



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการอบแห้งข้าวเปลือกโดย รังสีอินฟราเรด ลมร้อน  
และการเทมเปอร์ริง

Drying of paddy by Infrared ray, hot air and tempering

โดย

ผศ.ดร.จักรม าส เลาหวณิช

พฤษภาคม 2559

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการอบแห้งข้าวเปลือกโดย รังสีอินฟราเรด ลมร้อน  
และการเทมเปอร์ริง

Drying of paddy by Infrared ray, hot air and tempering

ผศ.ดร.จักรมาส เล่าหวณิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุน

สนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## กิตติกรรมประกาศ

ภายใต้การดำเนินงานการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ในการสนับสนุนเงินทุนพัฒนาศักยภาพในการทำวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ปี 2552 ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี วงษ์พิกษะฐู ที่ปรึกษาในการทำวิจัย ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ในการจัดสรรสถานที่สำหรับการทำวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการและนิสิตปริญญาตรีและปริญญาโท สำหรับความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูล และขอขอบคุณทุกท่านที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

จักรมาส เลาหวนิช

พฤษภาคม 2559

## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5280115

ชื่อโครงการ: การอบแห้งข้าวเปลือกโดย รังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน

ผศ.ดร.จักรมาส เลหาวิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร.เสรี วงษ์พิเชษฐ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อีเมล:

Juckamas.l@msu.ac.th

ระยะเวลาโครงการ:

16 มีนาคม 2552 ถึงวันที่ 15 มีนาคม 2554

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและคุณภาพการสีข้าวของข้าวเปลือกภายหลังผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วยการอบแห้งข้าวเปลือกโดย รังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง รวมถึงพิจารณาหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่นำมาศึกษาอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการอบแห้งประกอบด้วย 1) ระดับความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก ( $X_1$ ) 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก 2) เวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ( $X_2$ ) 2 4 และ 6 นาที 3) ระดับอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง ( $X_3$ ) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส 4) ระยะเวลาเทมเปอร์ริง ( $X_4$ ) 0 30 และ 60 นาที และ 5) ระยะเวลาอบแห้งด้วยลมร้อน ( $X_5$ ) 0-300 นาที โดยผลการศึกษาพบว่า ระดับความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อทั้งการเปลี่ยนแปลงทั้งระดับความชื้นและคุณภาพการสี รองลงมาคือเวลาในการอบแห้งและระดับอุณหภูมิลมร้อน ส่วนเวลาในการการเทมเปอร์ริงพบว่าไม่มีอิทธิพลเล็กน้อยเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ สำหรับรูปแบบกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมนั้นเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอนสองในรูปแบบสมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง สามารถอธิบายอิทธิพลของปัจจัยต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพการสีในรูปแบบค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมผัส (RHY) และเปอร์เซ็นต์ความขาวสัมผัส (RW) เทียบกับวิธีการอ้างอิงได้เป็นอย่างดีที่ระดับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  0.940 และ 0.914 ตามลำดับ โดยเทคนิคนี้เหมาะสำหรับการลดความชื้นข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นมากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ขึ้นไป อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไม่เกิน 4 นาที แล้วสามารถอบแห้งต่อด้วยลมร้อนได้ทันทีโดยใช้อุณหภูมิลมร้อนไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้เวลาการอบแห้งไม่เกิน 180 นาที

คำหลัก : ข้าวเปลือก อบแห้ง อินฟราเรด เทมเปอร์ริง ลมร้อน

## Abstract

---

**Project Code :** : MRG5280115

**Project Title :** Drying of paddy by Infrared ray, hot air and tempering

**Investigator :** Assistant Professor Juckamas Laohavanich, Ph.D.

Faculty of Engineering, Mahasarakham University

Assistant Professor Seree Wongpichet, D.Eng.

Faculty of Engineering, Khon Kaen University

**E-mail Address :.**

Juckamas.l@msu.ac.th

**Project Period :**

16 March 2009 to 15 March 2011

### **Abstract:**

This research aims to study the changes of moisture content and milling quality of paddy after drying by infrared ray, hot air and tempering. The appropriate drying condition was determined. The parameters used in this study are as followings: 1) the initial moisture content of paddy ( $X_1$ ) of 20 25 and 30% wet basis 2) the infrared drying time ( $X_2$ ) of 2, 4 and 6 minutes 3) the hot air temperature ( $X_3$ ) of 40 50 and 60 °C 4) tempering time ( $X_4$ ) of 0 30 and 60 minutes and 5) hot air drying time ( $X_5$ ) of 0-300 minutes. The results found that  $X_1$  and  $X_2$  were the main factors affecting in the changes of moisture content and milling qualities of paddy followed by  $X_3$  and  $X_5$ . While, there was a slight effect by  $X_4$  on change in moisture content and milling qualities. For the appropriate drying process determination, the response surface methodology (RSM) was used to develop the mathematical model in form of the second order polynomial equation. The models were able to describe the change in milling quality which was presented in terms of the percentage of relative head rice yield (RHY) and the percentage of relative whiteness (RW) with higher coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.940 and 0.914, respectively. In summary, this drying process is appropriate for drying paddy with  $X_1$  higher than 25% wet basis, with  $X_2$  lower than 4 minutes. Then, the paddy can be dried with hot air drying immediately using  $X_3$  lower than 50 °C. This drying process for the whole process is no longer than 180 minutes to reduce the moisture content down to 15% wet basis.

**Keywords :** Paddy Drying Infrared Tempering Hot air

## บทสรุปผู้บริหาร

### 1. รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย

1.1 ชื่อเรื่อง การอบแห้งข้าวเปลือกโดย รังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง

1.2 ชื่อคณะผู้วิจัย

ผศ.ดร.จักรมาส เลาหวณิช คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร.เสรี วงษ์พิเชษฐ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

1.3 งบประมาณและระยะเวลาการวิจัย

16 มีนาคม 2552 ถึงวันที่ 15 มีนาคม 2554

งบประมาณที่ได้รับ 480,000 บาท (สี่แสนแปดหมื่นบาทถ้วน)

### 2. การวิจัย

2.1 ที่มาและความสำคัญ

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกของเกษตรกร โดยนำเครื่องเกี่ยวนวดข้าวมาใช้น้อยลงแพร่หลายในปัจจุบัน ทำให้ภายหลังการเก็บเกี่ยวต้องมีการลดความชื้นข้าวเปลือกก่อนการเก็บรักษาหรือนำไปจำหน่าย การตากบนลานถือเป็นวิธีที่ผู้ประกอบการนิยมรับซื้อข้าวนิยมใช้มากที่สุด อย่างไรก็ตามหากข้าวเปลือกมีความชื้นสูง หรือสภาวะอากาศไม่เอื้ออำนวย หรือมีปริมาณข้าวเปลือกออกสู่ตลาดมากจนไม่สามารถหาพื้นที่สำหรับตากได้เพียงพอ การใช้เครื่องอบแห้งจะมีความเหมาะสมมากกว่า (อรรถพล นุ่มหอม, จริญญา ลิขิตรัตน์พร, 2537)

ขุนพล สังข์อารีย์ และคณะ (2545) ได้ประเมินสถานภาพการใช้เครื่องอบแห้งแบบต่างๆ ในประเทศไทย พบว่า เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลคลุกเคล้าเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด รองลงมาคือแบบถังหมุนเวียน และแบบฟลูอิดไชน์เบด ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ผู้ประกอบการกลับให้ความพึงพอใจต่อเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดมากที่สุดจากข้อได้เปรียบเรื่องอัตราการลดความชื้น Soponronnarit et al. (1999) ได้วิจัยเกี่ยวกับ การจัดการข้าวเปลือกความชื้นสูงด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด โดยลดความชื้นข้าวเปลือกลงอย่างรวดเร็วจนเหลือ 19-22% w.b. ในช่วงแรก จากนั้นเก็บข้าวเปลือกในที่อบอากาศหรือเทมเปอร์ริง (Tempering) เพื่อปรับสภาพความชื้นเมล็ดให้สม่ำเสมอ ก่อนที่จะนำไปลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบไหลคลุกเคล้าต่อไปจนเหลือ 14% w.b. ด้วยวิธีการนี้พบว่า สามารถร่นเวลาในการลดความชื้นลงและได้ปริมาณต้นข้าวอยู่ในเกณฑ์ดี อีกทั้งหากใช้อุณหภูมิลมร้อน 140-150°C พบว่ามีผลพลอยได้คือสามารถเพิ่มปริมาณต้นข้าวภายหลังการลดความชื้นได้ เนื่องจากเมล็ดแป้งที่เป็นส่วนประกอบของข้าวเกิดการเจลลาติไนเซชันและเปลี่ยนโครงสร้างในบางส่วน ทำให้ข้าวมีความแกร่ง ทนทานต่อการขัดสีได้มากขึ้น (อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์ และคณะ, 2542; สุทธิณี วาณิชสำราญ และคณะ, 2546 )

แนวทางการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงในช่วงแรกของกระบวนการลดความชื้นนั้น อาจสามารถใช้การถ่ายโอนความร้อนให้แก่ข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared ray) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่อาศัยคุณสมบัติของรังสีความร้อน (Thermal Radiation) สามารถถ่ายโอนความร้อนให้กับผิววัสดุโดยตรง และสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ระดับหนึ่ง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางส่งผ่านความร้อน (Ozisik, 1985; Mujamdar, 1995) ซึ่งน่าจะช่วยให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นในระยะเวลาน้อยลง อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในเนื้อเมล็ดได้ในเวลาเดียวกัน โดยจะสามารถประยุกต์ใช้ร่วมการระบบการอบแห้งที่มีอยู่ในปัจจุบัน ด้วยการให้ความร้อนข้าวเปลือกก่อนนำไปอบแห้งต่อด้วยลมร้อนและการเทมเปอร์ริงจนเหลือความชื้นในระดับที่สามารถนำไปเก็บรักษาได้ ซึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดก่อนนำไปตากแดดบนลานโดย W. Duangkhamchan, J. Laohavanich (2014) ก็พบว่าสามารถร่นระยะเวลาลดความชื้นได้รวดเร็วกว่าวิธีการตากแดดบนลานจาก 2-3 วัน ให้เหลือเพียง 4-5 ชั่วโมง เท่านั้นโดยที่คุณภาพการสีข้าวยังอยู่ในเกณฑ์ดีได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและคุณภาพการสีข้าวของข้าวเปลือกภายหลังผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วยรังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง รวมถึงพัฒนารูปแบบกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมที่ยังคงรักษาคุณภาพการสีข้าวได้เป็นอย่างดีซึ่งน่าจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยในการพัฒนาและเพิ่มพูนองค์ความรู้ในด้านการลดความชื้นข้าวเปลือก อีกทั้งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตข้าวของไทยต่อไป

## 2.2 วิธีดำเนินการและผลการศึกษาประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนคือ

1) พัฒนาและสร้างชุดทดสอบการลดความชื้น เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการขึ้น ประกอบด้วย ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ชุดทดสอบกระบวนการเทมเปอร์ริง และชุดทดสอบการอบแห้งด้วยลมร้อน

2) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากการลดความชื้นด้วย รังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริง และลมร้อน เพื่ออธิบายอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือก

3) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการสีของข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วย รังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริง และลมร้อน เพื่ออธิบายอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการสีของข้าวเปลือก จากนั้นสมการทางคณิตศาสตร์อธิบายการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพการสีของข้าวเปลือก เพื่อวิเคราะห์รูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นข้าวเปลือก

## 2.3 ผลการทดลอง หลักๆ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและคุณภาพการสีข้าวของข้าวเปลือกภายหลังผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วยการอบแห้งข้าวเปลือกโดย รังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง ได้ผลโดยสรุปดังนี้

1) การเปลี่ยนแปลงของความชื้นข้าวเปลือกและอุณหภูมิเมล็ดข้าวในกระบวนการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง พบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดอบแห้ง

ข้าวเปลือกในช่วงแรกสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลาสั้นๆ ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะในกรณีที่ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นสูง รวมถึงสามารถเพิ่มอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน นอกจากนั้นยังพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดซึ่งสามารถให้ความร้อนผ่านเข้าไปยังภายในเมล็ดข้าวเปลือกทำให้เมล็ดได้รับความร้อนพร้อมๆ กันทั้งภายในและนอกเมล็ดส่งผลให้การถ่ายเทมวลของน้ำภายในเมล็ดมีอัตราการถ่ายเทที่รวดเร็วขึ้น ขั้นตอนการเทมเปอร์ริงเพื่อใช้ในการปรับสมดุลความชื้นของเมล็ดข้าวในระหว่างพักการอบแห้งจึงมีผลน้อยมากต่อระบบการลดความชื้นในภาพรวมเมื่อวิเคราะห์หาค่าพหุคูณตอบสนอง สำหรับอิทธิพลของลมร้อนในการอบแห้งนั้นจากการวิเคราะห์พบว่าการใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงทำให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงได้แต่ยังคงมีอิทธิพลน้อยกว่าระดับความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก และระยะเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

2) การศึกษารูปแบบที่เหมาะสมของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดลมร้อน และการเทมเปอร์ริง เพื่อรักษาคุณภาพการสีข้าวสามารถอธิบายอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์พหุคูณตอบสนอง โดยอธิบายผลเป็นค่าสัมพัทธ์เทียบกับค่าคุณภาพการสีของข้าวเปลือกอ้างอิงที่ลดความชื้นด้วยการตากแห้งให้แห้ง ดังสมการแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (RHY) และเปอร์เซ็นต์ความขาวสัมพัทธ์ (RW)

$$\begin{aligned} RHY = & 110.07 + (16.622X_1) - (4.445X_3) - (3.3875X_1 * X_2) - (4.194X_1 * X_3) + (5.45X_1 * X_5) \\ & + (3.724X_2 * X_3) + (6.656X_2 * X_5) + (9.96X_3 * X_5) - (14.618X_1^2) - (3.841X_2^2) - (2.853X_3^2) \end{aligned}$$

มีค่า  $R^2 = 94.00 \%$

และ

$$\begin{aligned} RW = & 96.958 + (4.277X_1) - (2.188X_2) - (0.39X_3) - (2.012X_4) - (7.164X_5) - (4.251X_1 * X_2) \\ & - (0.305X_1 * X_4) - (0.557X_2 * X_3) + (2.605X_2 * X_5) - (4.448X_1^2) + (0.627X_4^2) + (4.662X_5^2) \end{aligned}$$

มีค่า  $R^2 = 91.4 \%$

การวิเคราะห์ผลการทดสอบนั้นพบว่ารูปแบบการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเทคนิคการใช้รังสีอินฟราเรด ร่วมกับการเทมเปอร์ริงและลมร้อน สามารถเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นมากกว่า 25%wb ขึ้นไป อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไม่เกิน 4 นาที แล้วสามารถอบแห้งต่อด้วยลมร้อนได้ทันทีโดยใช้อุณหภูมิลมร้อนไม่เกิน 50 °C ซึ่งจะใช้เวลาการอบแห้งไม่เกิน 180 นาที จะได้ข้าวเปลือกที่มีคุณภาพการสีใกล้เคียงกับวิธีการอ้างอิงด้วยการตากข้าวเปลือกบนลานตาก รวมถึงอาจได้ปริมาณต้นข้าวที่มากกว่าข้าวอ้างอิงได้ระดับหนึ่ง

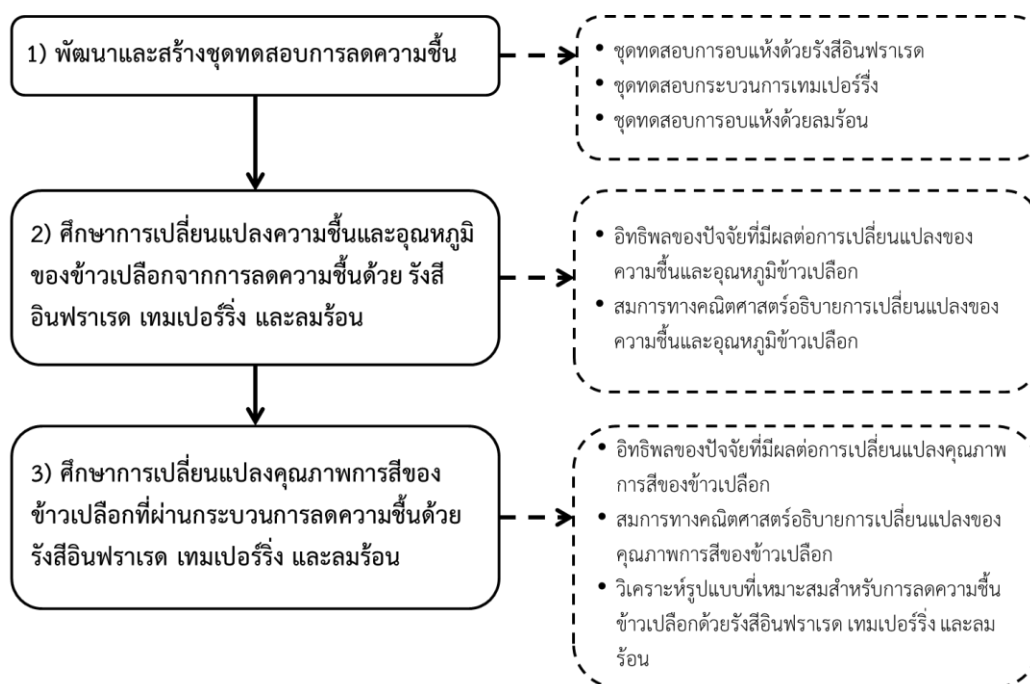
## วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและคุณภาพการสีข้าวของข้าวเปลือกภายหลังผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วยรังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง โดยมีวัตถุประสงค์เฉพาะเพื่อ

- 1) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง เพื่อหาสมการอบแห้ง
- 2) ศึกษารูปแบบที่เหมาะสมของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดลมร้อน และการเทมเปอร์ริง เพื่อรักษาคุณภาพการสีข้าว

## วิธีทดลอง

การวิจัยเพื่อศึกษากระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการใช้รังสีอินฟราเรดและการเทมเปอร์ริง ร่วมกับลมร้อน ดังแสดงกระบวนการศึกษาดังภาพที่ 1 ซึ่งการวิจัยครั้งนี้จะอธิบายอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและคุณภาพการสีของข้าวเปลือกดังรายละเอียดวิธีการดำเนินการศึกษาดังนี้



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงกระบวนการศึกษาวิจัย

## 1) การพัฒนาและสร้างชุดทดสอบการลดความชื้น

เพื่อทดสอบกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการใช้รังสีอินฟราเรด และการเทมเปอร์ริ่ง ร่วมกับลมร้อน ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้พัฒนาอุปกรณ์ทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการขึ้น ประกอบด้วย

- ก) อุปกรณ์ให้ความร้อนข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด
- ข) อุปกรณ์เทมเปอร์ริ่ง
- ค) อุปกรณ์อบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อน

## 2) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากการลดความชื้นด้วย รังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริ่ง และลมร้อน

การศึกษาระบบการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยการใช้รังสีอินฟราเรดและการเทมเปอร์ริ่ง ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนนั้น พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของความชื้น ( $m_t$ ) และอุณหภูมิของข้าวเปลือก ( $g_t$ ) ณ เวลาใดๆ เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทราบในเบื้องต้นเพื่อใช้ในการกำหนดกรอบเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการศึกษาคุนภาพการสี โดยมีรายละเอียดการดำเนินการดังนี้

- ก) ตัวอย่างข้าวเปลือกขึ้นสำหรับการทดสอบ

นำข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่พันธุ์ ชัยนาท 1 (CNT 1) ซึ่งนิยมปลูกในทั่วทุกภาคของประเทศไทย มาทำความสะอาดเพื่อคัดแยกสิ่งเจือปนรวมถึงเมล็ดข้าวเปลือกที่มีลักษณะลีบแบนไม่สมบูรณ์ออก หลังจากนั้นนำมาเพิ่มความชื้นด้วยการผสมน้ำคลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วนำเข้าเก็บไว้ในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 – 7 °C เป็นเวลา 7 วันเพื่อให้ได้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นตามที่ต้องการสำหรับการทดสอบ โดยก่อนการทดสอบ จะนำข้าวเปลือกออกมาวางไว้ในสภาพอุณหภูมิห้องก่อนเพื่อปรับอุณหภูมิเมล็ดให้เท่ากับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม แล้วสุ่มหาความชื้นเริ่มต้นก่อนการทดสอบโดยสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกจำนวน 3 ซ้ำนำมาชั่งน้ำหนักแล้วใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C ตามวิธีการมาตรฐาน ASAE Moisture Measurement: Grains and Seeds, Method S352.2 แล้วคำนวณค่าความชื้นจากสมการดังนี้

คำนวณตามฐานเปียก ความชื้นข้าวเปลือก ( $m_w$ ) เท่ากับ

$$m_w = \frac{(w_i - w_o)}{w_i} \times 100 \quad (1)$$

- เมื่อ
- $m_w$  = %wb (ความชื้นข้าวเปลือกฐานเปียก)
  - $w_i$  = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้นก่อนเข้าตู้อบ (กรัม)
  - $w_o$  = น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้ายหลังจากออกจากตู้อบ (กรัม)

หากคำนวณเป็นค่าฐานแห้งเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือก ( $m_d$ ) จะมีค่าเท่ากับ

$$m_d = \frac{m_w}{100 - m_w} \quad (2)$$

ข) อุปกรณ์วัดและเก็บข้อมูลสำคัญ

- 1) เครื่องวัดและเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (YOKOGAWA model DX200)
- 2) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 3) ตัวอย่างข้าวเปลือกทดสอบเพื่อหาความชื้น
- 4) ตู้ทำความเย็นสำหรับเตรียมข้าวเปลือกขึ้น

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือก โดยนำข้าวเปลือกที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะถูกนำมาทดสอบ เป็นการศึกษากระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการใช้รังสีอินฟราเรดและการเทมเปอร์ริง ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้น ( $m_c$ ) และอุณหภูมิของข้าวเปลือก ( $g_r$ ) ณ เวลาใดๆ จากเงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ แบ่งการอธิบายผลการศึกษาเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนที่ 1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกเฉพาะในขั้นตอนการใช้รังสีอินฟราเรดอบแห้งเนื่องจากใช้ระยะเวลาสั้นหากอธิบายรวมทั้งกระบวนการจะทำให้ไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน ส่วนที่ 2 ศึกษาการอบแห้งทั้งกระบวนการคือ ใช้รังสีอินฟราเรดและการเทมเปอร์ริง ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

โดยนำตัวอย่างข้าวเปลือกไปอบแห้งด้วยอุปกรณ์ให้ความร้อนข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด เป็นเวลา 6 นาที โดยสุ่มตัวอย่างไปตรวจวัดค่าความชื้น 3 ซ้ำ แล้วนำข้าวเปลือกชั่งน้ำหนักประมาณ 0.7 กก. จำนวน 3 ซ้ำสำหรับการทดสอบ จากนั้นนำตัวอย่างข้าวเปลือกในภาตใส่ตัวอย่างข้าวแล้วเกลี่ยให้ทั่ว จากนั้นเลื่อนภาตใส่ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ติดตั้งบนฐานสั่นเข้าไปในห้องอบ แล้วเริ่มจับเวลาจนกระทั่งถึงเวลาที่ต้องการจึงนำข้าวเปลือกออกมา ตรวจวัดค่าอุณหภูมิข้าวเปลือกในห้องอบแห้งด้วยอินฟราเรดและแบ่งตัวอย่างข้าวเปลือกชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าความชื้นข้าวเปลือกหลังอบที่เวลาอบให้ความร้อนต่างๆ ( $M_t$ ) จำนวน 3 ซ้ำ โดยมีตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาดังนี้

