

ตารางที่ 5 สรุปข้อมูลความพึงพอใจในการทำงานเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ

| ความพึงพอใจ | แบบไหลขวาง |    | แบบ LSU |      | Recirculating Batch |      | แบบฟลูอิดไคเบค |      | 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 | ควรปรับปรุงเครื่องอบแห้งที่ใช้อยู่ มีคะแนน | 1 |
|          | เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้ไม่พอใจ มีคะแนน | 2 |
|          | เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้พอใช้ มีคะแนน   | 3 |
|          | เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้ดี มีคะแนน      | 4 |
|          | เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้ดีมาก มีคะแนน   | 5 |

#### 5.4 ปัญหาที่พบในการอบแห้งข้าวเปลือก

กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกในโรงสีแต่ละโรงมีปัญหาแตกต่างกันมาก แต่ปัญหาที่ส่วนใหญ่คือ การอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงต้องใช้เวลานาน, การใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง, ข้าวที่เข้าโรงสีมีความชื้นแตกต่างกันมาก, ข้าวเปลือกได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 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  |
| เตาเผาแกลบเผาไหม้ไม่สมบูรณ์                         | 3                    | 6.4  |
| ไม่ตอบคำถามในส่วนนี้                                | 23                   | 49.0 |

### 5.5 ความต้องการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในอนาคต

ความต้องการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในอนาคตสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ภาคตามพื้นที่ต่าง ๆ ดังนี้

ภาคเหนือ โรงสีที่ต้องการเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่เป็นโรงสีในเขตภาคเหนือตอนล่าง เนื่องจากพื้นที่ในบริเวณนี้มีการปลูกข้าวนาปรังจำนวนมาก ทำให้มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องอบแห้งเพื่อลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศและผนวกกับปัจจุบันชาวนาได้นำรถเกี่ยวมาใช้ในการเกี่ยวเกี่ยวเพิ่มขึ้น ส่วนโรงสีที่ไม่ต้องการเครื่องอบแห้งจะอยู่ในภาคเหนือตอนบน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการปลูกข้าวนาปรังน้อยทำให้โรงสีไม่มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องอบแห้งมากนัก

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โรงสีที่มีความต้องการใช้เครื่องอบแห้งเป็นโรงสีที่ต้องการขยายกิจการเพื่อรับซื้อข้าวเปลือกขึ้นในคันฤดู หรือต้องการเพิ่มกำลังการผลิต ส่วนโรงสีที่ไม่ต้องการใช้เครื่องอบแห้งให้ความเห็นว่าในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการปลูกข้าวนาปรังน้อยมาก และชาวนาส่วนใหญ่ใช้มือเกี่ยวข้าวและได้ตากข้าวเอง ทำให้การใช้เครื่องอบแห้งในพื้นที่ไม่มีความจำเป็นมากนัก ส่งผลให้เจ้าของกิจการ โรงสีข้าวไม่ต้องการลงทุนใช้เครื่องอบแห้งเนื่องจากมีราคาสูง

ในภาคกลาง ชาวนาในเขตภาคกลางมีการปลูกข้าวนาปรังสูงมากและชาวนาใช้รถเกี่ยวเกี่ยวเกี่ยวข้าว ดังนั้นโรงสีจะมีข้าวเปลือกขึ้นเข้าเกือบตลอดทั้งปี ทำให้เจ้าของกิจการส่วนใหญ่ต้องการใช้เครื่องอบแห้งด้วยสาเหตุหลายประการเช่น เพื่อเพิ่มกำลังการผลิต รักษาคุณภาพข้าวให้ได้มาตรฐาน และเพื่อลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศเป็นต้น ส่วนโรงสีที่ไม่มีความต้องการเครื่องอบแห้ง เนื่องจาก มีเครื่องอบแห้งหรือมีลานตากเพียงพอแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 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  |

### 5. สรุป

โรงสีข้าวในภาคเหนือมีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง 55% (5 โรง) และมีโรงสีต้องการเครื่องอบแห้งในอนาคต 44% (4 โรง) โดยโรงสีที่มีเครื่องอบแห้งจะอยู่ในภาคเหนือตอนล่าง เนื่องจากผู้ประกอบการโรงสีต้องการลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศ ชาวนาปลูกข้าวนาปรังมากและเริ่มนำรถเกี่ยวมาใช้มากขึ้น ในภาคเหนือตอนบนมีการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกน้อยมากและโรงสีส่วนใหญ่ไม่ต้องการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในอนาคต เนื่องจาก ชาวนาปลูกข้าวนาปรังน้อยทำให้ผู้ประกอบการโรงสีไม่ต้องการใช้เครื่องอบแห้ง ส่วนลักษณะการใช้เครื่องอบแห้งพบว่า มีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง โรงสีที่ใช้ตากลานและ/หรือเครื่องอบแห้งร่วมกัน มีปริมาณเท่ากันคือ 22.2% (2 โรง) และโรงสีที่ใช้เครื่องอบแห้งหรือตากลานมี 11% (1 โรง)

โรงสีข้าวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง 52.6% (10 โรง) และมีความต้องการเครื่องอบแห้งในอนาคต 36.8% (7 โรง) เนื่องจาก ขาวนาปลูกข้าวนาปรังน้อยมาก และข้าวนาปีจะมีความชื้นสูงในช่วงต้นฤดูเป็นระยะเวลา 1-2 เดือนเท่านั้น ส่วนลักษณะการใช้เครื่องอบแห้งพบว่า โรงสีที่ใช้การตากลานและเครื่องอบแห้งร่วมกันมี 21% (4 โรง) เนื่องจากสภาพอากาศเอื้ออำนวยต่อการตากลานและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง และมีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง 26.3% (5 โรง) เนื่องจากต้องการรับซื้อข้าวต้นฤดูและรักษาระดับคุณภาพข้าว

โรงสีข้าวในภาคกลางมีโรงสีใช้เครื่องอบแห้ง 81.8% (18 โรง) และมีโรงสีต้องการใช้เครื่องอบแห้งในอนาคต 59.1% (13 โรง) เนื่องจาก ขาวนาปลูกข้าวนาปรังมากและใช้รถเกี่ยววนวดเก็บเกี่ยวข้าวทำให้ข้าวที่เข้าโรงสีมีความชื้นสูง ส่วนลักษณะการใช้เครื่องอบแห้งพบว่า โรงสีส่วนมากใช้เครื่องอบแห้งอย่างเดียว 45.5% (10 โรง) เนื่องจาก ต้องการลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศ ประหยัดเวลา และต้องการรักษาระดับคุณภาพข้าว

ปริมาณเครื่องอบแห้งที่ใช้มากที่สุดคือ เครื่องอบแห้งแบบ LSU (65.4%) รองลงมาคือแบบ Recirculating Batch (20.6%) และกำลังการผลิตรวมของ เครื่องอบแห้งแบบ LSU มีจำนวนมากที่สุด (79.3%) รองลงมาคือ แบบแบบฟลูอิโดซ์เบด (6.8%) สำหรับเครื่องอบแห้งที่ผู้ประกอบการโรงสีพอใจในสมรรถนะมากที่สุด คือ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิโดซ์เบด, LSU, Recirculating Batch, และ Cross Flow ตามลำดับ

#### คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและ Japan International Research Center for Agricultural Sciences ที่ให้การสนับสนุน และขอขอบคุณผู้ประกอบการโรงสีข้าวที่สละเวลาให้ข้อมูลหรือให้เข้าไปสำรวจ งานงานนี้สำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

#### เอกสารอ้างอิง

1. อรรถพล นุ่มหอม และ จริญญา ลิขิตรัตนพร, 2535, “สถานภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทย, เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมเกษตรประจำปี 2537, วันที่ 18 พฤษภาคม 2537, 21 หน้า.
2. สมยศ เชื้ออักษร, ผ่องพรรณ ทรัพย์มงคล, นิตยา เงินประเสริฐศรี และ สันติ ศรีสวนแดง, 2539, “การศึกษาปัญหาในการผลิตและการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกสำหรับโรงสีข้าวในเขตภาคกลาง”, เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมเกษตรประจำปี 2539, วันที่ 12 พฤศจิกายน 2539, 14 หน้า.
3. สถิติการเกษตรของประเทศไทยปีเพาะปลูก, 2541, พิมพ์ครั้งที่ 1, ศูนย์สถิติการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, หน้า 12-23.
4. อติศักดิ์ พงษ์กุลผลศักดิ์, 2544, เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคนิคการสูบลำตัวอย่าง, หน้า 1-1 ถึง 4-45.

# ผลกระทบของอุณหภูมิของการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่มีต่อ

## ค่าความขาวและผลของข้าวเต็มเมล็ด

### EFFECT OF TEMPERATURE OF PADDY FLUIDIZED BED DRYING ON WHITENESS BEHAVIOUR AND HEAD RICE YIELD OF RICE

Supawan Tirawanichakul<sup>1</sup>, Somkiat Prachayawarakorn<sup>2</sup>, Watunyu<sup>1</sup> Chaiwatpongskorn,

Warunee Warunyanong<sup>3</sup> and Somchart Soponronnarit<sup>1</sup>

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

King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Bangkok

<sup>3</sup>Institute of Food Research and Product Development,

Kasetsart University (KU), Bangkhen, Bangkok

บทคัดย่อ: วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิอบแห้ง ในช่วงอุณหภูมิ 40-150°C เซลเซียส ของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพของข้าวในหอมของข้าวเต็มเมล็ด และค่าความขาวของข้าวข้าวเปลือกตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นข้าวสายพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ซึ่งจัดเป็นกลุ่มข้าวเมล็ดขาว โดยมีปริมาณแอมิโลสประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ และนิยมใช้มาทำเป็นแป้งข้าวเจ้า การทดลองอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดแบบเป็นวงจะทดลองที่อัตราการไหลของอากาศผ่านเบดเท่ากับ 2.5 เมตร/วินาที ที่ความหนาของชั้นข้าวเปลือกในเบด 9.5 เซนติเมตร (2 กิโลกรัม) อากาศร้อนจะถูกเป่าผ่านชั้นเบดของข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นทดลองอยู่ในช่วง 25.6-33 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการเก็บในที่อับอากาศ และเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนกระทั่งความชื้น สุดท้ายลดลงเหลือประมาณ 16.3 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความขาวและร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเท่ากับ 33% มาตรฐานแห้ง มีความแตกต่างจากกลุ่มข้าวตัวอย่างที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิงที่ตากแห้งด้วยสภาวะอากาศแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ให้ค่าข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์และความเหลืองเพิ่มขึ้นบริเวณผิวของข้าวสารเล็กน้อย

**ABSTRACT:** The main objective of this work is to study the effect of drying temperatures, in a wide range of temperature between 40 and 150°C, the fluidized bed drying, on physical qualities of rice in terms of head rice yield and whiteness. A variety of long grain paddy samples used in the experiments is Suphanburi 1. This variety contains amylose content of 27% and is commonly used for making rice flour. The batch drying experiments were set-up at an airflow rate of 2.5 m/s and a bed depth of 9.5 cm. The drying air was forced continuously through the paddy bulk at an initial moisture contents of 25.6-33% dry basis (d.b.). After drying, the paddy was tempered and followed by ventilation with ambient air until its final moisture content was reduced to 16.3% dry basis.

The results has shown that whiteness and head rice yield for paddy containing the higher moisture content of 33% dry basis when subject to be dried at temperatures below 80°C insignificantly changes from that of the reference sample, which was dried by the ambient air. Drying at temperature above 100°C provides the relatively higher head rice yield and the slightly more yellow around the surface of white rice.

**KEYWORDS:** Paddy Fluidized Bed Drying, Grain , Physical Rice Quality

*For further details, contact Mrs. Supawan Tirawanichakul, Energy Tech. Devision, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Soi Suksawat 48, Bangkok 10140, TH.*

## 1. INTRODUCTION

The management of the highly moist paddy under the tropical climate is an extremely serious problem because the high humid air condition can encourage the excessive mould growth and the grain can rapidly releases the energy from their respiration, thus causing the occurrence of yellowness in the kernel. To manage the high quantities of moist paddy (moisture content is higher than 20% wet basis), a well-known fluidization drying technique is used. This dryer type has the advantages of high drying capacity and uniform grain moisture distribution.

Driscoll and Adamczak [1] reported that very high moisture of paddy must be reduced to 22% dry basis within 24 hours to prevent substantial losses. They stated that the fluidized bed dryer gave better economy, gentle grain handling and shorter drying time than the LSU dryer (developed by the Louisiana State University in the mid-1950s).

Sutherland and Ghaly [2] studied the fluidized bed drying of paddy using temperatures of 40-90°C to reduce moisture content from the initial moisture contents of 28.2%-35% dry basis to final moisture content of 20.5%-23.5% dry basis, respectively. They found that a head rice yield between 58-61% was obtained for reducing the initial moisture content of 28.2% dry basis to 20.5% dry basis. For reducing the high initial moisture content of 35% dry basis to the final moisture content of 23.5% dry basis at temperatures of 60-90°C, the head rice yield was in a range of 55-58%. There was the insignificant relationship between head rice yield and drying temperature.

Satayaprasert and Vanishserwatana [3] studied fluidized bed drying of corn at temperatures of 60-90°C using air velocities of 2.7-4.2 m/s and bed depths of 3-12 cm. Their results indicated a logarithmic drying rate, which was virtually implied the moisture transport to be controlled by internal diffusion. Soponronnarit and Prachayawarakorn [4] have significantly contributed to the research and development on fluidized bed drying. They concluded that the drying air temperature and the final moisture content had the greatest effect on paddy quality. They commended that the drying temperature should not over 115°C and final moisture content of paddy was not lower than 24-25% dry basis. Soponronnarit *et al.* [5] designed and constructed the cross flow fluidized bed dryer with a paddy capacity of 200 kg/h and used recycled air for reducing energy consumption. Comparison between their experiment values and simulation values were good agreement.

Quality indexes which is used as an important criterion for evaluating the qualities of rice are the rice yellowing (or whiteness) and head rice. Many researchers have studied on yellowness or whiteness [Quitco [6]; Gras and Bason [7]; Soponronnarit *et al.* [8]; Yap *et al.* [9]]. Gras and Bason [7] reported that the loss of the nutritive value of rice was occurred when the rice had an intense yellow.

Quitco [6] observed the yellowing of milled rice and concluded that the accumulation of fungal metabolites (*Fusarium sp.* *Aspergillus flavous*) might be expected to produce typically the distinctly yellowed individual rice kernel while the non-enzymic browning might cause the overall change in hue. Some microorganisms, such as: *Curvularia sp.*, *Aspergillus terreus* and *A.ochraceus*. might be expected to produce the blacked rice kernels. Quitco [6]; Gras and Bason [7]; and Yap *et al.* [9] studied on the influence of the water activity, temperature and storage atmosphere on

the yellowing of white rice kernels. Gras *et al.* [10] summarized that the water activity and temperature mainly affected the degree of yellowing rates. So far, the rate was slightly affected by the presence of oxygen (O<sub>2</sub>) but not by the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Soponronnarit *et al.* [8] studied on the yellowing of rice kernel. The results were concluded that the yellowing rate was the zero order kinetics and the equation could be used for the range of 35°C to 65°C and water activity of 0.80 to 0.95%. The statistical results were shown that the temperature and water activity significantly influenced the yellowing rate of paddy.

Due to the operation at high drying air temperature for the commercial fluidized bed paddy dryer, the physical qualities of product in terms of head rice yield and whiteness must be maintained and acceptable in market. Thus, the tempering process, which was recommended by many researchers [Steffe *et al.* [11]; Zhang and Litchfield [12] and Soponronnarit *et al.* [13]], was used to temper paddy after fluidized bed drying. Soponronnarit *et al.* [13] suggested to temper the grain between each drying pass because during the tempering period, the moisture profile in the rice kernel is equalized through moisture diffusion and this equalization would decrease the stress caused by moisture gradient within the kernel. Thus, the head rice yield after the next pass of drying could be maintained. Poomsa-ad *et al.* [14] recommended that in drying paddy at high temperature with fluidization technique, it should not be removed the water content lower than 22.5% dry basis in the single stage drying, corresponding to the grain temperature lower than 100°C, with subsequent tempering for 30 minutes. This condition is not only maintained high head rice yield but also prevented the yellowing.

So, the objective of the work is focused on the effect of drying temperature, ranging of 40-150°C, on physical rice qualities in terms of head rice yield and rice whiteness after the whole drying process. The moisture content, rice whiteness and head rice are presented.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Materials

Newly harvested paddy (22-25 %dry basis (d.b.)), which was provided by the National Rice Research Center, Thailand, used in all experiments were rewetted, mixed and kept in a cold storage at a temperature range of 3-7°C for a week. A local variety of long grain rough rice, Suphanburi 1, containing intermediate high amylose content of 27%, was used. The desired initial moisture content of rewetted paddy was about 25-33 %dry basis (d.b.). Before starting the experiments, paddy was placed in the ambient air until grain temperature was close to environmental temperature.

FIGURE 1 illustrates a schematic diagram of batch fluidized bed dryer. The dryer comprised of a cylinder shape drying chamber, a 12 kW electric heating unit (4 heating coils) and a backward curve-blade centrifugal fan driven by a 1.5 kW motor. The drying air temperature was controlled by a PID controller with an accuracy of  $\pm 1^\circ\text{C}$ . A mechanical variable speed unit was used for regulating air flow rate. A constant bed air velocity of 2.5 m/s was set up for paddy bed thickness of 9.5 cm.

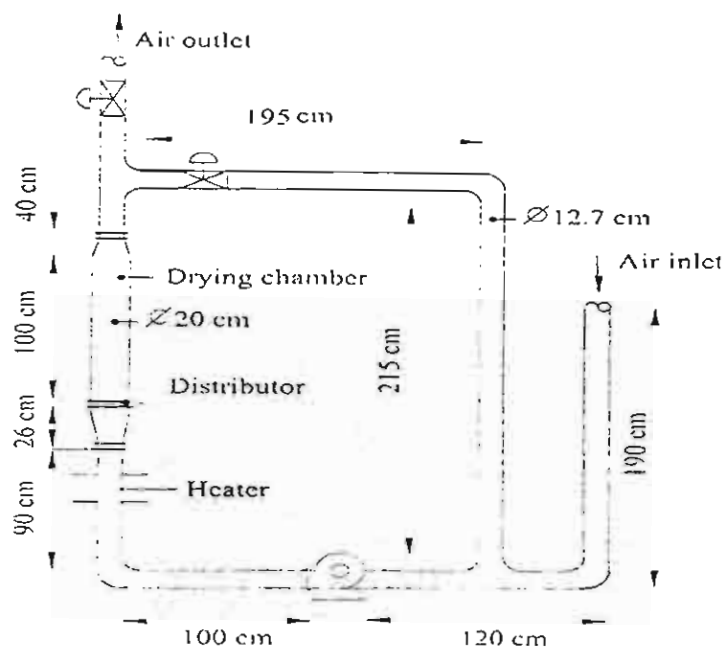


FIGURE 1 Illustrative diagram of batch fluidized bed dryer [Poomsa-ad *et al.*[14]].

## 2.2 Methods

FIGURE 2 illustrates a schematic diagram of drying system used in this work. The desired final moisture content after fluidized bed drying was about 22.5% dry basis [Poomsa-ad *et al.* [14]]. Tempering process was then used for grain relaxation (The second step was shown in FIGURE 2). In this stage, the fluidized paddy would be put into a glass bottle and kept in an oven at the same temperature as the grain temperature. After the fixed tempering time of 30 minutes [Poomsa-ad *et al.* [14]], the paddy was ventilated suddenly with a constant ambient airflow rate of 1.5 m/s. Finally, the paddy was dried to final moisture content of 16.3% dry basis.

The ambient inlet air temperature (both dry bulb and wet bulb temperatures), hot air temperature, bed temperature, air outlet temperature and grain temperature after drying were measured by K-type thermocouples connected to a data logger with an accuracy of  $\pm 1^\circ\text{C}$ . The wet paddy with moisture content of 25-33% dry basis were dried at the drying temperatures of 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 and  $150^\circ\text{C}$  with various drying time of 0.43-58 minutes. The moisture content of paddy was determined by a standard air oven method at  $103^\circ\text{C}$  for 72 hours.

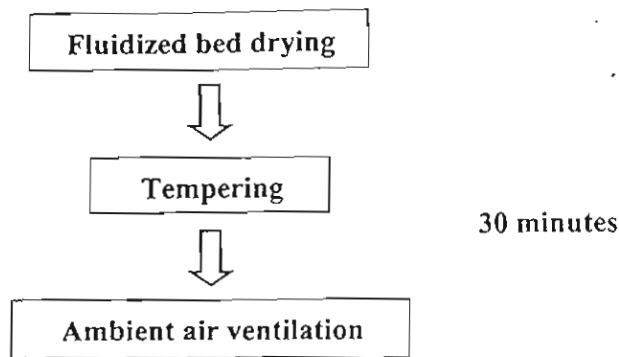


FIGURE 2 Illustrative schematic diagram of fluidized bed drying system

### 2.3 Physical properties analysis

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

The milling quality testing followed the guidelines of standard method. The head rice yield, which was defined as the ratio of mass of head rice obtained from milling to mass of paddy before milling, was determined. Relative head rice yield referred to the ratio of head yield obtained from the above-mentioned process to head rice yield obtained from the controlled sample. The rice whiteness was measured by Satake milling meter.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

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

TABLE 1 was shown the moisture content of paddy after fluidized bed drying in range of 40°C-150°C. These grain temperatures were used for set-up oven temperature when the tempering process was carried on. The results were concluded that the drying time at lower temperature was longer than that at higher drying temperature.

For the tempering temperature, it was shown that at higher drying temperature at 110-150°C, the grain temperature was higher than 80°C. At the drying temperature range of 110-150°C, the average grain temperature was about  $82 \pm 2^\circ\text{C}$ . This temperature range was close to the gelatinized temperature of rice kernel, thus it's possible to get gelatinization occurrence during drying pass and tempering period..

**TABLE 1** Experimental results of moisture content of paddy and grain temperature after fluidized bed drying

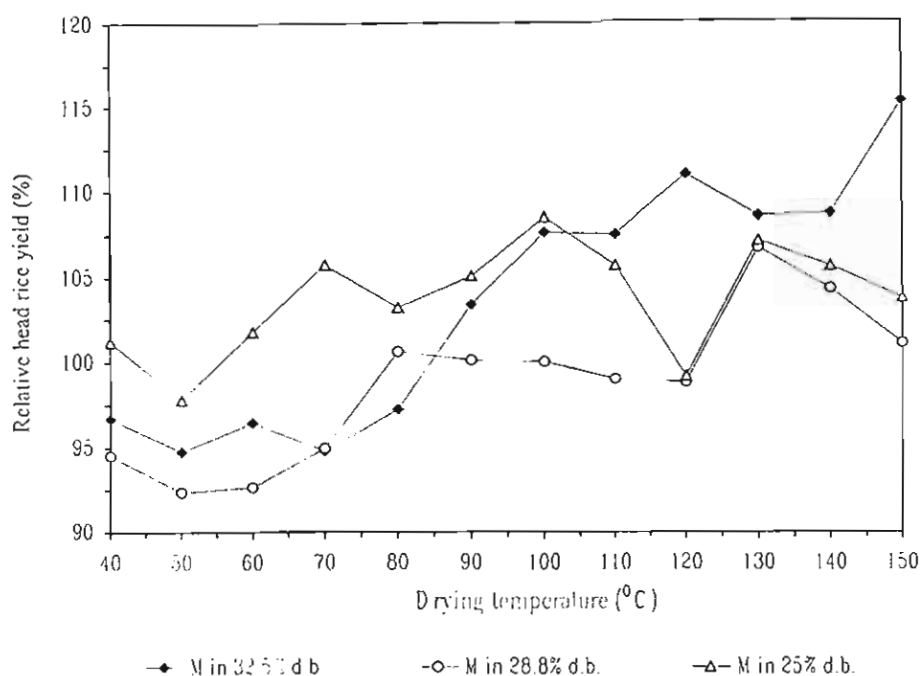
| Drying air temperature (°C) | Initial moisture content (% dry basis) | Drying time (min) | Final moisture content (% dry basis) |
|-----------------------------|----------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 40                          | 25.0                                   | 23.0              | 18.0                                 |
|                             | 28.2                                   | 36.0              | 18.3                                 |
|                             | 32.5                                   | 58.0              | 18.2                                 |
| 50                          | 25.0                                   | 13.0              | 16.8                                 |
|                             | 28.2                                   | 20.0              | 18.4                                 |
|                             | 32.5                                   | 30.0              | 18.4                                 |
| 60                          | 25.0                                   | 7.0               | 18.3                                 |
|                             | 28.2                                   | 11.0              | 18.2                                 |
|                             | 32.5                                   | 21.0              | 17.8                                 |
| 70                          | 25.0                                   | 5.0               | 16.7                                 |
|                             | 28.2                                   | 8.2               | 18.4                                 |
|                             | 32.5                                   | 14.0              | 17.7                                 |
| 80                          | 25.0                                   | 2.3               | 17.2                                 |
|                             | 28.2                                   | 5.3               | 18.4                                 |
|                             | 32.5                                   | 9.2               | 17.7                                 |
| 90                          | 25.0                                   | 2.0               | 18.6                                 |
|                             | 28.2                                   | 3.3               | 18.4                                 |
|                             | 32.5                                   | 6.1               | 17.9                                 |
| 100                         | 25.0                                   | 1.5               | 18.0                                 |
|                             | 28.2                                   | 3.0               | 17.9                                 |
|                             | 32.5                                   | 4.4               | 17.9                                 |
| 110                         | 25.0                                   | 1.3               | 18.0                                 |
|                             | 28.2                                   | 2.4               | 17.7                                 |
|                             | 32.5                                   | 3.4               | 18.1                                 |
| 120                         | 25.0                                   | 1.3               | 17.0                                 |
|                             | 28.2                                   | 2.0               | 18.6                                 |
|                             | 32.5                                   | 3.1               | 18.7                                 |
| 130                         | 25.0                                   | 1.1               | 17.0                                 |
|                             | 28.2                                   | 1.4               | 18.5                                 |
|                             | 32.5                                   | 2.5               | 17.7                                 |
| 140                         | 25.0                                   | 1.0               | 17.0                                 |
|                             | 28.2                                   | 1.2               | 18.4                                 |
|                             | 32.5                                   | 2.3               | 17.9                                 |
| 150                         | 25.0                                   | 0.4               | 17.5                                 |
|                             | 28.2                                   | 1.1               | 19.2                                 |
|                             | 32.5                                   | 2.0               | 18.0                                 |

### 3.2 Physical qualities analysis

#### (a) Head rice yield

FIGURE 3 illustrated the evolution of head rice yield of paddy in all experiments. They were shown that in drying temperature range of 40-150°C, the head rice yield of those experiments were slightly different, especially for low drying temperatures of 40-100°C. These were because the rice kernel was partially gelatinized cause effect on hardness of rice. The rice after drying was tightly packed with polygonal granules and spherical shaped protein bodies and these results were corresponding to previous work (Poomsa-ad *et al.*[14]). These results implied that at the high drying

temperature of 110-150°C and initial moisture content of 32.5% dry basis, a drying temperature effected to the physical quality of rice in terms of head rice yield.



