

稻穀儲存通風技術及其模式推導之研究

A Study of Aeration Techniques for Rice Storage and the Derivation of Aeration Models

國立臺灣大學農工所研究生

姚 金 典

Yau Chen-Tien

國立臺灣大學農機系教授

張 森 富

Chang, Sen-Fuh

摘 要

本研究之目的為探討整理通風技術以供臺灣地區應用及推導通風模式以供描述稻穀儲存溫度與時間之關係。

建議在相對溼度70% (60%更佳) 以下及外界溫度較穀溫低5°C以上時才通風，可得較佳冷卻效果亦不浪費能源。

根據能量、質量及蒸氣壓平衡方程式所導出之通風模式，與實際試驗結果比較時，其蒸氣壓平衡方程式須加以修正，尤其是在低風量通風可得較佳之模擬降溫結果。

將來在建立平倉通風靜壓阻力資料及通風模式在實際穀倉之應用方面，仍須繼續深入研究。

關鍵詞：通風，模式，稻穀。

ABSTRACT

The study is aimed at investigating aeration techniques for local applications and deriving an aeration model for describing the relationship between temperature and time of stored paddy.

It is suggested to ventilate the stored paddy under the condition of relative humidities below 70% (60% better) and temperature difference above 5 C for better cooling effect and energy saving.

An aeration model based on energy, mass and vapor pressure balance equations is derived. Compared with the experimental data, the model is modified to better fit those data in the low aeration rate range.

Further studies in constructing static pressure resistance data of local flat type paddy warehouses and applying the aeration model to practical warehouses are very needed.

Keywords: Aeration, Model, Paddy.

一、緒 論

臺灣地區稻穀年產量在民國67年約 310 萬公噸，到76年已降至 240 萬公噸(9*)，倉容不足的問題大體上已解決。不過，生產季節一定而消費則是常年的，仍需儲存才能確保供需平衡。而儲存稻穀，主要需注意的兩點是數量與品質。以往較注重穀量之保存，但是我國即將進入已開發國家之林，有關生活素質亦需提高，因此今後對於稻穀品質之確保也應注重。

改善倉儲條件，實用之機械方法有二即翻倉與通風。通風可均化穀溫，如在適當之條件下通風則更可達到冷卻之效果。另外，通風沒有翻倉費時與造成穀物破損之缺點。因此，本研究擬探討選擇與使用風機之技術以及進行小型通風試驗以推導通風模式。

有關通風技術方面，主要是收集國內外資料加以系統化整理以求適用於本省之環境。至於通風模式之推導，資料較欠缺，則需從乾燥模式之比較做起，輔以通風試驗控制主要因字：風量與內外溫差，然後建立較佳之通風模式。

二、目 的

本研究之目的如下：

1. 有系統的整理穀物通風技術資料，使其簡單明瞭，以供儲存稻穀之用。
2. 建立稻穀之半經驗通風模式，以供稻穀通風時預測穀溫變化與時間關係及其他相關能源消耗、成本之估計等應用。

三、通 風 技 術

1. 通風目的與標準風量(5)

通風的目的主要是“冷卻穀物”，使其溫度降低以減少菌類及昆蟲之活動；與“均化穀溫”以防止水分移動。並可在靜置的情況下，消除穀層內產生的熱點、異味，亦可配合薰蒸殺蟲劑之使用，以抑制病蟲害之產生。

為了確保貯存穀物的品質，避免因通風造成嚴重的水分移動，所以風量、溫差不宜太大。本省的氣候條件與美國南部各州較為接近，故採用其使用標準，經單位換算後如表一所示（每英斗以 56 磅計算）。儲藏穀物之通風量一般為 0.104 CMM/TON。

表一·美國貯存穀物通風作業時之通風量標準

貯 存 方 式	通風量，CMM/TON	
	北 部 各 州	南 部 各 州
平 倉	0.056-0.111	0.111-0.222
豎倉(例如圓筒倉)	0.028-0.056	0.037-0.111

* 本標準適用於適當條件下之間歇通風

2. 風機的選擇及使用(5)

當空氣被迫流經穀層時，因穀層阻力會使氣流產生壓力降。此阻力與空氣流速、穀物種類、空隙率、穀層深度因素有關。Shedd (1953) 曾就不同穀物之阻力進行試驗，其所獲得壓力降資料，已廣泛被應用(2)。

風機需有足夠的風壓以克服穀層產生的阻力和連接管路上的壓力損失，並維持適當的送風量。由單倉的總容量可求得適當的總風量，並可換算成爲單位面積的風量，再由 (Shedd curve) 中查出每呎深之壓降。代入下式可求得風機克服穀層阻力所需之馬力。

$$\text{風機馬力} = \frac{\{(\text{每呎深壓降}) * (\text{穀層厚度})\} * \text{總風量}}{4000}$$

上式中假設風機效率爲62.8%。

在實際使用上，有時以標準風量來冷卻穀物所需的時間太長，爲了維持穀物的品質，而提高風量以縮短冷卻所時間。根據美國 AMCA (1957) 法規，凡是販賣的穀物調製用風機都必須附有此機之特性資料(2)。以典型的軸流式風機爲例，如圖 1 所示。其靜壓效率在風量百分比55—75%間最高，所以要改變風量時，如能使風機靜壓維持在高效率的靜壓範圍內，即可避免因效率太低而浪費能源。

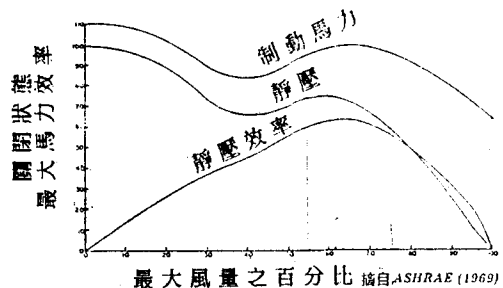


圖 1. 典型之軸流式風機特性曲線

* 括弧內數字爲參考資料之編號

3. 通風作業管理

穀物進倉時，通風工作應儘早進行。通常在穀物進倉之同時，通風設備應隨即工作，並連續作數日之運轉，使原先穀層中水分與溫度不均勻部分迅速達成均勻之目的(2)。

通風時機應選在穀溫與外界空氣溫差在 5℃ 以上，而且空氣相對溼度低於穀物安全儲藏水分之平衡相對溼度時最佳。臺農 67 號稻穀之平衡含水率資料可知大氣相對溼度在 60—70% 時，其平衡含水率大致在安全貯藏含水率 13—14% 之間 (6,7)。

因本省屬高溫多溼之氣候，假使有緊急情況發生，如穀溫高於 40℃ 且其含水率高於安全貯藏水分，或穀倉內有熱點存在時，最好連續通風使溫度降下來，再選擇相對溼度低於 70% 時通風，將回潮的水分除掉。

事實上，國外資料顯示通風應在相對溼度 60% 以下進行較安全 (16)。但是，臺灣地區之年平均相對溼度在 75% 以上，要找在相對溼度 60% 以下的時間才能通風，實際上相當困難。因此，採用相對溼度 70% 狀況，幸而風機開動時也會使氣溫上升 1—2℃，如此約可降低相對溼度 3—10%，略微彌補此一缺憾。

通風時穀層中會有一冷卻區移動的現象，由下往上通風時，冷卻區逐漸上移，將下層穀熱往上帶，使上層穀物溫度上升，所以必須等上層穀溫上升至某一高點再下降時，才表示大部分熱氣已排出倉外，此時才可停止通風。當穀溫與大氣溫度差在 2—3℃ 時，通風降溫速率極為緩慢，應停止通風(8)。

