

# 飼料玉米乾燥特性之研究

## A Study on the Drying Properties of Feed Corn

國立臺灣大學農機系副教授

馮 丁 樹

Din-Sue Fon

### Summary

Research on ear corn drying using artificial method is first conducted in this country. Farmers at present still adopts the sun drying method, which might be energy saving but needs lots of labor work.

In the States, ear corn is mostly dried with natural air or air of low temperature keeping energy used to a minimum. Their weather condition may be better than ours here, but the drying methods they used are still good examples for us to apply.

The feature of ear corn drying is its slowness. According to the experience in the States, each batch needs one week or more to have a complete drying, even on a very good weather condition. As a result, farmers combine their drying facilities with a storage system. Such can not be the case for our farmers who usually consider their corn as a cash crop. Storage system is then not necessary. To expedite the drying, cost then goes higher in our applications.

In this research we have conducted 18 tests on two models. Results show that at a hot air temperature higher than 50 degree in Centigrade, the rate of ear corn drying will be less than 0.4% in an hour, while the rate of shelled corn drying is less than 0.7% an hour. Obviously the shelled corn is dried faster than ear corn. For the drying cost related, it takes NT\$ 0.63 for shelled corn and 1.25 for ear corn, as drying from 35% to 13%.

At present, the moisture of harvested corn is too high to be shelled on the field. The ears need to be dried to 20% before a shelling starts and again dried to 13%. In this case, it takes NT\$ 1.05 per kilogram to have the job done by box driers and NT\$ 1.18 by circulating ones. Therefore, drying ear corn directly from 35% to 13%, followed by a shelling procedure might be feasible.

From the mechanical point of view, the two-way drying method is of necessity to be successful in an ear corn drying. For the energy saving point, insulation materials for the wall will deserve its low cost of drying.

## 一、前言

本省地處亞熱帶，氣候潮濕，頗適合玉米之生長。惟由於一年種植兩季，故收穫期短。玉米通常分為春作與秋作兩期，春作二、三月種植，五、六月採收；秋作七、八月種植，十、十一月採收。若採用玉米、水稻輪作制度，則因配合農時，亦有提早採收之現象。收穫期過短或提早採收，所得玉米穗之水分含量相當高，常達35%以上。在此情況下，採收機械之功能很難正常發揮，去苞與脫粒作業亦無法適切配合收穫作業。

為此，合理解決之道惟有延後脫粒作業。玉米經採收去苞後，先進行穗乾，俟玉米粒水分降至18%左右或直接乾至13%時再行脫粒。前者乾燥須分兩段進行，乾燥時間可大為縮短但較費人工；後者為一般種子公司常採用的方法，乾燥時間較長，耗油，惟節省一次出入倉時間，較適合於一般低溫乾燥之場合。

本文旨在針對玉米穗乾與粒乾階段之乾燥特性加以探討，並研究其在本省之適用性。

## 二、目的

1. 探討玉米穗與玉米粒之乾燥特性及其相關之配合條件。
2. 研究適合於本省使用之穗乾機械，並改良現有之乾燥機型。
3. 配合玉米穗乾試驗，分析其適用性，以作為今後推廣之依據。

## 三、玉米之物理與乾燥特性

本省歷年來孕育成功之玉米品種甚多，惟以產量比較，則以臺農育 351，臺南 5 號與 11 號等為最高，其中臺農 351 號每公頃可達六噸左右，秋作尤高，可達八噸，已列為轉作之主要推廣品種。本試驗與資料亦將針對此品系進行分析與收集。

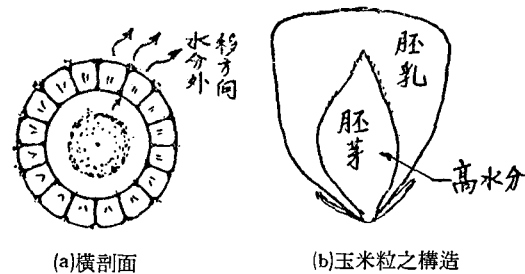
臺農育 351 號屬中熟性品系，株型高大，莖桿粗壯，根系分佈廣密且深。果穗長大而徑粗，每株長一穗，長約15~20公分，每穗着生種子16至18行，約600至800粒。子粒為半硬粒型、呈鮮橘紅色，與美國生產之黃玉米品系大致相同。

整穗之玉米，每英斗 (Bushel) 在去苞葉後約重70磅 (32公斤)，若以容量計算，每立方呎約28磅 (或每立方米350公斤)。英斗為容積單位，但在

美國均作為估計穀物數量之標準。為得到一致的換算比例，一般均以水分在 15.5% 時一英斗的玉米粒重 56 磅為換算標準，亦即一英斗等於玉米粒之乾物重 47.32 磅 (21.5 公斤)。其他所謂一英斗之玉米穗量仍以最終能產生一英斗之玉米粒量為基準，故實際一英斗之玉米穗容量約佔兩英斗的容積空間 (一英斗之容積 = 1.245 立方呎)。

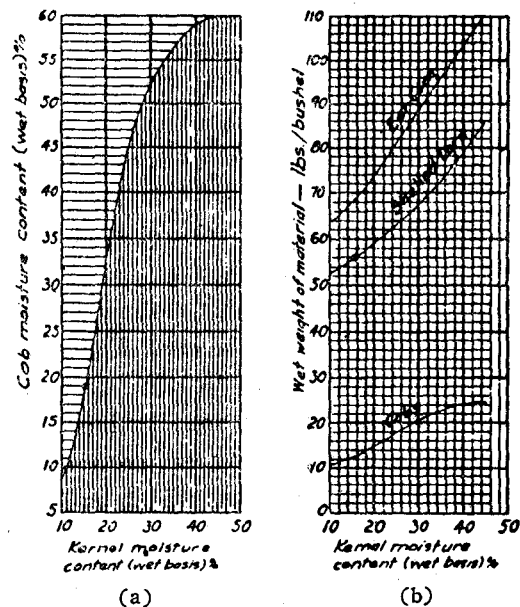
玉米粒之容重則為每立方呎 44.8 磅 (或每立方呎 719 公斤)，空隙率約在 40~44% 之間，依水分含量之高低而定。

整穗玉米之玉米粒排列如圖一(a)，玉米粒整齊排列在穗軸之外圍。由於玉米粒與穗軸之材質不同，



圖一 玉米穗軸與玉米粒之橫剖面圖

其水分分佈差異性極大，在高水分時，粒與穗軸間之水分差常達 20% 以上。此時由於玉米粒膨脹擁擠，穗軸之水分極難往外擴散。圖二(a)所示為玉米粒與穗軸間水分相差之情形。穗軸水分之飽和點約為 60



圖二 玉米穗軸心與玉米粒間之水分分佈關係

%，兩者差額最大區約在玉米粒水分25%至40%之範圍內。但水分降至13%以後，穗軸水分之下降轉速，遠低於玉米粒本身之水分含量，主要原因是玉米粒體積收縮，空隙變大，穗軸內之水分較容易蒸發之故。

玉米穗軸與玉米粒間之水分關係可用下次表示：

$$CM = 64.8691427 - 15.3158906 \times KM + 1.3827638 \times KM^2 - 0.0484529384 \times KM^3 + 7.69228407E - 4 \times KE^4 - 4.63070455E - 6 \times KM^5 \quad 10 \leq KM \leq 50 \dots\dots\dots(1)$$

$$CM = 60 \quad \text{當 } KM > 50$$

$$CM = 0.8763 \times KM \quad \text{當 } KM < 10$$

式中，KM, CM分別為玉米粒與穗軸之水分含量，以濕基百分比表示。

玉米粒本身（如圖一 b）之水分分佈亦相當不平均，胚胎與胚乳間常因水分傳遞與擴散速率之不同而有相當大之差異。胚芽部份吸濕性甚強，初期乾燥期間常有15%以上之差異（例：胚芽得36%，胚乳部份已降至20%以內）。最大原因在於胚芽與穗軸相連，水分均極難蒸發，故乾燥速率甚為緩慢。脫粒後之玉米粒因胚芽部份暴露在大氣中，水分脫離迅速，乾燥乃轉速。此亦即一般採用兩段乾燥之原因。

圖二 b 係利用一英斗之玉米穗中，除粒部份乾物47.32磅外加上穗軸乾物9.94磅，依圖二 a 顯示之水分含量比例，湊成在不同玉米粒含水率下，各部份之重量成分。玉米粒重與玉米穗總重間之百分比稱為脫粒率 (Shelling Percentage)，此項純為理想值，不包括實際脫粒時之損失。

利用上項基本數值，配合圖二 b 或方程式(1)的關係，可導演圖二 b 之數值如下：

1. 一英斗玉米穗中，玉米粒之重量；WS 為

$$WS = 47.32 \times \frac{100}{(100 - KM)} \dots\dots\dots(2)$$

2. 玉米穗軸部份重，WC 為

$$WC = 9.94 \times \frac{100}{(100 - CM)} \dots\dots\dots(3)$$

3. 玉米穗總重，WE 為

$$WE = WS + WC = \frac{4732}{100 - KM} + \frac{994}{(100 - CM)} \dots\dots\dots(4)$$

4. 脫粒率，SP 為

$$SP = \frac{WS}{WE} \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

5. 玉米穗之平均含水率，EM (乾基)

$$EM = \frac{WE - (47.32 + 9.94)}{(47.32 + 9.94)} \times 100\% \dots\dots\dots(6)$$

