



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ (ภาษาไทย): การพัฒนาเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิดาเซชันร่วมกับ
การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น

(ภาษาอังกฤษ): **Development of Paddy Drying Technique Using Combination of
Fluidization and Near-infrared Radiation**

โดย

ดร.นเรศ มีโส

มกราคม 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ (ภาษาไทย): การพัฒนาเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิดไอเซชันร่วมกับ
การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น

(ภาษาอังกฤษ): **Development of Paddy Drying Technique Using Combination of
Fluidization and Near-infrared Radiation**

คณะผู้วิจัย

ดร.นเรศ มีใส

สังกัด

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อน และเพื่อศึกษาผลของกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อย่างเหมาะสม และความสูงของเบตข้าวเปลือก ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ตันข้าว และความขาวของข้าว รวมทั้งวิเคราะห์คุณภาพการหุงต้ม คุณภาพการบริโภค คุณสมบัติของความหนืด และโครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดแป้งของข้าว

จากผลการวิจัยพบว่า กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อย่างเหมาะสม ความสูงของเบตข้าวเปลือกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก และเปอร์เซ็นต์ตันข้าวของข้าว แต่ไม่มีผลต่อความขาวของข้าว ส่วนคุณภาพการหุงต้ม คุณภาพการบริโภค คุณสมบัติของความหนืด และโครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดแป้งของข้าว มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซชันเบตโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อน จากผลการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมของการอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซชันเบตโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนคือ กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40°C ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

คำสำคัญ การอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซชันเบต การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น
การอบแห้งข้าวเปลือก คุณภาพข้าว

Abstract

The main attention of this research was to develop the fluidization paddy drying technique by using combination of near-infrared radiation and hot-air convection, and to study the effects of near-infrared radiation power, hot-air velocity, and paddy bed height on the changes of moisture content, paddy grain temperature, head rice yield, and whiteness. Cooking quality, eating quality, viscosity property, and microstructure of rice kernel were also analyzed.

The experimental results showed that near-infrared radiation power, hot-air velocity, and paddy bed height had a great effect on the changes of moisture content, paddy grain temperature, and head rice yield; on the contrary, it did not influence the whiteness. It was seen that cooking quality, eating quality, viscosity property, and microstructure of rice kernel were changed under the fluidization drying technique by using combination of near-infrared radiation and hot-air convection. Overall, the optimal condition of fluidized bed drying by using combination of near-infrared radiation and hot-air convection was near-infrared radiation power of 8 kW combined with hot-air temperature of 40°C, hot-air velocity of 1.12 m/s, and paddy bed height of 6 cm.

Keywords: Fluidized-bed drying, Near-infrared radiation drying , Paddy drying, Rice quality

บทสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)

แนวทางการแก้ไขปัญหาอย่างเป็นระบบจะต้องเริ่มตั้งแต่การเป่าด้วยอากาศแวดล้อมเข้าไปภายในกองข้าวเปลือกด้วยอัตราการไหลต่ำๆ เพื่อระบายความร้อนในขณะที่การอบแห้ง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปทำการอบแห้งจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงแรก ลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างรวดเร็วให้เหลือประมาณ 23% d.b. โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบด และในช่วงที่สอง ลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างช้าๆ จากประมาณ 23 เหลือ 16% d.b. โดยใช้เครื่องอบแห้งด้วยอากาศร้อนทั่วไป ต่อมาก็พบปัญหาว่า ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งออกมาจากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบดในช่วงแรกนั้นจะมีความชื้นที่บริเวณผิวของเมล็ดแตกต่างกับภายในแกนกลางของเมล็ดมาก (Moisture gradient) และเกิดความเครียดขึ้นจึงส่งผลทำให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกร้าวสาเหตุเนื่องมาจากข้าวเปลือกถูกลดความชื้นลงอย่างรวดเร็วด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบดปัญหาดังกล่าวนี้อาจกลายเป็น “ข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบด” ในระบบอบแห้งข้าวเปลือก ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงเชื่อได้ว่า การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนที่มีความเร็วสูงในการอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบดน่าจะมีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก และคาดหวังว่าจะช่วยแก้ไขข้อจำกัดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบดด้วยการพาอากาศร้อนเกี่ยวกับการลดความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณภายในและผิวของเมล็ดข้าวเปลือก และข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเกี่ยวกับการแผ่รังสีให้กับเบตของข้าวเปลือกที่มีความหนามากกว่าหนึ่งชั้นเมล็ดข้าวเปลือกได้

ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนขนาดห้องปฏิบัติการ และได้ศึกษาผลของกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้ง และความสูงของเบตข้าวเปลือก ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ตันข้าว และความขาวของข้าว รวมทั้งได้วิเคราะห์คุณภาพการหุงต้ม คุณภาพการบริโภค คุณสมบัติของความชื้น และโครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดแป้งของข้าว

จากผลการทดลองพบว่า กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้ง ความสูงของเบตข้าวเปลือกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก และเปอร์เซ็นต์ตันข้าวของข้าว แต่ไม่มีผลต่อความขาวของข้าว ส่วนคุณภาพการหุงต้ม คุณภาพการบริโภค คุณสมบัติของความชื้น และโครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดแป้งของข้าวมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณผู้มีส่วนร่วมทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จด้วยดีดังนี้

1. สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้
 2. ศาสตราจารย์ ดร. สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เป็นนักวิจัยที่ปรึกษาในการทำวิจัยครั้งนี้
 3. รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริธร ศิริอมรพรรณ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหารและโภชนาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับคุณภาพของข้าว
 4. นักวิจัยจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร (Research Unit of Drying Technology for Agricultural Products, ReDTec) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ช่วยเหลือทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบด โดยให้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนขนาดห้องปฏิบัติการ
- สุดท้าย คุณค่าและประโยชน์จากงานวิจัยเล่มนี้ขอมอบบูชาพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และบูรพาจารย์ ที่ประสาทความรู้ ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
บทสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
 บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว	5
2.2 คุณภาพของข้าว	7
2.3 คุณภาพการสี	8
2.4 คุณภาพเมล็ดข้าวทางเคมี	9
2.5 คุณภาพการหุงต้ม	12
2.6 คุณสมบัติความเหนียว	13
2.7 การเกิดเจลลาทีในเซชัน	16
2.8 คุณภาพการบริโภค	17
2.9 พื้นฐานของการอบแห้ง	18
2.10 วิธีการอบแห้ง	19
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	28
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย	30
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล	31
3.4 สถิติที่ใช้ในงานวิจัย	31
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	32
4.1 ผลของกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นต่อการเปลี่ยนแปลง ความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ตันข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1	32

4.2 ผลของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อยู่ในห้องต่อการเปลี่ยนแปลง ความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1	35
4.3 ผลของความสูงของเบดข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความขาว ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1	38
4.4 การเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรส์เบดโดยใช้ การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนและแบบ ฟลูอิดไรส์เบดโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวต่อการเปลี่ยน แปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเปอร์เซ็นต์ต้น ข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1	41
4.5 ผลการวิเคราะห์คุณภาพการหุงต้มและคุณภาพการบริโภคของ ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1	45
4.6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของความเหนียวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1	53
4.7 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดแบ่งของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1	63
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการทดลอง	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การศึกษาปัญหาและแนวทางการแก้ไขข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงหลังการเก็บเกี่ยวในช่วงหลาย ๆ ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาหาความเป็นไปได้ในระดับหนึ่ง แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการศึกษาจากการทดลองและการจำลองแบบปัญหาในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ต่อมาเมื่อปัญหาของข้าวเปลือกชื้นหลังการเก็บเกี่ยวมีมากขึ้น และความต้องการเพิ่มคุณภาพข้าวเปลือกให้สูงขึ้นเพื่อแข่งขันทางการค้า จึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยหาแนวทางการจัดการข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงหลังการเก็บเกี่ยวกันอย่างจริงจัง เพื่อรักษาผลผลิตให้มีคุณภาพสูง ลดความสูญเสียของเมล็ดข้าว และสามารถยืดระยะเวลาการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้น ดังนั้นแนวทางการแก้ไขปัญหอย่งเป็นระบบจะต้องเริ่มตั้งแต่การเป่าด้วยอากาศแวดล้อมเข้าไปภายในกองข้าวเปลือกด้วยอัตราการไหลต่ำๆ เพื่อระบายความร้อนในขณะที่รอการอบแห้ง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปทำการอบแห้งจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงแรก ลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างรวดเร็วให้เหลือประมาณ 23% d.b. โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบด และในช่วงที่สอง ลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างช้าๆ จากประมาณ 23 เหลือ 16% d.b. โดยใช้เครื่องอบแห้งด้วยอากาศร้อนทั่วไป เช่น เครื่องอบแห้งแบบ LSU และเครื่องอบแห้งแบบ Recirculation batch เป็นต้น (Meeso et al., 1999; Soponronnarit, 1995)

ต่อมาเมื่อแนวทางการแก้ไขปัญหามีเบื้องต้นได้ถูกนำมาใช้ในช่วงเวลาหนึ่งก็พบปัญหาว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งออกมาจากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบดในช่วงแรกนั้นจะมีความชื้นที่บริเวณผิวของเมล็ดแตกต่างกับภายในแกนกลางของเมล็ดมาก หรือเรียกว่า การเกิด Moisture gradient มากโดยเฉพาะภายในแกนกลางจะมีความชื้นมากกว่าผิวของเมล็ด และเกิดความเครียดขึ้นจึงส่งผลทำให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกร้าว สาเหตุเนื่องมาจากข้าวเปลือกถูกลดความชื้นลงอย่างรวดเร็วด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบด ปัญหาดังกล่าวนี้นี้จึงกลายเป็น **“ข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบด”** ในระบบอบแห้งข้าวเปลือก แต่ก็สามารถแก้ไขได้โดยการนำเอาการเก็บในที่อับอากาศ (Tempering) เข้ามาช่วยในระหว่างการอบแห้งทั้งสองช่วง เพื่อให้ความชื้นภายในของเมล็ดแพร่ออกมาที่บริเวณผิวของเมล็ดและทำให้ความชื้นที่ผิวและแกนกลางของเมล็ดข้าวมีความแตกต่างกันน้อยลง ดังนั้นเมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านการอบแห้งในช่วงที่สองก็จะส่งผลทำให้สามารถลดความชื้นออกได้ง่ายกว่าข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการเก็บในที่อับอากาศ (Soponronnarit et al., 1995; Steffe & Singh, 1980; Poomsa-ad et al., 2002)

จากการศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาคาไมเสียหยาของข้าวเปลือกชั้นหลังการเก็บเกี่ยว ที่กล่าวผ่านมามีพบว่า ได้รับผลสำเร็จเป็นที่น่าพอใจและได้รับการพิสูจน์ในทางอุตสาหกรรมแล้วว่า สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับที่มีความปลอดภัยต่อการเก็บรักษาได้ดีในระดับหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามยังมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคนิคการลดความชื้นของข้าวเปลือกเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ปัจจุบันจึงได้มีการนำเอาเทคโนโลยีต่างๆ เข้ามาประยุกต์ใช้กับระบบอบแห้งที่มีอยู่ในปัจจุบัน และเทคโนโลยีประเภทหนึ่งที่น่าจะมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับระบบอบแห้งข้าวเปลือกได้ดี คือ **รังสีอินฟราเรด** เพราะเนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถทะลุทะลวง (Penetration) เข้าไปภายในเมล็ดพืชต่างๆ ได้ ทำให้โมเลกุลของส่วนประกอบหลักของเมล็ดพืช (เช่น โปรตีน น้ำตาล ไขมัน และน้ำ) ดูดกลืนพลังงานบางส่วนจากการแผ่รังสีอินฟราเรดไว้ และเกิดการเปลี่ยนแปลงในสภาวะการสั่นสะเทือนของโมเลกุลกลายเป็นพลังงานความร้อนขึ้นภายในเมล็ดพืช ดังนั้นจึงส่งผลทำให้น้ำในสถานะของเหลวและไอน้ำเกิดการแพร่ออกไปยังผิวของเมล็ดพืช ส่วนความร้อนจะถ่ายโอนจากภายในออกไปยังผิวของเมล็ดพืชโดยการนำความร้อน แต่จะตรงกันข้ามกับการอบแห้งแบบใช้อากาศร้อนทั่วไป ซึ่งการนำความร้อนจะถ่ายโอนจากผิวเข้าไปยังภายในของเมล็ดพืช (Ginzburg, 1969; Il'yasov & Krasnikov, 1991; Sakai & Hanzawa, 1994)

โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของเมล็ดพืชต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น จะดูดกลืนพลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดที่บริเวณความยาวคลื่นมากกว่า 2.5 μm (Sandu, 1986; Shoji, 1986) โดยเฉพาะเมล็ดข้าวเปลือกจะดูดกลืนพลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดได้สูงสุดที่ความยาวคลื่น 2.9 μm (Bekki, 1991) ส่วนความลึกของการทะลุทะลวง (Depth of penetration) เข้าไปภายในเมล็ดพืชต่างๆ ของรังสีอินฟราเรดนั้นจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของเมล็ดพืช (เช่น ลักษณะของผิว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และปริมาณน้ำ) และความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด ยกตัวอย่างเช่น เมล็ดข้าวเปลือก และเมล็ดข้าวสาลี รังสีอินฟราเรดสามารถทะลุทะลวงลงไปภายในเมล็ดได้ลึกสุดประมาณ 1-2 mm ที่ความยาวคลื่น 1 μm (Ginzburg, 1969; Nindo et al., 1995) ดังนั้น รังสีอินฟราเรดจึงมีความเหมาะสมกับการอบแห้งเมล็ดพืชขนาดเล็กและมีความหนาของเบดเมล็ดพืช (Grain bed depth) เท่ากับหนึ่งชั้นเมล็ดพืช (Single-kernel layer) แต่ถ้าเมล็ดพืชมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความลึกของการทะลุทะลวงและมีความหนาของเบดเมล็ดพืชมากกว่าหนึ่งชั้นเมล็ดพืช จะส่งผลทำให้การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีประสิทธิภาพต่ำลง และกลายเป็น **“ข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด”** (Sandu, 1986; Sakai & Hanzawa, 1994) ซึ่งน่าจะแก้ไขโดยใช้วิธีการอบแห้งแบบการแผ่รังสีอินฟราเรดมากกว่า 1 ทิศทาง หรือวิธีการอบแห้งแบบการแผ่รังสีอินฟราเรดร่วมกับการพาความร้อน หรือวิธีการอบแห้งแบบการแผ่รังสีอินฟราเรดเป็นช่วง (Intermittent irradiation)

นอกจากนี้การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดยังมีลักษณะเด่นที่สำคัญคือ มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายโอนความร้อนไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่ถูกอบแห้ง จึงส่งผลทำให้ลดระยะเวลาของการอบแห้งและ

พลังงาน รวมทั้งยังมีลักษณะเด่นอื่นๆ อีก เช่น เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็ก ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย ควบคุมง่าย และสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยการพาความร้อน (Hashimoto et al., 1994; Ratti & Mujumdar, 1995; Sakai & Hanzawa, 1994; Sandu, 1986) แต่การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับการพาความร้อนสำหรับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรนั้นจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละวิธีการอบแห้ง เพราะเนื่องจากแต่ละวิธีการอบแห้งจะมีเงื่อนไขของการอบแห้งที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่าง **การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว (15-100 μm) ร่วมกับการพาอากาศร้อน** จะมีความเหมาะสมกับการอบแห้งในลักษณะเบดของเมล็ดพืชอยู่กับที่ (Fixed-bed drying) มีความหนาของเบดเมล็ดพืชเท่ากับหนึ่งชั้นเมล็ดพืช และมีความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งต่ำ เพราะแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดคลื่นยาวที่ผลิตในทางอุตสาหกรรมจะทำมาจากแท่งเซรามิก ซึ่งเมื่อถูกกระแสของอากาศร้อนที่มีความเร็วสูง (เช่น ความเร็วอากาศร้อนของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด ประมาณ 2.6 m/s) ไหลผ่านผิวของแท่งเซรามิกจะส่งผลทำให้เกิดการระบายความร้อน (Cooling effect) ที่บริเวณผิวของแท่งเซรามิก และทำให้ประสิทธิภาพการแผ่รังสีของแท่งเซรามิกต่ำลง (Afzal et al., 1999; Ginzburg, 1969; Meeso et al., 2006(a); Sharma et al., 2005) ส่วน **การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (0.75-3 μm) ร่วมกับการพาอากาศร้อน** ในการอบแห้งเมล็ดพืชนั้นยังมีการทำวิจัยในระดับนานาชาติค่อนข้างน้อยมาก สาเหตุเนื่องมาจากรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นมีพลังงานสูง ซึ่งจะส่งผลทำให้เมล็ดพืชมีการเสียหายได้ เช่น เกิดการไหม้ที่บริเวณผิวของเมล็ด (Bekki, 1991) เป็นต้น แต่จากข้อมูลงานวิจัยของ Bekki (1991); Ginzburg (1969); Nindo et al. (1995); Sandu (1986); Shoji (1986) ดังที่กล่าวผ่านมามีพบว่า เมล็ดพืชต่างๆ จะดูดกลืนพลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นได้ดีมีประสิทธิภาพมากที่สุด และรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นสามารถทะลุทะลวงลงไปภายในเมล็ดพืชได้ลึกกว่ารังสีอินฟราเรดคลื่นยาว รวมทั้งแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่ผลิตในทางอุตสาหกรรมจะทำมาจากทังสเตน (Tungsten) ที่มีลักษณะเป็นเส้นเล็กๆ และล้อมรอบด้วยก๊าซฮาโลเจน (Halogen) อยู่ภายในหลอดไฟที่ทำด้วยแร่ควอตซ์ (Quartz) (www.lighting.philips.com) ซึ่งสามารถป้องกันผลกระทบเนื่องจากการระบายความร้อนของกระแสอากาศร้อนที่มีความเร็วสูงต่อแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่บริเวณผิวของไส้ทังสเตนได้ และทำให้แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นยังคงมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงเชื่อได้ว่า การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนที่มีความเร็วสูงในการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดน่าจะมีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก และคาดหวังว่าจะช่วยแก้ไขข้อจำกัดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยการพาอากาศร้อนเกี่ยวกับการลดความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณภายในและผิวของเมล็ดข้าวเปลือก และข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเกี่ยวกับการแผ่รังสีให้กับเบดของข้าวเปลือกที่มีความหนามากกว่าหนึ่งชั้นเมล็ดข้าวเปลือกได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อหาแนวทางในการพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณภาพทางกายภาพและสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนขนาดห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale)

1.3.2 ความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่ศึกษาอยู่ในช่วง 0.75-3 μm

1.3.3 ตัวแปรต่างๆ ของการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไอเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนที่ศึกษาได้แก่ กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งและข้าวเปลือก ความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้ง ความสูงของเบตข้าวเปลือก ความชื้นของข้าวเปลือก และเวลาของการอบแห้ง

1.3.4 คุณภาพทางกายภาพของเมล็ดข้าวที่ศึกษา ได้แก่ ความชื้น เปอร์เซ็นต์ตันข้าว ความขาว และ Water activity (A_w)

1.3.5 สมบัติทางเคมีกายภาพ

1. คุณสมบัติแป้ง โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ซึ่งประกอบด้วย ความหนืด (Viscosity) อุณหภูมิการเกิดเจลลาทีไนเซชัน (Gelatinization temperature) และความคงตัวต่อการกวน (Set-back)
2. ลักษณะทางกายภาพของเมล็ดข้าวและเม็ดแป้ง โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)
3. คุณภาพการหุงต้ม ซึ่งประกอบด้วย เวลาการหุงต้ม (Cooking time) ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water uptake) และความสามารถในการยืดตัว (Elongation)

1.3.6 เปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไอเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนและการพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

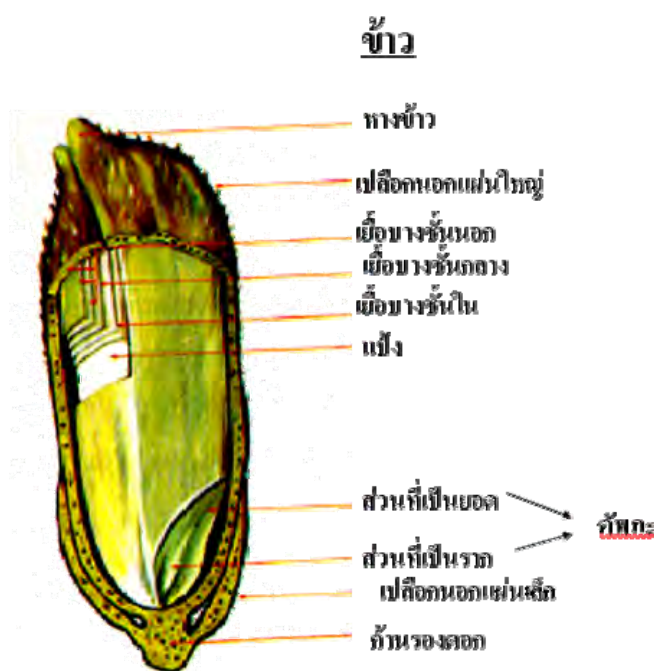
2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนใหญ่มาก สองส่วน คือ ส่วนที่ห่อหุ้ม เรียกว่า แกลบ (Husk or Hull) และส่วนที่รับประทานได้เรียกว่า ข้าวกล้อง (Caryosis or Brown Rice) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (บุญหงษ์ จงคิด, 2547)

2.1.1 แกลบ ประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (Lemna) เปลือกเล็ก (Palca) หาง (Awn) ข้าวเมล็ด (Rachilla) และกลีบรองเมล็ด (Sterile Lemmae)

2.1.2 ข้าวกล้องหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออกแล้ว ประกอบด้วย

1. เปลือกหุ้มผล (Pericarp) ประกอบด้วย เนื้อเยื่อ 3 ชั้น คือ Epicarp, Mesocarp และ Endocarp มีลักษณะเป็นใย (Fibrous) ผนังของเยื่อหุ้มผลมีโปรตีน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เป็นส่วนประกอบ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าวเปลือก (บุญหงษ์ จงคิด, 2547)

2. เปลือกหุ้มเมล็ด (Tegmen or Seed Coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้าไป ประกอบด้วยเนื้อเยื่อสองชั้นเรียงกัน และมีสารประเภทไขมันอยู่

3. ชั้นออเลอรอน (Aleurone Layer) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ดและคัพภะ ส่วนนี้จะมีโปรตีนสูง นอกจากนี้ยังมีน้ำมัน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส อยู่ด้วย

4. ส่วนที่เป็นแป้ง (Starchy Endosperm) หรือส่วนที่เป็นข้าวสาร อยู่ชั้นในสุดของเมล็ด ประกอบด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่และมีโปรตีนอยู่บ้าง แป้งในเมล็ดข้าวมีสองชนิด คือ อะมิโลเพกติน (Amylopectin) ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ของ D-Glucose ที่ต่อกันแบบ Branche Chain และอะมิโลส (Amylose) ซึ่งต่อกันแบบ Linear Chain ส่วนประกอบของแป้งทั้งสองชนิดนี้มีสัดส่วนแตกต่างกันไปตามชนิดข้าว ในข้าวเหนียวจะมีอะมิโลสอยู่ประมาณ 0-2% ส่วนที่เหลือเป็นอะมิโลเพกติน ข้าวเจ้ามี

อะมิโลสมากกว่าคือ ประมาณ 7-33% ของน้ำหนักข้าวสาร

5. คัพภะ (Embryo) อยู่ติดกับเนื้อเมล็ดทางด้านเปลือกหุ้ม เป็นส่วนที่เจริญไปเป็นต้นอ่อนและเป็นส่วนที่มีโปรตีนและไขมันสูง คัพภะ ประกอบด้วย ต้นอ่อน (Plumule) รากอ่อน (Radicle) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (Coleoptile) เยื่อหุ้มรากอ่อน (Coleorhiza) ท่อน้ำและอาหาร (Epiblast) และใบเลี้ยง (Scutellum)

