

inhibitor existing in soybean (Soponronnarit *et al.*, 2001). It showed a positive result of reduction in the urease activity. The measurement of urease activity is an indirect method to indicate the trypsin inhibitor. With the fluidization technique, the minimum temperature required to reduce the urease activity to level lower than 0.30 Δ pH should be not lower than 120°C. The protein level was insignificantly reduced in a temperature range of 110-140°C. For the physical qualities, the degree of cracking and breakage were found to be higher with increase of drying temperature.

However, the conventional fluidized bed usually provides the poor quality of fluidization (bubbling and slugging) for such coarse particles, resulting in low heat and mass transfer between solid and gas phases (Gishler, 1983). Thus spouted bed technique was developed for improving such cause. Several researchers have used this technique for drying cereal grains (Mathur and Epstein, 1974; Viswanathan *et al.*, 1986; Massarani, 1987; Pasos *et al.*, 1987, 1989). This technique has the advantages as follows: simple design and construction, regular cyclic movement of solids, easily handling and lower pressure drop.

The use of two-dimensional spouted bed as a heat processing to reduce the trypsin inhibitor in the soybean has been of less interest. Therefore, this work studies the drying rate of soybean in a two-dimensional spouted bed and the effect of temperature on the soybean qualities such as percentages of cracking and breakage, urease activity and protein solubility.

MATERIALS AND METHODS

Drying rate

A batch two-dimensional spouted bed dryer as shown in Figure 1 was used for drying and heat treatment. The system consisted of a spouted bed dryer with a width of 60 cm, a height of 200 cm, a 24 kW electric heater, an on-off temperature controller and a backward-curved blade centrifugal

fan (2.2 kW motor). Geometry of dryer was the inlet cross sectional area of $4 \times 15 \text{ cm}^2$, the spout width of 8 cm and the entrance height of 12.5 cm.

Temperatures were recorded by Chromel-Alumel (Type K) thermocouples connected to a data logger with an accuracy of $\pm 1^\circ\text{C}$. Pressure drop across bed and air velocity were respectively measured by a U-tube manometer and a hot wire anemometer.

Soybeans were rewetted to obtain the desired moisture content and then placed at temperature controlled room between 8 and 10°C for 5 or 7 days to ensure uniform moisture content of kernels. The experimental conditions were set up as follows: initial moisture contents of 28-32% dry basis, a fixed hold up of 25 kgs, temperatures of 120-150 °C and a fixed air velocity of 20.5 m/s. Sample taken at every five minutes for periods of 5-30 minutes were collected in an electric oven for 72 hrs at temperature of 103°C to determine the moisture content.

Quality

Percentages of cracking and breakage

Cracking and breakage were considered by visually sorting out the cracked and broken kernels with fluorescent from 200 gram sample. The percentages of cracking and breakage were expressed by the following equations:

Percentage of cracking

$$= \frac{\text{weight of cracked kernel}}{\text{weight of sample}} \times 100 \quad (1)$$

Percentage of breakage

$$= \frac{\text{weight of broken kernel}}{\text{weight of sample}} \times 100 \quad (2)$$

Urease activity

The urease activity could be measured by detecting pH change, which is caused by the urease converting urea to ammonia. This method is an indirect test for level of trypsin inhibitor. A properly

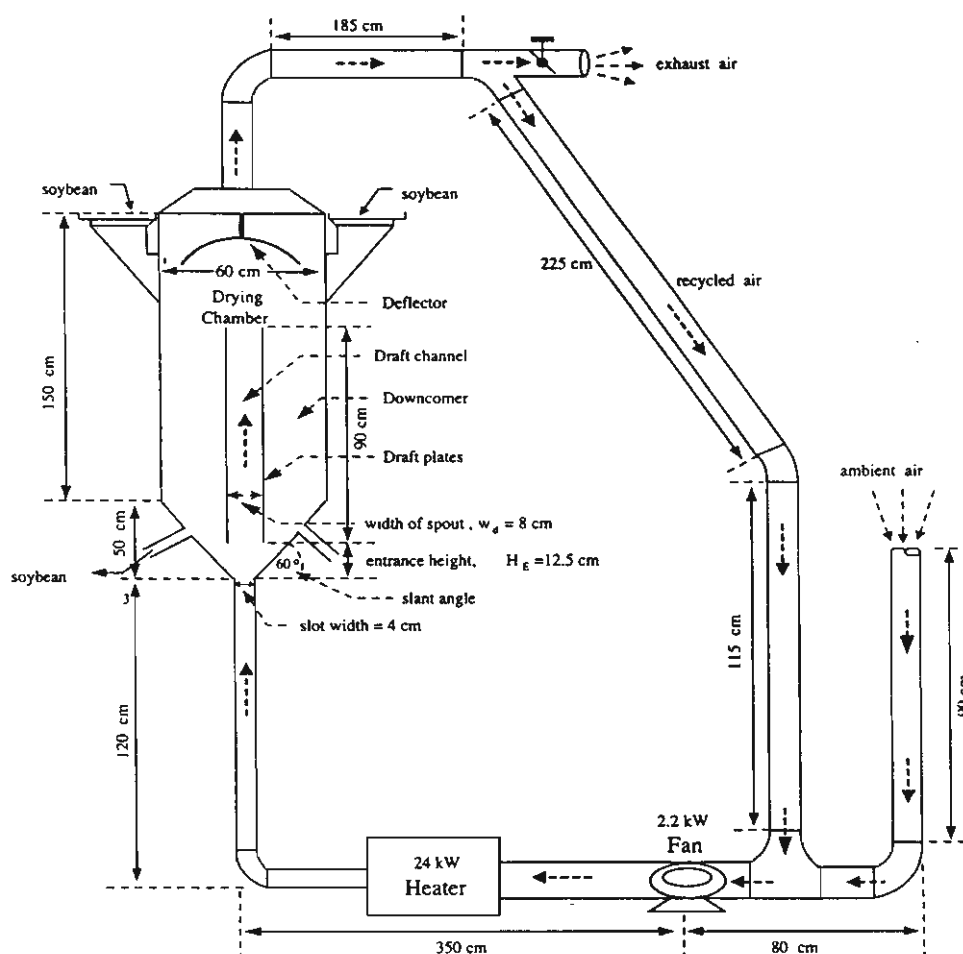


Figure 1 Schematic diagram of a Two-dimensional Spouted Bed Dryer (not to scale).

cooked soybean will give a urease activity of 0.30 rise in ΔpH . The measurement method follows the AACC procedure (1944).

Crude protein

Nitrogen content of soybean was estimated by Kjeldahl method (AOAC, 1980) using a nitrogen analyzer (Model VAPODEST12) and crude protein content was calculated by $\%N \times 6.25$.

Protein solubility

Protein solubility indicates the dispersion of proteins in 0.2% KOH solution. The nitrogen in the supernatant is determined by the Kjeldahl method. According to Cheong (1997), protein solubility

should be in a normal range between 70 and 85%. If its value is lower than 70%, it means the soybean is overcooked, but if it is higher than 85%, soybean is insufficiently cooked. Protein solubility was calculated by

Protein solubility

$$= \frac{\text{nitrogen of the supernatant in 0.2\% KOH solution}}{\text{crude protein}} \times 100 \quad (3)$$

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of temperatures on drying rate

A set of drying curves of soybeans at different inlet air temperatures is given in figure 2. It is clearly illustrated that moisture content is decreased

rapidly at the beginning of drying period and then reduces slowly at the end of drying period. In all cases, drying rates of soybean are increased with inlet air temperature and drying of soybean is in the falling rate period. During this period, moisture movement is controlled by internal diffusion.

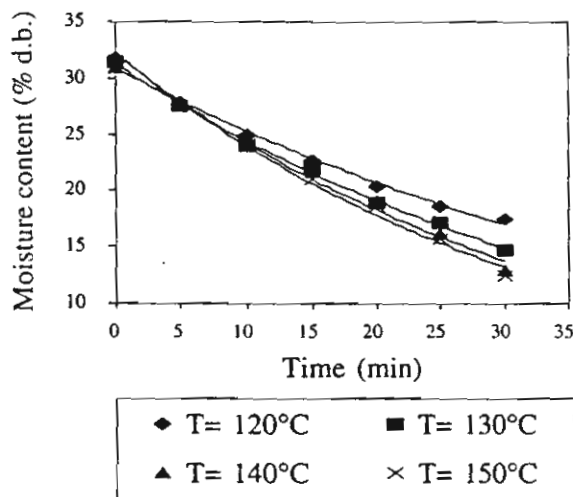


Figure 2 Effect of temperatures on reduction of moisture content.

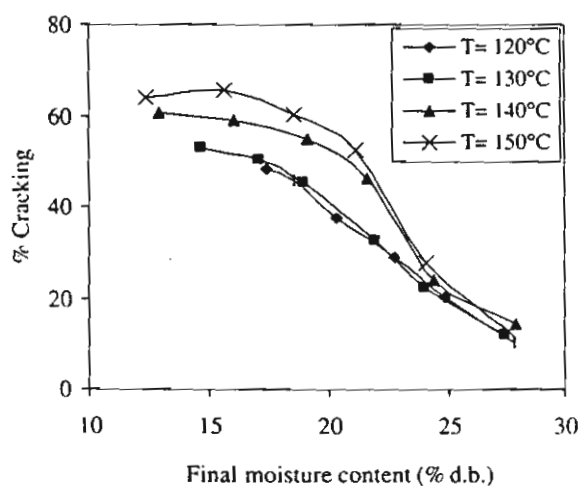


Figure 3 Effect of temperatures on the percentages of cracking at a fixed air velocity of 20.5 m/s and a deflector height of 138 cm.

Effect of temperatures on cracking and breakage

The cracking and breakage of soybean caused by drying at high temperatures is formed in V-shape. These results are similar to those reported by Overhults *et al.* (1973) and Soponronnarit *et al.* (2001).

The percentages of cracking and breakage shown in figures 3 and 4, respectively, were obtained by the following conditions: inlet air temperatures of 120-150°C, a deflector height of 138 cm from the entry of air inlet and a fixed air velocity of 20.5 m/s. They reveal that percentages of cracking and breakage depend strongly on the final moisture content and the inlet air temperatures; they increase with decrease of final moisture contents and increase of inlet air temperatures. Such defects are caused by the slow movement of water from the inside to the outside. Hence, soybean becomes brittle at the surface and tends to be cracked. Furthermore, the surface temperature of soybean rapidly increases as drying proceeds.

As illustrated in figure 4, the percentage of breakage of final product lies in a range of 6-24% higher than an acceptable level (3%). The cause of

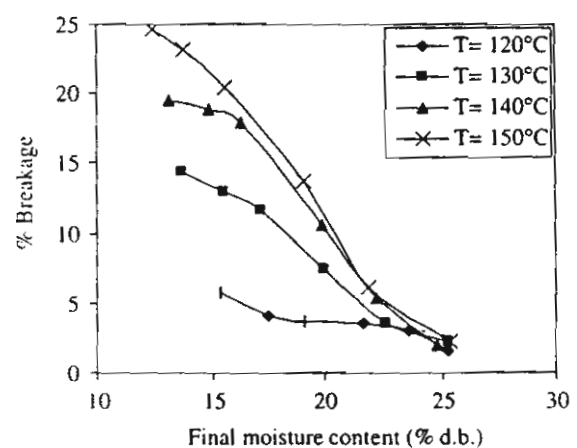


Figure 4 Effect of temperatures on the percentages of breakage at a fixed air velocity of 20.5 m/s and a deflector height of 138 cm.

such result is due to the effect of strong collision of kernels with the deflector, besides the drying effect. The effect of the deflector will be discussed in the next section.

Effects of air velocity and deflector height on cracking and breakage

Figures 5 and 6 show the increased percentages of cracking and breakage at the different air velocities and a deflector height of 142 cm. It is found that the percentages of cracking are insignificantly changed with increase of air velocity, but the percentages of breakage are substantially higher. When compared to figure 4 at 130°C in which degree of collision of kernel with deflector is higher than that in figure 6, it reveals that percentages of breakage at 142 cm deflector height (figure 6) are approximately 3% and 8% for air velocities of 15.86 and 17.12 m/s, respectively, whilst the percentage of breakage at 138 cm deflector height (figure 4) is 15% for air velocity of 20.5 m/s at the same drying conditions.

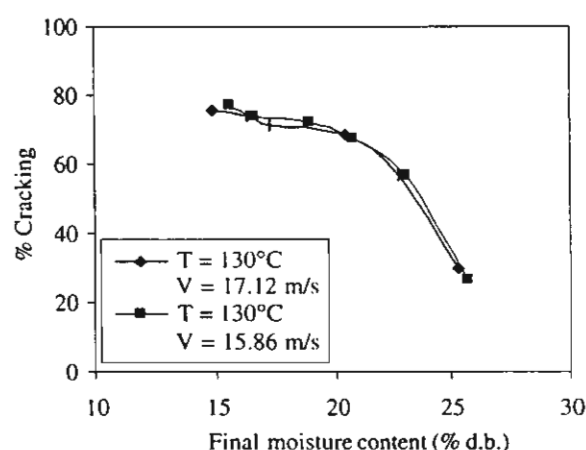


Figure 5 Effect of air velocities and deflector height on the percentages of cracking at a fixed temperature of 130°C, initial moisture content of 28% d.b. and a deflector height of 142 cm.

Effect of temperatures on urease activity and protein solubility

Figures 7 and 8 show the levels of urease of soybeans obtained from each treatment. In all tests, the pH is insignificantly changed at the early period and it is then reduced sharply. From the urease curve at 120°C, it can be seen that the level of urease is still higher than an acceptable limit of 0.30 ΔpH, according to FAO standard. At 130°C and initial moisture content of 28% d.b., urease can be reduced to be lower than an acceptable level, but at higher initial moisture content of 31-32% d.b., it is still higher than the acceptable level (pH change of 0.60). However, the capability of reducing the urease becomes more effectiveness when using the air temperature up to 140 or 150°C for reducing moisture content from a thorough range of 28-32% d.b. to 15% d.b.

Table 1 shows protein, urease activity and protein solubility in all heat treatments. It is found that the protein is insignificantly different and the protein solubility varies between 78-85%, indicating that the soybeans were properly treated.

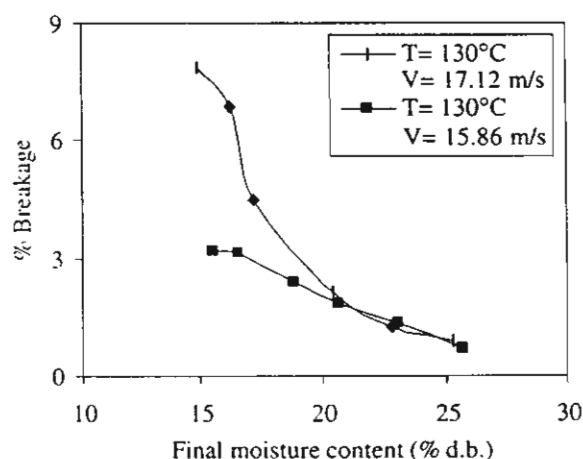


Figure 6 Effect of air velocities and deflector height on the percentages of breakage at a fixed temperature of 130°C, initial moisture content of 28% d.b. and a deflector height of 142 cm.

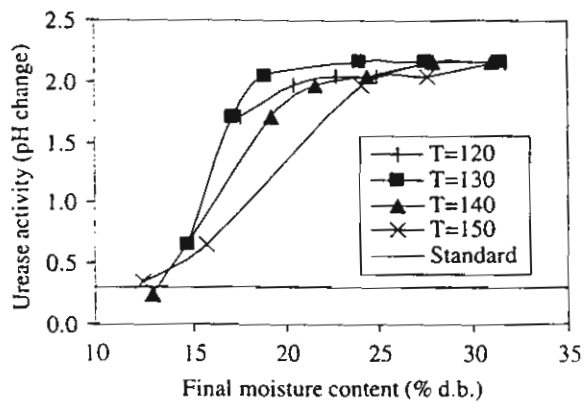


Figure 7 Effect of temperatures on the urease activity at the air velocity of 20.5 m/s, a deflector height of 138 cm and initial moisture content of 31-32% d.b.

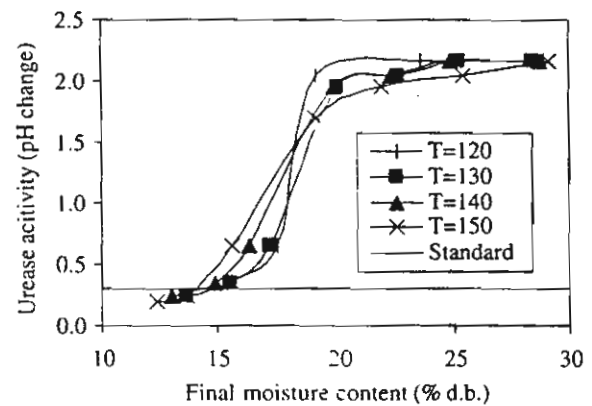


Figure 8 Effect of temperatures on the urease activity at the air velocity of 20.5 m/s, a deflector height of 138 cm and initial moisture content of 28% d.b.

Table 1 Analysis of protein solubility in 0.2% KOH at initial moisture content of 28-32% d.b.

T (°C)	MI (% d.b.)	Mf (% d.b.)	Protein (%)	Urease activity (ΔpH)	Protein solubility (%)
120	28.88	15.35	37.15	0.35	80.96
130	28.37	13.72	38.06	0.24	80.72
140	31.01	12.95	38.04	0.24	79.65
140	28.69	13.09	38.04	0.24	79.08
150	31.40	12.40	38.07	0.35	85.33
150	29.12	12.37	38.12	0.20	78.13
Initial sample			38.04-38.91	2.16	90.54-93.73

CONCLUSIONS

Drying at high air temperature can reduce the moisture content of soybean faster than that at low temperature. The percentages of cracking and breakage depend upon the temperature, final moisture content and degree of collision of kernel with deflector. Two-dimensional spouted bed dryer has a great potential to decrease the urease activity to the acceptable limit, along with maintaining the

protein quality, when using the drying air temperature between 140 and 150°C. Under satisfaction of both qualities, moisture contents of soybean were reduced from 28 – 32% to be lower than 14% dry basis.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Thailand Research Fund (T.R.F.) for supporting this work.

LITERATURE CITED

- AACC. 1944. Official and Tentative Methods of the American Oil Chemists' Society (2nd ed.). American Oil Chemists's Society, AACC Method 22-90.
- AOAC. 1980. Official Methods of Analysis. 10th ed. Association of Official Agricultural Chemists. Washington, D.C.
- Cheong, Y.L. 1997. Full fat soybean meal production and utilization. American Soybean Association (ASA) Technical Bulletin FT37-1997 : 1-13.
- Faber, J.L. and D.R. Zimmerman. 1973. Evaluation of infrared-roasted and extruder-processed soybeans in baby pig diets. *Journal of Animal Science* 36 (5) : 902-907.
- Gishler, P.E. 1983. The Spouted bed technique-discovery and early studies at N.R.C. *Canadian Journal Chemical Engineering* 61 : 267-268.
- Liener, I.E. 1988. Antinutritional factors in legume seeds: state of the art, pp. 6-11. *In* Recent Advances of Research in Antinutritional Factors in Legume Seeds. Pudoc Wageningen, The Netherlands.
- Massarani, G. 1987. Secagem de produtos agrícolas. Volume 2 Editora UFRJ, Rio de Janeiro.
- Mathur, K.B. and N. Epstein. 1974. Spouted bed. Academic Press. 52 : 129-144.
- Overhults, D.G., G.M. White, H.E. Hamilton and I.J. Ross. 1973. Drying soybean with heated air. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers* 16 : 112-113.
- Passos, M.L., A.S. Mujumdar, and V.G.S. Raghavan. 1987. Spouted beds for drying, pp. 359-397. *In* A.S. Mujumdar (ed.). Principles and Design Considerations in Advances in Drying Volume 4. Hemisphere, New York.
- _____. 1989. Spouted and spouted-fluidized beds for grain drying. *Drying Technology* 7 : 663-696.
- Qin, G., E.R. ter Elst, M.W. Bosch, and A.F.B. van der Poel. 1996. Thermal processing of whole soya beans studies on the inactivation of antinutritional factors and effects on ileal digestibility in piglets. *Animal Feed Science Technology* 57 : 313-324.
- Soponronnarit, S., T. Swasdisevi, S. Wetchacama, and W. Wutiwiwatchai. 2001. Fluidised bed drying of soybeans. *Journal of Stored Products Research* 37 : 133-151.
- Viswanathan, K., M.S. Lyall, and B.C. Raychavdhury. 1986. Spouted bed drying agricultural grains. *Canadian Journal Chemical Engineering* 64 : 223-232.
- White, C.L., D.E. Greene, P.W. Waldroup and E.L. Stephenson. 1967. The use of unextracted soybeans for chicks. *Poultry Science* 46 : 1180-1185.

Received date : 06/11/01

Accepted date : 28/12/01

การออกแบบ ทดสอบ และหา แนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการ อบแห้งข้าวเปลือก โดยเทคนิคการ ทำไหลบนฐานสัน

สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์*

สมบูรณ์ เวชกามา†

สุวัฒน์ ตรุทีศนวินท์*

วุฒิกรณ์ จริยตันติเวทย์*

*ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์

ราชบัณฑิตยสถาน

†คณะพลังงานและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

อดีตนักศึกษาระดับปริญญาโท

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องต้นแบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสัน ขนาดกำลังผลิต ๒.๕-๕.๐ ตันต่อชั่วโมง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด

สมการเงื่อนไขในการทดสอบเครื่องมีดังนี้ : อัตราการไหลของอากาศอบแห้ง ๑.๗ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที, ความเร็วอากาศอบแห้ง ๑.๕ เมตรต่อวินาที, อุณหภูมิอากาศอบแห้งเฉลี่ย ๑๒๕-๑๔๐ องศาเซลเซียส, ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้งประมาณ ๑ นาที, ความสูงชั้นข้าวเปลือก ๑๑.๕ เซนติเมตร, สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๘๔ และค่าความชื้นการสิ้นเปลือง ๑ (ความชื้น ๗.๓ เอิร์ช และแอมพลิจูดในแอมพลิจูด ๕ มิลลิเมตร)

ผลการทดสอบ พบว่า เมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเท่ากับ ๕.๕๖ ตันต่อชั่วโมง สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจากร้อยละ ๒๕ เหลือร้อยละ ๒๐ ของฐานแห้ง โดยสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าและน้ำมันดีเซล ๔.๖๖ วัตต์ และ ๑๖.๖ ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ สิ้นเปลืองพลังงานปรมาณูจำเพาะ ๒.๑๕ เมกะจูลต่อกิโลกรัมที่ระเหย, กำลังไฟฟ้าใช้กับมอเตอร์พัดลมและมอเตอร์สั่นสะเทือนมีค่าประมาณร้อยละ ๕๔ ของมอเตอร์พัดลมการอบแห้งด้วยเทคนิคการทำไหลไม่มีการสั่นสะเทือนที่เกินการอบแห้ง ๑๖ ชั่วโมงต่อวันและ ๔๐ วันต่อปี จะมีการใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก ๑.๕ บาทต่อกิโลกรัมที่ระเหย แบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง ๐.๕ บาทต่อกิโลกรัมที่ระเหย และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้ง ๑ บาทต่อกิโลกรัมที่ระเหย เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น พบว่าสามารถทำนายการอบแห้งข้าวเปลือกในระดับพลอยอมรับได้ สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลที่ขนาดกำลังผลิต ๕ ตันต่อชั่วโมง ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๐ ของฐานแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้ง ๒.๓ เมตรต่อวินาที สมการเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลที่เหมาะสมที่สุดมีดังนี้ : อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ๑๔๔ องศาเซลเซียส, สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๘๓, ความสูงชั้นข้าวเปลือก ๙.๙ เซนติเมตร, ความถี่การสั่นสะเทือน ๕ เอิร์ช และความชื้นการสิ้นเปลือง ๒.๕, มีความสิ้นเปลืองพลังงานปรมาณูจำเพาะ ๕.๓๖ เมกะจูลต่อกิโลกรัมที่ระเหย และความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๒๖.๐ ของฐานแห้ง

สรุป การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสันมีความสิ้นเปลืองพลังงานปรมาณูจำเพาะน้อยกว่าเทคนิคการทำไหลที่ไม่สันประมาณร้อยละ ๗ การอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสันใช้กำลังไฟฟ้ารวมและน้ำมันดีเซลเฉลี่ยเท่ากับ ๕.๙ กิโลวัตต์ และ ๒๑.๑ ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยมีค่ากำลังไฟฟ้ารวมประมาณร้อยละ ๓๐ ของกำลังไฟฟ้ารวมกรณีอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลที่ไม่มีการสั่น

คำสำคัญ : การอบแห้งข้าวเปลือก, การทำไหลบนฐานสัน, การทำไหล





บทนำ

สมชาติ โสภณเรณูฤทธิ์ และคณะ^๑ ได้ศึกษาสภาวะการอบแห้งข้าวเปลือก ความชื้นสูงด้วยเทคนิคการทำไอลแบบต่อเนื่อง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควบคุมไปกับการทดลอง เมื่อพิจารณาให้มีอัตราการผลิตสูง มีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ และข้าวมีคุณภาพดี พบว่า ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ๑๑๕ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกร้อยละ ๓๐ ของฐานแห้ง ความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๒๔ ของฐานแห้ง ความสูงชั้นข้าวเปลือก ๑๐ เซนติเมตร อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ ๐.๐๔๓ กิโลกรัมต่อวินาที-กิโลกรัมวัสดุแห้ง สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๘๐ มีอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ระเหยน้ำต่ออัตราการผลิตต่ำสุด โดยสิ้นเปลืองพลังงานปรมาณูมีจำเพาะ ๗.๔ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย มีค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง ๒.๐๕ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย. จากการศึกษาเพิ่มเติม^๒ พบว่า ถ้าต้องการให้ข้าวเปลือกมีปริมาณข้าวต้นสูง (ปริมาณข้าวหักต่ำ) ไม่ควรอบแห้งให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกต่ำกว่าร้อยละ ๒๓ ของฐานแห้ง และร้อยละ ๑๔ ของฐานแห้ง สำหรับกรณีที่ไม่มีการเทมเปอร์และกรณีที่มีการเทมเปอร์ ตามลำดับ และอุณหภูมิอากาศอบแห้งไม่ควรสูงกว่า ๑๕๐ องศาเซลเซียส.

Rysin^๓ ศึกษาการอบแห้งอาหาร โดยเทคนิคการทำไอลและสัน พบว่าความชื้นการสันไม่ควรมีค่าเกิน ๓.๓

โดยค่าความชื้นการสันและแอมพลิจูดที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง ๑.๕-๒.๐ และ ๕-๑๐ มิลลิเมตร ตามลำดับ. Ringer และ Mujumdar^๔ สร้างแผนภูมิสำหรับเลือกพารามิเตอร์การทำงานสำหรับการอบแห้งโดยใช้เทคนิคการทำไอลบนฐานสัน พบว่าอัตราส่วนความเร็วอากาศต่อความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการทำไอล และความชื้นการสันมีค่าไม่เกิน ๑.๑ และ ๓.๓ ตามลำดับ. ฮาน และคณะ^๕ ศึกษาการกระจายระยะเวลาที่อยู่ในห้องอบแห้งของวัสดุ (residence time distribution) และลักษณะเฉพาะของการอบแห้งในเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไอลบนฐานสันอย่างต่อเนื่องขนาดโรงงานนาร์รอง. วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือข้าวสาลี และ Biyanning^๖ (ชื่อทางการค้าของยารักษาโรคเยื่อจมูกอักเสบชนิดมีด). ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความชื้นการสัน, อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, อัตราการป้อนวัสดุ อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้ง และขนาดของวัสดุ. โดยพิจารณาการทำไอลของวัสดุในเครื่องอบแห้งเป็นการไหลแบบลูกสูบ (plug flow). จากการทดลองพบว่าความชื้นการสันเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระยะเวลาเฉลี่ยของวัสดุในห้องอบแห้ง และการกระจายของวัสดุ. เมื่อความชื้นการสันเพิ่มมากขึ้นทำให้ระยะเวลาเฉลี่ยของวัสดุในห้องอบแห้งลดลง และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น. จากงานวิจัยด้านการอบแห้งโดยเทคนิคการทำไอลบนฐานสันที่ผ่านมาข้างต้น สรุปได้ว่าความชื้น

การสันควรมีค่า ๑.๕-๒.๐ และความถี่ของการสันควรมีค่า ๕-๒๕ เฮิร์ตซ์ โดยควรใช้ความถี่ต่ำ เพื่อลดการสั่นไหว และประหยัดพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์สัน และเพิ่มค่าแอมพลิจูดเพื่อเพิ่มความชื้นการสันแทน.

