

稻殼燃燒爐之設計與性能試驗

Design and Tests of Rice Hull Furnaces

臺大農工系客座副教授

臺大農工系研究助理

李 廣 武

楊 志 成

K. W. Lee, Ph. D.

C. C. Yang, M. S.

Summary

This research involved the design and manufacture of two types of rice-hull furnace. One of them has over-feed stoker and heat exchanger, the other has under-feed stoker without heat exchanger. It was found that the under-feed furnace burned husks more completely than the over-feed type furnace.

Heat exchanger can avoid smoke and dust in the hot air, but reduce the thermal efficiency to 38-40%. If heat exchanger is removed from the furnace, its thermal efficiency can reach as high as 85%.

The dust size removed from the hot air through cyclone was about 1/1473 to 5/92 in., there were still smaller dust remained in the hot air.

Temperature regulating device must be added to the furnace for drying agricultural products in order to avoid possible hazard to the grains dried.

一、緒 言

臺灣每年約生產糙米二百七十萬噸，年產稻殼即達五十萬噸以上，過去稻殼的種種用途已逐漸被更經濟簡單的方式所取代，因此目前各地農會碾米廠的稻殼堆積如山，無法處理，每年尚須付出大量經費僱工搬運丟棄，同時又因稻殼體積鬆散，所佔地方又多，更形成嚴重的環境污染問題，因此如何尋求利用稻殼的新方法，解決堆積成害的廢物，使其變為有用的材料，已成為一項刻不容緩的工作。目前臺灣許多研究機構，都在從事這方面的研究，但是大量的利用稻殼的方法仍無突破性的發展。

稻殼問題不只在臺灣才有，有些國家也有同樣的問題。例如以美國稻殼利用的情形來說，由

表1可知儘管利用方式不少，但仍有三分之一強的稻殼無法適當的利用。

表 1. 美國稻殼利用的情形

用 途	數 量 (千 噸)
飼料 (整顆或粉碎)	142
飼料 (胺化或其他化學處理)	58
飼料 (與其他農產品混合)	120
厩肥	94
過濾劑	18
糖醛及其他化學品	17
其他	32
灰的利用	39
無法利用的稻殼	300

稻殼利用的研究從 1871 年有文獻記錄開始，迄今已百年有餘，研究出來的成果以及利用的方式難以數計，利用方式雖多，但真正實際可用的並不多。究其原因，在於稻殼雖然可用，但在同一用途下，往往還有其他東西也可用，兩者之間即產生競爭，於是只有具備經濟、方便或其他有利因素者才能被採用。因此在尋求稻殼的新用途時，不能單純考慮技術問題，必須同時考慮其他因素，處理上亦應因時因地而有所不同。

二、稻殼粒子之物性及化性分析

1. 稻殼內含蛋白質，澱粉之化學分析：

本分析以加酸水解法檢定澱粉，以半微量 Kjeldahl 法檢定蛋白質。先篩取粒徑 0.5mm 以下的稻殼，分析其澱粉及蛋白質含量，然後再與未經篩選過的新鮮稻殼成分比較（表 2）。

表 2. 經篩選過的稻殼與未篩選前蛋白質及澱粉之含量

樣本	N (%)	蛋白質 (%)	澱粉 (%)	備註
1	0.407	2.542	17.19	未篩選
2	0.408	2.550	15.21	未篩選
3	0.424	2.650	14.13	未篩選
4	0.805	5.030	—	已篩選

篩選後的穀殼混合物所含蛋白質約為普通新鮮稻殼的兩倍。這是由於碾米過程不理想以致稻殼中尚摻有少量的碎粒米，若將這些碎米分離出來，將可減少許多無謂的損失。

2. 稻殼在不同溫度下燃燒時，其溫度與重量、體積之變化：

表 3. 在 300°C~500°C 間稻殼完全燃燒時，其體積重量的變化

溫度 °C	原重 gm	燃燒後重 gm	燃燒後體積 ml
300	8,6155	2,9864	36
300	8,4726	2,8728	36
400	8,6685	1,3151	25
400	8,9681	1,4140	27
500	8,5623	1,2851	24
500	7,5255	1,2532	25

溫度愈高，燃燒後重量及體積減少愈多，燃燒也愈完全。在溫度 500°C 時燃燒後灰燼密度為 $1.86 \times 10^{-3} \text{ lb/in}^3$ 。