ตัวอย่างคุณลักษณะของข้าวชัยนาท 1 (Chai Nat 1)

ชื่อพันธุ์ ชัยนาท 1 (Chai Nat 1)

ชนิด ข้าวเจ้า

คู่ผสม IR13146-158-1 / IR15314-43-2-3-3 // BKN6995-16-1-1-2

ประวัติพันธุ์ ได้จากการผสม 3 ทาง ระหว่างสายพันธุ์ IR13146-158-1 และสายพันธุ์ IR15314-43-2-3-3 กับ BKN6995-16-1-1-2 ที่สถานีทดลองข้าวชัยนาท เมื่อ พ.ศ. 2525 ปลุกคัดเลือกจนได้สายพันธุ์ CNTBR82075-43-2-1

การรับรองพันธุ์ คณะกรรมการวิจัยและพัฒนากรมวิชาการเกษตร มีมติให้เป็นพันธุ์รับรองเมื่อวันที่ 9 กันยายน 2536

ลักษณะประจำพันธุ์

1. เป็นข้าวเจ้า สูงประมาณ 113 เซนติเมตร
2. ไม่ไวต่อช่วงแสง
3. อายุเก็บเกี่ยว ประมาณ 121-130 วัน
4. ทรงกอตั้ง ใบสีเขียว ใบธงค่อนข้างยาวตั้งตรง คอรวงสั้น รวงยาวและแน่น ระแง้ค่อนข้างถี่ ฟางแข็ง

5. เมล็ดข้าวเปลือกสีฟาง

6. ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์

7. เมล็ดข้าวกล้อง กว้าง x ยาว x หนา = 2.1 x 7.7 x 1.7 มิลลิเมตร

8. ปริมาณอะมิโลส 26-27 %

9. คุณภาพข้าวสุก ร่วน แข็ง

ผลผลิต

ประมาณ 740 กิโลกรัมต่อไร่

ลักษณะเด่น

1. ผลผลิตสูง
2. ตอบสนองต่อการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนดี
3. ต้านทานโรคใบหงิก และโรคไหม้
4. ต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล และเพลี้ยกระโดดหลังขาว
5. มีท้องไข่น้อย

2.2 คุณภาพของข้าว

2.2.1 คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

คุณภาพทางด้านกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือก ประกอบด้วย

2.2.1.1 น้ำหนักเมล็ดข้าว กำหนดได้ 2 แบบ คือ

1. น้ำหนักต่อปริมาตร หมายถึง การชั่งน้ำหนักข้าวด้วยปริมาตรคงที่ เช่น กรัม/ลิตร หรือ กิโลกรัม/ถัง
2. น้ำหนักต่อจำนวนเมล็ด หมายถึง การชั่งน้ำหนักข้าวด้วยปริมาตรคงที่ เช่น

กรัม/100 เมล็ด หรือ กรัม/1000 เมล็ด วิธีการนี้เป็นลักษณะหนึ่งในการจำแนกพันธุ์ข้าว

2.2.1.1.2 สีเปลือกของข้าวเปลือก บอกถึงลักษณะของพันธุ์ข้าว มีหลายสีตั้งแต่สีขาว สีฟาง น้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาลเข้ม น้ำตาลทอง ร่องน้ำตาล ม่วงหรือดำ เป็นต้น สำหรับพันธุ์ข้าวของประเทศไทยมีสีเปลือกส่วนใหญ่เป็นสีขาว หรือสีฟาง และสีน้ำตาล ส่วนสีน้ำตาลแดง สีเขียวแกมเทา และดำมีส่วนน้อย พันธุ์ข้าวที่มีคุณภาพดีควรมีเปลือกสีอ่อน (สีฟาง หรือ น้ำตาล)

2.2.1.1.3 สีข้าวกล้อง บอกถึงลักษณะประจำพันธุ์เช่นเดียวกับสีของข้าวเปลือก คุณภาพข้าวกล้องที่เกี่ยวกับข้อกับสีจึงขึ้นอยู่กับผู้บริโภค

2.2.1.1.4 ขนาดและรูปร่าง บอกถึงลักษณะประจำพันธุ์เพื่อจำแนกพันธุ์ข้าว และใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการซื้อขายข้าวประเทศไทยโดยวัดขนาดเป็นความยาว วัดรูปร่างจากอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง และการวัดความหนา เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวสาร ข้าวกล้องและข้าวเปลือก รูปร่างของเมล็ดข้าวสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ เรียว ปานกลาง และป้อม ซึ่งผลที่ได้จะบอกถึงคุณภาพและประสิทธิภาพของการขัดสีข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้องและข้าวสารแต่ละชนิด

2.1.1.5 ข้าวท้องไข หมายถึง จุดขาวขุ่นคล้ายชอล์กที่เกิดขึ้นในเนื้อของเมล็ดข้าวสารมี 3 ลักษณะ คือ จุดขาวขุ่นตรงกลางของเนื้อเมล็ดข้าวสาร (white center) จุดขาวขุ่นด้านข้างหรือด้านท้อง (white belly) และจุดขาวขุ่นด้านหลังของเมล็ดข้าวสาร ซึ่งเป็นด้านตรงข้ามกับคัมมะ (White back) เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่บ่งบอกคุณภาพ และราคาข้าวเปลือกเนื่องจากเมล็ดข้าวที่เป็นข้าวท้องไขมาก เมื่อนำไปสีจะทำให้เมล็ดหัก จึงมีผลต่อคุณภาพการสีโดยตรง

2.1.1.6 ความเลื่อมมันของเมล็ด เป็นปัจจัยที่ใช้ประเมินคุณภาพและราคาข้าวเนื่องจากข้าวกล้องที่มีความเลื่อมมันดี เมื่อนำไปสีจะทำให้ข้าวไม่หัก ได้ข้าวเต็มเมล็ดมาก

2.1.1.7 ความขาวของข้าวสาร เมื่อนำข้าวกล้องไปขัดขาวจนได้ข้าวสาร ซึ่งมีสีขาวเสมอ แต่อาจจะมีสีขาวแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระดับการสี ถ้าขัดเบาๆ จะมีสีคล้ำกว่าเมื่อขัดหนักๆ เพราะมีส่วนของรำติดอยู่ที่ผิวของเมล็ดข้าว สำหรับข้าวเปลือกที่เก็บไว้นานถ้านำไปสีจะได้ข้าวสารสีคล้ำกว่าข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ๆ ดังนั้นความขาวของข้าวสารจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานของข้าว

2.1.1.8 ความใสของเมล็ด เป็นลักษณะความโปร่งแสง โดยแสงส่องผ่านได้ทั้งเมล็ดข้าว ต่างจากข้าวท้องไข ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะจุด ในข้าวเจ้าด้วยกันหรือแม้แต่พันธุ์ข้าวเดียวกันจะมีความใส หรือขุ่นต่างกันขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมที่ปลูก ในขณะที่ข้าวเหนียวทั่วไปจะมีความทึบแสง

2.3 คุณภาพการสี (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

คุณภาพการสีกำหนดจากการนำข้าวเปลือกมาทดลองสีเพื่อประเมินปริมาณแกลบ รำ ข้าวสารเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหัก สิ่งสำคัญที่ใช้ประเมินราคาข้าวเปลือก คือ ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด และต้นข้าว ซึ่งถ้ามีปริมาณมากราคาข้าวเปลือกจะสูง สำหรับคุณภาพการสีประกอบด้วยดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด}}{\text{น้ำหนักข้าวสาร}} \times 100$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์แกลบ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์รำ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวสาร}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวหัก} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสาร} - \text{น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ดต้นข้าว}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

ในกระบวนการสีข้าวจะได้ผลผลิตจากข้าวเปลือกดังนี้

ข้าวเปลือกสะอาด 100 % จะได้

- แกลบ 20–30 %
- รำ 8–11 %
- ข้าวสารรวม 66–72 %

2.4 คุณภาพเมล็ดข้าวทางเคมี

คุณภาพเมล็ดข้าวทางเคมี ประกอบด้วย (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.4.1 คาร์โบไฮเดรต หมายถึง ซ้ำกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ส่วนใหญ่มีสูตรเคมี $C_x(H_2O)_y$ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ น้ำตาลและพอลิแซ็กคาไรด์ เป็นสารอาหารที่สำคัญมากประเภทหนึ่ง

คาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในข้าวซึ่งมีสตาร์ชนี้ประกอบไปด้วย อะไมโลสและอะไมโลสเพคตินในอัตราส่วนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวทำให้ข้าวมีลักษณะในการหุงต้ม และคุณภาพในการกินต่างกันไป ตลอดจนมีผลต่อคุณค่าทางอาหาร เนื่องจากเป็นแหล่งสะสมพลังงาน

สตาร์ช แหล่งเกิดสตาร์ชจะอยู่ในเมล็ดสตาร์ชซึ่งมีลักษณะเป็นรูปห้าเหลี่ยมขนาด 3-9 μm รวมกันเป็นกลุ่มภายในอะมิโลพลาส (Amyloplast) มีลักษณะกลมหรือรี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7–39 μm โดยภายในอะมิโลพลาสต์มีเมล็ดสตาร์ชรวมกันอยู่ประมาณ 20–60 เม็ด และระหว่างเมล็ดสตาร์ชจะมีกลุ่มโปรตีนแทรกอยู่เห็นเป็นร่องเมล็ดสตาร์ช สตาร์ชจากข้าวประกอบด้วยอะไมโลส 7–33 % ของน้ำหนักเมล็ดข้าวสาร หรือ 8–37 % ของปริมาณสตาร์ชทั้งหมด ส่วนที่มาก คือ อะมิโลเพคตินซึ่งในข้าวเหนียวอายุมีถึง 100 % แต่การเกาะกันอยู่ของโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลสเพคตินเป็นสตาร์ชนั้นมีลักษณะอย่างไร นักวิทยาศาสตร์ยังต้องศึกษาและวิจัยต่อไป แต่สันนิษฐานว่าส่วนที่ให้โครงสร้างและเป็นผลึกนั้นเกิดจากอะมิโลเพคติน การสกัดเมล็ดสตาร์ชออกจากเมล็ดข้าวโดยใช้วิธีการบดแบบเปียกด้วยน้ำ หรือต่างอ่อนเพื่อสกัดแยกโปรตีนออกไปและสารละลายช่วยไม่ให้เกิดสตาร์ชเสียหายในการบดแยกส่วนสตาร์ชจาก

สารละลายทำให้แห้งแล้วบดให้ละเอียดก็จะได้สตาร์ชจากข้าว ซึ่งสตาร์ชจากข้าวเจ้าและข้าวเหนียวจะมีคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชข้าวเจ้าและข้าวเหนียว
(อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

คุณสมบัติ	สตาร์ชข้าวเจ้า	สตาร์ชข้าวเหนียว
อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจล ($^{\circ}\text{C}$)	58 - 79	58 - 78.5
ขนาดเม็ดสตาร์ช (ไมโครเมตร)	1.6 - 8.7	1.9 - 8.1
ความหนาแน่น (แทนที่โดยไลซีน) (กรัม / มิลลิกรัม)	1.49 - 1.51	1.48 - 1.50
ความสามารถในการจับไอโอดีน (%)	2.36 - 6.96	0.15 - 1.64
โปรตีนที่เหลืออยู่ (% น้ำหนักแห้ง)	0.02 - 0.12	0.01 - 1.64

คุณภาพข้าวสุกนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสตาร์ชที่เป็นองค์ประกอบเป็นสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณอะไมโลส ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ ข้าวสุกจะมีลักษณะนุ่มและเหนียว ส่วนข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงข้าวสุกจะมีลักษณะร่วนและแข็งดังแสดงในตารางที่ 2.2 สตาร์ชเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของข้าวในระหว่างการแปรรูปและหลังการแปรรูปคือ การเกิดเจลลาติไนเซชัน (gelatinization) และการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) การเกิดรีโทรกราเดชันเป็นปรากฏการณ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ เกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบของแป้งที่ถูกเจลาติไนซ์แล้วมารวมกันอีกครั้งในโครงสร้างที่เป็นระเบียบในภาวะที่เหมาะสมมีผลทำให้เกิดผลึกขึ้น

ตารางที่ 2.2 คุณภาพข้าวหุงสุกแบ่งตามปริมาณอะไมโลส (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

ปริมาณอะไมโลส (% น้ำหนักแห้ง)	ชนิดข้าว	ลักษณะข้าวสุก
0 - 5	ข้าวเหนียว	เหนียวมาก
5.1 - 12.0	ข้าวเจ้าอะไมโลสต่ำมาก	เหนียว , นุ่ม
12.1 - 20.0	ข้าวเจ้าอะไมโลสต่ำ	เหนียว , นุ่ม
20.1 - 25.0	ข้าวเจ้าอะไมโลสปานกลาง	นุ่ม , ค่อนข้างเหนียว
> 25	ข้าวเจ้าอะไมโลสสูง	ร่วน , แข็ง

พอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช พบมากในเปลือกหุ้มผลและเปลือกหุ้มเมล็ดมากกว่าในเนื้อและคัมภะ จะเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ในรูปเส้นใยอาหาร ซึ่งประกอบไปด้วย เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส สารเพคติน ลิกันิน และโปรตีนที่ติดอยู่ ปริมาณเส้นใย (crude fiber) เส้นใยในข้าว

กล้อง ข้าวสารและข้าวหนึ่งเป็น 0.9 0.3 และ 0.2 % ตามลำดับ จากการวิเคราะห์แต่ละส่วนของข้าว (โปรตีนสูง) ที่ขัดสีในหีบปฏิบัติการและข้าวในท้องตลาด พบว่า มีปริมาณเส้นใยตั้งแต่ 1.5–3 % เส้นใยหยาบและเส้นใยอาหารมีมากในรำและคัมภะ แต่ถ้าวเคราะห์ปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์จากผนังเซลล์ที่เตรียมได้จะมีมากในข้าวสาร เพราะปริมาณเนื้อเมล็ดมีมากกว่าส่วนรำและคัมภะในเมล็ดนอกจากนี้ยังเหลือส่วนที่ละลายได้ในน้ำร้อนและต่างมากกว่ารำและคัมภะอีกด้วย

จากตารางที่ 2.2 เห็นได้ว่า ข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลสเพคตินในส่วนประกอบของโมเลกุลสตาร์ชทั้งหมด หรือเกือบทั้งหมด เมื่อหุงเป็นข้าวสุกมีลักษณะเหนียวมาก ติดมือ เมื่อปริมาณ อะไมโลสที่มากกว่า 25 % จัดเป็นข้าวเจ้าแข็ง ที่ร่วนแข็ง หุงขึ้นหม้อ

2.4.2 โปรตีน หมายถึง สารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนของไนโตรเจน มีโมเลกุลขนาดใหญ่ประกอบด้วยกรดแอมิโนหลายชนิดเชื่อมโยงกัน เป็นสารประกอบที่สำคัญยิ่งต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิดซึ่งจำเป็นต้องใช้เพื่อสร้างเนื้อเยื่อของร่างกาย

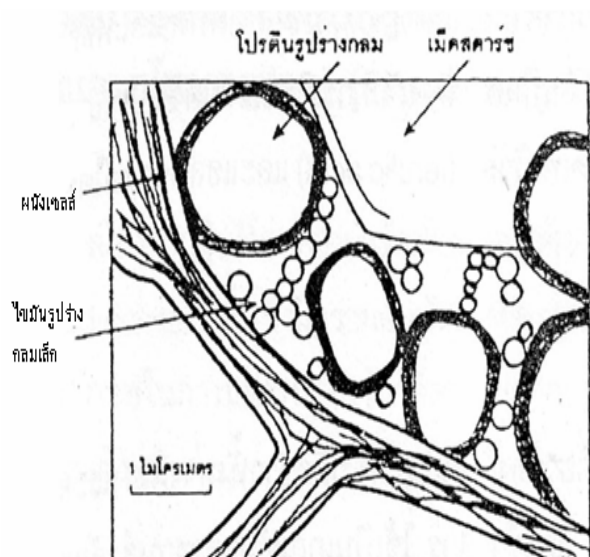
โปรตีนในข้าวมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และโดยทั่วไปจะมีปริมาณน้อยกว่าในธัญพืชอื่น การวิเคราะห์ และคำนวณปริมาณโปรตีนในข้าวใช้แฟกเตอร์ 5.95 คูณไนโตรเจน โปรตีนที่มีในข้าวนี้เกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของเมล็ด โดยมีมากในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ดและเนื้อเมล็ดด้านนอกจะมีโปรตีนมากกว่าใจกลางเมล็ด

2.4.3 ไขมัน หมายถึง สารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ มีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำแต่จะละลายในสารอินทรีย์ทั่วไป มีลักษณะเป็นของ (ไขมัน) ไปจนถึงของเหลว (น้ำมัน) ข้าวมีปริมาณไขมันประมาณ 3% คล้ายคลึงธัญพืชชนิดอื่นและมีอยู่ในส่วนด้านนอกของเมล็ดมากกว่าในใจกลางเมล็ด ดังนั้นการขัดสีข้าวให้ขาว ทำให้ข้าวสารเจามีไขมันอยู่เพียง 0.3-0.5% ซึ่งเป็นไขมันที่เกาะเกี่ยว (Bound lipids) กับสารอื่นอยู่ประมาณ 0.3-0.4% ส่วนในข้าวเหนียวมีไขมันที่เกาะเกี่ยวนี้น้อยกว่า (0.03%) โดยไขมันมีความสัมพันธ์กับเม็ดสตาร์ช 3 ลักษณะคือ ไขมันอยู่ติดกับโปรตีน ซึ่งอยู่ที่ผิวของเม็ดสตาร์ชภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 หรืออาจอยู่รวมกับโครงสร้างของอะไมโลสเพคตินสายนอก ลักษณะที่สองไขมันอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชโดยเกาะเกี่ยวกับเม็ดสตาร์ชและลักษณะที่สามอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชแต่ไม่เกาะเกี่ยวกับเม็ดสตาร์ช

2.4.4 ถ้า หมายถึง สิ่งที่เป็นผลผลิตของสิ่งที่เหลือจากไฟเผาหมดแล้ว

2.4.5 ปริมาณความชื้น เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ และเกี่ยวข้องกับคุณภาพข้าวทั้งทางตรง และทางอ้อม คือ ปริมาณความชื้นของข้าวทั้งในข้าวเปลือกและข้าวสารใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำคัญเพื่อการซื้อขายข้าว เนื่องจากปริมาณความชื้นสามารถบ่งชี้ถึงน้ำหนักของเนื้อข้าวที่ผู้ซื้อและผู้ขายเกี่ยวข้องโดยตรง ในการกำหนดราคาซื้อ-ขาย และในทางอ้อมนั้น ความชื้นสามารถบ่งชี้ถึงอายุการเก็บรักษาข้าวหรือบ่งบอกถึงความปลอดภัยในการเก็บรักษาให้ข้าวมีคุณภาพดี ข้าวที่มีความชื้นสูงจะมีความเสื่อมเสียเร็วกว่าข้าวที่มีความชื้นต่ำ ความชื้นที่ยอมรับกันทั่วไปประมาณ 13-14 %w.b. การตากข้าวเปลือกเพื่อลดความชื้นลงให้อยู่ในเกณฑ์ที่

ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา (ความชื้นไม่สูงกว่า 14 %มาตรฐานเปียก) จนถึงเวลาการสีข้าวเปลือกที่มีความชื้นเหมาะสมก็จะได้ข้าวเต็มเมล็ดสูง และข้าวหักน้อย



รูปที่ 2.2 จำลองภาพโครงสร้างของเมคสตาซ โปรตีน และไขมันในชั้นแอลิวโรนของเมล็ดข้าว ผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.5 คุณภาพการหุงต้ม (cooking quality) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

คุณภาพการหุงต้มมีผลมาจากวิธีการหุงต้มข้าวโดยขึ้นกับพันธุ์ข้าว ซึ่งตรวจวัดได้จากลักษณะปรากฏของข้าวหุงสุก หรือเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก สำหรับการหุงข้าวเมล็ดยาวของประเทศไทยนั้น เพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีที่สุดตามสภาพข้าว เช่น ข้าวที่มีอะไมโลสสูงซึ่งเป็นข้าวชนิดร่วนแข็ง นิยมใส่น้ำมากกว่าข้าวที่มีอะไมโลสต่ำ ซึ่งในระหว่างการหุงต้มเมล็ดข้าวจะดูดน้ำไว้ เมื่อเมล็ดข้าวสุกแล้วแต่ยังมีน้ำเหลืออยู่ต้องหุงต้มต่อไปอีกสักครู่จะช่วยให้เมล็ดข้าวดูดน้ำเพิ่มขึ้น และช่วยลดความแข็งกระด้างของข้าวสุกลงได้ ในทางตรงกันข้ามการหุงต้มข้าวที่มีอะไมโลสต่ำต้องระมัดระวังปริมาณน้ำในการหุงต้ม เพราะหากน้ำมากเกินไปเมล็ดข้าวจะแฉะและจากการหาความสัมพันธ์แบบถดถอยพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับการหุงต้มข้าวสามารถคาดคะเนจากปริมาณอะไมโลสได้ ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$W = 0.0874 + 1.056A : R^2 = 0.42$$

เมื่อ W = ปริมาณน้ำหุงต้มที่เหมาะสมคิดเป็นเท่าของน้ำหนักข้าวสาร

A = ปริมาณของอะไมโลสคิดเป็นร้อยละของข้าวสาร

อย่างไรก็ตาม การหุงต้มข้าวครั้งละมากๆ อัตราการระเหยน้ำในระหว่างการหุงต้มจะลดลง จึงต้องลดปริมาณน้ำส่วนนี้ลงเวลาหุงต้ม รวมทั้งควรปรับน้ำหนักของข้าวและน้ำให้เป็นปริมาตร เพื่อสะดวกในการปฏิบัติต่อไป สำหรับข้าวพันธุ์ดีบางพันธุ์ของประเทศไทยสามารถแบ่งกลุ่มคุณภาพตามลักษณะการหุงต้มและการรับประทานได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ข้าวสุกนุ่ม และเหนียว ข้าวสุกร่วน(ข้าวอ่อน) และข้าวสุกร่วนแข็ง ดังนั้นวิธีการหุงต้มข้าวสุกจึงมีผลโดยตรงต่อคุณภาพการหุงต้มซึ่งเกี่ยวข้องกับพันธุ์ข้าวโดยพันธุ์ข้าวต่างกัน เช่น ข้าวเจ้า และข้าวเหนียวจะต้องปรับปรุงวิธีการหุงต้มให้ได้ลักษณะเนื้อสัมผัสตามผู้บริโภคต้องการ นอกจากวิธีการหุงต้มแล้วยังรวมวิธีตรวจสอบคุณภาพการหุงต้ม ได้แก่ เวลาในการหุงต้ม (Cooking time) อัตราการอุ้มน้ำของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสาร (Water uptake ratio) อัตราการยืดออกของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสาร (Elongation ratio) และของแข็งที่สูญเสียระหว่างการหุงต้ม (Solid loss; %wet base)

2.6 คุณสมบัติความหนืด (viscosity)

คุณสมบัติความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดมากขึ้น (รูปที่ 2.3) พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง และหรือโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง

