中華農業研究（Jour. Agri. Res. China）39(4)：347～366（1990）

稻穀平衡相對濕度性質之研究[1]

陳加忠　賴建洲　曹之祖[2]

摘要：在此研究中以依序平衡相對濕度測定法量測稻穀於不同溫度下的平衡相對濕度與平衡含水率的關係。實驗中所用樣本經由55－60°C之熱風加以處理。實驗結果顯示三種 ERH 模式適用於去濕之物性。兩種模式適用於回潮之性質。在25°C和45°C時，遲滯現象並不顯著。含有四參數之 ERH 模式其對數據的適稱性並未顯著地高於含三參數的ERH模式。

關鍵詞：稻穀，平衡相對濕度模式

農產品平衡相對濕度(Equilibrium Relative Humidity, ERH)和平衡含水率(Equilibrium Moisture Content, EMC) 物性是農產加工作業研究設計上的重要影響因素。穀物在有關乾燥，貯存設備之設計必須先具備此物性資料。在特定溫度下 ERH 與 EMC 的關係曲線稱爲等溫水份線（sorption istherm）。

傳統上量測平衡相對濕度性質之方法以間接法爲主。此方法固定系統空間之相對溫度而量測平衡狀態時產品的含水率。飽和鹽溶液或不同濃度的酸液被用以產生標準的相對濕度環境。此方法簡易但受到許多限制，例如需要長時間平衡，高含水率樣本在未達平衡之前已腐敗。

爲了節省試驗所用時間，近年來直接測定法逐漸爲研究者採用。此方法是以容器裝置大量的樣本，在到達平衡狀態時，抽取樣本間隙之空氣以量取其平衡相對濕度相關值（如露點溫度，濕球溫度，水蒸氣壓…等）。但此技術受到相對濕度量測設備準確性的限制。上述兩種方法已有詳細之討論（Chen, 1989）。

近年來隨著電子技術的進步，相對濕度量測感應器的性能也日益改良。利用迴歸分析技術和良好電腦軟體的運算，相對濕度計的準確性可藉由適切迴歸校正方程式的建立而得到良好的改進（Chen, et al, 1989）。利用此方法可以使農產品平衡相對濕度的量測更爲準確，也使農產品ERH，EMC和溫度三者關係之建立更爲準確，快速。

在加工作業的設計和摸擬作業中，以簡單的數學模式代表農產品ERH，EMC，和溫度三者之關係十分重要，在衆多的模式中以包含三或四個參數的模式最常爲研究者採用，然而選擇模式適用性的比較標準並不一致。Chen（1988）曾比較評估四個包含三個參數的ERH模式在農產品物性之適用性，並用以修正研究者慣用的美國農工學會標準（ASAE, 1983）。此外，在許多乾燥和倉貯研究中所利用的ERH模式往往未曾考慮其原先模式數據之範圍，因而也未考慮外插時對模式適用性之影響，因此利用非線性迴歸技術所得模式之外插性能有其研究之必要。

在農產品的加工過程中，乾燥溫度對於平衡相對濕度的影響已有共同的結論，以牛肉乾(lgesias and Chirief, 1976)，玉米粒(Chen, 1988) 和花生（Hung, 1989）而言，在相同的相對濕度條件下，農產品乾燥的溫度愈高，其所能吸收的水份愈少。乾燥溫度對平衡相對濕度之影響程度則因作物

1. 臺灣省農業試驗所　研究報告 1541 號。本研究承蒙行政院國科會補助，謹此致謝。
2. 本所農機系副研究員，助理研究員，技士。

而異。

稻穀平衡相對濕度和平衡含水率在不同溫度下的關係已有許多研究，如美國Zuritz等氏（1979），澳州 Patranut 等氏（1979），日本 Kaneoka 等氏（1986）。本省稻穀在此物性之研究包含三個溫度（Chang, 1988）。在ERH的測定研究中因品種，所含成份，加工方式。和測量方法之不同，所得數據值也不盡相同，由於多數之研究方法以間接含水率測定法爲主。對於稻穀受不同乾燥溫度之影響並未加以討論。本省稻穀乾燥作業時所利用之熱風溫度範圍約於55－60°C，在此研究即以此相同溫度處理樣本，並以ERH直接測定法測定不同溫度下平衡相對濕度和平衡含水率之關係。其測定相對濕度之範圍包含10%以下與90%以上之數據。所得之數據以非線性迴歸技術比較不同ERH模式之適用性。所得的適用模式可利用於本省稻穀倉貯和乾燥作業。

理論探討

一、平衡相對濕度模式（ERH model）

爲表達在不同溫度時。平衡相對濕度與平衡含水之關係，已有許多模式被研究者提出利用。Van den Berg 與 Bruin 氏(1981)曾討論了七十七個模式。Chen(1988)檢查三十五組數據之後，發現美國農工學會所用標準修正 Henderson 式與 Chung-Pfost 式並不能適用所有農產品，修正 Halsey 式和修正 Oswin 式可適用於含高油和高蛋白質之作物。農工研究者經常利用的模式討論介紹如下：在以下的公式中 RH 代表相對濕度（小數點），M 爲含水率（%，乾基），T爲溫度（°C）。

1. Henderson 公式

此公式可說是最早被採用的公式，由 Henderson（1952）推導而得，其形式爲：

$$1-RH=Exp[-K'TM^n] \quad (1)$$

Henderson氏(1952)的推導過程中有些錯誤，已由Chang氏(1988)加以更正。在公式(1)K′, n爲常數。由於此方程式不能代表溫度的影響，因此在特定溫度時，此方程式常以如下形式表示：

$$1-RH=Exp[-KM^n] \quad (2)$$

2. 修正 Henderson 公式

Thompson 等氏（1968）爲表示溫度對於 ERH/EMC 性質之影響，對於 Henderson 式（公式(1)）中溫度項內增加一常數，其形式爲：

$$1-RH=Exp[-A(T+C)M^b] \quad (3)$$

在此式中，A與C值代表溫度的影響偏移（Shift），b 值則代表等溫水份線（isotherm）的形狀。

3. Day-Nelson 公式

由於 Henderson 式（公式(1)）中T並不能用以消除 K′與 n 值受溫度的影響。Day 與 Nelson 氏（1965）將T項省略，而將 K′與 n 兩數各以溫度的乘冪數（Power function）代表，新的公式包含四個參數：

$$1-RH=Exp[-aT^b, M^{c\cdot T^d}] \quad (4)$$

4. Kumar-Henderson 公式

在進行玉米軸，穗和粒之 ERH/EMC 性質研究時，Kumar 等氏（1978）將公式(2)之K和N值以溫度的線性函數代表，此新四參數公式爲：

$$1-RH=Exp[-(a+bT)M^{(c+dT)}] \quad (5)$$

5. Chung-Pfost 公式

在穀物吸濕過程中水份蒸發能量的研究中，Chung 與 Pfost 氏（1967）提出如下的公式：

$$RH=Exp[\frac{A}{RT}Exp(-BM)] \quad (6)$$

R爲氣體常數，此式如同公式(1)，公式中溫度項不能代表溫度對於A, B兩常數項的影響。爲使公式(6)有更大的適用性，Pfost 等氏 (1976) 增加一個新參數而將(6)式修正如下：

$$RH=Exp[\frac{-A}{(T+C)}Exp(-BM)] \quad (7)$$

6. Chen-Clayton 公式

爲了表達溫度對公式(6)中A, B兩值之影響，Chen 與 Clayton 將M值以溫度之乘冪函數表示，其新公式爲：

$$RH=Exp[-a\ T^{b}\ Exp(-C\ T^{d}\cdot M)] \quad (8)$$

7. Oswin 公式

爲表達 ERH/EMC 等溫水份線之曲線圖形，Oswin 氏 (1986) 提出此純數學公式：

$$M=K\left(\frac{RH}{1-RH}\right)^{N} \quad (9)$$

8. 修正 Oswin 公式

原先 Oswin 公式並未考慮K與N受到溫度的影響。因此 Chen (1988) 加以修正，K值表達爲溫度的線性函數，N則與溫度不相關，新的修正 Oswin 公式如下：

$$M=(A+BT)\left(\frac{RH}{1-RH}\right)^{N} \quad (10a)$$

$$或\ M=\frac{1}{\left(\frac{A+BT}{M}\right)^{c}+1},\ C=1/N \quad (10b)$$

9. Andrien-Oswin 公式

在研究小麥糊的等溫水份曲線時，Andrien 等氏 (1986) 將 Oswin 式之K與N值以溫度的線性函數代表，新公式爲：

$$M=(a+bT)\left(\frac{RH}{1-RH}\right)^{c+dT} \quad (11)$$

10. Halsey 公式

由多層水分子之概念，Halsey 氏 (1948) 推導之公式如下：

$$RH=Exp\left[\frac{A'}{RT}M^{-c}\right] \quad (12)$$

因爲 RT 項無法消除 A′ 與 C 項受溫度之影響，(12)式即被修正爲：

$$RH=Exp[-A\ M^{-c}] \quad (13)$$

11. 修正 Halsey 公式

爲表達溫度與 ERH/EMC 之關係，Iglesias 與 Chirite 氏 (1976) 分析公式(13)之 A 值。而認爲其爲溫度的指數函數。新的修正 Halsey 式表達如下：

$$RH=Exp[-Exp[A+BT]M^{-c}] \quad (14)$$

在比較玉米粒四組 ERH/EMC 數據之後，Pfost 等氏 (1976) 認爲含有四個參數之 ERH/EMC 模式其適用性並不一定優於含有三個參數的模式。修正 Henderson 式與新 Chung-Pfost 式被提出以代表十四種農產品之最佳模式，並被選爲 ASAE 標準。

