

the quality of paddy before drying. It should have a function similar to dryer, but the capability of moisture reduction should be lower along with the lower consumption of energy.

Several researchers develop mathematical models and attempt to investigate the optimum of the machinery systems for grain harvesting, handling, drying and storage. In 1972, Carpenter and Brooker (3) proposed a model which determined the minimum cost of harvesting, drying and storage for corn operations of various sizes. The model provided a means of determining and evaluating the effect of the size and type of equipment used in the system by simulating the operation of alternative machine systems on computer. Murata et al. (4) studied the dehumidification of paddy using silica gel. The results were shown that the silica gel dehumidifier for cereal grains at normal temperature was technically feasible. The application of silica gel for grain drying is an interesting technique for the pretreatment system because the method is simple and provides low input energy.

This section describes the drying technique for moisture deduction of paddy by fluidization technique developed by Soponronnarit and Prachayawarakorn (5). The advantages of this technique are as follows: rapid drying, compact dryer size and uniform final moisture content. Moreover, the head rice yield and whiteness can be maintained. By this approach, high moisture content of paddy should not be reduced lower than 16.3% dry basis by a single stage drying approach. Several researchers [Soponronnarit et al. (6), Steffe et al. (7), Zhang and Litchfield (8)] suggested that paddy should be dried by several drying stages in which tempering treatment is in between each drying stage in order to improve drying rate and maintain head rice yield. This treatment is traditionally used in drying process at rice milling factories.

The aims of this work are to investigate the paddy drying process on field experience at a rice merchant and the pretreatment systems for moist paddy using silica gel and ambient air. The physical quality in terms of head rice yield and whiteness will be reported and discussed.

1.2 Materials and Methods

(a) Materials

1.2.1 Drying process

In this study, the fresh paddy was dried by a 20 ton/h continuous fluidized bed dryer, with subsequent tempering in a conditioning unit, and dried again by a LSU dryer in the last step as shown in Figure 1. The paddy samples were collected for determining moisture content in each drying unit. The moisture content was tested at site by a Kett moisture meter (model J999) and a single kernel moisture meter (model MC CTR-200E). The grain temperature, drying air temperature and ambient air conditions were measured by K-typed thermocouple connected to a Yogokawa data logger with an accuracy of $\pm 1^{\circ}\text{C}$. To compare with the quick test method, the exact

moisture content of paddy was determined by a hot air oven at temperature of 103°C for 72 hours [AOAC, (9)]. The method of head rice yield determination was followed the guideline of USDA method [USDA, (10)].

1.2.1.1 The Fluidized bed dryer

The fluidized bed drying system is comprised of a rectangular shaped drying chamber with a dimension of 1.2x4.8x1.0m³, a backward curved-blade centrifugal fan driven by an electric motor, and a rice husk furnace. The drying air temperature was controlled by a PID controller with an accuracy of $\pm 1^{\circ}\text{C}$. The air flow rate was controlled by a damper at the inlet air duct of the fluidized bed dryer. The schematic diagram of the dryer is shown in Figure 1(no.5). Initial moisture content of paddy was collected at the hopper (no.4 in Figure 1). For dried paddy, it was taken from the bucket conveyer (no. 11 in Figure 1) before conveying to the conditioning unit.

1.2.1.2 Conditioning unit

The position no.6 in Figure 1 is presented as the conditioning unit. The function of this unit is to temper the dried paddy after fluidization. Tempering time was about 30 to 40 minutes. During this period, the moisture inside paddy kernels transports to the exterior surface, but it does not evaporate to the environment. This process can reduce stresses inside kernel.

1.2.1.3 LSU dryer

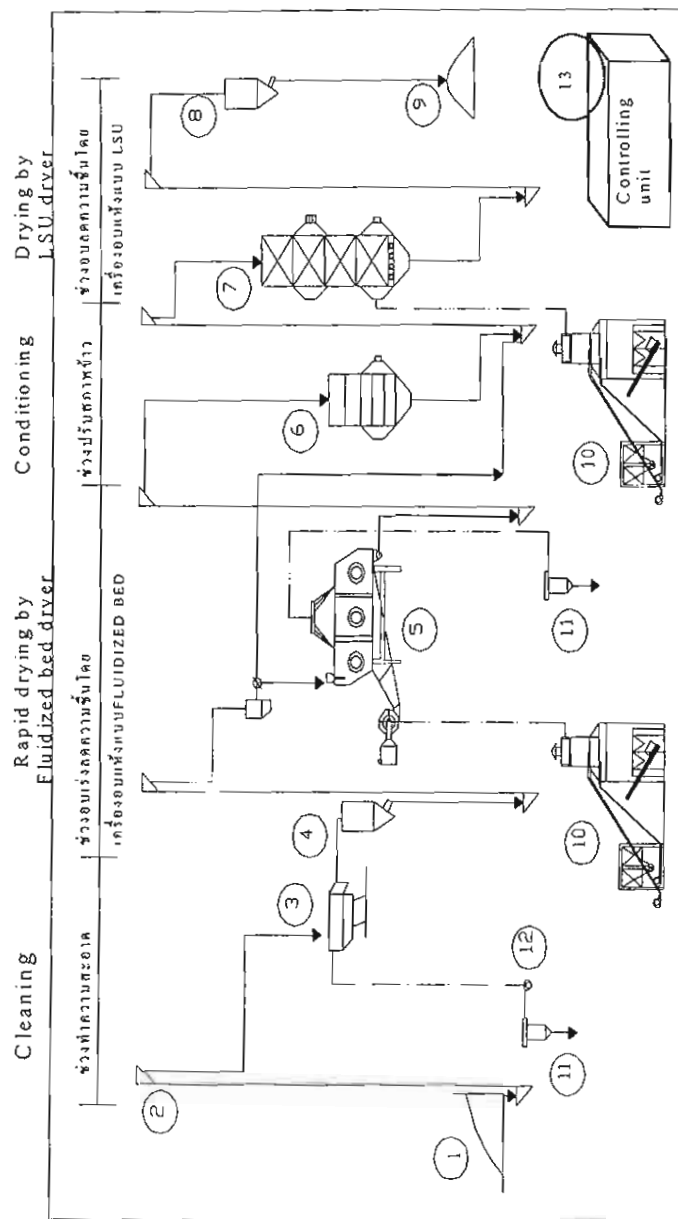
After tempering, paddy was conveyed by a bucket conveyer to the LSU dryer for reducing moisture content to the desired value of 14% wet basis. Finally, the dried paddy was conveyed to a storage area. The storage room was equipped with air ventilation ducts under floor for ventilating heat in the bulk.

1.2.2 Pre-treatment of wet paddy

In this experiment, the paddy was stored into 3 plastic bags with a capacity of 500 kg per bag as shown in Figure 2. In the first bag, the paddy was ventilated by ambient air. In the second bag, the paddy was dried by desiccant silica gel dryer and the last one was referred as the reference unit with no any equipment facility. The experiment was repeated in triplicate.

(b) Methods

For the drying process as shown in Figure 1, paddy samples were collected in each stage. For pretreatment of wet paddy, paddy samples were also taken from each bag. During the experiments, inlet air, moisture content, bed temperature and outlet air were recorded. The bed temperatures and dry bulb temperatures were measured by K-typed thermocouple, which was continuously monitored by a Yokokawa data logger with an accuracy of $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. The relative humidity was determined by the dry and wet bulb temperatures. The Figure 2 illustrates the schematic diagram of the pretreatment of fresh paddy.



1. High moist paddy bulk (bed height 2-5 m)
2. Bucket conveyor
3. Cleaning machine
4. Hopper
5. Fluidized bed dryer
6. Conditioning unit
7. LSU dryer
8. Hopper
9. Dry paddy
10. Rice husk furnace
11. Cyclone dust Collector
12. Conveyor
13. Controlling unit

Figure 1. Schematic diagram of drying process at Khung Li Chan rice merchant.

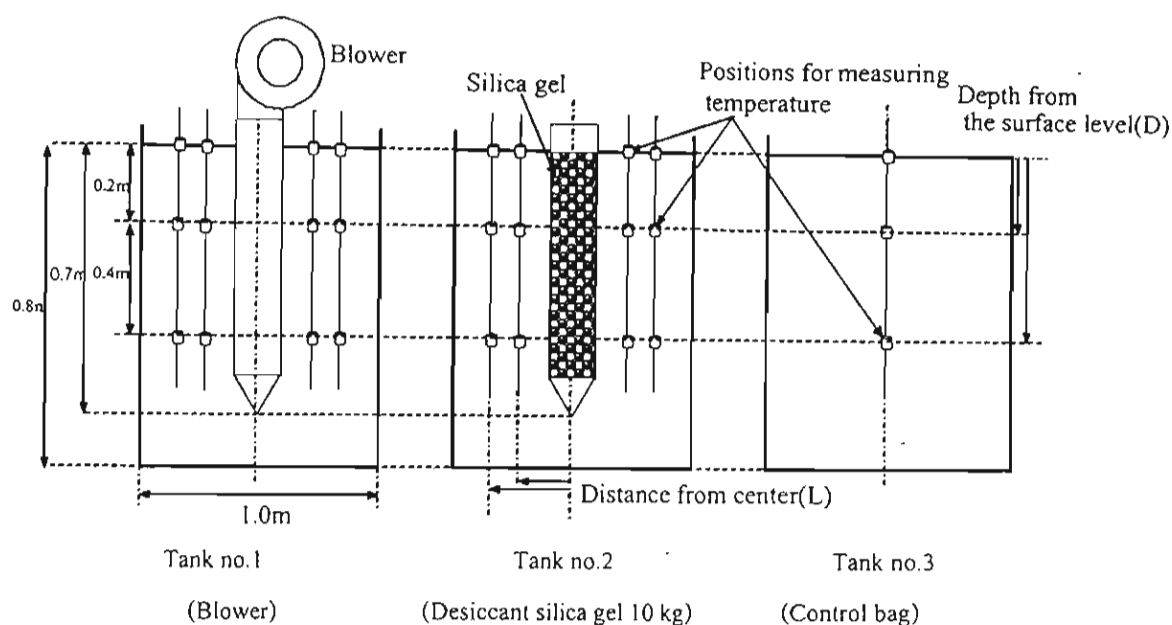


Figure 2 Schematic diagram of pretreatment systems for paddy

For Tank no.1, paddy was dried by ambient air using a 0.75kW motor to drive a fan. For Tank no.2, the paddy was dried by desiccant silica gel. The silica gel with a mass of 10 kg was used as an adsorbent agent to adsorb the water in the paddy and the last tank was not equipped with any device (Tank no.3 as the control unit). The samples were collected at each time interval to check head rice yield, whiteness and moisture content. The head rice yield was determined in triplicate by dehusking a 125g sample of rough rice. The brown rice was then milled in a milling machine and the head rice was separated from the broken rice using a rice separator. The head rice yield is the ratio of the head rice weight to the original weight of rough rice. Rice whiteness value was determined in triplicate using a SATAKE color meter.

1.3 Results and discussion

1.3.1 Moisture distribution during drying process

The fresh paddy kernels were collected in a heap installed in front of the bucket conveyor (no.1 in Figure 1). They were stored for 3 to 5 hours before drying. At the position no.1, the temperature and relative humidity in the grain bulk at the bed depth of paddy 1.0m from the surface level were in a range of 40 to 50°C and 90 to 95%, respectively. This result indicates that the condition in the bulk stimulates the yellowing of rice kernels if the delay of drying in the process, at least 3 to 4 days, occurs.

Figure 3 shows the comparison of experimental moisture content measured by single moisture meter and hot air oven method, indicating that the single moisture meter measuring the moisture content of paddy higher than the hot air oven approximately 2-3% wet basis. In Figure 4, the average initial moisture content at fluidized

bed dryer inlet, measured by the oven method, was 18.3% wet basis and the standard deviation of inlet moisture content, examined by the single moisture meter, was in a range of 1.9-3.3% wet basis implying the small deviation of moisture content at inlet. This moisture level is practically rather safe even though the drying is postponed for a week.

The moisture content of paddy leaving from the fluidized bed dryer varied in a range of 15.0 to 16.0% wet basis along with the standard deviation of 1.1-3.5% wet basis. From the standard deviation point of view, the deviation of moisture content between inlet and outlet lied in the same range, indicating the flow of grains in the dryer closed to plug type.

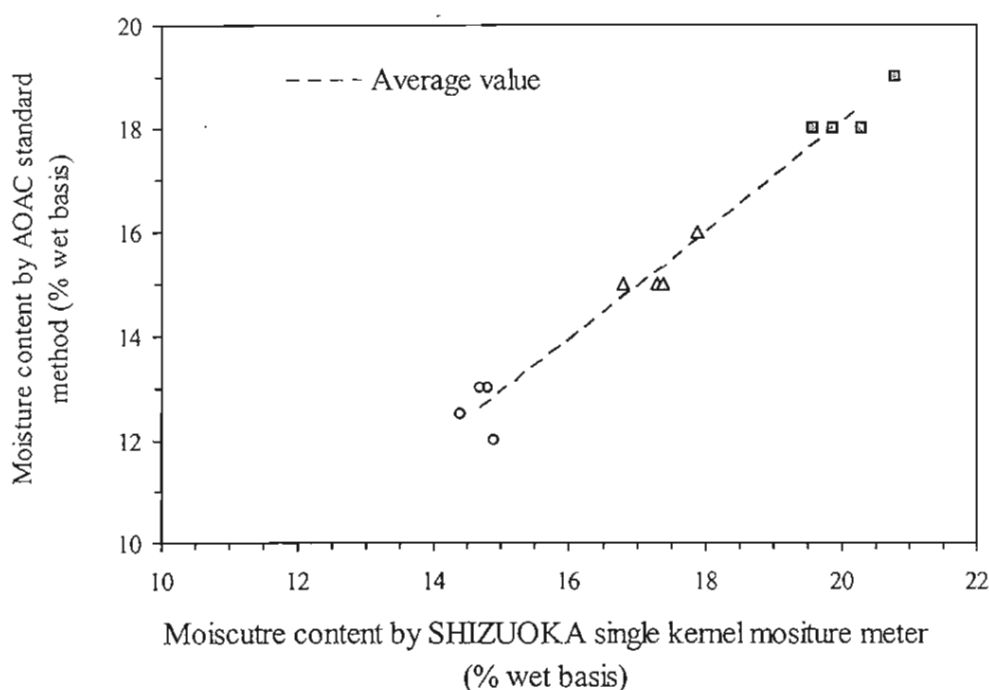


Figure 3 Comparison of moisture content measured by a SHIZUOKA single grain moisture meter and Oven standard method (AOAC, 1984)

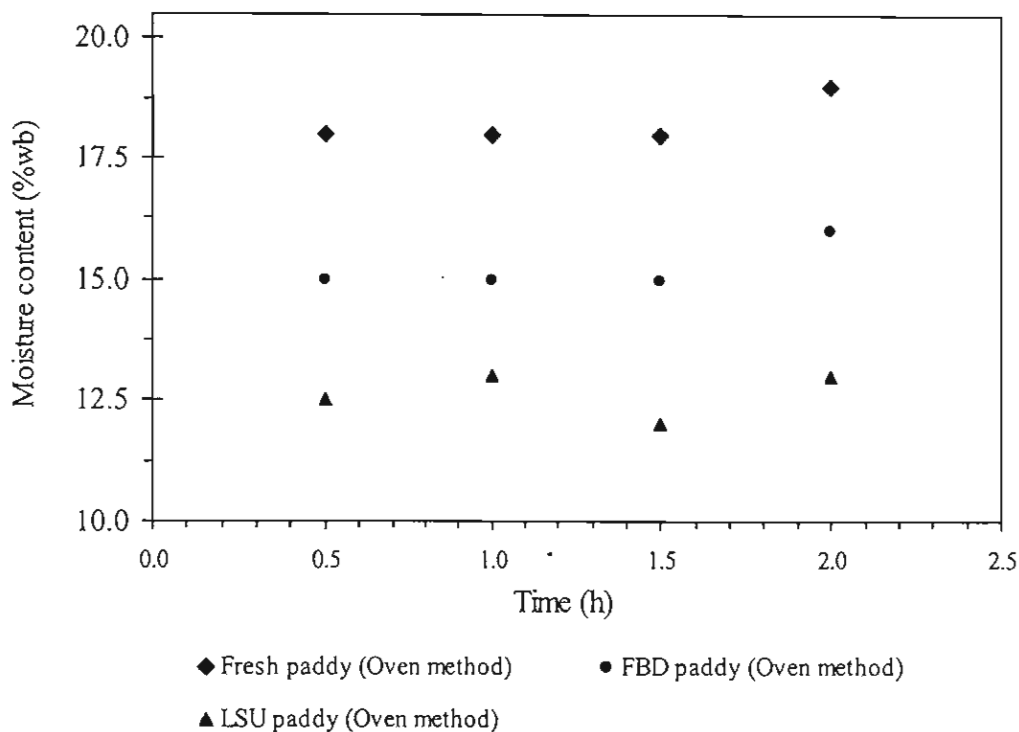


Figure 4 Evolution of moisture content of paddy during drying in different units at Khung Li Chan

Rice Merchant: Average initial moisture content 18.3%wet basis

The final moisture content after LSU was in a range of 12.5 to 13.0% wet basis and the standard deviation was about 1.0-1.8% wet basis. This moisture level ensures that it is safe for a long term storage without deterioration of grain quality [Soponronnarit et al. (11)].

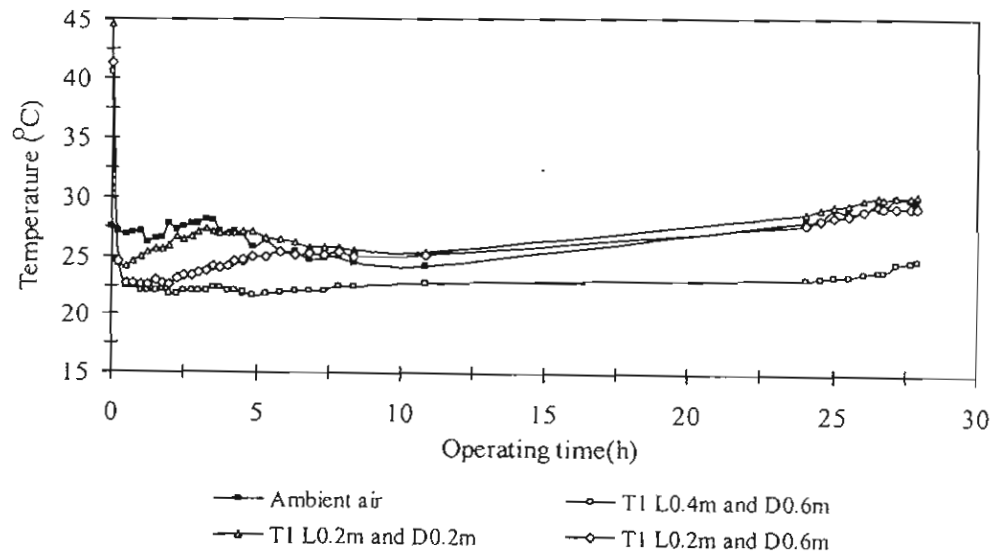
1.3.2 Pre-treatment of paddy using different techniques

The temperatures at different locations of the three tanks are shown in Figure 5. The ambient air temperature was about 30°C. At the beginning, the average temperature of paddy in each tank was 40°C since the paddy kernels in the tanks were kept at least 12 hours without air ventilation and thus heat can be liberated from the wet paddy by its respiration. During the ventilation, the drop in temperature from 42-43 to 23°C in Tank no.1 was in the first 15 minutes of operating time as shown in Figure5(a) and the consequent temperature at each level was remarkably lower in Tank no.1 than in Tanks no.2 and 3 as shown in Figure 5(b). After the elapsed time of 27 hours, the temperatures in the Tanks no.2 and 3 slightly increased from the beginning and were in between 40 and 50°C.