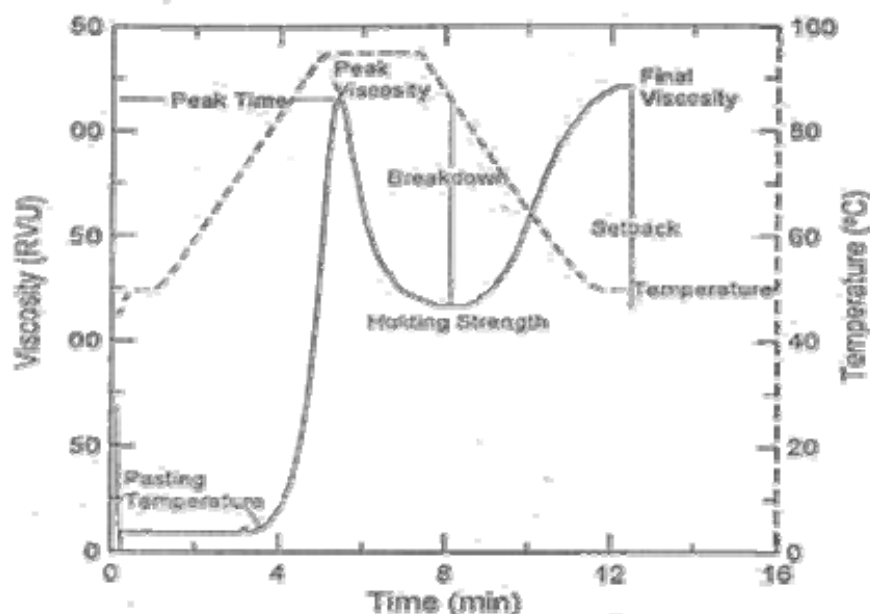
เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะไมโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือ ไม่สั้นและยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า setback และปรากฏการณ์นี้ก็คือการคืนตัวของแป้ง (retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน อุณหภูมิ shear rate ฯลฯ แต่ที่มีผลมากที่สุดได้แก่ ชนิดของแป้ง



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน
(กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

เครื่อง rapid visco analyser (RVA) เป็นเครื่องมือที่ได้รับการพัฒนามาเพื่อติดตามพฤติกรรมความหนืดของแป้งอีกแบบหนึ่ง คุณสมบัติพิเศษของเครื่องนี้คือ สามารถเปลี่ยนระดับอุณหภูมิทั้งการทำให้ร้อนและเย็นได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ควบคู่ไปกับความสามารถในการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ทำให้สามารถหา pasting curve ได้ภายใน 13 นาที เนื่องจากมีกลไกในการส่งผ่านความร้อนที่ดีและยังใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่าด้วย

การทำงานของเครื่อง RVA จะใช้แป้งประมาณ 3 กรัม เติมน้ำ 25 มิลลิลิตร รักษาอุณหภูมิไว้ที่ 50 หรือ 60°C ให้ความร้อนด้วยอัตราประมาณ 12°C ต่อนาที จนได้อุณหภูมิ 95°C ปลอยไว้ 2-3 นาที ทำให้เย็นลงด้วยอัตราประมาณ 12°C ต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 50°C หรือต่ำกว่าเป็นเวลา 2 นาที เครื่องจะทำการบันทึกอุณหภูมิและ viscosity profile ที่เปลี่ยนไปกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.4



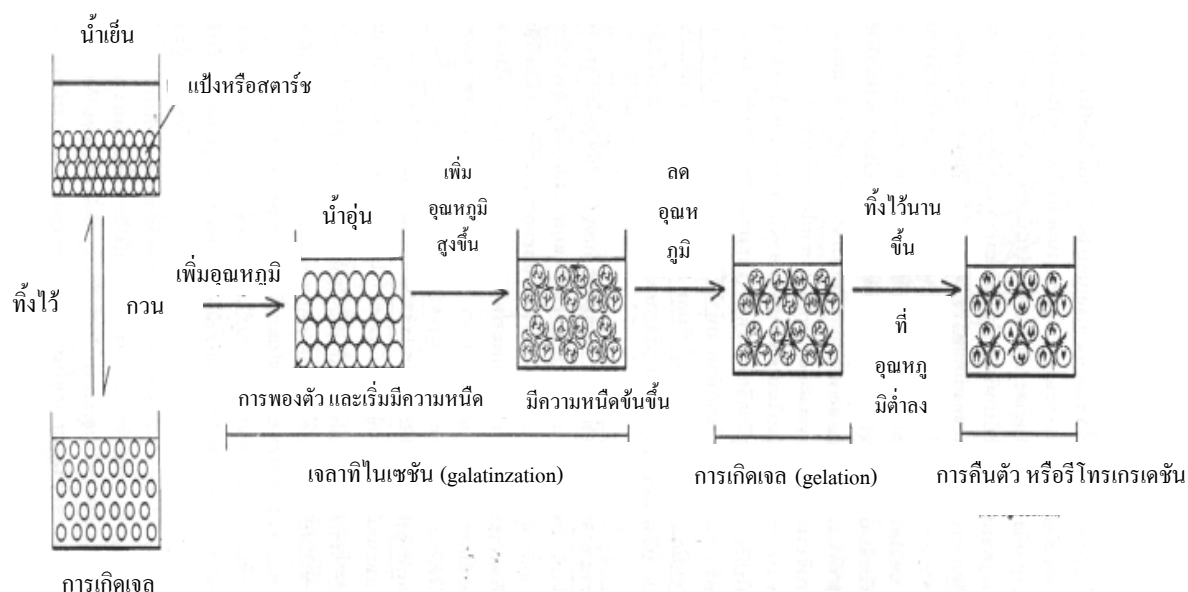
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA
(กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

ค่าที่เครื่องจะแสดงผลอ่านได้บนจอคอมพิวเตอร์โดยความหนืดมีหน่วยเป็น RVU ประกอบด้วยดังนี้

1. peak time = เวลาที่เกิด peak ของความหนืด (นาที)
2. pasting temperature = อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืดหรืออุณหภูมิที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ใน 20 วินาที ($^{\circ}\text{C}$)
3. peak temperature = อุณหภูมิที่เกิด peak ($^{\circ}\text{C}$)
4. holding strength = ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำให้เย็น (RVU)
5. breakdown = ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (RVU)
6. final viscosity = ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง (RVU)
7. setback from peak = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุด peak (RVU)
8. setback from trough = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด

2.7 การเกิดเจลในเซชัน (กลัณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

เมื่อนำเมล็ดข้าวหรือแป้งข้าวมาผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งโดยทั่วไปต้องมีน้ำและความร้อนมาเกี่ยวข้องเสมอ และจากการที่องค์ประกอบหลักในเมล็ดข้าวหรือแป้งข้าวคือ สตาร์ช ดังนั้นการตรวจสอบคุณสมบัติหรือลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชจึงมีผลโดยตรงต่อลักษณะเนื้อสัมผัส องค์ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากข้าวหรือแป้งข้าวนั้น ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงคุณภาพของข้าวหรือแป้งข้าวที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปว่าเหมาะสมต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จากข้าวนั้นตามความต้องการของผู้บริโภคหรือไม่ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับสตาร์ชหรือเม็ดสตาร์ชในเมล็ดข้าวหรือในแป้งข้าวจะเกิดขึ้นเมื่อมีน้ำและความร้อนซึ่งจำเป็นต่อการหุงต้มหรือการทำให้สุก เมื่อสุกแล้วผู้รับประทานข้าวสุกหรือผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากแป้งข้าวในขณะที่อุณหภูมิประมาณ $50-60^{\circ}\text{C}$ มากกว่าที่อุณหภูมิสูง หรือร้อนเกินไป จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชได้เป็นลำดับด้วยการนำแป้งข้าวมาผสมน้ำขณะที่น้ำยังเย็นอยู่ โดยถ้ามีน้ำในปริมาณที่มากกว่าแป้งในสัดส่วนประมาณ 1–5% เมื่อผสมกันในระยะแรกจะเห็นว่าส่วนผสมมีสีขาวขุ่นในลักษณะแป้งแขวนลอยในน้ำ แต่ถ้าทิ้งไว้ในระยะหนึ่งพบว่า แป้งตกตะกอนจากส่วนน้ำคล้ายกับเมื่อก่อนที่จะผสม แสดงว่าเม็ดสตาร์ชในแป้งไม่ดูดซึมน้ำขณะที่เย็น หรือดูดซึมได้น้อยมาก เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนผสมน้ำและแป้งหรือสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชโดยการพองตัวอมน้ำเข้าไปเพิ่มขึ้นในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนไปทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เกาะเกี่ยวกันเองในบริเวณอณูฐานของโครงสร้างโมเลกุลแอมิโลเพกทินคลายตัวลงสามารถมาจับกับโมเลกุลของน้ำในส่วนผสมหรืออมน้ำเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชทำให้พองขึ้นเรื่อยๆ พร้อมกับเริ่มหนืดขึ้น เรียกว่า การเกิดเจลในเซชัน โดยไม่จำกัดถ้าอยู่ในส่วนผสมที่มีน้ำมากจนในที่สุดน้ำเข้าไปในบริเวณผลึกทำลายโครงสร้างเม็ดสตาร์ชพร้อมทั้งมีความหนืดขั้นสูงสุด เพราะน้ำเข้าไปอยู่ในเม็ดสตาร์ชจนอาจไม่เหลือเป็นน้ำอิสระในส่วนผสม แต่เมื่อคั้นส่วนผสมไปเรื่อยๆ ที่อุณหภูมิสูงอีกระยะหนึ่งประมาณ 20–30 นาที พบว่าความหนืดลดลง เนื่องจากโครงสร้างเม็ดสตาร์ชถูกทำลายทำให้โมเลกุลของแอมิโลเพกทินและแอมิโลสกระจายออกจากเม็ดสตาร์ชแขวนลอยในส่วนผสม เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นเกิดการคืนตัวหรือรีโทรเกรเดชัน มีลักษณะขุ่นกลับคืนมีความหนืดขึ้นขึ้นอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงของส่วนผสมแป้ง หรือสตาร์ชในน้ำ โดยเพิ่มและลดอุณหภูมิ ตามกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งเป็นวัตถุดิบหลัก (อรอนงค์ นัยวิกุลม, 2547)

2.8 คุณภาพการบริโภค (eating quality) (อรอนงค์ นัยวิกุลม, 2547)

การวัดเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก โดยการทดลองทางประสาทสัมผัส และโดยการวัดด้วยเครื่องมือวัดมีบทบาทสำคัญมากขึ้น เนื่องจากมีผู้บริโภคเพิ่มมากขึ้นและผู้บริโภคแต่ละกลุ่มแต่ละประเทศมีความนิยมลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแตกต่างกัน ซึ่งลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกนี้ เป็นผลมาจากหลายปัจจัย ได้แก่ พันธุ์ข้าว คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว (เช่น ระดับการสีข้าว สภาพการทำให้แห้ง และความชื้นสุดท้ายของข้าว) และวิธีการหุงต้ม ดังนั้นจึงมีกลุ่มวิจัยหลายกลุ่มพยายามทดลองเปรียบเทียบผลการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสข้าวหุงสุกจาก 2 วิธีดังกล่าว และหาความสัมพันธ์เพื่อให้สามารถคาดคะเนลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกได้เร็วขึ้น

ในปัจจุบันมีเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสเพื่อใช้ประเมินและเปรียบเทียบกัน และลักษณะเนื้อสัมผัสที่วัดได้จากเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการวัดเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก และเมื่อเปรียบเทียบค่าวัดทางลักษณะจากผู้ชิมกับเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2.3

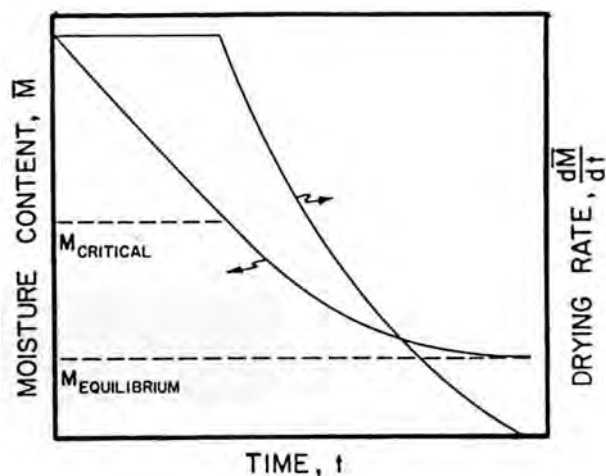
ตารางที่ 2.3 ค่าวัดลักษณะเนื้อสัมผัสจากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (อรอนงค์ นัยวิกุลม, 2547)

ค่าวัด	ผลจากเครื่อง
ความกระด้าง	ความสูงของพีคจากเส้นโค้งแรก
ความยืดหยุ่น	อัตราส่วนของเส้นทางระหว่างเส้นทางการกดของหัวกด เส้นโค้งที่สองกับเส้นโค้งแรก
ความเกาะติดกัน	อัตราส่วนของพื้นที่ระหว่างเส้นโค้งที่สองกับเส้นโค้งแรก
ความเหนียวติดกัน	แรงค่าลบที่เกิดจากแรงดึงขึ้นของหัวกดขึ้นจากตัวอย่าง
ความเหนียวยึดติดกัน	ผลจากการคูณค่าความกระด้างกับความติดเกาะ
การเคี้ยว	ผลจากการคูณค่าความเหนียวยึดติด กับความยืดหยุ่น

2.9 พื้นฐานของการอบแห้ง

สำหรับพื้นฐานของการอบแห้งวัสดุทั่วไปจะมีอัตราการอบแห้งหลักๆ อยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying rate) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying rate) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง อัตราการอบแห้งจะคงที่ สาเหตุเนื่องจากที่บริเวณผิวของวัสดุมีฟิล์มน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก และความร้อนที่ได้รับมาส่วนใหญ่จึงถูกนำมาใช้ในการระเหยน้ำออกจากบริเวณผิวของวัสดุไปสู่อากาศที่อยู่รอบๆ ด้วยอัตราคงที่ ดังนั้นจึงเรียกช่วงนี้ว่า อัตราการอบแห้งคงที่ ต่อมาเมื่อปริมาณน้ำที่บริเวณผิวของวัสดุลดลงอย่างมาก และขณะเดียวกันการระเหยน้ำที่บริเวณผิวของวัสดุก็จะเกิดขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งความชื้นของวัสดุลดลงถึงความชื้นวิกฤติ (Critical moisture content, M_{CRITICAL}) การอบแห้งวัสดุในช่วงนี้ก็จะถูกเรียกว่า อัตราการอบแห้งลดลง สาเหตุดังกล่าวนี้เนื่องจากอัตราการแพร่จากภายในของวัสดุช้ากว่าอัตราการระเหยน้ำที่บริเวณผิวจึงส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งลดลง และสุดท้ายความชื้นของวัสดุจะลดลงไปจนกระทั่งความชื้นของวัสดุสมดุลกับความชื้นของอากาศที่อยู่รอบๆ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ความชื้นของวัสดุไม่มีการเปลี่ยน ซึ่งความชื้นจุดดังกล่าวนี้จะเรียกว่า ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, $M_{\text{EQUILIBRIUM}}$) (Brooker et al.,1992; Mujumdar & Menon ,1995)

จากพื้นฐานของการอบแห้งเบื้องต้นนี้ Brooker et al. (1992) อธิบายไว้ว่า การอบแห้งผลผลิตทางเกษตรบางชนิด เช่น เมล็ดพืชต่างๆ จะไม่มีช่วงอัตราการคงที่ เนื่องจากเมล็ดพืชจะไม่มีฟิล์มน้ำเกาะอยู่ที่ผิวของเมล็ด ถึงแม้ว่าเมล็ดพืชต่างๆ จะถูกเก็บเกี่ยวในขณะที่เมล็ดยังไม่แก่หรือในช่วงฤดูฝนก็ตาม



รูปที่ 2.6 การอบแห้งวัสดุระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง (Brooker et al.1992)

2.10 วิธีการอบแห้ง

วิธีการอบแห้งส่วนใหญ่มักจะเกี่ยวข้องกับการใช้ตัวกลางสำหรับการอบแห้งจากภายนอกถ่ายโอนไปยังวัสดุ ซึ่งตัวกลางเหล่านี้จะมาจากรูปแบบต่างๆ ดังนั้นคือ การพาความร้อน (เช่น การอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed drying) และการอบแห้งแบบถาด (Tray drying)) การนำความร้อน (เช่น การอบแห้งแบบดรัม (Drum drying) และการอบแห้งแบบหมุน (Rotary drying)) และการแผ่รังสีความร้อน (เช่นการอบแห้งด้วยรังสีดวงอาทิตย์ (Solar drying) และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared radiative drying)) นอกจากนี้การอบแห้งบางประเภทจะนำเอารูปแบบการถ่ายโอนความร้อนทั้ง 3 รูปแบบมาใช้ร่วมกัน เช่น การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดร่วมกับการพาอากาศร้อน เป็นต้น ดังนั้นในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องครั้งนี้จะอธิบายเฉพาะการอบแห้งที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัยครั้งนี้เท่านั้นคือ การอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยการพาอากาศร้อน และการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด ตามลำดับ

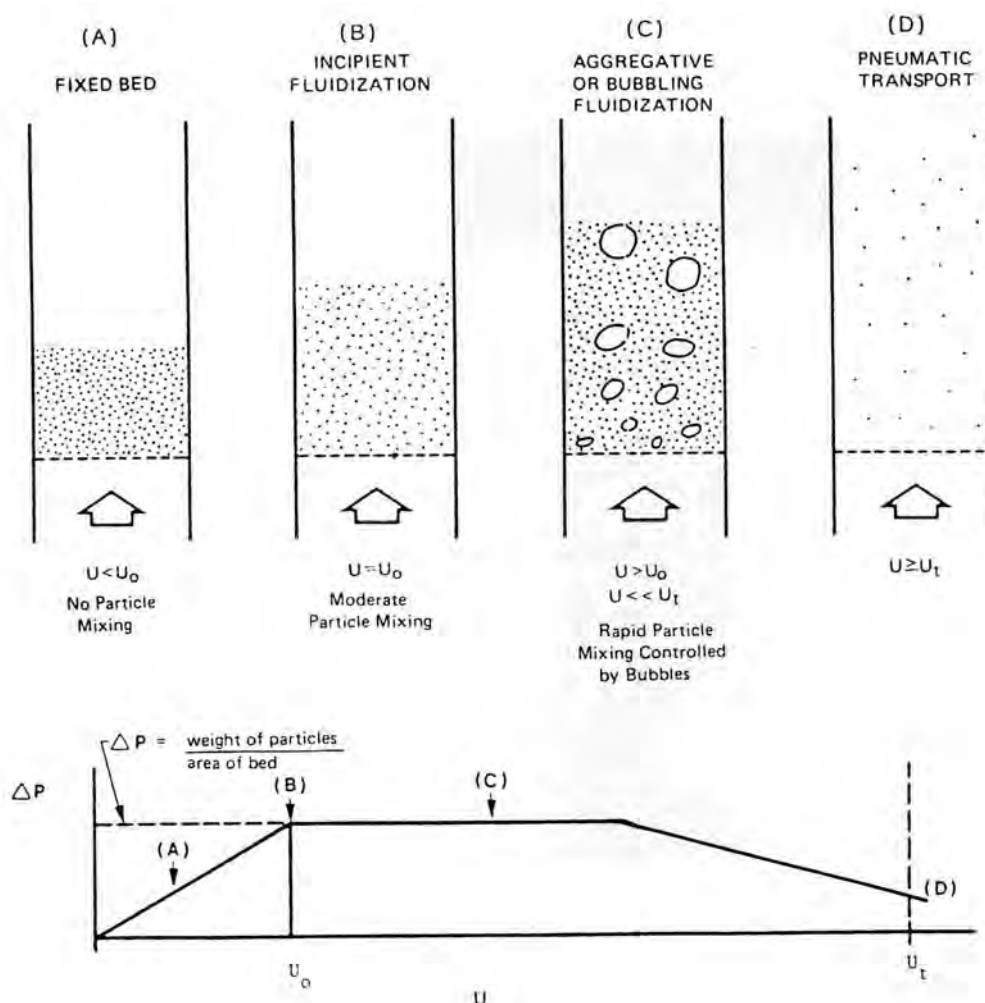
2.10.1 การอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยการพาอากาศร้อน (hot-air convective fluidized bed drying)

ฟลูอิดไคเซชัน (Fluidization) คือ กระบวนการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดสัมผัสกับของไหล (เช่น อากาศร้อน) และเม็ดของแข็งจะมีสภาวะคล้ายกับของไหล เนื่องจากเม็ดของแข็งมีการลอยตัวขึ้นอย่างเป็นอิสระและไม่เกาะติดกัน (Kunii & Levenspiel, 1991) ดังนั้นเมื่อนำเอาเทคนิคแบบฟลูอิดไคเซชันมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งเมล็ดพืชจะเรียกว่า การอบแห้งเมล็ดพืชแบบฟลูอิดไคซ์เบด

2.10.1.1 กลไกของการอบแห้งเมล็ดพืชแบบฟลูอิดไธซ์เบด

ในกลไกของการอบแห้งเมล็ดพืชแบบฟลูอิดไธซ์เบดนั้น จะเริ่มตั้งแต่การป้อนเมล็ดพืชลงบนตะแกรงภายในห้องอบแห้ง เมื่อเริ่มปล่อยให้อากาศร้อนไหลเข้าสู่เบดเมล็ดพืชผ่านทางตะแกรงที่อยู่ด้านล่างของห้องอบแห้งด้วยความเร็ว (U) ต่ำๆ อากาศก็จะไหลผ่านเบดเมล็ดพืชไปโดยที่เมล็ดพืชจะไม่มีการขยับตัวเลย ซึ่งลักษณะนี้จะเรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(A) และเมื่อความเร็วของอากาศร้อนที่ผ่านเบดเมล็ดพืชถูกเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้เกิดความดันลด (Pressure drop, ΔP) เพิ่มขึ้นตามความเร็วของอากาศร้อนจนกระทั่งความดันลดเท่ากับน้ำหนักของเมล็ดพืชทั้งหมดหารด้วยพื้นที่ของเบดเมล็ดพืช ซึ่งจุดดังกล่าวนี้เมล็ดพืชทั้งหมดจะลอยตัวเป็นอิสระอยู่กับกระแสอากาศร้อนที่ไหลผ่าน และแรงเสียดทานระหว่างเมล็ดพืชและอากาศร้อนจะสมดุลกับน้ำหนักของเมล็ดพืชทั้งหมด ดังนั้นจึงเรียกลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มต้นฟลูอิดไธเซชัน (Incipient fluidization or Minimum fluidization, U_0) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(B) ซึ่งจุดดังกล่าวนี้ เมล็ดพืชจะมีลักษณะคล้ายกับของไหล และมีการคลุกเคล้าเป็นเนื้อเดียวกัน ต่อมาเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศร้อนให้สูงขึ้นเรื่อยๆ และสูงมากกว่าความเร็วของจุดเริ่มต้นฟลูอิดไธเซชัน จะส่งผลทำให้อากาศร้อนที่ไหลเบดเมล็ดพืชเกิดเป็นฟองอากาศ (bubble) ขึ้น และจะเรียกลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไธเซชันวุ่นวาย (Aggregative fluidization or Bubbling fluidization) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(C) สำหรับลักษณะฟองอากาศดังกล่าวนี้ จะมีขนาดเล็กๆ โดยจะเกิดขึ้นบริเวณตะแกรง หลังจากนั้นจะขยายตัวใหญ่ขึ้นเมื่อฟองอากาศแทรกตัวขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดเมล็ดพืชและก็จะเกิดการแตกตัวในที่สุด นอกจากนี้ในขณะที่เกิดฟองอากาศลอยขึ้นมาจะทำให้เมล็ดพืชที่อยู่ผิวด้านบนของฟองอากาศตกลงมายังส่วนล่าง และมีบางส่วนของเมล็ดพืชจะติดกับผิวของฟองอากาศขึ้นไปด้วย สุดท้ายถ้าเพิ่มความเร็วของอากาศร้อนขึ้นไปอีกจนกระทั่งเท่ากับหรือมากกว่าความเร็ว Terminal fall velocity for grains, (U_t) ก็จะทำให้เมล็ดพืชถูกกระแสอากาศร้อนพาออกไปจากห้องอบแห้ง และจะเรียกลักษณะนี้ว่า การขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatic transport) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(D) (Hovmand, 1995)

สำหรับพฤติกรรมของการอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบดจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประเภทของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้ง เช่น ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงมากๆ ก็จะมี อัตราการอบแห้งหลักอยู่ 2 ช่วง คือ อัตราการอบแห้งคงที่และลดลง แต่ถ้าผลิตภัณฑ์มีความชื้นไม่สูงมากนัก เช่น เมล็ดพืชก็จะมีอัตราการอบแห้งอยู่ช่วงเดียว คือ อัตราการอบแห้งลดลง ตามที่ได้กล่าวผ่านมานี้ในข้อที่ 2.9



