

靜置式厚層玉米粒乾燥過程中最適風量率及最佳操作條件之探討

A Study on Optimum Airflow Rate and Operational Drying Conditions of a Fixed-Bed Drying System for Shelled Corns

國立臺灣大學農機系研究助理

國立臺灣大學農機系副教授

方

煒

馮

丁

樹

Fang, Wei

Fon, Din-Sue

摘 要

NTU-DRY 為臺大農機系新建立之個人電腦應用模式，可預測玉米粒乾燥期間，各相關因素之變化情形。本文即利用此模式，探討常溫或輔熱厚層乾燥系統中所需之最適風量率與最佳作業條件。

乾燥之最終目的在維護穀物品質，因此乾燥過程中質變情形相當重要。本文就質變之觀點，提出一便捷之方法，利用NTU-DRY 模式，求得最佳最適之操作風量率。例如，在穀層厚度2呎，熱風120°F，初始含水率在33.3% DB情況下乾燥，其最適風量率約在12cfm/英斗之範圍。

在一般常溫乾燥中，初始含水率20—25%之範圍內，每增加2%之含水率，其質變率將加倍，霉菌亦將伴隨滋長。在風量0.5~2cfm/英斗之範圍內，風量減半，質變率亦有隨之加倍之情形。

Abstract

NTU-DRY model was developed to handle a stationary type of drying for shelled corn. With this model, predictions on the drying conditions during drying period become available. Purpose of this study is therefore, using the NTU-DRY model, to find an optimum airflow rate and related operations for driers that run under different weather conditions.

Since the final aim of drying is to maintain the grain quality, the deterioration of grain during drying period is of great importance. On the basis of deterioration rate, this research was then conducted to provide a quick means to find the optimum airflow rate for a specific condition. An optimum airflow of 12 cfm/bu exists, for example, for shelled corn, 2 ft. in depth, drying from an initial moisture of 33.3%DB at an air temperature of 120°F.

Results also show that deterioration rate might double for an increase of two percent point in initial moistures ranging from 20 to 25% DB. Similarly, a half reduction of airflow rates ranging from 0.5 to 2cfm/bu. will double the grain deterioration rate also.

一、緒 言

玉米之乾燥程度與其最終品質有極密切之關係。乾燥不均或水分太高，常易導致品質轉劣，進而使病菌繁殖。最近國內因進口泰國玉米含有大量黃麴毒素而引起社會大眾甚大之震撼，就是霉菌等感染的結果。玉米黃麴毒素之產生與質變情形 (Deterioration) 有關，而質變之程度又因乾燥過程或貯藏期間之操作條件而受影響。

本文之目的乃在利用臺大農機系發展成功之 NTU-DRY 玉米厚層乾燥模式來探討乾燥或通風期間最適之風量率與最佳之操作條件，使玉米品質之降低能減少到最低程度。

二、理 論 探 討

在穀物乾燥儲藏過程中都必需考慮到穀物品質的變化問題，事實上這也是農民在選購乾燥機時考慮的重要因素。

玉米粒在乾燥或儲藏的過程中，若時間過長，穀體本身將因呼吸作用而產生化學反應，導致乾質分解現象。在乾燥之過程中，穀體內部所損失的乾質佔全乾穀的重量百分率，稱為乾質分解率 (Decomposition of Dry matter) 或質變率 (Deterioration rate)。

根據 Steele, et. al.(1969)等人的研究，質變率與含水率、穀溫及機械損傷程度有密切之關係。研究中發現，若以CO₂的產生量為指標，在濕基含水率15%，機械損傷30%的情況下玉米放在60°F的空氣中連續乾燥230小時，會有0.5%的質變率。當質變率超過0.5%時，此玉米即視為次一等級。因此，230小時可視為該條件下的安全儲藏期限。