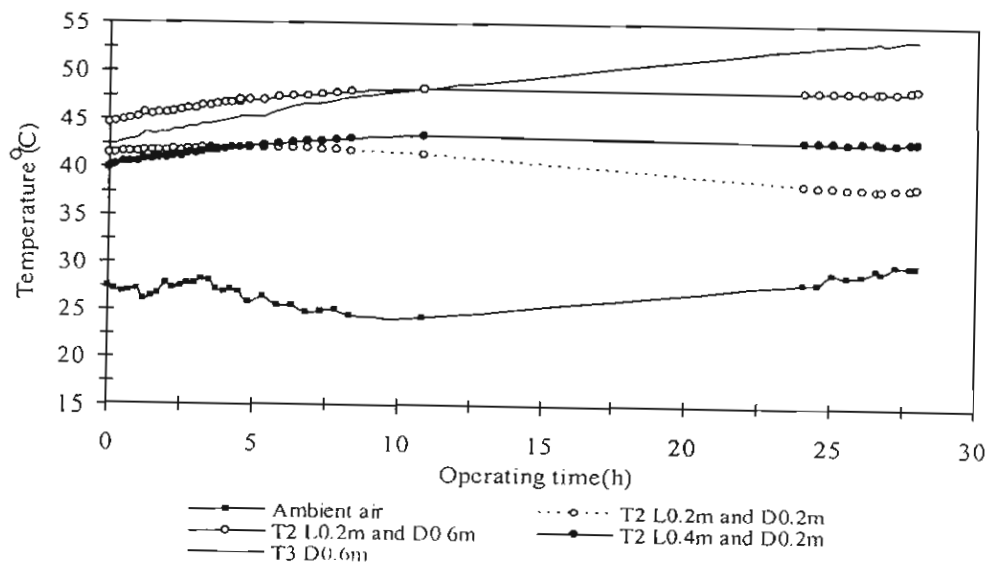
As shown in Figure 5(a), temperature in Tank no.1 for each depth was slightly lower than the ambient temperature, with the lowest one at the radius 0.2m and depth 0.6m (Radius and Depth account for the distance

from the center of tank and from the surface level of the tank, respectively). Figure 5(b) shows the temperature profile in Tank no.2 and Tank no.3. According to the change in temperature for these tanks, it clearly indicates that the pretreatment by ambient air ventilation can reduce the risk of the yellowing of paddy.

An average initial moisture content of paddy in Experiment no. 2 was about $22.8 \pm 3.5\%$ wet basis. The moisture content of paddy at the surface level in Tanks no.2 and 3 as shown in Figure 6 is reduced by natural air (no forced air) whilst the moisture content in Tank 1 is reduced by forcing air blown through the paddy bulk, enabling to remove the moisture content slightly faster than in Tank no.2 and Tank no.3.



Temperature profiles in each position in Tank no.1 (air ventilation)



Temperature profiles in each position in Tank no.2 (Desiccant silica gel) and 3 (Control unit)

Figure 5 Temperature change in each position during pretreatment by different techniques
[Experiment no.3]

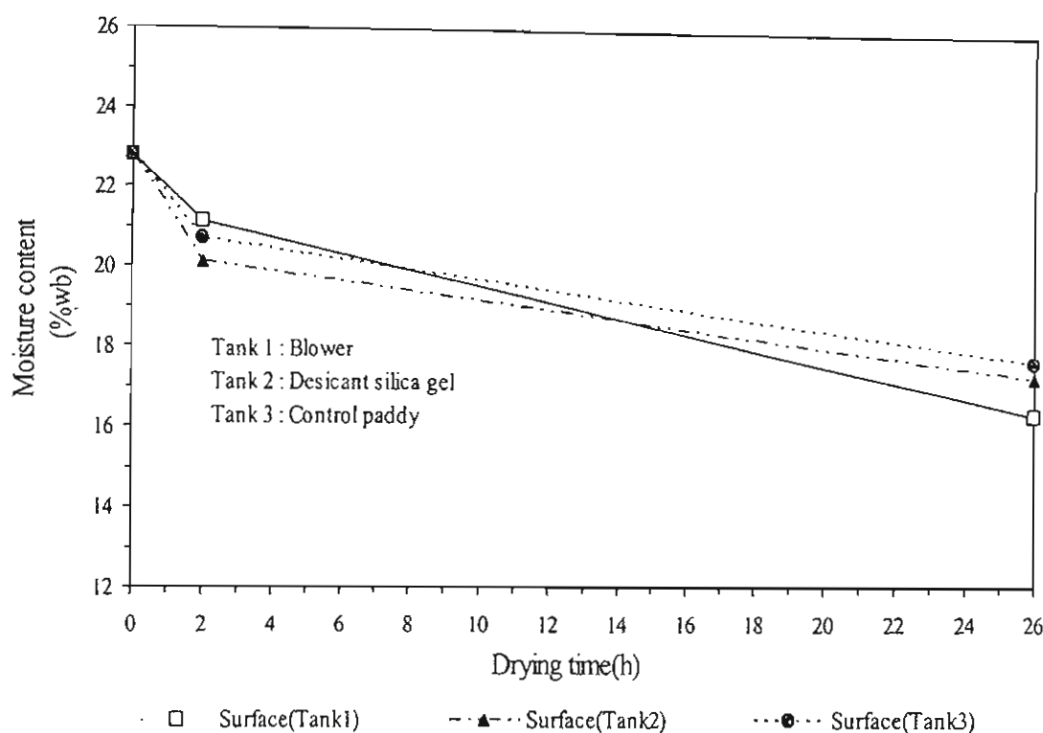


Figure 6 Evolution of moisture content of paddy at the surface level for 3 tanks: M_i 22.8% wet basis (standard deviation 3.5% wet basis) [Experiment no.2]

Figures 7 and 8 show the moisture content of paddy at the depths of 0.2m and 0.6m, respectively. The moisture content of paddy at each bed depth was reduced faster in Tank no.1 than in Tanks no.2 and 3, with the lowest drying rate being of Tank no. 3. The average final moisture content throughout the bed height in Tank no.1 was 17% wet basis whilst it was still higher than 20% wet basis in the desiccant silica gel tank, of which the value was almost the same as that at the beginning. This indicated the small amount of the water to be adsorbed by the silica gel.

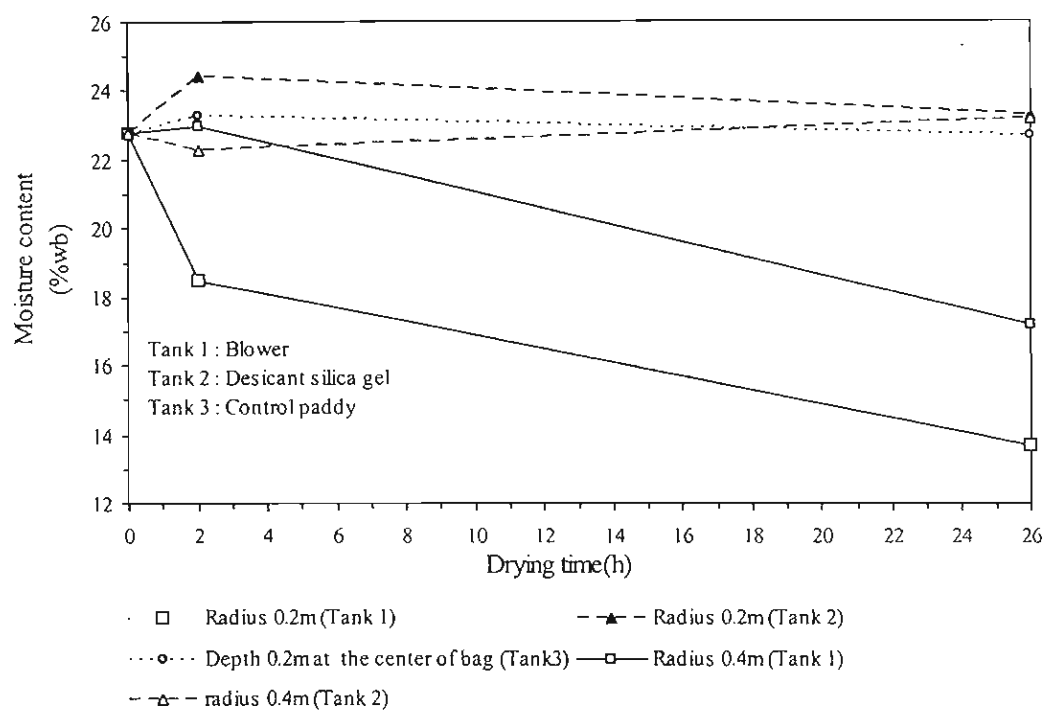


Figure 7 Evolution of moisture content of paddy at the bed depth of 0.2m from surface level: M_i 22.8%wet basis
(standard deviation 3.5%wet basis [Experiment no.2])

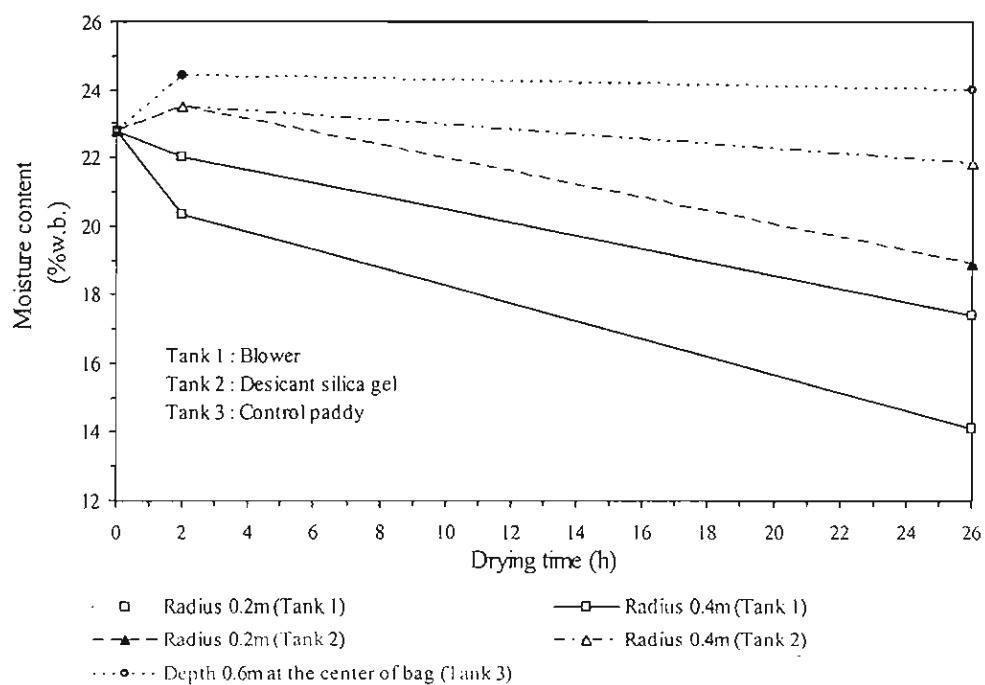


Figure 8 Evolution of moisture content of paddy at the bed depth of 0.6m from surface level: M_i 22.8%wet basis
(standard deviation 3.5%wet basis) [Experiment no.2]

1.3.3 Head rice yield and rice whiteness

Table 1 shows the head rice yield during pretreatment. The head rice yields were slightly lower at the bed depths of 0.2 and 0.4m for all tanks than at the surface. This might be affected by the combination of the accumulation of heat from the grain respiration and the moisture removal towards the development of stress on rice kernels.

Table 2 represents the value of rice whiteness during pretreatment. An average initial moisture content of paddy used for testing the paddy quality was about 18.5% wet basis and average initial whiteness of rice for all tanks was 36.9 ± 0.7 . During treatment for 27 hours, the rice whiteness obtained from the silica gel and control tanks has the same value as that of rice in Tank no.1. The rice whiteness at the end obtained from all tanks is still acceptable.

From this study, it shows that the paddy at initial moisture content of 18.5% wet basis does not deteriorate within 2 days even though there is no any equipment for treating the wet paddy. However, when the initial moisture content is approximate 22-25% wet basis, the yellowing of rice can occur easily within 2-3 days if the grains cannot be dried to the safe level. To prevent the occurrence of yellowness, the pretreatment system using ambient air would be a suitable way.

Table 1. Head rice yield during treatment by different methods
[Initial moisture content, M_i = 18.5% wet basis (Experiment no.2)]

Time (h)	Head rice yield at various depths and levels in each paddy bins													
	TANK 1 (Blower)					TANK 2 (Desiccant silica gel)					TANK 3 (Control unit)			
	surface	L20 D20	L20 D60	L40 D20	L40 D60	surface	L20 D20	L20 D60	L40 D20	L40 D60	surface	D20	D40	D60
0	60.9	57.7	58.4	57.7	58.4	59.9	58.4	59.2	58.4	59.2	59.9	57.8	58.4	58.4
2.5	60.7	58.7	55.9	58.3	58.4	59.3	54.3	59.7	54.3	58.7	60.1	62.3	59.3	58.6
24	61.2	58.8	60.1	58.8	60.0	60.3	52.9	57.7	57.1	58.9	60.4	58.6	56.1	56.2
27	60.6	61.7	60.4	59.0	59.7	57.9	57.4	57.6	58.6	55.2	64.9	59.7	57.1	58.5
Average	60.9	59.3	58.7	58.5	58.9	58.6	55.8	58.6	57.1	58.0	61.3	59.6	57.7	57.9

Note : L = radius from the center of tank, m

D = bed depth from the surface level, m

Table 2 The value of rice whiteness during treatment by different methods

[Initial moisture content, M_i 18.5%wet basis (Experiment no.2)]

Time (h)	Whiteness at various bed depth in each paddy tank													
	TANK 1					TANK 2					TANK 3			
	surface	L20	L20	L40	L40	surface	L20	L20	L40	L40	surface	D20	D40	D60
		D20	D60	D20	D60		D20	D60	D20	D60				
0	37.2	36.8	37.2	36.8	37.2	38.2	37.0	37.2	37.0	37.2	35.8	35.3	36.4	37.0
2.5	37.2	36.6	37.2	37.2	36.0	38.6	36.8	36.4	35.3	37.2	37.6	35.8	37.2	37.0
24	34.1	37.0	36.0	35.4	35.6	36.4	36.6	36.4	35.7	38.0	35.3	35.4	37.2	36.1
27	37.8	34.9	36.8	36.6	36.2	36.4	34.3	36.4	36.2	35.8	36.6	35.3	35.4	36.0
Average	36.6	36.3	36.8	36.5	36.3	37.4	36.2	36.6	36.0	37.1	36.3	35.5	36.6	36.7

Note : L = radius from the center of tank, m

D = bed depth from the surface level, m

1.4 Conclusions

The following conclusions could be drawn:

1. The moisture distributions leaving from fluidized bed dryer, conditioning unit and LSU dryer were almost uniform.
2. The air ventilation system for pretreatment of wet paddy can reduce accumulation of heat in the grain bulk and prevent the deterioration from heat liberation of grain.
3. The desiccant silica gel drying technique was not suitable for treating the wet paddy.

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 whiteness of rice.

References:

1. Damardiaty, D.S. and Barrett, D.A. Improving and maintenance of rice quality in Indonesia, *Indon. Agric. Res. Dev. Journal*. 1986; 8: 45-50.
2. Soponronnarit S and Nathakarakule A. Field experience of in-store drying of paddy under tropical climates, *The 13th Proc. ASEAN Seminar on Grain Postharvest Tech.*, Brunai Darussalam 1990; 4-7 Sept.: 183-196.
3. Carpenter M.L. and Brooker D.B. Minimum cost machinery systems for harvesting, drying and storing shelled corn, *Transactions of the ASAE* 1972; 15(2): 515-519.
4. Maruta S, Enomoto T and Miyauchi K. Adsorption Characteristics of Thin Silica-Gel Layer and Simulation in the Fixed Layer. (Japanese) 1993; 55(3): 41-49.
5. Soponronnarit S and Prachayawarakorn S. Maintaining Quality, Maximizing Throughput and Minimizing Energy Consumption in Fluidized Bed Paddy Drying, *Proceeding of the 15th ASEAN Seminar on Postharvest Technology* 1992; 8-11 Sept.: Singapore.
6. Soponronnarit S, Wetchama S, Swasdisevi T and Poomsa-ad N. Managing Moist Paddy by Drying, Tempering and Ambient Air Ventilation, *Drying Technology*; 1999; 17(1&2): 335-344.
7. Steffe J.F., Singh R.P. and Bakshi A.S. Influence of Tempering Time and Cooling on Rice Milling Yields and Moisture Removal. *Trans. of ASAE* 1979; 22: 1214-1218, 1224.
8. Zhang Q. and Litchfield J.B. An Optimization of Intermittent Corn Drying in a Laboratory Scale Thin Layer Dryer, *Drying Technology*; 1991; 9(11): 233-244.
9. AOAC. *Official Methods of Analysis*, 14th edition, Washington, D.C., Association of Official Analytical Chemists, USA, 1984.
10. USDA. *Grain Grade Procedure*. Federal Grain Inspection Service, Washington DC., USA, 1988.
11. Soponronnarit S, Amatachaya P, Prachayawarakorn S, Nathakarakule A and Inchan S. Field Trial of In-Store Drying and Storage, *The Kasetsart J.*, 1997; 18: 86-100.

ลักษณะเฉพาะของข้าวที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไชด์เบด
ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

CHARACTERISTICS OF RICE IN
SUPERHEATED-STEAM FLUIDISED-BED DRYER

ชัยศักดิ์ เตชะไพโรจน์¹, สมเกียรติ ปรัชญารากร², สมชาติ โสภณธนฤทธิ์³

¹นักศึกษาปริญญาเอก, ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ³ศาสตราจารย์

^{1,2}คณะพลังงานและวัสดุ ³คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สุขสวัสดิ์ 48, แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ : การศึกษาลักษณะเฉพาะของข้าวที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไชด์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 41-42.5 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยความชื้นสุดท้าย 16-28 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการอบแห้งและคุณภาพข้าวเปลือก สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองศึกษามีดังนี้ ความสูงเบดข้าวเปลือก 10, 12.5 และ 15 เซนติเมตร อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 150-170 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำในระบบอบแห้ง 106.1 กิโลปาสกาล ความเร็วในห้องอบ 3.1 เมตร/วินาที พบว่าอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าความสูงเบดข้าวเปลือก ในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถลดความชื้นได้ต่ำถึง 18 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยที่เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวมีค่ามากกว่า 60% ถ้าลดความชื้นต่ำกว่านี้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อความขาวและ white belly นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิการอบแห้งสูงให้ค่า peak viscosity, breakdown viscosity และ setback viscosity ต่ำ

ABSTRACT : Characteristic properties of parboiled rice in a superheated-steam fluidised-bed dryer have been investigated. The operating conditions were carried out at the initial moisture contents of 41-42.5% dry basis, three bed heights of 10, 12.5 and 15 cm, superheated steam temperatures of 150-170°C with a constant pressure of 106.1 kPa and a fixed superficial velocity of 3.1 m/s. The experimental results were shown that the inlet temperature had much more effect on removal of moisture content than the bed height. For the paddy quality, the head rice yield after reducing moisture content to 18% dry basis was higher than 60% (average reference value of 52%). The color of rice whiteness becomes darker and the inlet temperature significantly affects white belly. In addition, higher temperature provided the lower values of peak viscosity, breakdown viscosity and setback viscosity were also found under high temperature.

Keywords. Head rice yield; Rapid Visco Analyzer (RVA); White belly.