รูปที่ 2.7 กลไกของการอบแห้งเมล็ดพืชแบบฟลูอิดไรซ์เบด (Hovmand, 1995)

(U = air velocity, U_0 = air velocity for incipient fluidization, U_t = terminal fall velocity for grains and ΔP = pressure drop over grain bed)

2.10.1.2 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (Brooker et al, 1992; Hovmand, 1995)

ข้อดี

1. เนื่องจากวัสดุถูกทำให้ลอยตัวทำให้อากาศที่วัสดุภายในเบดมีโอกาสสัมผัสกับของไหลมากกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ผลที่ได้คือ จะทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงขึ้น การถ่ายโอนความร้อนและมวลจึงสูงขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ
2. การเคลื่อนที่ของวัสดุมีการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล จึงทำให้อากาศสามารถนำมาใช้ทำงานแบบต่อเนื่องได้
3. อุณหภูมิภายในเบดคงที่ เนื่องจากการผสมผสานของวัสดุภายในเบดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

4. มีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งชนิดอื่น ทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นกว่าชนิดอื่น และสามารถเพิ่มอุณหภูมิของไหลที่ซอบแห้งได้สูงกว่า โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุ

5. วัสดุมีการผสมผสานกันในระหว่างการอบแห้ง ทำให้คุณภาพของวัสดุหลังการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน

ข้อเสีย

1. เมื่ออบแห้งวัสดุที่มีความชื้นสูงเป็นเวลานานจะทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณภายในและผิวของวัสดุ และเกิดความเครียดขึ้นจนกระทั่งส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุ

2. มีฟองก๊าซเกิดขึ้นภายในเบด ทำให้มีประสิทธิภาพในการสัมผัสระหว่างวัสดุกับอากาศไม่ดี

3. การทำงานมีข้อจำกัดในด้านความเร็วของอากาศที่ใช้ไม่สามารถเพิ่มหรือลดได้เนื่องจากอาจทำให้วัสดุหลุดลอยออกจากห้องอบแห้ง หรือไม่เกิดลักษณะของฟลูอิดเซชัน

4. สามารถใช้งานได้ดีเฉพาะกรณีที่วัสดุที่ซอบแห้งมีขนาดเล็กและไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากขนาดของวัสดุมีผลต่อความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

5. ใช้กับวัสดุที่เปื่อยหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะจะเกิดการเกาะ

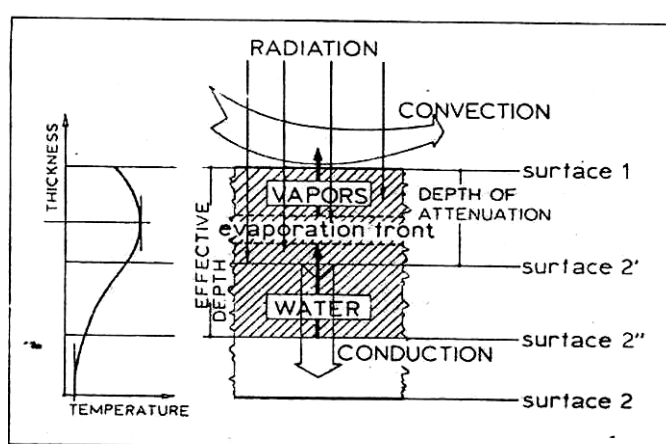
2.10.1 การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด (Infrared radiative drying)

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation, IR) จะมีช่วงของความยาวคลื่นอยู่ระหว่างรังสีวิทยิเบิลและไมโครเวฟ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังนี้คือ รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (Short or near-infrared radiation, NIR) : $0.75 - 3.0 \mu\text{m}$ รังสีอินฟราเรดคลื่นกลาง (Middle-infrared radiation, mid-IR) : $3.00 - 25 \mu\text{m}$ รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว (Long or far-infrared radiation, FIR) : $25-100 \mu\text{m}$ (Sandu, 1986) แต่ในประเทศญี่ปุ่นรังสีอินฟราเรดจะถูกแบ่งความยาวคลื่นออกแตกต่างจากมาตรฐานทั่วไปดังนี้ คือ NIR : $0.75 - 1.4 \mu\text{m}$ mid-IR : $1.4 - 3 \mu\text{m}$ และ FIR : $3 - 100 \mu\text{m}$ (Sakai & Hanazawa, 1994)

2.10.1.1 กลไกของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

เพื่อให้เข้าใจกลไกของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมากขึ้น Sandu (1986) ได้จำลองการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดของแผ่นของแข็งชื้น (Moist solid plate) ซึ่งวางอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ในการจำลองการอบแห้งนี้จะสมมุติฐานว่า รังสีอินฟราเรดจะถูกแผ่มาตกกระทบบนผิวด้านบน (surface 1) ของแผ่นของแข็งอย่างทันทีทันใด ส่วนผิวด้านตรงข้าม (surface 2) จะถูกหุ้มด้วยฉนวนอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 2.8 นอกจากนี้ยัง

สมมุติฐานว่า รังสีอินฟราเรดที่ถูกดูดกลืนด้วยแผ่นของแข็งจะอ่อนกำลังลงอย่างสมบูรณ์ ภายในความลึกที่กำหนด หรือกล่าวอีกนัยว่า รังสีอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนทั้งหมดอย่างสมบูรณ์ภายในความลึกที่กำหนดนั่นเอง และจะเรียกความลึกที่กำหนดนี้ว่า ความลึกของการอ่อนกำลังลง (Depth of attenuation) (Sandu, 1986) หรือ ความลึกของการทะลุทะลวง (Depth of penetration) (Ginzburg, 1969) ซึ่งความลึกดังกล่าวนี้จะมีลักษณะเป็นชั้นตื้นๆ (Superficial layer) อยู่ใต้ผิวด้านที่ถูกแผ่ด้วยรังสีอินฟราเรด และพิจารณาให้เป็นบริเวณที่มีการกำเนิดความร้อนเกือบจะสม่ำเสมอ (An almost uniform heat-generation) ทั้งหมด



รูปที่ 2.8 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดของแผ่นของแข็งขึ้น (Sandu, 1986)

พื้นที่ผิวที่ 1 (Surface 1) : ผิวของแผ่นของแข็งที่ถูกแผ่ด้วยรังสีอินฟราเรด

พื้นที่ผิวที่ 2 (Surface 2) : ผิวของแผ่นของแข็งที่ถูกหุ้มด้วยฉนวนอย่างดี

จากการจำลองการอบแห้งครั้งนี้ การแผ่รังสีอินฟราเรดมาตกกระทบบนแผ่นของแข็งจะเป็นแบบโพลีโครเมติก (polychromatic) หรือการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมาเป็นช่วงของความยาวคลื่น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า รังสีอินฟราเรดจะแผ่รังสีออกมามากกว่า 1 ความยาวคลื่นนั่นเอง ซึ่งการแผ่รังสีแบบดังกล่าวนี้ก็คือ การแผ่รังสีอินฟราเรดของหลอดรังสีอินฟราเรดที่ผลิตในทางอุตสาหกรรม ส่วนแผ่นของแข็งก็จะมีสเปกตรัมของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์จำพวกอาหารต่างๆ จากรูปที่ 2.8 ที่พื้นที่ผิวที่ 1 แผ่นของแข็งจะสูญเสียพลังงานให้กับอากาศแวดล้อมโดยการพาความร้อน ส่วนพื้นที่ผิวที่ 2 การถ่ายโอนพลังงานจะเข้าสู่ภายในของแผ่นของแข็งโดยการนำความร้อน สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนของแผ่นของแข็งครั้งนี้จะพิจารณาเป็นแบบ 1 มิติ และเป็นกระบวนการแบบไม่คงตัว (Transient process)

สำหรับความลึกของการทะลุทะลวง (Depth of penetration) ของรังสีอินฟราเรดก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการเลือกผลิตภัณฑ์จำพวกอาหารต่างๆ มาทำการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เนื่องจากผลิตภัณฑ์จำพวกอาหารต่างๆ จะมีความลึกของการทะลุทะลวงของ

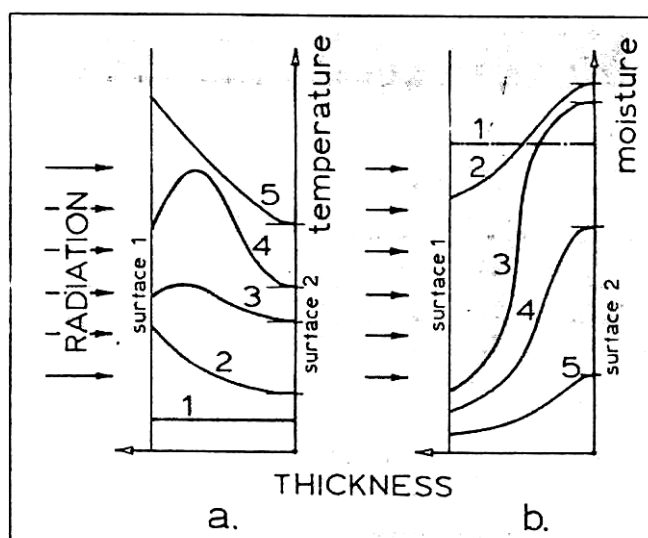
รังสีอินฟราเรดต่างกัน ซึ่งความลึกของการทะลุทะลวงนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ (เช่น ลักษณะของผิว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และปริมาณน้ำ เป็นต้น) และความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด (Hebbbar & Rastogi, 2001) ยกตัวอย่างเช่น เมล็ดพืช รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวจะทะลุทะลวงลงไปภายในเมล็ดเพียงแค่ 1 mm เท่านั้น (Nindo et al., 1995) นอกจากนี้ ความลึกของการทะลุทะลวงของรังสีอินฟราเรดนี้ยังมีความสำคัญอย่างมากต่อการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เนื่องจากจะต้องนำเอาความลึกดังกล่าวนี้ใส่ลงไปในการหลักของการถ่ายโอนความร้อน เพื่อทำนายกลไกของการถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ให้มีความแม่นยำมากขึ้น (Meeso et al, 2006(b)) สำหรับความลึกของการทะลุทะลวงของรังสีอินฟราเรดต่อผลิตภัณฑ์จำพวกอาหารบางประเภทจะแสดงดังในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความลึกของการทะลุทะลวงของรังสีอินฟราเรดต่อผลิตภัณฑ์จำพวกอาหารบางประเภท (Ginzburg, 1969)

Products	Spectral peak (μm)	Depth of penetration (mm)
dough, wheat	1.0	4-6
bread, wheat	1.0	11-12
bread biscuit, dried	0.88	4
	1.0	12
grain, wheat	1.0	2
carrots	1.0	1.5
tomato paste, 70-80% water	1.0	1
raw potatoes	1.0	6
dry potatoes	0.88	15-18
raw apples	1.16	4.1
	1.65	5.9
	2.36	7.4

ในสภาวะเริ่มต้นของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ดังแสดงในรูปที่ 2.9 แผ่นของแข็งชิ้นจะมีอุณหภูมิและ ปริมาณความชื้นสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น ดังแสดงในเส้นโปรไฟล์ที่ 1 ต่อมาเมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของการเกิดความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีอินฟราเรด การระเหยน้ำจะเริ่มเกิดขึ้นภายในความลึกของการอ่อนกำลังลง และไม่มีข้อจำกัดของการถ่ายโอนมวล (Mass transfer limitation) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้จะเรียกว่าช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่ ต่อมาส่วนหน้าของการระเหย (Evaporation front) จะเกิดขึ้นภายในแผ่นของแข็งอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้การถ่ายโอนมวลจากภายในของแผ่นของแข็งกลายมาเป็นข้อจำกัดของการถ่ายโอนมวล ซึ่ง

กระบวนการดังกล่าวนี้ จะเรียกว่า อัตราการอบแห้งลดลง ดังแสดงในเส้นโปรไฟล์ความชื้นที่ 2-5 จากข้อจำกัดของการถ่ายโอนมวลเบื้องต้นนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของแรงขับ (Driving force) เนื่องการแพร่โมเลกุล (Molecular diffusion) การแพร่ความร้อน (Thermal diffusion) และการแพร่แบบแคปิลลารี (Capillary diffusion) ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน จึงส่งผลทำให้เกิดการขนถ่ายน้ำในสถานะของเหลวและไอ และอากาศเข้าสู่หรือออกจากส่วนหน้าของการระเหย สำหรับความแตกต่างของแรงขับที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อจำกัดของการถ่ายโอนมวลขึ้นภายในของแผ่นของแข็งมากที่สุดคือ การแพร่ความร้อนของน้ำในสถานะของเหลว (Thermal diffusion of liquid water) (Lykow, 1955) ซึ่งจะส่งผลทำให้ความชื้นจากภายในแผ่นของแข็งบางส่วนถ่ายโอนออกไปยังผิวด้านที่ถูกแผ่ด้วยรังสีอินฟราเรด แต่บางส่วนจะถ่ายโอนเข้าไปสู่ผิวด้านที่ถูกหุ้มด้วยฉนวน ทำให้ปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณความชื้นเริ่มต้น ดังแสดงในเส้นโปรไฟล์ความชื้นที่ 2 และ 3 แต่ลักษณะดังกล่าวนี้จะเกิดในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งเท่านั้น สำหรับทฤษฎีของการถ่ายโอนความร้อนและมวลในการอบแห้งวัสดุต่างๆ นี้ สามารถอ้างอิงได้จากงานของ Lykow, (1955) และ Luikov (1966)



รูปที่ 2.9 โปรไฟล์อุณหภูมิ (a) และโปรไฟล์ความชื้น (b) ระหว่างการอบแห้งแผ่นของแข็งขึ้นด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดของในรูปที่ 2.8 (1 : เงื่อนไขเริ่มต้น, 2-5 : สภาวะไม่คงตัว) (Sandu, 1986)

จากโปรไฟล์อุณหภูมิและความชื้นในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นระหว่างการอบแห้งแผ่นของแข็งขึ้นด้วยรังสีอินฟราเรดในรูปที่ 2.8 นี้ สามารถยืนยันได้ว่าเป็นโปรไฟล์ที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากคล้ายกับผลการทดลองของนักวิจัยหลายๆ ท่าน

(Ginzburg, 1969; Il'yasov & Krasnikov, 1991 ; Lykow, 1955) และเงื่อนไขเริ่มต้นและขอบเขตของการอบแห้งแผ่นของแข็งขึ้นด้วยรังสีอินฟราเรดในรูปที่ 2.8 นี้ ก็ยังมีการใช้มาถึงปัจจุบันด้วย

สำหรับในทางปฏิบัติเพื่อให้ประสบความสำเร็จในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดนั้น วัสดุที่อยู่ในทิศทางของการแผ่รังสีมาตกกระทบจะต้องไม่มีความหนามากกว่าความลึกประสิทธิผล (effective depth) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งความลึกดังกล่าวนี้ก็คือ ระดับของความลึกที่ลึกที่สุดภายในวัสดุที่น้ำมีการถ่ายโอนออกไปยังผิวของวัสดุได้ดีที่สุด แต่ถ้าวัสดุมีความหนามากกว่าความลึกประสิทธิผลจะต้องใช้วิธีการอย่างอื่นเข้ามาช่วย เช่น การแผ่รังสีอินฟราเรดให้กับวัสดุมากกว่า 1 ทิศทาง การแผ่รังสีฟราเรดรวมกับการพาความร้อน (Ginzburg, 1969) และการแผ่รังสีอินฟราเรดเป็นช่วงๆ (Intermittent irradiation) (Lykow, 1955)

2.10.1.2 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด

มีนักวิจัยหลายท่าน (Ginzburg, 1969; Sandu, 1986; Sakai & Hanazawa, 1994; Ratti & Mujumdar, 1995; Meeso et al., 2006) ได้กล่าวถึงข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่างๆ ไว้ ซึ่งในความเป็นจริงลักษณะเด่นที่สุดของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดนั้นก็คือ การลดเวลาของอบแห้ง นอกจากนี้ยังสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียบางส่วนจากงานวิจัยต่างๆ ได้ดังนี้

ข้อดี

1. มีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนสำหรับอุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรดทางไฟฟ้า
2. มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายโอนความร้อนไปสู่ผลิตภัณฑ์จึงส่งผลทำให้ลดระยะเวลาการอบแห้งและค่าใช้จ่ายในด้านพลังงาน
3. รังสีอินฟราเรดสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในผลิตภัณฑ์ได้โดยตรงโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งความร้อนประเภทอื่นจากสิ่งแวดล้อม
4. พื้นที่ผิวไม่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์จะมีอิทธิพลน้อยมากต่อการเกิดความร้อนจากการแผ่รังสีอินฟราเรด จึงส่งผลให้ความร้อนภายในผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความร้อนจากการพาความร้อนทั่วไป
5. โปรไฟล์ความชื้นในผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจะอยู่ในระดับเดียวกัน และผลิตภัณฑ์มีความเสียหายต่ำ
6. แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิด Dielectric และไมโครเวฟ เนื่องจากมีอายุการใช้งานยาวนาน และค่าบำรุงรักษาต่ำกว่า
7. การติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรดใช้พื้นที่น้อย สามารถติดตั้งร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบทั่วไปได้ง่าย และควบคุมการทำงานง่าย

8. สภาพแวดล้อมการทำงานภายนอกของเครื่องอบแห้งแบบการแผ่รังสีอินฟราเรดจะมีอุณหภูมิอยู่ในระดับปกติ และสะอาดมากกว่าเครื่องอบแห้งแบบทั่วไป

ข้อเสีย

1. ประสิทธิภาพของการอบแห้งจะต่ำลงเมื่อผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นมากกว่าความลึกประสิทธิภาพ และจะส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งเป็นระยะเวลานานๆ เช่น การเกิดรอยไหม้ที่ผิวของผลิตภัณฑ์

2. การกำหนดความยาวคลื่นแบบคลื่นเดี่ยว (Monochromatic) ของรังสีอินฟราเรดให้ตรงกับสเปกตรัมของการดูดกลืนของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างทำได้ยาก เพราะแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดที่ผลิตในทางอุตสาหกรรมจะผลิตออกมาเป็นช่วงของความยาวคลื่นแบบโพลีโครเมติก (Polychromatic)

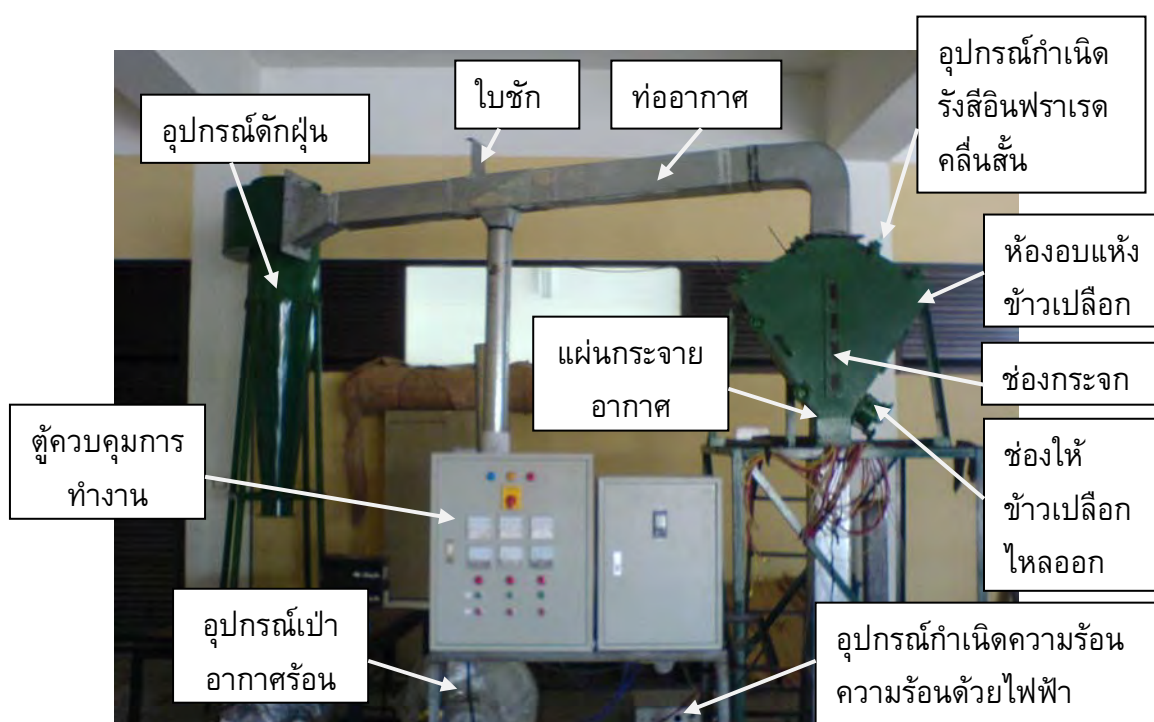
3. แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดบางประเภท เช่น รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวที่ทำจากเซรามิกไม่สามารถใช้ร่วมกับวิธีการอบแห้งที่มีความเร็วของกระแสอากาศสูงๆ ได้ เนื่องจากจะเกิดการระบายความร้อนที่บริเวณผิวของแหล่งกำเนิด และส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการแผ่รังสีลดลง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ร่วมกับการพาอากาศร้อนขนาดห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) จะแสดงดังในรูปที่ 3.1 ซึ่งพัฒนาขึ้นที่หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร (Research Unit of Drying Technology for Agricultural Products, ReDTec) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนขนาดห้องปฏิบัติการ

3.1.1.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนขนาดห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ห้องอบแห้งข้าวเปลือก ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนดังนี้ ส่วนที่หนึ่งคือ ส่วนด้านล่างของห้องอบแห้งข้าวเปลือก จะมีลักษณะเป็นท่อสี่เหลี่ยมขยายรูป โดยที่ปลายด้านล่างของท่อดังกล่าวจะเชื่อมต่อกับแผ่นกระจายอากาศ ส่วนบริเวณผนังด้านหลังของท่อดังกล่าวจะมีถึงปล่อยข้าวเปลือก และที่บริเวณส่วนปลายของผนังด้านข้างด้านหนึ่งของท่อดังกล่าวจะมีช่องให้ข้าวเปลือกไหลออกจากห้อง

อบแห้งข้าวเปลือก และส่วนที่สอง คือ ส่วนบนของห้องอบแห้งข้าวเปลือกจะมีลักษณะเป็นท่อสี่เหลี่ยมลดรูป โดยที่บริเวณผนังด้านข้างด้านในทั้งสองด้านของท่อดังกล่าวจะมีอุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นติดตั้งไว้กับฐานติดตั้งหลอด ส่วนด้านหน้าของห้องอบแห้งข้าวเปลือกมีช่องกระจก ส่วนประกอบอื่นๆ ของเครื่องอบแห้งดังกล่าว ประกอบด้วย อุปกรณ์กำเนิดความร้อน ความร้อนด้วยไฟฟ้า อุปกรณ์เป่าอากาศร้อน อุปกรณ์ดักฝุ่น ท่ออากาศ และใบชัก