二、模式合適性的比較

爲比較不同方程式對於相同數據之合適性 (fitting-agreement)，可利用於非線性迴歸的常用的判別標準介紹如下：

㈠定量標準

1. 決定係數，R^2

此值可代表公式用以說明反應值的比例。由於此值受許多因素影響，因此不能做爲良好的判別值（Myers , 1986, Helland, 1987）。

2. 估計值標準差（Standard Error of the Estimated Value, S. E.）。

S. E. 值可由殘差平方和除以自由度再加以開方而得。此值之重要意義在於此統計量與反應值有相同單位，而且可代表方程式之參數數目對於統計量之影響。

3. 平均相對離差百分比（Mean Relative Perceneage Deviation, P）

P值之計算如下：

$$P=\frac{100}{N}\sum\left|\frac{y-\hat{y}}{y}\right| \tag{15}$$

在此N爲數據數目，y爲量測值，$\hat{y}$爲方程式之預測值。雖然此值在統計原理無任何意義，但許多食品科學研究者採用此值以比較方程式之合適性（Boquet et al, 1978, Gencturk et al, 1986, Lomaaro et al, 1985）。

4. 誤差百分比平方總和之平方根

（Root Mean Square Percentage Error, RMS）

RMS值之計算式爲：

$$RMS=\left[\frac{1}{N}\sum\left(\frac{y-\hat{y}}{y}\right)^2\right]^{0.5}\cdot 100 \tag{16}$$

如同P值，此值亦無統計學上之意義，但也爲許多研究者採用（Weisser, 1985, Admrieu et al, 1986）。

㈡定性標準

對非線性迴歸的定性檢驗標準而言，繪製殘差值對預測值的分佈圖形是一種最爲有用的判別技術（Draper and Smith, 1981）。若方程式能合適的解釋數據，誤差之產生將爲任意分佈值，因此殘差圖呈現均衡的分佈關係。若方程式無法眞正的代表數據的分佈，殘差分佈將有一定的型態（Pattern）。

材料與方法

一、實驗材料

此研究中之稻穀樣本品種爲臺農67號。去濕 ERH 性質測定所用樣品以55—60°C之熱風乾燥至預設的含水率。回潮過程所需要之穀物則自極低之含水率加水調整至預設含水率。所有樣品都存置密封之塑膠容器內至少兩個月以使樣本本身因水份移轉而促使含水率成均勻狀態。爲避免樣本發霉變質，存有高含水率之樣本容器則貯存於 3 °C之冰櫃內。

二、相對濕度感應器

此試驗所用相對濕度量測器爲 VAISALA Humidity Transmitter HMD 30UB，其主要規格如下：

a. 感應元件：HUMICAP HI0062

b. 量測範圍：0—100% RH

c. 20%準確度：㊣2 %（0—90%），㊣3 %（90—100% RH）

d. 溫度影響：以廠商所附校正式加以修正。

此感應器經校正後建立校正方程式，所讀出值經校正方程式轉換之後準確度可到達 1 %以內，此

感應器之性能評估，詳細之校正方式和校正方程式之建立已由陳氏等完成（1990）。

三、稻穀平衡相對濕度之量測

此研究採用依序相對濕度測定法（Step-by-Step ERH measurement），此方法由 Chen （1988）研究開發而成，其主要方式如圖 1 和 2 所示，將已知固定含水率之標本置於樣本容器內，濕度感應元件置於樣本之間，元件之外有保護蓋以避免與穀粒接觸而損傷。整個容器形成一密閉系統。系統在達到平衡狀態時，農產品間隙內之空氣與穀物達到溫、濕度平衡，由感應元件所量測之空氣溫濕度即代表穀物之溫度與平衡相對濕度，樣本容器置於恆溫控制箱內，在到達第一設定溫度平衡狀態時，量測記錄此溫濕度讀出值，然後調整恆溫室至下一階段溫度。在第二階段設定溫度下達到平衡之後，記錄溫濕度而再調整至第三階段設定溫度。經由此依序調整和量測方式，可在短時間內量測大量之平衡相對濕度數據，所得讀出 ERH 值再由已建立之校正方程式轉換爲眞實值。恆溫箱之穩定性爲㊣0.1°C，又因感應元件在樣本容器內受穀物包圍且穀物本身爲熱傳之良好絕緣體，其溫度變化幅度更趨穩定，因此溫度之誤差可忽略。

此測定程序係自低溫調整至高溫。若進行自高溫調整至低溫之程序，在高含水率穀物具有高相對濕度之狀況下，由於穀物和間隙空氣熱傳係數之不同，因結露（Dew point）作用產生之水份容易滲入感應元件造成量測之嚴重誤差。

四、非線性迴歸運算

此研究中所得平衡相對濕度，平衡含水率，和溫度三者之數據以非線性迴歸技術估求其參數值和各種統計量。執行迴歸之軟體係以最小平方法和 Hartley 修正法（Hartely, 1961）爲理論依據選寫成 GW-BASIC 程式軟體。在此迴歸分析中，相對濕度爲應變值（Depentent Variables）而含水率與溫度爲獨立變數（Independent Variables）。在實驗量測過程中，含水率和溫度之數值其量