ก) ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น และความชื้นหลังให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

ระดับตัวแปร 3 ระดับ 20 25 และ 30%wb

(25 33 และ 42 %db ตามลำดับ)

ข) เวลาในการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

ระดับตัวแปร 3 ระดับ 2 4 และ 6 นาที

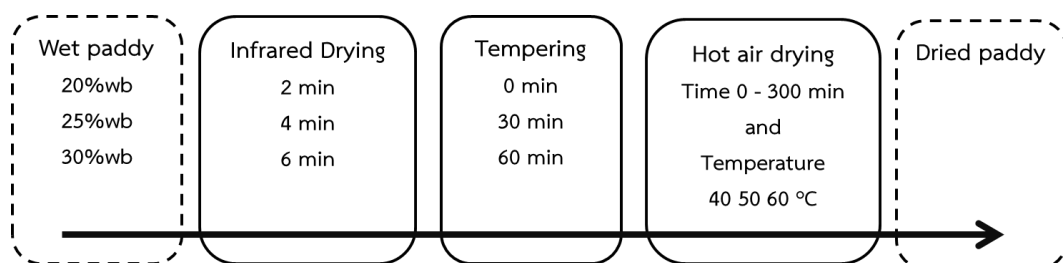
(ใช้ระดับความชื้นของรังสีอินฟราเรด 2.58 ไมโครเมตรหรือ 850 °C)

ค่าชี้ผลการศึกษาในขั้นตอนนี้คือ ความชื้น (mt) และอุณหภูมิ (gt) ของข้าวเปลือกที่ทดสอบ ณ เวลาใดๆ ทั้งนี้เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงจากการรับรังสีอินฟราเรด

2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ร่วมกับการเทมเปอร์ริงและลมร้อน

มีจุดประสงค์เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมในการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเทคนิคหลายเทคนิคร่วมกัน ได้แก่ การใช้รังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริง และลมร้อน ต่อเนื่องเป็นกระบวนการ ดังนั้นในการจัดรูปแบบกระบวนการที่เหมาะสม จะต้องมีการทดสอบถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างการอบแห้ง ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้น เวลาในการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด เวลาในการเทมเปอร์ริง เวลาและอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยลมร้อน ตามลำดับ เพื่อใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์และเลือกเงื่อนไขไปใช้ในการทดสอบเกี่ยวกับคุณภาพการสีในขั้นตอนต่อไป

โดยนำตัวอย่างข้าวเปลือกน้ำหนักประมาณ 0.7 กก. ไปอบแห้งด้วยอุปกรณ์ให้ความร้อนข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด เป็นเวลา 2-6 นาที จากนั้นนำไปอบอากาศ 0 – 60 นาที ก่อนนำไปอบแห้งต่อด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 300 นาที เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก ในการทดสอบจะสุ่มตัวอย่างไปตรวจวัดค่าความชื้น 3 ซ้ำ เมื่อข้าวเปลือกผ่านการทดสอบจากกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่เวลา 20 40 60 120 240 และ 300 นาที เพื่อหาค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก (ภาพที่ 2) โดยมีตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาดังนี้



ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบลดความชื้นข้าวเปลือก

ก) ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น และความชื้นหลังให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

ระดับตัวแปร 3 ระดับ 20 25 และ 30%wb

ข) เวลาในการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

ระดับตัวแปร 3 ระดับ 2 4 และ 6 นาที

(ใช้ระดับความเข้มของรังสีอินฟราเรด 2.58 ไมโครเมตรหรือ 850 °C)

ค) เวลาที่ใช้ในการเทมเปอร์ริง ในภาชนะอับอากาศ

ระดับตัวแปร 3 ระดับ 0 30 และ 60 นาที

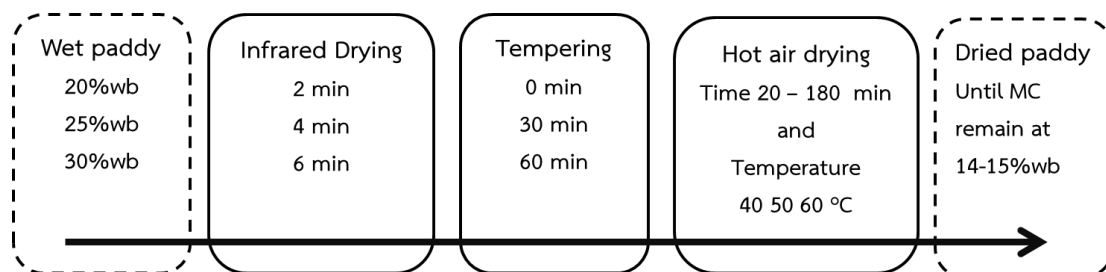
ง) เวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อน

ระดับตัวแปร 20 40 60 120 240 และ 300 นาที

ค่าชี้ผลการศึกษาในขั้นตอนนี้คือ ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง ( $m_t$ ) ณ เวลาการอบแห้งที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงและใช้ข้อมูลดังกล่าวในการเลือกกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบในขั้นตอนการศึกษาคุณภาพการสีต่อไป โดยในการอบแห้งลดความชื้นนั้นระดับความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษาคือ 12-15 %wb ดังนั้นข้อมูลจากการทดสอบนี้จะใช้ในการวางแผนการทดสอบเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการสี ในขั้นตอนต่อไป

### 3) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการสีของข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วย รังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริง และลมร้อน

เมื่อได้ข้อสรุปการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกจากการทดสอบในขั้นตอนที่ 2 แล้ว ในการศึกษาขั้นตอนนี้จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรโดยกำหนดให้ ข้าวเปลือกสุดท้ายเหลือประมาณ 13-15%wb (ภาพที่ 3) ภายหลังจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริงและนำไปอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งเป็นระดับที่สามารถเก็บรักษาและทำการสีข้าวได้ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการทดสอบเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2 แต่การทดสอบจะสิ้นสุดเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกจนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่านั้น โดยมีตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาดังนี้



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบลดความชื้นข้าวเปลือก

ก) ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น และความชื้นหลังให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

ระดับตัวแปร 3 ระดับ 20 25 และ 30%wb

ข) เวลาในการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

ระดับตัวแปร 3 ระดับ 2 4 และ 6 นาที

(ใช้ระดับความเข้มของรังสีอินฟราเรด 2.58 ไมโครเมตรหรือ 850 °C)

ค) เวลาที่ใช้ในการเทมเปอร์ริง ในภาชนะอับอากาศ

ระดับตัวแปร 3 ระดับ 0 30 และ 60 นาที

ง) เวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อน

ระดับตัวแปร 3 ระดับอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 13-15%wb

ค่าชี้ผลการศึกษา

ค่าชี้ผลในขั้นตอนนี้จะใช้ ข้อมูลคุณภาพการสีข้าวที่สำคัญ ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว (Head rice yield) และค่าเปอร์เซ็นต์ความขาวของข้าวสาร (Whiteness) โดยนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาเก็บรักษาไว้ประมาณ 7 วันก่อนนำไปตรวจสอบคุณภาพการสีเทียบกับข้าวเปลือกตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการทดสอบ โดยวิธีการตรวจสอบอ้างอิงตามวิธีมาตรฐานของสถาบันวิจัยข้าว และสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ โดยขั้นตอนหลักๆ ของการตรวจสอบเริ่มจากนำตัวอย่างข้าวเปลือก 150 กรัม มากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะข้าวเปลือก หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักข้าวกล้องที่ได้ จากนั้นไปขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาว จนได้ออกมาเป็นข้าวสารแล้วนำมาคัดขนาดเพื่อแยกข้าวหักออกจากต้นข้าวก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นนำข้าวสารมาวัดค่าดัชนีความขาวด้วยเครื่องวัดค่าดัชนีความขาว แล้วคำนวณหาค่าคุณภาพข้าวตามวิธีการมาตรฐาน

$$\text{เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว} = \frac{\text{ปริมาณต้นข้าว} \times 100 \%}{\text{ปริมาณข้าวเปลือก}} \quad (3)$$

ค่าชี้ผลในขั้นตอนนี้จะใช้ ข้อมูลคุณภาพการสีข้าวที่สำคัญ ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว (Head rice yield) และค่าเปอร์เซ็นต์ความขาวของข้าวสาร (Whiteness) โดยแสดงในลักษณะค่าสัมพัทธ์เทียบกับตัวอย่างข้าวอ้างอิงที่ไม่ผ่านการทดสอบ ประกอบ

ก) ค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (Relative head rice yield, RHY)

ข) ค่าเปอร์เซ็นต์ความขาวข้าวสารสัมพัทธ์ (Relative whiteness, RW)

ซึ่งการอธิบายผลการทดสอบนอกจากการแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพการสีข้าวจากผลของตัวแปรต่างๆ ที่ทดสอบว่ามีค่าการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเทียบกับคุณภาพการสีอ้างอิงแล้ว ค่าคุณภาพการสีสัมพัทธ์จะนำมาวิเคราะห์เพื่อแสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ร่วมกันโดยใช้การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM)

โดยการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองนั้นเป็นเทคนิคทางสถิติศาสตร์สำหรับพัฒนาสมการจากการทดลอง (Box, Draper, 1987) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อระดับอุณหภูมิ ซึ่งที่ผ่านมา RSM ได้ถูกประยุกต์ใช้ในงานวิจัยมากมาย อาทิ Madamba, Yabes (2005) ทดสอบและคำนวณหาเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกที่เหมาะสม Bello et al. (2006) ศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพการสีและคุณภาพการหุงต้มของข้าวหลังผ่านการทำให้ไธโรเทอร์มอลทรีตเมนต์เป็นต้น ดังนั้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต้นต่างๆ ที่กำหนดที่มีผลต่อคุณภาพการสี ซึ่งจะทำให้สามารถหารูปแบบของระบบการอบแห้งที่เหมาะสมและเลือกระดับของตัวแปรต่างๆ ทั้งเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เหมเปอร์รี้งและการอบแห้งด้วยลมร้อนได้ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงตัวเลขของตัวแปรต้นที่กระทำต่อตัวแปรตามคือคุณภาพการสี แล้วใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยทำให้ได้สมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยรูปแบบของสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษาซึ่งหมายถึงคุณภาพการสีเป็นค่าตอบสนองที่สังเกต (Response variable, Y) จะมีความสัมพันธ์แปรผันตามตัวแปรต่างๆ ที่ศึกษา (Working variables,  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ ) ด้วยรูปแบบสมการทั่วไปที่ใช้จะเป็นความสัมพันธ์ในลักษณะสมการเชิงเส้นโค้งกำลังสอง หรือ Quadratic equation ดังนี้

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

|       |          |                                                         |
|-------|----------|---------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $a_0$    | = ค่าคงที่                                              |
|       | $a_i$    | = ค่าคงที่ของผลเชิงเส้นตรง (Linear effects)             |
|       | $a_{ii}$ | = ค่าคงที่ของผลเชิงเส้นโค้ง (Quadratic effects)         |
|       | $a_{ij}$ | = ค่าคงที่ของผลของปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction effect) |

ลักษณะการตอบสนองต่อปัจจัยดังกล่าวสามารถอธิบายโดยการสร้างกราฟ Contour ทั้งแบบ 2 และ 3 มิติ ซึ่งความลาดชันของเส้นโค้งในกราฟจะแสดงให้เห็นว่าปัจจัยหรือตัวแปรต้นทั้งความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก เวลาในการอบให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด เวลาในการเหมเปอร์รี้ง และอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อน ที่มีอิทธิพลต่อค่าชี้ผลต่างๆ ในที่นี้คือค่าคุณภาพการสีข้าวอย่างไร โดยกราฟแสดงผลตอบสนองของคุณภาพการสีนั้น สามารถแสดงค่าตัวแปรต้นได้เพียง 2 ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเพียง 1 ตัวแปรเท่านั้น ดังนั้นหากจะพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมดเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสม จำเป็นสร้างกราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยที่ละคู่จนครบและครบทุกตัวแปรตาม การพิจารณากราฟจำนวนมากจึงอาจยุ่งยากในการพิจารณาค่าระดับของตัวแปรที่เหมาะสม เช่นเมื่อเพิ่มหรือลดระดับของปัจจัยบางตัว อาจทำให้คุณภาพการสีข้าวต่ำลง การหาขอบเขตหรือค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาพร้อมกันทั้งหมดจึงจะสามารถกำหนดระดับที่เหมาะสมได้ ดังนั้น ต้องนำกราฟแต่ละกราฟมาซ้อนทับกัน

(Contour overlay) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทุกตัวที่กระทำต่อคุณภาพการสีข้าวทุกตัว วิธีการนี้ มักนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีหลายปัจจัยและหลายค่าชี้ผลเพื่อหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมที่สุด (Madamba, Yabes 2005; Singh et al. 2006; Wang et al. 2006) โดยที่ เพื่อให้สามารถนำกราฟมาซ้อนทับกันได้ จำเป็นต้องปรับค่าในแต่ละแกนให้เป็นค่าเดียวกันก่อน ซึ่งตัวแปรต้นทุกตัว ( $X_i$ ) จะถูกปรับให้เป็นค่ารหัส (Coded value,  $x_i$ ) มีค่าปัจจัยต่ำสุดและสูงสุดอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 จากสมการ

$$x_i = \frac{X_i - X_{i(\text{mean})}}{X_{i(\text{mean})} - X_{i(\text{min})}} \quad (5)$$

เมื่อ  $X_i$  = ตัวแปรที่ศึกษาซึ่งเป็นตัวแปรต้นมีจำนวนเท่ากับ  $i$  ตัวแปร  
 $X_{i(\text{mean})}$  = ค่าเฉลี่ยของตัวแปร  $i$  นั้นๆ  
 $X_{i(\text{min})}$  = ค่าระดับต่ำสุดของปัจจัย  $i$

## ผลการทดลอง

### 1) ผลการพัฒนาและสร้างชุดทดสอบการลดความชื้น

เพื่อทดสอบกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการใช้รังสีอินฟราเรด และการเทมเปอร์ริง ร่วมกับลมร้อน ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้พัฒนาอุปกรณ์ทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการขึ้นประกอบด้วย

#### ก) อุปกรณ์ให้ความร้อนข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด

อุปกรณ์ให้ความร้อนข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดในการศึกษานี้ได้พัฒนาต่อเนื่องจาก Laohavanich, J and Wongpichet, S (2009) ซึ่งเป็นการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วย Gas-fired Infrared Dryer (GID) ที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงกำเนิดความร้อน มีค่าความยาวคลื่นสูงสุดหรือ Maximum peak wave length,  $\lambda_{\max}$  อยู่ระหว่าง 2 – 3  $\mu\text{m}$  (อุณหภูมิผิววัตถุร้อนประมาณ 700 – 900 °C) โดยอุปกรณ์หลักประกอบด้วย (ภาพที่ 4)

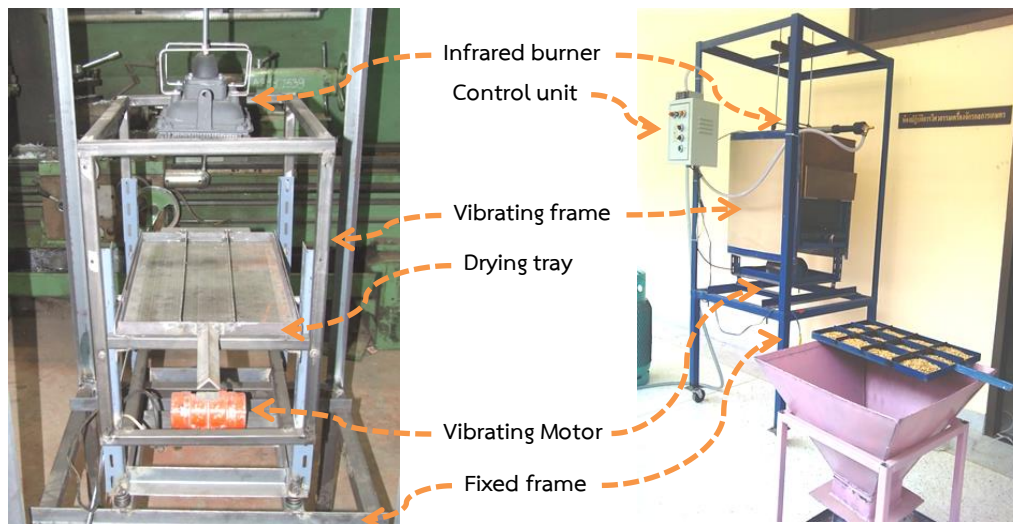
- โครงสร้างเหล็กกล่องขนาด 0.04 x 0.04 ม. ส่วนบนสุดของโครงเครื่องเป็นตำแหน่งติดตั้งชุดยึดและปรับระดับสูงต่ำของหลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรด

- หลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดชนิดใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงติดตั้งอยู่ด้านบนสุด มีชุดควบคุมอุณหภูมิเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิผิวของหลอด เพื่อให้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิปรับค่าตั้งค่าความยาวคลื่นสูงสุดให้คงที่ตลอดการทดสอบ

- ห้องอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 0.45 x 0.60 x 0.90 ม. ตามลำดับ สร้างจากเหล็กกล่องขนาด 0.02 x 0.02 ม. ติดตั้งอยู่บนฐานสปริงที่มีระบบสั่นสะเทือน ส่วนผนังด้านข้างเป็นผนังแผ่นอะลูมิเนียมสามด้านช่วยในการสะท้อนรังสี และอีกด้านหนึ่งติดตั้งบานเปิดเพื่อนำวัตถุดิบเข้าและออกจากห้องอบแห้ง โดยห้องอบแบบเป็นวงวนนี้ออกแบบระบบการไหลของอากาศแวดล้อมผ่านห้องอบเป็นแบบอิสระจากช่องด้านล่างซึ่งเป็นอากาศเย็นแล้วลอยตัวขึ้นสูงตามอากาศร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง LPG ออกทางช่องด้านบน

- ภาชนะใส่วัสดุอบแห้งขนาด 0.4 x 0.5 ม. ติดตั้งอยู่ด้านล่างห่างจากหลอด 0.40 ม. ภายในห้องอบแห้ง ซึ่งในระหว่างการอบแห้งระบบสั่นสะเทือนจะทำให้วัสดุเกิดการพลิกไปมาระหว่างการอบแห้งทำให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ

ในการใช้งานสำหรับการทดสอบจะทำการเปิดเครื่องอบแห้งอินฟราเรดให้อยู่ในสภาวะการทำงานที่เสถียรก่อนเป็นเวลาประมาณ 5 นาที ก่อนนำภาชนะใส่ตัวอย่างเข้าห้องอบแห้ง เมื่อทำการทดสอบจะใส่ภาชนะที่บรรจุวัตถุดิบและยึดให้แน่นก่อนเปิดระบบสั่นที่ติดตั้งมอเตอร์สั่นสะเทือนไว้ที่ด้านล่างของฐานสั่น เมื่อทดสอบจนถึงระดับเวลาที่กำหนดจะปิดระบบสั่นและนำตัวอย่างข้าวเปลือกออกจากห้องอบเพื่อนำไปตรวจวัดค่าต่อไป



ภาพที่ 4 อุปกรณ์ให้ความร้อนข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด

#### ข) อุปกรณ์เทมเปอร์ริงข้าวเปลือก

วิธีการเทมเปอร์ริงในการศึกษาครั้งนี้เลือกวิธีการ บรรจุข้าวเปลือกที่ผ่านขั้นตอนการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดใส่ภาชนะอับอากาศ แล้วนำไปควบคุมอุณหภูมิโดยนำภาชนะใส่ในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ประมาณ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของเมล็ดข้าวเปลือกภายหลังจากผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและหากใช้อุณหภูมิสูงเกินไปอาจเป็นสาเหตุทำให้มีเมล็ดแตกร้าวเพิ่มในระหว่างการเทมเปอร์ริงได้ โดยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบเป็นงวด (Batch type hot air dryer, BHD) สำหรับการทดสอบนี้ใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง มีตู้อบขนาด 0.75x0.90x1.2 ม. ควบคุมอุณหภูมิลมร้อนด้วย Temperature controller ติดตั้งพัดลมใช้มอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า สามารถใส่ถาดอบได้ 10 ถาด (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 อุปกรณ์เทมเปอร์ริงข้าวเปลือกในภาชนะอับอากาศและเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อน

### ค) อุปกรณ์อบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อน

ขั้นตอนสุดท้ายสำหรับการศึกษานี้คือการนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและนำไปเทมเปอร์ริ่งแล้วมาลอบความชื้นต่อด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนจนกระทั่งข้าวเปลือกเหลือความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 14% wb. (ภาพที่ 5) อุปกรณ์อบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อนแบบเป็นงวด) โดยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบเป็นงวด (Batch type hot air dryer, BHD) สำหรับการทดสอบนี้ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 15000 วัตต์ มีตู้อบขนาด 0.90x0.90x1.5 ม. ควบคุมอุณหภูมิลมร้อนด้วย Temperature controller ติดตั้งพัดลมใช้มอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า สามารถใส่ถาดอบได้ 10 ถาด

## 2) ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากการลดความชื้นด้วยรังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริ่ง และลมร้อน

ผลการศึกษากระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการใช้รังสีอินฟราเรดและการเทมเปอร์ริ่ง ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้น ( $m_c$ ) และอุณหภูมิของข้าวเปลือก ( $g_r$ ) ณ เวลาใดๆ จากเงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ ซึ่งแบ่งการอธิบายผลการศึกษาเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกเฉพาะในขั้นตอนการใช้รังสีอินฟราเรดอบแห้งเนื่องจากใช้ระยะเวลาสั้นหากอธิบายรวมทั้งกระบวนการจะทำให้ไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน ส่วนที่ 2 ผลการศึกษาการอบแห้งทั้งกระบวนการคือ ใช้รังสีอินฟราเรดและการเทมเปอร์ริ่ง ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