3.1.1.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไธด์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนขนาดห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มต้นจากการปล่อยข้าวเปลือกจากถังปล่อยข้าวเปลือกให้ไหลลงบนแผ่นกระจายอากาศภายในห้องอบแห้งข้าวเปลือกอย่างรวดเร็วจนกระทั่งกองข้าวเปลือก หรือเรียกว่า เบดเมล็ดข้าวเปลือก (Paddy grain bed) บนแผ่นกระจายอากาศ มีความสูงของเบดเมล็ดข้าวเปลือกตามที่ต้องการ ในขณะเดียวกันนั้น อุปกรณ์เป่าอากาศร้อนจะดูดอากาศและเป่าอากาศไปยังอุปกรณ์กำเนิดความร้อนความร้อนด้วยไฟฟ้าเพื่อทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงระดับอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการอบแห้งตามที่กำหนดไว้ ซึ่งอากาศดังกล่าวจะมีสมบัติเป็นอากาศร้อนแห้ง และเรียกว่า อากาศร้อนที่ใช้ออบแห้ง ต่อมาเมื่ออากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งถูกส่งผ่านท่ออากาศไปสู่แผ่นกระจายอากาศที่บริเวณด้านล่างของห้องอบแห้งข้าวเปลือกแล้ว กลไกของการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไธด์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนจะเกิดขึ้นทันที โดยเริ่มจากอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งที่มีความเร็วในช่วงของการเกิดฟลูอิดไธเซชันจะไหลผ่านแผ่นกระจายอากาศขึ้นไปยังเบดข้าวเปลือก ส่งผลทำให้ข้าวเปลือกเกิดการลอยตัวอย่างเป็นอิสระในกระแสของอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้ง ซึ่งในระหว่างที่ข้าวเปลือกลอยตัวขึ้นนั้น อุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่อยู่บริเวณผนังด้านข้างด้านในทั้งสองด้านของส่วนด้านบนของห้องอบแห้งข้าวเปลือกจะแผ่รังสีออกมา ซึ่งพลังงานของรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่แผ่ออกมาบางส่วนจะตกกระทบลงบนผิวของเมล็ดข้าวเปลือกและบางส่วนจะทะลุทะลวงเข้าไปภายในเมล็ดข้าวเปลือก ทำให้โมเลกุลของส่วนประกอบหลักของเมล็ดข้าวเปลือกดูดกลืนพลังงานของรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นไว้ และเกิดการเปลี่ยนแปลงในสภาวะการสั่นสะเทือนของโมเลกุลกลายเป็นพลังงานความร้อนขึ้นภายในเมล็ดข้าวเปลือก ส่งผลทำให้ความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดการแพร่จากภายในเมล็ดข้าวเปลือกออกไปยังผิวของเมล็ดข้าวเปลือกและถูกพาออกไปจากผิวของเมล็ดข้าวเปลือกโดยการพาของอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้ง หลังจากนั้นกลไกของการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไธด์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนจะดำเนินต่อไปตามเวลาของการอบแห้งที่กำหนดไว้จนกระทั่งข้าวเปลือกที่อบแห้งมีความชื้นสุดท้ายอยู่ในระดับที่มีความปลอดภัยต่อการเก็บรักษา ข้าวเปลือกจะถูกนำออกจากห้องอบแห้งข้าวเปลือกให้ไหลออกทางช่องให้ข้าวเปลือกไหลออก ส่วนอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งหลังจากการพาความชื้นจากผิวของเมล็ดข้าวเปลือกออกมาจะมีคุณสมบัติเป็นอากาศร้อนชื้น และถูกเรียกว่า อากาศร้อนชื้น ซึ่งอากาศดังกล่าวจะไหลออกจากบริเวณด้านบนของห้องอบแห้งข้าวเปลือกไปยังท่ออากาศ และเครื่องดักฝุ่น ตามลำดับ

3.1.2 ตู้อบหาความชื้น (Hot-air oven) นำตัวอย่างแต่ละเงื่อนไขมาอบที่อุณหภูมิ 103 °C ใช้เวลาในการอบแห้ง 72 ชั่วโมง

3.1.3 เครื่องวัดความเร็วอากาศร้อน (Hotwire anemometer) ความละเอียด ± 0.01 m/s

3.1.4 เครื่อง DATA LOGGER ใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ต่อกับเครื่องอ่าน และบันทึกอุณหภูมิ ความละเอียด ± 0.01 °C

3.1.5 เครื่องชั่งวัดละเอียด ความละเอียด ± 0.01 g และชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 2100 g

3.1.6 เครื่องวัดกำลัง แรงดัน และกระแสไฟฟ้า

3.1.7 เครื่องวัดสี Minolta CR-300

3.1.8 เครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA)

3.1.9 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM; JEOL JSM-6460LIU)

3.1.10 เครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหาร (Texture Analyzer; รุ่น TA.XT.plus)

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

ข้าวเปลือกที่ใช้ทดลองเป็นข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งได้นำข้าวเปลือกมาทำการทดลองดังนี้

3.2.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนต่อคุณภาพทางกายภาพของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งข้าวเปลือกหลังผ่านการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนจะมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 16 %d.b.

3.2.2 การทดลองที่ 2 ก่อนทำการวิเคราะห์ผู้วิจัยได้ทำการกะเทาะข้าวเปลือกและขัดสีข้าวเปลือกข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ให้เป็นข้าวสาร และได้นำข้าวสารไปวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาคุณภาพการหุงต้ม (Cooking quality) ประกอบด้วย เวลาในการหุงต้ม อัตราการอุ้มน้ำ ของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสาร อัตราการยืดออกของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสาร และของแข็งที่สูญเสียระหว่างการหุงต้ม (Bello et al. 2004)

2. ศึกษาคุณภาพการบริโภค (Eating quality) วิเคราะห์ความแข็งและความเหนียวของเมล็ดข้าวสุก โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหาร (Texture Analyzer; รุ่น TA.XT.plus) (Amornsir and Siriamornpun, 2004)

3.2.3 การทดลองที่ 3 ก่อนทำการวิเคราะห์ผู้วิจัยได้ทำการกะเทาะข้าวเปลือกและขัดสีข้าวเปลือกข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ให้เป็นข้าวสาร และได้นำข้าวสารไปวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติทางด้านความหนืด ประกอบด้วย อุณหภูมิเริ่มต้นของความหนืด (Pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (Peak time) ความหนืดลดลง (Breakdown) ความคงทนต่อการกวน (Holding strength), ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง หรือการคืนตัว (Set back) และความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) วิเคราะห์โดย

ใช้เครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) [Newport Scientific Ltd., Warriewood, NSW, Australia Model 3D] (AACC, 2000)

3.2.4 การทดลองที่ 4 ก่อนทำการวิเคราะห์ผู้วิจัยได้ทำการกะเทาะข้าวเปลือกและขัดสีข้าวเปลือกข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ให้เป็นข้าวสาร และได้นำข้าวสารไปวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดแป้ง ใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope ในการวิเคราะห์ กำลังการขยาย 1,000 เท่า และ 4,000 เท่า บริเวณด้านขอบและตรงกลางของเมล็ดข้าวเปลือก

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิจัยครั้งนี้ แบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นดังนี้

3.3.1 นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย เปอร์เซนต์ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.3.2 สรุปผลการรายงานวิเคราะห์และรายงานในรูปตารางและกราฟ

3.4 สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

3.4.1 สถิติพื้นฐาน ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ร้อยละ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

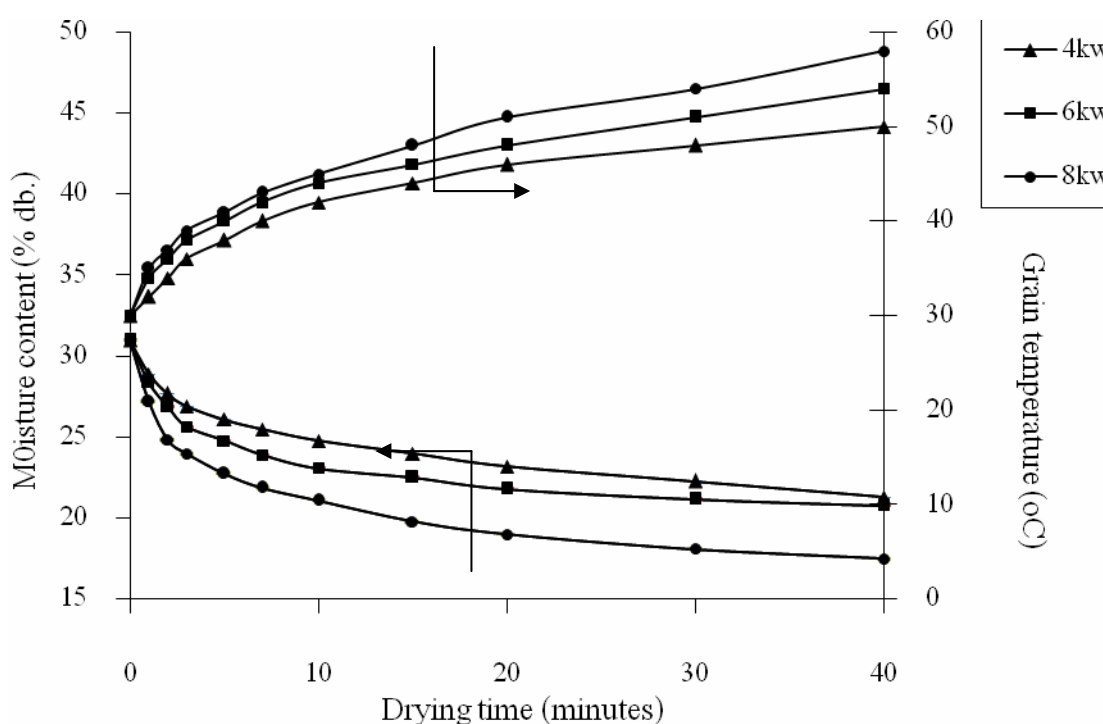
3.4.2 สถิติที่ใช้ในการทดลองที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 คือ เปรียบเทียบความแตกต่างแบบรายคู่โดยใช้วิธี Duncan test

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลของกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

ผลของกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 6 8 และ 10 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40°C ความเร็วของอากาศร้อน 1.24 m/s และความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่แตกต่างกันร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C ความเร็วของอากาศร้อน 1.24 m/s และความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าที่กำลังการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่ระดับ 4 kW จะลดความชื้นได้น้อยที่สุด และที่กำลังการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่ระดับ 8 kW จะลดความชื้นได้มากที่สุด

เพราะว่าที่ระดับกำลังการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่ 8 kW เมล็ดข้าวจะสามารถรับการแผ่รังสีได้มากกว่าที่ระดับกำลังการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่ 4 kW เมื่อได้รับการแผ่รังสีอินฟราเรดมากก็จะทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ความชื้นของเมล็ดข้าวลดลงเช่นกัน เนื่องจากการกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่ส่งออกมานั้นจะเป็นการเร่งให้ความชื้นภายในเมล็ดข้าวแพร่ออกมายังผิวของเมล็ดข้าวได้เร็วทำให้ความชื้นลดลงได้ง่าย ส่วนที่ระดับกำลังการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่ 10 kW ข้าวเปลือกได้เริ่มเกิดการพองตัว (Puffing) ตั้งแต่เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ 1 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.4



50 นาที

รูปที่ 4.2 ข้าวเปลือกเริ่มเกิดการพองตัวที่ 8 kW



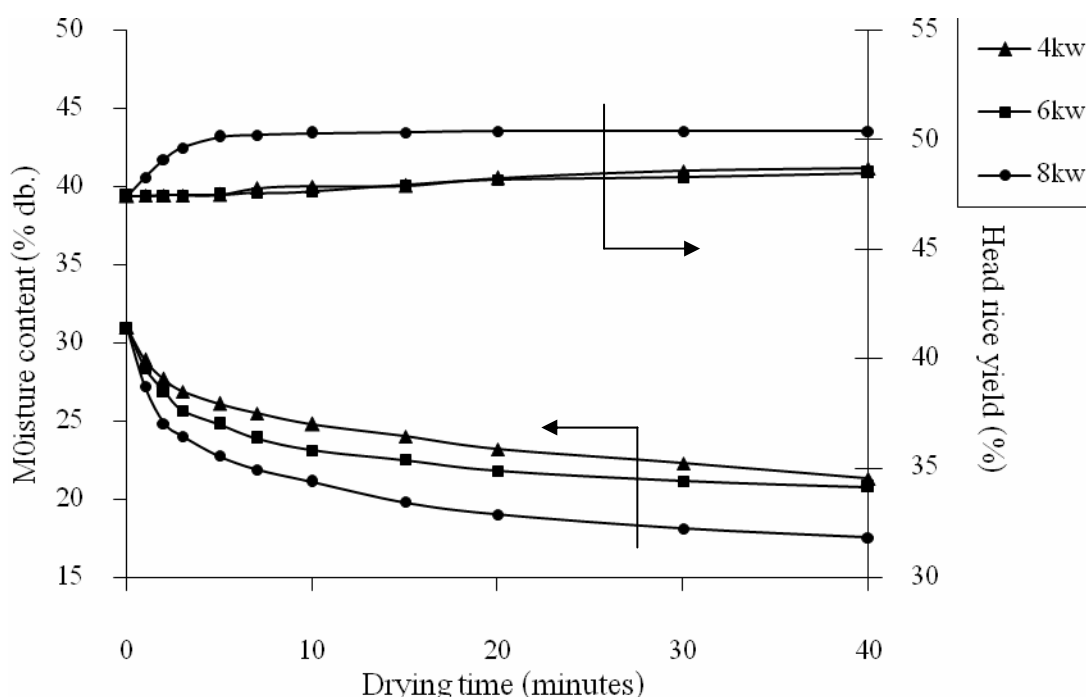
1 นาที

รูปที่ 4.3 ข้าวเปลือกเริ่มเกิดการพองตัวที่ 10 kW



2 นาที

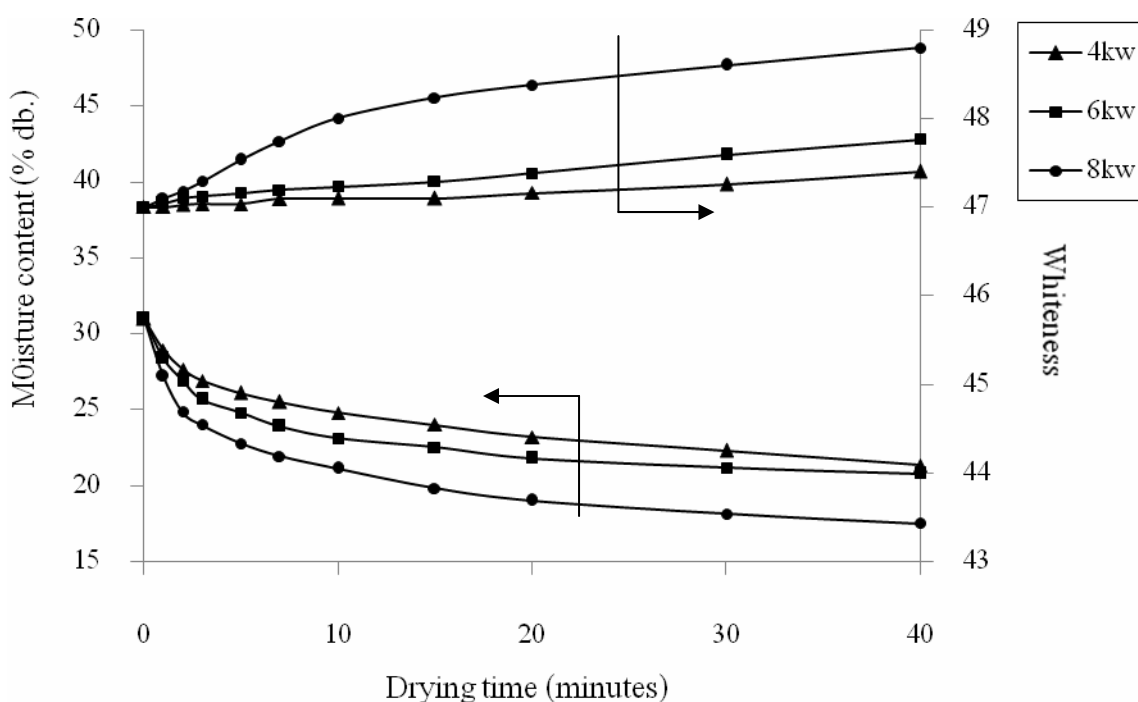
รูปที่ 4.4 ข้าวเปลือกเริ่มเกิดการพองตัวที่ 10 kW



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและเปอร์เซ็นต์ตันข้าวของข้าวเปลือกภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่แตกต่างกันร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C ความเร็วของอากาศร้อน 1.24 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่า ที่ระดับกำลังการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่ 8 kW มีค่าเปอร์เซ็นต์ตันข้าวดีที่สุด ซึ่งมีค่าสูงสุดที่เวลาของการอบแห้ง 10 นาที คือ 52.04 เปอร์เซ็นต์ แล้วจะเริ่มคงที่จนถึงเวลาของการอบแห้ง 40 นาที และที่ระดับกำลังการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่ 6 kW มีค่าเปอร์เซ็นต์ตันข้าวใกล้เคียงกับที่ระดับกำลังการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่ 4 kW เปอร์เซ็นต์ตันข้าวที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนสูงกว่าเปอร์เซ็นต์ตันข้าวของข้าวอ้างอิง คือ 47.44 % เนื่องจากรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นจะเข้าไปทำให้โมเลกุลของเมล็ดข้าวเกิดการสั่นแล้วไล่ความชื้นเนื่องจากความร้อนออกมาจากภายในเมล็ดสู่ผิวรอบนอกเมล็ดข้าว ส่วนอากาศร้อนจะทำหน้าที่ลดความเครียดที่ผิวของเมล็ดข้าว ซึ่งทำให้อุณหภูมิภายในเมล็ดกับอุณหภูมิภายนอกเมล็ดใกล้เคียงกัน เมื่อผลต่างของอุณหภูมิภายในกับภายนอกเมล็ดมีน้อยจึงเป็นผลทำให้ค่าความเครียดของเมล็ดข้าวน้อยมาก ทำให้ไม่มีการแตกร้าวของเมล็ดข้าวเกิดขึ้น จึงส่งผลทำให้สามารถรักษาเปอร์เซ็นต์ตันข้าวไว้ได้

จากรูปที่ 4.6 จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดสั้นที่แตกต่างกันจะมีผลต่อค่าความขาวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและความขาวของข้าวภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่แตกต่างกันร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C ความเร็วของอากาศร้อน 1.24 m/s และความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm

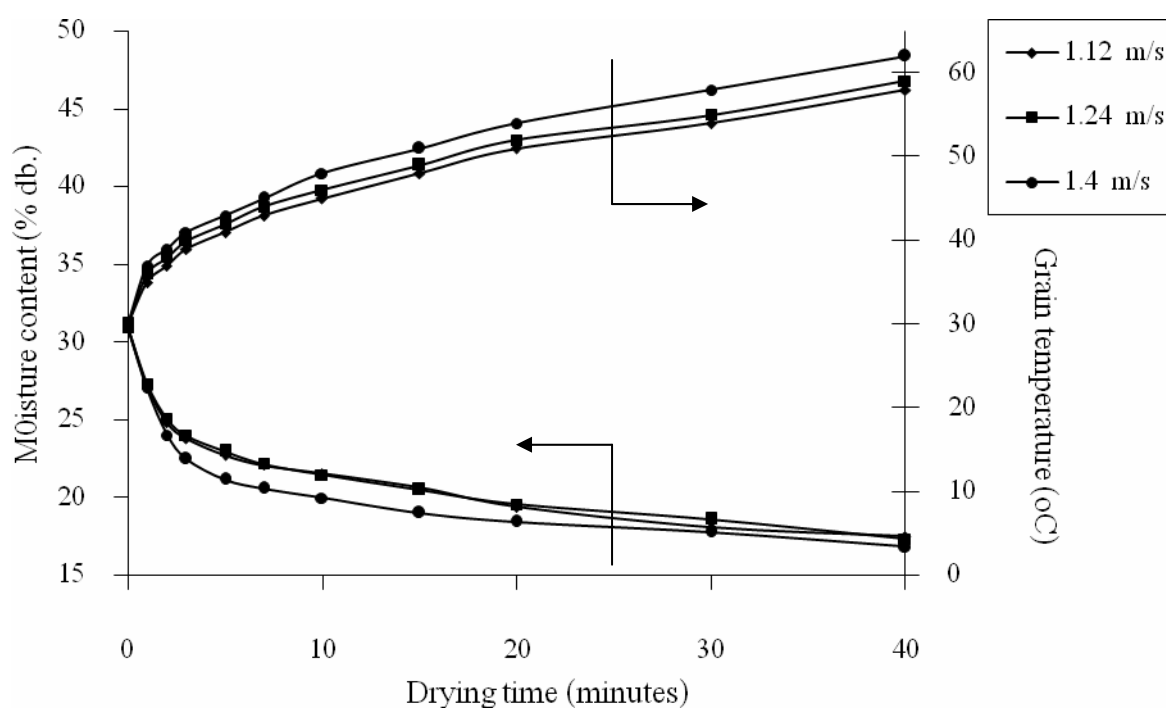
สำหรับผลของกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นที่แตกต่างกันร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C ความเร็วของอากาศร้อน 1.24 m/s และความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเปลือก เปอร์เซ็นต์ตันข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ดังอธิบายผ่านมาเบื้องต้นนี้สรุปได้ว่า ที่กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่ระดับ 8 kW สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้เร็วที่สุด และมีค่าเปอร์เซ็นต์ตันข้าวสูงที่สุด ส่วนค่าความขาวใกล้เคียงกันกับความขาวเริ่มต้น

4.2 ผลของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ตันข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

ผลของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ตันข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งความเร็วของอากาศ

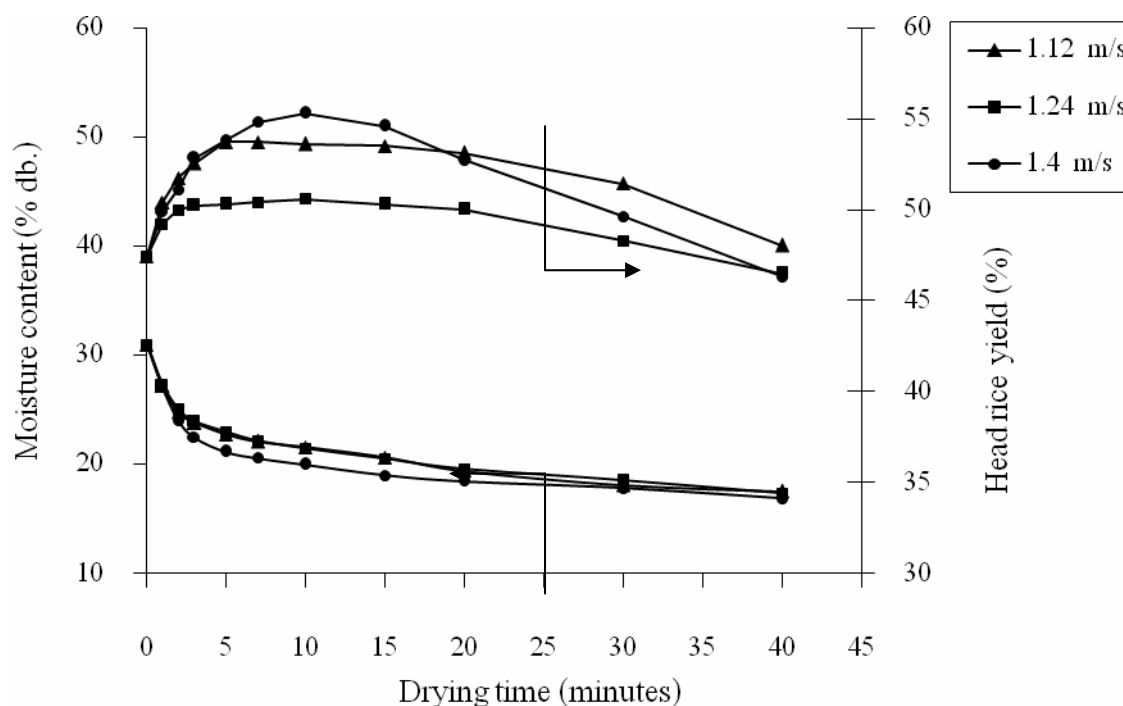
ร้อนที่ใช้อบแห้ง 1.12, 1.24 และ 1.40 m/s ร่วมกับกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C ความเร็วของอากาศร้อน 1.24 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7-4.9

