

循環式乾燥機乾燥玉米粒之模擬與研究

Studies on Simulations of the Circulating Drying Systems for Shelled Corn

國立臺灣大學農機系副教授

馮 丁 樹

Fon, Din-Sue

國立臺灣大學農工所研究生

王 永 明

Wang, Yung-Ming

摘 要

由於近年來玉米種植面積遽增，其產量將繼續增加，而本省地處亞熱帶，氣候潮濕，穀物不適久存，故對其收穫後之乾燥處理加以研究，實屬必要。

本研究目的旨在進行循環式乾燥方式之室內基本研究，並配合乾燥理論，建立循環式乾燥模式，再利用個人電腦以交談方式下執行，供乾燥機設計之參考或作業決策之用。

國內、外有關乾燥理論，論述甚多，本文乃擇其適用於循環式乾燥系統者，加以整理分析，再綜合筆者自身見解擴充成為本模式，並以室內基礎試驗、現場測試及廠商之循環乾燥機性能測定數據分別加以驗證。

研究結果證實本模式之預測值與實際試驗值相當接近。針對模擬結果加以分析可得：

1. 提高熱風溫度、增加風量率或減少穀層厚度，均可提高減乾率。
2. 在影響乾燥速率諸因子中，以熱風溫度最具決定性。
3. 模擬時之穀層厚度會影響結果正確性，每層以不超過 0.2 呎為佳。
4. 均化確實可消除水分梯度、溫度梯度，因而可提高穀物在乾燥期間之減乾率。

Abstract

The Taiwan climates are almost hot and wet throughout the whole year. Under the circumstances, a study on drying porcess of shelled corn becomes necessary as both corn production and yield are increasing in recent years.

The purposes of this study are to make basic studies on a circulating drying system, in cooperating with an appropriate drying theory to construct a circulating drying model, and to use personal computer to write an interactive program, which can be useful for dryer designs and project researches.

Several laboratory tests have been conducted in this study to examine the built model. Field tests on commercial driers of circulating type are

also performed. Data shows that the drying model is very dependable and can be used under different drying conditions.

The analysis of the model leads to the following conclusions:

1. As the drying temperature and/or airflow rates increase, or the grain column thickness decreases, the process will obtain a higher drying rate.
2. The hot air temperature is the most important factor that influences drying rate.
3. An optimum depth of each divided grain layer used during simulation shall not be greater than 0.2 foot (6cm).
4. A long tempering period would definitely affect the drying process as it is observed faster as the period for tempering increases.

一、前言

由於稻米生產過剩，稻田轉作已然成為當前之農業政策，且其中玉米則為轉作主要對象之一。本省地處亞熱帶，氣候潮濕，亦頗適合玉米之生長。惟由於一年種植兩季，故收穫期短。若採玉米、水稻輪作制度，則因配合農時，亦常有提早採收之現象。不論收穫期過短或提早採收，所得之玉米穗含水率都相當高，故收穫後處理之工作實為當務之急，而玉米之乾燥即為必要處理之方式。

一般言，穀物乾燥具有下列許多優點：

1. 可提早收穫、減少因颱風或自然震落等原因所造成之田間損失。且早期收穫之田間狀況較為良好，利於收穫作業，收穫時間提早亦可使農民有充裕時間為下季作進行整地作業。

2. 收穫期間不受田間作物水分含量高低之限制，農民可將收穫作業之程序先予通盤規劃，以節省勞力、善用人工。

3. 利於長期儲藏，不致變質。

4. 使農民在收穫期後數月內價格較高時，及時售賣，賺取較高利潤。

5. 維持穀物活力。穀物水份減低後，穀粒本身因發熱所導致發芽率降低或破壞等情形將大為減少。

6. 使農民可享受較高等級農產品之利潤。

目前玉米乾燥方式大多為兩段：玉米穗經採收去苞後，先進行穗乾，待玉米濕基含水率降至18%~22%左右，再行脫粒，並粒乾至13%。粒乾通常採用乾燥機乾燥。是以粒乾可說是基本而常用之乾燥方式，而其中又以循環式乾燥系統最能配合此種

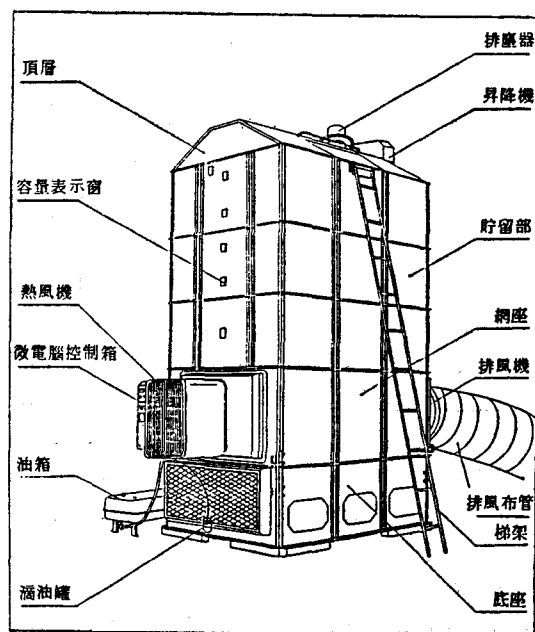
粒乾之作業環境。

二、目的

1. 進行循環式乾燥方式之室內基本研究。
2. 配合乾燥理論建立循環式乾燥模式。
3. 利用個人電腦寫成交談程式，以供乾燥機設計之參考或作業研究決策之用。

三、文獻探討與理論分析

穀物乾燥，即利用自然或人工方法，移除穀物內之水分，以降低其水分含量，防止產品在未利用前腐壞、變質。人工乾燥系統中，最常用的方式是

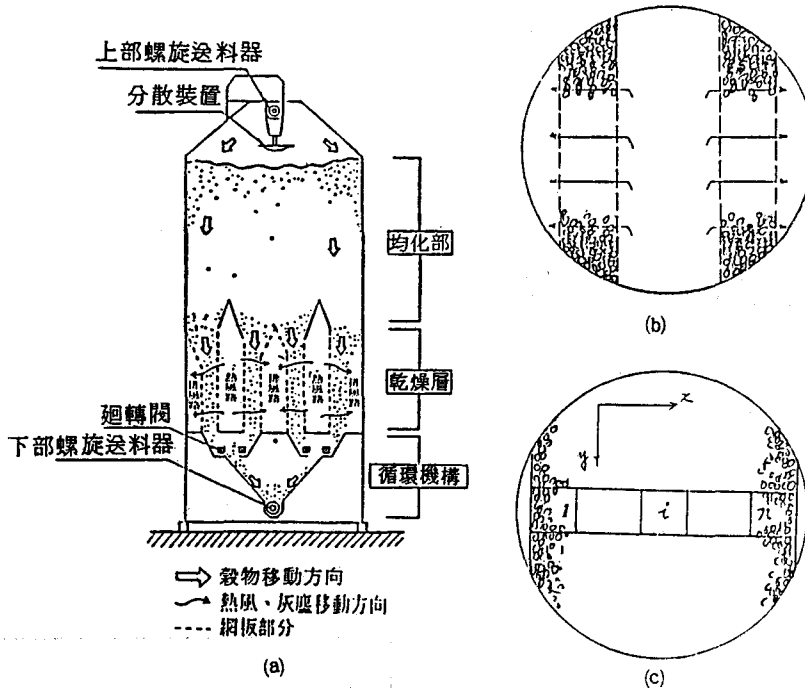


圖一、循環式乾燥機之各部構造示意圖

以空氣流經穀體表面，藉循環熱空氣與穀粒間之傳導與對流現象進行熱量傳遞與水分轉移。

穀物乾燥依穀層厚度可分為薄層與厚層兩種。前者為單粒厚度之乾燥，目的在建立單粒乾燥理論之基礎，由此再發展其他乾燥系統模式。嚴格言之，厚度超過單粒厚度之乾燥系統均屬厚層乾燥，一般應用範圍則以15~20公分以上屬之，深者可達六米之程度。