在上述的標準條件下，Steele認為CO₂的產生量(y)與穀物安全儲藏期限(t)的關係，可以下式表示：

$$y = 1.3[\exp(0.006t - 1)] + 0.015t \quad (1)$$

由於在1公斤的玉米粒中，每1%的乾質分解時會損失1克的六角醣，並產生14.7公克的CO₂，故以(1)式值除以14.7，可得在時間t時的質變率(DM)：

$$DM = \frac{y}{14.7} = 0.0883[\exp(0.006t - 1)] + 0.00102t \quad (2)$$

然而，當外界因素不同於標準條件時，必需先經過一換算公式，如下所示：

$$t_{eq} = \frac{t}{M_T M_M M_D} \quad (3)$$

t：各種操作條件下之安全儲藏期限。

t_{eq}：標準條件下之安全儲藏期限。

M_T：溫度修正係數。

M_M：水分修正係數。

M_D：機械損傷修正係數。

溫度修正係數(M_T)

$$T \leq 60^\circ\text{F} \text{ 或 } M_{WB} \leq 19\%$$

$$M_T = 32.3 \exp[-3.48(T/60)]$$

$$T > 60^\circ\text{F} \text{ 且 } 19 < M_{WB} \leq 28\%$$

$$M_T = 32.3 \exp[-3.48(T/60)]$$

$$+ \frac{(M_{WB} - 19)}{100}$$

$$\exp[0.01017(T - 60)]$$

$$T > 60^\circ\text{F} \text{ 且 } M_{WB} > 28\%$$

$$M_T = 32.3 \exp[-3.48(T/60)] + 0.09$$

$$\exp[0.01017(T - 60)] \quad (4)$$

水分修正係數(M_M)

$$13 \leq M_{WB} \leq 35\%$$

$$M_M = 0.103 \left[\exp\left(-\frac{455}{(M_{DB})^{1.53}}\right) \right.$$

$$\left. - 0.00845 M_{DB} + 1.558 \right] \quad (5)$$

機械損傷修正係數(M_D)

$$M_D = 3.42604466 - 0.110143904 P_D$$

$$+ (9.64300265 \times 10^{-4}) (P_D)^2 \quad (6)$$

$$r^2 = 0.999862416$$

P_D：機械損傷程度，%

補充溫度修正係數(M_T) (Saul, 1970)

$$T \leq 60^\circ\text{F}$$

$$M = 128.76 \exp(-468(T/60)) \quad (7)$$

〔註〕上面有關公式已歸納在 NTU-DRY 程式內

圖一為利用公式(1)與(2)在質變率維持0.5%以內所繪之穀物(玉米粒)含水率、穀溫與安全貯藏期間之關係。由圖所示，玉米粒之溫度愈高，品質愈易變壞，水分含量愈高，亦有相同的結果。故圖一所示雖為玉米粒之安全貯藏期限之關係，事實上

，與乾燥過程中，亦有密切的關連。尤其在常溫或輔熱通風乾燥中，其乾燥過程仍甚長，而頂層部份之穀物常因濕度、溫度及水分含量甚高，在未完成乾燥以前即產生霉變。

因此，乾燥期間，風量率之大小是決定性之因子。尤其在乾燥之設計方面，此點甚為重要。風量率加大，乾燥率雖加快，減少霉變之風險，但設備及成本將大為提高。如何利用模式作系統分析，以

