

Figure 2. Illustrative diagram of fluidized bed drying system

#### Physical properties analysis

To reduce the stress inside kernel, the paddy after drying was kept in a complete seal plastic bag at room temperature for 2 weeks before testing physical properties. The properties of the paddy in terms of head rice yield, whiteness and hardness were analyzed.

##### *(a) Head rice yield*

Cleaned rough rice sample (dry and control) with a mass of 125 g. was passed twice through a rubber roll testing husker and the resulting brown rice was whitened for 45 min. Each sample was repeated twice and average head rice yield was represented. The relative head rice yield referred to the ratio of head yield obtained from the above-mentioned process to that obtained from the control one (dry by ambient air).

##### *(b) Whiteness of rice*

The rice whiteness was measured by a Satake milling meter by the light reflected at the surface of rice kernel before measuring the whiteness meter was calibrated with a standard pure white barium oxide having a value of 86%.

##### *(c) Hardness of rice*

Texture analysis was determined in terms of hardness using a bench-top Texture analyzer model TA-XT2i (Stable Micro Systems Ltd.). The milled rice samples were cooked and tested individually at 20 min intervals. A 30 g. portion of each dry-milled head rice sample was put in aluminum cylindrical

cup (diameter of 7 cm. and height of 7 cm.) and rice sample was rinsed and strained to remove excess water, and distilled water was added in amount equal to 1:1.5 ratio of rice to water by weight. Rice samples were presoaked at room temperature for 10 minutes and then cooked in an automatic rice cooker with a capacity of 3 L. After cooking cycle was completed, the cooked rice was continue to keep for 10-15 min in the cooker and then the sample was taken out and cooled down to room temperature for 1 h. The cooked rice sample was taken from the middle of cup ( $\sim 50 \text{ g.} \pm 0.1 \text{ g.}$ ) and placed 1 cm. height from the base of the extrusion plate.

The initial height of the compression probe (Ottawa cell) was set at 120 mm. The pretest speed of probe was 1.5 mm/s. The test speed for compression was 0.5 mm/s and the post test speed was 10 mm/s. The maximum force required for compression cooked rice to 90% of initial portion height 10mm as indicated hardness of cooked rice. In the other words, the hardness was the height of the force peak on the first compression. The value was expressed in kilogram unit.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Moisture content and grain temperature during fluidized bed drying

The average grain temperatures was in between 35°C and 75°C for corresponding inlet air temperatures of 40-90°C and between of 83°C and 89°C for corresponding inlet air temperatures of 100°C to 150°C. These grain temperatures were used for setting-up temperature for tempering section.

Table 1 shows the drying time to obtain the final moisture content of  $22.0 \pm 1.3\%$  d.b. for initial moisture content of 32.5% d.b. was longer than those for initial moisture contents of 28.2% and 25.0% d.b.

Table 1. Experimental results of moisture content of paddy after fluidized bed drying. (Varieties Suphanburi 1 and Pathumthani 1)

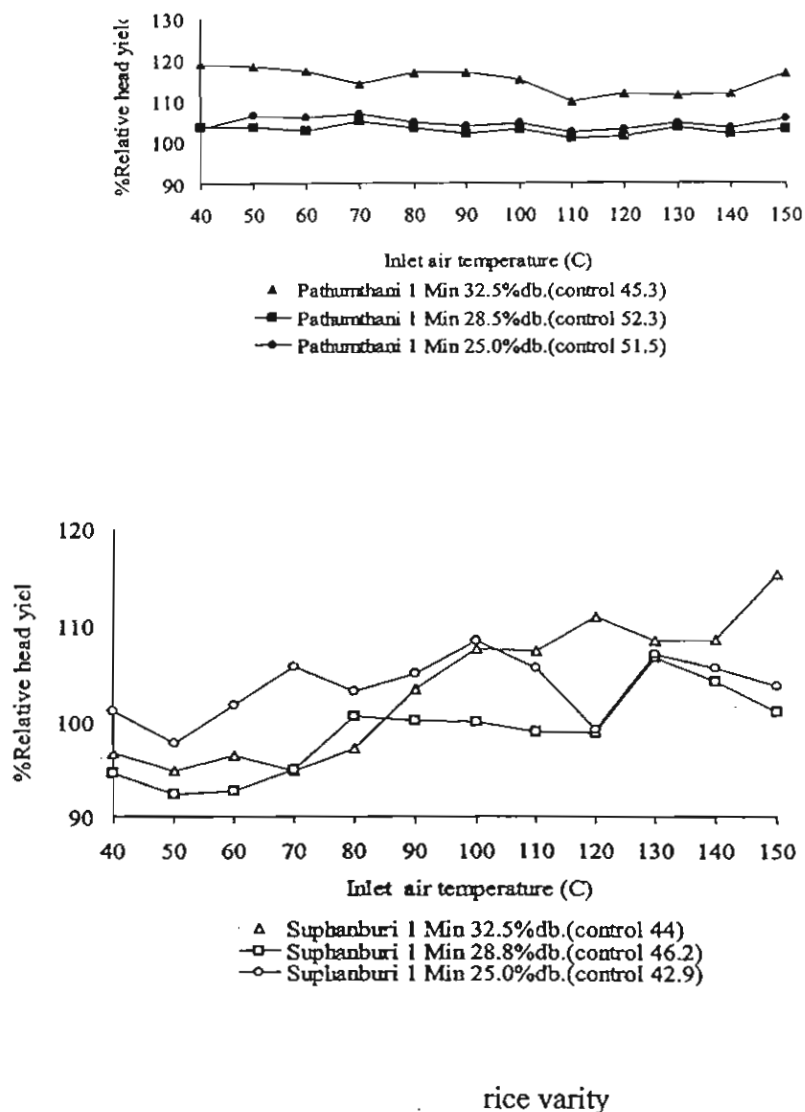
Inlet air temperature (°C)	Initial moisture content (% dry basis)	Average drying time (min)	Average final moisture content (% dry basis)	
			Suphanburi 1	Pathumthani 1
40	25.0	23.0	22.0	22.6
	28.2	36.0	22.4	21.8
	32.5	58.0	22.3	22.4
50	25.0	13.0	20.2	20.9
	28.2	20.0	22.6	21.7
	32.5	30.0	22.6	22.6
60	25.0	7.0	22.4	20.5
	28.2	11.0	22.3	22.4
	32.5	21.0	21.7	22.3
70	25.0	5.0	20.1	20.9
	28.2	8.2	22.6	22.1
	32.5	14.0	21.5	22.6
80	25.0	2.3	20.8	21.8
	28.2	5.3	22.6	22.7
	32.5	9.2	21.5	22.7
90	25.0	2.0	22.9	21.2
	28.2	3.3	22.6	22.9
	32.5	6.1	21.8	22.7
100	25.0	1.5	22.0	21.2
	28.2	3.0	21.8	22.9
	32.5	4.4	21.8	22.0
110	25.0	1.3	22.0	21.4
	28.2	2.4	21.5	22.9
	32.5	3.4	22.1	21.7
120	25.0	1.3	20.5	21.4
	28.2	2.0	22.9	23.3
	32.5	3.1	23.0	23.0
130	25.0	1.1	20.5	21.7
	28.2	1.4	22.7	23.3
	32.5	2.5	21.5	22.7
140	25.0	1.0	20.5	21.4
	28.2	1.2	22.6	22.7
	32.5	2.3	21.8	22.7
150	25.0	0.4	21.2	22.6
	28.2	1.1	22.3	22.9
	32.5	2.0	22.0	22.7

## Physical quality

### *(a) Head rice yield*

Figure 3 (a) shows the influence of drying temperature on the head rice yield at three moisture levels of Suphanburi 1 variety. The average percentage of head rice yield for control rice was about 44. Drying at temperature below 80°C provides the relative head rice yield for the samples at 33% d.b. is not higher than the other two samples. This means that low drying temperature ranging from 40°C and 80°C does not affect the grain kernel to be gelatinized. The gelatinization temperature for Suphanburi 1 variety is 74°C±3°C. For high drying temperature from 100°C and 150°C provides the relative head rice yield 105 and 115. Such a better quality is a result of partial gelatinization occurring inside the grain kernels during the course of drying at high temperature. When the gelatinization is being formed inside the grains, the starch granules are swelled and at the same time, the protein is decomposed and penetrates through the void spaces amongst the granules, thus providing the stronger adhesive forces between them. Consequently, the kernels are capable of withstanding the abrasive force while being milled.

For Pathumthani 1 rice variety as shown in figure 3(b), the percentage of head rice yield of control rice samples was about 50 except for the initial moisture content 32.5% d.b. showing a value of 45.3. The relative head rice yield of the initial moisture content of 32.5% d.b. is higher than that obtained from the samples at initial moisture contents of 25.0 and 28.8% dry basis at any drying temperature comparing to the head rice yield of Suphanburi 1 after drying, these head rice yield were relatively higher.



(b) Pathumthani 1 rice variety

Figure 3. Effect of inlet air temperature on relative head rice yield Initial moisture contents of 25-33% db. and final moisture content of  $22.0 \pm 1.3\%$  d.b. (after fluidized bed drying)

(b) Rice whiteness

Figure 4 shows the effect of inlet air temperature on rice whiteness for two rice varieties, Suphanburi 1 and Pathumthani 1. For the initial moisture contents

of 32.5% dry basis, the whiteness decreased when the drying temperature increased. This is because of non-enzymatic reaction causing the yellowing of rice kernel. For the initial moisture content lower than 28.8% dry basis, it was found that the drying temperature had insignificant effect on the whiteness of rice kernel. However, throughout these experiments, the values of rice whiteness are still accepted for the commercials propose.

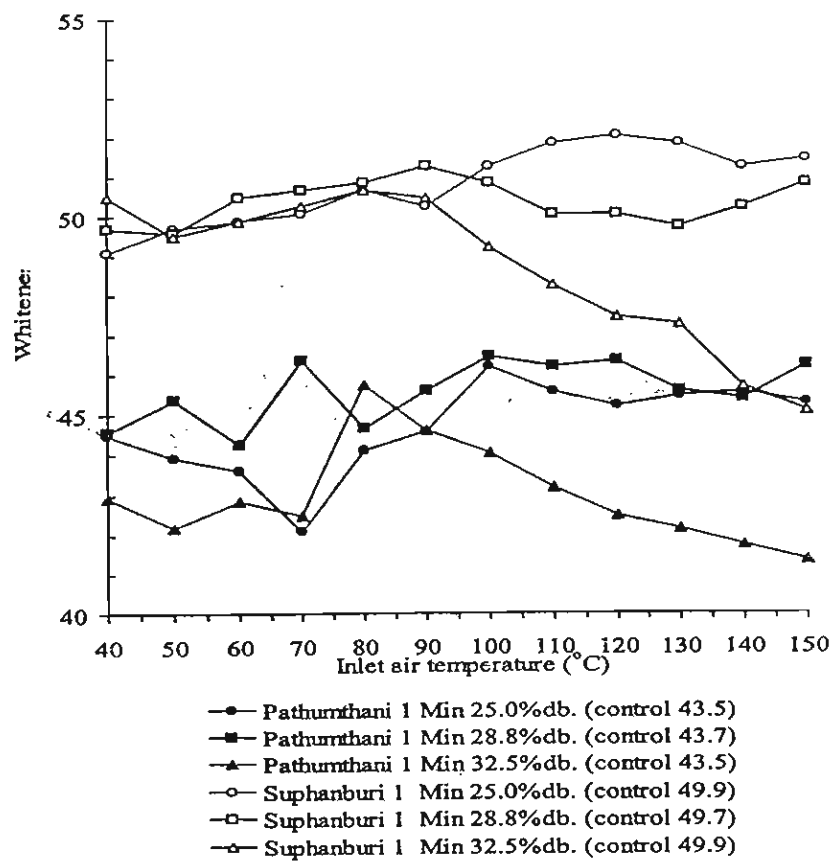


Figure 4. Effect of inlet air temperature on rice whiteness for Suphanburi 1 and Pathumthani 1 : the initial moisture contents 25-33% dry basis : final moisture content  $22.0 \pm 1.3\%$  d.b.

*(c) Hardness of rice*

For the hardness values of control rice and dried rice of two paddy varieties are shown in Table 2. The hardness value after drying was slightly increased. The hardness value of control rice was  $19.12 \pm 1.36$  kg for Pathumthani 1 and  $35.63 \pm 3.17$  kg for Suphanburi 1 rice. The hardness values of two paddy varieties increased when the initial moisture content and drying temperature increased. Firstly, the tightly packed with starch granules from loss of water molecules in starch and penetrating of spherical shaped protein body in starch granules causes increasing hardness of rice. This effect normally occurs on ageing of stored rice [Zhout et al.(2002)] and drying by high temperature [Imprasit and Noomhorm (2001)]. Therefore, both low temperature drying ( $30^{\circ}\text{C}$ - $90^{\circ}\text{C}$ ) and high temperature drying ( $100^{\circ}\text{C}$ - $150^{\circ}\text{C}$ ) of this experiment also are affected by this phenomenon. Secondly, partial gelatinization during high temperature drying affects to hardness values of rice. For gelatinization effect, the rice kernel has been partial gelatinized so its starch was more strength and hardness value trends to be higher than rice using low drying temperature. Trends of gelatinization increasing will be predominated if paddy is high initial moisture content and dried by temperature over gelatinized temperature of grain. For this work, the gelatinization temperature of Suphanburi 1 variety and Pathumthani 1 variety is about  $74^{\circ}\text{C}$  and  $70^{\circ}\text{C}$ , respectively. From the results as shown in Table 2, it indicates that at higher initial moisture content of paddy (32.5% d.b.), the hardness values of rice is harder than those of lower initial moisture content.

Table 2. Values of hardness after drying at different inlet air temperatures and initial moisture contents : Suphanburi 1 and Pathumthani 1

Inlet air temperature (°C)	Initial moisture content (% dry basis)	Hardness (kg)	
		Pathumthani 1	Suphanburi 1
Control rice	25.0	17.23	33.23
	28.2	19.77	33.57
	32.5	20.37	40.09
40	25.0	19.17	35.61
	28.2	19.77	36.50
	32.5	20.37	33.23
60	25.0	18.92	36.31
	28.2	20.57	38.89
	32.5	21.76	39.70
90	25.0	19.86	34.92
	28.2	19.16	39.32
	32.5	22.54	34.34
110	25.0	20.76	34.28
	28.2	21.48	31.22
	32.5	21.89	38.38
130	25.0	20.62	35.79
	28.2	20.56	34.35
	32.5	22.19	36.30
150	25.0	20.57	35.72
	28.2	19.06	33.19
	32.5	21.56	39.01

## CONCLUSIONS

Head rice yield of long grain paddy containing the higher moisture content of 25% d.b. when dried at temperature below 80°C does not show a significant enhancement or a rapid decline, along with the whiteness to be invariably maintained, comparing to those qualities of the control rice sample. However, at temperature above 100°C, the recovery of head rice yield can be made particularly for the initial moisture content of 32.5% dry basis whereas the color of white rice has a pale yellow but it is still in the preferentially acceptable value.

For the hardness, the value was slightly increased with increase the initial moisture content and drying temperature.



## ACKNOWLEDGEMENT

The authors wish to express their sincere thanks to the Thailand Research Fund (TRF), the Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS) for financial support and Institute of Food Research and Product Development (IFPRD) at Kasetsart University, Thailand for testing rice qualities. Division of Agricultural Engineering, Department of Agriculture for testing quality of milling quality.

## REFERENCES

- AOAC, 1984. Official Methods of Analysis, 14<sup>th</sup> edition, Washington, D.C., Association of Official Analytical Chemists
- Bason, M.L., Gras, P.W., Banks, H.J. and Esteves, L.A. 1989. A Qualitative Study of the Influences of Temperature, Water Activity and Storage Atmosphere on the Yellowing of Paddy Endosperm. *J. of Cereal Science*, 12: 193-201.
- Driscoll, R.H. and Adamczak, T. 1988. Drying Systems for the Humid Tropics. In : Bulk Handling and Storage of Grain in the Humid Tropics. *ACIAR Proceedings*, 22: 58-68.
- Gras, P.W., Banks, H.J., Bason, M.L. and Arriola, L.P. 1989. A Qualitative Study of the Influences of Temperature, Water Activity and Storage Atmosphere on the Yellowing of Milled Rice, *J. of Cereal Science*, 9: 77-89.
- Gras, P.W. and Bason, M.L. 1989. Biochemical Effects of Storage Atmospheres on Grain and Grain Quality. *ACIAR Proceeding*, No.25, Fumigation and Controlled Atmosphere Storage of Grain, 83-91.
- Imprasit, C. and N. Noomhorm, 2001. Effect of Drying Air Temperature and Grain Temperature of Different Types of Dryer and Operation on Rice Quality, *Drying Technology*, 19(2), 389-404.
- Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Terdyothin, A. and Prachayawarakorn, S. 2001. Head Rice Yield after Drying by Fluidization Technique and Tempering. The 2<sup>nd</sup> Asia-Oceania Drying Conference, Batu-Feringhai, Penang, Malaysia, 20-22 August
- Quitco, R.T. 1982. Studies of Fungal Infection and Heating of Paddy. *Proc.GASGA Seminar, Paddy Deterioration in the Humid Tropics*, 52-56, GTZ, Eschborn.
- Satayaprasert, S. and Vanishserwatana, V. 1992. Drying Corn in Fluidized Bed. *Thailand Engineering Journal*, 44(12): 76-79.
- Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 1992. Maintaining Quality, Maximizing Throughput and Minimizing Energy Consumption in

- Fluidized Bed Paddy Drying. Proc. of the 15<sup>th</sup> ASEAN Seminar on Postharvest Technology, 8-11 September, Singapore.
- Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Sripawatakul, O. 1996a. Development of Cross-Flow Fluidized Bed Paddy Dryer. *Drying Technology*, 12(7): 1667-1686.
- Soponronnarit, S., Srisubati, N. and Yoovidhya, T. 1998. Effect of Temperature and Relative Humidity on Yellowing Rate of Paddy. *J.Stored Prod. Res.*, 34(4): 323-330.
- Soponronnarit, S., Wetchama, S., Swasdisevi, T. and Poomsa-ad, N. 1999. Managing Moist Paddy by Drying, Tempering and Ambient Air Ventilation. *Drying Technology*, 17(1&2): 335-344.
- Steffe, J.F., Singh, R.P. and Bakshi, A.S. 1979. Influence of Tempering Time and Cooling on Rice Milling Yields and Moisture Removal. *Trans. Of ASAE*, 22: 1214-1218, 1224.
- Sutherland, J.W. and Ghaley, T.F. 1990. Rapid Fluid-Bed Drying of Paddy Rice in the Humid Tropics. Proc. of the 13<sup>th</sup> ASEAN Seminar on Grain Postharvest Technology, 4-7 September, Brunei Darussalam, 168-177.
- Yap, A.B., Juiliano, B.O. and Perez, C.M. 1988. Artificial Yellowing of Rice at 60°C. *Proceeding Group, The Source of Yellow Grains in Rice, Myc. Centralbl*, 3: 153-157.
- Zhang, Q. and Litchfield, J.B. 1991. An Optimization of Intermittent Corn Drying in a Laboratory Scale Thin Layer Dryer. *Drying Technology*, 9 (11): 233-244.
- Zhout, Z., K. Robards, S. Heliwell and C. Blanchard, 2002. Ageing of Stored Rice: Changes in Chemical and Physical Attributes. *Journal of Cereal Sc.*, 35, 65-78.

## MATHEMATICAL MODEL OF DEEP BED PADDY DRYING AND QUALITY ASPECT

Yutthana Tirawanichakul<sup>1</sup>, Somkiat Prachayawarakorn<sup>2</sup>,  
Patcharee Tungtrakul<sup>3</sup>, Warunce Varunyanond<sup>4</sup> and Somchart Soponronnarit<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Energy and Materials, <sup>2</sup>Faculty of Engineering,  
King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), BKK,  
Thailand

<sup>3</sup>Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University  
(KU), Bangkok, Thailand

E-mail: Tyutthan@hotmail.com

### ABSTRACT

*The main objective of this work was to study the physical qualities, chemical quality and physico-chemical quality of rice during in-store drying. The prediction results of moisture content and whiteness of rice were compared to the experiment results using a near-equilibrium drying mode including whiteness kinetics of rice kernel. The long grain rice (Suphanburi1), containing of amylose content of 27%, was used for all experiments. The experiments were set up at the average ambient temperature of  $30 \pm 4^\circ\text{C}$ , average relative humidity of  $76 \pm 8\%$  with a fixed bed depth of 1.0m. Specific air flow rates of  $0.65$  and  $0.93\text{m}^3/\text{min-m}^3$  of paddy were forced through the paddy bulk at a initial moisture contents of 18.5% and 20.1% wet basis. The final moisture content of paddy was about  $3.3 \pm 0.6\%$  wet basis. The results were shown that the drying rate and the whiteness predictions were in good agreement with those from the experiments. For determination of energy consumption, the consumption by this drying technique consumed low energy input and did not produce notable effect on those of qualities of rice. For the physical quality analysis, was indicated that the rice whiteness, head rice yield and the percentage of paddy germination were insignificant affected by the low-temperature drying. The hardness and stickiness after drying were slightly increased.*

**Keywords.** drying model, grain, in-store drying, rice quality

### INTRODUCTION

Freshly harvested paddy contains the water around 18 to 23% wet basis. The management of highly moist paddy during harvesting period is a serious

### *Thin layer drying equation*

An empirical thin layer drying equation developed by Agrawal and Singh (1977) was used. It can be written by the following equation:

$$MR = \left( \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \right) = \exp(-xt^y) \quad (4)$$

$$\text{where } x = 0.02958 - 0.44565 RH_0 + 0.1215T_0 \quad (5)$$

$$y = 0.13365 + 1.93653 RH_0 - 1.77431 RH_0^2 + 0.009468 T_0 \quad (6)$$

where  $RH_0$  = relative humidity of air before drying, decimal  
 $M_{in}$  = initial grain moisture content, decimal dry basis

### *Dry matter loss(DML)*

The dry matter loss for rough rice was proposed by Seib et al (1980) and described by the following equation

$$DML = 1 - \exp[\text{TERM}] \quad (7)$$

in which

$$\text{TERM} = a \left( \frac{t}{1000} \right)^c \exp[D(1.8\theta - 28)] \exp[(E(M_w - 0.14))] \quad (8)$$

where DML = dry matter loss, decimal  
 $t$  = in-store drying time, h  
 $\theta$  = grain temperature, °C  
 $M_w$  = grain moisture content, decimal dry basis

For long grain

$$a, c, d, e = 0.001889, 0.7101, 0.0274 \text{ and } 31.63, \text{ respectively.}$$

### *Yellowness of rice kernel*

The yellowing rate of paddy was described by temperature and water activity and an empirical equation for predicting the yellowing rate was developed by Soponronnarit et al (1998) as given by

$$\frac{db}{dt} = k \quad (9)$$

$$\text{and } \ln k = 71.87 - 25.32a_w - \frac{25919.13}{T} + \frac{10712.78a_w}{T} \quad (10)$$

where  $b$  = yellowness of rice, Hunter  $b$  unit  
 $t$  = time, day

$k$  = constant value for the yellowing rate, Hunter  $b$  unit/day  
 $a_w$  = water activity, decimal  
 $T$  = temperature, K

The relationship between the rice whiteness and yellowness was followed by

$$W_h = 85.1 - 3.36 b \quad (11)$$

Where  $W_h$  = whiteness of rice

The average moisture content and the average whiteness can be determined by Equation (12) and (13), respectively.

$$\bar{M}_{av} = \frac{\int_0^L M(x) dx}{\int_0^L dx} \quad (12)$$

$$\bar{W}_{av} = \frac{\int_0^L W(x) dx}{\int_0^L dx} \quad (13)$$

Where  $\bar{M}_{av}$  = average moisture content of paddy, % wet basis  
 $\bar{W}_{av}$  = average whiteness of rice kernel, %  
 $M(x)$  = moisture content of paddy, % wet basis  
 $W(x)$  = whiteness of rice in each bed depth, %  
 $dx$  = bed depth, m

## MATERIALS AND METHODS

### Materials

FIGURE 1 shows a deep bed dryer which comprises of a drying bin (Point 1), an electric heating unit (Point 2) and an outlet air duct (Point 3). The experiments were conducted in an insulated cylindrical bin having a 0.75m diameter and a 2.75m height. The bed depth of paddy as fixed at 1.0m. Ambient air is blown through a perforated steel sheet and then into the grain bed. The outlet air is finally delivered to the atmosphere.