本省一般循環式乾燥機均有乾燥部及均化部兩部份，其外觀如圖一。其最大特徵在於熱空氣之流向與穀物之流向互相垂直，故應屬於批式垂向型乾燥系統。即熱空氣在水平方向流動，穀物在垂直方向流動。農產品(玉米粒)在乾燥期間同時與熱空氣發生熱和水分的傳遞，因此，為了正確模擬此系統內之玉米粒乾燥，必須對所模擬之系統作明確界定。



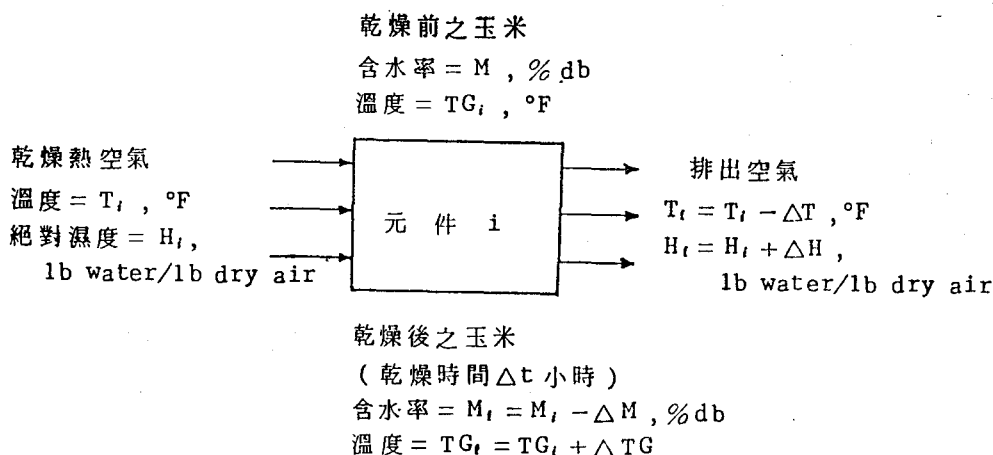
圖二、循環式乾燥機內部風路分佈情形
(a)穀路與風路之垂向流動情形
(b)熱風路與穀層間之放大示意圖
(c)乾燥層劃分為元件系列組合圖

圖二應即為本模式所要考慮的整個範圍，然而在此乾燥機中真正進行乾燥的部份僅有乾燥層（如圖二 a）。所以只要取熱風路與排風路間的一個乾燥層進行分析即可（如圖 b）。此時，熱風之條件可視為穩定狀態，而玉米粒在此系統中則不斷循環，在分析上，為了節省電腦記憶空間，加快其模擬速度之考慮，故僅截取薄層中之一小部份（如圖二 c）作為考慮元件。針對此控制元件中之質量與進出之空氣變化情形考慮。為使所模擬之情況更接近薄層乾燥狀態，必須再視需要將此元件細分為數層，使單粒乾燥理論能應用於其中每一個單一元件上

，如圖三所示。

在進行元件內乾燥過程前，讓我們先作些基本假設：

1. 穀粒內部之溫度梯度變化可略而不計（即溫度分佈均勻）。
2. 穀粒與穀粒間之熱傳遞現象可忽略。
3. 風量與穀流量均為負壓型。
4. 乾燥箱壁具絕緣性，且其熱容量可不計。
5. 濕空氣與穀物之熱容量在短時間內維持一定。
6. 在乾燥層中，空氣流動方向與穀粒流動方向皆為一維向量。



圖三、單一元件內熱空氣與穀物間之熱質傳遞情形

7. 乾燥之前後，穀體溫度與熱空氣之濕球溫度大略相同。

設最初溫度及最初濕度分別為 T_i 、 H_i 的空氣，在 Δt 的時間區間內通過初溫為 TG_i 、初始含水率為 M_i 之玉米粒薄層（元件）。在此時間區間內有 ΔM 的水分由穀體元件內蒸至熱空氣中，使熱空氣之絕對濕度增加 ΔH 。由於在乾燥過程進行中，蒸發和冷卻作用是同時發生，當玉米粒被熱空氣加熱而蒸發出其內水分時，相對亦降低熱空氣本身的溫度。故當熱風經過穀物元件後，空氣溫度將下降 ΔT ，而穀物溫度上升 ΔT_g 。

既然在乾燥過程中同時發生了熱與水分的傳遞，要準確預測穀物元件在 Δt 時間區間內所發生的含水率變化及溫度變化，則必須知道玉米與空氣的物理性質及其能量、質量傳遞率。

一、玉米粒薄層乾燥方程式

依 Thompson⁽⁷⁾ 等人所提出之玉米粒薄層乾燥方程式：

$$t = A \ln(MR) + B[\ln(MR)]^2 \dots \dots \dots (1)$$

其中，

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$$

$$A = -1.862 + 0.00488T$$

$$B = 427.4 e^{-0.033t}$$

$$T = \text{熱風溫度, } ^\circ\text{F}$$

M_0 , M_e , M = 穀物之初期含水率，平衡含水率及時間 t 時之含水率，%（乾基）。

t = 以溫度 T 之熱風將穀物自 M_0 乾至 M 所需之時間，小時。

二、玉米平衡含水率

玉米粒之平衡含水率則利用 Thompson 氏⁽⁷⁾ 修正 Henderson 氏⁽⁵⁾ 所得之經驗方程式：

$$1 - rh = \exp[-3.82 \times 10^{-5} \times (T + 50) \times M_e^2] \dots \dots \dots (2)$$

式中， rh 為空氣之相對濕度，以小數表示。

三、玉米內部水分之潛熱

Thompson 和 Shedd⁽⁸⁾ 以最小平方差求出玉米粒中水分蒸發之潛熱為：

$$L = (1094 - 0.57T_g) (1 + 4.35 e^{-28.25m}) \dots \dots \dots (3)$$

其中， L = 玉米粒之水分蒸發潛熱，BTU/磅

T_g = 穀物溫度，°F

m = 乾基含水率，小數

一般自由水面在一大氣壓下之潛熱則為：

$$L = 1094 - 0.57T \dots \dots \dots (4)$$

四、比熱

玉米粒之比熱可用下式表示（Kazarian and Hall, ⁽⁶⁾）：

$$C_g = 0.35 + 0.00851M_w \dots \dots \dots (5)$$

其中， C_g = 玉米粒之比熱，BTU/°F 磅玉米

M_w = 玉米粒之濕基含水率，%

五、空氣之熱力性質

1. 飽和水蒸氣壓（Brooker, ⁽⁴⁾）：

$$P_s = \exp(54.6329 - \frac{12301.69}{T_a} - 5.16923 \ln T_a) \dots \dots \dots (6)$$

