—1000蒲式耳/小時。

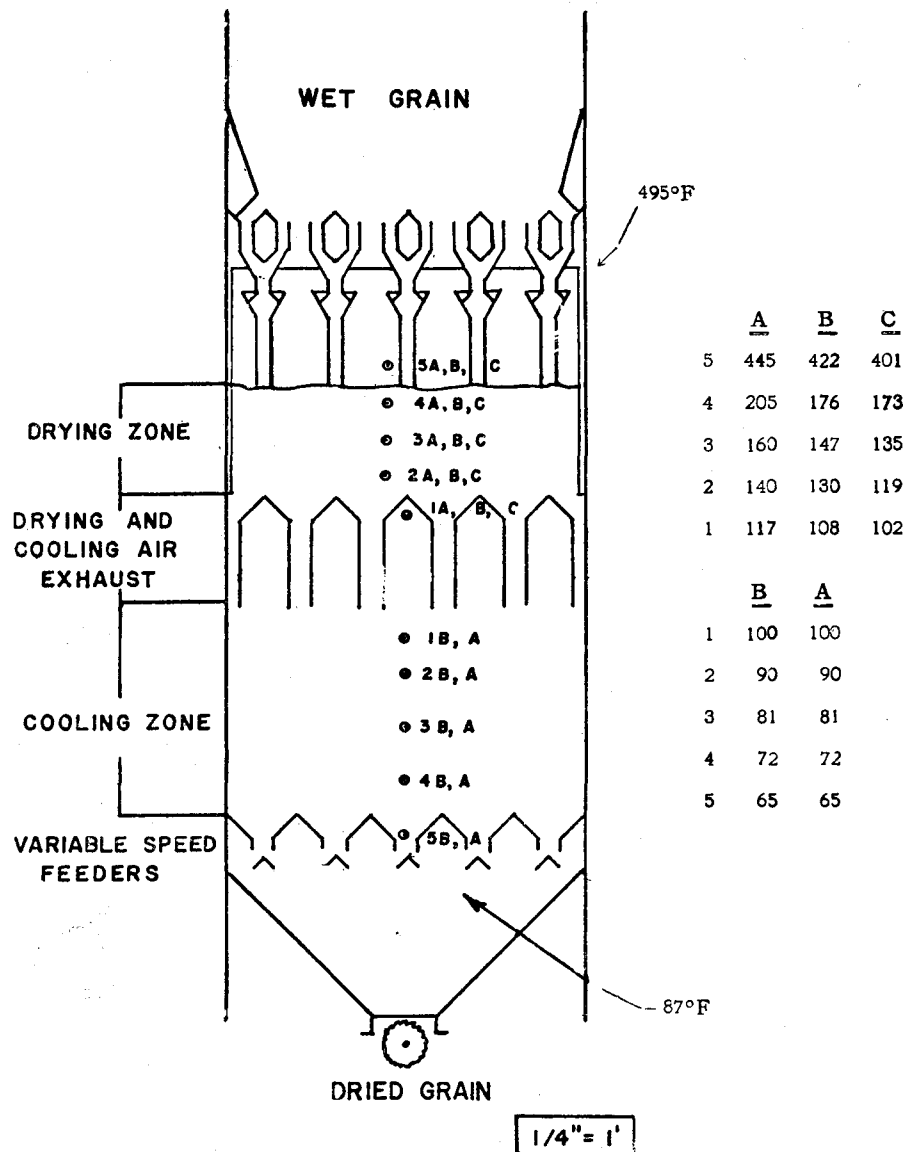
5.通風乾燥貯藏：——穀物貯藏倉庫或容槽均可作為乾燥穀物時之容器，如圖(34)為各種型式乾燥系統。有時送熱風或常溫通風乾燥，風量1—5 cfm/bu或以上時屬於通風乾燥，通風量小者為通風冷卻，一般≤ $\frac{1}{2}$  cfm/bu，貯槽乾燥可以節省勞力，設備費用。穀物溫度80°F 通風0.5 cfm/bu' 24小時後可降低為50°F，穀物溫度由夏季溫度通風冷卻達冬季溫度，50%是由蒸發穀物水分所達成。乾燥直後通風冷卻，80%是由蒸發穀物水分而達成。通風速度不宜過高，普通20—30 fpm，最大風速為1000 fpm，風速過大除增加風扇馬力外，常會送風不均，穀物深度50