三、稻殼爐之設計

1. 影響燃燒狀況之各種因素：

(1) 爐子容積負荷及爐篦負荷：

$$q_{rr} = \frac{Q}{A}, q_{rr} = \frac{Q}{V}$$

q_{rr} ：爐篦負荷

q_{rr} ：爐容積負荷

Q：單位時間內，爐子燃燒所產生的熱量

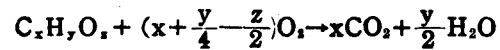
A：爐篦燃燒面積

V：爐容積

若爐容積不夠時，保養及耐久均較差，一般適當的容積負荷約為 35000 Btu/ft³-hr。

若爐篦負荷低時，灰燼及火星會減少，燃料溫度降低，流經爐篦的空氣速度減弱。一般爐篦負荷約在 113590 Btu/ft²-hr 左右。

(2) 完全燃燒所需之氧量或空氣量：



燃料完全燃燒時所需氧量或空氣量之理論最小值可由上式算出。大氣中通常含有 21% 之氧，將所得之氧量乘以係數 100/21 即得相當之空氣量，但以此理論量來實行燃燒，事實上不可能，常須有相當之過剩空氣 (excess air)，蓋因空氣或氧與燃料混合接觸時，各反應分子衝突之速度，遠較可燃物分子與氧分子燃燒反應速度為小，因此一部分空氣未能參與燃燒。若空氣量失之過大，則廢氣量增加，結果燃燒溫度降低，廢氣帶去之熱量亦增加。

下列公式表示實際所需空氣量，L，與理論所需空氣量，L_{min} 之關係：

$$\lambda = \frac{L}{L_{min}}$$

λ：過剩空氣率 (excess air coefficient)。

固體燃料之 λ 值在 1.5 至 2.0 之間。

(3) 加熱用燃燒設備：

固體燃料有以塊狀燃燒之火格子燃燒法 (grate firing) 及微粉燃燒法 (pulverized firing) 二種。

火格子燃燒法，一般由火格子之下部導入一次空氣，由火格子之上部或後方供給二次空氣使行燃燒。進料方法有上方進料及下方進料兩種，其燃燒過程在燃料層內之位置正相反。下方進料較易完全燃燒。

微粉燃燒法，一般以一次空氣使煤粉噴出，二

次空氣有由爐壁間隙導入者，亦有由燃燒器供給者。

因將稻殼碾為粉狀所需成本及動力較高。本研究係採用火格子燃燒法設計燃燒爐。

(4)燃料層厚度：

火格子燃燒法之下方進料方式，燃料層厚度與燃料粒子大小，及一次空氣量有關。如圖1所示粒子愈小，燃料層厚度要愈薄。

2. 稻殼燃燒後灰渣之處理：

稻殼燃燒後灰渣甚多，其煙味難聞。若將熱能直接應用或由煙囪排出時，這些煙灰、煙味均應加以處理。

煙塵收集方式很多，有集塵篩(screen-type)

，布濾器(cloth-filter)，濕洗器(wet-washing)，電集塵器(electric-precipitator)，旋風器(cyclone)等。其中集塵篩不耐高熱，濕洗器較貴，電集塵器操作成本高。以旋風煙塵收集器最為經濟。

旋風分離器係利用離心力將粒子由氣流切線方向射出，然後使兩者分開。旋風分離器的效率與其半徑成反比，即半徑愈小效率愈高，因此除非過濾的粒子其粒徑很大，一般都不採用單一個旋風分離器，而採用一系列並列的小型旋風分離器組合。