其中, P_s = 飽和蒸氣壓, 磅/平方吋

T_a = 熱空氣絕對溫度, R

上式有效範圍為 32~212°F (0~100°C) 間, 而由理想氣體方程式可導出水蒸氣之分壓, P 為

$$P = \frac{23.63H}{1 + 1.608H} \dots\dots\dots(7)$$

其中, P = 空氣中水蒸氣之分壓, 磅/平方吋

H = 空氣中絕對濕度, 磅水分/磅乾空氣

2. 空氣比熱:

$$C_a = 0.2405 + 0.445H \dots\dots\dots(8)$$

其中, C_a = 空氣比熱, BTU/°F, 磅空氣

H = 空氣中絕對濕度, 水分(磅)/乾空氣(磅)

3. 空氣中絕對濕度:

$$H = \frac{0.6219P}{14.696 - P} \dots\dots\dots(9)$$

六、循環乾燥之理論

穀物乾燥之過程中, 對空氣而言, 是一種冷卻加濕之現象。此時玉米粒和熱空氣經由蒸發水分而降低了本身的溫度, 當空氣中所保持的水氣量逐漸上昇時, 空氣之乾球溫度將逐漸降低, 而熱焓值和濕球溫度則維持不變。

事實上, 這些過程幾乎是同時發生, 但為簡化整個乾燥過程之模擬, 須加以界定區別, 在對能量傳遞與質量傳遞作定量分析之前, Thompson⁽⁷⁾氏曾先作下列定義:

$$R = \frac{WG}{WA} = \frac{\text{玉米重(磅)}}{\text{空氣重(磅)}} \dots\dots\dots(10)$$

$$WG = \frac{(37.86)\Delta X}{1 - 0.01M_0} = \frac{\text{玉米重(磅)}}{\text{平方呎}} \dots\dots(11)$$

$$WA = \frac{\Delta t (AIR) (60)}{VA} = \frac{\text{空氣重(磅)}}{\text{平方呎}} \dots\dots\dots(12)$$

$$VA = \frac{(53.35)(T_i + 460)}{(144)(14.696 - P)} \dots\dots\dots(13)$$

其中, R = 穀物與空氣之質量比。

WG = 每平方呎截面積內之元件(玉米粒)重, 磅。

WA = Δt 時間內通過單位面積元件之空氣重, 磅。

VA = 空氣之比容, 立方呎/磅乾空氣

ΔX = 玉米薄層厚度, 呎。

AIR = 單位面積風量率, CFM/平方呎。

利用上述資料, 假設熱空氣在進入元件前, 玉米粒與乾燥熱空氣將很快(就與乾燥運轉週期之比較而言, 時間甚短)達到一平衡溫度, T_e , 則

$$\begin{aligned} C_a \times T_i + H_i \times (1060.8 + 0.45 \times T_i) \\ + C_g \times T_{gi} \times R \\ = C_a \times T_e + H_i \times (1060.8 + 0.45 \times T_e) \\ + C_g \times T_e \times R \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

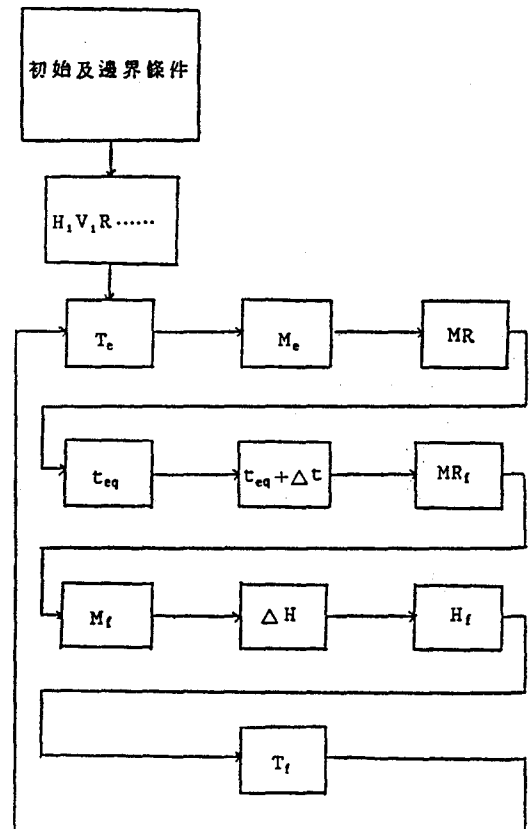
解之得 T_e 為:

$$T_e = \frac{(C_a + 0.45 \times H_i) \times T_i + C_g \times T_{gi} \times R}{C_a + 0.45 \times H_i + C_g \times R} \dots\dots\dots(15)$$

以此 T_e 值代表穀物及熱風之最初溫度代入(6)式中求 P_s , 以 H_i 代入(7)式中求 P , 再由第(2)式中反求 M_e , 則 M_e 為:

$$M_e = \left[\frac{-\ln(1 - rh)}{3.82 \times 10^{-5} \times (T_e + 50)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(16)$$

由於實際乾燥情形通常不為單獨薄層, 故(1)式所示之水分比 MR 與乾燥時間 t 間之關係在維持某一特定之熱風條件下而得。問題是在實際乾燥程中, 熱風之條件時時因吸濕及去熱而改變。為求得熱



圖四、模式運算之流程圖

風在經過 Δt 時間區間後之真正改變，Thompson⁽⁷⁾提出等效時間(Equivalent drying time)之觀念。在進入乾燥元件之前，先以熱空氣之狀態及穀物之含水率經由(1)式反求該狀況下所經過之累積時間 teq ，然後再由(1)式求經過 $teq + \Delta t$ 時間後之最終水分比，其作業流程如圖四，有關計算過程則如下：

1. 先計算元件乾燥前之水分比：

$$MR_i = \frac{M_i - M_e}{M_0 - M_e} \dots\dots\dots(17)$$

2. 計算等效乾燥時間， teq ：由(1)式

$$teq = A \times \ln MR_i + B \times [\ln MR_i]^2 \dots\dots(18)$$

其中，A與B值之定義與(1)式同。

3. 計算乾燥時間， t ：

$$t = teq + \Delta t \dots\dots\dots(19)$$

其中， t = 在 T_e 溫度下，經 Δt 時間區間後，所累積之時間

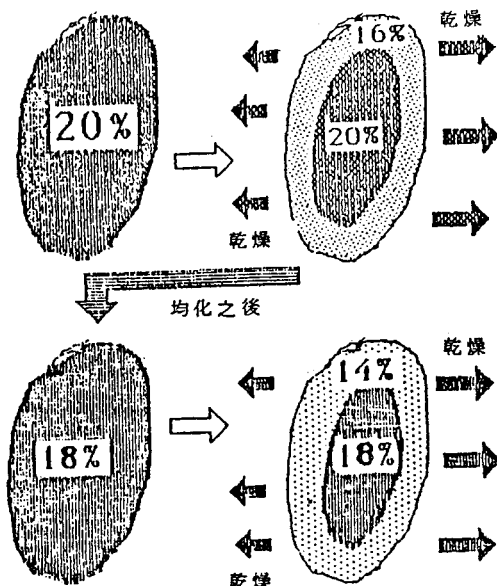
$$C_a \times T_e + H_i \times (1060.8 + 0.45 \times T_e) + C_g \times T_e \times R + \Delta H \times (T_e - 32) \\ = C_a \times T_f + H_i \times (1060.8 + 0.45 T_f) + C_g \times T_{gf} \times R + \Delta L \times \Delta H \times R \dots\dots\dots(22)$$