四、通風模式

根據熱傳、質傳原理導出之基本理論模式，大都將倉壁視為絕熱。在大型穀倉中，由於倉壁傳導所損失的能量，相對於整個穀倉的能量比例很小，所以不致有所影響。但以小型試驗倉模擬通風狀況時，倉壁散熱相當大，不能予以忽略。所以此通風模式著重於可包含倉壁熱傳導的半經驗模式。

半經驗模式是經由一些經驗理論的假設，簡化基本理論模式中過於複雜的偏微分方程式而得。

Thompson (1968) 假設薄層玉米粒和其周圍空氣的熱傳非常快，使玉米能在極短的時間內趨近空氣的溫度。然後，再將穀層視為一連串薄層的組合，配合上述平衡溫度的假設，提出：在每一段

時間區間內，各薄層穀物和空氣存在一平衡狀態，此即為最初的平衡模式。本研究擬採用此模式與通風實驗結果比較，其步驟包含以下三項：

1. 各薄層穀物空氣、穀物之能量在極短時間內平衡

$$1.005 \cdot T_o + H_o(2467.4 + 1.884 \cdot T_o) + CrGo = 1.005 \cdot T_e + H_o(2467.4 + 1.884 \cdot T_e) + CrTe$$

平衡溫度

$$T_e = \frac{(1.005 \cdot T_o + 1.884 \cdot H_o) T_o + CrGo}{1.005 + 1.884 \cdot H_o + Cr}$$

T_o : 空氣初溫, K

H_o : 空氣初絕對溼度

Cr : 稻穀比熱*穀物對空氣的重量比, KJ/ (Kg · K)

T_e : 空氣瞬間平衡溫度, K

Go : 稻穀初溫, K

2. 穀物與空氣在達到瞬間平衡溫度後，再進行水分蒸發的作用。

空氣絕對溼度變化

$$\Delta H = H_f - H_o = (M_o - M_f) \cdot R / 100$$

Δ : 變化量

M_o : 稻穀初含水率

H_f : 空氣瞬間平衡後之絕對溼度

M_f : 為穀物在 T_e, H_o 空氣狀態下的平衡含水率

R : 穀物乾物對空氣的重量比

3. 再估算空氣溼度變化後新的平衡狀態

$$1.005 \cdot T_e + H_o(2467.4 + 1.884 \cdot T_e) + CrGe + \Delta H(Ge - 273.16) = 1.005 \cdot T_f + H_f(2467.4 + 1.884 \cdot T_f) + CrGf + L \Delta H$$

其中 $Ce = Te$

最後的平衡溫度

$$T_f = \frac{(1.005 + 1.884 \cdot H_o) \cdot T_e - \Delta H(2467.4 + L - Ge + 273.16) + CrGe}{1.005 + 1.884 \cdot H_f + Cr}$$

T_f, H_f 為進入下一層穀物之 T_o, H_o

Bloom and Shove (1971) 提出，因外界空氣溫、溼度的變動會使穀層有溫度梯度存在，所以各薄層內空氣的蒸氣壓可能或高或低於穀物的蒸氣壓。但兩者蒸氣壓差異不大，假如在通風率亦不大的情況下，空氣與穀物很可能在短時間內幾近一

平衡狀態。

Thompson (1972) 針對 Bloome and Shove 提出的蒸氣壓幾近平衡狀態假設，將原來平衡模式予以修改。不再用空氣瞬間平衡溫度與空氣初溼度來計算穀物當時的平衡含水率。改以空氣與穀物在單位時間區間內的能量、質量、蒸氣壓三大平衡方程式描述其狀態。使用數值方法找出適合三平衡方程式的空氣 Hf 值，再解出平衡後的空氣溫度、溼度和穀物最終含水率。其方程式為：

1. 能量平衡

$$1.005 * T_o + H_o(2467.4 + 1.884 * T_o) + CrGo + \Delta H(Go - 273.16) = 1.005 * T_f + H_f(2467.4 + 1.884 * T_f) + CrGf + L\Delta H$$

得

$$T_f = \frac{(1.005 + 1.884 * H_o) * T_o - \Delta H(246.4 + L - Go + 273.16) + CrGo}{1.005 + 1.884 H_f + Cr}$$

2. 質量平衡

$$\Delta H = H_f - H_o = (M_o - M_f) * R / 100$$

得

$$M_f = M_o - 100 * (H_f - H_o) / R$$

3. 蒸氣壓平衡

穀體內平衡相對溼度 (Erh)，可由周圍溫度、穀體含水率決定，可表示如下：

$$Erh = f(T_f, M_o)$$

空氣相對溼度 (RHair)，可以溼氣圖數學式子表示如下：

$$RHair = \frac{14.696 * H_f / (0.6219 + H_f)}{\text{EXP}(54.6329 - 12301.688 / T_r - 5.16923 * \log(T_r))}$$

T_r ：空氣之絕對溫度，R

其空氣、穀物熱交換流程如圖 2。

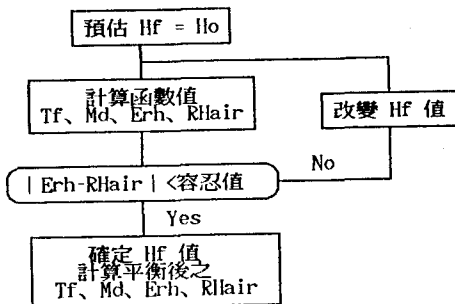


圖 2. 平衡模式空氣、穀物熱交換流程圖

對於低溫低風量作業而言，Thompson 修正後的模式，在蒸氣壓平衡部分確實較原假設完備。另外 Thompson 亦在新模式中考慮了倉壁熱傳導和穀物呼吸熱兩部分。採用之通風模式不考慮呼吸熱影響，其流程如圖 3。

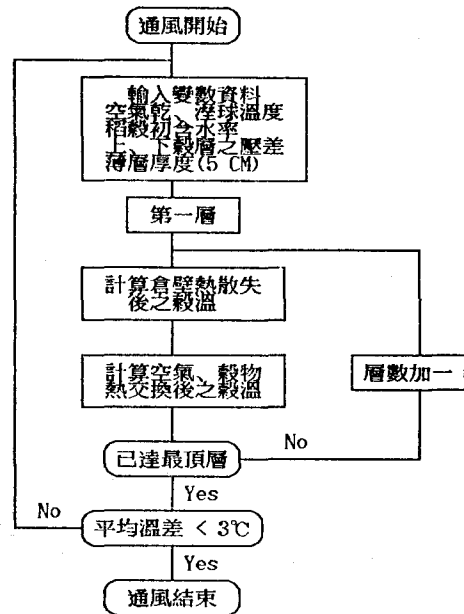


圖 3. 平衡模式流程圖

五、模式相關資料

1. 風壓：

Shedd 其所獲得的稻穀壓力降資料，可以下列關係式表示(8)：

$$Q = 0.0007282 \exp [0.864 * \ln (\Delta P / L)],$$

$$r = 0.999$$

其中

ΔP ：壓力降 (Pa)

L ：穀層深度 (M)

Q ：單位面積之風量 ($m^3/s - m^2$)

r ：相關係數

公式適用範圍： $0.006 - 0.2000 m^3/s - m^2$

Calderwood (1973) 使用稻穀，糙米與白米在不同狀況下進行穀層阻力試驗。其中稻穀含長粒、中粒各在不同含水率 (16M、24M，M：% d.b.)，不同充填密度 (自然鬆填、鎮壓) 下進行試驗，所得結果與 Shedd 曲線同繪於圖 4 上。