基於穗軸之乾量為 9.94磅/英斗之情況下，脫粒率約為82.6% (即KM=0%時)。事實上，脫粒率之多寡受品種、成熟度與病蟲害之侵擊情形影響甚大。換言之，玉米穗之脫粒率會隨着上項因素之存在情形有所增減，間接影響 9.94磅之實際數值。為此，Miles 氏設計一指標，稱為玉米特性指數 (Corn Characteristic Index)，或 CCI 指數。此指數範圍自零至廿，指數愈小，其脫粒率愈佳，愈大脫粒率愈差，後者表示玉米穗未成熟者或遭受蟲害者愈多。具有飽滿穗者其 CCI 指數值約在 4 至 5 左右。圖二 b 所示者其 CCI 值約為 7 左右。

在水分為零之乾物狀態下，脫粒率與 CCI 值間具有下列之關係：

$$SP = 87.3887 - 0.67838 \times CCI \dots\dots\dots(7)$$

圖三為配合不同 CCI 值情況下，公式 2-7 之各項數值。利用 Apple 培基語言程式亦可計算上述值，圖四為其操作之實例。（有關軟體，請向作者洽詢）

圖三所示各值中，在同等 CCI 值之條件下，其脫粒率在水分含量低時較高，雖然此項原因大部份係因雙方水分各有增加造成百分比消滅之結果，但根據試驗，在高水分脫粒，其所獲得之玉米粒乾物量常比低水分脫粒時為少，其差異有時達 4.2% 以上。究其原因，一則可能玉米在水分低時容易脫粒，殘餘粒較少，二則可能係玉米粒與穗軸接觸時間較長，部份養份仍繼續自穗軸轉移至玉米粒上；此現象亦經多數營養專家所承認。

事實上，利用圖二至四所提供之資料，可計算玉米穗乾燥期間所需排除之水分與最後之淨重。

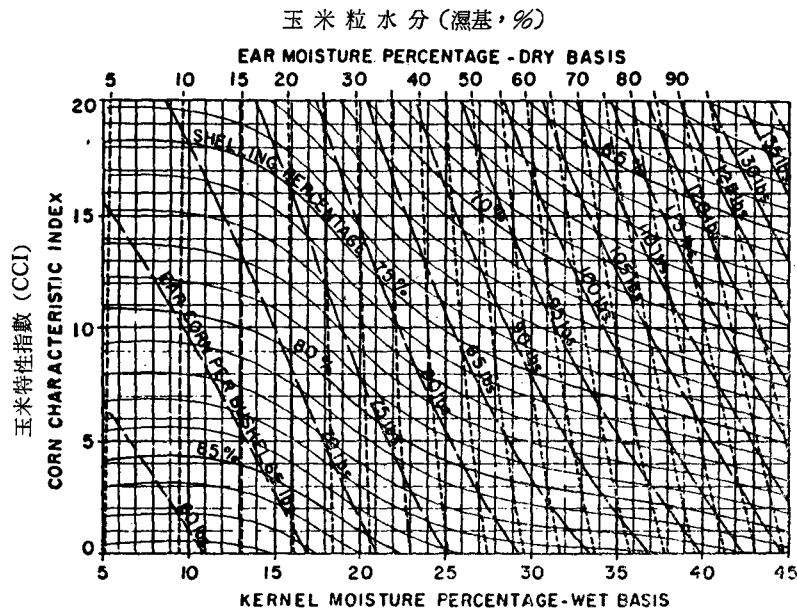
例如，玉米穗重 WEKg，自粒水分 KM<sub>1</sub> 乾至 KM<sub>2</sub> 時，其水分之排除情形可分成玉米粒與玉米穗兩部份，首先求最初與最末期玉米穗之相對應水分 CM<sub>1</sub> 與 CM<sub>2</sub>，及初期各部份重 WS<sub>1</sub> 與 WC<sub>1</sub>

$$\text{則 } WS_2 = WS_1 \times \left( \frac{100 - KM_1}{100 - KM_2} \right) \dots\dots\dots(8)$$

$$WC_2 = WC_1 \times \left( \frac{100 - CM_1}{100 - CM_2} \right) \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{最終玉米穗重 } WE_2 = WS_2 + WC_2 \dots\dots\dots(10)$$

排除之水分 = WE<sub>1</sub> - WE<sub>2</sub>



圖三 玉米穗之脫粒率、重量與 CCI 間之關係

```

KERNEL MOISTURE CONTENT <WB%>
<10:50> =?40
KERNEL MOISTURE CONTENT <WB%> =40
COB MOISTURE CONTENT... <WB%> =58.708
WET WEIGHT OF COBS.....LBS/BU =24.073
WET WT. OF CORN.....LBS/BU =78.867
WET WT. OF EAR CORN....LBS/BU =102.939
SHELLING PERCENTAGE.....% =76.615
EAR MOISTURE CONTENT....<DB%> =79.775

CORN CHARACTERISTIC INDEX... =100
ANOTHER TRY <Y/N> ?
KERNEL MOISTURE CONTENT <WB%>
<10:50> =?25
KERNEL MOISTURE CONTENT <WB%> =25
COB MOISTURE CONTENT... <WB%> =44.38
WET WEIGHT OF COBS.....LBS/BU =17.871
WET WT. OF CORN.....LBS/BU =63.093
WET WT. OF EAR CORN....LBS/BU =80.965
SHELLING PERCENTAGE.....% =77.927
EAR MOISTURE CONTENT....<DB%> =41.398

CORN CHARACTERISTIC INDEX... =100
ANOTHER TRY <Y/N> ?
KERNEL MOISTURE CONTENT <WB%>
<10:50> =?20
KERNEL MOISTURE CONTENT <WB%> =20
COB MOISTURE CONTENT... <WB%> =32.292
WET WEIGHT OF COBS.....LBS/BU =14.681
WET WT. OF CORN.....LBS/BU =59.15
WET WT. OF EAR CORN....LBS/BU =73.831
SHELLING PERCENTAGE.....% =80.116
EAR MOISTURE CONTENT....<DB%> =28.939

CORN CHARACTERISTIC INDEX... =100
ANOTHER TRY <Y/N> ?
GO BACK TO THE MENU?

```

圖四 利用Apple之培基語言計算玉米穗之相關數值  
(程式請向作者洽詢)

$$= WS_1 \times \left( \frac{KM_1 - KM_2}{100 - KM_2} \right) + WC_1$$

$$\times \left( \frac{CM_1 - CM_2}{100 - CM_2} \right) \dots\dots\dots(11)$$

[例] 1000磅重玉米穗自40%粒水分乾至20%後之重量。

方法一：利用圖四， $KM_1=40\%$ ， $KM_2=20\%$   
 $CM_1=58.708\%$ ， $CM_2=32.292\%$

$$\therefore WE_1 = 1000 \text{磅} / 102.939 \text{磅} / \text{英斗} = 9.7415 \text{英斗}$$

$$\therefore WE_2 = 9.7415 \times 78.867 \times \left( \frac{100 - 40}{100 - 20} \right)$$

$$+ 9.7415 \times 24.073 \times \left( \frac{100 - 58.708}{100 - 32.292} \right)$$

$$= 576.212 + 143.015 = 719.227 \text{磅}$$

方法二：利用玉米穗總水分率 (DB%)  
 $EM_1=79.775\%$  (對應於粒水分40%)  
 $EM_2=28.939\%$  (對應於粒水分20%)

$$\text{排除之水分} = \frac{1000}{(1 + 0.79775)}$$

$$\times (0.79775 - 0.28939)$$

$$= 282.775 \text{磅}$$

$$WE_2 = 1000 \text{磅} - 282.775 \text{磅} = 717.225 \text{磅}$$

方法三：利用穗總重  
 $WE_2 = 9.7415 \text{英斗} \times 73.831 \text{磅} / \text{英斗}$   
 $= 719.225 \text{磅}$

上述三種方法均利用圖二至四所提供之資料而得，以第三種方式最為迅捷。

#### 四、國外玉米穗倉之設計

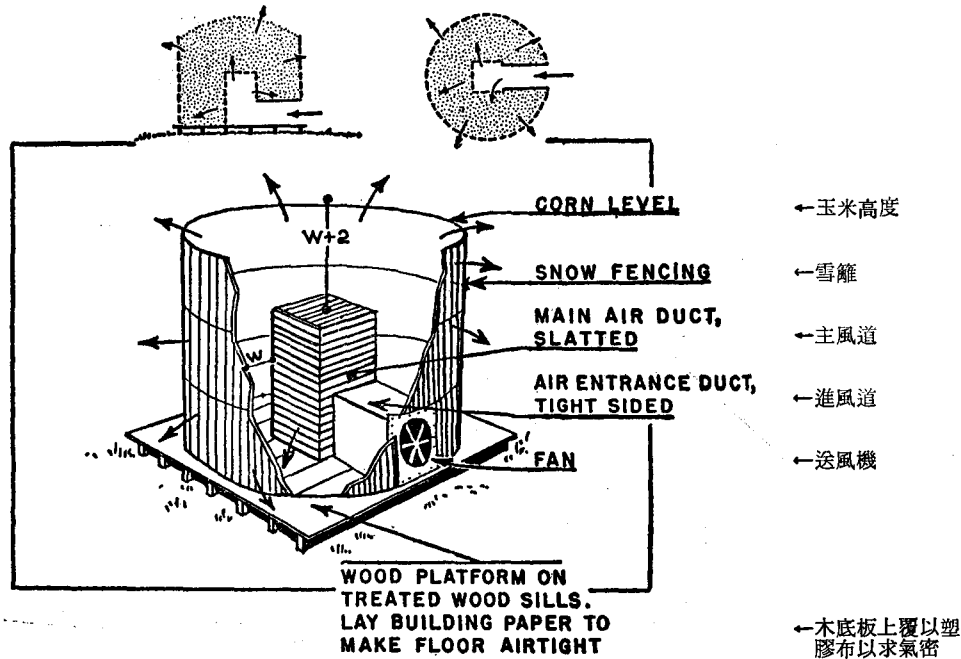
玉米穗由於所佔體積龐大，且流動性不高，故在美國，除部份自給之所需外，大部份先行脫粒再予處理。惟玉米穗之貯藏與乾燥，在農場上仍到處可見。由於濕度低，故以採用自然乾燥方式居多，可節省大量能源，據估計，玉米粒自 25 % 乾至 14 % 每公噸約需 12 公升之瓦斯燃料。利用穗倉乾燥，由於空隙大，行自然通風，自 25 % 降至 15 % 約需 60 ~ 75 日，長短依各地之氣候條件而異，不需能源。