3. 稻殼爐之構造

本研究依不同的進料方式設計完成兩種稻殼爐，其構造分述如下。

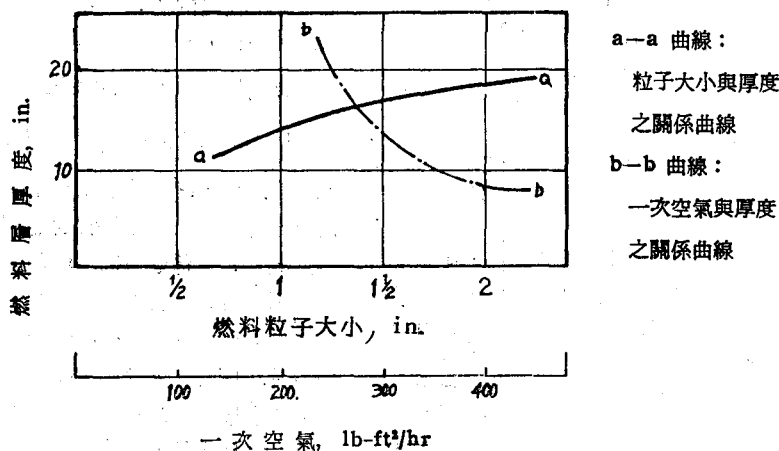


圖1. 燃料層厚度與燃料粒子大小及一次空氣間的關係

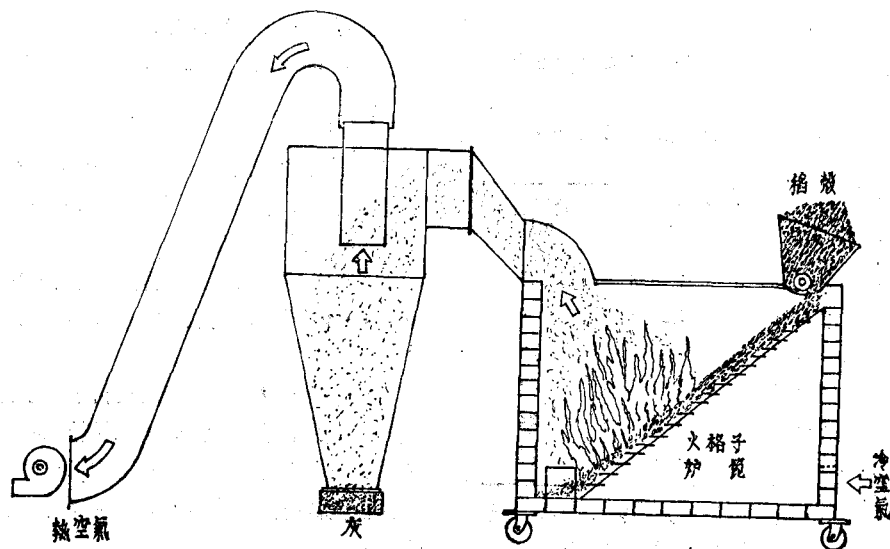


圖2. 上方進料式稻殼爐構造圖

(1)上方進料式：

為提高熱氣利用效率不採用熱交換器 (Heat Exchanger)，僅經過兩個並聯旋風分離器，將煙塵予以分離。火格子採可活動式，然後再以離心式抽風機將熱氣吸出 (圖 2，圖 3)，抽風機出口加活性炭過濾煙味，活性炭採用粗粒。

(2)下方進料式：

採用間接加熱方式，利用橫向式熱交換器。稻殼經由螺旋輸送器由爐底送入，被送入的稻殼逐漸被推往兩邊的鐵條火格子上，一面燃燒，一面往兩側掉落。如圖 4，圖 5 及圖 6 所示。