จากรูปที่ 4.7 จะพบว่า ที่ระดับความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้ง 1.4 m/s จะสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้เร็วที่สุด เนื่องจากที่ระดับความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งสูงจะสามารถพาเมล็ดข้าวเปลือกลอยขึ้นมาสัมผัสรังสีได้เร็วกว่าที่ระดับความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งต่ำ ส่วนความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งที่ระดับ 1.12 และ 1.24 m/s ลดความชื้นของข้าวเปลือกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไต์ซ์ เบตที่ความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งที่แตกต่างกันร่วมกับกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C ความเร็วของอากาศร้อน 1.24 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

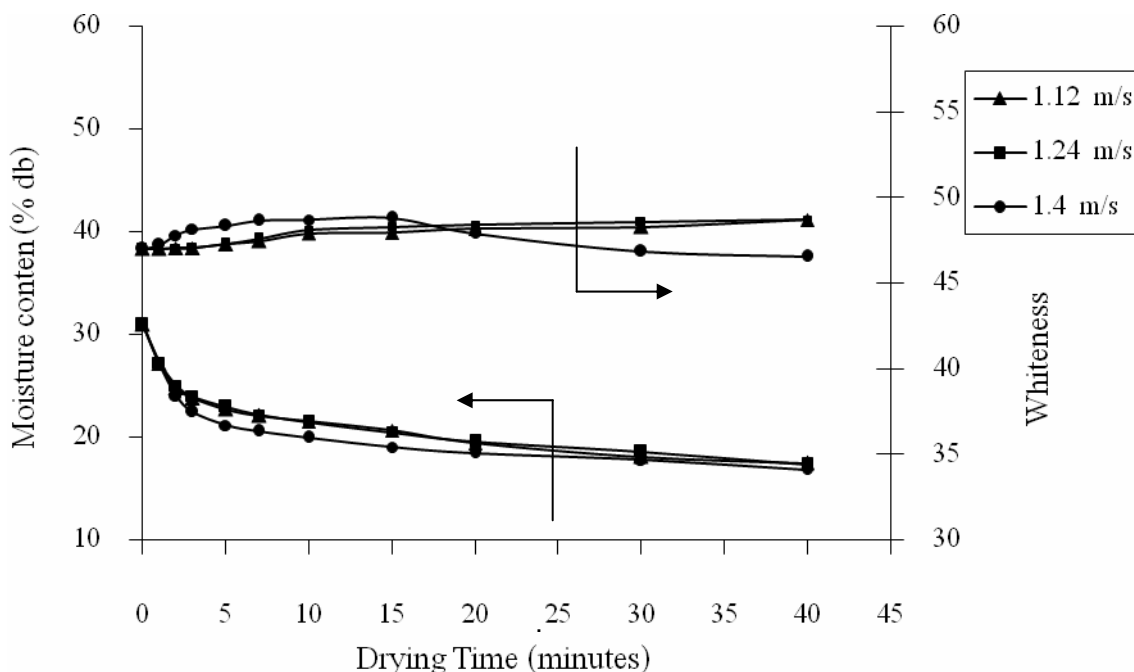
จากรูปที่ 4.8 จะพบว่า ที่ระดับความเร็วอากาศร้อนที่ 1.12 m/s จะรักษาเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวได้ดีที่สุด ส่วนความเร็วอากาศร้อนที่ 1.40 m/s เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวจะเพิ่มขึ้นสูงที่สุดที่เวลาของการอบแห้ง 7 นาที แล้วจะลดลงอย่างรวดเร็ว และความเร็วอากาศร้อน 1.24 m/s เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวจะใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเริ่มต้นคือ 47.44 %



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวของข้าวเปลือกภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชันที่ความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อย่างแตกต่างกันร่วมกับกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C ความเร็วของอากาศร้อน 1.24 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

จากรูปที่ 4.9 จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อย่างแตกต่างกันจะมีผลต่อค่าความขาวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สำหรับผลของความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อย่างแตกต่างกันร่วมกับกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C ความเร็วของอากาศร้อน 1.24 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเปลือก เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ดังอธิบายผ่านมาเบื้องต้นนี้สรุปได้ว่า ที่ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้เร็วที่สุด และมีค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงที่สุด ส่วนค่าความขาวใกล้เคียงกันกับความขาวเริ่มต้น

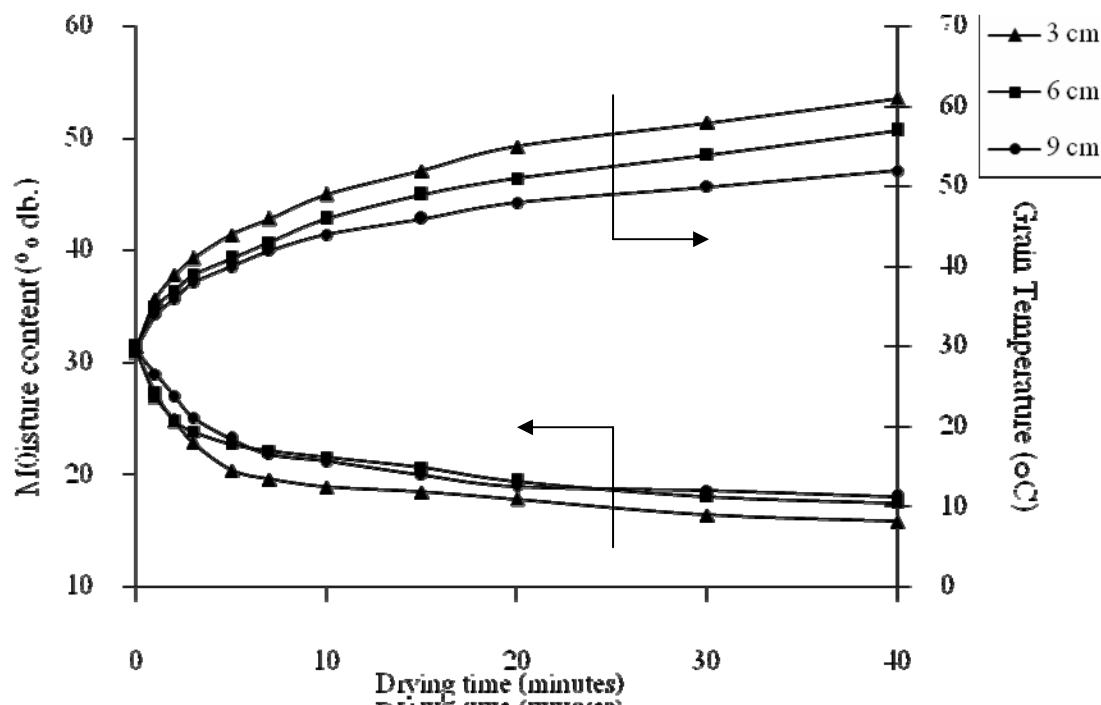


รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและความขาวของข้าวภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชันที่ความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งที่แตกต่างกันร่วมกับกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C ความเร็วของอากาศร้อน 1.24 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

4.3 ผลของความสูงของเบตข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซนต์ตันข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

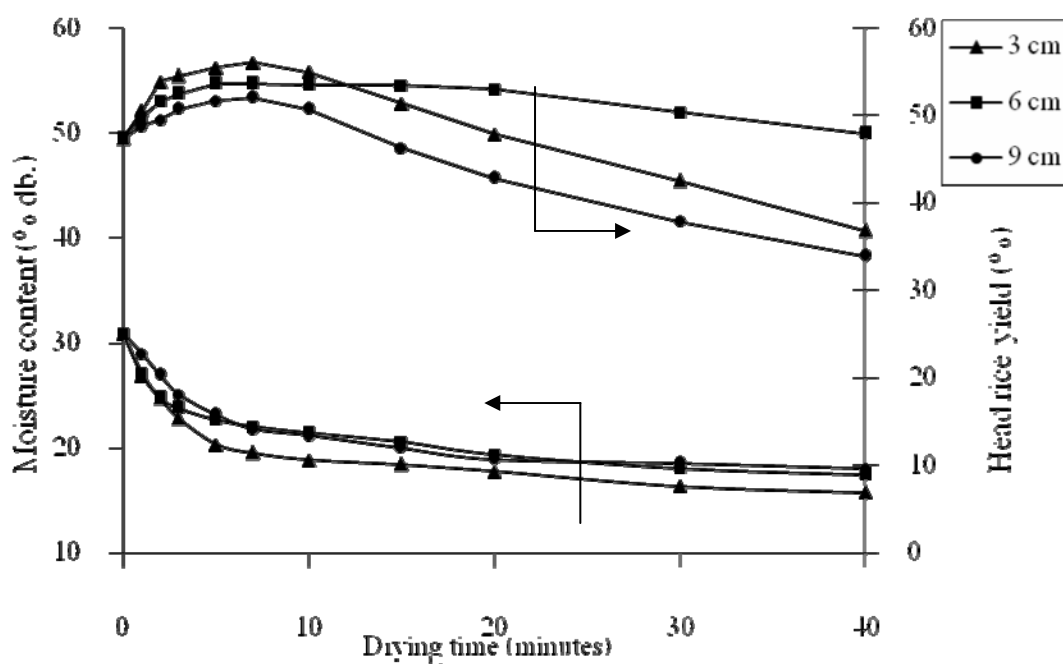
ผลของความสูงของเบตข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซนต์ตันข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งความสูงของเบตข้าวเปลือก 3, 6 และ 9 cm ร่วมกับกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW อุณหภูมิของอากาศร้อน 40°C และความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.12

จากรูปที่ 4.10 จะพบว่า ความสูงของเบตข้าวเปลือกลดต่ำลงจะส่งผลต่อการลดความชื้นของข้าวเปลือกและการเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิของข้าวเปลือก ซึ่งที่ความสูงของเบตข้าวเปลือก 3 cm สามารถความชื้นของข้าวเปลือกได้เร็วที่สุด เนื่องจากที่ความสูงของเบตข้าวเปลือก 3 cm นั้นเป็นความสูงที่พอเหมาะ และมีปริมาณข้าวเปลือกไม่หนาเกินไปจึงทำให้เมล็ดข้าวเปลือกได้รับรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นอย่างทั่วถึง จึงส่งผลทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงได้เร็ว ส่วนที่ความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 และ 9 cm พบว่า มีการลดลงของความชื้นไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์ เบดที่ความสูงของเบดข้าวเปลือกที่แตกต่างกันรวมทั้งกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรด คลื่นสั้น 8 kW อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C และความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s

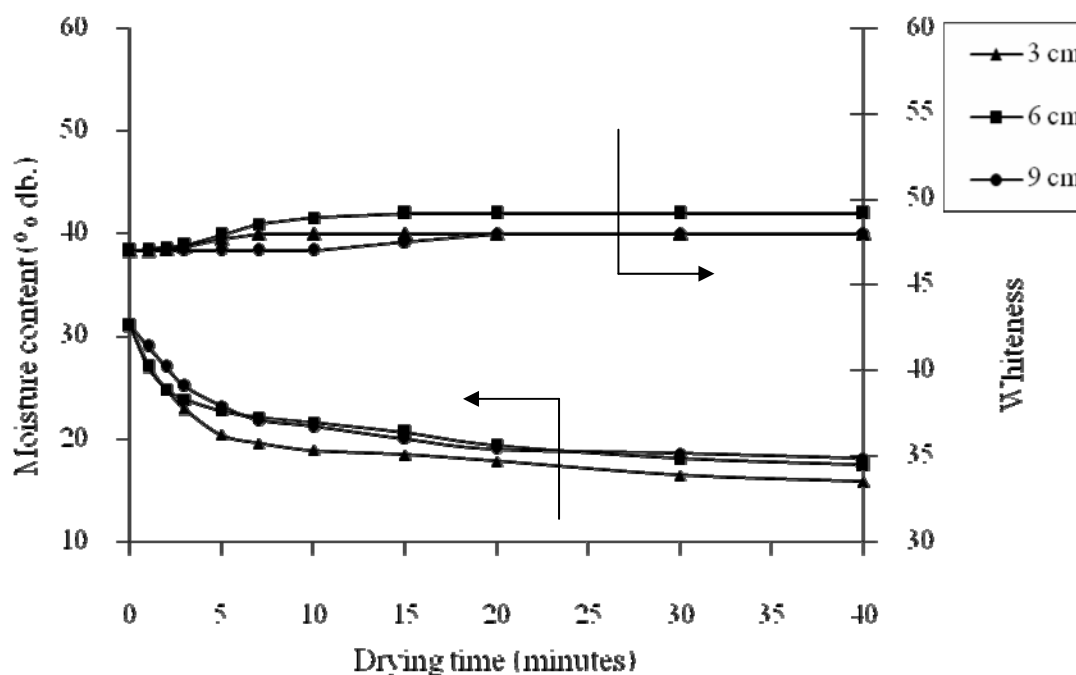
จากรูปที่ 4.11 จะพบว่า ที่ความสูงของเบดข้าวเปลือก 3 และ 9 cm จะส่งผลต่อ เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว แต่เมื่อเวลาของการอบแห้งเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวก็จะมีค่าน้อยลง ส่วนที่ ความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm สามารถรักษาเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวได้ดีกว่า ที่ความสูงของเบด ข้าวเปลือก 3 และ 9 cm ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวของข้าวเปลือกภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่ความสูงของเบดข้าวเปลือกที่แตกต่างกันร่วมกับกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C และความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s

จากรูปที่ 4.12 จะพบว่าความสูงของเบดที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น ในช่วงแรกค่าความขาวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่เมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้นค่าความขาวจะมีค่าคงที่ ดังนั้นความสูงเบดจึงไม่มีผลต่อค่าความขาว

สำหรับผลของความสูงของเบดข้าวเปลือกที่แตกต่างกันร่วมกับกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C และความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเปลือก เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ดังอธิบายผ่านมาเบื้องต้นนี้สรุปได้ว่า ที่ความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้เร็วที่สุด และมีค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงที่สุด ส่วนค่าความขาวใกล้เคียงกันกับค่าความขาวเริ่มต้น



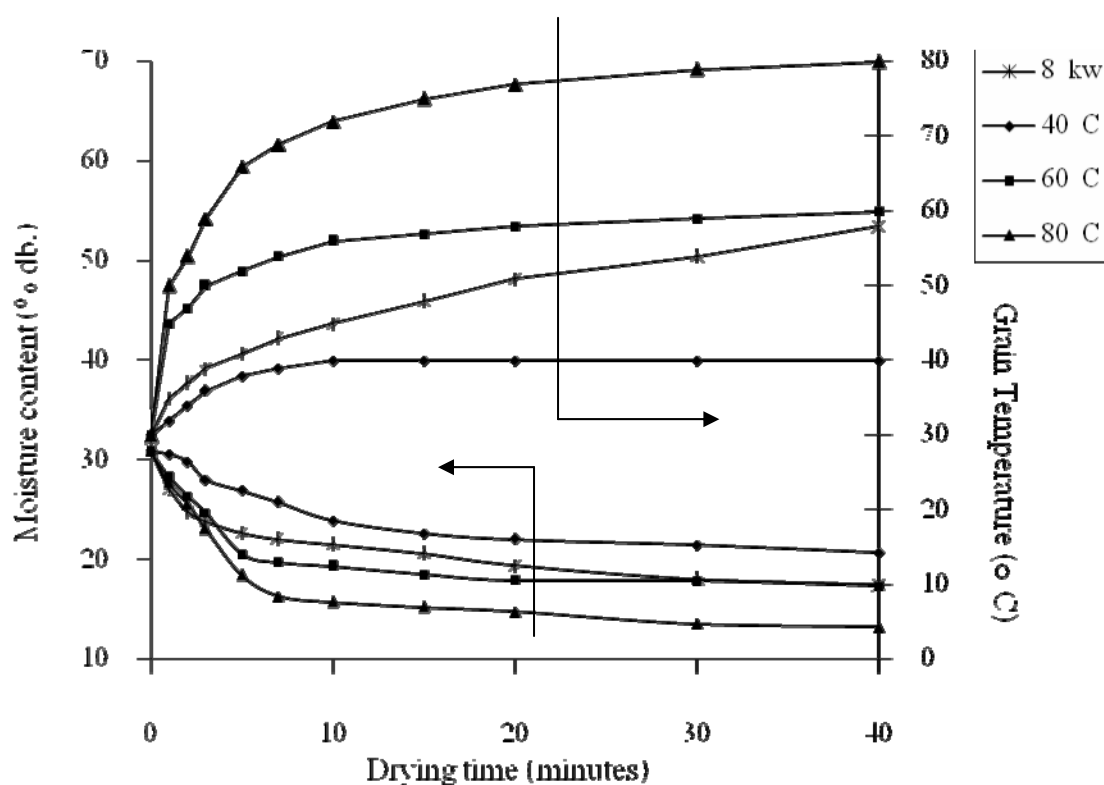
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและความขาวของข้าวภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชันที่ความสูงของเบตข้าวเปลือกที่แตกต่างกันรวมทั้งกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C และความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s

4.4 การเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนและแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเปลือกเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

ผลของการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนที่กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm เปรียบเทียบกับการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 60 และ 80 °C ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความขาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.13-4.15

จากรูปที่ 4.13 จะพบว่า การอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นจะส่งผลต่อการลดความชื้นของข้าวเปลือก และการเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิข้าวเปลือก ส่วนการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้การแผ่รังสี

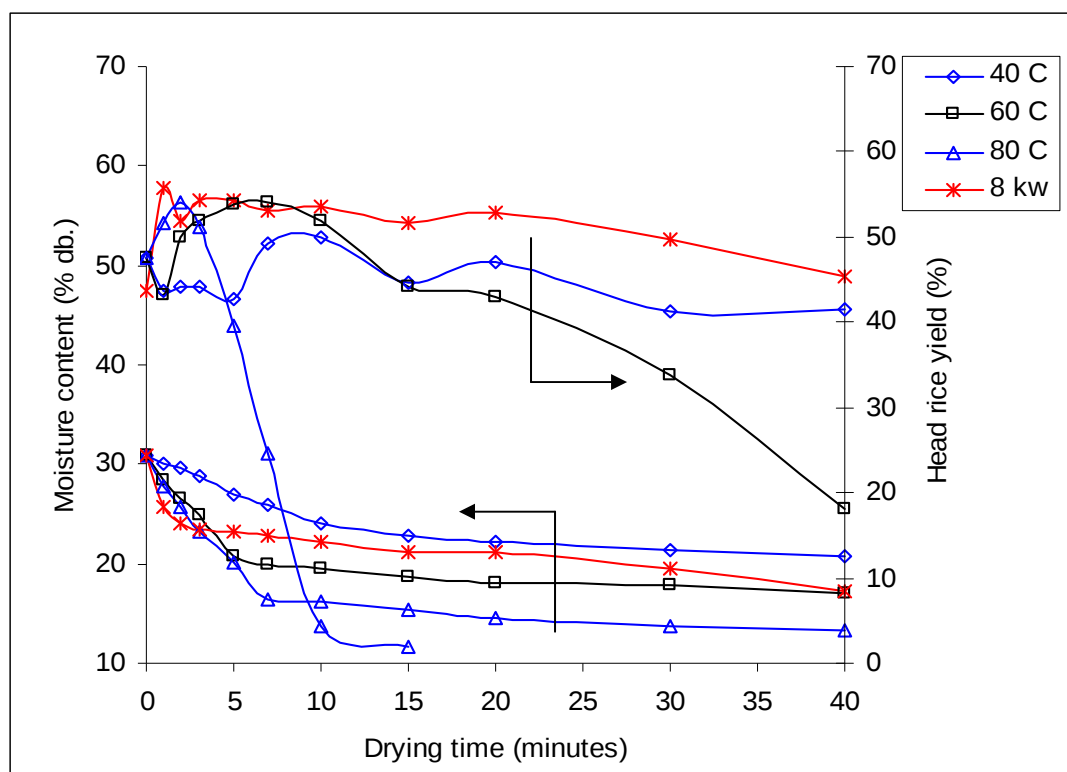
อินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนที่กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40°C จะลดความชื้นของข้าวเปลือกลงได้ใกล้เคียงกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิของอากาศร้อน 60°C



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนที่กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40°C เปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิของอากาศร้อนที่แตกต่างกัน

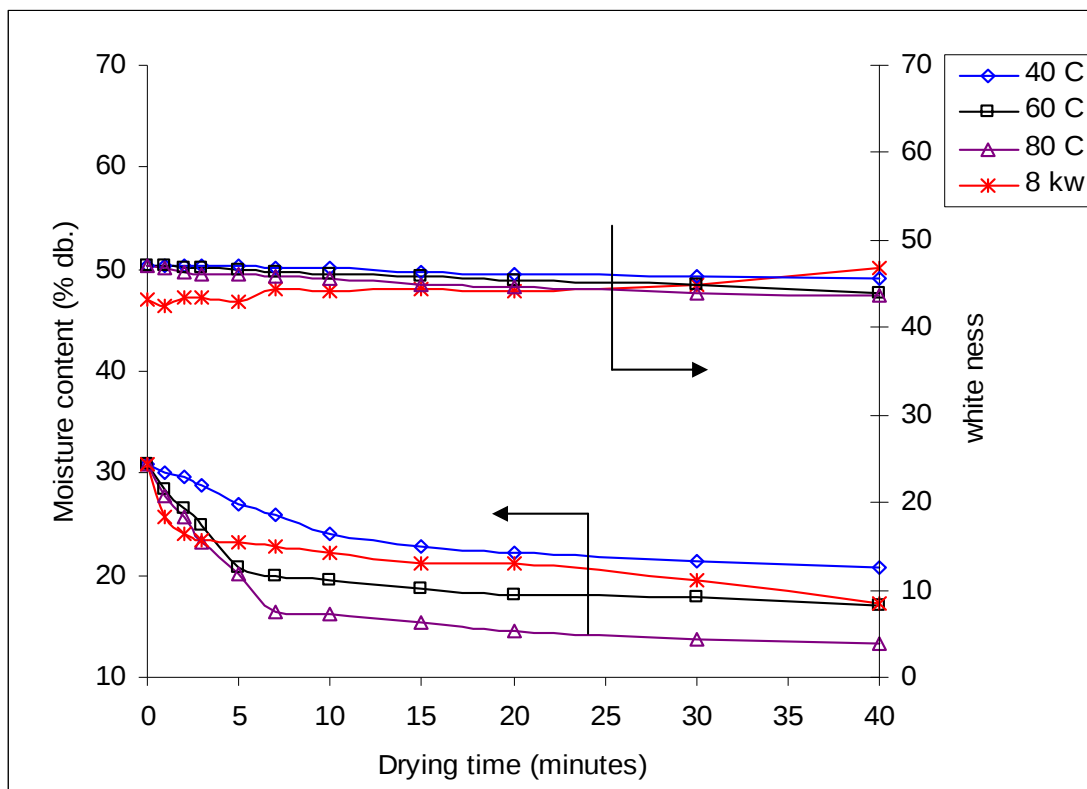
จากรูปที่ 4.14 จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่ทำการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนจะรักษาเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวได้ดีกว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวเมื่อทำการอบแห้งเป็นเวลานานจะทำให้ความชื้นที่บริเวณผิวของเมล็ดข้าวแตกต่างกับภายในแกนกลางของเมล็ดข้าวมาก หรือเรียกว่าการเกิด Moisture gradient มาก โดยเฉพาะภายในแกนกลางจะมีความชื้นมากกว่าผิวของเมล็ด

ข้าวและเกิดความเครียดขึ้น จึงส่งผลทำให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกร้าวมากกว่าการอบแห้ง ข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไธซ์เบตโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อน



รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและเปอร์เซ็นต์ตันข้าวของข้าวเปลือกภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบตโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนที่กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40°C เปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบตโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิของอากาศร้อนที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 จะพบว่า การอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบตโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนรักษาความขาวได้ดีกว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบตโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบตโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวจะเกิดเจลบางส่วนในระหว่างทำการอบแห้ง และเกิดปรากฏการณ์สีน้ำตาล จึงส่งผลทำให้ค่าความขาวน้อยกว่าค่าความขาวเริ่มต้น



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและความขาวของข้าวภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยการใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนที่กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40°C เปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิของอากาศร้อนที่แตกต่างกัน

สำหรับผลของการเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนและแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวดังอธิบายผ่านมาเบื้องต้นนี้สรุปได้ว่า การอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนสามารถรักษาเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวและความขาวของได้ดีกว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

4.5 ผลการวิเคราะห์คุณภาพการหุงต้มและคุณภาพการบริโภคของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

4.5.1 คุณภาพการหุงต้ม

1. ผลการนำตัวอย่างข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนไปวิเคราะห์เวลาในการหุงต้ม ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า เงื่อนไขที่ 1 และ 2 จะใช้เวลาในการหุงต้มเท่ากันทุกระยะเวลาของการอบแห้งเวลาที่ใช้เวลาในการหุงต้มคือ 15 นาที ส่วนเงื่อนไขที่ 3 ที่เวลา 5 และ 10 นาที จะใช้เวลาที่ใช้เวลาในการหุงต้มคือ 15 นาที และ ที่เวลาของการอบแห้ง 20 30 และ 40 นาที ใช้เวลาในการหุงต้ม 16 นาที เงื่อนไขที่ 4 และ 5 จะใช้เวลาในการหุงต้มเท่ากัน ทุกระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเวลาที่ใช้เวลาในการหุงต้ม 16 นาที และเงื่อนไขที่ 6 ใช้เวลาในการหุงต้ม 16 นาที

2. ผลการวิเคราะห์อัตราการอ้วนน้ำของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสาร จากผลการวิเคราะห์หาอัตราการอ้วนน้ำของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสารของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่า อัตราการอ้วนน้ำของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสารของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากข้าวอ้างอิงทุกเงื่อนไขการทดลองและเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการอบแห้งโดยที่แกน X เป็นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก ส่วนแกน Y จะบอกถึงอัตราการอ้วนน้ำของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสาร เงื่อนไขที่ 1 2 3 4 5 และ 6 จะได้อัตราการอ้วนน้ำของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสารอยู่ในช่วง 2.24-2.39 2.27-2.41 2.29-2.44 2.23-2.31 2.23-2.33 และ 2.26-2.29 ตามลำดับ ซึ่งนำมาพล็อตกราฟจะได้กราฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง แต่อัตราการอ้วนน้ำของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสาร ค่าที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. ผลการวิเคราะห์อัตราการยืดออกของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสาร จากผลการวิเคราะห์หาอัตราการยืดออกของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสาร ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่า อัตราการยืดออกของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสาร ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากข้าวอ้างอิงทุกเงื่อนไขการทดลองและเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการอบแห้ง จากเงื่อนไขการอบแห้งที่ 3 จะได้อัตราการยืดออกของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสารมีค่ามากที่สุด และเงื่อนไขการอบแห้งที่ 4 จะได้อัตราการยืดออกของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสารมีค่าต่ำสุด

4. ผลการวิเคราะห์ของแข็งที่สูญเสียระหว่างการหุงต้มจากผลการทดลองหาปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการหุงต้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า ที่เงื่อนไขที่ 1 และ 2 จะได้ค่าของแข็งที่สูญเสียระหว่างการหุงต้ม อยู่ในช่วง 9.96 – 9.10 และ 9.96 – 7.44 ตามลำดับ ซึ่งค่าของแข็งที่สูญเสียระหว่างการหุงต้มที่ได้มีปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำข้าวสุกสูงกว่าข้าวอ้างอิง ส่วนเงื่อนไขที่ 3 ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาของการอบแห้ง 5 และ 10 นาที ค่าที่ได้คือ 8.19 และ 7.54 ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้สูงกว่าข้าวอ้างอิง 6.70 ส่วนเงื่อนไขที่ 4, 5 และ 6 ได้

ค่าของแข็งที่สูญเสียระหว่างการหุงต้ม อยู่ในช่วง 6.65 – 4.94, 6.50 – 4.64 และ 3.83 – 3.04 ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้ลดลงตามระยะเวลาของการอบแห้ง และค่าของแข็งที่สูญเสียระหว่างการหุงต้มที่ได้มีค่าต่ำกว่าข้าวอ้างอิง

ตารางที่ 4.1 เวลาในการหุงต้มของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

cooking time (min)						
ระยะเวลาที่ ใช้อบแห้ง	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	เงื่อนไขที่ 4	เงื่อนไขที่ 5	เงื่อนไขที่ 6
ข้าวอ้างอิง	15	15	15	15	15	15
5 นาที	15	15	15	16	16	17
10 นาที	15	15	15	16	16	17
20 นาที	15	15	16	16	16	-
30 นาที	15	15	16	16	16	-
40 นาที	15	15	16	16	16	-

หมายเหตุ

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

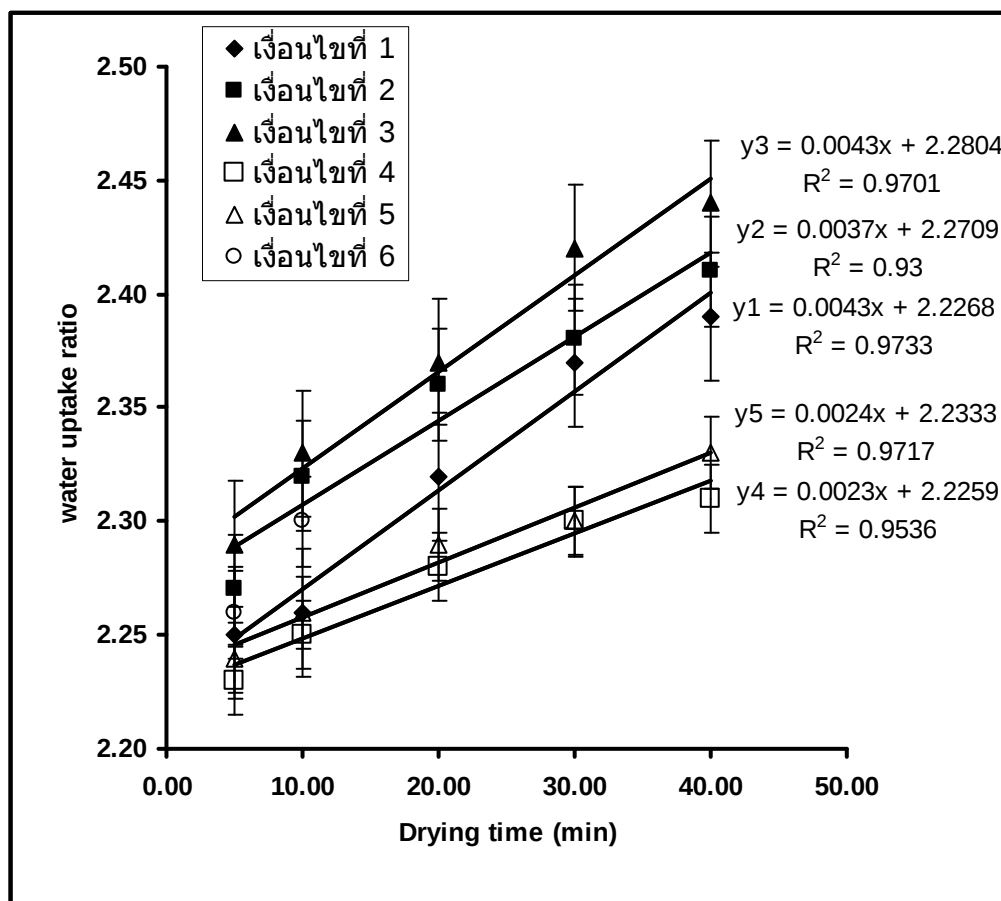
เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 4: อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 5: อุณหภูมิของอากาศร้อน 60 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm



รูปที่ 4.16 อัตราการอุ้มน้ำของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสารของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน (reference rice, water uptake ratio = 2.19)

หมายเหตุ

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

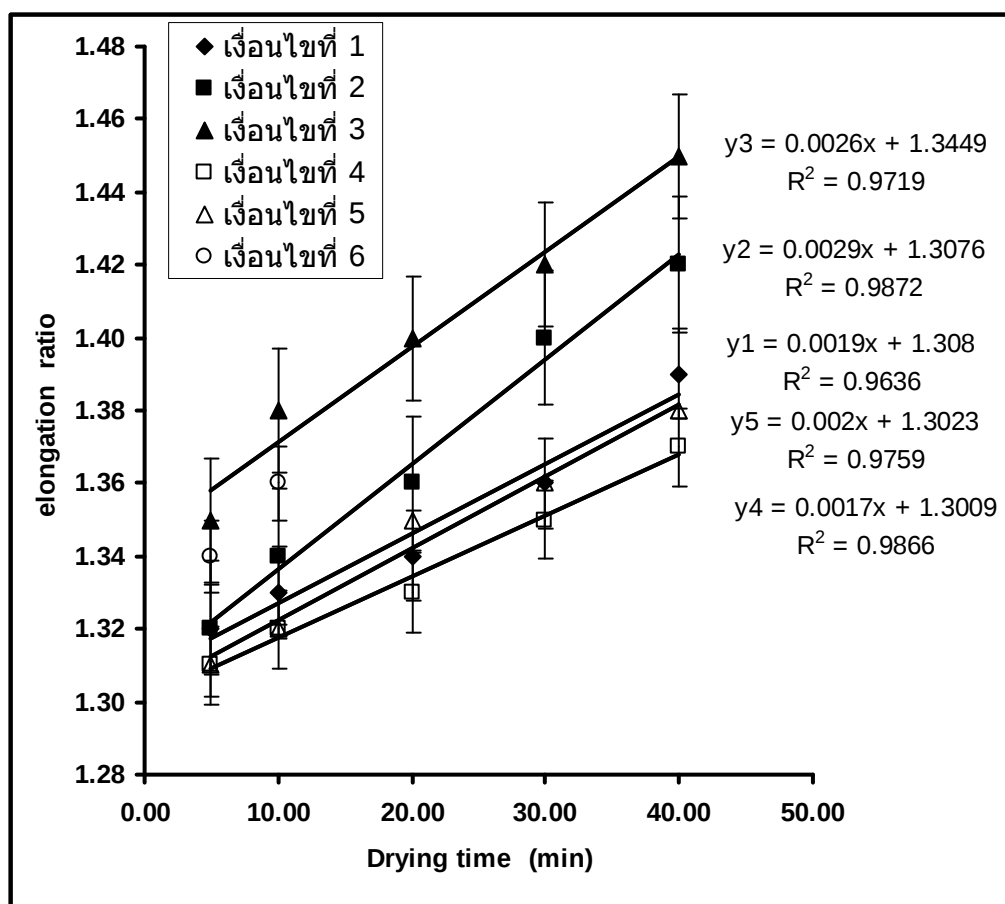
เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 4: อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 5: อุณหภูมิของอากาศร้อน 60 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm



รูปที่ 4.17 อัตราการยืดออกของเมล็ดข้าวสุกต่อเมล็ดข้าวสารของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1
ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน (Reference rice, elongation ratio = 1.30)

หมายเหตุ

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

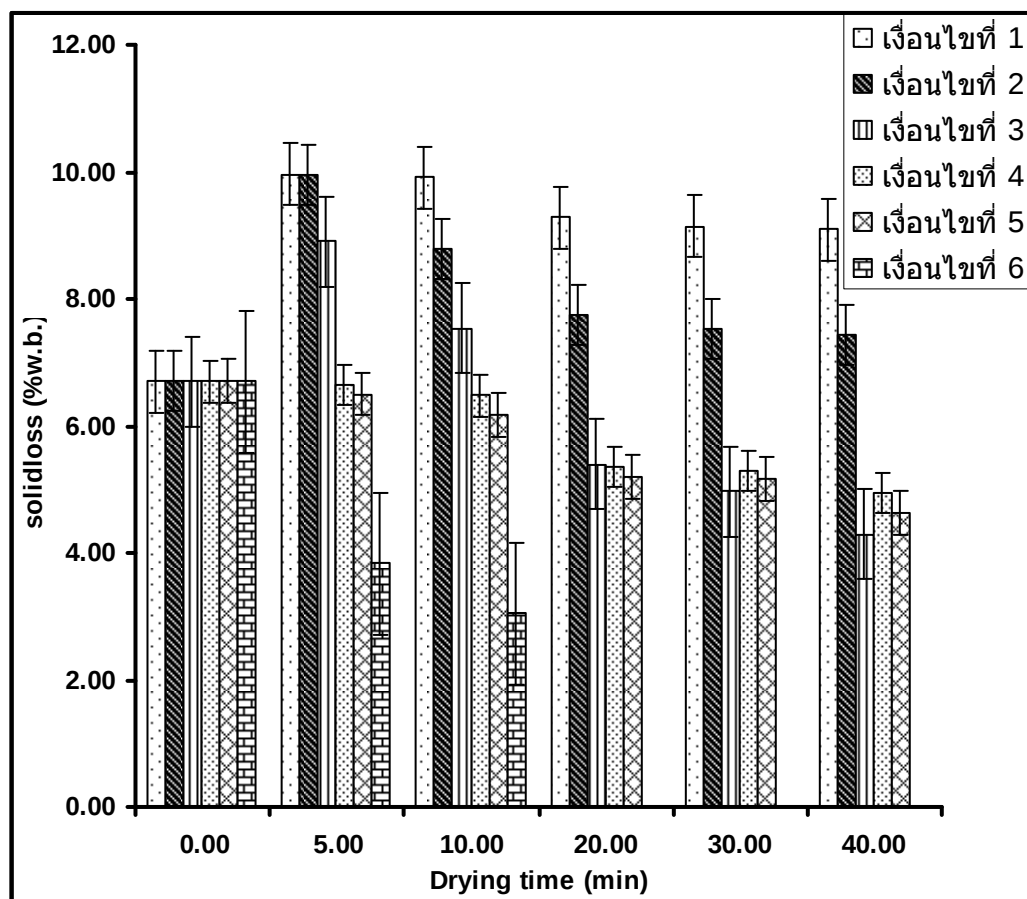
เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 4: อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 5: อุณหภูมิของอากาศร้อน 60 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm



รูปที่ 4.18 ของแข็งที่สูญเสียระหว่างการหุงต้มของข้าวพันธุ์ชยันนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

(Reference rice, solid loss (% w.b.) = 6.70)

หมายเหตุ

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 4: อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 5: อุณหภูมิของอากาศร้อน 60 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

4.5.2 คุณภาพการบริโภค

1. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของข้าวสุก

จากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของข้าวสุกของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า เงื่อนไขการทดลองที่ 1 2 3 4 5 และ 6 ความแข็งแรงของข้าวสุกเพิ่มขึ้นจากข้าวอ้างอิงทุกเงื่อนไขการทดลองและเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และค่าความแข็งแรงของข้าวสุกที่เงื่อนไขที่ 6 จะได้ค่าความแข็งแรงของข้าวสุกสูงสุด

2. ผลการวิเคราะห์และความเหนียวของข้าวสุก

จากผลการวิเคราะห์และความเหนียวของข้าวสุกของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า เงื่อนไขการทดลองที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ค่าความเหนียวของข้าวสุกลดลงจากข้าวอ้างอิงทุกเงื่อนไขการทดลองและลดลงตามระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหาความแข็งของเมล็ดข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 หุงสุก โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหารในการทดสอบ (Texture analyzer) ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

ระยะเวลาของการอบแห้ง	hardness (g)					
	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน					
	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	เงื่อนไขที่ 4	เงื่อนไขที่ 5	เงื่อนไขที่ 6
ข้าวอ้างอิง	800.43 $\pm$ 10.76E	800.43 $\pm$ 10.76F	800.43 $\pm$ 10.76F	800.43 $\pm$ 10.76F	800.43 $\pm$ 10.76E	800.43 $\pm$ 10.76C
5 นาที	834.98 $\pm$ 20.27dD	883.44 $\pm$ 16.39cE	1000.09 $\pm$ 24.67bE	839.08 $\pm$ 23.68dE	1102.06 $\pm$ 26.25aD	1108.51 $\pm$ 25.60aB
10 นาที	1031.14 $\pm$ 37.21dC	1182.28 $\pm$ 18.04cD	1297.30 $\pm$ 15.81bD	997.28 $\pm$ 27.05eD	1199.32 $\pm$ 19.13cC	1809.65 $\pm$ 13.58aB
20 นาที	1062.10 $\pm$ 16.10dB	1249.39 $\pm$ 25.40bC	1395.11 $\pm$ 34.37aC	1029.20 $\pm$ 33.26eC	1209.57 $\pm$ 22.65cC	-
30 นาที	1078.46 $\pm$ 8.07dB	1286.47 $\pm$ 31.34bB	1523.74 $\pm$ 27.22aB	1232.87 $\pm$ 33.73cB	1495.59 $\pm$ 32.00aB	-
40 นาที	1108.65 $\pm$ 14.45dA	1328.33 $\pm$ 27.41cA	1632.04 $\pm$ 25.09bA	1325.93 $\pm$ 30.71cA	1779.93 $\pm$ 14.44aA	-

หมายเหตุ : ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวนอน ($p < 0.05$)

ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวดิ่ง ($p < 0.05$)

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 4: อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 5: อุณหภูมิของอากาศร้อน 60 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาความเหนียวของเมล็ดข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 หุงสุก โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหารในการทดสอบ (Texture analyzer) ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

ระยะเวลาของการอบแห้ง	stickiness (g)					
	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน					
	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	เงื่อนไขที่ 4	เงื่อนไขที่ 5	เงื่อนไขที่ 6
ข้าวอ้างอิง	$-58.15 \pm 0.92A$	$-58.15 \pm 0.92A$	$-58.15 \pm 0.92A$	$-58.15 \pm 0.92A$	$-58.15 \pm 0.92A$	$-58.15 \pm 0.92A$
5 นาที	$-29.97 \pm 1.72dB$	$-49.65 \pm 4.18bB$	$-57.98 \pm 0.70aA$	$-21.46 \pm 0.51eB$	$-33.34 \pm 0.48cB$	$-21.18 \pm 0.45eB$
10 นาที	$-26.79 \pm 1.72dC$	$-36.90 \pm 4.14bC$	$-41.75 \pm 0.62aB$	$-20.57 \pm 0.49eC$	$-29.14 \pm 0.52cC$	$-19.84 \pm 0.78eC$
20 นาที	$-20.83 \pm 0.73cD$	$-26.21 \pm 1.09bD$	$-38.68 \pm 0.72aC$	$-19.50 \pm 0.75dD$	$-26.67 \pm 0.80bD$	-
30 นาที	$-18.79 \pm 0.92cE$	$-19.71 \pm 0.75bE$	$-29.18 \pm 0.78aD$	$-17.88 \pm 0.79dE$	$-20.03 \pm 0.66bE$	-
40 นาที	$-16.86 \pm 0.69bF$	$-17.96 \pm 0.40aE$	$-18.57 \pm 0.94aE$	$-16.59 \pm 0.89bF$	$-18.51 \pm 0.55aF$	-

หมายเหตุ : ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวนอน ($p < 0.05$)

ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวตั้ง ($p < 0.05$)

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 4: อุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 5: อุณหภูมิของอากาศร้อน 60 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm

4.6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของความหนืดของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

4.6.1 คุณสมบัติของความหนืด

1. ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นของความหนืด ที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดรวมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของความหนืดที่ผ่านเงื่อนไขของการอบแห้ง มีค่าสูงกว่าข้าวอัมอิง ในขณะที่เดียวกันก็พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของความหนืด ที่ผ่านการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองที่ 1, 2, 3 และ 6 ที่ระยะเวลาของการอบแห้ง 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที จากการวิเคราะห์พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นของความหนืดที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2. ผลการวิเคราะห์ความหนืดสูงสุด ที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดรวมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ผลการทดลองหาความหนืดสูงสุด ที่เงื่อนไขที่ 1 2 และ 3 มี peak viscosity สูงกว่าข้าวอัมอิง จากเงื่อนไขที่ 1 ค่า peak viscosity จะสูงขึ้น ที่ระยะเวลาของการอบแห้ง 5 10 20 และ 30 นาที ค่า peak viscosity ที่ได้คือ 388.25, 393.97, 402.61 และ 412.80 RVU ตามลำดับ ส่วนที่เวลาการอบแห้ง 40 นาที ค่า peak viscosity ลดลงมาอยู่ที่ 400.50 RVU ส่วนเงื่อนไขที่ 2 ก็เป็นไปในทำนองเดียวกันกับเงื่อนไขที่ 1 คือ ค่า peak viscosity จะสูงขึ้น ที่ระยะเวลาของการอบแห้ง 5 10 20 และ 30 นาที ส่วนที่เวลาการอบแห้ง 40 นาที ค่า peak viscosity ลดลง ที่ระยะเวลาของการอบแห้ง 5 10 20 และ 30 นาที ค่า peak viscosity ที่ได้คือ 395.50 399.86 406.97 และ 427.67 RVU ตามลำดับ ส่วนที่เวลาการอบแห้ง 40 นาที ค่า peak viscosity ลดลงมาอยู่ที่ 414.47 RVU เงื่อนไขที่ 3 ค่า peak viscosity จะสูงขึ้น ที่ระยะเวลาของการอบแห้ง 5 10 และ 20 นาที ค่า peak viscosity ที่ได้คือ 409.72 419.69 และ 420.64 RVU ตามลำดับ ส่วนที่เวลาการอบแห้ง 30 และ 40 นาที ค่า peak viscosity ลดลงมาอยู่ที่ 378.67 และ 335.46 RVU ตามลำดับ ส่วนเงื่อนไขที่ 6 พบว่าค่าความหนืดสูงสุดจะต่ำกว่าข้าวอัมอิง ค่าความหนืดสูงสุดที่ระยะเวลาการอบแห้งที่ 5 และ 10 นาที ค่าที่ได้คือ 301.22 และ 295.95 RVU

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเริ่มต้นของความหนืด (pasting temperature) ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

ระยะเวลาของการอบแห้ง	pasting temperature (°C)			
	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	เงื่อนไขที่ 6
ข้าวอ่างอิง	79.67 ± 0.33C	79.67 ± 0.33C	79.67 ± 0.33C	79.67 ± 0.33aA
5 นาที	80.52 ± 2.52bcBC	85.88 ± 1.86aA	83.32 ± 2.25abAB	79.65 ± 0.43cA
10 นาที	85.13 ± 1.29aA	84.72 ± 2.42abA	83.37 ± 1.49abAB	80.12 ± 0.49cbA
20 นาที	84.48 ± 2.58aAB	84.45 ± 0.84aAB	83.18 ± 1.42aB	-
30 นาที	79.13 ± 3.63bC	80.52 ± 2.24bBC	85.80 ± 1.28aA	-
40 นาที	87.43 ± 2.28aA	83.57 ± 3.68abABC	78.75 ± 0.15cC	-

หมายเหตุ - ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวนอน ($p < 0.05$)

- ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวตั้ง ($p < 0.05$)

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

ตารางที่ 4.5 ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

peak viscosity (RVU)				
ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
ระยะเวลา ของการ อบแห้ง	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	เงื่อนไขที่ 6
ข้าวอ้างอิง	$354.19 \pm 4.60D$	$354.19 \pm 4.60E$	$354.19 \pm 4.60D$	$354.19 \pm 4.60A$
5 นาที	$388.25 \pm 8.21bC$	$395.50 \pm 5.17bD$	$409.72 \pm 1.13aB$	$301.22 \pm 1.18cB$
10 นาที	$393.97 \pm 1.32abcBC$	$399.86 \pm 8.43abCD$	$419.69 \pm 8.28aA$	$295.95 \pm 6.62cB$
20 นาที	$402.61 \pm 4.83bAB$	$406.97 \pm 5.05bBC$	$420.64 \pm 2.95aA$	-
30 นาที	$412.08 \pm 8.71bA$	$427.67 \pm 2.85aA$	$378.67 \pm 1.55cC$	-
40 นาที	$400.50 \pm 0.10bB$	$414.47 \pm 6.96aB$	$335.46 \pm 14.84cE$	-

หมายเหตุ - ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวนอน ($p < 0.05$)

- ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวตั้ง ($p < 0.05$)

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

3. ผลการวิเคราะห์เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time)