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศผลิตข้าวที่สำคัญ ผลผลิตข้าวนอกจากใช้สำหรับบริโภคภายในประเทศ ยังสามารถส่งออกโดยปริมาณการส่งออกข้าวของไทยจัดเป็นอันดับ 1 ของโลกมาหลายปี ข้าวหนึ่งซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดที่ผลิตจากข้าวเปลือก โดยผ่านกระบวนการต่างๆ ดังนี้ 1 การแช่ (Soaking) เพื่อทำให้ข้าวเปลือกนั้นมีความชื้นเพิ่มขึ้น โดยมีความชื้นอยู่ในระหว่าง 42-54% มาตรฐานแห้ง ซึ่งโดยทั่วไปน้ำที่ใช้แช่เป็นน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 60-80°C 2 การนึ่ง (Steaming) เพื่อทำให้ข้าวที่มีความชื้นเหมาะสมมาให้ความร้อนโดยการต้มหรือนึ่งด้วยไอน้ำ ซึ่งทำให้เม็ด สคาร์ชเกิดเจลาไทไนซ์ 3 การอบแห้งเพื่อลดความชื้นที่มีอยู่ในข้าวเปลือกลงต่ำกว่า 16 % มาตรฐานแห้ง ก่อนจะนำไปเก็บรักษาหรือจัดสีให้เป็นข้าวหนึ่ง ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวข้างต้นเป็นผลทำข้าวหนึ่งที่ได้มีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวขาว (Dimopoulos & Muller, 1972)

จากกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งดังกล่าวข้างต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการนึ่งและการอบแห้งซึ่งมีความเป็นไปได้ที่รวมเข้าเป็นขั้นตอนเดียว โดยการประยุกต์ใช้ไอน้ำร้อนยังคงเป็นตัวเลือกในการนึ่งและอบแห้งแทน ก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาข้อดีบางประการของการใช้ไอน้ำร้อนยังคง เช่น อัตราการอบแห้งสูงและการกำจัดกลิ่นของผลิตภัณฑ์ (Tang et al., 2000; Iyota et al., 2001; Tatermoto et al., 2002)

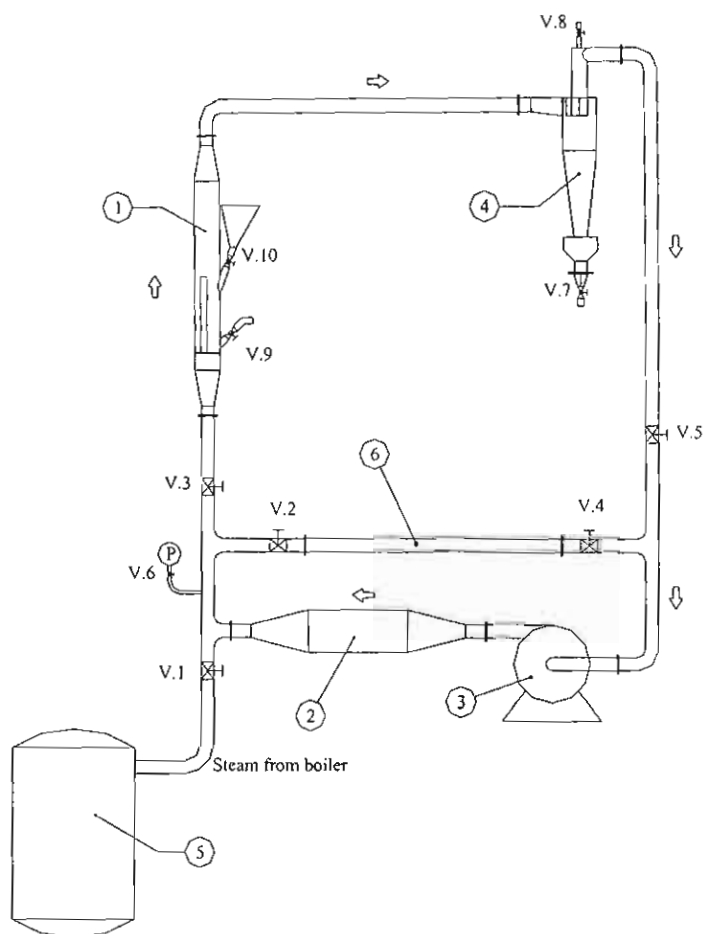
จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของข้าวที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยังคง ได้แก่ คุณลักษณะของการอบแห้งข้าว, คุณสมบัติทาง pasting ตลอดจนคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งประกอบด้วย ปริมาณต้นข้าว, ความขาวและ white belly

2. อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดแบบวงวด รูปทรงกระบอกทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm และสูง 100 cm อุปกรณ์ให้ความร้อนมีขนาด 13.5 kW เพื่อเปลี่ยนสถานะของไอน้ำอัดตัวเป็นไอน้ำร้อนยังคงตามอุณหภูมิที่ต้องการ โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID มีค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ พัดลม (blower) เป็นแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง (backward-curved centrifugal blower) ขับด้วยมอเตอร์ขนาด 2.2 kW อัตราการไหลของไอน้ำสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับความเร็วรอบของพัดลม เพื่อที่จะดักฝุ่นที่ปนมากับข้าวเปลือกจึงได้ออกแบบเครื่องดักฝุ่น (cyclone) เป็นแบบ reverse flow ทำด้วยสแตนเลส เครื่องกำเนิดไอน้ำ (boiler) ออกแบบความดันให้ใช้งานสูงสุด 3.5 bars ความสามารถผลิตไอน้ำได้ 31 kg/h ที่อุณหภูมิ 100°C ความดันบรรยากาศ หรือเทียบได้กับพลังงานความร้อน 20 kW ใช้ไฟฟ้า 380/3/50

ลักษณะการทำงานเริ่มต้นจากการอุ่นระบบให้ร้อนโดยเปิดวาล์ว V.3 และ V.5 ส่วนวาล์วที่เหลือปิดหมดแล้วจึงเปิดพัดลมและอุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อให้ระบบร้อนขึ้นป้องกันการควบแน่นของไอน้ำที่จะป้อนเข้าระบบ เมื่ออุณหภูมิอากาศภายในระบบสูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำแล้วจึงเริ่มป้อนไอน้ำจากเครื่องกำเนิดไอน้ำเข้าในระบบโดยเปิดวาล์ว V.1 เนื่องจากในระบบมีอากาศอยู่จึงต้องมีการไล่อากาศออกโดยเปิดวาล์ว V.8 และ V.9 เพื่อให้อากาศออก ไอน้ำจะปนออกมากับอากาศจนกระทั่งแน่ใจว่า ไม่มีอากาศแล้วจึงปิดวาล์ว V.8 และ V.9 ปรับความดันในระบบจากวาล์ว V.1 ให้ได้ประมาณ 5000 Pa โดยดูจากมาตรวัดความดัน ปรับอุณหภูมิอบแห้งจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิและปรับความเร็วของไอน้ำในระบบจากความเร็วรอบของพัดลมให้ได้ตามต้องการ ก่อนป้อน

ข้าวเปลือกเข้าห้องอบแห้งต้องสลับทางการไหลของไอน้ำก่อนเพื่อความปลอดภัยโดยปิดวาล์ว V.3 และ V.5 ขณะเดียวกันก็เปิดวาล์ว V.2 และ V.4 แล้วจึงป้อนข้าวเปลือกเข้าทางวาล์ว V.10 หลังจากนั้นก็สลับทางการไหลของไอน้ำกลับสู่ตำแหน่งเดิมคือเปิดวาล์ว V.3 และ V.5 แล้วปิดวาล์ว V.2 และ V.4 เมื่อได้เวลาอบแห้งตามที่ต้องการแล้วจึงนำข้าวเปลือกออกโดยเปิดวาล์ว V.9 แล้วนำข้าวเปลือกที่ได้ไปทดสอบต่อไป ลักษณะรายละเอียดของเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ไคอะแกรมระบบอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง: (1) ห้องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด; (2) อุปกรณ์ให้ความร้อน; (3) พัดลม; (4) เครื่องคักฝุ่น; (5) เครื่องกำเนิดไอน้ำ; (6) Bypass line, (V) วาล์ว; (P) มาตรวัดความดัน

ในงานวิจัยนี้จะทำการอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 42% d.b. ความสูงเบดข้าวเปลือก 10–15 cm มาทำการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 150–170°C ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่า 3.1 m/s และความดันไอน้ำในระบบอบแห้งประมาณ 106.1 kPa เพื่อป้องกันการรั่วเข้าของอากาศจึงเลือกความดันไอน้ำในระบบสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย จากนั้นนำข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาปล่อยไว้ให้เย็นตัว

ลงที่อุณหภูมิห้องภายในถุงปิดสนิทเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น จากนั้นนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนมีความชื้นเหลือ 16% d.b. สุดท้ายนำข้าวไปทดสอบคุณภาพต่อไป

สำหรับการหาความชื้นของข้าวเปลือกใช้ตู้อบไฟฟ้า (oven) โดยการวัดความชื้นของข้าวเปลือกจะทำโดยอบข้าวเปลือกตัวอย่างที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง สำหรับคุณภาพของข้าวทางด้านกายภาพได้แก่เปอร์เซ็นต์ตันข้าว เปอร์เซ็นต์ความขาว และ % white belly

- เปอร์เซ็นต์ตันข้าวคือน้ำหนักของตันข้าวที่ผ่านการอบแห้งหารด้วยน้ำหนักข้าวเปลือก
- เปอร์เซ็นต์ความขาววัดได้จากเครื่องวัดความขาวของ Kett model C-300
- เปอร์เซ็นต์ white belly คือจำนวนของข้าวที่เป็นจุขาวขุนในเมล็ดข้าวใน 100 เมล็ด โดยการสุ่มตัวอย่าง

Rapid Visco Analyser (RVA) measurement

การวัดคุณสมบัติทาง pasting ของข้าวหนึ่งโดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyser model-4 (Newport Scientific Pty Ltd., Warriewood, Australia) ตามวิธีการของ AACC method 61-02 (AACC, 1995) โดยการนำตัวอย่างแป้งข้าวปริมาณ 3 กรัม (ความชื้น 14%) ผสมกับน้ำกลั่น ในถ้วยอลูมิเนียมโดยน้ำหนักรวม 28 กรัม จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้เข้าเครื่อง RVA ตัวอย่างจะถูกทำให้ร้อนที่ 50°C คงไว้ ณ อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 1 นาที ต่อจากนั้นให้ความร้อนแก่ของผสมด้วยอัตรา 12°C/min ไปที่อุณหภูมิ 95°C คงไว้ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 2.5 นาที จากนั้นถูกทำให้เย็นลงกลับไปที่ 50°C ด้วยอัตราการทำให้เย็น 12°C/min แล้วคงไว้ที่ 50°C เป็นเวลา 2.1 นาที ตัวอย่างดังกล่าวทดสอบสองซ้ำ สมบัติ pasting ต่าง ๆ ถูก plot เทียบกับเวลา ค่าต่างที่ได้จาก pasting properties ได้แก่ peak viscosity (PV), trough, final viscosity (FV), breakdown viscosity (BKV = PV - trough) and setback viscosity (SBV = FV - trough)

3. ผลและวิจารณ์

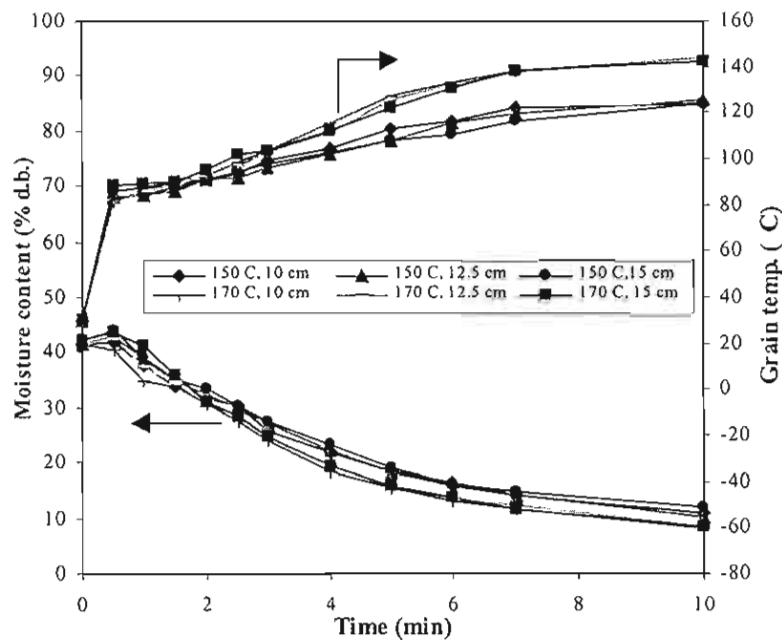
- อิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดขี้และความสูงเบดที่มีต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนขวดขี้

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก ความชื้น และเวลาในการอบแห้ง เนื่องจากช่วงแรกของการอบแห้งเกิดการควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้น กล่าวคือ ทันทีที่ไอน้ำร้อนขวดขี้ไหลผ่านเบดของข้าวเปลือก ไอน้ำจะเริ่มเกิดการควบแน่นที่เบดข้าวเปลือกซึ่งจะเกิดในช่วงแรกเป็นเวลาดัง ๆ คืออุณหภูมิของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิแวดล้อมจนถึงอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ หลังจากนั้นอุณหภูมิของข้าวเปลือกเพิ่มตามอุณหภูมิของไอน้ำร้อนขวดขี้

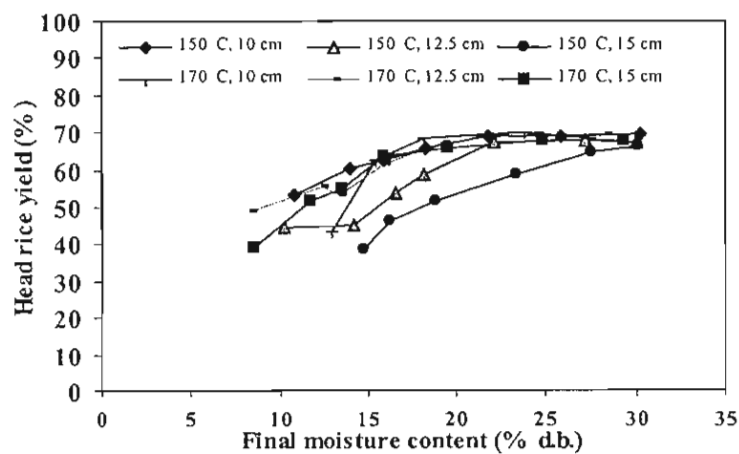
ผลของความสูงเบดและอุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดขี้ที่มีต่อการอบแห้งในช่วง 150 ถึง 170°C พบว่า ที่ความสูงเบด 15 cm จะอบแห้งและอุณหภูมิของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นได้ช้ากว่าที่ความสูงเบด 12.5 และ 10 cm ตามลำดับ เนื่องจากที่ความสูงเบดมากขึ้น (มวลของข้าวเปลือกก็จะมากขึ้น) ทำให้ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำมีค่ามากขึ้น และอุณหภูมิของไอน้ำร้อนขวดขี้สูงขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิข้าวเปลือกและอุณหภูมิไอน้ำร้อนขวดขี้มีมากขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น

- เปอร์เซ็นต์ตันข้าว

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิและความสูงเบดต่างๆ จากการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงความชื้นสุดท้ายสูงกว่า 18% d.b. และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 18% d.b. ซึ่งเป็นผลจากการเกิด gelatinization โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อข้าวที่มีความชื้นสูงได้รับความร้อนสูงเพียงพอที่จะพองตัวและถูกทำให้สุก และทำให้โปรตีนแตกตัวและแทรกเข้าไปภายในช่องว่างระหว่างเม็ดแป้ง ทำให้ช่องว่างหรือรอยร้าวและรอยแตกภายในเมล็ดข้าวประสานกันอย่างสนิท เมื่อนำไปทำให้แห้ง เมล็ดข้าวจะมีลักษณะแข็งใส เหนียว และทนทานต่อการขัดสี จึงทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูง การเกิด gelatinization จะต้องประกอบด้วยอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกที่เหมาะสม



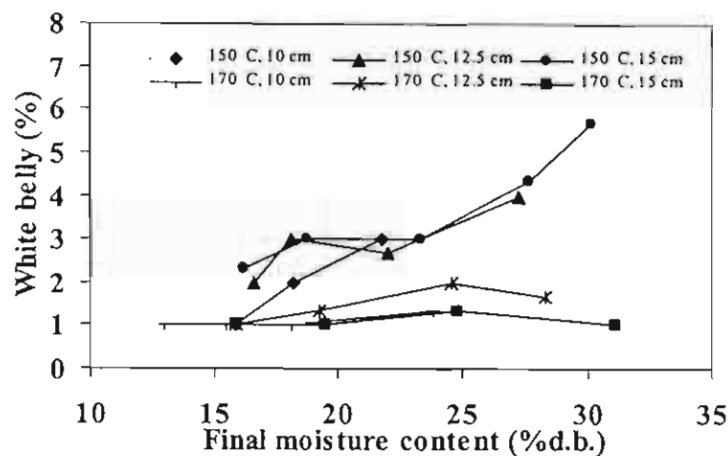
รูปที่ 2. ผลของความสูงและอุณหภูมิของไอน้ำร้อนชนิดยิ่งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกและอุณหภูมิของเมล็ดข้าว



รูปที่ 3. ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนชนิดยิ่ง และความสูงเบดต่างๆ (ความชื้นเริ่มต้น 42 % d.b.)

- % White belly

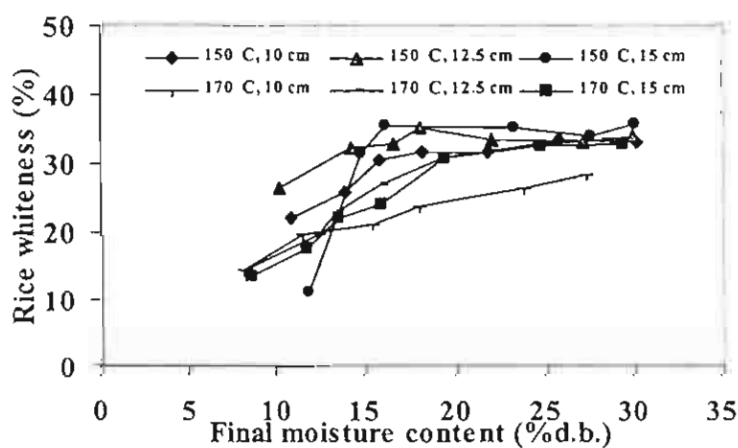
White belly คือ ข้าวที่เป็นจุดขุนขาวที่บ่งแสดงภายในเมล็ดข้าว ซึ่งเกิดจากข้าวผ่านการนึ่งแล้วเกิดเจลในเมล็ดข้าวไม่สมบูรณ์ ซึ่งโดยส่วนมากจะปรากฏจุดขุนขาวบริเวณแกนกลางในเมล็ดข้าวสาร รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ white belly กับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิและความสูงเบดต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งมีอิทธิพลต่อ % white belly โดยที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยังคงสูงขึ้นทำให้ % white belly ลดลง แต่อย่างไรก็ตามความสูงเบดไม่มีผลต่อ % white belly



รูปที่ 4. ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ white belly กับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยังคง และความสูงเบดต่าง ๆ (ความชื้นเริ่มต้น 42 % d.b.)