**FIGURE 3** Relationship between head rice yield and fluidized bed drying temperature: Initial moisture contents of 25-33% dry basis: final moisture content of 16.3 % dry basis : Average head rice yield of control rice 50%

*(b) Whiteness of rice*

**FIGURE 4** illustrates the evolution of whiteness of rice in each drying temperature. For high initial moisture content of paddy 32.5% dry basis, the whiteness decreased when the drying temperature increased. This is because the high temperature caused the yellowing of rice kernel, implying reduce the whiteness values (non-enzymatic reaction). For the initial moisture contents of 28.8% dry basis, it was found that the drying temperature had significant effect on the whiteness of rice kernel. However, throughout these experiments, the values of rice whiteness are still accepted for the commercial propose. The rice whiteness should not be lower than 45 for good quality in the rice market.

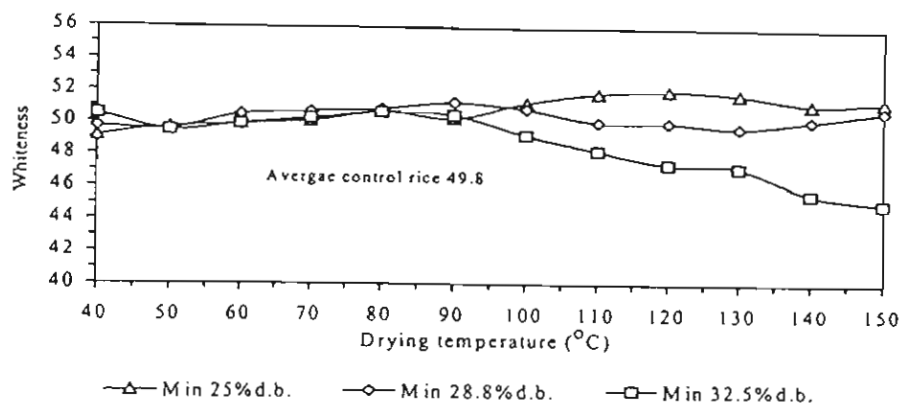


FIGURE 4 Evolution of whiteness of rice after fluidized bed drying process : Initial moisture content of paddy 25-33% d.b. : Final moisture content 16.3% d.b. (after air ventilation)

#### 4. CONCLUSIONS

1. At drying temperatures of 40-150°C for fluidized bed drying, the value of rice whiteness was in acceptable range and relative head rice yield is above 98% compared to the reference sample.
2. At high initial moisture content of 32.5% dry basis, when the drying temperature increased the degree of yellowness increase too. This is because the non-enzymatic reaction in paddy.

#### ACKNOWLEDGEMENT

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

#### REFERENCES

1. R.H. Driscoll and T. Adamczak, Drying Systems for the Humid Tropics. In : Bulk Handling and Storage of Grain in the Humid Tropics, ACIAR Proceedings, 22, p. 58-68, 1988.
2. J.W. Sutherland, and T.F. Rapid Fluid-Bed Drying of Paddy Rice in the Humid Tropics, Proc. of the 13<sup>th</sup> ASEAN Seminar on Grain Postharvest Technology, 4-7 September, Brunei Darussalam, p. 168-177, 1990.
3. C., Satayaprasert and V. Vanishserwatana, Drying Corn in Fluidized Bed, Thailand Engineering Journal, 44(12), p. 76-79, 1992.
4. S. Soponronnarit and S. Prachayawarakorn, Maintaining Quality, Maximizing Throughput and Minimizing Energy Consumption in Fluidized Bed Paddy Drying, Proc. of the 15<sup>th</sup> ASEAN Seminar on Postharvest Technology, 8-11 September, Singapore, 1992.

5. S. Soponronnarit, S. Prachayawarakorn and O. Sripawatakul, Development of Cross-Flow Fluidized Bed Paddy Dryer, Drying Technology, 17(1&2), p. 335-344, 1996.
6. R.T. Quitco, Studies of Fungal Infection and Heating of Paddy, Proc.GASGA Seminar, Paddy Deterioration in the Humid Tropics, p. 52-56, GTZ, Eschborn, 1982.
7. P.W. Gras and M.L. Bason, Biochemical Effects of Storage Atmospheres on Grain and Grain Quality, ACIAR Proceeding, No.25, Fumigation and Controlled Atmosphere Storage of Grain, p. 83-91, 1989.
8. S. Soponronnarit, N. Srisubati and T. Yoovidhya, Effect of Temperature and Relative Humidity on Yellowing Rate of Paddy, J.Stored Prod. Res., 34(4), p. 323-330, 1998.
9. A.B. Yap, B.O. Juliano and C.M. Perez, Artificial Yellowing of Rice at 60°C, Proceeding Group, The Source of Yellow Grains in Rice, Myc. Centralbl, 3, p. 153-157, 1988.
10. P.W. Gras, H.J. Banks, M.L. Bason and L.P. Arriola, A Qualitative Study of the Influences of Temperature, Water Activity and Storage Atmosphere on the Yellowing of Milled Rice, J. of Cereal Science, 9, p. 77-89, 1989.
11. J.F. Steffe, R.P. Singh and A.S. Bakshi, Influence of Tempering Time and Cooling on Rice Milling Yields and Moisture Removal. Trans. Of ASAE, 22, p. 1214-1218, 1224, 1979.
12. Q. Zhang and J.B. Litchfield, An Optimization of Intermittent Corn Drying in a Laboratory Scale Thin Layer Dryer, Drying Technology, 9(11), p. 233-244, 1991.
13. S. Soponronnarit, S. Wetchama, T. Swasdisevi and N. Poomsa-ad, Managing Moist Paddy by Drying, Tempering and Ambient Air Ventilation, Drying Technology, 17(1&2), p. 335-344, 1999.
14. N. Poomsa-ad, S. Soponronnarit, A. Terdyothin and S. Prachayawarakorn, Head Rice Yield after Drying by Fluidization Technique and Tempering, The 2<sup>nd</sup> Asia-Oceania Drying Conference, Batu-Feringhai, Penang, Malaysia, 20-22 August, 2001.
15. M.L. Bason, P.W. Gras, H.J. Banks and L.A. Esteves, A Qualitative Study of the Influences of Temperature, Water Activity and Storage Atmosphere on the Yellowing of Paddy Endosperm, J. of Cereal Science, 12, p. 193-201, 1990.

## การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดพืชชนิดต่าง ๆ STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES FOR GRAINS

Somkiat Prachayawarakorn<sup>1</sup> Somchart Soponronnarit<sup>2</sup>  
and Keiichi Inoue<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, <sup>2</sup> Energy and Materials  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Suksawat 48 Road, Bangkok 10140, Thailand  
<sup>3</sup> Hokkaido National Research Center, Sapporo Japan

**บทคัดย่อ:** ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นในเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ หรือการออกแบบระบบอบแห้งเมล็ดพืชในที่เก็บนั้น มีความจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติเบื้องต้นของเมล็ดพืช อาทิ เช่น ขนาด ความหนาแน่น ความพรุน ปริมาตรจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน เป็นต้น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นสำหรับคุณสมบัติดังกล่าวสำหรับเมล็ดพืชหลาย ๆ ชนิด เช่น ข้าวเปลือกที่มีเมล็ดยาว และสั้น ข้าวไรย์ ข้าวสาลีและ buck wheat เป็นต้น โดยได้ดำเนินการทดลองในช่วงความชื้นระหว่าง 15% ถึง 32 % มาตรฐานแห้ง จากการทดลองพบว่า ความหนาแน่นจริง และความหนาแน่นปรากฏของข้าวเปลือกชนิดยาว เปลี่ยนแปลงในลักษณะผกผันกับความชื้น ขณะที่ขนาดและปริมาตรจำเพาะจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นตรง ในการอธิบายค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน สำหรับตัวอย่างเมล็ดพืชดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ power law โดยค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานขึ้นอยู่กับตัวเลขเรย์โนลด์ และชนิดของเมล็ดพืช

**ABSTRACT:** In designing the in-store drying system for grains or analysing the heat and mass transfers occurring within dryer, it is necessary to know the primary physical properties such as size, density, specific volume and friction factor in order to obtain the accurate results. In this work, we have experimentally determined such properties for the *Indica* and *Japonica* paddy, rye paddy, wheat and buck wheat at the moisture content between 15% and 32% dry-basis. The results have been shown that the true and bulk densities vary inversely with moisture content, but the specific volume and size change proportionally. A simple power law model can suitably describe the friction factor for the grains. The friction is strongly dependent on the Reynolds number and the grain type.

**KEYWORDS:** Friction factor, Grain, Physical property

*For further details, contact*

## 1. บทนำ

การอบแห้งเป็นการไล่ความชื้นออกจากวัสดุ เพื่อต้องการให้วัสดุสามารถเก็บได้เป็นระยะเวลานาน และปลอดภัยจากเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับเมล็ดพืชชนิดต่าง ๆ นั้นความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาอยู่ในช่วงประมาณ 13-14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ในกรณีที่มีเมล็ดพืชมีความชื้นสูงนั้น มีอัตราเสี่ยงสูงที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหายได้ง่าย ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของข้าว ข้าวอาจมีสีเหลือง และเชื้อราเกิดขึ้นภายในกองข้าว สำหรับข้าวโพดนั้นอาจมีการติดเชื้อ *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus paracitius* เชื้อดังกล่าวนี้เมื่อมีการเจริญเติบโตจะมีการสร้างสารแอลฟาทอกซิน [1] ซึ่งเป็นสาเหตุก่อให้เกิดมะเร็งขึ้นภายในสัตว์หรือคนที่บริโภค จากการที่คุณภาพด้อยลงส่งผลต่อเนื้อหาราคาของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรต่ำลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องลดความชื้นของเมล็ดพืช ในการลดความชื้นนั้นโดยปกติทั่วไปแรกเริ่มจะใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง เครื่องอบแห้งที่ใช้ในปัจจุบันมีด้วยกันหลายประเภท เช่น เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง LSU ฟลูอิดไคซ์เบด เป็นต้น

การลดความชื้นที่เกิดขึ้นภายในเครื่องอบแห้งมักเกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างวัฏภาคของแก๊สและของแข็ง โดยทั่วไปเรามักพบว่าการลดความชื้นเกิดขึ้นค่อนข้างช้ากว่ากระบวนการถ่ายเทความร้อน จากสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งอยู่ในเกณฑ์สูง และประสิทธิภาพในการอบแห้งต่ำ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของการอบแห้งจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องอบแห้งเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพนั้นมีความจำเป็นที่ต้องทราบคุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดพืช ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของเมล็ดพืช เช่น ความหนาแน่น ขนาด ปริมาตรจำเพาะ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเมล็ดพืช เป็นต้น โดยใช้ข้าวกล้องพันธุ์ *Indica* และ *Japonica* ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และ buck wheat

### 1.1 ขนาดของเมล็ดพืช

ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ มักมีรูปร่างไม่แน่นอน และเป็นการยากที่จะหาขนาด ปริมาตร และพื้นที่ผิวได้อย่างถูกต้อง การใช้ตัวปรับแก้ค่า (Correction factor) พร้อมกับสมมติให้รูปร่างของผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิตมักเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป สำหรับในงานวิจัยนี้เมล็ดพืชชนิดต่าง ๆ มีลักษณะเป็นรูปร่างคล้ายทรงกระบอกดังแสดงในดังรูปที่ 1 จากรูปเป็นการแสดงลักษณะรูปร่างของข้าวกล้อง โดย  $C$  เป็นความยาวความแนวแกนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง  $C'$  เป็นความยาวความแนวแกนในช่วงที่ความกว้างคงที่  $a$  เป็นความกว้างของเมล็ดพืช และ  $b$  คือความหนา จากขนาดในด้านต่างๆ ของเมล็ดพืช เราสามารถคำนวณหาคุณสมบัติทางกายภาพเมล็ดพืชได้ดังนี้

#### 1.1.1 พื้นที่ผิว

พื้นที่ผิวของเมล็ดพืชสำหรับหนึ่งเมล็ดสามารถคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$S = (\pi/2)(ab + b\gamma c + a\gamma c) \quad (1)$$

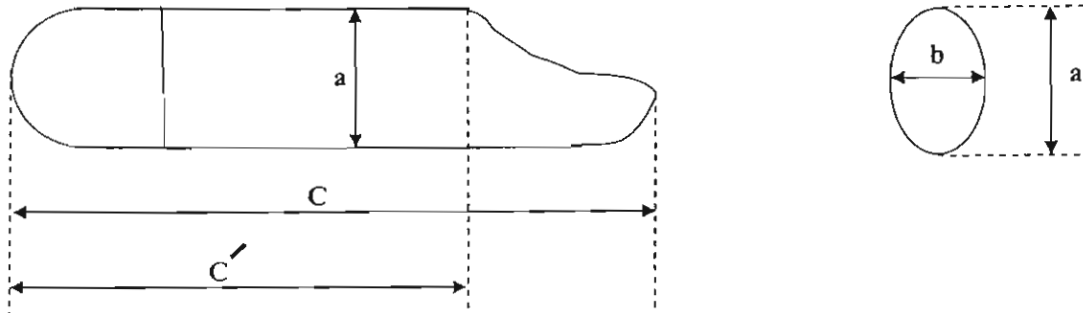
โดยที่  $S$  คือพื้นที่ผิวของเมล็ดพืชหนึ่งเมล็ด และ  $\gamma$  คือตัวปรับแก้ค่า ( $c'/c$ ) สำหรับในงานวิจัยนี้เราสมมุติว่าค่าของ  $\gamma$  มีค่าคงที่สำหรับเมล็ดพืชชนิดหนึ่ง ๆ

### 1.1.2 ปริมาตร

ปริมาตรของเมล็ดพืชคำนวณจากสมการที่ (2)

$$V_p = \gamma \pi a b c / 6 \quad (2)$$

โดยที่  $V_p$  คือปริมาตรของเมล็ดพืชสำหรับหนึ่งเมล็ด จากการที่ทราบปริมาตร เราสามารถคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า ( $D_p$ ) และความเป็นทรงกลม ( $\phi$ ) ได้จากสมการดังต่อไปนี้



A) Front view

B) Side view

รูปที่ 1 รูปร่างและขนาดของข้าวเปลือก

### 1.1.3 เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า ( $D_p$ )

$$D_p = (6V_p / \pi)^{1/3} \quad (3)$$

### 1.1.4 ความเป็นทรงกลม ( $\phi$ )

$$\phi = 6 / (a_p D_p) \quad (4)$$

เมื่อ  $a_p$  คืออัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ถ้าค่าของ  $\phi$  มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง นั้นแสดงว่าเมล็ดพืชมีรูปร่างเข้าใกล้ทรงกลมมากเท่านั้น

### 1.1.5 สัดส่วนช่องว่าง

เราสามารถคำนวณสัดส่วนช่องว่างระหว่างเมล็ดพืชขณะที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้งได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของเมล็ดพืชดังสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon = 1 - (\rho_s / \rho_p) \quad (5)$$

โดยที่  $\varepsilon$ ,  $\rho_s$  และ  $\rho_p$  คือสัดส่วนช่องว่าง ความหนาแน่นจริง และความหนาแน่นปรากฏตามลำดับ

#### 1.1.6 ปริมาตรจำเพาะ

ปริมาตรจำเพาะคือ ปริมาตรของเมล็ดพืชหารด้วยมวลแห้งของเมล็ดพืช (ไม่มีความชื้น) คำจำกัดความนี้มีลักษณะตรงกันข้ามกับความหนาแน่น พารามิเตอร์ดังกล่าวนี้มีประโยชน์ในการคำนวณหาปริมาตรของเบดที่ลดลงขณะที่เมล็ดพืชกำลังอบแห้ง สำหรับในการคำนวณหาขนาดของเมล็ดพืชที่เปลี่ยนแปลงไปขณะอบแห้งนั้นนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ระเหย

ปริมาตรจำเพาะที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 2 ชนิด คือปริมาตรจำเพาะจริง (specific true volume) และปริมาตรจำเพาะปรากฏ (specific bulk volume) ปริมาตรจำเพาะทั้งสองสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V'_i = V_i / m_d \quad (6)$$

$$V'_b = V_b / m_d \quad (7)$$

โดยที่  $V'_i$ ,  $V'_b$ ,  $V_i$  และ  $V_b$  คือ ปริมาตรจำเพาะจริง ปริมาตรจำเพาะปรากฏ ปริมาตรจริง และปริมาตรปรากฏ (bulk volume) ตามลำดับ สำหรับ  $m_d$  เป็นมวลแห้งของเมล็ดพืช

#### 1.2 ความดันลด

ในการคำนวณหาความดันลดภายในเบดนั้นอาจกล่าวทั่วไปได้ว่ามีด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีแรกนั้นเป็นการพิจารณาอนุภาคของแข็งภายในเบดมีลักษณะเป็นกลุ่มท่อที่มีการจัดเรียงตัวและมีพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกัน สำหรับในวิธีที่สองนั้นพิจารณาเบดประกอบด้วยกลุ่มของวัตถุที่จมอยู่ภายใต้ของไหล และความดันลดสามารถคำนวณได้จากการรวมกันของความต้านทานที่เกิดขึ้นจากวัตถุดังกล่าว อย่างไรก็ตามวิธีแรกค่อนข้างมีประโยชน์และเราจะนำมาใช้ในการคำนวณความดันลดภายในเบด

ในการคำนวณหาความดันลดที่เกิดขึ้นนั้นเราสมมติว่าการจัดเรียงตัวของของแข็งภายในเบดนั้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและไม่มี channelling เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังสมมติว่าอิทธิพลของผนังเบดมีผลกระทบน้อยมากต่อความดันลด ความดันลดที่เกิดขึ้นภายในเบดสามารถคำนวณได้จากสมการ [2]

$$\Delta P/L = f \left( 25[1-\varepsilon]^2 \rho_{air} u^2 \right) / \left( 4\varepsilon^3 \phi D_p \right) \quad (8)$$

เมื่อ  $u$  คือความเร็วที่ไหลผ่านเบด

$\Delta P$  คือความดันลดคร่อมเบด

$f$  คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

$L$  คือความสูงของเบด

แทนค่าเทอม  $\phi D_p$  ด้วย  $6/a_p$  ในสมการที่ (8) จะได้

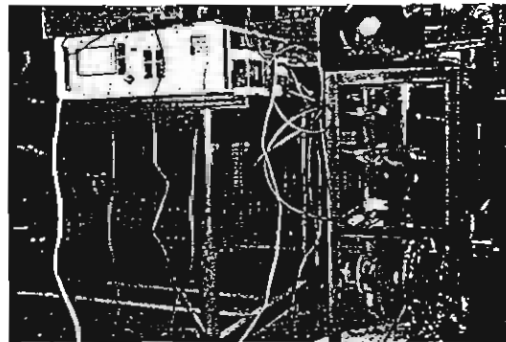
$$\Delta P/L = f \left( 25[1-\varepsilon]^2 a_p \rho_{air} u^2 \right) / (24 \varepsilon^3 p) \quad (9)$$

$f$  มีความสัมพันธ์กับตัวเลขเรย์โนลด์ตามสมการดังต่อไปนี้

$$f = A (Re)^B \quad (10)$$

โดยที่  $Re = \frac{\phi D_p u \rho_{air}}{\mu_{air}}$  และ ค่าของ A และ B เป็นค่าคงที่ของการทดลองขึ้นอยู่กับชนิดของเม็ดพืช และตัวเลขเรย์โนลด์

## 2. วิธีการทดลอง



รูปที่ 2 โคอะแกรมของเครื่องที่ใช้ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

### 2.1 การวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

รูปที่ 2 แสดงโคอะแกรมของระบบสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านเบดควบคุมโดยใช้ frequency inverter ภาชนะที่ใช้บรรจุเม็ดพืชทำด้วย PVC ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10.8 cm และใช้ตาข่ายพลาสติกเป็นตัวรองรับวัสดุภายในเบด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง pressure transducer ที่มีความถูกต้อง  $\pm 5$  Pa ได้ใช้เป็นตัววัดความดันของอากาศขณะที่ไหลผ่านกองเม็ดพืช นอกจากความดัน เรายังมีการวัดอุณหภูมิภายในเบดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีความถูกต้อง  $\pm 1^\circ\text{C}$  ความเร็วของอากาศภายในท่อ PVC วัดโดย hot wire anemometer ( $\pm 0.1$  m/s, model 1002, NIHON KAGAKU KOGYO Co. LTD.) เครื่องมือวัดที่กล่าวมาทั้งหมดได้นำมาต่อเข้ากับ data acquisition (model NR-1000, KEYENCE Co., LTD.) โดยทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที อุณหภูมิและความดันได้ทำการวัดที่ ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของท่อที่ระยะความสูงต่างๆ สำหรับความเร็วได้ทำการวัด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างจุดวัดความดันทั้งสอง

ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ข้าวสาลีที่นำเปลือกออก ข้าวกล้องพันธุ์ *Indica* ข้าวเปลือก *Japonica* ข้าวไรย์ และ buck wheat ได้นำมาทดสอบหาความสัมพันธ์แรงเสียดทาน ความชื้นของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ได้นำมาหาความชื้นโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

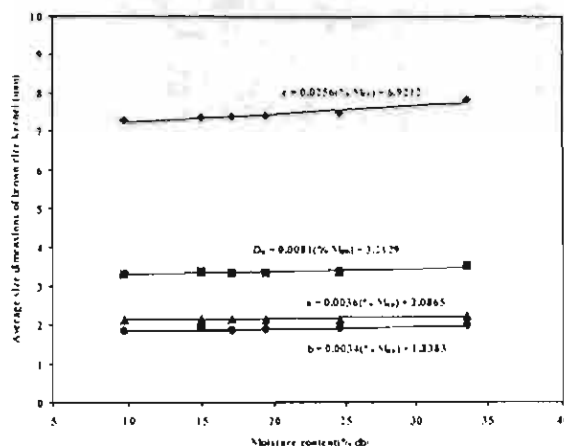
## 2.2 การวัดคุณสมบัติทางกายภาพ

ในการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของเมล็ดพืชขณะอบแห้งนั้นได้ทำการทดสอบกับข้าวกล้องพันธุ์ *Indica* โดยตัวอย่างข้าวกล้องได้ทำการเพิ่มความชื้นให้ได้ความชื้น 33% เปอร์เซนต์มาตรฐานแห้ง จากนั้นได้ทำการอบแห้งโดยใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำมาก ๆ โดยควบคุมอุณหภูมิอบแห้งไว้ที่ 25°C ในระหว่างการอบแห้ง ข้าวกล้องได้นำตัวอย่างข้าวกล้องมาทำการวัดขนาด และ ปริมาตรของข้าวกล้อง ในการวัดขนาดนั้นได้ใช้ตัวอย่างเมล็ดข้าวจำนวน 10 เมล็ด และในการวัดทุกครั้งได้ใช้กลุ่มตัวอย่างเดิม สำหรับการหาความหนาแน่น และ ปริมาตรจำเพาะได้ใช้เครื่องมือวัดแบบสูญญากาศรุ่น DIK-110 DAIKI RIKA KOGYO Co., LTD