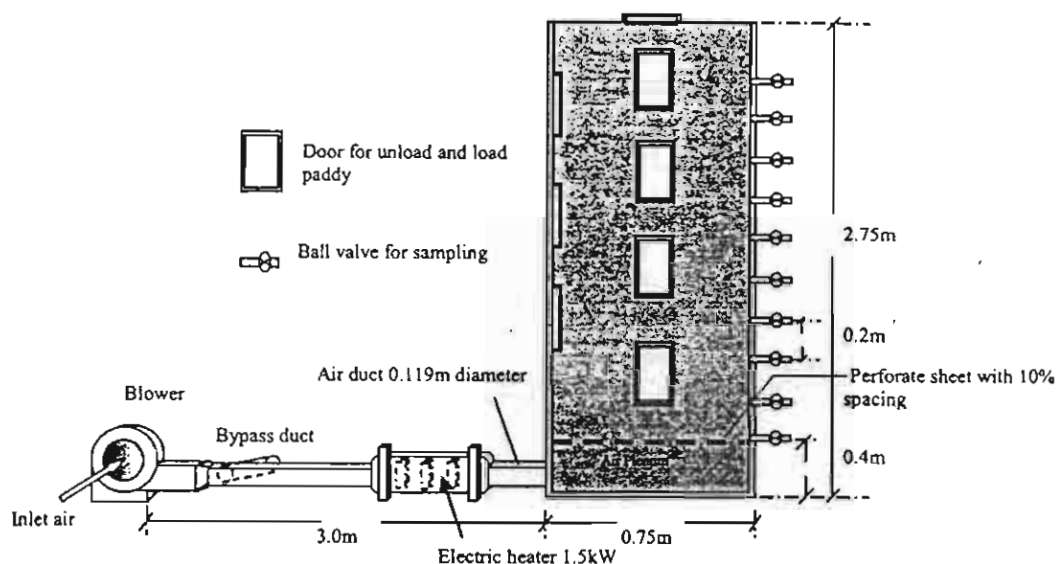


Figure 1 Illustrative diagram of in-store dryer

## Methods

### (1) Paddy drying condition

Long grain variety of paddy (Suphanburi 1) containing the amylose content of 27% was used. Paddy (moisture content of 18-20% wet basis) was rewetted by spraying water and mixed and then kept in a cold storage at the temperature of 4-8°C for a week. The desired initial moisture content for the experiments were 20.1% wet basis for experiment no.1 and 18.5% wet basis for the experiment no.2. The moisture content of paddy was determined by hot air oven at 103°C for 72 hours [AOAC (1984)]. The paddy was dried by ambient air with a volumetric flow rate of 0.93 and 0.65 m<sup>3</sup>/min-m<sup>3</sup> of paddy for experiment no.1 and the experiment no.2, respectively. During the experiments, inlet air, moisture content, grain temperature and outlet air were recorded and paddy was random taken out to determine head rice yield and whiteness of rice. The grain temperatures, dry bulb and wet bulb temperatures were measured by K-typed thermocouple, which were continuously monitored by a Yogokawa data logger with a precision of  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ .

## *(2) Quality of rice*

Head rice yield, whiteness, viscosity and texture properties and germination of paddy were determined compared to the control samples (The control paddy was dried by ambient air ventilation with 2cm thickness). The details were reported in the following item:

### *(2.1) Head rice yield*

The method of head rice yield determination followed the guideline of USDA method [USDA (1977)]. Samples, which were weighed 125g, were passed twice through a rubber roll testing husker and the resulting brown rice was whitened for 45min, using a stone type laboratory testing mill. A testing length grader with a log grain type (hole diameter of 4mm) was operated to choose the head rice kernel. Percentage of head rice yield was determined by mean of duplications. The relative head rice yield referred to the ratio of head yield obtained from the above-mentioned process to head rice yield obtained from the control samples, was presented.

### *(2.2) Whiteness of rice*

The rice whiteness was measured with a Satake milling meter by the light reflected at the surface of rice kernel before measuring, the meter was calibrated with standard pure white magnesium oxide powder.

### *(2.3) Hardness and stickiness of rice*

Hardness, stickiness of rice were determined by a Texture analyzer model TA-XT2i (Stable Micro Systems Ltd). The milled rice samples were cooked and tested individually at 20min intervals. The cooked rice sample was taken from the middle of cup and this portion ( $50\text{g} \pm 0.1\text{g}$ ) was placed 1cm equidistant from each other on the base of the Texture analyzer. The initial height of the compression probe (Ottawa cell) was set at 120mm. During compression, the test speed was 0.5 mm/s. The maximum force required to compress cooked rice to 90% of initial portion height 10mm as measured as hardness. For measuring rice stickiness, the cylindrical probe P50 was also used in this work. Their values were optional expressed in kilograms.

## *Viscosity*

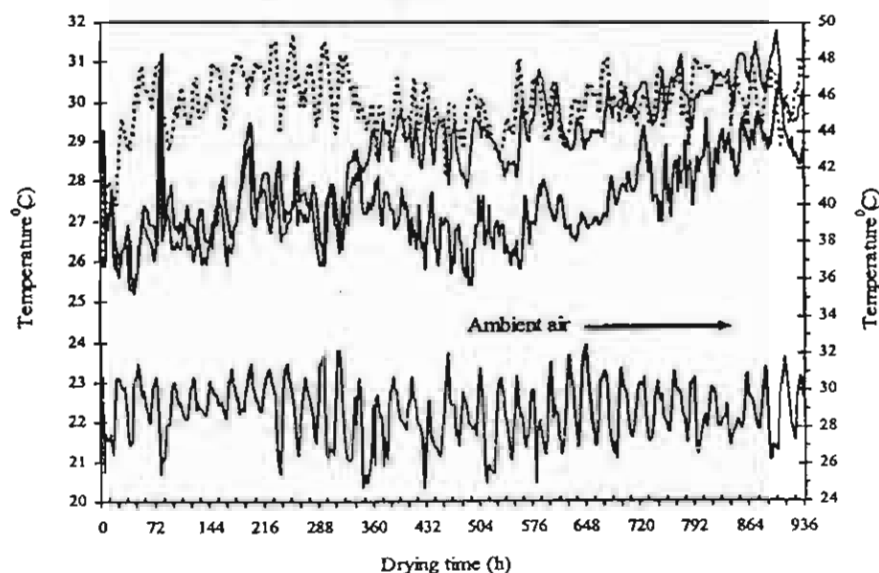
The viscosity properties of rice samples were determined using an Rapid Visco Analyzer [RVA] (Newport Scientific Pty. Ltd., Warriewood, Australia Model 3D) with Approved Method 61-02 (AACC 2000). Viscosity of flour was measured in duplicate samples as above. Those of RVA parameters except time and temperature were expressed in RVU ( $1\text{ RVU} \approx 10^{-2}\text{ cP}$ ).

Finally, the germination test of dry paddy and control paddy was done following the method of the National Rice Research Institute.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Moisture profile and Energy consumption

Figure 3 shows the evolution of temperature profile of experiment no.1 during drying periods along the bed height. The average ambient air temperature was about  $30.0^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . The experimental results were shown that evolution of temperature was changed from initial grain temperature to ambient air starting from the bottom (near inlet air duct) to the top of grain bulk. This implied that grain was dried from the bottom to top of bulk. After moisture content of grain kernel in each bed depth was reduced slightly, the grain temperature also was close to ambient air. This was because mass transfer between grain kernel and ambient air was in equilibrium state and their moisture content were equilibrium.



[Experiment no.1 ( $0.93 \text{ m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^3$  of paddy):  $M_{in}$  20.1% wet basis]

Figure 3. The evolution of temperature profile during drying

The paddy was dried from the initial moisture contents of 18.5% and 20.1% wet basis to  $14 \pm 1\%$  wet basis. Figure 4 shows the moisture profiles of experiments and predictions. Figures 4(a) and 4(c) show the moisture content at each bed depth throughout drying time for the specific flow rate of  $0.93 \text{ m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^3$  of paddy and  $0.65 \text{ m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^3$  of paddy, respectively. The results show that the predicted moisture content tends to be slightly different from the experiment value. However, both of them were the same moisture profiles.



Figures 4(b) and 4(d) intend to show the average moisture content prediction, which was included and excluded respiration effect for the calculation. More detail was presented in energy analysis as following.

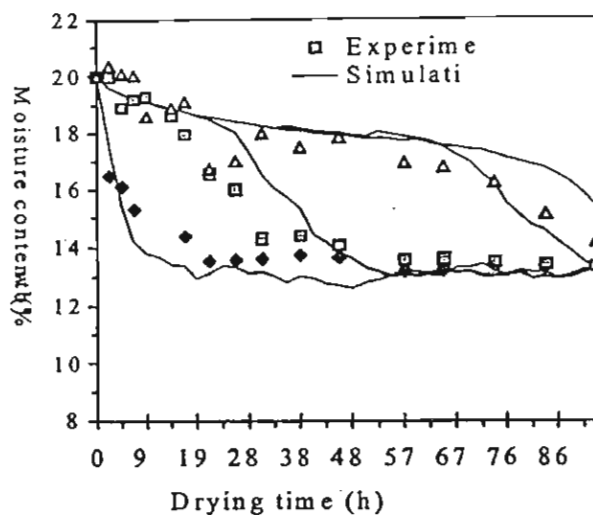


Figure 4(a). Moisture profile of paddy at bed depth of 0.05-1.0m

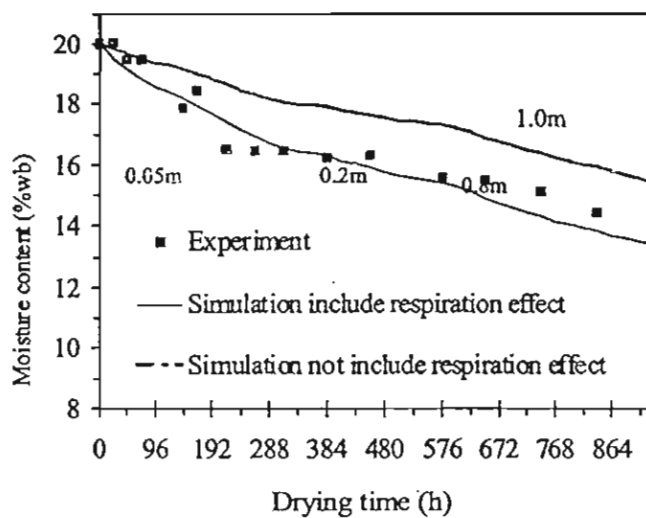


Figure 4(b). Average moisture content throughout the bed

Energy consumption reported in this work covers only the mechanical energy used for driving the fan and heat loss at the motor was negligible. Comparison of specific energy consumption between prediction and experiment was significantly different. The energy consumption of experiment no.1 and experiment no.2 were 0.97 and 2.11MJ/kg of water evaporated which was obtained from the prediction values while the energy consumption of 0.09 and 0.11MJ/kg of water evaporated was obtained from the experiments, respectively. Due to grain respiration effect, energy liberation corresponding to dry matter loss for experiment no.1 and experiment no.2 of 0.8 and 0.9%, were about 0.8 and 2.0MJ/kg of water evaporated, respectively. These amounts were used for evaporating the water and some energy loss in form of convective heat transfer. These imply the energy from respiration effect is the impartial contribution to reduce the moisture content of grain. So, the simulation with including the respiration effect shows the moisture content predictions more accurately than the excluded one. the average moisture content including respiration effect as shown in Figure 4(b) and 4(d). the respiration effect is more pronounced to moisture reduction in particularly at low airflow rate as shown in Figure 4(d), comparing to Figure 4(b).

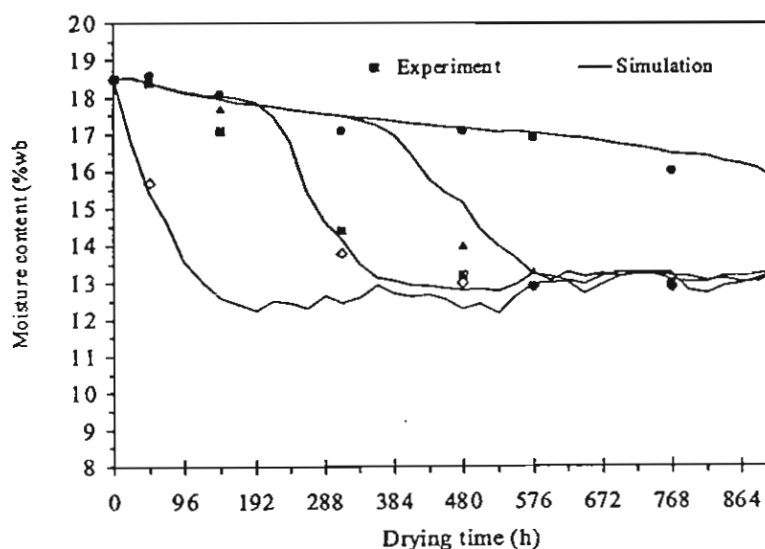


Figure 4(c). Moisture profile of paddy at bed depths of 0.05-1.0m

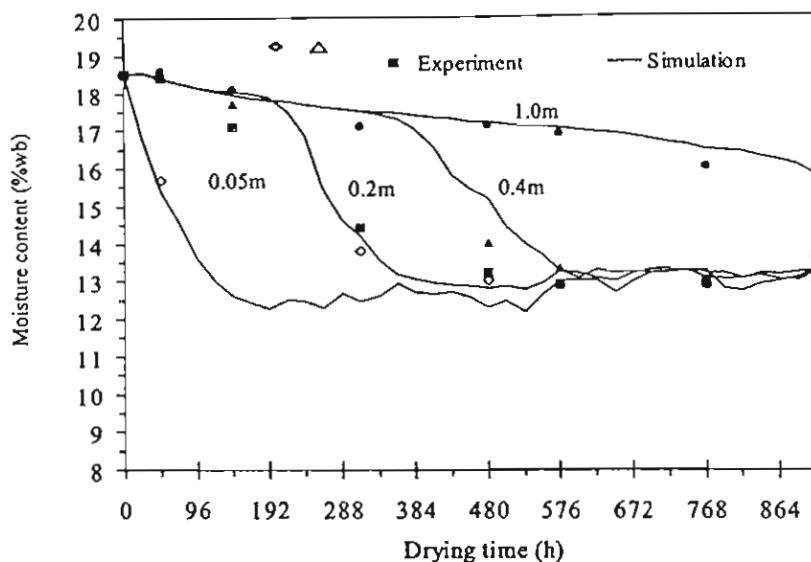


Figure 4(d) Average moisture content throughout the bed

### Paddy Qualities

#### (a) Head rice yield and whiteness value

The average initial head rice yield of the experiments was about 40. The value of relative head rice yield after drying was between 0.92-0.98. The results showed that low temperature drying insignificant effected to head rice yield.

For experiment no.1 and no.2, which initial moisture content were 20.1% and 18.5%wet basis, respectively, an average initial whiteness value of rice is 50.3 and 49.8 and after drying, the average final value of whiteness was 48.8 and 49.0 , respectively. The whiteness values of rice were shown in FIGURE 5 (a) and 5(b). FIGURE 5 only shows one of evolution of rice whiteness during drying time at bed depth of 0.05m and 0.8m for experiment no.1. The results showed that an experimentally determined rice whiteness values at the higher levels was slightly higher than these at lower bed levels.

Both of experiments, these values were in good agreement between predictions and experiments. It implied that the higher bed depth of rice was, more yellowing was. The moisture content at lower bed height of paddy bulk was more transferred rapidly than moisture content along the higher bed height. This was concluded that drying rate at the lower bed height was higher than that at the higher bed height. This was corresponding to previous work

which studied on effect of high water activity and high temperature on yellowing of rice [Yap et al (1988); Soponronnarit et al (1998)]. However, for experiment no.2, the paddy at high bed depth of 0.8-1.0m was infected by fungi thus the rice samples got more yellowing and damage so that its prediction became relatively lower was [The results was not shown as graph for this paper].

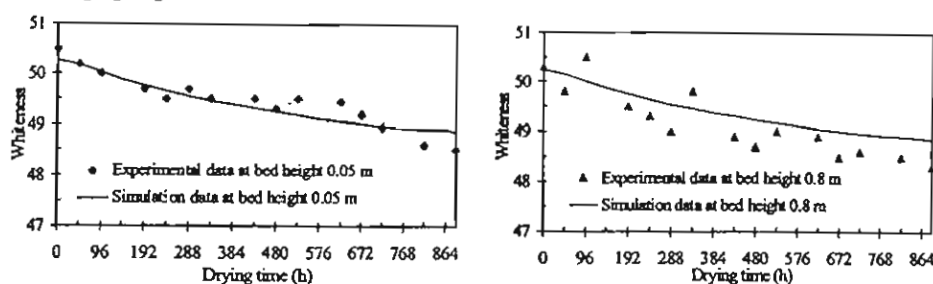


Figure 5(a) Whiteness of rice at bed depth 0.05 m      Figure 5(b) Whiteness of rice at bed depth 0.8m

Experiment no.1 ( $M_m$  20.1% w.b.:  $M_f$  14% w.b.:  $0.93 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$  of paddy)

Figure 5. The evolution of whiteness of rice during drying period

Table 1 shows the amylose content determination and germination test. The comparison chemical properties between control rice and dry rice showed that it was not significant different in amylose content.

For the experiments, the germination test showed that they were insignificant different. These results could be concluded that in-store drying by ambient air ventilation was not affected the head rice yield and the germination.

Table 2 shows the physical quality and physico-chemical quality of dried rice compare to control rice. Hardness and stickiness value of control rice and dried rice as shown in Table 2, the hardness value was increased when the stickiness was decreased. This was because of aging of rice. However, the stickiness was not measured in experiment no.1. The stickiness value in experiment no.2 was determined by using P50 cylinder probe type. The experimental result was concluded that the stickiness of dry rice is slightly decreased comparing to the control rice.

#### (b) Viscosity

From the physical and physico-chemical quality were shown in Table 2, they indicated that rice after drying were changed in hardness, stickiness and viscosity. The increased changes of the hardness after drying as above mention were supported and correlated to RVA testing in terms of final viscosity increasing as shown in Table 2. This is because rice after drying was tightly

packed with polygonal granules and spherical shaped protein bodies and these results were the same phenomena as previous work (Juliano 1985; Imprasis and Noomhorm 2001; Zhou et al 2002).

Table 1. Change of amylose content and germination test of Suphanburi-1

rice variety dried using in-store dryer

Drying strategy	Amylose (% wet weight)	Germination test (%)
Control rice EXP-1	26.1	92.5
After drying EXP-1	28.6	93.1
Control rice EXP-2	27.1	94.5
After Drying EXP-2	27.7	94.9

Table 2. Physical quality and physico-chemical quality of Suphanburi-1 rice variety dried on in-store dryer

D r y i n g strategy	Hardness (kg)	Stickiness (kg)	Peak viscosity (RVU)	Final viscosity (RVU)	Relative Head rice yield
Control rice EXP-1	16.66±4.25	-*	293.33	380.50	1
After drying EXP-1	23.87±5.28	-*	304.58	389.67	0.92
Control rice EXP-2	16.14±1.89	-0.11± 0.04	246.58	286.01	1
After Drying EXP-2	22.84±3.43	-0.07± 0.06	266.81	311.47	0.94

\* no data

## CONCLUSIONS

1. The deep bed paddy drying using ambient air temperature has no a significant effect on the average yellowing of rice kernel.
2. The grain drying model including the yellowing kinetics can suitably be described the drying kinetics and rice whiteness in the deep bed drying.
3. The simulation including the respiration effect shows the more accurate moisture predictions than that excluding one and the energy from respiration effect is an impartial contribution to reduce the moisture content of grain. So, the in-store drying technique is low energy consumption process.
4. The in-store drying technique using ambient air ventilation is slightly affected the physical qualities physico-chemical qualities of rice.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors wish to express their sincere thanks to the Thailand Research Fund (TRF). The authors also thank to the Japanese International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS) for financial support and the Institute of Food Research and Product Development (IFPRD) at Kasetsart University, Thailand for testing of rice qualities.

## REFERENCES

- Agrawal, Y.C. and R.P. Singh, 1977. Thin-Layer Drying Studies on Short-Grain Rough Rice. ASAE Paper No.77-3531, ASAE, St.Joseph, MI.
- AOAC, 1984. Official Methods of Analysis, 14<sup>th</sup> edition, Washington, D.C, Association of Official Analytical Chemists.
- Bakker-Arkema, F.W., W.G. Bickert and R.V. Morey, 1967. Simultaneous Heat and Mass Transfer during the Process of Deep Bed Drying of Grain (translated). Landtechnische Forschung, 17(6), 175-180.
- Barre, H.J., G.R. Baughman and M.Y. Hamdy, 1971. Application of the Logarithmic model to cross-flow deep-bed drying. Trans. Of the ASAE, 14(6), 1061-1064.
- Bason, M.L., P.W. Gras, H.J. Banks, and L.A. Esteves, 1990. A Qualitative Study of the Influences of Temperature, Water Activity and Storage Atmosphere on the Yellowing of Paddy Endosperm. J. of Cereal Science, 12, 193-201.
- Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema, and C.W. Hall, 1974. Drying Cereal Grain. AVI Publishing, Chinsakolthanakorn, S., 1986. A study of In-Store Drying of Rough Rice (3<sup>rd</sup> phase) "Energy Consumption Grain Quality and Mathematical Model Improvement. MSc. Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Thailand, 96 pages.
- Chung, D.S., B. Kanuyoso, I. Erickson and C.H. Lee, 1985. Grain aeration and in-store drying in U.S.A. ACIAR Proc. No.15, Preserving grain quality by aeration and in-store drying. Australian Center for International Agricultural Research, Canberra.
- Gras, P.W. and M.L. Bason, 1989. Biochemical Effects of Storage Atmospheres on Grain and Grain Quality. ACIAR Proceeding No.25, Fumigation and Controlled Atmosphere Storage of Grain, 83-91.
- Gras, P.W., H.J. Banks, M.L. Bason and L.P. Arriola, 1989. A Qualitative Study of the Influences of Temperature, Water Activity and Storage Atmosphere on the Yellowing of Milled Rice. J. of Cereal Science, 9, 77-89.
- Henderson, S.M., 1952. A basic concept of Equilibrium. Agri.Eng., 33, 29-31.