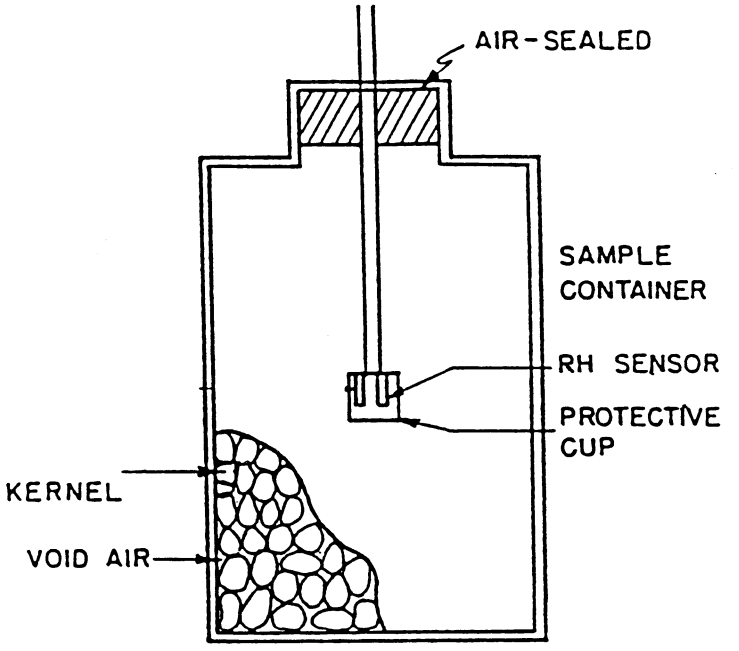


圖 1. 樣 本 容 器
Fig. 1. The sample container

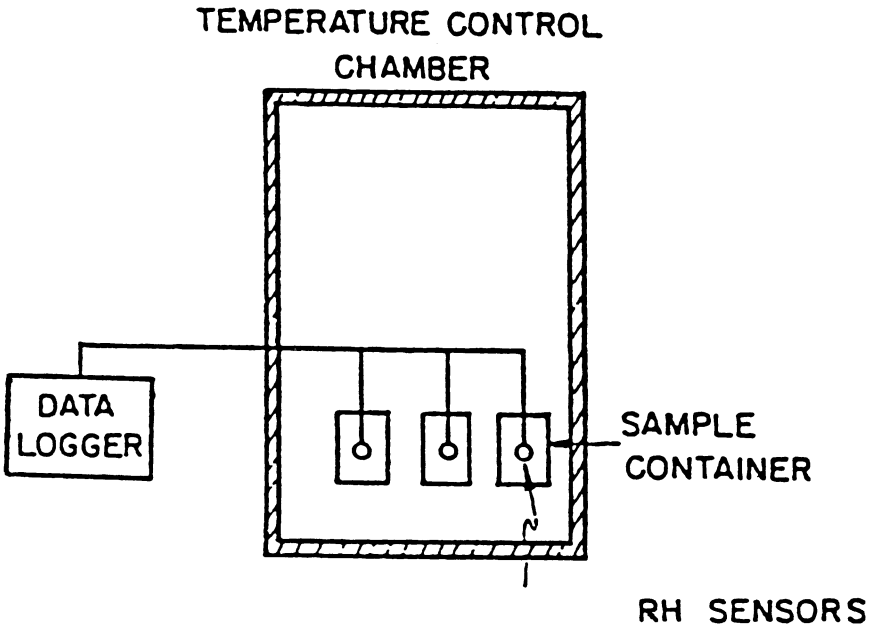


圖 2. 實 驗 裝 置
Fig. 2. The experimental set-up

測誤差極小，因此符合迴歸分析之假設條件。

五、平衡相對濕度模式合適性之評估

爲比較不同相對濕度模式對於稻穀 ERH/EMC 於不同溫度下之合適性，此研究中以四個定量標準和殘差圖爲比較評估之依據。並利用美國加洲稻穀之原始數據（Zuritz et al, 1979）做爲比較。此數據之範圍如下：溫度（10, 20, 25, 30, 40°C），含水率（4.68 −22.32%），相對濕度（11.2%−86.5%）。其實驗方式係利用間接含水率測定法。

結果與討論

一、乾燥過程之 ERH/EMC 性質

稻穀在六種溫度下等溫水份線的相關數據列於表 1。由數據分佈的連續性和良好的重覆性顯示此種依序相對濕度測定法可獲得良好的實驗結果。等溫水份線爲典型的 S 型曲線（圖 3）。溫度對曲線的分佈有顯著的影響，而主要的影響範圍在於 RH 的中間範圍。

四種 ERH 模式對稻穀乾燥過程 ERH/EMC 性質的適用性比較結果列舉於表 2。四個模式迴歸分析結果的殘差圖如圖 4。

由殘差圖分佈性可知，僅修正 Halsey 公式具有明顯的分佈曲線：此公式之 P 值和 RMS 值在四個模式中最大，由此可知此修正 Halsey 式並不能適當地描述此 ERH/EMC 之分佈性質。修正 Henderson, Cnung-Pfost, 與修正 Oswin 式都具均勻分佈的殘差圖：

表 1. 稻穀之去濕數據

Table 1. Desorption data of rough rice

M. C	ERH %					
(% db)	5 °C	15°C	25°C	35°C	45°C	55°C
1.54	2.70	3.51	4.40	5.50	6.40	8.00
1.68	3.99	4.80	5.40	6.10	6.59	7.20
5.60	11.58	13.26	15.00	16.66	18.06	20.71
6.74	15.57	18.13	20.52	22.40	24.35	28.29
5.98	13.75	16.71	19.04	20.81	22.16	25.73
6.96	16.63	19.53	22.41	24.67	27.40	31.12
5.72	11.87	13.13	14.86	16.50	18.16	20.83
6.94	17.01	19.57	22.00	24.20	26.53	30.40
7.28	21.72	25.40	28.94	31.31	34.13	38.11
8.12	25.14	29.43	32.77	35.28	38.50	42.75
8.62	28.94	33.30	36.77	40.20	42.07	46.30
9.15	32.01	35.90	39.44	42.40	45.40	49.70
10.10	39.63	42.80	46.47	49.49	52.45	57.50
10.30	41.40	45.20	48.70	51.30	54.60	59.80
12.76	49.80	55.10	59.60	63.40	68.20	73.30
13.81	62.80	67.30	70.50	73.20	76.10	79.20
14.68	70.20	74.56	77.76	80.42	82.08	84.60
15.98	76.20	80.10	82.30	83.80	84.60	86.40
33.07	90.80	91.70	92.50	92.50	94.60	97.80
30.15	93.95	94.37	94.18	94.53	94.50	94.80
24.48	87.74	89.16	90.10	92.00	92.30	92.70
21.29	82.40	84.60	85.90	86.80	89.70	91.80

表 2. 稻穀去濕數據四 ERH 模式之估計參數值和比較標準

Table 2. Estimated Parameters and comparison criteria for four ERH models of desorption data for rougn rice

	Modified-Hendersion	Chung-Pfost	Modified-Oswin	Modified-Halsey
A	6.62736E-5	557.853	11.56512	4.66697
B	1.97148	0.19350	−4.8643E-2	−1.00626E-2
C	72.2045	78.3150	2.8817	2.06425
R^2	0.985	0.988	0.991	0.986
S.E.	3.772	3.316	2.957	3.622
P	12.417	10.485	13.292	16.973
RMS	22.70	19.684	29.10	33.73
Residual Plot	U.S[3]	U.S	U.S	Pattern[4]

Note : 1. ERH as the dependent variable, M and T as the indepedent variable
2. Sample dried at 55—60°C
3. U.S : Uniformly scattered points in the residual plot
4. Pattern : A systematic pattern in the residual plot

四個模式迴歸分析之 R^2 值都相當大，如修正 Halsey 之 R^2 值爲0.986。由此可知 R^2 值並不是一個判別模式合適性的好標準。修正 Oswin 方程式在四個模式中有最大的 R^2 值和最小的 S. E. 值。然而其 P 和 RMS 值則大於修正 Henderson 和 Chung-Pfst 模式。由此可知 S. E., P, RMS 值在用以比較模式的合適性時，並不一定都具有完全相同的大小次序。對 P 和 RMS 值而言，同樣大小的誤差值對反應值很小的區域（低 RH 範圍）其影響力遠大於反應值高（高 RH 範圍）的區域，由此可知若只用單一的定量標準以評估模式的合適性並不合理。