- เปอร์เซ็นต์ความขาว

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความขาวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิและความสูงเบดต่าง ๆ โดยความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 42% d.b. จากการทดลองพบว่าช่วงเวลาการอบแห้ง 3 นาทีแรกความขาวของข้าวลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าค่อนข้างคงที่ (30-35) ที่ความชื้นสุดท้ายในช่วง 18-30% d.b.



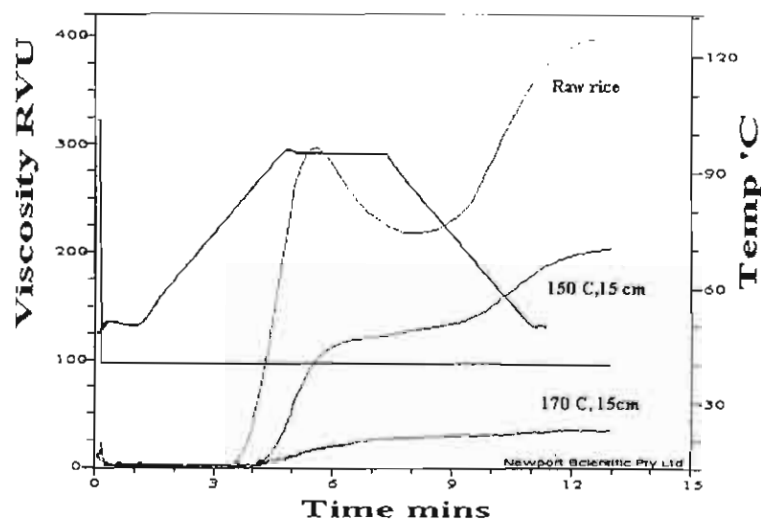
รูปที่ 5. ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความขาวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยังคง และความสูงเบดต่าง ๆ (ความชื้นเริ่มต้น 42 % d.b. ความขาว = 41-43)

การเปลี่ยนแปลงสีของข้าวอันเนื่องมาจากการเกิดสีน้ำตาลแบบเมลลาร์ดโดยสภาพที่เหมาะสมของน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิโนที่มีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสีน้ำตาล และอีกสาเหตุอันเนื่องมาจากการควบแน่น

ของไอน้ำที่ผิวของข้าวเปลือกอาจจะทำให้อุณหภูมิของเปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวอยู่นั้นเกิดการซึมเข้าสู่เนื้อเมล็ดข้าวจึงมีผลทำให้ความขาวของข้าวที่ผ่านการอบ ได้มีสีที่คล้ำขึ้น

- *Pasting behaviour*

รูปที่ 6 และตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติ pasting ของข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งยวดและข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง ผลการทดลองพบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งภายใต้อุณหภูมิ 150 – 170°C ให้ค่า PV, BKV และ SBV ต่ำกว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง การที่ค่า PV สูง คือการที่เม็ดสตาร์ชมีความสามารถในการจับกับน้ำได้ปริมาณมากกว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง ซึ่งทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวเป็นผลทำให้ค่าความหนืดสูงขึ้น ส่วนข้าวผ่านการอบแห้งค่า PV ลดลงตามอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น เนื่องจากในช่วงเวลา 3 นาทีแรกระหว่างการอบแห้งข้าว เมื่อข้าวที่มีความชื้นสูงได้รับความร้อนสูงเม็ดสตาร์ชที่ถูกน้ำจะพองตัวและถูกทำให้สุก และทำให้โปรตีนแตกตัวและแทรกเข้าไปภายในช่องว่างระหว่างเม็ดสตาร์ช และเมื่อนำข้าวที่ผ่านการอบแห้งได้เกิดเจลไปแล้ว เมื่อนำไปวัดคุณสมบัติ pasting มีผลทำให้ความสามารถในการจับน้ำของเม็ดสตาร์ชลดลง ซึ่งทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้น้อยลงด้วย มีผลทำให้ค่า PV ลดลง สำหรับค่า FV และ SBK แสดงถึงคุณสมบัติความแข็งแรงกระด้างของข้าวสุก (Ranghavendra Rao & Juliano, 1970; Priestley, 1976; Ali and Bhattacharya, 1980) ข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงให้ค่า FV และ SBK ต่ำกว่าข้าวที่ผ่านอบที่อุณหภูมิต่ำและที่ไม่ผ่านการอบตามลำดับ จากผลดังกล่าวแสดงว่า ข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งยวดเมื่อนำไปหุงสุกและปล่อยให้เย็นตัวลงจะมีลักษณะความแข็งแรงกระด้างต่ำกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง หลังจากการหุงสุกและปล่อยให้ข้าวเย็นตัวลง



รูปที่ 6 ความหนืดของข้าวที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งยวด

ตารางที่ 1 สมบัติ pasting ของข้าวที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดขี้

	PV rvu	Though Rvu	BKV rvu	FV rvu	SBV rvu
Raw rice	296	218	79	399	181
150°C 15 cm	120	113	8	205	92
170°C 15 cm	25	20	5	35	15

4. สรุป

ลักษณะเฉพาะของข้าวที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเบดภายใต้อุณหภูมิ 150-170°C ด้วยไอน้ำร้อนขวดขี้ และความสูงเบด 10-15 cm พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าความสูงเบด ความขาวของข้าวที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าที่อุณหภูมิสูง สำหรับ %white belly ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้นและเมื่อต้องการให้ได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงควรอบแห้งโดยการลดความชื้นไม่ต่ำกว่า 18% d.b. ส่วนสมบัติทาง pasting ให้ค่า PV, BKV และ SBV มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดขี้

5. คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบคุณสมบัติ pasting ของข้าว ขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี และกลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบคุณภาพข้าว

6. เอกสารอ้างอิง

- AACC, 1995, Approved method of the American Association of Cereal Chemist 9th ed.). St. Paul, MN: AACC.
- Ali, S. Z. and Bhattacharya, K. R. 1980, Pasting behaviour of parboiled rice, J. Texture Stud., 11, 239-245.
- Dimopoulos, J. S., and Muller, H.G. 1972, Effect of processing conditions on protein extration and composition and on some other physicochemical characteristics of parboiled rice, Cereal Chemistry. 49, 54-62.
- 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.
- Priestley, R. J., 1976, Studies on parboiled rice. I. Comparison of the characteristics of raw and parboiled rice, Food Chemistry, 1, 5-14.
- Ranghavendra Rao, S. N. and Juliano, B. O. 1970, Effect of parboiling on some physicochemical properties of rice, Journal Agricultural Food Chemistry, 18, 289-294.

- Tang, Z., Cenkowski, S. and Muir, W.E., 2000, Dehydration of sugar-beet pulp in superheated steam and hot air, Trans. of the ASAE, 43(3), 685-689.
- Tatamoto, Y., Mawatari, Y., Sakurai, K., Noda, K. and Komatsu, N. Drying characteristics of pour material in superheated steam fluidized bed, Proceedings of the 13th International Drying Symposium, Beijing, China, 27-30 August 2002, Vol. A, 624-633.

การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศร้อน
และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Comparative Study of Fluidized Bed Paddy Drying Using Hot Air
and Superheated Steam

วาทัญญ รอดประพัฒน์¹ อติศักดิ์ นาดกรณกุล² วารุณี เตีย³ และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์⁴

¹ นักศึกษาปริญญาเอก, ² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ³ รองศาสตราจารย์, ⁴ ศาสตราจารย์

คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สุขสวัสดิ์ 48, แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน โดยศึกษาเฉพาะคุณภาพทางด้านกายภาพ เช่น เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว ความขาวของข้าวสารและเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้ ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิเริ่มต้น 80°C เป็นเวลา 3 และ 4 ชั่วโมง อุณหภูมิอบแห้ง 150°C ความสูงเบด 10 cm ความเร็วของอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ 1.3 และ 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซชัน จากผลการวิจัยพบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดการควบแน่นของไอน้ำขึ้น ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้นและขณะเดียวกันอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ทำให้แบ่งภายในเมล็ดข้าวเปลือกมีสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดเจลลิตไนเซชันมากกว่า ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่สูงกว่าข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่ความขาวของข้าวสารจะลดลงต่ำกว่าข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน ส่วนเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ที่ได้จากการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงตามเวลาของการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการอบแห้งผ่านไป 2-3 นาที จะได้เปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ประมาณ 1-5%

ABSTRACT: This study was to compare fluidized bed paddy drying using hot air with that using superheated steam. The study was emphasized on physical properties, i.e. head rice yield, whiteness, and percentage of white belly. Paddy was prepared by soaking in water with initial temperature of 80°C for 3 and 4 hours. After that it was dried in conditions (for both drying media) of drying temperature of 150°C, bed depth of 10 cm and velocity of 1.3 and 1.5 times of minimum fluidized velocity. The experimental results showed that there was condensation occurred during early drying state of superheated steam. This made moisture content of paddy dried by superheated steam higher than those dried by hot air. Drying with superheated steam also resulted

in sharp increase in paddy temperature. Both parameters were suitable conditions for gelatinization, making paddy dried by superheated steam have higher head rice yield than those dried by hot air. However, whiteness of paddy dried by superheated steam was lower than those dried by hot air. Percentage of white belly of paddy dried by both drying media decreased with drying time. White belly of 1-5% was achieved after drying time of 2-3 minutes.

Keywords: Condensation, Dehydration, Quality, Superheated steam.

1. บทนำ

ปัจจุบันความนิยมในการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงๆ ด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดมีเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะโรงสีข้าวหนึ่ง เพราะเครื่องอบแห้งมีขนาดที่เล็กแต่กำลังการผลิตสูง และสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว ตลอดจนช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวได้อีกด้วย การศึกษาวิจัยและพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบันมีดังนี้ Sutherland and Ghaly (1990) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้อากาศร้อน พบว่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว ถ้าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกต่ำกว่า 18% w.b. เมื่อนำไปสีจะได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวลดลง ต่อมา Tumambling and Driscoll (1993) ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายผลการทดลอง พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิของอากาศอบแห้งและความสูงของเบดข้าวเปลือก Soponronnarit และคณะ (1994) พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้อากาศร้อนนั้น ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไชน์ (U_m) เท่ากับ 1.65 m/s ต่อมาได้มีการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด (แบบจวด) ด้วยอุณหภูมิของอากาศร้อนสูง (140-150°C) โดย Taweerattanapanish และคณะ (1999) พบว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นระหว่าง 23-31% w.b. เมื่อผ่านการอบแห้งแล้วจะได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีการเป่าด้วยลมธรรมชาติ คาดว่าเกิดจากการที่แป้งบางส่วนภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดเจลลิตไนเซชัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Inprasit และคณะ (2001) ที่พบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด มีแป้งบางส่วนภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดเจลลิตไนเซชัน และข้าวมีลักษณะคล้ายกับข้าวหนึ่ง ต่อมาได้มีการนำเอาไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาเป็นตัวกลางในการอบแห้งอบแห้งผลิตภัณฑ์แทนที่อากาศร้อนเนื่องจากมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนสูง (Mujumdar 1995) คือ สามารถลดความชื้นวัสดุได้เร็วกว่าอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิอบแห้งที่ใช้สูงกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน และ Taechapairoj และคณะ (2002) ได้ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไชน์เบด(แบบจวด)โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 และ 170°C ความสูงของเบด 10, 12.5 และ 15 cm พบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไชน์ เท่ากับ 2.55 m/s อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าความสูงของเบด และยังพบอีกว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแล้วจะมีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเพิ่มสูงขึ้น แต่ความขาวของข้าวสารจะลดลง(สีคล้ายกับข้าวหนึ่ง) และเมื่อนำไปทดสอบการหุงข้าวมีลักษณะคล้ายกับข้าวหนึ่ง และยังได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการอบมันฝรั่งแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนโดย Iyola และคณะ (2001) ซึ่งพบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งด้วย

ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะเกิดการควบแน่นของไอน้ำ (Condensation) ทำให้มันฝรั่งแผ่นที่อบแห้งมีความชื้นเพิ่มขึ้น และการพัฒนาการเกิดเจลลิตินในเซชันของแป้งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อนำไปตรวจวัดสี พบว่าแผ่นมันฝรั่งที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีสีแดงเข้มกว่าแผ่นมันฝรั่งที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยศึกษาเฉพาะคุณสมบัติทางด้านกายภาพ เช่น เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว ความขาว และเปอร์เซ็นต์ข้าวทองใจ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

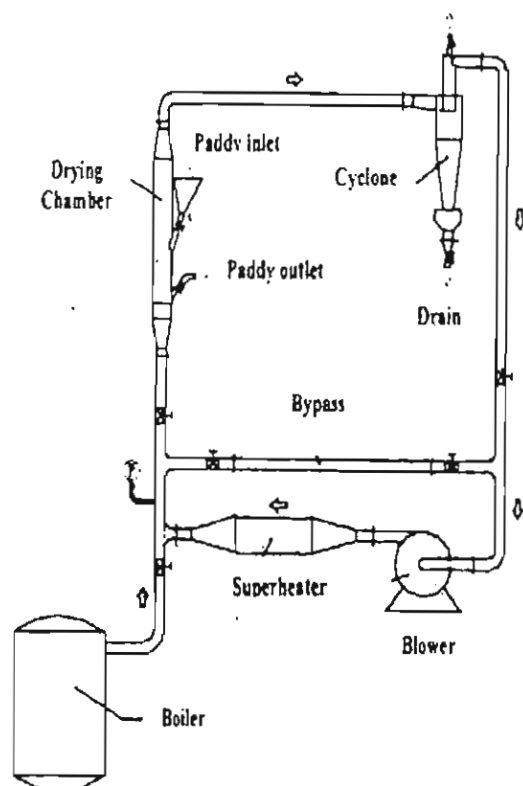
ในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนจะใช้เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบวง ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ มีดังนี้

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 1 ก) ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ 1) ห้องอบแห้ง (Drying chamber) เป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm และห้องอบแห้งสูง 100 cm 2) อุปกรณ์ให้ความร้อน (Superheater) มีขนาด 13.5 kW โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID มีค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 3) พัดลม (Blower) เป็นแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง (Backward – curved centrifugal blower) มอเตอร์ขนาด 2.2 kW สามารถปรับความเร็วรอบของพัดลมได้ 4) เครื่องดักฝุ่น (Cyclone) เป็นแบบ Reverse flow ทำด้วยสแตนเลส 5) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) ความดันใช้งานสูงสุด 3.5 bars มีวาล์วระบายไอน้ำทิ้งเมื่อความดันเกิน 3.5 bars ความสามารถในการผลิตไอน้ำ 31 kg/h ที่อุณหภูมิ 100°C และความดันบรรยากาศ หรือเทียบได้กับพลังงานความร้อน 20 kW ใช้ไฟฟ้า 380/3/50 ระบบต่อทั้งหมดหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนาประมาณ 2.5 cm และช่องปล่อยข้าวเปลือกติดตั้งด้านล่างของห้องอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 cm

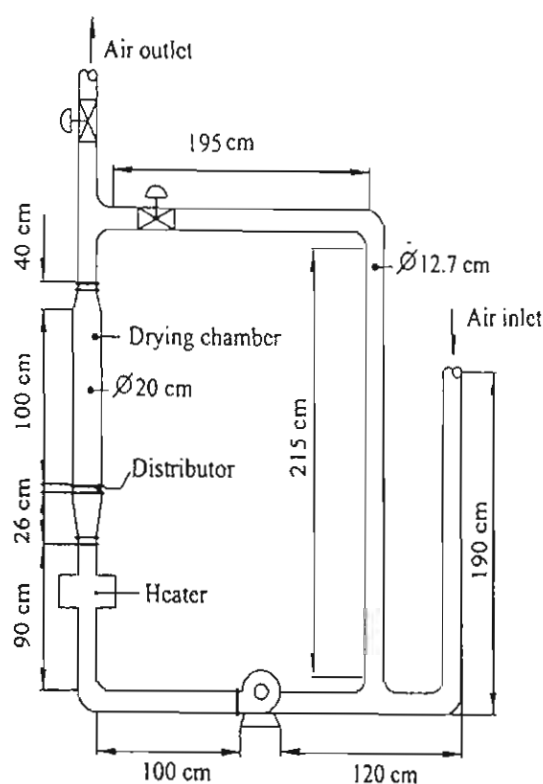
การทดลองอบแห้งด้วยอากาศร้อน ใช้เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบวง (แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 1 ข) ห้องอบแห้งเป็นรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm บริเวณผิวห้องอบแห้งและระบบต่อหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนาประมาณ 2.5 mm อุปกรณ์ให้ความร้อนใช้ชุดลดความร้อนขนาด 12 kW พัดลมเป็นแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง ใช้มอเตอร์ขนาด 1.5 kW สามารถปรับความเร็วรอบได้ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ทางเข้าห้องอบแห้งใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับ Temperature controller เพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้ง ช่องทางป้อนข้าวเปลือกติดตั้งด้านบนห้องอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 cm และช่องป้อนและปล่อยข้าวเปลือกมีลักษณะคล้ายกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

การเตรียมข้าวเปลือกขึ้นใช้ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี 1 (จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี) ที่สะอาดปราศจากข้าวลีบใส่ในถังกลมขนาดประมาณ 50 ลิตร หุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว (เพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำในถังแช่) แล้วใส่น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 80°C แช่ข้าวเปลือกทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 3 และ 4 ชั่วโมง แล้วจึงระบายน้ำแช่ทิ้ง และปล่อยข้าวเปลือกทิ้งไว้ในถังแช่ (Tempering) อีกหนึ่งชั่วโมงก่อนที่จะนำข้าวเปลือกขึ้นไปทดลองอบแห้ง ซึ่งในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ใช้ความเร็ว 1.3 และ 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์เบด (ความเร็วต่ำสุดของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเท่ากับ 2.55,

1.65 m/s ตามลำดับ) และอุณหภูมิอบแห้ง 150°C ความสูงของเบคประมาณ 10 cm ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้ว จะนำไปอบแห้งต่อโดยวิธีเป่าด้วยลมธรรมชาติเพื่อให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณ 14% w.b เก็บตัวอย่างข้าวเปลือก ไว้ที่อุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 14 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบคุณภาพการสี (ใช้เครื่องกระเทาะเปลือกแบบลูกยาง จัด ขวดด้วยลูกหิน และตรวจสอบความขาวของข้าวสารด้วยเครื่องวัดความขาว Kett C-300)



(ก) ใช้น้ำร้อนขวดบึ่ง



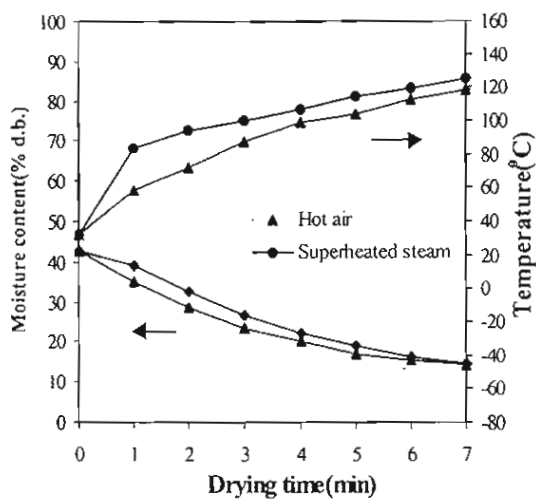
(ข) อากาศร้อน

รูปที่ 1 โคอะแกรมของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดแบบวง

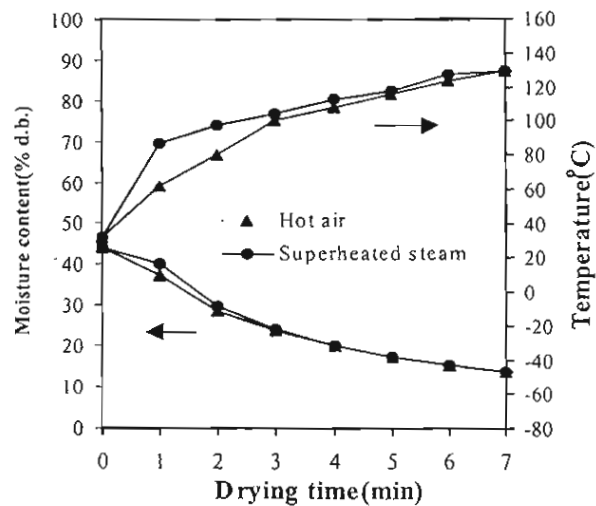
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดบึ่งและอากาศร้อนที่ อุณหภูมิอบแห้ง 150°C และความเร็วของอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวดบึ่งเท่ากับ 1.3U_{mf} และ 1.5U_{mf} ความสูงของ เบค 10 cm พบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของการอบแห้งและอุณหภูมิของข้าวเปลือก เปรอ์เซ็นต์คั่นข้าว ความขาว ของข้าวสาร และ เปรอ์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2-5