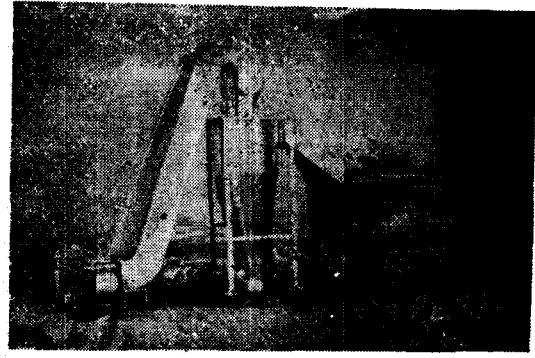


圖 3. 上方進料式稻殼爐

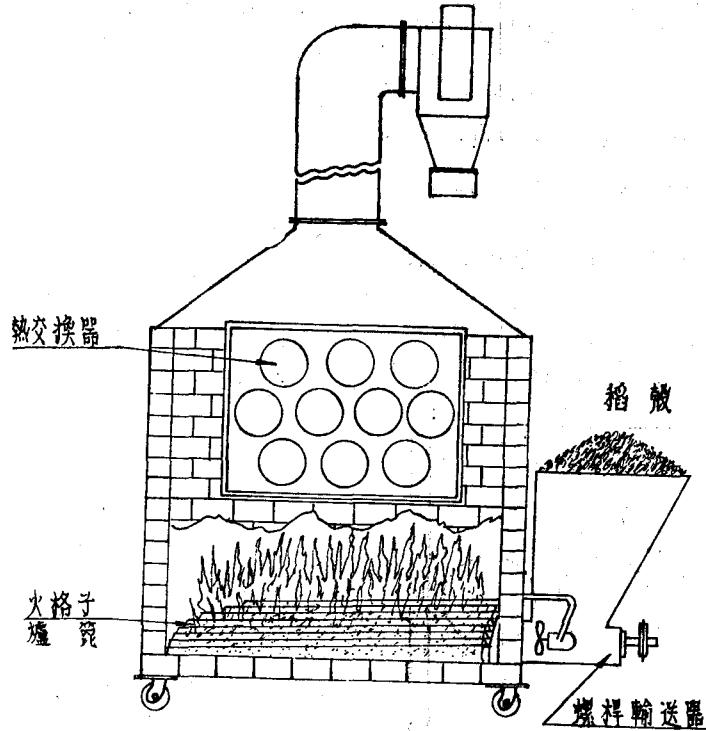


圖 4. 間接加熱式稻殼爐

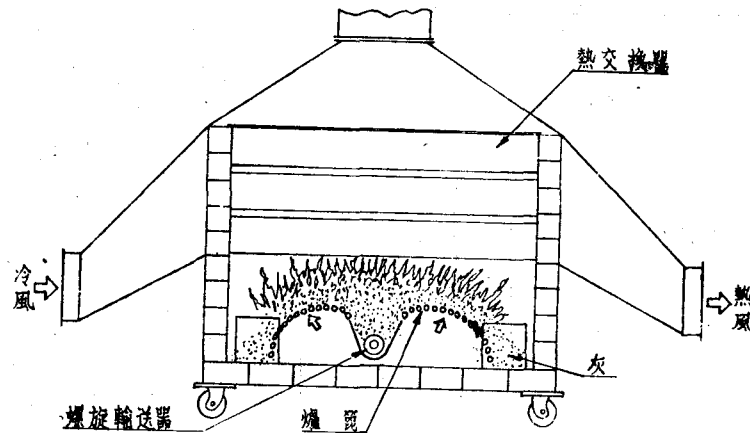


圖 5. 間接加熱式稻殼爐

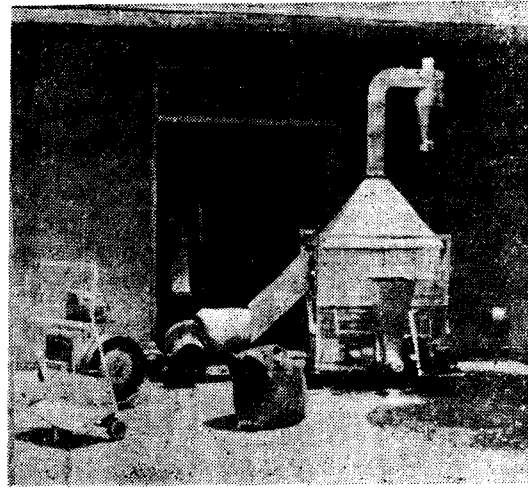
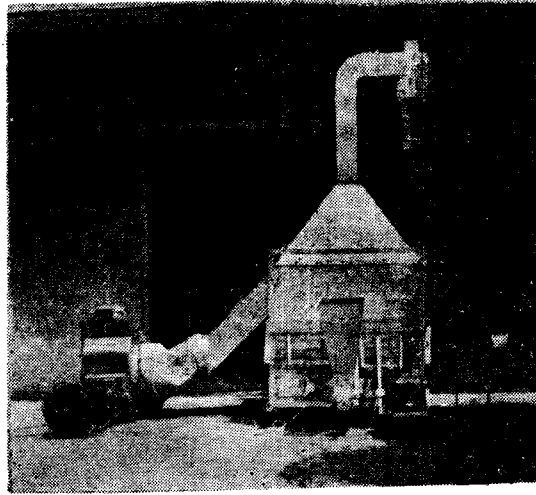
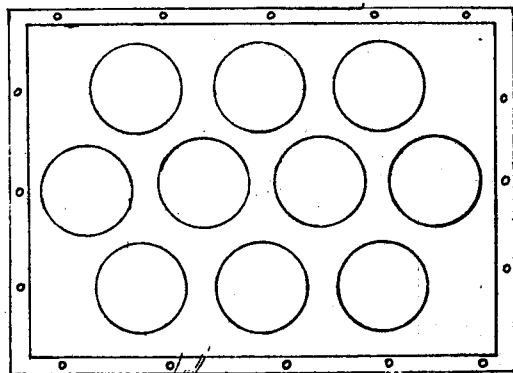