美國農家對玉米穗之存貯，常採用圓籠倉 (Bin crib) 或百葉倉 (Slatted crib)，或行自然通風，或行強制送風方式。圓籠倉為圓筒型，其地面鋪以水泥，四周用鐵絲網或雪籬 (Snow fence) 圈圍而成，上覆以圓錐型金屬頂，以避風雨。其形狀與結構如圖五。金屬頂側有穗入倉口，由穗輪送帶直接送入倉內。部份沒有金屬頂蓋者，多為暫時性設備 (如圖六)。圓籠倉內亦有裝置通風管以行通風乾燥。管道可由條狀木板構成，以利通氣。若

為其他金屬孔板做成，其孔度應維持在 25 % 以上。依據一般通風道截面設計之規則，風管風速應維持在每平方呎通風量在 1000 CFM 以內 (或風速 5.08 M/S 內)。玉米穗之高度最高可達 20 呎 (或 6 米左右)。為求風速分佈均勻，管路可配置在正中央，頂層表面與風道末端之距離應為兩呎，使玉米穗乾燥縮小體積後 (通常收縮程度約在 2 至 3 呎左右)，仍能維持通氣之均勻度。



圖五 美國農家使用之典型穗乾燥倉，前者為方型倉，右後方為圓型籠倉

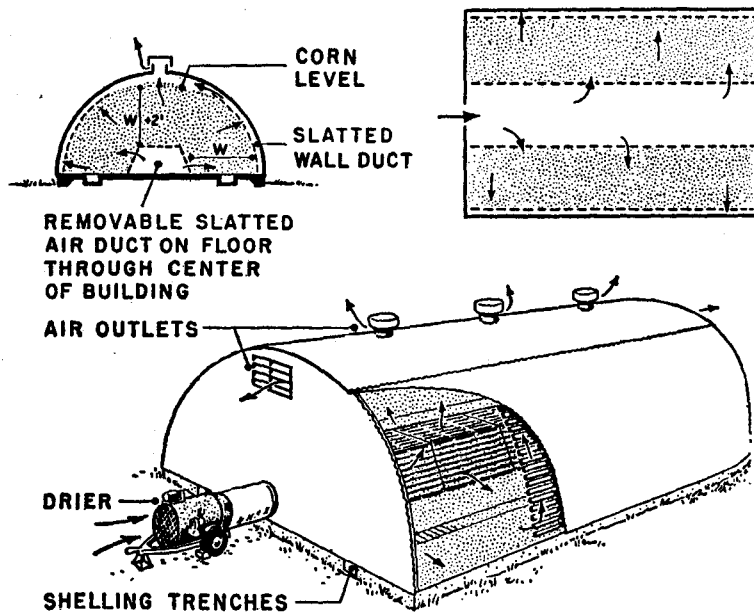


圖六 圓籠倉之另一種簡易型式

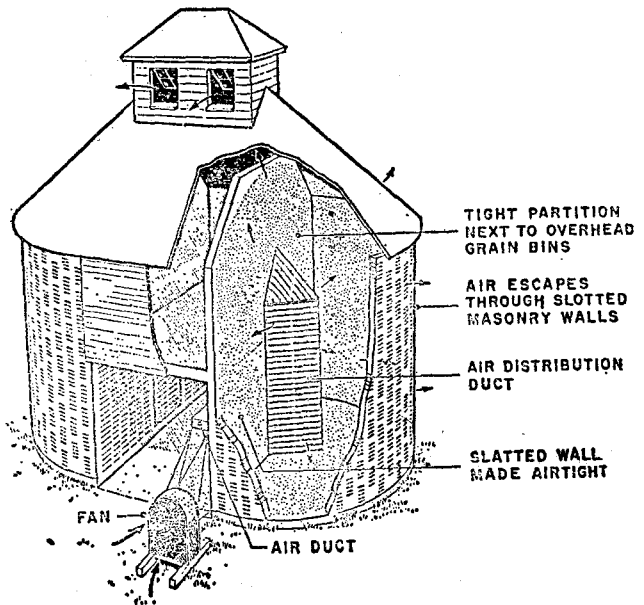
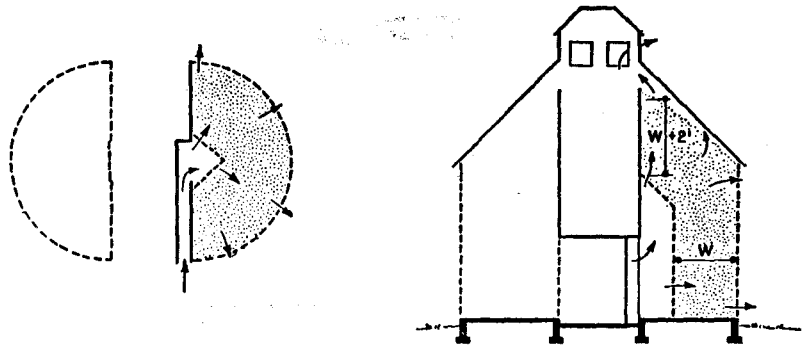
為適合不同穀層高度之使用，管路中設有上下度。可供調節之阻風板。

圓筒倉用於玉米穗乾時，亦有採用臥式者 (如圖七)。風道仍設於中央地上，廢氣自頂層排出。穀層之安排仍維持中間高出兩側寬度約兩呎之裕

度。圖八為相同於此類型之另一種型式，惟四周材料以空心水泥磚砌成。中間設有甬道，作為通氣管佈設的位置。甬道上方可作為另一臨時性穀倉，故事實上倉內區分為三種不同性質之乾燥倉，以應臨



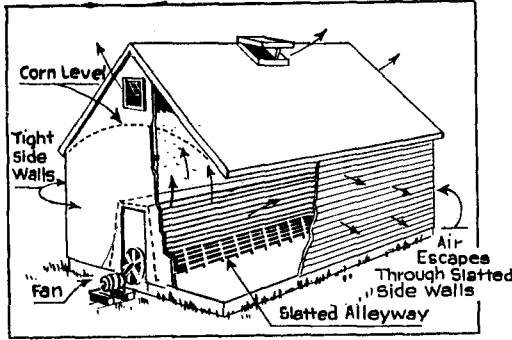
圖七臥式半圓籠倉



圖八空心磚堆砌而成之圓型籠倉

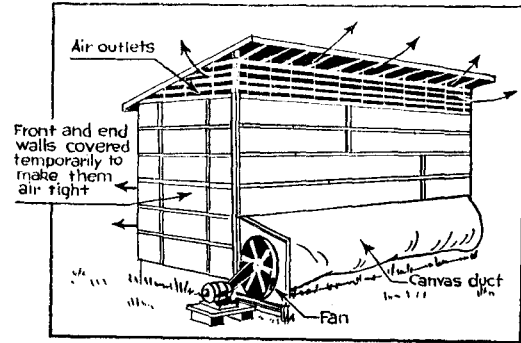
時之所需。

除了圓籠倉外，百葉倉亦為常用之倉型。圖九為典型之方型倉面，同時具有送風管道。倉之兩側及頂部氣窗均作為排氣之用，縱向兩端則密閉，以防漏氣。圖五為一同型方型倉，推行自然通風。