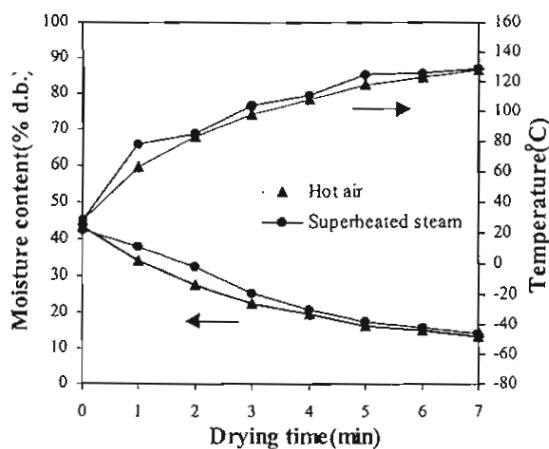
3.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก



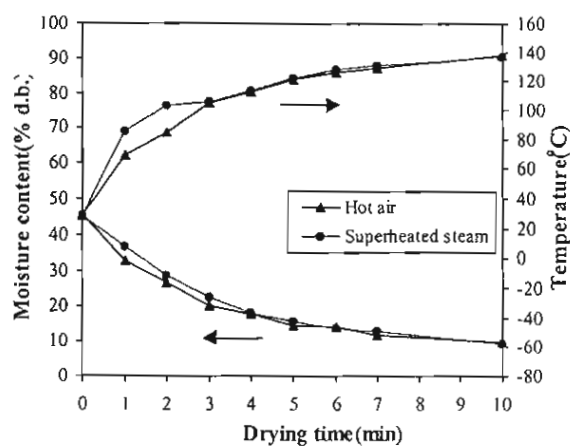
(ก) ความเร็ว $1.3U_{mr}$



(ข) ความเร็ว $1.5U_{mr}$



(ค) ความเร็ว $1.3U_{mr}$



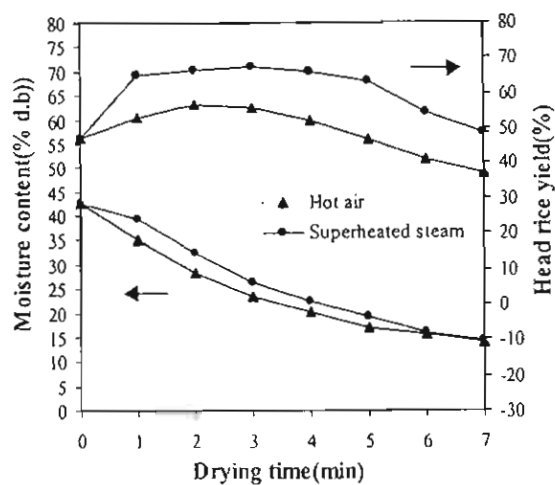
(ง) ความเร็ว $1.5U_{mr}$

รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งยวดที่อุณหภูมิอบแห้ง 150°C ความสูงของเบด 10 cm (รูปที่ 2 (ก) และ (ข) แห่ข้าวเปลือกนาน 3 ชั่วโมง รูปที่ 2 (ค) และ (ง) แห่ข้าวเปลือกนาน 4 ชั่วโมง)

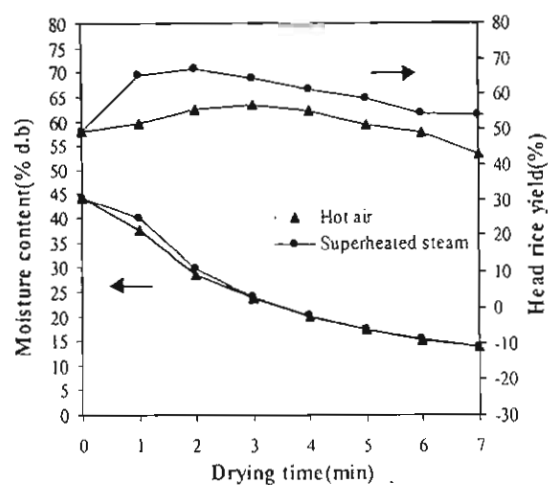
รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้งและอากาศร้อน ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150°C ความสูงเบด 10 cm ความเร็วของไอน้ำร้อนขวดยั้ง/อากาศร้อน 1.3U_{mf} และ 1.5U_{mf} พบว่าข้าวเปลือกเมื่อผ่านการแช่น้ำอุณหภูมิเริ่มต้น 80°C เป็นเวลานาน 3 และ 4 ชั่วโมง มีค่าความชื้นใกล้เคียงกันประมาณ 43-45% d.b. และเมื่อนำไปอบแห้งด้วยความเร็ว 1.3U_{mf} (ดูรูปที่ 2 ก และ ค ประกอบ) อัตราการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้งจะช้ากว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งช่วงแรกของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้งเกิดการควบแน่นของไอน้ำขึ้น ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Iyola และคณะ(2001) และ Taechapairoj และคณะ(2002) ดังนั้นจึงทำให้อัตราการอบแห้งต่ำกว่าข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน และเมื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นโดยการเพิ่มความเร็วนับเป็น 1.5U_{mf} (ดูรูปที่ 2 ข และ ง ประกอบ) พบว่าอัตราการลดลงของความชื้นของการอบแห้งทั้ง 2 กรณี มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกนั้น จะเห็นว่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของไอน้ำร้อนขวดยั้งสูงกว่าอากาศร้อน (Mujumdar, 1995)

3.2 การเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวและอัตราการอบแห้ง

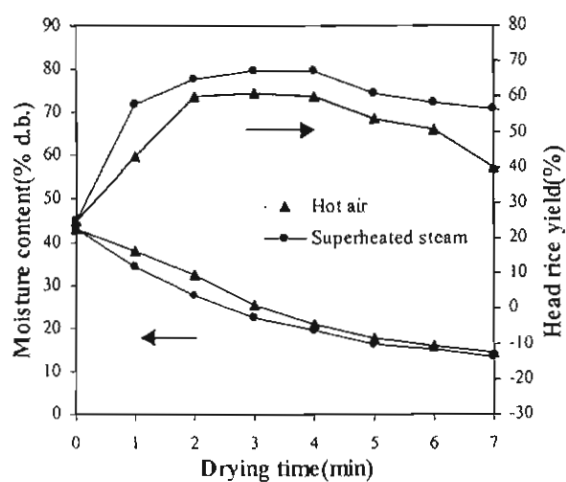
รูปที่ 3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวและความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้งและอากาศร้อน ซึ่งพบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้งและอากาศร้อนมีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการอบแห้งหรืออบแห้งด้วยวิธีเป่าด้วยลมธรรมชาติ(เวลาการอบแห้ง 0 นาที) อาจเกิดจากแป้งบางส่วนภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดเจลลิตีในเซชัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Taweerattanpanish และคณะ (1999) และ Inprasit และคณะ (2001) ที่ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงๆ ด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคเซบด แต่ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้งจะมีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนทุกช่วงเวลากการอบแห้ง(ดูรูปที่ 3 ก, ข, ค และ ง ประกอบ) ทั้งนี้เพราะว่าในช่วงแรกของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้ง อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มสูงขึ้นถึงอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันได้อย่างรวดเร็ว (ประมาณ $73-86^{\circ}\text{C}$ จาก Zhai และคณะ, 2002) ประกอบกับเมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเกิดเจลลิตีในเซชันมากขึ้น โดยดูได้จากรูปที่ 3 ก และ ค ที่ใช้ความเร็วในการอบแห้งเท่ากับ 1.3U_{mf} ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกจะลดลงอย่างช้า ๆ ทำให้ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดเจลลิตีในเซชันนานขึ้น ดังนั้นความสมบูรณ์(อุณหภูมิและความชื้น)ในการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกมีมากขึ้น และเมื่อนำไปสีจึงได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่สูง(มากกว่า 60%) และมีค่าคงที่จนถึงเวลาการอบแห้ง 4-5 นาที เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวจึงมีแนวโน้มลดลง และเมื่อเพิ่มความเร็วในการอบแห้งเป็น 1.5U_{mf} มีผลทำให้ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกลดลงอย่างรวดเร็ว(ดูรูปที่ 3 ข และ ง ประกอบ) ซึ่งทำให้ช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดเจลลิตีในเซชันลดลง จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเพิ่มขึ้นเฉพาะในช่วงแรกของเวลาการอบแห้ง 2 นาที หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวจะเริ่มมีแนวโน้มลดลงตามเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณผิวและแกนกลางของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกซึ่งนำไปสู่การเกิดรอยร้าวและแตกหัก เมื่อนำไปสี (Milling) จึงได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวลดลง



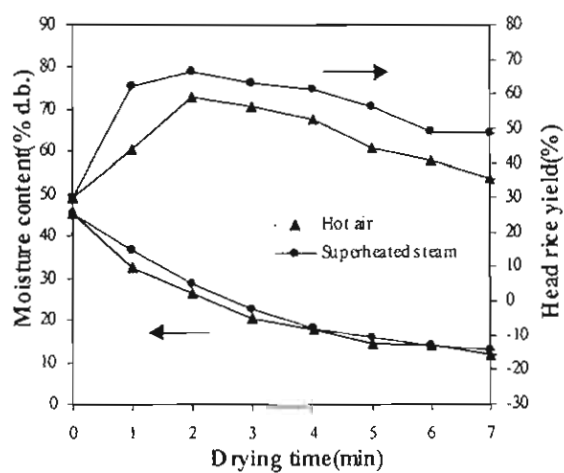
(ก) ความเร็ว 1.3U_{mf}



(ข) ความเร็ว 1.5U_{mf}



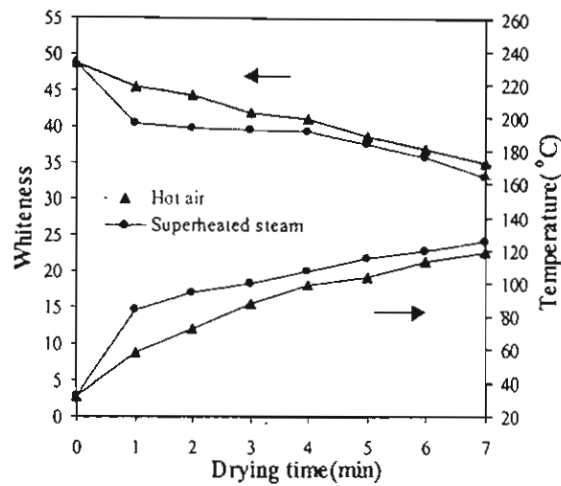
(ค) ความเร็ว 1.3U_{mf}



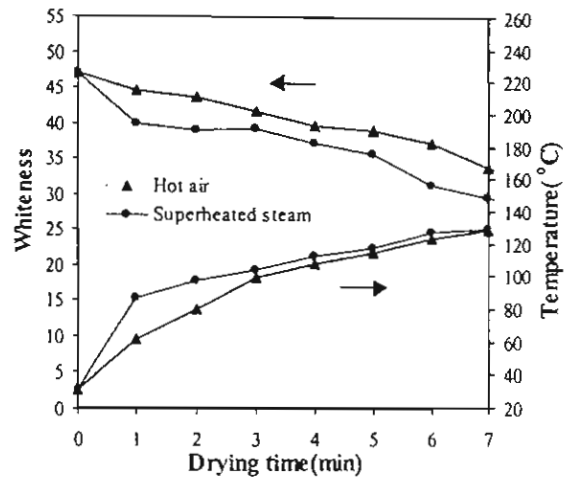
(ง) ความเร็ว 1.5U_{mf}

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวและอัตราการอบแห้งของเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งยวด ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 °C ความสูงของเบด 10 cm (รูปที่ 3 (ก) และ (ข) แช่วข้าวเปลือกนาน 3 ชั่วโมง รูปที่ 3 (ค) และ (ง) แช่วข้าวเปลือกนาน 4 ชั่วโมง)

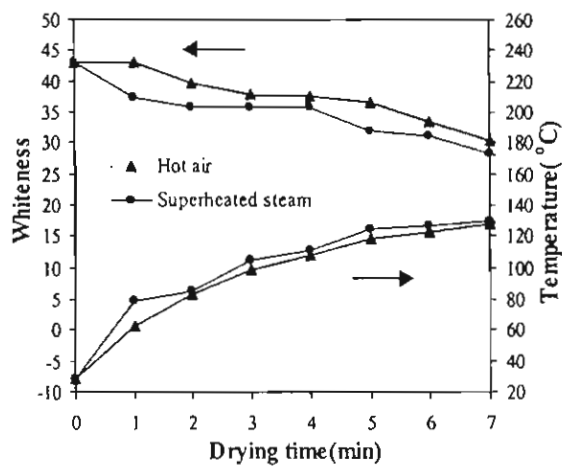
3.3 การเปลี่ยนแปลงความขาวของข้าวสารและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก



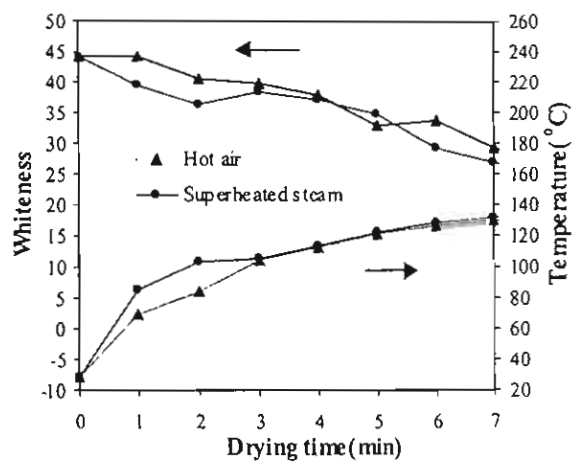
(ก) ความเร็ว 1.3U_{mf}



(ข) ความเร็ว 1.5U_{mf}



(ค) ความเร็ว 1.3U_{mf}

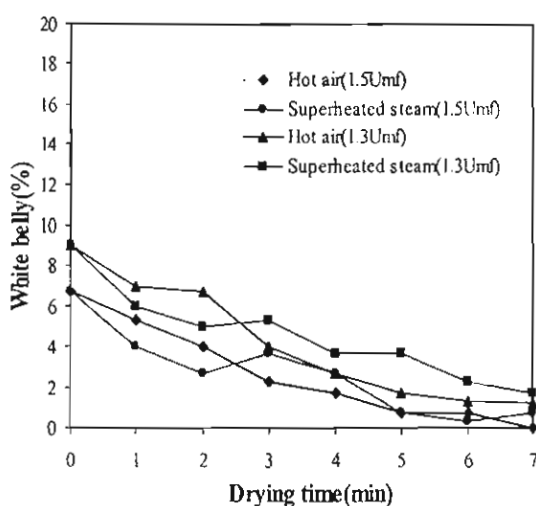


(ง) ความเร็ว 1.5U_{mf}

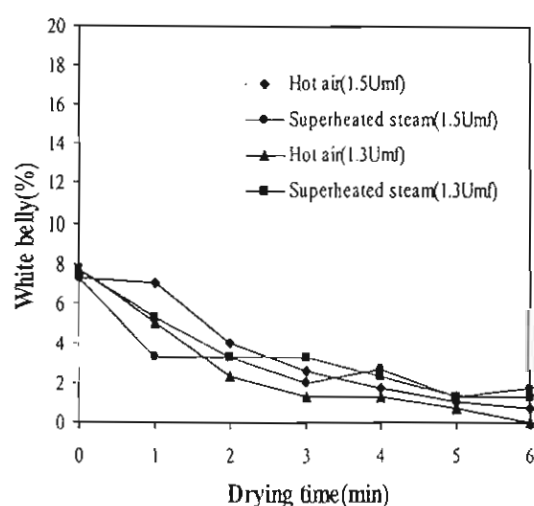
รูปที่ 4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความขาวของข้าวสารและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก ที่ผ่านการอบแห้ง ด้วยไอน้ำร้อนขับเคลื่อนและอากาศร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 150°C ความสูงเบด 10 cm (รูปที่ 4 (ก) และ (ข) แห้งข้าวเปลือกนาน 3 ชั่วโมง รูปที่ 4 (ค) และ (ง) แห้งข้าวเปลือกนาน 4 ชั่วโมง)

รูปที่ 4 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความขาวของข้าวสารและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน จะเห็นว่า ที่เวลาการอบแห้ง 0 นาที ข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีความขาวสูงกว่า 47 จุด ขณะที่ข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีความขาวต่ำกว่า 45 จุด (ดูรูปที่ 4 ก, ข, ค และ ง ประกอบ) และเมื่อผ่านการอบแห้งพบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ความขาวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนการอบแห้งด้วยอากาศร้อน เพราะว่าการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกประกอบกับการควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้น ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเร่งการเกิด ปฏิกิริยาสีน้ำตาล(Browning Reaction) มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Iyola และคณะ(2002) และ Horrobin และคณะ(2003) ขณะที่ช่วงแรกของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อน อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ดังนั้นจึงทำให้ความขาวของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่าลดลงอย่างช้าๆ และมีค่ามากกว่าข้าวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งทุกช่วงการทดลอง และเมื่อเวลาการอบแห้งข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้นความขาวของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนมีแนวโน้มที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกทุกเงื่อนไขการทดลอง

3.4 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ (White belly)



(ก) แช่ข้าวเปลือกนาน 3 ชั่วโมง



(ข) แช่ข้าวเปลือกนาน 4 ชั่วโมง

รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ของเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 °C ความสูงของเบด 10 cm

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่และเวลาการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150°C ความสูงเบด 10 cm พบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งและอากาศร้อนมีเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ลดลงตามเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ทุก ๆ กรณีที่ได้ศึกษา เพราะว่าการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง ๆ (เพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการแช่น้ำร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 80°C เป็นเวลานาน 3 และ 4 ชั่วโมง) ทำให้ความชื้นแพร่เข้าไปภายในเมล็ดข้าวเปลือกได้อย่างทั่วถึง และคาดว่ามีการเกิดเจลลิตินในเซชันของแป้งบางส่วนภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดขึ้นในช่วงเวลาของการแช่ข้าวเปลือกด้วย เมื่อนำข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่แล้วไปอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง ๆ (150°C) จึงช่วยให้แป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกสามารถเกิดเจลลิตินในเซชันได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยดูได้จากการลดลงของเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ของข้าวเปลือกที่แช่นาน 3 ชั่วโมง จะลดลงเหลือประมาณ 1-5 เปอร์เซ็นต์ (เปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ของข้าวหนึ่งคุณภาพดีที่ยอมรับทางด้านการค้าและใกล้เคียงกับข้าวหนึ่งที่ผลิตโดยทั่วไป) ที่เวลาการอบแห้ง 4 นาที ซึ่งช้ากว่าข้าวเปลือกที่แช่นาน 4 ชั่วโมง ที่เวลาการอบแห้งเพียง 2 นาที เท่านั้น (ดูรูปที่ 5 ก และ ข ประกอบ) เปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งและอากาศร้อนลดลงตามเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น