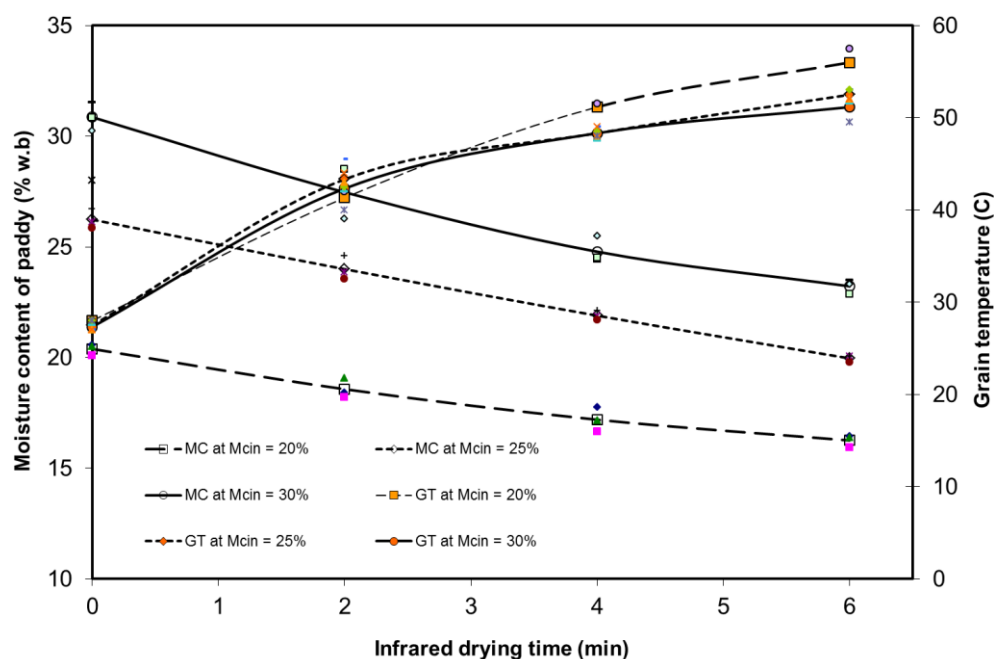
กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกในขั้นตอนการใช้รังสีอินฟราเรด ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกในการลดความชื้นข้าวเปลือก 3 ระดับความชื้นเริ่มต้นคือ 20 25 และ 30%wb จากการอบแห้ง 2 4 และ 6 นาที สามารถแสดงผลการศึกษาได้ตามภาพที่ 6 โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้นพบว่ามีความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการทดสอบ โดยในช่วงแรกความชื้นของข้าวเปลือกมีความชื้นของอัตราการลดลงอย่างมากในช่วง 2 นาทีแรก โดยมีอัตราการลดลงของความชื้นต่อเวลา 1 นาทีเท่ากับ 1.70 1.12 และ 0.91 %wb ในเงื่อนไขของความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 30 25 และ 20 %wb ตามลำดับ ส่วนช่วงเวลาการอบแห้งต่ออัตราการลดลงของความชื้นมีค่าเท่ากับ 1.06 1.01 และ 0.58 % ในเงื่อนไขของความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 30 25 และ 20 %wb ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเป็นอัตราการลดลงที่ต่ำกว่าช่วงแรกของการอบแห้งเนื่องจากความชื้นบริเวณส่วนด้านนอกของเมล็ดข้าวเปลือกได้ระเหยออกไปแล้วและเข้าสู่ช่วงการอบแห้งที่ต้องดึงเอาความชื้นจากด้านในเมล็ดออกมา

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอบแห้งโดยช่วงเวลา 2 นาทีแรกของการอบแห้งอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกต่อเวลา 1 นาทีเท่ากับ 7.5 7.92 และ 6.67 °C ในเงื่อนไขของความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 30 25 และ 20 %wb ตามลำดับซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อผ่านช่วงเวลาแรกของการอบแห้งแล้วนั้น อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกต่อเวลา 1 นาทีจะมีค่าเท่ากับ 4.42 4.58 และ 7.73 °C ในเงื่อนไขของความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 30 25 และ 20 %wb ตามลำดับ โดยจะพบว่าในกรณีความชื้นเริ่มต้นต่ำจะมีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดสูงกว่ากรณีอื่นเนื่องจากมีสัดส่วนของน้ำในเมล็ดน้อยกว่าจึงทำให้พลังงานความร้อนที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำในเมล็ดได้ในอัตราที่สูงกว่า

สำหรับอุณหภูมิของเมล็ดเมื่อผ่านการอบแห้งนั้นจะมีค่าประมาณ 50-55 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นระดับที่ใกล้เคียงกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่เป็นเทคนิคที่มีใช้แพร่หลายในปัจจุบัน

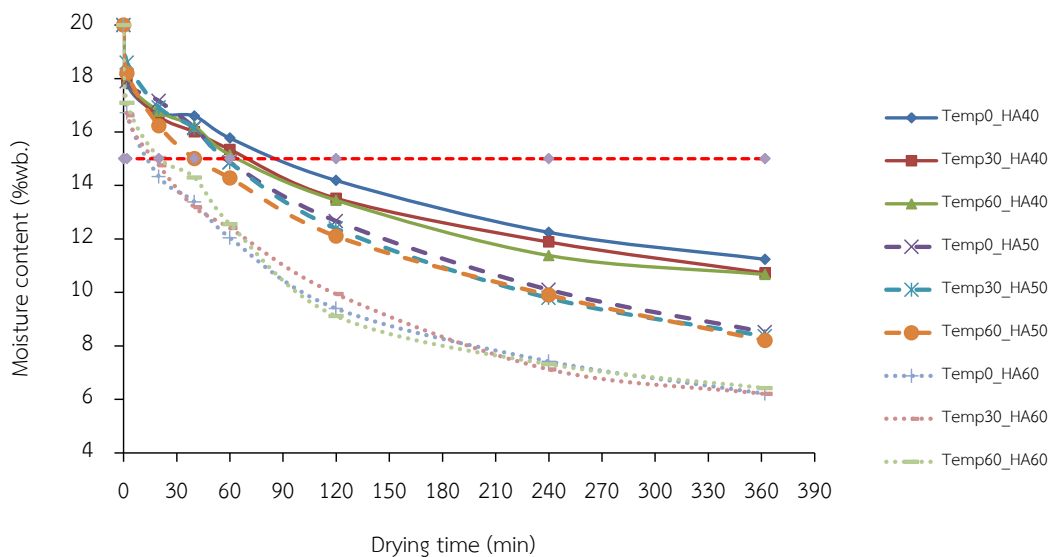
2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ร่วมกับการเทมเปอร์ริงและลมร้อน

การเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือก ในการอบแห้งต่อเนื่องทั้ง 3 ขั้นตอนด้วยรังสีอินฟราเรดการเทมเปอร์ริงร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ โดยได้แสดงข้อมูลไว้ในตารางผนวกที่ ก 3 ซึ่งได้นำมาแสดงผลการทดสอบเฉพาะการเปลี่ยนแปลงในช่วงของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและต่อกราฟด้วยช่วงการอบแห้งด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อน

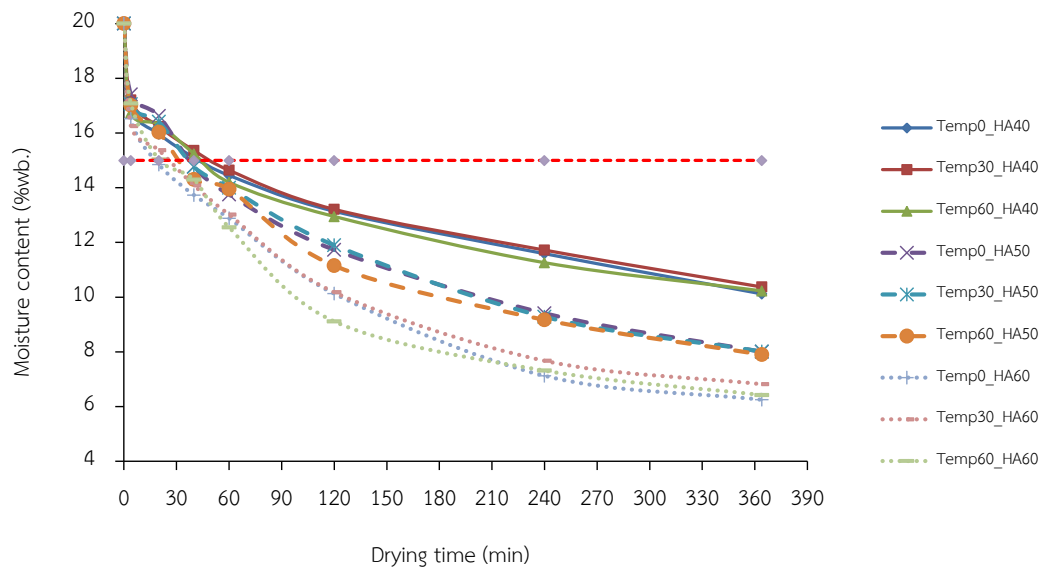


ภาพที่ 6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกเทียบกับเวลาจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ระดับความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 20 25 และ 30 %wb

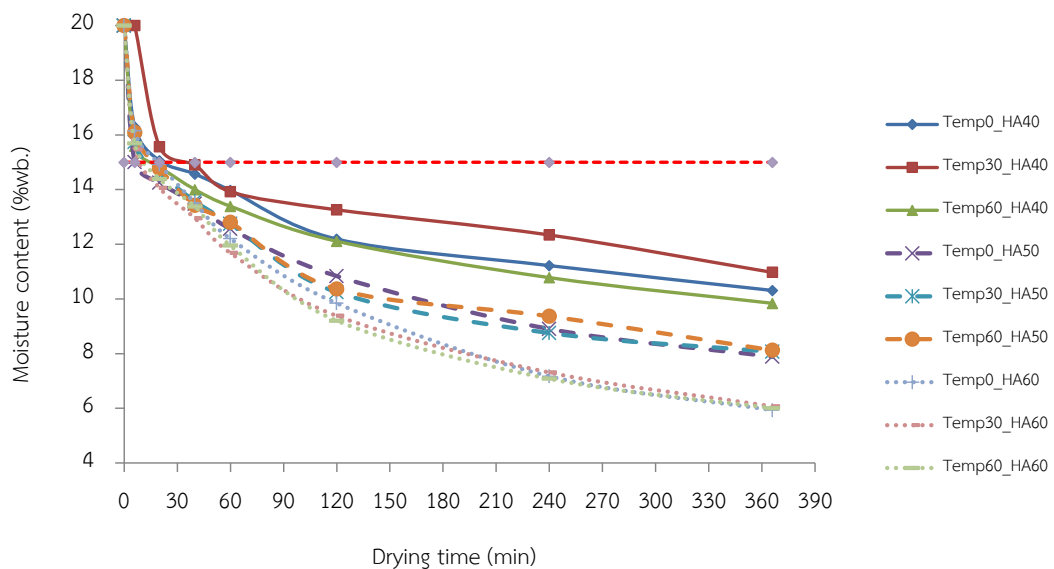
ดังแสดงในภาพที่ 7 ถึง 15 ซึ่งแสดงผลการทดสอบที่ระดับความชื้นเริ่มต้นและเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดระดับต่างๆ ด้วยการไม่แสดงเวลาในการเทมเปอร์ริงในเวลารวมของการอบแห้งตามแกน X ซึ่งจะเป็นเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแล้วต่อเชื่อมด้วยเวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งกราฟได้แสดงผลของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ส่งผลชัดเจนและรวดเร็วในการลดความชื้นข้าวเปลือก โดยเฉพาะเวลาในการอบแห้ง 6 นาทีที่สามารถลดความชื้นลงได้อย่างมากก่อนส่งผ่านไปขั้นตอนการเทมเปอร์ริงและอบแห้งด้วยลมร้อนในขั้นตอนต่อมา ส่วนอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งก็ส่งผลชัดเจนเช่นเดียวกันโดยเฉพาะการใช้อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C .ในกรณีอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 20 %wb ให้เวลาที่ใช้ในการลดความชื้นน้อยกว่ากรณีการใช้อุณหภูมิ 50 และ 40°C ส่วนผลของการเทมเปอร์ริงส่งผลต่อการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกหลังจากผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดใกล้เคียงกันในทุกเงื่อนไขที่ทดสอบ อย่างไรก็ตามขั้นตอนการเทมเปอร์ริงยังถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการรักษาคุณภาพการสีของข้าวเปลือกในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะได้กล่าวถึงในผลการทดลองขั้นตอนต่อไป



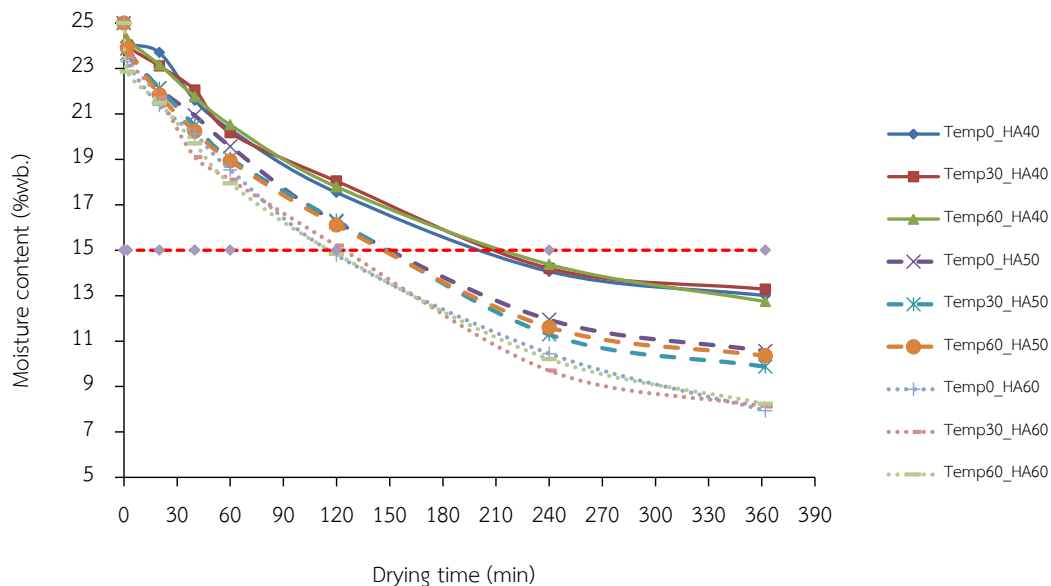
**ภาพที่ 7** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกเทียบกับเวลาอบแห้งด้วยเงื่อนไขการทดสอบที่ ความชื้นเริ่มต้น 20 %wb รังสีอินฟราเรด 2 นาที เทมเปอร์ริง 0 30 และ 60 นาที และอบแห้งด้วยลมร้อน 300 นาที



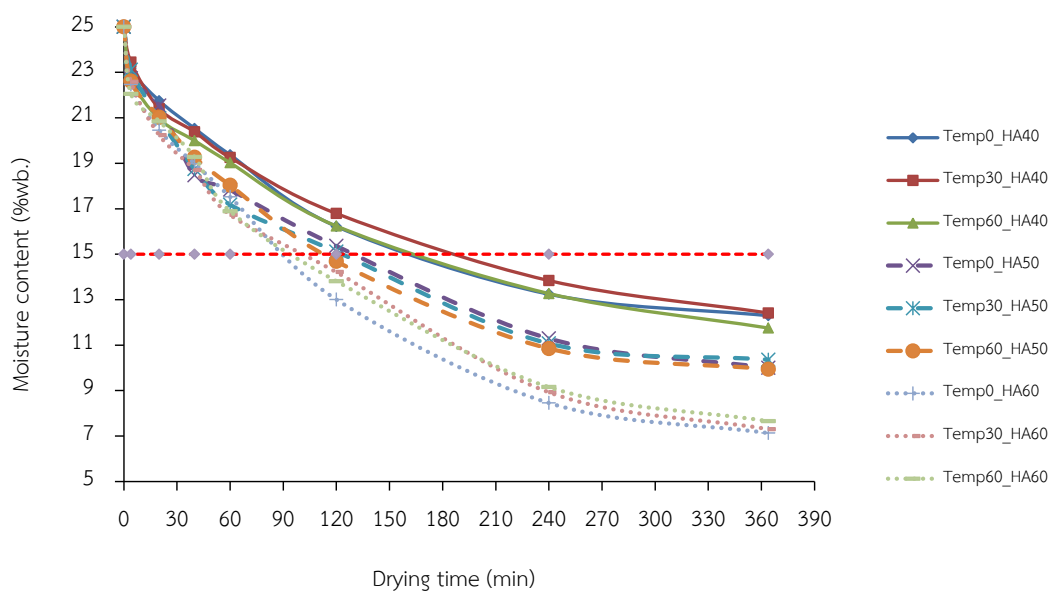
**ภาพที่ 8** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกเทียบกับเวลาอบแห้งด้วยเงื่อนไขการทดสอบที่ ความชื้นเริ่มต้น 20 %wb รังสีอินฟราเรด 4 นาที่ เหมเปอร์ริง 0 30 และ 60 นาที่ และอบแห้งด้วยลมร้อน 300 นาที่



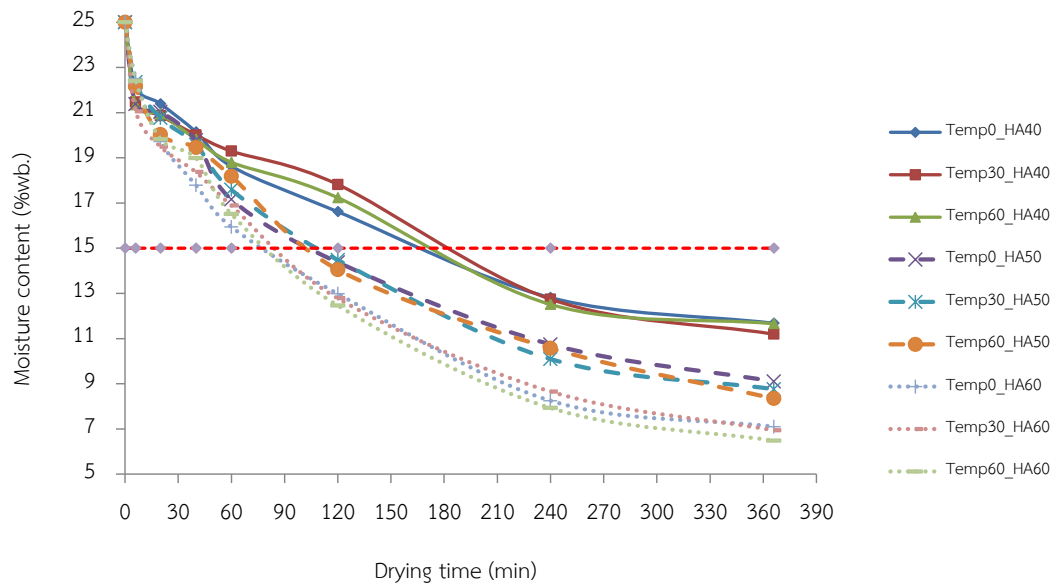
**ภาพที่ 9** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกเทียบกับเวลาอบแห้งด้วยเงื่อนไขการทดสอบที่ ความชื้นเริ่มต้น 20 %wb รังสีอินฟราเรด 6 นาที่ เหมเปอร์ริง 0 30 และ 60 นาที่ และอบแห้งด้วยลมร้อน 300 นาที่



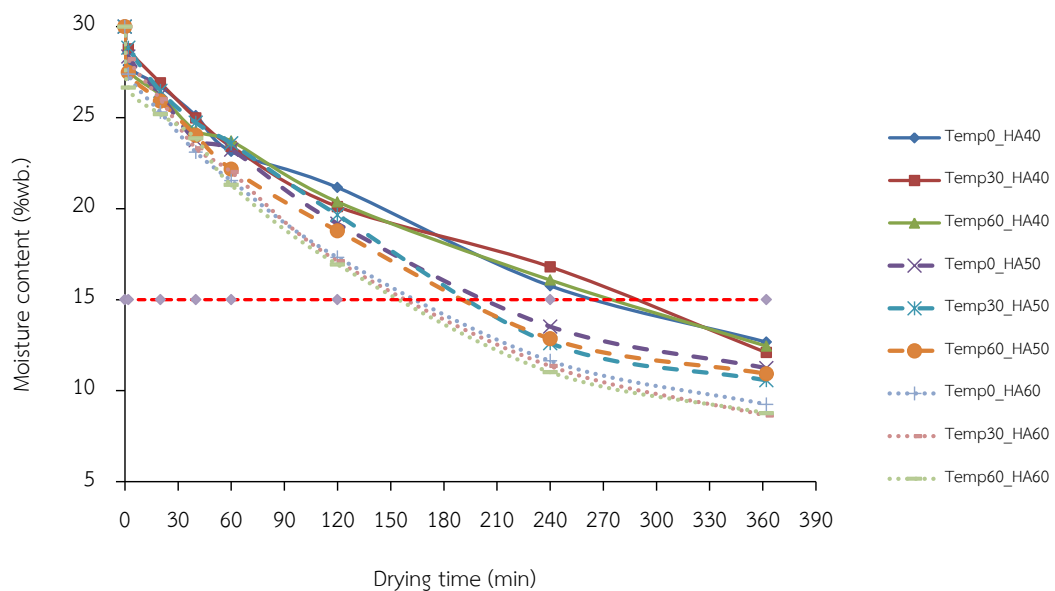
ภาพที่ 10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกเทียบกับเวลาอบแห้งด้วย  
เงื่อนไขการทดสอบที่ ความชื้นเริ่มต้น 25 %wb รังสีอินฟราเรด 2 นาที่ เทมเปอร์เจอร์ 0 30  
และ 60 นาที่ และอบแห้งด้วยลมร้อน 300 นาที่



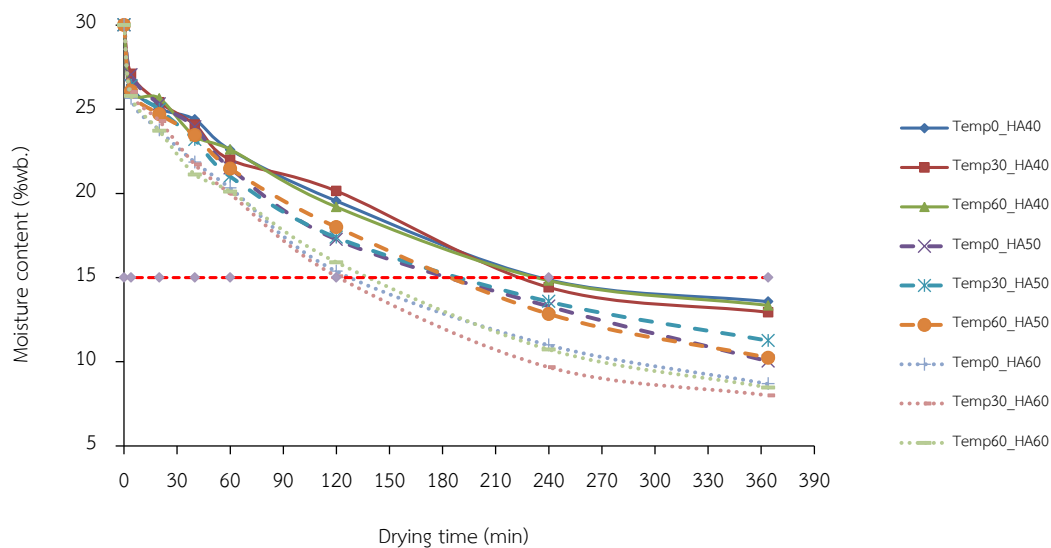
ภาพที่ 11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกเทียบกับเวลาอบแห้งด้วย  
เงื่อนไขการทดสอบที่ ความชื้นเริ่มต้น 25 %wb รังสีอินฟราเรด 4 นาที่ เทมเปอร์เจอร์ 0 30  
และ 60 นาที่ และอบแห้งด้วยลมร้อน 300 นาที่