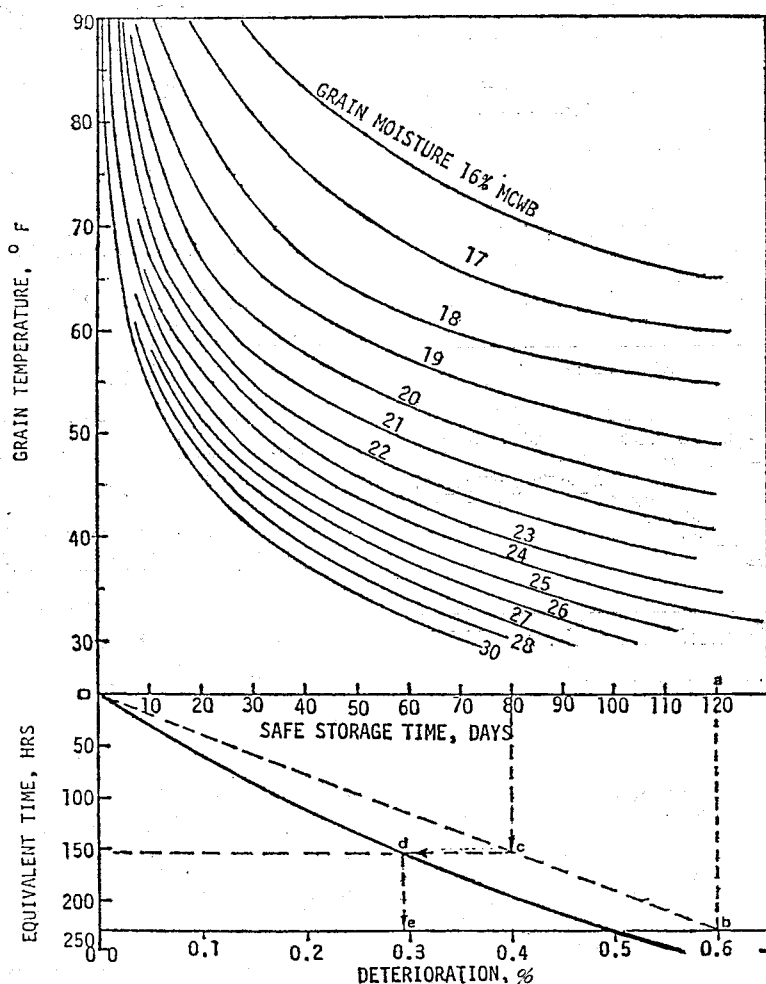


圖1 玉米之水分、溫度與安全貯藏期限間之關係

獲得最適風量率及最佳操作條件，遂成為本文探討之主題。

圖一底部顯示者為求得低於某狀態條件下，相對應之質變率與相對應之等效時間之方法。例如，水分含量20%，溫度44°F下，可以貯藏120天。由此繪虛線得a—b，並得o—b；則可求得相同狀況下，存80天後之質變率為0.3%，等效時間為150小時（沿c—d—e及c—d—f）。

三、各項變因對質變率之影響與討論

Pierce & Thompson, (1979)認為全倉式乾

燥系統中，質變程度最大的通常發生在最頂層，此點可由圖2至圖5中，曲線變化的趨勢得知。

圖2顯示熱風溫度對質變率之影響，在厚度1.5呎以下的穀層影響不大，1.5呎以上之穀粒則隨熱風溫度之增加而品質變差。在100°F以上時，每增加20°F質變率約增為原來之1.3倍。

圖3為相對濕度對質變率之影響情形。相對濕度愈高，不僅乾燥速率變慢，質變率也增加。相對濕度在16%以上時，相對濕度值加倍，其質變率亦將加倍，甚至更大。

圖4為初始含水率對質變率影響之情形，圖中

三條曲線之差異頗大，顯示初始含水率之影響質變率頗深。其值愈高者，質變率愈大。含水率為 33.3 % (乾基) 以上之玉米粒，其質變率約為含水率為 25 % (乾基) 以下者之 4 至 6 倍。大於 33.3% 乾基含水率之玉米，其質變率將超過此倍數。

圖 5 為風量率對質變率之影響。當風量率小於 12cfm/ 英斗時，隨風量率之增加而質變率增加，但當風量率超過 12cfm/ 英斗時，質變率則隨風量率之增加而減少。故在乾燥系統中通入適當的風量，是非常重要的。風量太大，浪費能源，風量太小，不僅乾燥效果不彰，歷時良久，更予霉菌、微生物等滋長的機會而導致霉變，是以對各種乾燥條件下，求出其最佳及最小風量率，是一必要的步驟。