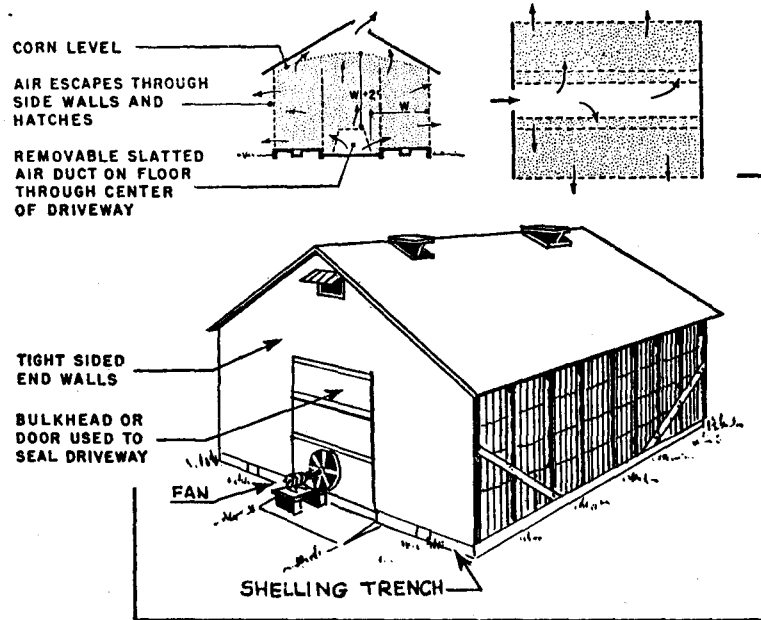
圖九 方型百葉式總倉

圖十為一單側葉倉，風道以帆布組合，靠近風道之側牆及前後兩端密閉，以保證空氣均勻通過穀層。



圖十 單側通風倉，以帆布作為通風管

為增加倉容，亦有設計成兩側合用者，如圖十一所示。中間闕為通氣道位置，其餘倉面大體相同



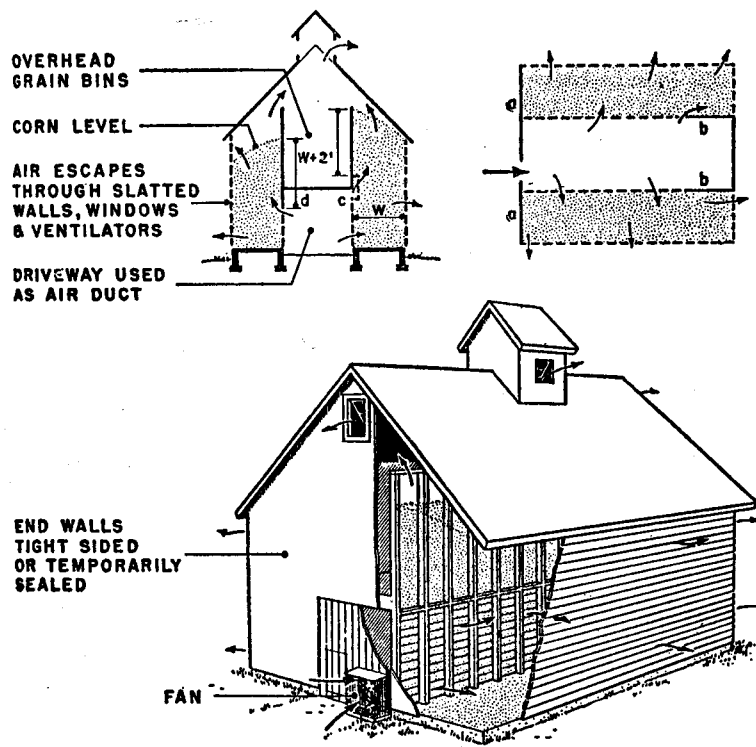
圖十一 方型總倉利用中央為通風道兼作乾燥之用

。圖十二者中間甬道特別分開，有如圖八之圓倉。甬道上方之阻隔板可因入倉量作適當調整。其平面圖顯示：風道前端 a-a 部份應設法封閉，他端則在 b-b 處設法密閉，使風路經過穀層能更為均勻。兩側之寬度以 8 呎到 10 呎為宜，實際深度應比兩側寬度多出兩呎。

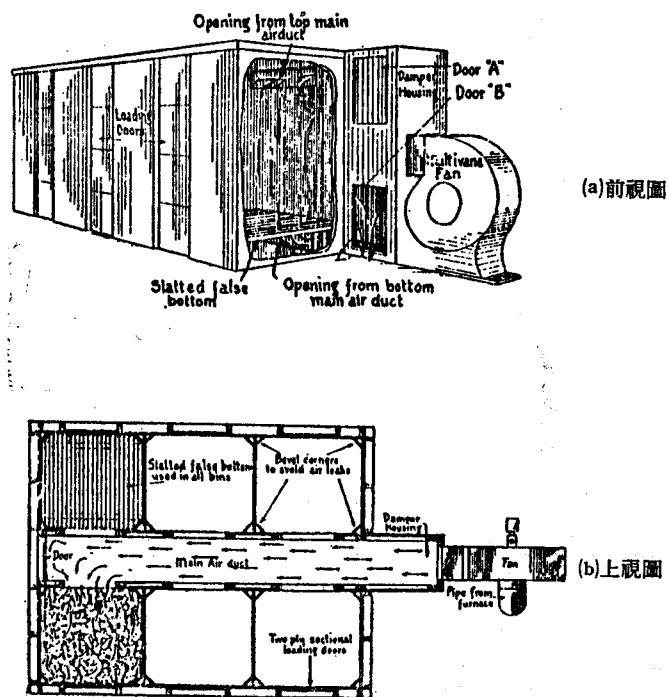
此種型式在美國農家使用相當普遍。其中央甬

道除可放置輸送帶外，亦可通行小拖車，十分方便。

杜非氏 (Duffee, F.W.) 於 1937 年介紹一種專門為乾燥玉米種子用之貨櫃式乾燥室 (如圖十三)，其外型較為特殊，有別於前面介紹之簡單型。為使玉米穗能均勻乾燥，此型式更採用上下通風方式，每 12 小時可作風向轉換乙次。此倉通常高度十



圖十二 方型倉中間設有調整風路之倉門，其上下位置可因穀面調節



圖十三 玉米穗乾燥機，風向可分上下兩方向轉換，以求均勻。

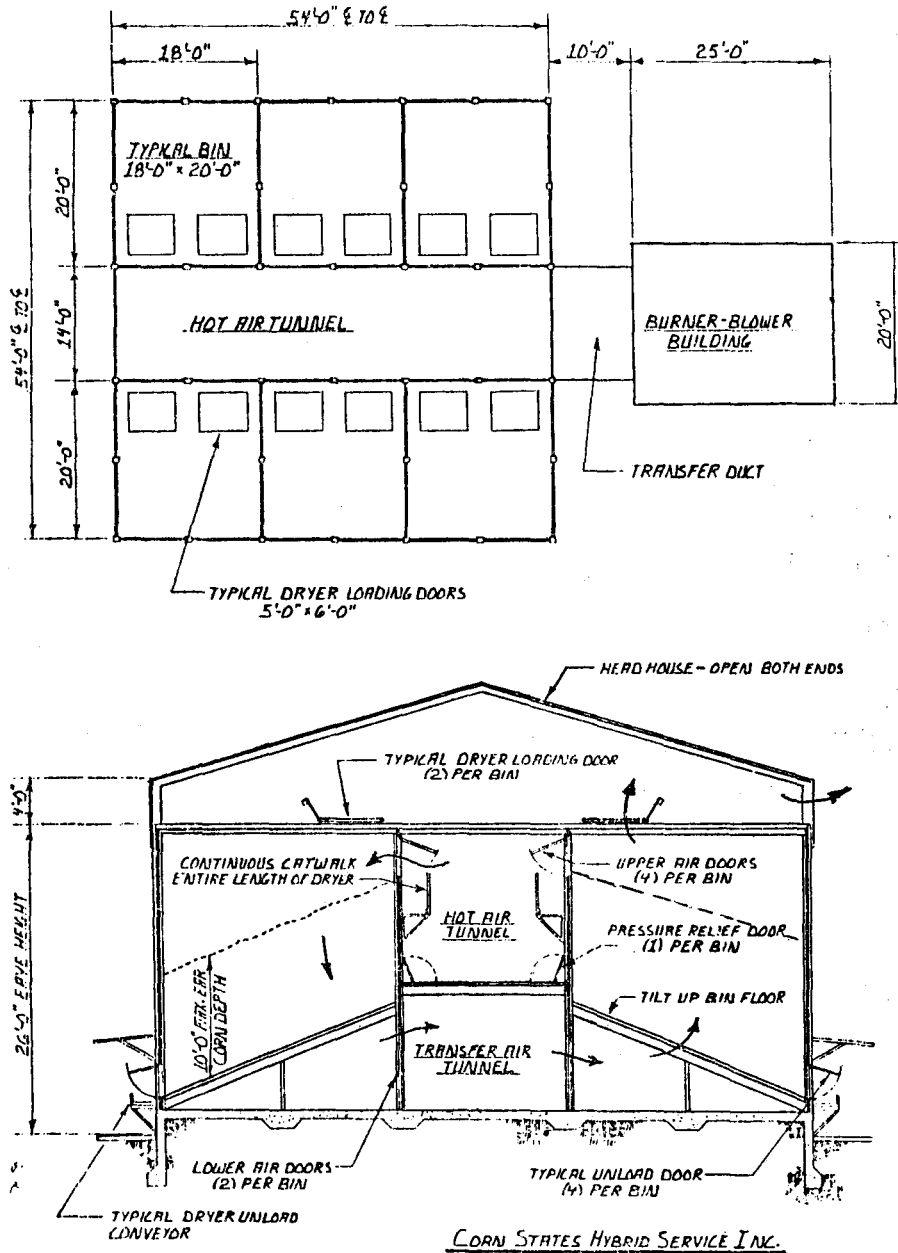


呎，底層採用條狀地板，離地一呎高，作為調壓室之用，因此，玉米穗可裝至7~8呎深。乾燥時，熱風經導向板自中央甬道進入穀層，中央甬道分上下兩層，互作為進氣與排氣之用。當熱風自上往下吹送時（如圖十三 a 所示），下層甬道變為排氣，上層改為進氣；風向改為上吹時，順序則反之。

本型式採用之通風量相當高，每平方呎達 60 cfm 以上，水柱壓力約為 1~1¼ 吋，所需馬力在 3

至 7½ 馬力之間，故乾燥速率頗快。因為乾燥玉米種子，所用之熱風溫度限制在 110°F 內，惟在大型之乾燥室內，有時前後溫差仍達 5°F 左右。燃燒爐之能力至少每平方呎可產生 2,000 BTU 之熱量。

筆者此次有機會至美國中西部考察玉米種子處理設備，在 Iowa 州之一種子設備顧問公司 (Corn State International) 看到一套更新式之乾燥設備，其觀念如圖十四。基本上，乾燥室的配置與前



圖十四 大型玉米穗種子用乾燥設備構造圖

者大體相同，中央甬道仍然分為上下兩層，惟上層甬道僅供熱氣通道，下層甬道轉變為中途調壓室。熱風自上層甬道進入左邊甲乾燥室，往下通過其穀層，由其底層轉出進入下層甬道之調壓室，再進入右邊乙乾燥室之底層，往上通過穀層，再自乙乾燥室頂排出。