Calderwood 試驗穀層高度為 2.44M (8ft)

，而 Shedd 則為 2.74M (9ft)，以自然鬆填而言，其充填密度應甚為接近。由圖 4 中鬆填部分的曲線可看出：雖因穀物種類及含水率而使壓力有所差異，但相差不大；壓實部分（充填密度約為鬆填之 1.14 倍）曲線與鬆填曲線間的差距最為明顯。因此推論充填密度對壓力降的影響最大，其他因素則較不顯著。

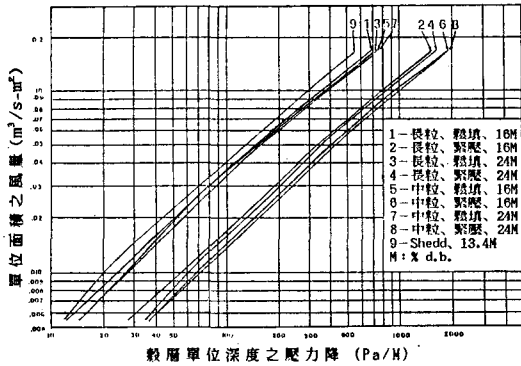


圖 4. 不同狀況稻穀的空氣阻力關係

Gunasekaran and Shove (1983) 對薄層稻穀（長粒）進行低風量下的壓力降試驗。穀層以自然鬆填 30 公分為最大厚度，並由資料迴歸出三段低風量範圍的壓力降公式。公式如下所示：

風量 0-0.002 m³/s-m²

$$\log(Q) = 0.8533 \log(\Delta P/L) - 3.0$$

風量 0.002-0.013 m³/s-m²

$$\log(Q) = 0.7742 \log(\Delta P/L) - 2.854$$

風量 0.013-0.022 m³/s-m²

$$\log(Q) = 0.6709 \log(\Delta P/L) - 2.569$$

Q: 風量, m³/s-m²

$\Delta P/L$: Pa/M

以量測倉底調壓室的靜壓代入適當的風量與壓力降公式，以求得使用的風量。以模擬倉而言，豎倉標準風量 0.037-0.111 CMM/TON 其單位面積的通風量

$$Q = \frac{(\text{標準風量 CMM/TON}) * (\text{容積 } 36.4 \text{ Kg})}{\text{截面積 } 0.0625 \text{ m}^2}$$

$$= 0.000359 - 0.00108 \text{ m}^3/\text{s-m}^2$$

而 Shedd 曲線的下限範圍為 0.006 m³/s-m² 並不適用。因此需要有一較為適當的壓力降公式來估計所用的風量。

風壓部分，推論影響壓力降最大的因素為充填

密度，其餘因素只會造成些許的誤差。本研究是採 0.9M 的自然鬆填穀層高度，其充填密度應在 Shedd 之 2.74M，與 Gunasekaran (1983) 低風量試驗 30 CM 之間。因為 Shedd 曲線下限為 0.006 m³/s-m²，故取其末端良好的線性關係予以延伸，再配合 Gunasekaran 所得資料，希望有一較適合的關係式存在。Shedd 與 Gunasekaran 所作資料同繪於圖 5。

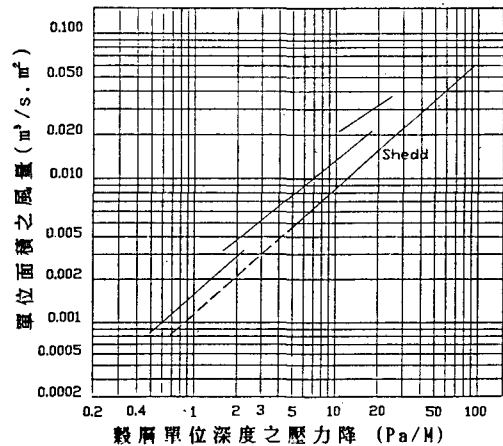


圖 5. Shedd 與 Gunasekaran 所作之空氣阻力關係

本研究實際採用的風量關係式為

$$Q1, \text{shedd} = 0.0007282 * \exp[0.864 * \ln(\Delta P/L)]$$

IF Q1 in 0-0.002 m³/s-m²

$$\log(Q2) = 0.8533 \log(\Delta P/L) - 3.0$$

IF Q1 in 0.002-0.013 m³/s-m²

$$\log(Q2) = 0.7742 \log(\Delta P/L) - 2.854$$

IF Q1 in 0.13-0.022 m³/s-m²

$$\log(Q2) = 0.6709 \log(\Delta P/L) - 2.569$$

使用風量 $Q = (Q1 + Q2) / 2$

使用控制調壓室靜壓的方式，不僅可免除調壓室前段壓力、流量的問題，若有更精密的儀器和方法可確定使用風量，亦可在不須重作試驗下進行修正的工作。

2. 溼氣圖

Brooker (1967)，提供了描述溼氣圖的數學模式，只須經由二項熱力性質的輸入，就可獲得當時空氣狀態的其他資料。在模式應用上，很方便。

3. 稻穀的物性及平衡含水率

1) 稻穀的比熱

Wratten (1969) 等，提出稻穀比熱

$$C_p = 0.9214 + 0.05447 M_w$$

其中

C_p : 稻穀比熱, KJ/ (Kg. K)

M_w : 溼基含水率%

2) 稻穀之蒸發潛熱

Wang (1978) 提出 -0.346

$$L = (1795.44 - 0.811 * T) M_d$$

其中

L : 稻穀中水的蒸發熱, KJ/Kg

T : 空氣之溫度, K

M_d : 稻穀的乾基含水率%

3) 稻穀的平衡含水率

平衡含水率是穀體內水分移動之重要指標，經多位學者提出許多不同型態之方程式，其中仍以配合試驗資料的半經驗公式使用最廣。

Henderson 於 1952 年提出下列型態的半經驗公式

$$1 - rh/100 = EXP(-C * Tr * Md^n)$$

其中

rh : 相對溼度

M_d : 乾基平衡含水率

Tr : 絕對溫度, R

C, n : 與穀物有關之常數

經多位學者及 Henderson 本人修正 (1982, ASAE Yearbook) 再提出下列型態的式子：

$$1 - rh/100 = EXP(-K(T_c + C) * Md^n)$$

不同型態的方程式可能適用於不同種類的穀物，而 Modified Henderson 方程式對稻穀而言，相當好用。但對不同品種、地區的稻穀而言，其性質會有不同，方程式所得的常數也會不同。本試驗使用臺農67號稻穀為試驗材料，故以其四組平衡含水率資料 (15°C, 25°C, 35°C, 45°C)，導出常數如下：

K : 3.55E - 5

C : 27.4

n : 2.384

六、試驗設備與方法

1. 試驗設備：

本試驗使用內徑尺寸為 250MM*250MM*1000MM 之豎倉模型倉如圖 6. 並採用含水率 12—13% 溼

基之臺農67號稻穀為試驗材料。試驗中使用的主要設備有：

- 1) 恒溫箱 (加熱稻穀至設定溫度)
- 2) 自動溫度計錄器 (Data Loggor 3020T)
- 3) 微差壓計 (至 0.01 MM-水柱)
- 4) 小型離心式風扇及變壓器
- 5) 風管、節流閥