ft 以上時，風速可以增加，有時可用1500—2000 fpm。風扇風量與風壓之關係見圖(35)，常溫通風乾燥之風量見附表。穀物貯藏期中穀物受外界影響，使穀

穀物常溫通風風量表

Crop	Moisture Percentage	Recommended Minimum Air Flow cfm/ft <sup>2</sup> of Drying Area	Recommended Depths, Feet
Wheat	20	15	6
	18	13	8
	16	8	10
Oats	25	15	6
	20	13	8
	18	12	10
	16	10	12
Shelled corn	25	22	6
	20	19	8
	18	19	12
	16	13	16
Ear corn	30	24	12
	25	19	16
Chopped hay	40	15	8
		17	12
		24	18
Baled hay	35	15	6
		22	9
		30	12

For hay, total air flow should not drop below 500 cfm. per ton.

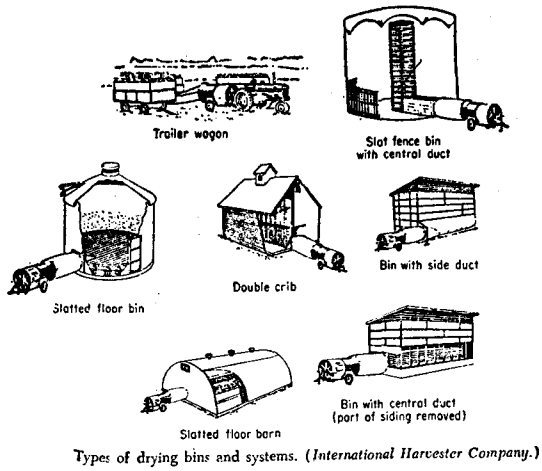


圖(33) 高溫同流向乾乾燥機之結構

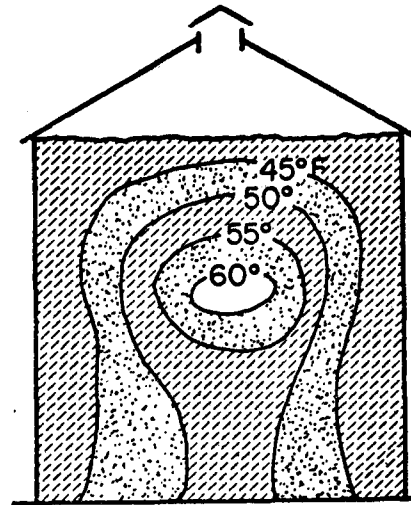
物溫度分布不均，水分發生移動，如圖(33)為頂面中央發生濕穀敗壞，若為外界氣溫高，穀溫低時則貯穀底部中央產生濕穀開始敗壞。設若通風冷却使穀溫均一，則可免除上述現象發生，確保穀物品質。寒冷期間通風使穀溫下降，利於保存，但不可低於 30°F (冰點)。玉米水分含量 20%，通風冷却保持穀溫 40°F，可安全貯藏，玉米水分含量 26%，通風冷却保持穀溫 40°F，可保證品質不受影響卅天。一般原則大氣