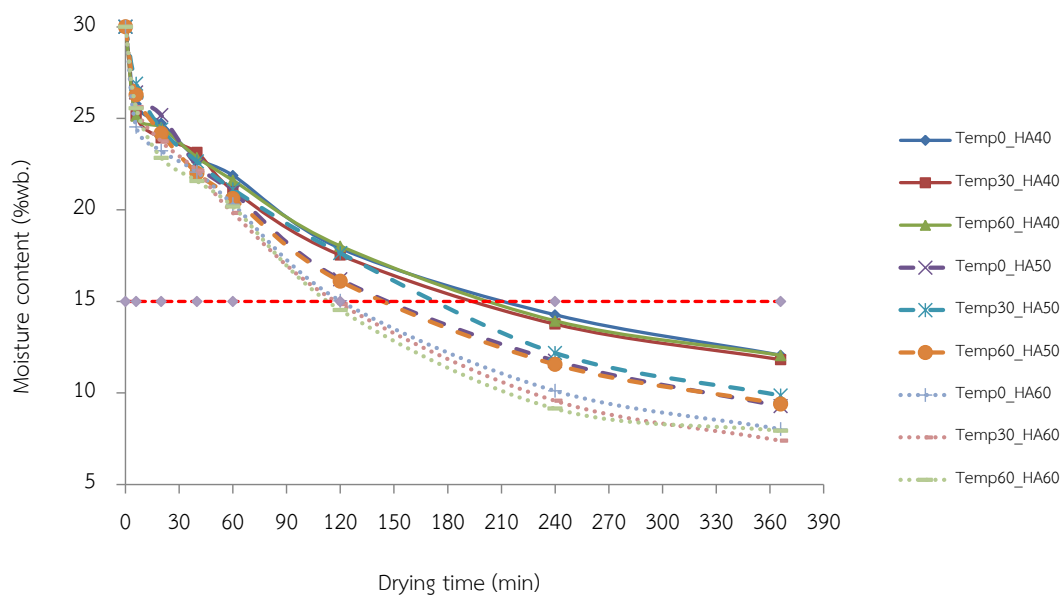
ภาพที่ 12 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกเทียบกับเวลาอบแห้งด้วย  
เงื่อนไขการทดสอบที่ ความชื้นเริ่มต้น 25 %wb รังสีอินฟราเรด 6 นาที เทมเปอร์ริ่ง 0  
30 และ 60 นาที และอบแห้งด้วยลมร้อน 300 นาที



ภาพที่ 13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกเทียบกับเวลาอบแห้งด้วย  
เงื่อนไขการทดสอบที่ ความชื้นเริ่มต้น 30 %wb รังสีอินฟราเรด 2 นาที เทมเปอร์ริ่ง 0  
30 และ 60 นาที และอบแห้งด้วยลมร้อน 300 นาที



ภาพที่ 14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกเทียบกับเวลาอบแห้งด้วย  
เงื่อนไขการทดสอบที่ ความชื้นเริ่มต้น 30 %wb รังสีอินฟราเรด 4 นาที่ เทมเปอร์ริ่ง 0 30  
และ 60 นาที่ และอบแห้งด้วยลมร้อน 300 นาที่



ภาพที่ 15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิข้าวเปลือกเทียบกับเวลาอบแห้งด้วย  
เงื่อนไขการทดสอบที่ ความชื้นเริ่มต้น 30 %wb รังสีอินฟราเรด 6 นาที่ เทมเปอร์ริ่ง 0 30  
และ 60 นาที่ และอบแห้งด้วยลมร้อน 300 นาที่

เวลาโดยรวมในการอบแห้งนั้นจะอยู่ระหว่าง 1- 4 ชั่วโมงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความชื้นเริ่มต้น ซึ่งหากรวมเวลาในการอบแห้งทั้งกระบวนการแล้วพบว่าสามารถจะร่นระยะเวลาในการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการตากลานเพียงอย่างเดียวที่ต้องใช้เวลา 2 -3 วันได้เป็นอย่างดี

เวลาในการลดความชื้นที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับวิธีการตากลานแม้จะเป็นผลดีในแง่การลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ต้องใช้ อย่างไรก็ตามการจัดการที่เหมาะสมก็ยังคงคำนึงถึงคุณภาพการสีข้าวภายหลังที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วย ดังนั้นจึงต้องดำเนินการตรวจสอบและศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพข้าวให้สามารถหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้งานจริงได้ต่อไป

จุดประสงค์ของการทดสอบในขั้นตอนนี้เพื่อใช้ข้อมูลการทดสอบมากำหนดเวลาในการอบแห้งด้วยเทคนิคต่อเนื่องทั้งสามกระบวนการ แล้วศึกษาถึงคุณภาพข้าวภายหลังผ่านการอบแห้ง ดังนั้นการเลือกเงื่อนไขอบแห้งสำหรับการทดสอบในขั้นตอนต่อไปจะเลือกโดยอบแห้งด้วยกระบวนการทั้งหมดจนความชื้นข้าวเปลือกเหลือประมาณ 15 %wb จะหยุดกระบวนการอบแห้งซึ่งจากกราฟในภาพที่ 7 ถึง 15 โดยเส้นประที่ระดับความชื้นสุดท้ายที่ 15%wb เป็นเส้นที่ใช้แสดงระยะเวลาในการอบแห้งทั้งกระบวนการด้วยรังสีอินฟราเรด เหมเปอร์ริงและตากข้าวเปลือกบนลานจนกระทั่งถึงระดับที่เก็บรักษาหรือรอการสีได้ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการทดสอบในขั้นตอนการหาคุณภาพข้าวภายหลังการอบแห้งซึ่งจะกล่าวถึงในขั้นตอนต่อไปโดยเงื่อนไขการอบแห้งซึ่งเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการสีของข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วย รังสีอินฟราเรด เหมเปอร์ริง และลมร้อน ได้แสดงในภาคผนวกดังตารางที่ ก 4

### 3) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการสีของข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วย รังสีอินฟราเรด เหมเปอร์ริง และลมร้อน

เงื่อนไขการอบแห้งจากการศึกษาในขั้นตอนที่ 2.2 ทำให้สามารถเลือกเงื่อนไขของกระบวนการอบแห้งด้วย รังสีอินฟราเรด เหมเปอร์ริง และลมร้อน ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ ก 4 ในภาคผนวก ก เมื่อนำมาใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการสีของข้าวเปลือกทำให้ได้ผลดังแสดงไว้ในผนวก ข 1 และได้สรุปข้อมูลคุณภาพการสีดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคุณภาพการสีของข้าวเปลือกอ้างอิงที่ลดความชื้นด้วยวิธีตากผึ่งในร่ม ดังข้อมูลในตารางผนวก ข 2 โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวอยู่ระหว่าง 36-40 % ค่าความขาว 42-44 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาพบว่า มีผลการศึกษาส่วนหนึ่งได้ผลด้านคุณภาพการสีอยู่ในเกณฑ์เทียบเท่ารวมถึงดีกว่าค่าอ้างอิงซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษากับงานวิจัยของ Laohavanich J and Wongpichet S. (2009) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการคุณสมบัติของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เหมเปอร์ริงและเป่าด้วยลมธรรมชาติ โดยเฉพาะในกรณีที่ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นสูง (25 %wb ขึ้นไป) ส่วนกรณีความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นไม่สูงมาก (20 %wb) ผลการอบแห้งก็จะพบการแตกหักสูงเช่นเดียวกัน

**ตารางที่ 1** ค่าเฉลี่ยคุณภาพการสีข้าวเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งในการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก  
ด้วยรังสีอินฟราเรด เหมเปอริ่ง และลมร้อน

| ความชื้นข้าวเปลือก<br>เริ่มต้น (%wb) | อินฟราเรด (min) | เหมเปอริ่ง (min) | อุณหภูมิลมร้อน<br>( C ) | เวลาในการอบแห้ง<br>ด้วยลมร้อน (min) | ต้นข้าว (%) | ความขาว<br>ข้าวสาร |
|--------------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------|--------------------|
| 20                                   | 2               | 0                | 40                      | 0                                   | 34.37       | 46.50              |
|                                      | 2               | 30               |                         | 0                                   | 33.44       | 44.70              |
|                                      | 2               | 60               |                         | 0                                   | 34.21       | 43.90              |
| 20                                   | 4               | 0                |                         | 0                                   | 32.13       | 45.90              |
|                                      | 4               | 30               |                         | 0                                   | 31.68       | 44.70              |
|                                      | 4               | 60               |                         | 0                                   | 32.15       | 43.90              |
| 20                                   | 6               | 0                |                         | 0                                   | 30.10       | 45.10              |
|                                      | 6               | 30               |                         | 0                                   | 28.56       | 44.80              |
|                                      | 6               | 60               |                         | 0                                   | 29.10       | 43.70              |
| 20                                   | 2               | 0                | 50                      | 0                                   | 31.52       | 45.90              |
|                                      | 2               | 30               |                         | 0                                   | 32.57       | 44.30              |
|                                      | 2               | 60               |                         | 0                                   | 32.06       | 43.70              |
| 20                                   | 4               | 0                |                         | 0                                   | 31.68       | 44.90              |
|                                      | 4               | 30               |                         | 0                                   | 33.11       | 44.10              |
|                                      | 4               | 60               |                         | 0                                   | 32.37       | 43.70              |
| 20                                   | 6               | 0                |                         | 0                                   | 28.81       | 44.80              |
|                                      | 6               | 30               |                         | 0                                   | 28.37       | 45.20              |
|                                      | 6               | 60               |                         | 0                                   | 28.82       | 43.90              |
| 20                                   | 2               | 0                | 60                      | 0                                   | 22.96       | 45.10              |
|                                      | 2               | 30               |                         | 0                                   | 23.53       | 44.30              |
|                                      | 2               | 60               |                         | 0                                   | 24.11       | 44.80              |
| 20                                   | 4               | 0                |                         | 0                                   | 23.44       | 44.70              |
|                                      | 4               | 30               |                         | 0                                   | 24.68       | 44.10              |
|                                      | 4               | 60               |                         | 0                                   | 25.68       | 43.80              |
| 20                                   | 6               | 0                |                         | 0                                   | 23.93       | 43.70              |
|                                      | 6               | 30               |                         | 0                                   | 24.27       | 44.90              |
|                                      | 6               | 60               |                         | 0                                   | 24.45       | 42.70              |

ตารางที่ 1 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยคุณภาพการสีข้าวเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งในการทดสอบอบแห้ง  
ข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด เหมเปอร์ริง และลมร้อน

| ความชื้นข้าวเปลือก<br>เริ่มต้น (%wb) | อินฟราเรด (min) | เหมเปอร์ริง (min) | อุณหภูมิลมร้อน<br>( C ) | เวลาในการอบแห้ง<br>ด้วยลมร้อน (min) | ต้นข้าว (%) | ความขาว<br>ข้าวสาร |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------|--------------------|
| 25                                   | 2               | 0                 | 40                      | 120                                 | 44.44       | 43.90              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 120                                 | 44.59       | 42.70              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 120                                 | 44.99       | 41.30              |
| 25                                   | 4               | 0                 |                         | 120                                 | 46.48       | 43.20              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 120                                 | 47.28       | 41.30              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 120                                 | 46.25       | 41.50              |
| 25                                   | 6               | 0                 |                         | 120                                 | 40.82       | 42.10              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 120                                 | 41.72       | 41.70              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 120                                 | 41.57       | 40.30              |
| 25                                   | 2               | 0                 | 50                      | 120                                 | 41.53       | 44.30              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 120                                 | 42.31       | 42.50              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 120                                 | 41.77       | 42.00              |
| 25                                   | 4               | 0                 |                         | 120                                 | 43.15       | 43.20              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 120                                 | 44.84       | 42.10              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 120                                 | 44.28       | 41.30              |
| 25                                   | 6               | 0                 |                         | 120                                 | 37.78       | 41.90              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 120                                 | 38.65       | 41.10              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 120                                 | 37.75       | 40.30              |
| 25                                   | 2               | 0                 | 60                      | 120                                 | 38.45       | 44.70              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 120                                 | 38.00       | 42.60              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 120                                 | 37.09       | 42.30              |
| 25                                   | 4               | 0                 |                         | 60                                  | 42.28       | 42.70              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 60                                  | 42.47       | 41.30              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 60                                  | 41.46       | 40.80              |
| 25                                   | 6               | 0                 |                         | 60                                  | 36.47       | 42.60              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 60                                  | 37.84       | 41.00              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 60                                  | 36.15       | 41.00              |

**ตารางที่ 1 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยคุณภาพการสีข้าวเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งในการทดสอบอบแห้ง**  
ข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด เหมเปอร์ริง และลมร้อน

| ความชื้นข้าวเปลือก<br>เริ่มต้น (%wb) | อินฟราเรด (min) | เหมเปอร์ริง (min) | อุณหภูมิลมร้อน<br>( C ) | เวลาในการอบแห้ง<br>ด้วยลมร้อน (min) | ต้นข้าว (%) | ความขาว<br>ข้าวสาร |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------|--------------------|
| 30                                   | 2               | 0                 | 40                      | 240                                 | 41.44       | 43.10              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 240                                 | 43.43       | 42.00              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 240                                 | 42.84       | 41.50              |
| 30                                   | 4               | 0                 |                         | 180                                 | 42.66       | 41.50              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 180                                 | 42.03       | 40.00              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 180                                 | 41.06       | 40.30              |
| 30                                   | 6               | 0                 |                         | 180                                 | 41.26       | 40.50              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 180                                 | 43.44       | 39.10              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 180                                 | 43.14       | 38.70              |
| 30                                   | 2               | 0                 | 50                      | 180                                 | 42.89       | 42.80              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 180                                 | 43.51       | 41.00              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 180                                 | 42.43       | 40.70              |
| 30                                   | 4               | 0                 |                         | 120                                 | 42.87       | 42.60              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 120                                 | 42.70       | 41.20              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 120                                 | 40.73       | 40.50              |
| 30                                   | 6               | 0                 |                         | 120                                 | 39.07       | 40.20              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 120                                 | 38.22       | 38.70              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 120                                 | 38.70       | 38.30              |
| 30                                   | 2               | 0                 | 60                      | 120                                 | 40.37       | 43.10              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 120                                 | 41.17       | 41.80              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 120                                 | 40.65       | 41.30              |
| 30                                   | 4               | 0                 |                         | 120                                 | 39.84       | 42.70              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 120                                 | 39.61       | 42.10              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 120                                 | 38.22       | 40.60              |
| 30                                   | 6               | 0                 |                         | 120                                 | 34.75       | 39.70              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 120                                 | 36.57       | 37.30              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 120                                 | 36.69       | 37.50              |

เพื่อวิเคราะห์ผลการศึกษาจากการอบแห้งด้วยกระบวนการที่ทดสอบในขั้นตอนนี้ ซึ่งเป็นการลดความชื้นจากระดับความชื้นเริ่มต้นต่างๆ (20-30 %wb) จนมีความชื้นเหลือประมาณ 12-15 %wb นั้นขั้นตอนต่อไปจะนำผลการทดสอบที่ได้ไปวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเพื่ออธิบาย อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ในการทดสอบที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพการสีของข้าวเปลือก ทดสอบ โดยวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) โดย ระดับของตัวแปรที่ทดสอบ ( $X_i$ ) ทั้ง ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก เวลาในการอบแห้งด้วยรังสี อินฟราเรด เหมเปอร์ริงและการอบแห้ง จะต้องนำมาปรับให้เป็นค่ารหัส (Coded value,  $x_i$ ) ตาม

สมการที่ 4-2 โดยมีค่าปัจจัยต่ำสุดและสูงสุดอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 จากก่อนนำไปวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลตามสมการที่ 4-1 ดังแสดงในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** แสดงการปรับค่ารหัสของตัวแปรทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เหมเปอร์ริงและตากลานเพื่อตรวจสอบคุณภาพข้าว

| ตัวแปรทดสอบ                                             | Coded value, $X_i$ |      |     |     |     |
|---------------------------------------------------------|--------------------|------|-----|-----|-----|
|                                                         | -1                 | -0.5 | 0   | 0.5 | 1   |
| 1) ความชื้นเริ่มต้น $X_1$ หรือ MC (%wb)                 | 20                 | -    | 25  | -   | 30  |
| 2) ระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด $X_2$ หรือ IR (min) | 2                  | -    | 4   | -   | 6   |
| 3) อุณหภูมิลมร้อน $X_3$ หรือ HA ( $^{\circ}\text{C}$ )  | 40                 | -    | 50  | -   | 60  |
| 4) ระยะเวลาเหมเปอร์ริง $X_4$ หรือ Temp (min)            | 0                  | -    | 30  | -   | 60  |
| 5) ระยะเวลาอบแห้งด้วยลมร้อน $X_5$ หรือ HA_time (min)    | 0                  | 60   | 120 | 180 | 240 |

ในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสม โดยใช้การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต้นต่างๆ ที่กำหนดที่มีผลต่อคุณภาพการสี ซึ่งทำการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในลักษณะสมการเชิงเส้นโค้งกำลังสอง ตามรูปแบบสมการที่ 2 นั้น ด้วยการปรับค่ารหัสของตัวแปรทดสอบตามสมการที่ 3 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวตอบสนองในลักษณะค่าสัมพัทธ์เทียบกับตัวอย่างข้าวอ้างอิงที่ไม่ผ่านการทดสอบ ประกอบด้วย ค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (Relative head rice yield, RHY) และ ค่าเปอร์เซ็นต์ความขาวข้าวสารสัมพัทธ์ (Relative whiteness, RW) ดังแสดงในสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{RHY} = & 110.07 + (16.622X_1) - (4.445X_3) - (3.3875X_1 \cdot X_2) - (4.194X_1 \cdot X_3) + (5.45X_1 \cdot X_5) \\ & + (3.724X_2 \cdot X_3) + (6.656X_2 \cdot X_5) + (9.96X_3 \cdot X_5) - (14.618X_1^2) - (3.841X_2^2) - (2.853X_3^2) \end{aligned}$$

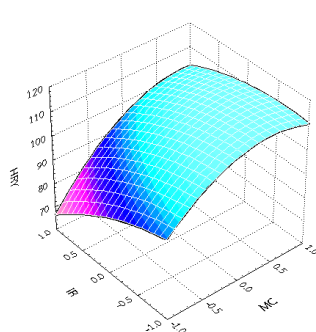
$$R^2 = 94.00 \%$$

$$\begin{aligned} \text{RW} = & 96.958 + (4.277X_1) - (2.188X_2) - (0.39X_3) - (2.012X_4) - (7.164X_5) - (4.251X_1 \cdot X_2) \\ & - (0.305X_1 \cdot X_4) - (0.557X_2 \cdot X_3) + (2.605X_2 \cdot X_5) - (4.448X_1^2) + (0.627X_4^2) + (4.662X_5^2) \end{aligned}$$

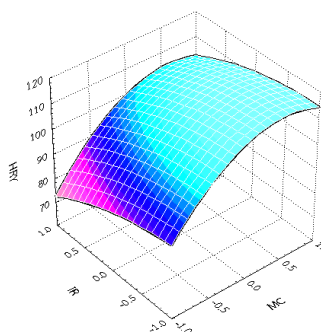
$$R^2 = 91.4 \%$$

เมื่อสร้างกราฟจากสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เพื่อแสดงผลต่อพื้นผิวตอบสนองในลักษณะของกราฟสามมิติของ ค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (ภาพที่ 16-20) และค่าเปอร์เซ็นต์ความขาวข้าวสารสัมพัทธ์ (ภาพที่ 21-25) เมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวอ้างอิง สามารถแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

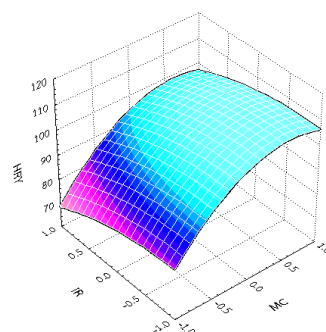
การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (RHY) จากภาพที่ 4. ถึง 11 โดยพบว่าระดับของตัวแปร  $X_1$  หรือความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิงในกรณีที่  $X_1$  มีค่าสูง ส่วนกรณี  $X_1$  มีค่าต่ำพบว่ามีความชื้นที่เกิดการแตกหักของข้าวเปลือกมากขึ้นเมื่อผ่านการอบแห้งในทุกเงื่อนไขซึ่งหมายถึงหากความชื้นเริ่มต้นต่ำ การใช้วิธีการอบแห้งที่ทดสอบอาจทำให้คุณภาพข้าวลดลงได้ หรือวิธีการนี้เหมาะสมสำหรับข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง สำหรับอิทธิพลของตัวแปร  $X_2$  ระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด หรือ IR (min) นั้นพบว่าค่าระดับของปัจจัยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพข้าวเช่นเดียวกันแต่ยังถือว่ามียิทธิพลน้อยกว่าความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น  $X_1$  สังเกตได้จากความชันของพื้นผิวในภาพหากชันมากหมายถึงมียิทธิพลต่อตัวแปรตามมากขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณี  $X_2$  พบว่าเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้ข้าวเปลือกมีการแตกหักสูงขึ้น ดังนั้นอาจต้องระมัดระวังในการใช้รังสีอินฟราเรดให้ความร้อนข้าวเปลือกไม่ให้นานเกินไป สำหรับตัวแปร  $X_3$  อุณหภูมิความร้อน หรือ HA ( $^{\circ}\text{C}$ )  $X_4$  ตัวแปรระยะเวลาเทมเปอร์ริง หรือ Temp (min) และ  $X_5$  ระยะเวลาอบแห้งด้วยลมร้อน หรือ HA\_time (min) พบว่ามียิทธิพลน้อยกว่า  $X_1$  และ  $X_2$  เมื่อสังเกตจากค่าความชันของกราฟแสดงพื้นผิวพื้นผิวตอบสนอง



HA 40 C

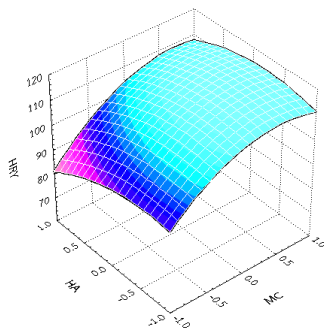


HA 50 C

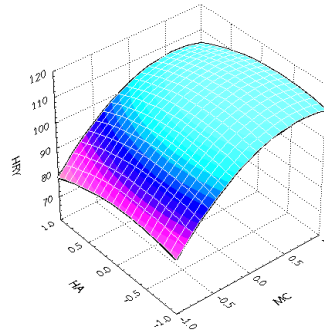


HA 60 C

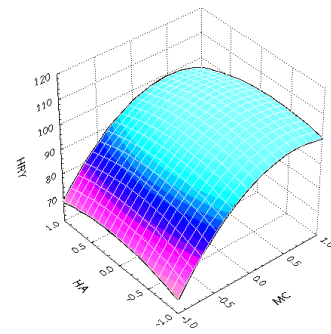
**ภาพที่ 16** กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (RHY) ที่ระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน (HA) 40 50 และ 60 $^{\circ}\text{C}$  ในฟังก์ชันของ ความชื้นเริ่มต้น  $X_1$  กับ ระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด  $X_2$  ที่ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง 60 นาที



IR 2

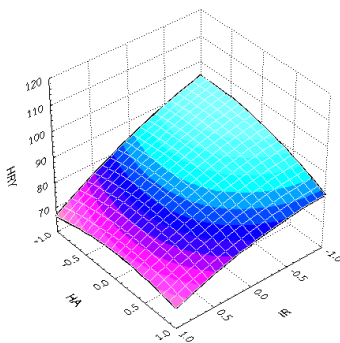


IR 4

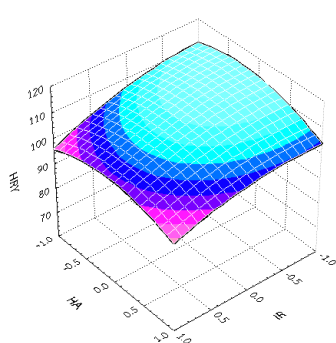


IR 6

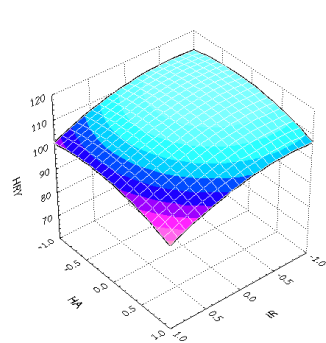
ภาพที่ 17 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (RHY) ที่ระดับเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (IR) 2 4 และ 6 นาที ในฟังก์ชันของความชื้นเริ่มต้น  $X_1$  กับ อุณหภูมิความร้อน  $X_3$  ที่ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง 60 นาที