同理，假設空氣與穀物溫度在最後階段時亦應達到平衡狀態，亦即 $T_f = T_{gf}$ ，則

$$T_f = \frac{\Delta H \times (-1060.8 - \Delta L \times R - 32 + T_e) + T_e \times (C_g \times R + C_a + 0.45 H_i)}{C_a + C_g \times R + 0.45 \times H_i} \dots\dots(23)$$

6. 均化 (Tempering)

均化作用的目的是使玉米粒內部水分獲得重新分配，消除水分梯度，讓玉米粒外圍由急速高溫乾



圖五、均化期間，穀物內部水分之再分佈情形

Δt = 乾燥該薄層元件之時間區間。
由前述步驟，再代入(1)式方程式，解之得 MR_f 為

$$MR_f = \exp\left(\frac{-A - \sqrt{A^2 + 4 \times B \times t}}{2 \times B}\right) \dots\dots\dots(20)$$

4. 計算最終含水率， M_f ：

經過 Δt 時間後，穀物之最終含水率為：

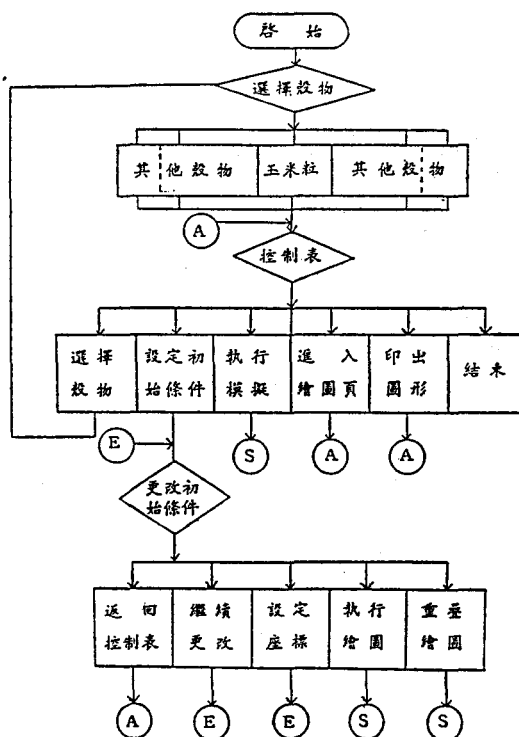
$$M_f = (M_0 - M_e) \times MR_f + M_e$$

5. 熱空氣中水分之計算：

此時，空氣中因蒸發玉米粒中水分而增加之絕對濕度為：

$$\Delta H = \frac{(M_i - M_f)}{100} \times R = \frac{R \times \Delta M}{100} \dots\dots\dots(21)$$

而 ΔH 之水分進入空氣後，新的熱平衡式變為：



圖六、循環式乾燥程式之功能流程

燥所產生之應力得以解除。因為當玉米粒在乾燥室內進行乾燥時，穀體內部有相當之水分梯度存在，且以穀體中央之水分含量最高。(方煒，⁽³⁾)。

經過足夠時間的均化後，穀物內部之水分分佈應已回復到未經乾燥階段之原有性質，而可於次階段乾燥時，有較高減乾率。連續乾燥之效果不若加入均化期的間歇乾燥，其原因可由圖五說明，初始含水率20%之穀體，經乾燥後，表面水分可能已降至16%，然而中心水分却仍維持20%，若予以夠長時間之均化，使其水分重新分配而達均勻之程度，再行乾燥，則表面水分將更易於釋出，否則持續吹送熱風，只會增加其內部壓力梯度，而對乾燥效果並無幫助。

在循環式乾燥系統操作時，玉米粒離開乾燥室進入均化期的同時，也藉着底部螺旋輸送機與側端斗昇機之運作，使穀物均勻混合。

七、模式之結構

模式的運算，其流程如前節所述(圖四)，而程式的功能流程則如圖六所示。此模式寫成電腦程式時，曾作以下之設定，以配合實況，調節程式之運作，便利求解。

1. 程式中之時間區間以每0.2小時為一計算單位。

2. 每次循環乾燥時間為14單位，初期均化時間為56單位。

3. 乾燥過程中，每次循環所需時間隨穀體體積減少而縮短。

4. 玉米粒體積與濕基含水率呈線性關係變化。

$$V(M_w) = 1 + 1.395(M_w - 0.13)$$

5. 經均化期後，水分含量與穀溫都經完全混合而達平均值。

6. 在含水率 $M > 20\% \text{ d.b.}$ 時，均化可完全恢復其初始狀態。

模式之運算僅就單一元件，而循環式乾燥系統之乾燥層在應用上係一系列元件進行模擬，如圖二(c)，就元件(2)而言，進入之熱空氣其熱力性質其實即為離開元件(1)之最終熱空氣熱力性質，此時之空氣已與初始進入元件(1)者不同，參照表一，就研究結果發現，除了第一層外，每層進入之空氣初始熱力性質(T、H、RH)即為前一層之空氣終了之熱力性質。

在此系統中，熱空氣將維持在Y方向之移動。

而穀物構成之一列元件經歷乾燥過程時保持不混合之狀態而下降，可知經過 Δt 後，此列元件將向下滑落 ΔY ，並由相同初始條件之熱風重新吹入元件(1)，再依序循環，而此時除了穀溫維持初始值外，含水率已有變化，須以 Δt 時間以前，前一元件之終期含水率為當前之初始值，再行運算，如表一，在各不同時間區間，各層的終期含水率實亦即次一時間區間，該層之初始含水率。

八、軟硬體介紹

(一)APPLE II 硬體介紹

自1977年到1983年初，APPLE II 個人電腦經改良、發展至APPLE plus 及APPLE IIe機種。由於主要的改良在主機內部，其外觀及操作上的差異很小，是以本套軟體可適用於以上三種機種。