ผลการวิเคราะห์เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด ที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า เงื่อนไขที่ 1 2 3 และ 6 ที่ระยะเวลาของการอบแห้ง 5 10 20 30 และ 40 นาที จะใช้เวลาที่ความหนืดสูงสุดต่ำกว่าข้าวอัมอิง ในขณะที่ข้าวผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขที่ 1 2 3 และ 6 ที่ระยะเวลาของการอบแห้ง 5 10 20 30 และ 40 นาที พบว่า เวลาที่ความหนืดสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4. ผลการวิเคราะห์ความหนืดลดลง

ผลการวิเคราะห์ความหนืดลดลง (breakdown) ที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า เงื่อนไขที่ 1 2 3 และ 6 ที่เวลาการอบแห้ง 5 10 20 30 และ 40 นาที ค่า breakdown ที่ได้ต่ำกว่าข้าวอัมอิง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาของการอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองพบว่า ค่า breakdown ที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.6 เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

ระยะเวลาของการอบแห้ง	peak time (min)			
	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	เงื่อนไขที่ 6
ข้าวอ้างอิง	$6.00 \pm 0.07A$	$6.00 \pm 0.07A$	$6.00 \pm 0.07A$	$6.00 \pm 0.07A$
5 นาที	$5.47 \pm 0.00bC$	$5.49 \pm 0.03bB$	$5.47 \pm 0.00bD$	$5.91 \pm 0.08aA$
10 นาที	$5.49 \pm 0.03bC$	$5.51 \pm 0.03bB$	$5.47 \pm 0.00bD$	$5.84 \pm 0.10aA$
20 นาที	$5.49 \pm 0.03aC$	$5.51 \pm 0.03aB$	$5.47 \pm 0.00aD$	-
30 นาที	$5.53 \pm 0.07aBC$	$5.40 \pm 0.07bC$	$5.53 \pm 0.00aC$	-
40 นาที	$5.60 \pm 0.00bB$	$5.47 \pm 0.00cBC$	$5.90 \pm 0.03aB$	-

หมายเหตุ - ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวนอน ($p < 0.05$)

- ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวตั้ง ($p < 0.05$)

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

ตารางที่ 4.7 ความหนืดลดลง (breakdown) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

ระยะเวลาของการอบแห้ง	breakdown viscosity (RVU)			
	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	เงื่อนไขที่ 6
ข้าวอ้างอิง	123.72 $\pm$ 7.16D	123.72 $\pm$ 7.16D	123.72 $\pm$ 7.16C	123.72 $\pm$ 7.16A
5 นาที	193.72 $\pm$ 4.35bcB	201.56 $\pm$ 3.5bC	213.14 $\pm$ 8.10aA	87.36 $\pm$ 0.98dB
10 นาที	205.17 $\pm$ 2.69aA	209.78 $\pm$ 7.93aC	212.14 $\pm$ 7.18aA	85.53 $\pm$ 7.19bB
20 นาที	211.31 $\pm$ 5.75aA	209.97 $\pm$ 5.47aA	221.81 $\pm$ 9.64aA	-
30 นาที	210.92 $\pm$ 1.55bA	242.75 $\pm$ 2.38aA	190.22 $\pm$ 3.36cB	-
40 นาที	165.14 $\pm$ 4.94bC	222.78 $\pm$ 6.87aB	112.91 $\pm$ 2.22cD	-

หมายเหตุ - ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวนอน ($p < 0.05$)

- ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวตั้ง ($p < 0.05$)

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm

5. ผลการวิเคราะห์ความคงทนต่อการกวน หรือค่าความหนืดต่ำสุด

ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า ค่าความหนืดต่ำสุดต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอ้างอิง ในขณะที่ระยะเวลาของการอบแห้งเพิ่มขึ้นทุกเงื่อนไขในการทดลองพบว่า ค่าความหนืดต่ำสุดที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

6. ผลการวิเคราะห์ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง หรือการคืนตัว (setback)

ผลการวิเคราะห์ค่าการคืนตัว (setback) ที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอ้างอิง ในขณะที่เพิ่มระยะเวลาของการอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองพบว่า ค่า setback ที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

7. ผลการวิเคราะห์ความหนืดสุดท้าย

ผลการวิเคราะห์ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่า เงื่อนไขที่ 1, 2, 3 และ 6 ที่เวลาการอบแห้ง 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ค่า final viscosity ที่ได้ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง และเมื่อระยะในการอบแห้งเพิ่มขึ้น 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ค่า final viscosity ที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.7 ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

trough viscosity (RVU)				
ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
ระยะเวลาของการอบแห้ง	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	เงื่อนไขที่ 6
ข้าวอ้างอิง	230.47 $\pm$ 9.17A	230.47 $\pm$ 9.17A	230.47 $\pm$ 9.17A	230.47 $\pm$ 9.17A
5 นาที	194.93 $\pm$ 6.54bBC	193.94 $\pm$ 2.07bB	196.58 $\pm$ 7.94bBC	213.86 $\pm$ 3.08aB
10 นาที	188.81 $\pm$ 1.39bC	190.09 $\pm$ 4.35bBC	207.55 $\pm$ 8.01aB	210.42 $\pm$ 3.28aB
20 นาที	191.31 $\pm$ 2.31bC	197.00 $\pm$ 2.37aB	198.83 $\pm$ 2.41aBC	-
30 นาที	201.16 $\pm$ 4.56aB	184.59 $\pm$ 0.76bC	188.44 $\pm$ 4.65bC	-
40 นาที	190.53 $\pm$ 2.04bC	191.69 $\pm$ 0.96bBC	203.97 $\pm$ 0.54aB	-

หมายเหตุ - ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวนอน ($p < 0.05$)

- ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวตั้ง ($p < 0.05$)

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

ตารางที่ 4.8 ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง หรือการคืนตัว (setback) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

setback viscosity (RVU)				
ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
ระยะเวลาของการอบแห้ง	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	เงื่อนไขที่ 6
ข้าวอ้างอิง	128.36 $\pm$ 3.97A	128.36 $\pm$ 3.97A	128.36 $\pm$ 3.97A	128.36 $\pm$ 3.97A
5 นาที	10.84 $\pm$ 1.10bC	- 21.61 $\pm$ 2.13cB	- 44.97 $\pm$ 6.36dC	100.14 $\pm$ 2.20aC
10 นาที	13.17 $\pm$ 4.84bcBC	- 24.19 $\pm$ 4.02cBC	- 56.00 $\pm$ 6.25cD	110.28 $\pm$ 6.49abB
20 นาที	16.67 $\pm$ 2.27aB	- 25.42 $\pm$ 2.47bBC	- 65.31 $\pm$ 7.74cE	-
30 นาที	16.53 $\pm$ 2.09aB	- 26.64 $\pm$ 3.73cBC	- 12.67 $\pm$ 1.46bB	-
40 นาที	17.05 $\pm$ 0.05aB	- 29.39 $\pm$ 3.20cC	- 19.93 $\pm$ 0.03abB	-

หมายเหตุ - ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวนอน ($p < 0.05$)

- ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวตั้ง ($p < 0.05$)

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

ตารางที่ 4.9 ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

ระยะเวลาของ การอบแห้ง	final viscosity (RVU)			
	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
	เงื่อนไขที่ 1	เงื่อนไขที่ 2	เงื่อนไขที่ 3	เงื่อนไขที่ 6
ข้าวอ้างอิง	482.56 $\pm$ 6.25A	482.56 $\pm$ 6.25A	482.56 $\pm$ 6.25A	482.56 $\pm$ 6.25A
5 นาที	398.47 $\pm$ 2.97aD	373.89 $\pm$ 3.00bB	364.75 $\pm$ 6.95cBC	401.36 $\pm$ 1.84aB
10 นาที	407.14 $\pm$ 4.30aC	375.67 $\pm$ 4.96bcB	363.69 $\pm$ 4.31cBC	406.22 $\pm$ 7.48aB
20 นาที	410.78 $\pm$ 2.00aC	381.56 $\pm$ 8.50bB	355.34 $\pm$ 4.25cC	-
30 นาที	395.25 $\pm$ 4.91aD	358.36 $\pm$ 8.87bC	366.00 $\pm$ 2.60bB	-
40 นาที	417.55 $\pm$ 4.88aB	385.08 $\pm$ 5.00bB	315.50 $\pm$ 4.88dC	-

หมายเหตุ - ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวนอน ($p < 0.05$)

- ตัวเลขที่ตามด้วยตัวกำกับภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในแนวตั้ง ($p < 0.05$)

เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 2: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 6 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40 °C

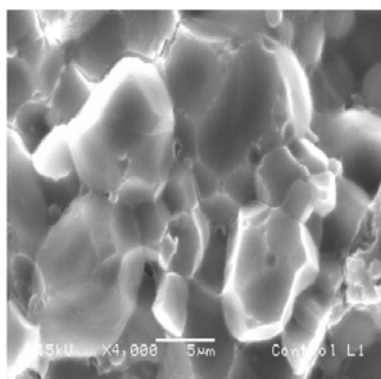
เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80 °C

ทุกเงื่อนไขการทดลองใช้ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm

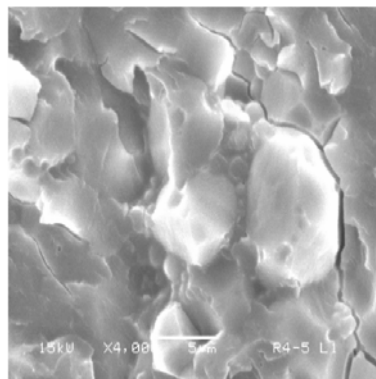
4.7 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดแป้งของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดแป้งของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ผ่านเงื่อนไขทั้งหมดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อน พบว่า จากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดแป้งของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 โดยรวมที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนที่เงื่อนไขที่ 1 3 และ 6 โดยเงื่อนไขที่ 1 ที่เวลาการอบแห้ง 5 นาที พบว่า จากรูปที่ 4.19 ยังมีลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดแป้งที่ได้ยังเป็นเม็ดแป้งที่เกาะกลุ่มกัน และยังเป็นผลึกอยู่ และเมื่อเพิ่มระยะเวลาของการอบแห้งขึ้น เป็น 10, 20, 30 และ 40 นาที พบว่าเม็ดแป้งเริ่มหลอมเข้าหากันมากขึ้น โครงสร้างของเม็ดแป้งที่เป็นผลึกก็เริ่มหายไปตามระยะเวลา และกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นคลื่นสั้นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ส่วนเงื่อนไขที่ 3 เมื่อกำลังอินฟราเรดเพิ่มขึ้น ก็พบว่า ที่เวลาการอบแห้ง 5 นาที เม็ดแป้งจะหลอมเข้าหากันเป็นบางส่วน และยังมีลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดแป้งที่ได้ยังเป็นเม็ดแป้งที่เกาะกลุ่มกัน และยังเป็นผลึกอยู่ ส่วนระยะเวลาของการอบแห้งขึ้น เป็น 10, 20, 30 และ 40 นาที โครงสร้างของเม็ดแป้งที่เป็นผลึกก็เริ่มหายไปตามระยะเวลา และกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นคลื่นสั้นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และเงื่อนไขที่ 6 ก็พบในลักษณะเดียวกัน คือ ยังเป็นกลุ่มเม็ดแป้งแต่ก็เริ่มมีการหลอมเข้าหากันเป็นบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.21

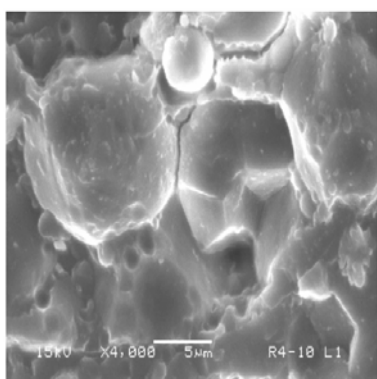
เงื่อนไขที่ 1: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 4 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40°C ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm



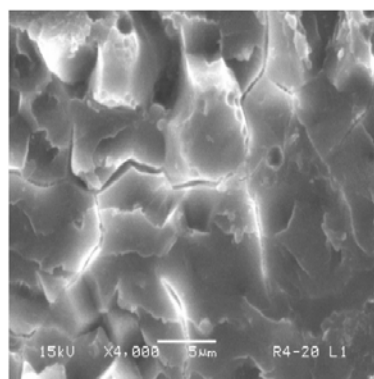
ข้าวอ้างอิง



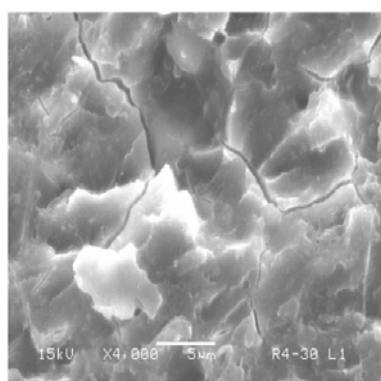
5 นาที



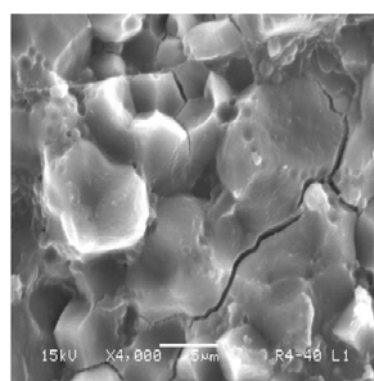
10 นาที



20 นาที



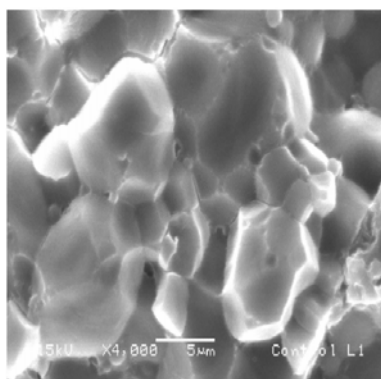
30 นาที



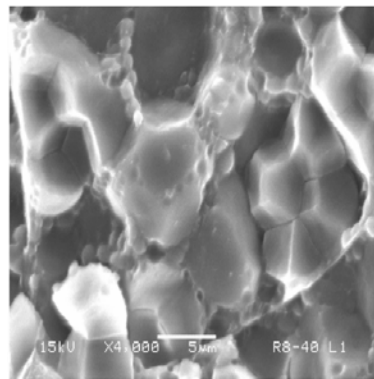
40 นาที

รูปที่ 4.19 SEM cross-section ด้านขอบของเมล็ดข้าวเปลือก CN 1 กำลังขยาย X4,000 ของเงื่อนไขที่ 1

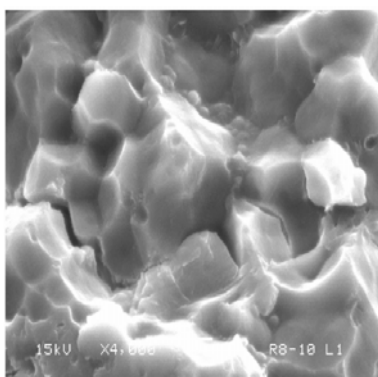
เงื่อนไขที่ 3: กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 8 kW ร่วมกับอุณหภูมิของอากาศร้อน 40°C ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และความสูงของเบตข้าวเปลือก 6 cm



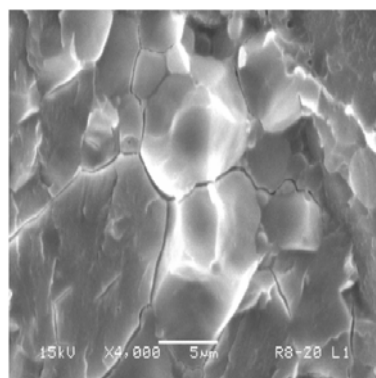
ข้าวอ้างอิง



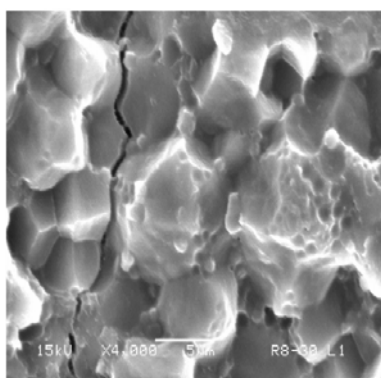
5 นาที



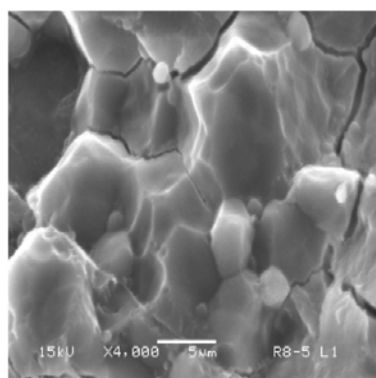
10 นาที



20 นาที



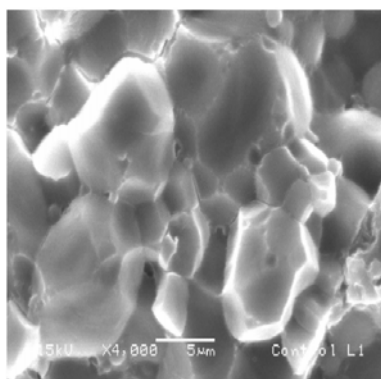
30 นาที



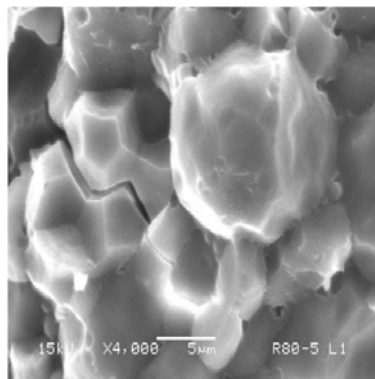
40 นาที

รูปที่ 4.20 SEM cross-section ด้านขอบของเมล็ดข้าวเปลือก CN 1 กำลังขยาย X4,000 ของเงื่อนไขที่ 3

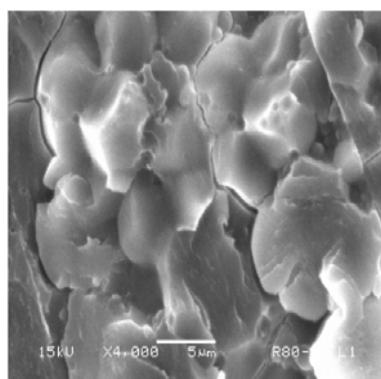
เงื่อนไขที่ 6: อุณหภูมิของอากาศร้อน 80°C ความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s และ ความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm



ข้าวอ้างอิง



5 นาที



10 นาที

รูปที่ 4.21 SEM cross-section ด้านขอบของเมล็ดข้าวเปลือก CN 1 กำลังขยาย X4,000 ของเงื่อนไขที่ 6

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. กำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความยาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรดสั้นที่ระดับ 8 kW จะสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้เร็วที่สุด และมีค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงที่สุด ส่วนค่าความยาวใกล้เคียงกันกับความยาวอ้างอิง

2. ความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้อย่างเหมาะสมจะมีผลต่อ การเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความยาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งความเร็วของอากาศร้อน 1.12 m/s จะสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้เร็วที่สุด และมีค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงที่สุด ส่วนค่าความยาวใกล้เคียงกันกับความยาวเริ่มต้น

3. ความสูงของเบดข้าวเปลือกจะมีผลต่อ การเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และความยาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งความสูงของเบดข้าวเปลือก 6 cm จะสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้เร็วที่สุด และมีค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงที่สุด ส่วนค่าความยาวใกล้เคียงกันกับค่าความยาวเริ่มต้น

4. การอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนสามารถรักษาเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวและความยาวของได้ดีกว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้การพาอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

5. การอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นร่วมกับการพาอากาศร้อนจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความชื้น คุณภาพการหุงต้ม และคุณภาพการบริโภคของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยพบว่าเมื่อนำข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ ที่ระยะเวลาต่างกันและนำไปถ่ายภาพ SEM แล้วพบว่า ภาพ SEM ที่ได้ มีลักษณะเหมือนกับเกิดเจลขึ้นเป็นบางส่วน ดังนั้นจึงควรศึกษาเพื่อความแน่ใจโดยนำไปหาเปอร์เซ็นต์การเกิดเจลลิตีในเซชันด้วยเครื่อง DSC

บรรณานุกรม

- บุญหงส์ จงคิด. ข้าวและเทคโนโลยีการผลิต. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2547.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. ข้าว:วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2547
- กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2546
- 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.
- Bekki, E. Rough rice drying with a far-infrared panel heater. *Journal of the Japanese Society of Agriculture* 1991; 53(1): 55-63.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. Van Nostrand Reinhold Press, New York, 1992: 450pp.
- Ginzburg, A. S. Application of infrared radiation in food processing. *Chemical and Process Engineering Series*, Leonard Hill, London; 1969: 412 pp.
- Hasimoto, A., Yamazaki, Y., Shimizu, M., and Oshita, S. Drying characteristics of gelatinous materials irradiation. *Drying Technology-An International Journal* 1994; 12(5): 1029-1052.
- Hebbar, H. U., and Rastogi, N. K. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *Journal of Food Engineering* 2001; 47: 1-5.
- Hovmand, S. Fluidized bed drying. *Handbook of Industrial Drying : Volume 1*, A.S. Mujumdar Ed., 1995: 195-248.
- Il'yasov, S. G., and Krasnikov, V. V. Fundamental principle of infrared radiation of food products. Hemisphere Publishing Corporation, New York; 1991: 397 pp.
- Kunii D. and Levenspiel O. Fluidization engineering. Butterworth-Heinemann, Boston; 1991: 491 pp.
- Luikov, A.V. Heat and mass transfer in capillary porous bodies. Pergamon Press, New York, 1966: 523 pp.
- Lykow, A. W. Experimentelle und theoretische Grundlagen der Trocknung. Berlin, 1955.
- Meeso, N., Soponronnarit, S., and Wetchacama, S. Evaluation of drying system performance in rice mills. In *Proceedings of the 19th ASEAN/1st APEC Seminar on Postharvest Technology*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 9-12 November 1999: 286-295.

- Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T., and Soponronnarit, S.(a) Feasibility of combined FIR and hot-air convection in fluidized bed paddy drying. In Proceedings of the 7th Thailand Society of Agricultural Engineering Conference, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham, Thailand, 23-24 January 2006: 500-507.
- Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T., and Soponronnarit, S.(b) Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process. *Journal of Food Engineering* 2007; 78(4): 1248-1258.
- Mujumdar, A.S., and Menon, A.S. Drying of solids : principles, classification, and selection of dryers. *Handbook of Industrial Drying: Volume 1*, A.S. Mujumdar Ed., 1995: 1-39.
- Nindo, C.I., Kudo, Y. and Bekki, E. Test model for studying sun drying of rough rice using far-infrared radiation. *Drying Technology-An International Journal* 1995; 13(1&2):225-238.
- Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakron, S., and Terdyothin, A. Effect of tempering on subsequent drying of paddy using fluidization technique. *Drying Technology-An International Journal* 2002; 20(1&2): 195-210.
- Ratti, C., and Mujumdar, A.S. Infrared drying. *Handbook of Industrial Drying: Volume 1*, A.S. Mujumdar Ed., Marcel Dekker Inc., New York; 1995: 567-588.
- Sandu, C. Infrared radiative drying in food engineering : a process analysis. *Biotechnology Progress* 1986; 2: 109-119.
- Sakai, N., and Hanzawa, T. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Science & Technology* 1994; 5: 357-362.
- Sharma, G. P., Verma, R.C. and Pathare, P. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* 2006; 17(3): 282-286.
- Shoji, Y. Machine equipment of Food Industrial 1986; 23(2): 63-67.
- Soponronnarit, S. Strategy for managing moist paddy. *The Royal Institute Journal* 1995; 20(4): 115-125 (in Thai).
- Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Swasdisevi, T. and Poomsa-ad, N. Managing moist by drying tempering and ambient air ventilation. *Drying Technology-An International Journal* 1999; 17(1&2): 335-344.
- Steffe, J.F. and Singh, R.P. Theoretical and practical aspects of rough rice tempering. *Transactions of the ASAE* 1980; 23: 775-782.

www.lighting.philips.com. IRK halogen infrared radiators in the industrial heating process, Philips Lighting,. Germany.