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

### 3.1 ขนาดเมล็ดพืช

จากการทดลองพบว่าขนาดของข้าวกล้องเปลี่ยนแปลงกับความชื้น โดยความยาวในด้านที่ยาวที่สุด(C) มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูงกว่าด้านอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งสามารถสังเกตได้ง่ายจากความชันของเส้นกราฟ จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่าความชันในด้านของ a b และ C เป็น 0.0036 0.0034 และ 0.0256 ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงขนาดของเมล็ดกับความชื้นอธิบายด้วยสมการเชิงเส้นตรงดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงขนาดในด้านต่าง ๆ ของเมล็ดพืชสำหรับข้าวกล้องชนิด *Indica*

$$C(\text{mm}) = 0.0256(\%M_{db}) + 6.9212 \quad (11)$$

$$a(\text{mm}) = 0.0036(\%M_{db}) + 2.0865 \quad (12)$$

$$b(\text{mm}) = 0.0034(\%M_{db}) + 1.838 \quad (13)$$

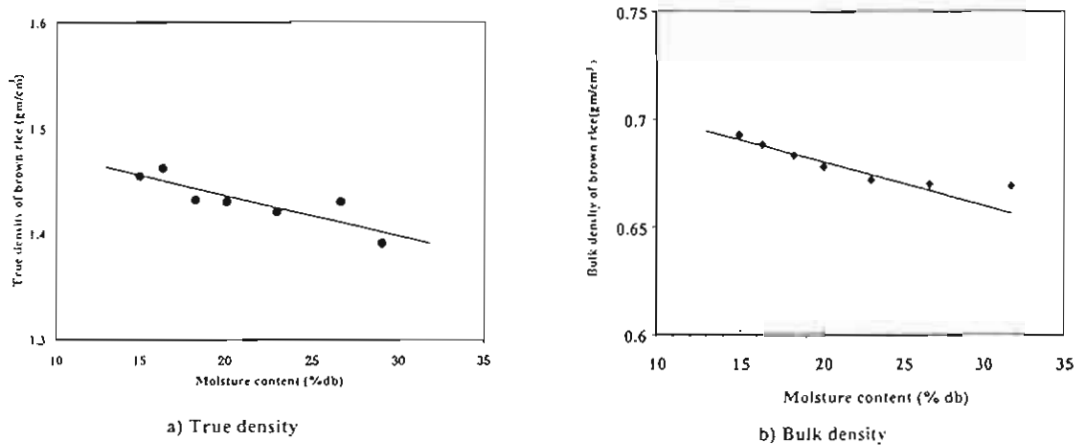
$$D_p(\text{mm}) = 0.0081(\%M_{db}) + 3.2129 \quad (14)$$

### 3.2 ความหนาแน่น

รูปที่ 4 แสดงความหนาแน่นจริง ( $\rho_t$ ) และความหนาแน่นปรากฏ ( $\rho_b$ ) สำหรับข้าวกล้องพันธุ์ *Indica* จากรูปชี้ให้เห็นว่าความหนาแน่นลดลงเป็นเชิงเส้นตรงกับความชื้นของเมล็ดพืช ความหนาแน่นจริงเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงระหว่าง 1.34 และ 1.47 gm/cm<sup>3</sup> ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงระหว่าง 14% ถึง 29% มาตรฐานแห้ง และสำหรับการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นปรากฏจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.6 และ 0.7 gm/cm<sup>3</sup> จากข้อมูลดังกล่าว นำมาพิดกราฟโดยใช้สมการเส้นตรงมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น โดยมีค่าคงที่ต่างๆ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\rho_t = -0.0038(\%M_{db}) + 1.526 \quad R^2 = 0.76 \quad (15)$$

$$\rho_b = -0.002(\%M_{db}) + 0.721 \quad R^2 = 0.94 \quad (16)$$



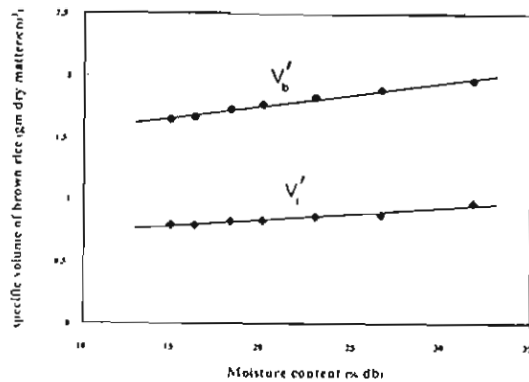
รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกับความชื้น

### 3.3 ปริมาตรจำเพาะ

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรจำเพาะจริง ( $v'_t$ ) และปริมาตรปรากฏ ( $v'_b$ ) กับความชื้น จากกราฟจะเห็นว่าปริมาตรจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลง ซึ่งผลดังกล่าวนี้ตรงกันข้ามกับผลของความหนาแน่น สมการเส้นตรงที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะจริง และปริมาตรปรากฏสำหรับข้าวกล้องเป็นดังนี้

$$v'_t = 0.0104(\%M_{db}) + 0.6295 \quad R^2 = 0.96 \quad (17)$$

$$v'_b = 0.0193(\%M_{db}) + 1.371 \quad R^2 = 0.98 \quad (18)$$

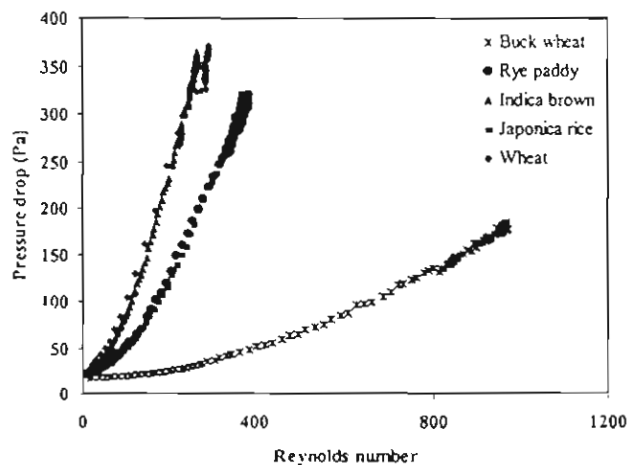


รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะกับความชื้น

ผลจากการพิตกราฟจะเห็นว่า สมการเส้นตรงที่ใช้ในการทำนายปริมาตรจำเพาะจะให้ค่าเบี่ยงเบนในการทำนายผลน้อยกว่าในกรณีของสมการเส้นตรงสำหรับทำนายความหนาแน่น ซึ่งสังเกตได้จากค่าของ  $R^2$

### 3.4 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

รูปที่ 6 แสดงค่าความดันลดขณะให้อากาศไหลผ่านชั้นเบดของเมล็ดพืชชนิดต่างๆ ข้อมูลที่แสดงได้มาจากการทดลองที่ความหนาของเบดเท่ากับ 102.36 mm ความดันลดสูงสุดเกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านชั้นเบดของข้าวสาลีและข้าวกล้องชนิด *Indica* ขณะที่ความดันลดต่ำสุดเมื่ออากาศไหลผ่าน buck wheat จากข้อมูลความดันที่ได้เราสามารถคำนวณหา  $f$  จากสมการที่ (9) สำหรับคุณสมบัติต่างๆ ของเมล็ดพืชชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 1 จากตารางจะเห็นว่า buck wheat มีลักษณะความเป็นทรงกลมมากที่สุด และมีขนาดใหญ่มากที่สุด

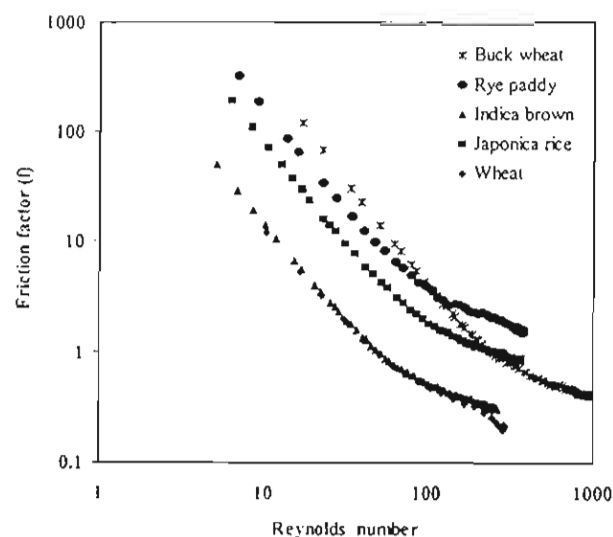


รูปที่ 6 แสดงความดันลดของเมล็ดพืชชนิดต่างๆ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดพืชชนิดต่างๆ

| Properties                           | Agricultural Products |                |                   |           |            |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------|-------------------|-----------|------------|
|                                      | Wheat                 | Japonica paddy | Indica brown rice | Rye paddy | Buck wheat |
| Equivalent diameter (mm)             | 3.76                  | 4.05           | 3.34              | 4.67      | 10.36      |
| Volume (mm <sup>3</sup> )            | 27.8                  | 34.9           | 19.55             | 53.5      | 581.85     |
| Surface area (mm <sup>2</sup> )      | 52.6                  | 64.5           | 45.44             | 90.27     | 389.93     |
| Bulk density (gm/cm <sup>3</sup> )   | 0.776                 | 0.533          | 0.795             | 0.418     | 0.607      |
| True density (gm/cm <sup>3</sup> )   | 1.37                  | 1.421          | 1.67              | 1.29      | 1.23       |
| Space ratio(E)                       | 0.44                  | 0.64           | 0.52              | 0.67      | 0.51       |
| Sphericity ( $\phi$ )                | 0.84                  | 0.80           | 0.77              | 0.76      | 0.86       |
| Moisture content (%M <sub>db</sub> ) | 15.0                  | 16.0           | 16.0              | 17.0      | 11.5       |

ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน กับตัวเลขเรย์โนลด์แสดงใน รูปที่ 7 จากรูปจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงที่ค่าของตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในลักษณะเชิงเส้นตรง (พลอตอยู่ในรูปของ สเกล log-log) เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งเข้าใกล้ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 60 สำหรับเมล็ดพืชชนิดต่างๆ ยกเว้นสำหรับของ buck wheat จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีการเปลี่ยนไปไม่มากนักเมื่อเทียบกับช่วงที่ตัวเลขเรย์โนลด์น้อย ๆ จากรูปที่ 7 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ buck wheat มีค่ามากที่สุด ในช่วงของตัวเลขเรย์โนลด์น้อย ๆ แต่เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 125 กลับพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของข้าวไรย์กลับมีค่าสูงสุด



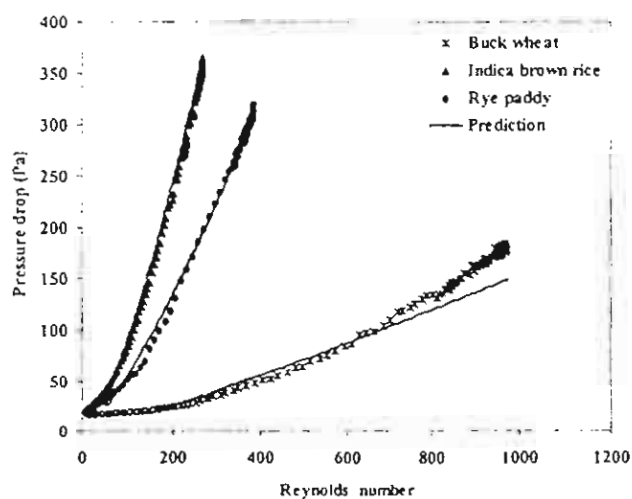
รูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสำหรับเมล็ดพืชชนิดต่างๆ

ค่าคงที่ของ A B และ  $R^2$  สำหรับข้าวสาลี ข้าวกล้องชนิด *Indica* ข้าวเปลือกชนิด *Japonica* และ buck wheat ที่ช่วงของตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำและสูง แสดงในตารางที่ 2 ค่าคงที่ต่างๆ เหล่านี้ได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression analysis) จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของ A เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน โดยเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างระหว่าง 8 ถึง 12088

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของ A และ B สำหรับเมล็ดพืชชนิดต่างๆ

| Products                 | A       | B       | Re   | $R^2$ |
|--------------------------|---------|---------|------|-------|
| Wheat                    | 554.981 | -1.652  | 60<  | 0.99  |
|                          | 20.7728 | -0.8088 | >60  | 0.99  |
| <i>Japonica</i> paddy    | 6241.62 | -1.900  | 60<  | 0.99  |
|                          | 44.1781 | -0.6754 | >60  | 0.99  |
| <i>Indica</i> brown rice | 996.167 | -1.840  | 60<  | 0.99  |
|                          | 8.71567 | -0.6014 | >60  | 0.99  |
| Rye paddy                | 12088.1 | -1.881  | 60<  | 0.99  |
|                          | 129.897 | -0.7533 | >60  | 0.99  |
| Buck wheat               | 30497   | -1.948  | 125< | 0.99  |
|                          | 168.75  | -0.9027 | >125 | 0.98  |

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายความดันตกของท่ออากาศไหลผ่านเบดเมล็ดพืชชนิดต่าง ๆ กับผลที่ได้จากการทดลอง ในการคำนวณหาความดันนั้นเราคำนวณโดยใช้สมการที่ (9) พร้อมกับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานโดยใช้ค่าคงที่ของ A และ B จากตารางที่ 2 จากกราฟจะเห็นว่าผลการคำนวณมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง



รูปที่ 8 เปรียบเทียบการทำนายความดันตกกับผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับตัวอย่างเมล็ดพืชชนิด

#### 4. สรุป

ข้อมูลของคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นสำหรับของข้าวกล้องชนิด *Indica* ข้าวเปลือกชนิด *Japanica* ข้าวสาเลิ ข้าวไรย์ และ buck สมการต่างๆ ที่เสนอสามารถอธิบายผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ ได้ค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลองภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ได้ดำเนินการทดลอง อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับเงื่อนไขที่ไม่ตรงกับสภาวะที่ได้ดำเนินการทดลอง คุณสมบัติต่างๆ ที่คำนวณได้อาจมีความผิดพลาดบ้างพอสมควร

#### 5. คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและ Japan International Research Center for Agricultural Sciences ที่สนับสนุนทางการเงินสำหรับโครงการวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

1. Siriacha, P., Tanboon-Ek, P., Buangsuwon, D., 1991. Aflatoxin in maize in Thailand. In: Champ, B.R., Highley, E., Hocking, A.D., Pitt, J.I., (Eds), Fungi and Mycotoxins in Stored Products: proceeding of an international conference, Bangkok, Thailand, 23-26 April 1991. ACIAR Proceedings No.36, pp.187-193.
2. Inoue, K., Ootsuka, K., Suugimoto, M., Murakami, N. and Li, W., 1999, Drying Conditions of Temperature and Humidity of Forced Air for Soybeans (Part1), Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery(JSAM),Vol61(1)

## การศึกษาเปรียบเทียบการอบทุเรียนด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง A Comparative Study of Drying Durian with Hot Air and Superheated Steam

จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์<sup>1</sup>, สมเกียรติ ปรัชญาวรรณ<sup>2</sup>, อติศักดิ์ นาถกรณกุล<sup>3</sup> และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาเอก, <sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์, <sup>3</sup>ศาสตราจารย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กทม. 10140

**บทคัดย่อ :** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งทุเรียนด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140, 150 และ 170°C และความเร็ว 2.8 m/s ที่เวลาต่าง ๆ โดยทุเรียนที่อบแห้งมีขนาด (กว้าง×ยาว×หนา) 20×20×2 mm ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงความชื้น สี และความกรอบของผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นและความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง สำหรับการอบแห้งด้วยตัวกลางทั้งสองชนิดเมื่อเวลาผ่านไปจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสีแดง ค่าสีเหลืองและค่าการเปลี่ยนแปลงสีรวมที่สูงขึ้น ในขณะที่ค่าความสว่างลดลง ทุเรียนซึ่งอบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีลักษณะผิวที่เป็นมันวาวและสีแดงเข้มกว่าทุเรียนที่อบด้วยอากาศร้อน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบทุเรียนที่อบได้กับทุเรียนทอดด้วยน้ำมันพบว่า ความกรอบของทุเรียนที่ทอดด้วยน้ำมันมีค่าน้อยกว่าทุเรียนที่อบด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

**ABSTRACT :** This research is a comparative study of drying durian with hot air and superheated steam at the drying medium temperature of 140, 150 and 170°C, the drying media velocity of 2.8 m/s and the material dimension (width×length×thickness) of 20×20×2 mm. The studied parameters were moisture, color and crispiness change according to drying time. The experimental results showed that at the same drying medium temperature, drying with hot air gave faster moisture change and crispier final product than drying with superheated steam. For both drying media, redness (a), yellowness (b) and total color difference ( $\Delta E$ ) had a risen tendency with drying time, whereas lightness (L) was vice versa. The products dried by superheated steam were more reddish and glossier than those dried by hot air. However, durian slices dried by superheated steam and hot air had more crispiness than commercial deep fried durian.

**Keywords :** Crispiness / Durian / Superheated Steam

## 1. Introduction

Thailand is located in a tropical region suitable for various fruit cultivation. A series of fruits have been planted and harvested all over the year such as durian, banana and jackfruit. Being rich in agro-products of Thailand makes preservation techniques more necessary. Solar drying of fruits has been employed for years as one of the preservation techniques but time consuming is its disadvantage. There were extensive researches connected to drying technology for decade to produce final dried fruits of desired quality at minimum cost and maximum throughput. The concept of using superheated steam instead of air for drying was not employed until 60 years ago in German (Mujumdar, 1995). The potential advantages of superheated steam drying when compared to hot air drying are higher drying rates at above the "inversion temperature", no oxidative deterioration, explosion and fire protection, low possible pollutants due to closed-circuiting process and low energy consumption because both of the superheated steam and the evaporated water can be recycled (Li, 1999). However, superheated steam has its possible restrictions i.e. the system is more complex, the sealing of the process is carefully needed, not suitable for heat sensitive products, and some additional devices are needed for loading and unloading of the material.

To obtain the optimum condition for drying, the effects of operational conditions on drying performance have been extensively studied. Tatemoto et al. (2001) showed that the drying gas temperature had influence on drying rate and drying time. The drying rate becomes higher with increasing drying gas temperature and in case of superheated steam drying, the drying time decreases sharply with increasing temperature at the relatively low temperature. At the temperature increases, the decrement degree in drying time becomes smaller.

Color is an important quality index for dried product. Many researchers studied the effect of air temperature on food drying (Shin and Bhowmik, 1995; Sokhansanj and Patil, 1996; Lozano and Ibarz, 1997; Krokida, M.K. et al., 1998). Krokida (1998) stated that the rate of color deterioration was found to increase as temperature increased and air humidity decreased. When each color parameter was investigated, redness (a) and yellowness (b) parameters depended on both air temperature and humidity whilst lightness (L) parameter was practically independent of drying conditions.

The present work is the comparative study of drying durian with superheated steam and hot air to obtain an alternative mode of fruit drying. The effects of temperature and type of drying medium on moisture and color changes and crispiness of dried product are investigated.

## 2. Material and Method

### 2.1 Raw material

Durian cv. Monthong was purchased from a local and sliced into a dimension of 20×20×2 mm (width×length×thickness). The initial moisture of Durian slices was in range of 75.5-81.9% w.b.

## 2.2 Drying Equipment

A schematic diagram of the experiment apparatus is shown in Fig. 1. It composed of boiler (1), heater (2), batch dryer (3), blower (4), and pipe and valve systems. The 30×30 cm drying chamber has an opening in the front for inserting 3 trays of drying samples. With this drying equipment, experiments can be conducted with either hot air or superheated steam by opening and closing valve no. 1. In case of using superheated steam, valve no. 1 was opened for feeding steam into the system. Valve no. 3 (V.3) and 4 (V.4) were opened for blowing air out of the superheated steam system. Both drying media were heated by heater and flown through drying chamber, and then sucked by blower to recirculate into the system. Superheated steam temperatures were controlled by PID-controller with an accuracy of  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . The temperature in the test section can be recorded by connecting data logger to the thermocouple inserted at the desired position.

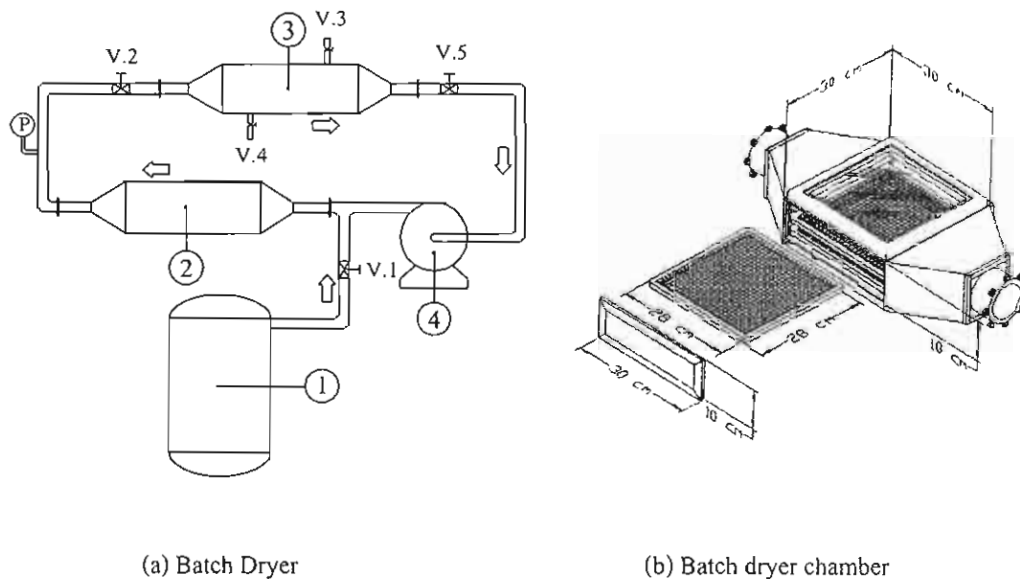


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

## 2.2 Method

The drying experiments were conducted at drying medium temperatures of 140, 150 and 170°C and drying medium velocity of 2.08 m/s. A sampling of the dried products was taken to check color, crispiness and moisture content at every drying time interval. Compressive tests were conducted by using Instron 4301 series universal testing instrument to determine crispiness that is defined by number of peak in force-displacement graph. For color measurement, colors of raw durian and dried durian were measured by Color spectrophotometer (Minolta CR-300).

The color of durian was represented by Hunter L which comprises 3 parameters, i.e. "L", "a", and "b". "L" represents lightness, "a" represents redness or greenness while "b" represents blueness or yellowness. The changes in each individual color parameters were calculated as follows:

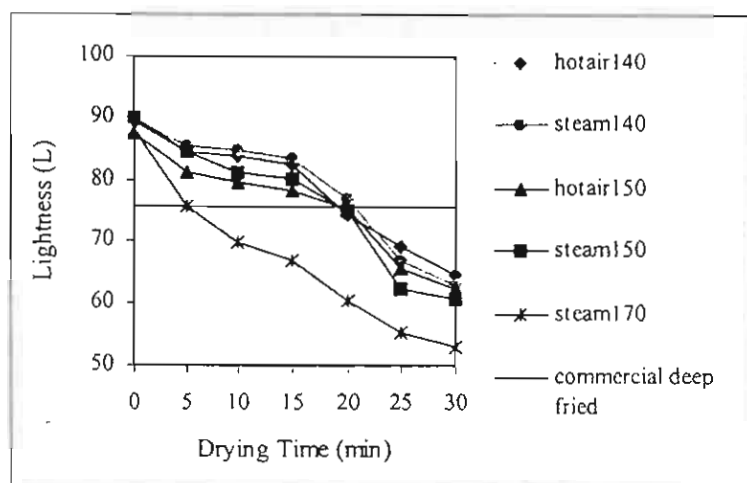


Fig. 5 Lightness change at various drying temperatures using superheated steam and hot air

The relationship between lightness and drying time was shown in Fig. 5. Lightness decreased with the increase of drying time in every drying condition. It was found that lightness values of durian dried by both superheated steam and hot air at temperatures of 140 and 150°C were lower than those of commercial deep fried durian after 20 minutes of drying. Drying with 170°C superheated steam resulted in much lower lightness values; the values were lower than those of commercial deep fried durian after 5 minutes of drying.