圖 6. 同一爐子採用不同風量之送風機，左為軸流式，右為離心式

熱交換器係委託有經驗廠家承造。其傳熱面積為 24547.6cm^2

通風管斷面積為 572.4cm^2 ，通風管進口斷面積為 572.5cm^2

交換器內通風管之排列及構造如圖 7，圖 8 所示。爐子的煙塵仍以旋風分離器處理。



管徑：9cm
間隙：2~2.5cm

圖 7. 交換器截面圖

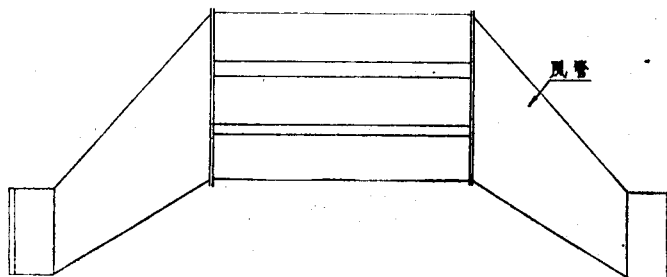


圖 8. 交換器正面圖

四、稻殼爐性能測定

1. 上方進料式

(1) 燃爐主體：

螺旋進料轉速	10 rpm
稻殼進料量	30 kg/hr (66 lb/hr)
爐子容積	12.9 ft ³
爐篦面積	8.6 ft ²
燃燒面積	4.0 ft ²

燃燒狀況(1) 焰色 紅色，小部分藍色

(2) 灰燼 黑色，密度 0.0030 lb/in³

容積負荷 30700 Btu/ft³-hr

爐篦負荷 46000 Btu/ft²-hr

(2) 抽風機：

規格：¼ Hp 及 ½ Hp 多翼式離心送風機各一台。

風量：¼ Hp : 880 ft³/min，氣溫 20°C

½ Hp : 1435.5 ft³/min

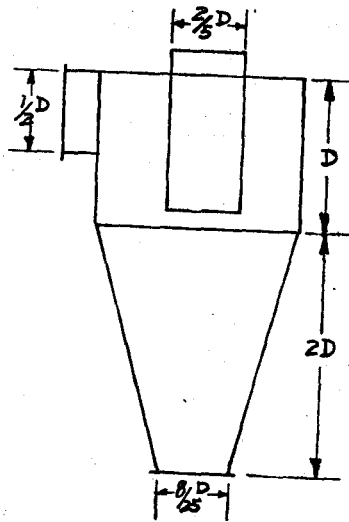
風溫：¼ Hp : 穩定 100°C，最大 130°C

½ Hp : 穩定 90°C，最大 110°C

煙味去除情形：吸出的熱風，含有濃厚煙味，其中包含 $\frac{1}{737}$ in ~ $\frac{3}{737}$ in 粒徑煙塵甚多，且有油份。試加活性炭層予以吸附煙味，但風壓驟降，且排出的熱氣仍有煙味。

(3) 旋風分離器：上方進料式燃爐採接線入口兩個並列式，

尺寸：尺寸大小與被濾粒子大小有關，一般規格如圖 9 所示。



$D = 500 \text{ mm} = 1.65 \text{ ft}$

圖 9. 旋風分離器

過濾性能：燃燒半小時後取下旋風分離器底座承盆，將煙塵倒出，如圖 10 所示。其粒徑大小以雙眼實體顯微鏡檢視之。粒徑分佈由 $\frac{1}{1473} \text{ in}$ 至 $\frac{5}{92} \text{ in}$ ，以 $\frac{5}{368} \text{ in}$ 的粒徑佔多數。內容物包含殼灰，細磚屑及其他雜物。