MC 20

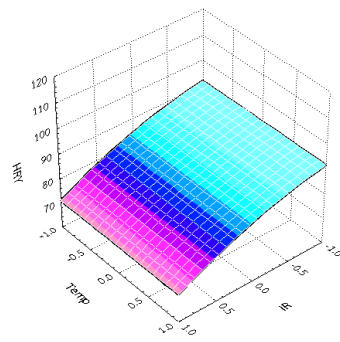


MC 25

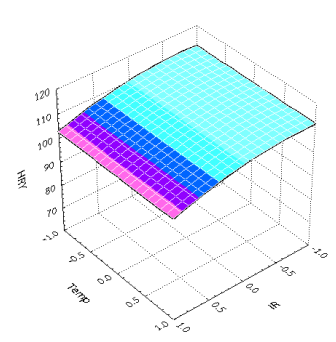


MC 30

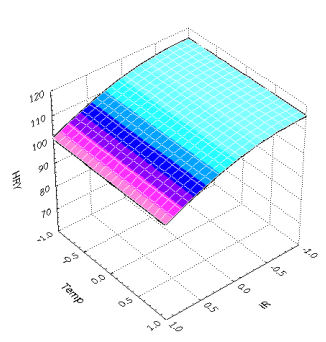
ภาพที่ 18 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (RHY) ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น ( $X_1$ ) 20 25 และ 30 %wb ในฟังก์ชันของ ระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด  $X_2$  กับ อุณหภูมิความร้อน  $X_3$  ที่ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง 60 นาที



MC 20

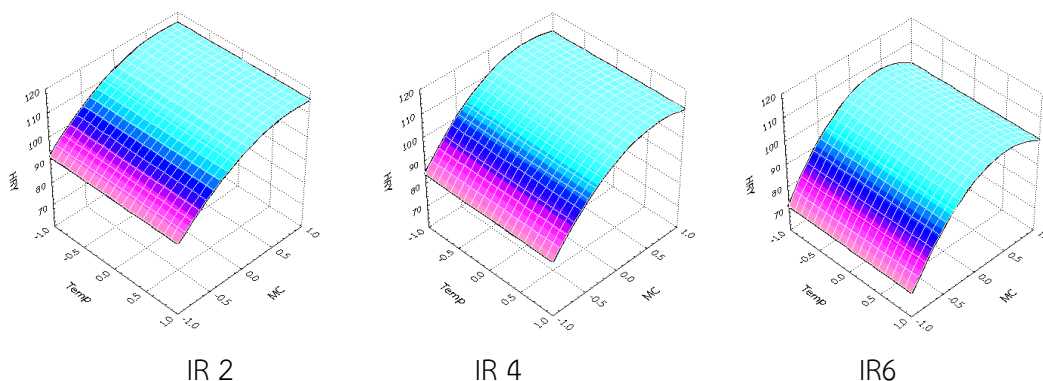


MC 25



MC 30

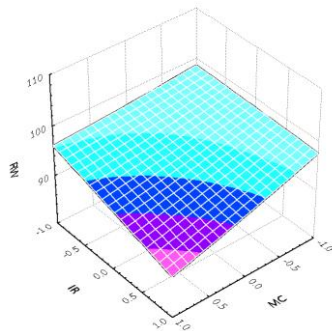
ภาพที่ 19 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (RHY) ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น ( $X_1$ ) 20 25 และ 30 %wb ในฟังก์ชันของ ระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด  $X_2$  กับ ระยะเวลาเทมเปอร์ริง  $X_4$  ที่อุณหภูมิความร้อน  $X_3$  50°C



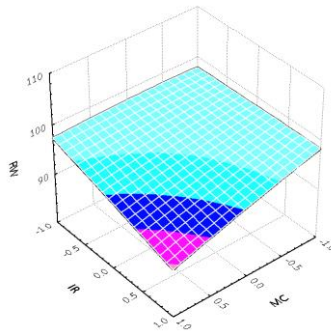
**ภาพที่ 20** กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (RH) ที่ระดับเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (IR) 2 4 และ 6 นาที ในฟังก์ชันของความชื้นเริ่มต้น  $X_1$  กับ ระยะเวลาเทมเปอร์ริง  $X_2$  ที่อุณหภูมิความร้อน  $X_3$  50°C

อย่างไรก็ดีคุณภาพการสีของข้าวยังต้องพิจารณาถึงค่าความขาวของข้าวสารควบคู่ไปด้วยเนื่องจากการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณต้นข้าวอาจส่งผลต่อค่าความขาวของข้าวสารได้ จากผลของความร้อนในกระบวนการที่กระทำต่อตัวอย่างข้าวเปลือกที่ทดสอบ การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ความขาวสัมพัทธ์ (RW) จากภาพที่ 21-25 โดยพบว่าระดับของตัวแปรความชื้นเริ่มต้น ( $X_1$ ) กับ ระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ( $X_2$ ) ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความขาวของข้าวสารมีค่าลดลงอย่างชัดเจน ดังนั้นในกรณีของข้าวเปลือกเริ่มต้นที่มีความชื้นสูงไม่ควรอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดนานเกินไป ส่วนระดับอุณหภูมิความร้อน ( $X_3$ ) ที่ใช้ในการทดสอบพบว่าไม่มีความแตกต่างกันและมีอิทธิพลน้อยมากเมื่อเทียบกับ ( $X_1$ ) และ ( $X_2$ ) ส่วนเวลาในการเทมเปอร์ริง ระยะเวลาเทมเปอร์ริง  $X_4$  และเวลาในการอบแห้ง  $X_5$  กราฟพื้นผิวแสดงลักษณะแบนราบเอียงในทิศทางเดียวซึ่งหมายถึงมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับ ( $X_1$ ) และ ( $X_2$ )

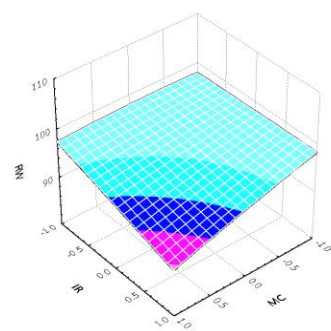
อย่างไรก็ตามการพิจารณาว่าเงื่อนไขของตัวแปรใดเหมาะสมในการนำมาใช้ลดความชื้นข้าวเปลือกนั้นต้องมีการพิจารณาทั้งค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวและดัชนีความขาวควบคู่กัน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นในการกำหนดซึ่งตัวที่สำคัญคือความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ต้องการอบแห้งลดความชื้น ให้ได้คุณภาพการสีที่ดีในท้ายที่สุด



HA 40 C

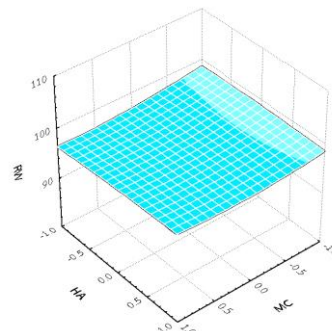


HA 50 C

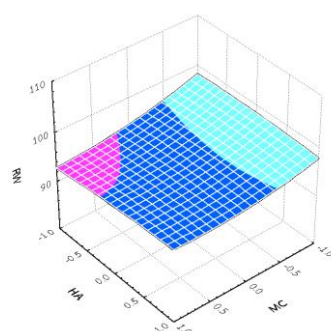


HA 60 C

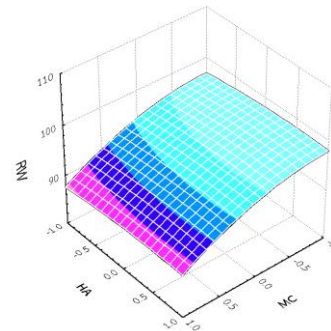
**ภาพที่ 21** กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ความขาวขาวสารสัมผัส (RW) ที่ระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน (HA) 40 50 และ 60°C ในฟังก์ชันของความชื้นเริ่มต้น  $X_1$  กับ ระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด  $X_2$  ที่ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง 60 นาที



IR 2

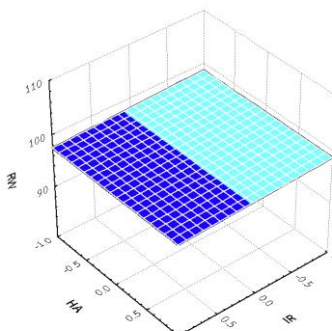


IR 4

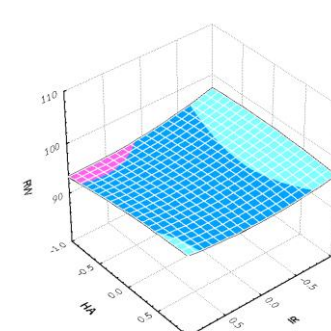


IR 6

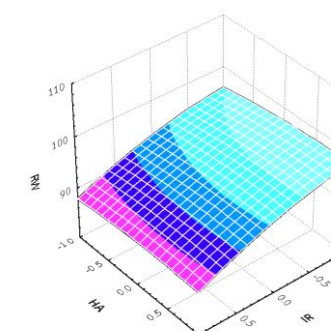
**ภาพที่ 22** กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ความขาวขาวสารสัมผัส (RW) ที่ระดับเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (IR) 2 4 และ 6 นาที ในฟังก์ชันของความชื้นเริ่มต้น  $X_1$  กับอุณหภูมิลมร้อน  $X_3$  ที่ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง 60 นาที



MC 20

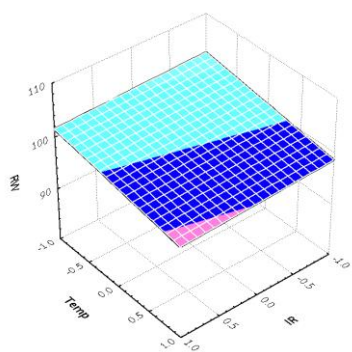


MC 25

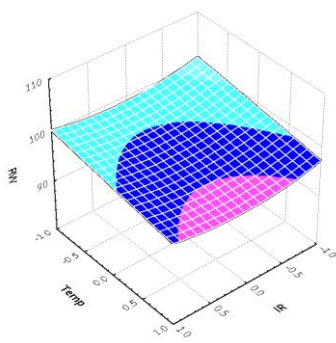


MC 30

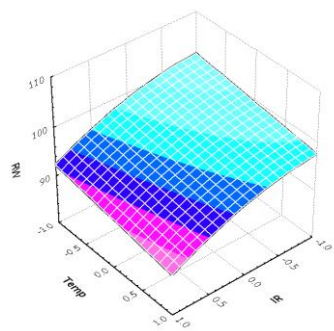
**ภาพที่ 23** กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ความขาวขาวสารสัมผัส (RW) ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น ( $X_1$ ) 20 25 และ 30 %wb ในฟังก์ชันของระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด  $X_2$  กับอุณหภูมิลมร้อน  $X_3$  ที่เวลาการเทมเปอร์ริง 60 นาที



MC 20

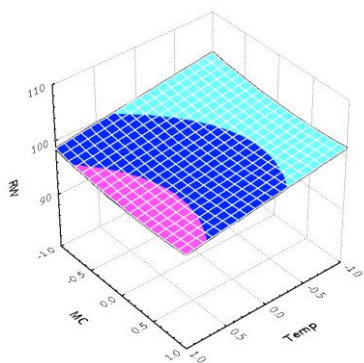


MC 25

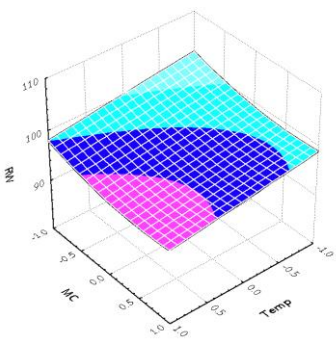


MC 30

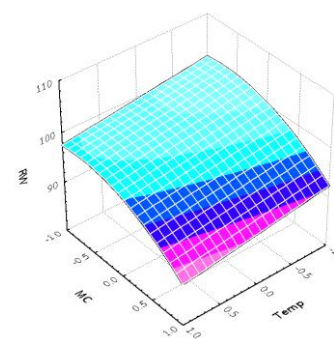
ภาพที่ 24 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ความขาวข้าวสารสัมพัทธ์ (RW) ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น ( $X_1$ ) 20 25 และ 30 %wb ในฟังก์ชันของ ระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด  $X_2$  กับ ระยะเวลาเทมเปอร์ริง  $X_4$  ที่อุณหภูมิลมร้อน  $X_3$  50°C



IR 2



IR 4



IR 6

ภาพที่ 25 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ความขาวข้าวสารสัมพัทธ์ (RW) ที่ระดับเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (IR) 2 4 และ 6 นาที ในฟังก์ชันของ ความชื้นเริ่มต้น  $X_1$  กับ ระยะเวลาเทมเปอร์ริง  $X_4$  ที่อุณหภูมิลมร้อน  $X_3$  50°C

## สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและคุณภาพการสีข้าวของข้าวเปลือกภายหลังผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วยการอบแห้งข้าวเปลือกด้วย รังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง ได้ผลโดยสรุปดังนี้

1) การเปลี่ยนแปลงของความชื้นข้าวเปลือกและอุณหภูมิเมล็ดข้าวในกระบวนการอบแห้ง โดยใช้รังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง พบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดอบแห้งข้าวเปลือกในช่วงแรกสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลานั้นๆ ได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะในกรณีที่ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นสูง รวมถึงสามารถเพิ่มอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดซึ่งสามารถให้ความร้อนผ่านเข้าไปยังภายในเมล็ดข้าวเปลือกทำให้เมล็ดได้รับความร้อนพร้อมๆ กันทั้งภายในและนอกเมล็ดส่งผลให้กลไกการถ่ายเทมวลของน้ำภายในเมล็ดมีอัตราการถ่ายเทที่รวดเร็วขึ้น ขั้นตอนการเทมเปอร์ริงเพื่อใช้ในการปรับสมดุลความชื้นของเมล็ดข้าวในระหว่างพักการอบแห้งจึงมีผลน้อยมากต่อระบบการลดความชื้นในภาพรวมเมื่อวิเคราะห์ค่าพื้นผิวตอบสนอง สำหรับอิทธิพลของลมร้อนในการอบแห้งนั้นจากการวิเคราะห์พบว่าการใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงทำให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงได้แต่ยังคงมีอิทธิพลน้อยกว่าระดับความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก และระยะเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

2) การศึกษารูปแบบที่เหมาะสมของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง เพื่อรักษาคุณภาพการสีข้าวสามารถอธิบายอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง โดยอธิบายผลเป็นค่าสัมพัทธ์เทียบกับค่าคุณภาพการสีของข้าวเปลือกอ้างอิงที่ลดความชื้นด้วยการตากแห้งให้แห้ง ดังสมการแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (RHY) และเปอร์เซ็นต์ความขาวสัมพัทธ์ (RW)

$$\begin{aligned} RHY = & 110.07 + (16.622X_1) - (4.445X_3) - (3.3875X_1 \cdot X_2) - (4.194X_1 \cdot X_3) + (5.45X_1 \cdot X_5) \\ & + (3.724X_2 \cdot X_3) + (6.656X_2 \cdot X_5) + (9.96X_3 \cdot X_5) - (14.618X_1^2) - (3.841X_2^2) - (2.853X_3^2) \end{aligned}$$

มีค่า  $R^2 = 94.00 \%$

และ

$$\begin{aligned} RW = & 96.958 + (4.277X_1) - (2.188X_2) - (0.39X_3) - (2.012X_4) - (7.164X_5) - (4.251X_1 \cdot X_2) \\ & - (0.305X_1 \cdot X_4) - (0.557X_2 \cdot X_3) + (2.605X_2 \cdot X_5) - (4.448X_1^2) + (0.627X_4^2) + (4.662X_5^2) \end{aligned}$$

มีค่า  $R^2 = 91.4 \%$

การวิเคราะห์ผลการทดสอบนั้นพบว่ารูปแบบการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเทคนิคการใช้รังสีอินฟราเรด ร่วมกับการเทมเปอร์ริงและลมร้อน สามารถเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นมากกว่า 25%wb ขึ้นไป อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไม่เกิน 4

นาที่ แล้วสามารถอบแห้งต่อด้วยลมร้อนได้ทันทีโดยใช้อุณหภูมิร้อนไม่เกิน 50 °C ซึ่งจะใช้เวลาการอบแห้งไม่เกิน 180 นาที จะได้ข้าวเปลือกที่มีคุณภาพการสีใกล้เคียงกับวิธีการอ้างอิงด้วยการตากข้าวเปลือกบนลานตาก รวมถึงอาจได้ปริมาณต้นข้าวที่มากกว่าข้าวอ้างอิงได้ระดับหนึ่ง

## เอกสารอ้างอิง

---

- ขุนพล สังข์อารีย์, สมบูรณ์ เวชกามา, อติศักดิ์ พงษ์พูลผลศักดิ์, สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์. การประเมินสถานะภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทย. ว.สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2545; 9 (1): 32-41
- สุทธิณี วานิชสำราญ, พชร ตั้งตระกูล, วารุณี วารัญญานนท์, สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์. การเพิ่มปริมาณต้นข้าวของข้าวคุณภาพต่ำโดยวิธีแช่ร่วมกับการอบแห้งบนฐานไหล. ว. ราชบัณฑิตยสถาน 2546; 28 (4): 1160-1169.
- อรรถพล นุ่มหอม, จรรย์ ลิขิตรัตน์พร. สถานะภาพของเครื่องอบแห้งในประเทศไทย. เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมเกษตรประจำปี 2537, 18 พฤษภาคม 2537; กรุงเทพฯ.
- อติเทพ ทวีรัตนพาณิชย์, สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, งามชื่น คงเสรี, สุนันทาวงศ์ปิยชน. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซน. ว. เกษตรศาสตร์(วิทย) 2542; 33: 134 – 145.
- Bello M, Baeza R, Tolaba MP. Quality characteristics of milled and cooked rice affected by hydrothermal treatment. J Food Eng 2006. 72, 124-133.
- Box GEP, Draper NR. Empirical model-building and response surfaces. New York: Wiley; 1987.
- Laohavanich J, Wongpichet, S. Drying Characteristics and Milling Quality Aspects of Paddy Dried with Gas-Fired Infrared. Journal of Food Process Engineering. 2009. 32(3): 442-461.
- Madamba PS, Yabes RP. Determination of optimum intermittent drying conditions for rough rice. LWT 2005; 38, 157 – 165.
- Mujumdar AS, editor. Handbook of industrial drying. volume 1. 2nd ed. New York: Marcel Dekker; 1995.
- Ozisik MN. Heat transfer: a basic approach. New York: McGraw-Hill; 1985.

Soponronnarit S, Wetchacama S, Swadisevi T. Poomsa-ad N. Managing moist paddy by drying, tempering, and ambient air ventilation. Dry Technol 1999; 17(1&2): 335-344.

W. Duangkhamchan, J. Laohavanich, "Feasibility of Using a Multistage Drying Method Including Infrared Heating, Tempering and Sun Drying for Wet Paddy", Advanced Materials Research, Vols. 931-932, pp. 1497-1501, May. 2014

### ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

---

- 1) พันธุ์ข้าวในประเทศไทยมีทั้งพันธุ์ข้าวที่มีค่า อะมัยโลส สูงและต่ำ รวมถึงพันธุ์ข้าวเหนียวที่นิยมปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกส่วนใหญ่ จึงควรมีการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการอบแห้งในการวิจัยนี้ให้ครอบคลุมพันธุ์ข้าวหลักของประเทศ
- 2) ระดับของปัจจัยที่ทดสอบในการวิจัยนี้ยังคงไม่ครอบคลุมอิทธิพลที่อาจจะส่งผลต่อคุณภาพการสีข้าว จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถอธิบายอิทธิพลให้ครอบคลุมยิ่งขึ้น

## ภาคผนวก

### ผนวก ก.

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากการลดความชื้นด้วย รังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริง และลมร้อน

ตารางผนวก ก.1 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกจากการลดความชื้นด้วย รังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริง และลมร้อน

| IR Drying<br>time (min) | Moisture content of paddy after dried by infrared ray (%db) |       |       |         |                                |       |       |         |                                |       |       |         |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------|-------|-------|---------|--------------------------------|-------|-------|---------|--------------------------------|-------|-------|---------|
|                         | Initial moisture content 20%wb                              |       |       |         | Initial moisture content 25%db |       |       |         | Initial moisture content 30%db |       |       |         |
|                         | Rep 1                                                       | Rep 2 | Rep 3 | Average | Rep 1                          | Rep 2 | Rep 3 | Average | Rep 1                          | Rep 2 | Rep 3 | Average |
| 0                       | 20.56                                                       | 20.09 | 20.52 | 20.39   | 26.13                          | 25.84 | 26.74 | 26.23   | 31.51                          | 30.24 | 30.83 | 30.86   |
| 2                       | 18.43                                                       | 18.21 | 19.09 | 18.57   | 23.85                          | 23.55 | 24.59 | 24.00   | 27.64                          | 26.27 | 28.50 | 27.47   |
| 4                       | 17.77                                                       | 16.65 | 17.17 | 17.20   | 21.88                          | 21.69 | 22.12 | 21.90   | 24.34                          | 25.50 | 24.51 | 24.79   |
| 6                       | 16.45                                                       | 15.94 | 16.38 | 16.26   | 20.05                          | 19.80 | 20.05 | 19.97   | 23.48                          | 23.32 | 22.87 | 23.22   |

ตารางผนวก ก.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากการลดความชื้นด้วย รังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริง และลมร้อน

| IR Drying<br>time (min) | Grain temperature of paddy after dried by infrared ray ( C ) |       |       |         |                                |       |       |         |                                |       |       |         |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|-------|---------|--------------------------------|-------|-------|---------|--------------------------------|-------|-------|---------|
|                         | Initial moisture content 20%db                               |       |       |         | Initial moisture content 25%db |       |       |         | Initial moisture content 30%db |       |       |         |
|                         | Rep 1                                                        | Rep 2 | Rep 3 | Average | Rep 1                          | Rep 2 | Rep 3 | Average | Rep 1                          | Rep 2 | Rep 3 | Average |
| 0                       | 28.00                                                        | 28.00 | 28.00 | 28.00   | 27.00                          | 27.50 | 28.00 | 27.50   | 27.00                          | 27.00 | 28.00 | 27.33   |
| 2                       | 42.00                                                        | 40.00 | 42.00 | 41.33   | 45.50                          | 42.00 | 42.50 | 43.33   | 43.00                          | 44.00 | 40.00 | 42.33   |
| 4                       | 51.00                                                        | 51.00 | 51.50 | 51.17   | 49.00                          | 47.50 | 48.50 | 48.33   | 48.00                          | 49.00 | 48.00 | 48.33   |
| 6                       | 55.50                                                        | 55.00 | 57.50 | 56.00   | 53.00                          | 51.50 | 53.00 | 52.50   | 52.00                          | 52.00 | 49.50 | 51.17   |

ผนวก ข.