- Hukill, W.V., 1947. Basic principles in drying corn and grain sorghum. *Agricultural Engineering*, 28(8), 335-338, 340.
- Imprasit, C. and A. Noomhorm, 2001. Effect of Drying Air Temperature and Grain Temperature of Different Types of Dryer and Operation on Rice Quality, *Drying Technology*, 19(2), p. 389-404.
- Juliano, B.O., 1985. *Rice: Chemistry and Technology*, ed., 774 pages.
- Nathakaranakule, a. and S. Soponronnarit, 1991. Comparative Study of Mathematical Models of Corn Drying. *The Kasetsart J.*, 25(3), 345-357.
- Phillips, S., R. Mitfa and A. Wallbridge, 1989. Rice Yellowing during Drying Delays. *Journal of Stored Products Research*, 25, 155-164.
- Preechakul, P. and S. Soponronnarit, 1986. Paddy and Quality. *Thai Agricultural Engineering Journal*. October-December.
- Quitco, R.T., 1982. Studies of Fungal Infection and Heating of Paddy. *Proc. GASGA Semin, Paddy Deterioration in the Humid Tropics*,
- Baquio, 1981, Philippines, 52-56, GTZ, Eschborn. Seib, P.A. *et al.*, 1983. Spoilage of rough rice as measured by carbon dioxide evolution. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Annual Workshop on Grain Post-Harvest Technology*, Kuala Lumpur, Jan.29-30.
- Soponronnarit, S., 1988. Energy Model of Grain Drying System., *ASEAN J. on Sci. and Tech. for Dev.*, 5(2), 43-68.
- Soponronnarit, S. and S. Chinsakolthanakorn, 1986. Energy Consumption Patterns in Drying Paddy by Various Drying Strategies. *Proc. Of the Regional Seminar on Alternative Energy*, Chiang Mai, Thailand, 27-29 Oct.
- Soponronnarit, S., 1987(a). Strategies for Drying Paddy under Tropical Climates, Paper presented at the Consultative Workshop on Grain Drying and Rice Milling in ASEAN, Hyatt Central Plaza Hotel, Bangkok, 24-27 Nov, 1987.
- Soponronnarit, S., 1987(b) Drying in Bulk Storage of High Moisture Grains in the Kingdom of Thailand, Final report submitted to Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, 1987.
- Soponronnarit, S. and S. Chinsakolthanakorn, 1990. Effect of Heat and Water from Respiration on Drying Rate and Energy Consumption. *ASEAN Journal for Science and Technology for Development*, 7, 65-83.
- Soponronnarit, S. and A. Nathakaranakule, 1990. Field Experience of In-store Drying of Paddy under Tropical Climates. *Proc. 13<sup>th</sup> ASEAN Seminar on Grain Postharvest Tech.*, Brunei Darussalam, 4-7 Sep., 183-196.
- Soponronnarit, S. and P. Preechakul, 1990. Experiments on In-Store and Batch Drying of Paddy : Quality of Product *Kasetsart University Science Journal*, 24 367-388 (in Thai).
- Soponronnarit, S., 1987a. Strategies for drying paddy under tropical climates. Paper presented at the Consultative Workshop on Grain Drying and

- Rice Milling in ASEAN, Hyatt Central Plaza Hotel, Bangkok, 24-27 November.
- Soponronnarit, S., 1987 b. Drying in Bulk Storage of High Moisture Grains in the Kingdom of Thailand. Final report submitted to Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra.
- Soponronnarit, S., 1988. Energy Model of Grain Drying System, ASEAN J. on Science and Technology for development, 5(2), 43-68.
- Soponronnarit, S., N. Srisubati and T. Yoovidhya,, 1998. Effect of Temperature and Relative Humidity on Yellowing Rate of Paddy. J.Stored Prod. Res., 34(4), 323-330.
- Thompson, T.L., R.M. Peart and G.H. Foster, 1968. Mathematical Simulation of Corn Drying-a New Model. Transaction of ASAE, 11(4), 582-586.
- Thompson, T.L., 1972. Temporary Storage of High Moisture Shelled Corn Using Continuous Aeration. Transaction of ASAE, 15(2), 333-337.
- Yap, A.B., B.O. Juiliano and C.M. Perez, 1988. Artificial Yellowing of Rice at 60°C. Proceeding Group, The Source of Yellow Grains in Rice, Myc. Centralbl, 3, 153-157.
- Zhou, Z., K. Robards, S. Helliwell and C. Blanchard, 2002. Ageing of Stored Rice: Changes in Chemical and Physical Attributes. J. of Cereal Science, 35, 65-78.



## QUALITY ASSESSMENT OF DRIED SHRIMP USING TWO - STAGE SUPERHEATED STEAM AND HEAT PUMP DRYERS

Yuvanaree Namsanguan<sup>1</sup>, Warunee Tia<sup>1</sup>, Sakamon Devahastin<sup>2</sup>  
and Somchart Soponronnarit<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Energy and Materials and <sup>2</sup>Department of Food Engineering  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Suksawat 48 Rd., Bangkok 10140, Thailand  
E-mail: yuvanaree@yahoo.com

### ABSTRACT

*The purpose of the present study was to investigate strategies for two-stage drying. This work concerned on the drying of shrimp using superheated steam dryer followed by heat pump dryer (SSD/HPD) both from heat/mass transfer and quality points of view. The moisture contents exited from the superheated steam dryer varied between 30% and 40% (w.b.). Shrinkage, color, rehydration behavior and texture of dried shrimps were determined in this study. The laboratory experiments were carried out in the two different stages of SSD/HPD. The first-stage superheated steam drying was performed at a drying temperature of 140°C while the second-stage heat pump drying was operated at 50°C. The results indicate that shrimp dried using SSD/HPD has even better quality than dried in SSD alone; SSD/HPD dried shrimp has much lower degree of shrinkage, higher degree of rehydration, better color and softer. In addition to the two-stage drying of SSD/HPD, the drying of shrimp using superheated steam dryer followed by hot air dryer (SSD/AD) was investigated. Laboratory experiments were conducted by changing the second-stage dryer from heat pump dryer (HPD) to hot air dryer (AD) that operated at the same drying air temperature as HPD. The results show that SSD/AD gives redder and softer shrimp similar to SSD/HPD dried shrimp but no improvement in terms of shrinkage and rehydration behavior was observed*

**Keywords.** color; hybrid drying; rehydration behavior; shrinkage

### INTRODUCTION

Drying is one of the oldest methods for food preservation. Thermal damage incurred by a product during drying is directly proportional to the temperature and time involved. Conventional hot air drying at high temperature often

causes loss in product quality, while at low temperature it takes longer drying time and causes higher energy consumption. Heat pump drying has been used for solving this main problem with advantages of low temperature drying, higher drying rate and high energy efficiency. However, various techniques have been developed to achieve the more effective dehydration such as variable temperature drying. Freeze drying can be applied to reduce thermal damage and produce products with excellent structural retention but it is a costly process and is only suitable for high-value products. Freeze drying also cause major losses of volatile flavors (Flink 1975) and involves long drying time. Hybrid drying techniques have therefore become very interesting. Strommen 2001, for example, presented a new heat-pump drying technology for drying frozen fruits and vegetables. The final products obtained using this technique have very low bulk densities and high porosity. The color and taste of the products are also favorable due to the low temperature used. The two-stage drying is also an alternative for improving the quality of dried products. Combined, for example, superheated steam and heat pump drying has high potential for improving the quality of the final dried products as well as energy consumption due to enhanced drying rates. Superheated steam drying can produce many large pores (Seyed-Yagoobi et al. 1999) with high drying rate in the first stage, and then heat pump drying followed could maintain the shape and preserve the color of product.

In this work, shrimp was dried in a two-stage superheated steam and heat pump dryer. The boiling of shrimp prior to drying (in order to deactivate microbial growth) was eliminated due to the use of superheated steam as the drying medium in the first stage of drying and the product also tasted better due to lack of nutritional loss during the boiling process, as suggested by Prachayawarakorn et al. 2002. The effects of operating conditions in two different and separated stages on the drying characteristics and quality of dried shrimp, in terms of shrinkage, color, texture and rehydration behavior, were investigated.

## MATERIALS AND METHODS

Raw shrimp (Penaeidae) was washed and dipped in NaCl solution (2% w/v) at room temperature for 30 minutes before drying. One kilogram of raw shrimp was used for each drying test and was placed proportionally on three wire screens. The weight of shrimp was measured by digital balance instrument (an accuracy of = 0.1 gram) every 15 minutes during drying. This work was operated separately in SSD, HPD and AD units. For comparison, experiments were performed using the three different drying processes (SSD, SSD/HPD and SSD/AD). An SSD unit used in the experiments consisted of a steam generator, a steam superheater rated at 13.5 kW, a  $0.3 \times 0.3 \times 0.1 \text{ m}^3$

- Iyota, H., Nishimura, N., Onuma, T. and Nomura, T. 2001. Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air. *Drying Technology*, 19 (7):1411-1424.
- Chua, J.K., Mujumdar, A.S., Chou, S.K., Hawlader, M.N.A and Ho, J.C. 2000. Convective drying of banana, guava and potato pieces : effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change. *Drying Technology*, 18(4&5):907-936.
- Posomboon, W. 1998. Processing effect on quality of dried shrimp. Master of Engineering Thesis, Agricultural Engineering Program. Bangkok, Thailand: Asian Institute of Technology.

## เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก APPROPRIATE TECHNIQUE FOR PADDY DRYING

สมชาติ โสภณธนฤติ  
Somchart Soponronnarit

ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์ ประเภทวิทยาศาสตร์ประยุกต์; ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Fellow of the Royal Institute, Academy of Science, Professor, School of Energy and Materials, King  
Mongkut's University of Technology Thonburi, Suksawat 48 Road, Bangkok 10140.

บทคัดย่อ : บทความนี้กล่าวถึงความเสียหายของข้าวเปลือกซึ่งหลังจากการเก็บเกี่ยว สาเหตุและแนวทางการแก้ไขปัญหานี้  
เป็นระบบ โดยเริ่มตั้งแต่การเป่าอากาศแวดล้อมเข้าในกองข้าวเปลือกขึ้น เพื่อระบายความร้อนในขณะที่ยกยอการอบแห้ง ซึ่ง  
เป็นการอบแห้งแบบสองระยะ ได้แก่ การอบแห้งอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ตามด้วยการอบแห้งอย่างช้า ๆ ในช่วงที่สอง และ  
การเป่าอากาศแวดล้อมเข้าในกองข้าวเปลือกเป็นระยะ ๆ หากว่าต้องการเก็บรักษาเป็นระยะเวลาหลาย ๆ เดือน

**Abstract :** This paper describes damage of moist paddy after harvesting, affecting factors and  
systematic approach for solving the problem. The solutions include aeration of ambient air through  
moist paddy bulk during the waiting period for drying, two-stage drying, i.e., fast drying in the first  
stage, followed by slow drying in the second stage and intermittent aeration of ambient air through the  
paddy bulk if it is necessary to store the paddy over several months.

**Conclusion :** Strategy for managing moist paddy is recommended as follows:

1. Moist paddy should be ventilated with ambient air during waiting period for drying with low air  
flow rate,  $0.35 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$  of paddy.
2. Then moist paddy should be dried rapidly during the first stage with hot air until moisture content is  
reduced to 18-19% wet basis. It is recommended to use fluidization technique due to fast drying  
rate, simple use and low cost.
3. From then intermediate moisture paddy should be dried slowly during the second stage until  
moisture content is reduced to 14% wet basis. It is recommended to use technique of ambient air  
drying in storage due to low cost and high grain quality. Recommended air flow rate is  $0.5-1.0$   
 $\text{m}^3/\text{min-m}^3$  of paddy. Or the intermediate moisture paddy is dried in traditional dryer with proper  
rate of drying.
4. If dried paddy is stored over several months, it should be ventilated from times to times in order to  
reduce accumulated heat in the paddy bulk. It is recommended to ventilate about 3 hours a week.

คำขอบคุณ : ผู้เขียนใคร่ขอบคุณหน่วยงานต่าง ๆ ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยเรื่องนี้อย่างต่อเนื่อง ได้แก่ สำนักงานกองทุน  
สนับสนุนการวิจัย Australian Centre for International Agricultural Research และกองส่งเสริมเทคโนโลยี กระทรวงวิทยา  
ศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

**Keywords :** dehydration, fluidization, grain, strategy

*Paper presented at the 26<sup>th</sup> Congress on Science and Technology in Thailand, Bangkok, Thailand, 18-20 Oct 2000*

# เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก

ศาสตราจารย์ ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์

คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

## ผลงานวิจัยโดยสรุป

ผลงานวิจัยหลักเกี่ยวข้องกับพลังงานทดแทน โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน เทคโนโลยีการอบแห้ง เน้นที่เมล็ดพืชและอาหาร ตัวอย่างหัวข้องานวิจัยที่สำคัญ ได้แก่ การอบแห้งข้าวเปลือก ข้าวโพดและถั่วเหลือง โดยวิธีฟลูอิดซ์เบดและ สเตาเต็ดเบด การพัฒนาเตาเผาแบบกลบแบบไฮโคลน การอบแห้งผักและผลไม้โดยใช้ฮีทปั๊ม การอบแห้งผักและผลไม้โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งและเก็บรักษาข้าวเปลือกในฉางเก็บ การชะลอความเสียหายของข้าวเปลือกขึ้น ทั้งนี้ได้พยายามเน้นด้านคุณภาพของผลงานวิจัย โดยตีพิมพ์ผลงานในวารสารนานาชาติที่มีผู้ตรวจรอบจำนวน 38 เรื่อง ในขณะที่เดียวกันก็ได้เน้นความร่วมมือกับภาคอุตสาหกรรมเพื่อขยายผลงานวิจัยไปใช้งานจริง ผลงานที่ประสบความสำเร็จได้แก่ เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดซ์เบดและเตาเผาแบบไฮโคลน ได้รับความนิยมนำไปใช้ในประเทศและยังมีการส่งออกไปยังหลายประเทศด้วย เทคนิคการอบแห้งและเก็บรักษาข้าวเปลือกภายในฉางเก็บ ได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรมโรงสีข้าวผสมแอม และเครื่องอบแห้ง แบบฮีทปั๊ม เริ่มผลิตขายและใช้ในวงการอุตสาหกรรมอบแห้งผักและผลไม้

บทความนี้กล่าวถึงความเสียหายของข้าวเปลือกขึ้นหลังการเก็บเกี่ยว สาเหตุและแนวทางการแก้ไขปัญหาอย่างเป็นระบบ โดยเริ่มตั้งแต่การเป่าอากาศแวดล้อมเข้าในกองข้าวเปลือกขึ้น เพื่อระบายความร้อนในขณะที่คอยการอบแห้ง ซึ่งเป็นการอบแห้งแบบสองระยะ ได้แก่ การอบแห้งอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ตามด้วยการอบแห้งอย่างช้าๆ ในช่วงที่สอง และการเป่าอากาศแวดล้อมเข้าในกองข้าวเปลือกเป็นระยะๆ หากว่าต้องการเก็บรักษาเป็นระยะเวลาหลายๆ เดือน

## บทนำ

ในปี พ.ศ. 2536 ประเทศไทยผลิตข้าวเปลือกได้ 18.15 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าที่เกษตรกรขายได้ 67,000 ล้านบาท ส่งออกในรูปของข้าวสาร 32.915 ล้านบาท ผลิตกันต์จากข้าว 1.750 ล้านบาท ผลผลิตเฉลี่ย 348 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับผลผลิตทั่วโลก ผลิตข้าวโพดได้ 3.33 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าที่เกษตรกรขายได้ 9,219 ล้านบาท ผลผลิตเฉลี่ย 475 กิโลกรัมต่อไร่ (ข้อมูลจาก Agricultural Statistics in Brief Crop Year 1993/94)<sup>1</sup>

เนื่องจากความนิยมในการใช้รถเก็บเกี่ยวและนวดข้าวในด้วเก็บเกี่ยวอย่างรวดเร็ว ทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นค่อนข้างสูง ประมาณ 20-28 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก เป็นผลให้เกิดความเสียหาย ที่สำคัญได้แก่ เมล็ดข้าวสารเปลี่ยนเป็นสีเหลือง (ข้าวฟันทน) และเปอร์เซ็นต์ข้าวตันหลังการสีมีค่าต่ำ

สาเหตุสำคัญที่ทำให้เมล็ดข้าวสารเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ได้แก่ ความร้อนภายในกองข้าวเปลือกขึ้นที่อับอากาศ ความร้อนซึ่งเกิดจากการหายใจของเมล็ดพืชเอง และจากจุลินทรีย์ต่างๆ ที่เจริญเติบโตได้ในช่วงความชื้นสูง ส่วนสาเหตุที่ทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันหลังการสีมีค่าต่ำ ได้แก่ การลดความชื้นอย่างไม่ถูกวิธี เช่น อบแห้งด้วยลมร้อนด้วยอัตราการลดความชื้นที่ค่อนข้างสูง การตากบนลานคอนกรีต

การแก้ไขปัญหาทั้งสองนี้ทำได้โดยการขจัดสาเหตุ เรื่องแรกทำได้โดยการเป่าอากาศแวดล้อมเข้าในกองข้าวเปลือก เพื่อระบายความร้อนออกจากกอง ส่วนการรักษาเปอร์เซ็นต์ข้าวตันให้มีค่าสูงนั้น ทำได้โดยการอบแห้งให้ถูกวิธี เช่น จะต้องเลือกอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้ง อัตราการไหลของอากาศ และช่วงเวลาของการอบแห้งในแต่ละครั้งให้เหมาะสม เทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกภายในฉางเก็บรักษาโดยการเป่าอากาศแวดล้อม ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันมีค่าสูงเมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งอื่นๆ วิธีนี้จะได้นำกล่าวในรายละเอียดต่อไป

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะเสนอแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาข้าวเปลือกขึ้น แนวทางดังกล่าวได้รับการพิสูจน์แล้วในทางอุตสาหกรรมว่าใช้ได้ผลดี ประกอบด้วย การเป่าอากาศแวดล้อม เพื่อระบายความร้อนออกจากกองข้าวเปลือกขณะที่รอคิวการอบแห้ง การอบแห้งระยะที่ 1 โดยใช้อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศสูง และการอบแห้งระยะที่ 2 โดยใช้อากาศแวดล้อมเป่าเข้าไปในกองข้าวเปลือกภายในฉางเก็บรักษา

## เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่มีใช้กันอยู่ภายในประเทศ

จากการสำรวจ<sup>2</sup> พบว่าใน พ.ศ. 2535 มีเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกจำนวน 117 เครื่อง ใน 17 จังหวัด มีกำลังการผลิตรวม 7,045 ตันต่อวัน และพบว่ามีจำนวนโรงสีข้าวขนาดใหญ่จำนวน 736 โรง และตลาดกลางในแหล่งผลิตข้าวจำนวน 9 แห่ง มีไม่ถึงร้อยละ 15 ที่มีเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก ในเวลานี้เข้าใจว่าส่วนใหญ่ใช้เครื่องอบแห้งกันแล้ว

เครื่องอบแห้งแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. แบบเป็นวงวน (Batch) ใช้กับระดับเกษตรกร ไม่เหมาะกับอุตสาหกรรม คาดว่าไม่มีใช้งานในบ้านเรา
2. แบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Grain Flow) ที่นิยมใช้กันในบ้านเรา ได้แก่ แบบเมสสิพิทไหลขวางกับกระแสอากาศ ซึ่งเป็นแบบหนึ่งของแบบเมสสิพิทไม่คลุกเคล้า และแบบเมสสิพิทคลุกเคล้ากันในขณะที่ไหล บางครั้งเรียกว่าแบบ LSU

หากให้มีการไหลเวียนของข้าวเปลือกจากตรงทางออกกลับเข้าไปในเครื่องใหม่ มักเรียกเครื่องอบแห้งแบบนี้ว่า แบบเป็นวงวนหมุนเวียน ซึ่งมักมีความจุของถัง 6-10 ตัน โดยเฉลี่ยแล้วมีกำลังผลิตประมาณ 1 ตันต่อชั่วโมง (ลดความชื้นได้ประมาณ 6 จุด) สำหรับเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่กว่านี้ มีกำลังผลิตประมาณ 4-6 ตันต่อชั่วโมง (ลดความชื้นได้ประมาณ 6 จุด)

เชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องอบแห้งได้แก่ แกลบ น้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา ซึ่งอาจนำแก๊สร้อนจากการเผาไหม้มาใช้โดยตรงหรือโดยอ้อม หรือนำมาใช้ผลิตไอน้ำ โดยเฉพาะกับเชื้อเพลิงราคาถูก เช่น แกลบและน้ำมันเตา

## เทคนิคใหม่สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก

ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคนิคใหม่สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก โดยเฉพาะกับประเทศไทย เทคนิคดังกล่าวได้แก่

1. การอบแห้งข้าวเปลือกภายในฉางเก็บรักษา
2. การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคหญ้าไคเซกัน

### การอบแห้ง ข้าวเปลือกภายในฉางเก็บ<sup>3</sup>

การอบแห้งเมสสิพิทในฉางเก็บ หมายถึง การอบแห้งเมสสิพิทในฉางหรือโรงคลุมที่ใช้ในการเก็บรักษา โดยที่ไม่มีการเคลื่อนย้ายเมสสิพิทระหว่างหรือหลังการอบแห้ง โดยทั่วไปมักมีท่อลมและพัดลมเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจะทำหน้าที่เป่าอากาศแวดล้อมเข้าไปในกองเมสสิพิท ขณะที่อากาศผ่านกองเมสสิพิท จะเกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้น เมสสิพิทจะมีระดับความชื้นและอุณหภูมิลดลง ทำให้ไม่เกิดความเสียหาย ความชื้นเริ่มต้นของเมสสิพิทไม่ควรสูงกว่า 18 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ในกรณีของการอบแห้งข้าวเปลือก พบว่ามีข้อดีคือเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งทั่วไป นอกจากนี้เมสสิพิทข้าวสาลียังมีสีขาวปรกติด้วย