จากการที่มีการผลิตและใช้งานเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไอลอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ และความต้องการลดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลม ซึ่งคาดว่าจะลดได้ถ้ามีการสันร่วมด้วย. ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง ทดสอบเครื่องต้นแบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไอลบนฐานสัน ขนาดกำลังการผลิต ๒.๕-๕.๐ ตันต่อชั่วโมง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไอลบนฐานสัน.

วิธีดำเนินการ

การพัฒนาเครื่องต้นแบบและวิธีการทดลอง

ดำเนินการสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไอลบนฐานสัน ขนาดกำลังผลิต ๕.๐ ตันต่อชั่วโมง ที่บริษัทไรซ์เอ็นจิเนียริง ซัพพลาย จำกัด ออกแบบตามหลักการเช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไอล แต่ใช้ความเร็วอากาศอบแห้งลดลง ทำให้ใช้มอเตอร์ขนาดเล็กลงจาก ๑๕ กิโลวัตต์ เหลือ ๗.๕ กิโลวัตต์. ได้ทำการทดลองที่





โรงสีข้าวชัยภูมิจำลองการวังตาเพชร อำเภอ
บางปลาม้า จังหวัดสุพรรณบุรี. ส่วน
ประกอบเครื่องอบแห้งมีดังนี้

ห้องเผาไหม้และหัวพันไฟ

พัดลมแบบหอยโข่งใบพัดโค้ง
หลัง ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด ๗.๕ กิโลวัตต์

ห้องอบแห้งขนาด ๐.๖ × ๒.๑ ×
๑.๒ เมตร

และแผ่นตะแกรงกระจายลม
ขนาด ๐.๖ × ๒.๑ เมตรหนา ๐.๕
มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู
๑.๑ มิลลิเมตร

ระบบการสิ้นประกอบด้วย ชุด
ลูกเบี้ยว ชุดสปริงชุด และชุดสปริงลาน
มอเตอร์ขับเคลื่อนระบบสิ้น ขนาด ๑.๕ กิโล
วัตต์ (ความถี่ ๗.๓ เฮิร์ตซ์, ความ
เข้มการสิ้น ๑ และแอมพลิจูดในแนวตั้ง
๕ มิลลิเมตร)

ถังพักข้าวเปลือก

โรตารีป้อนและปล่อยข้าวเปลือก
เลาะกะพ้อ

ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า

ระบบท่ออากาศเวียนกลับ

และไซโคลน รายละเอียดแสดงไว้
ในรูปที่ ๑.

ในการทดลองได้เก็บตัวอย่างข้าว
เปลือกก่อนและหลังการอบแห้งทุก ๒๐
นาทิจำนวนห้าครั้งเพื่อมาหาความชื้นและทดสอบ
คุณภาพ. ก่อนการทดสอบคุณภาพ
ตัวอย่างข้าวเปลือกถูกเป่าด้วยอากาศ
แวดล้อมจนความชื้นลดลงเหลือ
ประมาณร้อยละ ๑๔ ของฐานเปียก.
วัดอุณหภูมิโดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิล
(thermocouple) ชนิดเค ต่อเข้ากับ
ตัวบันทึกข้อมูล (data logger) ค่า
ความถูกต้อง ± 0.1 องศาเซลเซียส. วัด

ความเร็วลมโดย hot wire anemo-
meter ค่าความถูกต้อง $\pm$ ร้อยละ ๔
ที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องอบแห้ง
ดังแสดงในรูปที่ ๑ และวัดกำลัง
ไฟฟ้าโดยใช้ clamp-on meter ค่า
ความถูกต้อง $\pm$ ร้อยละ ๐.๕.

การพัฒนาแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และ
สมเกียรติ ปรัชญารากร* และ สมชาติ
โสภณธนฤทธิ์และคณะ* ได้พัฒนา
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ
สมการอัตราการอบแห้งข้าวเปลือก
โดยเทคนิคการทำไหล โดยศึกษาใน

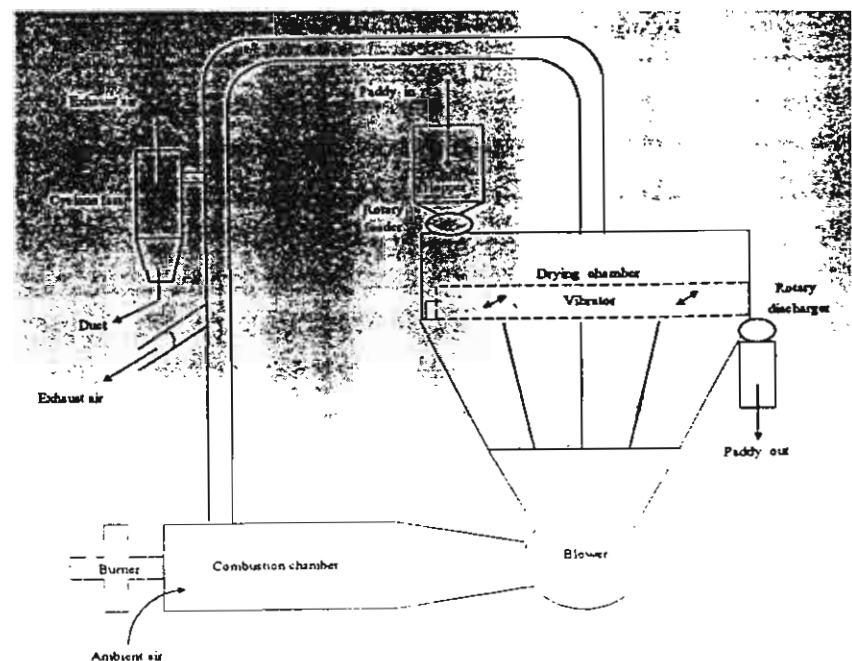
ช่วงอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ
๐.๑๓-๐.๓๓ กิโลกรัมต่อวินาที-
กิโลกรัมวัสดุแห้ง และ ๐.๐๓-๐.๑๖
กิโลกรัมต่อวินาที-กิโลกรัมวัสดุแห้ง
ตามลำดับ, ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์
ใช้กับการพัฒนาแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือก
โดยเทคนิคการทำไหลและสันได้ โดย
ตั้งสมมุติฐานดังนี้

๑. เกิดสมดุลความร้อนระหว่าง
ข้าวเปลือกกับอากาศอบแห้ง

๒. การไหลของข้าวเปลือกใน
ห้องอบแห้งเป็นการไหลแบบลูกสูบ

๓. ข้าวเปลือกเกิดการไหลอย่าง
สมบูรณ์ในห้องอบแห้ง

รูปที่ ๑
ผังแสดงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลและสัน



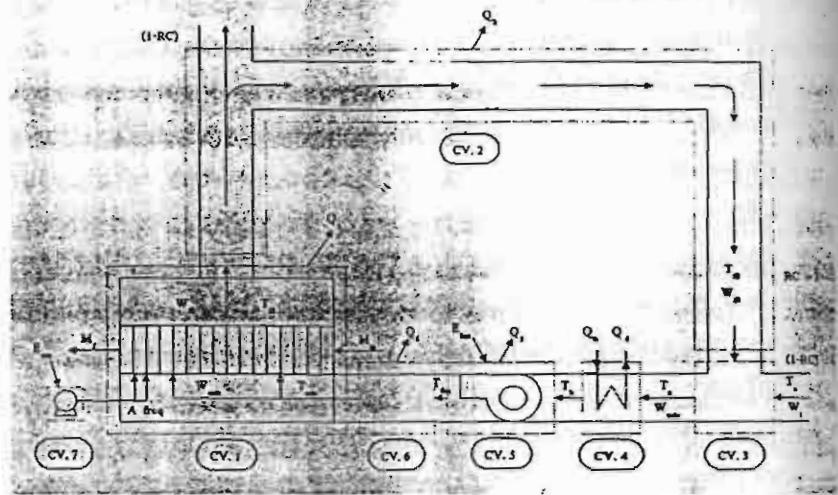


๔. อากาศไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกอย่างสม่ำเสมอ และ

๕. แรงลัพธ์ของการสั่นสะเทือนมีทิศทางเดียวกับทิศทางของอากาศอบแห้ง. รูปที่ ๒ เป็นแผนภาพแสดงระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลและสั่น และปริมาณควบคุมในแต่ละส่วนของระบบ จากกฎอนุรักษ์พลังงานและมวล, ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั่นได้ดังนี้

รูปที่ ๒

ผังแสดงปริมาณควบคุมของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลและสั่น



การคำนวณเป็นแบบลงมือ

$$W_{n,j} = \frac{h p_i (M_i - M_{i+1})}{m_{mix,j} t_i} + W_{mix}$$

$$T_{n,i} = \frac{Q_i/m_{mix} + c_a T_{mix} + W_{mix} (h_{fg} + c_v T_{mix})}{c_a + W_{n,i} c_v} - \frac{W_{n,i} h_{fg} + \Delta U_{p,i}}{c_a + W_{n,i} c_v}$$

$$W_{mix} = (1 - RC)W_i + RCW_n$$

$$T_x = \frac{RCm_{mix} c_a T_{f2} + RCm_{mix} W_n (h_{fg} + c_v T_{f2}) - m_{mix} W_{mix} h_{fg}}{m_{mix} (c_a - W_{mix} c_v)} + \frac{m_i c_a T_a + m_i W_i (h_{fg} + c_v T_a)}{m_{mix} (c_a - W_{mix} c_v)}$$

$$P_i = P_L + P_{bv}$$

$$P_{bv} = P_b \Gamma^n \text{ where } n \text{ depends on density and size of particle}$$

$$T_b = T_{fan} - \left(\frac{P_i m_{mix}}{p_s h_f} + Q_s \right) / m_{mix} (c_a + c_v W_{mix})$$

$$Q_h = m_{mix} (c_a + c_v W_{mix}) (T_b - T_x) - Q_d$$

$$E_{im} = \frac{P_i (m_{mix} / p_s)}{\eta_i \eta_{im}}$$

$$E_{im} = \frac{F_i [2 \pi i (freq)]}{1000 \eta_{im}} \text{ where } F_i = \mu p_s A_p H \cdot g$$

$$MER = \frac{1000 F (M_{in} - M_i)}{(1 + M_{in})}$$

- (๑) ลองถูก โดยสมมติค่า W_n แล้วทำการตรวจสอบภายหลัง พิจารณาปริมาณควบคุมที่ ๑ ในรูปที่ ๒ ซึ่งเป็นห้องอบแห้งข้าวเปลือก จากสมการการอบแห้งข้าวเปลือกของ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ สมเกียรติ ปรัชญารากร และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ, คำนวณการอบแห้งข้าวเปลือกโดยแบ่งข้าวเปลือกเป็น n ชั้นตามแนวยาวของเครื่องอบแห้ง และใช้สมการที่ (๑) และ (๒) คำนวณหาสัดส่วนความชื้นของอากาศและอุณหภูมิของอากาศหลังการอบแห้งของแต่ละชั้นได้ โดยอุณหภูมิของอากาศหลังอบแห้งและสัดส่วนความชื้นของอากาศหลังการอบแห้งเท่ากับค่าเฉลี่ยเลขคณิตของอุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้งและสัดส่วนความชื้นของอากาศหลังการอบแห้งตั้งแต่ชั้นที่ ๑ ถึง n ส่วนรับการคำนวณค่าอื่นๆ เช่น อุณหภูมิของ



อากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง, อุณหภูมิของอากาศเวียนกลับ, อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าหัวเผา, น้ำมันดีเซล, อุณหภูมิของอากาศหลังออกจากพัดลม, อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน, อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลม, อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์สั่น และอัตราการระเหยน้ำของข้าวเปลือก, สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ๑-๑๑.

การหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุด โดย grid search method สามารถคำนวณหาค่าความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุด และความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะต่ำที่สุดซึ่งเป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective functions) โดยการหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดในครั้งแรกกำหนดให้ฟังก์ชันจุดประสงค์คือ ค่าความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุด ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนอากาศเวียนกลับ (RC), ความสูงชั้นข้าวเปลือก (H), อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T_{mix}), ความเข้มข้นการสั่น (Γ) และความถี่การสั่น (freq), โดยมีความสัมพันธ์ดังได้อธิบายไว้แล้วตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และสามารถเขียนรูปแบบสมการฟังก์ชันจุดประสงค์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Minimize } y_1 \\ = M_1(RC, H, T_{mix}, \Gamma, \text{freq}) \quad (๑๒) \end{aligned}$$

คำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์

ที่เป็นไปได้ คือ ความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ ๑๔ ของฐานแห้ง เพื่อให้ได้ข้าวเปลือกมีปริมาณข้าวต้นสูง และหลังการอบแห้งข้าวเปลือกควรลดความชื้นได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ ๔ ของฐานแห้ง และมีอัตราการป้อนข้าวเปลือก ๒.๕-๕.๐ ตันต่อชั่วโมง ตามขนาดกำลังผลิตของเครื่องอบแห้ง ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ ดังนี้

$$19 \leq M_1 \leq M_2 - 4\% \text{ d.b.} \quad (๑๓)$$

$$2.5 \leq F \leq 5.0 \text{ tons/h} \quad (๑๔)$$

เงื่อนไขที่กำหนด คือการอบแห้งเพื่อให้ได้ข้าวเปลือกคุณภาพดี ซึ่งต้องมีเงื่อนไขการอบแห้งดังนี้ : อุณหภูมิ อากาศอบแห้ง ๑๐๐-๑๕๐ องศาเซลเซียส และเพื่อให้ระบบของเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการไหลบนฐานสั่นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในขอบเขตความสามารถของเครื่องอบแห้ง ได้กำหนดสภาวะเงื่อนไขดังนี้ : ความสูงชั้นข้าวเปลือกภายในห้องอบแห้งระหว่าง ๕-๒๐ เซนติเมตร, สัดส่วนอากาศเวียนกลับระหว่าง ๐-๐.๔๗, ความเข้มข้นการสั่นระหว่าง ๑.๐-๒.๕ และความถี่การสั่นระหว่าง ๕-๒๕ เฮิรตซ์ และกำหนดให้ความเร็วอากาศอบแห้งมีค่าคงที่เท่ากับ ๒.๓ เมตรต่อวินาที และ ๑.๕ เมตรต่อวินาที สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลและเทคนิคการทำไหลและสั่นตามลำดับ. สาเหตุที่กำหนดให้ความเร็วอากาศอบแห้งมีค่าคงที่เนื่องจากที่ความเร็วอากาศอบแห้งต่ำกว่าค่าดังกล่าว ข้าวเปลือกอาจเกิดสภาพการไหลไม่

สมบูรณ์ได้ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$0 \leq RC \leq 0.97 \quad (๑๖)$$

$$0.05 \leq H \leq 0.20 \text{ m} \quad (๑๗)$$

$$100 \leq T_{mix} \leq 150^\circ\text{C} \quad (๑๘)$$

$$1.0 \leq \Gamma \leq 2.5 \quad (๑๙)$$

$$5 \leq \text{freq} \leq 25 \text{ Hz} \quad (๒๐)$$

ในการหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดครั้งที่ ๒ กำหนดให้ฟังก์ชันจุดประสงค์คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะต่ำที่สุด ซึ่งคำนวณหาค่าได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวข้างต้น โดยเขียนรูปแบบสมการฟังก์ชันจุดประสงค์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Minimize } y_2 \\ = \text{SPEC}(RC, H, T_{mix}, \Gamma, \text{freq}) \quad (๒๑) \end{aligned}$$

$$\text{โดยที่ SPEC} = \text{SHC} + \text{SPC} \quad (๒๒)$$

$$\text{SHC} = \frac{Q_h}{\text{MER}} \quad (๒๓)$$

$$\text{SPC} = \frac{E_t}{\text{MER}} \quad \text{เมื่อ } E_t = E_{fm} + E_{vm} \quad (๒๔)$$

คำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่เป็นไปได้คือ ค่าความชื้นสุดท้ายแปรผันได้ไม่เกินร้อยละ ๐.๕ ของฐานแห้ง จากค่าความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดที่ได้จากการหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดครั้งแรก โดยมีเงื่อนไขที่กำหนดของการอบแห้งข้าวเปลือกตามสมการที่ ๑๖ ถึง ๒๐ สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่เป็นไปได้ ดังนี้

$$\text{MER} - y_2 \leq 0.5\% \text{ d.b.} \quad (๒๕)$$

จากการหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดทั้ง ๒ ครั้งดังกล่าว จะทำให้สามารถหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด



ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิค
การทำไหลและการอบแห้งข้าวเปลือก
โดยเทคนิคการทำไหลและสันได้

ผลและวิจารณ์

ผลการทดลอง

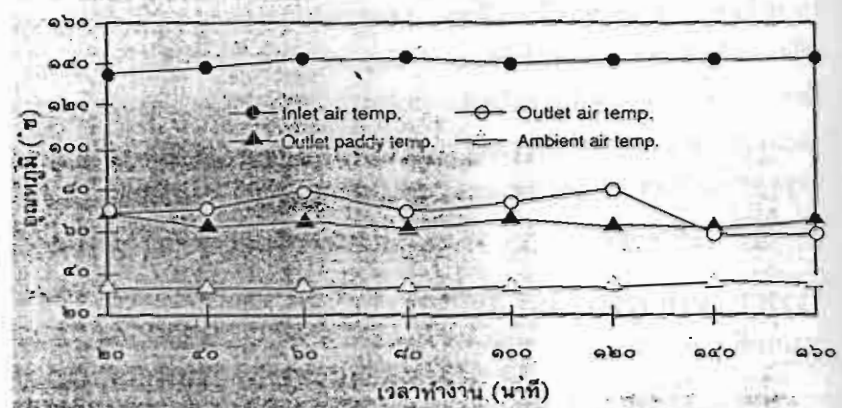
จากการทดลองอบแห้งข้าว
เปลือกที่กำลังผลิต ๔.๘๒ ตันต่อ
ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศอบ
แห้ง ๑.๗ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
(ความเร็วอากาศอบแห้ง ๑.๔ เมตร
ต่อวินาที), สัดส่วนอากาศเวียนกลับ
๐.๘๕, อุณหภูมิอากาศอบแห้งเฉลี่ย
ในช่วง ๑๒๕-๑๕๐ องศาเซลเซียส
และความชื้นการสัน ๑ (ความถี่ ๗.๓
เฮิรตซ์ และแอมพลิจูดในแนวตั้ง ๕
มิลลิเมตร) ได้ ผลการทดลองสรุปไว้
ในตารางที่ ๑.

ความชื้นข้าวเปลือกและ
อุณหภูมิในเครื่องอบแห้ง

รูปที่ ๓ แสดงอุณหภูมิ ณ จุด
ต่างๆ ของเครื่องอบแห้ง กรณีที่
อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง
เฉลี่ยเท่ากับ ๑๕๐ องศาเซลเซียส
โดยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
ของอากาศแวดล้อมมีค่าประมาณ ๓๕
องศาเซลเซียส และร้อยละ ๖๖ ตาม
ลำดับ พบว่า อุณหภูมิข้าวเปลือกหลัง
ออกจากห้องอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ ๖๔
องศาเซลเซียส. รูปที่ ๔ แสดงความชื้น
เริ่มต้นของข้าวเปลือกมีค่าเฉลี่ยร้อยละ
๒๔ ของฐานแห้ง และความชื้นหลัง
การอบแห้งเฉลี่ยร้อยละ ๒๓ ของฐาน
แห้ง ซึ่งพบว่าความชื้นค่อนข้างสม่ำเสมอ.

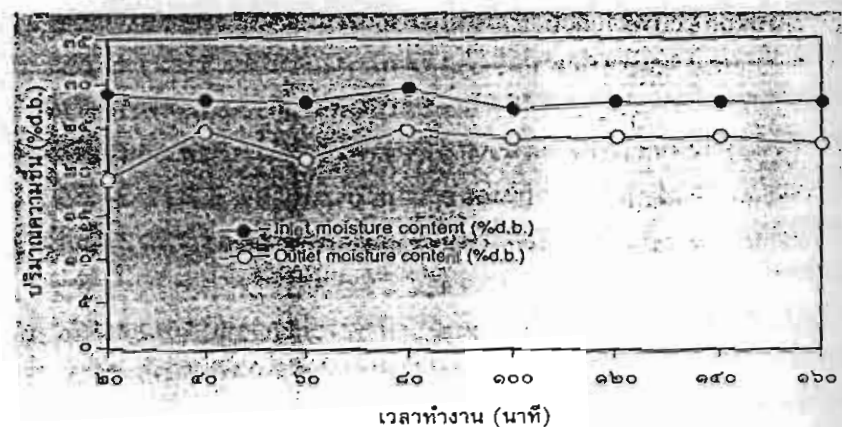
รูปที่ ๓

อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของเครื่องอบแห้ง (อุณหภูมิอากาศเข้าเฉลี่ย = ๑๕๐ °C, ความชื้นของการสัน = ๑, อัตราการใส่ตัวอย่าง = ๑.๓๔ กก./วินาที, ปริมาณความชื้นอากาศ = ๑๘% d.b., ความสูงของตัวอย่างบนฐาน = ๑๑.๕ ซม., ความเร็วของฐาน = ๑.๔ ม./วินาที, ปริมาณความชื้นอากาศออก = ๒๓% d.b.)



รูปที่ ๔

แสดงความชื้นของข้าวเปลือกก่อนและหลังการอบแห้ง (อุณหภูมิอากาศเข้าเฉลี่ยเท่ากับ ๑๕๐ °C, ความชื้นของการสัน = ๑, อัตราการใส่ตัวอย่าง = ๑.๓๔ กก./วินาที, ความสูงของตัวอย่างบนฐาน = ๑๑.๕ ซม., ความเร็วของฐาน = ๑.๔ ม./วินาที)



คุณภาพข้าวเปลือก

ในการทดสอบหาข้าวตัน ได้เก็บ
ตัวอย่างข้าวเปลือกก่อนและหลังการ
อบแห้งทุก ๒๐ นาที พบว่าตัวอย่าง

ข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอากาศแวดล้อมและเครื่องอบแห้งไหล เทคนิคการทำไหลและสัน กรณีอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ย ๑๕๐ องศา





เซลเซียส) มีข้าวตันเฉลี่ยร้อยละ ๓๒.๐ และ ๓๗.๐ ตามลำดับ ซึ่งข้าวตันที่ได้จากเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไอลและสันมากกว่าประมาณร้อยละ ๕ ดังรายละเอียดในรูปที่ ๕ ทั้งนี้ เป็นผลเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่เหมาะสม (๑๔๐ องศาเซลเซียส) และใช้เวลาในการอบแห้งสันประมาณ ๑ นาที เชื่อว่ามีการเกิดสภาพหุ้น (เจลาไทไนเซชัน) ในเมล็ดข้าวเปลือก โดยเฉพาะที่ผิวซึ่งเหมือนกับผลที่ได้จากการทดลองศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคการทำไอลของ อติเทพ ทวีรัตนพานิช และคณะ^๗.

ในการทดสอบสีของข้าวสารจากตัวอย่างข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอากาศแวดล้อมและเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไอลและสัน พบว่ามีความขาวเฉลี่ยประมาณ ๔๒.๕ และ ๔๑.๒ ตามลำดับ (ตามสเกลของเครื่องวัดความขาวยี่ห้อ Kett C-300) ซึ่งมีค่าต่างกันประมาณ ๑.๓ ดังรายละเอียดในรูปที่ ๖.

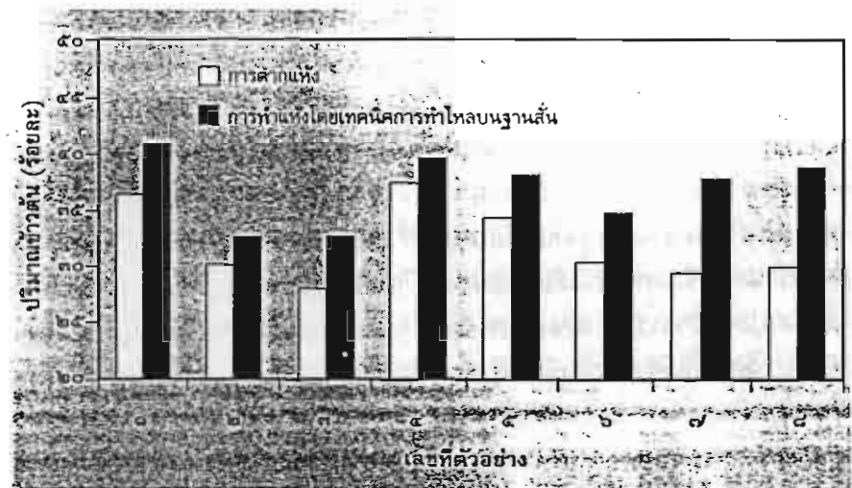
ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption)

ระบบใช้กำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ ๙,๖๔๖ วัตต์ แยกเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าของแต่ละอุปกรณ์ดังนี้

๑. blower ร้อยละ ๕๕.๐
๒. vibrator ร้อยละ ๑๐.๔
๓. rotary feeder ร้อยละ ๖.๔
๔. rotary discharger ร้อยละ ๗.๑
๕. elevator ร้อยละ ๑๓.๐

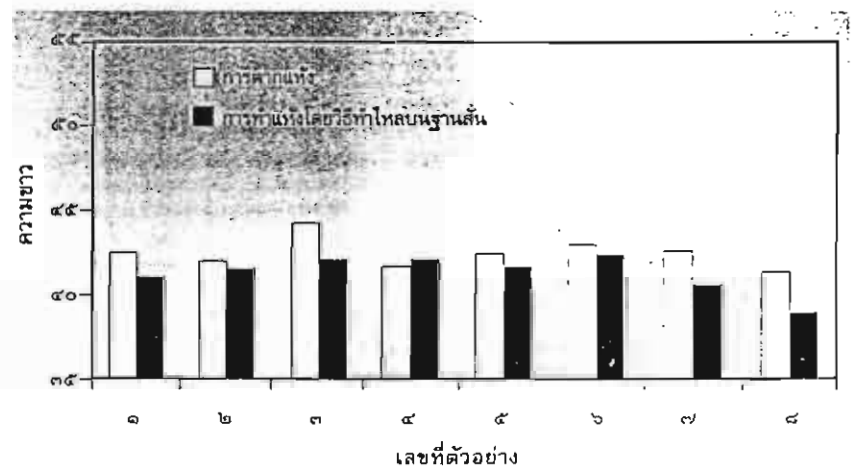
รูปที่ ๕

เปรียบเทียบข้าวตันที่ได้โดยการทำไอลบนฐานสันกับการตากแห้ง: (อุณหภูมิอากาศอบแห้ง = ๑๔๐°ซ. ความชื้นของการสัน = ๑, อัตราใส่ตัวอย่าง = ๑.๓๔ กก./วินาที, ปริมาณความชื้นขาเข้า = ๒๔% d.b., ความสูงของตัวอย่างบนฐาน = ๑๑.๕ ซม., ความเร็วของฐาน = ๑.๕ ม./วินาที, ปริมาณความชื้นขาออก = ๒๓% d.b.)



รูปที่ ๖

ความขาวของข้าวเปรียบเทียบระหว่างกาอบแห้งโดยการทำไอลบนฐานสันกับการตากแห้ง (อุณหภูมิอากาศอบแห้งเฉลี่ย = ๑๔๐°ซ. ความชื้นของการสัน = ๑, อัตราใส่ตัวอย่าง = ๑.๓๔ กก./วินาที, ปริมาณความชื้นขาเข้า = ๒๔% d.b., ความสูงของตัวอย่างบนฐาน = ๑๑.๕ ซม., ความเร็วของฐาน = ๑.๕ ม./วินาที, ปริมาณความชื้นขาออก = ๒๓% d.b.)