以修正 Henderson 之迴歸模式建立所得的曲線和量測數據之比較如圖 3 所示。曲線分佈與數據之符合性顯示此模式具有良好的適稱能力。

爲比較溫度和數據分佈範圍對於模式合適性的影響，以部份分割（Splitting）三組數據進行迴歸的結果與原先所有數據的迴歸結果相比較，此部份分割數據分別爲：

(A)不包含 5°C，55°C的數據。

(B)不包含15°C，45°C的數據。

(C)包含全部六溫度，但是 RH 之範圍在於（10—95%）之間。

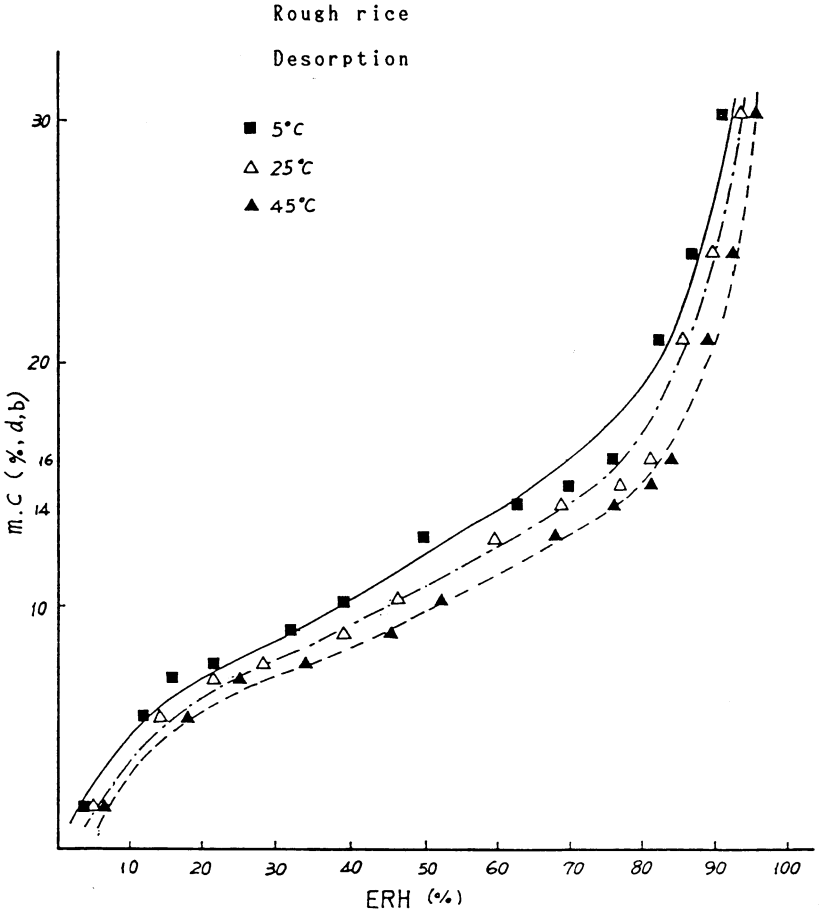


圖 3. 稻穀之去濕數據

Figure. 3. Desorption data of rough rice

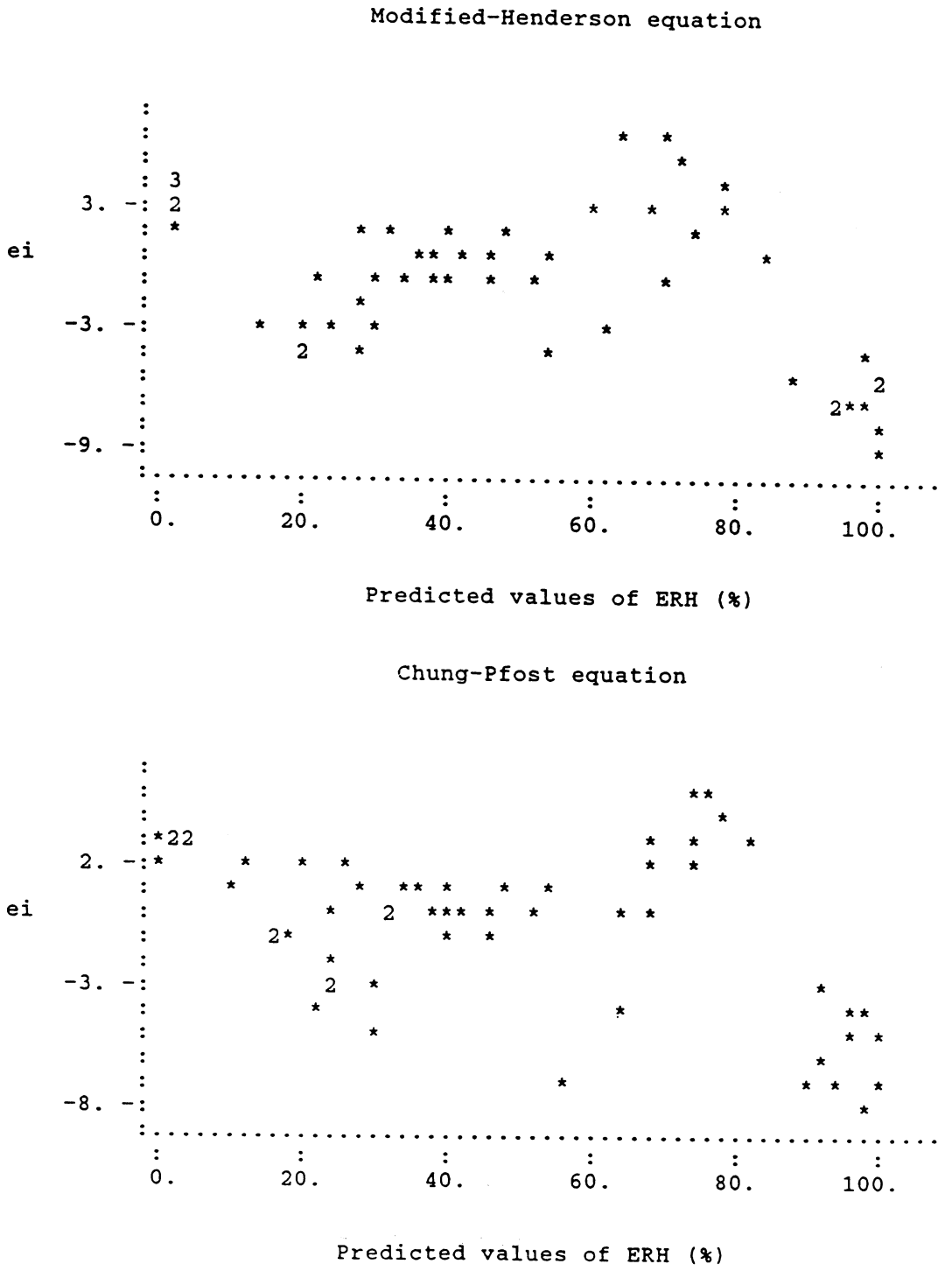


圖4a. 稻穀去濕數據 ERH 模式之殘差圖

Figure. 4a. Residuals vs. predicted values of ERH models for desorption data of rough rice

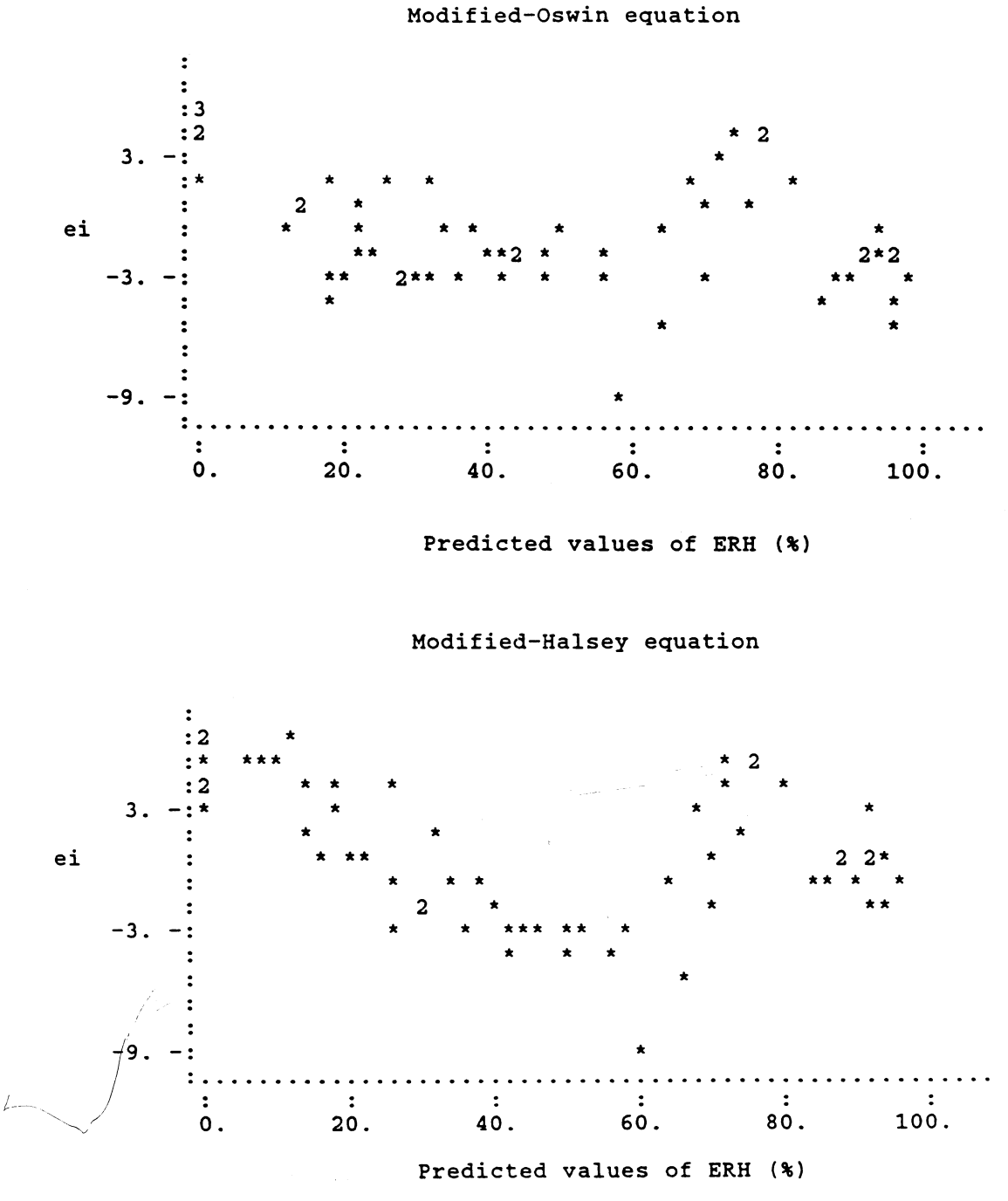


圖4b. 稻穀去濕數據 ERH 模式之殘差圖

Figure. 4b. Residuals vs. predicted values of ERH models for desorption data of rough rice