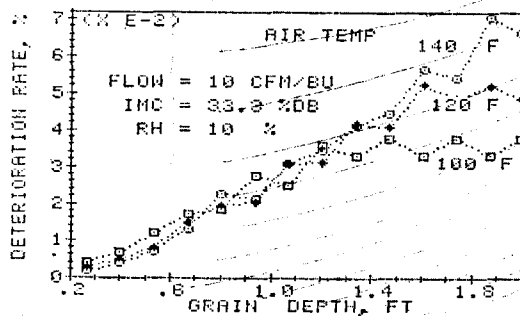


圖 2 不同熱風溫度下之玉米質變率

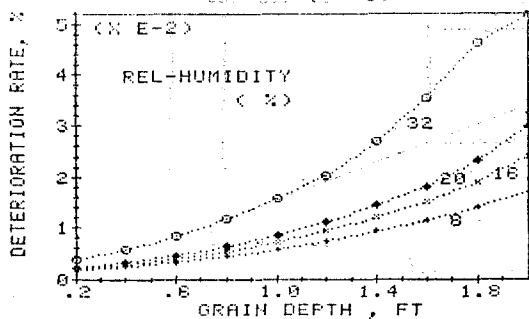


圖 3 不同相對濕度下之玉米質變率

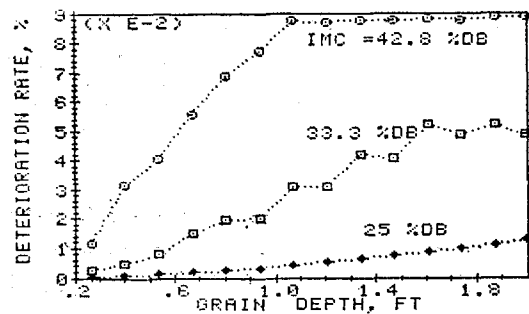


圖 4 不同初始含水率下之玉米質變率

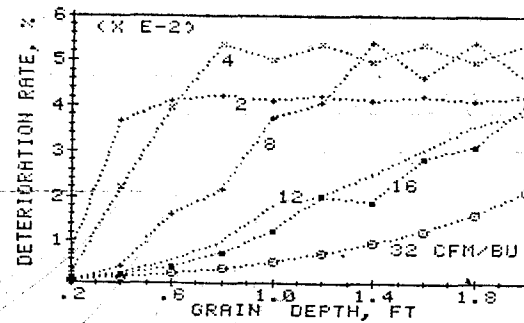


圖 5 不同風量率下之玉米質變率

四、最佳最小風量率之尋求

就質變率的觀點而言，風量率在 12cfm/ 英斗時為一重要的轉折點 (圖 5)。低於此風量，質變率增加甚速。就乾燥效率之觀點而言，如圖 6 所示，在乾燥過程之前期 (0 小時至 20 小時)，風量率在 12 至 17cfm/ 英斗的範圍內，有最大的乾燥速率。乾燥時間在 20 小時之後，則風量率在 8 至 12cfm/ 英斗的範圍內，有最大的乾燥速率。

由圖 5 與圖 6 可知，在該操作條件下 (熱風溫度 120°F，相對濕度 8.1%，玉米穀溫 60°F，初始含水率 33.3% 乾基，穀床厚 2 呎)，風量率低於 8cfm/ 英斗，不僅乾燥效果不彰，並且導致嚴重的質變；風量率超過 17cfm/ 英斗，乾燥效果未見得較佳，却浪費能源，是以取 12cfm/ 英斗為最佳的風量是合適的。