๖. burner ร้อยละ ๘.๑

จากการทดสอบเครื่องพบว่า สิ้นเปลืองพลังงานปรมาณูเฉลี่ย ๗๒๓.๑ เมกะจูลต่อชั่วโมง แบ่งเป็นกำลังไฟฟ้าในรูปพลังงานปรมาณูเฉลี่ย ๘๗.๖ เมกะจูลต่อชั่วโมง (ใช้ค่า conversion factor = ๒.๖) และความร้อนเฉลี่ย ๖๓๕.๕ เมกะจูลต่อชั่วโมง สามารถระเหยน้ำได้ ๑๑๗.๖ กิโลกรัมต่อชั่วโมง สิ้นเปลืองพลังงานปรมาณูเฉพาะรวมเฉลี่ย ๖.๑๕ เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหมที่ไม่มีกลิ่น แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในมอเตอร์พัดลมและมอเตอร์สั่น พบว่าใช้กำลังไฟฟ้าประมาณร้อยละ ๕๕ ของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในมอเตอร์พัดลมของการอบแห้งโดยใช้เทคนิคการทำไหมที่ไม่มีกลิ่น

ค่าใช้จ่าย

ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหมและสั่น

เท่ากับ ๔๕๐,๐๐๐ บาท (คิดรวมค่าแรงงานและติดตั้ง) กำหนดให้มูลค่าซากเครื่องเท่ากับร้อยละ ๑๐ ของค่าสร้างเครื่องอบแห้ง สำหรับค่าใช้จ่ายในส่วนอื่นๆ นั้น ได้อ้างอิงถึงผลที่ได้จากการทดสอบเครื่องดังนี้ กำลังผลิต ๔.๘๒ ตันต่อชั่วโมง ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ ๒๘ ของฐานแห้ง และร้อยละ ๒๓ ของฐานแห้ง ตามลำดับ สามารถระเหยน้ำได้เฉลี่ย ๑๘๙.๔ กิโลกรัมต่อชั่วโมง และกำหนดให้เครื่องทำงาน ๙๐ วันต่อปี การวิเคราะห์แยกเป็น ๒ กรณี คือ

๑. กรณีเครื่องทำงาน ๑๒ ชั่วโมงต่อวัน และ

๒. กรณีเครื่องทำงาน ๒๔ ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในแต่ละกรณีมีดังนี้

กรณีเครื่องทำงาน ๑๒ ชั่วโมงต่อวัน สามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้ ๕,๑๘๔ ตันต่อปี ค่าใช้จ่ายรวมในการอบแห้ง ๓๐๕,๐๑๕ บาทต่อปี แบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง

๑๐๐,๑๓๑ บาทต่อปี ค่าน้ำมันดีเซล ๑๗๐,๗๒๖ บาทต่อปี ค่ากำลังไฟฟ้า ๑๖,๐๗๐ บาทต่อปี ค่าบำรุงรักษาเครื่องอบแห้ง ๒๐,๐๐๐ บาทต่อปี และมูลค่าซากเครื่องอบแห้งเท่ากับ ๑,๙๑๓ บาทต่อปี ดังนั้น จะได้ค่าใช้จ่ายรวมในการอบแห้ง ๕๕ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑.๕๐ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) แบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง ๑๔ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๐.๕๐ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้ง ๔๐ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย)

กรณีเครื่องทำงาน ๒๔ ชั่วโมงต่อวัน ค่าใช้จ่ายรวมในการอบแห้ง ๕๕.๕๐ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑.๒๕ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) แบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง ๕.๕๐ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๐.๒๕ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้ง ๕๐ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑ บาทต่อ

ตารางที่ ๑ การทดสอบสมรรถภาพของการอบแห้งโดยวิธีทำไหมบนฐานสั่น (ความสูงของตัวอย่างบนฐาน = ๑๑.๕ ซม., ความเร็วของฐาน = ๑.๕ เมตร/วินาที, ความชื้นของการสั่น = ๑, สัดส่วนอากาศเวียนกลับ = ๐.๘๕, อัตราการใส่ตัวอย่าง = ๔๘๒๑ กก./ชม.)

T _{mix}	M _{in}	M _f	อัตราอนุหภูมิ ของข้าวเปลือก ขาเข้า	ข้าวคั้นที่ ได้จาก การตากแห้ง	ข้าวคั้นที่ ได้จากเทคนิค การทำไหม	ความขาว ของข้าว จากการตาก	ความขาว ของข้าว โดยวิธีเทคนิค การทำไหม	SPC (เมกะจูล ต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย)	SHC (เมกะจูล ต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย)
(°C.)	(% d.b.)	(% d.b.)	(°C.)	(%)	(%)				
๑๕.๕	๕๖.๘	๕๓.๗	๖๖	๓๓.๐	๓๒.๕	๔๒.๕	๔๒.๕	๐.๖๖	๕.๖๖
๑๖.๖	๕๔.๑	๕๐.๗	๖๓	๓๕.๒	๓๗.๕	๔๑.๕	๔๑.๐	๐.๖๖	๕.๖๕
๑๕.๐	๕๔.๐	๕๓.๐	๖๔	๓๒.๐	๓๗.๐	๔๒.๕	๔๑.๒	๐.๕๘	๓.๕๐





กิโลกัรณน้ำที่ระเหย)

ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปรียบเทียบค่าความชื้นสุดท้าย ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และความสิ้นเปลืองพลังงานปรุณภูมิจำเพาะ ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงไว้ในตารางที่ ๒ พบว่า ความถูกต้องของการทำนายอุณหภูมิอากาศก่อนและหลังการอบแห้ง มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ๓.๓ และร้อยละ ๓๗.๕ ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ผลการทำนายอุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้งคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากผลการทดลองมาก อาจเนื่องมาจากกำรอบแห้งจริงมีการรั่วของอากาศอบแห้งบริเวณรอยเชื่อมระหว่างระบบสั่นกับห้องอบแห้ง

แต่ในแบบจำลองไม่ได้คิดถึงการรั่วของอากาศอบแห้ง ทำให้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากผลการทดลอง สำหรับความคลาดเคลื่อนของการทำนายความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก มีค่าน้อยกว่าร้อยละ ๖.๖ ความคลาดเคลื่อนของความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าปรุณภูมิจำเพาะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ ๒๐.๘ และความคลาดเคลื่อนของความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ ๓๕.๓ ประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมและมอเตอร์สั่นเท่ากับร้อยละ ๘๘ และ ๘๕ ตามลำดับ และประสิทธิภาพหัวเผาน้ำมันดีเซลเท่ากับร้อยละ ๘๓

การหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุด

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีการหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด พบว่าในการให้ระบบ

สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งให้คลาดเคลื่อนจากค่าความชื้นสุดท้ายที่ต่ำที่สุดไม่เกินร้อยละ ๐.๕ ของฐานแห้ง และมีความสิ้นเปลืองพลังงานปรุณภูมิจำเพาะต่ำที่สุดด้วย สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกที่เหมาะสมที่สุดแสดงสรุปไว้ในตารางที่ ๓ และ ตารางที่ ๔ สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกที่ขนาดกำลังผลิต ๕ ตันต่อชั่วโมง ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ ๓๐ ของฐานแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้ง ๒.๓ เมตรต่อวินาที สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกที่เหมาะสมที่สุดโดยเทคนิคการทำโหลมีดังนี้ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ๑๔๘ องศาเซลเซียส สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๘๓ และความสูงชั้นข้าวเปลือก ๑๑.๘ เซนติเมตร มีความสิ้นเปลืองพลังงานปรุณภูมิจำเพาะเท่ากับ ๕.๗๔ เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย และความชื้นสุดท้าย

ตารางที่ ๒ การเปรียบเทียบผลการอบแห้งระหว่างผลจากการทดลองกับผลจากเทคนิคการทำโหล

T _{amb} (°C)	F _{amb} (h)	H _{amb} (m)	M _{amb} (% d.b.)	T _{mb} (°C)		Error (%)	M _{mb} (% d.b.)		Error (%)	T _{mb} (°C)		Error (%)	SHC (MJ/kg-water evaporated)		Error (%)	SPC (MJ/kg-water evaporated)		Error (%)
				Exp.	Sim.		Exp.	Sim.		Exp.	Sim.		Exp.	Sim.		Exp.	Sim.	
130	3.12	0.115	25.9	120	124	3.3	22.5	22.6	0.4	65.2	76.2	16.9	6.45	5.88	-8.8	0.90	0.90	0
140	4.72	0.147	26.7	130	133	3.0	23.3	23.9	2.5	65.8	77.5	17.8	4.83	5.46	13.0	0.73	0.82	12.3
150	6.42	0.119	25.9	140	143	1.7	23.3	23.4	0.2	59.4	75.5	27.1	4.93	5.13	4.1	0.70	0.57	-18.6
150	6.09	0.150	25.9	140	142	1.5	23.7	23.4	-1.1	56.1	77.1	37.5	6.70	5.49	-13.1	0.85	0.70	-17.6
150	5.10	0.150	26.1	139	142	2.2	23.4	23.3	-0.3	62.2	80.9	30.0	6.01	5.47	-9.0	0.79	0.73	-7.6
130	4.82	0.115	26.8	125	124	-0.5	23.7	24.1	1.7	56.0	71.7	27.9	5.47	5.16	-5.7	0.77	0.75	-1.3
140	4.82	0.115	24.1	132	133	0.4	20.7	21.5	3.9	57.3	77.6	35.4	4.69	5.72	22.0	0.66	0.75	15.2
150	4.82	0.115	28.0	140	143	1.9	23.0	24.5	6.6	63.7	77.6	21.7	3.80	5.14	35.3	0.48	0.58	20.8

Note: Exp. = experimental results, Sim. = simulation results





ตารางที่ ๓ สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกบนฐานไหล (สภาวะการทำงานที่เหมาะสม $T_a = 30^\circ\text{C}$, $T_{wb} = 25^\circ\text{C}$, $M_a = 30\%$ d.b., $V = 2.3$ m/s)

F	T_{fan}	T_{mix}	RC	H	M_a	Total electricity consumption	Average fuel consumption	SPEC
(tons/h)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	(%)	(m)	(% d.b.)	(kW)	(l/h)	(MJ/kg-water evaporated)
3	154	150	94	0.164	23.0	22.6	22.8	6.48
4	154	150	93	0.135	24.1	20.6	24.7	6.03
5	153	149	93	0.119	24.9	19.6	26.2	5.74

ตารางที่ ๔ สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยการทำให้ลมบนฐานสั้น (สภาวะการทำงานที่เหมาะสม $T_a = 30^\circ\text{C}$, $T_{wb} = 25^\circ\text{C}$, $M_a = 30\%$ d.b., $V = 1.5$ m/s)

F	T_{fan}	T_{mix}	RC	H	freq	T_a	M_a	Total electricity consumption	Average fuel consumption	SPEC
(tons/h)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	(%)	(m)	(Hz)	($^\circ\text{C}$)	(% d.b.)	(kW)	(l/h)	(MJ/kg-water evaporated)
3	152	145	89	0.110	5	25	24.6	5.4	19.2	5.98
4	150	144	86	0.103	5	25	25.5	5.6	20.1	5.61
5	150	143	83	0.099	5	25	26.0	5.9	21.1	5.36

ท้ายเท่ากับร้อยละ ๒๔.๔ ของฐานแห้ง และสำหรับการอบแห้งโดยเทคนิคการทำให้ลมบนฐานสั้นที่กำลังการผลิตและความชื้นเริ่มต้นเท่ากัน แต่ความเร็วอากาศอบแห้งเท่ากับ ๑.๕ เมตรต่อวินาที สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด มีดังนี้ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ๑๔๓ องศาเซลเซียส สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๘๓ ความสูงชั้นข้าวเปลือก ๔.๔ เซนติเมตร ความถี่การสั้น ๕ เฮิร์ตซ์ และความชื้นการสั้น ๒.๕ มีความสิ้นเปลืองพลังงานปรมาณูมีจำเพาะเท่ากับ ๕.๓๖ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และ

ความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ ๒๖.๐ ของฐานแห้ง

สรุป

๑. จากการทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำให้ลมบนฐานสั้น โดยมีสภาวะเงื่อนไขการอบแห้งดังนี้ กำลังผลิต ๔.๔๒ ตันต่อชั่วโมง ความสูงของตัวอย่างบนฐาน ๑๑.๕ เซนติเมตร อัตราการไหลอากาศอบแห้ง ๑.๗ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ความเร็ว อากาศอบแห้ง ๑.๔ เมตรต่อวินาที สัดส่วนอากาศเวียนกลับ

๐.๘๕ และความชื้นการสั้นประมาณ ๑ (ความถี่ ๗.๓ เฮิร์ตซ์ และแอมพลิจูดในแนวตั้ง ๕ มิลลิเมตร) ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ย ๑๔๐ องศาเซลเซียส สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

๑.๑ เครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำให้ลมบนฐานสั้น สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกโดยเฉลี่ยจากร้อยละ ๒๔ ของฐานแห้ง เหลือร้อยละ ๒๓ ของฐานแห้ง ความชื้นก่อนเข้าสม่ำเสมอตลอดช่วงการทดลอง อุณหภูมิข้าวเปลือกที่ออกจากห้องอบแห้งเฉลี่ย ๖๔ องศาเซลเซียส





๑.๒ ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบด้วยอากาศแวดล้อม มีข้าวตันเฉลี่ยร้อยละ ๓๒ และจากตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้น มีข้าวตันเฉลี่ยร้อยละ ๓๗ ซึ่งสูงกว่าประมาณร้อยละ ๕.

๑.๓ ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบด้วยอากาศแวดล้อมและที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นมีความขาวของข้าวสารประมาณ ๔๒ และ ๔๑ ตามลำดับ (ตามสเกลเครื่องวัดความขาวยี่ห้อ Kett C-300).

๑.๔ การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นมีความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะรวมเฉลี่ย ๖.๑๕ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย โดยกำลังไฟฟารวมที่ใช้ในการขับมอเตอร์พัดลมและมอเตอร์สั้น มีค่าประมาณร้อยละ ๕๕ ของกรณีการอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลที่ไม่มีการสั้น.

๒. ค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง กรณีที่ดำเนินการอบแห้งข้าวเปลือก ๑๒ ชั่วโมงต่อวัน ๘๐ วันต่อปี ค่าใช้จ่ายรวมในการอบแห้ง ๕๕ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑.๕๐ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) โดยแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง ๑๕ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๐.๕๐ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้ง ๔๐ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย).

๓. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นสามารถทำนายการอบแห้งข้าวเปลือกพอยอมรับได้.

๔. จากการจำลองแบบปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการอบแห้งที่แห้งที่สุด สำหรับขนาดกำลังผลิต ๕ ตันต่อชั่วโมง และความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกร้อยละ ๓๐ ของฐานแห้ง พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นมีความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลประมาณร้อยละ ๗ โดยมีค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกร้อยละ ๒๖ ของฐานแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะเท่ากับ ๕.๓๖ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย.

๕. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้น ที่ขนาดกำลังผลิตข้าวเปลือก ๕ ตันต่อชั่วโมง สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าและน้ำมันดีเซลเฉลี่ยเท่ากับ ๕.๘ กิโลวัตต์ และ ๒๑.๑ ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยกำลังไฟฟารวมทั้งหมดมีค่าประมาณร้อยละ ๓๐.๑ ของกำลังไฟฟารวมทั้งหมดสำหรับกรณีอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลที่ไม่มีการสั้น.

กิตติกรรมประกาศ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ Australian Centre for International Agricultural Research ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้. บริษัท ไรซ์เอ็นจิเนียริง ซัพพลาย จำกัด ได้

อำนวยความสะดวกและช่วยสร้างเครื่องอบแห้ง.

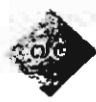
เอกสารอ้างอิง

๑. สมชาติ โสภณฤกษ์, สมเกียรติ ปรัชญาวรรณ, อรอนงค์ ศรีพาทกุล. Development of cross-flow fluidized bed paddy dryer. *Drying Technology* 1996; 14: 2397-410.
๒. สมชาติ โสภณฤกษ์, สมบูรณ์ เวชกามา, ธนิตย์ สวัสดิ์เสวี, ณัฐพล ภูมิสาธิต. Managing moist paddy by drying, tempering and ambient air ventilation. *Drying Technology*, 1999; 17(1&2): 335-44.
๓. Rysin AP. Theory and technology of food product drying in fluidized vibration bed. *Drying of Solids*, New York, International Science Publisher and Oxford & IBH publishing Co. Ltd., 1992: 86-99.
๔. Ringer D, Mujumdar AS. Flow and immersed surface heat transfer in a vibro-fluidized bed. *Proceedings of Third International Symposium on Drying at McGill University*, 1982; 1: 67-73.
๕. Han W, Mai B, Gu T. Residence time distribution and drying characteristics of a continuous vibro-fluidized bed. *Drying Technology* 1991; 9(1): 159-81.
๖. สมชาติ โสภณฤกษ์, สมเกียรติ ปรัชญาวรรณ. Optimum strategy for fluidized bed paddy drying. *Drying Technology* 1994; 12: 1667-86.
๗. อติเทพ ทวีรัตนพานิช, สมชาติ โสภณฤกษ์, สมบูรณ์ เวชกามา, งามชื่น คงเสรี, สุนันทา วะชิระชน. Effect of drying on head rice yield using fluidization technique. *Drying Technology* 1999; 17(1&2): 343-54.
๘. สมชาติ โสภณฤกษ์, วัชรวิญญู รอดประพัฒน์, สมบูรณ์ เวชกามา. Mobile fluidized bed paddy dryer. *Drying Technology*, 1995; 16: 1301-13.



สัญลักษณ์

A	คือ แอมพลิจูดการสั่น, มิลลิเมตร
A_b	คือ พื้นพื้นฐาน, ตารางเมตร
c_a	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส
c_v	คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส
E_{fm}	คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลม, กิโลวัตต์
E_t	คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในรูปพลังงานปรมาณู, กิโลวัตต์
E_{vm}	คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์สั่น, กิโลวัตต์
F	คือ อัตราการป้อนข้าวเปลือก, ตันต่อชั่วโมง
F_f	คือ แรงต้านทานการหมุนของระบบสั่น, นิวตัน
freq	คือ ความถี่การสั่น, เฮิรตซ์
g	คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง, ตารางเมตรต่อวินาที
H	คือ ความสูงชั้นข้าวเปลือก, เมตร
h_i	คือ มวลแห้งของข้าวเปลือกที่ชั้นที่ i , กิโลกรัม
h_{fc}	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ, กิโลจูลต่อกิโลกรัม
M_i	คือ ความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อไหลเข้าชั้นที่ i , ร้อยละ
M_{i+1}	คือ ความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อไหลเข้าชั้นที่ $i+1$, ร้อยละ
MER	คือ อัตราการระเหยน้ำของข้าวเปลือก, กิโลกรัมต่อชั่วโมง
m_i	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแวดล้อม, กิโลกรัมต่อวินาที
M_{in}	คือ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก, ร้อยละ
M_f	คือ ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก, ร้อยละ
m_{mix}	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอบแห้ง, กิโลกรัมต่อวินาที
$m_{mix,i}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอบแห้งเมื่อไหลเข้าชั้นที่ i , กิโลกรัมต่อวินาที
P_b	คือ ความดันสถิตคร่อมฐานข้าวเปลือก, กิโลพาสคัล
P_{bv}	คือ ความดันสถิตคร่อมฐานข้าวเปลือกสั่น, กิโลพาสคัล
P_L	คือ ความดันสถิตของระบบไม่รวมความดันสถิตคร่อมฐานข้าวเปลือกสั่น, กิโลพาสคัล
P_t	คือ ความดันสถิตของระบบ, กิโลพาสคัล
Q_1	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนของห้องอบแห้งให้กับสิ่งแวดล้อม, กิโลวัตต์
Q_2	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนต่ออากาศเวียนกลับให้กับสิ่งแวดล้อม, กิโลวัตต์
Q_3	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนของหัวเผาน้ำมันดีเซลให้กับสิ่งแวดล้อม, กิโลวัตต์
Q_4	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนของพัดลมให้กับสิ่งแวดล้อม, กิโลวัตต์
Q_5	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนของท่ออากาศหลังจากออกจากพัดลมให้กับสิ่งแวดล้อม, กิโลวัตต์
Q_n	คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน, กิโลวัตต์
r	คือ รัศมีของเพลาลูกเบี้ยวของมอเตอร์สั่น, เมตร





RC	คือ	สัดส่วนอากาศเวียนกลับ, เศษส่วน
SHC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะ, เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย
SPC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าปฏิกิริยาจำเพาะ, เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย
SPEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ, เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย
T_a	คือ	อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศแวดล้อม, องศาเซลเซียส
T_b	คือ	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าพัดลม, องศาเซลเซียส
T_{fan}	คือ	อุณหภูมิอากาศหลังออกจากพัดลม, องศาเซลเซียส
T_{in}	คือ	อุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้ง, องศาเซลเซียส
$T_{in,i}$	คือ	อุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้งที่ชั้นที่ i, องศาเซลเซียส
$T_{in,i+1}$	คือ	อุณหภูมิอากาศเวียนกลับ, องศาเซลเซียส
T_{max}	คือ	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง, องศาเซลเซียส
T_{wb}	คือ	อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศแวดล้อม, องศาเซลเซียส
T_w	คือ	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าหัวเผาไหม้ดีเซล, องศาเซลเซียส
$t_{p,i}$	คือ	ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่จากชั้นที่ i ไปยังชั้นที่ i+1, วินาที
$\Delta U_{p,i}$	คือ	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของเมล็ดข้าวเปลือกต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้งที่ชั้นที่ i, กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง
W	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศใหม่, กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง
W_{max}	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง, กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง
W_{in}	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศหลังอบแห้ง, กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง
$W_{in,i}$	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศหลังอบแห้งที่ชั้นที่ i, กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง
ρ_a	คือ	ความหนาแน่นของอากาศแวดล้อม, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของข้าวเปลือก, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
η	คือ	ประสิทธิภาพของพัดลม, ไร้หน่วย
η_{fm}	คือ	ประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลม, ไร้หน่วย
η_{vm}	คือ	ประสิทธิภาพของมอเตอร์สัน, ไร้หน่วย
μ	คือ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของข้าวเปลือก, กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที
Γ	คือ	ความเข้มข้นการสัน, ไร้หน่วย

**Abstract** Design, Testing and Optimization of Vibro-fluidized Bed Paddy DryingSomchart Soponronnarit*, Somboon Wetchacama¹, Suwat Trutassanawin², Wuttikon Jariyatontivain³^{*}Fellow, the Academy of Science, the Royal Institute, Thailand, ¹School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, ²Former master students.

The objectives of this research were to design, construct and test a prototype of a vibro-fluidized bed paddy dryer with a capacity of 2.5-5.0 tons/h, and to develop a mathematical model that determines optimum operating parameters. Experimental conditions were: air flow rate, 1.7 m³/sec; bed velocity, 1.4 m/sec and average drying air temperature, 125-140°C. Residence time of paddy was approximately one minute; fraction of air recycled, 0.85 and bed height, 11.5 cm. With a feed rate of 4,821 kg/h, the moisture content of paddy was reduced from 28 to 23 per cent dry bed (d.b.). Vibration intensity was 1 (frequency 7.3 Hz and amplitude 5 mm). Electrical power consumption and average diesel oil consumption were 9,646 W and 17.6 L/h, respectively. Specific primary energy consumption (SPEC) was 6.15 MJ/kg of water evaporated. Electrical power of the blower motor and vibrator motor was 55 per cent as compared with the electrical power of the blower motor used in fluidized bed drying without vibration. For operation 12 hours/day and 90 days/year, the cost of paddy drying was 1.50 baht/kg of water evaporated, of which 0.50 baht was fixed cost and 1.00 baht was operating cost (US\$ 1 = 40 baht). Comparison between the experimental and simulated results showed that the mathematical model could predict with fairly accuracy. For fluidized bed paddy drying with a capacity of 5 tons/h, initial moisture of paddy of 30 per cent d.b. and drying air velocity was 2.3 m/sec, the optimum operating parameters were: drying air temperature, 149°C; fraction of air recycled, 0.93 and bed height, 11.9 cm. SPEC and final moisture content were 5.74 MJ/kg of water evaporated and 24.9 per cent d.b., respectively. For vibro-fluidized bed paddy drying with the same capacity and initial moisture content and drying air velocity of 1.5 m/sec, the optimum operating parameters were: drying air temperature, 143°C; fraction of air recycled, 0.83; bed height, 9.9 cm; frequency, 5 Hz and vibration intensity, 2.5. SPEC and final moisture content were 5.36 MJ/kg of water evaporated and 26.0 per cent d.b., respectively. Paddy drying with vibro-fluidization technique consumed 7 per cent less primary energy compared with fluidized bed drying without vibration. Total electrical power and average diesel oil consumption of vibro-fluidized bed drying were 5.9 kW and 21.1 L/h, respectively. Total electrical power consumption was 30.1 per cent as compared with total electrical power consumption used in fluidized bed drying without vibration.

Key words : vibro-fluidized bed, paddy drying, fluidization



การประเมินสถานภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทย

Evaluation of Status of Paddy Dryers in Thailand

ขุนพล สังข์อารียกุล¹⁾ สมบูรณ์ เวชกามา²⁾ อติศักดิ์ พงษ์พูลผลศักดิ์³⁾ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์²⁾
Khunphol Sungareekul¹⁾ Somboon Wetchacama²⁾ Adisak Pongpullponsak³⁾ Somchart Soponronnarit²⁾

ABSTRACT

The objectives of this study were to evaluate the status of paddy dryers in Thailand. The survey was confined to the rice mills with capacity over 100 tons/day. By stratified random sampling classified by each region, 50 rice mills in 36 provinces were surveyed by using questionnaire and direct interview. From 19 rice mills in the northeastern, it was found that 52.7% of surveyed rice mills use dryers. However, dryer is not popular in the northeastern region. Only 36.8%, most of which have high capacity, need dryers. From 22 rice mills in the central region, almost all of rice mills (81.9% of surveyed rice mills in the central region) commonly use dryers and 59.1% of them intend to purchase more dryers to extend their drying capacity or to purchase new dryers to avoid uncertainty of weather. From 9 rice mills in the northern region, 55.5% of surveyed rice mills use dryers and 44.5% intend to purchase more or new dryers. Most of them locate in the lower part of northern region.

The analytical results of the survey showed that LSU dryers are mostly used (65.4%) and recirculating batch dryer are the next (20.6%). The maximum total drying capacity is due to LSU dryers, approximately 79.3% and the fluidized bed dryers have total drying capacity of around 6.8%. Almost all of rice mills use rice husk as fuel source. The most satisfactory dryer is fluidized bed dryer and the next is LSU, cross flow and recirculating batch dryers, respectively.