4. สรุปผล

จากการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวดยิ่ง พบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่ง จะได้เปอร์เซ็นต์ดินข้าวที่สูงกว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ขณะที่ความขาวของข้าวสารที่ได้จะต่ำกว่า (มีสีคล้ำกว่าข้าวหนึ่ง) และในช่วงแรกของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำขึ้น ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกที่สูงขึ้นนี้ทำให้มีสถานะที่เหมาะสมกับการเกิดเจลลิตินในเซชันมากกว่าข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกและการควบแน่นของไอน้ำช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาตีน้ำตาลมากขึ้นจึงทำให้ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งมีความขาวต่ำกว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน การเพิ่มความเร็วตัวกลางในการอบแห้งสูงขึ้นจะมีผลทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดเจลลิตินในเซชันสั้นลง เปอร์เซ็นต์ดินข้าวจะลดลงเร็วกว่าการอบแห้งที่ความเร็วต่ำ ระยะเวลาในการแช่ข้าวเปลือกมีผลต่อการลดลงของเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ โดยข้าวเปลือกที่แช่เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่มีแนวโน้มลดลงเหลือ 1-5 เปอร์เซ็นต์ เร็วกว่าข้าวเปลือกที่แช่นาน 3 ชั่วโมง เพียงเล็กน้อย ส่วนความเร็วที่ใช้ในการอบแห้งไม่มีอิทธิพลมากนัก

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย และศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานีที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือทดสอบคุณภาพความขาวของข้าวสาร จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

1. Horrobin DJ, Landman KA, Ryder L. Interior and Surface Colour Development during Wheat Grain Steaming. *Journal of Food Engineering* 2003; 57: 33-43.
2. Inparsit C, Noomhorm A. Effect of Drying Air Temperature and Grain Temperature of Different Type of Dryer and Operation on Rice Quality. *Drying Technology* 2001; 19(2): 389-404.
3. Iyota H, Nishimura N, Onuma T, Nomura T. Drying of Sliced Raw Potatoes in Superheated Steam and Hot Air. *Drying Technology* 2001; 19(7): 1411-1424.
4. Iyota H, Nishimura T, Komishi Y, Yoshida K. Effect of Initial Steam Condensation on Color Changes of Potatoes During Drying in Superheated Steam. In *Proceedings of the 13th International Drying Symposium (IDS' 2002) Beijing China, 27-30 August 2002*; B: 1352-1359.
5. Mujumdar AS. Superheated Steam Drying in AS. Mujumdar (Ed.). *Handbook of Industrial Drying*, 2nd Edition, Marcel Dekker, New York 1995: 1071-1086.
6. Soponronarit S, Prachayawarakorn S. Optimum Strategy for Fluidized Bed Paddy Drying. *Drying Technology* 1994; 12(7): 1667-1686.
7. Sutherland JW, Ghaly TF. Rapid Fluid-Bed Drying of Paddy Rice in the Humid Tropics. *Proceeding of the 13th ASEAN Conference on Grain Post-harvest Technology, Bruci Darussalam, 4 -7 September 1992*.
8. Tacchapairoj C, Dhuchakallaya I, Soponronarit S, Wetchacama S, Prachayawarakorn S. Fluidized Bed Paddy Drying Using Superheated Steam. *Proceedings of the 13th International Drying Symposium, Beijing, China, 27-30 August 2002*; Vol. B: 1218-1227.
9. Taweerattanapanish A, Soponronarit S, Wetchacama S, Kongseri N, Wongpiyachon S. Effect of Drying on Rice Yield Using Fluidization Technique. *Drying Technology* 1999; 17 (1&2): 345-353.
10. Tumambing JA, Driscoll RH. Modeling the Performance of Continuous Fluidized Bed Paddy Dryer for Rapid Pre-drying of Paddy. *Proceedings of the 14th ASEAN seminar on Grain Post-harvest Technology, Manila, Philippines, 5-8 November 1993*:193-213.

6. เอกสารอ้างอิง

1. Horrobin DJ, Landman KA, Ryder L. Interior and Surface Colour Development during Wheat Grain Steaming. *Journal of Food Engineering* 2003; 57: 33-43.
2. Inpansit C, Noomhorm A. Effect of Drying Air Temperature and Grain Temperature of Different Type of Dryer and Operation on Rice Quality. *Drying Technology* 2001; 19(2): 389-404.
3. Iyota H, Nishimura N, Onuma T, Nomura T. Drying of Sliced Raw Potatoes in Superheated Steam and Hot Air. *Drying Technology* 2001; 19(7): 1411-1424.
4. Iyota H, Nishimura T, Komishi Y, Yoshida K. Effect of Initial Steam Condensation on Color Changes of Potatos During Drying in Superheated Steam. In *Proceedings of the 13th International Drying Symposium (IDS' 2002) Beijing China, 27-30 August 2002*; B: 1352-1359.
5. Mujumdar AS. Superheated Steam Drying in AS. Mujumdar (Ed.). *Handbook of Industrial Drying*, 2nd Edition, Marcel Dekker, New York 1995: 1071-1086.
6. Soponronarit S, Prachayawarakorn S. Optimum Strategy for Fluidized Bed Paddy Drying. *Drying Technology* 1994; 12(7): 1667-1686.
7. Sutherland JW, Ghaly TF. Rapid Fluid-Bed Drying of Paddy Rice in the Humid Tropics. *Proceeding of the 13th ASEAN Conference on Grain Post-harvest Technology*, Bruei Darussalam, 4 -7 September 1992.
8. Taechapairoj C, Dhuchakallaya I, Soponronnarit S, Wetchacama S, Prachayawarakorn S. Fluidized Bed Paddy Drying Using Supperheated Steam. *Proceedings of the 13th International Drying Symposium*, Beijing, Chaina, 27-30. August 2002; Vol. B: 1218-1227.
9. Taweerattanapanish A, Soponronnarit S, Wetchacama S, Kongseri N, Wongpiyachon S. Effect of Drying on Rice Yield Using Fludization Technique. *Drying Technology* 1999; 17 (1&2): 345-353.
10. Tumambling JA, Driscoll RH. Modeling the Performance of Continuous Fluidized Bed Paddy Dryer for Rapid Pre-drying of Paddy. *Proceedings of the 14th ASEAN seminar on Grain Post-harvest Technology*, Manila, Philippines, 5-8 November 1993:193-213.

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกพัลส์ฟลูอิดไคซ์เบด

Pulsed Fluidized Bed Paddy Dryer

กรกช ภูไพบูลย์¹, สมชาติ โสภณธนฤทธิ์², วารุณี เตีย³

¹นักศึกษาปริญญาโท, ²ศาสตราจารย์, ³รองศาสตราจารย์

คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สุขสวัสดิ์ 48 แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไคซ์เบดโดยไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ มีเงื่อนไขการทดลองคือ อุณหภูมิอบแห้ง 144-154 °C ความสูงเบด 11.6-12.3 cm. และความเร็วของอากาศเข้าห้อง อบแห้ง 1.6-1.8 m/s ผลการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไคซ์เบดสามารถอบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 29% d.b เหลือประมาณ 24% d.b. โดยคุณภาพข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนมากนัก มีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งข้าวเปลือกเฉลี่ย 0.53 Baht/kg-water evap. ใช้พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยในช่วง 6.23-9.37 MJ/kg-water evap. และใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยในช่วง 0.18-0.25 MJ/kg-water evap. เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดพบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไคซ์เบดจะใช้พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยใกล้เคียงกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด แต่จะใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยน้อยกว่า

Abstract: The objective of this research was to study the drying of paddy using pulsed fluidized bed dryer without air recirculation. The testing conditions were drying air temperature in the range of 144 °C to 154 °C, bed height in the range of 11.6 cm to 12.3 cm, and air velocity in the range of 1.6 m/s to 1.8 m/s. The result showed that pulsed fluidized bed dryer can reduced the moisture content of paddy from 29% d.b. to 24% dry-basis while the paddy qualities were still acceptable. It was found that the cost was approximately 0.53 Baht/kg-water evaporation, respectively. The specific heat and electrical consumption were in the range of 6.23 to 9.37 MJ/ kg-water evaporation and 0.18 to 0.25 MJ/ kg-water evaporation, respectively. Its drying rate and specific heat consumption were the same as conventional fluidized bed dryer, however, its specific electrical consumption was lower.

Keywords: Fluidization / grain / pulse

1. บทนำ

ข้าวถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่สุดของประเทศไทย เพราะนอกจากจะเป็นอาหารหลักของคนไทยแล้ว ข้าวยังเป็นสินค้าส่งออกสำคัญที่ทำรายได้เข้าประเทศในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการบริโภคข้าวตลอดทั้งปี แต่การผลิตสามารถทำได้เฉพาะฤดูกาล อีกทั้งยังมีปัญหาความชื้นของข้าวเปลือกในการจัดเก็บ จึงต้องมีการค้นคว้าหาวิธีการจัดเก็บให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อเป็นการรักษาคุณภาพของผลิต เพราะความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกมีผลอย่างมากในการเก็บรักษา ถ้าความชื้นมากเกินไปจะทำให้เมล็ดเน่าเสีย แต่ถ้าแห้งมากเกินไปอาจสูญเสียน้ำหนักในเชิงพาณิชย์ และอาจทำให้เมล็ดแตกหักได้ง่าย ปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้เพื่อเพิ่มผลผลิตและรักษาคุณภาพ ทำให้เครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ ได้รับการพัฒนารูปแบบและประสิทธิภาพเพื่อนำมาใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือก เพราะเครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้โดยไม่ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศที่แปรปรวน ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย และให้อัตราการลดความชื้นเร็วกว่าแบบลานตาก

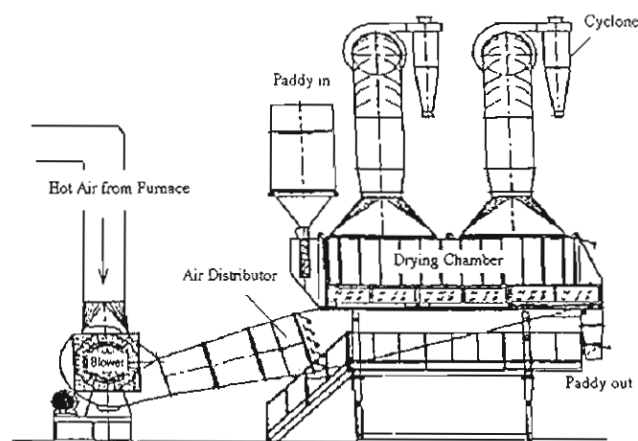
งานวิจัยของ Soponronnarit and Prachayawarakorn [1] พบว่า การนำเทคนิคฟลูอิโดเซชันมาใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ การกระจายความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งและอุณหภูมิภายในเบดมีความสม่ำเสมอ เนื่องจากขณะทำงานเมล็ดข้าวมีการเคลื่อนที่คล้ายของไหลตลอดเวลา จึงทำให้อากาศร้อนสัมผัสกับเมล็ดพืชได้อย่างทั่วถึงขณะเกิดฟลูอิโดเซชันให้อัตราการลดความชื้นสูง เนื่องจากอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่อมวลของข้าวเปลือกมีค่าสูง ทำให้ระยะเวลาการอบแห้งสั้น และสามารถประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานความร้อนได้หลากหลายจากการอบแห้งจริงในเครื่องอบแห้งฟลูอิโดเซชันพบว่า เมื่อทำการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง เมล็ดข้าวเปลือกจะจับตัวกันเป็นก้อน ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับเมล็ดข้าวเปลือกไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบพัลส์ฟลูอิโดเซชัน (Pulsed Fluidized Bed) ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งที่เมล็ดพืชมีการไหลขวางกับทิศทางการไหลของอากาศร้อน โดยอากาศร้อนจะไหลเข้าเครื่องอบแห้งเป็นจังหวะ ไม่ไหลต่อเนื่องเหมือนเครื่องอบแห้งฟลูอิโดเซชันทั่วไป ทำให้ [2] สามารถอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นสูงได้ดี และ [3] สามารถลดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง เพราะใช้อากาศในการอบแห้งลดลง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิโดเซชันโดยทำการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิโดเซชันที่ติดตั้งใช้งานจริงในโรงสีข้าว

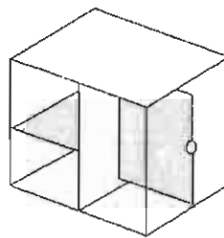
2. อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิโดเซชันนี้ ใช้เครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิโดเซชันแบบต่อเนื่องขนาด 20 ๗ มีลักษณะตามภาพที่ 1 หัวเผาใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง พื้นที่ห้องอบแห้งมีขนาดกว้าง 1.2 m ยาว 4.8 m โดยมีพัดลมส่งลมร้อนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 37 kW บริเวณท่อส่งลมร้อนเข้าห้องอบแห้งจะติดตั้งอุปกรณ์กระจายอากาศซึ่งทำให้อากาศไหลเข้าห้องอบแห้งเป็น 2 จังหวะไม่ต่อเนื่อง ทำให้เบดในห้องอบแห้งไม่ลอยต่อเนื่องเหมือนฟลูอิโดเซชัน แต่จะมีจังหวะที่ลอยขึ้นลงสลับกัน ลักษณะของอุปกรณ์กระจายอากาศ (Air distributor) เป็นแผ่นโลหะ 2 แผ่นวางต่อกันในแนวตั้งฉาก ดังภาพที่ 2 และต่อเข้ากับมอเตอร์ แผ่นโลหะจะบังลมทำให้ลมเข้าห้องอบแห้งได้ทีละด้านสลับกัน

เมื่อมอเตอร์หมุน ลมจะเข้าเครื่องอบแห้งสลับกันไปมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้เบดในห้องอบแห้งลอยขึ้นลงสลับกันตามจังหวะการไหลของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้ง ลมร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งจะถูกทำความสะอาดโดยใช้ไซโคลน แล้วทิ้งสู่บรรยากาศโดยไม่มีการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ขณะที่ทำการทดลองมีการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งเพื่อหาความชื้นและทดสอบคุณภาพการสี และวัดความสิ้นเปลืองไฟฟ้าโดยใช้ Clamp on power meter ค่าความถูกต้อง $\pm 3\%$ รวมทั้งวัดอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก ลมร้อนที่ใช้ออบแห้งโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ต่อเข้ากับ Data Logger ค่าความถูกต้อง $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ และวัดความเร็วของอากาศที่ใช้ออบแห้ง ในการหาความชื้นของข้าวเปลือกนั้นจะนำตัวอย่างข้าวเปลือกมาทำการอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และในการพิจารณาคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการสี จะพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด และ ความขาวของข้าวสาร



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชเบด



ภาพที่ 2 อุปกรณ์กระจายอากาศ

3. ผลและวิจารณ์

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไชเบด ขนาดกำลังผลิต 20 ต/ช ใช้ข้อมูลที่ทำกรเก็บในช่วงเวลา 112 ชั่วโมง ทำการทดลอง 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชเบค โดยไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้

การทดลองครั้งที่	1	2	3
อัตราการป้อนข้าวเปลือกเฉลี่ย (v/h)	16.13	15.87	15.18
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	145	144	154
ความเร็วรอบในการหมุนแผ่นกระจายอากาศ (รอบ/นาที)	25	25	25
อุณหภูมิข้าวเปลือก (°C)			
- ก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง	39	40	38
- ออกจากเครื่องอบแห้ง	71	71	73
ความชื้นข้าวเปลือก (%d.b.)			
- ก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง	28.0	28.4	30.2
- ออกจากเครื่องอบแห้ง	22.2	23.1	24.1
อัตราการระเหยน้ำ (kg-water evap./h)	731	665	713

3.1 ความสิ้นเปลืองพลังงาน

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชเบค ใช้เตาเผาแลกเปลี่ยนแบบไซโคลนเป็นแหล่งให้ความร้อน และไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ อากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งจะถูกปล่อยทิ้งหมด คิดประสิทธิภาพเตาเผา 70% คำนวณหาปริมาณการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจำเพาะเฉลี่ย และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยได้ดังนี้ การทดลองครั้งที่ 1 ปริมาณการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจำเพาะเฉลี่ย 6.23 MJ/kg-water evap. และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ย 0.19 MJ/kg-water evap. การทดลองครั้งที่ 2 ปริมาณการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจำเพาะเฉลี่ย 6.54 MJ/kg-water evap. และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ย 0.21 MJ/kg-water evap. การทดลองครั้งที่ 3 ปริมาณการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจำเพาะเฉลี่ย 7.83 MJ/kg-water evap. และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ย 0.18 MJ/kg-water evap.

3.2 ค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง

เงื่อนไขในการวิเคราะห์มีดังนี้ ราคาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพัลส์ฟลูอิดไชเบค 1,300,000 Baht เตาเผาแลกเปลี่ยนแบบไซโคลนราคา 1,300,000 Baht ระยะเวลาการทำงาน 3000 h/y อายุการใช้งานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพัลส์ฟลูอิดไชเบคและเตาเผาแลกเปลี่ยนแบบไซโคลน 10 ปี ค่าบำรุงรักษารายปีของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพัลส์ฟลูอิดไชเบค 3% ของราคาเครื่องอบแห้ง ค่าบำรุงรักษารายปีของเตาเผาแลกเปลี่ยนแบบไซโคลน 7% ของราคาเตาเผาแลกเปลี่ยน มูลค่าค่าซาก 10% ของราคาเครื่อง ราคาแลกเปลี่ยน 200 Baht/ton ราคาข้าว 100 Baht/ton อัตราค่าไฟฟ้า 2.29 Baht/kWh ค่าแรงงานในการดำเนินการอบแห้งค่อน 30 Baht/h อัตราส่วนลด 7% อัตราการป้อนข้าวเปลือกเฉลี่ย 15.55 v/h อัตราการป้อน

แกลบเฉลี่ย 0.34 t/h อัตราการผลิตชี้ได้แกลบเฉลี่ย 0.08 t/h กำลังไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟัลส์ฟลูอิดไชน์เบดเฉลี่ย 37.8 kW กำลังไฟฟ้าของเตาเผาแกลบแบบไซโคลนเฉลี่ย 6.3 kW ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 29%d.b. และ 24%d.b. ตามลำดับ อัตราการระเหยน้ำเฉลี่ย 664 kg-water evap/h.