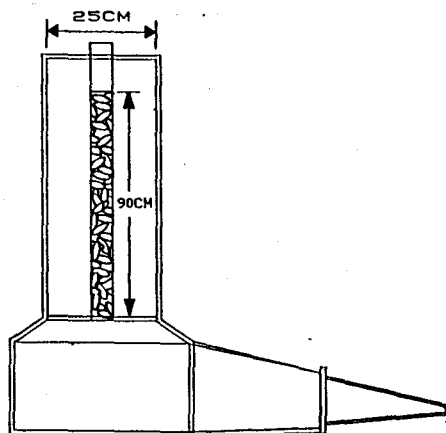


圖 6. 試驗倉

有關測點位置如圖 7，為了減少倉壁邊界效應的影響，和便於向外推展成為大型穀倉，模擬倉以內截面積 (20*20 CM) 之穀物為分析對象 (20*20*90 CM)，並選擇此體積 15—75 CM 高之部分，以

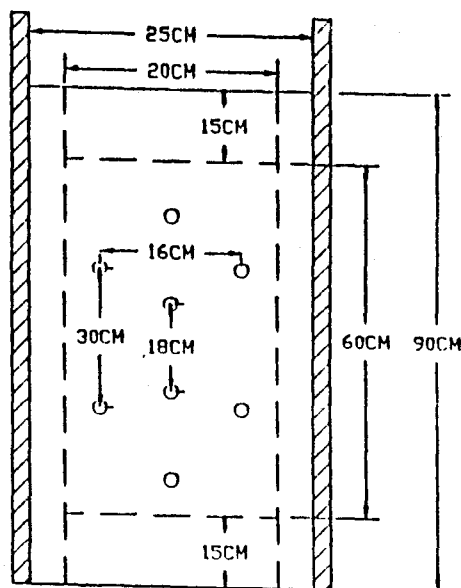


圖 7. 測點位置

平均穀溫 $T_{avg} = \sum V_i \cdot T_i / \sum V_i$ 做為當時此區內 (20*20*60 CM) 總熱量之指標。模式模擬 90CM 穀層所得結果，亦取 15—75 CM 高度之資料予以比較。

2. 試驗方法與步驟：

本試驗是在常溫下進行通風作業，變換風量與溫差。試驗中以倉底調壓室靜壓，代入風量與壓降換算公式，求得相對之風量。採用之調壓室靜壓值與相對之風量為 0 (自然降溫)，0.04 MM-水柱 (0.0436 CMM/TON)，0.13 MM-水柱 (0.120 CMM/TON)，0.23 MM-水柱 (0.196 CMM/TON)，0.53 MM-水柱 (0.451 CMM/TON)，1.00 MM-水柱 (0.753 CMM/TON)，2.79 MM-水柱 (2.089 CMM/TON)。再與不同初溫的稻穀 (30°C, 35°C, 40°C) 配合，重覆試驗。

試驗步驟為：

- 1) 將稻穀分散放入恒溫控制箱內，使稻穀達到設定溫度後，將稻穀混合均勻，取樣後 (測含水率)，倒入試驗倉內，以溫度記錄器每 30 min 記錄各測點溫度。
- 2) 通風時，由變壓器及節流閥控制風量，使倉底調壓室的靜壓維持在設定值左右 0.01 MM-水柱範圍內。
- 3) 當最上層穀溫與外界溫差在 2-3°C 時停止通風，取上、中、下三層稻穀，測其含水率。
- 4) 依 ASAE S352 號標準之程序，測量稻穀之含水率。

七、通風試驗結果與討論

通風效果通常是指可降低溫度及降溫速率 (單位時間內可降低溫度) 而言，大致上風量愈大、穀層與外界溫差愈大，降溫速率愈快。本試驗所得之資料如表二、三、及四，分別討論如後。

1. 不同稻穀初溫對降溫速率的影響

此部分主要是討論稻穀是否會因太高的初溫，而改變其原來通風降溫時的性質。以 0.044CMM/TON 風量為代表，如圖 8 所示。由圖上可看出，雖然稻穀初溫的差距 (最小為 33°C，最大為 42°C)，在不同季節下只要溫差相近，其降溫性質相當接近。即稻穀降溫性質，受稻穀初溫、季節、外界溫、溼度的影響很小，其最主要因素為穀溫與外界之溫差。

表二、不通風自然降溫

Time (hr)	No-1 dT	No-2 dT	No-3 dT	Time	No-1 dT	No-2 dT	No-3 dT
0	15.1	14.3	15.3	25	4.6	5.6	4.7
0.5	15.1	14.3	14.5	25.5	3.7	4.6	4.7
1	14.2	14.2	14.4	26	3.7	5.1	4.8
1.5	14.2	13.8	14.5	26.5	3.7	4.2	4.3
2	13.7	13.8	14.4	27	3.6	5.1	4.6
2.5	13.3	13.8	13.9	27.5	3.6	4.6	3.8
3	13.2	12.9	13.5	28	3.7	4.2	3.8
3.5	13.2	13.7	13.9	28.5	3.6	4.1	3.8
4	12.7	12.8	13.4	29	2.7	4.1	3.7
4.5	12.2	12.8	13.3	29.5	3.6	4.2	3.7
5	12.2	11.8	12.4	30	3.6	4.1	3.7
5.5	12.2	11.8	12.4	30.5	2.7	4.1	3.7
6	11.7	11.3	11.5	31	2.7	4.1	3.3
6.5	11.2	10.8	12.3	31.5	2.7	4.1	3.2
7	11.2	10.8	11.4	32	2.7	4.1	3.7
7.5	10.8	10.7	10.9	32.5	2.7	4.1	3.7
8	10.7	10.2	10.9	33	2.7	3.2	3.2
8.5	10.2	10.7	10.8	33.5	2.7	3.2	3.2
9	10.1	9.8	10.3	34	2.6	3.1	2.8
9.5	9.7	9.8	9.8	34.5	2.7	4.1	2.8
10	8.7	9.7	9.8	35	2.2	3.1	3.7
10.5	8.7	9.2	9.8	35.5	2.6	3.1	2.8
11	8.7	9.6	9.3	36	2.2	3.1	2.8
11.5	8.6	8.8	9.8	36.5	2.6	3.2	3.2
12	7.7	8.8	9.3	37	1.7	3.1	2.7
12.5	7.7	8.8	8.8	37.5	1.7	3.1	2.2
13	7.7	8.6	8.8	38	1.7	3.1	1.9
13.5	7.7	8.6	8.3	38.5	1.7	2.6	2.7
14	7.6	8.6	7.8	39	1.7	2.6	2.2
14.5	7.2	8.2	8.7	39.5	1.7	3.1	1.8
15	6.7	8.2	7.8	40		3.1	1.7
15.5	7.2	7.6	7.3	40.5		3.1	1.8
16	6.7	7.6	7.3	41		2.2	1.8
16.5	6.7	7.2	7.3	41.5		2.2	1.7
17	6.7	6.7	6.8	42		2.2	1.7
17.5	6.7	7.2	6.8	42.5		2.2	2.1
18	6.1	6.7	6.8	43		2.1	1.7
18.5	6.6	6.6	6.3	43.5		2.1	1.7
19	5.7	6.2	6.2	44		2.1	1.6
19.5	5.7	6.6	6.7	44.5		2.1	1.2
20	5.7	7.1	5.8	45		2.1	1.7
20.5	5.7	6.6	5.7	45.5		2.1	1.6
21	5.2	6.2	5.8	46		2.1	1.2
25.1	5.6	6.1	5.8	46.5		2.1	1.7
22	5.6	6.2	5.7	47		1.7	1.6
22.5	4.7	5.7	5.3	47.5		1.6	
23	4.7	6.1	4.8	48		1.6	
23.5	4.7	5.2	4.8	48.5		1.2	
24	4.7	5.6	4.8	49		1.6	
24.5	4.7	5.6	4.7	49.5		1.1	
Mc	13.6	12.8	12.5				

Mc: 最初含水率, %W.b.