一套以APPLE II 為中心所組合的系統可包括：

1. APPLE II 主機及鍵盤。
2. 螢光幕，俗稱監視器(Monitor)。
3. 磁碟機(Floppy disk driver)。
4. 印表機(Printer)。

(二)軟體介紹

為達到直接與電腦作交談式(Interactive)的溝通，本程式以APPLE SOFT 之培基語言寫成，共佔62個磁區，約為15K。

肆、實驗與驗證

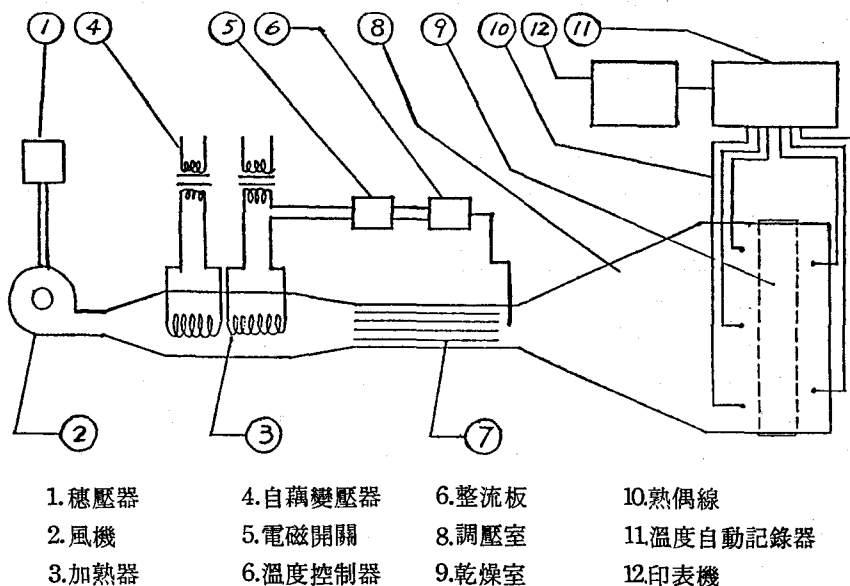
一、實驗儀器與設備

本實驗設備包括送風機、電熱器、自藕變壓器、風速計、熱電偶、烤箱、乾燥器、電子磅秤、粉碎機、紅外線水分測定儀、電容式水分測定儀及自動溫度記錄器等。

實驗工作分室內與現場實驗部份，現場實驗係配合斗南農會興建之玉米乾燥系統，針對三久牌(SJC-36C型)進行。室內部份之設備則主要由加熱器、乾燥箱與熱電偶自動溫度記錄器所組成，如圖七所示：其中加熱器係由送風機、電熱器與自藕變壓器組合而成。送風機為單相交流馬達帶動之離心式風機，其風量之大小可由風門直接調整。電熱器則由一電熱絲構成，電熱絲接上一變壓器，由此變壓器可控制電熱絲之電壓，進而控制入口處熱風之溫度。溫度則經由插於入口處的熱電偶探針，回饋

表一、乾燥層的分割計算

時 間 (hr)	第一層 (厚5cm)		第二層 (厚5cm)		第三層 (厚5cm)	
	初 期	終 期	初 期	終 期	初 期	終 期
0.00) 0.02	$M_0 = 30$ $T = 122$ $T_g = 60$ $H = 0.003$ $RH = 10$	$M = 29.79$ $T_g = 76.23$ $H = 0.006$ $RH = 31.02$	$M_0 = 30$ $T = 76.23$ $T_g = 60$ $H = 0.006$ $RH = 31.02$	$M = 29.83$ $T_g = 67.03$ $H = 0.01$ $RH = 73.9$	$M_0 = 30$ $T = 67.03$ $T_g = 60$ $H = 0.01$ $RH = 7.39$	$M = 29.88$ $T_g = 66.06$ $H = 0.014$ $RH = 99.33$
0.02) 0.04	$M_0 = 29.79$ $T = 122$ $T_g = 60$ $H = 0.003$ $RH = 10$	$M = 29.62$ $T_g = 82.21$ $H = 0.005$ $RH = 20.42$	$M_0 = 29.83$ $T = 82.21$ $T_g = 60$ $H = 0.005$ $RH = 20.42$	$M = 29.7$ $T_g = 67.22$ $H = 0.008$ $RH = 58.08$	$M_0 = 29.88$ $T = 67.22$ $T_g = 60$ $H = 0.008$ $RH = 58.08$	$M = 29.78$ $T_g = 63.72$ $H = 0.011$ $RH = 85.95$
0.04) 0.06	$M_0 = 29.62$ $T = 122$ $T_g = 60$ $H = 0.003$ $RH = 10$	$M = 29.47$ $T_g = 87.32$ $H = 0.004$ $RH = 15.58$	$M_0 = 29.7$ $T = 87.32$ $T_g = 60$ $H = 0.004$ $RH = 15.58$	$M = 29.58$ $T_g = 69.01$ $H = 0.007$ $RH = 48.62$	$M_0 = 29.78$ $T = 69.01$ $T_g = 60$ $H = 0.007$ $RH = 48.62$	$M = 29.69$ $T_g = 62.74$ $H = 0.01$ $RH = 78.69$
0.06) 0.08	$M_0 = 29.47$ $T = 122$ $T_g = 60$ $H = 0.003$ $RH = 10$	$M = 29.32$ $T_g = 91.55$ $H = 0.004$ $RH = 12.76$	$M_0 = 29.58$ $T = 91.55$ $T_g = 60$ $H = 0.004$ $RH = 12.76$	$M = 29.47$ $T_g = 71.59$ $H = 0.007$ $RH = 41.6$	$M_0 = 29.69$ $T = 71.59$ $T_g = 60$ $H = 0.007$ $RH = 41.6$	$M = 29.61$ $T_g = 62.83$ $H = 0.009$ $RH = 72.95$



圖七、室內試驗設備之示意圖

控制電熱絲之電壓及熱量，以維持恆溫。

乾燥箱用四分厚（約 1.27cm）之夾板自行依設計釘製，乾燥箱可分為兩部份，其前面為調壓室，後為乾燥室，在乾燥室上方有進料口，下方有出料口，其間分別插置兩片順光公司生產之多孔網板。

熱電偶之探針可依需要置於電熱器熱風出口處、熱風進入乾燥室之前、後、並大氣中，以量測乾濕球溫度。此記錄器可依設定每分鐘掃瞄一次，每次掃瞄六次（即六分鐘），取平均值列印於列表機之報表上，並隨時在螢幕上立即顯示所掃瞄之各點溫度。

二、試驗方法

本實驗之主要目的在驗證模式之正確性。驗證計分三部分：

(1)室內試驗驗證。

(2)現場實驗驗證。

(3)以廠商性能測定數據驗證。

有關實驗驗證之各種變數可歸納如下：

1.熱風溫度：40-55°C（室內則特別以50°C、55°C加以實驗）。

2.初始含水率：20%至32%（濕基）

3.單位面積風量率：21米／分至64米／分。

4.穀層厚度：10公分至12公分。

三、實驗程序

1.將新採收之臺農 351 號玉米先行脫粒，置入冷藏庫內，保持 1-3°C，至實驗前一日自冷藏庫取出，陳於室內回溫，待穀溫回升至室溫後，量取初始含水率、重量等，即完成試料準備，開始實驗。

2.當玉米粒漸回溫時，即開啓風機、調整風門，利用風速計在熱風出口端量測風速，使出口端之風速在合適範圍。此時並開啓自動溫度記錄器，電熱器，並以變壓器調整電熱絲之電壓，使進入乾燥室前之熱風溫度達到所需條件。

3.將玉米粒置放於乾燥箱內。開始乾燥，並記錄當時之各項溫度。每乾燥16分鐘後，打開出料口，將玉米粒傾出均化。在卸出玉米粒時，同時分別依上、中、下三點取樣，待樣品溫度冷卻後，量測含水率。

4.卸出之玉米粒經適度攪拌，給予70分鐘時間作為均化，爾後再傾入乾燥箱內，作第二次乾燥。如此周而復始，直至含水率降到13%以下為止。

5.在整個實驗過程中，需隨時注意入口處之空

氣溫度是否維持恒定。當乾燥進行時，玉米粒體積會隨含水率下降而減少，此時則需在原有玉米層上放置其他玉米粒，使乾燥箱內維持氣密，而這兩部份玉米不可混合，在乾燥或均化期間均需分開，以免影響實驗之正確性。