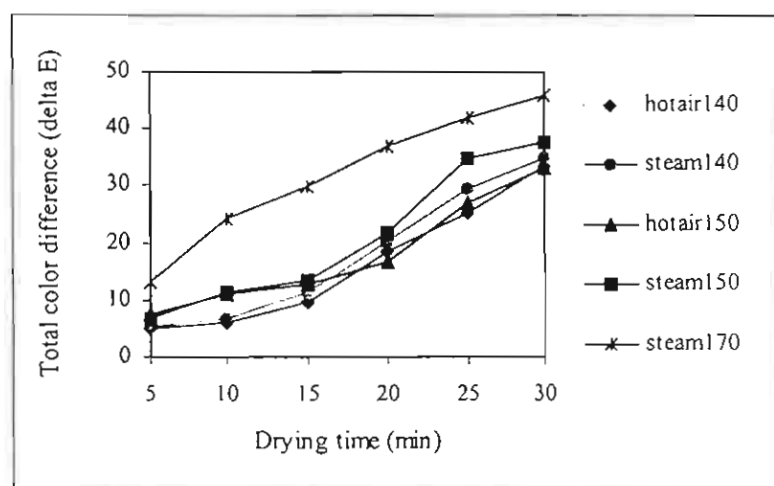


Fig. 6 Total color difference change at various drying temperatures using superheated steam and hot air

Fig. 6 revealed that at the first state of drying, total color differences,  $\Delta E$  of products dried at 150°C hot air were higher than those of the products dried with 140°C hot air. Nevertheless, after 20 minutes of drying, there was no difference in  $\Delta E$  values of both drying conditions. For drying with superheated steam, the  $\Delta E$  values raised

with increasing of drying time and drying medium temperature.  $\Delta E$  values of products dried by superheated steam were higher than those dried by hot air but not significant.

The color changes of dried durian slices were the results of thermal degradation and browning reaction. In case of using superheated steam, it probably had the effect of condensation to be related. Additionally, durian slices dried by superheated steam had more glossy surface than those dried by hot air. The glossy surface was the consequence of starch gelatinization.

### 3.3 Crispness

Table 1 Distribution of numbers of peaks in force-displacement graph

| No. of peak | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 140H(15min) | 50% | 10% | 10% | 10% |     | 10% |     | 10% |     |     |
| 140S(20min) | 40% | 30% |     |     | 20% |     | 10% |     |     |     |
| 140H(20min) | 20% | 10% | 60% |     |     |     | 10% |     |     |     |
| 140S(25min) | 40% | 30% |     | 20% |     | 10% |     |     |     |     |
| 140H(25min) | 40% |     | 30% | 20% |     |     | 10% |     |     |     |
| 140S(30min) | 40% | 20% | 30% |     |     |     | 10% |     |     |     |
| 140H(30min) | 10% | 10% | 50% | 10% | 10% |     |     |     |     | 10% |
| 150H(15min) | 10% | 10% | 50% | 20% |     | 10% |     |     |     |     |
| 150S(20min) | 10% | 50% | 10% |     | 10% |     |     | 20% |     |     |
| 150H(20min) | 20% | 10% | 30% | 10% | 20% |     |     |     | 10% |     |
| 150S(25min) | 20% | 40% | 20% |     | 10% | 10% |     |     |     |     |
| 150H(25min) | 10% | 30% |     |     | 10% | 10% |     | 20% | 20% |     |
| 150S(30min) | 20% | 30% | 10% | 20% | 10% | 10% |     |     |     |     |
| 150H(30min) | 10% | 20% | 20% |     | 10% |     | 10% | 20% | 10% |     |
| Reference*  | 50% | 50% |     |     |     |     |     |     |     |     |

H = hot air

S = superheated steam

\*commercial deep fried durian

Crispiness of dried durian slices defined by number of peak in force-displacement graph from compressive test is represented in table 1. The more the number of peak means crispier products. It was clearly found that durian slices dried by hot air were crispier than those dried by superheated steam at the same drying time and temperature. Nonetheless, there was no obvious effect of drying temperature on crispiness.

#### **4. Conclusions**

##### **4.1 moisture change**

Moisture ratio changes significantly at the first state of drying and at drying time of approximately 20 minutes it converted to a constant value. Drying with hot air at the temperature of 140 and 150<sup>0</sup>C resulted in faster moisture change of products than drying with superheated steam. This showed that the inversion temperature was higher than 150<sup>0</sup>C.

##### **4.2 color change**

Redness, yellowness and total color difference had a risen tendency when time passed, while lightness had opposite results. The products dried by superheated steam were more reddish than those dried by hot air. In addition, it was found that durian slices dried by superheated steam were glossier than those dried by hot air.

##### **4.3 Crispiness**

It was found that drying with hot air gave crispier products when compared to those dried by superheated steam. However, drying with both media gave dried durian slices that had more crispiness than commercial deep fried durian.

#### **5. Acknowledgement**

The authors would like to express their appreciation to the Thailand Research Fund for financial supporting.

#### **6. References**

1. Krokida, M.K., Tsami, E. and Maroulis, Z.B. Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology* 1998; 16(3-5): 667-685.
2. Li, Y.B., Seyed-Yagoobi, J., Moreira, R.G. and Yamsaengsun, R. Superheated steam impingement drying of tortilla chips. *Drying Technology* 1999; 17(1&2): 191-213.
3. Lozano, J.E. and Ibarz, A. Color changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. *Journal of Food Engineering* 1997; 31 : 365-373.
4. Mujumdar, A.S. Superheated steam drying. *Handbook of industrial drying*, 2<sup>nd</sup> edition Vol. 2, Macel Dekker, Inc, 1995.
5. Shin, S. and Bhowmik, S.R. Thermal kinetics of color changes in pea puree. *Journal of Food Engineering* 1995; 24 : 77-86.
6. Sokhansanj, S., and Patil, R.T. Kinetics of dehydration of green alfalfa, *Drying Technology* 1996; 45(5) : 1197-1234.

7. Tatemoto, Y., Bando, Yoshiyuki, Oyama, K., Yasuda, K., Nakamura, M., Sugimura, Y. and Shibata, M. Effects of operational conditions on drying characteristics in closed superheated steam drying. *Drying Technology* 2001; 19(7) : 1287-1303.

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

ยุวารี นามสงวน<sup>1</sup>, วรณิ เตีย<sup>2</sup>, สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา<sup>3</sup> และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์<sup>4</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษานิเทศศาสตร์, <sup>2</sup>รองศาสตราจารย์, <sup>3</sup>อาจารย์, <sup>4</sup>ศาสตราจารย์

<sup>1,2,4</sup> คณะพลังงานและวัสดุ<sup>3</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
สุขสวัสดิ์ 48 แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400

**บทคัดย่อ :** งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งกึ่งแบบสองขั้นตอน คือ อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดขังตามด้วยปั๊มความร้อน (SSD/HPD) โดยการอบแห้งในช่วงแรกใช้ไอน้ำร้อนชาดขังที่อุณหภูมิ 140°C แล้วช่วงที่สองอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C โดยความชื้นที่ดึงออกจากเครื่องอบแห้งแบบใช้ไอน้ำร้อนชาดขังอยู่ที่ประมาณ 30-40% w.b. และทดลองอบแห้งกึ่งด้วยไอน้ำร้อนชาดขังตามด้วยลมร้อน (SSD/AD) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ เหมือนกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดขังตามด้วยปั๊มความร้อน จากการทดลองพบว่า กึ่งแห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชาดขังตามด้วยปั๊มความร้อน มีการหดตัวน้อยลง คุณภาพสีดีขึ้น การคืนตัวมากขึ้น และเนื้อไม่แข็ง เมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนชาดขังเพียงอย่างเดียว (SSD) ขณะที่การอบแห้งกึ่งด้วยไอน้ำร้อนชาดขังตามด้วยลมร้อนให้คุณภาพกึ่งที่ด้อยลงและเนื้อไม่แข็ง

**ABSTRACT :** The purpose of the present study was to investigate strategies for innovative two-stage drying techniques. This work concerned on the drying of shrimp using superheated steam dryer followed by heat pump dryer (SSD/HPD). Shrinkage, color, rehydration behavior and texture of dried shrimps were determined. The experiments were carried out in the two different stages of SSD/HPD. The moisture contents exited from the first-stage superheated steam dryer varied between 30% and 40% (w.b.). The first-stage superheated steam drying was performed at a drying temperature of 140°C while the second-stage heat pump drying was operated at 50°C. In addition, an alternative two-stage drying of SSD/AD (drying using superheated steam dryer followed by hot air dryer) was also investigated by changing the second-stage dryer from heat pump dryer (HPD) to hot air dryer (AD) that operated at the same drying air temperature as HPD. The results show that SSD/HPD dried shrimp has much lower degree of shrinkage, higher degree of rehydration, better color and softer than single-stage SSD dried shrimp. SSD/AD gives redder and softer shrimp but no shrinkage and rehydration improvements was observed.

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

## 1. บทนำ

กังหันเป็นผลิตภัณฑ์ประมงที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง กังหันมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 60 การทำกังหันส่วนใหญ่ทำเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือน ปัจจุบันได้พัฒนาทำเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งยังมีปัญหาในเรื่องความสม่ำเสมอของคุณภาพ ทั้งขั้นตอนการต้มกังหันและการทำแห้ง Posomboon [1998] ได้ทำการอบแห้งกังหันด้วยลมร้อน พบว่า คุณภาพกังหันในช่วงอุณหภูมิลมร้อนต่ำโดยทดลองช่วง  $40-70^{\circ}\text{C}$  แต่จะสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าการใช้อุณหภูมิสูง ( $100-140^{\circ}\text{C}$ ) เนื่องจากใช้เวลาอบแห้งมากกว่า คุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ที่อุณหภูมิไม่เกิน  $140^{\circ}\text{C}$  โดยทั่วไปการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิสูงใช้เวลาน้อยแต่คุณภาพมักลดลง ขณะที่ใช้อุณหภูมิต่ำคุณภาพมักดีกว่าแต่ใช้เวลานานและทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่า การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำความร้อนจึงเป็นอีกทางเลือกที่ช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ ทั้งด้านเวลาอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และนิยมใช้กันโดยทั่วไป

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เนื่องจากมีศักยภาพการอบแห้งสูง Prachayawarakorn et al. [2002] ได้ทดลองอบแห้งกังหันด้วยไอน้ำร้อนยังคง พบว่าใช้เวลาน้อยกว่าลมร้อนมาก ลดขั้นตอนการต้มกังหัน และคุณภาพดีกว่าการใช้ลมร้อน คุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ที่อุณหภูมิไม่เกิน  $180^{\circ}\text{C}$  อย่างไรก็ตาม เทคนิคการอบแห้งแบบผสมผสานกำลังเป็นที่น่าสนใจ เช่น Stromen [2001] ได้ทดลองอบแห้งผักและผลไม้ โดยทำการแช่แข็งก่อนที่จะนำมาอบแห้งด้วยไอน้ำความร้อน พบว่า ผลิตภัณฑ์มีรูพรุนมาก สีและรสชาติ อีกแนวทางที่น่าสนใจคือ การแบ่งช่วงการอบแห้งโดยการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงในช่วงความชื้นสูง ซึ่งสามารถอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงและอัตราการอบแห้งสูง และใช้การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนในช่วงที่ความชื้นลดลง ซึ่งสามารถอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำแต่อัตราการอบแห้งสูง ผลิตภัณฑ์จะไม่เสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนในช่วงที่สอง ยังช่วยลดขั้นตอนการต้มกังหัน ทำให้กังหันมีรสชาติและยังสามารถกำจัดจุลินทรีย์ ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งกังหันแบบ 2 ขั้นตอน คือ การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยังคงตามด้วยไอน้ำร้อน โดยพิจารณาอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งและความชื้นขณะเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้ง ที่มีต่อระยะเวลาอบแห้งและคุณภาพของกังหันหลังอบแห้ง

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 การทดลอง

การทดลองอบแห้งกังหันแบ่งเป็น 3 แบบ (5 กรณี) คือ แบบที่ 1 การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยังคงเพียงอย่างเดียว (กรณีที่ 1) แบบที่ 2 การอบแห้งแบบสองขั้นตอนโดยใช้ไอน้ำร้อนยังคงแล้วตามด้วยไอน้ำร้อน (กรณีที่ 2 และ 3) และแบบที่ 3 การอบแห้งแบบสองขั้นตอนโดยใช้ไอน้ำร้อนยังคงแล้วตามด้วยลมร้อน (กรณีที่ 4 และ 5) ซึ่งมีกระบวนการและสภาวะการอบแห้งดังตารางที่ 1 ระบบเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคง มีส่วนประกอบหลัก คือ เครื่องกำเนิดไอน้ำ อุปกรณ์ให้ความร้อน (superheater) ขนาด 13.5 kW ห้องอบแห้งแบบตู้ขนาด  $30 \times 30 \times 10 \text{ cm}^3$  และพัดลมใบพัดโค้งหลัง เครื่องอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนเป็นแบบวงจรปิด มีส่วนประกอบสำคัญ คือ ตู้อบแห้งขนาด  $85 \times 85 \times 85 \text{ cm}^3$  เครื่องอัดไอน้ำแบบลูกสูบขนาด 0.5 kW เครื่องทำระเหย ขนาด 1 kW เครื่องควบแน่นตัวในและเครื่องควบแน่นตัวนอก ขนาด 1.8 และ 1.1 kW ตามลำดับ ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อน ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอบแห้งแบบตู้ขนาด  $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$  และมีอุปกรณ์ให้ความร้อนขนาด 4 kW

Table 1. The experimental conditions

| Case no. | Drying process/conditions                                                                            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Case 1   | SSD: Drying using SHS only, 140°C<br>(SHS: superheated steam)                                        |
| Case 2   | SSD/HPD: Drying using SHS, 140°C until IMC = $30 \pm 3.2\%$ (w.b.)<br>and then followed by HPD, 50°C |
| Case 3   | SSD/HPD: Drying using SHS, 140°C until IMC = $40 \pm 2.4\%$ (w.b.)<br>and then followed by HPD, 50°C |
| Case 4   | SSD/AD: Drying using SHS, 140°C until IMC = $30 \pm 2.6\%$ (w.b.)<br>and then followed by AD, 50°C   |
| Case 5   | SSD/AD: Drying using SHS, 140°C until IMC = $40 \pm 4.1\%$ (w.b.)<br>and then followed by AD, 50°C   |

การเตรียมตัวอย่าง นำกุ้งขาว (Penaeidae) ขนาดเล็ก นำมาทำความสะอาด นำไปแช่ในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 2% โดยปริมาตร ประมาณ 30 นาที ก่อนนำไปอบแห้ง แต่ละการทดลองใช้กุ้งสดครั้งละ 1 กิโลกรัม ตัวอย่างกุ้งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80% w.b. ทำการทดลองอบแห้งในแต่ละกรณีตามตารางที่ 1 อุณหภูมิและความเร็วของไอน้ำร้อนชนิดที่ใช้ คือ 140°C และ  $2.08 \pm 0.2$  m/s ตามลำดับ สำหรับการอบแห้งในขั้นตอนที่สอง อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนและแบบตู้เท่ากัน คือ 50°C และ ความเร็วลมในเครื่องอบแห้งทั้งคู่คือ 0.91 และ 0.87 m/s ตามลำดับ โดยความชื้นที่ดึงออกจากขั้นตอนแรก (intermediate moisture content: IMC) คือ 30% และ 40% w.b. แต่ละการทดลองทำการเก็บข้อมูลดังนี้ อุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้อบแห้ง การลดลงของความชื้นตัวอย่างขณะอบแห้งโดยชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลที่มีความละเอียด  $\pm 0.1$  กรัม ทำการอบแห้งจนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 20% w.b. การหาค่าน้ำหนักแห้งใช้ตู้อบ อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

## 2.2 การทดสอบคุณภาพของกุ้ง

คุณภาพกุ้งที่ทำการทดสอบคือ การหดตัว สี การคืนตัว โดย 1) การทดสอบการหดตัว จะใช้วิธีวัดขนาดของตัวอย่างกุ้งก่อนและหลังทำการอบแห้งโดยใช้ vernia เพื่อหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าโดยสมมติรูปร่างกุ้งเป็นทรงกลม แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวของกุ้ง 2) การทดสอบคุณภาพสีของกุ้ง จะทำการวัดสีของกุ้งก่อนและหลังทำการอบแห้งโดยใช้เครื่องวัดสีอาหารชนิด Model Juki JP 7100P ซึ่งแสดงค่าสี 3 อย่าง คือ ค่าสีเขียวหรือแดง (a) ค่าสีน้ำเงินหรือ เหลือง (b) และค่าความสว่าง (L) และ 3) การทดสอบการคืนตัว จะใช้วิธีวัดขนาดของตัวอย่างกุ้งโดยใช้ vernia ในลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบการหดตัว นำกุ้งที่อบแห้งแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ 100°C เพื่อทำการวัดขนาดของกุ้งแห้งที่ขยายตัวทุก ๆ 1 นาที แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การคืนตัวของกุ้ง

### 3. ผลและวิจารณ์

#### 3.1 ผลการทดลองอบแห้งกุ้งด้วยการอบแห้งแบบต่างๆ

จากการทดลอง รูปที่ 1 และ 2 พบว่า กระบวนการอบแห้งแบบต่างๆ และความชื้นที่ดึงออกจากชั้นตอนแรก (intermediate moisture content: IMC) มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการลดความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก การอบแห้งจะช้าลงเมื่อเปลี่ยนการอบแห้งช่วงหลังมาใช้ไอน้ำความร้อน โดยจะใช้เวลานานขึ้นกรณีที่กระบวนการอบแห้งแบบสองชั้นตอนซึ่งวัสดุถูกดึงออกจากช่วงแรกที่มีความชื้นสูง และมีแนวโน้มเดียวกันสำหรับการอบแห้งแบบโดยใช้ไอน้ำร้อนขุดอิงตามด้วยลมร้อน

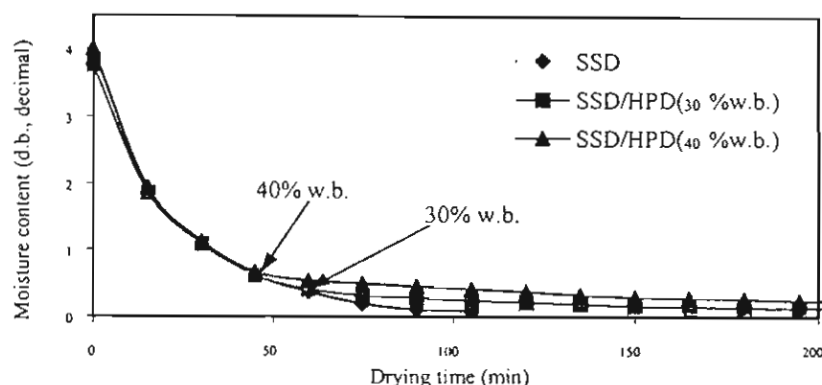


Figure 1. Drying curves of shrimp dried in SSD and SSD/HPD

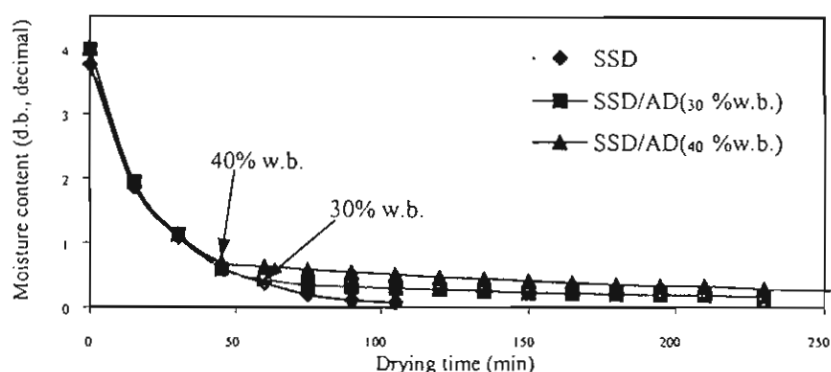


Figure 2. Drying curves of shrimp dried in SSD and SSD/AD

จากรูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการอบแห้งตามกรณีต่างๆ ที่ใช้ในการอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้นถึงความชื้นสุดท้าย พบว่าการอบแห้งแบบสองชั้นตอนใช้เวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขุดอิงตามด้วยปั๊มความร้อน (SSD/HPD) จะใช้เวลาสั้นกว่าการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขุดอิงตามด้วยลมร้อน (SSD/AD) ที่ความชื้นที่ดึงออกจากชั้นตอนแรกเดียวกัน โดยใช้เวลานานกว่า 1.4-1.5 เท่า เนื่องจากการอบแห้งในช่วงที่สองด้วยปั๊มความร้อนนั้น มีศักยภาพการอบแห้งที่เร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยเฉพาะกรณีที่ 5 (SSD/AD) นั้นใช้เวลามากที่สุด มากกว่ากรณีที่ 1 (SSD) 3.57 เท่า

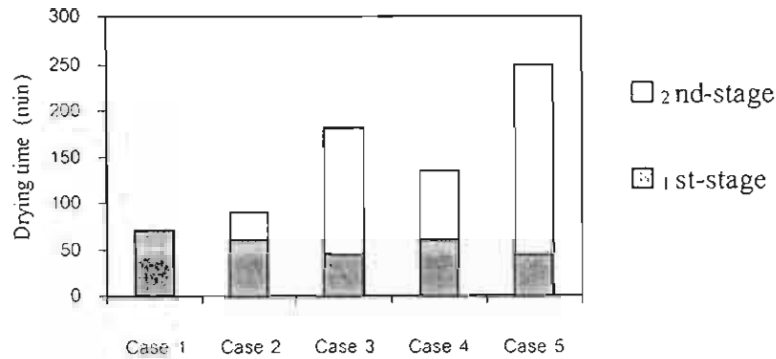


Figure 3. Drying time of shrimp drying using different drying techniques

### 3.2 คุณภาพของผลิตภัณฑ์

#### 3.2.1 การหดตัว

จากการทดลองดังตารางที่ 2 พบว่า การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งตามด้วยปั๊มความร้อน (SSD/HPD) (ทั้งกรณีที่ 2 และ 3) ให้ผลการหดตัวของกุ้งแห้งน้อยกว่าการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งเพียงอย่างเดียว จึงถือได้ว่าช่วยทำให้การหดตัวของกุ้งแห้งน้อยลง เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งในช่วงแรก การระเหยน้ำในวัสดุเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดขณะที่ไอน้ำในวัสดุขยายตัวภายในผนังเซลล์ อันเนื่องจากความดันไอน้ำที่สูงกว่าความดันในไอน้ำร้อนขวดยิ่ง ทำให้วัสดุเกิดรูพรุนมากมาย (Seyed-Yagoobi et al. [1999]) ดังนั้นการหดตัวจึงน้อยลงด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน (Prachayawarakron et al. [2002]) และเมื่อเปลี่ยนการอบแห้งอุณหภูมิต่ำช่วงที่สองมาใช้ปั๊มความร้อนซึ่งเป็นการอบแห้งที่ช่วยรักษาคุณภาพการหดตัว

ส่วนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนแบบอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งตามด้วยลมร้อน (SSD/AD) กรณีที่ 4 (IMC 30% w.b.) การหดตัวน้อยลงซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งเพียงอย่างเดียว แต่ในกรณีที่ 5 (IMC 40% w.b.) การหดตัวมากกว่าการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งเพียงอย่างเดียวมาก จึงถือได้ว่าไม่ได้ช่วยทำให้การหดตัวของกุ้งแห้งดีขึ้น เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลานานทำให้การหดตัวมากขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ว่ากรณีที่ 5 ใช้เวลานานเกินไปจนไม่สามารถรักษาคุณภาพการหดตัวได้

Table 2. Percentage of shrinkage of dried shrimp obtain from different drying techniques

| Sample                                 | Shrinkage (%) |
|----------------------------------------|---------------|
| Case 1: SSD process                    | 37.50 ± 7.50  |
| Case 2: SSD/HPD process (IMC 30% w.b.) | 21.47 ± 7.36  |
| Case 3: SSD/HPD process (IMC 40% w.b.) | 31.20 ± 5.67  |
| Case 4: SSD/AD process (IMC 30% w.b.)  | 35.53 ± 7.79  |
| Case 5: SSD/AD process (IMC 40% w.b.)  | 48.07 ± 8.87  |

จากผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นที่ดึงออกจากขั้นตอนแรก (IMCs) ในตารางที่ 2 พบว่า การอบแห้งแบบสองขั้นตอนทั้งสองแบบ เมื่อดึงออกที่ความชื้นเพิ่มขึ้นการหดตัวจะเพิ่มขึ้น ความชื้นที่ดึงออกจากขั้นตอนแรก 30% w.b. จะได้กุ้งที่หดตัวน้อยกว่ากรณีที่ดึงออกที่ความชื้น 40% w.b. ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหากดึงออกที่ความชื้นสูงอยู่ การสร้างรูพรุนด้วยการอบแห้งแบบใช้น้ำร้อนยังคงในช่วงแรกอาจยังไม่มากพอ (pore development) เมื่ออบแห้งต่อด้วยอากาศทั้งแบบใช้ป้อนความร้อนและลมร้อน จึงง่ายต่อการหดตัว อีกทั้งการใช้เวลาการอบแห้งที่นานกว่าถึงประมาณ 2 เท่า จากรูปที่ 3 โดยการอบแห้งในช่วงที่สองซึ่งใช้อากาศทั้งสองแบบจะใช้เวลานานขึ้นเมื่อดึงออกที่ความชื้นสูง

นอกจากนี้ยังพบว่าจากการสังเกตโดยการสัมผัสด้วยมือ กุ้งที่ได้จากการอบแห้งแบบสองขั้นตอนนั้นมีลักษณะเนื้อไม่แข็ง มีลักษณะเงาใส ดูโปร่งกว่า เมื่อเทียบกับกรณีอบแห้งด้วยอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการอบแห้งแบบสองขั้นตอนนั้น การอบแห้งกุ้งในช่วงที่สองด้วยป้อนความร้อนหรือด้วยลมร้อนมีอุณหภูมิการอบแห้งที่ต่ำลง กุ้งไม่ไหม้แสง และการหดตัวน้อยทำให้เนื้อกุ้งไม่แข็ง

### 3.2.2 คุณภาพสี

จากการตรวจสอบคุณภาพสีของกุ้งหลังการอบแห้ง โดยใช้เครื่องวัดสีอาหารซึ่งแสดงค่าสี 3 อย่าง คือ ค่าสีแดง (a) ค่าสีเหลือง (b) และค่าความสว่าง (L) ตารางที่ 3 พบว่า กุ้งแห้งที่ได้ในแต่ละกรณีมีค่าสีแดงโดดเด่น การอบแห้งโดยใช้น้ำร้อนยังคงตามด้วยป้อนความร้อน (SSD/HPD) กุ้งแห้งที่ได้มีค่าความสว่างต่ำกว่าการอบแห้งโดยใช้น้ำร้อนยังคงเพียงอย่างเดียวขณะที่ค่าสีของกุ้งแห้งสูงกว่า ถือได้ว่าช่วยพัฒนาสีของกุ้งแห้ง เนื่องจากการอบแห้งแบบสองขั้นตอนนั้นอบแห้งด้วยอุณหภูมิค่าด้วยป้อนความร้อนในช่วงที่สอง สีจึงดีกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงตลอดช่วง โดยการเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้งที่ความชื้นสูงจะให้คุณภาพสีที่ดีกว่าที่ความชื้นต่ำ โดยในกรณีที่ 3 ความชื้นที่ดึงออกจากขั้นตอนแรกที่ 40% w.b. (IMC 40% w.b.) สีแดงและเหลืองของกุ้งแห้งสูงที่สุด อาจเนื่องมาจากใช้เวลาอบแห้งอุณหภูมิสูงด้วยไอน้ำร้อนยังคงในช่วงแรกสั้นกว่ากรณีที่ 2 (IMC 30% w.b.) และการอบแห้งต่อด้วยป้อนความร้อนช่วยรักษาคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ (Chua et al. [2000]) ค่าสีเริ่มต้นของกุ้ง a, b และ L คือ -0.42, -0.97 และ 32.15 ตามลำดับ

Table 3. Values of 'a', 'b' and 'L' for the dried shrimp samples

| Sample                                 | Colors |       |       |
|----------------------------------------|--------|-------|-------|
|                                        | 'a'    | 'b'   | 'L'   |
| Case 1: SSD process                    | 6.05   | 12.27 | 41.98 |
| Case 2: SSD/HPD process (IMC 30% w.b.) | 6.20   | 10.07 | 37.87 |
| Case 3: SSD/HPD process (IMC 40% w.b.) | 9.45   | 12.72 | 38.22 |
| Case 4: SSD/AD process (IMC 30% w.b.)  | 8.19   | 9.75  | 35.25 |
| Case 5: SSD/AD process (IMC 40% w.b.)  | 5.97   | 11.34 | 42.08 |

จากการเปรียบเทียบการอบแห้งแบบสองขั้นตอนอีกแบบ คือ อบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดอิงตามด้วยลมร้อน (SSD/AD) กรณีที่ 4 (IMC 30% w.b.) กุ้งแห้งมีสีแดงกว่าการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดอิงเพียงอย่างเดียว ขณะที่ในกรณีที่ 5 (IMC 40% w.b.) ค่าสีต่างๆ ของกุ้งแห้งไม่ดีขึ้น อาจเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำในช่วงที่สอง ที่จริงแต่ใช้เวลาอบแห้งนานมากจนไม่สามารถรักษาคุณภาพไว้ได้

### 3.2.3 การคืนตัว

จากการทดสอบการคืนตัวของกุ้งที่ได้จากการอบแห้งแต่ละแบบ โดยแช่ในน้ำร้อนที่ อุณหภูมิประมาณ 100°C ตามรูปที่ 4 พบว่า ทุกกรณีมีแนวโน้มการคืนตัวคล้ายกัน คือ มีลักษณะความชันของกราฟของการอบแห้งแต่ละกรณีคล้ายกันโดยมีอัตราการคืนตัวเร็วในช่วงแรก จากค่าการคืนตัวสุดท้ายของกุ้งแห้งในแต่ละกรณี พบว่า การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดอิงตามด้วยปั๊มความร้อนทั้ง 2 กรณี (กรณีที่ 2 และ 3) ให้ผลการคืนตัวของกุ้งแห้งมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและการคืนตัวของกุ้ง คือ การหดตัวมักเป็นสัดส่วนผกผันกับการคืนตัว ดังรูปที่ 5.

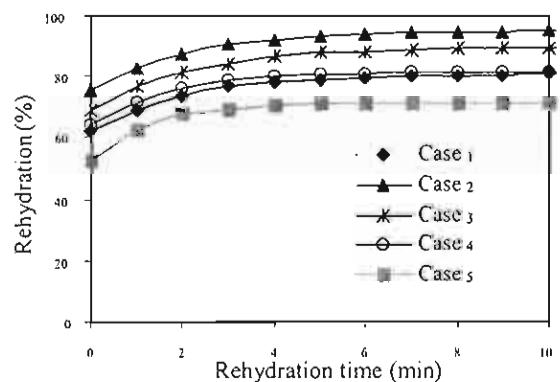


Figure 4. Rehydration curves of dried shrimp samples obtained from different drying processes

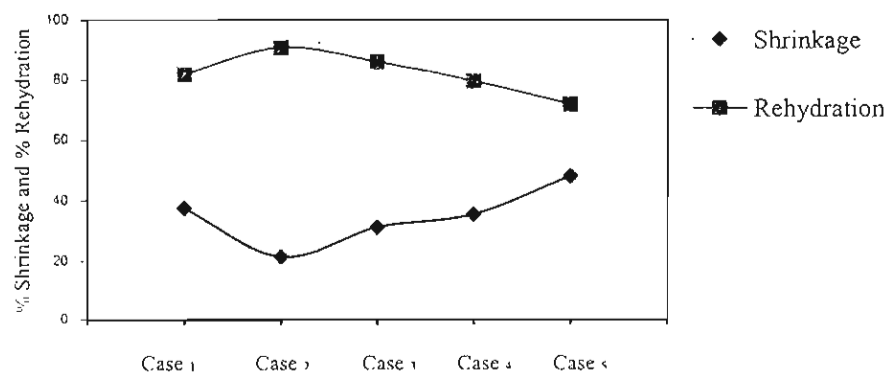


Figure 5. Relationship between shrinkage and rehydration

#### 4. สรุป

การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยปั๊มความร้อน (SSD/HPD) เป็นเทคนิคการอบแห้งใหม่ที่สามารถพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ กุ้งแห้งที่ได้หาคตัวน้อยลง คุณภาพสีดีขึ้น การคืนตัวมากขึ้น เนื้อกุ้งแห้งดูเงาใสและไม่แข็ง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงอย่างเดียว (SSD) ส่วนการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อน (SSD/AD) ช่วยพัฒนาคุณภาพบางประการคือ กุ้งแห้งที่ได้สีแดงขึ้นและเนื้อไม่แข็ง

โครงสร้างของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง สามารถพัฒนาโดยการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงแรก การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนคือในช่วงที่สองช่วยรักษาการสูญเสียรูปร่างของผลิตภัณฑ์ให้น้อยลง ขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนเกิดการสูญเสียรูปร่างมากเนื่องจากการใช้เวลาอบแห้งนาน อย่างไรก็ตาม การเลือกสภาวะการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิอบแห้งและความชื้นที่ดึงออกจากขั้นตอนแรกที่เหมาะสม เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มศักยภาพด้านคุณภาพได้

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

1. Stromman I. Heat pump drying, new development and applications. Proc of 2<sup>nd</sup> Asian-Oceania Drying Conference (ADC '01), 2001; 102-113.
2. Seyed-Yagoobi J, Li Y.B, Moreira R.G, Yamsaengsung R. Superheated steam impingement drying of tortilla chips. Drying Technology, 1999; 17(1 & 2):191-213.
3. Prachayawarakorn S, Soponronnarit S, Wetchacama S, Jaisut D. Desorption isotherms and drying characteristics of shrimp in superheated steam and hot air. Drying Technology, 2002; 20(3):669-684.
4. Chua J.K, Mujumdar A.S, Chou S.K, Hawlader M.N.A, Ho J.C. Convective drying of banana, guava and potato pieces : effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change. Drying Technology, 2000; 18(4&5):907-936.
5. Posomboon W. Processing effect on quality of dried shrimp. Master of Engineering Thesis, Agricultural Engineering Program, 1998. Bangkok, Thailand: Asian Institute of Technology.

## เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรด Heat Pump-Infrared Dryer

กิตติศักดิ์ วิธินันทกิจ<sup>1</sup> สมชาติ ไสภณธนฤทธิ์<sup>2</sup> อติศักดิ์ นาดกรณกุล<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาปริญญาโท, <sup>2</sup>ศาสตราจารย์, <sup>3</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์

คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ประชาอุทิศ บางมด กทม 10140

**บทคัดย่อ:** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล โดยออกแบบ และติดตั้งแท่งรังสีอินฟราเรดขนาด 1.95 กิโลวัตต์ ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศที่ผ่านการอบแห้งผ้าชุบน้ำ เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสามารถบรรจุผลิตภัณฑ์ได้ 12 ถาด (น้ำหนักผลิตภัณฑ์ 100-132 กิโลกรัม) ทำการทดลองอบแห้งผ้าชุบน้ำแบบระบบปิด เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง พลังงานและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยเปลี่ยนแปลงความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิควบคุมการเปิดปิดแท่งรังสีอินฟราเรด และอัตราการไหลของอากาศเข้าห้องอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่า รังสีอินฟราเรดช่วยลดเวลาในการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นสูง และอัตราการไหลอากาศต่ำ แต่จะมีอิทธิพลน้อยลงเมื่ออัตราการไหลอากาศสูงขึ้น ส่วนการตั้งอุณหภูมิควบคุมการเปิดปิดแท่งรังสีอินฟราเรดต่ำกว่าอากาศอบแห้งประมาณ 8-10°C จะประหยัดพลังงานมากกว่าการตั้งอุณหภูมิควบคุมรังสีอินฟราเรดเท่ากับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ในขณะที่ใช้เวลาในการอบแห้งเท่าเดิม จากการทดลองทั้งหมด พบว่า ความชื้นเริ่มต้น 200 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 51°C อุณหภูมิควบคุมการเปิดปิดแท่งรังสีอินฟราเรด 41°C และอัตราการไหลอากาศ 858 กิโลกรัมต่อชั่วโมง รังสีอินฟราเรดช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้มากที่สุด เท่ากับ 3 ชั่วโมง สิ้นเปลืองพลังงาน 3.69 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย โดยมีค่าสมรรถนะของปั๊มความร้อนเท่ากับ 3.58

**คำสำคัญ:** การอบแห้ง / ปั๊มความร้อน / รังสีอินฟราเรด

**ABSTRACT:** This research is a study of combined heat pump and far-infrared drying. 1.95-kW far-infrared rod was designed and installed in the vertical direction, perpendicular to direction of drying air downstream. Heat pump dryer contained 12 trays of product (100-132 kg-product capacity) inside. Drying experiments were conducted to evaluate dryer performance, energy and time used for drying wetted cloths. Parameters studied were initial moisture contents, temperature for controlling infrared operation, and flow rate of inlet air. The experimental results showed that far-infrared contributed to decrease drying time at high initial moisture content and low air flow rate. However, it had less influence at the higher air flow rate. It was clearly found that there was more energy saving when the temperature for controlling far-infrared operation was set below the drying air temperature by approximately 8-10°C than when the temperature was set equal to the drying air temperature. The drying condition of far-infrared heat pump at 200% d.b. of moisture content, 51°C of hot air temperature, 41°C of temperature for controlling far-infrared operation and 858 kg/hr of air flow rate, reduced the maximum drying time of 3 hours with the energy consumption of 3.69 MJ/evaporated water and heat pump performance of 3.58.

**Keywords:** drying / heat pump / infrared

## 1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการอบแห้งมีวิวัฒนาการที่ตอบสนองต่อความต้องการของภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมอยู่หลายวิธี เช่น การอบแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์ การอบแห้งแบบอุโมงค์ การอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด และการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน เป็นต้น การอบแห้งแบบปั๊มความร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่มีความนิยม เนื่องจากอากาศที่อบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำทำให้น้ำระเหยได้ง่าย และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่สูงมากทำให้ช่วยรักษากลิ่นและสีของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาในการอบแห้งค่อนข้างนานส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงาน การศึกษาหาวิธีลดเวลาในการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนให้น้อยลงโดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ด้วยการนำกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ร่วมกับปั๊มความร้อนจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจ เนื่องจากกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรดเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรมค่อนข้างมาก ใช้งานง่าย ให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และประหยัดพลังงาน การนำเทคโนโลยีทั้งสองมาประยุกต์ใช้ร่วมกันน่าจะเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งได้มากขึ้น งานวิจัยในด้านการใช้ปั๊มความร้อน และรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร สรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรด

| ผู้แต่ง                     | ผลิตภัณฑ์                                     | ความชื้นเริ่มต้น<br>/ สุดท้าย | คุณสมบัติอากาศเข้า<br>ห้องอบแห้ง                    | ระยะห่างวัสดุ<br>อบแห้งกับ FIR | พลังงานที่ใช้                                                        |
|-----------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Min และ Naizhang (1992)     | เห็ดขาว(50 g) พหนา 1-3, 3-5, 5-7 mm)          | - / 0.08 w.b.                 | T = 40, 60, 80 °C<br>V = 0, 1.37, 2.74 m/min        | 14 ,20, 26 cm                  | -FIR                                                                 |
| Abe และ Afzal (1997)        | ข้าวเปลือก (400 g)                            | (0.25, 0.35, 0.47)/0.14 d.b.  | T = 30 °C<br>V = 0.3, 0.5, 0.7 m/s                  | 15 cm                          | -FIR = 0.167, 0.333, 0.5, 0.625 W/cm <sup>2</sup>                    |
| Fu และ Lien (1998)          | กุ้ง (60 g)                                   | -/0.276 d.b.                  | T = 43-117 °C<br>V = 1.5 m/s                        | 6.5-12.3 cm                    | -FIR = 2000 W<br>-Electric Heater = 4x400 W                          |
| Afzal และ คณะ (1999)        | ข้าวบาร์เลย์ (300 g)                          | 0.23/0.15 d.b.                | T = 40, 55, 70 °C<br>V = 0.5 m/s                    | -                              | -Electric Heater                                                     |
|                             |                                               |                               | T = 30 °C<br>V = 0.3, 0.5, 0.7m/s                   | -                              | -FIR = 0.167, 0.333, 0.5 W/cm <sup>2</sup><br>-Electric Heater       |
| Afzal และ Abe (1999)        | มันฝรั่ง (40x40x6 mm)                         | 3.51-5.44 kg/kg dry solid/-   | T = 30 °C<br>V = 0.3, 0.5, 0.7 m/s<br>RH = 36, 62 % | 15 cm                          | -FIR = 0.125, 0.25, 0.375, 0.5 W/cm <sup>2</sup><br>-Electric Heater |
| ประพัฒน์ และ ธวัชชัย (2544) | เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (500 kg)                  | 0.1/0.0445 w.b.               | T = 70 °C                                           | -                              | -Gas oven                                                            |
|                             |                                               |                               | T = 70-90 °C                                        | 15-25 cm                       | -FIR                                                                 |
| Tan และ คณะ (2001)          | แอปเปิ้ล มันฝรั่ง (25x25x2 mm) แครอท (Ø5x3mm) | -                             | T = 60 °C<br>V = 2.1 m/s                            | 9.5 cm                         | -IR = 2000 W<br>-Heat Pump                                           |

Min และ Naizhang ศึกษาการอบแห้งเห็ดขาวด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่า ที่อุณหภูมิและความเร็วอากาศสูง สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งเนื่องจากสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า แต่สิ้นเปลืองพลังงานค่อนข้างมาก รังสี

อินฟราเรดสามารถทะลุทะลวงเข้าไปได้ถึงใจกลางเนื้อผลิตภัณฑ์ที่บางได้ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่หนา ทำให้การถ่ายเทความร้อนทั่วถึง และผลิตภัณฑ์ที่อยู่ใกล้กับแท่งอินฟราเรดจะรับพลังงานความร้อนได้มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่อยู่ไกลออกไป เนื่องจากรังสีอินฟราเรดที่ตกกระทบผลิตภัณฑ์ที่อยู่ใกล้จะมีระดับความเข้มสูงทำให้น้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานจากรังสีมากจึงระเหยได้รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้พบว่า ที่สภาวะความหนาผลิตภัณฑ์ 1-3 mm ระยะห่างของผลิตภัณฑ์กับแท่งอินฟราเรด 14 cm อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 60°C และความเร็วลมเข้าห้องอบแห้ง 2.74 m/min เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้ง เพื่อให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่น้อยที่สุด และประหยัดพลังงานได้มากที่สุด

Abe และ Afzal ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกชั้นบางด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่า ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มความเร็วอากาศและความเข้มรังสีอินฟราเรดซึ่งช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้ค่อนข้างมาก แต่การเพิ่มความเข้มรังสีอินฟราเรดจาก 0.333 W/cm<sup>2</sup> เป็น 0.500 W/cm<sup>2</sup> สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้น้อยกว่าการเพิ่มความเข้มรังสีอินฟราเรดจาก 0.167 W/cm<sup>2</sup> เป็น 0.333 W/cm<sup>2</sup> แสดงว่าการเพิ่มความเข้มรังสีอินฟราเรดที่ระดับความเข้มที่สูงแล้วไม่สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้มากนัก ส่วนการเพิ่มความเร็วอากาศเข้าห้องอบแห้งสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มความเข้มรังสีอินฟราเรด

Fu และ Lien ศึกษาการอบแห้งกุ้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน พบว่า อุณหภูมิแท่งอินฟราเรดและอุณหภูมิอากาศร้อนที่สูงสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แต่เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานค่อนข้างมากและคุณภาพของกุ้งลดต่ำลงเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป ในการทดลองที่อุณหภูมิแท่งอินฟราเรดสูงกับอุณหภูมิอากาศร้อนต่ำและอุณหภูมิแท่งอินฟราเรดต่ำกับอุณหภูมิอากาศร้อนสูงเป็นจุดที่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยและคุณภาพของกุ้งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ดังนั้นถ้าพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง การประหยัดพลังงาน และคุณภาพของกุ้งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี พบว่าที่อุณหภูมิแท่งอินฟราเรด 357°C อุณหภูมิอากาศร้อน 43°C และระยะห่างระหว่างแท่งอินฟราเรดกับวัสดุ 12.5 cm เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

Afzal และ คณะ ศึกษาการอบแห้งข้าวบาร์เลย์ด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อนสามารถอบแห้งได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวและสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่า การเพิ่มความเข้มรังสีอินฟราเรดช่วยลดเวลาในการอบแห้ง แต่จะสิ้นเปลืองพลังงานและส่งผลกระทบต่อเซ็นเซอร์การออกของข้าวบาร์เลย์ลดลง เงื่อนไขในการอบแห้งที่เหมาะสมคือ ที่ระดับความเข้มของรังสีอินฟราเรด 0.333 W/cm<sup>2</sup> ส่วนการเพิ่มความเร็วอากาศเข้าห้องอบแห้งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานและยังใช้เวลาอบแห้งเพิ่มมากขึ้นเพราะความเร็วอากาศที่สูงขึ้นทำให้เกิดการระคายความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ออกไป

Afzal และ Abe ได้ทำการศึกษาการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อนของมันฝรั่ง โดยใช้เงื่อนไขในการทดลองเหมือนกับข้าวบาร์เลย์ พบว่าได้ผลการทดลองในแนวทางเดียวกับการอบแห้งข้าวบาร์เลย์ และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่ามากที่ระดับความเข้มของรังสีอินฟราเรดสูง ส่วนความชื้นสัมพัทธ์อากาศไม่มีอิทธิพลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ประพัฒน์ ทองจันทร์ และวิชชัย ทิววรรณวงศ์ ศึกษาการลดความชื้นเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สำหรับการลวกเนื้อโดยใช้รังสีอินฟราเรด พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้ง 70°C ระยะติดตั้งแท่งอินฟราเรด 15 cm นอกจากนี้ยังพบว่า การอบโดยใช้รังสีอินฟราเรดใช้เวลาในการอบ 6 ชั่วโมง สิ้นเปลืองพลังงานคิดเป็นเงิน 80.95 บาท และค่าแรงงาน 143 บาท ในขณะที่ตู้อบแก๊สใช้เวลาในการอบ 26 ชั่วโมง สิ้นเปลืองพลังงานคิดเป็นเงิน 231.33 บาท และค่าแรงงาน 429 บาท การอบเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้รังสีอินฟราเรดสามารถประหยัดเวลาได้ 76.9 เปอร์เซ็นต์ และประหยัดค่าใช้จ่ายแปรผันได้ 66 เปอร์เซ็นต์