以三個 ERH 模式對於上述三組數據的迴歸結果如表 3 所示。迴歸分析結果顯示所得的新參數值（A, B 與C）與利用原來所有數據迴歸所得的參數值並無顯著的不同。統計量 P 和 S. E. 值並不受溫度範圍的影響。換言之，修正 Henderson, Chung-Pfost 與修正 Oswin 模式對稻穀ERH/EMC 性質在不同溫度範圍內插（interpolation）和外插（extrapolation）都有良好的適稱性。

表 3. 溫度與 RH 範圍對 ERH 模式估計參數值和比較標準之影響

Table 3. The effect of temperature and RH range parameters on the estimated Parameters and comparison criteria for ERH models

I. The Modified-Henderson equation

	Six Temp.	Excluded Temp 5, 55	Excluded Temp 15, 45	5—55°C 10—95% RH range
A	6.62736E-5	6.33514E-5	6.63258E-5	6.1808E-5
B	1.97148	1.9899	1.9744	2.00856
C	72.2045	71.9546	71.889	70.5067
R^2	0.985	0.984	0.984	0.984
S.E	3.772	3.798	3.813	3.48
P	12.42	12.10	12.56	5.90

II. The Chung-Pfost equaticn

	Six Temp.	Excluded Temp 5, 55	Excluded Temp 15, 45	5—55°C 10—95% RH range
A	557.853	552.125	539.36	585.32
B	0.1935	0.1950	0.19325	0.19842
C	78.3156	75.094	75.36	78.374
R^2	0.988	0.988	0.988	0.987
S.E	3.316	3.287	3.361	3.077
P	10.49	10.61	10.50	5.049

III. The Modified-Oswin equation

	5 —55°C	Excluded 5, 55°C	Excluded 15, 45°C	5—55°C 10—95% RH range
A	11.5651	11.5957	11.8514	11.69248
B	−4.8643E-2	−0.04434	−5.28744E-2	−4.7615E-2
C	2.8817	2.90053	2.8304	2.9034
R^2	0.991	0.9910	0.9911	0.992
S.E	2.957	2.876	3.404	2.407
P	12.29	12.73	13.61	4.372

對只包括10—95% RH 範圍之 ERH/EMC 數據迴歸所得的 A，B與C參數值與利用原先所有數據所得之參數值並無顯著的差異。在統計量比較方面，P 值則顯著的減少。此原因可解釋爲在高 RH（大於95%）和低 RH（小於10%）的範圍，量測數據本身大的試驗誤差（Random error）容易發生。在實際的加工作業如乾燥，倉貯等，10—95% RH 的測定範圍已足以符合實際需要。此外，在極低 RH 的範圍下，EMC/ERH 觀念已不適用於乾燥過程（Chen，1988）。由此可知上述三個模式皆可適用以代表稻穀去濕過程的 ERH/EMC 關係。

二、吸濕（回潮）過程之 ERH/EMC 性質

稻穀在五個溫度下的吸濕等溫水份線其量測數據如表 4 所示。四個 ERH 模式對此組數據的迴歸參數估計和比較統計量列於表 5。由殘差圖分佈之檢驗方式可知修正 Oswin 模式和修正 Halsey 模式都具有特定的曲線趨向，此現象表示兩模式並不適用於這些數據。

表 4. 稻穀之去濕數據
Table 4. The adsorption data of rough rice

M. C	ERH %				
(% db)	5°C	15°C	25°C	35°C	45°C
2.85	7.49	8.50	9.75	10.39	11.26
3.55	7.76	8.51	9.82	10.57	11.37
4.12	8.36	10.71	11.62	13.28	14.86
4.65	12.22	12.83	14.69	16.01	17.50
7.36	21.30	24.10	28.30	30.11	31.97
8.24	21.66	25.18	29.77	32.98	35.36
9.19	29.93	34.11	37.95	40.08	42.62
9.25	30.40	34.13	37.64	40.42	43.63
9.91	36.20	40.65	44.53	46.83	48.79
9.92	37.10	41.18	44.91	47.14	49.14
12.09	47.80	52.55	56.00	59.14	60.65
14.25	58.72	63.69	67.13	71.17	71.95
14.69	60.59	64.17	66.92	69.59	70.83
15.34	68.86	72.90	75.69	78.62	79.80
17.32	77.75	80.77	82.10	84.10	84.30
17.41	79.70	83.00	84.20	85.70	86.50
18.93	85.49	87.50	88.30	89.05	89.94
21.27	90.23	91.43	91.71	92.14	92.58
21.66	90.65	91.76	92.11	92.59	92.93
27.13	88.26	89.88	91.35	93.30	95.60
26.36	90.80	90.60	90.80	92.20	92.80
25.83	89.00	89.70	90.80	92.20	93.30
23.98	90.00	90.80	90.90	91.50	92.00
23.50	92.40	93.90	93.60	94.90	95.30
23.11	87.60	88.80	90.50	91.70	92.70

表 5. 稻穀去濕數據四 ERH 模式之估計參數值和比較標準
Table 5. Estimated parameters and comparison criteria for four ERH models of adsorption data for rougn rice

	Modified-Hendersion	Chung-Pfost	Modified-Oswin	Modified-Halsey
A	9.3241E-5	507.728	11.9457	5.42311
B	1.80986	0.17254	−4.7258E-2	−1.03946E-2
C	72.359	85.8474	2.7888	2.34585
R^2	0.987	0.990	0.983	0.963
S.E.	3.665	3.155	4.129	6.108
P	7.346	7.390	14.11	22.886
RMC	11.398	12.48	25.20	43.42
Residual Plot	U.S	U.S	Pattern	Pattern

修正 Henderson 與 Chung-Pfost 模式可適用以代表稻穀吸濕過程中 ERH/EMC 之關係。對兩者模式迴歸分析之統計量而言，Chung-Pfost 模式之 R^2 值較大，S. E. 值較小，但其 P 和 RMS 值則大於修正 Hnederson 公式。此再度說明統計量之比較並無一致的結論。因此可知以單一統計量做爲評估模式的唯一量化標準是不可靠的。

三、遲滯效應 (Hysteresis)

由於農產品 ERH/EMC 性質受到去濕和吸濕過程所影響，此種差異性稱爲遲滯效應。

在25°C吸濕和去濕過程之比較如圖 5 所示。兩者並無太大的差異，僅在高 RH 範圍，去濕數據高於回潮數據。5 °C和45°C遲滯之現象如圖 6 所示。在 5 °C時，遲滯現象較爲明顯，而45°C之環境下兩者幾乎無所差別。由此可知經熱風處理之稻穀由於其結構成份結構性改變，使遲滯效應之差異大爲減少。而遲滯效應在低溫時，比高溫更明顯。此與玉米粒之 ERH 物性相同 (Chen，1988) 。