Keywords: dryer, paddy quality, rice mill

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ประเมินสถานภาพการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่างๆ ของโรงสีในประเทศไทย โดยใช้การสำรวจและสังเกตแบบสอบถามกับผู้ประกอบการโรงสีข้าวที่มีกำลังการผลิตมากกว่า 100 tons/day ใช้วิธีแยกเก็บตัวอย่างโรงสีออกเป็นภาค และแบ่งสัดส่วนการเก็บตัวอย่างโรงสีตามจำนวนโรงสีในภาคนั้น ๆ รวมทั้งสิ้น 50 โรง ใน 36 จังหวัด พบว่า ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเก็บตัวอย่างโรงสี 19 โรง มีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง 52.7% และมีความต้องการใช้เครื่องอบแห้งในอนาคต 36.8% ซึ่งส่วนมากเป็นโรงสีขนาดใหญ่ ในภาคกลางเก็บตัวอย่างโรงสี 22 โรง มีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง 81.9% มีโรงสีต้องการเครื่องอบแห้งในอนาคต 59.1% เนื่องจากต้องการลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศและเพิ่มกำลังการผลิต ในภาคเหนือเก็บตัวอย่างโรงสี

9 โรง มีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง 55.5% และมีความต้องการเครื่องอบแห้งในอนาคต 44.5% ส่วนใหญ่อยู่ในภาคเหนือตอนล่าง เนื่องจากมีความต้องการลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศเช่นเดียวกับโรงสีในภาคกลาง

จากการวิเคราะห์ผลการสำรวจการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยรวมพบว่า เครื่องอบแห้งแบบ LSU มีจำนวนมากที่สุด (65.4%) รองลงมาคือ แบบ Recirculating Batch (20.6%) และเครื่องอบแห้งแบบ LSU มีกำลังการผลิตรวมมากที่สุด (79.3%) รองลงมาคือ แบบฟลูอิดไรซ์เบด (6.8%) เชื้อเพลิงที่ใช้มากที่สุดคือแกลบ ส่วนเครื่องอบแห้งที่ผู้ประกอบการโรงสีพอใจในสมรรถนะโดยรวมจากมากไปน้อยคือ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด, LSU, Cross Flow และ Recirculating Batch ตามลำดับ

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้ง, คุณภาพข้าวเปลือก, โรงสีข้าว

¹⁾ คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ถนนรังสิต-นครนายก คลองหก ัญญบุรี ปทุมธานี 12110
Faculty of Engineering, Rajamangala Institute of Technology, Rangsit-Nakornnayok Rd., Klong 6, Thanyaburi, Patumthani 12110

²⁾ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถนนสุขสวัสดิ์ 48 กรุงเทพฯ 10140
School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Suksawat 48 Rd., Bangkok 10140

³⁾ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถนนสุขสวัสดิ์ 48 กรุงเทพฯ 10140
Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Suksawat 48 Rd., Bangkok 10140

คำนำ

ปัจจุบันปัญหาข้าวเปลือกความชื้นสูงมีมากขึ้น เนื่องจากการนำเครื่องเกี่ยวหวดมาใช้เก็บเกี่ยวข้าวแทนการใช้แรงงาน ซึ่งเครื่องเกี่ยวหวดจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวข้าวในขณะที่ข้าวเปลือกมีความชื้นค่อนข้างสูงเพื่อหลีกเลี่ยงการร่วงหล่นในแปลงนา ประกอบกับการเก็บเกี่ยวข้าวนาปรังที่อยู่ในช่วงฤดูฝนทำให้ข้าวต้องประสบปัญหาความชื้นสูงไม่สามารถเก็บรักษาได้ โรงสีข้าวจะแก้ปัญหาโดยการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการตากลานหรือใช้เครื่องอบแห้ง แต่การตากลานจะไม่สามารถใช้ได้เมื่อเวลาฝนตกทำให้การใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกจะมีความจำเป็นมากขึ้น ดังนั้นจึงมีโรงสีบางส่วนได้นำเครื่องอบแห้งมาใช้เพื่อแก้ปัญหา แต่ปัญหาการสูญเสียผลผลิตข้าวมวลรวมต่อปียังมีอยู่ เนื่องจากการไม่เข้าใจในหลักการลดความชื้นของข้าวเปลือกอย่างถูกต้องและขาดความรู้ความชำนาญในการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก ดังนั้นจึงควรศึกษาลักษณะของระบบอบแห้งข้าวเปลือกที่

เป็นอยู่ในปัจจุบัน เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการแก้ปัญหาดังกล่าวของโรงสีข้าวในอนาคต

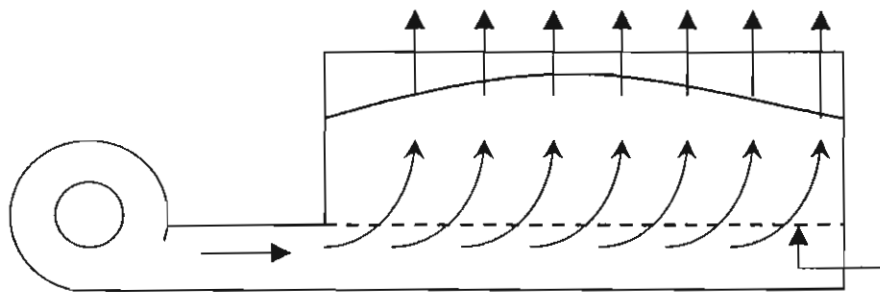
เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่มีใช้อยู่ในประเทศไทยสามารถแบ่งได้เป็นหลายแบบดังนี้

1. เครื่องอบแห้งแบบกระบะ

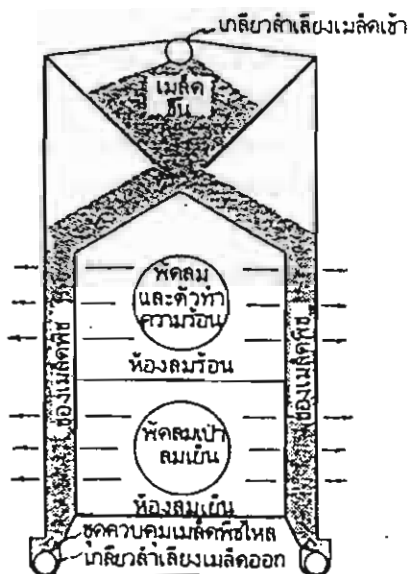
เครื่องอบแห้งแบบนี้มีลักษณะอบแห้งแบบเป็นวงดังแสดงในรูปที่ 1 อากาศที่ชื้นอบแห้งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 49-61 °C ใช้อัตราการไหลเฉพาะของอากาศ 6-11 m³/t-hr of grain ชั้นความหนาของชั้นข้าวเปลือกประมาณ 1 m ข้อดีคือ การจัดการง่าย แต่มีข้อเสียคือ เกิดการกระจายความร้อนไม่ทั่วถึงนั่นคือ ข้าวที่อยู่ด้านล่างจะร้อน และแห้งมากกว่าส่วนที่อยู่ด้านบน ทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นไม่สม่ำเสมอ เพราะตลอดเวลาการอบข้าวเปลือกจะไม่มีพลิกตัวเลย

2. เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง (Cross flow dryer)

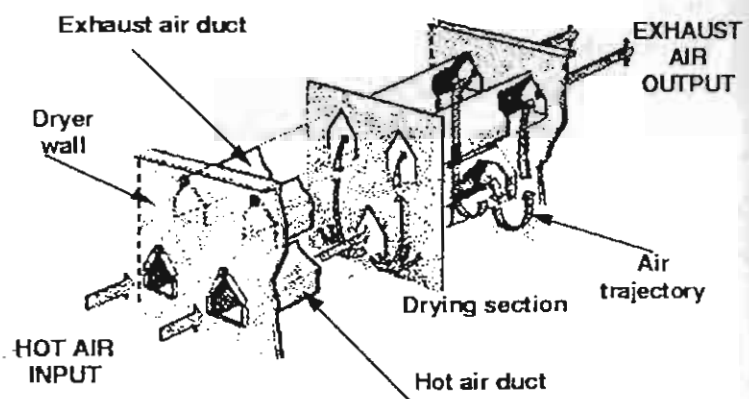
ในเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง อากาศที่ชื้นอบแห้งจะ



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างเครื่องอบแห้งแบบกระบะ



รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง

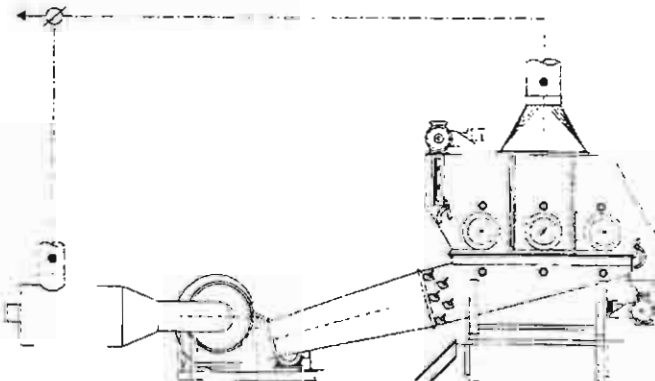


รูปที่ 3 ลักษณะโครงสร้างเครื่องอบแห้งแบบ LSU

ไหลตัดผ่านทิศทางการไหลของข้าวเปลือกดังแสดงในรูปที่ 2 ข้าวเปลือกจะไหลจากด้านบนลงด้านล่างผ่านช่องแคบซึ่งกว้างประมาณ 0.30-0.45 m และไหลออกทางด้านล่างของเครื่องอบแห้งด้วยตัวควบคุมการไหล ช่องแคบแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ส่วนบนเป็นส่วนอบแห้งและส่วนล่างเป็นส่วนที่ทำให้ข้าวเปลือกเย็นลง อัตราการไหลเฉพาะของอากาศอยู่ในช่วง $38-76 \text{ m}^3/\text{min-m}^2$ of grain อัตราการไหลของข้าวเปลือกขึ้นอยู่กับตัวควบคุมการไหล ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ส่วนล่างของเครื่องอบแห้ง ปัญหาของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ก็เช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งแบบเป็นวง คือการเกิดเกร็ดขึ้นที่ความชื้นในชั้นข้าวเปลือก แต่ข้าวเปลือกชื้นและแห้งจะผสมกันเป็นบางส่วนตรงทางออกของเครื่องอบแห้ง ทำให้ลดปัญหานี้ลงได้เป็นบ้าง

3. เครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกไหลคลุกเคล้า(LSU)

ลักษณะโครงสร้างของเครื่องอบแห้งเป็นถึงอรูปทรงสี่เหลี่ยมมีท่อลมเข้าและออกรูปสามเหลี่ยมขวางการไหลของเมล็ด ทำให้ข้าวเปลือกไหลเป็นแบบซิกแซกดังในรูปที่ 3 โดยแต่ละแถวของท่อลมถูกวางในแนวนอน ท่อลมเข้าเปิดออกทางด้านหน้าและปิดทางด้านหลัง ส่วนท่อลมออกเป็นไปในลักษณะปิดด้านหน้าและเปิดให้ลมออกทางด้านหลัง การวางตำแหน่งท่อลมในแต่ละแถวก็จะวางตำแหน่งสลับกันไป ซึ่งทำให้ข้าวเปลือกมีการคลุกเคล้ากันขณะอบแห้งทำให้ข้าวเปลือกแห้งได้สม่ำเสมอขึ้น เนื่องจากข้าวมีการพลิกอยู่ตลอดเวลา เครื่องอบแห้งแบบ LSU ยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบชนิดท่อลมขนานกันกับชนิดท่อลมเข้าและลมออกไขว้ตั้งฉากกัน สำหรับชนิดท่อลมเข้าและออกไขว้ตั้งฉากกันนี้การลงทุนจะแพงกว่าแต่ข้าวพลิกตัวได้ทั้ง 3 มิติทำให้อบได้สม่ำเสมอทั่วถึงกว่าและยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้ตัวถังด้วย



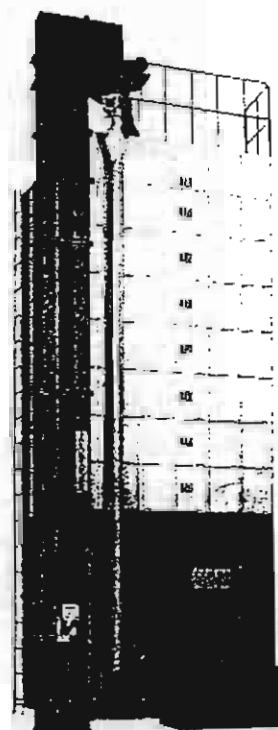
รูปที่ 4 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไชเบต

4. เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไชเบต (Fluidized Bed Dryer)

ในเครื่องอบแห้งแบบนี้ข้าวเปลือกถูกเป่าด้วยอากาศร้อนความเร็วสูงจนทำให้ข้าวเปลือกลอยอยู่ในอากาศ มีลักษณะเหมือนของไหล สามารถอบแห้งได้รวดเร็วมาก (1-2 นาที) อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบตไม่ควรสูงกว่า 150°C เพราะจะทำให้ข้าวสารเริ่มเหลืองและแตกหัก ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกไม่ควรต่ำกว่า 19% w.b.

5. เครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเวียน (Recirculating Batch Dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญ 5 ส่วน คือ ส่วนอบแห้งซึ่งมีลักษณะเป็นช่อง ถังพัก อุปกรณ์ลำเลียง เตากำเนิดความร้อน และพัดลม ดังรูปที่ 5 การทำงานเริ่มจากการลำเลียงข้าวเปลือกความชื้นสูงด้วยกะพ้อลำเลียง ไปยังด้านบนของเครื่องผ่านจานกระจายข้าว พอข้าวเต็มถังแล้วจึงเปิดเครื่องและตั้งอุณหภูมิของอากาศร้อนหรือตั้งค่าความชื้นที่ต้องการ จากนั้นข้าวเปลือกเริ่มเคลื่อนเข้าส่วนอบแห้ง (ช่องข้าว) พัดลมจะดูดอากาศจากภายนอกผ่านเตากำเนิดความร้อนไหลผ่านเข้าไปในช่องข้าว เพื่ออบแห้งข้าวเปลือกขึ้น ข้าวเปลือกจะเคลื่อนที่ออกด้วยอุปกรณ์ลำเลียงแบบเพลารอตารี



รูปที่ 5 เครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเวียน

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านสถานภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในโรงสีอยู่บ้าง เช่น จริญ ลิขิตรัตนพร และ อรรถพล นุ่มหอม, 2537 สำรวจและศึกษสถานภาพการใช้เครื่องอบแห้งในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2535 ใน 17 จังหวัดจำนวน 736 โรงสี และตลาดกลางในแหล่งผลิต 9 แห่งพบว่า มีการใช้เครื่องอบแห้งประมาณ 15% จำนวน 117 เครื่อง กำลังการผลิตรวม 7045 tons/day ซึ่งเครื่องอบแห้งที่มีใช้ในประเทศไทยมีทั้งที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ผลิตในประเทศ และผู้ประกอบการโรงสีข้าวและตลาดกลางจัดสร้างขึ้นเอง โดยมีขนาดของเครื่องอบแห้ง กำลังการผลิต ชนิดเชื้อเพลิง และหลักการอบแห้งที่แตกต่างกันไป ส่วนปัจจัยที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อเครื่องอบแห้งได้แก่ ความต้องการในการผลิตข้าวของโรงสี ขนาด กำลังการผลิตและ ชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องอบแห้ง อุปกรณ์ที่ส่งต่อผลการตัดสินใจใช้เครื่องอบแห้งได้แก่ ขนาดของเครื่องอบแห้ง ราคาเครื่องอบแห้ง อุปกรณ์เสริม ค่าดำเนินงานที่สูง เชื่อถือว่าเครื่องอบแห้งเป็นสาเหตุที่ทำให้คุณภาพของข้าวค่อยลงไป และไม่มีแหล่งวิชาการที่น่าเชื่อถือสำหรับผู้ประกอบการ สมยศ เขียวอักษร และคณะ [2] ศึกษาปัญหาในการผลิตและการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก สำหรับโรงสีข้าวในเขตภาคกลาง การวิจัยใช้วิธีการสัมภาษณ์กลุ่มของผู้ผลิตและกลุ่มผู้ประกอบการโรงสี จากการสำรวจผู้ผลิตเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก ทั้งกลุ่มผู้นำเข้า ผู้ผลิตรายใหญ่ และผู้ผลิตรายย่อย รวมทั้งการสำรวจโรงสีข้าว 11 จังหวัด ในเขตภาคกลางพบว่า สถานะการผลิตเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกมีแนวโน้มการพัฒนาและการแข่งขันค่อนข้างดี สถานะการใช้งานในกลุ่มโรงสีข้าวโดยภาพรวมมีแนวโน้มในทางที่ดีเช่นเดียวกัน แม้จะมีความแตกต่างอยู่บ้างในด้านคุณภาพการใช้งานของเครื่องอบแห้ง

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าการประเมินสถานภาพการใช้เครื่องอบแห้งข้าว

เปลือกที่ผ่านมาทั้งหมดได้สำรวจข้อมูลเฉพาะโรงสีในเขตภาคกลางเท่านั้น ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินสถานภาพการใช้เครื่องอบแห้งภายในประเทศไทยได้แต่ยังไม่สมบูรณ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการประเมินสถานภาพการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในแต่ละภาคของประเทศไทย

อุปกรณ์และวิธีการ

1. กำหนดวัตถุประสงค์ของการสำรวจ ได้แก่ สถานภาพการใช้เครื่องอบแห้งในโรงสีโดยทั่วไป ปัญหาใน

การใช้เครื่องอบแห้ง ความต้องการเครื่องอบแห้งในอนาคต

2. กำหนดประชากร (โรงสี) ที่อยู่ในข่ายการสำรวจ โดยในงานวิจัยนี้จะมีขอบเขตคือ สำรวจเฉพาะโรงสีที่มีกำลังการผลิตมากกว่า 100 ตันต่อวันเท่านั้น ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 298 โรงสี (ข้อมูลจาก ศูนย์สารสนเทศ กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม)

3. วางแผนการสุ่มตัวอย่างโรงสีเพื่อนำมาเป็นตัวแทนโรงสีทั้งหมด โดยในงานวิจัยนี้ ในขั้นแรกใช้แผนการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิ เพื่อแบ่งการสำรวจออกเป็นแต่ละภาคของประเทศ และหลังจากนั้นใช้แผนการสุ่มตัวอย่างแบบระบบสำหรับเลือกตัวอย่างโรงสีที่อยู่ในแต่ละภาค เพื่อให้ได้ตัวอย่างกระจายทั่วทุกภาคของประเทศ

4. แบ่งจำนวนตัวอย่างโรงสีในแต่ละภาค ซึ่งแบ่งตามสัดส่วนจำนวนโรงสีที่ตั้งอยู่ในแต่ละภาค โดยในภาคเหนือมีโรงสี 51 โรง สุ่มตัวอย่าง 9 โรง ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีโรงสี 113 โรง สุ่มตัวอย่าง 19 โรง และในภาคกลางมีโรงสี 134 โรง สุ่มตัวอย่าง 22 โรง รวมตัวอย่างทั้งหมด 50 โรงสี

5. สุ่มโรงสีที่จะเป็นตัวอย่างในแต่ละภาค โดยสุ่มตัวอย่างแบบระบบ ซึ่งมีวิธีการคือ นำรายชื่อโรงสีในแต่ละภาคมาเรียงตามลำดับตัวอักษรจากนั้นกำหนดหมายเลขให้แต่ละโรงสีตามที่จัดเรียงลำดับไว้ จากนั้นเลือกโรงสีที่มีหมายเลข ซึ่งสามารถหารด้วย 6 ได้ลงตัวมาเป็นตัวอย่าง

6. สร้างแบบสอบถาม (Questionnaire) โดยตั้งคำถามตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการสำรวจ และนำแบบสอบถามที่สร้างเสร็จแล้วเสนอให้ คณะกรรมการที่ปรึกษาของงานวิจัยและผู้เชี่ยวชาญ (ผู้ประกอบการโรงสีข้าว) ตรวจสอบ เพื่อให้แบบสอบถามมีความเที่ยงตรง และมีภาษาที่เหมาะสม

7. เก็บรวบรวมข้อมูล โดยส่งแบบสอบถามพร้อมหนังสือขอความร่วมมือไปทางไปรษณีย์ และรอรับแบบสอบถามกลับ ถ้าไม่ได้รับแบบสอบถามคืนจะโทรศัพท์ไปเพื่อสอบถามผู้ตอบถึงการตอบแบบสอบถาม และหากยังไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ ผู้วิจัยจะเดินทางไปเก็บข้อมูลด้วยตนเอง

8. วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล มีวิธีการคือ นำข้อมูลมาบันทึกลงในคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลข้อมูล โดยแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 7 ตอนดังนี้

1. ประเภทและกำลังการผลิตของโรงสีข้าวในประเทศไทย

2. ประเมินสถานภาพการใช้วิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกในโรงสีข้าว

3. การประมาณปริมาณเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ

และปริมาณข้าวเปลือกที่ผ่านเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ

4. การประเมินสถานภาพการใช้เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ในเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด

5. การวิเคราะห์ความพอใจในเครื่องอบแห้งแต่ละประเภท

6. ปัญหาที่พบในการอบแห้งข้าวเปลือก

7. ความต้องการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในอนาคต

โดยประเด็นในข้อ 1 ถึง 4 และ 6 ถึง 7 จะนำมาวิเคราะห์แจกแจงความถี่และ และหาค่าร้อยละ ของแต่ละข้อ แล้วนำเสนอในรูปตาราง และแปลผลด้วยการบรรยาย และข้อที่ 5 จะนำมาวิเคราะห์โดยหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และแปลผลด้วยการบรรยาย

ผลการสำรวจ และวิจารณ์

1. ประเภทและกำลังการผลิตของโรงสีข้าวในประเทศไทย

ประเภทและกำลังการผลิตของโรงสีข้าวในประเทศไทย สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 และ 2 และเมื่อนำตารางที่ 1 และ 2 มาพิจารณา พบว่า ในภาคเหนือโรงสีส่วนมากเป็นโรงสีที่ผลิตข้าวขาวเกือบทั้งหมด ส่วนภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นโรงสีที่ผลิตโรงสีขาวทั้งหมด และในภาคกลางจะมีโรงสีส่วนหนึ่งผลิตข้าวหนึ่งและส่วนมากเป็นโรงสีขนาดใหญ่

2. ประเมินสถานภาพการวิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกในโรงสีข้าว

ในภาคเหนือ โรงสีมีวิธีการลดความชื้นแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 3 และ 4 เมื่อพิจารณาจากการสอบถามพบว่า โรงสีข้าวในภาคเหนือตอนล่างมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องอบแห้ง เนื่องจากชาวนาปลูกข้าวนาปรังมากทำให้มีปริมาณข้าวเปลือกชื้นมาก ทำให้โรงสีต้องใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกช่วยในการลดความชื้น และปริมาณข้าวเปลือกชื้นที่มากนี้จะส่งผลให้เกิดความคั่งค้างในการลงทุนซื้อเครื่องอบแห้ง ส่วนในภาคเหนือตอนบนชาวนาปลูกข้าวนาปรังน้อยมากทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องอบแห้ง

ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โรงสีที่รับซื้อเฉพาะข้าวเปลือกที่แห้งแล้ว (ไม่ได้ลดความชื้น) มีจำนวน 4 โรง และโรงสีที่รับซื้อข้าวเปลือกชื้นมีจำนวนทั้งหมด 15 โรง โดยใช้วิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกต่างกันดังตารางที่ 3 จากการวิเคราะห์พบว่า ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องอบแห้งไม่มากนัก เนื่องจากในภาคนี้มีสภาพอากาศเอื้ออำนวยต่อตากลาน ชาวนาปลูกข้าวนาปรังน้อย ใช้มือเกี่ยวข้าวและตากข้าวก่อนขายข้าวให้แก่โรงสี ส่งผลให้ข้าวที่เข้าโรงสีส่วนมากมีความชื้นต่ำ ดังนั้นจึงมีโรงสีส่วนหนึ่งใช้วิธีการตากลานลดความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งสังเกตได้จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ปริมาณข้าวที่ไม่ได้ถูกลดความชื้นตากลาน ใช้เครื่องอบแห้งจะมีปริมาณสูง ส่วนโรงสีที่ใช้เครื่องอบแห้งจะเป็นโรงสีขนาดใหญ่ (มากกว่า 200 tons/day) เพื่อ

ตารางที่ 1 ประเภทของโรงสีข้าวในแต่ละภาคของประเทศไทย

ประเภทโรงสี	ภาคเหนือ		ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		ภาคกลาง	
	จำนวนโรง	%	จำนวนโรง	%	จำนวนโรง	%
ข้าวขาว	8	88.9	19	100	13	59.1
ข้าวหนึ่ง	1	11.1	-	-	4	18.2
ข้าวขาวและข้าวหนึ่ง	-	-	-	-	5	22.7
รวม	9	100	19	100	22	100

ตารางที่ 2 กำลังการผลิตรวมของโรงสีข้าวในแต่ละภาคของประเทศไทย

ผลิตภัณฑ์	ภาคเหนือ		ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		ภาคกลาง	
	tons/day	%	tons/day	%	tons/day	%
ข้าวขาว	1105	78.6	5480	100	6540	61.2
ข้าวหนึ่ง	300	21.4	-	-	4000	38.8
รวม	1405	100	5480	100	10540	100

ตารางที่ 3 สรุปการเลือกใช้วิธีลดความชื้นข้าวเปลือกของโรงสีข้าวในแต่ละภาคของประเทศไทย

วิธีการลดความชื้น	ภาคเหนือ		ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		ภาคกลาง	
	จำนวนโรงสี	%	จำนวนโรงสี	%	จำนวนโรงสี	%
ตากลาน	3	33.4	5	26.3	3	13.6
ใช้เครื่องอบแห้ง	2	22.2	5	26.3	10	45.5
ตากลาน หรือใช้เครื่องอบแห้ง	1	11.1	1	5.4	2	9.1
ตากลานและใช้เครื่องอบแห้งร่วมกัน	-	-	4	21.0	5	22.8
ตากลานและ/หรือใช้เครื่องอบแห้งร่วมกัน	2	22.2	-	-	1	4.5
ไม่ได้ลดความชื้นข้าวเปลือก	1	11.1	4	21.0	1	4.5
รวม	9	100	19	100	22	100

ตารางที่ 4 สรุปการเลือกใช้วิธีลดความชื้นข้าวเปลือกของโรงสีข้าวตามกำลังการผลิตในแต่ละภาคของประเทศไทย

วิธีการลดความชื้น	ภาคเหนือ		ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		ภาคกลาง	
	tons/year	%	tons/year	%	tons/year	%
ตากลาน	810	0.3	270	0.1	5,880	0.2
ตากลาน หรือใช้เครื่องอบแห้ง	32,960	10.5	58,800	23.7	248,800	10.5
ตากลานและใช้เครื่องอบแห้งร่วมกัน	7,200	2.3	11,600	4.7	4,320	0.2
ใช้เครื่องอบแห้ง	207,600	66.0	123,300	49.8	2,006,160	84.3
ไม่ได้ลดความชื้นข้าวเปลือก	66,030	21.0	53,830	21.7	114,120	4.8
รวม	314,600	100	247,800	100	2,379,280	100

ตารางที่ 5 ปริมาณการใช้เครื่องอบแห้งแต่ละชนิด ในโรงสีแต่ละภาคของประเทศไทย

พื้นที่สำรวจ	แบบไหลขวาง		แบบ LSU		Recirculating Batch		แบบฟลูอิดไชน์เบด		แบบ Rotary	
	เครื่อง	%*	เครื่อง	%*	เครื่อง	%*	เครื่อง	%*	เครื่อง	%*
ภาคเหนือ	1	0.7	10	6.7	6	4	2	1.3	-	-
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	-	-	13	8.7	3	2	-	-	-	-
ภาคกลาง	9	6	75	50	22	14.6	7	4.7	2	1.3
รวม	10	6.7	98	65.4	31	20.6	9	6	2	1.3

หมายเหตุ : * หมายถึงเปอร์เซ็นต์การใช้เครื่องอบแห้งแต่ละชนิดเทียบกับจำนวนเครื่องอบแห้งทั้งหมดจากกลุ่มตัวอย่างโรงสีที่สำรวจ โดยมีจำนวนเครื่องอบแห้งทั้งหมด 150 เครื่อง

ตารางที่ 6 ปริมาณการใช้เครื่องอบแห้งแต่ละชนิดตามกำลังการผลิตในโรงสีแต่ละภาคของประเทศไทย

พื้นที่สำรวจ	แบบไหลขวาง		แบบ LSU		Recirculating Batch		แบบฟลูอิดไชน์เบด		แบบ Rotary	
	tons/year	%*	tons/year	%*	Tons/year	%*	tons/year	%*	tons/year	%*
ภาคเหนือ	24,000	0.9	80,160	3.0	103,600	3.8	40,000	1.5	-	-
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	-	-	128,660	4.8	-	-	-	-	-	-
ภาคกลาง	121,600	4.5	1,931,360	71.5	79,360	2.9	144,000	5.3	48,000	1.8
รวม	145,600	5.4	2,140,180	79.3	182,960	6.7	184,000	6.8	48,000	1.8

หมายเหตุ : * หมายถึงเปอร์เซ็นต์การอบแห้งข้าวเปลือกของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิดเทียบกับปริมาณการอบแห้งทั้งหมดจากกลุ่มตัวอย่างโรงสีที่สำรวจ (2,700,740 tons/year)

ความเร็วในการลดความชื้นและรักษาคุณภาพข้าวให้ได้มาตรฐาน

ในภาคกลาง โรงสีข้าวส่วนมากจะมีเครื่องอบแห้ง เนื่องจากมีปริมาณข้าวนาปรังสูงมากและชาวนาใช้เครื่องเกี่ยววัดเก็บเกี่ยวข้าว ทำให้โรงสีข้าวในภาคกลางส่วนมากจำเป็นต้องใช้เครื่องอบแห้งเพื่อให้สามารถดำเนินธุรกิจได้

3.การประมาณปริมาณเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ และปริมาณข้าวเปลือกที่ผ่านเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ

ปริมาณการใช้เครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ มีดังตารางที่ 5 เมื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่เครื่องอบแห้งแบบ LSU มีใช้กันมากในโรงสีข้าว เนื่องจากเป็นเครื่องอบแห้งที่มีเทคโนโลยีมาจากต่างประเทศและได้ถูกนำมาใช้อบแห้งข้าวโพดในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์มานานแล้ว ซึ่งเจ้าของกิจการโรงสีได้นำมาดัดแปลงเพื่อประยุกต์ใช้กับข้าวเปลือกจนประสบผลสำเร็จในระดับหนึ่งทำให้เครื่องอบแห้งชนิดนี้เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมโรงสีและได้มีการนำเข้าหรือผลิตขายจากหลายๆ บริษัทในเวลาต่อมา สำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด เป็นเครื่องอบแห้งที่ได้เริ่มมีการพัฒนาและสร้างออกจำหน่ายภายในประเทศเมื่อปี พ.ศ. 2540 ซึ่งเป็นสาเหตุ

ให้มีโรงสีที่ใช้เครื่องอบแห้งชนิดนี้ไม่มากเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาปริมาณข้าวเปลือกที่ผ่านเครื่องอบแห้งตามตารางที่ 6 พบว่า เครื่องอบแห้งที่ถูกใช้อบแห้งข้าวเปลือกมากที่สุดคือ เครื่องอบแห้งแบบ LSU รองลงมาคือเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด

4. การประเมินสถานภาพการใช้เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ในเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด