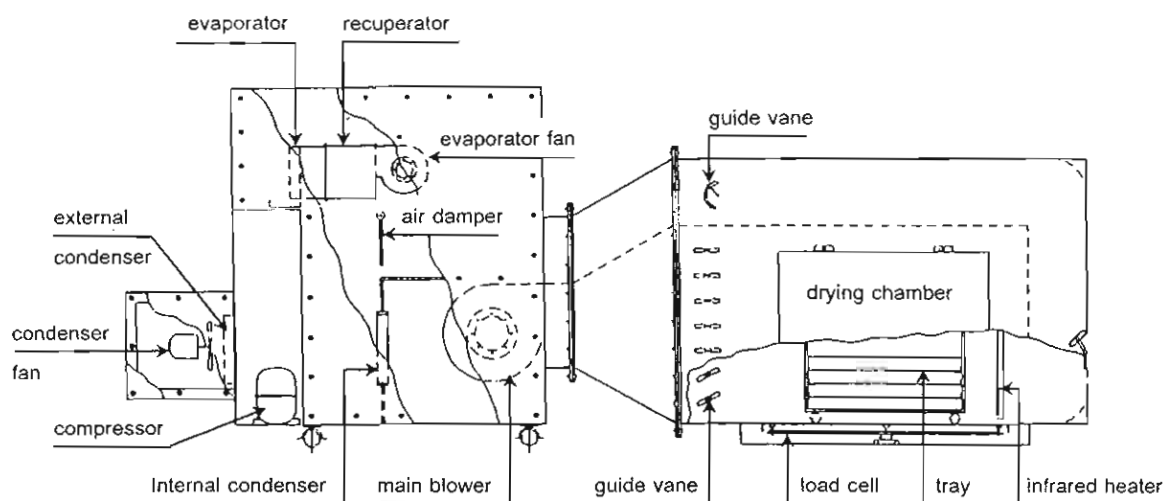
Tan et al. ศึกษาการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ในการทดลองนี้ใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบที (type T) ที่ต่อไปยังชุดควบคุม (PID controller) เชียบเข้าไปในเนื้อผลิตภัณฑ์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามที่กำหนด (set point temperature) ดังนั้นการให้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดถูกควบคุมโดยอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะตัดรังสีอินฟราเรดทันทีที่อุณหภูมิของวัสดุถึงค่าที่กำหนดไว้ จากผลการทดลองแบ่งเป็นสองกรณี คือกรณีแรก ควบคุมอุณหภูมิผลิตภัณฑ์เริ่มต้นที่ 38°C เป็นเวลา 10 นาที ต่อมาควบคุมที่ 36°C และกรณีที่สองควบคุมอุณหภูมิผลิตภัณฑ์เริ่มต้นที่ 45°C เป็นเวลา 10 นาที ต่อมาควบคุมที่ 40°C พบว่ากรณีแรกซึ่งอุณหภูมิต่ำกว่าแต่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่ากรณีที่สอง เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ของกรณีที่สองมีค่าน้อยกว่ากรณีที่แรก ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากผลิตภัณฑ์โดยการพามีค่าน้อย ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งมากกว่า ส่วนการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับปั๊มความร้อนสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว อีกทั้งสีของผลิตภัณฑ์ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การศึกษาการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดยังมีไม่มาก โดยเฉพาะในประเทศไทย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเริ่มต้นของการใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดในการอบแห้ง โดยศึกษาผลของการอบแห้งผ้าชุบน้ำด้วยปั๊มความร้อน (HP) และปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรด (HP&IR) เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งทั้งสองแบบ โดยคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งคือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง อุณหภูมิควบคุมการเปิดปิดแหล่งรังสีอินฟราเรด (set point temperature; setpt) อัตราการไหลของอากาศอบแห้ง และความชื้นเริ่มต้นของผ้าชุบน้ำ

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรดที่ออกแบบได้ติดตั้งแหล่งรังสีอินฟราเรดขนาด 0.65 kW จำนวน 3 แท่ง ในแนวตั้งจากก้นทิศทางการไหลของอากาศที่ผ่านการอบแห้งผ้าชุบน้ำและห่างจากวัสดุอบแห้ง 0.12 m โดยมีระยะห่างระหว่างแท่งรังสีอินฟราเรด 0.25 m ปั๊มความร้อนมีขนาดเครื่องควบแน่นตัวในและตัวนอกรวม 4.5 kW เครื่องทำระเหย 3.66 kW เครื่องอัดไอ 1.3 kW พัดลมหลักขนาด 0.75 kW พัดลมสำหรับเครื่องควบแน่นตัวนอกและเครื่องทำระเหยขนาด 50 W ตู้อบแห้งมีขนาดภายในเท่ากับ 0.90 m.(กว้าง) x 0.80 m.(ยาว) x 0.75 m.(สูง) สามารถบรรจุวัสดุชิ้นเลนส์ขนาด 0.74 m.(กว้าง) x 0.65 m.(ยาว) x 0.60 m.(สูง) รถเข็นสามารถบรรจุภาตสเลนส์ขนาด 0.72 x 0.63 m<sup>2</sup> ได้ 12 ภาต เครื่องชั่งน้ำหนักแบบโหลดเซลล์ถูกติดตั้งอยู่ด้านล่างของตู้อบแห้ง ซึ่งน้ำหนักได้สูงสุด 150 kg (อ่านได้ละเอียด 0.05 kg) รายละเอียดของเครื่องอบแห้งแสดงในรูปที่ 1 ส่วนอุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิเปิดปิดแหล่งรังสีอินฟราเรดควบคุมโดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (digital temperature controller) ความละเอียด 1 °C โดยติดตั้งปลายสายเทอร์โมคัปเปิลที่ทางเข้าห้องอบแห้งสำหรับการควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง และติดตั้งปลายสายเทอร์โมคัปเปิลที่ขอบภาตด้านอากาศอบแห้งไหลออกจากชั้นภาตห่างจากแหล่งรังสีอินฟราเรด 0.12 m สำหรับควบคุมอุณหภูมิเปิดปิดแหล่งรังสีอินฟราเรด อุปกรณ์การวัดข้อมูลที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K สำหรับวัดอุณหภูมิโดยต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล รุ่น C8510 ช่วงวัดอุณหภูมิ -100-1300°C ความละเอียด ± 0.2%, บรูตองเกจสำหรับวัดความดันของสารทำความเย็น, hot wire anemometer สำหรับวัดความเร็วลม, กิโวลต์แอมป์มิเตอร์ สำหรับวัดพลังงานไฟฟ้ารวม, clip on meter สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าของพัดลมหลัก, เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลอ่านได้ละเอียด 0.01 g

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดูแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 47 และ 51°C อุณหภูมิควบคุมการเปิดปิดแห้งรังสีอินฟราเรด 38, 39, 41, 43 และ 48°C อัตราการไหลของอากาศอบแห้ง 258, 858, 1126 และ 1437 kg/h ความชื้นเริ่มต้นของผ้าชุบน้ำ 200 %d.b. (ไม่มัดผ้า) และความชื้นเริ่มต้นของผ้าชุบน้ำต่ำประมาณ 34 %d.b. (มัดผ้าและไม่มัดผ้า) สำหรับความชื้นเริ่มต้นของผ้าชุบน้ำ 200 %d.b. จะคลุกเคล้าผ้าแห้ง (1.5 kg) กับน้ำ (3 kg) จนผ้าดูดซับน้ำหมดแล้วนำผ้าเปียกวางเรียงบนถาดให้สม่ำเสมอทั่วถาด ส่วนความชื้นเริ่มต้นต่ำ



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรด

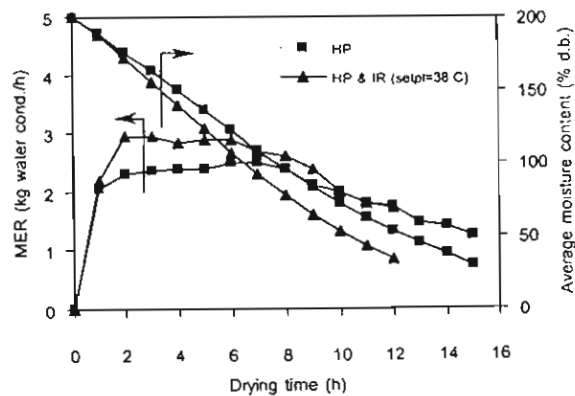
ประมาณ 34 %d.b. จะคลุกผ้าแห้ง (1.5 kg) พร้อมกับสเปรย์น้ำลงบนผ้าเพื่อให้ น้ำกระจายได้ทั่วถึง ซึ่งมวลผ้าขึ้นเป็นระยะๆ จนได้น้ำหนักประมาณ 2.015 kg แล้วเก็บผ้าไว้ในที่อับอากาศโดยใส่ถุงผูกให้แน่น นำไปใส่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C คลุกเคล้าผ้าวันละ 2-3 ครั้ง เป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้ น้ำแพร่กระจายทั่วถึงผ้าทั้งหมดจึงนำออกมาอบแห้ง ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี คือ ไม่มัดผ้าและมัดผ้า กรณีไม่มัดผ้าจะนำผ้าขึ้นวางเรียงบนถาดให้สม่ำเสมอทั่วถาด ส่วนกรณีมัดผ้าจะนำผ้าขึ้นมัดเป็นก้อนประมาณ 40-45 ชิ้นต่อถาดแล้ววางเรียงกันให้ทั่วถาด

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

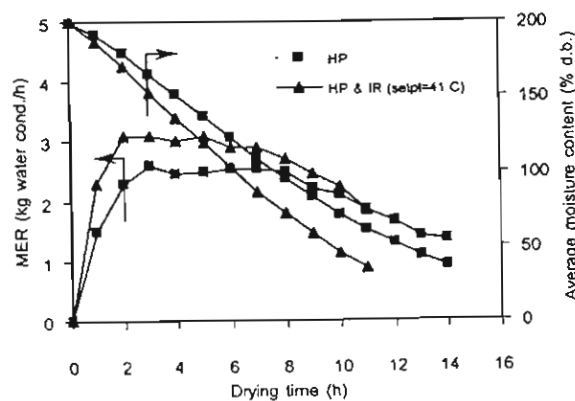
#### 3.1 ผลกระทบของการใช้รังสีอินฟราเรดต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

เมื่อเปรียบเทียบกราฟ Moisture extraction rate (MER) กับการทดลองที่ 2 (HP) และ 3 (HP&IR) (รูปที่ 2) พบว่าในการทดลองที่ 3 ช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งค่า MER สูงกว่าการทดลองที่ 2 มาก หลังจากนั้นจะเริ่มลดลงกระทั่งมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงท้ายของการอบแห้งที่เวลาอบแห้งประมาณ 10 ชั่วโมง แสดงว่าการใช้รังสีอินฟราเรดสามารถช่วยลดเวลาในการอบแห้งช่วงแรก แต่ในช่วงท้ายของการอบแห้งผ้าบริเวณส่วนบนของถาด (ส่วนที่สัมผัสกับอากาศร้อนและรังสีอินฟราเรดโดยตรง) เริ่มแห้งทำให้น้ำระเหยได้ยากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของรังสีอินฟราเรดที่ทะลุทะลวงผ่านวัสดุได้ค่อนข้างน้อยทำให้ไม่มีส่วนช่วยในการระเหยน้ำในช่วงท้ายของการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง (drying rate) ของการทดลองที่ 3 มีค่ามากกว่าการทดลองที่ 2 เนื่องจากการทดลองที่ 3 เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการพาพร้อมกับการแผ่รังสีทำให้น้ำระเหยได้เร็วกว่าการถ่ายเทความร้อนแบบการพาเพียงอย่างเดียว การใช้พลังงานจำเพาะในการทดลองที่ 3 จะมากกว่าการทดลองที่ 2 เนื่องจากต้องสิ้นเปลืองพลังงานในส่วนของการใช้รังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น สมรรถนะของปั๊มความร้อน

ร้อน ( $COP_{hp,uscd}$ ) ของการทดลองที่ 3 มีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 2 เนื่องจากการใช้รังสีอินฟราเรดทำให้อุณหภูมิอากาศอบแห้งขาออกจากห้องอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้คอนเดนเซอร์ตัวในระบายความร้อนได้น้อยลง ความร้อนที่เหลือในสารทำความเย็นต้องไประบายทิ้งที่คอนเดนเซอร์ตัวนอกมากขึ้น (ตารางที่ 2) สำหรับการทดลองที่ 6 (HP) และ 7 (HP&IR) (รูปที่ 3) จะเพิ่มอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้งสูงกว่าการทดลองที่ 2 และ 3 ประมาณ  $4^{\circ}C$  แต่เวลาในการอบแห้งที่ได้จากการทดลองทั้งสองต่างกันไม่มาก ส่งผลให้ค่า MER และ อัตราการอบแห้งสูงขึ้นเล็กน้อย ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ 6 และ 7 มีลักษณะในแนวเดียวกันกับผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลง MER และความชื้นเฉลี่ยกับเวลา (การทดลองที่ 2. HP และ 3. HP&IR:seipt  $38^{\circ}C$ )



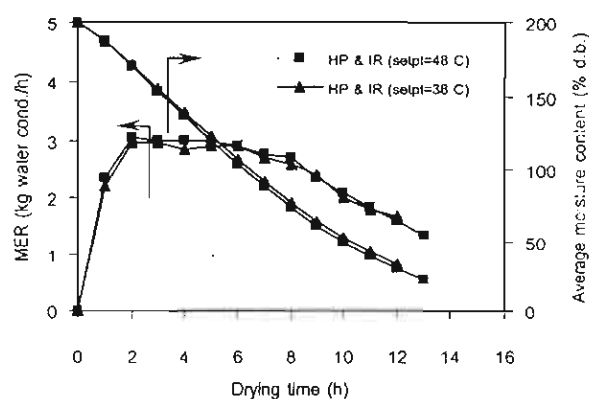
รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลง MER และความชื้นเฉลี่ยกับเวลา (การทดลองที่ 6. HP และ 7. HP&IR:seipt  $41^{\circ}C$ )

ตารางที่ 2 ผลการทดลองอบแห้งผ้าชุบน้ำ

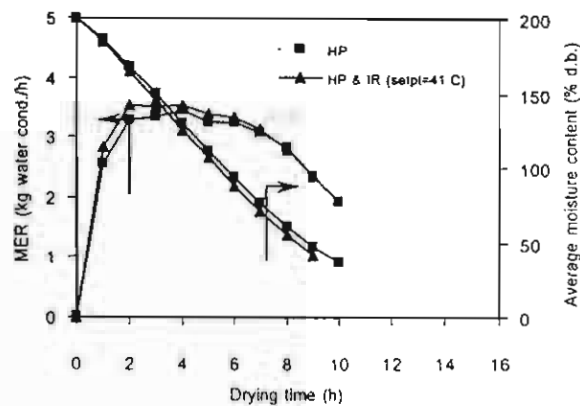
| Description                                              | Test No. |      |       |      |       |       |      |
|----------------------------------------------------------|----------|------|-------|------|-------|-------|------|
|                                                          | 1        | 2    | 3     | 6    | 7     | 9     | 10   |
|                                                          | HP&IR    | HP   | HP&IR | HP   | HP&IR | HP&IR | HP   |
| <b>Condition of product</b>                              |          |      |       |      |       |       |      |
| Average moisture before drying (%d.b.)                   | 200      | 200  | 200   | 200  | 200   | 200   | 200  |
| Average moisture after drying (%d.b.)                    | 14.9     | 21.9 | 23.0  | 21.1 | 22.7  | 21.1  | 18.8 |
| Initial weight (kg)                                      | 54       | 54   | 54    | 54   | 54    | 54    | 54   |
| Moisture removed (kg)                                    | 33.3     | 32.1 | 31.9  | 32.2 | 31.9  | 21.8  | 21.4 |
| <b>Drying air conditions</b>                             |          |      |       |      |       |       |      |
| Average temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )               | 47       | 47   | 47    | 51   | 51    | 51    | 51   |
| Set point temperature of infrared ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 48       | -    | 38    | -    | 41    | 41    | -    |
| Evaporator by-pass air (%)                               | 65       | 65   | 65    | 65   | 65    | 65    | 65   |
| Average air velocity (m/s)                               | 0.61     | 0.61 | 0.61  | 0.61 | 0.61  | 0.80  | 0.80 |
| Air flow rate (kg/h)                                     | 858      | 858  | 858   | 858  | 858   | 1126  | 1126 |
| Energy consumption of infrared (kWh)                     | 20.0     | -    | 11.8  | -    | 7.4   | 7.0   | -    |
| Energy consumption of HPD (kWh)                          | 27.8     | 28.4 | 25.7  | 29.2 | 25.4  | 22.0  | 24.1 |
| Drying time (h)                                          | 13.0     | 15.0 | 12.3  | 14.3 | 11.3  | 9.7   | 10.5 |
| <b>Performance of heat pump dryer</b>                    |          |      |       |      |       |       |      |
| drying rate (kg water evap. / h)                         | 2.56     | 2.14 | 2.59  | 2.25 | 2.82  | 3.33  | 3.11 |
| MER (kg water cond. / h)                                 | 2.46     | 2.04 | 2.48  | 2.10 | 2.67  | 3.10  | 2.90 |
| SMER (kg water evap. / kWh)                              | 0.70     | 1.13 | 0.85  | 1.10 | 0.98  | 1.11  | 1.35 |
| SEC (MJ / kg water evap.)                                | 5.16     | 3.18 | 4.24  | 3.26 | 3.69  | 3.24  | 2.66 |
| $\text{COP}_{\text{hp,used}}^*$                          | 3.20     | 3.84 | 3.56  | 3.59 | 3.58  | 3.82  | 4.37 |
| $\text{COP}_{\text{hp}}^{**}$                            | 4.49     | 4.71 | 4.57  | 4.32 | 4.52  | 5.04  | 4.94 |

\* สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนซึ่งคำนวณจากความร้อนที่ระบายออกโดยเครื่องควบแน่นตัวใน

\*\* สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนซึ่งคำนวณจากความร้อนที่ระบายออกโดยเครื่องควบแน่นทั้งสองตัว



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลง MER และความชื้นเฉลี่ยกับเวลา (การทดลองที่ 1. HP&IR: setpt 48 $^{\circ}\text{C}$  และ 3. HP&IR: setpt 38 $^{\circ}\text{C}$ )



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลง MER และความชื้นเฉลี่ยกับเวลา (การทดลองที่ 9. HP&IR: setpt 41°C และ 10. HP)

### 3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิควบคุมรังสีอินฟราเรดต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรด

จากผลการทดลองในหัวข้อ 1 พบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับการอบแห้งสามารถลดเวลาในการอบแห้งลงได้ แต่สิ้นเปลืองพลังงานในส่วนของการใช้รังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากการทดลองที่ 1 ได้ใช้อุณหภูมิควบคุมรังสีอินฟราเรด (set point temperature, setpt) 48°C ทำให้อุณหภูมิอากาศออกจากห้องอบแห้งมีค่าสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศที่เข้าห้องอบแห้งคือ 47°C และมีการระบายความร้อนทิ้งที่คอนเดนเซอร์ตัวนอกค่อนข้างมาก ดังนั้นในการทดลองที่ 3 จึงได้ลดอุณหภูมิควบคุมรังสีอินฟราเรดลงเหลือ 38°C ต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้ง 9°C ซึ่งสามารถลดพลังงานที่ใช้ในส่วนของการใช้รังสีอินฟราเรดได้ถึง 35 % แต่อัตราการอบแห้งยังคงใกล้เคียงกับการทดลองที่ 1 (รูปที่ 4) เนื่องจากน้ำภายในผ้าชุบน้ำสามารถดูดกลืนพลังงานจากรังสีอินฟราเรดได้ระดับหนึ่ง ถ้าอุณหภูมิควบคุมรังสีอินฟราเรดสูงเกินไปจะทำให้พลังงานจากการแผ่รังสีของแท่งรังสีอินฟราเรดมากเกินไปจนเกินไป นอกจากนั้นการระบายความร้อนทิ้งที่คอนเดนเซอร์ตัวนอกจะน้อยลง ส่งผลให้  $COP_{hp, used}$  มีค่าสูงขึ้น จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้อุณหภูมิควบคุมรังสีอินฟราเรดต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้งประมาณ 8-10 °C เป็นจุดที่ค่อนข้างเหมาะสมเพราะมีค่าใกล้เคียงกับอากาศอบแห้งที่ไหลออกจากชั้นถาด ซึ่งถ้าลดอุณหภูมิควบคุมรังสีอินฟราเรดต่ำกว่านี้ แท่งรังสีอินฟราเรดจะไม่สามารถทำงานได้

### 3.3 ผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศอบแห้ง ต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศอบแห้งจาก 858 kg/h (การทดลองที่ 6 (HP) และ 7 (HP&IR)) เป็น 1126 kg/h (การทดลองที่ 9 (HP&IR) และ 10 (HP)) สามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลงได้ประมาณ 12.2-18.4 % และ 14.2-26.6% ตามลำดับ ส่วน MER และ  $COP_{hp, used}$  มีค่าสูงขึ้นประมาณ 16.1-38.1% และ 7.9-24.5% ตามลำดับทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศอบแห้ง เป็นการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น อันเป็นผลมาจากค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นน้ำจึงระเหยออกจากผ้าชุบน้ำได้เร็วขึ้น แต่การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศอบแห้ง จะส่งผลกับรังสีอินฟราเรดให้มีอิทธิพลต่อการอบแห้งน้อยลง ดังจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบ รูปที่ 3 (อัตราการไหลของอากาศต่ำ) และรูปที่ 5 (อัตราการไหลของอากาศสูง) พบว่าความแตกต่างของเส้นกราฟ MER ในกรณีของอัตราการไหลอากาศสูงมีค่าน้อยลง เนื่องจากอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนโดยการพาที่มีค่าสูงกว่าการแผ่รังสีนั่นเอง จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของการแผ่รังสีอินฟราเรดอาจน้อยมากหรือไม่มีเลยถ้าอัตราการไหลของอากาศอบแห้งสูงมาก อย่างไรก็ตาม

ตามการเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งไม่ได้ทำให้การกระจายลมดีขึ้น ซึ่งดูได้จากความชื้นสุดท้ายระหว่างชั้นด้ายแตกต่างกันอยู่มากดังตารางที่ 4

จากการทดลองที่ 1-15 (บางการทดลองไม่ได้แสดงในที่นี้) พบว่า อากาศร้อนได้ไหลออกทางช่องว่างระหว่างผนังห้องอบแห้งกับรถเข็น ซึ่งมีประมาณ 35% ของพื้นที่หน้าตัดห้องอบแห้งทำให้การกระจายลมไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในการทดลองที่ 16 และ 17 จึงได้ปิดกันช่องว่างตรงจุดนี้ เพื่อยังคงให้อากาศร้อนไหลผ่านชั้นด้ายมากขึ้นเปรียบเสมือนการเพิ่มอัตราการไหลในชั้นด้ายนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบการทดลองที่ 6 และ 7 ซึ่งอัตราการไหลของอากาศอบแห้งโดยรวมเท่ากับการทดลองที่ 16 และ 17 พบว่า การทดลองที่ 16 และ 17 ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง (ตารางที่ 3) และการกระจายลมภายในห้องอบแห้งดีขึ้น สังเกตได้จากความชื้นสุดท้ายระหว่างชั้นด้ายมีความแตกต่างกันน้อยลง (ตารางที่ 4)

### 3.4 ผลกระทบของความชื้นเริ่มต้นต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

การลดความชื้นเริ่มต้นของผ้าชุบน้ำจาก 200 %d.b. เป็น 34.3 %d.b. (การทดลองที่ 18 (HP&IR) และ 19 (HP)) เพื่อศึกษาผลของรังสีอินฟราเรดในช่วงความชื้นเริ่มต้นต่ำ (ตารางที่ 3) พบว่า การใช้รังสีอินฟราเรดจะสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น และไม่ได้ช่วยลดเวลาในการอบแห้ง เนื่องจากผ้ามีคุณสมบัติในการระเหยน้ำได้ง่ายและปริมาณน้ำภายในผ้ามีน้อยมาก อุณหภูมิของผ้าชั้นจึงสูงขึ้นค่อนข้างเร็ว ดังนั้นความร้อนจากอากาศเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอต่อการระเหยน้ำออกจากผ้าชุบน้ำ ส่วนการทดลองที่ 20 (HP&IR) และ 21 (HP) ได้ทดลองที่เงื่อนไขเดียวกับการทดลองที่ 18 และ 19 แต่จะมัดผ้าเป็นก้อนเพื่อจำลองการถ่ายเทความร้อนให้คล้ายกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในช่วงการอบแห้งลดลง ซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์นั้นๆ เป็นตัวควบคุมกลไกการอบแห้ง จากการทดลอง พบว่า การอบแห้งผ้าที่มัดเป็นก้อนใช้เวลานานกว่าผ้าที่ไม่ได้มัดทั้งการอบแห้งที่ใช้และไม่ใช้รังสีอินฟราเรด เนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ลดลงในผ้ามัดก้อน อย่างไรก็ตามรังสีอินฟราเรดมีส่วนช่วยในการ อบแห้งน้อยที่ความชื้นเริ่มต้นระดับนี้และให้ผลการทดลองที่คล้ายกับการทดลองที่ 18 และ 19