圖 10. 取下旋風分離器承盆，將被過濾煙塵倒出

(4) 熱效率：

$$\text{熱效率 } \eta = \frac{Q_{\text{output}}}{Q_{\text{input}}}$$

$$Q_{\text{input}} = \text{每磅稻殼熱含量 } 6000 \text{ Btu/lb} \times \text{每小時進料量 } 66 \text{ lb/hr} = 396000 \text{ Btu/hr}$$

$$Q_{\text{output}} = \frac{1}{2} \text{ Hp 風機排出熱量} + \frac{1}{2} \text{ Hp 風機排出熱量 (風量, cfm} \times \text{提昇溫度, } ^\circ\text{F} \times 1.1 = \text{風機排出熱量)}$$

$$= (880 \text{ cfm} \times 144^\circ\text{F} \times 1.1) + (1435.5 \text{ cfm} \times 126^\circ\text{F} \times 1.1)$$

$$= 338349 \text{ Btu/hr}$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{output}}}{Q_{\text{input}}} \times 100 \% = 85 \%$$

2. 下方進料式：

(1) 爐子主體：

螺旋進料轉速 10 rpm

稻殼進料量 74.25 lb/hr

爐子容積 14.9 ft³

爐篦面積 4.0 ft²

燃燒狀況(1) 火焰 藍色，焰長，部份浮動

(2) 灰燼 黑色，密度 0.0022 lb/in³

煙塵排出過濾 $\frac{1}{737} \sim \frac{110}{737} \text{ in}$ 粒徑

燃料層厚度 3~5 in

助燃風扇風量 153.6 ft³/min

爐容積負荷 39900 Btu/ft³-hr

爐篦面積負荷 111375 Btu/ft²-hr

(2) 送風機：

規格：軸流式：口徑 19"，馬力 1 Hp

離心式：多翼式，馬力 1/2 Hp

風量：採用兩種不同型式的風機，測定熱交換器出口風量各為：

軸流式：792 cfm

離心式：950 cfm

風溫：軸流式：135°C

離心式：110°C

煙味去除情形：良好，熱氣出口無煙味或雜質。

(3) 旋風分離器：一般規格如圖 9 所示，各尺寸間均有相關關係。下方進料式煙囪部分因考慮負擔過重故稍加修改，不完全按照規定尺寸，如 D 係採用 30 公分，全部高度予以縮短為 60 公分，即 2D 部分縮短為 30 公分。

(4) 熱效率：

$$Q_{\text{input}} = 6000 \text{ Btu/lb} \times 74.25 \text{ lb/hr} = 445500 \text{ Btu/hr}$$

軸流式送風機：

$$Q_{\text{output}} = 792 \text{ cfm} \times 201.6^\circ\text{F} \times 1.1 = 175634 \text{ Btu/hr}$$

離心式送風機：

$$Q_{\text{output}} = 950 \text{ cfm} \times 162.0^\circ\text{F} \times 1.1 = 169290 \text{ Btu/hr}$$

熱效率：

$$\eta_1 = \frac{175634}{445500} \times 100 = 40 \% \text{ - 軸流式}$$

$$\eta_2 = \frac{169290}{445500} \times 100 = 38 \% \text{ - 離心式}$$

五、討 論

1. 爐子燃燒依焰色及燃燒後灰分比重可判斷其燃燒是否完全。上方進料式爐其焰色呈紅色，燃燒後灰燼密度為 0.00301 lb/in^3 ，與下方進料式爐之藍焰，灰燼密度 0.0022 lb/in^3 比較顯示其燃燒較不完全。又根據實驗，在 500°C 以下完全燃燒所得灰燼密度為 0.00186 lb/in^3 ，顯示這兩個爐子的燃燒並不完全。

2. 熱效率以旋風分離器直接連結式效率較高，雖然兩個爐子燃燒狀況並不完全相同，但直接式之熱效率可高達 85% ，顯示直接式較間接式效率高。直接式之熱效率雖高，但熱風的使用限制較多，因其內含有雜質，煙味，若使用間接式，則此情況可免除。