欲得相反方向時，則反其道而行，改變風路（或窗口），由乙乾燥室進，經下層調壓室，再由甲乾燥室之上方排出。利用此方式有幾個特點如下：

1.熱風道固定，不必因更換方向而隨時改道。  
2.排氣口與穗進倉口合併，其他方向改變可由各乾燥室之窗戶開關為之。

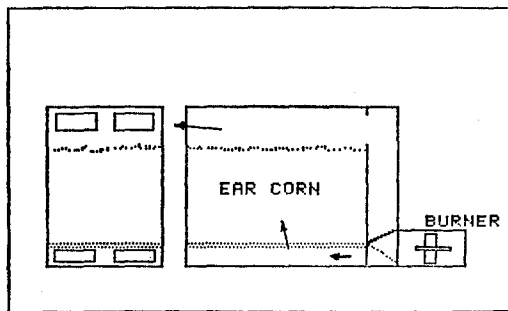
3.可進行多倉作業，無論各倉狀態如何，風向均可隨時個別調換，不必同時調整。

4.熱風經過之穀層厚度加倍，熱效率高。

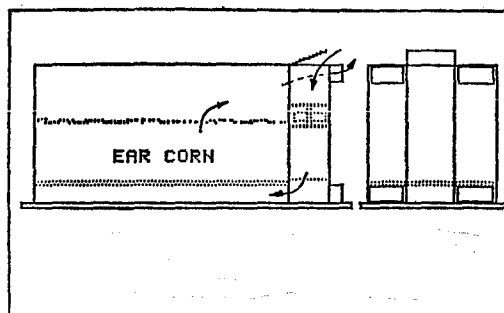
此型式均使用於大型乾燥設備為多，由 8~10 倉組併而成，每倉為 18呎×20呎× 8~10呎高。風車馬力約 150Hp，風壓 3~5吋水柱。風量每英斗在 20~25 cfm 之間。操作時每 12 小時轉換乙次，自 30% 乾至 11% 約需 72 小時。

### 五、本試驗使用之機型

本試驗係分別與國內大發樹脂公司及三久工業公司合作，大發公司係以其六坪式烤菸室改良而成，其結構如圖十六。三久公司則為重新設計之兩坪型，其結構如圖十五。由於大發六坪型係由烤菸機改善而來，故採用間接加熱方式，但仍行上下送風方式，以兩具送風機送風。馬達為兩馬力，送風量為 250 CMM，風壓 15 厘米水柱。此種形式排氣可經收回再用，因此在減率乾燥期較省能源。乾燥機內之規格：長×寬×高= 550 cm×360 cm×2,120 cm。總容量玉米穗約可裝 12 噸（15.50% 粒水分時）。



圖十五 三久牌 A 型機之構造圖



圖十六 大發牌 B 型機之結構圖

由於通風機係採用軸流式，配裝於回風管道與進風管中（如圖十六），反向吹送較為困難，需將整個風機反轉 180 度，由於管路前後分配之長度不同故反向後（由上往下吹），乾燥效果較差。

三久之試驗機基本上為兩坪式，高度約兩米，容量約為玉米穗 2000 公斤（15.5% 粒水分）。用單一軸流送風機，動力為 1 馬力，風量 34~62 CMM，風壓 17~38 厘米水柱。風向之轉換靠閘門控制。此型式較為簡單，價格亦較廉。惟四周僅用鐵板為牆，絕熱性能較差。

### 六、乾燥條件

#### 1.熱氣溫度

玉米穗之乾燥依時地條件與最終用途而異，一般可分為自然通風，常溫強制通風與加熱通風乾燥等三種。自然通風主要以玉米穗為對象，適合於氣候乾燥地區。美國廿餘年前甚多地區採用此方式，惟乾燥時間甚長，平均自收穫 25% 至 15% 約需 60~75 天。美國農家多兼養牛畜，故通常在未乾至 15% 前常會取出部份並與其他乾飼料混合供飼牲畜。此方式在適當條件配合下，可以節省大量能源。

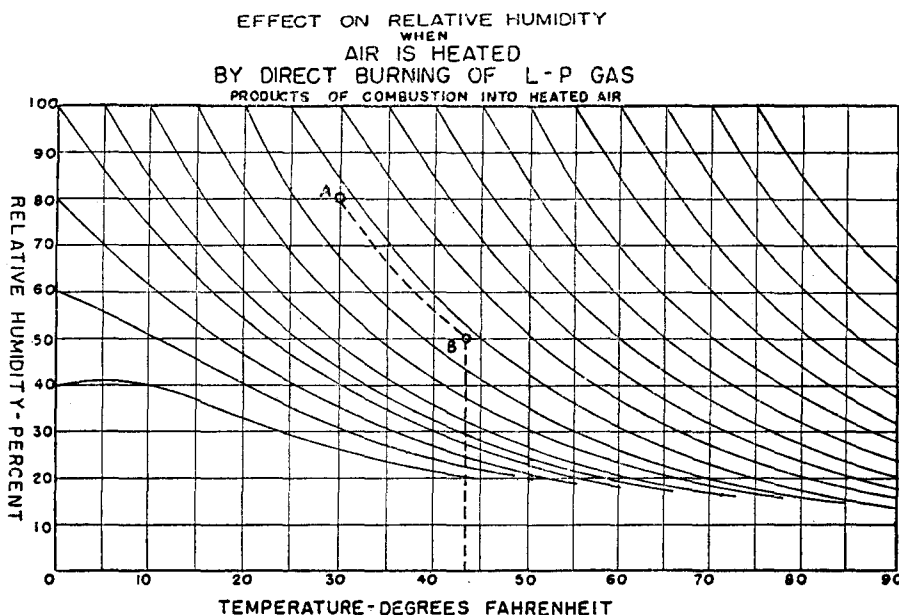
常溫強制通風為較普遍之一種乾燥方法，惟仍須視地域之氣象條件為之，必要時須輔助加熱，以加速乾燥過程。

加熱送風乾燥，普遍使用在玉米粒之乾燥方面。玉米穗方面亦採用之，但乾燥速率較慢。一般言，熱風溫度之極限依玉米之最終用途而定。若為飼料用途，溫度可達 82°C（或 180°F）；若為商業用途，最高為 54.5°C（130°F）；若作種子用，則最高不得超過 43.3°C（110°F），以防胚芽死亡或受熱傷。故不同用途所用溫度自亦不同。

熱風溫度除有上述最高界限之外，為防止近於熱風進口處穀物過於乾燥，亦應視外界之氣象條件

作適當調整。由於穀物之最終含水率受限於穀物本身之平衡含水率，後者又與大氣相對濕度有極大之相關性，故必須設法調定適當熱風溫度，以獲得正確之相對濕度，最後維持最終均一之穀物水分含量。

圖十七為簡易之決定溫度提高幅度之方法。設外氣相對濕度為80%，空氣溫度為30°F，欲得50%之相對濕度，其熱風溫度應提高至44°F。一般而言，熱風溫度每提高1°F，相對濕度約可降2%。



圖十七 熱風溫度與相對濕度關係圖

### 2. 玉米之平衡含水率

平衡含水率決定玉米在乾燥過程中之最終含水量，此項數值須由空氣中之溫度與相對濕度決定。謝拉氏 (Sharaf-Eldeen) 曾就玉米穗之平均平衡含水率進行試驗，並獲得如下之結果：

$$ME = 5.69 \times \left[ \frac{-\ln(1-RH)}{T_{abs}} \right]^{0.55} \dots\dots(12)$$

式中，ME 為玉米穗乾基含水率，RH 為相對濕度，以小數表示， $T_{abs}$  則為熱風之絕對溫度，以 °R 以表示。使用時，必須配合玉米粒與穗軸之重量合併計算。

玉米粒方面，平衡含水率之文獻較多，安得遜 (Handersen) 氏之修正公式可為代表：

$$ME = \left[ \frac{\ln(1-RH)}{-K(T+C)} \right]^{1/N} / 100 \dots\dots(13)$$

式中， $K = 8.6541 \times 10^{-5}$ ； $N = 1.8634$ ；

$$C = 49.810$$

### 3. 玉米通風阻力之計算：

空氣通過穀層，其所產生之阻力或壓力降可因穀層之厚度、密度而變化。玉米粒方面之壓力降可

由下式求得：

$$\Delta P = \frac{0.00065 \times Q_a^2}{\ln(1+0.156 \times Q_a)} \dots\dots(14)$$

式中  $\Delta P$  為每呎穀層所產生之風壓降（以吋水柱表示）， $Q_a$  為單位通氣面積之通風量，單位為  $\text{cfm}/\text{ft}^2$ 。

玉米穗則依收穫後之清潔度而有不同，在去苞甚為乾淨，含水率約在16%之場合，其阻力如下式：

$$Q_a = 276.266 \Delta P^{0.5022633} \dots\dots(15)$$

若玉米穗剛收穫，未經清理，水分約在20%時，阻力公式如下：

$$Q_a = 124.8039963 \Delta P^{0.550806867} \text{ 當 } Q_a > 20 \text{ cfm}/\text{ft}^2 \\ = 162.8927307 \Delta P^{0.630929754} \text{ 當 } Q_a \leq 20 \text{ cfm}/\text{ft}^2 \dots\dots(16)$$

### 4. 穀層厚度與風量：

穀層厚度直接影響風道之阻力與風量之分佈。在玉米穗乾燥方面，若採用多孔底板，高度應在1.2米以上，有時厚度可達3米，使風力分佈更為平均。玉米粒堆放時，高度至少在40公分以上。