ตารางที่ 3 ผลการทดลองอบแห้งผ้าขนนกที่ปิดกันช่องว่างระหว่างรัดขึ้นและหนังหุ้มอบแห้ง

| Description                                              | Test No. |      |       |      |       |      |
|----------------------------------------------------------|----------|------|-------|------|-------|------|
|                                                          | 16       | 17   | 18    | 19   | 20    | 21   |
|                                                          | HP&IR    | HP   | HP&IR | HP   | HP&IR | HP   |
| <b>Condition of product</b>                              |          |      |       |      |       |      |
| Average moisture before drying (%d.b.)                   | 200      | 200  | 34.3  | 34.3 | 34.7  | 34.7 |
| Average moisture after drying (%d.b.)                    | 21.8     | 22.6 | 10.6  | 10.6 | 9.1   | 9.8  |
| Initial weight (kg)                                      | 54       | 54   | 24.2  | 24.2 | 24.2  | 24.2 |
| Moisture removed (kg)                                    | 21.9     | 22.1 | 4.3   | 4.3  | 4.6   | 4.5  |
| <b>Drying air conditions</b>                             |          |      |       |      |       |      |
| Average temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )               | 51       | 51   | 51    | 51   | 51    | 51   |
| Set point temperature of infrared ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 41       | -    | 41    | -    | 41    | -    |
| Evaporator by-pass air (%)                               | 65       | 65   | 65    | 65   | 65    | 65   |
| Average air velocity (m/s)                               | 0.81     | 0.81 | 0.24  | 0.24 | 0.24  | 0.24 |
| Air flow rate (kg/h)                                     | 858      | 858  | 259   | 259  | 259   | 259  |
| Energy consumption of infrared (kWh)                     | 5.7      | -    | 2.0   | -    | 2.4   | -    |
| Energy consumption of HPD (kWh)                          | 18.6     | 18.3 | 5.5   | 5.6  | 6.8   | 6.6  |
| Drying time (h)                                          | 8.2      | 8.3  | 2.5   | 2.7  | 3.3   | 3.3  |
| <b>Performance of heat pump dryer</b>                    |          |      |       |      |       |      |
| drying rate (kg water evap. / h)                         | 3.93     | 3.83 | 1.71  | 1.60 | 1.41  | 1.38 |
| MER (kg water cond. / h)                                 | 3.68     | 3.64 | 1.49  | 1.47 | 1.24  | 1.26 |
| SMER (kg water evap. / kWh)                              | 1.32     | 1.74 | 0.57  | 0.76 | 0.50  | 0.67 |
| SEC (MJ / kg water evap.)                                | 2.73     | 2.06 | 6.28  | 4.75 | 7.24  | 5.35 |
| $\text{COP}_{\text{hp,used}}^*$                          | 3.71     | 4.23 | 2.09  | 2.18 | 1.98  | 2.25 |
| $\text{COP}_{\text{hp}}^{**}$                            | 4.63     | 4.68 | 2.42  | 2.37 | 2.39  | 2.35 |

- \* สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนซึ่งคำนวณจากความร้อนที่ระบายออกโดยเครื่องควบแน่นตัวใน
- \*\* สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนซึ่งคำนวณจากความร้อนที่ระบายออกโดยเครื่องควบแน่นทั้งสองตัว

ตารางที่ 4 ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยของผ้าชุบน้ำในถาดต่างๆ

| Position of Trays | Average final moisture content (%d.b.) |       |       |      |       |      |
|-------------------|----------------------------------------|-------|-------|------|-------|------|
|                   | Test No.                               |       |       |      |       |      |
|                   | 6                                      | 7     | 9     | 10   | 16    | 17   |
|                   | HP                                     | HP&IR | HP&IR | HP   | HP&IR | HP   |
| 1 (Top)           | 0.7                                    | 7.7   | 8.6   | 8.6  | 21.5  | 28.7 |
| 2                 | 6.5                                    | 34.1  | 22.2  | 18.5 | 24.3  | 26.0 |
| 3                 | 5.1                                    | 15.4  | 8.2   | 9.2  | 16.2  | 16.2 |
| 4                 | 5.6                                    | 14.3  | 11.2  | 6.9  | 20.9  | 22.8 |
| 5                 | 17.4                                   | 21.4  | 18.6  | 15.1 | 26.3  | 21.7 |
| 6                 | 26.1                                   | 31.9  | 34.5  | 25.2 | 27.8  | 31.2 |
| 7                 | 47.8                                   | 30.7  | 37.4  | 33.7 | 24.3  | 25.2 |
| 8                 | 41.4                                   | 23.7  | 29.5  | 29.8 | 20.4  | 22.0 |
| 9                 | 39.7                                   | 25.0  | 22.2  | 26.5 | 18.7  | 18.3 |
| 10                | 36.3                                   | 27.1  | 24.8  | 24.8 | 22.4  | 20.7 |
| 11                | 24.4                                   | 33.5  | 28.9  | 23.1 | 16.9  | 18.2 |
| 12 (Bottom)       | 1.6                                    | 7.4   | 7.5   | 4.6  | 22.3  | 20.8 |

#### 4. สรุปผลการทดลอง

การใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับการอบแห้งแบบบีบความร้อนช่วยลดเวลาในการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นของผ้าชุบน้ำสูงได้ระดับหนึ่งแต่จะสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้นในส่วนของการใช้รังสีอินฟราเรด การตั้งค่าอุณหภูมิควบคุมแห้งรังสีอินฟราเรดให้ใกล้เคียงกับอากาศร้อนที่ไหลออกจากชั้นถาด จะช่วยลดความสิ้นเปลืองพลังงานในส่วนนี้ลงขณะที่ยังใช้เวลาในการอบแห้งเท่าเดิม รังสีอินฟราเรดจะมีอิทธิพลน้อยลงเมื่ออัตราการไหลอากาศอบแห้งสูงขึ้น และไม่มีอิทธิพลในการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นของผ้าชุบน้ำต่ำทั้งมัดผ้าและมัดผ้า นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการไหลอากาศอบแห้งในการทดลองอบแห้งแบบบีบความร้อนและแบบบีบความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ส่งผลให้ค่าสมรรถนะของบีบความร้อนและ Moisture extraction rate (MER) สูงขึ้น ขณะที่ระยะเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลง การทดลองเปรียบเทียบการอบแห้งผ้าชุบน้ำด้วยบีบความร้อน และบีบความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบว่า ในกรณีที่ไม่ได้ปิดกั้นช่องลมระหว่างรถเข็นกับผนังห้องอบแห้ง เงื่อนไขความชื้นเริ่มต้นของผ้าชุบน้ำสูง (200%d.b.) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 51°C อุณหภูมิควบคุมการเปิดปิดแห้งรังสีอินฟราเรด 41°C และอัตราการไหลอากาศต่ำ (858 kg/h) เป็นเงื่อนไขการอบแห้งด้วยบีบความร้อนร่วมกับอินฟราเรดใกล้ที่ดีที่สุดในช่วงเวลาของการอบแห้งที่เร็วกว่าการอบแห้งด้วยบีบความร้อน ในขณะที่การสิ้นเปลืองพลังงานและค่าสมรรถนะมีค่าใกล้เคียงกับการอบแห้งด้วยบีบความร้อน โดยการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับบีบความร้อนช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้ประมาณ 3 ชั่วโมง สิ้นเปลืองพลังงาน 3.69 MJ/kg water evap. และค่าสมรรถนะของบีบความร้อน ( $COP_{hp,used}$ ) เท่ากับ 3.58 ขณะที่การอบแห้งผ้าชุบน้ำโดยใช้บีบความร้อนที่เงื่อนไขเดียวกันใช้เวลาในการอบแห้ง 14.3 ชั่วโมง สิ้นเปลืองพลังงาน 3.26 MJ/kg water evap. และค่าสมรรถนะของบีบความร้อนเท่ากับ 3.59

#### คำขอขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

1. Min, Z. and Naizhang, X. Research of Far-Infrared Drying on White Mushroom. Proceeding of the International Agricultural Engineering Conference. 1992; 637-641.
2. Abe, T. and Afzal, T.M., Thin-Layer Infrared Radiation Drying of Rough Rice. Journal of Agricultural Engineering Research. 1997; 67: 289-297.
3. Fu, W.R. and Lien, W.R., Optimization of Far Infrared Heat Dehydration of Shrimp Using RSM. Journal of Food Science, 1998; 63(1): 80-83.
4. Afzal, T.M. and Abe, T. Some Fundamental Attributes of Far Infrared Radiation Drying of Potato. Drying Technology, 1997; 17(1&2): 137-155.
5. Afzal, T.M., Abe, T. and Hikida Y. Energy and Quality Aspects During Combined FIR-Convection Drying of Barley. Journal of Food Engineering, 1999; 42: 177-182.
6. Tan, S.L., Chou, S.K., Mujumdar, A.S. and Chua, K.J. Convective and Intermittent Radiative Drying of Model Foods: Effect on Drying Kinetics and Colour Change. In ACD 2001; 537-546.
7. ประพัฒน์ ทองจันทร์ และ ชัชชัย ทิววรรณวงศ์. การประเมินความเหมาะสมเบื้องต้นของวิธีการอบแห้งเห็ดลมวังหิมพานต์โดยใช้อินฟราเรด. วิศวกรรมเกษตรกับวิชาการสร้างสรรค์แห่งสหัสวรรษใหม่ 2544; 241-250.

การศึกษาการแผ่รังสีอินฟราเรดหลังการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิไดซ์เบด  
STUDY OF INFRARED IRRADIATION AFTER FLUIDIZED BED PADDY DRYING

นเรศ มีโส<sup>1</sup> อติศักดิ์ นาดกรณกุล<sup>2</sup> ฐานิตย์ เมธิยานนท์<sup>3</sup> และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์<sup>4</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาปริญญาเอก, <sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์, <sup>3</sup>อาจารย์, <sup>4</sup>ศาสตราจารย์

<sup>1,2,4</sup>คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ถนนสุขสวัสดิ์ 28 เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

<sup>3</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

บทคัดย่อ : รังสีอินฟราเรด คือ แหล่งพลังงานที่สำคัญแหล่งหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ในการอบแห้งข้าวเปลือกได้ เพราะข้าวจะดูดกลืนพลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความยาวคลื่นระหว่าง 2.9-9.5  $\mu\text{m}$  และเกิดการเปลี่ยนแปลงในสภาวะการสั่นสะเทือนโมเลกุลของน้ำกลายเป็นพลังงานความร้อนขึ้นภายในเมล็ดข้าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีผลต่อความชื้นและคุณภาพการสีของข้าวเปลือกในด้านปริมาณต้นข้าวและความขาวในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด การแผ่รังสีอินฟราเรด การเก็บในที่อับอากาศ และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม จากผลการทดลองพบว่า การแผ่รังสีอินฟราเรดหลังการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกลงถึง 21.5%d.b. โดยปริมาณต้นข้าวยังอยู่ในเกณฑ์ที่สูง แต่จะลดลงถ้าความชื้นลดลงต่ำถึง 20.5%d.b.

**ABSTRACT :** Paddy can absorb far-infrared radiative energy efficiently in wavelengths between 2.9-9.5  $\mu\text{m}$ . Infrared radiative energy induces the changes in the vibrational state of water molecules, resulted in thermal energy generating inside the paddy kernel. The objective of this work is to study the influence of infrared irradiation on moisture content and milling quality of paddy in terms of head rice yield and whiteness in drying process, which consists of fluidized bed drying. Experimental results showed that infrared irradiation after fluidized bed drying can reduce the moisture content of paddy down to 21.5%d.b. with high head rice yield. However, if moisture content was lower than 20.5%d.b., head rice yield reduced considerably..

**Keywords :** ambient air ventilation / fluidized bed drying / tempering / infrared irradiation

## 1. บทนำ

สำหรับการศึกษาปัญหาและแนวทางการแก้ไขข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงหลังการเก็บเกี่ยวที่ผ่านมา Soponronnarit [9] ได้เสนอแนวทางการแก้ไขปัญหานี้ไว้อย่างเป็นระบบ โดยแนะนำให้เป่าอากาศแวดล้อมเข้าภายในกองข้าวเปลือกในขณะที่คอยการอบแห้ง และทำการอบแห้ง 2 ช่วง คือ ในช่วงแรก ลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างรวดเร็วให้เหลือประมาณ 23% d.b. ด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชเบค และในช่วงที่สอง ลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างช้าๆ ภายในฉางเก็บ จากประมาณ 23 เหลือ 16% d.b. โดยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม หรือใช้เครื่องอบแห้งที่ใช้ลมร้อนทั่วไป

จากแนวทางดังกล่าวนี้พบปัญหาว่า ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งจากเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชเบคในช่วงแรกนั้น มีความแตกต่างของความชื้นระหว่างแกนกลางและผิวของเมล็ดมาก และเกิดความเครียดขึ้นจึงส่งผลทำให้เมล็ดเกิดการแตกร้าว ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการนำเอาการเก็บในที่อับอากาศเข้ามาช่วยในระหว่างการอบแห้งทั้งสองช่วง Stelfe, Singh และ Bakshi [12] ได้ศึกษาระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศที่เหมาะสมในระหว่างการอบแห้งข้าวเปลือกครั้งแรกและครั้งที่สอง พบว่า การเก็บในที่อับอากาศสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกในการอบแห้งในช่วงที่สองได้มากกว่าข้าวเปลือกที่ไม่มีการเก็บในที่อับอากาศ ส่วนในด้านคุณภาพการสี พบว่า ข้าวเปลือกที่ผ่านการเก็บในที่อับอากาศจะมีปริมาณต้นข้าวมากกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการเก็บในที่อับอากาศ Stelfe และ Singh [11] พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง และระยะเวลาในการอบแห้งหรือความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงในช่วงแรกของการอบแห้งจะเป็นตัวแปรที่มีผลต่อระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศมากที่สุด จากหลักการของการเก็บในที่อับอากาศ Soponronnarit, Welchacama, Swasdisevi และ Poomsa-ad [10] ได้นำเอาการเก็บในที่อับอากาศและการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมมาใช้เป็นกระบวนการหลังการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไชเชชัน พบว่า สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 33 ลงได้ถึง 16.5% d.b. ภายในระยะเวลา 53 นาที ส่วนคุณภาพของข้าวเปลือกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ Poomsa-ad, Soponronnarit, Prachayawarakorn และ Terdyothin [4] แนะนำว่า การรักษาข้าวเปลือกให้มีคุณภาพสูงนั้น ในช่วงแรกของการอบแห้งจะต้องไม่ลดความชื้นลงต่ำกว่า 22.5% d.b. และตามด้วยการเก็บในที่อับอากาศประมาณ 30 นาที จากภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวนี้ จะทำให้ปริมาณต้นข้าวสัมพัทธ์สูงกว่า 100%

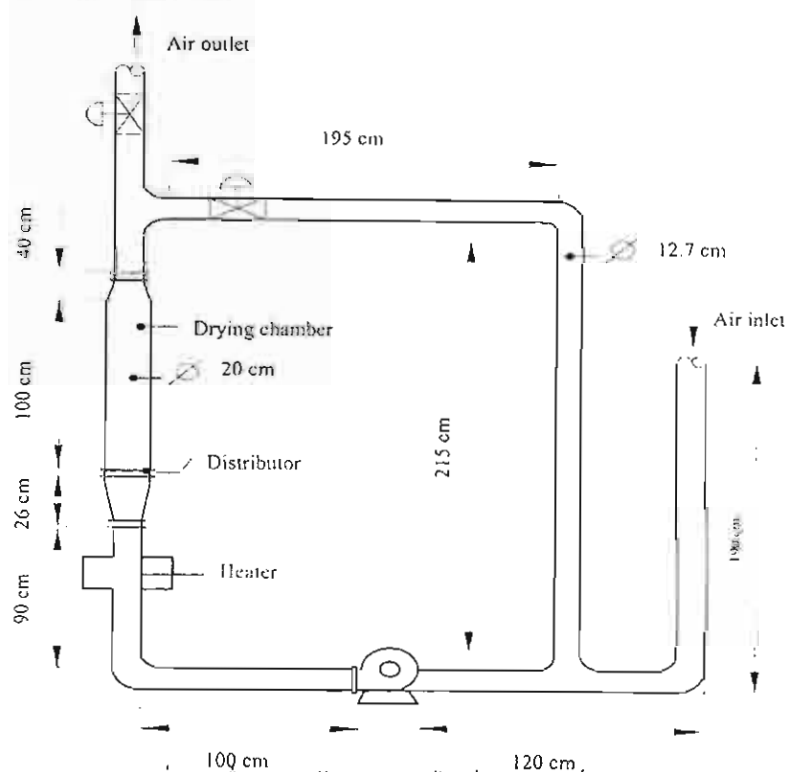
สำหรับในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดนั้น Sakai และ Hanzawa [5] อธิบายไว้ว่า รังสีจะถูกแผ่ออกมาในลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตลอดช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรดมาดกระทบลงบนผิวของผลิตภัณฑ์ แล้วรังสีจะเกิดการทะลุทะลวงเข้าไปภายในผลิตภัณฑ์ทำให้พลังงานส่วนหนึ่งของการแผ่รังสีถูกผลิตภัณฑ์ดูดกลืนเอาไว้และเกิดการเปลี่ยนแปลงในสถานะการสั่นสะเทือนของโมเลกุล ซึ่งในสภาวะดังกล่าวนี้จะสอดคล้องกับความยาวคลื่นในช่วงระหว่าง 2.5-100  $\mu\text{m}$  หรือในช่วงรังสีอินฟราเรดแบบคลื่นยาว (Shimizu [7]) โดยทั่วไปแล้ว เมล็ดพืชต่างๆ จะมีส่วนประกอบหลัก คือ น้ำ โปรตีน และแป้ง ซึ่งจะดูดกลืนพลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ความยาวคลื่นมากกว่า 2.5  $\mu\text{m}$  (Shoji [8], Sandu [6]) Bekki [2] พบว่า การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดสูงที่สุดโดยเมล็ดข้าวเปลือกขนาดกลางจะเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่น 2.9  $\mu\text{m}$  สำหรับความลึกของการทะลุทะลวงเข้าไปภายในเมล็ดพืชต่างๆ ของรังสีอินฟราเรดนั้น Sandu [6], Nindo, Kudo และ Bekki [3] พบว่า รังสีอินฟราเรดแบบคลื่นยาวจะทะลุทะลวงลงไปภายในเมล็ดพืชเพียงแค่ 1-2 mm เท่านั้น ดังนั้นกระบวนการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดแบบคลื่นยาวจึงเหมาะสมกับชั้นบางของเมล็ดขนาดเล็ก เช่น ข้าว

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีต่อความชื้น และคุณภาพของข้าวเปลือก

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองจะถูกทำให้ชื้น แล้วนำไปเก็บในห้องเย็นที่อุณหภูมิ  $3-5^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 7 วัน ก่อนการทดลองข้าวเปลือกจะถูกปล่อยทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเท่ากับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม

สำหรับการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 1 คือ ข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขจะถูกอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดแบบเป็นวง ดังแสดงในรูปที่ 1 ต่อมาจะถูกแผ่ด้วยรังสีอินฟราเรดโดยเครื่องแผ่รังสีอินฟราเรดแบบกล่อง ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งตั้งอุณหภูมิห้องแผ่รังสีอินฟราเรดเท่ากับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกหลังจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด จากนั้นจะนำไปเก็บในที่อับอากาศโดยการใส่ในขวดแก้วที่ปิดสนิท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 cm สูง 10 cm แล้วจึงนำเข้าตู้อบ ซึ่งตั้งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกหลังจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด สุดท้ายจะนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมโดยเครื่องเป่าอากาศแวดล้อม



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดแบบเป็นวง

ในการทดลองแต่ละเงื่อนไขจะทำการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกทุกชั้นตอน เพื่อนำไปหาความชื้นและทดสอบหาคุณภาพของข้าว สำหรับการหาความชื้นของข้าวเปลือกนั้นจะถูกหาโดยการเก็บตัวอย่างละประมาณ 50 g ไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ  $103^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (ความถูกต้องของการหาความชื้นประมาณ  $\pm 0.3\% \text{d.b.}$ ) ส่วนคุณภาพของข้าวเปลือกในเทอมของปริมาณคั่วและความขาวจะถูกนำไปทดสอบตามกรรมวิธีของกองการข้าว กรม

วิชาการเกษตร กระบวนการเกษตรและสหกรณ์ และความขาวจะทดสอบด้วยเครื่อง Whiteness Tester Model Kett C-300 (ความขาวอ้างอิง 86.3)

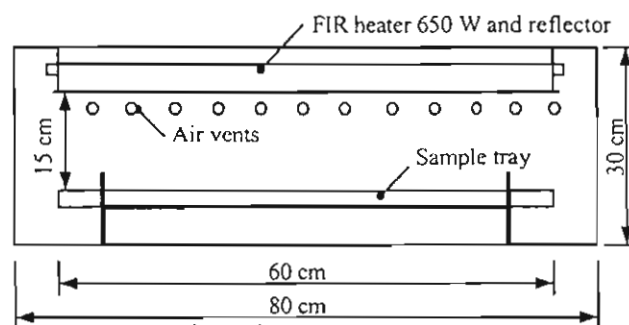
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองของกระบวนการอบแห้งต่างๆ

| กระบวนการอบแห้ง |                                                                | เงื่อนไข          |                   |                   |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                 |                                                                | A                 | B                 | C                 |
| FB              | อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, ( $^{\circ}\text{C}$ ) <sup>(1)</sup>     | 150               | 150               | 150               |
|                 | ความหนาของเบด,(cm) <sup>(1)</sup>                              | 9.5               | 9.5               | 9.5               |
|                 | ความเร็วลม,(m/s) <sup>(1)</sup>                                | 2.6               | 2.6               | 2.6               |
|                 | เวลา,(นาทึ)                                                    | 1.5               | 1.5               | 2                 |
| IR              | ความเข้มของการแผ่รังสี,( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )       | 0.311             | 0.689             | 0.311             |
|                 | ความหนาของเบด                                                  | ชั้นเดียวของเมล็ด | ชั้นเดียวของเมล็ด | ชั้นเดียวของเมล็ด |
|                 | ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดและข้าวเปลือก, (cm) <sup>(2)</sup> | 15                | 15                | 15                |
|                 | เวลา,( นาทึ)                                                   | 0.5               | 0.5               | 0.5               |
| TEM             | อุณหภูมิ, ( $^{\circ}\text{C}$ )                               | 80                | 80                | 85                |
|                 | เวลา,(นาทึ)                                                    | 20                | 20                | 20                |
| AAV             | ความหนาของเบด,(cm) <sup>(1)</sup>                              | 3                 | 3                 | 3                 |
|                 | ความเร็วอากาศ,(m/s) <sup>(1)</sup>                             | 0.15              | 0.15              | 0.15              |
|                 | เวลา,(นาทึ)                                                    | 30                | 30                | 30                |

หมายเหตุ

- เงื่อนไข A, B และ C ประกอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชเบด (FB) เครื่องแผ่รังสีอินฟราเรด (IR) การเก็บในที่อับอากาศ (TEM) และเครื่องเป่าด้วยอากาศแวดล้อม (AAV)

(1) คำแนะนำจาก Poonisa-ad และ คณะ [4] , (2) คำแนะนำจาก Abe และ Afzal [1]



รูปที่ 2 เครื่องแผ่รังสีอินฟราเรด

### 3. ผลและวิจารณ์

#### 3.1 อิทธิพลของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีผลต่อความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน

ตารางที่ 2 ถึง 4 และรูปที่ 3 ถึง 5 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้ง จากผลการทดลองตามเงื่อนไขของกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 เงื่อนไข เมื่อข้าวเปลือกถูกอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1.5 นาที จะทำให้ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกจาก 30.8-34.1%d.b. ลดลงประมาณ 23.2-25.6%d.b. (เช่น เงื่อนไข A1, B1 และ A2, B2 ในตารางที่ 2 และ 3 หรือดูได้จากเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงการอบแห้งแบบฟลูอิดเซชันในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ) แต่ถ้าเพิ่มเวลาการอบแห้งเป็น 2 นาที ความชื้นจะลดลงจาก 30.4%d.b. ลงประมาณ 20.4%d.b. (เช่น เงื่อนไข C1,2 ในตารางที่ 4 หรือรูปที่ 5) หลังจากนั้นข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขจะถูกนำไปแผ่ด้วยรังสีอินฟราเรดที่ความเข้มของการแผ่รังสีแตกต่างกันเป็นเวลา 0.5 นาที พบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขลดลงประมาณ 1.8-2.0%d.b. ซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก (เช่นเงื่อนไข A1, B1 และ C1, C2 ในตารางที่ 2 และ 4 หรือในช่วงการแผ่รังสีอินฟราเรดในรูปที่ 3 และ 5 ตามลำดับ) สาเหตุเนื่องจากระยะเวลาการแผ่รังสีอยู่ในช่วงสั้นๆ ดังนั้นระดับความเข้มของการแผ่รังสีที่แตกต่างกันจึงไม่มีผลต่อการลดความชื้น ยกเว้นเงื่อนไข A2 และ B2 (ตารางที่ 3 หรือรูปที่ 4) ซึ่งความชื้นจะลดลงมากกว่า A1 และ B1 จึงมีแนวโน้มว่าระดับความเข้มของการแผ่รังสีมีผลทำให้ความชื้นลดลงมากขึ้น แต่ก็ยังไม่สามารถสรุปได้ เพราะข้อมูลความชื้นอยู่ในช่วงของค่าความถูกต้อง