在許多乾燥和倉貯通風的模擬的模擬研究中，往往假設遲滯效應本身並無差異。對於以高溫乾燥風進行之乾燥作業或經高溫乾燥後穀物的倉貯通風作業而言，此種假設可成立。

由於農產品 ERH 性質受許多因素影響。不同品種，不同乾燥溫度對於稻穀吸濕和去濕時 ERH /EMC 性質有詳細研究之必要。

四、模式參數數目對 ERH/EMC 數據合適的影響

一、臺農67號稻穀

以此次實驗所得去濕數據對四個含有四參模式 (公式(4)，(5)，(8)，(11)) 進行非線性迴歸分

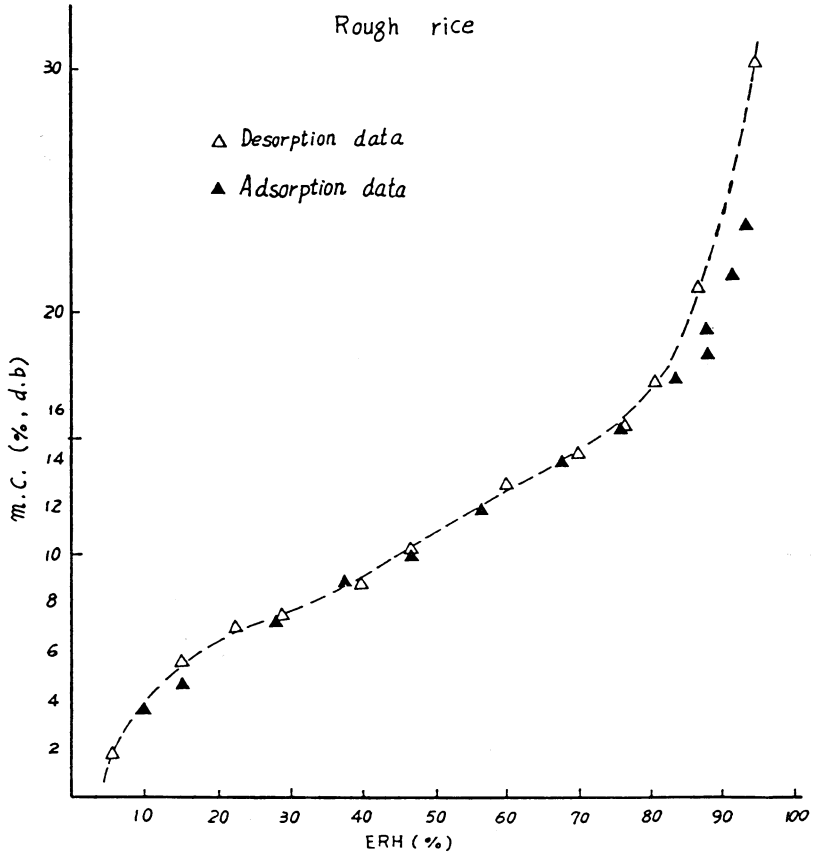


圖 5. 稻穀於25°C時吸濕與去濕數據

Fig. 5. Adsorption and desorption data of rough rice at 25°C

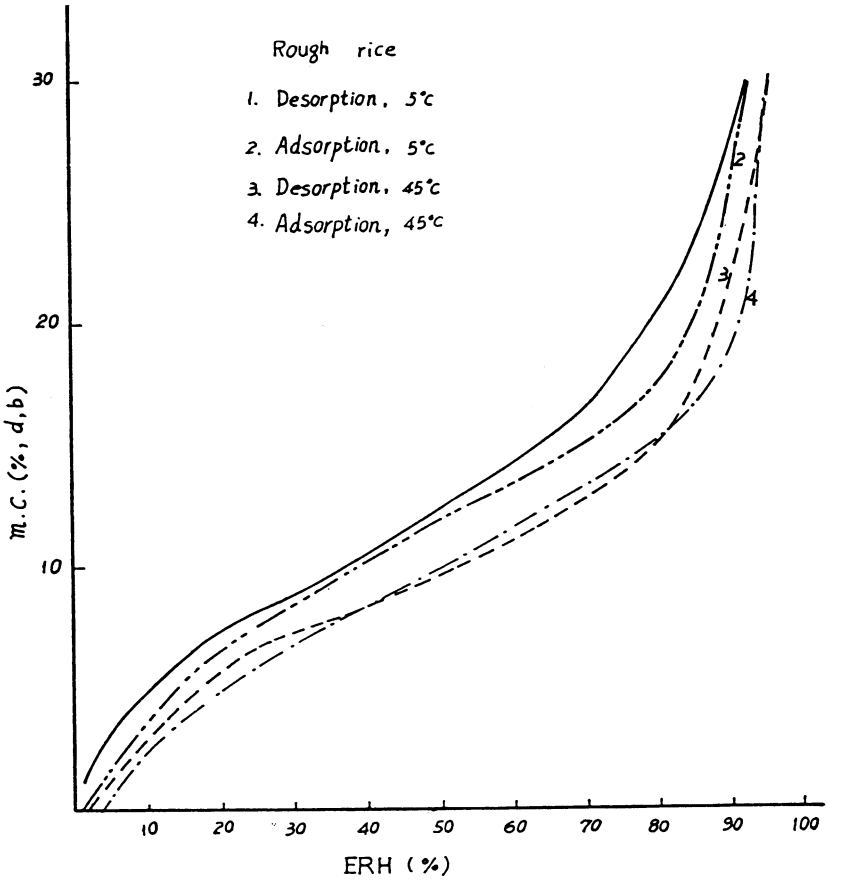


圖 6. 稻穀在兩溫度吸濕曲線之遲滯效應

Figure. 6. Hysteresis effect of sorption isotherm for rough rice at two temperatures

析，其所得參數值和統計量列於表 6。由此結果可知，在由相同根源模式所加以修正推衍的修正模式中，含四參數的模式其合適性並未有顯著的改良。根源於 Hnederson 公式的三模式中，Day-Nelson 模式其 R^2 值小於修正 Henderson 公式之 R^2 值，而且 S. E. 與 P 值均大於含三參數之模式，僅 RMS 值較小。對於 Kumar-Hnederson 模式而言，R^2 值與三參數之模式相同，P 值較小，但是 S. E. 與 RMS 值皆有較大值。由於 S. E. 值統計量考慮了參數數目對於統計量的影響，由此可知含四參數之模式其合適性能並未有顯著改善。

表 6. 稻穀（陳氏）去濕數據八模式適稱性之比較

Table 6. The comparison of the fitting-agreement for eight models of Chen's desorption data

Original Equation	Henderson Equation			Chung-Pfost Equation		Oswin Equation	
	Modi.-Henderson	Day-Nelson	Kumar-Henderson	Chung-Pfost	Chen-Nelson	Modi.-Oswin	Andrieu-Oswin
A (a)	6.627E-5	3.6937E-3	4.530E-3	557.85	5.8581	11.565	11.8256
B (b)	1.9715	0.4327	6.943E-3	0.1935	−3.476E-2	−4.864E-2	−5.286E-2
C (c)	72.205	1.8341	1.9842	78.31	0.1416	2.8817	0.3486
(d)		−3.716E-2	−3.6823E-5		9.05E-2		−3.410E-5
R	0.985	0.981	0.985	0.988	0.988	0.991	0.991
S.E.	3.77	5.16	3.79	3.32	3.43	2.96	2.86
P	12.42	13.96	12.26	10.49	10.93	13.29	12.86
RMS	22.70	19.70	22.78	19.68	19.68	29.10	29.07
Residual Plot	U.S.	U.S.	U.S.	U.S.	U.S.	U.S.	U.S.

對導源於 Chung-Pfost 公式之兩修正式，含四參數的 Chen-Nelson 模式其 R^2 值，RMS 值與含三參數模式之新 Chung-Pfost 修正式相等，其他統計量並未有所改良。以導源自 Oswin 模式之公式而言，四模式之 Andrien-Oswin 模式其評估統計量雖比三參數之修正 Oswin 公式較好，但未顯著性的影響。

由上述之比較可知，含四參數之修正模式對於數據的適稱性並未勝於三參數的模式。

二、美國加洲稻穀

此研究所得原始數據得自於相關文獻（Zuritz et al, 1979）。依各模式之非線性迴歸分析結果列於表 7 。

表 7 . 稻穀（Zuritz）去濕數據八模式適稱性之比較

Table 7. The comparison of the fitting-agreement for eight models of Zuritz's desorption data

Original Equation	Henderson Equation			Chung-Pfost Equation		Oswin Equation	
	Modi.-Henderson	Day-Nelson	Kumar-Henderson	Chung-Pfost	Chen-Nelson	Modi.-Oswin	Andrieu-Oswin
A (a)	3.5031-5	1.1290E-5	1.2384E-3	363.73	22.0613	16.036	16.6878
B (b)	2.3159	1.5609	2.2018E-3	0.1807	−0.3596	−0.1215	−0.1146
C (c)	27.407	4.04997	2.2498	26.673	0.1652	3.3671	0.2753
(d)		−0.17972	2.9164E-3		2.899E-2		1.0283E-3
R	0.993	0.994	0.993	0.993	0.990	0.989	0.991
S.E.	2.14	1.95	2.08	2.09	2.49	2.55	2.33
P	5.70	4.33	5.64	4.56	5.41	7.19	6.29
RMS	9.35	6.00	9.74	6.41	7.37	13.68	11.52
Residual Plot	U.S.	U.S.	U.S.	U.S.	U.S.	Pattern	Pattern