風量大小依玉米粒之初期水分與所要求之乾燥速率而定。在玉米穗方面，如為常溫乾燥，最低風量每英斗勿小於5cfm（或每公噸乾物6.6 CMM）。大風量之使用雖無限制，但求經濟原則，約在20 cfm/bu（26.4 CMM/公噸乾物）以下。表一所示為玉米穗在不同乾燥高度與風量、風壓間之關係，黑粗線內為一般使用之情況。其中英斗之量仍以能產生玉米粒乾物47.32磅為基準。

為求風量平均，玉米穗入倉前應去苞乾淨，且入倉時，應將已脫粒之玉米粒，苞葉、殘渣等分佈

均勻。不論利用分配器、或挪動進倉口等方式，最好能盡量將這些雜物往外緣分佈。

利用常溫通風乾燥時，風機應在穗入倉後儘早起動，不論外界氣候如何連續通風，直到玉米粒水分降至20%為止。以後之乾燥則需視外氣條件而定。相對濕度低於75%，應可啟動送風，或利用輔熱系統，設法降低至75%以下。在正常狀況下，玉米穗乾至18~20%約需10日左右，雨期增多時，則必影響乾燥時間。

表一 玉米穗在不同厚度與風量率下之靜壓值

玉米穗厚度,呎	風 壓 , 吋 水 柱			
	5 CFM /英斗	8 CFM /英斗	10 CFM /英斗	15 CFM /英斗
4	0.30	0.35	0.40	0.45
6	0.40	0.45	0.55	0.85
8	0.50	0.70	0.90	1.70
10	0.60	1.05	1.55	2.85
12	0.85	1.60	2.40	5.05
14	1.25	2.35	3.50	7.25
16	1.55	3.45	5.05	10.50
18	2.05	4.80	7.45	
20	2.85	6.25	9.85	

上述數據已另加0.25吋為管口損失。

事實上，在良好的天氣中，若玉米穗已乾至20%，即可留在籠倉中行自然通風乾燥。玉米穗會自然乾至安全範圍。

加熱乾燥方式應可加快乾燥速率十倍以上。所用之風量最少不得低於7cfm/bu（或9.2 CMM/ton）。習慣上，實際使用之風量常高於此值甚多。燃燒機之性能通常在加溫幅度高於常溫30°C以上時較為理想。熱效率方面也以一批處理800英斗以上之容量時為佳。表一所示為不同厚度與風量率下之靜壓值。

乾燥期間，空氣進口處附近之穀層水分會下降特別厲害。正常情況下，當排氣口附近穀物水分達20%時，進口處水分已降至8~10%。若在籠倉內

乾燥，達成上述情況時應即可停止乾燥，直接貯藏。若在密閉倉內，則上層需乾至18%後方可停機。若玉米乾完後立即脫粒出售，則需俟平均含水率達到13.0%時方可停機。停機後一日間內進行脫粒，脫粒時應設法上下層均勻混合。

乾燥時間通常可由所用之燃料量進行估計。只要知道燃料消耗的數量，即可大概瞭解穀層水分乾燥之程度。

燃油的消耗量則由所需蒸發之水分量估計而得，一般燃燒機燃燒每公升柴油約可蒸發6.6公斤的水。穀物中欲蒸發之水分可由圖四之程式或由表二中獲得。

表二 玉米穗中不同粒水分下各成分之重量。

玉米穗中之水分分佈

粒水分 (%)	英 斗 玉 米 穗 內 之 水 分		
	玉米粒重, 磅	軸心重, 磅	總重, 磅
35.....	25.5	12.4	37.9
30.....	20.3	9.9	30.2
28.....	18.4	8.8	27.2
26.....	16.6	7.8	24.4
24.....	14.9	6.7	21.6
22.....	13.3	5.5	18.8
20.....	11.8	4.4	16.2
18.....	10.4	3.2	13.6
16.....	9.0	2.1	11.1
14.....	7.7	1.4	9.1
12.....	6.5	0.9	7.4
10.....	5.3	0.5	5.8

一英斗玉米穗為產生15.5%粒水分之玉米粒重56磅之量

### 七、試驗分析

此次試驗分兩地進行，各使用不同廠牌之箱式乾燥機。總計重覆試驗十八次，其中10次屬三久牌A型兩坪式箱型。另五次則以大發牌貨櫃烤菸機（B型）進行試驗，其餘三次為循環式機型（C型）。

試驗之基本構想是，將濕玉米穗自30~35%水分乾至20%，取出脫粒後再放回原機乾至13%粒水分，其中有部份則移至循環式乾燥機乾燥。另有一次係將濕穗直接乾至13%後再行脫粒。

在十八次試驗中，有九次作粒乾試驗。各項試驗之結果如表三所示。在穗乾部份，平均每小時約可乾減 0.36~0.40%，基本上與所用之熱風溫度有密切的關係。A型機之溫度操作以低溫為主，惟初期數小時仍以 70~80°C 之高溫。對於飼料品質言，此種溫度相當適合，惟高溫過久或末期採取高溫時，底層一小部份之胴裂增高。以第四次試驗為例，其增加率達33%。雖說胴裂高低與將來脫粒後，加工處理期間所產生之破損關係尚無正確的結論，但一般認為，胴裂率高時對未來破損率有正面的影響。由試驗結果可知，在穗乾部份之胴裂情形並不厲害，主要是玉米穗僅乾至20%左右即行脫粒。在此期間，胴裂現象較少。粒乾部份之胴裂情形則不然，由第八至十二之試驗結果得知，脫粒機所造成

之損傷情形遠比穗乾部份嚴重，而粒乾部份更加速胴裂之發生。事實上，胴裂均在穀物甚乾期間發生，故粒乾期間最易導致其胴裂。

玉米脫粒後之乾燥速率加快，正如前文所討論，當玉米粒與軸心連接時，胚芽部位與水分最高之軸心相連，水分無從發散，故乾燥速率減緩。一旦脫粒後，胚芽部份暴露於熱氣中，乾燥轉速。就本試驗（第八至十三）中之乾燥速率看，平均每小時可達 0.66%，若採用循環型進行粒乾，則效果更佳，平均每小時在 0.7% 以上。

由於兩種機型之設計與絕熱程度之不同，其耗油量亦有相當大之差異。為求公平比較，以第十七項之耗油量率為基準。其定義為每噸（乾至13%水分時之粒重）每降低1%（W.B.）粒水分所需之油量。表四係針對此項資料之比較結果。

大體言，粒乾雖然處於低水分階段，但其耗油量率約僅為穗乾之半。故採用粒乾方式比穗乾省油。惟循環型乾燥機雖能加快乾燥速率，並未見得比箱式乾燥機省油，此應與其殼層較薄（僅 12 公分厚）有關。厚層乾燥在省油方向上應有其自然之優點，惟在水分均勻程度上，則比循環型者差。

由表四之資料知，A型機與B型機在耗油方面是有相當大之差異。穗乾作業上，每一噸每降低1%所使用之油量，三久約多耗 1.32 公斤；粒乾作業則多耗 0.775 公斤。最主要原因歸納如下：

1. B型機係烤菸機改裝而成，其絕熱性能相當良好。A型機僅有厚約 0.6mm 鐵板鑄成，火爐、風管部份未經裝飾任何絕熱層，故熱損失比例高。

2. B型機具有熱能回收裝置，這在乾燥末期時段，效果較佳。

3. B型機比A型機每批乾燥數量較多，能源統籌運用上亦因而較為節省。

4. A型機試驗時所用之熱風溫度較低，時間較長。

在乾燥成本方面，若以每公斤玉米粒自35%乾至13%計算，穗乾作業約需 1 元左右。粒乾作業則需 0.5 元。循環型乾燥機處理的話，每公斤平均要在 0.634 元左右之成本（上述不包括用電成本）。仍然相當高。兩個廠型比較，A型機所需之乾燥成

表三 玉 米 乾 燥 試 驗 報 告

73年 2 月

項目	批數		1 (穗)	2 (穗)	3 (穗)	4 (穗)	5 (穗)	6 (穗)
	1	試驗日期		2月23日~25日	2月27日~29日	3月2日~4日	3月15日~16日	3月20~21日
2	試驗地點		三 久	三 久	三 久	三 久	三 久	三 久
3	玉米品種		臺南 5 號	臺南 5 號	臺南 5 號	臺南 5 號	臺南 5 號	臺南 5 號
4	農友姓名		楊 萬 寶	李 文 波	李 連 對	—		
5	農機廠牌		三 久 牌	三 久 牌	三 久 牌	三 久 牌	三 久 牌	三 久 牌
6	機 型		A 型 (2坪)	A 型	雙 向 作 業 A 型	A 型	箱 A 型	箱 A 型
8	穀 重 (KG)	乾前	4,749	5500	5380.5	3287.3	3625.5	3217.9
		乾後	粒軸 2416 816	粒軸 3373.7 760.3	粒軸 3082.2 739.2	粒軸 2128.5 631.5	粒軸 2306.9 507.0	粒 1812
9	穀層厚度(cm)		145	157	153	100	100	100
10	水 分 MCWB %	前	33.1	30.75	30.42	29.63	31.47	33.6
		終	20.1	20.51	19.0	22.11	21.0	19.34
11	熱風溫度°C		32-48°C	60°C	45-80°C	80°C~65°C	50~80°C	50~80°C
12	總乾燥時間, 小時		34	25.5	36	20.5	27.25	48
13	減乾率, %/H		0.383	0.402	0.317	0.367	0.384	0.297
14	胴裂增加率		—	—	1%	33.26%	13.6%	7.6%
15	燃油種類		柴	柴 油	柴 油	柴 油	柴 油	柴 油
16	耗油量, KG		169.9	145.6	161.2	50.15	76.95	90.55
17	耗油率, KG/T-%		5.89	4.613	4.919	3.50	3.51	3.78
18	耗電量, KWH		29.3					
19	乾燥成本 元/KG		1.814	1.421	1.515	1.078	1.081	1.164
20	乾燥均勻度%		—	20.5±1.34 1.99		上 21.44 下 22.78	上 22.12 下 19.92	上 19.54 下 19.14
21	脫 粒 率		74.8	81.6%	80.7%	77.1%	82.0%	—
	13%時粒重		2218.8KG	3082.5	2869.6	1905.6	2094.8	1680.0