ต่อมาเมื่อข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขถูกนำไปผ่านการเก็บในที่อับอากาศโดยตั้งอุณหภูมิการเก็บในที่อับอากาศเท่ากับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดเซชันเป็นเวลา 20 นาที และสุดท้ายจะนำข้าวเปลือกทุกเงื่อนไขไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อม พบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงหลังเริ่มเป่าด้วยอากาศแวดล้อมประมาณ 15 นาที และหลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลง (ดังแสดงในรูปที่ 3, 4 และ 5 ของเงื่อนไข A1, B1, A2, B2, C1 และ C2 ตามลำดับ) สาเหตุเนื่องจากข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขมีการเก็บในที่อับอากาศก่อนการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม จึงทำให้ความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกแพร่ออกมายังผิวจนกระทั่งความแตกต่างของความชื้นระหว่างแกนกลางและผิวของเมล็ดข้าวเปลือกน้อยลง และสามารถลดความชื้นลงในช่วงแรกของการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมได้ง่าย

#### 3.2 อิทธิพลของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีผลต่อปริมาณต้นข้าวของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน

จากผลการทดลองแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณต้นข้าวของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดเซชัน ดังแสดงในตารางที่ 5 ถึง 7 พบว่า ปริมาณต้นข้าวของข้าวเปลือกหลังผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดเซชันและการแผ่รังสีอินฟราเรดและการเก็บในที่เก็บอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเมล็ดและความชื้นของข้าวเปลือก ดังเช่นเงื่อนไข A1, B1 และ A2, B2 ในตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งอิทธิพลของอุณหภูมิเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีต่อปริมาณต้นข้าว นั้นสาเหตุเนื่องจากการอบแห้งแบบฟลูอิดเซชันใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงคือ  $150^{\circ}\text{C}$  และมีสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนสูง จึงทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกสูงขึ้นถึงระดับการเกิดปฏิกิริยาเจลาตินในเซชันบางส่วน (partial gelatinization) ได้เร็ว เพราะอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดเซชันของเงื่อนไข A1,2 และ

B1,2 จะอยู่ในช่วงประมาณ  $80^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกดังกล่าวนี้จะอยู่ในระดับการเกิดปฏิกิริยาเจลลิตินในเซชัน (อุณหภูมิในการเริ่มเกิดปฏิกิริยาเจลลิตินในเซชัน ประมาณ  $65-70^{\circ}\text{C}$  โดยอุณหภูมิที่แท้จริงจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของข้าว) (กล้านรงค์ ศรีรอด [13]) ถึงแม้ว่าจะนำข้าวเปลือกหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบคของเจ็อนไซ A1,2 และ B1,2 ไปผ่านการแผ่รังสีอินฟราเรดแล้วอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกลดต่ำลงเหลือประมาณ  $57$  ถึง  $64^{\circ}\text{C}$  ก็ตาม ซึ่งสาเหตุการลดลงของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกหลังการแผ่รังสีอินฟราเรดนั้นอาจจะเกิดจากข้าวเปลือกถูกแผ่รังสีอินฟราเรดเพียงด้านเดียว ดังนั้นจึงส่งผลทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเฉลี่ยหลังการแผ่รังสีอินฟราเรดลดต่ำลง แต่การลดลงของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่ระดับต่างๆ จะอยู่ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ประมาณ 30 วินาที ต่อมาเมื่อนำข้าวเปลือกไปทำการเก็บในที่อับอากาศ ซึ่งตั้งอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกหลังผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบค คาดว่าการเกิดปฏิกิริยาเจลลิตินในเซชันก็ยังคงเกิดต่อเนื่องอยู่ และเมื่อนำข้าวเปลือกหลังการเก็บในที่อับอากาศไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมก็พบว่า ปริมาณคั้นข้าวของเจ็อนไซ A1,2 และ B1,2 อยู่ในเกณฑ์ที่สูง ดังแสดงในตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

ส่วนอิทธิพลของความชื้นของข้าวเปลือกที่มีต่อปริมาณคั้นข้าว พบว่า ปริมาณคั้นข้าวจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบคและการแผ่รังสีอินฟราเรดสูงขึ้น เช่น เจ็อนไซ A2 และ B2 ซึ่งมีปริมาณคั้นข้าวสูงกว่าเจ็อนไซ A1 และ B1 เพราะความชื้นสูงกว่า (สามารถเปรียบเทียบได้จากการเปลี่ยนแปลงความชื้นตารางที่ 2 กับ 3 และการเปลี่ยนแปลงปริมาณคั้นข้าวตารางที่ 5 กับ 6) แต่การลดลงของความชื้นนั้นจะต้องไม่ต่ำกว่า  $21.5\% \text{d.b.}$  เช่นเจ็อนไซ A1 และ B1 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Poomsa-ad et al. [4] ที่ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบเทคนิคฟลูอิดไชน์เซชันโดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง และมีการเก็บในที่อับอากาศในระหว่างการอบแห้งของทั้ง 2 ช่วง และได้แนะนำว่า การที่จะรักษาปริมาณคั้นข้าวให้มีคุณภาพสูงนั้น ในช่วงแรกของการอบแห้งจะต้องไม่ลดความชื้นลงต่ำกว่า  $22.5\% \text{d.b.}$  พบว่า การแผ่รังสีอินฟราเรดหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบคสามารถลดความชื้นลงในช่วงแรกของการอบแห้งได้ต่ำกว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบคเพียงอย่างเดียวประมาณ  $1\% \text{d.b.}$  ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวนี้อาจจะเกิดจากกลไกของการแผ่รังสีอินฟราเรดช่วยทำให้ความต่างของความชื้นระหว่างแกนกลางและผิวของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบคน้อยลง ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณคั้นข้าวหลังการแผ่รังสีอินฟราเรดอยู่ในเกณฑ์ที่สูง แต่ถ้าความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบคและการแผ่รังสีอินฟราเรดถูกลดลงถึงประมาณ  $20.5\% \text{d.b.}$  พบว่า ปริมาณคั้นข้าวของข้าวเปลือกจะลดลงต่ำมาก ดังเช่นเจ็อนไซ C1,2 ในตารางที่ 7 สาเหตุเนื่องจากเกิดความเครียดขึ้นเนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นที่บริเวณผิวน้อยกว่าที่บริเวณภายในแกนกลางมาก ต่อมาเมื่อนำข้าวเปลือกหลังผ่านการแผ่รังสีอินฟราเรดไปผ่านการเก็บในที่อับอากาศก็จะช่วยทำให้ปริมาณคั้นข้าวเพิ่มสูงขึ้น

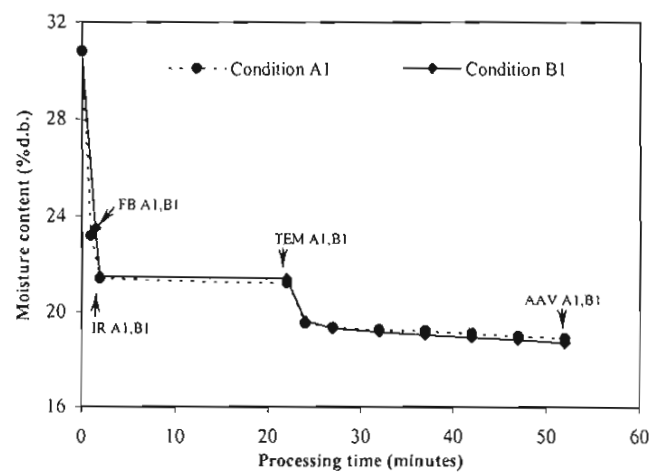
### 3.3 อิทธิพลของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีผลต่อความขาวของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์

ตารางที่ 8 ถึง 10 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงความขาวของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งของเจ็อนไซต่างๆ พบว่า การแผ่รังสีอินฟราเรดและการเก็บในที่อับอากาศมีผลต่อความขาวของข้าวเปลือกในแต่ละเจ็อนไซไม่มากนัก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความขาวที่ยอมรับได้ในทางการค้า (ประมาณ 37) พบว่า ความขาวของทุกเจ็อนไซอยู่ในเกณฑ์ดี

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้น (MC) ของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งของเงื่อนไข A1 และ B1

| กระบวนการอบแห้ง |          | เงื่อนไข |      |
|-----------------|----------|----------|------|
|                 |          | A1       | B1   |
| MC เริ่มต้น     | (% d.b.) | 30.8     | 30.8 |
| MC หลัง FB      | (% d.b.) | 23.2     | 23.5 |
| MC หลัง IR      | (% d.b.) | 21.4     | 21.5 |
| MC หลัง TEM     | (% d.b.) | 21.2     | 21.4 |
| MC หลัง AAV     | (% d.b.) | 18.9     | 18.7 |

- A1 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).
- B1 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.689 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).

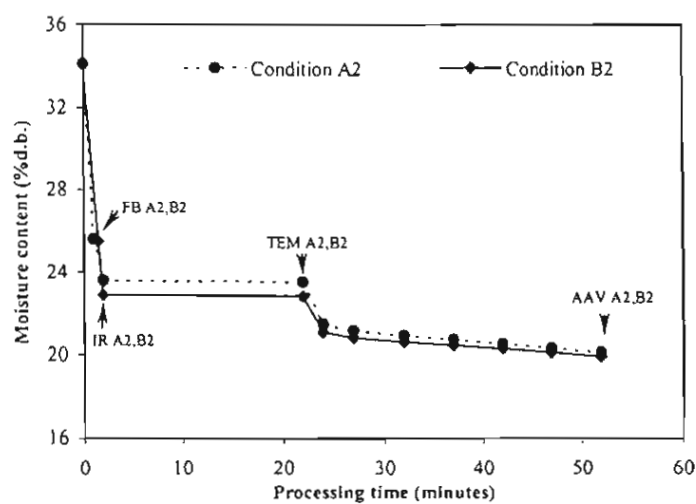


รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งของเงื่อนไข A1 และ B1  
(Ambient air conditions : 29.2°C and 70.0%r.h.)

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้น (MC) ของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งของเงื่อนไข A2 และ B2

| กระบวนการอบแห้ง |          | เงื่อนไข |      |
|-----------------|----------|----------|------|
|                 |          | A2       | B2   |
| MC เริ่มต้น     | (% d.b.) | 34.1     | 34.1 |
| MC หลัง FB      | (% d.b.) | 25.6     | 25.5 |
| MC หลัง IR      | (% d.b.) | 23.6     | 22.9 |
| MC หลัง TEM     | (% d.b.) | 23.5     | 22.8 |
| MC หลัง AAV     | (% d.b.) | 20.1     | 19.9 |

- A2 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).
- B2 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.689 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).

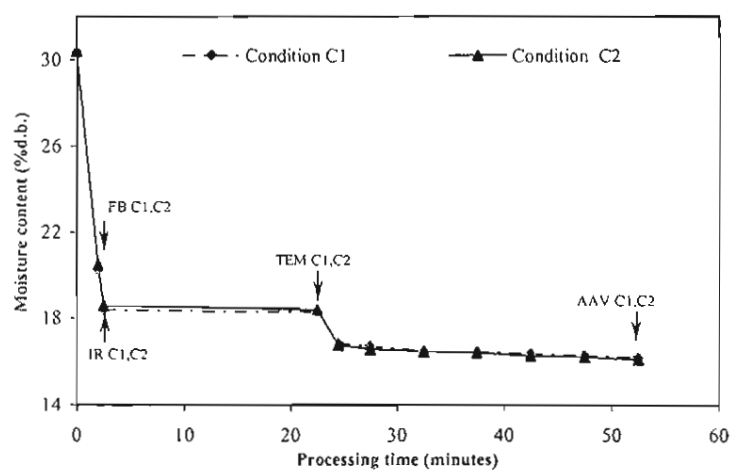


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งของเงื่อนไข A2 และ B2  
(Ambient air conditions : 30.1°C and 75.0%r.h.)

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้น (MC) ของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งของเงื่อนไข C1 และ C2

| กระบวนการอบแห้ง |          | เงื่อนไข |      |
|-----------------|----------|----------|------|
|                 |          | C1       | C2   |
| MC เริ่มต้น     | (% d.b.) | 30.4     | 30.4 |
| MC หลัง FB      | (% d.b.) | 20.3     | 20.5 |
| MC หลัง IR      | (% d.b.) | 18.4     | 20.5 |
| MC หลัง TEM     | (% d.b.) | 18.3     | 18.4 |
| MC หลัง AAV     | (% d.b.) | 16.2     | 16.1 |

- C1 : FB (150°C, 2 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (85°C, 20 min) and AAV (30 min).
- C2 : FB (150°C, 2 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (85°C, 20 min) and AAV (30 min).



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งของเงื่อนไข C1 และ C2  
(Ambient air conditions : 29.6°C and 67%r.h.)

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณต้นข้าว (HRY) ของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการ  
อบแห้งของเงื่อนไข A1 และ B1

| กระบวนการอบแห้ง |     | เงื่อนไข |      |
|-----------------|-----|----------|------|
|                 |     | A1       | B1   |
| HY เริ่มต้น     | (%) | 52.2     | 52.2 |
| HRV หลัง FB     | (%) | 55.4     | 55.8 |
| HRV หลัง IR     | (%) | 52.2     | 54.7 |
| HRV หลัง TEM    | (%) | NA       | NA   |
| HRV หลัง AAV    | (%) | 55.8     | 56.6 |

- A1 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).
- B1 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.689 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).

ตารางที่ 6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณต้นข้าว (HRY) ของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการ  
อบแห้งของเงื่อนไข A2 และ B2

| กระบวนการอบแห้ง |     | เงื่อนไข |      |
|-----------------|-----|----------|------|
|                 |     | A2       | B2   |
| HY เริ่มต้น     | (%) | 46.0     | 46.0 |
| HRV หลัง FB     | (%) | 55.3     | 56.3 |
| HRV หลัง IR     | (%) | 56.2     | 55.6 |
| HRV หลัง TEM    | (%) | NA       | NA   |
| HRV หลัง AAV    | (%) | 57.8     | 58.7 |

- A2 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).
- B2 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.689 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).

ตารางที่ 7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณต้นข้าว (HRY) ของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการ  
อบแห้งของเงื่อนไข C1 และ C2

| กระบวนการอบแห้ง |     | เงื่อนไข |      |
|-----------------|-----|----------|------|
|                 |     | C1       | C2   |
| HY เริ่มต้น     | (%) | 54.2     | 54.2 |
| HRV หลัง FB     | (%) | 39.0     | 31.0 |
| HRV หลัง IR     | (%) | 18.2     | 20.0 |
| HRV หลัง TEM    | (%) | NA       | NA   |
| HRV หลัง AAV    | (%) | 43.6     | 46.6 |

- C1 : FB (150°C, 2 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (85°C, 20 min) and AAV (30 min).
- C2 : FB (150°C, 2 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (85°C, 20 min) and AAV (30 min).

ตารางที่ 8 การเปลี่ยนแปลงความขาว (wh) ของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้ง  
ของเงื่อนไข A1 และ B1

| กระบวนการอบแห้ง |       | เงื่อนไข |      |
|-----------------|-------|----------|------|
|                 |       | A1       | B1   |
| wh เริ่มต้น     | (จุด) | 50.4     | 50.4 |
| wh หลัง FB      | (จุด) | 50.3     | 50.0 |
| wh หลัง IR      | (จุด) | 50.0     | 50.4 |
| wh หลัง TEM     | (จุด) | NA       | NA   |
| wh หลัง AAV     | (จุด) | 49.8     | 50.3 |

- A1 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).
- B1 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.689 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).

ตารางที่ 9 การเปลี่ยนแปลงความขาว (wh) ของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้ง  
ของเงื่อนไข A2 และ B2

| กระบวนการอบแห้ง |       | เงื่อนไข |      |
|-----------------|-------|----------|------|
|                 |       | A2       | B2   |
| wh เริ่มต้น     | (จุด) | 50.7     | 50.7 |
| wh หลัง FB      | (จุด) | 47.1     | 47.9 |
| wh หลัง IR      | (จุด) | 48.6     | 47.8 |
| wh หลัง TEM     | (จุด) | NA       | NA   |
| wh หลัง AAV     | (จุด) | 46.5     | 44.6 |

- A2 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).
- B2 : FB (150°C, 1.5 min), IR (0.689 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (80°C, 20 min) and AAV (30 min).

ตารางที่ 10 การเปลี่ยนแปลงความขาว (wh) ของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้ง  
ของเงื่อนไข C1 และ C2

| กระบวนการอบแห้ง |       | เงื่อนไข |      |
|-----------------|-------|----------|------|
|                 |       | C1       | C2   |
| wh เริ่มต้น     | (จุด) | 51.6     | 51.6 |
| wh หลัง FB      | (จุด) | 49.5     | 47.7 |
| wh หลัง IR      | (จุด) | 45.0     | 45.4 |
| wh หลัง TEM     | (จุด) | NA       | NA   |
| wh หลัง AAV     | (จุด) | 49.0     | 48.7 |

- C1 : FB (150°C, 2 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (85°C, 20 min) and AAV (30 min).
- C2 : FB (150°C, 2 min), IR (0.311 W·cm<sup>-2</sup>, 0.5 min), TEM (85°C, 20 min) and AAV (30 min).

#### 4. สรุป

1. การลดความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดและการแผ่รังสีอินฟราเรดไม่ต่ำกว่า 21.5%d.b. และตามด้วยการเก็บในที่อับอากาศ จะทำให้ปริมาณต้นข้าวยังอยู่ในเกณฑ์ที่สูง แต่ถ้าความชื้นลดลงถึงประมาณ 20.5%d.b. ปริมาณต้นข้าวจะลดลงต่ำมาก
2. การเก็บในที่อับอากาศจะทำให้ความชื้นลดลงในช่วงแรกของการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมได้ง่าย
3. การแผ่รังสีอินฟราเรดและการเก็บในที่อับอากาศหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดมีอิทธิพลต่อความขาวของข้าวสารน้อย

#### คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่สนับสนุนทุนวิจัย ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบคุณภาพการสี และภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องอินฟราเรด

#### เอกสารอ้างอิง

1. Abe, T. and Afzal, T.M..1997. Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. J. agric. Engng Res.. 67 : 289-297.
2. Bekki, E.. 1991. Rough rice drying with a far-infrared panel heater. Journal of the Japanese Society of Agriculture. 53(1) : 55-63.
3. Nindo, C.I., Kudo, Y. and Bekki, E.. 1995. Test model for studying sun drying of rough rice using far-infrared radiation. Drying Technology. 13(1&2) : 225-238.
4. Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakron, S. and Terdyothin, A.. 2002. Effect of tempering on subsequent drying of paddy using fluidization technique. Drying Technology. 20(1) : 195-210.
5. Sakai, N., Hanzawa, T.. 1994. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. Trends in Food Science & Technology. 5 : 357-362.
6. Sandu, C.. 1986. Infrared radiative drying in food engineering : a process analysis. Biotechnology Progress. 2 : 109-119.
7. Shimizu, M.. 1991.. New Food Industrial. 33(8) : 23-30.
8. Shoji, Y.. 1986. Machine equipment of Food Industrial. 23(2) : 63-67.
9. Soponronnarit, S.. 1995. Strategy for managing moist paddy. The Royal Institute Journal. 20(4) : 115-125 (in Thai).
10. Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Swasdisevi, T. and Poomsa-ad, N.. 1999. "Managing moist paddy by drying tempering and ambient air ventilation. Drying Technology 17(1&2) : 335-344.
11. Steffe, J.F. and Singh, R.P.. 1980. Theoretical and practical aspects of rough rice tempering. Trans. of the ASAE. 23 : 775-782.

12. Steffe, J.F., Singh, R.P. and Bakshi, A.S.. 1979. Influence of tempering time and cooling on rice milling yields and moisture removal. Transaction of ASAE. 22 : 1214-1218, 1224.
13. กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2540. หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยี. ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 48-51 หน้า.

การอบแห้งข้าวเปลือกขึ้นภายใต้สภาวะอากาศเขตร้อนชื้นในภาคสนาม  
FIELD EXPERIENCE ON DRYING OF PADDY UNDER  
TROPICAL CLIMATE

ยุทธนา ฐิระวนิชย์กุล<sup>1</sup>, สมเกียรติ ประทุมวารการ<sup>2</sup>, เคนอิชิ อิโอะเอะ<sup>3</sup>  
และสมชาติ โสภณธณฤทธิ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาปริญญาเอก คณะพลังงานและวัสดุ, <sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>3</sup>ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ, กรุงเทพฯ 10140

<sup>3</sup> PhD. (Senior engineer), National Agricultural Research Center for Hokkaido Region, Hokkaido, Japan

บทคัดย่อ : วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษา กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกในสภาพใช้งานจริงที่ทำข้าว และ ศึกษาหาแนวทางการจัดการข้าวเปลือกขึ้นขณะรอการอบแห้งด้วยการเป่าอากาศแวดล้อม และการลดความชื้นด้วย ซิลิกาเจล ที่ค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกอยู่ในช่วงประมาณ 18-22% มาตรฐานเปียก

ผลการทดลองพบว่า ค่าความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด และการอบแห้ง แบบคลุกเคล้าอยู่ในช่วงร้อยละ 16.0±1.5 มาตรฐานเปียก และร้อยละ 13.0±1.8 มาตรฐานเปียก ตามลำดับ สรุปได้ว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิด-ไชน์เซชันและการอบแห้งแบบคลุกเคล้าที่เหมาะสม ทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีกระจายอย่างสม่ำเสมอ

จากการศึกษาการลดความชื้นข้าวเปลือกขึ้นในกระสอบพลาสติก เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิภายในกองข้าวอ้างอิงสูงถึงประมาณ 53±4°C ขณะที่กองข้าวเปลือกในกระสอบที่ลดความชื้นด้วยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม มีการระบายความร้อนจากการหายใจของเมล็ดพืชที่สะสมอยู่ ออกจากกองข้าวเปลือกได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกองข้าวที่ลดความชื้นด้วยซิลิกาเจลและกองข้าวอ้างอิง อย่างไรก็ตาม ในการทดลองนี้ไม่พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญในด้านสมบัติทางกายภาพในเทอมของความขาวและร้อยละข้าวเต็มเมล็ด สรุปได้ว่าการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม เป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการลดความเสื่อมคุณภาพของกองข้าวเปลือกที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการสะสมของความชื้นและความชื้นในกองข้าวเปลือกได้เป็นอย่างดี

**Abstract :** Objectives of this work are to investigate of paddy drying process on field experience at a rice merchant and the pretreatment systems for moist paddy of 18-22% wet basis by using ambient air and silica gel.

The results show that moisture content after fluidized bed drying and mixed flow drying using LSU dryer was about of  $16.0 \pm 1.5\%$  wet basis and  $13.0 \pm 1.8\%$  wet basis, respectively. It is concluded that the uniform moisture content of dried paddy can be maintained with the suitable condition of paddy drying by using fluidization technique and LSU.

For the pretreatment of wet paddy bulk in plastic bag with operation time of 12 hours, it is showed that the increasing of temperature of reference paddy bulk was in range of  $53 \pm 4^{\circ}\text{C}$  and paddy bulk with using ambient air ventilation can reduce the heat liberated from grain respiration comparing to pretreatment moist paddy bulk by using silica gel and reference paddy. The results are concluded that to maintain the quality of rice, the pretreatment of paddy by using air ventilation is a suitable method for delay of moist paddy deteriorations from heat accumulation and humid in grain bulk.

**Keywords :** Head rice yield, Field experiment, Fluidized bed paddy drying, Uniform moisture distribution

## 1.1 Introduction

In hot and humid climates, harvested paddy usually contains moisture content in a range of 18 to 26% wet basis. The combine harvester, which can be replaced for the manual reaping due to lack of man power, causes the high moist paddy. So, the good management of postharvest is necessary for reducing grain deterioration. The paddy quality-determinants, such as moisture content, immature grain, foreign materials, chalky grain and yellowness, are more affected by post-harvest handling and processing than by grain varieties [Damardiati and Barrett (1)]. The most important quality determinant of paddy is the moisture content because storage of moist paddy can cause the excess grain deterioration, for example mould growth and rice yellowing.

To prevent all the above serious problems, the moisture content of paddy must be reduced to a range of 13 to 14% wet basis, which is safe for prolonged storage [Soponronnarit and Nathakarakakule (2)]. Artificial drying is an appropriate method to remove the moisture content from high level and a fluidized bed drying technique is the one of the dryer types which provides a rapid drop in moisture content for a short period.

In addition to the drying step, pretreatment system, which is an additional step in the drying process, is also necessary since a large amount of wet paddy from cultivation areas is transported to the traders. With such a massive amount, some factories may have a limited drying capacity, so that delay of moisture reduction cannot be avoided. This would be a risk of deterioration of paddy quality. The main purpose of pretreatment is to maintain