由於實驗中含水率之量測方式直接影響實驗結果，故將所用之測定方法簡述於下：

1.烤箱式：每次取樣前，先將水分盤置於烤箱中預熱，再置於乾燥器中冷卻，然後取約十克玉米粒，磨成粉，以20號篩篩選，用電子磅秤取2克置於水分盤，並迅速置入 $130\pm 3^{\circ}\text{C}$ 烤箱中（不加蓋）烘烤一小時，加蓋後取出，放入乾燥器，待冷卻後測重，求其含水率。

2.紅外線法：與烤箱法原理類似，惟取磨碎之玉米粉末5克重，以紅外線水分測定儀測定含水率。

3.電容法：取250克玉米粒顆粒，放入 Steinlite SS250測定儀中，按下進料鈕，約15秒即自行顯示該批玉米之濕基含水率，

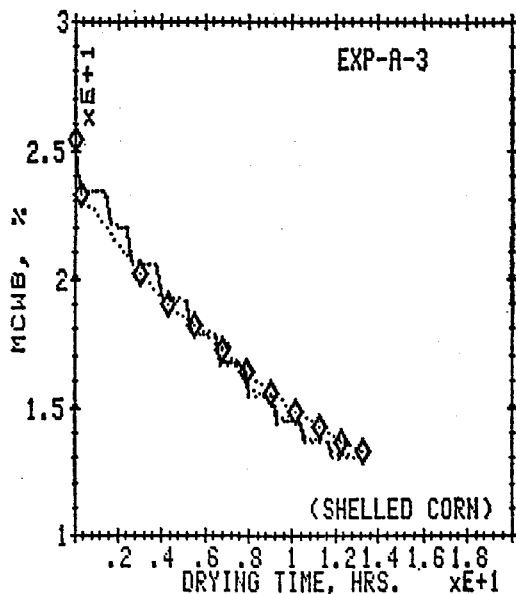
伍、結果與討論

本乾燥程式在個人電腦上執行，除可詳細描述乾燥過程外，亦可就各變因輸入不同數值以比較其對乾燥的影響，從而求出最佳的操作條件，因此，模擬結果之驗證甚為重要。

圖八與圖九為室內實驗結果與模擬之驗證。由模擬所得之乾燥曲線不同於一般所見之乾燥曲線，以圖八模擬曲線為例，其值係由一組右斜及近似水平之線段所組成。傾斜部份為穀物元件，在乾燥時，含水率之下降情形；而近似水平之線段則係穀物元件，在乾燥時，含水率之下降情形；而近似水平之線段則係穀物元件離開乾燥室至下次乾燥間的均化期，因無降低含水率，故線段近似水平。

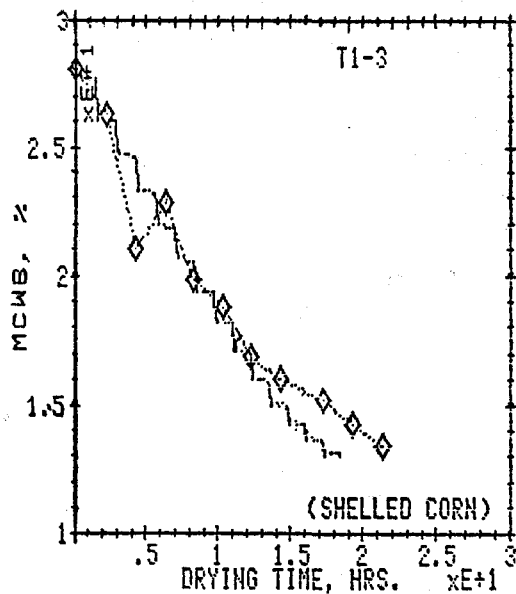
圖八之實驗條件如下：熱風溫度 55°C，相對濕度15%、穀物初始溫度 18°C，穀物總厚度10cm，進入穀層之熱風風速21m/min，而初始含水率則為 25. %。由此圖所示可知，預測值與實驗值極為相近，其誤差約為 1 %以內。預測值比實驗值略低，亦即乾減率較大，此由於室內實驗之均化期，係將玉米粒自乾燥室卸出置於大氣中，而模式中整個乾燥過程却假設為絕熱過程，所以可能造成此誤差。

圖九之實驗條件為熱風溫度 50°C、相對濕度

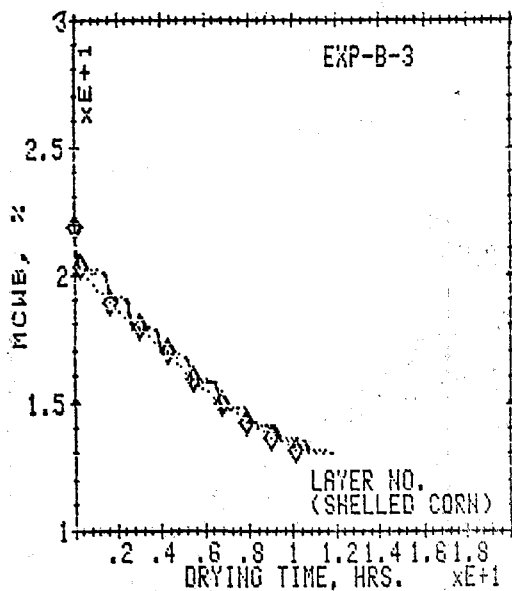


圖八、室內實驗結果與預測值比較(一)

熱風溫度：55°C 穀層厚度：10cm
 相對濕度：16% 風量：21m/min
 初期含水率：25.2% 穀溫：18°C

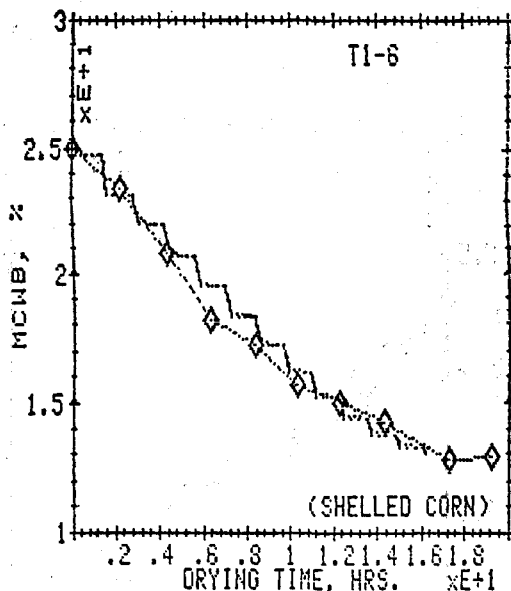


圖十、現場實驗結果與預測值比較 (T1-3)



圖九、室內實驗結果與預測值比較(二)

熱風溫度：50°C 穀層厚度：10cm
 相對濕度：20% 風量：21m/min
 初期含水率：21.87% 穀溫：13°C



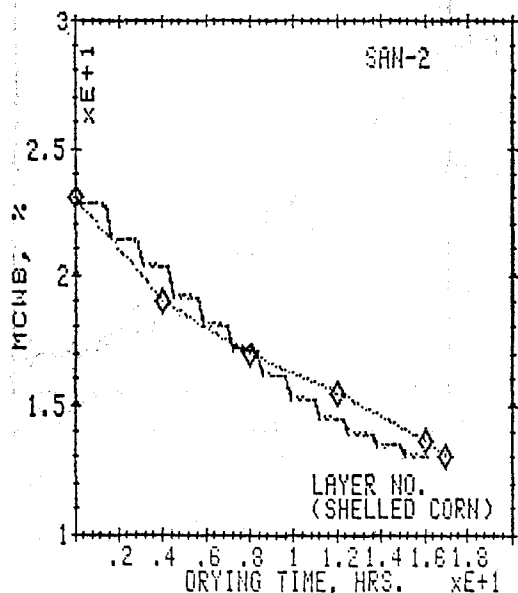
圖十一、現場實驗結果與預測值比較 (T1-6)