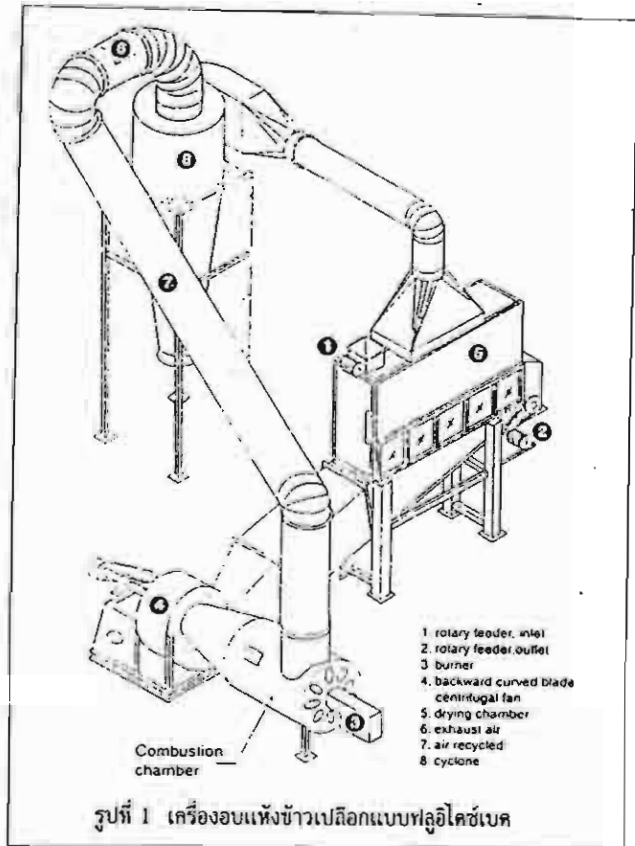
ค่าใช้จ่ายของการอบแห้งเมสสิพิทในฉางเก็บมีแนวโน้มว่าต่ำกว่าของเครื่องอบแห้งหลายๆ แบบ จากประสบการณ์ของโรงสีกิดศักดิ์วัฒนา อำเภอสายาย่าง จังหวัดนครปฐม พบว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นเฉลี่ย 19-20 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถแห้งจนเหลือความชื้นประมาณ 14-15 เปอร์เซ็นต์ได้โดยการเป่าอากาศแวดล้อมภายในเวลาประมาณ 1-1.5 เดือน โดยเป่าอากาศเฉพาะในช่วงเวลากลางวัน โรงคลุมมีขนาดความจุ 3,000 ตัน ใช้พัดลมกับตัวมอเตอร์ขนาด 12 kW จำนวน 6 ตัว ทำให้ฟ้าประมาณ 12 บาท ต่อตันข้าวเปลือก สำหรับโรงคลุมพื้นคอนกรีตสามารถออกแบบท่อลมให้อยู่ใต้พื้น ด้านบนของท่อปิดด้วยแผ่นเหล็กเจาะรูขนาดเล็กสามารถวิ่งบนพื้นคอนกรีตได้ ทำให้สะดวกในการขนย้ายเมสสิพิท ส่วนฉางไม้ยกพื้นหรือฉางที่มีพื้นเดิมอยู่แล้ว ควรออกแบบท่อลมวางอยู่บนพื้นฉาง หากเก็บรักษาเมสสิพิทเป็นเวลาหลายเดือน กองเมสสิพิทจะร้อนได้ เมสสิพิทที่อยู่ชั้นบนๆ อาจเสียหาย สามารถแก้ไขได้โดยการเป่าอากาศอาทิตย์ละครั้งละ 3 ชั่วโมงก็เพียงพอที่จะระบายความร้อนออกจากกองเมสสิพิท

### การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซน 3.4.5

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไอเซนมีความสามารถในการอบแห้งค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของเครื่องอบแห้ง นอกจากนี้ ความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งจะมีความสม่ำเสมอ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซนเหมาะกับเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงมากกว่า 23 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกขึ้นไป ความชื้นของเมล็ดพืชขณะไหลออกจากเครื่องไม่ควรต่ำกว่า 18 เปอร์เซ็นต์เพราะจะทำให้ข้าวมีโอกาสแตกหักมาก ถ้าในขณะนั้นใช้อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ ยังจะทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงกว่าปกติด้วย ช่วงอุณหภูมิของอากาศที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 120-150°C

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไอเซนประกอบด้วย หัวเผาเซลหรือเตาถ่าน ห้องเผาไหม้ ห้องอบแห้ง ไซโคลนและกะลอลัดข้าวเปลือก (ดูรูปที่ 1)

**หลักในการทำงาน** ข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงจะถูกบังคับให้ไหลผ่านเครื่องทำความสะอาด เพื่อแยกแกลบหรือสิ่งปนขนาดใหญ่ และจะถูกส่งไปยังถังพัก แล้วไหลเข้าห้องอบแห้งโดยใช้ชุดป้อนข้าวเปลือกเป็นตัวส่งออก จากนั้นข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะถูกกะลอลัดขึ้นไปยังที่สูง เพื่อส่งไปเก็บในสถานที่ที่ต้องการ อากาศบริเวณรอบๆ เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกจะถูกดูดให้ไหลเข้ามาผสมกับแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล แล้วผสมกับอากาศซึ่งหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ในห้องผสมอากาศ โดยมีพัดลมเป็นตัวดูดและเป่าเข้าห้องอบแห้ง อุณหภูมิของอากาศจะถูกควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิ (thermostat) ซึ่งจะไปควบคุมการทำงานของหัวเผาเซล อากาศที่ออกจากห้องอบแห้งไหลผ่านไซโคลนเพื่อดักเอาแกลบและฝุ่นผงออก อากาศส่วนน้อยจะถูกปล่อยทิ้ง ขณะที่อากาศส่วนมากซึ่งยังคงร้อนอยู่ไหลไปผสมกับแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ต่อไป



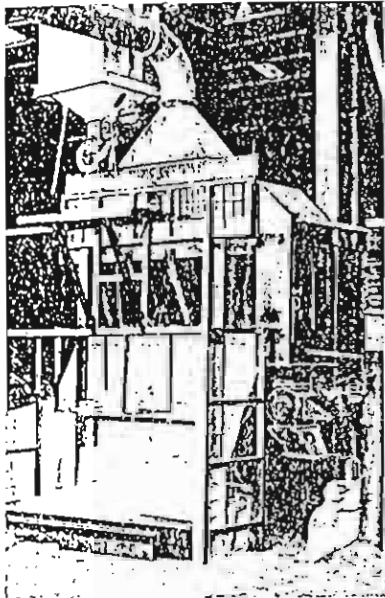
ผลจากการเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งที่ใช้ลมร้อนโดยทั่วไปพบว่า เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซนสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิงและไฟฟ้าต่ำกว่า ค่าไฟฟ้าและค่าน้ำมันดีเซลรวม 0.53 บาทต่อตันโลกหรือน้ำที่ระเหย<sup>6</sup> สามารถใช้งานได้ง่ายกว่า นอกจากนี้การสรางประกอบเครื่องก็ทำได้ง่ายกว่าด้วย จวบจนปัจจุบันได้มีการผลิตขายใน 8 ประเทศ รวมจำนวนกว่า 100 เครื่อง<sup>7</sup> ถ้าเงื่อนไขการอบแห้งเหมาะสม คือ อุณหภูมิและความชื้นของเมล็ดข้าวเหมาะสม การอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซนยังให้ผลพลอยได้คือ ทำให้ข้าวต้นมีปริมาณเพิ่มขึ้น คาดว่าคงเกิดการเชื่อมติดกันของเมล็ดแป้งอันเนื่องมาจากอุณหภูมิและความชื้นของเมล็ดข้าวที่เหมาะสม ได้มีการทดสอบคุณภาพการหุงต้มแล้ว พบว่ามีคุณภาพเช่นเดียวกับกรณีของการอบแห้งโดยทั่วไป<sup>8</sup>

### แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก

เกณฑ์การพิจารณาสำหรับใช้ในการศึกษาแนวทางการอบแห้งข้าวเปลือกที่เหมาะสม คือ

1. คุณภาพข้าวเปลือก ซึ่งแยกได้เป็นความขาวของข้าวสาร และเปอร์เซ็นต์ข้าวตันหลังการสี
2. ค่าใช้จ่าย ซึ่งแยกได้เป็นค่าใช้จ่ายคงที่และค่าใช้จ่ายแปรผัน การที่เครื่องมือกำลังการผลิตสูง จะทำให้ค่าใช้จ่ายคงที่ลดต่ำลง การเลือกเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมและ/หรือเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมจะช่วยลดค่าใช้จ่ายแปรผันลง

ในการแก้ปัญหาความเสียหายของข้าวเปลือกขึ้นนั้น ต้องเริ่มดำเนินการนับตั้งแต่ข้าวเปลือกขึ้นเข้ามาคอยคิวการอบแห้ง ซึ่งอาจรอเป็นเวลาหลายชั่วโมงหรือหลายวัน ข้าวเปลือกความชื้นสูงจะเสียหายได้ง่ายภายในเวลาไม่กี่วัน โดยข้าวสารจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง



เนื่องจากความร้อนที่ปลดปล่อยจากการหายใจของเมล็ดพืชและจุลินทรีย์ต่างๆ การแก้ปัญหาสามารถทำได้ง่ายโดยการระบายอากาศ แวดล้อมเข้ากองข้าวเพื่อลดอุณหภูมิลง จากผลการทดสอบขึ้นต้นพบว่าสามารถใช้อัตราการไหลของอากาศที่ค่อนข้างต่ำ  $0.35 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^3$  ของข้าวเปลือก เพื่อชะลอความเสียหายของข้าวเปลือกขึ้นที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกได้นานกว่า 1 เดือน อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาในรายละเอียดให้มากกว่านี้ ทั้งนี้เพื่อที่จะได้เลือกอัตราการไหลของอากาศ และช่วงเวลาเป่าอากาศ ที่เหมาะสม

เมื่อข้าวเปลือกพร้อมที่จะเข้ากระบวนการอบแห้ง ควรทำการอบแห้งอย่างรวดเร็วโดยใช้ลมร้อน โดยให้ความชื้นลดลงเหลือ ประมาณ 18-19 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก แล้วจึงลดความชื้นลงอย่างช้าๆ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าที่ระดับความชื้นประมาณ 18-19 เปอร์เซ็นต์ ข้าวเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้นเทียบกับอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นข้าวจะเริ่มแตกร้าวหรือเปลี่ยนเป็นสีเหลืองได้ง่าย

ในการลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างรวดเร็วในช่วงแรกนั้น สามารถทำได้โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่อาจมีความเหมาะสมกว่าในแง่ของค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า และการใช้งานง่ายกว่า หากใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไอบด

ในการลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างช้าๆ ในช่วงที่สองจากความชื้นประมาณ 19 เปอร์เซ็นต์เหลือ 14 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำได้โดยเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเช่นกัน โดยการลดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง แต่อาจมีความเหมาะสมกว่าหากใช้เทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกภายในฉางเก็บรักษาโดยใช้อากาศแวดล้อมในแง่ของค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า และเปอร์เซ็นต์ข้าวคั่วที่สูงกว่า (5-1 เปอร์เซ็นต์) อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง  $0.5-1.0 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^3$  ข้าวเปลือก ความสูงของกองข้าว ประมาณ  $3-5 \text{ m}^{11,12}$  ถ้าใช้อัตราการไหลของอากาศที่สูงกว่านี้อาจทำให้สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้าเกินความจำเป็น ควรเป่าอากาศเฉพาะในช่วงเวลากลางวันเท่านั้น

เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกภายในฉางเก็บรักษาแล้วเสร็จและหากต้องการเก็บรักษาไว้นานหลายเดือน อาจทำการเป่าอากาศแวดล้อมเป็นระยะ เช่น เป่าอากาศอาทิตย์ละครั้งๆ ละประมาณ 3 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ความร้อนอันเกิดจากการหายใจของข้าวเปลือก และช่วยให้อุณหภูมิของกองข้าวเปลือกสม่ำเสมอ ทำให้ลดการไหลเวียนของอากาศโดยธรรมชาติภายในกองข้าวเปลือกได้

## สรุป

แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาข้าวเปลือกขึ้นรูปได้ดังนี้

1. เป่าอากาศแวดล้อมด้วยอัตราการไหลต่ำๆ เข้าภายในกองข้าวเปลือก ในขณะที่รอคิวการอบแห้ง อัตราการไหลของอากาศที่แนะนำประมาณ  $0.35 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^3$  ข้าวเปลือก
2. ลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างรวดเร็วในช่วงแรกโดยใช้ลมร้อนจนความชื้นเหลือประมาณ 18-19 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก



เครื่องอบแห้งสำหรับการลดความชื้นในช่วงแรกนี้น่าจะเป็นเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายต่ำ อบแห้งได้รวดเร็วและใช้งานง่าย

3. ลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างช้าๆ ในช่วงที่สอง จากความชื้นประมาณ 18-19 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐาน เปียกเทคนิคการอบแห้งในช่วงนี้น่าจะเป็นการอบแห้งข้าวเปลือกภายในฉางเก็บรักษาโดยใช้อากาศแวดล้อม เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายต่ำ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูง อัตราการไหลที่แนะนำประมาณ  $0.5-1.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$  ข้าวเปลือก และควรเป่าอากาศเฉพาะช่วงเวลากลางวันเท่านั้น หากโรงสีไม่มั่นใจนโยบายในการเก็บรักษาข้าวเปลือก เทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกภายในฉางเก็บรักษาอาจไม่สามารถนำมาใช้ได้ การลดความชื้นในช่วงที่สองสามารถทำได้โดยใช้เครื่องอบแห้งที่ให้ความร้อนทั่วไป แต่ควรปรับอุณหภูมิให้ลดต่ำลงเพื่อป้องกันข้าวแตกข้าว

4. หากเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นระยะเวลาหลายเดือนควรเป่าอากาศแวดล้อมเข้ากองข้าวเป็นระยะๆ อาจจะ 3 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ เพื่อให้ความร้อนออกจากกองและทำให้อุณหภูมิในกองสม่ำเสมอ

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอบคุณหน่วยงานต่างๆ ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยเรื่องนี้อย่างต่อเนื่อง ได้แก่ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย Australian Centre for International Agricultural Research และกองส่งเสริมเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

ขอขอบพระคุณมูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ได้มอบรางวัลอันทรงเกียรติ คือ รางวัล "นักวิทยาศาสตร์ดีเด่น" ประจำปี พ.ศ. 2543 ให้แก่ข้าพเจ้า ซึ่งจะเป็ความกำลังใจที่สำคัญในการดำเนินงานวิจัยของข้าพเจ้าและเพื่อนร่วมงานวิจัยอย่างมุ่งมั่นสืบไปในอนาคต และขอขอบคุณฝ่ายนิเทศสัมพันธ์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ในการรวบรวมแก้ไขและจัดทำภาพประกอบบทความนี้

## เอกสารอ้างอิง

1. Anon. Agricultural Statistics in Brief Crop Year 1993-94. Center for Agricultural Statistics, Office of Agricultural Economics, Ministry of Agricultural and Co-operatives, Bangkok, 1995.
2. ยรรพ พุกทอง และ จรัญ ลิขิตรัตนพร. สถานภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทย. รายงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 18-20 พฤษภาคม 2537.
3. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. การอบแห้งเมล็ดพืช. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ. 2537. หน้า 384.
4. Soponronnarit S and Prachayawarakorn S (1994) Optimum strategy for fluidized bed paddy drying. *Drying Technology - An International Journal* 12(7): 1667-86.
5. Soponronnarit S, Sripawatakul O and Prachayawarakorn S (1996) Development of cross-flow fluidized bed paddy dryer. *Drying Technology - An International Journal* 14(10): 2397-110.
6. Soponronnarit S, Yapha M and Prachayawarakorn S (1995) Cross-flow fluidized bed paddy dryer: prototype and commercialization. *Drying Technology - An International Journal* 13 (8&9): 2207-16.
7. Soponronnarit S (1999) Fluidized bed paddy drying. *Science Asia* 25(1): 51-6.
8. Taweerattanapanish A, Soponronnarit S, Weichacama S, Kongseri N and Wongphachon S (1999) Effects of drying on head rice yield using fluidization technique. *Drying Technology - An International Journal* 17(1&2): 345-54.
9. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ เทวชา ปริชากุล. การทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบในถังเก็บและแบบเป็นมัด: คุณภาพผลิตภัณฑ์. วิทยาสารเกษตรศาสตร์ (วิทย์.) 2533: 24: 367-77.
10. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, ไพโรจน์ วงศ์โรจน์ธนา, อติศักดิ์ นาสภณกุล และ สมชาย ฉันทกลอนกร. การรักษาคุณภาพข้าวเปลือกโดยการเป่าอากาศอย่างเหมาะสม. วารสารราชบัณฑิตยสถาน. ฉบับผนวก สำนักวิทยาศาสตร์ 2537: 3: 51-66.
11. Soponronnarit S, Wongvirojana P, Nathakarnmakul A and Chinsakolkhanakorn S (1994) Maintaining paddy quality by appropriate ventilation under tropical climates. *Proc. 9th International Drying Symposium, Gold Coast, Australia*

รายงานการประชุมวิชาการวิชาการประจำปี 2544  
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2544

IN-STORE DRYING TECHNIQUE IN TROPICAL REGION

Somkiat Prachayawarakorn<sup>1</sup> and Somchart Soponronnarit<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering <sup>2</sup> School of Energy and Materials

King Mongkut's University of Technology Thonburi

Suksawat 48 Road, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอความก้าวหน้างานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งในที่เก็บสำหรับประเทศ ในแถบร้อนชื้น โดยกล่าวถึงการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเมล็ดพืชในถังเก็บ และเสนอแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับระบบการอบแห้งโดยเทคนิคนี้โดยมุ่งเน้นไปที่คุณภาพของเมล็ดพืชและประสิทธิภาพของการใช้พลังงานสำหรับระบบอบแห้งชนิดนี้ การติดตั้งตัวกวนและการใช้อากาศแวดล้อมในการอบแห้งจะส่งผลให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและลดความแตกต่างของความชื้นภายในภายในถังเก็บ พร้อมกันนี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดี อย่างไรก็ตามเมื่ออากาศอยู่ในสภาวะที่ไม่เอื้ออำนวยอย่างมากต่อการอบแห้ง อากาศที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้งมีความจะเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย ปัญหาสำคัญในด้านของคุณภาพข้าวเปลือกสำหรับอากาศในเขตร้อนชื้น ได้แก่ การเกิดสีเหลืองของข้าว ข้าวเต็มเมล็ด และการสูญเสียมวลแห้ง เป็นต้น จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ ระดับของความชื้นเริ่มต้น และอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้คุณภาพของข้าวเปลือกลดลง

คำสำคัญ: คุณภาพเมล็ดพืช / การอบแห้งในที่เก็บ / แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ABSTRACT

This report has reviewed some works on in-store drying technique in tropical region. The mathematical models and drying strategy are reviewed with main interest focusing on the grain quality and energy efficiency. Installing stirrers and using natural airflow provide advantageously the effective energy utilisation and the reduction of moisture gradient in the bin together with maintaining grain quality. Slightly supplemental heat is indispensably necessary for the worst weather conditions. Initial moisture levels, relative humidity and temperature are the main cause of grain deterioration in terms of head rice yield, dry matter loss and the yellowing of paddy.

Key words: grain quality / in-store drying / mathematical model

1. Introduction

The drying generally refers to a process of removal of moisture existing inside the product in which the convective air drying is often used. The approach of convective drying for grain may conceptually be considered as a continuous grain flow and a fixed bed grain. Both techniques have the advantages and disadvantages. The types of continuous grain flow frequently found in the area of grain drying are, for example, cross-flow dryer, mixed flow dryer (Giner et al., 1998) and fluidized bed dryer

(Soponronnarit et al., 1997b). The illustrations of mixed flow and fluidized bed dryers are shown schematically in Figures 1a and 1b, respectively. Such typical dryers commonly use high air velocity and high temperature for removing moisture at high level, thereby obtaining high drying capacity. However, when used with grain possessing very low initial moisture contents, they provide very less efficient performance in terms of drying efficiency, particularly the fluidised bed dryer which largely consumed the thermal energy more than 10 MJ/ kg water evaporated (Soponronnarit et al., 1998b) for reducing moisture content of corn from 21.1% dry-basis to 14.2% dry-basis.

However, the "in-store" drying technique known as the fixed bed grain drying may compromise such a cause. Figure 1c represents the in-store drying system, showing that the drying system is not very complicated and mainly composed of bin, heater and ventilation system. This technique has many advantages such as easy handling, effective heat utilisation, less mechanical equipment and low stress cracking if low drying temperature is used. Besides, it had a potential capability in storing agricultural products for a long period without deterioration of quality (Amatachaya et al., 1997 and Soponronnarit et al., 1997a) after their moisture contents reached to acceptable level for safe storage. This was accomplished by ventilating the ambient air about 2 or 3 hours a week through the grain bulk to remove heat being generated by the respiration of grain. The disadvantage of this technique is that it may particularly be applied with low inlet temperature and low airflow rate in order to avoid high-pressure drop and lost the weight due to high moisture gradient in the grain bed. Drying will therefore be taken more than a week if the initial moisture content of grain is very high. This may consequently result in a serious problem of quality aspect. To obtain the superior quality and the efficient heat utilisation, the drying should be divided into two stages (Szczepnicki and Driscoll, 1995).

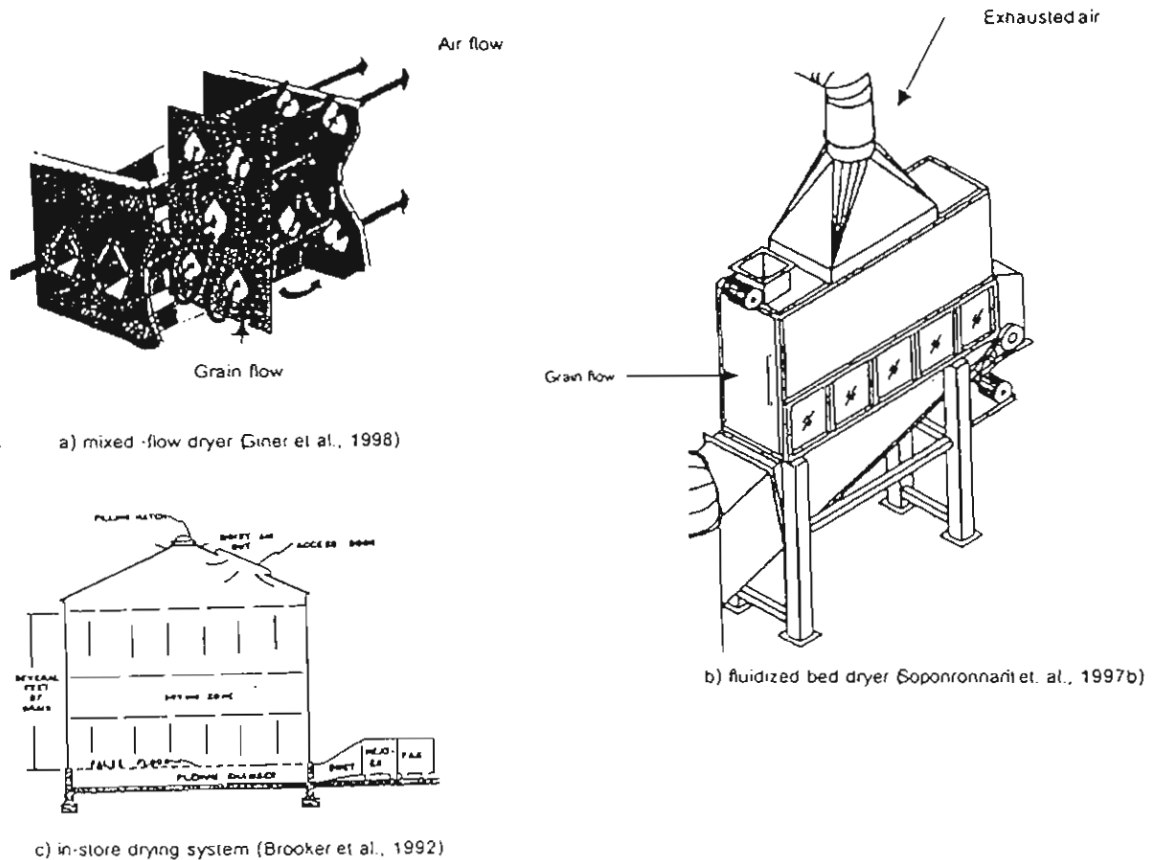


Figure 1 Some typical types of

At first, grain should be dried as fast as possible in order to reduce the moisture content from its harvest, usually between 20% wet-basis and 25% wet-basis, down to a moisture level at which rate of respiration and activity of micro-organism are relatively low. At such range, moisture is almost concentrated near the grain surface so that it can be transferred rapidly if high air temperature is utilised. After the completed process of first stage drying, grain is transported to a storage, in which grain is to be dried using lower air temperatures. Soponronnarit et al. (1995) recommended for the second period that the acceptable level of initial moisture content for agricultural products, which can be dried safely without changing quality, should not be higher than 20% wet-basis. At this stage, the removal of moisture inside the grain is very difficult since transport of moisture is extremely controlled by the nature of chaotic voids inside the grain, leading to the great reduction of drying rate. The slow drying in the bin, although the moisture content of grain is relatively high, may play an important role in grain deterioration, both the yellowing and the dry matter loss, especially in the area of hot and humid conditions at which the micro-organisms and grain activity perform proficiently. Many workers have become increasingly interest in the study of how the operating parameters for in-store drying technique and the weather conditions affect the grain quality and the decrease of moisture content. In this review paper, we report some progresses of in-store drying technique in the tropical countries.