表三、低 風 量 通 風

Time (hr)	Q=0.044				Q=0.120		Q=0.196	
	Tavg	dT	Tavg	dT	Tavg	dT	Tavg	dT
0	42.0	12.5	33.4	13.6	32.8	14.3	35.7	18.0
0.5	42.1	12.6	33.3	13.5	32.9	14.4	35.0	17.3
1	41.1	11.6	33.1	13.3	32.6	14.1	35.0	17.3
1.5	41.1	11.6	32.6	12.8	32.3	13.9	34.5	16.8
2	41.0	11.5	32.6	12.8	32.1	13.6	34.7	17.1
2.5	41.0	11.5	32.6	12.8	32.1	13.6	34.0	16.3
3	41.0	11.5	32.0	12.3	31.8	13.3	33.4	15.7
3.5	40.0	10.5	31.5	11.8	31.5	13.0	33.4	15.7
4	40.0	10.5	31.5	11.7	31.2	12.8	33.1	15.4
4.5	40.0	10.5	31.0	11.2	30.7	12.2	32.3	14.6
5	39.0	9.5	31.0	11.2	30.4	11.9	32.0	14.3
5.5	38.5	9.1	30.4	10.6	30.1	11.7	31.5	13.8
6	38.9	9.4	30.4	10.6	30.1	11.6	31.2	13.5
6.5	38.5	9.0	30.1	10.4	29.6	11.1	30.9	13.2
7	38.5	9.0	29.9	10.1	29.3	10.8	30.1	12.4
7.5	38.5	9.0	30.1	10.3	28.7	10.3	29.8	12.1
8	38.0	8.5	29.6	9.8	28.7	10.2	29.6	11.9
8.5	38.0	8.5	29.0	9.2	28.2	9.7	29.0	11.3
9	37.5	8.0	29.0	9.2	27.9	9.4	28.4	10.7
9.5	37.5	8.0	28.5	8.7	27.6	9.1	27.9	10.0
10	37.5	8.0	28.2	8.4	27.1	8.6	27.6	9.9
10.5	37.0	7.5	27.9	8.1	27.1	8.6	27.3	9.7
11	36.5	7.0	27.9	8.1	26.8	8.3	27.3	9.6
11.5	36.5	7.0	27.6	7.9	26.5	8.0	27.0	9.3
12	36.4	6.9	27.1	7.3	26.2	7.7	26.0	8.3
12.5	36.0	6.5	27.3	7.6	25.9	7.5	25.9	8.2
13	35.5	6.0	27.1	7.3	25.1	6.7	25.4	7.7
13.5	35.5	6.0	26.8	7.0	25.1	6.7	25.4	7.7
14	35.0	5.5	26.5	6.7	24.9	6.4	24.8	7.1
14.5	35.4	5.9	26.0	6.2	24.8	6.4	24.8	7.1
15	34.9	5.4	26.5	6.7	24.8	6.3	24.3	6.6
15.5	34.5	5.0	25.7	5.9	24.3	5.8	23.7	6.1
16	34.9	5.4	25.9	6.2	24.0	5.5	23.7	6.0
16.5	34.5	5.0	25.7	5.9	23.8	5.3	23.4	5.7
17	34.5	5.0	25.4	5.6	23.7	5.2	23.1	5.5
17.5	34.4	4.9	25.3	5.6	23.1	4.7	23.1	5..
18	34.0	4.5	24.8	5.1	23.4	4.9	22.6	4.9
18.5	34.0	4.5	24.8	5.1	23.2	4.7	22.3	4.7
19	33.5	4.0	24.5	4.8	23.1	4.7	22.3	4.7
19.5	34.0	4.5	24.3	4.5	23.1	4.7	21.8	4.1
20	34.0	4.5	24.5	4.8	22.8	4.4	21.5	3.8
20.5	34.0	4.5	24.0	4.2	22.3	3.8	21.5	3.8
21	33.0	3.5	24.0	4.2	22.0	3.5	21.4	3.8
21.5	33.0	3.5	24.0	4.2	22.9	4.4	21.5	3.8
22	33.0	3.5	23.9	4.2	22.6	4.1	20.9	3.2
22.5	33.0	3.5	23.9	4.2	22.6	4.1	20.6	2.9
23	33.0	3.5	24.0	4.2	22.6	4.1	20.6	2.9
23.5	33.0	3.5	23.9	4.2	22.5	4.1	20.6	2.9
24	33.0	3.5	23.9	4.1	22.5	4.1	20.4	2.7
24.5	33.0	3.5	23.9	4.1	22.5	4.1	20.1	2.4
25	33.0	3.5	23.9	4.1	22.0	3.5	19.8	2.1
25.5	33.0	3.5	23.1	3.4	22.3	3.8		
Mc	12.0		12.5		12.4		12.6	

Q: 風量, CMM/TON Mc: 最初含水率, %W.b.

表四、高風量通風

Time (hr)	Q=0.451		Q=0.753		Q=2.089	
	Tavg	dT	Tavg	dT	Tavg	dT
0	35.2	16.0	43.8	14.0	45.0	14.4
0.5	35.2	16.0	43.4	13.6	41.8	11.3
1	35.2	16.0	43.4	13.7	40.2	9.7
1.5	34.4	15.2	42.8	13.1	37.8	7.2
2	34.4	15.2	41.9	12.2	37.2	6.7
2.5	33.9	14.7	40.4	10.6	35.9	5.3
3	33.3	14.1	39.4	9.6	35.3	4.8
3.5	32.5	13.3	39.4	8.7	34.8	4.4
4	31.2	12.0	36.5	6.7	33.9	3.4
4.5	31.2	11.9	35.5	5.8	33.4	2.9
5	30.3	11.1	34.9	5.2	33.4	2.9
5.5	30.1	10.8	34.0	4.2	33.0	2.4
6	29.5	10.2	33.0	3.3	32.9	2.4
6.5	29.2	10.0	32.1	2.3	32.9	2.4
7	28.4	9.2	32.5	2.7	32.9	2.4
7.5	27.9	8.6	32.0	2.3	32.5	1.9
8	27.6	8.3	31.6	1.8	32.4	1.9
8.5	26.8	7.6	31.5	1.8	32.4	1.9
9	26.4	7.2	32.0	2.2	32.0	1.5
9.5	25.9	6.7	31.1	1.3	32.0	1.5
10	25.6	6.4	31.0	1.3	32.0	1.5
10.5	25.1	5.9	31.0	1.3	21.9	1.4
11	25.0	5.8	31.5	1.7	32.4	1.9
11.5	24.2	5.0	31.0	1.2	32.0	1.5
12	23.7	4.5	31.0	1.3	32.0	1.4
12.5	23.7	4.5	31.1	1.3	32.4	1.9
13	23.4	4.2	32.0	2.2	32.0	1.4
13.5	22.9	3.7	31.0	1.3	32.9	2.4
14	11.8	3.6	31.9	2.1	32.4	1.9
14.5	22.6	3.3	32.0	2.2	32.9	2.4
15	22.5	3.3	32.0	2.2	32.4	1.9
15.5	22.3	3.1	32.0	2.2	32.4	1.9
16	22.3	3.0	32.0	2.2	33.0	2.4
16.5	21.7	2.5			33.0	2.4
17	21.2	2.0			33.0	2.4
17.5	21.2	1.9				
18	20.9	1.7				
18.5	20.6	1.4				
19	20.6	1.4				
19.5	20.6	1.4				
20	20.6	1.3				
20.5	20.3	1.1				
21	20.1	0.8				
21.5	20.0	0.8				
22	20.0	0.8				
22.5	19.7	0.5				
23	19.8	0.5				
23.5	19.8	0.5				
Mc	12.4		11.8		12.5	

Q：風量，CMM/TON

Mc：最初含水率，%W.b.