ผลการทดสอบหาคุณภาพการสีของข้าวเปลือกจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริง และ  
 ลมร้อนจากการลดความชื้นด้วย รังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริง และลมร้อน

ตารางที่ ผนวก ข.1 คุณภาพการสีของข้าวเปลือกจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เทมเปอร์ริง  
 และลมร้อน

| ความชื้นข้าวเปลือก<br>เริ่มต้น (%) | อินฟราเรด (min) | เทมเปอร์ริง (min) | อุณหภูมิลมร้อน<br>( C ) | เวลาในการอบแห้ง<br>ด้วยลมร้อน (min) | ข้าวเปลือก<br>(g) | ข้าวกล้องรวม<br>(g) | ข้าวกล้องเต็ม<br>(g) | ข้าวสารรวม<br>(g) | ต้นข้าว (g) | ต้นข้าว (%) | ข้าวหัก (%) | รำ<br>(%) | ความขาว<br>ข้าวสาร |
|------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|
| 20                                 | 2               | 0                 | 40                      | 0                                   | 115.00            | 82.66               | 70.51                | 73.38             | 39.52       | 34.37       | 29.44       | 8.07      | 46.50              |
|                                    | 2               | 30                |                         | 0                                   | 115.00            | 83.01               | 69.34                | 74.03             | 38.46       | 33.44       | 30.93       | 7.81      | 44.70              |
|                                    | 2               | 60                |                         | 0                                   | 115.00            | 84.68               | 67.66                | 74.50             | 39.34       | 34.21       | 30.57       | 8.85      | 43.90              |
| 20                                 | 4               | 0                 |                         | 0                                   | 115.00            | 83.44               | 42.97                | 71.42             | 36.95       | 32.13       | 29.97       | 10.45     | 45.90              |
|                                    | 4               | 30                |                         | 0                                   | 115.00            | 83.94               | 44.87                | 73.22             | 36.43       | 31.68       | 31.99       | 9.32      | 44.70              |
|                                    | 4               | 60                |                         | 0                                   | 115.00            | 80.65               | 43.47                | 69.97             | 36.97       | 32.15       | 28.70       | 9.29      | 43.90              |
| 20                                 | 6               | 0                 |                         | 0                                   | 115.00            | 81.00               | 56.15                | 70.54             | 34.61       | 30.10       | 31.24       | 9.10      | 45.10              |
|                                    | 6               | 30                |                         | 0                                   | 115.00            | 82.78               | 66.93                | 71.74             | 32.84       | 28.56       | 33.83       | 9.60      | 44.80              |
|                                    | 6               | 60                |                         | 0                                   | 115.00            | 81.43               | 63.68                | 72.51             | 33.46       | 29.10       | 33.96       | 7.76      | 43.70              |
| 20                                 | 2               | 0                 | 50                      | 0                                   | 115.00            | 80.04               | 62.66                | 70.08             | 36.25       | 31.52       | 29.42       | 8.66      | 45.90              |
|                                    | 2               | 30                |                         | 0                                   | 115.00            | 79.52               | 62.54                | 69.93             | 37.45       | 32.57       | 28.24       | 8.34      | 44.30              |
|                                    | 2               | 60                |                         | 0                                   | 115.00            | 77.89               | 62.66                | 68.30             | 36.87       | 32.06       | 27.33       | 8.34      | 43.70              |
| 20                                 | 4               | 0                 |                         | 0                                   | 115.00            | 81.37               | 67.48                | 71.87             | 36.43       | 31.68       | 30.82       | 8.26      | 44.90              |
|                                    | 4               | 30                |                         | 0                                   | 115.00            | 82.77               | 29.00                | 72.36             | 38.08       | 33.11       | 29.81       | 9.05      | 44.10              |
|                                    | 4               | 60                |                         | 0                                   | 115.00            | 83.19               | 68.18                | 74.74             | 37.22       | 32.37       | 32.63       | 7.35      | 43.70              |
| 20                                 | 6               | 0                 |                         | 0                                   | 115.00            | 80.66               | 66.29                | 70.46             | 33.13       | 28.81       | 32.46       | 8.87      | 44.80              |
|                                    | 6               | 30                |                         | 0                                   | 115.00            | 81.20               | 62.42                | 72.49             | 32.62       | 28.37       | 34.67       | 7.57      | 45.20              |
|                                    | 6               | 60                |                         | 0                                   | 115.00            | 82.24               | 65.16                | 72.11             | 33.14       | 28.82       | 33.89       | 8.81      | 43.90              |
| 20                                 | 2               | 0                 | 60                      | 0                                   | 115.00            | 81.54               | 35.18                | 70.55             | 26.40       | 22.96       | 38.39       | 9.56      | 45.10              |
|                                    | 2               | 30                |                         | 0                                   | 115.00            | 81.05               | 37.73                | 70.00             | 27.06       | 23.53       | 37.34       | 9.61      | 44.30              |
|                                    | 2               | 60                |                         | 0                                   | 115.00            | 80.73               | 40.22                | 69.51             | 27.73       | 24.11       | 36.33       | 9.76      | 44.80              |
| 20                                 | 4               | 0                 |                         | 0                                   | 115.00            | 81.41               | 61.91                | 71.63             | 26.96       | 23.44       | 38.84       | 8.50      | 44.70              |
|                                    | 4               | 30                |                         | 0                                   | 115.00            | 81.25               | 67.45                | 71.70             | 28.38       | 24.68       | 37.67       | 8.30      | 44.10              |
|                                    | 4               | 60                |                         | 0                                   | 115.00            | 83.24               | 67.92                | 71.88             | 29.53       | 25.68       | 36.83       | 9.88      | 43.80              |
| 20                                 | 6               | 0                 |                         | 0                                   | 115.00            | 81.59               | 62.72                | 71.29             | 27.52       | 23.93       | 38.06       | 8.96      | 43.70              |
|                                    | 6               | 30                |                         | 0                                   | 115.00            | 82.39               | 64.93                | 72.25             | 27.91       | 24.27       | 38.56       | 8.82      | 44.90              |
|                                    | 6               | 60                |                         | 0                                   | 115.00            | 84.85               | 65.56                | 75.14             | 28.12       | 24.45       | 40.89       | 8.44      | 42.70              |

ตารางที่ ผนวก ข.1 (ต่อ) คุณภาพการสีของข้าวเปลือกจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เหม  
เปอร์รีง และลมร้อน

| ความชื้นข้าวเปลือก<br>เริ่มต้น (%wb) | อินฟราเรด (min) | เหมเปอร์รีง (min) | อุณหภูมิลมร้อน<br>( C ) | เวลาในการอบแห้ง<br>ด้วยลมร้อน (min) | ข้าวเปลือก<br>(g) | ข้าวกล้องรวม<br>(g) | ข้าวกล้องเต็ม<br>(g) | ข้าวสารรวม<br>(g) | ต้นข้าว (g) | ต้นข้าว (%) | ข้าวหัก (%) | รำ<br>(%) | ความขาว<br>ข้าวสาร |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|
| 25                                   | 2               | 0                 | 40                      | 120                                 | 115.00            | 81.92               | 68.28                | 72.00             | 51.11       | 44.44       | 18.17       | 8.63      | 43.90              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 85.00               | 68.99                | 73.69             | 51.28       | 44.59       | 19.49       | 9.83      | 42.70              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 84.00               | 68.30                | 72.70             | 51.74       | 44.99       | 18.23       | 9.83      | 41.30              |
| 25                                   | 4               | 0                 |                         | 120                                 | 115.00            | 82.33               | 67.57                | 71.25             | 53.45       | 46.48       | 15.48       | 9.63      | 43.20              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 83.46               | 71.62                | 74.82             | 54.37       | 47.28       | 17.78       | 7.51      | 41.30              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 83.24               | 67.84                | 73.55             | 53.19       | 46.25       | 17.70       | 8.43      | 41.50              |
| 25                                   | 6               | 0                 |                         | 120                                 | 115.00            | 85.53               | 68.53                | 74.28             | 46.94       | 40.82       | 23.77       | 9.78      | 42.10              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 84.53               | 69.22                | 73.54             | 47.98       | 41.72       | 22.23       | 9.56      | 41.70              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 84.23               | 65.70                | 71.98             | 47.81       | 41.57       | 21.02       | 10.65     | 40.30              |
| 25                                   | 2               | 0                 | 50                      | 120                                 | 115.00            | 79.14               | 68.06                | 68.27             | 47.76       | 41.53       | 17.83       | 9.45      | 44.30              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 78.82               | 65.47                | 67.25             | 48.66       | 42.31       | 16.17       | 10.06     | 42.50              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 81.07               | 55.94                | 66.97             | 48.04       | 41.77       | 16.46       | 12.26     | 42.00              |
| 25                                   | 4               | 0                 |                         | 120                                 | 115.00            | 86.57               | 96.98                | 74.50             | 49.62       | 43.15       | 21.63       | 10.50     | 43.20              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 81.57               | 65.76                | 72.10             | 51.57       | 44.84       | 17.85       | 8.23      | 42.10              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 82.15               | 63.44                | 71.83             | 50.92       | 44.28       | 18.18       | 8.97      | 41.30              |
| 25                                   | 6               | 0                 |                         | 120                                 | 115.00            | 83.94               | 64.89                | 72.55             | 43.45       | 37.78       | 25.30       | 9.90      | 41.90              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 83.94               | 64.89                | 72.55             | 44.45       | 38.65       | 24.43       | 9.90      | 41.10              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 83.53               | 61.35                | 71.89             | 43.41       | 37.75       | 24.77       | 10.12     | 40.30              |
| 25                                   | 2               | 0                 | 60                      | 120                                 | 115.00            | 84.29               | 30.23                | 72.45             | 44.22       | 38.45       | 24.55       | 10.30     | 44.70              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 85.00               | 51.30                | 73.56             | 43.70       | 38.00       | 25.97       | 9.95      | 42.60              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 82.56               | 54.17                | 70.56             | 42.65       | 37.09       | 24.27       | 10.43     | 42.30              |
| 25                                   | 4               | 0                 |                         | 60                                  | 115.00            | 86.73               | 37.15                | 70.52             | 48.62       | 42.28       | 19.04       | 14.10     | 42.70              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 60                                  | 115.00            | 86.22               | 42.25                | 73.44             | 48.84       | 42.47       | 21.39       | 11.11     | 41.30              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 60                                  | 115.00            | 85.78               | 55.23                | 73.38             | 47.68       | 41.46       | 22.35       | 10.78     | 40.80              |
| 25                                   | 6               | 0                 |                         | 60                                  | 115.00            | 85.37               | 39.23                | 74.52             | 41.94       | 36.47       | 28.33       | 9.43      | 42.60              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 60                                  | 115.00            | 86.33               | 67.64                | 74.67             | 43.52       | 37.84       | 27.09       | 10.14     | 41.00              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 60                                  | 115.00            | 86.44               | 71.21                | 75.29             | 41.57       | 36.15       | 29.32       | 9.70      | 41.00              |

ตารางที่ ผนวก ข.1 (ต่อ) คุณภาพการสีของข้าวเปลือกจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เหม  
เปอร์รีง และลมร้อน

| ความชื้นข้าวเปลือก<br>เริ่มต้น (%wb) | อินฟราเรด (min) | เหมเปอร์รีง (min) | อุณหภูมิลมร้อน<br>( C ) | เวลาในการอบแห้ง<br>ด้วยลมร้อน (min) | ข้าวเปลือก<br>(g) | ข้าวกล้องรวม<br>(g) | ข้าวกล้องเต็ม<br>(g) | ข้าวสารรวม<br>(g) | ต้นข้าว (g) | ต้นข้าว (%) | ข้าวหัก (%) | รำ<br>(%) | ความขาว<br>ข้าวสาร |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|
| 30                                   | 2               | 0                 | 40                      | 240                                 | 115.00            | 83.10               | 67.72                | 71.91             | 47.66       | 41.44       | 21.09       | 9.73      | 43.10              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 240                                 | 115.00            | 82.17               | 71.17                | 73.60             | 49.95       | 43.43       | 20.57       | 7.45      | 42.00              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 240                                 | 115.00            | 83.15               | 72.19                | 74.15             | 49.27       | 42.84       | 21.63       | 7.83      | 41.50              |
| 30                                   | 4               | 0                 |                         | 180                                 | 112.00            | 84.50               | 67.72                | 73.67             | 47.78       | 42.66       | 23.12       | 9.67      | 41.50              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 180                                 | 115.00            | 84.04               | 68.26                | 71.51             | 48.34       | 42.03       | 20.15       | 10.90     | 40.00              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 180                                 | 115.00            | 84.92               | 68.13                | 72.26             | 47.22       | 41.06       | 21.77       | 11.01     | 40.30              |
| 30                                   | 6               | 0                 |                         | 180                                 | 115.00            | 85.59               | 65.41                | 75.41             | 47.45       | 41.26       | 24.31       | 8.85      | 40.50              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 180                                 | 115.00            | 85.34               | 63.50                | 76.91             | 49.96       | 43.44       | 23.43       | 7.33      | 39.10              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 180                                 | 115.00            | 86.04               | 67.25                | 76.93             | 49.61       | 43.14       | 23.76       | 7.92      | 38.70              |
| 30                                   | 2               | 0                 | 50                      | 180                                 | 115.00            | 81.00               | 64.67                | 72.20             | 49.32       | 42.89       | 19.90       | 7.65      | 42.80              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 180                                 | 115.00            | 80.93               | 68.33                | 76.04             | 50.04       | 43.51       | 22.61       | 4.25      | 41.00              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 180                                 | 115.00            | 84.23               | 63.25                | 73.91             | 48.80       | 42.43       | 21.83       | 8.97      | 40.70              |
| 30                                   | 4               | 0                 |                         | 120                                 | 115.00            | 79.07               | 64.52                | 70.65             | 49.30       | 42.87       | 18.57       | 7.32      | 42.60              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 81.55               | 65.29                | 72.12             | 49.11       | 42.70       | 20.01       | 8.20      | 41.20              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 85.05               | 52.90                | 74.27             | 46.84       | 40.73       | 23.85       | 9.37      | 40.50              |
| 30                                   | 6               | 0                 |                         | 120                                 | 115.00            | 85.84               | 53.11                | 76.51             | 44.93       | 39.07       | 27.46       | 8.11      | 40.20              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 84.78               | 47.34                | 65.32             | 43.95       | 38.22       | 18.58       | 16.92     | 38.70              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 84.04               | 47.71                | 74.32             | 44.50       | 38.70       | 25.93       | 8.45      | 38.30              |
| 30                                   | 2               | 0                 | 60                      | 120                                 | 115.00            | 83.36               | 68.38                | 70.48             | 46.43       | 40.37       | 20.91       | 11.20     | 43.10              |
|                                      | 2               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 83.27               | 18.68                | 69.83             | 47.34       | 41.17       | 19.56       | 11.69     | 41.80              |
|                                      | 2               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 79.67               | 26.70                | 64.22             | 46.75       | 40.65       | 15.19       | 13.43     | 41.30              |
| 30                                   | 4               | 0                 |                         | 120                                 | 115.00            | 84.92               | 38.33                | 68.52             | 45.82       | 39.84       | 19.74       | 14.26     | 42.70              |
|                                      | 4               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 84.02               | 37.61                | 72.05             | 45.55       | 39.61       | 23.04       | 10.41     | 42.10              |
|                                      | 4               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 83.08               | 55.52                | 71.00             | 43.95       | 38.22       | 23.52       | 10.50     | 40.60              |
| 30                                   | 6               | 0                 |                         | 120                                 | 115.00            | 83.50               | 34.21                | 72.45             | 39.96       | 34.75       | 28.25       | 9.61      | 39.70              |
|                                      | 6               | 30                |                         | 120                                 | 115.00            | 85.24               | 36.52                | 72.96             | 42.05       | 36.57       | 26.88       | 10.68     | 37.30              |
|                                      | 6               | 60                |                         | 120                                 | 115.00            | 85.94               | 38.44                | 74.52             | 42.19       | 36.69       | 28.11       | 9.93      | 37.50              |

ตารางที่ ผนวก ข.2 คุณภาพการสีของข้าวเปลือกอ้างอิงเพื่อใช้เปรียบเทียบการผลการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เหมเปอร์ริง และลมร้อน

| ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น (%wb) | ข้าวเปลือก (g) | ข้าวกล้องรวม (g) | ข้าวกล้องเต็ม (g) | ข้าวสารรวม (g) | ต้นข้าว (g) | ต้นข้าว (%) | ข้าวหัก (%) | รำ (%) | ความขาวข้าวสาร |
|----------------------------------|----------------|------------------|-------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|--------|----------------|
| 20.00                            | 115.00         | 82.30            | 41.20             | 72.71          | 41.73       | 36.29       | 26.94       | 8.34   | 44.30          |
| 25.00                            | 115.00         | 85.49            | 74.86             | 76.63          | 46.32       | 40.28       | 26.36       | 7.70   | 43.10          |
| 30.00                            | 115.00         | 84.58            | 70.71             | 74.83          | 43.92       | 38.19       | 26.88       | 8.48   | 42.90          |

ตารางที่ ผนวก ข.3 ปัจจัยทดสอบเมื่อแปลงเป็นค่าโค้ดแสดงร่วมกับค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์และค่าความขาวข้าวสารสัมพัทธ์

| ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น | อินฟราเรด | เหมเปอร์ริง | อุณหภูมิลมร้อน | เวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อน | ต้นข้าว (%) | ความขาวข้าวสาร | ต้นข้าวสัมพัทธ์ (%) | ความขาวข้าวสารสัมพัทธ์ (%) | ต้นข้าวสัมพัทธ์ ทำนาย (%) | ความขาวข้าวสารสัมพัทธ์ ทำนาย (%) |
|----------------------------|-----------|-------------|----------------|---------------------------|-------------|----------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| X1                         | X2        | X3          | X4             | X5                        | RHY         | RW             | RHY                 | RW                         | RHY_Prd                   | RW_Prd                           |
| -1                         | -1        | -1          | -1             | -1                        | 34.37       | 46.50          | 94.70               | 104.97                     | 94.30                     | 102.61                           |
| -1                         | -1        | -1          | 0              | -1                        | 33.44       | 44.70          | 92.16               | 100.90                     | 94.30                     | 100.60                           |
| -1                         | -1        | -1          | 1              | -1                        | 34.21       | 43.90          | 94.26               | 99.10                      | 94.30                     | 98.59                            |
| -1                         | -1        | 0           | -1             | -1                        | 32.13       | 45.90          | 86.86               | 103.61                     | 83.22                     | 102.61                           |
| -1                         | -1        | 0           | 0              | -1                        | 31.68       | 44.70          | 89.74               | 100.00                     | 83.22                     | 100.60                           |
| -1                         | -1        | 0           | 1              | -1                        | 32.15       | 43.90          | 88.35               | 98.65                      | 83.22                     | 98.59                            |
| -1                         | -1        | 1           | -1             | -1                        | 30.10       | 45.10          | 63.26               | 101.81                     | 66.43                     | 102.61                           |
| -1                         | -1        | 1           | 0              | -1                        | 28.56       | 44.80          | 64.84               | 100.00                     | 66.43                     | 100.60                           |
| -1                         | -1        | 1           | 1              | -1                        | 29.10       | 43.70          | 66.45               | 101.13                     | 66.43                     | 98.59                            |
| -1                         | 0         | -1          | -1             | -1                        | 31.52       | 45.90          | 88.54               | 103.61                     | 91.64                     | 102.07                           |
| -1                         | 0         | -1          | 0              | -1                        | 32.57       | 44.30          | 87.29               | 100.90                     | 91.64                     | 100.06                           |
| -1                         | 0         | -1          | 1              | -1                        | 32.06       | 43.70          | 88.59               | 99.10                      | 91.64                     | 98.05                            |
| -1                         | 0         | 0           | -1             | -1                        | 31.68       | 44.90          | 87.29               | 101.35                     | 84.28                     | 102.07                           |
| -1                         | 0         | 0           | 0              | -1                        | 33.11       | 44.10          | 91.25               | 99.55                      | 84.28                     | 100.06                           |
| -1                         | 0         | 0           | 1              | -1                        | 32.37       | 43.70          | 89.18               | 98.65                      | 84.28                     | 98.05                            |
| -1                         | 0         | 1           | -1             | -1                        | 28.81       | 44.80          | 64.60               | 100.90                     | 71.22                     | 102.07                           |
| -1                         | 0         | 1           | 0              | -1                        | 28.37       | 45.20          | 68.00               | 99.55                      | 71.22                     | 100.06                           |
| -1                         | 0         | 1           | 1              | -1                        | 28.82       | 43.90          | 70.76               | 98.87                      | 71.22                     | 98.05                            |
| -1                         | 1         | -1          | -1             | -1                        | 22.96       | 45.10          | 82.93               | 101.81                     | 81.29                     | 101.53                           |
| -1                         | 1         | -1          | 0              | -1                        | 23.53       | 44.30          | 78.69               | 101.13                     | 81.29                     | 99.52                            |
| -1                         | 1         | -1          | 1              | -1                        | 24.11       | 44.80          | 80.18               | 98.65                      | 81.29                     | 97.50                            |
| -1                         | 1         | 0           | -1             | -1                        | 23.44       | 44.70          | 79.38               | 101.13                     | 77.66                     | 101.53                           |
| -1                         | 1         | 0           | 0              | -1                        | 24.68       | 44.10          | 78.16               | 102.03                     | 77.66                     | 99.52                            |
| -1                         | 1         | 0           | 1              | -1                        | 25.68       | 43.80          | 79.41               | 99.10                      | 77.66                     | 97.50                            |
| -1                         | 1         | 1           | -1             | -1                        | 23.93       | 43.70          | 65.94               | 98.65                      | 68.32                     | 101.53                           |
| -1                         | 1         | 1           | 0              | -1                        | 24.27       | 44.90          | 66.88               | 101.35                     | 68.32                     | 99.52                            |
| -1                         | 1         | 1           | 1              | -1                        | 24.45       | 42.70          | 67.38               | 96.39                      | 68.32                     | 97.50                            |