## 2. Mathematical Model

The drying of moist grain in the fixed bed is a complicated process relating to the phenomena of heat and mass transfers. The moisture of grain bulk in the bin may change largely following the bed height; moisture content of grain is low at the bottom near the inlet air whereas it is high at the top. This consequently causes grain deterioration. In order to understand deeply such phenomenon, the mathematical model is needed to explain how the operating parameters, such as temperature, airflow rate and capacity, affect the removal of moisture throughout the grain bulk. In addition, the model should be able to predict the energy consumed over the drying period. In the simulation of an one-dimensional deep-bed dryer, the grain bed is divided into thin layers; the model is solved for each layer by considering the outlet conditions of one layer to be the inlet conditions for the next one. After the model is solved for all layers, the moisture content and the air conditions along the grain bed depth are obtained.

The deep-bed grain drying models can normally divided into two categories, non-equilibrium and equilibrium model.

### 2.1 Non-Equilibrium Model

Brooker et al. (1992) was proposed the non-equilibrium model in which the drying air and a thin layer grain at any arbitrary location in the bed do not exist the equilibrium. The detailed non-equilibrium model consists of the following equations:

#### 2.1.1 For enthalpy of air

$$\frac{\partial T}{\partial x} = [ha/(G_a c_a + G_a c_v W)](T - \theta) \quad (1)$$

where

$T$	= air temperature
$x$	= distance
$h$	= convective heat transfer
$a$	= particle surface area per unit bed volume
$G_a$	= flux of drying air flowing through the bed
$c_a$	= specific heat of dry air
$c_v$	= specific heat of water vapour
$W$	= humidity ratio
$\theta$	= grain temperature

From the equation (1) the energy transferred by convection from the drying air to the grain is equivalent to the difference of enthalpy of air flowing in and out the thin layer grain considered in a small volume.

#### 2.1.2 For enthalpy of grain

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = [ha/(\rho_p(c_p + c_w M))](T - \theta) + [(h_{fg} + c_v(T - \theta))/(\rho_p(c_p + c_w M))]G_a \partial W / \partial x \quad (2)$$

where  $\rho_p$  = grain density

$c_p$	= heat capacity of dried grain
$c_w$	= heat capacity of liquid water
$h_g$	= latent heat
$M$	= moisture content of grain

This equation interprets the amount heat transferred by convection from air to the grain bed corresponding to the enthalpy of grain using for heating the grain kernel and for evaporating the water inside the grain.

### 2.1.3 For humidity ratio of air

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -(\rho_p/G_a) \partial M / \partial t \quad (3)$$

where  $\partial M / \partial t$  = single kernel equation which can be determined from the experiment. This equation shows that the evaporated water carried by the air is equal to the moisture lost by the grain kernels in the thin layer grain considered.

## 2.2 Near Equilibrium model

Thompson (1972) originally modified the non-equilibrium model to simply calculate the moisture and temperature changes along the bed depths by assuming the thermal equilibrium conditions existing between the grain and drying air in each thin layer grain during a small interval of drying time, resulting in grain temperature similar to drying temperature. Similarly, Soponronnarit (1988) modified slightly the Thompson's model by taking into accounts the dry matter loss, temperature risen by fan and energy consumption. The main equations developed by Soponronnarit (1988) are as follows:

### 2.2.1 For Enthalpy Change In the Thin Bed

From the first law of thermodynamics, the sum of changes between the internal energy of a thin layer at any bed level and the enthalpy of inlet and outlet airs is equal to zero. The conservation equation can thus be written as

$$C_g T_o + W_o (2502 + c_w T_o) + R T c_{pw} \theta_o = c_g T_f + (2502 + c_w T_f) W_f + R c_{pw} T_f \quad (4)$$

where  $W_o$  = humidity ratio before entering a thin layer  
 $T_o$  = temperature before entering a thin layer  
 $c_{pw}$  = heat capacity of moist grain  
 $\theta_o$  = grain temperature of thin layer  
 $T_f$  = outlet temperature from the thin layer  
 $W_f$  = outlet humidity ratio from the thin layer  
 $R$  = ratio of dry grain mass to dry air mass

### 2.2.2 For humidity ratio of air

The amount of moisture removed from any thin layer bed being regarded is equivalent to the change of humidity ratio of flowing air. This can be expressed as the following equation:

$$W_t - W_o = (M_o - M_t)R \quad (5)$$

where  $M_o$  and  $M_t$  are moisture contents of grain before and after drying at time  $t$ . These values can be calculated from the single kernel equation.

### 2.2.3 Temperature rise by fan

Although temperature increases a few degrees, it is very important to improve the accuracy particularly when using ambient air ventilation. Such temperature rise is caused by the increased static pressure of fan. This equation is simply given by

$$c_p \Delta T_f = P / \rho_a E_f \quad (6)$$

where  $\Delta T_f$  = temperature difference across the fan

$P$  = pressure drop

$E_f$  = efficiency of fan

Figure 2 shows the evolution moisture content at various bed levels using air flow rate  $14.83 \text{ m}^3/\text{min-m}^2$  and temperature  $54.5\text{--}58.4^\circ\text{C}$  (Nathakaranakule and Soponronnait, 1991), indicating that the large gradients of moisture content, particularly at longer drying time, are found starting from high moisture contents at the top laid down to low moisture contents at the bottom. The non-equilibrium model can predict the results closer than the near equilibrium one. When using higher airflow rates, the near equilibrium model predicted the moisture content largely different from the experiments. In spite of its limitation, the near equilibrium model is preferably used in drying simulation of in-store drying system since the running time is shorter and the model is not so complicated. Jindal et al. (1996) was developed the software for simulation of grain drying in deep beds based on the near equilibrium model. However, with the recent advance of powerful computing, the non-equilibrium model may be applicable due to no any limitation.

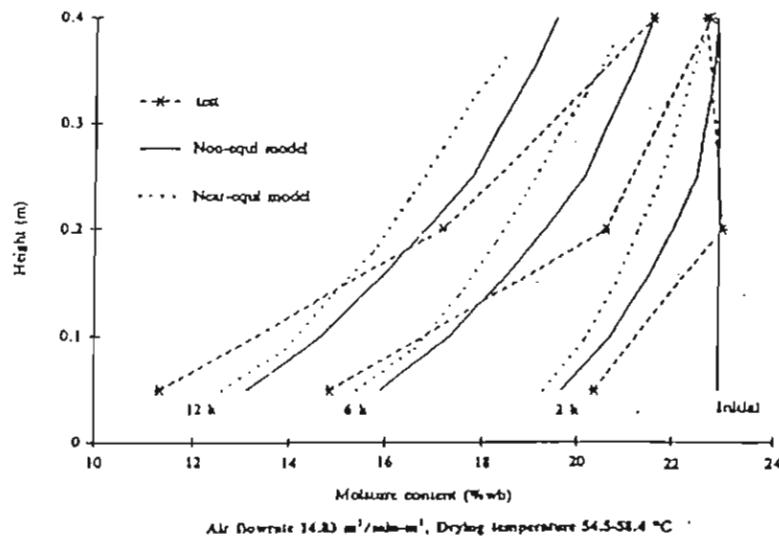


Figure 2 Comparisons of predicting moisture content between non-equilibrium and near equilibrium models (Nathakaranakule and Soponronnait, 1991)

Soponronnarit et al. (1995) employed the near equilibrium model to establish the charts in order to facilitate in designing in-store drying system for which both intermittent and continuous air ventilation are regarded. The important criterion used for obtaining the design charts for paddy was that the dry matter loss should not be higher than 0.5 or 0.75%. These values are certainly safe for acquiring an acceptably preferred quality of paddy.

Dry matter loss is an index indicated whether the dried grain has a good quality or not. If its value is high, it means the mass of grain would be lost significantly. It is dependent strongly on the time, temperature and moisture content. The dry matter loss equation for paddy developed by Seib et al. (1980) is calculated as followed:

$$DML = 1 - \exp(-TERM) \quad (7)$$

Where  $TERM = A(V/1000)^C \exp[D(1.8\theta - 28)] \exp[E(M_w - 0.14)]$

$t$  = elapse time

$\theta$  = grain temperature

$M_w$  = moisture content of paddy

$A, C, D$  and  $E$  = constant

When dry matter loss equation was included in the deep-bed drying model, its prediction approached the experimental results (Soponronnarit et al., 1995). These are clearly indicated in Figure 3, showing that the model included heat from the respiration predict satisfactorily in particular at the top layer in which it is dried latest whilst the prediction from the model excluding the respiration effect deviates largely. In contrast, when the initial moisture content is relatively lower than 18% wet-basis, the respiration effect will not be pronounced notably due to low activity of respiration, thus calculating the reduced moisture content from such two cases insignificantly different.

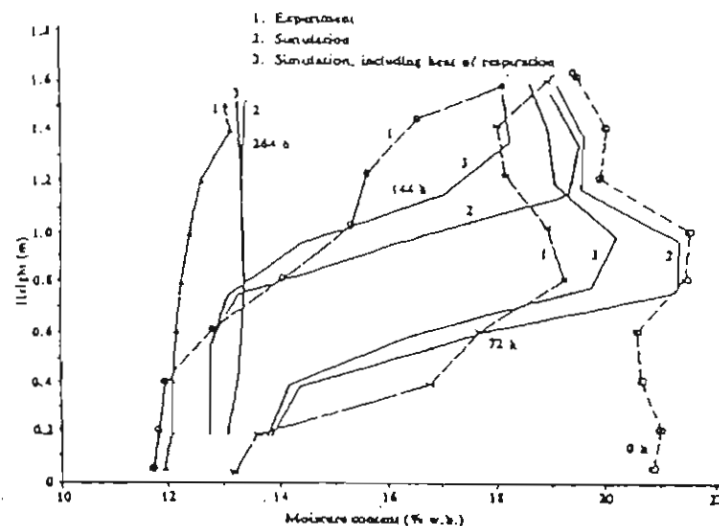


Figure 3 Accuracy of model in predicting moisture content (Soponronnarit et al., 1995)



### 3. In-Store Drying Strategy

Works on in-store drying have been intensively interested in finding the appropriate ways in which can conserve the energy consumption and minimise the moisture gradient in the bin. Installing a stirrer in the natural-air dryer allows the relative improvement of the drying performance. By vertically mixing grain in a bin, stirrer can simultaneously decrease the overdrying at the bottom layers that are the first ones to be contacted with drying air and the spoilage chance on the top when compared to the system with no stirrer. So far, it has more potential capability in reducing the drying time, electric-energy use. The lower airflow rate might subsequently be obtained with large energy savings 83.1% for 20% wet-basis initial moisture content of corn and 51.5% for 24% wet-basis moisture content (Wilcke and Bern, 1986).

The use of ambient air for in-store drying process offers much better both grain quality and energy efficiency than that of high temperature. The ambient-air drying uses a fan to ventilate ambient air through the bin. Heat from the fan is added to the air stream providing a small increase in temperature and increasing relatively a capability of air in removing the grain moisture content. The powerful success of such an approach depends on decreasing the grain moisture content so quickly enough that the significant deterioration does not occur. Airflow is therefore very important. Fan management strategies for continuous humidistat and time-clock controlled operation were investigated by Morey et al. (1979) and Szrednicki (1995). The influences of different management techniques on the performance obtained by low-temperature drying were studied by means of computer simulations and experiments (Lynch and Morey, 1989; Shove, 1983-1984; Morey and Peart, 1971; Soponronnarit and Chinsakolthanakom, 1990). Previous tests were shown that grain could be dried safely for storage under certain conditions without significant mass losses or changes in quality. Furthermore, the important factors affecting the drying time, energy consumption and equipment cost were the initial moisture, the grain bed depth, the airflow rate and the temperature and relative humidity of the ambient air.

Similarly, Cheigh et al. (1985) studied in-bin drying of paddy with ambient air under Korean weather conditions. The results was shown that it was possible to dry paddy to safe storage conditions within 5 to 17 days with no deterioration quality, depending upon the initial moisture contents of grain (19.2%-25.5% wet-basis), the bed depths (1.1-3.5 m) and the airflow rates ( $3.0-6.9 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$  of paddy). Besides, the energy requirement was considerably lower comparing to the conventional high-temperature drying. However, for lower initial grain moisture content of 20% wet-basis, the use of low airflow rate provided the energy utilisation relatively more effective than that of high airflow rate in spite of using longer drying time (Soponronnarit, 1988). In addition, Soponronnarit et al. (1995) also suggested that in hot and humid conditions, the ambient airflow should be used between  $0.5-1.0 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$  of paddy and the bed depth allowed to be varied from 3 to 4 m. Such conditions can only be applied for paddy possessing initial moisture contents between 18% and 19% wet-basis. Beside that, in order to save economically the energy consumption, the air should be ventilated only when the relative humidity was not higher than 75%, corresponding to paddy moisture equilibrium between 14 and 15% wet-basis (Laytong, 1987). However, if the ventilated air with the property of relative humidity higher than 75% is flown through the grain layer, then some proportions of paddy which had already dried to low moisture

contents will adsorb the moisture from the air stream, thereby causing seriously lower strength of grain, higher yellowing and rapid growth of micro-organisms (Yap et al., 1988 and Phillips et al., 1989, Kunze, 1995). In order to prevent such a situation, the slightly supplemental heat may essentially be required and this is certainly sure that the grain quality can be maintained although it encounters the worst weather condition.

#### 4. Grain Quality

The preferred grain quality achieved after the final stage of moisture removal does not depend only on the drying approach, but also on the previous grain history, such as harvesting conditions, grain varieties and transportation. Different grain products possess different quality standards. The general quality applicable to a wide range of grain types is the dry matter loss, as previously mentioned. This factor can be determined by measuring the amount of carbon dioxide produced, assuming the respiration process has been considered principally as the complete oxidation of carbohydrates into carbon dioxide and water vapour (Steele et al., 1970; Seib et al., 1980).

However, for paddy, the important criteria to characterise the quality to be preserved during drying process are the head rice yield and the colour, besides the dry matter loss. The head rice yield, defined as the rice having the long grain size as 8/10 of the fully complete grain, is reasonably sensitive to condition of drying process and is usually employed in evaluating the success or failure of paddy drying system. Numerous factors are influence to head rice yield. In tropical region, the paddy is harvested at average moisture content between 20% wet-basis and 25% wet-basis, relying on the harvesting methods and the paddy varieties. In general, harvest at higher moisture levels provided effectively a high yield of head rice, giving a maximum head rice yield at moisture content of 24-25% wet-basis (Chinsakolthanakorn, 1987; Suwansathit, 1989), due to the fact that the paddy rarely experiences the processes of rewetting and drying occurring repeatedly in the field. In addition, it is also relatively dependent on the paddy variety in which the medium and short grain usually provided higher head rice yields than the long grain variety (Brooker et al., 1992).

Besides such factors, the effect of tropical environmental conditions on head rice yield during milling is also important. The head rice yield decreased relatively from 3.5% to 1.6% for increased temperature of 20-35 °C at 40%, 60% and 80% relative humidities, respectively (Noomhorm and Yubai, 1991). The highest head rice yields ranging from 55.3 up to 56.0% were obtained at 70-80% relative humidities corresponding to the 20-25°C temperature range. The cause of reducing head rice yield during milling conditions can be explained by the fact that the dried grain adsorbs moisture from the air stream to which it was exposed (Kunze, 1995), hence the grain responds dynamically and physically to moisture change in its environment. Moisture adsorbed through the grain surface causes the starch cells to expand and produce compressive stresses. Since the grain is free body, the compressive stress is balanced with the opposite tensile strength of the grain at its centre. When the compressive stress is higher than the tensile strength of the grain, a fissure develops, leading to the grain breakage during the milling.

Such a phenomenon of grain adsorption can also be happened during stored grains in particular on the top. This is due to the temperature gradients in grain bulk giving rise to moisture migration. However, the temperature gradients in the bulk when the grain was stored at lower temperatures were less severe than when stored at higher temperatures, hence the natural convection was not remarkable and the air stream then carried less moisture from the warm regions of the grain storage to the cooler surfaces (Griffith, 1964). Properly ventilating air through the grain bulk can discourage the moisture migration. Soponronnarit et al. (1997a) studied the field trial of in-store drying and storage using ambient temperature and airflow rate of  $0.57 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$  of paddy. During experiment, the weather conditions were average temperature of  $27.7^\circ\text{C}$  and relative humidity of 67%. In their work, the paddy was dried initially at moisture content of 17% wet-basis down to 11.6% wet-basis within 9 weeks and then followed with storage period for 19 weeks. In the period of storage, the air ventilation was taken twice a week. Paddy qualities obtained in terms of colour and head rice yield were still acceptable when compared to reference sample.

For rapid drying process, Kunze (1995) explained the cause of head rice yield reduction during the removal of moisture owing to the fact that the convective drying technique produces a steep moisture gradient inside the grain. As the gradient reduces after drying, the grain surface receives moisture from the interior and expands, whilst the grain interior loses moisture and contracts. As this combination of stresses, that is compressive at the surface and tensile at the centre, develops with time, the grain fails in tension by pulling itself apart at its centre. The head rice yield is therefore decreased. Such phenomenon was not occurred at end of drying period but it took place after drying: a certain time interval after drying was necessary before the fissures developed (Kunze, 1979). This also can be logically described why we do not operate grain milling immediately after the paddy is dried.

In the fixed bed drying system, the drying rate is usually not very high, resulting in insignificant change of head rice yield. Srihawong (1988) recommend for this system that to maintain the head rice yield throughout the bed, the inlet temperature should not be higher than  $49^\circ\text{C}$  for reducing moisture content from 19-20% wet-basis to 14% wet-basis.

Another quality index of great commercial importance, which is used as the criteria of considering the price, besides the head yield, is the rice yellowing. If the rice has intense yellow, the price would be dropped noticeably. The yellowing is frequently found in the areas where the weather has humidity and temperature relatively high. Rice yellowing is therefore a major problem in humid tropics, especially in Southeast Asia. Thrashing and drying delays may cause the yellowing of rice (Mendoza and Rigor, 1982). It was found in the moist paddy levels of more than 20% wet-basis, corresponding to the water activity of more than 0.96. The resulting rapid microorganism growth occurred and the grain then heated up to temperatures of  $45\text{-}60^\circ\text{C}$ . The yellow grain associated with high temperature was often noticed at the central area of the paddy bulk within 2-3 days (Phillips et al., 1989) whereas the surface of moist paddy bulk yielded fewer yellow. The mechanism of yellowing is not well known. A large number of investigations have been attempted to pursue this cause. Pioneering work by Schroeder (1963) was stated that rice discolouration can occur without heating of grains. A similar statement was made by Wolk (1913) in

relation to yellowing of rice kernels. These reinforced the observations of previous workers that yellowing can result from slow drying of moist rice without substantial heating (Phillips et al., 1988).

Later, some researchers (Quitco, 1982; Christensen and Kaufmann, 1965; Indudhara Swamy et al., 1971; Phillips et al., 1989) attributed the yellowing of rice that it was mainly caused by the greater metabolic activities of microbial at the above-mentioned conditions. The subsequent high temperature could be reached

However, in order to better understand the yellowing, Yap et al. (1988) minimised the role of microorganisms to yellowing phenomenon in study by surface sterilisation of samples. For each variety of rice, the significant progressive yellowing of milled rice and rough rice was much higher at 60°C than at 30°C. They reported that both high temperature and high moisture content were necessary for yellowing. The yellowing of rice produced inside the kernels was not uniform, decreasing a degree of yellow from the exterior to the interior layers. This occurrence correlated consistently with the non-uniform distribution of reactants involving non-enzymatic browning or Maillard reaction, such as reducing sugars, epsilon-amino group of lysine and terminal amino acid in proteins and free amino acids.

Recently, A quantitative study of influences of the water activity, temperature and storage atmosphere on the yellowing of grain has been of increasingly interest. Some workers (Gras et al., 1989; Bason, et al., 1990) summarised that the water activity, and the temperature strongly affected the degrees of yellowing whilst the  $O_2$  was very less significant. In addition, the degrees of yellowing obtained from paddy and milled rice had values insignificantly different. Equation for predicting the rate of yellowing proposed by Gras et al. (1989) is as follows:  $k = \alpha \cdot e^{\beta/T} (a_w)^\gamma [O_2]^\delta$  where  $k$  = rate of yellowing (Hunter b unit/day),  $T$  = absolute temperature(K),  $a_w$  = water activity,  $O_2$  = oxygen content ( $\text{mol/m}^3$ ) and  $\delta$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$  and  $\gamma$  are constants. By contrast, Soponronnarit et al. (1998a) found that the yellowing rate was found to follow the zero order kinetics. The proposed predictive model was given by  $\ln k = \alpha - \delta a_w - \epsilon/T + (\gamma a_w)/T$  where  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\alpha$  and  $\gamma$  are constant values. The apparent activation varied in a range from 130 to 145 kJ/mol, depending upon the water activity.

As above-mentioned quality aspect, the inherent characteristic of in-store drying technique usually using ambient air temperature or slightly additional heat may not detrimentally affect the reduction of head rice yield. In this system, drying zone initially starts at the bottom and then slowly move upward to the top. Drying time would be taken more than a week and thus, it definitely encounter a serious problem of yellowing if the paddy with high moisture content is filled. However, this does not inherently imply that the in-store drying technique will not appropriate for such moisture level although the drying rate is relatively low. As already known that the paddy would be deteriorated within 2 or 3 days due to either microorganisms or non-enzymatic browning reaction, it therefore reach to the questions how to apply the suitable technique for in-store drying under such condition in order to dry paddy safely. The layer drying technique seems to be an appropriate solution. Using such an approach, many questions should be asked, for example, airflow rate, bed depth and type of drying air (natural air and supplemental heat). All these questions are worth to be pursuing and exploring further.

## 5. Conclusions

1) The near equilibrium model can predict satisfactorily the moisture removal only at the low airflow rates whilst the non-equilibrium model is applicable to wider range. The heat from the respiration and the fan should be included in the models, both having the significant effect when moisture content of grain is relatively high and the natural air is employed. In addition, the adsorption and quality models should be added. This leads to realise reasonably how the grain quality can be deteriorated during the complex interchange of heat and mass throughout the grain bed.

2) Improvement of drying performance via installing the stirrer and using low-temperature drying air approves to have a favourable effect on energy saving and grain quality. Computer simulations using long term of the weather data for tropical conditions recommended that air should be ventilated when the relative humidity was not higher than 75%. If necessary, slightly additional heat might be required essentially.