通風量：0.044 CMM/TON

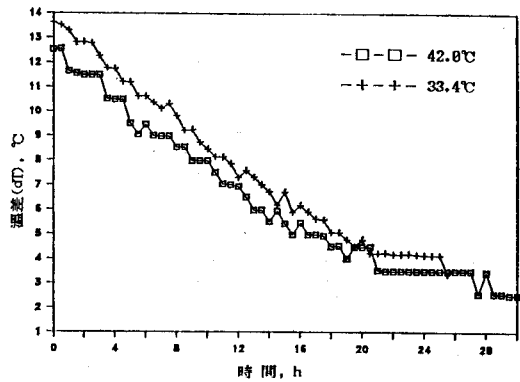


圖8. 稻穀初溫不同之比較

2. 風量與降溫速率之關係

圖9為不同風量下降溫曲線之比較，各組試驗在溫差3°C以下，有的仍能繼續降溫，有的開始產生溫度振盪，不過大多數在3°C以上皆有良好的溫度下降趨勢。由圖9量比較圖上可看出，除了最大風量(2.089 CMM/TON)外，其餘降溫曲線都近似直線，因此以溫差3°C為分界，降溫速率以(稻穀初溫-3°C) / (通風時間)，作為比較標準。為了知道真正的通風效果，各種風量、溫差下試驗之降溫速率計算得如表五。

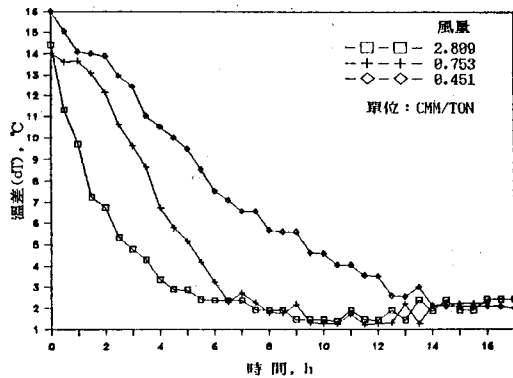


圖9. 不同風量降溫速率比較

自然降溫速率，乃指相似狀況下未通風之試驗結果計算所得之資料，亦列於表五，以資比較。

表五、各風量降溫速率的比較

風量 CMM/噸	穀溫 (°C)	溫差 (°C)	降溫速率 (°C/hr)	自然降溫速率 (°C/hr)
0.044	33.4	13.3	-0.37	-0.35-0.38
	42.0	12.5	-0.34	-0.35-0.38
0.120	29.4	10.2	-0.33	-0.29-0.30
	32.8	14.3	-0.42	-0.35-0.40
	36.5	7.6	-0.33	-0.24-0.30
	42.0	10.7	-0.31	-0.29-0.30
0.196	39.6	20.1	-0.74	-0.36-0.41
	35.7	18.0	-0.67	-0.36-0.41
0.451	35.2	16.0	-0.84	-0.36-0.41
	44.5	14.0	-0.99	-0.35-0.40
	46.4	16.0	-0.96	-0.36-0.41
0.753	43.8	10.0	-1.78	-0.35-0.40
2.090 分兩段	45.0	14.4	-3.64(5°C) -0.96	-0.35-0.40 -0.35-0.40

由表五顯示，標準風量範圍 (0.044, 0.120 CMM/TON) 的通風效果已因自然降溫影響而不明顯，所以標準風量對未絕熱之模擬試驗並不適合。

3. 可降低溫度

穀倉通風時，必須確定冷却區移至最末層，而且在此層達到冷却效果後關機。由試驗資料顯示在平均溫度與外界溫差 3°C 時，降溫開始變緩，此時 60 CM 厚穀層高低溫差大致在 3°C 以內，所以只要最末層穀物溫度僅高於外界 6°C 以內，即表示此最後冷却區 (60 CM) 已經過主要降溫時間，熱氣已完成排出倉外，而可以停止通風。

八、模式與試驗之比較

現在就半經驗模式中修正後之平衡模式 (Thompson, 1972)，及不考慮質傳之單純熱交換情形加以探討，即輸入當時之作業條件，並在模式中改變變數值 (稻穀含水率)，以測試模式中變數的靈敏度。

1. 模式中的倉壁熱散失部分，是以方程式模擬未通風之降溫情況 (分段迴歸)，作為實際的估算。其模擬情形如圖 10。

2. 模式模擬比較

依不同風量，將各種降溫曲線繪於同一圖上，可以很容易的了解並比較模擬與試驗結果之異同；分別如圖 11 (風量, 0.044 CMM/TON)，圖 12

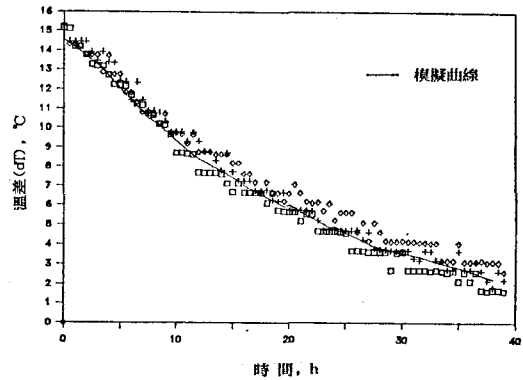


圖 10 三組未通風降溫資料及模擬曲線

(0.120 CMM/TON)，圖 13 (0.196 CMM/TON)，圖 14 (0.451 CMM/TON)，圖 15 (0.753 CMM/TON)。

各組均包含 4 組資料所得之 4 種曲線如下：

- 1) 不通風降溫曲線。
- 2) 通風降溫曲線。
- 3) 平衡模式模擬曲線 (含熱傳、質傳之平衡)。
- 4) 熱傳平衡模擬曲線 (不含質傳平衡)。

由圖 11 至 15，可看出，平衡模式之降溫效果較試驗結果快，高估的情形很明顯。風量愈大，降溫偏差也愈大。有關模式之修正，後文將述及。

由圖 11 與 12 顯示，低風量對此小型試驗倉，幾乎無通風降溫效果，反而與不通風自然降溫一致。

不考慮質傳，單考慮熱傳之模擬降溫效果與自然降溫相同，只有在高風量 (0.451 及 0.753 CMM/TON) 通風後期才顯出不同。這可解釋熱傳現象由自然對流轉為強制對流。由此，亦可說明熱傳曲線與實際通風降溫曲線與實際通風降溫曲線之不同，主要是由於質傳 (水分蒸發) 造成的。