使用者可利用 NTU-DRY 之乾燥模擬程式，依圖 5、6 之分析方式，得出各項不同操作條件下的最佳最小風量率。其執行步驟如下：

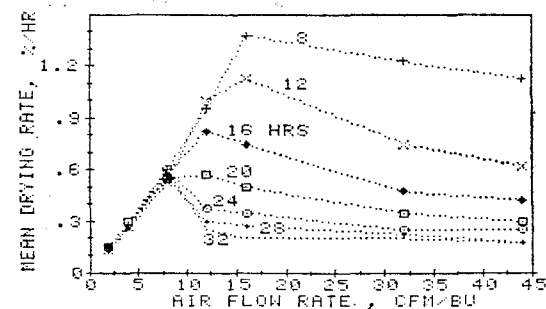


圖 6 平均乾燥速率與風量率間之關係

1. 設定程式內各項初始條件。
2. 設定一初始的風量率值 (使用者自定，在此設 2cfm/ 英斗)。

3.執行乾燥模擬，將各項資料存檔或由印表機中印出。

4.記錄各時間之平均含水率，如表 1 中行①所示。

5.計算平均乾燥率(mean drying rate)，如表 1 中行②所示。

6.改變風量率之值，重回步驟 3，直到得到一大範圍的平均乾燥率資料。

7.取表 1 中之各不同風量率為橫座標，列①、②、③……平均乾燥率值為縱座標，繪圖如圖 6。

8.由圖上選擇一適當之乾燥時間（如圖 6 示 20 小時）。

9.記錄乾燥 20 小時後各不同風量下之逐層質變率，如表 2。

10.以穀層厚度為橫座標，質變率為縱座標，繪圖如圖 5。

11.探討步驟 7、10 所繪兩圖之關係，求得最佳最小風量率。

表 1 平均乾燥率求法略表

風 量	2cfm/英斗		4cfm/英斗		8cfm/英斗	
	時間	平均含水率①	平均乾燥率②	①'	②'	①'' ②''
	0	M ₀		M ₀		M ₀
①	t ₁	M ₁	$(M_1 - M_0)/(t_1 - 0)$	M' ₁	$(M'_1 - M_0)/(t_1 - 0)$	M ₁ ' 同前
②	t ₂	M ₂	$(M_2 - M_1)/(t_2 - t_1)$	M' ₂	$(M'_2 - M'_1)/(t_2 - t_1)$	M ₂ '
③	t ₃	M ₃	$(M_3 - M_2)/(t_3 - t_2)$	M' ₃	$(M'_3 - M'_2)/(t_3 - t_2)$	M ₃ '
④	t ₄	M ₄	$(M_4 - M_3)/(t_4 - t_3)$	M' ₄	$(M'_4 - M'_3)/(t_4 - t_3)$	M ₄ '
⑤	t ₅	M ₅	$(M_5 - M_4)/(t_5 - t_4)$	M' ₅	$(M'_5 - M'_4)/(t_5 - t_4)$	M ₅ '

由圖 2 知，溫度增加，將導致質變率的增加；但 Pierce & Thompson(1979) 在其文獻中提及，當風量率為適當之時，輔熱乾燥（由常溫昇高至 10°F 以內）可降低質變率。首先依上述之分析法求出適當的風量率。

假設外界空氣為 77°F (25°C)，相對濕度 75%，以同於圖 5、6 的分析方式，程式之模擬結果如圖 7 與圖 8 所示。圖 7 為乾燥 144 小時內，才乾燥

至 19.1%，但質變率也接近 0.5%，是以此二風量率值皆為不良的操作條件。由圖 7 中可知，採 30cfm/英斗的風量率值較佳。

表 2 風量率對質變率之影響

AIR T		120F					
RH %		8.1					
FLOW		2	4	8	12	16	32
IMC %		33.33DB %					
層厚	FT	質變率 %					
.2		.0013	.0027	.0012	.0073	.002	.0013
.4		.0031	.022	.0046	.037	.0026	.002
.6		.006	.04	.016	.041	.0047	.003
.8		.01	.053	.022	.042	.0077	.004
1		.018	.05	.037	.041	.012	.0057
1.2		.02	.053	.041	.042	.02	.0075
1.4		.025	.05	.054	.041	.019	.009
1.6		.031	.053	.046	.042	.029	.0125
1.8		.036	.05	.054	.041	.031	.0162
2		.038	.053	.046	.042	.04	.0213

圖 8 表示，初期之風量率採 40cfm/英斗為佳，繼而漸減。對整個乾燥過程而言，乾燥率較佳者分佈在風量率 25 至 35cfm/英斗之範圍內，故 30cfm/英斗應為合理值。