3) In hot and humid conditions, the in-store drying technique using low airflow rate and ambient temperature can suitably be applied for initial moisture contents of grain lower than 19% wet-basis. When the initial moisture content is relatively higher than 19% wet-basis, the higher natural airflow or supplemental heat is needed. However, it should be aware of larger pressure drop and high moisture gradient in the grain bed high due to very high bed depth, usually 3-4 m in practice, if the airflow rate or the inlet temperature is set up too high.

4) Three significant factors such as relative humidity, temperature and initial moisture level affect prominently the rice qualities. The adsorption and rapid drying caused mainly the head rice yield reduction. The suitable environmental condition for milling was 70-80% relative humidities corresponding to 20-25°C temperatures. Both microorganism and environmental conditions were dominant noticeably to the yellowing of rice.

## Acknowledgement

The authors would like to thank the Thailand Research Fund and the JIRCAS for their financial support.

## References

- Amatachaya, P., Soponronnarit, S., Prachayawarakom, S., Nathakarankule, A. and Inchan, S., 1997, Evaluation in Product Quality and Potential of In-Store Corn Drying, *Kasetsart J.*, 18, 73-85
- Bason, M.L., Gras, P.W., Banks, H. J. and Esteves, L.A., 1990, A Quantitative Study of the Influence of Temperature, Water Activity and Storage Atmosphere on the Yellowing of Paddy Endosperm, *J. Cereal Science*, 9, 77-89.
- Brooker D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W., 1992, *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*, Van Nostrand Reinhold Publisher. New York.
- Cheigh, H.S., Muhlbauer, W., Rhim, J-W and Shin, M\_G, 1985, In-Bin Drying of Paddy with Ambient Air: Influence of Drying Parameters on Drying Time, Energy Requirements and Quality, *Korean J. Food Sci. Technol.*, 17(1), 25-32.

- Chinsakolthanakom, S., 1987, the Study of In-Store Paddy Drying at Third Stage, Master Thesis, King Mongkut's Institute Of Technology Thonburi, Thailand
- Christensen, C.M. and Kaufmann, H.H., 1965, Deterioration of Stored Grains by Fungi, *Ann. Rev. Phytopathol.*, 3, 69-84.
- Giner, S. A., Bruce, D.M. and Mortimore, S., 1998, Two-Dimensional Simulation Model Of Steady-State Mixed-Flow Grain Drying, Part 1: The Model, *J. Agric. Engng. Res.*, 71, 37-50
- Gras, P.W., Banks, H.J., Bason, M.L., and Arriola, L.P., 1989, A Quantitative Study of the Influence of Temperature, Water Activity and Storage Atmosphere on the Yellowing of Milled Rice, *J. Stored Prod. Res.*, 9, 77-89.
- Griffith, H.J., 1964, Bulk Storage of Grain: A Summary of Factors Governing Control of Deterioration, Melbourne, Australia, CSIRO Division of Mechanical Engineering, Report ED8.
- Indudhara Swamy, Y.M., Ali, S.Z. and Bhattacharya, K.R., 1971, Relationship of Moisture and Temperature to Discoloration of Rice During Storage, *J. Food Sci. Technol.* 8:150-152.
- Jindal V.K., Martinez, R.C. and Le Van Diep, 1996, Drying Simulation: a PC-Based, User-Oriented Decision Support System for In-Store Drying and Aeration of Grains, *Proceedings of an International Conference Held at the FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand, October 17-20, ACIAR Proceedings*, 71, 282-283
- Kunze, O. R., 1995, Effect of Drying on Grain Quality, *International Conference on Grain Drying East Asia, Bangkok, 17-20 October*.
- Kunze, O. R., 1979, Fissuring of the Rice Grain after Heated Air Drying, *Transactions of the ASAE*, 22, 1197-1201, 1207
- Laytong, C., 1987, The Study of Thermophysical Properties of Paddy, MSc. Thesis, School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi.
- Lynch, B.E. and Morey, R. V., 1989, Control Strategies for Ambient Air Corn Drying, 32(5), *Transactions of the ASAE*, 1727-1731
- Noomhorm, A. and Yubai, C., 1991, Effect of Tropical Environmental Conditions on Rice Kernel Breakage during Milling, *J. Sci Food Agric*, 521-528.
- Mendoza, E.E. and Rigor Jr., A.C., 1982, Grain Quality Deterioration in On-Farm Level of Operation, In *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Annual Workshop on Grain Post-Harvest Technology*, 101-107.
- Morey, R.V. and Pearl, R.M., 1971, Optimum Horsepower and Depth for a Natural Air System, *Transactions of the ASAE*, 14(5), 930-934.
- Morey, R.V., Cloud, H.A., Gustafson, R.J. and Petersen, D.W., 1979, Management of Ambient Air Drying Systems, *Transactions of the ASAE*, 22(6), 1418-1425.
- Nathakaranakule, A. and Soponronnrait, S., 1991, Comparative Study of Mathematical Models of Corn Drying, *The Kasetsart J.*, 25(3), 345-357.
- Phillips, S, Widjaja, S., Wallbridge, A. and Cooke, R., 1988, Rice Yellowing during Post-Harvest Drying by Aeration and During Storage, *J. Stored Prod. Res.*, 24, 173-181.
- Phillips, S., Mitfa, R. and Wallbridge, A., 1989, Rice Yellowing During Drying Delays, *J. Stored Prod. Res.*, 25(3), 155-164.
- Quitco, R.T., 1982, Studies of Fungal Infection and Heating of Paddy, *Proc. GASGA Semin, Paddy Deterioration in the Humid Tropics*, Baguio, 1981, Philippines, 52-56, GTZ, Eschborn
- Schroeder, H.W., 1963, The Relation between Storage Moulds and Damage in High Moisture Rice in Aerated Storage, *Phytopathol.*, 53, 804-808.
- Seib, P.A., Pfost, H. B., Sukaboi, A., Rao, V.S. and Burroughs, R. B., 1980 Spoilage of Rough Rice as Measured by Carbon Dioxide Evaluation, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Annual Workshop on Grain Post-Harvest Technology*, Kuala Lumpur, 29-30 Jan.
- Shove, G. C., 1983-1984, Energy Consumed in Low Temperature Corn Drying, *Drying Technology*, 2(4), 503-511.

- Soponronnarit, S., 1988, Energy Model of Grain Drying System, *ASEAN Jour. on Sci. and Technol. for Dev.* 5(2), 43-68.
- Soponronnarit, S. and Chinsakolthanakorn, S., 1990, Effect of Heat and Water from Respiration on Drying Rate and Energy Consumption, *ASEAN Journal on Science & Technology for Development*, 7 (2), 65-83.
- Soponronnarit, S., Wongvirojtana, P., Nathakarakakule, A. and Chinsakolthanakorn, S., 1995, Design Charts for In-Store Paddy Drying under Hot and Humid Climates, *Agri. Engineering J.*, 4, 147-162.
- Soponronnarit, S., Amatachaya, P., Prachayawarakorn, S., Nathakarakakule, A. and Inchan, S., 1997, Field Trial of In-Store Drying and Storage, *The Kasetsart J.*, 18, 86-100.
- Soponronnarit, S., Kittiporn, K. and Prachayawarakorn, S., 1997b, Appropriate Operating Parameters for Fluidized Bed Corn Drying, *RERIC International Energy J.*, 19(1), 1-13.
- Soponronnarit, S., Srisubati, N. and Yoovidhya, T., 1998a, Effect of Temperature and Relative Humidity on Yellowing Rate of Paddy, *J. Stored Prod. Res.*, 34(4), 323-330.
- Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Swasdisevi, T., Kittiporn, K. and Vitsutdipat, S., 1998b, Performance Testing of Industrial-Scale Fluidized Bed Corn Dryer, , 6. *Proc 13<sup>th</sup> CIGR Processing*, 6, 307-314.
- Srihawong, R., 1988, Paddy Drying Experiments, *Thai Agricultural Engineering J.*, 3(1), Jan-Apr.
- Szrednicki, G.S., 1995, Control Systems for Aeration and Drying of Grain, *International Conference on Grain Drying East Asia*, Bangkok, 17-20 October.
- Szrednicki, G.S. and Driscoll, R.H., 1995, Adoption of In-Store Drying Technology in Southeast Asia, Paper Presented at 17<sup>th</sup> ASEAN Technical Seminar on Grain Postharvest Technology, Lumut, Malaysia, 25-27 July
- Suwansathit, R., 1989, The Study of Paddy Drying in a Small On-Farm Storage Barn at Chinat Province, Master Thesis, Mahidol University, Bangkok
- Steele, J.L., Saul, R.A. and Hukill, W.V., 1969, Deterioration of Shelled Corn as Measured by Carbon Dioxide Production, *Transactions of the ASAE*, 12(5), 685-689
- Thompson, T.L., 1972, Temporary Storage of High Moisture Shelled Corn Using Continuous Aeration. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers.*, 15(2), 333-337.
- Wilcke, W.F. and Bern, C. J., 1986, Natural-Air Corn Drying with Stirring: II. Dryer Performance, *Transactions of the ASAE*, 29(3), 860-867.
- Wolk P.C. van der, 1913, *Protascus Colorans*, a new Genus and a New Species of the Protascineae Group, the Source of Yellow Grains in Rice, *Myc. Centralbl*, 3, 153-157.
- Yap, A.B., Juliano, B.O. and Perez, C.M., 1988, Artificial Yellowing of Rice at 60°C, *Proceedings of 11<sup>th</sup> ASEAN Technical Seminar on Grain Post-Harvest Technology*, Kuala Lumpur, 23-26 Aug.

รายงานการประชุมวิชาการวิชาการประจำปี 2544  
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2544

## การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อจลนศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพเมล็ดข้าวโพด Study of Parameters Affecting Drying Kinetics and Quality of Corns

สมบูรณ์ เวชกามา<sup>1</sup> สมชาติ โสภณรณฤทธิ์<sup>1</sup> อติศักดิ์ พงษ์พูลผลศักดิ์<sup>1</sup>  
วุฒิภัต ดันติเวส<sup>2</sup> และ สุภรัตน์ โษษิตเจริญกุล<sup>3</sup>  
Somboon Wetchacama<sup>1</sup>, Somchart Soponronnart<sup>1</sup>, Adisak Pongpullponsak<sup>1</sup>,  
Wuttat tuntiweisa<sup>2</sup> and Suparat Kositcharoeankul<sup>3</sup>

1. อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) 91 ถนนพระยาอุทิศ แขวงจตุจักร กรุงเทพฯ  
Lecturer, King Mongkut's University of Technology (KMUTT), Pracha-utit Rd., Tungkr, Bangkok.
2. อดีตนักศึกษาระดับปริญญาโท คณะพลังงานและวัสดุ มจธ.  
Former graduate student, School of Energy and Materials, KMUTT.
3. กองโรคพืชและจุลชีววิทยา ภาควิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ถนนพหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ  
Plant Pathology and Microbiology Division, Department of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้นและอุณหภูมิอบแห้งสูงด้วยเทคนิคฟลูอิดไรเซชัน และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้ง โดยการทดลองอบแห้งมี 3 ขั้นตอน คือ 1) การอบแห้งอย่างรวดเร็วด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชัน ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130 - 170°C 2) การเก็บในที่อับอากาศ (tempering) ที่อุณหภูมิเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้ง และ 3) การเป่าเมล็ดข้าวโพดด้วยอากาศแวดล้อม จากการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิและอัตราการไหลเฉพาะของอากาศอบแห้ง ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้เปรียบเทียบผลการทำนายอัตราการอบแห้งที่ได้จากสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (สมการของ Page, Wang-singh และ Lewis) กับผลการทดลอง พบว่า สมการ Page ให้ผลการทำนายสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด

สำหรับวัตถุประสงค์อีกข้อหนึ่งคือ เพื่อตรวจสอบคุณภาพเมล็ดข้าวโพดหลังผ่านการอบแห้งแต่ละขั้นตอน โดยพิจารณาถึงคุณภาพ 3 อย่างคือ 1) ปริมาณสารแอฟลาทอกซินในเมล็ด 2) การแตกและการร้าว และ 3) สีของเมล็ด พบว่า ปริมาณสารแอฟลาทอกซินไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะเงื่อนไขการทดลอง การแตกและการร้าวของเมล็ดข้าวโพดขึ้นอยู่กับความชื้นหลังการอบแห้ง ซึ่งอุณหภูมิอากาศอบแห้งและระยะเวลาการ tempering ส่งผลกระทบน้อยมาก ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของเมล็ดข้าวโพดคือ ระยะเวลาการ tempering ซึ่งความชื้นหลังการอบแห้งและอุณหภูมิอากาศอบแห้งส่งผลน้อยมาก

คำสำคัญ: คุณภาพ / จลนศาสตร์การอบแห้ง / เมล็ดพืช



### Abstract

The objectives of this research were to investigate factors affecting on drying rate of high moisture corn at high temperature with fluidization technique and to develop a mathematical model for predicting drying rate. There were three steps of drying process as follows: 1) rapid drying using fluidized bed dryer at inlet drying air temperature of 130-170°C, 2) corn tempering at temperature of corn after drying from step 1, in tempering period of 40-180 minutes, and 3) drying with ambient air. It was found that the drying rate was affected by Inlet air temperature and specific air flow rate. Among three semi-empirical drying equations (Wang and Singh, Page and Lewis), it was found that Page's equation provided the best prediction.

This study also aimed at investigating the quality of corn dried in each step. Corn qualities in terms of *Aflatoxin* content, percentages of breakage and stress crack, and colour change were considered. Experimental results showed that *aflatoxin* content in dried corn did not change; breakage and cracking depended on final moisture content, and did not rely on inlet air temperature and tempering period. The colour of dried corn depended on tempering period, while final moisture content as well as inlet air temperature have no effect on the colour.

**Key words:** drying kinetics / grain / quality

### 1. บทนำ

แอฟลาทอกซิน (*Aflatoxin*) เป็นสารพิษซึ่งเกิดจากเชื้อราที่มีอยู่ทั้งในดินและอากาศ เป็นสารพิษชนิดหนึ่งที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ก่อให้เกิดมะเร็ง และทำให้เกิดอาการอื่นได้อย่างเฉียบพลันและเรื้อรัง เชื้อราที่สร้างสารพิษนี้ที่พบเสมอคือ *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus Parasiticus* การศึกษาเกี่ยวกับพิษของ *Aflatoxin* ต่อร่างกายมนุษย์ไม่สามารถทำการทดลองได้โดยตรง แต่จะทำการศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ *Aflatoxin* ที่ตรวจพบในอาหารกับอาการของโรคที่เกิดหลังการรับประทานและปริมาณที่ตรวจพบในอวัยวะต่างๆ ของผู้ป่วยที่เสียชีวิต อาการที่พบคือ คับอึกเสบ คับแข็ง มะเร็งที่ตับ และ สมองบวมน้ำ ซึ่งเป็นอาการแบบเฉียบพลันที่พบในเด็ก

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดสาร *Aflatoxin* มีดังนี้

1. ชนิดของเชื้อรา เชื้อราแต่ละชนิดมีความสามารถในการสร้างสาร *Aflatoxin* ได้แตกต่างกัน
2. ชนิดของอาหาร เชื้อราแต่ละชนิดมีความสามารถสร้างสาร *Aflatoxin* ได้แตกต่างกันในผลิตภัณฑ์และชนิด หรือแม้แต่นิดเดียวกันแต่ต่างพันธุ์

3. ความชื้นในผลิตภัณฑ์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เป็นปัจจัยที่สำคัญมาก ปกติความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำสุดที่เชื้อรา *A.flavus* และ *A.parasiticus* จะเจริญเติบโตได้คือ 80% และต้องการถึง 85% ในการสร้างสปอร์ ซึ่งเป็นส่วนแพร่พันธุ์ สำหรับเมล็ดข้าวโพดระดับความชื้นที่ปลอดภัยจากการเจริญเติบโตของเชื้อรา *A.flavus* และ *A.parasiticus* อยู่ที่ระดับ 13% หรือต่ำกว่า

4. อุณหภูมิ เชื้อรา *A.Flavus* สามารถเจริญเติบโตและสร้าง *Aflatoxin* ได้ในช่วงอุณหภูมิ 12 - 41°C โดยช่วงที่เหมาะสมที่สุด คือ 25 - 32°C

5. เวลา เมื่อสภาวะแวดล้อมทุกอย่างเหมาะสม เชื้อรา *A.flavus* และ *A.parasiticus* สามารถสร้างสาร *Aflatoxin* ได้ภายใน 48 ชั่วโมง

6. การเสียหายของเมล็ดพิษ เกิดจากแรงกระทบจากภายนอกและการเข้าทำลายของแมลงจะส่งเสริมการเกิดสาร *Aflatoxin* ได้ 2 ทาง คือ เปิดทางเชื้อราเข้าเมล็ดสุพืชได้ง่าย และส่งผลให้เกิดอุณหภูมิและความชื้นเมล็ดพิษสูงขึ้นด้วย ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา

จากที่กล่าวมาสรุปได้ว่า ความชื้นเมล็ดพิษหลังการเก็บเกี่ยวเป็นปัจจัยที่สำคัญตัวหนึ่งที่สามารถควบคุมการสร้างสาร *Aflatoxin* ได้ โดยระดับความชื้นของเมล็ดข้าวโพดที่ปลอดภัย คือ 13.5% wet basis (w.b.) ดังนั้นการอบแห้งลดความชื้นเมล็ดข้าวโพดให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยจึงถือเป็นสิ่งที่สำคัญมาก ซึ่งการลดความชื้นโดยวิธีตากลานจะใช้เวลานาน และไม่สามารถทำการลดความชื้นได้เมื่อมีฝนตก หรือความชื้นแสงแดดไม่เพียงพอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด ด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซน เพื่อความรวดเร็วในการอบแห้ง และทดลองหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม เพื่อลดหรือหยุดการเจริญเติบโตของเชื้อราชนิด *A.flavus* และ *A.parasiticus* พร้อมกับพิจารณาถึงคุณภาพเมล็ดข้าวโพดหลังการ อบแห้งให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์อบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซนเบด ประกอบด้วย ห้องอบแห้งรูปทรงกระบอก ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สูง 140 cm เครื่องทำความร้อนโดยใช้ไฟฟ้า ขนาด 3 kW จำนวน 4 ตัว สามารถแยกควบคุมได้ และพัดลมหยอชิงชนิดใบพัดโค้งกลับ (backward-curve-blade centrifugal fan) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 m จำนวน 12 ใบ ขนาดมอเตอร์ 1.5 kW ความเร็วรอบ 2870 rpm สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้ ทั้งระบบหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วเพื่อลดการสูญเสียความร้อน และมีการย้อนกลับอากาศอบแห้งมาผสมกับอากาศใหม่ เพื่อประหยัดพลังงานในการอบแห้ง อุณหภูมิอบแห้งควบคุมด้วยเครื่อง PID Controller ค่าความถูกต้อง  $\pm 1^{\circ}\text{C}$

### 2.2 การทดลอง

#### 2.2.1 การทดลองศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้ง

สภาวะเงื่อนไขการทดลองมีดังนี้ อุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้ง  $150 - 170^{\circ}\text{C}$  และความสูงเบด 4, 6 และ 8 cm โดยการอบแห้งมี 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1). อบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไอเซนเบด
  - 2) การเก็บเมล็ดข้าวโพดในที่อับอากาศ (tempering) ในช่วงเวลา 40 – 180 นาที และโดยใช้อุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้งจากขั้นตอนที่ 1 และ
  - และ 3) เป่าชั้นเมล็ดข้าวโพดด้วยอากาศแวดล้อม
- การทดลองในแต่ละกรณีได้ทำซ้ำ 3 ครั้ง

#### 2.2.2 การพัฒนาสมการทำนายการอบแห้ง

ทำการพัฒนาโดยการเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราการอบแห้ง ในรูปของอัตราส่วนความชื้นจากสมการกับผลการทดลอง สมการที่นำมาใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบผลมี 3 รูปแบบดังนี้

$$\text{สมการ Wang-Singh[1]} \quad MR = a \cdot \exp(-bt) \quad (1)$$

$$\text{สมการ Page[2]} \quad MR = \exp(-bt^n) \quad (2)$$

$$\text{สมการ Lewis[3]} \quad MR = \exp(-bt) \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ} \quad a = A_1 + A_2T + A_3S_p + A_4T \cdot S_p + A_5 \ln(S_p) \quad (4)$$

$$b = B_1 + B_2T + B_3S_p + B_4T \cdot S_p + B_5 \ln(S_p) \quad (5)$$

โดย MR คือ อัตราส่วนความชื้นเมล็ดข้าวโพด

$$= \frac{M(t) - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}}$$

$M(t)$  คือ ความชื้นของเมล็ดข้าวโพดที่เวลา  $t$

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุลของเมล็ดข้าวโพด

$M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพด

$S_p$  คือ อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ

$T$  คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง

$t$  คือ ระยะเวลาการอบแห้ง

$A_{1-5}$  และ  $B_{1-5}$  คือ ค่าคงที่

ค่าคงที่ต่าง ๆ ของแต่ละสมการสามารถคำนวณได้จากโปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Science) โดยการป้อนข้อมูล MR,  $S_p$ ,  $T$ , และ  $t$ , ที่ได้จากการทดลองให้กับโปรแกรม แล้วจะทำการคำนวณหาโดยใช้เทคนิค non-linear regression

### 2.2.3 การทดสอบคุณภาพเมล็ดข้าวโพด

คุณภาพเมล็ดข้าวโพดหลังผ่านการอบแห้งในแต่ละขั้นตอน ที่พิจารณามี 3 อย่าง ดังนี้

1). ปริมาณสาร *Aflatoxin* ทำการตรวจวัดทั้งสามขั้นตอนการอบแห้ง โดยตรวจวัดซ้ำ 3 ครั้ง ในการทดลองแต่ละกรณี และใช้ทฤษฎีวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสาร *Aflatoxin*

2). การแตกและการร้าวของเมล็ด

และ 3). สีของเมล็ด

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

### 3.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง

จากผลการทดลอง ที่ระยะเวลาการอบแห้งต่าง ๆ พบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการอบแห้งคือ อุณหภูมิและอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ เมื่อมีค่าสูงจะสามารถลดความชื้นเมล็ดข้าวโพดได้มากกว่ากรณีที่อุณหภูมิและอัตราการไหลจำเพาะของอากาศต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3

### 3.2 ผลการพัฒนาสมการอธิบายการอบแห้ง

จากผลการคำนวณหาค่าคงที่ต่าง ๆ ของสมการ (1), (2) และ (3) และนำไปแทนค่าในสมการ (4) และ (5) จะได้สมการคำนวณหาค่า  $a$  และ  $b$  ของแต่ละสมการ ดังนี้

สมการ Wang-Singh

$$a = 0.3019 - 0.0002000T + 2.001S_p + 0.002000T \cdot S_p - 0.2112 \ln(S_p)$$

$$b = 0.09332 + 0.0005000T - 0.6088S_p + 0.003900T \cdot S_p + 0.04171 \ln(S_p)$$

$$(\text{ค่า } R^2 = 0.9782)$$

สมการ Page

$$\begin{aligned} a &= -3.089 - 0.001000T + 2.703S_p + 0.1474T \cdot S_p - 1.586 \ln(S_p) \\ b &= 0.6017 + 0.002100T + 0.07010S_p - 0.01790T \cdot S_p + 0.2510 \ln(S_p) \\ &(\text{ค่า } R^2 = 0.9832) \end{aligned}$$