จากผลการทดลองคำนวณหาค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมน้ำระเหย และค่าใช้จ่ายต่อดันข้าวเปลือกได้ดังนี้ ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งรวม 0.53 Bahu/kg-water evap. (22.54 Bahu/ton) ค่าเครื่องอบแห้งและเตาเผาแกลบ 0.18 Bahu/kg-water evap. (7.53 Bahu/ton) ค่าแกลบ 0.10 Bahu/kg-water evap. (4.33 Bahu/ton) ค่าไฟฟ้ารวม 0.15 Bahu/kg-water evap. (6.49 Bahu/ton) ค่าบำรุงรักษารวม 0.07 Bahu/kg-water evap. (2.79 Bahu/ton)

3.3 คุณภาพข้าว

เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความขาวของข้าวสารก่อนและหลังอบแห้งที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นว่าคุณภาพข้าวก่อนอบแห้งและหลังอบแห้งมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวมีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนในการทดลองครั้งที่ 3 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไชน์ใช้อุณหภูมิสูงและเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นสูงและความชื้นสุดท้ายไม่ต่ำกว่า 23%d.b. จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเพิ่มขึ้นได้ อาจเป็นเพราะผลของการเกิดเป็นเจลละติน (gelatinization) บางส่วน ปกติการเกิด gelatinization จะเริ่มที่อุณหภูมิประมาณ 68°C และจะเกิดอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 78°C ซึ่งในการทดลองครั้งที่ 3 เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเฉลี่ย 73°C

ตารางที่ 2 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความขาวของข้าวสารก่อนและหลังอบแห้ง

ครั้งที่ทดลอง	รายการ	HY _{in} (%)	HY _{out} (%)	Wh _{in}	Wh _{out}
1	F = 16.13 t/h T _{in} = 145°C T _p = 71°C	45.8	45.1	52.5	53.1
2	F = 15.87 t/h T _{in} = 144°C T _p = 71°C	46.3	44.3	52.6	53.6
3	F = 15.18 t/h T _{in} = 154°C T _p = 73°C	51.5	53.4	50.8	50.9

หมายเหตุ - HY_{in} = เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเฉลี่ยก่อนอบแห้ง - HY_{out} = เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเฉลี่ยหลังอบแห้ง

- Wh_{in} = ความขาวเฉลี่ยก่อนอบแห้ง - Wh_{out} = ความขาวเฉลี่ยหลังอบแห้ง

- F = อัตราการป้อนข้าวเปลือก - T_{in} = อุณหภูมิลมร้อน

- T_p = อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก

3.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟัลส์ฟลูอิดไชน์เบดกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อรอนงค์[4] ได้ทำเอาไว้ มาประยุกต์เพื่อใช้ทำนายการอบแห้งข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งฟัลส์ฟลูอิดไชน์เบดขนาดกำลังผลิต 20 t/h โดยมีสมมุติฐานว่า การปล่อยลมเข้าห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งฟัลส์ฟลูอิดไชน์เบดเป็นไปอย่างต่อเนื่องเหมือนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟ

ลูอิโดซ์เบด พบว่าผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ทั้งในส่วน
ของปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก และปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะเฉลี่ย

ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้ง
พัลส์ฟลูอิโดซ์เบดกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิโดซ์เบด โดยถือว่าความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้ง
1.5 m/s เป็นความเร็วของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิโดซ์เบด และใช้ความเร็วของอากาศเข้า
ห้องอบแห้ง 2 และ 2.5 m/s เป็นความเร็วของอากาศเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งฟลูอิโดซ์เบด

ที่ความเร็วอากาศเข้าห้องอบแห้ง 2 และ 2.5 m/s ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ได้จากการทำนายด้วยแบบ
จำลองทางคณิตศาสตร์ จะต่ำกว่าความชื้นที่ได้จากการทำนายเมื่อใช้ความเร็วอากาศเข้าห้องอบแห้ง 1.5 m/s เพราะที่
ความเร็วของอากาศที่เข้าห้องอบแห้งสูง อัตราการระเหยความชื้นจะดีกว่าเมื่ออัตราเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้งต่ำ ซึ่งจากผล
การทำนายแสดงให้เห็นว่า การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิโดซ์เบด จะลดความชื้นได้ดีกว่าการอบแห้ง
ข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิโดซ์เบด

ส่วนปริมาณการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อใช้ข้อมูลที่ได้อาก
การทดลอง แต่ใช้ความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้งเป็น 1.5, 2 และ 2.5 m/s พบว่าปริมาณการใช้พลังงานความร้อน
จำเพาะเฉลี่ยจากการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์เมื่อใช้ความเร็วอากาศ 1.5 m/s จะน้อยกว่าปริมาณการใช้พลังงาน
ความร้อนจำเพาะเฉลี่ยจากการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ เมื่อใช้ความเร็วอากาศเข้าห้องอบแห้ง 2 และ 2.5 m/s

สำหรับปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยจากการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ก็มีลักษณะเดีย
วกันกับปริมาณการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ย คือ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ความเร็วอากาศ 1.5 m/s
จะน้อยกว่า ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ความเร็วอากาศ 2 และ 2.5 m/s

3.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิโดซ์เบดกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วย เครื่องอบแห้งฟลูอิโดซ์เบด โดยใช้ข้อมูลที่ได้อากการวิจัยมาแล้ว

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้อากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิโดซ์เบด กับงานวิจัย
อบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิโดซ์เบดซึ่งมีลักษณะการทำงานของเครื่องเหมือนกัน คือ ใช้เกลบเป็นเชื้อ
เพลิง และไม่มี air recycle พบว่า อัตราการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ถ้าเทียบกันในกรณี
ที่มีความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายใกล้เคียงกัน ดังจะเห็นจากข้อมูลการวิจัยของขุนพล [5] ที่มีความชื้นเริ่มต้น
27.5%d.b. และมีความชื้นสุดท้าย 22.5%d.b. พบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิโดซ์เบดจะใช้พลัง
งานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยน้อยกว่าการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิโดซ์เบดเล็กน้อย โดยข้อมูลแสดงดังดา
รางที่ 3

ในงานวิจัยอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิโดซ์เบด ของนเรศ [6] จะเห็นว่าปริมาณการใช้พลังงาน
ความร้อนจำเพาะเฉลี่ย และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยสูงกว่างานวิจัยอื่น ๆ เพราะความชื้นของข้าวเปลือก
อยู่ในช่วงที่ต่ำมากแล้ว การระเหยน้ำจึงเป็นไปได้ยากขึ้น ทำให้ใช้พลังงานมากขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 3 ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชน์เบด เทียบกับงานวิจัยอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด (ไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่)

	PFBD	FBD			
		1*	2*	3**	4**
อัตราการป้อนข้าวเปลือกเฉลี่ย (t/h)	15.55	13.57	11.75	9.3	10.5
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	148	138	140	145	149
ความชื้นข้าวเปลือก (%d.b.)					
- ก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง	29.3	24.7	27.5	23.3	20.6
- ออกจากเครื่องอบแห้ง	23.7	20.2	22.5	18.5	18.4
อัตราการระเหยน้ำ (kg-water evap./h)	664	490	461	362	192
ปริมาณการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ย (MJ/ kg-water evap.)	7.65	7.04	7.77	7.43	14.05
ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ย (MJ/ kg-water evap.)	0.20	0.25	0.27	0.33	0.65

หมายเหตุ* เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่โรงสีทุ่งหลักจันทน์ งานวิจัยของขุนพล สังข์อารียกุล [5]

** เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่โรงสีนิธิชัยนุกิจ งานวิจัยของนเรศ มีโส [6]

4. สรุป

1. เครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชน์เบดสามารถอบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 29%d.b เหลือประมาณ 24% d.b. โดยคุณภาพข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนมากนัก
2. การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชน์เบดโดยไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ จะใช้พลังงานความร้อนจำเพาะอยู่ในช่วง 6.23-9.37 MJ/kg-water evap. และใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะอยู่ในช่วง 0.18-0.25 MJ/kg-water evap.
3. เมื่อใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชน์เบดจะใช้พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยใกล้เคียงกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด และเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชน์เบดจะใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยน้อยกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด
4. ผลการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ เมื่อความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 1.5 m/s เป็นความเร็วของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชน์เบด และความเร็ว 2 และ 2.5 m/s เป็นความเร็วของอากาศเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด พบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชน์เบดจะมีอัตราการ

ระเหยนํ้าต่ำกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด แต่ปริมาณการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยและพลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่าเมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด

5. ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งข้าวเปลือกเท่ากับ 0.53 Baht/kg-water evap. (22.54 Baht/ton)

5. ค่าขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง

6. เอกสารอ้างอิง

1. Soponronarit, S. and Prachayawarakorn, S., 1994, "Optimum Strategy for Fluidized Bed Paddy Drying," *Drying Technology*, Vol. 12, No. 7, pp. 1667-1668.
2. Xiangyou, W. and Chongwen, C., 1996, "Research on Pulsoidfluidized Bed Drying," *Proceedings of the 10th International Drying Symposium*, Vol. A, pp. 621-626.
3. Gawrzynski, Z., 1996, "Operational Tests of a Pulsed Fluid Bed Dryer/Cooler for Granulated Sugar," *Proceedings of the 10th International Drying Symposium*, Vol. B, pp. 771-777.
4. Soponronarit, S., Prachayawarakorn, S., Sripawatakul, O., 1996, "Development of Cross-Flow Fluidized Bed Paddy Dryer," *Drying Technology*, Vol. 14, No. 10, pp. 2397-2410.
5. ขุนพล สังข์อารียกุล, สมบูรณ์ เวชกามา, อติศักดิ์ พงษ์กุลผลศักดิ์ และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2545, "การประเมินสถานภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทย," *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 1, หน้า 32-41.
6. นเรศ มีโต, สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และสมบูรณ์ เวชกามา, 2543, "การประเมินสมรรถนะระบบอบแห้งของโรงสีข้าวในเขตภาคกลางของประเทศไทย," *วิศวกรรมสาร มก.*, ฉบับที่ 40, หน้า 81-93.

การอบแห้งข้าวหนึ่งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด Drying of Parboiled paddy Using Fluidized Bed Dryer

เอกรินทร์ โปษกรณ์¹ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์² และ วารุณี เตีย²

1 ฝ่ายบริหารและแผนงานด้านการใช้ไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

53 หมู่ 2 ถนนเจริญสุขนิทวงศ์ บางกรวย นนทบุรี 11130

2 คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถนนประชาธิปไตย บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์พลังงานในการผลิตข้าวหนึ่ง โดยการผลิตข้าวหนึ่งทำโดยการแช่น้ำอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และหนึ่งด้วยไอน้ำความดัน 11 bar_g เป็นเวลา 11 นาที ส่วนระบบอบแห้งประกอบด้วยการตากลาน การอบด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบด การเก็บในที่อับอากาศ การเป่าอากาศ แวดล่อมและการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง LSU โดยมีเตาเผาเปลือกไซโคลนเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการอบแห้ง จากการศึกษาพบว่า การผลิตข้าวหนึ่งมีการใช้พลังงานความร้อน 651.45 – 732.14 MJ/ton พลังงานไฟฟ้า 5.16 – 6.08 kWh/ton กระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงที่สุด โดยสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยเมื่อไม่คิดรวมการตากลาน 5.67 MJ/kg-water evap. และพลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ย 0.086 kWh/kg-water evap. ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งข้าวหนึ่งเฉลี่ย 68.22 บาท/ตันข้าวเปลือกหนึ่ง

คำสำคัญ : การอบแห้ง / ข้าวหนึ่ง / ฟลูอิดไรซ์เบด

Abstract: Parboiled paddy process consists of steeping paddy in water at 80°C for 8 hr and steaming under 11 bar_g steam pressure for 11 minutes, and then drying. The drying system consists of sun drying, fluidized bed dryer, tempering and ventilation, LSU dryer. The cyclonic husk furnace was used as thermal energy source for drying. This research aims to study the energy consumption of parboiled paddy production plant. The results of energy usage showed that the production of parboiled paddy required thermal energy of 651.45 – 732.14 MJ/ton and electrical energy of 5.16 – 6.08 kWh/ton. The drying process, of which the specific thermal and electrical energy consumption are 385.71 MJ/ton (5.67 MJ/kg water evaporation) and 5.16 kWh/ton (0.086 kWh/kg water evaporation), respectively, is the most energy consumable process. Total cost of the drying process is about 68.22 Baht/ton of parboiled paddy.

Keywords : Dehydration / Fluidization / Parboiled rice

1. บทนำ

ข้าวหนึ่ง คือข้าวที่ได้จากการสีข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่น้ำและให้ความร้อน แล้วทำให้แห้งก่อนการสี ข้าวหนึ่งเป็นที่นิยมมากในประเทศอินเดีย ปากีสถาน บังคลาเทศ อัฟริกา และประเทศทางตะวันออกกลาง ข้าวหนึ่งจะมีคุณค่าทางอาหารสูงกว่าข้าวโดยทั่วไป เนื่องจากสารอาหารที่อยู่บริเวณผิวของเมล็ดละลายน้ำซึมเข้าสู่ภายใน เมล็ดข้าวระหว่างขั้นตอนการผลิต นอกจากนี้ข้าวหนึ่งยังมีปริมาณการแตกหักหลังการขัดสีต่ำอีกด้วย โดยปกติขั้นตอนการผลิตข้าวหนึ่งประกอบด้วย การแช่ข้าวในน้ำที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน แล้วนึ่งด้วยไอน้ำ หรือตัวกลางนำความร้อนอื่น จากนั้นจึงอบแห้งลดความชื้นเพื่อให้สามารถขัดสีได้ (13-14% w.b.) เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 ขั้นตอน กระบวนการอบแห้งเป็นขั้นตอนที่ใช้พลังงานมากกว่า 50% ของพลังงานรวมทุกขั้นตอนการผลิต [1] ได้มีการศึกษาถึงวิธีการต่างๆ เพื่อลดพลังงานในการผลิตข้าวหนึ่ง Pillaiyar et. al. [2] ได้แนะนำขั้นตอนการผลิตข้าวหนึ่งเพื่อให้ได้ข้าวที่ผ่านการนึ่งที่มีความชื้นต่ำ และใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยลง นอกจากนี้ Prasad et. al. [3] ยังเสนอการอบแห้งข้าวหนึ่งที่สภาวะเบดข้าวหนึ่งแบบกึ่งฟลูอิดซ์ ที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อลดพลังงานในการอบแห้ง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง รวมถึงความเหมาะสมของการอบแห้งข้าวหนึ่งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดในโรงสีข้าวหนึ่ง

2. อุปกรณ์และวิธีการ

ระบบการผลิตข้าวหนึ่งที่ทำการศึกษ ประกอบด้วย ดังสำหรับแช่และนึ่งข้าวขนาดเส้นรอบวง 20 ฟุต สูง 15 ฟุต ความจุข้าว 7 ตัน จำนวน 24 ถัง ข้าวเปลือกที่ผ่านการแยกสิ่งเจือปน เช่น ฟางข้าว แผลง และกรวดแล้ว จะถูกบรรจุลงในถังเพื่อแช่ข้าวในน้ำร้อนอุณหภูมิ 80°C ซึ่งได้มาจากการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำร้อนที่ออกจากเครื่องจักรไอน้ำที่ใช้ในการสีข้าว การแช่ใช้เวลาประมาณ 8 ชั่วโมง มีการหมุนเวียนน้ำภายในถังโดยการสูบน้ำจากด้านล่างถึงไปปล่อยที่ด้านบนทุก 3 ชั่วโมง เมื่อแช่ข้าวได้ 8 ชั่วโมงแล้ว น้ำที่ใช้แช่จะถูกปล่อยออกจากถัง แล้วทำการนึ่งข้าวโดยให้ความร้อนด้วยไอน้ำความดัน 11 bar_g จากหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงแกลบภายในถังปิดเป็นเวลา 10 นาที น้ำควบแน่นจะออกจากถังทางวาล์วที่อยู่ด้านล่างของถัง ข้าวหนึ่งที่ได้นำไปตากลานเพื่อหุบเปลือกข้าวและการลดความชื้นขั้นต้น จากนั้นจึงนำไปผ่านระบบอบแห้งซึ่งมีกำลังการผลิต 12 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งมีแผนภาพการทำงานของระบบอบแห้งดังแสดงไว้ในภาพที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

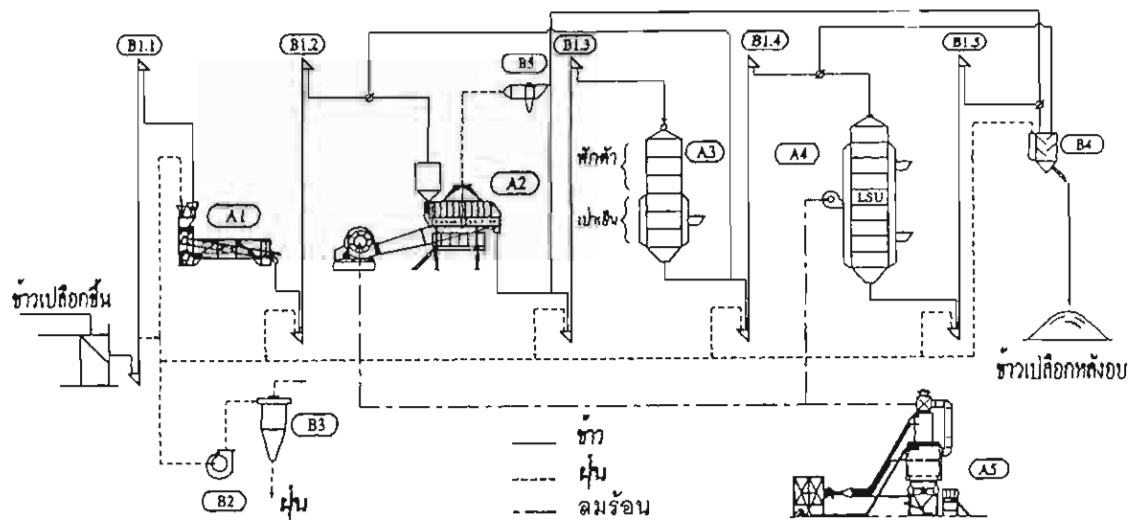
- A1 เครื่องทำความสะอาดข้าวเปลือก
- A2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดซ์เบด พื้นที่ห้องอบ $1 \times 2.5 \text{ m}^2$ กำลังการผลิต 12 ตันต่อชั่วโมง
- A3 เครื่องปรับสภาพข้าว ส่วนบนเป็นการเก็บในที่อับอากาศขนาด $2 \times 2 \times 3 \text{ m}^3$ ส่วนล่างเป็นการเป่าเย็น

ด้วยอากาศแวดล้อมขนาด $2 \times 2 \times 3 \text{ m}^3$ ความจุข้าวรวม 10 ตัน

- A4 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ LSU ขนาด $2.4 \times 3 \times 7 \text{ m}^3$ ความจุข้าว 38 ตัน
- A5 เตาดูแลแกลบ
- B1.1-B1.5 กะพ้อ
- B2 พัดลมดูดฝุ่น

B3, B5 ไชโคลอน

B4 ดังดักฝุ่น



ภาพที่ 1 ระบบอบแห้ง

ข้าวหนึ่งความชื้นสูงจะถูกลำเลียงจากหลุมข้าวเปลือกไปยังเครื่องทำความสะอาด (A1) ข้าวสะอาดจะถูกส่งต่อไปยังถังพักข้าว และไหลต่อไปยังเครื่องฟลูอิดไชเบต (A2) จากนั้นเข้าสู่ชุดปรับสภาพข้าว (A3) เพื่อลดอุณหภูมิและทำให้ความชื้นภายในเมล็ดข้าวให้มีความสม่ำเสมอ แล้วส่งต่อไปยัง เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ LSU (A4) และเข้าไปที่ดังดักฝุ่น B4 และนำไปกองที่กองข้าวเพื่อรอการสี