การใช้เชื้อเพลิงในระบบอบแห้งข้าวเปลือก จากตารางที่ 7 เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่า โรงสีส่วนใหญ่ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง เนื่องจาก สามารถจัดซื้อจัดหาได้ง่าย มีราคาถูก และให้พลังงานความร้อนได้สูงตามต้องการ ส่วนเครื่องอบแห้งที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงจะเป็นโรงสีขนาดใหญ่มาก ซึ่งใช้เตาเผาให้ความร้อนกับไอน้ำแล้วนำไอน้ำไปผ่านกังหันเพื่อผลิตไฟฟ้า และนำไอน้ำที่เหลือทิ้งจากการผลิตไฟฟ้ามาใช้ออบแห้งข้าว ซึ่งวิธีนี้มีการลงทุนที่สูงมาก แต่เป็นวิธีที่ใช้เชื้อเพลิงได้คุ้มค่าและประหยัดมากที่สุด ส่วนวิธีการที่สิ้นเปลืองและมีราคาแพงมากที่สุดคือการใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง ซึ่งจะพบมากในเครื่องอบแห้งแบบ Recirculating Batch

ตารางที่ 7 สรุปการใช้เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแต่ละชนิด

ชนิดเชื้อเพลิง	แบบไหลขวาง		แบบ LSU		Recirculating Batch		แบบฟลูอิดซ์เบด		แบบ Rotary	
	เครื่อง	%	เครื่อง	%	เครื่อง	%	เครื่อง	%	เครื่อง	%
ถ่าน	9	90.0	52	53.2	7	22.6	9	100	2	100
น้ำมันดีเซล	-	-	6	6.1	24	77.4	-	-	-	-
น้ำมันเตา	1	10.0	-	-	-	-	-	-	-	-
ชีวมวล	-	-	40	40.8	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 8 สรุปข้อมูลความพึงพอใจในการทำงานเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ

ความพึงพอใจ	แบบไหลขวาง		แบบ LSU		Recirculating Batch		แบบฟลูอิดซ์เบด		แบบ Rotary	
	เครื่อง	%	เครื่อง	%	เครื่อง	%	เครื่อง	%	เครื่อง	%
ควรปรับปรุง	2	20	4	4.1	5	16.1	-	-	-	-
พอใช้	1	10	49	50.0	19	61.4	3	33.3	-	-
ดี	6	60	43	43.9	5	16.1	4	44.4	2	100
ดีมาก	1	10	2	2.0	2	6.4	2	22.3	-	-

หมายเหตุ	ควรปรับปรุงเครื่องอบแห้งที่ใช้ถ่าน มีคะแนน	1
	เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้ไม่พอใจ มีคะแนน	2
	เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้พอใช้ มีคะแนน	3
	เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้ดี มีคะแนน	4
	เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้ดีมาก มีคะแนน	5

5. การวิเคราะห์ความพอใจในการทำงานเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด

ความพอใจในการทำงานของเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ สามารถแสดงดังตารางที่ 8 เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่า ผู้ใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลขวางมีความพอใจในการทำงานของเครื่องเฉลี่ย 3.4 คะแนน หรืออยู่ในเกณฑ์พอใช้ถึงดี โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.6 และผู้ใช้เครื่องอบแห้งแบบ Recirculating Batch มีความพอใจในการทำงานเฉลี่ย 3 คะแนน หรืออยู่ในเกณฑ์พอใช้ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.54 ส่วนเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด ผู้ใช้มีความพอใจในการทำงานของเครื่องอบแห้งชนิดนี้มีค่าเฉลี่ย 3.9 คะแนน หรืออยู่ในเกณฑ์ดี โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.54 สำหรับผู้ใช้เครื่องอบแห้งแบบ LSU มีความพอใจในการทำงานของเครื่อง มีค่าเฉลี่ย 3.4 คะแนนหรืออยู่ในเกณฑ์พอใช้ถึงดี โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.5 สาเหตุที่ผู้ใช้มีความพอใจในเครื่องอบแห้งแบบ Recirculating Batch ก่อนข้างต่ำคือเครื่องอบแห้งแบบนี้ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง และสาเหตุที่ผู้ใช้มีความพอใจในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดสูงคือ เครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว

6. ปัญหาที่พบในการอบแห้งข้าวเปลือก

กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกในโรงสีแต่ละโรงมีปัญหาแตกต่างกันมาก แต่ส่วนใหญ่คือ การอบแห้งข้าว

เปลือกที่ความชื้นสูงต้องใช้เวลานาน และข้าวเปลือกได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอ ส่วนปัญหาหลักคือ ค่าใช้จ่ายในการใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง เนื่องจากน้ำมันมีราคาสูงมาก ตารางที่ 9 แสดงปัญหาที่พบในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกของแต่ละโรงสี

7. ความต้องการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในอนาคต

ความต้องการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในอนาคตแสดงดัง ตารางที่ 10 ถึง 12 ซึ่งสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกได้เป็น 3 ภาคตามพื้นที่ต่าง ๆ ดังนี้

ภาคเหนือ โรงสีที่ต้องการเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่เป็นโรงสีในเขตภาคเหนือตอนล่าง เนื่องจากพื้นที่ในบริเวณนี้มีการปลูกข้าวนาปรังจำนวนมาก ทำให้มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องอบแห้งเพื่อลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศและฝนกับปัจจุบันชาวนาได้นำรถเกี่ยวมาใช้ในการเกี่ยวเกี่ยวเพิ่มขึ้น ส่วนโรงสีที่ไม่ต้องการเครื่องอบแห้งจะอยู่ในภาคเหนือตอนบน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการปลูกข้าวนาปรังน้อยทำให้โรงสีไม่มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องอบแห้งมากนัก

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โรงสีที่มีความต้องการใช้เครื่องอบแห้งเป็นโรงสีที่ต้องการขยายกิจการเพื่อรับซื้อข้าวเปลือกขึ้นในต้นฤดู หรือต้องการเพิ่มกำลังการผลิต ส่วนโรงสีที่ไม่ต้องการใช้เครื่องอบแห้งให้ความเห็นว่า ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการปลูกข้าวนาปรังน้อยมาก และชาวนา

ตารางที่ 9 สรุปผลการสำรวจปัญหาหลักที่พบในการอบแห้งข้าวเปลือกในโรงสี

ปัญหาหลักที่พบ	จำนวนโรงสีที่พบปัญหา	%
สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก	1	2.1
ข้าวที่รับซื้อ มีสิ่งเจือปนมาก	1	2.1
ข้าวที่เข้าโรงสีมีความชื้นแตกต่างกันมาก	2	4.4
เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับอบแห้งมีราคาสูง (น้ำมันดีเซล)	5	10.6
พนักงานไม่มีความรับผิดชอบ	1	2.1
ข้าวได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอ	2	4.3
ข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงใช้เวลาอบแห้งนาน	4	8.5
ข้าวเปลือกหลังการอบแห้งจะหักมาก	1	2.1
ข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีสีเหลืองมากขึ้น	1	2.1
ข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีความชื้นต่างกันมาก	1	2.1
ระบบอบแห้งมีฝุ่นละอองมาก	1	2.1
ข้าวเปลือกที่ความชื้นสูงจะเกาะกันเป็นก้อน	1	2.1
เคาเผาแกลบเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	3	6.4
ไม่ตอบคำถามในส่วนนี้	23	49.0

ตารางที่ 10 สรุปผลการสำรวจความต้องการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในอนาคต

	ภาคเหนือ		ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		ภาคกลาง	
	จำนวนโรงสี	%	จำนวนโรงสี	%	จำนวนโรงสี	%
ต้องการ	4	44.5	7	36.8	13	59.1
ไม่ต้องการ	2	22.2	10	52.6	7	31.8
ไม่ตอบคำถาม	3	33.3	2	10.6	2	9.1

ตารางที่ 11 สรุปผลการสำรวจเหตุผลที่ผู้ประกอบการโรงสีต้องการใช้เครื่องอบแห้ง

เหตุผล	ภาคเหนือ		ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		ภาคกลาง	
	จำนวนโรงสี	%	จำนวนโรงสี	%	จำนวนโรงสี	%
เพื่อลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศ	3	60	1	12.5	4	28.6
มีพื้นที่ตากข้าวน้อย	1	20	-	-	-	-
ชาวนาได้นำรถเกี่ยวมาใช้มากขึ้น	1	20	-	-	-	-
ต้องการรับซื้อข้าวตันฤดู	-	-	3	37.5	-	-
ช่วยเพิ่มปริมาณต้นข้าว	-	-	1	12.5	-	-
ต้องการเพิ่มกำลังการผลิต	-	-	3	37.5	4	28.5
ต้องการประหยัดเวลา	-	-	-	-	2	14.3
ต้องการรักษาระดับคุณภาพข้าว	-	-	-	-	2	14.3
ข้าวเปลือกมีความชื้นสูง	-	-	-	-	2	14.3

ตารางที่ 12 สรุปผลการสำรวจเหตุผลที่ผู้ประกอบการโรงสีไม่ต้องการใช้เครื่องอบแห้ง

เหตุผล	ภาคเหนือ		ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		ภาคกลาง	
	จำนวนโรงสี	%	จำนวนโรงสี	%	จำนวนโรงสี	%
มีการปลูกข้าวนาปรังมีน้อย	2	50	5	31.3	1	14.3
เครื่องอบแห้งมีราคาสูงไม่คุ้มการลงทุน	2	50	5	31.3	2	28.5
ชาวนาบางส่วนตากข้าวเอง	-	-	1	6.3	-	-
ชาวนาใช้มือเกี่ยวข้าวขณะที่ข้าวแก่แล้ว	-	-	-	-	1	14.3
มีเครื่องอบแห้งเพียงพอ	-	-	1	6.2	1	14.3
มีลานตากเพียงพอ	-	-	1	6.2	1	14.3
มีเครื่องอบแห้งและลานตากเพียงพอ	-	-	2	12.5	-	-
ไม่ให้เกิดผล	-	-	1	6.2	1	14.3

ส่วนใหญ่ใช้มือเกี่ยวข้าวและได้ตากข้าวเอง ทำให้การใช้เครื่องอบแห้งในพื้นที่ไม่มีความจำเป็นมากนัก ส่งผลให้เจ้าของกิจการโรงสีข้าวไม่ต้องการลงทุนใช้เครื่องอบแห้งและมีราคาสูง

ในภาคกลาง ชาวนาในเขตภาคกลางมีการปลูกข้าวนาปรังสูงมากและชาวนาใช้รถเกี่ยวมาเกี่ยวข้าว

ดังนั้นโรงสีจะมีข้าวเปลือกขึ้นเข้าเกือบตลอดทั้งปี ทำให้เจ้าของกิจการส่วนใหญ่ต้องการใช้เครื่องอบแห้งด้วยสาเหตุหลายประการเช่น เพื่อเพิ่มกำลังการผลิต รักษาคุณภาพข้าวให้ได้มาตรฐาน และเพื่อลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศ เป็นต้น ส่วนโรงสีที่ไม่ความต้องการเครื่องอบแห้ง เนื่องจากมีเครื่องอบแห้งหรือมีลานตากเพียงพอแล้ว

สรุป

โรงสีข้าวในภาคเหนือส่วนมากเป็นโรงสีที่ผลิตข้าวขาว มีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง 55% (5 โรง) และมีโรงสีต้องการเครื่องอบแห้งในอนาคต 44% (4 โรง) โดยโรงสีที่มีเครื่องอบแห้งจะอยู่ในภาคเหนือตอนล่าง เนื่องจากผู้ประกอบการโรงสีต้องการลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศ ขวานาปลูกข้าวนาปรังมากและเริ่มนำรถเกี่ยวมาใช้นาปรังมากขึ้น ในภาคเหนือตอนบนมีการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกน้อยมากและโรงสีส่วนใหญ่ไม่ต้องการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในอนาคต เนื่องจาก ขวานาปลูกข้าวนาปรังน้อย ทำให้ผู้ประกอบการโรงสีไม่ต้องการใช้เครื่องอบแห้ง ส่วนลักษณะการใช้เครื่องอบแห้งพบว่า มีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง โรงสีที่ใช้ตากลานและ/หรือเครื่องอบแห้งร่วมกัน มีปริมาณเท่ากันคือ 22.2% (2 โรง) และโรงสีที่ใช้เครื่องอบแห้งหรือตากลานมี 11% (1 โรง)

โรงสีข้าวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นโรงสีที่ผลิตข้าวขาว มีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง 52.6% (10 โรง) และมีที่ความต้องการเครื่องอบแห้งในอนาคต 36.8% (7 โรง) เนื่องจาก ขวานาปลูกข้าวนาปรังน้อยมาก และขวานาปีจะมีความชื้นสูงในช่วงต้นฤดูเป็นระยะเวลา 1-2 เดือนเท่านั้น ส่วนลักษณะการใช้เครื่องอบแห้งพบว่า โรงสีที่ใช้การตากลานและเครื่องอบแห้งร่วมกันมี 21% (4 โรง) เนื่องจากสภาพอากาศเอื้ออำนวยต่อการตากลานและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง และมีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง 26.3% (5 โรง) เนื่องจากต้องการรับซื้อข้าวต้นฤดูและรักษาระดับคุณภาพข้าว

โรงสีข้าวในภาคกลางเป็นโรงสีที่ผลิตข้าวขาวมากกว่าโรงสีที่ผลิตข้าวหนึ่งเล็กน้อย มีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง 81.8% (18 โรง) และมีโรงสีต้องการใช้เครื่องอบแห้งในอนาคต 59.1% (13 โรง) เนื่องจาก

ขวานาปลูกข้าวนาปรังมากและใช้รถเกี่ยวนาปรังเกี่ยวข้าวทำให้ข้าวที่เข้าโรงสีมีความชื้นสูง ส่วนลักษณะการใช้

ใช้เครื่องอบแห้งพบว่า โรงสีส่วนมากใช้เครื่องอบแห้งอย่างเดียว 45.5% (10 โรง) เนื่องจาก ต้องการลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศ ประหยัดเวลา และต้องการรักษาระดับคุณภาพข้าว

ปริมาณเครื่องอบแห้งที่ใช้มากที่สุดคือ เครื่องอบแห้งแบบ LSU (65.4%) รองลงมาคือแบบ Recirculating Batch (20.6%) แต่กำลังการผลิตรวมของ เครื่องอบแห้งแบบ LSU มีจำนวนที่สุด (79.3%) รองลงมาคือ แบบแบบฟลูอิดไชเบต (6.8%) เชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องอบแห้งมากที่สุดคือแก๊ส สำหรับเครื่องอบแห้งที่ผู้ประกอบการโรงสีพอใจในสมรรถนะมากที่สุด คือ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชเบต, LSU, Recirculating Batch, และ Cross Flow ตามลำดับ

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ขอขอบคุณผู้ประกอบการโรงสีข้าวที่สละเวลาให้ข้อมูลหรือให้เข้าไปสำรวจ และหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ประกอบการโรงสีข้าว ผู้ที่เกี่ยวข้องหรือผู้ต้องการใช้ประโยชน์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

อรรถพล นุ่มหอม และ จริญญา ลิขิตรัตน์พร. 2537. สถานภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทย. เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมเกษตร ประจำปี 2537, 18 พฤษภาคม 2537. 21 หน้า.

สมยศ เชิญอักษร, ผ่องพรรณ ดริยมงคล, นิตยา เงินประเสริฐศรี และ สันติ ศรีสวนแดง. 2539. การศึกษาปัญหาในการผลิตและการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกสำหรับโรงสีข้าวในเขตภาคกลาง. เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมเกษตร ประจำปี 2539, 12 พฤศจิกายน 2539. 14 หน้า.



วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
THAI SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING JOURNAL ISSN 1685-408X
ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2545 (Volume 9 No. 1 January - June 2002)

สารบัญ

- ผลกระทบเนื่องจากรูปร่างของร่องปลูกและความสูงในการปล่อยกระเทียมที่เหมาะสม
ต่อความแม่นยำในการปลูกกระเทียม. 3
จิราภรณ์ เบญจประภากรรัตน์, สัตยลักษณ์ กิ่งทอง
Effects of Furrow Shapes and High of Seed Tubes on Precisions of Garlic Bulb Planting
Jiraporn Benjaphragairat, Sanluck Kingthong
- การออกแบบและพัฒนาเครื่องนวดพริกไทย. 9
สาทิป รัตนภาสกร, พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์
Design and Development of Pepper Thresher
Sathip Ratanapasakorn, Pimpen pornchalemwong
- การประเมินความสูญเสียจากการเก็บเกี่ยวข้าว. 14
วินิต ชินสุวรรณ, สมชาย ชวนอุดม, วราจิต พยอม
Rice Harvest Losses Assessment
Winit Chinsuwan, Somchai Choun-udom, Warachit Phayom
- การชะลอการเสื่อมคุณภาพข้าวเปลือกความชื้นสูงโดยการระบายอากาศออกจากกองข้าว. 20
วินิต ชินสุวรรณ, ลือพงษ์ ลือนาม
Delay of Deterioration of Wet Paddy by Ventilation
Winit Chinsuwan, Luepong Luenam
- ✓ ● การประเมินสถานภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทย. 32
ขุนพล สังข์อารียกุล, สมบูรณ์ เวชกามา, อติศักดิ์ พงษ์พูลผลศักดิ์, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์
Evaluation of Status of Paddy Dryers in Thailand
Khunphol Sungareekul, Somboon Wetchacama, Adisak Pongpullponsak, Somchart Soponronnarit
- การอบแห้งผลไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ที่ใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง. 42
สุเมธ รุจินินนาท, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมเกียรติ ปรัชญาวารการ
Fruit Drying Using LPG-Cabinet Dryer
Sumate Rujininnat, Somchart Soponronnarit, Somkiat Prachayawarakorn
- การศึกษาการใช้บรรจุภัณฑ์ขายปลีกผลไม้ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. 50
บัณฑิต จวิโมภาส, ศุภกิตต์ สายสุนทร, เจษฎา วสุวัต
Study on Use of Retail Fruit Package in Bangkok and Metropolitan Area
Bundit Jarimopas, Supakit Saisonorn, Jesada Wasuwat
- ระบบการวัดหาพื้นที่ใบไม้แบบอัตโนมัติ. 57
บัณฑิต จวิโมภาส, อุดมศักดิ์ กิจทวี, วันปิติ รังสี, สยาม ดุ่มแสงทอง
Automatic Leaf Area Measurement System
Bundit Jarimopas, Udomsak Kijlawee, Wanpiti Rangsri, Siam Tommsaengtong

การอบแห้งผลไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ที่ใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง

Fruit Drying Using LPG-Cabinet Dryer

สุเมธ รุจินินนาท¹⁾ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹⁾ สมเกียรติ ประชยวารการ²⁾

Sumate Rujininnat¹⁾ Somchart Soponronnarit¹⁾ Somkiat Prachayawarakorn²⁾

ABSTRACT

The design, construction and performance evaluation for a small-scale cabinet dryer using LPG (Liquid petroleum gas) as a direct heat source for heating air have been studied. The dryer had a 0.95x1.43x0.95 m³ drying chamber and could contain 2 trolleys, with total capacity of 100-200 kg of fruit product. The characteristics of the cabinet dryer have been evaluated quantitatively by considering the colour of product, the energy consumption, and the flow distribution inside the dryer. The airflow distribution was indicated by measuring indirectly the moisture content and the temperature. The preliminary tests with the cotton cloth show lower variation of moisture content for the case of installing a guide vane than that of no guide vane. In testing with banana at the conditions of 60 °C, 0.95 m³/s and 81.6 % air recycle, the specific energy was consumed around 51.6 MJ/kg water evaporated for removing moisture content from 34.2% to 52.6% dry basis. For rambutan drying under the same operating condition, the amount of energy required 9.12 MJ/kg water evaporated for reducing moisture content from 63.6% to 45% dry basis. The colour of the products was preferentially accepted. Overall drying cost of the products were 4.38-5.27 Baht/kg water evaporated, of which 1.67-2.48 baht was the cost of dryer, 2.43-2.47 baht was the energy cost, and 0.24-0.35 baht was the maintenance cost.

Keywords: Cabinet dryer, Fruit, Dehydration, Energy consumption

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบ สร้าง และประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งผลไม้ชนิดตู้โดยใช้ก๊าซแอลพีจี (ก๊าซหุงต้ม) เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนแก่อากาศอบแห้ง เครื่องอบแห้งมีขนาด 0.95x1.43x0.95 ลูกบาศก์เมตร ห้องอบแห้งสามารถบรรจุรถเข็นได้ 2 คัน และสามารถอบแห้งผลไม้ได้ครั้งละ 100-200 กิโลกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ ในการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งได้พิจารณาถึงความสิ้นเปลืองพลังงาน คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งและ ลักษณะการกระจายของลมภายในห้องอบแห้ง ความสม่ำเสมอของลมที่ไหลผ่านห้องอบแห้งบ่งบอกโดยการวัดอุณหภูมิและการกระจายความชื้นของผลิตภัณฑ์ภายในห้องอบแห้ง เทคนิคนี้เป็นวิธีการวัดโดยทางอ้อมจากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่า การติดตั้งใบปรับทิศทางลมสามารถลดความแตกต่างของความชื้นผ้าฝ้ายในแต่ละรถเข็นอย่างเห็นได้ชัด ในการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าและเงาะ ที่ 60 °ซ. อัตราการไหลของอากาศ 0.95 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และสัดส่วนอากาศหมุนเวียนกลับ 81.6 เปอร์เซ็นต์ พบว่าในการอบแห้งกล้วยจากความชื้น 34.2 เปอร์เซ็นต์

มาตรฐานแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 52.6 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานแห้ง ให้ความสิ้นเปลืองพลังงานปรมาณูมีค่าเท่ากับ 51.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย สำหรับในการอบแห้งเงาะให้ความสิ้นเปลืองพลังงานปรมาณูมีค่าเท่ากับ 9.12 เมกะจูลต่อกิโลกรัมที่น้ำระเหย โดยลดความชื้นจาก 63.6 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งเหลือความชื้น 45 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง คุณภาพในด้านสีของผลไม้หลังการอบแห้งอยู่ในเกณฑ์ดี จากการประเมินค่าใช้จ่ายในการอบแห้งผลไม้ พบว่าค่าใช้จ่ายทั้งหมดมีค่าระหว่าง 4.38-5.27 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย โดยแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งมีค่าระหว่าง 1.67-2.48 บาท ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าและก๊าซแอลพีจีมีค่าระหว่าง 2.43-2.47 บาท และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องมีค่าระหว่าง 0.24-0.35 บาท

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งแบบตู้ ผลไม้ การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน

บทนำ

วิธีการอบแห้งผลไม้ในปัจจุบันสามารถทำได้หลายวิธี

¹⁾ คณะพลังงานและวัสดุ ²⁾ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถนนประชาธิปไตย บางมด กรุงเทพฯ 10140

เช่น การใช้ลมร้อน การแช่แข็ง การออสโมซิส และไมโครเวฟ เป็นต้น วิธีที่นิยมใช้ทั่วไปคือการให้ความร้อนกับอากาศเมื่ออากาศร้อนสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นทำให้เกิดการระเหยของน้ำขึ้น และปริมาณน้ำที่ระเหยถูกพาออกไปกับอากาศที่ไข้อบแห้ง แหล่งความร้อนที่ใช้ได้แก่ เชื้อเพลิง หรือไฟฟ้า การให้ความร้อนแก่อากาศโดยใช้ไฟฟ้าไม่เป็นที่นิยมในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน เนื่องจากค่าใช้จ่ายด้านพลังงานค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในเครื่องอบแห้งแบบตู้และอุโมงค์ เนื่องจากหาได้ง่าย ให้ความร้อนสูงและโอเสียหลังการเผาไหม้มีเขมาน้อยมาก จึงเหมาะสมในการนำมาให้ความร้อนแบบตรง (direct heating) แก่อากาศอบแห้ง ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าในกรณีให้ความร้อนโดยอ้อม (indirect heating)

ไมตรี แนวพนิช และคณะ (2536) ได้สร้างเครื่องอบแห้งผักและผลไม้แบบใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง มีพื้นที่อบแห้ง 20 ตารางเมตร กำเนิดลมร้อนด้วยหัวพ่นก๊าซ อัตราการเผาไหม้ก๊าซประมาณ 0.75 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความคุมอุณหภูมิโดยใช้โซลินอยด์วาล์วและเทอร์โมสแตท ในงานวิจัยดังกล่าวได้ทดลองอบแห้งดอกดาวเรือง โดยใช้น้ำหนักเริ่มต้น 50 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้น 80 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และอุณหภูมิ 65 °ซ. อบแห้งให้ความชื้นสุดท้าย 12 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 12 ชั่วโมง

ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ และคณะ (2537) ได้ออกแบบและทดสอบอบแห้งแบบอุโมงค์สำหรับฆ่าแมลงในมะขามหวาน ลักษณะการไหลของอากาศในห้องอบแห้งเป็นแบบไหลตามแนวยาวของอุโมงค์ เครื่องอบแห้งสามารถบรรจุได้ 4 คัน พื้นที่อบแห้ง 28 ตารางเมตร สามารถอบมะขามหวานได้ครั้งละประมาณ 300 กิโลกรัม พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งประมาณ 70-80 °ซ. เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถฆ่าแมลงและลดการเกิดเชื้อราได้ อัตราการใช้ก๊าซแอลพีจีเท่ากับ 1.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการอบแห้งเฉลี่ย กิโลกรัมละ 0.72 - 0.88 บาท และให้ผลตอบแทนในอัตราร้อยละ 39 เมื่อคิดค่าใช้จ่ายในการอบแห้งกิโลกรัมละ 1 บาท

ปัญหาที่พบมากสำหรับเครื่องอบแห้งแบบตู้คือการกระจายของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควร ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสุดท้ายแตกต่างกันมาก จากสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้สูญเสียน้ำหนักในเชิงพาณิชย์ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้อยลง ยกตัวอย่างเช่น

เกิดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่แห้งสนิท สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะคล้ำสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นหลังการอบแห้งต่ำเนื่องจากอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีค่าค่อนข้างสูง ปัญหาดังกล่าวนี้มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการอบแห้งผลไม้แช่แข็ง เพราะการเปลี่ยนสีดังกล่าวเกิดเนื่องจาก ปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง พิระพันธ์ สนองชาติ (2539) ได้ศึกษาถึงข้อปัญหาดังกล่าวโดยได้พัฒนาเครื่องอบแห้งชนิดภาคหมุนและใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง จากการทดลองพบว่า การอบแห้งแบบภาคหมุนช่วยให้ความชื้นของมะเขือเทศแช่แข็งหลังการอบแห้งมีความสม่ำเสมอดีกว่าการอบแห้งแบบภาคอยู่กับที่ และเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ดังกล่าว คือที่อุณหภูมิอบแห้ง 65 °ซ. และอัตราการไหลของอากาศ 0.5752 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที Kiranoudis และ Markatos (1998) ได้จำลองศึกษาการไหลของอากาศในเครื่องอบแห้งแบบตู้ชนิดภาคอยู่กับที่โดยใช้ Computational Fluid Dynamics ความเร็วของอากาศในห้องอบแห้งอยู่ระหว่าง 4-20 เมตร/วินาที พบว่าในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งใบปรับทิศทางลมมีส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายของลมที่เข้าเครื่องอบแห้ง ลักษณะความปั่นป่วนของอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้งมีค่าสูงสำหรับในกรณีที่ไม่มีติดตั้งใบปรับลม

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบผลของการติดตั้งและไม่ติดตั้งใบปรับลม ที่มีต่อการกระจายของอุณหภูมิและความชื้นภายในเครื่องอบแห้งแบบตู้ ปัจจัยดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้โดยอ้อมถึงลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้ง นอกจากนี้ยังได้มีการประเมินประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายของเครื่องอบแห้งแบบตู้ดังกล่าว โดยทำการทดลองกับมะละกอแช่แข็งและเงาะ เครื่องอบแห้งที่ออกแบบนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

อุปกรณ์และวิธีการ

ลักษณะของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างเพื่อใช้ในการทดลองมีขนาดตู้อบแห้งภายนอกเท่ากับ 1 ม.(กว้าง) x 1.86 ม.(ยาว) x 1.5 ม.(สูง) ผนังทำจากเหล็กแผ่นหนา 0.8 มม. หุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 3.75 ซม. ภายในประกอบด้วยห้องอบแห้งขนาด 0.95 ม.(ก) x 1.43 ม.(ย) x 0.95 ม.(ส) สามารถบรรจุถาดสเตนเลส ขนาด 0.7 ม.(ก) x 0.90 ม.(ย) x 0.90 ม.(ส) เป็นจำนวน 2 คัน รถเข็นแต่ละคันสามารถบรรจุถาดสเตนเลส ขนาด 0.64 x 0.85 ตารางเมตร ได้ 12 ถาด คิดเป็นพื้นที่ของการอบแห้งทั้งหมดเท่ากับ 13 ตารางเมตร