間接式熱交換器，內部設有渦流產生裝置，使流經熱管的空氣速度減慢，提高熱效率。本試驗採用兩種不同風機，軸流式風機風速較低，離心式風機經交換器後風速高，因此兩者熱效率會有不同，以軸流式的 40% 較高。但軸流式因風壓較離心式低，受到阻力後，會增加馬達負載。

3. 容積負荷及爐篦負荷：

一般適當容積負荷為 $35000 \text{ Btu/ft}^3\text{-hr}$ 。本試驗上方進料式爐其容積負荷為 $30700 \text{ Btu/ft}^3\text{-hr}$ ，下方進料式爐為 $39900 \text{ Btu/ft}^3\text{-hr}$ ，兩者與適當負荷之差分別為 4300 及 $4900 \text{ Btu/ft}^3\text{-hr}$ ，相差不大。但上方進料式在保養使用上較差，燃燒也差。

爐篦之適當負荷為 $114000 \text{ Btu/ft}^2\text{-hr}$ ，上方進料式為 $46000 \text{ Btu/ft}^2\text{-hr}$ ，下方進料式為 $111375 \text{ Btu/ft}^2\text{-hr}$ 。以下方進料式較為接近適當負荷，燃燒較佳。

4. 煙塵過濾情形：

直接式所產生熱氣包含大量小粒徑煙塵 ($\frac{1}{737} \sim \frac{3}{737} \text{ in}$)，且有油份，若使用在農產品的乾燥上須相當慎重。間接式的則無此現象，又因其上端煙囪裝有小型旋風分離器可過濾小粒子 ($\frac{1}{737} \sim \frac{110}{737} \text{ in}$)，對空氣污染減低。

5. 下方進料式因附有助燃風扇，由圖 1 粒子大小與燃料層厚度間之關係可知，本試驗所用稻穀粒子約 $\frac{1}{4} \text{ in}$ ，厚度約 $3 \sim 5 \text{ in}$ 頗為適當。

六、結 論 與 建 議

1. 上述兩個稻穀爐，若應用到農產品乾燥上，

以採用間接交換熱，下方進料式較佳，因其燃燒較完全，且送出來的熱風無煙味，煙油，不致影響品質。

2. 上述兩爐所產生的熱風，溫度甚高，若欲加以利用，須加一風溫減低裝置，才不致損害農產品。

3. 將間接式燃爐配合本省現在普遍使用的箱式乾燥機使用，可以節省油料，降低成本。

4. 爐子除以稻穀為燃料以外，尚可稍加改變，使適合落花生殼或廢竹篾等。

5. 將稻穀研磨成粉狀，可適合浮動燃燒，且利打包運輸，同時可再加工製成其他製品。

6. 稻穀經燃燒後灰渣甚多，清理費時，若能改為機器清理，將可省却人工。

7. 稻穀爐進料，若以人工進料，煙塵甚多，對人體不好，宜改為機器進料。

七、參 考 文 獻

1. 馬承九 熱工學 三民書局 64 年版
2. 斐德烈 最新機械工程圖表手冊徐氏基金會
3. 郭質良 塑合板 臺糖公司出版
4. 黃正雄、莊博雄 換熱器之設計 徐氏基金會
5. 實用化學工業全書 第四冊
6. 胺化農產品之製造及作為飼料肥料之應用 工業技術研究院聯工所 64 年
7. 化學工學便覽 改訂三版 日本化學工協會丸善株式會社
8. 倉田勇 燃油兼用燃燒裝置的試作 機械化農業 1976
9. 稻穀燃燒爐的開發研究 日本富士縣立技術短期大學研究報告 第六卷 (1973)
10. 稻穀燒却爐 日本全農建設部穀類共乾調製施設
11. Tatom, J. W., T. I. Chiang; H. Wirjosumarto Pyrolytic Conversion of Agricultural and Forestry Wastes to Alternate Energy Sources in Indonesia. (Economic Development Laboratory, Atlanta, Georgia, U. S. A.
12. Kahn, A. V., et al "Rice Machinery Development and Mechanization Research". IRRI, Philippines.
13. Norris, et al. Applied Thermodynamics. 3rd edition, 1955.
14. Johnson and Auth. Fuels and Combustion Handbook. 1st edition, 1951.
15. Perry. Chemical Engineering Handbook.
16. Gerzhoi A. D. and V. F. Samochetov. Grain Drying and Grain Driers.