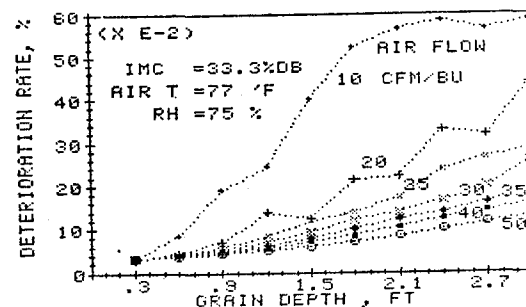


圖 7 玉米粒乾至 144 小時後各層之質變情形

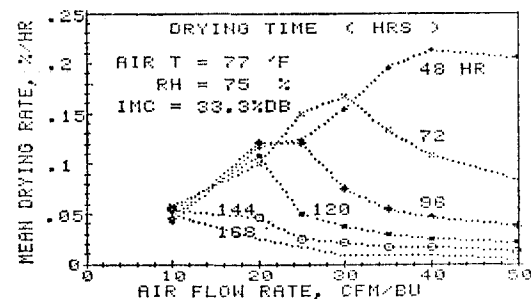


圖 8 不同風量率下，乾燥速率之變化情形

圖 9 顯示，在 77°F，75% 相對濕度的環境下通入 30cfm/英斗的風量，適度的加熱使得風溫昇

高3°F、6°F、9°F時，其質變率可降低，是以Pierce & Thompson(1969)之說法在此得到驗證。

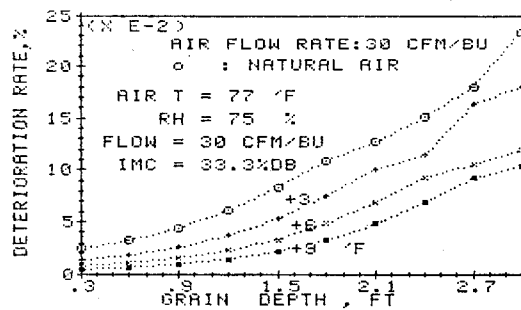


圖9 在適當風量率下，質變率隨溫度遞減之情形

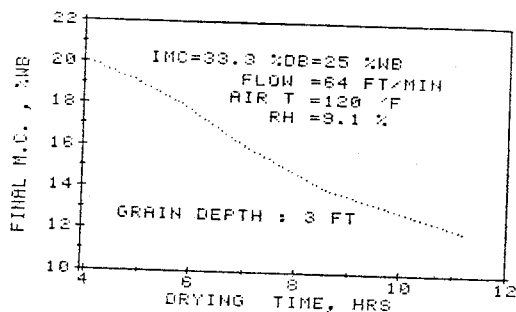


圖10 最終含水率與乾燥時間之關係

五、各項變因對所需乾燥時間之關係

圖10是玉米粒由25%濕基含水率乾燥至不同的最終含水率時，所須的乾燥時間（穀層厚度為3呎）。在19%至14%之間，大約呈線性的變化。最終含水率低於14%時，由圖上可知，斜率較為平緩，是以須要的時間為更久。

圖11表示風量率改變時，將玉米粒由25%乾至14%所須的時間。圖中顯示，風量率在65呎/分以上時，乾燥時間之差異不大，風量愈大，徒然浪費

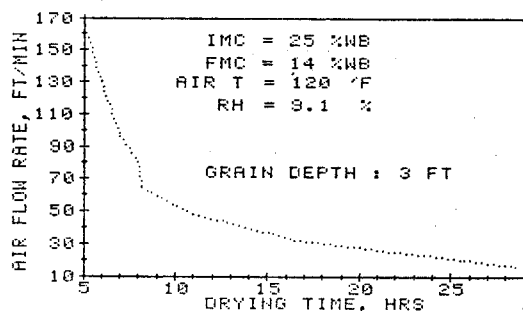


圖11 玉米自25%乾至14%時，風量率之改變與乾燥時間的關係

能源。但風量率低於65呎/分時，降低風量率，將增加不少的乾燥時間，而乾燥時間太長，可能引起品質的敗壞，是以65呎/分為適當的風量率。

圖12為不同的初始含水率乾燥至14%所須的時間。以25%濕基含水率為界限，亦可分成二段線性的變化。

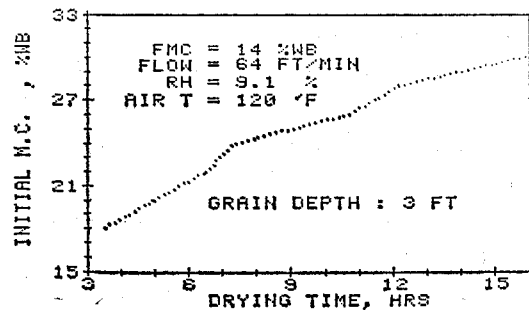


圖12 不同初始含水率乾至14%時所需之時間

圖13為不同溫度的熱風，將玉米粒乾至14%濕基含水率其各自所須的時間。由圖可知，溫度在90°F以上時，其所須的乾燥時間的差異較小，但若乾燥空氣的溫度較低時，如70°F以下，則溫度