อากาศภายในเครื่องอบแห้งหมุนเวียนโดยใช้พัดลมชนิดแรงเหวี่ยงใบโค้งหน้า พิกัดมอเตอร์ 0.74 กิโลวัตต์ ความเร็วรอบพัดลม 864 รอบต่อนาที พัดลมดังกล่าวให้อัตราการไหลของอากาศประมาณ 0.95 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อัตราการไหลของอากาศดังกล่าวได้กำหนดให้มีความคงที่ตลอดการทดลองสำหรับอากาศหลังการอบแห้งจะถูกระบายทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณ 20% ของปริมาณอากาศหมุนเวียนทั้งหมด และอากาศอบแห้งที่เหลืออีก 80% จะนำผสมกับอากาศแวดล้อมเพื่อหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ การให้ความร้อนแก่อากาศทำได้โดยใช้หัวเผาก๊าซแอลพีจีที่มีขนาดนมหู (orifice) เท่ากับ 1.2 มม. นมหูจะต่อเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมการจ่ายก๊าซซึ่งประกอบด้วยวาล์วโซลินอยด์ (solenoid valve) ขนาด 1/4 นิ้ว ทำหน้าที่เปิดปิดก๊าซเข้าหัวเผา อุณหภูมิอบแห้งควบคุมโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (thermostat) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิในช่วงระหว่าง 30 ถึง 100 °ซ. ค่าความถูกต้อง ± 3 °ซ. เพื่อความปลอดภัยในขณะที่มีการดำเนินการอบแห้งได้มีการติดตั้งวาล์วโซลินอยด์ปิดก๊าซ (shut off solenoid valve) เพื่อตัดการจ่ายก๊าซทันทีหากเกิดกรณีไฟฟ้าดับหรือพัดลมหลักไม่ทำงาน นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งชุดไฟล่อที่หัวเผา ซึ่งจะจุดโดยชุดจุดอัตโนมัติตลอดเวลาการอบแห้ง รายละเอียดของระบบอบแห้งแบบตู้แสดงใน Fig. 1

1. การทดสอบการกระจายลม

ขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อศึกษาลักษณะการกระจายความชื้นของผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้ง พร้อมกับการได้มีการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งทาง

เข้าและออกจากห้องอบแห้ง ในการทดลองนี้ได้ใช้ผ้าฝ้ายชุบน้ำโดยวางในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ สภาวะเงื่อนไขที่ดำเนินการทดลองคือความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 313 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง อัตราการไหลของอากาศ 3528 กก./ชม. สำหรับการทดลองที่ 1 และ 3420 กก./ชม. ในการทดลองที่ 2 อุณหภูมิในการอบแห้ง 63 °ซ. หลังจากอบแห้งได้ผ่านไปเป็นระยะเวลา 5 และ 9 ชั่วโมง ความชื้นของผ้าในถาดที่ 1, 6 และ 12 ได้นำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาความชื้นของผ้าที่อยู่ในแต่ละถาด (Fig. 1) เครื่องซึ่งที่ใช้วัดมีความถูกต้องอยู่ในช่วงประมาณ ± 0.1 กก. นอกจากนี้หลังจากชั่วโมงที่ 5 ได้มีการสลับภาชนะระหว่างรถเข็นที่ 1 และ 2 เพื่อต้องการให้การกระจายความชื้นของผ้าที่อยู่ในถาดรถเข็นที่ 1 ซึ่งสัมผัสกับลมร้อนที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นอุณหภูมิของอากาศที่เข้าห้องอบแห้ง กับรถเข็นที่ 2 ไม่แตกต่างกันมากนัก

ในการทดลองที่ 1 นั้นเป็นการศึกษาการกระจายลมในห้องอบแห้งโดยไม่ติดตั้งใบปรับทิศทางลม และในการทดลองที่ 2 ได้ติดตั้งใบปรับทิศทางลม ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงของบริเวณทางเข้าห้องอบแห้ง ดังแสดงใน Fig. 1

2. ผลกระทบผลไม่อบแห้ง

หลังจากที่ได้มีการทดสอบการกระจายของลมในห้องอบแห้ง ต่อมาได้มีการนำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กล้วยน้ำว่าและเงาะมาใช้ในการทดสอบ โดยในการทดลองที่ 3 เป็นการทดสอบกล้วยน้ำว่าและในการทดลองที่ 4 เป็นการทดสอบเงาะ ในการทดสอบกล้วยน้ำว่านั้นได้ใช้น้ำหนักเริ่มต้น 202.8 กก. ความชื้นเริ่มต้น 342 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

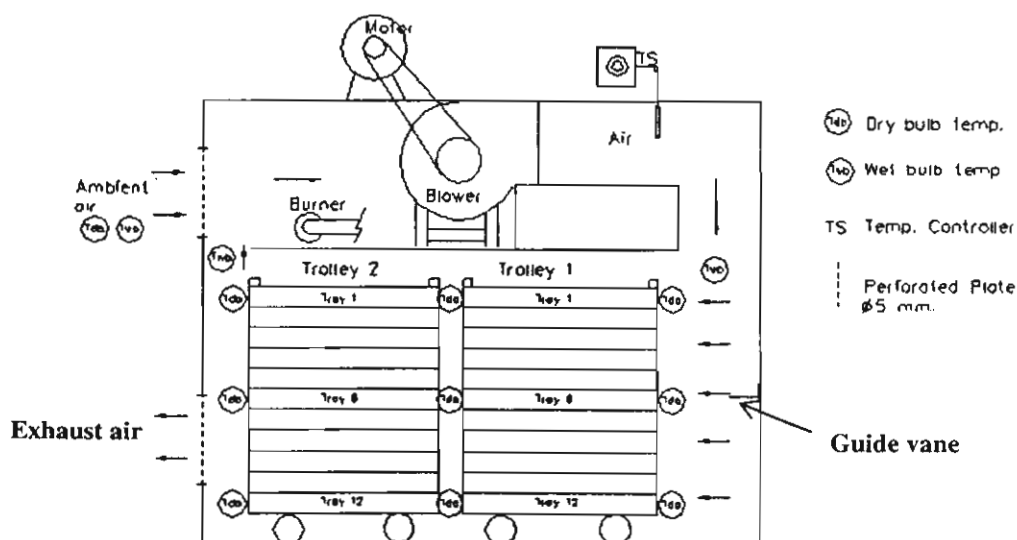


Fig. 1 Schematic diagram of cabinet dryer.

ในการทดลองอบแห้งกล้วยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ในช่วงแรกของการอบแห้งใช้เวลา 13 ชั่วโมง หลังจากนั้นน้ำหนักกล้วยมากขึ้นที่อุณหภูมิอากาศเป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยไม่ให้อุณหภูมิในแต่ละภาคปะปนกัน จากนั้นน้ำหนักกล้วยมาอบแห้งต่ออีก 10 ชั่วโมง และหมักเป็นครั้งที่สองโดยใช้เวลาเท่ากับการหมักครั้งแรก ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการอบแห้งกล้วยอีกครั้ง โดยใช้เวลา 12 ชั่วโมง ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยของกล้วยประมาณ 52 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

สำหรับการอบแห้งเงาะนั้น ได้ใช้เนื้อเงาะสดและเงาะเชื่อมปนรวมเป็นน้ำหนักอบแห้ง 56.4 กิโลกรัม ปริมาณเงาะที่บรรจุไม่เต็มห้องอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของเงาะประมาณ 636 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งและอบแห้งให้เหลือความชื้น 45 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จากการทดลองพบว่าในการอบแห้งเงาะใช้เวลาในการอบแห้ง 11 ชั่วโมง การบันทึกค่าของอุณหภูมิ กำลังไฟฟ้าที่ให้กับเครื่อง และปริมาณก๊าซที่ใช้ จะบันทึกทุกๆ 1 ชั่วโมงของช่วงเวลารอบแห้ง การเก็บตัวอย่างมาหาความชื้นจะสุ่มเก็บจากภาคที่ 1 (ภาคบนสุด) 3 6 9 และ 12 (ภาคล่างสุด) ของรถเข็นแต่ละคัน ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียกได้แสดงไว้ใน Fig. 1 โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับ data logger ความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$. การวัดความเร็วของอากาศที่ท่ออากาศเวียนกลับและช่องระบายอากาศทั้งใช้ Hot wire anemometer การวัดพลังงานไฟฟ้าใช้ clip-on meter ในการหาความชื้นของผลิตภัณฑ์ ทำได้โดยการเก็บตัวอย่างมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80°C . เป็นเวลา 60 ชั่วโมง

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การทดสอบการกระจายของลมร้อนในห้องอบแห้ง

1.1 การกระจายของอุณหภูมิและความชื้น (ไม่ติดตั้งในปริบลม)

ในการทดสอบความสม่ำเสมอของลมภายในห้องอบแห้งนั้นเราได้วัดความชื้นที่และอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในห้องอบแห้ง กรณีที่ความชื้นของวัสดุในแต่ละภาคตามความสูงของห้องอบแห้งและอุณหภูมิมิมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากัน นั้นแสดงว่าการกระจายของลมที่ผ่านห้องอบแห้งมีความสม่ำเสมอ สภาวะเงื่อนไขต่างๆในการทดสอบการกระจายลมซึ่งเป็นกรณีไม่ติดตั้งในปริบลมได้แสดงไว้ใน Table 1 (การทดลองที่ 1) จากการทดลองจะเห็นว่าปริมาณความชื้นของผ้า (Table 2) หลังจากเวลาอบแห้งผ่านไปเป็นเวลา 5

ชั่วโมง มีค่าโดยประมาณ 106.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งสำหรับบริเวณตอนกลางของ Trolley 1 (ภาคที่ 6) และความชื้น 66.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งในภาคที่ 1 ในขณะที่ความชื้นของภาคที่ 12 ซึ่งเป็นบริเวณด้านล่างสุดของห้องอบแห้งอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่ามาก (16.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) จากผลดังกล่าวมีแนวโน้มแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าปริมาณอากาศส่วนใหญ่จะไหลผ่านบริเวณด้านล่างของห้องอบแห้ง และจากความแตกต่างของความชื้นในแต่ละภาคของ Trolley 1 สามารถคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชื้นได้เท่ากับ 43.1 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

ผลของความชื้นที่แสดงใน Table 2 มีความสอดคล้องกับอุณหภูมิที่วัดได้ดังแสดงใน Fig. 2 กล่าวคือ อุณหภูมิที่วัดตรงตำแหน่งภาคที่ 6 มีค่าต่ำสุดตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ยกเว้นในช่วงชั่วโมงที่ 4 และ 5 ขณะที่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ 1 และ 12 มีค่าสูงกว่า ในเชิงทฤษฎีนั้นอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งควรมีค่าเท่ากันตลอดหน้าตัดของห้องอบแห้ง เนื่องจากอากาศร้อนที่ไหลออกจากพัดลมมีการผสมกันของอากาศเป็นไปอย่างสมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติกลับพบว่ามีความแตกต่างกันดังแสดงใน Fig. 2 ซึ่งผลดังกล่าวน่าจะเนื่องมาจากอากาศที่ไหลผ่าน Trolley 1 มีการไหลเวียนกลับออกมาบางส่วน และมาผสมกับอากาศที่ไหลออกจากพัดลมส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิตรงทางเข้าห้องอบแห้ง

ผลการกระจายความชื้นของผ้าใน Trolley 2 แสดงใน Table 2 จะเห็นว่าลักษณะโปรไฟล์ความชื้นของ Trolley 2 มีความแตกต่างจาก Trolley 1 กล่าวคือ ความชื้นในภาคที่ 1 มีปริมาณความชื้นสูงสุด (213 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) ขณะที่ภาค 6 และ 12 มีความชื้นต่ำกว่า โดยใน Tray 12 มีความชื้นต่ำสุด (114.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) จากลักษณะข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอากาศหลังจากไหลผ่าน Trolley 1 มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหล โดยบริเวณกึ่งกลางและด้านล่างของ Trolley 2 มีแนวโน้มที่มีอัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ Trolley คันแรก หลังจากชั่วโมงที่ 5 ได้มีการสลับรถเข็นระหว่าง Trolley 1 และ 2 เพื่อต้องการลดความแตกต่างของความชื้นระหว่างบริเวณด้านหน้าและหลังภาค หลังสิ้นสุดการอบแห้งมีความแตกต่างของความชื้นประมาณ 22.9 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

1.2 การกระจายของความชื้นและอุณหภูมิ (กรณีติดตั้งในปริบลม)

ในกรณีนี้ใบปริบทิศทางลมได้ทำการติดตั้งที่ระบกกึ่งกลางของความสูงของห้องอบแห้ง จากผลที่แสดงใน Table

Table 1 Experimental results for different products.

Description	Test no.					
	1	2	3/1	3/2	3/3	4
Products	Cotton cloth	Cotton cloth	Banana	Banana	Banana	Rambutan
Ambient air conditions						
Average temperature (°C)	31.3	28.6	32.2	33.1	31.1	29.7
Average relative humidity (%)	76	85	79	75	77	78
Condition of products						
Average initial moisture content (% d.b.)	313	307	342	131	78.6	636
Average final moisture content (% d.b.)	36.4	16.4	130	76.3	52.6	45
Initial weight (kg)	148.8	146.4	202.8	105.6	80.9	56.4
Moisture removal (kg)	99.7	104.5	97.2	24.8	10.9	44.7
Drying air conditions						
Guide vane	no	installation	installation	installation	installation	installation
Average temperature (°C)	62.7	62	61.2	61.7	60.3	58.4
Air flow rate (kg/h)	3528	3420	3420	3420	3420	3420
Fraction of air recycled (%)	79.5	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6
LPG flow rate (kg/h)	0.9	0.98	0.77	0.55	0.5	0.65
Electricity (kW-h)	4.55	4.64	6.6	5.07	6.07	5.56
Drying time (h)	9	9	13	10	12	11
Performance of dryer						
Drying rate (kg water evap./h)	11.08	11.61	7.48	2.48	0.91	4.06
Specific primary energy consumption						
LPG (MJ/kg water evap.)	4.07	4.22	5.15	11.11	27.9	8
Electricity (MJ/kg water evap.)	0.41	0.4	0.61	1.84	5.01	1.12
Total Energy (MJ/kg water evap.)	4.48	4.62	5.76	12.95	32.91	9.12
Drying efficiency (%)	58	56.3	45	20	7.9	28.5

Table 2 Average moisture content of cotton cloth (Test no. 1).

Drying time (h)	Average moisture content (% d.b.)							
	Trolley 1				Trolley 2			
	Tray 1	Tray 6	Tray 12	SD**	Tray 1	Tray 6	Tray 12	SD**
0	313	313	313	0	313	313	313	0
5*	66.7	106.7	16.7	45.1	213	193.3	114.7	52
9	28	26.7	3.7	13.7	60.7	62.7	3.7	33.5

* Swapping the trolleys between 1 and 2 since 6 h ** Standard Deviation

3 จะเห็นว่าหลังสิ้นสุดการอบแห้งในชั่วโมงที่ 9 (มีการสลับรถเข็นในชั่วโมงที่ 5) ความชื้นของผ้าในแต่ละ Tray มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับในแต่ละ Trolley ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้ในการทดลองที่ 2 มีค่าเท่ากับ 3.4 และ 4.5 เปอร์เซนต์มาตรฐานแห้งสำหรับ Trolley 1 และ 2 ตามลำดับ ค่าที่ได้ดังกล่าวนี้มีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการทดลองที่ 1 ดังแสดงใน Table 2 ซึ่งแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหลังสิ้นสุดการอบแห้งเท่ากับ 13.7 และ 33.5 เปอร์เซนต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง

สำหรับ Trolley 1 และ 2 ตามลำดับ ในการทดลองทั้งสองนี้ ได้ดำเนินการที่สภาวะเงื่อนไขเหมือนกันดังแสดงใน Table 1 จาก Table 3 จะเห็นว่าความชื้นที่บริเวณด้านล่างของห้องอบแห้งยังคงมีค่าต่ำกว่าบริเวณด้านบนของห้องอบแห้ง ซึ่งจากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของอากาศส่วนใหญ่ยังคงไหลผ่านบริเวณด้านล่างของห้องอบแห้ง อย่างไรก็ตามความแตกต่างของความชื้นในแต่ละภาคมีค่าน้อยลงหลังจากติดตั้งไปปรับทิศทางลม

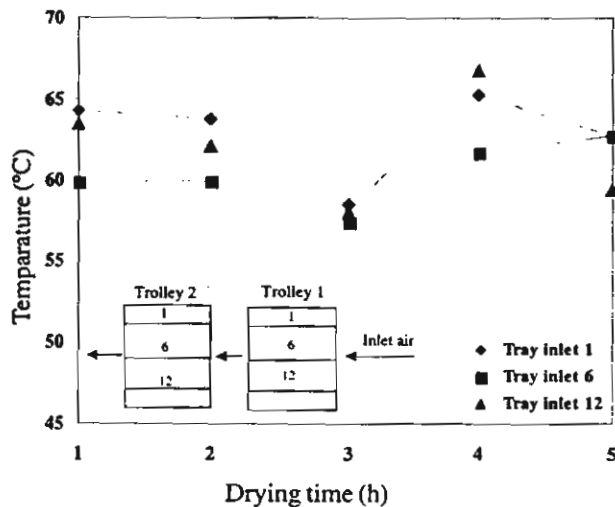


Fig. 2 Temperature distribution at tray inlets of trolley 1 (no guide vane).

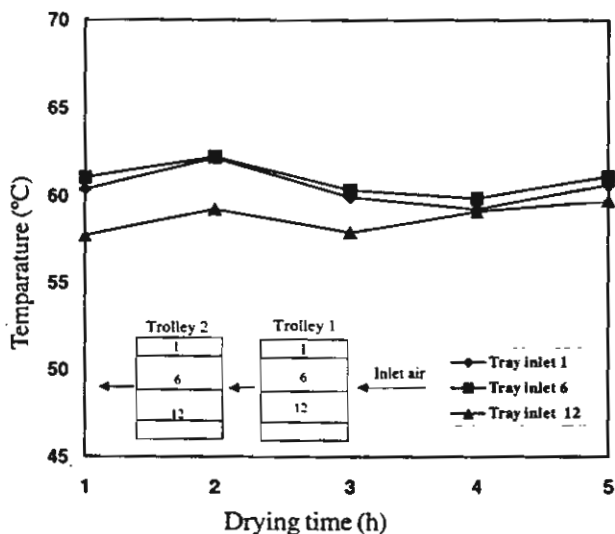


Fig. 2 Temperature distribution at tray inlets of trolley 1 (with guide vane).

Fig. 3 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ทางเข้าของ Trolley 1 ค่าที่แสดงนี้เป็นค่าในช่วง 5 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง จากกราฟจะเห็นว่าการกระจายของอุณหภูมิตลอดความสูงของห้องอบแห้งอยู่ในช่วงแคบกว่าการทดลองที่ 1 (Fig. 2) ความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 58-62 °ซ. จากผลการวัดอุณหภูมิเป็นการยืนยันแสดงให้เห็นถึงการกระจายของอากาศดีขึ้นหลังจากมีการติดตั้งใบปรับลม และเป็นผลให้การกระจายความชื้นมีค่าลดลง

2. สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

หลังจากได้มีการปรับปรุงการกระจายของลมภายในห้องอบแห้ง ต่อมาได้ทำการทดลองกับผลไม้ชนิดต่างๆ

Table 3 Average final moisture content of cotton cloth (Test no. 2)

Position of trays	Average moisture content (% d.b.)	
	Trolley 1	Trolley 2
1 (top)	10	28
3	4.7	26.7
6	2.7	24.7
9	3.3	28.7
12 (bottom)	1.3	17.3
SD	3.4	4.6

Table 4 Average final moisture content of banana (Test no. 3/1).

Position of trays	Average moisture content (% d.b.)	
	Trolley 1	Trolley 2
1 (top)	134.1	156.2
3	124.1	138.3
6	114.5	129.3
9	134.9	131.2
12 (bottom)	130.0	115.3
SD	8.4	14.9

สำหรับการทดสอบอบแห้งกล้วยน้ำว้าแสดงใน Table 4 ซึ่งเป็นการอบแห้งช่วงแรกที่กล้วยน้ำว้ามีความชื้นสูงมาก จากผลที่ได้จะเห็นว่าใน Trolley 1 ความแตกต่างของความชื้นกล้วยในแต่ละถาดมีค่าน้อยสังเกตได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.4 เปอร์เซนต์ความชื้น ขณะที่ใน Trolley 2 มีความแตกต่างของความชื้นสูงกว่า Trolley 1 โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 14.9

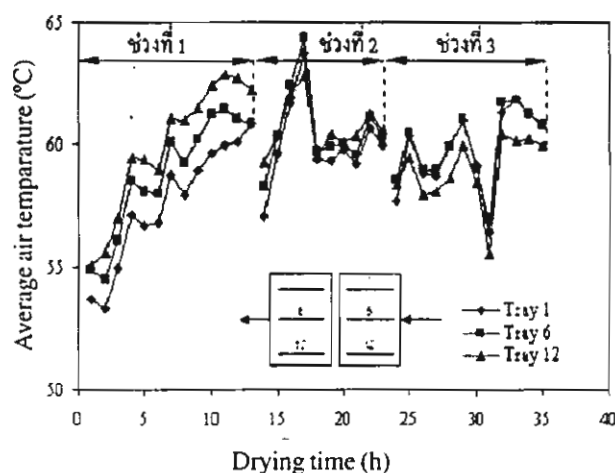
นอกจากนี้ความชื้นของกล้วยใน Trolley 2 มีค่าสูงกว่าใน Trolley 1 โดยมีความแตกต่างของความชื้นดังกล่าวมีค่าประมาณ 7 เปอร์เซนต์ความชื้น ผลดังกล่าวอาจเนื่องมาจากการลดลงของอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งและการเปลี่ยนทิศทางการไหลของอากาศหลังจากหลังจากผ่าน Trolley 1 ซึ่งผลการทดสอบนี้มีความสอดคล้องเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และ 2 ดัง Tables 1 และ 2 ตามลำดับ หลังจากสิ้นสุดกระบวนการอบแห้งพบว่ามีความแตกต่างของความชื้นระหว่าง Trolley 1 และ 2 โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.9 เปอร์เซนต์ความชื้น สำหรับเงาที่มีความแตกต่างของความชื้นประมาณ 6 เปอร์เซนต์ความชื้น ซึ่งผลความแตกต่างดังกล่าวมีค่าค่อนข้างน้อยและอาจกล่าวได้ว่าไม่มีการสูญเสียน้ำหนักในเชิงพาณิชย์ (การทดลองผลไม้อื่นๆดังกล่าวนี้นี้ไม่ได้มี

การสลับภาคหรือรถเข็น เพื่อต้องการลดความแตกต่างของความชื้นภายในห้องอบแห้งซึ่งเป็นที่นิยมปฏิบัติกันทั่วไป)

จาก Table 1 จะเห็นว่าอัตราการอบแห้งสำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์มีค่าไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นแรกเริ่ม และ ลักษณะของการจัดเรียงตัวของเนื้อเยื่อของผลิตภัณฑ์ ในการอบแห้งกล้วยน้ำว้าให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 7.48 kg water evap./h ในการอบแห้งช่วงที่ 1 (ลดความชื้นจาก 342 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 130 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) และเมื่อความชื้นของกล้วยลดลงจนมีค่าน้อยที่สุดในช่วงที่ 3 พบว่ามีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.91 kg water evap./h เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความชื้นที่ผิวของกล้วยในช่วงแรกมีค่ามากและการระเหยของน้ำส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณผิว แต่เมื่อเวลาผ่านไปน้ำที่ผิวลดลง น้ำในเนื้อผลไม้ดังกล่าวจะเริ่มแพร่จากภายในมายังที่ผิวซึ่งต้องอาศัยเวลาในระยะหนึ่งสำหรับการแพร่ดังกล่าว เป็นผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับช่วงแรก และจากผลดังกล่าวยังส่งผลต่อเนื่องถึงปริมาณของพลังงานที่ใช้ โดยให้ความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.76 MJ/kg water evap. สำหรับช่วงแรกของการอบแห้งเป็น 32.91 MJ/kg water evap. สำหรับการอบแห้งในช่วงที่ 3 ผลความสิ้นเปลืองพลังงานดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพ การอบแห้งจึงลดลงจาก 45% เหลือเพียง 7.9%

ในกรณีของการอบแห้งเงาะที่อุณหภูมิ 58 °C ให้อัตราการอบแห้ง 4.06 kg water evap./h สำหรับในการลดความชื้นจาก 636 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 45 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง และให้ความสิ้นเปลืองพลังงานเท่ากับ 9.12 MJ/kg water evap. ซึ่งความสิ้นเปลืองพลังงานดังกล่าวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีของการอบแห้งกล้วย นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งก็ยังมีค่าน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน

ในการทดลองที่ 3 (Table 1) สำหรับอบแห้งกล้วย พบว่าความชื้นเริ่มต้นในการอบแห้งกล้วยในช่วงที่ 2 (3/2) กับความชื้นสุดท้ายของช่วงที่ 1 (3/1) และความชื้นเริ่มต้นในการอบแห้งช่วงที่ 3 (3/3) กับ ความชื้นสุดท้ายของช่วงที่ 2 (3/2) พบว่ามีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ในทางทฤษฎีควรมีค่าเท่ากัน) ทั้งนี้เนื่องจากกล้วยได้ดูดความชื้นจากอากาศในขณะที่กำลังหมัก การหมักกล้วยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อต้องการให้เอ็นไซม์ในกล้วยเปลี่ยนแปลงให้เป็นน้ำตาล นอกจากนี้ยังส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นเมื่อนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมาผ่านการอบแห้งอีกครั้ง (หลังจากผลิตภัณฑ์ได้ผ่านการอบแห้งในขั้นตอนแรก) เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากน้ำภายในกล้วยมีเวลาในการแพร่มายังบริเวณผิวของกล้วยในขณะที่กำลังหมัก ซึ่งสามารถสังเกตได้โดยง่ายจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้าและออกจากห้องอบแห้งมีค่ามากโดย



เฉพาะในช่วงต้นของการอบแห้งในช่วงที่สองดังแสดงใน Fig. 4 นั่นคือความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าและออกจากรถเข็นในช่วงต้นของการอบแห้งช่วงที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงท้ายการอบแห้งช่วงที่ 1 และช่วงต้นของการอบแห้งช่วงที่ 3 เปรียบเทียบกับช่วงท้ายการอบแห้งช่วงที่ 2

นอกจากปัจจัยของความชื้น ยังได้มีการพิจารณาสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากสีเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคสามารถสังเกตเห็นและมีอิทธิพลอย่างสูงต่อความรู้สึกของผู้บริโภค สีของผลไม้อบแห้งได้นำมาเปรียบเทียบกับใช้มาตรฐานเทียบสีของ R.H.S. Color Chart พบว่า กล้วยหลังการอบแห้งมีสีเหลืองปนส้ม ตาม Code 175-C ส่วนเงาะหลังการอบแห้งมีสีส้มปนแดง ตาม Code 167-A และเงาะเชื่อมอบแห้งมีสีเหลืองอ่อนปนส้มตาม Code 167-D และจากผลการนำตัวอย่างคุณภาพสีของกล้วยและเงาะหลังจากสิ้นสุดการอบแห้งมาให้ผู้ผลิตผลไม้อบแห้งพิจารณาพบว่าสีที่ได้เป็นที่น่าพึงพอใจ

3. การประเมินค่าใช้จ่าย

สำหรับเงื่อนไขในการประเมินค่าใช้จ่ายในการอบแห้งได้แสดงในรายละเอียดใน Table 5 จากการประเมินค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง พบว่า ค่าใช้จ่ายรวมรายปีสำหรับการอบกล้วยเท่ากับ 27,910.03 บาทต่อปีหรือเท่ากับ 4.38 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย โดยแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่ากับ 2.47 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ค่าใช้จ่ายด้านบำรุงรักษาเท่ากับ 0.24 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย และค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง 1.67 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ในส่วนการอบแห้งเงาะมีค่าใช้จ่ายรายปีเท่ากับ 22,597.70 บาทต่อปีหรือเท่ากับ 5.27 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย โดยแบ่งเป็น ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่ากับ 2.43 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ค่าใช้จ่ายด้านบำรุงรักษาเท่ากับ 0.35 บาทต่อ

Table 5 Conditions of Accounting for the Drying Cost

	Products	
	banana	rambutan
Initial moisture content (% d.b.)	342	636
Final moisture content (% d.b.)	52.6	45
Initial mass (kg)	202.8	56.4
Final mass (kg)	69.95	11.7
Amount of evaporated water (kg/batch)	132.85	44.7
Drying time (kg/batch)	35	11
Production rate (batch/year)	48	96
LPG consumption (kg/batch)	21.51	7.15
LPG cost * (baht/kg)	12.6	12.6
Electricity consumption (kW-h/batch)	17.74	5.56
Electricity cost** (baht/kW-h)	3.32	3.32
Investment cost (baht)	75,830	75,830
Life time (year)	10	10
Maintenance cost (% ของต้นทุนสร้างเครื่อง)	2	2
Salvage value (% ของต้นทุนสร้างเครื่อง)	10	10
Interest rate* (%)	7.75	7.75

* Reference on 13/07/2001 ** Electricity Cost 1500 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ต่อเดือน

กิโลกรัมน้ำระเหยและค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง 2.48 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย จากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายจะเห็นว่า ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งผลไม้ทั้งสองใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เป็น เพราะปริมาณกล้วยที่ใช้อบแห้งต่อปีมีค่าสูงกว่าเงาถึง 1.8 เท่า

สรุปผลการทดลอง

การติดตั้งใบปรับทิศทางลม ณ บริเวณทางเข้า ห้องอบแห้งช่วยลดระดับความปั่นป่วนของกระแสอากาศที่ เข้าห้องอบแห้ง และเป็นผลให้ความแตกต่างของความชื้น ของผลิตภัณฑ์สำหรับในแต่ละรอบเย็นมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งใบปรับลม เครื่องอบแห้งที่ออกแบบ สามารถบรรจุกล้วยน้ำว้าได้ครั้งละประมาณ 200 กิโลกรัม ให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 51.6 MJ/kg water evap. สำหรับลดความชื้นจาก 342 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 52.6 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งและเมื่อนำมาอบแห้งเงาสามารถจุ ได้ 56 กิโลกรัม ให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 9.12 MJ/kg water evap. จากการลดความชื้น 636 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 45 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง คุณภาพทางด้านสีของ กล้วย และเงาหลังกระบวนการอบแห้งอยู่ในเกณฑ์ดี ค่าใช้ จ่ายในการอบแห้งผลไม้มีค่าประมาณ 4.38-5.27 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ โดยแบ่ง ออกเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งมีค่าระหว่าง 1.67-2.48 บาท ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าและก๊าซแอลพีจีมีค่า

ระหว่าง 2.43-2.47 บาท และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา เครื่องมีค่าระหว่าง 0.24-0.35 บาท

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุน งานวิจัยที่สนับสนุนทางการเงินและบริษัทเจเนอรัล ฟู้ด แอนด์ ฟรุ๊ต จำกัด ที่ให้ความร่วมมือระหว่างการทำทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- ไมตรี แนวพนิช, ศรีวิทย์ สิงหะเชนทร์, พิมล วุฒิสันต์, ศิริชัย ส่ง เสริมพงษ์, สุภัทร หนูสวัสดิ์ และ บงยุทธ คงชาน. 2536. เครื่องอบแห้งผักและผลไม้. เครื่องจักรกลเกษตร 2536, กองเกษตรวิศวกรรม, กรมวิชาการเกษตร, หน้า 75-78.
- ศิวลักษณ์ ปุริวรรตน์, ชุตติศักดิ์ ขวประดิษฐ์, นิทัศน์ ตั้งพินิจกุล, บงยุทธ คงชาน, อนุสรณ์ พินศิริกุล และ สุภัทร หนูสวัสดิ์. 2537. ออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งมะขามหวาน. เอกสารเผยแพร่ กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว, กองเกษตรวิศวกรรม, ปทุมธานี. 14 หน้า.
- พีระพันธ์ สอนงชาติ. 2539. การพัฒนาเครื่องอบแห้งผลไม้แบบ ถาดหมุน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ ๙. 130 หน้า.
- Kiranoudis, C. and N.vMarkatos. 1998. Computer Analysis of Industrial Batch Dryer Aerodynamics, Drying Technology, Vol. 16(7). p. 1283-1303.