表三 玉 米 乾 燥 試 驗 報 告 (續前)

項目		批數						
		7 (粒)	8 (粒)	9 (粒)	10 (粒)	11 (粒)	12 (粒)	
1	試驗日期	3月8日	3月1日	3月25日	3月28日	2月26日	3月7日	
2	試驗地點	霧峰	霧峰	霧峰	霧峰	霧峰	霧峰	
3	玉米品種	臺南5號	臺南5號	臺南5號	臺南5號	臺南5號	臺南5號	
4	農友姓名	李文波	李文波			楊萬寶	李連對	
5	農機廠牌	三久牌	三久牌	三久牌	三久牌	三久牌	三久牌	
6	機 型	箱A型	箱A型	箱A型	箱A型	循環型 C型	循環型 C型	
8	穀重 (KG)	乾前	655	3373.7	1812	2200	2416.5	3082.2
		乾後	569	3098.4	1680	1914	2320.0	3011.0
9	穀層厚度(cm)	17.5	66	38	38	12×4層	"	
10	水分 MCWB %	前	16.86	20.94	19.47	19.41	15.68	18.77
		終	13.22	13.56	12.96	12.51	13.05	13.49
11	熱風溫度°C	40~45°C	43~56°C	35~33°C	36~32°C	50~58°C	48~55°C	
12	總乾燥時間,小時	3.8	13.75	13.5	10.25	3	6.67	
13	減乾率, %/H	0.96	0.54	0.48	0.673	0.877	0.792	
14	(初期) 胴裂增加率	—	(23.54%) 25.7%	(13.2%) 11.4%	(15.8%) 23.2%	(28.93%) 28.07%	(24.3%) 2.8%	
15	燃油種類	煤油	煤油	高級柴油	高級柴油	柴油	柴油	
16	耗油量, KG	9.58	50.6	17.05	16.1	15.20	26.3	
17	耗油率, KG/T-%	4.637	2.23	1.56	1.212	2.493	1.664	
18	耗電量, KWH	1.78	11.16			6.3	14.0	
19	乾燥成本 元/KG	1.428	0.687	0.481	0.373	0.768	0.513	
20	乾燥均勻度%			上12.8 中13.1 下13.0				
21	13%時粒重	567.6	3078.5	1680.7	1924.8	1½ HP 2318.7	2994.0	

表三 玉米乾燥試驗報告 (續前)

項目	批數		13 (粒)	14 (穗)	15 (穗)	16 (穗)	17 (粒)	18 (粒)
	1	試驗日期	3月18日	2月25日~26日	3月16日~18日	3月19日~22日	3月18日~19日	3月22日~23日
2	試驗地點	霧峰	臺中縣	臺中縣	臺中縣	臺中縣	臺中縣	
3	玉米品種	臺南5號	臺農育351	臺南6號	臺南6號	臺南6號	臺南6號	
4	農友姓名		林炳煌					
5	農機廠牌	三久牌	大發牌	大發牌	大發牌	大發牌	大發牌	
6	機型	循環式C型	6坪貨櫃式B型	貨櫃式雙向B型	貨櫃式雙向B型	貨櫃式雙向B型	貨櫃式雙向B型	
8	穀重 (KG)	乾前	4512.5	5580	8100	9780	4240	4609.8
		乾後	4134	粒 3100	粒 4240 軸 1534	粒 4609.8 軸 1829.2	3919	4369.0
9	穀層厚度(cm)	12×4層	70	75	95			
10	水分 MCWB %	前	19.2	28.14	35.8	37.6	19.6%	17.8
		終	13.32	13.50	18.8	15.7	12.3%	11.6
11	熱風溫度°C	52°C	70°C	47~57°C	38~46°C	33~51°C	34~42°C	
12	總乾燥時間, 小時	14	27	45	68	21.2	15.9	
13	減乾率, %/H	0.42	0.542	0.378	0.322	0.344	0.390	
14	(初期胴裂) 胴裂增加率	(38.4%) 12.6%	—	—	(0.2%) 7%	(8.4%) 8.6%	(16%) 5.8%	
15	燃油種類	高級柴油	高級柴油	高級柴油	高級柴油	高級柴油	高級柴油	
16	耗油量, KG	48.8	173.3	168.3	274.2	42.9	40.7	
17	耗油率, KG/T-%	2.02	3.84	2.50	2.80	1.488	1.479	
18	耗電量, KWH	33.6	67	91.5	119.5	41.6	32.3	
19	乾燥成本 元/KG	0.622	1.183	0.77	0.862	0.458	0.456	
20	乾燥均勻度%	1.33±0.2	13.3% 13.7%	18.8 +3.6 -6.4	15.7 +10.1 -6.1	12.3 +5.3 -2.4	11.6 +2.6 -1.4	
21	脫粒率 %			73.4%	71.6%			
	13%時粒重	4118.8	3082	3957.3	4466.7	3950.5	4439.3	



表四 各型乾燥機之耗油量率統計比較

項目	廠牌	重覆次數	KG/Ton-%**	成本元/Kg*
穗乾	A型	6	4.369±0.867	1.345
"	B型	3	3.047±0.574	0.938
粒乾	A型	7	2.259±1.049	0.696
"	B型	2	1.484±0.005	0.457

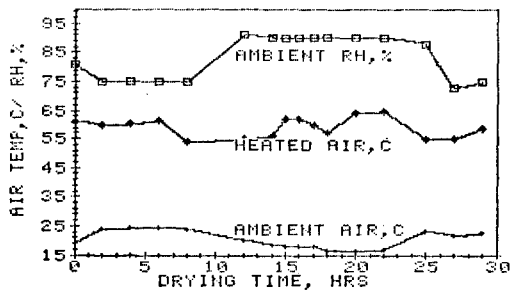
\* 以粒水分35%乾至13%時為準

\*\* 玉米粒重量以最終13%時之單位重為基準。

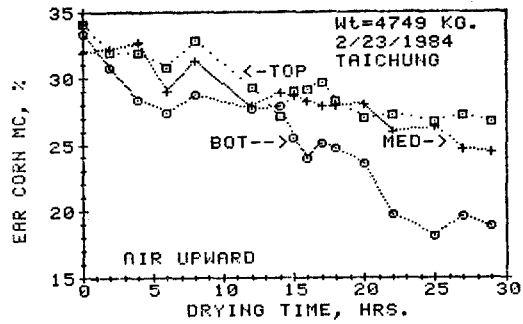
本約高兩角錢以上。惟若計及電費，由於前者僅1馬力，後者為兩馬力，但容量後者約為前者兩倍，故電費成本相去不遠，所佔之比率亦低。以第一次試驗為例，A型機每噸每%約需1度電，合算每公斤約為0.067元，僅及總乾燥成本之3.7%。以第十五次試驗為例，B型機每噸每%需1.35度電，每公斤用電成本為0.089元，約佔總成本之10.4%。

脫粒率為玉米穗脫粒後，得實粒之比值。此項比例與品種、乾燥程度有密切關係。水分含量在20%左右脫粒時，實脫粒率約在80%左右。若乾至18%或15%以下，其脫粒率約為72%左右。此項結果與圖三所顯示之關係略有不符，可能與品種有很大之關係。

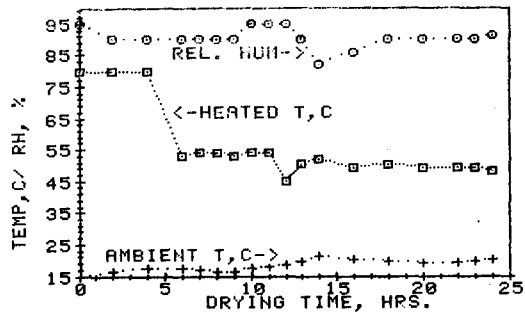
就個別試驗之溫度與水分層次之變化言，如圖十八與圖十九所示之第一次試驗結果。此次為連續單向通風，故底層穗軸乾燥快速，與上層在乾燥終了期間相差在5%以上。所使用之溫度則控制在60°C左右。圖廿與圖廿一為第六次試驗之情形，溫度最初控制在80°C左右，四小時以後降為50°C乾燥。此次試驗最大不同點是行上下改變通風方式，平均7~8小時反向乙次。最後上下層之水分相當接近。



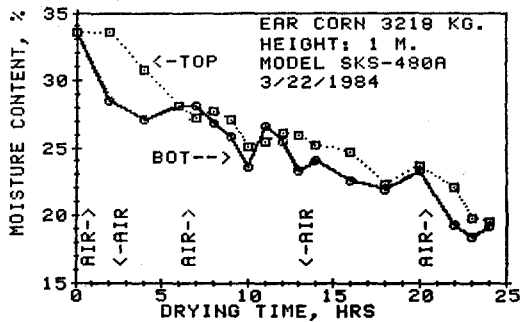
圖十八 A型箱型玉米乾燥機第1次試驗時外界溫度變化情形 (73年2月23日)