ตารางที่ ผนวก ข.3 (ต่อ) ปัจจัยทดสอบเมื่อแปลงเป็นค่าได้แสดงร่วมกับค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว  
สัมพัทธ์และค่าความขาวข้าวสารสัมพัทธ์

| ความชื้น<br>ข้าวเปลือกเริ่มต้น | อินฟราเรด | เทมเปอร์ริ่ง | อุณหภูมิลมร้อน | เวลาในการ<br>อบแห้งด้วยลม<br>ร้อน | ต้นข้าว (%) | ความขาวข้าวสาร | ต้นข้าวสัมพัทธ์<br>(%) | ความขาว<br>ข้าวสารสัมพัทธ์<br>(%) | ต้นข้าวสัมพัทธ์<br>ทำนาย (%) | ความขาว<br>ข้าวสารสัมพัทธ์<br>ทำนาย (%) |
|--------------------------------|-----------|--------------|----------------|-----------------------------------|-------------|----------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| X1                             | X2        | X3           | X4             | X5                                | RHY         | RW             | RHY                    | RW                                | RHY_Prd                      | RW_Prd                                  |
| 0                              | -1        | -1           | -1             | 0                                 | 44.44       | 43.90          | 110.34                 | 101.86                            | 111.55                       | 101.16                                  |
| 0                              | -1        | -1           | 0              | 0                                 | 44.59       | 42.70          | 110.70                 | 99.07                             | 111.55                       | 99.15                                   |
| 0                              | -1        | -1           | 1              | 0                                 | 44.99       | 41.30          | 111.70                 | 95.82                             | 111.55                       | 97.13                                   |
| 0                              | -1        | 0            | -1             | 0                                 | 46.48       | 43.20          | 103.10                 | 102.78                            | 106.23                       | 101.16                                  |
| 0                              | -1        | 0            | 0              | 0                                 | 47.28       | 41.30          | 105.05                 | 98.61                             | 106.23                       | 99.15                                   |
| 0                              | -1        | 0            | 1              | 0                                 | 46.25       | 41.50          | 103.71                 | 97.45                             | 106.23                       | 97.13                                   |
| 0                              | -1        | 1            | -1             | 0                                 | 40.82       | 42.10          | 95.46                  | 103.71                            | 95.21                        | 101.16                                  |
| 0                              | -1        | 1            | 0              | 0                                 | 41.72       | 41.70          | 94.34                  | 98.84                             | 95.21                        | 99.15                                   |
| 0                              | -1        | 1            | 1              | 0                                 | 41.57       | 40.30          | 92.07                  | 98.14                             | 95.21                        | 97.13                                   |
| 0                              | 0         | -1           | -1             | 0                                 | 41.53       | 44.30          | 115.39                 | 100.23                            | 111.66                       | 98.97                                   |
| 0                              | 0         | -1           | 0              | 0                                 | 42.31       | 42.50          | 117.37                 | 95.82                             | 111.66                       | 96.96                                   |
| 0                              | 0         | -1           | 1              | 0                                 | 41.77       | 42.00          | 114.83                 | 96.29                             | 111.66                       | 94.95                                   |
| 0                              | 0         | 0            | -1             | 0                                 | 43.15       | 43.20          | 107.12                 | 100.23                            | 110.07                       | 98.97                                   |
| 0                              | 0         | 0            | 0              | 0                                 | 44.84       | 42.10          | 111.33                 | 97.68                             | 110.07                       | 96.96                                   |
| 0                              | 0         | 0            | 1              | 0                                 | 44.28       | 41.30          | 109.93                 | 95.82                             | 110.07                       | 94.95                                   |
| 0                              | 0         | 1            | -1             | 0                                 | 37.78       | 41.90          | 104.96                 | 99.07                             | 102.77                       | 98.97                                   |
| 0                              | 0         | 1            | 0              | 0                                 | 38.65       | 41.10          | 105.44                 | 95.82                             | 102.77                       | 96.96                                   |
| 0                              | 0         | 1            | 1              | 0                                 | 37.75       | 40.30          | 102.93                 | 94.66                             | 102.77                       | 94.95                                   |
| 0                              | 1         | -1           | -1             | 0                                 | 38.45       | 44.70          | 101.33                 | 97.68                             | 104.10                       | 96.78                                   |
| 0                              | 1         | -1           | 0              | 0                                 | 38.00       | 42.60          | 103.58                 | 96.75                             | 104.10                       | 94.77                                   |
| 0                              | 1         | -1           | 1              | 0                                 | 37.09       | 42.30          | 103.21                 | 93.50                             | 104.10                       | 92.76                                   |
| 0                              | 1         | 0            | -1             | -1                                | 42.28       | 42.70          | 93.80                  | 97.22                             | 102.90                       | 100.23                                  |
| 0                              | 1         | 0            | 0              | -1                                | 42.47       | 41.30          | 95.96                  | 95.36                             | 102.90                       | 98.22                                   |
| 0                              | 1         | 0            | 1              | -1                                | 41.46       | 40.80          | 93.71                  | 93.50                             | 102.90                       | 96.20                                   |
| 0                              | 1         | 1            | -1             | -1                                | 36.47       | 42.60          | 90.54                  | 98.84                             | 94.35                        | 100.23                                  |
| 0                              | 1         | 1            | 0              | -1                                | 37.84       | 41.00          | 93.95                  | 95.13                             | 94.35                        | 98.22                                   |
| 0                              | 1         | 1            | 1              | -1                                | 36.15       | 41.00          | 89.74                  | 95.13                             | 94.35                        | 96.20                                   |

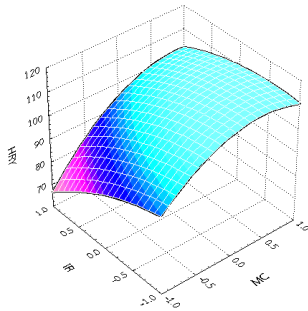
ตารางที่ ผนวก ข.3 (ต่อ) ปัจจัยทดสอบเมื่อแปลงเป็นค่าได้แสดงร่วมกับค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว  
สัมพัทธ์และค่าความขาวข้าวสารสัมพัทธ์

| ความชื้น<br>ข้าวเปลือกเริ่มต้น | อินฟราเรด | เทมเปอร์ริ่ง | อุณหภูมิลมร้อน | เวลาในการ<br>อบแห้งด้วยลม<br>ร้อน | ต้นข้าว (%) | ความขาวข้าวสาร | ต้นข้าวสัมพัทธ์<br>(%) | ความขาว<br>ข้าวสารสัมพัทธ์<br>(%) | ต้นข้าวสัมพัทธ์<br>ทำนาย (%) | ความขาว<br>ข้าวสารสัมพัทธ์<br>ทำนาย (%) |
|--------------------------------|-----------|--------------|----------------|-----------------------------------|-------------|----------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| X1                             | X2        | X3           | X4             | X5                                | RHY         | RW             | RHY                    | RW                                | RHY_Prd                      | RW_Prd                                  |
| 1                              | -1        | -1           | -1             | 1                                 | 41.44       | 43.10          | 108.52                 | 100.47                            | 110.45                       | 100.13                                  |
| 1                              | -1        | -1           | 0              | 1                                 | 43.43       | 42.00          | 113.73                 | 97.90                             | 110.45                       | 98.12                                   |
| 1                              | -1        | -1           | 1              | 1                                 | 42.84       | 41.50          | 112.19                 | 96.74                             | 110.45                       | 96.11                                   |
| 1                              | -1        | 0            | -1             | 1                                 | 42.66       | 41.50          | 112.30                 | 99.77                             | 111.51                       | 101.52                                  |
| 1                              | -1        | 0            | 0              | 1                                 | 42.03       | 40.00          | 113.94                 | 95.57                             | 111.51                       | 99.51                                   |
| 1                              | -1        | 0            | 1              | 1                                 | 41.06       | 40.30          | 111.11                 | 94.87                             | 111.51                       | 97.49                                   |
| 1                              | -1        | 1            | -1             | 1                                 | 41.26       | 40.50          | 105.72                 | 100.47                            | 101.27                       | 101.52                                  |
| 1                              | -1        | 1            | 0              | 1                                 | 43.44       | 39.10          | 107.79                 | 97.44                             | 101.27                       | 99.51                                   |
| 1                              | -1        | 1            | 1              | 1                                 | 43.14       | 38.70          | 106.45                 | 96.27                             | 101.27                       | 97.49                                   |
| 1                              | 0         | -1           | -1             | 1                                 | 42.89       | 42.80          | 111.71                 | 96.74                             | 115.61                       | 96.38                                   |
| 1                              | 0         | -1           | 0              | 1                                 | 43.51       | 41.00          | 110.07                 | 93.24                             | 115.61                       | 94.37                                   |
| 1                              | 0         | -1           | 1              | 1                                 | 42.43       | 40.70          | 107.52                 | 93.94                             | 115.61                       | 92.36                                   |
| 1                              | 0         | 0            | -1             | 0                                 | 42.87       | 42.60          | 112.25                 | 99.30                             | 112.07                       | 98.80                                   |
| 1                              | 0         | 0            | 0              | 0                                 | 42.70       | 41.20          | 111.82                 | 96.04                             | 112.07                       | 96.79                                   |
| 1                              | 0         | 0            | 1              | 0                                 | 40.73       | 40.50          | 106.65                 | 94.41                             | 112.07                       | 94.77                                   |
| 1                              | 0         | 1            | -1             | 0                                 | 39.07       | 40.20          | 104.33                 | 99.53                             | 100.58                       | 98.80                                   |
| 1                              | 0         | 1            | 0              | 0                                 | 38.22       | 38.70          | 103.71                 | 98.14                             | 100.58                       | 96.79                                   |
| 1                              | 0         | 1            | 1              | 0                                 | 38.70       | 38.30          | 100.07                 | 94.64                             | 100.58                       | 94.77                                   |
| 1                              | 1         | -1           | -1             | 0                                 | 40.37       | 43.10          | 108.04                 | 94.41                             | 106.42                       | 92.36                                   |
| 1                              | 1         | -1           | 0              | 0                                 | 41.17       | 41.80          | 113.76                 | 91.14                             | 106.42                       | 90.35                                   |
| 1                              | 1         | -1           | 1              | 0                                 | 40.65       | 41.30          | 112.96                 | 90.21                             | 106.42                       | 88.34                                   |
| 1                              | 1         | 0            | -1             | 0                                 | 39.84       | 42.70          | 102.30                 | 93.71                             | 104.36                       | 92.36                                   |
| 1                              | 1         | 0            | 0              | 0                                 | 39.61       | 42.10          | 100.07                 | 90.21                             | 104.36                       | 90.35                                   |
| 1                              | 1         | 0            | 1              | 0                                 | 38.22       | 40.60          | 101.32                 | 89.28                             | 104.36                       | 88.34                                   |
| 1                              | 1         | 1            | -1             | 0                                 | 34.75       | 39.70          | 90.99                  | 92.54                             | 96.59                        | 92.36                                   |
| 1                              | 1         | 1            | 0              | 0                                 | 36.57       | 37.30          | 95.75                  | 86.95                             | 96.59                        | 90.35                                   |
| 1                              | 1         | 1            | 1              | 0                                 | 36.69       | 37.50          | 96.06                  | 87.41                             | 96.59                        | 88.34                                   |

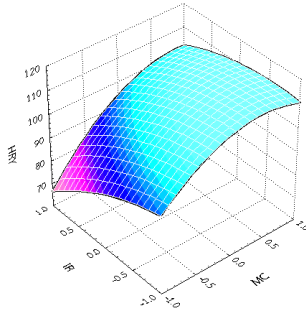
### ผนวก ค

สมการแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ (Relative head rice yield, RHY)

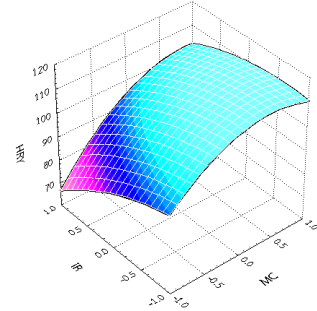
$$\begin{aligned} \text{HRY} = & 110.07 + (16.622X_1) - (4.445X_3) - (3.3875X_1 * X_2) - (4.194X_1 * X_3) + (5.45X_1 * X_5) \\ & + (3.724X_2 * X_3) + (6.656X_2 * X_5) + (9.96X_3 * X_5) - (14.618X_1^2) - (3.841X_2^2) - (2.853X_3^2) \\ & R^2 = 94.00 \% \end{aligned}$$



Temp 0

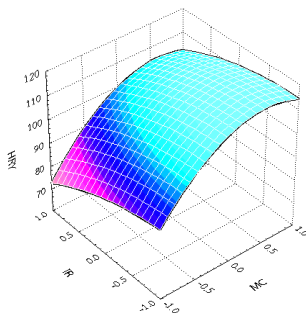


Temp 30

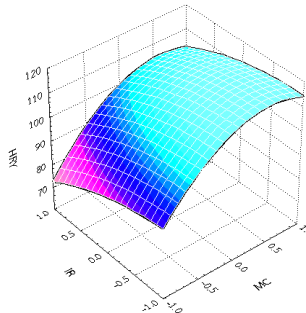


Temp 60

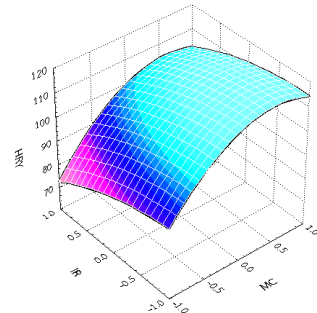
**ภาพที่ ผ.1** กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ ที่ระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน 40 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง 0 30 60 นาที ในฟังก์ชันของ ความชื้นเริ่มต้นกับระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด



Temp 0

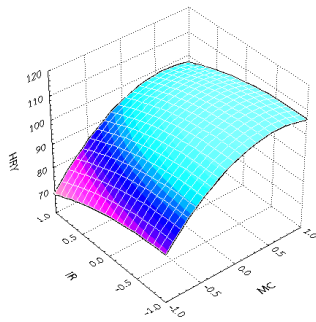


Temp 30

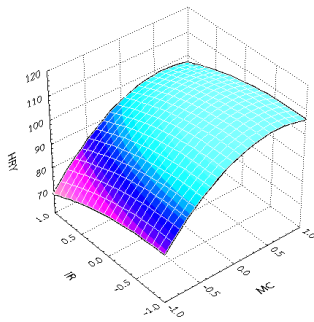


Temp 60

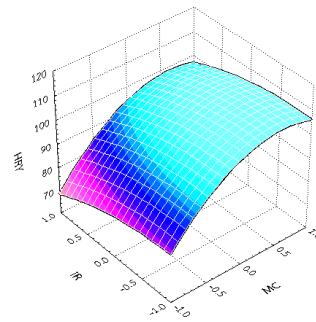
**ภาพที่ ผ.2** กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ ที่ระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง 0 30 60 นาที ในฟังก์ชันของ ความชื้นเริ่มต้นกับระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด



Temp 0

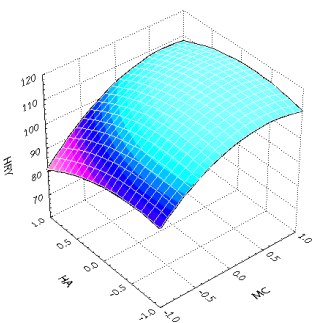


Temp 30

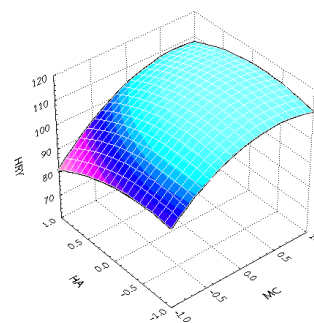


Temp 60

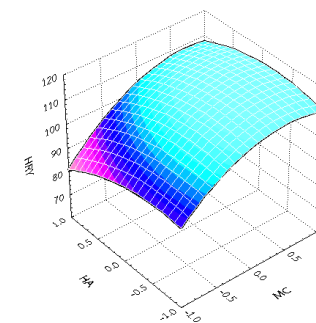
ภาพที่ ผ.3 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ ที่ระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง 0 30 60 นาที ในฟังก์ชันของ ความชื้นเริ่มต้นกับระยะเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด



Temp 0

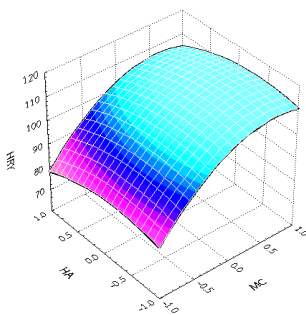


Temp 30

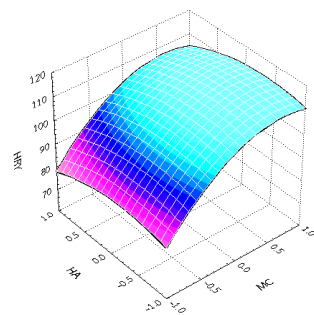


Temp 60

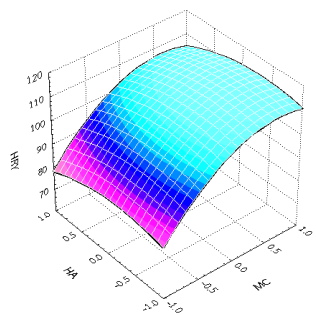
ภาพที่ ผ.4 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ ที่ระดับเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 2 นาที ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง 0 30 60 นาที ในฟังก์ชันของ ความชื้นเริ่มต้นกับระยะเวลาอบแห้งด้วยลมร้อน



Temp 0

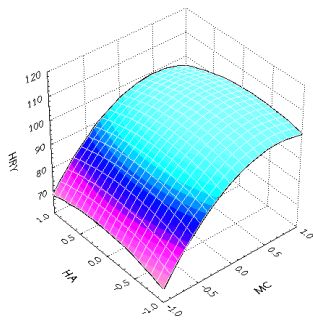


Temp 30

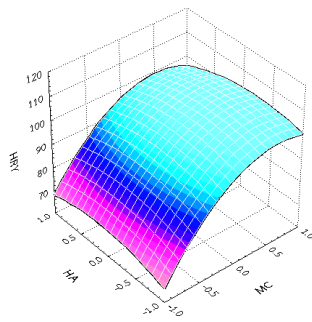


Temp 60

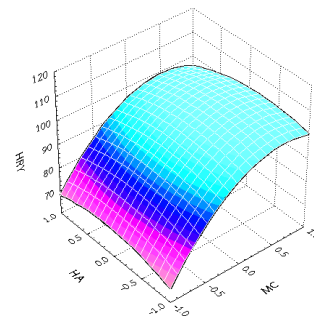
ภาพที่ ผ.5 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ ที่ระดับเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ๓ นาที ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง 0 30 60 นาที ในฟังก์ชันของ ความชื้นเริ่มต้นกับระยะเวลาอบแห้งด้วยลมร้อน



Temp 0

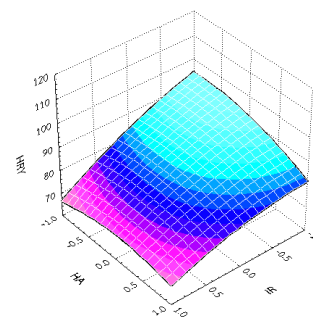


Temp 30

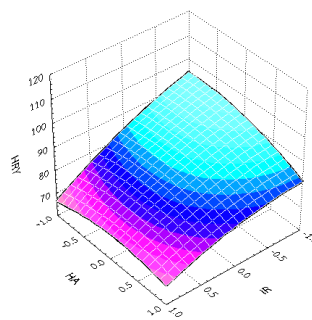


Temp 60

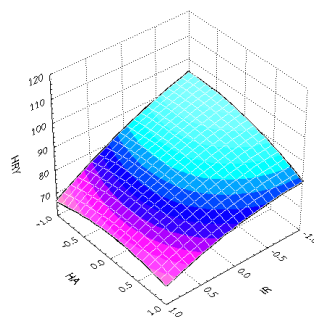
ภาพที่ ผ.6 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ ที่ระดับเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 6 นาที่ ระยะเวลาในการหม่เปอร์ริง 0 30 60 นาที ในฟังก์ชันของ ความชื้นเริ่มต้นกับระยะเวลาอบแห้งด้วยลมร้อน



Temp 0

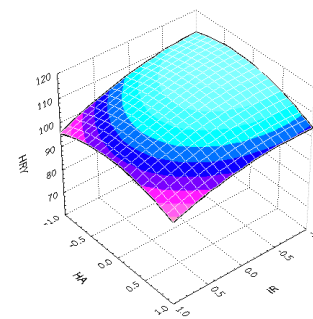


Temp 30

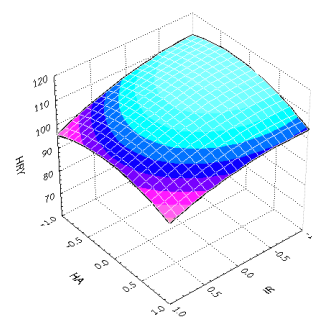


Temp 60

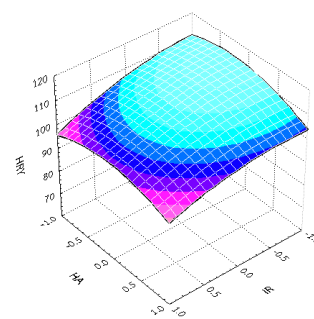
ภาพที่ ผ.7 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 20 %wb:ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับ อุณหภูมิอบแห้งด้วยลมร้อน



Temp 0

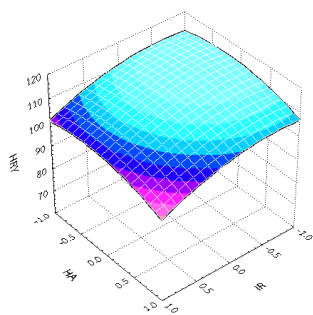


Temp 30

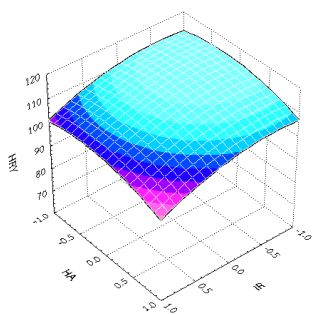


Temp 60

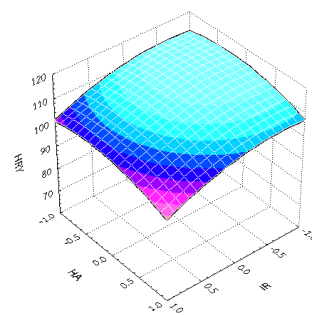
ภาพที่ ผ.8 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25 %wb:ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับ อุณหภูมิอบแห้งด้วยลมร้อน



Temp 0

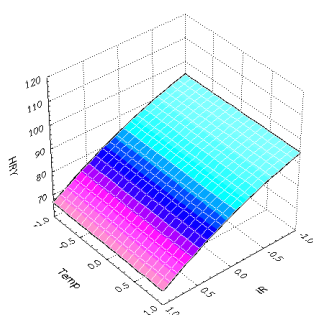


Temp 30

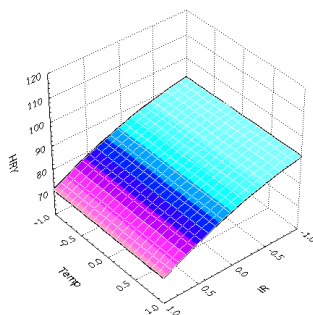


Temp 60

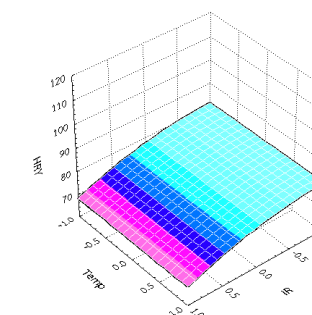
ภาพที่ ผ.9 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 30 %wb:ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับ อุณหภูมิอบแห้งด้วยลมร้อน



HA 40

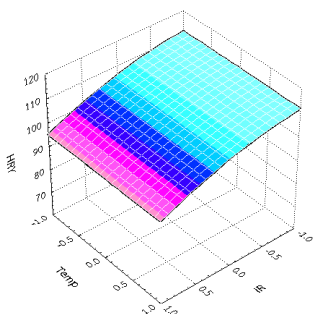


HA 50

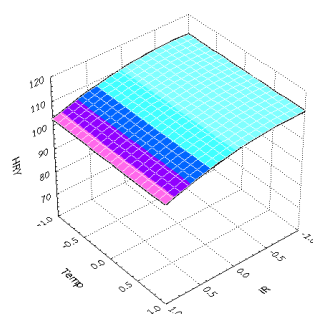


HA 60

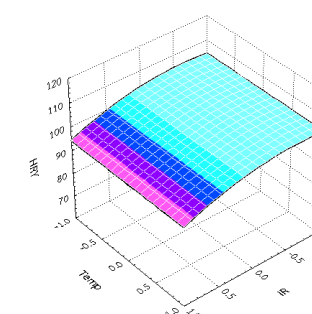
ภาพที่ ผ.10 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 20 %wb:ในฟังก์ชันของเวลาการเทมเปอร์ริงกับอุณหภูมิอบแห้งด้วยลมร้อน



HA 40

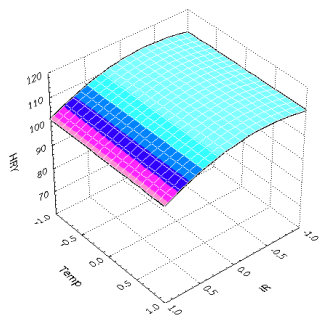


HA 50

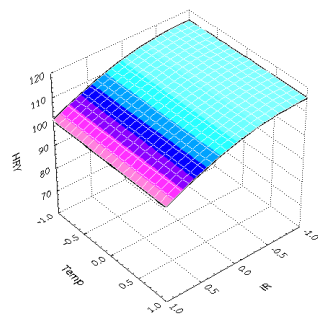


HA 60

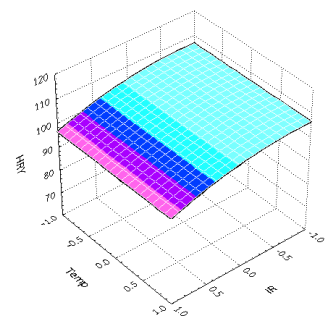
ภาพที่ ผ.11 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพัทธ์ ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25 %wb:ในฟังก์ชันของเวลาการเทมเปอร์ริงกับอุณหภูมิอบแห้งด้วยลมร้อน