วารสาร

สวท.

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

THAI SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING JOURNAL

ISSN 1685-408X

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2545 (Volume 9 No. 1 January - June 2002)

สารบัญ

- ผลกระทบเนื่องจากรูปร่างของร่องปลูกและความสูงในการปล่อยกระเทียมที่เหมาะสม
ต่อความแม่นยำในการปลูกกระเทียม..... 3
จิราภรณ์ เบญจประกายรัตน์, สัญลักษณ์ กิ่งทอง
Effects of Furrow Shapes and High of Seed Tubes on Precisions of Garlic Bulb Planting
Jiraporn Benjaphragairat, Sanluck Kingthong
- การออกแบบและพัฒนาเครื่องนวดพริกไทย..... 9
สาทิป รัตนภาสกร, พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์
Design and Development of Pepper Thresher
Sathip Ratanapasakorn, Pimpen pornchalermwong
- การประเมินความสูญเสียจากการเก็บเกี่ยวข้าว..... 14
วินิต ชินสุวรรณ, สมชาย ชวนอุดม, วราจิต พยอม
Rice Harvest Losses Assessment
Winit Chinsuwan, Somchai Choun-udom, Warachit Phayom
- การชะลอการเสื่อมคุณภาพข้าวเปลือกความชื้นสูงโดยการระบายอากาศออกจากกองข้าว..... 20
วินิต ชินสุวรรณ, ลือพงษ์ ลือนาม
Delay of Deterioration of Wet Paddy by Ventilation
Winit Chinsuwan, Luepong Luenam
- การประเมินสถานภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทย..... 32
ขุนพล สังข์อารีย์กุล, สมบูรณ์ เวชกามา, อติศักดิ์ พงษ์พูลผลศักดิ์, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์
Evaluation of Status of Paddy Dryers in Thailand
Khunphol Sungareekul, Somboon Wetchacama, Adisak Pongpullponsak, Somchart Soponronnarit
- ✓ ● การอบแห้งผลไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ที่ใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง..... 42
สุเมธ รุจินินนาท, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมเกียรติ ปรัชญาวรรการ
Fruit Drying Using LPG-Cabinet Dryer
Sumate Rujininnat, Somchart Soponronnarit, Somkiat Prachayawarakorn
- การศึกษาการใช้บรรจุภัณฑ์ขายปลีกผลไม้ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล..... 50
บัณฑิต จริโมภาส, ศุภกิตต์ สายสุนทร, เจษฎา วสุวัต
Study on Use of Retail Fruit Package in Bangkok and Metropolitan Area
Bundit Jarimopas, Supakit Saisontorn, Jesada Wasuwat
- ระบบการวัดหาพื้นที่ใบไม้แบบอัตโนมัติ..... 57
บัณฑิต จริโมภาส, อุดมศักดิ์ กิจทวี, วันปิติ รัสสี, สยาม ต้มแสงทอง
Automatic Leaf Area Measurement System
Bundit Jarimopas, Udomsak Kijtawee, Wanpiti Rangsi, Siam Tommsaengtong

แห้ง หรือไม้คัมบรดูบับ หรือไม้คอง หรือไม้แห้งที่วางขายในท้องตลาด มักใช้วิธีการตากแห้งเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งปัญหาที่ตามมาคือ ความสะอาดของหน่อไม้แห้ง กระบวนการผลิตหน่อไม้แห้งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ นำหน่อไม้สดมาทำการต้มเพื่อกำจัดสาร Taxiphyllin ซึ่งเป็นสารที่ไวรสวม (1-2) สารนี้จะสลายตัวเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 116°C จากนั้นจะเก็บกระบวนการลดความชื้นของหน่อไม้ ความชื้นของหน่อไม้แห้งที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.17 มาตรฐานแห้ง ในกระบวนการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์นอกจากจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการหาความชื้นออกจากวัสดุ เราอาจใช้อุณหภูมิร้อนชื้นทดแทนก็ได้

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นยังได้มีการพัฒนามาเป็นเวลานานมาแล้ว งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่อาหาร เช่น ไม้, กากน้ำตาล และ ถ่านหิน เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นกับลมร้อนในแง่ของอัตราการอบแห้ง ที่อุณหภูมิต่ำ อัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์โดยวิธีไอน้ำร้อนชื้นยังจะมีค่าต่ำกว่าการใช้อากาศร้อน และอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นยังจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มสูงจนถึง ๗๐ องศาเซลเซียส อัตราการอบแห้งที่ได้จากการใช้ไอน้ำร้อนชื้นยังและอากาศร้อนจะมีค่าเท่ากัน อุณหภูมิ ๗๐ องศาเซลเซียสเรียกว่า อุณหภูมิผกผัน (inversion temperature) Schwartz and Brocker [3] ได้ทำการศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิผกผันพบว่า อุณหภูมิผกผันมีค่าไม่แน่นอน ขึ้นกับรูปแบบของกระบวนการอบแห้ง และลักษณะทางกายภาพของวัสดุ และเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิผกผัน อัตราการอบแห้งโดยวิธีไอน้ำร้อนชื้นยังจะมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนและค่าการนำความร้อนของไอน้ำร้อนชื้นมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับของอากาศร้อน ค่านิยามของอุณหภูมิผกผันที่กล่าวมานี้เบื้องต้นสามารถใช้ได้ในกรณีที่ การอบแห้งเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของเท่านั้น ในกรณีที่การอบแห้งถูกควบคุมโดยกระบวนการถ่ายเทความร้อนภายในอุณหภูมิ ๗๐ องศาเซลเซียสกล่าวเราเรียกว่า อุณหภูมิผกผันประสิทธิผล (effective inversion temperature)

ความแตกต่างระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนชื้นยังจากงานวิจัยที่ผ่านมา [4-9] พบว่ามีข้อดีและข้อเสียดังต่อไปนี้

ข้อดี

1. ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือเกิดการเผาไหม้เนื่องจากไม่มีแก๊สออกซิเจนในระบบทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น อาทิเช่นสีของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง
2. อัตราการอบแห้งโดยวิธีไอน้ำร้อนชื้นยังสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิผกผัน
3. ผลิตภัณฑ์ที่มีพิษ หรือมีกลิ่นที่ต้องการนำมาใช้งาน สามารถสกัดนำมาใช้ได้

4. การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นยังสามารถฆ่าเชื้อโรค หรือกำจัดกลิ่นของอาหารได้

ข้อเสีย

1. ระบบมีความซับซ้อน จำเป็นต้องมีการป้องกันการรั่วซึม การนำผลิตภัณฑ์เข้าและออกห้อง ไม่มีการรั่วซึมของอากาศ ในตอนแฉะ เติมน้ำและเครื่องเติมเครื่องอาจเกิดการกัดกร่อนด้วยของไอน้ำเกิดขึ้นได้
 2. เมื่อผลิตภัณฑ์เข้ามาในระบบ ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการกัดกร่อนด้วยไอน้ำได้ ทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น 10-15% ที่ความดันบรรยากาศ
 3. ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการกระบวนการออกซิเดชันเพื่อที่จะให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ไม่สามารถใช้การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นได้ แต่สามารถแก้ไขโดยแบ่งการอบแห้งเป็นสองช่วงเช่น การอบแห้งร้อน ซึ่งอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นก่อน และตามด้วยการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน
- จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ดังต่อไปนี้ 1) เพื่อต้องการทราบเส้นไอโซเทอมแบบการคายความชื้นของหน่อไม้แห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิต่าง ๆ 2) มีความเข้าใจถึงกลไกของการอบแห้งที่เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนชื้น ความแตกต่างของอัตราการอบแห้งที่ได้จากการใช้ตัวกลางที่แตกต่างกันอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล 3) เปรียบเทียบคุณภาพของหน่อไม้ที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชื้นและลมร้อน โดยเปรียบเทียบกับที่ได้จากการตากแห้ง

2. ทฤษฎี

2.1 แบบจำลองของไอโซเทอมแบบมีการคายความชื้น

คุณสมบัติของสารที่ทราบคุณสมบัติไอโซเทอมของอาหารมีความสำคัญสำหรับใช้ในการคำนวณหาความชื้นที่สภาวะสมดุลขณะที่ทำให้การเก็บรักษา ซึ่งทำให้ทราบได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาภายใต้สภาวะดังกล่าวมีโอกาสที่เชื้อจุลินทรีย์จะมีการเจริญเติบโตโดยอากาศหรืออาจนอกจากนี้ยังนำไปใช้ในการคำนวณหาความชื้นที่เวลาอบแห้งต่าง ๆ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายไอโซเทอมของวัสดุพหุสามารถแบ่งได้กว้าง ๆ เป็น 2 ชนิดคือ สมการในทางทฤษฎีและสมการเอมไพริคัล ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเลือกทั้งสองรูปแบบดังกล่าวมาอธิบายไอโซเทอมของหน่อไม้ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิต่าง ๆ รูปแบบสมการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1) สมการทางทฤษฎี

2.1.1.1) สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) [10]

$$M_{eq} = \frac{M_d Y a_w}{(1 - a_w)(1 + (Y - 1)a_w)} \quad (1)$$

โดยที่ M_{eq} คือความชื้นที่สภาวะสมดุล มีหน่วยเป็นมาตรฐานแห้ง (d.b.)

M_b คือความชื้นสูงที่สุดขณะที่โมเลกุลของน้ำเรียงตัวเพียงชั้นเดียวภายในรูพรุนของวัสดุ

a_w คือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขณะที่เกิดสภาวะสมดุล มีหน่วยเป็นเศษส่วน

Y คือค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบมีการคายน้ำ

2.1.1.2) สมการของ Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)[11]

$$M_{eq} = \frac{M_b S Y a_w}{(1 - S a_w)(1 + (Y - 1) S a_w)} \quad (2)$$

โดยที่ S คือค่าคงที่แบบมีการคายน้ำ

ค่าคงที่ S และ Y เป็นตัวแปรที่อธิบายถึงอิทธิพลของอุณหภูมิว่ามีผลอย่างไรต่อไอโซเทอม โดยตัวแปรดังกล่าวอธิบายได้ด้วยสมการของอาร์เรเนียส

$$Y = G \exp\left(-\frac{E}{R(T + 273)}\right) \quad (3)$$

$$S = A \exp\left(-\frac{C}{R(T + 273)}\right) \quad (4)$$

โดยที่ E และ C เป็นค่าคงที่ มีหน่วยเป็น kJ/kmol R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (kJ/kmol-K)

2.1.2) สมการเอนไพริคัล

2.1.2.1) สมการของ Henderson [12]

$$M_{eq} = \left[-\frac{1}{B(T + 273)} \ln(1 - a_w) \right]^{1/F} \quad (5)$$

โดยที่ B และ F คือ ค่าคงที่ของหน่อไม้

2.1.2.2) สมการของ Chung and Pfof [13]

$$M_{eq} = -\frac{1}{B} \ln\left(-\frac{R(T + 273)}{F} \ln a_w\right) \quad (6)$$

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการไอโซเทอมได้ใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) และ SSE (summation of square error) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองที่นำมาอธิบายผลการทดลอง ค่าของ SSE มีค่าต่ำ แสดงว่าแบบจำลองนั้นอธิบายผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ นิยามของ SSE เป็นดังนี้

$$SSE = \sum_{i=1}^n (M_{eq}(\text{experiment}) - M_{eq}(\text{prediction}))^2 \quad (7)$$

โดยที่ n คือจำนวนข้อมูลการทดลอง

2.2 แบบจำลองของการอบแห้ง

รูปร่างของหน่อไม้ที่ใช้ในการศึกษาทดลองการอบแห้งมีลักษณะเป็นแผ่นแบนกว้าง ในงานวิจัยนี้สมมติว่าหน่อไม้มีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic solid) และการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางเดียว ขณะที่เกิดการถ่ายเทมวลของหน่อไม้ของผลิตภัณฑ์มีคงที่เท่ากับอุณหภูมิของตัวกลางอบแห้ง จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้นเราสามารถคำนวณหาความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ ได้จากสมการการแพร่ทางทฤษฎี [14]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(i+1)^2} \exp\left(-\frac{(i+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{b^2}\right) \quad (8)$$

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้นไร้หน่วย $\frac{M(t) - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}}$

D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีหน่วยเป็น m^2/min

t คือเวลาในการอบแห้งมีหน่วยเป็นนาที

b คือความหนาครึ่งหนึ่งของวัสดุ มีหน่วยเป็นเมตร

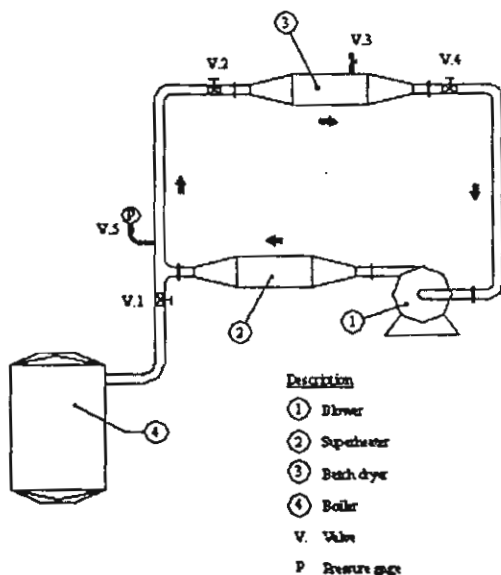
ในการคำนวณหาความชื้นของวัสดุที่เวลาต่าง ๆ เราใช้จำนวนเทอมทั้งหมด 10 เทอมในการคำนวณ กรณีที่ใช้จำนวนเทอมมากนี้พบว่าผลการคำนวณความชื้นที่ได้มีแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเทียบกับที่ใช้จำนวนเทอมเท่ากับ 10 ดังนั้นจำนวนเทอมดังกล่าวสามารถเป็นตัวแทนที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณความชื้นแทนการใช้จำนวนเทอมเป็นอนันต์

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์

รูปที่ 1 แสดงระบบอบแห้งของไอน้ำร้อนชาดอชิงซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ๆ ดังนี้ ดังความดันที่ผลิตไอน้ำที่ความดันเหนือบรรยากาศเล็กน้อย ชุดทำไอน้ำร้อนชาดอชิงโดยใช้จลลาลความร้อนวาล์วสำหรับควบคุมความดันของไอน้ำ ชุดอบแห้งแบบถาด พัดลมแบบเหวี่ยงที่มีใบพัดโค้งหลัง อัตราไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งควบคุมโดยใช้ตัวปรับความเร็วรอบ และระบบท่อไอน้ำ การทำงานของระบบเริ่มต้นด้วยอุณหภูมิของไอน้ำจากเครื่องไอน้ำที่ห้องปฏิบัติการอบแห้ง เหตุที่กระทำเช่นนี้เพื่อต้องการป้องกันการกลั่นตัวของไอน้ำภายในระบบอบแห้งขณะทำการอบแห้งโดยใช้อิทธิพลของไอน้ำร้อนชาดอชิง เมื่อหน่วยต่าง ๆ ภายในระบบมีอุณหภูมิคงที่ จากนั้นก็จะปล่อยไอน้ำร้อนชาดอชิงผ่านหน่วยต่าง ๆ โดยไอน้ำที่ผลิตจากถังความดันหมายเลข 4 จะมีสภาวะเป็นไอน้ำอิ่มตัวไหลผ่านหน่วย Superheater เพื่อทำการเปลี่ยนสภาวะของไอน้ำ

จากไออีเอ็มคิวเป็นไอร้อนชาดอ้ง และในขณะที่เคียวกันให้ความร้อนต่อไป จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ หลังจากนั้นไอน้ำร้อนชาดอ้งจะไหลผ่านชุด หน่วยอบแห้งโดยทิศทางการไหลของไอน้ำจะอยู่ในแนวขนานกับวัสดุ และวัสดุซึ่งวางอยู่บนสวคเคแกระจะสัมผัสกับไอน้ำทั้งสองด้าน ปริมาณ ไอน้ำทั้งหมดหลังจากผ่านห้องอบแห้งแล้วจะนำกลับมาใช้ใหม่ โดย ลักษณะวิธีการเช่นนี้จะทำให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบการใช้กาสร้อนซึ่งต้องมีการทิ้งกาสร้อนไปเป็นบางส่วน



รูปที่ 1 ระบบเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดอ้งชนิดกะ

3.2 การทดลองหาความชื้นสมดุล

การทดลองหาความชื้นสมดุลของหน่อไม้ใช้วิธีติด โดยนำ หน่อไม้มาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 0.5×0.5×0.5 cm วางไว้ เหนือสารละลายเกลืออีเอ็มคิวของ KNO_3 , $NaCl$, $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ และ $LiCl$ ซึ่งสารดังกล่าวมีความชื้นสัมพัทธ์เหนือ สารละลายเกลือในช่วงระหว่าง 11.2 ถึง 84.9% จากนั้นจึงนำตัวอย่างต่าง ๆ ไปใส่ในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้อุณหภูมิที่ 50, 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักทุกวันจนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง แล้ว จึงนำไปหาความชื้นที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่แต่ละ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ได้ทำทดลองซ้ำถึง 3 ครั้ง

3.3 การทดลองอบแห้ง

นำหน่อไม้ปริมาณ 0.5 kg ที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 19–25 d.b. มาหั่นตามแนวเส้นใยขนาด 5×5 cm หยา 0.3 cm โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ ของไอน้ำร้อนชาดอ้ง 120, 140 และ 160°C และอัตราการไหลของอากาศ 0.024 kg/s หน่อไม้ที่นำอบแห้งที่อุณหภูมิสูงดังกล่าวนี้จะไม่ผ่าน กระบวนการคัมเพื่อกำจัดสาร Taxiphyllin ขณะอบแห้งนำตัวอย่างมาชั่ง

น้ำหนักทุก ๆ 20 นาทีเพื่อเก็บข้อมูลหาความชื้น การอบแห้งดำเนินไป จนกระทั่งอบแห้งความชื้นของหน่อไม้ลดลงเหลือประมาณ 0.17 d.b. ที่ ความชื้นดังกล่าวเป็นความชื้นของหน่อไม้ที่เก็บรักษา และจำหน่ายใน ท้องตลาด สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนทำการทดลองโดยใช้เงื่อนไข อุณหภูมิและอัตราการไหลเชิงมวลเดียวกันกับการใช้ไอน้ำร้อนชาดอ้ง ทำ การทดลองเหมือนการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดอ้ง

3.4 การทดสอบคุณภาพ

ตัวอย่างที่ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงด้วยไอน้ำร้อนชาดอ้ง และอากาศร้อนได้นำมาเปรียบเทียบกับคุณภาพของหน่อไม้ที่ได้จากการตาก แห้งและจากการทดลองอบแห้งหน่อไม้ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 และ 70°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่นิยมในการใช้ในการอบแห้งผักและผลไม้ ใน การอบแห้งที่ด้วยลมร้อนอุณหภูมิต่ำหรือจากการตากแห้งดังกล่าว หน่อไม้จะต้องผ่านกระบวนการคัมเสียก่อนเพื่อกำจัดสาร Taxiphyllin และจากนั้นหน่อไม้จะนำมาลดความชื้นจนเหลือประมาณ 0.17 d.b. คุณ ภาพของหน่อไม้ที่ได้รับความสนใจในงานวิจัยนี้ได้แก่ สีของหน่อไม้ หลังการอบแห้งและรสชาติความขม

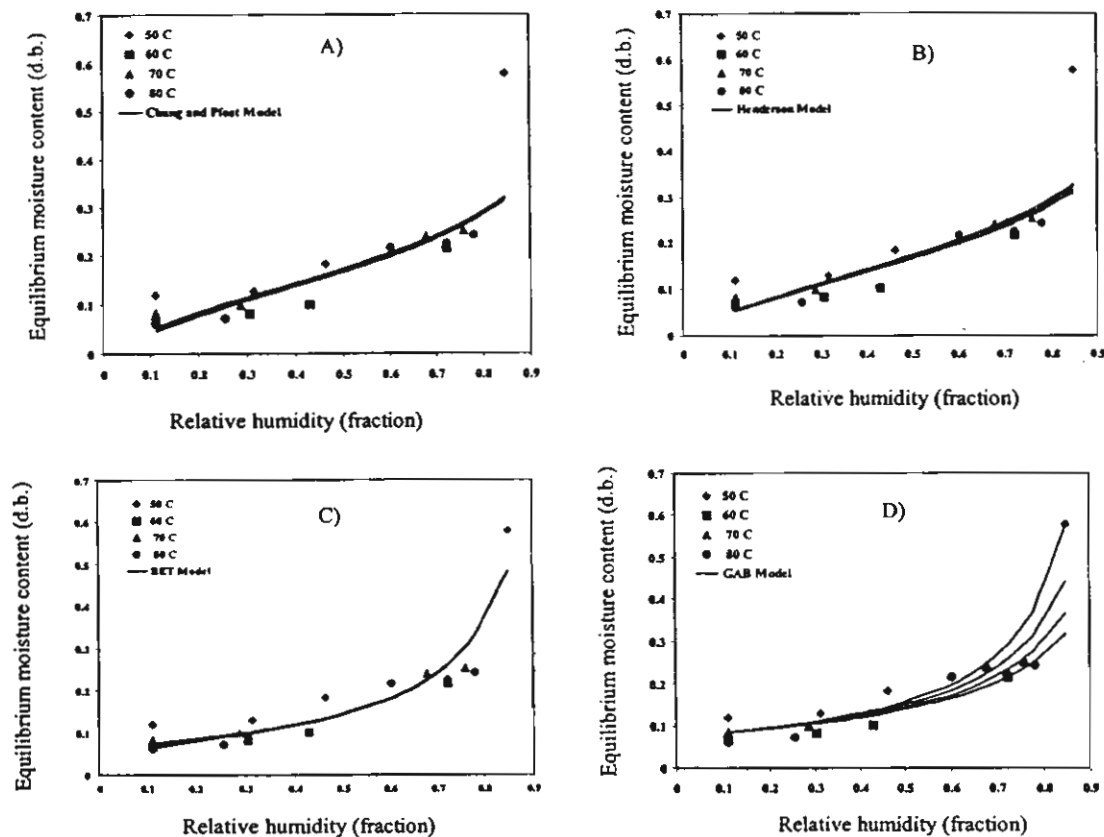
สีของหน่อไม้แห้งวัดจากการเปรียบเทียบกับตารางเทียบสี มาตราฐานของ R.H.S. (The Royal Horticultural Society) สำหรับในการ ทดสอบรสชาติความขมใช้วิธีทดสอบการชิมโดยใช้ผู้อาสาสมัครเป็น จำนวน 10 คน และกลุ่มตัวอย่างได้แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มมีลำดับ การชิมไม่เหมือนกัน เหตุที่ทำเช่นนี้เพื่อต้องการพิสูจน์ผลของลำดับการ ชิมไม่มีผลต่อการรับรู้รสชาติ ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้ใช้วิธีทางสถิติของ ฟรีดแมน (Friedman's test) โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) เป็น 0.05

4.ผลและวิจารณ์

4.1 ความชื้นสมดุล

ผลการทดลองพบว่า หน่อไม้เข้าสู่สมดุลแบบคาย ความชื้น ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80°C ความชื้นสมดุลที่แต่ละ ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ขณะที่อุณหภูมิ 50°C และ ความชื้นสัมพัทธ์ 0.85 ความชื้นสมดุลของหน่อไม้มีค่าค่อนข้างสูงเป็น พิเศษเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิอื่น ๆ ภาวได้ความชื้น สัมพัทธ์เดียวกันดัง รูปที่ 2 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่านอกจาก ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิก็เป็นปัจจัยที่สำคัญอันหนึ่งที่มีผลต่อความชื้น สมดุล จากผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองของ BET, GAB, Chung and Pfost และ Henderson พบว่า ยกเว้นเฉพาะกรณีของแบบจำลองของ GAB แบบจำลองสมดุลต่าง ๆ ที่เสนอไม่สามารถอธิบายผลของอุณหภูมิที่ต่อ ความชื้นสมดุลได้อย่างแม่นยำ พารามิเตอร์ของแบบจำลองต่าง ๆ ที่ได้ จากการวิเคราะห์การลดถอยแสดงในตารางที่ 1 จากตารางจะเห็นว่า ค่า ความชื้นสูงสุดของหน่อไม้ไม่แตกต่างที่ทำนายได้จากสมการของ GAB

และ BET มีค่าใกล้เคียงกัน และจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าสมการของ GAB เป็นสมการที่อธิบายผลสอดคล้องกับการทดลองมากที่สุด



รูปที่ 2 ความชื้นสมดุลของหน่อไม้ที่ได้จากการทดลอง และการทำนายจากแบบจำลองต่างๆ

ตารางที่ 1 ค่าคงที่พารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมชนิดต่างๆ

Models	M_s	G	H	D	E	B	F	SSE
BET	0.07300	-	-	0.000135000	35656.40	-	-	0.0304
GAB	0.07600	0.2156	4179.53	555054	1018.87	-	-	0.0117
Chung and Pfost	-	-	-	-	-	9984.41	9.67	0.138
Henderson	-	-	-	-	-	0.0366700	1.57	0.141