約20%、穀物初溫介於13°C~18°C、穀層總厚度10cm、而進入穀槽之熱風風速仍保持21m/min。其初期含水率為21.87%。在初期含水率低時，其準確度均良好。

圖十至十一係在斗南農會對三久牌乾燥機所作的現場試驗結果。針對模式而言，室內實驗與現場實驗最大之不同在於，室內實驗係控制質量下進行；而現場實驗則須以控制體積之情況來探討，故假設在乾燥之初，所欲模擬之微小體積元件位於均化層之頂，逐次下降，經過一完整均化期後，才進入乾燥室。

如圖十所示，可以發現實驗曲線未若室內試驗曲線平滑穩定，此係取樣時機不一定能配合循環乙次所需時間所造成，如圖中第四小時之取樣測得含水率不但與模擬預測值相去甚遠，在整條實驗乾燥曲線上亦偏離不少，除了上述取樣時機影響外，另一可能原因為乾燥機中玉米粒本身水分分佈就不均勻，例如，不是一個農戶所提供，或非由同一田區所收穫、收穫時間不同等所造成。由圖十中可發現，自第十四小時後，曲線有突然平緩且上凸情形，此係乾燥熱風溫度降低4°C而造成這一小段曲線與預測值的差距。

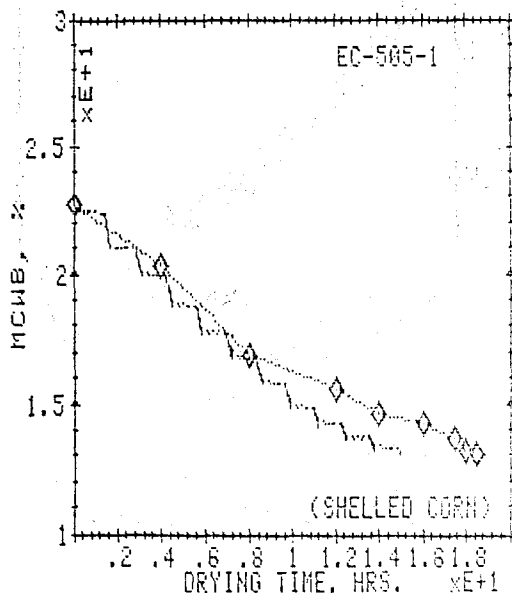
圖十一之實驗條件為熱風溫度平均值50°C，初始含水率平均值25%，穀層高度（即代表玉米粒量）同圖十（即達第六視窗口之高度）。



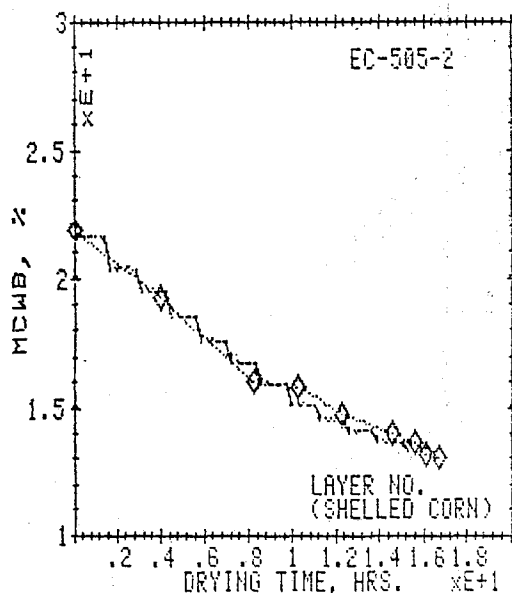
圖十二、三久 SKS-20S 循環式乾燥機測定數據與模式驗證。

現場實驗與室內實驗另一不同為熱風在進入乾燥室之風速，依據廠商設計資料為60m/min（三久、順光分別為63m/min，60m/min）。

圖十二至圖十四則是分別以三家乾燥機廠商性能測定數與模式驗證所得之結果。圖十二係針對三久牌 SKC-20S 型循環式玉米粒乾燥機，在熱風平



圖十三、順光 EC-505 循環式乾燥機測定數據與模式驗證(-)。



圖十四、順光EC-38X循環式乾燥機測定數據與模式驗證(-)。

均溫度 46°C ，初始含水率 23.01% 條件下，模擬與實驗值。圖十三、十四則為順光 EC-505 型循環式乾燥機模擬與實驗值。圖十三之熱風溫度 48°C ，初始含水率 22.85% ，除後半段乾燥時間因熱風溫度下降而造成乾燥曲線與模擬預測值有差距外，餘皆頗吻合。圖十四則為熱風溫度 41°C ，初始含水率 21.82% 條件下之情形。

根據以上三種方法對模式加以驗證，可證實模

式合理而可信。以下即依此對模式作各種不同條件下之探討比較：

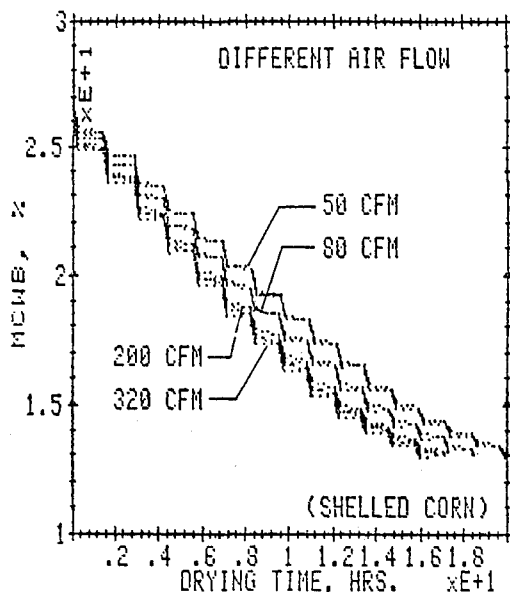
1. 由圖十五可歸納出，單位面積之風量率愈大，圖中顯示的四條乾燥曲線分別為單面積風量率為 50, 80, 200, 320。其他條件固定：熱風溫度為 50°C ，初始含水率 27% (W.B.)。並且減乾率不隨風量率之增加而成正比例增加。如圖中上側兩條乾燥曲線之風量率僅差 $30\text{CFN}/\text{min}$ ，而減乾率差異較下側兩條風量率的曲線還大。

2. 圖十六顯示乾燥室厚度對乾燥之影響，其熱風溫度為 50°C ，單位面積風量率為 $70\text{CFM}/\text{min}$ ，初始含水率 30% ，由圖可知，乾燥室厚度增加時，其乾燥速率則減慢。