對於源於 Henderson 模式的三種修正模式而，Day-Nelson 模式之合適性比含三參數模式之修正 Henderson 公式其合適性較好，而 Kumar-Henderson 公式並未有所改善。但是四參數之模式其合適性之改良並不顯著。對於源於 Chung-Pfostm而言，含四參數的 Chen-Nelson 模式適合性比含三參數的新 Chung-Pfost公式更差。對於源於 Oswin 公式之修正模式而言， Andrien-Oswin 模式其適合性比三參數之修正 Oswin 式較佳，但並未俱有顯著性之改良。由此可知含四參數之模式其合適性並未勝於三參數之模式。

修正 Henderson 與 Day-Nelson 模式之殘差圖如圖 7a 所示，兩圖數據之分佈性質十分相似。Chung-Pfost 模式和 Chen-Clayton 模式之殘差圖其分佈狀況亦類似（圖 7 b）。此原因可解釋爲其根源於相同的原始模式。

由上述兩者數據各模式之合適性比較，一味增加模式中參數之數目並不代表模式之合適性即得到改善。對含三參數之模式而言（公式(3)，(7)，(10)與(14)）已可代表農產品平衡相對濕度，平衡含水率和溫度之關係。此四個模式對於各種農產品的適應性也已詳細的研究（Chen，1988）。然而，此種含有三參數的模式往往有許多誤用的情況。例如以固定溫度條件下的 ERH 對 EMC 的數據代入公式中求其 A, B, 和 C 之參數值（Genctukk. et al, 1986），此即不瞭解原來修正公式用以考慮溫度影響性的意義。而若再將此方式所得之各溫度下A，B，和 C 值以溫度爲自變數進行線性迴歸（Hutchinson and Otten, 1984，Cenkokski et al, 1989），此只是使得 ERH 模式更加複雜化，對模式之適稱性並無改善，更是未瞭解模式修正以包含溫度影響的意義。

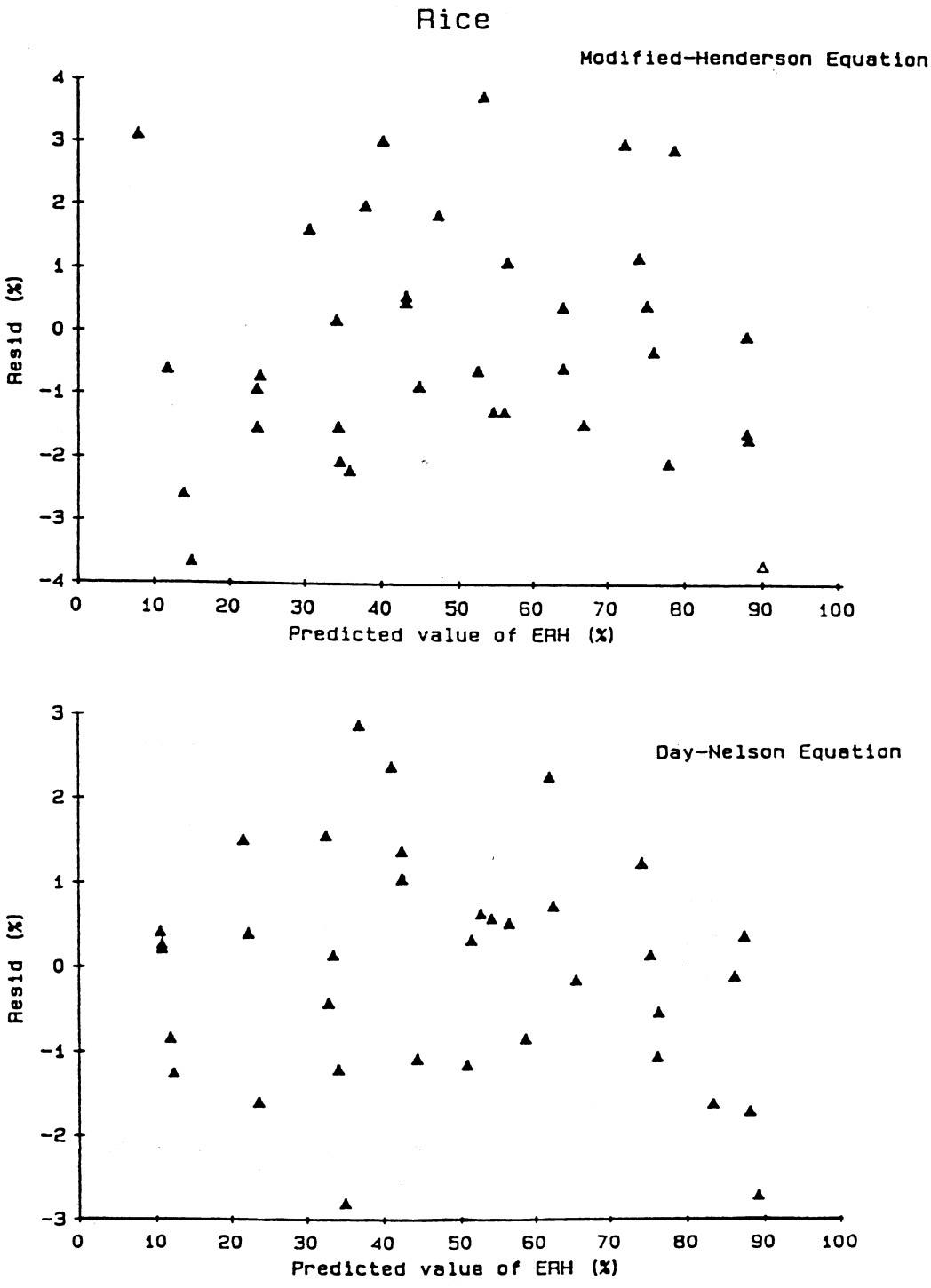


圖7a. 美國稻穀 ERH 模式之殘差圖

Figure. 7a. Residuals vs predicted values of ERH models for rough rice (U.S.A)

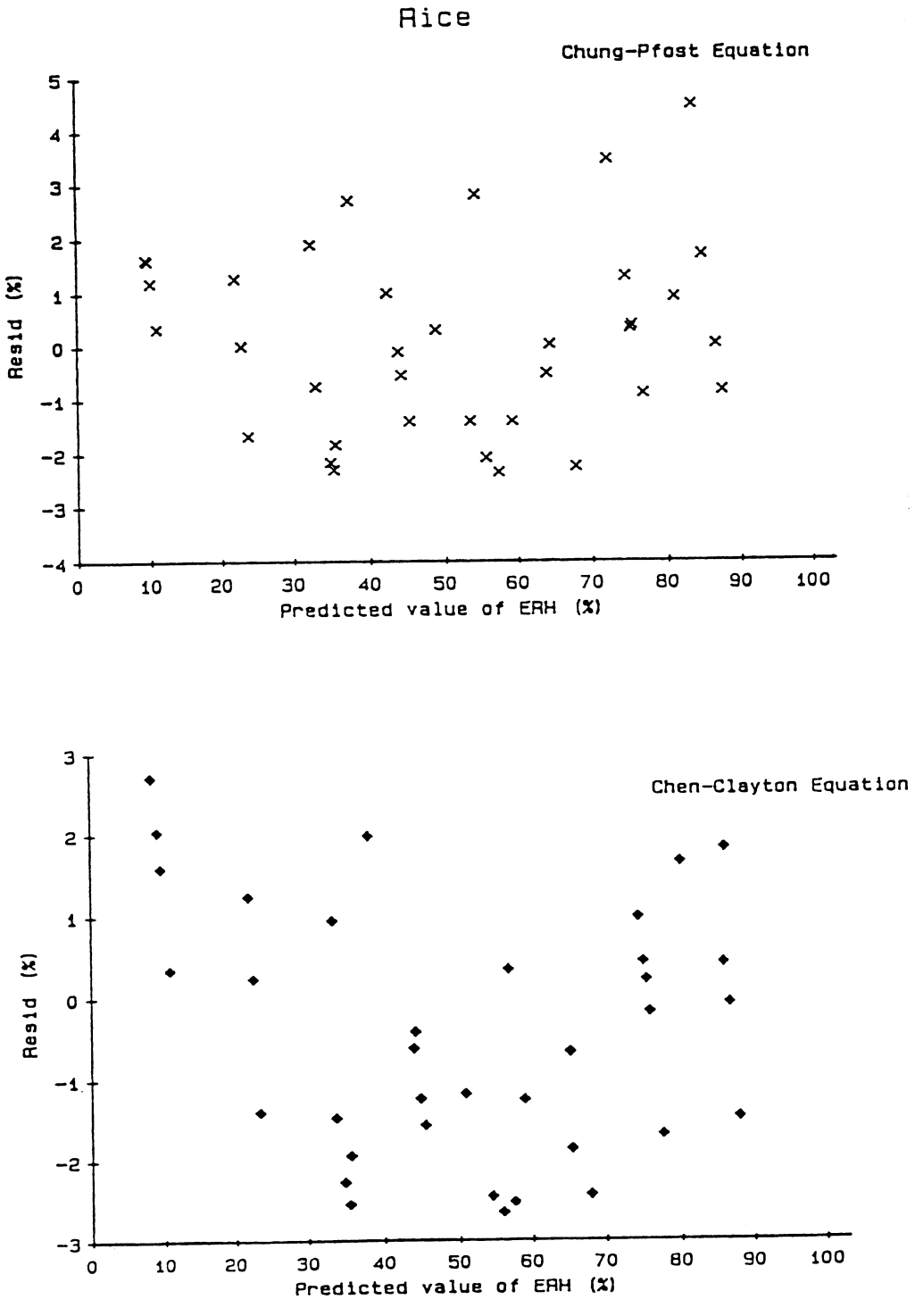


圖7b. 美國稻穀 ERH 模式之殘差圖

Figure. 7b. Residuals vs predicted values of ERH models for rough rice (U.S.A)