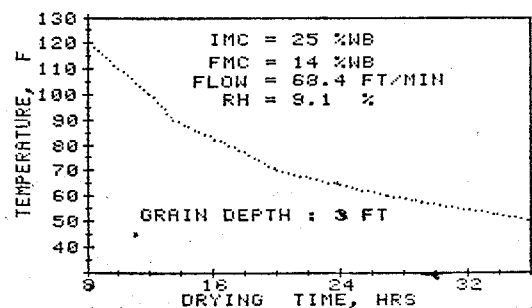


圖13 熱風溫度與乾燥時間之關係

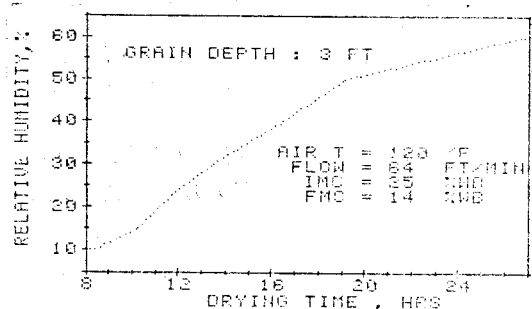


圖14 空氣相對濕度與乾燥時間之關係

低幾度，乾燥時間便會增長許多。此處，穀層厚度為3呎，若更厚，則此現象將愈顯著。

圖14為相對濕度對乾燥時間之關係圖，大約以50%的相對濕度為界限，較低者，所須的乾燥時間較短；較高者，所須的時間為較長。二段皆呈線性的變化。

六、最佳操作條件之尋求

使用者欲期在某段時間內完成乾燥作業，則按照以上分析方式，可得知合適的操作條件，茲說明如下：

假設作業條件為風量 64 呎/分，玉米粒厚度 3 呎，含水率由25%WB乾燥至14% WB，欲在24小時內完成乾燥，則由圖13及圖14之分析方式可知合適的熱風狀態為：（*依同法求得）

熱風溫度	相對濕度
65°F	9.1%
80°F*	15%
100°F*	40%
120°F	56%

將這些空氣狀態點在濕氣圖上連線，則此線上之每一點大致上皆可視為本乾燥條件下的合適熱風狀態點。假設外界空氣狀態已知，若直接以外界空氣通入穀層中將無法在預期的24小時內完成乾燥，則應予以適度的加熱。不論採直接加熱或間接加熱的方式，所加入的熱量能夠將空氣狀態點移到剛才在濕氣圖上畫出的合適熱風狀態線上即可。如圖15所示。A B 曲線為合適熱風狀態線，若空氣狀態點在 A B 曲線右側，則乾燥時間將低於24小時；反之，在左側的點，將高過24小時。設 C 點為外界空氣狀態點位於 A B 線段左側，欲期在24小時完成乾燥，則須加以熱量，直接加熱如 C E 線段所示，間接加熱如 C D 線段所示。其加入熱量之多寡，由熱焓值之增加量即可求得。

若乾燥條件中熱風狀態已設定，溫度 120°F，相對濕度9.1%，其他條件不變，則由圖11之分析可得知欲期在24小時完成乾燥作業，則風量率取20呎/分為適當。

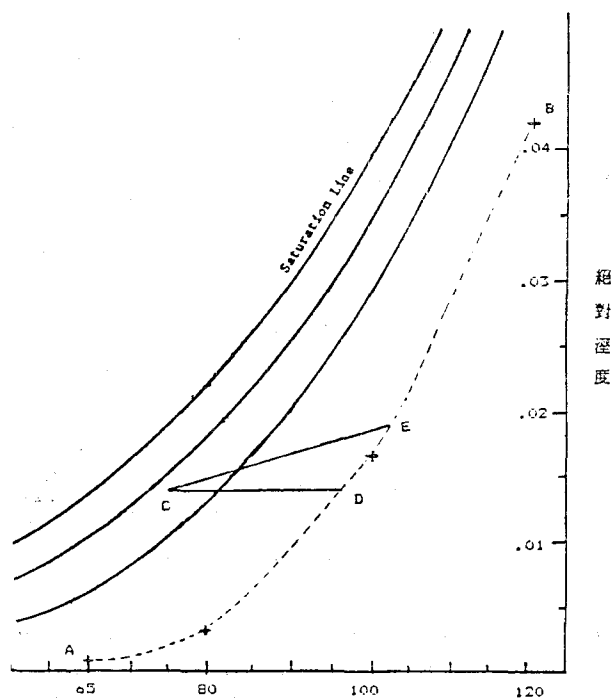


圖15 合適熱風狀態線示意圖

七、結 論

玉米粒乾燥過程中，所牽涉之因素甚多，為求乾燥快速，常需提高風量。但風量過高，影響系統設置成本。如何針對實際之需要，選擇最佳最小之

適當風量率，是一個不易的問題。本文利用NTU-DRY 乾燥模式，進行作業分析，可提供一迅速之方式，決定最佳操作條件。此項技巧之應用，在一
(文轉第55頁)