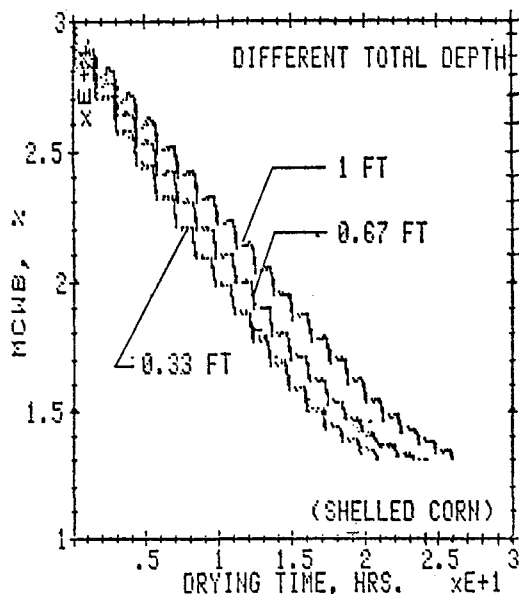
3. 圖十七則顯示模擬時不同的薄層厚度對乾燥之影響。模擬之條件為：熱風溫度 50°C ，風量率 $70\text{CFM}/\text{min}$ ，乾燥室厚度 12cm，分為五層之模擬乾燥曲線，其減乾燥較只以一層模擬之減乾率快，並且兩條乾燥曲線的差距隨時間增加而愈大愈大。

4. 圖十八顯示在不同相對濕度為 60% 、 35% 、 10% 時之乾燥曲線，當相對濕度愈高時，乾燥速率則減慢。

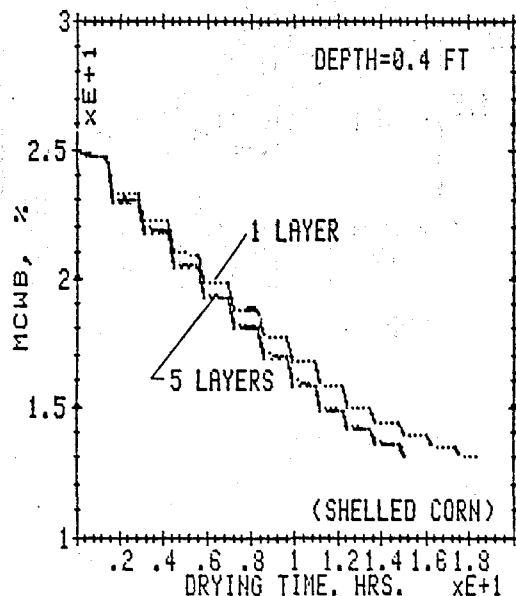
5. 圖十九顯示不同之熱風溫度對乾燥曲線之影響，當熱風溫度升高，乾燥速率亦加快，且熱風溫度之變化幅度雖然不大，但對乾燥曲線之影響却甚明顯。



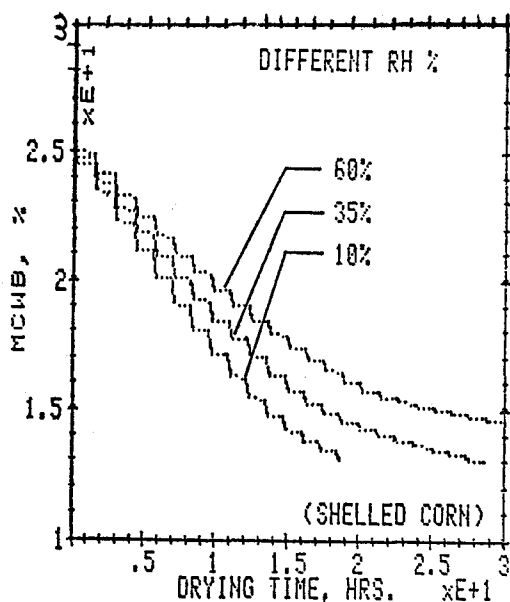
圖十五、單位面積風量率對乾燥之影響。



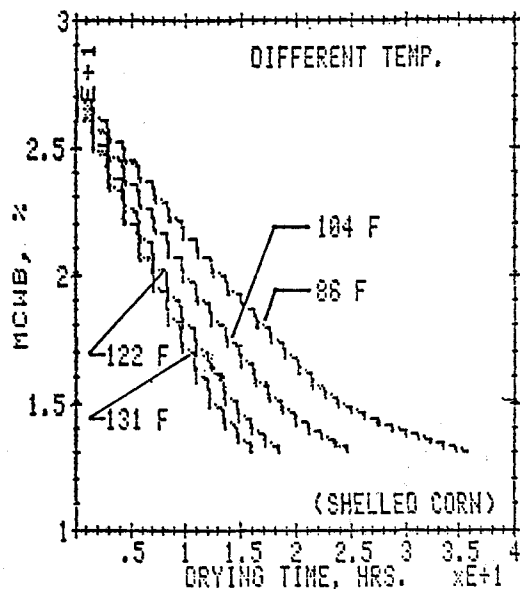
圖十六、乾燥室厚度對乾燥之影響。



圖十七、薄層厚度對乾燥之影響。



圖十八、空氣相對濕度對乾燥之影響。



圖十九、熱風溫度對乾燥之影響。

陸、結 論

循環式玉米乾燥機之基本試驗及電腦模擬工作，目前在國內外之文獻仍極為有限，尤其針對本省特有之循環式乾燥機型式進行之模擬研究，本文應為首次資料。針對本次試驗以及模式印證的結果，可歸納如下：

1. 本研究所建立之循環式乾燥模式經室內試驗

、現場與實際現有之本省循環式乾燥機所得之乾燥資料及已有數據印證結果，預測值與實際值十分接近，證明模式之應用相當準確。

2. 本模擬程式可就本省一般玉米粒之乾燥條件下，作不同變因之情況進行預測，從而可在試驗進行之前，先得預知其結果，節省試驗之時間。

3. 在循環式乾燥系統中，提高熱風溫度，增加風量率或減少穀層厚度，均可提高減乾率；在影響乾燥速率諸因子中，以熱風溫度最具決定性。

4. 模擬時之每層穀物厚度以不超過 6 cm 為佳。

5. 均化作用實可消除水分梯度、溫度梯度而提高穀物在乾燥層之減乾率。

6. 本模擬程式系以交談方式寫在 APPLEII 之八位元微電腦上，以培基語言執行，不但操作簡便、溝通容易，且攜帶方便，可為工程人員解析乾燥現象或設計乾燥機之參考。

柒、誌 謝

本文承蒙農委會 75 農建-7.1-糧-91(2)a 計劃之支援下方得以成，謹誌謝意。

捌、參考資料

1. 馮丁樹譯 1978 穀物乾燥臺北市徐氏基金會編號 1377.
2. 馮丁樹 1985 飼料玉米乾燥特性之研究，農工學報 31(1):37~55.
3. 方煒 1985 使用個人電腦對靜置式厚層玉米乾燥系統模擬程式之研究 臺大碩士論文。
4. Brooker, D.B. 1967. Mathematical model of psychrometric chart. Trans. of the ASAE 10(4):558.
5. Henderson, S. M. 1952. A basic concept of equilibrium moisture. Agric. Eng. 33:20-32.
6. Kazarian, E. A. and Hall C. H. 1965. Thermal properties of grains. Trans. Trans. of the ASAE 8(1):33-37, 48.
7. Thompson, T. L., Peart, R. M. and Foster, G. H. 1968. Mathematical simulation of corn drying--A new model. Trans. of the ASAE 11(14):582-586.
8. Thompson, H. J. and Shedd, C. K. 1954 Equilibrium moisture and heat of vaporization of shelled corn and wheat. Agri. Eng. 35(11) 786-8.