溫度低於穀物溫度 15°F 時，即可通風冷却乾燥，如果大氣相對濕度低於 70% 時，效果更佳。

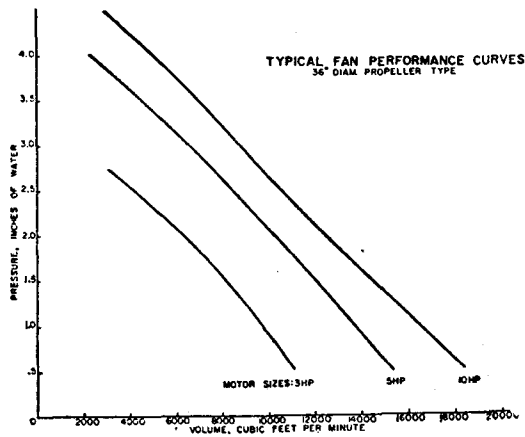
水稻吾人對乾燥方面資料太少，除了規定收穫後乾燥水分含量 13% 進倉後，什麼也不談，如何乾燥以及如何保持水稻日後品質也少研究。實有研究如何通風使穀物溫度降低，有時可除去燻蒸殺菌後的不快氣體氣味，亦屬必要。



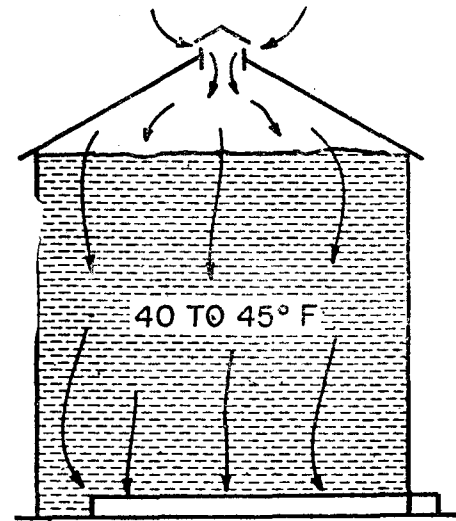
圖(34) 各種型式乾燥系統



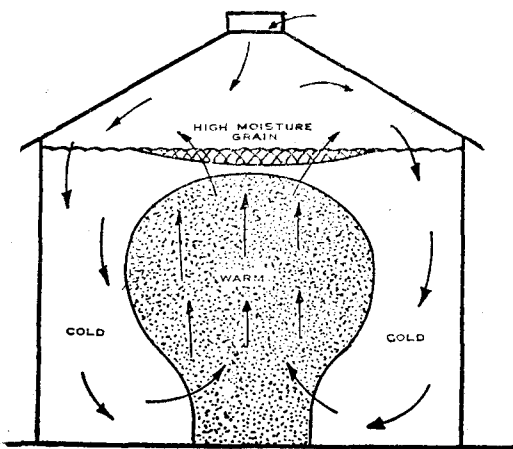
圖(37) 貯穀溫度分布曲線



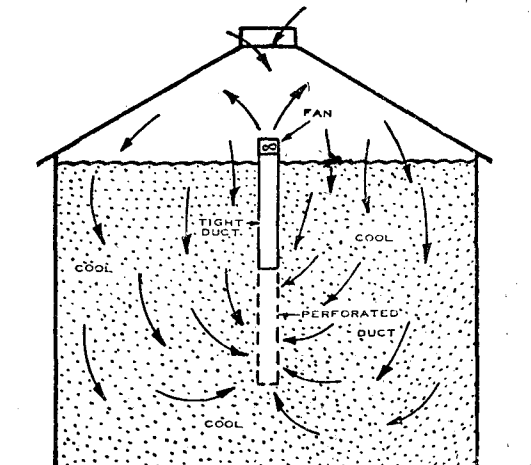
圖(35) 螺旋槳風扇之風量與風壓



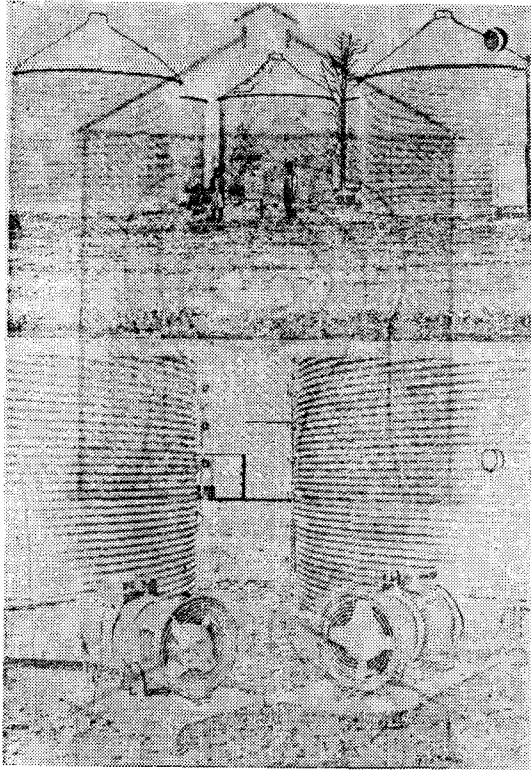
圖(38) 之一 通風冷却貯穀溫度均一



圖(36) 大氣溫度低穀物溫度高裝如中央頂層濕潮



圖(38) 之二 通風冷却貯穀溫度均一



圖(39) 美國農家露天穀物乾燥貯倉

### 謝 誌

穀物貯藏與乾燥問題發生已久。有人類即有此問題，古今中外專家學者研究者不乏其人，因時因地條件所限，不能完全解決問題。筆者五十五年受國科會補助開始研究水稻乾燥，二年前又由國科會資助出國進修一年，有機會從美國乾燥專家Dr Barre繼續研究穀物乾燥，迄今尚無機會實地實驗穀物乾燥。不揣愚陋，特將研究心得寫出。若能對臺灣水稻增產後所發生之貯藏與乾燥問題有所貢獻，則感幸甚！

### 參 考 文 獻

1. 水稻常溫及加熱通風乾燥 沈國文 國科會補助研

### 究報告

2. 穀物品質與機械作業之關係 沈國文 農工學報
3. 農產品通風乾燥法 渡邊鐵四郎 博友社(日文)
4. 稻病害蟲及其防除法 湯淺啓溫等 博友社
5. 麥、雜穀病害蟲及其防除法 同上
6. 食品加工與貯藏 櫻井芳人等 光生館
7. 食料工業 同上 厚生閣版
8. 農產品製造機械 南川利雄 產業圖書
9. 米穀低溫貯藏理論與實用化研究 河野常盛
10. 冷藏倉庫 鶴田鎮太郎等 日本冷凍協會
11. 粉粒體輸送裝置 狩野武 日刊工業
12. 粉體裝置工學 白井隆等 同上
13. Agricultural Engineer's Handbook Richey, et al McGraw-Hill
14. Agricultural process Engineering Henderson, et al John Wiley & Sons.
15. The fundamentals of Food Engineering S. E. Charm, AVI.
16. Feed Manufacturing Technology, H. B. Pfest.
17. ASHRAE Handbook of Fundamentals ASHRAE.
18. Mass transport phenomena, Geankoplis Holt, Rinehart & Winster, inc.
19. Basic principles in Grain Drying & Milling, Padua UPCA.
20. Application of the logarithmic model to Cross-flow Deep-bed Grain drying, Barre, et al Transaction of ASAE.
21. Modern Methods for Drying Grain in Bin, Barre, Farm Fans, inc.
22. Heat Transfer, Jakob John Wiley & Sons, Inc.
23. Farm Machinery & Equipment, Smith McGraw-Hill.
24. Farm Power & Machinery Management, Hunt Iowa State Univ, Press.

### Summary

Grain storage and drying is an important and troublesome problem in Formosa. Locally, both the so-called specialists and farmers are unknown the modern scientific methods and principles of grain drying and preservation.

This article is purposely written to illustrate the fundamentals of process engineering, and to present the means by which might solve the local problems of farm crops. Maybe the readers get some new comprehension after in reading this subject, and change his traditional methods to the efficient scientific ones here.