3. 改變稻穀初含水率模式影響

平衡模式具有高估質傳的傾向，因此可借由改變水分有關之因子，減少其影響而了解並比較模擬與試驗結果。將稻穀初含水率降低是方法之一。另為質傳之水分蒸氣壓平衡並未完全在瞬間達到，以修正因子表示，後文之修正模式將討論之。

將稻穀初含水率減少 1%，2% 之模擬曲線與原模式及實際通風降溫曲線，仍依不同風量分別表示如圖 16，17 及 18。從以上圖中，很明顯可看出初含水率減少之修正模式對於高估質傳效果之現象可以改善。此表示，蒸氣壓平衡之假設須修正，才可以減少高估冷却效果的現象發生。

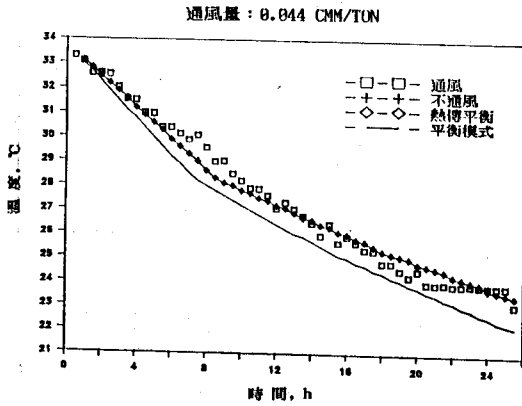


圖11 降溫曲線比較

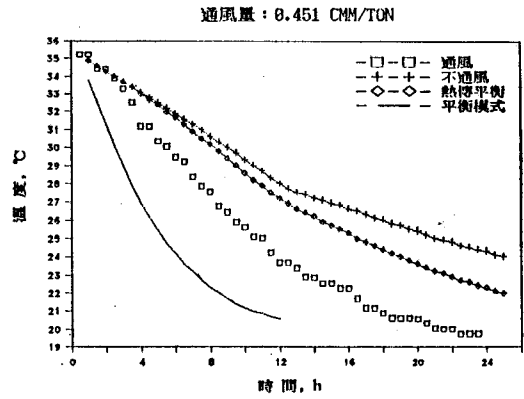


圖14 降溫曲線比較

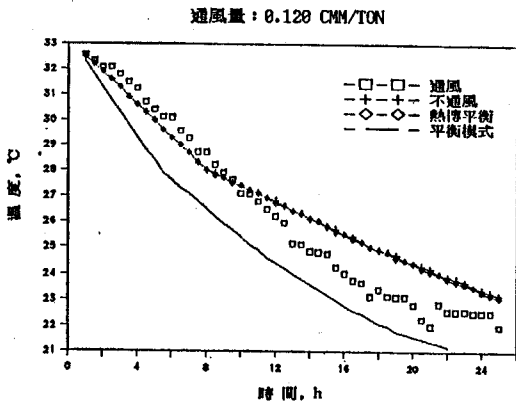


圖12 降溫曲線比較

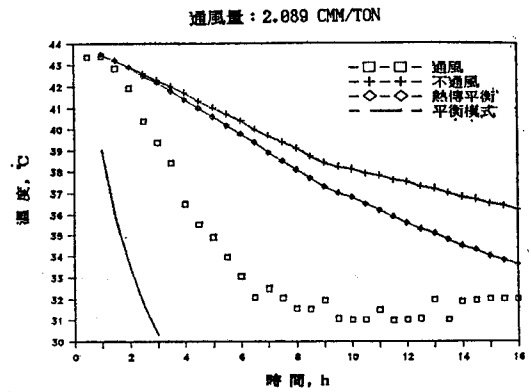


圖15 降溫曲線比較

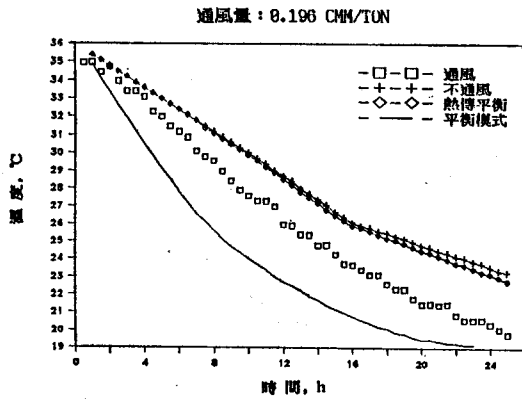


圖13 降溫曲線比較

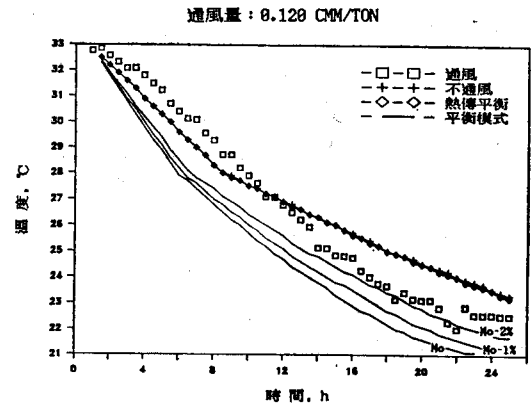


圖16 變化初含水率之平衡模式降溫曲線

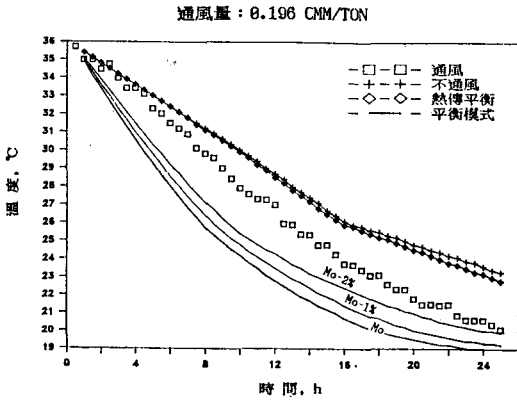


圖17 變化初含水率之平衡模式降溫曲線

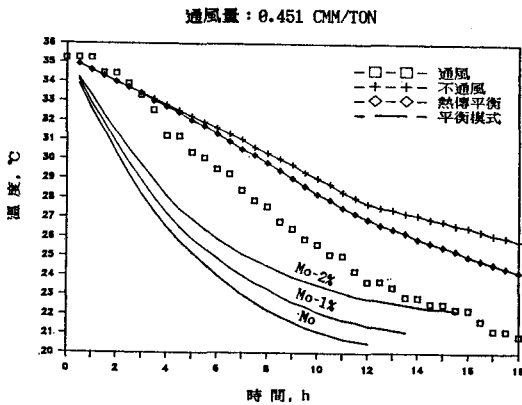


圖18 變化初含水率之平衡模式降溫曲線

4.修正模式

在 Thompson (1968) 假設的溫度瞬間平衡式中，當空氣進入穀層與穀物熱交換時，穀物內水分並未完全蒸散或很少，因此，可視為先達到瞬間平衡溫度 T_e ，而空氣中之絕對濕度 (W_o) 不變。因此，原平衡模式有關蒸氣壓平衡須可修正如下式：

$$RHf = RH'_{air} \times (ERH_{rice} - RH'_{air}) * Factor$$

- RHf : 最終平衡的空氣相對濕度
- RH'air : 原空氣在絕對濕度不變下，相對於瞬間平衡溫度 T_e 之相對濕度
- ERHrice : 稻穀在 T_e 、 M_o 下，穀體內之平衡相對濕度
- Factor : 修正因子，範圍在0—1之間。