สมการ Lewis

$$\begin{aligned} b &= 737 + 0.0006000T - 0.8420S_p + 0.003700T \cdot S_p + 0.06590 \ln(S_p) \\ &(\text{ค่า } R^2 = 0.9778) \end{aligned}$$

เมื่อนำผลการคำนวณทำนายอัตราการอบแห้งเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 และ 5 พบว่า สมการของ Page (2) ให้ผลสอดคล้องมากที่สุด

### 3.3 คุณภาพเมล็ดข้าวโพด

จากการทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวโพด ที่ความชื้นเริ่มต้น 30% w.b. ความเร็วอากาศในเบด 3.0 m/s ความสูงเบด 8 cm และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130 - 170°C ผลการตรวจสอบคุณภาพข้าวโพดมีดังนี้

#### 3.3.1 ปริมาณสารแอฟลาทอกซิน

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณสาร *Aflatoxin* ระหว่างก่อนและหลังการอบแห้ง และระหว่างหลังการอบแห้งกับการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ *Aflatoxin* ในช่วงดังกล่าว ทุกสภาวะการทดลอง

#### 3.3.2 เปอร์เซ็นต์การแตก

รูปที่ 6 และ 7 แสดงผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งและระยะเวลาการ tempering ต่อการแตกและการร้าวของเมล็ดข้าวโพดหลังผ่านขั้นตอนการอบแห้ง พบว่า กรณีที่ข้าวโพดมีความชื้นหลังการอบแห้ง 19% w.b. มีเปอร์เซ็นต์การแตกน้อยมาก โดยไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง แต่เมื่อลดความชื้นลงเหลือ 14% w.b. เปอร์เซ็นต์การแตกมีค่ามากขึ้น และเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 170°C เมล็ดข้าวโพดจะแตกบานเหมือน pop corn และจากรูปที่ 7 พบว่า การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการ tempering (ในช่วง 40 - 180 นาที) ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การแตกของเมล็ดข้าวโพดมากนัก

#### 3.3.3 เปอร์เซ็นต์การร้าว

จากรูปที่ 6 และ 7 พบว่า ที่ความชื้นหลังการอบแห้งและระยะเวลา tempering เดียวกัน ความชื้นหลังการอบแห้งมีผลต่อการร้าวของเมล็ดข้าวโพด กล่าวคือ เมื่อความชื้นหลังการอบแห้งลดลง การร้าวของเมล็ดจะสูงขึ้น และพบว่า อุณหภูมิอากาศอบแห้งในช่วง 150 - 170°C และระยะเวลาการ tempering ในช่วง 40 - 180 นาที ส่งผลต่อการร้าวในเมล็ดข้าวโพดน้อยมาก

#### 3.3.4 สีของเมล็ดข้าวโพด

จากผลการทดสอบพบว่า ระยะเวลาการอบอากาศ (tempering time) ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดข้าวโพด กล่าวคือ เมื่อระยะเวลาการ tempering มากขึ้น ค่าความสว่าง (L) และ ค่าสีเหลือง (b) ของเมล็ดมีค่าลดลง แต่ค่าสีแดง (a) มีค่ามากขึ้น ที่ระยะเวลาการ tempering 120 และ 180 นาที เมล็ดข้าวโพดจะมีสีคล้ำมาก ค่ากว่าเกณฑ์มาตรฐานเมื่อเทียบกับที่ระยะเวลา 40 นาที ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ พงศ์เทพ [4] กรณีที่ระยะเวลาในการ tempering เท่ากัน (40 นาที) แต่มีความชื้นหลังการอบแห้ง หรืออุณหภูมิอบแห้งต่างกัน พบว่า สีเมล็ดข้าวโพดมีค่า a, b และ L ใกล้เคียงกัน ทั้ง ๆ ที่สังเกตเห็นได้ชัดว่าสีของเมล็ดข้าวโพดที่ผ่านการอบแห้งจนเหลือความชื้นต่ำ หรือใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงจะมีสีที่คล้ำกว่าก็ตาม อาจอธิบายได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดข้าว

โพดหลังการ tempering (ค่า  $b$  และ  $L$  ลดลง และค่า  $a$  สูงขึ้น) มีค่าสูงกว่า เมื่อความชื้นเมล็ดข้าวโพดก่อนการ tempering มีค่าต่ำกว่า

รูปที่ 8 และ 9 แสดงการเปลี่ยนสีของเมล็ดข้าวโพด กรณีที่มีระยะเวลาการ tempering และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง แตกต่างกัน ตามลำดับ

#### 4. สรุป

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อจลนศาสตร์การอบแห้ง การพัฒนาสมการทำนายการอบแห้ง และคุณภาพเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้ง ในที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

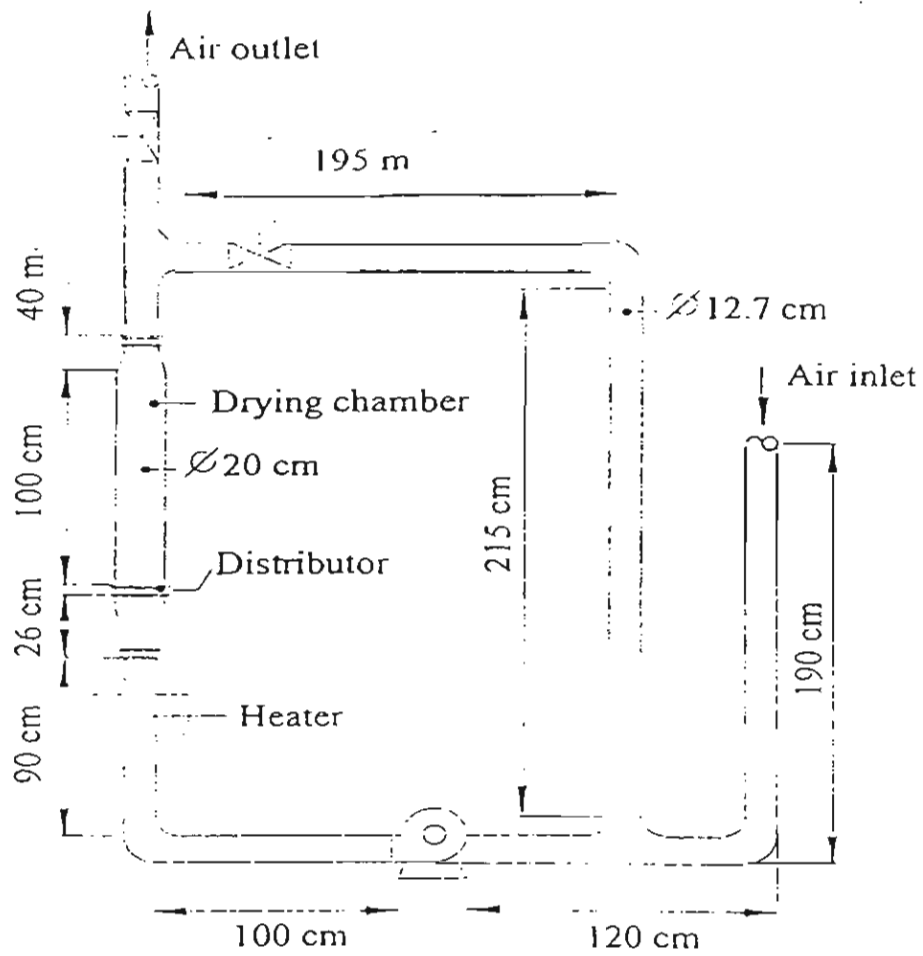
1. ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเทคนิคฟลูอิดาเซชันคือ อุณหภูมิ และอัตราการไหลจำเพาะของอากาศอบแห้ง
2. จากการพัฒนาสมการ Page, Wang-singh และ Lewis เพื่อใช้คำนวณทำนายอัตราการอบแห้งข้าวโพดพบว่า สมการ Page ให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด
3. จากการตรวจสอบคุณภาพข้าวโพดหลังการอบแห้ง ในแต่ละสภาวะการทดลอง ได้ผลดังนี้
  - การแตกและการร้าวของเมล็ดข้าวโพดขึ้นอยู่กับความชื้นหลังการอบแห้ง ซึ่งอุณหภูมิมอบแห้งหรือระยะเวลาการ tempering ส่งผลกระทบน้อยมาก
  - ปริมาณสาร *Aflatoxin* ในเมล็ดข้าวโพดในช่วงก่อนและหลังการอบแห้งเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
  - ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดข้าวโพด (ค่า  $a$ ,  $b$  และ  $L$ ) คือ ระยะเวลาการ tempering ซึ่งความชื้นหลังการอบแห้ง หรืออุณหภูมิมอบแห้ง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีน้อยมาก

#### กิตติกรรมประกาศ

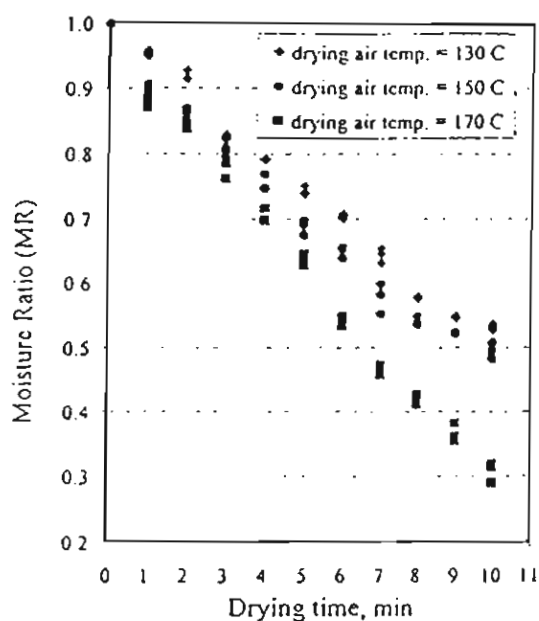
ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย และขอขอบคุณกองโรคพิษและจุลชีววิทยา กรมวิชาการเกษตร ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและแนะนำการตรวจวัดปริมาณสารพิษ การเพาะเชื้อราเตรียมสารพิษ และด้านอื่น ๆ ซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญในงานวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

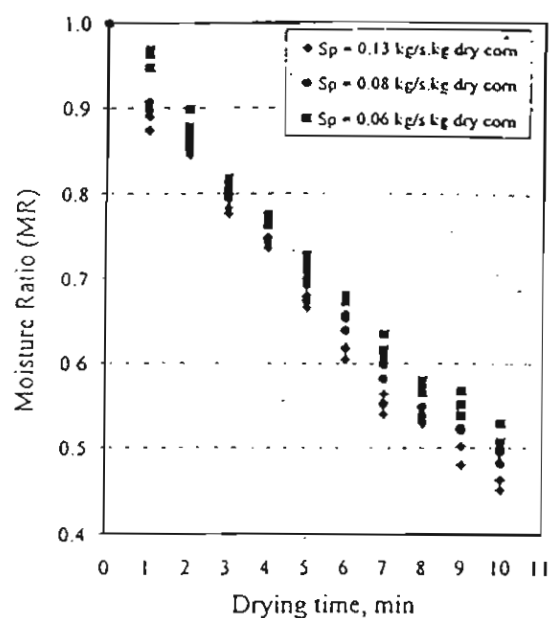
1. Wang, C.Y. and Singh, R.P., 1978, A Single Layer Drying Equation for Rough Rice, ASAE, No. 78-3001, St. Joseph, MI.
2. Page, G.E., 1952, Factor Influencing the Maximum Rate of Drying Shell Corn in Layer, Thesis, Master of Science, Purdue University, pp. 33 - 452.
3. Lewis, W.K., 1921, The Rate of Drying of Solid Materials, The Journal of Ind. and Eng. Chem., Vol. 13, No. 5, pp. 427 - 432.
4. พงศ์เทพ โชติจักรดิกุล, 2540, การจัดการข้าวโพดชื้นโดยการอบแห้งแบบฟลูอิดาเซชัน การเทมเปอร์ และการเป่าอากาศแวดล้อม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 28 - 88.



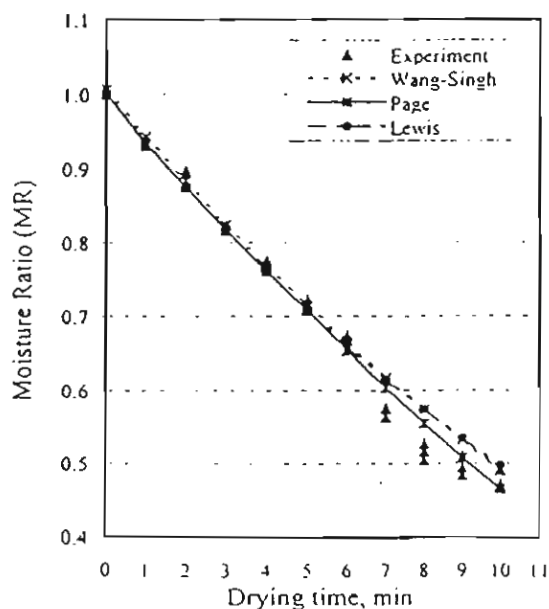
รูปที่ 1 ไดอะแกรมระบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด



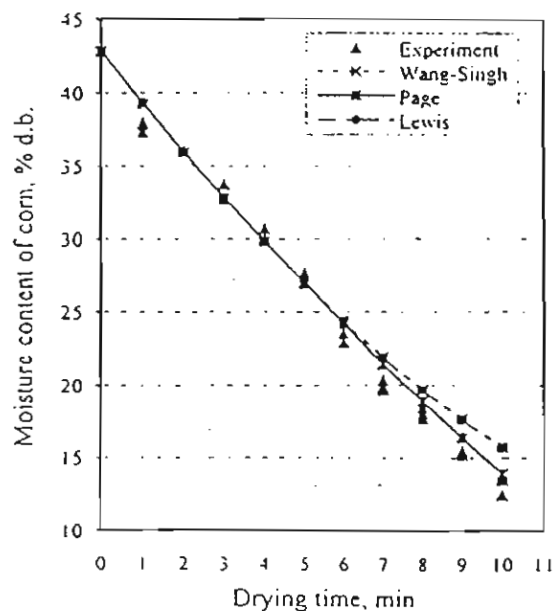
รูปที่ 2 ผลของอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้งต่อความชื้นเมล็ดข้าวโพด (ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 43% d.b., ความเร็วอากาศในห้องอบแห้ง 3 m/s และความสูงเบด 6 cm)



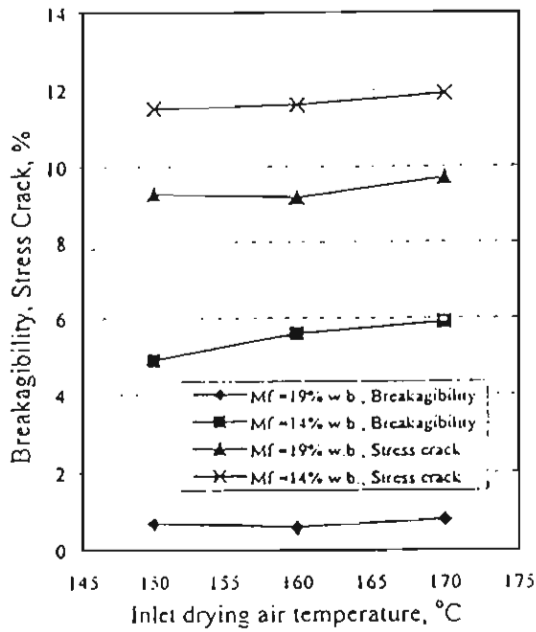
รูปที่ 3 ผลของอัตราการใช้พลังงานต่อความชื้นเมล็ดข้าวโพด (ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 43% d.b., ความเร็วอากาศในห้องอบแห้ง 3 m/s และอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้ง 150°C)



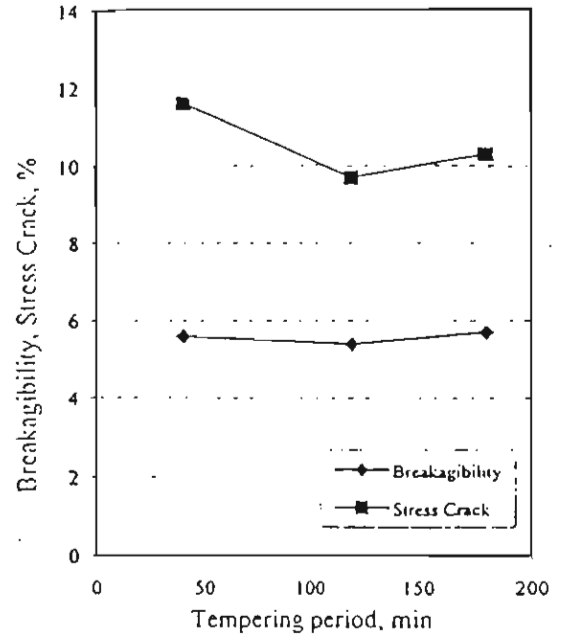
รูปที่ 4 การเปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นเมล็ดข้าวโพดระหว่างแบบจำลองต่าง ๆ กับผลการทดลอง (ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 43% d.b., ความเร็วอากาศในห้องอบแห้ง 3 m/s, ความสูงเบด 4 cm และอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้ง 130°C)



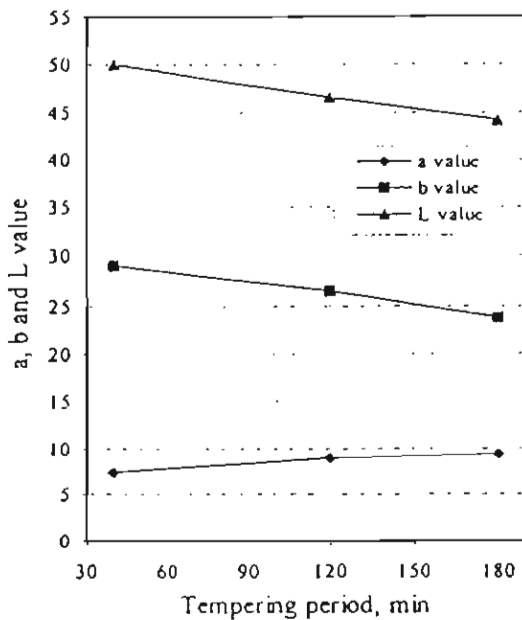
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นเมล็ดข้าวโพดระหว่างแบบจำลองต่าง ๆ กับผลการทดลอง (ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 43% d.b., ความเร็วอากาศในห้องอบแห้ง 3 m/s, ความสูงเบด 6 cm และอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้ง 170°C)



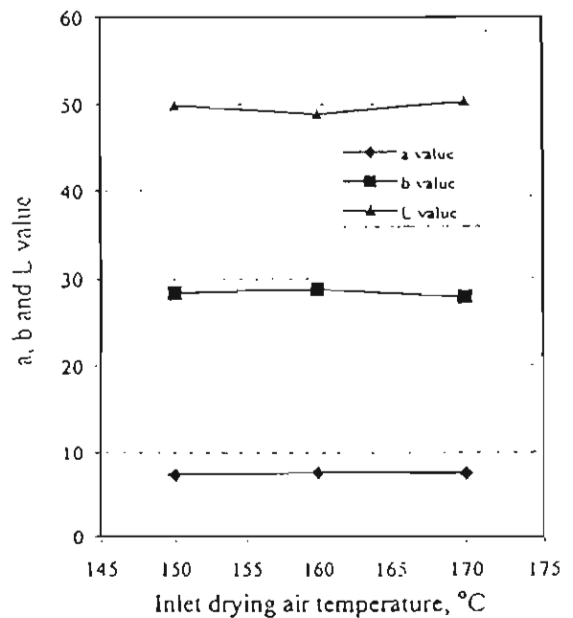
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การแตกและการร้าวของเมล็ดข้าวโพดกับอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้ง (ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 30% w.b.)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การแตกและการร้าวของเมล็ดข้าวโพดกับระยะเวลาการอบอากาศ (ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 30% w.b., อุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้ง 160°C)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a, b และ L ของเมล็ดข้าวโพดกับระยะเวลาการอบอากาศ (ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 30% w.b., อุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้ง 160°C)



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a, b และ L ของเมล็ดข้าวโพดกับอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้ง (ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 30% w.b., ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 19% w.b. และระยะเวลาการอบอากาศ 40 min)



รายงานการประชุมวิชาการวิชาการประจำปี 2544  
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2544

อิทธิพลของการเก็บในที่อับอากาศที่มีต่อการอบแห้งข้าวเปลือก  
ด้วยเทคนิคฟลูอิดาเซชัน

Effect of Tempering Process on Paddy Drying by Fluidization Technique

ณัฐพล ปุณิสระอาด สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ อภิชาติ เทอดโยธิน  
Nattapol Poomsa-ad, Somchart Soponronnarit and Apichit Terdyothin  
คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
School of Energy and Materials King Mongkut's University of Technology Thonburi

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเก็บในที่อับอากาศ (tempering) ที่มีต่อสมรรถนะของระบบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดาเซชัน โดยการอบแห้งแบ่งออกเป็นสองขั้นด้วยกระบวนการ tempering สมการที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ของการถ่ายเทมวลภายในปริมาตรควบคุมซึ่งพิจารณาให้ข้าวเปลือกมีรูปร่างแบบทรงกระบอกสั้น และใช้เทคนิค Finite difference ในการแก้ปัญหา พบว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายได้สอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี และอัตราการอบแห้งในครั้งที่สองเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการ tempering ระหว่างการอบแห้ง ระยะเวลาในการ tempering ที่เหมาะสมคือ 15 นาที และระยะเวลาเพื่อให้มีดัชนีการ tempering เท่ากับ 0.95 เพิ่มขึ้นตามความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก แต่ลดลงตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง  
คำสำคัญ: การอบแห้ง / การแพร่ / ฟลูอิดาเซชัน / เมล็ดพืช / การเก็บในที่อับอากาศ

Abstract

The objective of this research is to study the effect of tempering on the performance of paddy drying by fluidization technique. The drying was divided into two passes in which the tempering period is between them. The simulation describing the moisture movement inside the paddy kernel during drying and tempering process was modeled with the differential equation of mass balance in control volume that considered the grain shape as a finite cylinder. The explicit method based on finite difference was used to solve the equation. The results show that the simulation can predict satisfactorily the effect of tempering on moisture reduction during the second drying pass and the drying rate during the second pass of drying is significantly improved when the tempering is available. The tempering period of 15 minute is recommend. The required time for the 0.95 tempering index increases with the initial moisture content but decreases with drying air temperature and drying time.

Key words: Diffusion / Drying / Fluidized Bed / Grain / Tempering

## 1. Introduction

At the present, paddy drying by fluidization technique is widely used in several countries. The advantages of this technique are as follows: rapid drying, small dryer size and uniform final moisture content. If the product quality in terms of head rice yield and whiteness is to be maintained, the fluidized bed dryer should not reduce the grain moisture content down to safe storage level at 16.3% dry basis by a single drying pass. Several researchers [Steffe *et al.* (1978), Zhang and Litchfield (1991) and Sopornronnarit *et al.* (1999)] suggested to temper the grain between each drying pass in order to improve the drying performance and the product quality.