圖十九 A型玉米穗乾燥機之乾燥結果 (連續單向通風) —— 第一次試驗

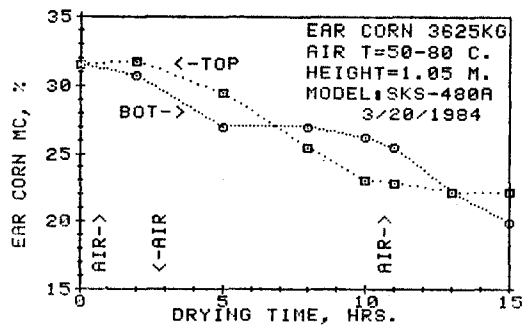


圖廿 A型機第六次試驗熱風溫度之變動情形

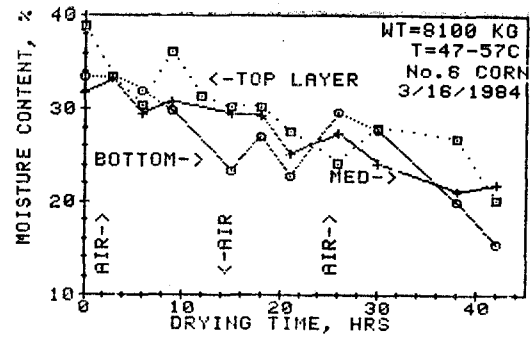


圖廿一 A型機第六次試驗，上下層玉米穗水分之變化情形

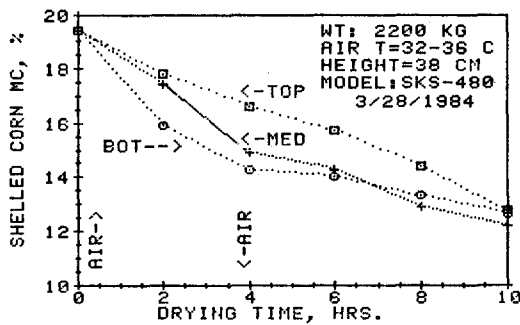
圖廿二與圖廿三分別為第五次與第十次試驗之結果，兩者一為穗乾，一為粒乾，但屬同批次。圖廿二中很明顯可以看出上、下層穗水分因反覆風向所產生之交替效果。圖廿三中之粒乾作業使用之溫度僅及32°C，反覆風向僅及兩次，但仍可看出上、中、下三層水分趨於一致的情形，與第一次試驗（圖十九）之結果有很大之不同。



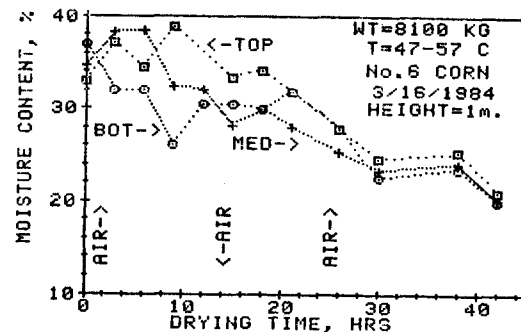
圖廿二 A型機第五次試驗之玉米穗水分變化情形



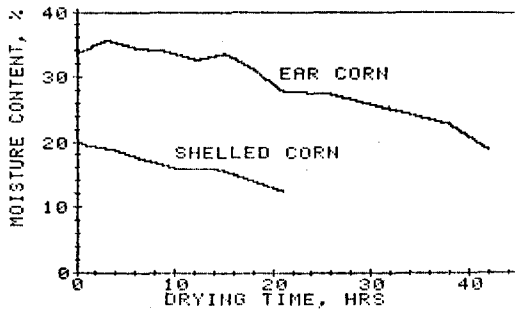
圖廿六 B型機穗乾作業，倉面遠離風機點處之各層水分變化



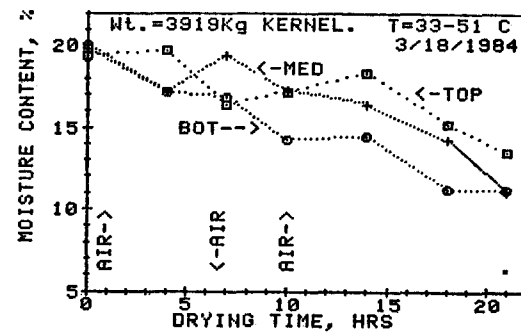
圖廿三 A型機第十次粒乾作業之粒水分變化情形



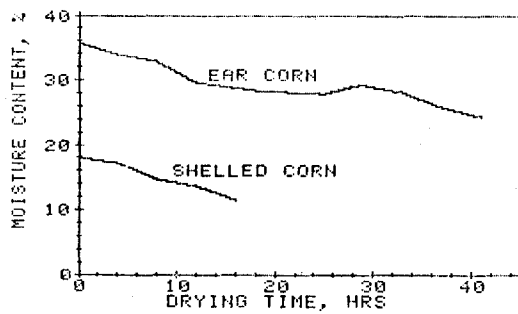
圖廿七 B型機穗乾作業倉面中心點處各層水分變化



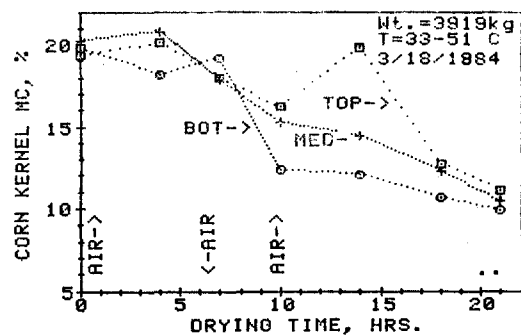
圖廿四 B型機玉米穗與玉米粒第一批乾燥結果 (73年3月16日) — 第十五與十七次試驗結果。



圖廿八 B型機粒乾作業，倉面遠離風機點處之各層水分變化



圖廿五 B型機第二批玉米乾燥結果 (73年3月20日) — 第十六與十八次試驗結果



圖廿九 B型機粒乾作業，倉面中心點處各層之水分變化

B型機試驗中，第十五次穗乾與第十七次粒乾屬同批次(圖廿四)；第十六與十八為另一批次(圖廿五)。兩者採用之溫度平均分別在50°C與45°C範圍內。乾燥速率顯然以圖廿四所示者快得多。由於此型底面積達六坪，均勻度甚為重要。圖廿六為第十五次穗乾作業時，倉面離爐具最遠點之水分變化情形；圖廿七為倉面中心點之上中下各層水分變化情形。由於施行上下交換風向的方法，故水分變化甚劇。交換時間為12小時一次。由兩圖比較可知倉面中心點水分變化容易趨於一致，愈遠，其水分上下層次之差距愈大，此可能由於其風速分佈不均，以及倉面過大均有密切關係。

圖廿八與圖廿九所示為上述相同位置而行粒乾作業(第十七次試驗)之結果。其最終水分之差異仍以中心點處為最小。

## 八、結 論

玉米穗之乾燥，在國內屬初次試驗階段。目前農民採行之方法仍以鋪地晒乾之方式為主，雖符合能源節約原則，但操作頗費人工。

在美國，玉米穗之處理向採自然通風或低溫乾燥方式，以節省能源。雖然其氣候條件比國內情形為佳，惟其實施方式仍有值得吾人借鏡之處。

玉米穗乾作業最大特點是乾燥速率遲緩，無法快速乾燥。依國外之經驗，在良好之氣象條件下，每批均得花費一星期至半個月以上之時間，方能完成乾燥。為此，農民常把乾燥與儲藏問題合併處理。國內農民種植玉米之目的均以立即求現為主，倉儲問題很少考慮。因此作業上力求乾燥快速，却因而增加成本。

此次利用兩種不同型式乾燥機試驗結果：熱風在50°C以上時，玉米粒之平均乾減率約在每小時0.7%以內。粒乾之方式因此比穗乾作業快速。在乾燥成本方面，每公斤、玉米粒自35%乾至13%約需0.63元；穗乾時約需1.25元，相差達一倍。

目前本省玉米收穫時，水分太高，無法即行脫

粒，否則損傷頗大。若先行穗乾至20%方行脫粒，並繼續粒乾至13%，則此時每斤之乾燥成本為1.05元左右。若採用循環乾燥後半段，則總成本為1.18元。綜合上項因素，採用穗乾作業直到13%再行脫粒，仍不失為可行之方法。

在機械性能方面，雙向通風方式仍為必走之途徑，以求乾燥均勻。能源之節省方面，則需設法予以絕熱，使熱能損失能減至最低。

## 九、誌 謝

本研究係依農發會七十三年農機化(化)計畫進行，並蒙農林廳陳銓燦股長、林明仁先生以及大發工業樹脂公司與三久工業股份有限公司之協助，謹誌謝意。

## 十、參 考 資 料

1. Brooker, D.B & Bakker-Arkema F.W. Drying Cereal Grains. The AVI Publishing Company, Inc. 1981
2. Aerovent Crop Drying Systems Aerovent fan & Equipment, Inc. Lansing, MI. 1958
3. Agricultural Research Service. U. S. D. A. Proceedings of Conference on Field Shelling and Drying of Corn Chicago, Illinois, May 17 and 18 1956
4. Quick G. R. and Buchele, W. F. A Symposium on Grain Damage at ISU. April 17&18, 1968.
5. Behlen Manufacturing Co., Modern grain conditioning Second edition
6. Duffee, F.W. Drying Seed Corn with Electricity Agricultural Engineering Vol 18(4): 149-151, 1937
7. Holman L.E. and Carter, D.G. Corn and Grain Conditioning with or without Heat Agricultural Engineering September, 1947
8. ASAE Agricultural Engineers Yearbook p. 311-312 1982-1983