ในการศึกษาหาความสัมพันธ์พลังงานได้ทำการวัดอุณหภูมิน้ำแช่ข้าว ข้าวเปลือก อากาศแวดล้อม ลมร้อนที่ใช้อบแห้งด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ต่อกับ Data วัดความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเครื่อง Hot wire anemometer ค่าความถูกต้อง $\pm 4\%$ วัดการใช้ไฟฟ้าด้วย Clamp-on power meter $\pm 0.5\%$ วัดอัตราการป้อนข้าวเปลือก อัตราการใช้เกลบของเตาเผา เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกในขั้นตอนต่างๆ เพื่อทดสอบหาความชื้นและคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการสีได้แก่ เปอร์เซ็นต์ตันข้าว เปอร์เซ็นต์ White belly และความขาวของข้าวสาร การทดสอบหาความขาวของข้าวสาร เปอร์เซ็นต์ White belly จะวัดเฉพาะข้าวที่ผ่านขั้นตอนการสีแล้วเท่านั้น

3. ผลและวิจารณ์

3.1 การผลิตข้าวหนึ่ง

ข้าวเปลือกที่ความชื้นเฉลี่ย 28.2% d.b. เมื่อผ่านขั้นตอนการแช่ข้าวทำให้ความชื้นเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 49% d.b. หลังจากผ่านการนึ่งข้าวความชื้นข้าวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 49.8% d.b. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์พลังงานที่ใช้ในการแช่และนึ่งข้าวแสดงในตารางที่ 1 ความสัมพันธ์พลังงานที่ใช้ในการแช่ข้าวขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้แช่ ส่วนการนึ่งข้าวพลังงานที่ใช้ขึ้นกับระยะเวลาการนึ่ง ข้าวหนึ่งชั้นจะถูกนำไปตากแดดบนลานเพื่อลด

ความชื้นระยะเวลาในการตากขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ จากนั้นนำไปเข้าระบบอบแห้ง ข้าวหลังจากผ่านเครื่องทำความสะอาดความชื้นเฉลี่ย 21.9%d.b. จะผ่านเข้าสู่เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคเบต อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเฉลี่ย 121°C จากนั้นจะเข้าสู่เครื่องปรับสภาพข้าว ซึ่งช่วงบนของเครื่องจะเป็นการเก็บข้าวเปลือกในที่อับอากาศเพื่อให้ความชื้นภายในข้าวเปลือกที่ออกมาบริเวณผิวของเมล็ด ส่วนช่วงล่างจะเป็นการเป่าเย็นด้วยอากาศแวดล้อมอัตราการไหลเฉลี่ย 2.6 m³/s เพื่อให้ข้าวมีอุณหภูมิลดลง ทำให้ความชื้นเฉลี่ยของข้าวหนึ่งลดลงเหลือ 15.9%d.b. และอุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดหลังเป่าเย็น 37°C จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ LSU อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 140°C อัตราการไหลเฉลี่ย 1.9 m³/s ผลการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานแสดงในตารางที่ 2 ในการทดลองที่ 2 พลังงานจำเพาะมีค่าสูงเนื่องจากกระเหยน้ำได้น้อยเพราะความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มต้นต่ำ ทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวระเหยออกได้ยากกว่า

3.2 ค่าใช้จ่ายของระบบอบแห้ง

นำผลการทดลองทั้ง 3 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้คำนวณหาค่าใช้จ่ายที่ใช้ในระบบอบแห้ง ได้แก่ อัตราการป้อนข้าวเปลือกเฉลี่ย 11.8 t/h ที่ความชื้นเฉลี่ย 14.2%d.b. อัตราการป้อนแกลบเฉลี่ย 276 kg/h อัตราการผลิตข้าวเปลือกเฉลี่ย 55 t/h กำลังไฟฟ้าของระบบอบแห้งเฉลี่ย 65.37 kW ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 21.9% และ 14.2% d.b. ตามลำดับ เงื่อนไขในการวิเคราะห์มีดังนี้

- ต้นทุนระบบอบแห้ง 6,000,000 บาท แยกเป็น
 - เครื่องทำความสะอาด 200,000 บาท
 - เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคเบต 1,000,000 บาท
 - เครื่องปรับสภาพข้าว 900,000 บาท
 - เครื่องอบแห้ง LSU 2,600,000 บาท
 - เตาเผาแกลบไซโคลน 1,300,000 บาท
- ระยะเวลาการทำงาน 1500 ชั่วโมงต่อปี
- การผลิตข้าวเปลือกหนึ่ง 17,700 ตันต่อปี
- อายุการใช้งานของระบบอบแห้ง 10 ปี
- ค่าบำรุงรักษารายปีของระบบอบแห้งไม่รวมเตาเผาแกลบไซโคลน 1.6% ของต้นทุนระบบ
- ค่าบำรุงรักษารายปีของเตาเผาแกลบไซโคลน 3.2% ของต้นทุนเตาเผาแกลบ
- มูลค่าซากของระบบอบแห้ง 10% ของต้นทุนระบบอบแห้ง
- ราคาแกลบตันละ 200 บาท
- ราคาข้าวเปลือกตันละ 100 บาท
- อัตราค่าไฟฟ้าหน่วยละ 2.85 บาท
- แรงงาน 1 คน คิดเป็นค่าดำเนินงานชั่วโมงละ 20 บาท
- อัตราดอกเบี้ย 7% ต่อปี

มูลค่าเงินปัจจุบันของค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับ 8,785,361 บาท แบ่งเป็นต้นทุนระบบอบแห้ง 6,000,000 บาท ค่าบำรุงรักษา 110,862 บาท ค่าดำเนินงาน 158,031 บาท ค่าเชื้อเพลิงแกลบเฉลี่ย 580,969 บาท ค่าไฟฟ้า 1,993,596 บาท ค่าซื้อข้าวเปลือกที่ขายได้เฉลี่ย 58,097 บาท คิดเป็นค่าใช้จ่ายรายปีเฉลี่ย 1,221,887 บาท หรือ 68.22 บาทต่อตันข้าวเปลือกหนึ่ง และค่าใช้จ่ายในการกระเหยน้ำเฉลี่ย 1,040 บาทต่อตันน้ำระเหย

เมื่อคิดค่าใช้จ่ายเทียบกับกรณีที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นแหล่งพลังงานความร้อนโดยเตาเผาดีเซลประสิทธิภาพความร้อน 90% ราคา 100,000 บาท ค่าบำรุงรักษารายปี 1.6% ของราคาเตา ราคาน้ำมันดีเซลลิตรละ 15 บาท มูลค่าปัจจุบันรวมเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 22,274,580 บาท แบ่งเป็นเงินลงทุนระบบอบแห้ง 4,700,000 บาท เตาเผาดีเซล 100,000 บาท ค่าบำรุงรักษา 72,896 บาท ค่าดำเนินงาน 158,031 บาท ค่าเชื้อเพลิง 15,977,086 บาท ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 2,014,596 บาท คิดเป็นค่าใช้จ่ายรายปีเฉลี่ย 3,136,658 บาท หรือ 177.21 บาทต่อตันข้าวเปลือกหนึ่ง หรือค่าใช้จ่ายในการระเหยน้ำเฉลี่ย 2,700 บาทต่อตันน้ำระเหย

เมื่อพิจารณากรณีที่เดิมใช้น้ำมันดีเซลแล้วเปลี่ยนมาใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง เมื่อประเมินหาผลตอบแทนที่ได้พบว่า ระยะเวลาคืนทุน 0.6 ปี อัตราผลตอบแทนภายใน 160%

3.3 คุณภาพข้าว

ผลการทดสอบคุณภาพข้าวในขั้นตอนต่างๆ แสดงในภาพที่ 2 และ 3 จากการทดลอง พบว่า หลังจากขั้นตอนการแช่เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากข้าวเกิด Gelatinization ขึ้นบางส่วนขณะอยู่ในน้ำอุณหภูมิ 80°C เมื่อหนึ่งด้วยไอน้ำ ทำให้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นมากอย่างชัดเจน (15-20%) จนสามารถคิดว่าข้าวเกิดการ Gelatinization สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามการแช่และการึ่งที่ความดันไอน้ำสูงเป็นเวลานานก็ทำให้ความขาวเฉลี่ยของข้าวลดลง ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนหลังจากข้าวผ่านกระบวนการหนึ่งเช่นเดียวกัน ส่วนกระบวนการอบแห้งทำให้เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยต้นข้าวและความขาวเฉลี่ยลดลงเล็กน้อย เปอร์เซ็นต์ White belly ของทุกการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากไม่สามารถสังเกตได้

เมื่อสังเกตเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวของการทดลองครั้งที่ 2 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวหลังจากผ่านกระบวนการแช่และหนึ่งแล้วใกล้เคียงกับการทดลองครั้งที่ 1 และ 3 แต่เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวในช่วงกระบวนการ อบแห้งมีค่าต่ำกว่าในการทดลองครั้งที่ 1 และ 3 มีสาเหตุมาจากความชื้นของข้าวหนึ่งที่ผ่านมาการตากลานมีความชื้นต่ำอยู่แล้ว เมื่อข้าวหนึ่งผ่านเข้าไปในระบบอบแห้งจึงทำให้ข้าวเกิดการแตกหักมากจากความชื้นที่ต่ำเกินไป ข้าวหนึ่งที่ผ่านมาการตากลานความชื้นเฉลี่ย 18.5% d.b. ในการทดลองครั้งที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว 59.7% ซึ่งต่ำกว่าข้าวที่ผ่านระบบอบแห้งจนเสร็จสิ้นก่อนการสีจากการทดลองครั้งที่ 1 และ 3 (เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว 62.4-62.9% ความชื้น 12.7-13.7% d.b.)

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

เครื่องอบแห้งฟลูอิดไธด์เบดสามารถอบแห้งข้าวหนึ่งจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 25% d.b เหลือประมาณ 20% d.b. โดยคุณภาพข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในการผลิตข้าวหนึ่งมีการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนเฉลี่ย 698.62 MJ/ton paddy ความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง 65.37 kW ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 5.62 kWh/ton paddy พลังงานความร้อนเฉลี่ยที่ใช้ในการอบแห้ง 366.59 MJ/ton paddy พลังงานความร้อนจำเพาะในการระเหยน้ำเฉลี่ยเมื่อไม่คิดรวมการตากลาน 5.67 MJ/kg-water evap. พลังงานไฟฟ้าจำเพาะในการระเหยน้ำเฉลี่ย 0.086 kWh/kg-water evap. เมื่อพลังงานต่อต้นข้าวเปลือกคิดที่ความชื้นข้าวเปลือก 16% d.b.

การแช่ทำให้เกิดการ gelatinization บางส่วน เพิ่มเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวได้ 1-5% การหนึ่งทำให้เกิดการ gelatinization อย่างสมบูรณ์ และเพิ่มเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวได้มาก (ประมาณ 17%) แต่ทำให้ความขาวลดลง สมรรถนะในการระเหยน้ำของระบบอบแห้งขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้นของข้าวก่อนเข้าสู่ระบบอบแห้ง เนื่องจากที่ความชื้นข้าวหนึ่งจะทำให้ไอน้ำระเหยออกจากข้าวได้ยากกว่าที่ความชื้นสูง ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งข้าวหนึ่งประมาณ

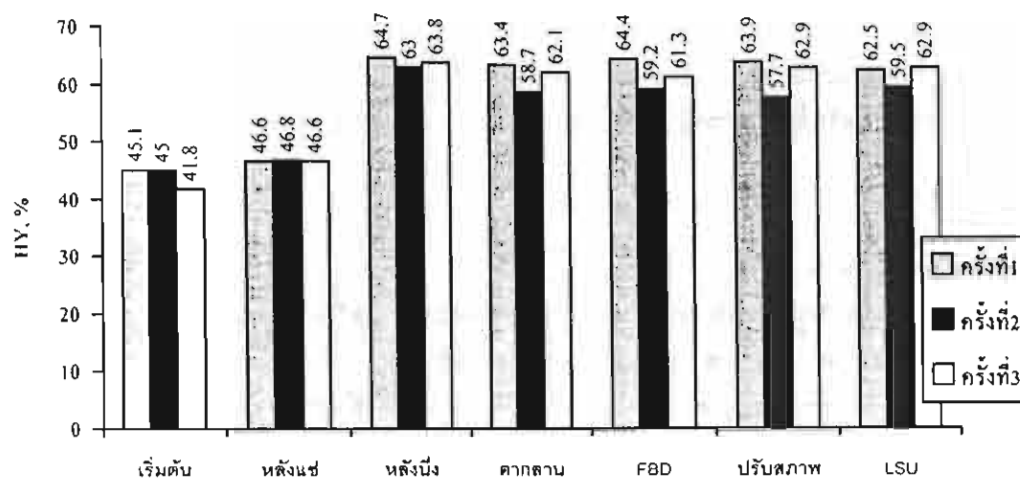
68.22 บาท/ตันข้าวเปลือกหนึ่ง หรือ 10.40 บาท/kg-water evap. โดยค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่คือเงินลงทุนและค่าไฟฟ้าของระบบอบแห้ง

5. ขอบคุณ

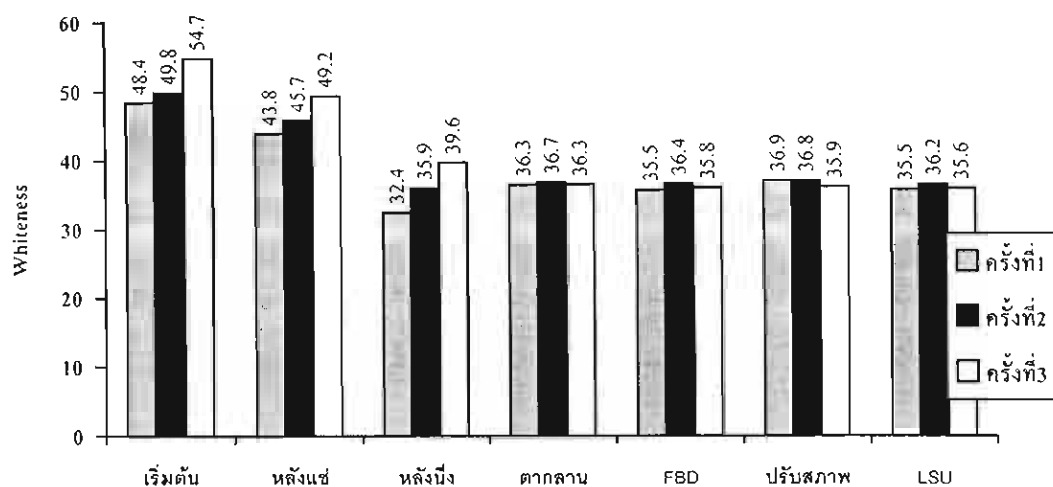
ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ประกอบการโรงสีข้าวพ.แสงวัฒนา4 ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและให้เข้าตรวจวิเคราะห์ในโรงสี และขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Pillaiyar, P., "Energy Saving in Parboiling of Paddy," *Proceeding of 4th International Food Conference*, pp. 1001 - 1006.
2. Pillaiyar, P., Singaravadivel, K., Desikachar, H.S.R., and Subramaniyan, 1993, "Low-Moisture Parboiling of Paddy," *Journal of Food Science Technology*, Vol. 30, No. 2, pp. 97 - 99.
3. Prasad, B.V.S., Chandra, P.K., and Bal, S., 1994, "Drying Parboiled Rough Rice in Stationary, Semi-Fluidized, and Fluidized Conditions," *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE)*, Vol. 37, No. 2, pp. 589 - 594.



ภาพที่ 2 เปอร์เซนต์ดินข้าวของแต่ละขั้นตอนการผลิต



ภาพที่ 3 ความขาวของแต่ละขั้นตอนการผลิต

ตารางที่ 1 ความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการแช่และนึ่งข้าวเปลือก

การทดลองครั้งที่	1	2	3	เฉลี่ย
ความชื้นข้าวเปลือก (%d.b)				
- เริ่มต้น	28.9	27.7	28.1	28.2
- หลังการแช่	47.0	48.4	51.5	49.0
- หลังการนึ่ง	47.6	48.9	52.9	49.8
ความสิ้นเปลืองพลังงาน				
- การแช่ (MJ/t - paddy*)	172.03	156.53	170.70	166.42
ปริมาณน้ำที่ใช้ (l/ t - paddy*)	0.90	0.92	0.90	0.91
- การนึ่ง (MJ/t - paddy*)	174.40	163.35	159.07	165.61
เวลาที่ใช้ (นาที)	11.19	11.15	10.51	10.95

หมายเหตุ t – paddy คัดที่ความชื้น 16%d.b.

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานในระบบอบแห้ง (ไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้)

การทดลองครั้งที่	1	2	3	เฉลี่ย
เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชเบด				
- อัตราการป้อนข้าวเปลือก (t/h) ที่ความชื้น 25%d.b.	12.72	12.20	11.30	12.1
- ความชื้นข้าวเปลือก (%d.b) เริ่มต้น	24.7	18.5	22.4	21.9
สุดท้าย	20.6	16.6	17.8	18.3
- อุณหภูมิ (°C) ลมร้อนที่ใช้ออบแห้ง	120.8	119.5	121.3	120.5
ข้าวเปลือกก่อนอบแห้ง	34.9	37.2	31.8	34.6
ข้าวเปลือกหลังอบแห้ง	63.6	63.9	66.4	64.6
- อัตราการอบแห้ง (kg-water evap./h)	414.9	181.5	415.9	337.4
- ความสิ้นเปลืองพลังงาน ความร้อน (MJ/t -paddy *	143.19	155.91	155.23	151.44
หรือ MJ/kg-water evap.)	4.07	9.73	3.92	5.91
- ไฟฟ้า (kWh/t -paddy *	2.85	3.11	3.11	3.02
หรือ kWh/kg-water evap.)	0.081	0.194	0.078	0.12
เครื่องปรับสภาพข้าว				
- ความชื้นข้าวเปลือกที่ออก (%d.b)	17.7	13.8	16.2	15.90
- ความสิ้นเปลืองไฟฟ้า (MJ/t-paddy*)	0.32	0.32	0.36	0.33
เครื่องอบแห้ง LSU				
- ความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย (%d.b)	15.9	12.2	14.5	14.2
- อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ออบแห้งของ (°C)	146.5	132.8	142.1	140.5
- อัตราการอบแห้ง (kg-water evap/h)	181.6	156.5	151.6	163.2
- ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้ง ความร้อน (MJ/t -paddy*	67.61	51.37	45.58	54.85
หรือ MJ/kg-water evap.)	4.39	3.72	3.15	3.75
ไฟฟ้า (kWh/t -paddy*	0.83	0.86	0.96	0.88
หรือ kWh/kg-water evap.)	0.054	0.062	0.066	0.061
- อุปกรณ์อื่นๆ ไฟฟ้า (kWh/t -paddy*)	1.16	1.33	1.65	1.38

หมายเหตุ * ดันข้าวเปลือกคิดที่ความชื้น 16 %d.b.

** ปริมาณน้ำระเหยเป็นน้ำที่ระเหยจากทุกอุปกรณ์ ไม่คิดความชื้นที่ระเหยขณะตากลาน

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานในระบบอบแห้ง (ไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้) (ต่อ)

การทดลองครั้งที่	1	2	3	เฉลี่ย
พลังงานรวมที่ใช้ในระบบอบแห้ง				
- ความร้อนจากแก๊ส (MJ/t -paddy *	385.71	363.12	350.94	366.59
หรือ MJ/kg-water evap.)	5.14	6.70	5.18	5.67
- ไฟฟ้า (kWh/t -paddy *	5.16	5.62	6.08	5.62
หรือ kWh/kg-water evap.)	0.069	0.099	0.090	0.086

หมายเหตุ * ต้นข้าวเปลือกคิดที่ความชื้น 16 % d.b.

** ปริมาณน้ำระเหยเป็นน้ำที่ระเหยจากทุกอุปกรณ์ ไม่คิดความชื้นที่ระเหยขณะตากลาน