Tempering times used in the commercial rice drying vary widely. It is essentially important to know the tempering time for different drying processes and different drying conditions. Steffe and Singh (1980) simulated the multipass drying of rough rice to determine the effect of drying variables on tempering time and the influence of tempering on the second drying pass. The results showed that the drying air temperature was the main parameter affecting the tempering time. For the temperatures between 35-55°C, tempering was 95% completed in less than 2 hours and was fully completed in less than 5 hours. Sopornronnarit *et al.* (1999) introduced the tempering and the ambient air ventilation as the processes after fluidized-bed paddy drying. It was found that the maximum rate of moisture reduction during the ambient air ventilation was obtained when the tempering time was 15 minutes or longer. In addition, the quality in terms of head rice yield was improved as compared to that without tempering.

In the simulation of drying system with including of the tempering effect between each drying pass, the moisture profile in the grain kernel at the end of each drying pass must be known. However, the moisture profile cannot be predicted with the empirical drying equation. It can be determined only by using the theoretical drying equation. The differential equation with boundary and initial conditions for a paddy considered as a finite cylinder can be written as follows:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \left( \frac{1}{r} \right) \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} t = 0, 0 \leq r \leq r_0 & \quad M = M_{in} \\ -\ell \leq z \leq +\ell & \quad M = M_{in} \\ t > 0, r = r_0 & \quad M = M_{eq} \\ z = \pm \ell & \quad M = M_{eq} \\ t > 0, r = 0 & \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \end{aligned}$$

During the tempering process, the moisture inside the paddy kernel migrates to the surface. The moisture profile is not uniform at the onset of tempering. The moisture distribution inside the kernel can be described again by Eqn. (1) with the new boundary conditions as follows:

$$t = 0, \quad M = M(r, z)$$

$$\begin{array}{ll}
 t > 0, \quad r = r_0 & \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \\
 z = \pm \ell & \frac{\partial M}{\partial z} = 0 \\
 t > 0, \quad r = 0 & \frac{\partial M}{\partial r} = 0
 \end{array}$$

Due to the very complexity of boundary conditions the analytical solution is not practical. The numerical method can thus be employed to obtain the solution of moisture profile.

The objective of this research is to study the effect of tempering on the performance of paddy drying by fluidization technique. The drying was divided into two passes in which the tempering period is between them

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Experimental Apparatus

In this study, an experimental batch fluidized bed dryer (FIGURE 1) comprises of a cylinder shaped drying chamber with a dimension of 20 cm in diameter and 140 cm in height, a 12 kW electrical heater and a backward curved-blade centrifugal fan driven by a 1.5 kW motor. The drying air temperature was controlled by a PID controller with an accuracy of  $\pm 1^\circ\text{C}$ . A mechanical variable speed unit can regulate air flow rate. All drying conditions were performed at constant bed air velocity (2.2 m/s) and bed thickness (1.5 cm). The temperature of grain, drying air and ambient air were measured by thermocouple type K connected to a data logger with an accuracy of  $\pm 1^\circ\text{C}$ . The moisture contents of paddy were determined by an air oven at temperature of  $103^\circ\text{C}$  for 72 hours. It was estimated that the error was approximately  $\pm 0.1\%$  dry basis.

Paddy used in all experiment was rewet, mixed and kept in a cold storage at the temperature of  $3-5^\circ\text{C}$  for 5-7 days. Before starting of the experiment, the paddy was kept in ambient air until grain temperature was close to the ambient temperature.

### 2.2 Experiments on Drying and Tempering

To study the effect of tempering on the drying performance, drying was divided into two passes in which the tempering is between them. During the tempering, paddy was placed into a sealed container and kept in an oven at the temperature equal to the paddy temperature obtained after the first drying pass. The experiment conditions were as follows: initial moisture contents of 24.0 and 29.5% dry basis, drying air temperatures of 130 and  $150^\circ\text{C}$  and tempering times of 0, 5, 15 and 30 minutes.

### 2.3 Numerical Solution for Moisture Profile

In this study, the simulation describing the moisture movement inside the paddy kernel during both drying and tempering processes was modeled with the differential equation of mass balance in a small control volume. The explicit method based on the finite difference was used to solve it.

The effective moisture diffusivity in this study is modified by using the experimental data conducted by Poomsa-ad *et al.* (1999). It can be described as a function of drying temperature. It is written as :

$$D = 121.76 \exp (-3433.8/T_{\text{abs}}) \quad (2)$$

For studying the effect of tempering on the moisture reduction during the following drying pass, several researchers used the parameter called as a tempering index which is a guideline for the tempering time. It is defined as follows:

$$I_c = \frac{(M_{s,t} - M_{s,t=0})}{(M_{s,t=\infty} - M_{s,t=0})} \quad (3)$$

where the subscript s refers to the kernel surface. The average moisture content of the kernel surface of a short cylinder can be determined by the following equation:

$$M_{s,av} = \frac{\sum M_i A_i + \sum M_j A_j}{\sum A_i + \sum A_j} \quad (4)$$

where i and j refer to the curve surface and the plane surface, respectively.

### 3. Results and Discussion

FIGURE 2 shows the experimental and predicted results of tempering effect on moisture reduction during the fluidized bed drying. Drying rate during the second pass improves when the tempering is included. The drying curve for 15 minute tempering approaches to that of 30 minute tempering. Similar results were obtained for different drying conditions. It can be seen that the simulation can predict satisfactorily the effect of tempering on moisture reduction during the second drying pass.

The predicted moisture distribution inside the paddy kernel during tempering is shown in FIGURE 3 (grain temperature of 100°C). The moisture content becomes more uniform after a certain period of tempering. At the grain surface, The curve surface has faster change of moisture content than that of the plane surface.

Considering the calculated tempering index, it was found that the tempering index changed rapidly at the early period of tempering. The tempering indexes after the tempering periods of 5, 15 and 30 minutes were 0.78, 0.90 and 0.95, respectively. Tolaba *et al.* (1999) reported that for tempering index more than 0.95, the drying curve approached the drying curve of complete tempering. From the drying and tempering simulation, the predicted equation of tempering time for tempering index of 0.95 was established as shown in Eqn. (5)

$$t_t = 39.266 - 0.12125 T_{\text{abs}} + 0.77167 M_n - 5.74167 t_d \quad (5)$$

$$R^2 = 0.943$$

The above equation is applicable to the range of drying air temperature of 383 – 443 K, 20% dry basis  $\leq M_n \leq 30\%$  dry basis, and 1 minute  $\leq t_d \leq 5$  minutes.

The required time for 0.95 tempering index increases with initial moisture content but decreases with drying air temperature and drying time. Steff and Singh (1980) reported that tempering time of 120 minutes was required for the tempering index of 0.95 (drying air temperature was 35-55°C). It was observed

that tempering paddy at high temperature requires much shorter time as compared to the case of low temperature. Consequently, the capacity of tempering bin can be reduced significantly.

#### 4. Conclusions

1. Drying rate during the second pass is improved when the tempering is included. It is recommended that tempering period of 15 minutes is sufficient for tempering at high temperature.

2. The required time for the 0.95 tempering index increases with the initial moisture content but decreases with drying air temperature and drying time. The tempering time for grain dried at high temperature is much shorter than that at low temperature.

#### Nomenclature

A	Surface area, mm <sup>2</sup>
D	Effective diffusion coefficient, mm <sup>2</sup> /minute
$I_c$	Tempering Index
$\ell$	Half height of the cylinder, mm
M	Moisture content, % dry basis
$R^2$	Correlation coefficient
r	Distance along the cylinder radius, mm
$r_o$	Radius of the cylinder, mm
T	Temperature, K
t	Time, minute
z	Distance along the cylinder axis, mm

#### Subscripts

abs	Absolute
av	Average
d	Drying
eq	Equilibrium
i	Curve surface
in	Initial
j	Plane surface
s	Kernel surface
t	Tempering

#### Acknowledgements

The authors would like to express their sincere thanks to the Thailand Research Fund for financial support.

## References

1. Poomsa-ad, N., S. Soponronnarit and A. Terdyothin, 1999, Diffusion model of paddy drying by fluidization technique. Proceedings of the Engineering Technology Exhibition and Symposium., Bangkok Thailand November 1-2, 268-273. (In Thai)
2. Soponronnarit, S., S. Wetchacama, T. Swasdisevi, and N. Poomsa-ad, 1999, Managing moist paddy by drying, tempering and ambient air ventilation. *Drying Technology*, 17(1&2): 335-344.
3. Steffe, J.F. and R.P. Singh, 1980, Theoretical and practical aspects of rough rice tempering, *Trans. of the ASAE*, 23(3): 775-782.
4. Steffe, J.F., R.P. Singh, and A.S. Bakshi, 1978, Influence of tempering time and cooling on rice milling yields and moisture removal. ASAE paper No. 78-3055, ASAE., St Joseph, MI.
5. Zhang, Q. and J.B. Litchfield, 1991, An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*, 9(11): 233-244.
6. Tolaba, P., R. J. Aguerre and C. Suarez. 1999, Drying simulation of corn with tempering. *Drying Technology*, 17(6): 1081-1093.

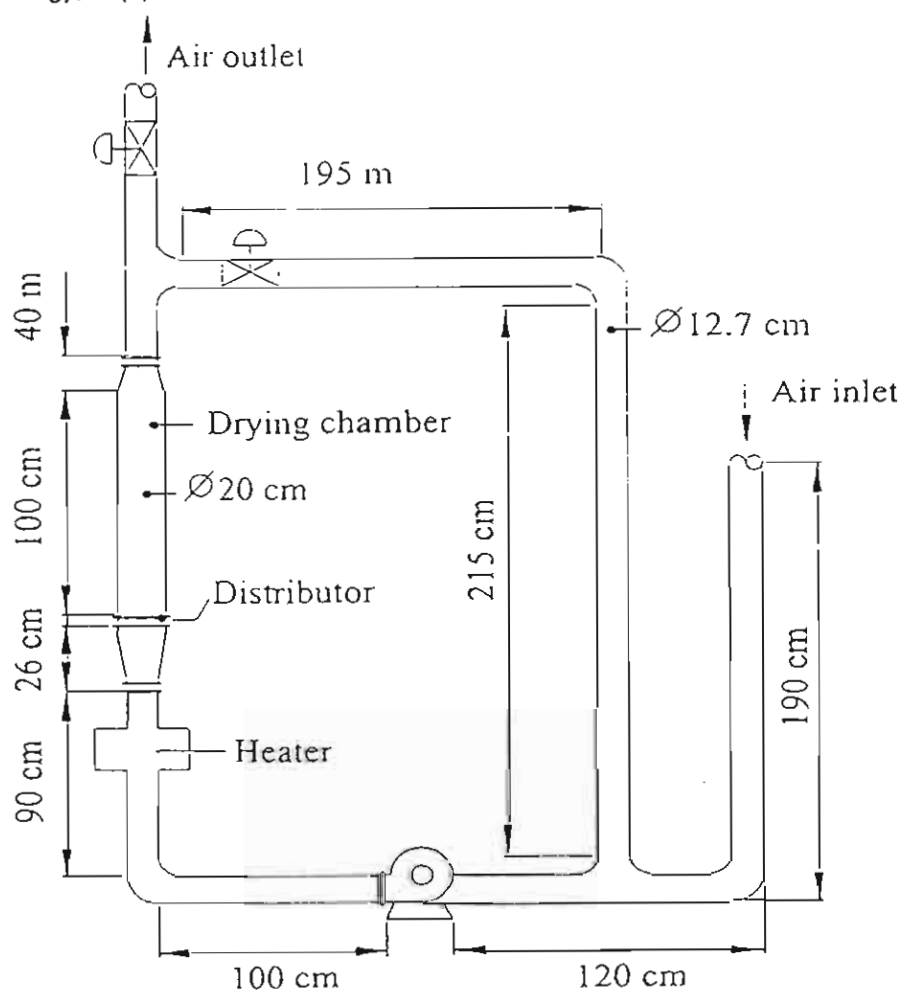


FIGURE 1 Diagram of experimental fluidized bed dryer.

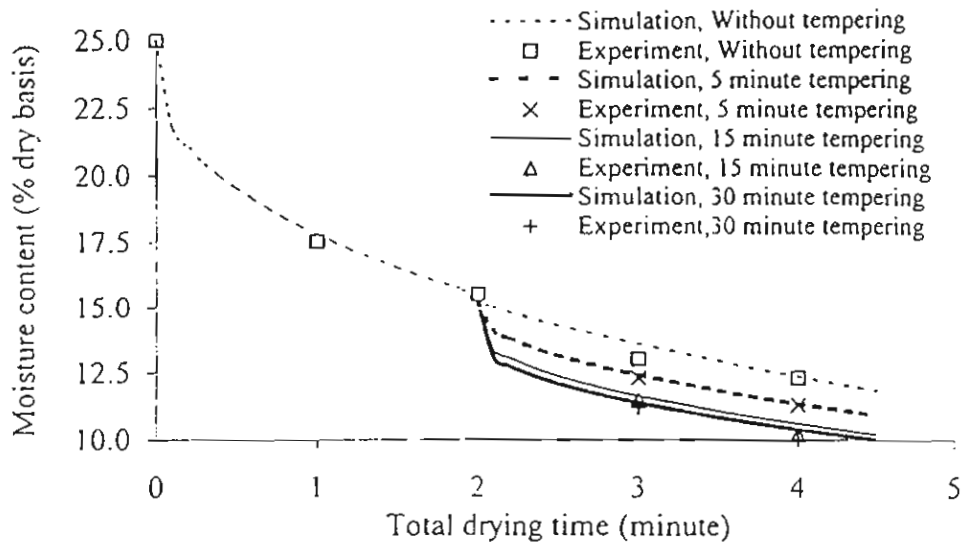


FIGURE 2 Effect of tempering time on the second drying pass. (Initial moisture content, 25.0% dry basis; the first drying pass time, 2 minutes and drying temperature, 130°C)

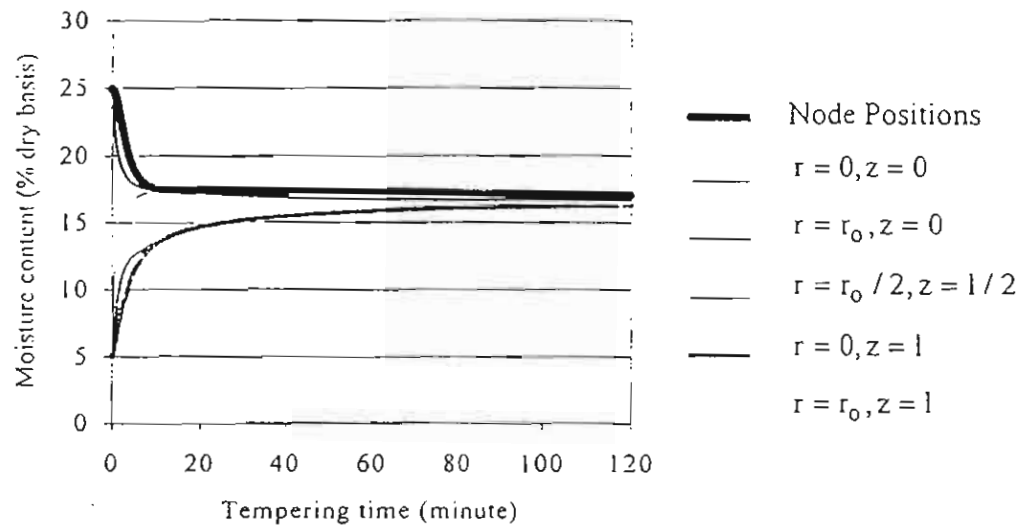


FIGURE 3 Simulated moisture changing inside paddy kernel during tempering. (Initial moisture content, 25.0% dry basis; the first drying pass time, 2 minutes and drying temperature, 130°C)

รายงานการประชุมวิชาการวิชาการประจำปี 2544  
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2544

## การอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคสเปาเด็ดเบดสองมิติ Soybean Drying by Two-Dimensional Spouted Bed Technique

ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ สมชาติ โสภณธนฤธี และสมเกียรติ ปรัชญาวารการ  
Songchai Wiriyapalwong, Somchart Soponronnarit, Somkiat Patchyawarakorn

1. นักศึกษาปริญญาเอก คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจร.)  
Ph.D. student, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi
2. อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
Lecturer, King Mongkut's University of Technology Thonburi

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคสเปาเด็ดเบดสองมิติ โดยทำการทดลองที่ความเร็วอากาศอยู่ในช่วง 20.2-20.5 m/s และปริมาณถั่วเหลืองในห้องอบแห้ง (hold-up) 25 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นในช่วง 28-32% dry basis ความชื้นสุดท้ายประมาณ 12-17% dry basis และอุณหภูมิอบแห้งในช่วง 120-150°C จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและความชื้นเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น คุณภาพของเมล็ดถั่วเหลืองเมื่อพิจารณาในรูปของการร้าว การแตก การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH change or urease activity) และความสามารถการละลายโปรตีน (protein solubility) ในสารละลายโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.2% พบว่า ร้อยละของการร้าวและการแตกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสุดท้าย มีค่าอยู่ในช่วง 50-60% และ 6-24% ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง และความสามารถการละลายโปรตีนของถั่วเหลือง หลังอบแห้งจะลดลงถึงเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ โดยคุณภาพโปรตีนก่อนและหลังอบแห้งเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง / ความสามารถในการละลายโปรตีน / เมล็ดพืช

### Abstract

Drying of soybean using a two-dimensional spouted bed dryer has been studied. Air velocity was varied in a small interval of 20.2-20.5 m/s, with a fixed hold-up of 25 kg. The soybean with initial moisture levels varying between 28 and 32% dry basis was dried to 12-17% dry basis, using inlet temperatures of 120-150°C. The experimental results indicate that higher temperatures and higher moisture contents provide faster moisture reduction rate.

The qualities of soybean have also been considered in terms of stress crack, breakage, urease activity and protein solubility in 0.2% KOH. It is shown that the percentages of stress crack and breakage depend on the temperature and the final moisture content with showing in a range of 50-60% and of 6-24%, respectively. The urease activity and protein solubility can possibly be reduced to a standard level with slightly changing the protein quality.

Key words: Grain / pH change / Protein solubility



## 1. บทนำ

การอบแห้งเมล็ดพืชหลังจากการเก็บเกี่ยวเพื่อลดความชื้นในเมล็ดพืช ทำให้สามารถเก็บรักษาเมล็ดพืชไว้ได้นานขึ้น ทั้งยังลดการสูญเสียและรักษาคุณภาพของเมล็ดพืชไว้ได้นาน การอบแห้งโดยเทคนิค สเปาเต็ดเบดสองมิติเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ลดความชื้นเมล็ดพืชซึ่งให้อัตราการอบแห้งสูงและใช้เวลาในการอบแห้งสั้น การอบแห้งเมล็ดพืชซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรได้แก่ เมล็ดถั่วเหลือง ข้าวสาลี ข้าวโพด โดย Kalwar *et al.* (1991) พบว่าอุณหภูมิอากาศหลังอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิเมล็ดข้าวสาลีประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  แสดงว่า ช่วงเวลาที่อยู่ในสเปาเร็วเกินกว่าที่จะเกิดสภาวะสมดุลความร้อน สำหรับผลของความเร็วแกสต่อการลดความชื้นในเมล็ดพืชพบว่า ไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งแต่อย่างใด เนื่องจากการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่ลดลงถูกควบคุมโดยการแพร่ของโมเลกุลน้ำภายในเมล็ดพืช แต่เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น และความกว้างบริเวณทางเข้าห้องอบแห้ง (slot width) มากขึ้น อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระยะ slot width เท่ากับเป็นการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนของอนุภาค cycle time สั้นลง (ในขณะที่ residence time เท่าเดิม) เวลาที่เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลใน draft plate นานขึ้น จึงทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น

นอกจากอุณหภูมิอากาศเข้า และระยะ slot width จะส่งผลต่อการลดความชื้นของอนุภาคแล้ว ความสูงเบด (bed height) ก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดความชื้น (Kalwar *et al.*, 1993) โดยที่ความสูงเบดเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งจะลดลง เนื่องจากเบดที่มีความสูงมาก อนุภาคจะใช้เวลาอยู่ใน downcomer ทำให้ cycle time นานขึ้น เวลาที่อยู่ในสเปา (spout) สั้นลง อัตราการอบแห้งจึงลดลง จากผลการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งของ (Kalwar *et al.*, 1991) พบว่า สมการของ page (1949) สามารถอธิบายการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดพืชได้เป็นอย่างดี และได้เสนอรูปแบบสมการไว้ดังนี้

$$\frac{x - x_{eq}}{x_o - x_{eq}} = \exp(-kt^n) \quad (1)$$

โดยที่ค่า  $k$  และ  $n$  ได้จากผลการทดลองเป็นฟังก์ชันของมิติต่าง ๆ ของสเปาเต็ดเบดสองมิติ อุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดพืช อุณหภูมิอากาศที่ทางออกห้องอบ ความชื้นสมดุลของอากาศ และ cycle time

เป็นที่ทราบกันดีว่าเมล็ดถั่วเหลืองดิบยังไม่สามารถใช้บริโภคหรือใช้เลี้ยงสัตว์ได้ทันที เนื่องจากเมล็ดถั่วเหลืองดิบประกอบไปด้วยสารหลายชนิดซึ่งขัดขวางการใช้ประโยชน์ของสารอาหาร (antibutritional substances) และบางชนิดมีโทษต่อผู้บริโภค จึงจำเป็นต้องทำลายฤทธิ์สารเหล่านี้เสียก่อนโดยการให้ความร้อนแก่เมล็ดถั่วเหลืองหรือทำให้เมล็ดถั่วเหลืองสุก แล้วจึงนำไปบริโภคหรือใช้เลี้ยงสัตว์ แต่ถึงอย่างไรความร้อนที่ให้แก่ถั่วเหลืองก็ไม่ควรมากเกินไปอาจทำให้ถั่วเหลืองไหม้และคุณค่าทางอาหารของโปรตีนลดลง

การศึกษาการให้ความร้อนแก่เมล็ดถั่วเหลืองด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด และการเอ็กทруд ที่มีผลต่อน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการใช้อาหาร ค่าการย่อยได้ของไขมันในการทดลองเลี้ยงกับลูกไก่ (White *et al.*, 1967) และในการทดลองเลี้ยงกับลูกสุกร (Faber and Zimmerman, 1973) พบว่า ทั้ง 2 วิธีให้น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการใช้อาหารดีขึ้นเมื่อเทียบกับอาหารผสมกากถั่วเหลืองกับน้ำมันถั่วเหลือง นอกจากนี้ พบว่า การทำอาหารให้เป็นเม็ดช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของการเลี้ยงลูกไก่ (White *et al.*, 1967) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเอ็กทрудจะให้ไถหนักตัวที่เพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเทียบกับถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรด เนื่องจากการทำเป็นเม็ดไปเพิ่มความหนาแน่นในอาหาร ทำให้น้ำหนักตัวเพิ่มขึ้น

นอกจากการให้ความร้อนด้วยการเอ็กทрудและการแผ่รังสีอินฟราเรดแล้ว การอบแห้งโดยเทคนิค ฟลูอิดไรซ์เบดก็เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถให้ความร้อนแก่เมล็ดถั่วเหลือง เพื่อลดความชื้นและลดสารขัดขวางการใช้ประโยชน์สารอาหารในเมล็ดถั่วเหลืองได้ (วิวัฒน์ วุฒิวิวัฒน์ชัย 2541) โดยใช้ค่า Urease activity เป็นวิธีทดสอบทางอ้อม เพื่อ