由上式之 RHf 及 T_e 可求得空氣之絕對濕度 (Wf)，及其含水分之變化而得最終之平衡溫度 Tf 。 Tf 、 Wf 為進入下一穀層之 T_o 、 W_o 。詳細流程如圖19，此部分與圖2不同，再代入圖3之流程即可得到模擬結果如圖20及21。

由圖20可知在通風量為0.196 CMM/TON時，修正因子為0.01時與試驗結果相當接近。可是，高通風量 0.451 CMM/TON 時，却不適用，在圖21上很明顯可看出其差異，不過此高通風量屬乾燥用的範圍，並不適宜實際之通風作業。

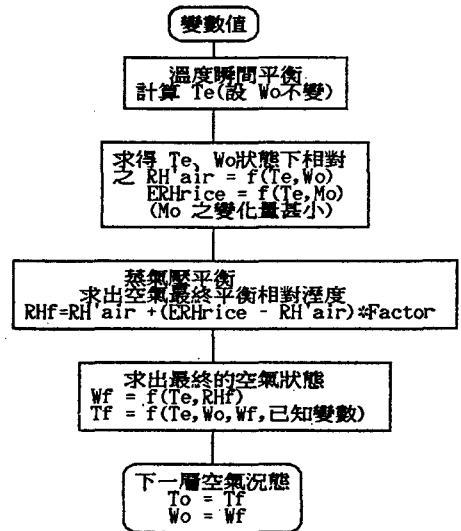


圖19 修正模式用之空氣、穀物熱交換流程

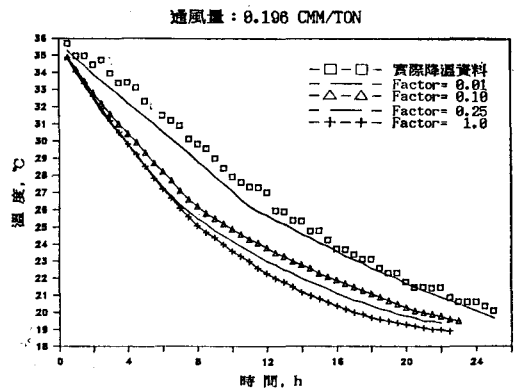


圖20 修正模式降溫曲線

通風量：0.451 CMM/TON

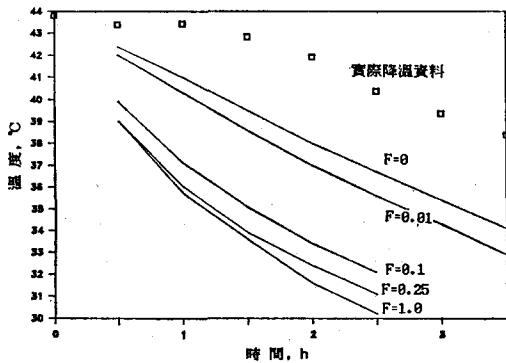


圖21 修正模式降溫曲線

九、結論與建議

本研究所得之結論如下：

1. 通風技術

選擇風機應根據穀倉之條件，求得靜壓再配合通風量決定風機之馬力，購置風機。通風時機應選在相對濕度 70% 以下時，外界溫度較穀物溫度低 5°C 以上時才可開機，以免達不到冷卻效果浪費能源。通風至溫差在 2—3°C 時就應停機，不然也是浪費能源。

2. 通風模式

根據能量、質量及蒸氣壓平衡等三方程式，再將穀層分層時間分段模擬通風情形所建立之通風模式，其模擬所得之降溫效果却有高估，即較快之傾向。探討其原因乃為質傳部分之假設過份高估，因此乃將相關之蒸氣平衡式子加以修正，所得修正模式之模擬結果，則與低風量通風效果相當接近。此修正模式，至少可用於試驗倉通風之模擬。

未來之研究，可在以下三方面繼續進行：

1. 國外以現代化或機械化的豎倉為主來儲存穀物，而我國仍以平倉為主儲存稻穀，因此平倉之靜壓阻力資料，應在實際穀倉進行測試加以建立。
2. 通風模式與乾燥模式之銜接以及穀物平衡含水率等微觀與巨觀現象之調和，仍待深入研究。
3. 如何擴充試驗倉之通風模式至實際穀倉應用也須繼續探討。

十、誌謝

本研究經費承行政院國家科學委員會補助，編號為 NSC 77-0409-B002-07，謹在此深致謝意。

參考資料

1. 李浩銓：1988：玉米通風之研究與電腦模擬，臺大農工所碩士論文。
2. 馮丁樹譯：1978：穀物乾燥，臺北市徐氏基金會。
3. 張森富：1976：Changes in Fat Acidity in Brown Rice During Storage. 加州大學 (Davis) 農工所碩士論文。
4. 張森富：1980：谷類平衡含水率之研究，農工學報26(3)：111-117。
5. 張森富：1981：進口玉米儲存方法試驗調查，雜糧基金會。
6. 張森富：1987：Why Henderson's Equation Works，美國農業工程師學會冬季年會發表。
7. 張森富：1988：Modification of Henderson's EMC model and EMC isotherms of local paddy and corn, 農工學報，34卷1期，16—39，臺北。
8. 蔡致榮：1983：強制通風對散裝貯藏稻穀溫度變化之影響，臺大農工所碩士論文。
9. 臺灣農業年報：1988：臺灣省政府農林廳，臺中。
10. Bloome, P.D. and G.C. Shove. 1971. Near Equilibrium Simulation of Shelled Corn Drying. Trans. of ASAE. 14 (4): 709-712.
11. Brooker, D.B. 1967. Mathematical Model of 10(3): 558-563.
12. Calderwood, D.L. 1973. Resistance to Airflow of Rough, Brown and Milled ice. Trans. of ASAE. 16(3): 525-527.
13. Elder, W.B. 1971. The control and monitoring of grain aeration System. Trans. of ASAE. 14(2): 290-293.
14. Foster, G.H. 1967. Moisture Changes during Aeration of Grain. Trans. of ASAE. 10(3): 344-347,351.
15. Cunasekaran S. and G.C. Shove. 1983. Resistance to Airflow of Paddy in Shallow Depths, Trans. of ASAE. 26 (2): 601-605.

16. Houston, D.F. 1972. Rice Chemistry and Technology AACC Ins. St. Raul. Minnesota.
17. Kumar, A. and W.E. Muir. 1986. Airflow resistance of Wheat and Barley affected by the airflow direction, filling method and dockage. Trans. of ASAE. 29(5): 1423-1426.
18. Luh, B.S. 1980. Rice: Production and Utilization, AVI Inc., Westport, Connecticut.
19. Noomhorm, A. and L.R. Verma. 1986. Deep-Bed Rice Drying Simulation Using Two Generalized Single-Layer Models. Trans. of ASAE. 29(5): 1456-1461.
20. Thompson, T.L, R.M. Peart and G.H. Foster. 1968. Mathematical Simulation of Corn Drying-A New Model. Trans. of ASAE. 11(4): 582-586.

專營土木、水利、建築等工程

正 全 土 木 包 工 業

負責人：廖 天 隆

地址：高雄縣岡山镇仁壽路252巷15號

電話：(07)6214207

專營土木、水利、建築等工程

利 和 企 業 有 限 公 司

地址：苗栗縣頭份鎮上興里13鄰5-1號

電話：(036)661091

專營土木、水利、建築、道路、橋樑等工程

柳 貴 營 造 有 限 公 司

地址：苗栗縣後龍鎮南龍里244號

電話：(037)722727