4.2 การเปลี่ยนความชื้นของหน่อไม้ขณะอบแห้ง

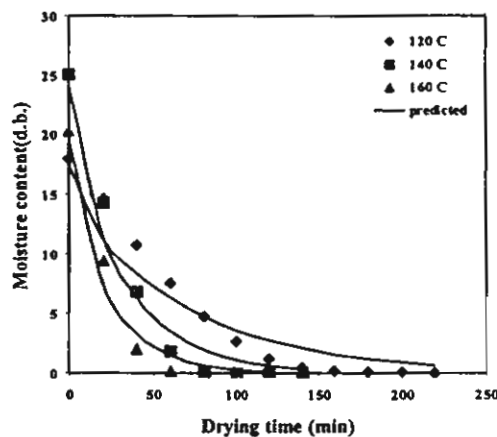
การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของหน่อไม้ได้เร็วกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ ดังรูปที่ 3 และ 4 โดยลักษณะการลดลงของความชื้นทั้งในกรณีที่ใช้ไอน้ำร้อนจากถังและอากาศร้อนเป็นรูปของการลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

จากข้อมูลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อการอบแห้งดำเนินไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง ความชื้นของหน่อไม้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นั้นแสดง

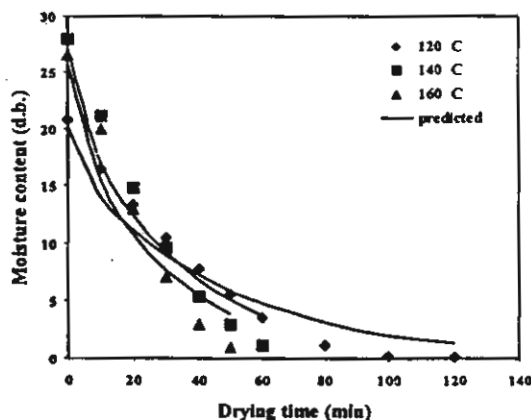
ว่าความเข้มข้นของไอน้ำในตัวกลางขณะอบแห้งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสมมติให้ความเข้มข้นของความชื้นที่ผิวของหน่อไม้มีค่าเป็นศูนย์หลังจากเริ่มอบแห้ง ข้อสมมติฐานนี้ไม่สามารถนำไปใช้กับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำๆ

จากการทำนายโดยใช้สมการที่ 8 จะเห็นว่าให้ผลการทำนายในทำนองเดียวกับผลการทดลอง กล่าวคือการลดลงของความชื้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา จากรูปที่ 3 และ 4 แบบจำลองการแพร่ทำนายความชื้นในช่วงต้น ๆ ของการทดลองเร็วกว่าการทดลอง

พอสมควร ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงต้นๆของการอบแห้งเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุ ดังนั้นอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จึงมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของตัวกลางอบแห้ง ซึ่งในการคำนวณความชื้นของหน่อไม้ เราสมมติให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์คงที่โดยมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของตัวกลางอบแห้ง



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของหน่อไม้ขณะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดอึ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนาย

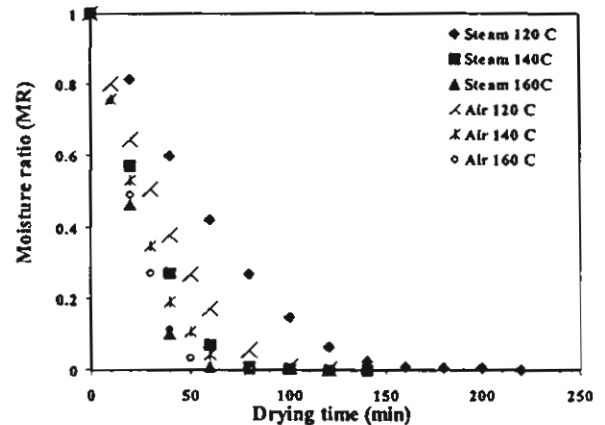


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของหน่อไม้ขณะอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนาย

4.3 การเปรียบเทียบความชื้นระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดอึ่งและลมร้อน

รูปที่ 5 แสดงอัตราส่วนความชื้นไร้หน่วยของหน่อไม้ที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดอึ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดอึ่งที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดเดือดปกติของน้ำให้อัตราการลดความชื้นช้ากว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนภายใต้ความดันเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่นที่อุณหภูมิ 120°C ในการลดอัตราส่วนความชื้นจากหนึ่งให้ลดลงเหลือ 0.2 การอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนชาดอึ่งใช้เวลา 90

นาที ขณะที่ลมร้อนใช้เวลา 60 นาที เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นเป็น 140°C กลับพบว่าเวลาที่ใช้ในการลดอัตราส่วนความชื้นของหน่อไม้ทั้งในไอน้ำร้อนชาดอึ่งและอากาศร้อนมีค่าเกือบเท่ากัน และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนชาดอึ่งเร็วกว่าการอบแห้งของลมร้อนเล็กน้อยเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งเป็น 160°C



รูปที่ 5 เปรียบเทียบความชื้นของหน่อไม้ที่ได้จากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชาดอึ่งภายใต้ความดันต่างๆ

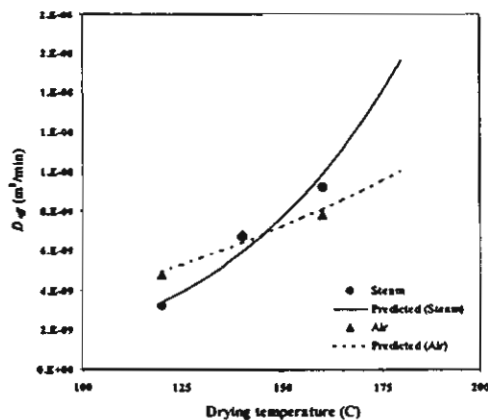
รูปที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของหน่อไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดอึ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งมีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งสำหรับการใช้ไอน้ำร้อนชาดอึ่งเมื่อเทียบกับลมร้อน โดยที่อุณหภูมิที่อบแห้งต่ำกว่า 145°C ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลต่ำกว่าการอบแห้งของลมร้อนแต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 145°C กลับพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของหน่อไม้ในกรณีที่ใช้ไอน้ำร้อนชาดอึ่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่ามากกว่าการอบแห้งของลมร้อนอย่างเห็นได้ชัดเจน ณ ตำแหน่งที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของหน่อไม้ที่อบแห้งด้วยตัวกลางเท่ากันอยู่ที่อุณหภูมิ 145°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิผกผันประสิทธิผลของหน่อไม้สำหรับการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของหน่อไม้สำหรับไอน้ำร้อนชาดอึ่งและอากาศร้อนมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในรูปแบบของการอาร์เรเนียสดังต่อไปนี้

$$\text{ไอน้ำร้อนชาดอึ่ง } D_{eff} = 3.613 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{37837}{R(273+T)}\right) \quad (9)$$

$$\text{อากาศร้อน } D_{eff} = 1.038 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{17471}{R(273+T)}\right) \quad (10)$$

จากสมการที่ (9) และ (10) จะเห็นว่าในกรณีที่อุณหภูมิสูงกว่า 170°C ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำร้อนชาดอึ่งมีค่ามากกว่าของลมร้อน 1.5 เท่า



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสำหรับการอบแห้งของไอน้ำร้อนและอากาศร้อน และการเปรียบเทียบผลทำนายด้วยสมการที่ 9 และ 10

4.4 คุณภาพของหน่อไม้แห้ง

สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดอ้งพบว่าหน่อไม้แห้งที่ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C มีสีตรงกับรหัสสี 164A, 165B และ 165A ตามลำดับ ขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิในช่วงดังกล่าวหน่อไม้แห้งที่ได้มีรหัสสี 164B, 164A และ 164A ตามลำดับ สีที่ได้จากการอบแห้งด้วยตัวกลางทั้งสองมีลักษณะน้ำตาลไหม้ แต่สีของหน่อไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดอ้งมีสีเข้มกว่าภายใต้การอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน จากการสังเกตกรณี

ตารางที่ 2 การทดสอบรสชาติของหน่อไม้ด้วยวิธีการอบแห้งต่าง ๆ

Group	Subsequent testing	Very bitter	bitter	slight bitter	no bitter
No.1	Sun drying	0	0	0	8
	Low temperature hot air	0	0	2	6
	High temperature hot air	0	2	5	1
	Superheated steam	0	1	5	2
No. 2	Superheated steam	0	1	3	4
	High temperature hot air	1	1	6	0
	Low temperature hot air	0	0	1	7
	Sun drying	0	1	2	5
No. 3	Low temperature hot air	0	0	1	7
	Superheated steam	0	0	7	1
	Sun drying	0	0	3	5
	High temperature hot air	0	5	3	0

5 สรุป

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดอ้ง พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง สีของหน่อไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วโดยสีของหน่อไม้เปลี่ยนเป็นสีเหลืองนวลคล้ายสีของหน่อไม้คัม มีรหัสสี 160B ซึ่งอยู่ในกลุ่มสี greyed-yellow ขณะที่ การอบแห้งด้วยลมร้อนสีของหน่อไม้ในช่วงแรกของการอบแห้งยังคงเป็นสีเขียวมีรหัสสี 157D ตรงกับกลุ่มสี green-white จากการเปรียบเทียบด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 และ 70°C ให้สีอ่อนกว่ารับประทานที่สุดโดยมีรหัสสี 162A ซึ่งยังให้ผลดีกว่าการทำหน่อไม้แห้งโดยวิธีตากแดดโดยหน่อไม้แห้งที่ได้มีสีตรงกับรหัสสี 164B

สำหรับการทดสอบคุณภาพของหน่อไม้แห้งในด้านรสชาติ กระทำเพื่อยืนยันว่าสารให้ความขมในหน่อไม้ (*Taxiphyllin*) โดยใช้วิธีการชิม จากผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มดังแสดงในตารางที่ 2 จากผลการทดสอบสมมติฐานของความแตกต่างของรสชาติในแต่ละวิธีการอบแห้งตามวิธีของฟริคแมน สรุปได้ว่าวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ ให้ผลไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงทั้งไอน้ำร้อนชาดอ้งและลมร้อนสามารถทำลายสารความขมที่มีอยู่ในหน่อไม้

จากการทดลองเพื่อศึกษาไอโซโทมแบบการคายความชื้นของหน่อไม้ การเปรียบเทียบจุดสาคของการอบแห้งหน่อไม้ด้วยไอน้ำร้อนชาดอ้งกับลมร้อน และศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของหน่อไม้

หลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาวจีน ธรรมชาติของอุณหภูมิสูง ธรรมชาติของอุณหภูมิต่ำ และวิธีการตากแห้ง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. ความชื้นสัมพัทธ์ของหน่อไม้ขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและอุณหภูมิ และแบบจำลองไอโซเทอมของ GAB สามารถทำนายความชื้นสัมพัทธ์ในหน่อไม้สดคั่วกับผลการทดลอง

2. อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลกระทบต่ออัตราการลดความชื้นสำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาวจีนโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิใกล้เคียงจุดเดือดปกติจะให้อัตราการลดความชื้นช้ากว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาวจีนมีค่าเกือบเท่ากันหรือมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนทั้งนี้ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้

3. จากสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของหน่อไม้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิผกผันประสิทธิผลสำหรับการอบแห้งหน่อไม้อยู่ที่ช่วงประมาณ 145°C

4. คุณภาพของหน่อไม้ในด้านสีที่ได้จากการตากแห้งและการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงระหว่าง 120 และ 160°C โดยใช้น้ำร้อนและไอน้ำร้อนชาวจีนอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับหน่อไม้อบแห้งที่อุณหภูมิระหว่าง 55 ถึง 70°C

5. การให้ความชื้นในหน่อไม้ (*Taxiphyllin*) สามารถละลายตัวระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาวจีนและลมร้อนได้เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงกว่าหรือเท่ากับ 120°C

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. ธรรมรงค์ นิยมวิทย์ "หน่อไม้และผลิตภัณฑ์จากหน่อไม้ ตอนที่ 1: หน่อไม้," อาหาร, ฉบับที่ 2 ปีที่ 18 พ.ศ. 2531a หน้า 79-94.
2. ธรรมรงค์ นิยมวิทย์ "หน่อไม้และผลิตภัณฑ์จากหน่อไม้ ตอนที่ 2 : ผลิตภัณฑ์จากหน่อไม้," อาหาร, ฉบับที่ 3 ปีที่ 18 พ.ศ. 2531b หน้า 183-189.
3. J. Schwartz, and S. Brocker, "A Theoretical Explanation for the Inversion Temperature", Proceedings of the 12th International Drying Symposium (IDS'2000), No. 93 [CD-ROM], 2000, pp.10, Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam
4. A.S. Jensen "Pressurized Drying in Fluid Bed with Steam", Proceedings of the 8th International Drying Symposium

- (IDS'92), 1992, pp. 1593-1601, Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam.
5. W.Z. Tamawski, J. Mittra, P. Borowski and A. Klepaczka "Energy Analysis on Use of Air and Superheated Steam as Drying Media", Drying Technology, Vol. 14, No. 7&8, 1996, pp. 1733-1749.
6. K. Urbaniec and J. Malczewski, "Experimental Investigations of Beet Pulp Drying in Superheated Steam under Pressure", Drying Technology, Vol. 15, No. 6-8, 1997, pp. 2005-2013.
7. J.E. Gilmour, T.N. Oliver and S. Jay "Energy Use for Drying Processes: The Potential Benefits of Airless Drying", Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), Vol. A, 1998, pp. 573-580, Halkidiki, Greece.
8. J. Seyed-Yagoobi, Y.B. Li, R.G. Moreira and R. Yamsaengsung, "Superheated Steam Impingement Drying of Tortilla Chips", Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), Vol. B, 1998, pp. 1221-1228, Halkidiki, Greece.
9. R. Blasco and P.I. Alvarez, "Flash Drying of Fish Meals with Superheated Steam: Isothermal Process", Drying Technology, Vol. 17, No. 4&5, 1999, pp. 775-790.
10. S. Brunauer, P.H. Emmette and E. Teller, "Adsorption in Multimolecular Layers", Journal of the American Chemical Society, Vol. 60, No. 2, 1938, pp. 309-319.
11. C. Van den Berg and S. Bruin, "Water Activity and Its Estimation in Food Systems: Theoretical Aspects", In Water Activity: Influences on Food Quality, L.B. Rockland and G.F. Stewart (Eds.), 1981, pp.1-61, Academic Press, Inc., New York
12. S.M. Henderson, "A Basic Concept of Equilibrium Moisture", Transaction of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Vol. 33, No. 1, 1952, pp. 29-31.
13. D.S. Chung and H.B. Pfost, "Adsorption and Desorption of Water Vapour by Cereal Grains and Their Products", Transaction of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Vol. 10, No. 4, 1967, pp. 52-557.
14. J. Crank, "The Mathematics of Diffusion second edition", 1975, pp. 44-68, Brunel University Uxbridge, J. W. Arrowsmith LTD.

ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมในโรงสีข้าวขาวของประเทศไทย

Potential of Cogeneration in Thai White Rice Mills

วารุณี เตีย สมชาติ โสภณพฤกษ์ และ สุวดี เรืองเดช
คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ถนนประชาธิปไตย บางมด กรุงเทพฯ 10140
โทร 024708632-33 โทรสาร 024708635
E-Mail: warunee.tia@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ทั้งทางด้านเทคนิคและการเงินในการนำระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม มาใช้งานในโรงสีข้าวขาวขนาด 100-2000 ตัน/วัน โดยไฟฟ้าที่ผลิตได้จะนำมาใช้ในกระบวนการสีข้าว ไฟฟ้าส่วนที่เหลือใช้จะขายให้แก่การไฟฟ้า สำหรับความร้อนจากไอน้ำขาออกกักเก็บจะนำมาใช้ในระบอบแห้งและระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน การหาขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมโดยใช้กังหันไอน้ำแบบความดันต้านกลับ (back-pressure) ได้ออกแบบโดยพิจารณาจากเกณฑ์ที่เหมาะสมมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ผลการศึกษาพบว่า โรงสีขนาด 100-500 ตัน/วัน สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 344-1718 kW มีระยะเวลาคืนทุน 6.5-2.1 ปี และ ค่า IRR 15.8-47.9% โรงสีขนาด 800-2000 ตัน/วัน สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 2966-7416 kW มีระยะเวลาคืนทุน 3.4-3 ปี และ ค่า IRR 29.5-34.6% ในการวิเคราะห์ค่าความไวของตัวแปรที่มีผลต่ออัตราผลตอบแทนการลงทุน พบว่า ตัวแปรที่มีความไวสูงได้แก่ อัตราค่าไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้า ส่วนราคาขายชี้น้ำมันดิบ อัตราค่าไฟฟ้าที่ขายกลับให้การไฟฟ้า และราคาถ่านหินมีความไวต่ำ

คำสำคัญ (keywords) : ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน / ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม / โรงสีข้าวขาว

ABSTRACT

This research aims to evaluate both technical and financial potential of cogeneration system in white rice mills with capacity of 100-2000 tons/day. The generated electricity is supplied to milling process and exported the surplus electricity to the grid. The exhaust heat from steam turbine is also utilized for drying and cooling paddy by absorption chiller. The topping-cycle cogenerations with back-pressure steam turbine are designed based on husk-match. Results from this study indicated that the generated electricity for 100-500 tons/day and 800-2000 tons/day were 344-1718 kW and 2966-7416 kW with payback periods of 6.5-2.1 years and 3.4-3 years respectively, and the corresponded internal rate of return were 15.8-48.0% and 29.5-34.6%. The sensitivity analysis of the effects of parameters on the internal rate

of return was carried out. It was found that the purchased electricity price was highly sensitive, while the ash price, buy back rate and husk price were less sensitive.

Keywords: Absorption chiller/ Cogeneration system/ White rice mill

1. บทนำ

การที่ประเทศไทยประสบปัญหาเศรษฐกิจ บวกกับการต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศประมาณร้อยละ 50 ของการจัดหาพลังงานทั้งหมด[1] รัฐจึงสนับสนุนให้มีการจัดหาพลังงานจากแหล่งภายในประเทศ และใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ การผลิตไฟฟ้าโดยใช้ กากหรือเศษวัสดุเหลือใช้เป็นเชื้อเพลิง และการผลิตไฟฟ้าโดยระบบ Cogeneration เป็นระบบผลิตพลังงานที่มีประสิทธิภาพเพราะสามารถผลิตได้ทั้งไฟฟ้าและความร้อนจากเชื้อเพลิงเดียวกัน อีกทั้งแบ่งเบาภาระทางการลงทุนในระบบผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศ รัฐได้ให้การสนับสนุนโดยรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตด้วยกระบวนการดังกล่าว โรงสีข้าวเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีถ่านเป็นวัสดุเหลือใช้มาก ในการสีข้าวจะได้ถ่านประมาณร้อยละ 22-25 ของน้ำหนักข้าวเปลือก จากสถิติกรมโรงงานอุตสาหกรรมปี 2542 มีโรงสีข้าวตั้งแต่ขนาด 10-2000 ตัน/วัน ประมาณ 6000 โรง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการสีข้าวขาว จากข้อมูลสถานภาพผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่ขายไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้า ๗ กุมภาพันธ์ 2544 พบว่า มีกำลังการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียว และใช้ถ่านร่วมกับเศษไม้ 24.9 MW และ 60.8 MW ตามลำดับ ซึ่งได้ทำสัญญาขายไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 51.7 MW [2] ปัจจุบันโรงสีข้าวส่วนใหญ่มีเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อลดความชื้นข้าวก่อนสี และมีการเก็บข้าวไว้รอสีในช่วงที่ไม่มีการรับซื้อข้าวเปลือกได้ การเก็บรักษาข้าวเปลือกมีหลายวิธี Chek และ Hassan [3] [4] ได้ศึกษาวิธีเก็บข้าวเปลือกด้วยการอบแห้งร่วมกับการทำความเย็นข้าวเปลือกพบว่า ข้าวที่ผ่านการสีแล้วมีคุณภาพดี มีเปอร์เซ็นต์คืนข้าวเพิ่มขึ้น

เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบ Cogeneration เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพ และมีขนาดกำลังผลิตตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะประเมินหาความเป็นไปได้ทั้งทางด้านเทคนิคและการเงินของการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบ Cogeneration

RECEIVED 23 JULY, 2001

ACCEPTED 3 MAY, 2002

ในโรงสีข้าวขาวโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง โดยนำความร้อนที่ได้จากระบบมาใช้ในการอบแห้ง และทำความเย็นแบบดูดกลืน

2. โรงสีข้าวขาว

ปัจจุบันโรงสีข้าวขาวขนาดใหญ่จะมีการสีข้าวเกือบตลอดปี จึงมีการรับซื้อข้าวเกือบตลอดปี ทั้งข้าวนาปี และนาปรัง โดยฤดูกาลเก็บเกี่ยวของข้าวนาปีอยู่ในช่วงเดือน พฤศจิกายนถึงกุมภาพันธ์ ส่วนข้าวนาปรังจะออกประมาณ 5 เดือนต่อครั้ง และสามารถเพาะปลูกได้ 2 ปี 5 ครั้ง ในการเก็บเกี่ยวข้าวปัจจุบันมักใช้รถเกี่ยวข้าว ซึ่งเก็บเกี่ยวข้าวในช่วงที่ข้าวมีความชื้นสูง จากการสำรวจข้อมูลโรงสีด้วยแบบสอบถามจำนวน 16 โรงพบว่าระยะเวลาในการเก็บข้าวเปลือกก่อนสีอยู่ในช่วง 10 วันถึง 3 เดือน มีการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก โดยเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่เป็นเครื่องฟลูอิดไคซ์เบด และเครื่องอบแห้งแบบ Louisiana State University (LSU dryer).

โรงสีข้าวที่พิจารณาในการศึกษานี้เป็นโรงสีข้าวขนาด 100-2,000 ตัน/ชม. พลังงานที่ใช้ในโรงสีข้าวส่วนใหญ่ได้แก่ ไฟฟ้า จากการศึกษารายการไฟฟ้าพลังงานในโรงสีข้าวขนาดกำลังผลิตสูงสุด 1000 ตัน/วัน พบว่า การใช้ไฟฟ้าในการสีข้าว บรรจุงวด รวมถึงสำนักงานมีค่า 145.4 MJ/ตันข้าวเปลือก หรือ 40.4 kWh/ตันข้าวเปลือก [5] จะเห็นได้ว่าในกระบวนการสีข้าวขาวใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเดิวนั้น จึงมีแกลบเหลือมาก ถึงแม้บางโรงสีอาจนำแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้งข้าวเปลือก แต่ก็เป็นส่วนน้อยยังคงมีแกลบเหลืออีกปริมาณมาก จึงมีโรงสีข้าวขนาดใหญ่บางโรงได้นำแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า สำหรับใช้แกลบสามารถขายให้ต่างประเทศ เพื่อใช้เป็นส่วประกอบในการผลิตตัวกรองน้ำ หรือใช้ในเตาหมักเห็ด เป็นต้น [6] เนื่องจากข้าวเปลือกที่ซื้อมีความชื้นสูงจึงต้องนำมาอบแห้งให้เหลือความชื้นเริ่มต้นประมาณ 12-14 % w.b. (wet basis) ก่อนจะถูกส่งเข้ากระบวนการสีข้าวต่อไป โดยโรงสีใช้พลังงานไฟฟ้าในการสีข้าว ข้าวเปลือกส่วนที่เหลือจากการสีจะนำมาเก็บเข้าไซโล เพื่อรอการสีในเดือนที่ไม่มีการรับซื้อข้าวเปลือก เมื่อข้าวเปลือกกองรวมกันเป็นเวลานานๆ ถึงแม้จะมีความชื้นต่ำ แต่เมล็ดข้าวยังมีการหายใจ ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในกองข้าว และเกิดความเสียหายแก่กองข้าวเปลือกได้ จึงต้องมีการระบายความร้อนให้แก่กองข้าวเปลือกโดยวิธีการเป่าลมเย็น

3. ระบบผลิตไฟฟ้าและเก็บรักษาข้าว

เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าเป็นแกลบ ดังนั้นจึงพิจารณาใช้ cogeneration แบบ back-pressure steam turbine topping system หม้อไอน้ำที่ใช้เป็นแบบตะกรับ (Stoker) ข้อได้เปรียบของหม้อไอน้ำแบบนี้ คือ สามารถควบคุมคุณภาพของเชื้อเพลิงแกลบได้ตามความต้องการของตลาด จึงทำให้สามารถขายเชื้อเพลิงได้ และจากการสอบถามบริษัทผู้จำหน่ายหม้อไอน้ำ พบ

ว่าหม้อไอน้ำที่มีความดันสูง 40 bar(abs.) อุณหภูมิ 400°C ที่มีขนาดเชิงพาณิชย์จะมีขนาดตั้งแต่ 20-130 ตัน/ชม. จากข้อมูลปริมาณแกลบที่เหลือพบว่าหม้อไอน้ำนี้เหมาะสำหรับโรงสีที่มีขนาดตั้งแต่ 800 ตัน/วันขึ้นไป ส่วนโรงสีที่มีขนาดเล็กกว่านี้จะใช้หม้อไอน้ำที่มีความดัน 25 bar(abs.) อุณหภูมิ 400°C ที่มีขนาดตั้งแต่ขนาด 1.5 ตัน/ชม. ขึ้นไป สำหรับกังหันไอน้ำที่ใช้เป็นแบบหลายขั้น (multistage) ประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 80-87 ไอน้ำที่ออกจากกังหันที่ 2 -3 bar (abs) อุณหภูมิ 173°C-184°C นำมาใช้ออบแห้งข้าวเปลือก โดยใช้เครื่องฟลูอิดไคซ์เบดและเป่าลมเย็นด้วยเครื่องทำความเย็นแบบดูดกลืน (absorption chiller) ไอน้ำที่เหลือใช้จะระบายความร้อนทิ้งที่เครื่องควบแน่น และในช่วงที่ไม่มีการอบแห้งไอน้ำบางส่วนจะนำไประบายความร้อนทิ้งที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การอบแห้งข้าวเปลือก จะนำไอน้ำความดันต่ำที่ออกจากกังหันไอน้ำมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบทอมีคริบ ให้อากาศไหลผ่านในท่อที่มีคริบและอากาศไหลผ่านนอกท่อ ระบบอบแห้งแบ่งเป็น 2 ช่วงดังแสดงในรูปที่ 1 โดยในช่วงแรกจะอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นค่อนข้างสูงด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด ข้าวเปลือกหลังอบแห้งจะมีอุณหภูมิสูง ทำการลดอุณหภูมิข้าวเปลือกโดยผ่านเข้าถังเป่าลมด้วยอากาศแวดล้อม ช่วงที่ 2 หลังจากข้าวเปลือกมีอุณหภูมิลดลงแล้วจะนำไปเข้าเครื่องอบแห้งเครื่องที่ 2 เมื่อผ่านการอบแห้งแล้วจะลดอุณหภูมิข้าวเปลือกโดยใช้อากาศแวดล้อมเช่นเดียวกับช่วงที่ 1 รายละเอียดข้อมูลระบบอบแห้งแสดงในตารางที่ 1

การเป่าลมเย็นเพื่อระบายความร้อนข้าวเปลือกที่เก็บในไซโลใช้วิธีการของ Maier [8] ข้าวเปลือกแห้ง ความชื้นประมาณ 13.5-14% w.b. ที่เก็บไว้ในไซโลเพื่อรอการสีข้าว จะทำการระบายความร้อนแก่ข้าวเปลือกโดยการเป่าลมเย็น ข้าวเปลือกหลังจากเป่าลมเย็นเป็นเวลานาน 144 ชั่วโมง ค่อนข้างเย็น จะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานประมาณ 2 เดือน โดยไม่เกิดความเสียหายแก่กองข้าวเปลือก หลังจากนั้นถ้าต้องการเก็บข้าวเปลือกต่อไปอีกจะต้องเป่าลมเย็นใหม่อีกครั้ง ข้อมูลจากการเป่าลมเย็นข้าวเปลือก 1,000 ตัน ความชื้น 13.5% w.b. อุณหภูมิ 29°C ลมเย็นที่ใช้เป่า อุณหภูมิ 15°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65% อัตราการไหลเชิงปริมาตรของลม 0.15 ลบ.ม/นาที่/ตันข้าวเปลือก ขนาดพื้นที่การทำความเย็น 167 ตัน ความเย็น ระยะเวลาทำความเย็น 144 ชั่วโมง จะทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิลดลงเป็น 15°C เครื่องทำความเย็นที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบดูดกลืน เพื่อนำไอน้ำจากระบบ cogeneration มาใช้ประโยชน์ โดยใช้สารทำความเย็นเป็นแบบลิเทียมโบรไมด์ (LiBr) กับน้ำ และต้องการไอน้ำที่มีความดันไม่เกิน 1 barg.

4. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของระบบ cogeneration

ในการออกแบบขนาดของระบบ cogeneration ได้พิจารณาแบบใช้แกลบทั้งหมดที่ได้จากการสีข้าวเป็นเชื้อเพลิง (husk-match) จากข้อมูลทางด้านเทคนิคที่ได้กล่าวมาแล้ว และสมมติฐานทางด้าน