在此研究中只討論了非線性迴歸模式之適稱（fitting agreement）能力。至於預測能力（Prediction ability）的比較統計量如 PRESS 值或 PRESS 殘差絕對值總和值（Myers, 1986）因涉及更複雜之計算，需要更詳細之研究。

結 論

由上述研究所得之結論如下：

1. 稻穀樣本經55—60°C溫度處理至各不同含水率後所得之平衡相對濕度，平衡含水率和溫度三者數據其關係之適用模式爲修正 Henderson, Chung-Pfost, 和修正 Owsin 模式。此樣品之回潮相關數據以修正 Henderson 和 Chung-Pfost 模式爲適用模式。這些模式之參數值可做爲本省稻穀乾燥和倉貯作業之設計因子。

2. 對於 ERH 模式對稻穀數據的適用性而言，溫度值的內插或外插性能都十分良好。RH 數值範圍於10—95%時有良好的適稱性。

3. 經由高溫（55—60°C）處理後的稻穀，在25和45°C之遲滯現象並不顯著。低溫時遲滯現象較爲明顯。

4. 含四個參數之 ERH 模式其適稱能力並未顯著地優於含三參數的 ERH 模式。具有三參數的 ERH 模式已足以適用於代表稻穀平衡相對濕度，平衡含水率和溫度之關係。

參考文獻

Andrien, A, A, Stamatopoulos and M. Zafiropoulos, 1986, Corn pasta water desorption isotherms, Lebensm, wiss.-Technol, 19 : 415-418.

ASAE. 1983. Mosture relationships of grains. ASAE Standards D. 245.4. Agricultural Engineering Yearbook 30th ed. St, Joseph, MI, pp : 297-301.

Cenkowski, S., S. Soknansanj, and F. W. Sosulski, 1989, Equilibrium moisture content of Lentile, Canadion Agri. Eng. 31 : 159-162.

Chang, Sen-Fuh, 1988, Modifieation of Henderson's EMC model and EMC isotherms of local paddy and corn. J. of Chinese Agri, Eng. vol 34(1) : 16-39.

Chen, C. 1988. A study of equilibrium relative humidity for yellow-dent corn kernels. Ph. D. thesis. University of Minnesota, St. Paul, MN.

Chen, C. C, 1989, The deterimination methods and effect factors of the equilibrium relative humidity of agricultural products, J. of Chinese Agricultural Engineering, V35 : 59-69.

Chen, C. C, C. T. Tsao, C. C. Lai, 1989, Statistical evaluation on the performance of electric RH sensors for ERH measurements. ASAE paper No. 89-6539, St. Joseph, MI.

Chen, C. S, and J. T. Clayton, 1971, The effect of temperature on sorption, isotherms of biological materials. Trans of ASAE 14(5) : 927-929.

Chung, D. S. and H. B. Pfost, 1967, Desorption of water vapor by cereal and their products, Part II : Development of the general isotherm equation, Tran. of ASAE 10(4) : 552-554.

Day, D. L. and G. Nelson, 1969, Desorption:sotherms for wheat, Trans. of ASAE 8 : 293.

Draper, N. R. and H. Smith. 1981. Applied Regression Analysis. 2th ed, willy, N. Y.

Gencturk, M. B., A, A. Bakshi, Y. C. Hong and T. P. Labuza. 1986. Moisture transfer properties of wild rice. J. of Food proc. Engine. 8 : 243-261.

Halsey, G. 1948. Physical andsorption on non—uniform surfaces. J. Chem. Phys. 16 : 931-935.

Hartley, H. O. 1961. The modified Gauss-Newton method for the fitting of nonlinear regression functions by least squares. Technometrics. 3 : 269-280.

Helland, I. S. 1987. On the interpretation and use of R^2 in regression analysis. Biometrics 43 : 61-69.

Henderson, S. M. 1970. Equilibrium moisture content of small grain-hysteresis. Trans. of ASAE 13(3) : 762-764.

Hung, Y. -C, 1989, Predicting the effect of drying conditions on the textural properties of roasted peanuts, Trans. of ASAE 32 : 968-972.

Hutchinson D, H. and L. Othen, 1984, Egulibrium moisture content of white beans, Cereal Chemisty 61(2) : 155-158.

Iglisias, H. A. and J. Chirife. 1976a. Prediction of effect of temperature on water sorption isotherms of food materials. J. of Food Tech. 11 : 109-116.

Iglesias, H. A. and J. Chirief, 1976b. Equilibrium moisture contents of air dried beef—Dependence on drying temperature. J. of Food tech. 11 : 565-573.

Kameoka, T., D. S. Jayas, H. Morishima, and S. Sokhansa. 1986. Equilibrium moisture content of rice. In : Food engineering and process applications vol : I. Transport Phenomena. pp.201-210. Elsevier Applied Science Publisheres, London and N. Y.

Kumar, A., F. L. Herum, and J. L. Blaisdell, 1987, Equilibrium moisture contents of inact corn ears and parts, ASAE paper No. 78-3054, ASAE, St, Joseph. MI.

Lomaaro, C. J., A. S. Bakshi and J. P. Labuza. 1985. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. lebensm. Wiss. Technol. 18 : 111-124.

Myers, R. H, 1986, Classical and modern regression with applications, Pws and kent Publishing Co. Boston, MA.

Putranon, R., R. E. Bowrey, and J. Eccleston, 1979, Sorption isotherms for two cultivars of paddy rice grown in Australia. Food technology in Australia Dec : 510-515.

Oswin, C. R, 1946, The kinesics of Package life, III. Isotherm. J. Chem. Industry,65 : 419-422.

Pfost, H. B., S. G. Mourer, D. S. Chung and George A. Milliken 1976. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. ASAE Paper No. 76-3520. St. Joseph, MI. ASAE.

Thompson, T. L., R. M. Peart and G. H. Forst, 1968, Mathematics simulation of corn drying—a new model. trans of ASAE. 24 : 582-586.

Van den Berg, C. and S. Bruin. 1981. Water activity and its estimation in food systems:theoretic aspects. In : water Activity : Influences on Food Quality, pp. 1-43, Academic Press, N. Y.

Weisser, H. 1985. Influence of temperature on sorption equilibria In : Properties of water in foods. Simato, D. and J. L. Multon (eds.) P. P. 95-118. M. Nijhooff Publ. Netherlands.

Zuritz, C., R. Paul Singh, S. M. Moini, S. M. Henderson, 1979, Desorption isotherms of rough rice from 10°C to 40°C, Trans, of ASAE 22 (2) : 433-440.

A Study of Equilibrium Relative Humidity properties for Rough Rice[1]

C. C. Chen, C. C. Lai, and C. T. Tsao[2]

Summary

The relationships of equilibrium relative humidity and equilibrium moisture content of rough rice at different temperature were measured by step-by-step ERH determinating method in this study. The sample was treated by the heated air at the range of 55-60 °C. The experimental results indicated that three ERH models can serve as good model for desorption data. Two adequate ERH models could be used for adsorption data. The hystereses was in 25 and 45°C. The fitting-agreement of four-parameter ERH models did not have better performance than those of the three-parameter ERH models.

Key words : ERH model, Rough rice.

1. Contribution No. 1541 from Taiwan Agricultural Research Institute, This resenroh was supported by grants from the National Science Gouncil. R. O. C.

2. Associate researcher, Assistant researcher, Junior specialist, respectively, TARI, Taichung, R. O. C.