HA 40

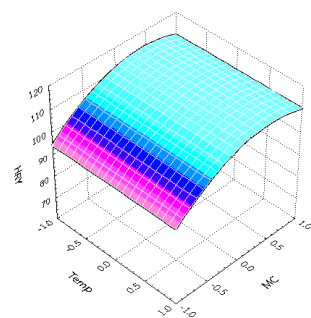


HA 50

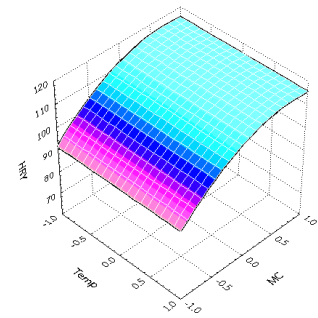


HA 60

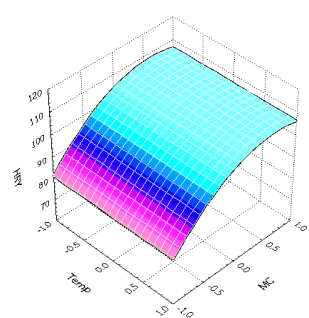
ภาพที่ ผ.12 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสาลีที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 30 %wb: ในฟังก์ชันของเวลาการหม่เปอร์ริงกับอุณหภูมิอบแห้งด้วยลมร้อน



HA 40

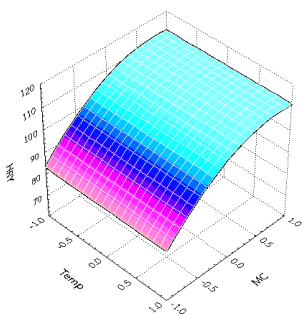


HA 50

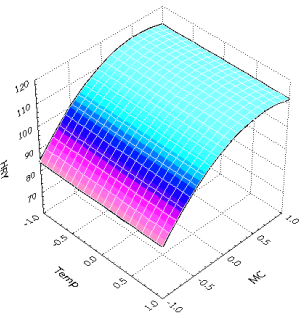


HA 60

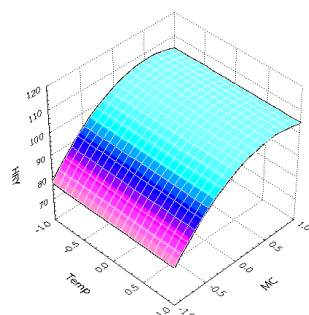
ภาพที่ ผ.13 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสาลีที่ระดับเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 2 นาที ในฟังก์ชันของเวลาการหม่เปอร์ริงกับ ความชื้นเริ่มต้น



HA 40

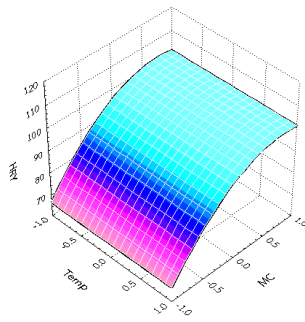


HA 50

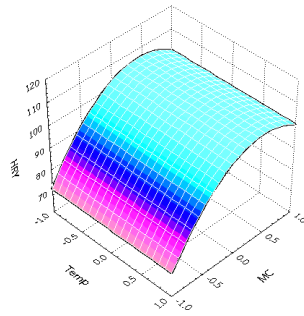


HA 60

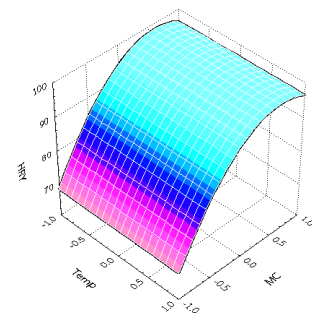
ภาพที่ ผ.14 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสาลีที่ระดับเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 4 นาที ในฟังก์ชันของเวลาการหม่เปอร์ริงกับ ความชื้นเริ่มต้น



HA 40



HA 50



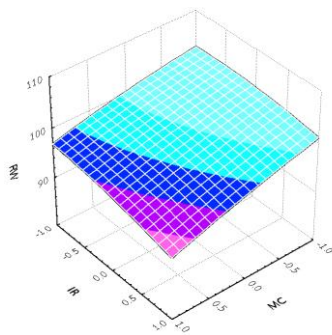
HA 60

ภาพที่ ผ.15 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสาลีที่ระดับเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 6 นาที ในฟังก์ชันของเวลาการหมักเปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้น

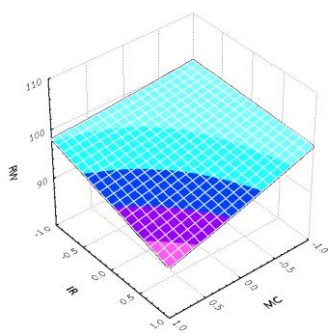
สมการแสดงค่าค่าเปอร์เซ็นต์ความขาวข้าวสารสาลี (Relative whiteness, RW)

$$RW = 96.958 + (4.277X_1) - (2.188X_2) - (0.39X_3) - (2.012X_4) - (7.164X_5) - (4.251X_1 \cdot X_2) - (0.305X_1 \cdot X_4) - (0.557X_2 \cdot X_3) + (2.605X_2 \cdot X_5) - (4.448X_1^2) + (0.627X_4^2) + (4.662X_5^2)$$

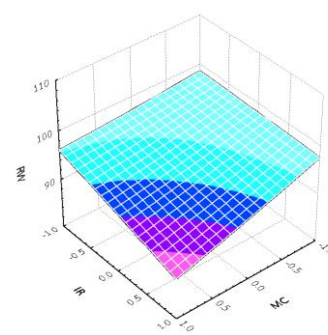
$$R^2 = 91.4 \%$$



Temp 0

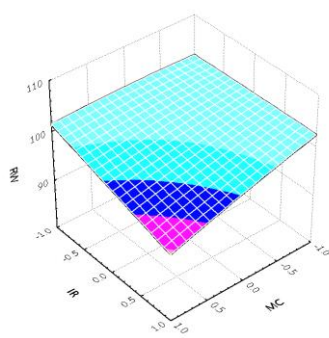


Temp 30

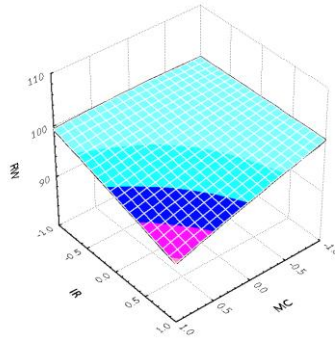


Temp 60

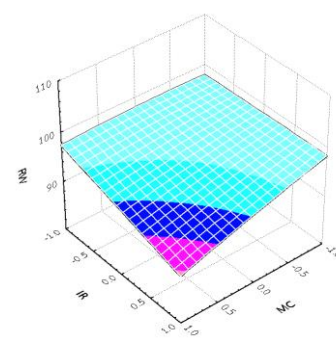
ภาพที่ ผ.16 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวข้าวสารสาลี ที่ระดับระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน 40 °C ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับความชื้นเริ่มต้น



Temp 0

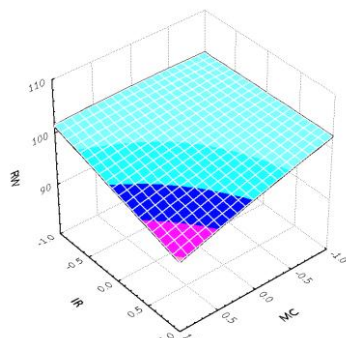


Temp 30

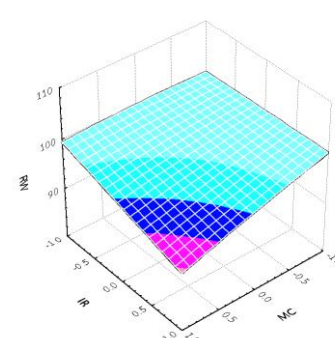


Temp 60

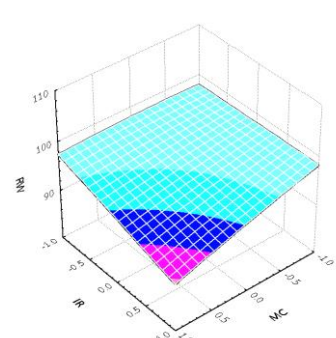
ภาพที่ ผ.17 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมพัทธ์ ที่ระดับระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน 50 °C ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับความชื้นเริ่มต้น



Temp 0

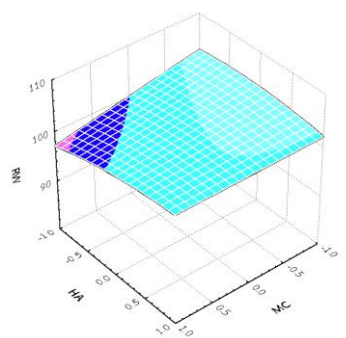


Temp 30

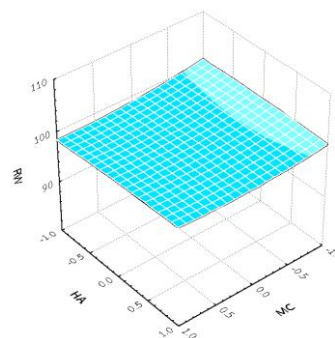


Temp 60

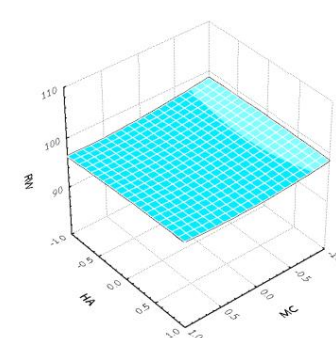
ภาพที่ ผ.18 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมพัทธ์ ที่ระดับระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน 60 °C ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับความชื้นเริ่มต้น



Temp 0

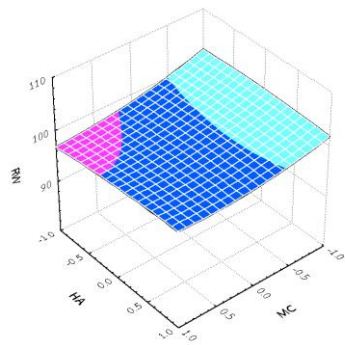


Temp 30

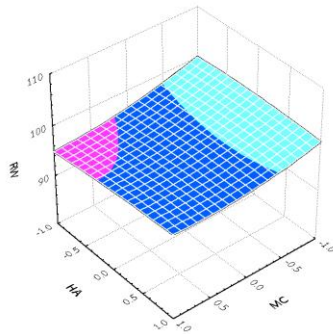


Temp 60

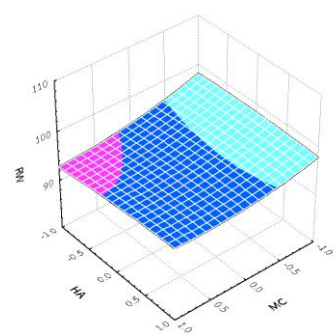
ภาพที่ ผ.19 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมพัทธ์ ที่เวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 2 นาที ในฟังก์ชันของระดับความชื้นเริ่มต้นกับระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน



Temp 0

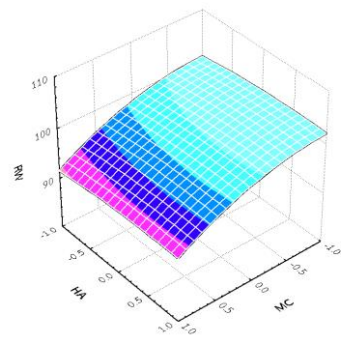


Temp 30

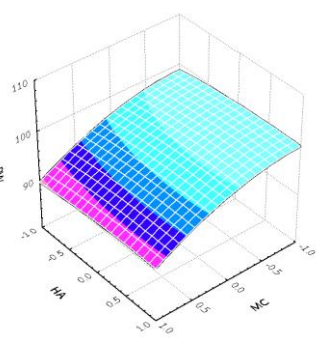


Temp 60

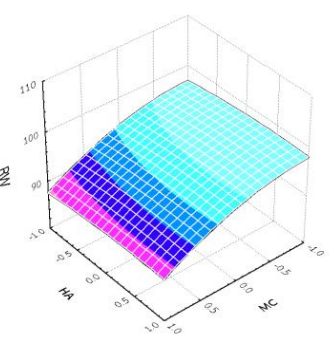
ภาพที่ ผ.20 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมพัทธ์ ที่เวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 4 นาที ในฟังก์ชันของระดับความชื้นเริ่มต้นกับระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน



Temp 0

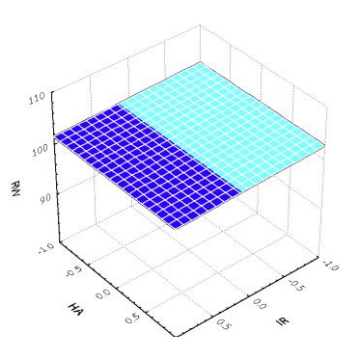


Temp 30

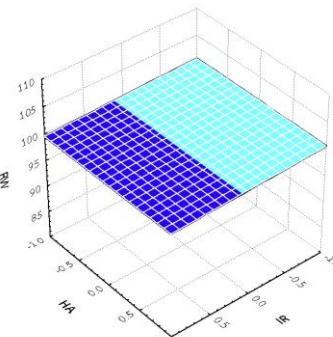


Temp 60

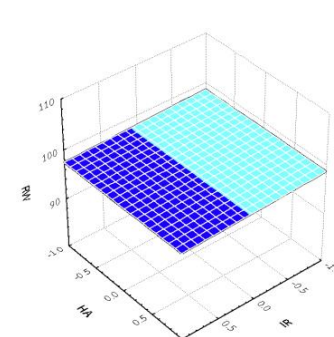
ภาพที่ ผ.21 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมพัทธ์ ที่เวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 6 นาที ในฟังก์ชันของระดับความชื้นเริ่มต้นกับระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน



Temp 0

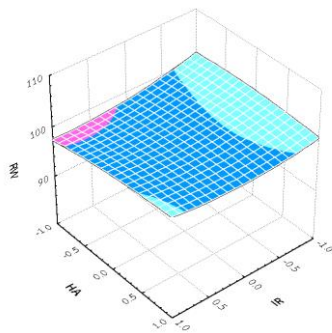


Temp 30

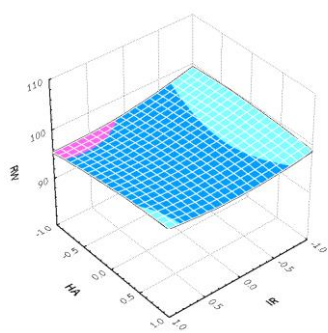


Temp 60

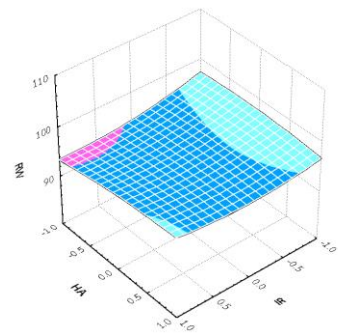
ภาพที่ ผ.22 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมพัทธ์ ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 20 %wb ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน



Temp 0

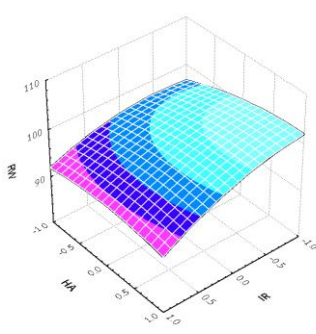


Temp 30

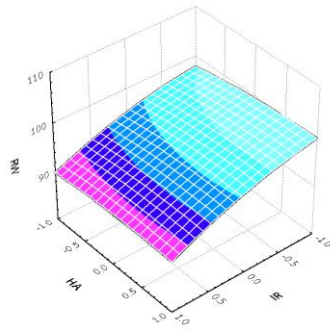


Temp 60

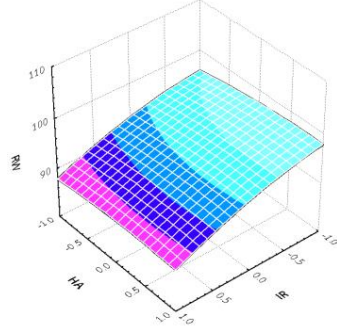
ภาพที่ ผ.23 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมพัทธ์ ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25 %wb ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน



Temp 0

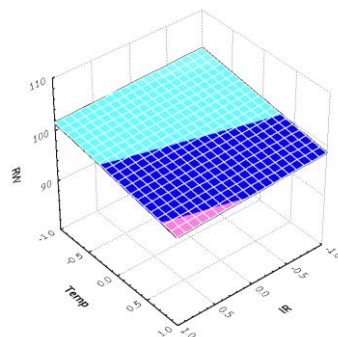


Temp 30

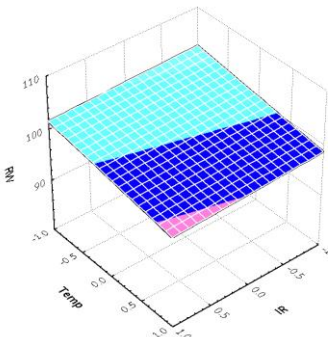


Temp 60

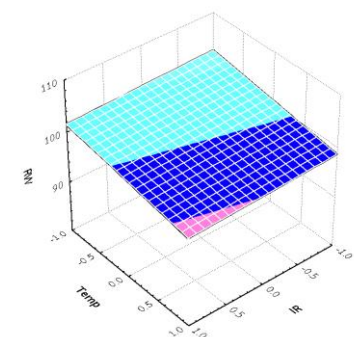
ภาพที่ ผ.24 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมพัทธ์ ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 30 %wb ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับระดับอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน



HA 40

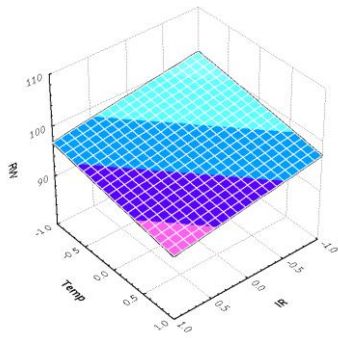


HA 50

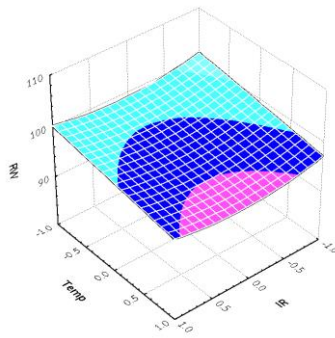


HA 60

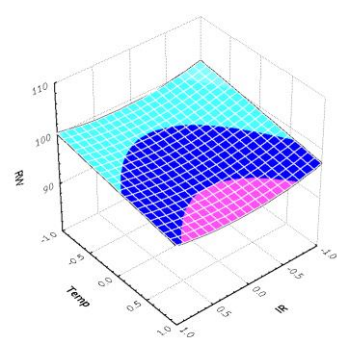
ภาพที่ ผ.25 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมพัทธ์ ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 20 %wb ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับระดับเวลาในการเทมเปอร์ริง



HA 40

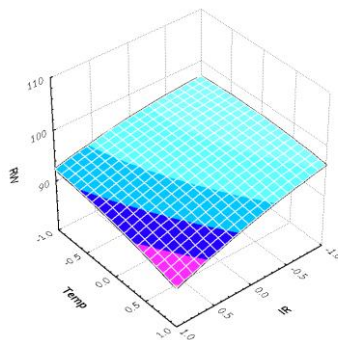


HA50

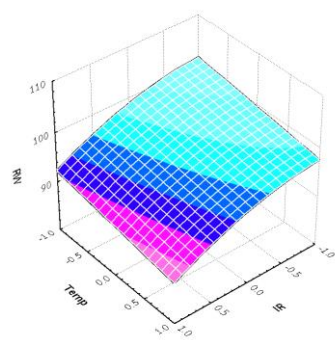


HA60

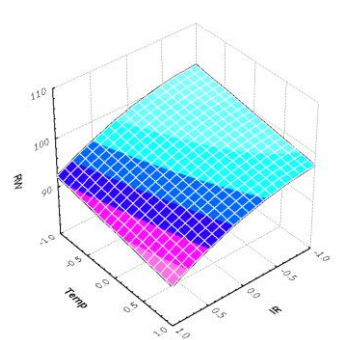
ภาพที่ ผ.26 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมผัส ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 25 %wb ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับระดับเวลาในการเทมเปอร์ริง



HA 40

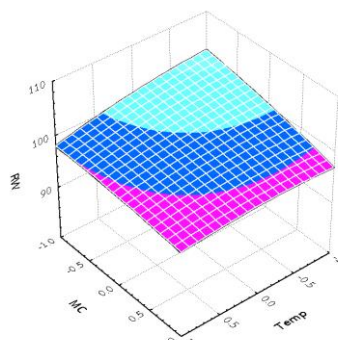


HA50

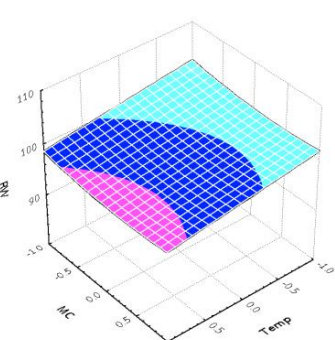


HA60

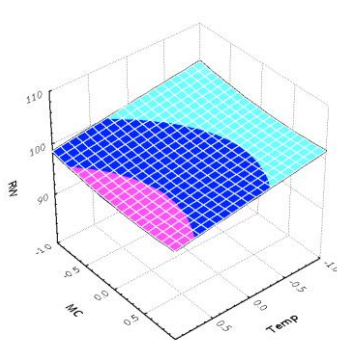
ภาพที่ ผ.27 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมผัส ที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 20 %wb ในฟังก์ชันของเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับระดับเวลาในการเทมเปอร์ริง



HA 40

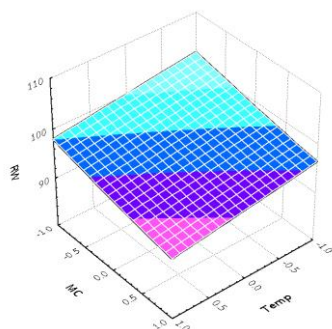


HA50

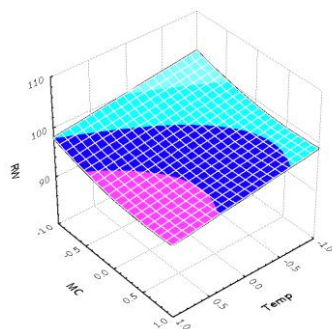


HA60

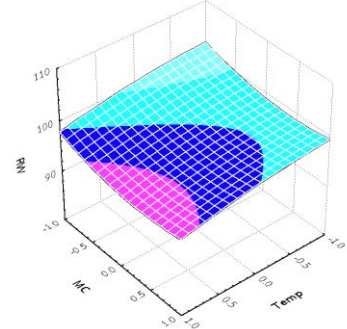
ภาพที่ ผ.28 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวขาวสารสัมผัส ที่ระดับเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 2 นาทีในฟังก์ชันของความชื้นเริ่มต้นกับระดับเวลาในการเทมเปอร์ริง



HA 40

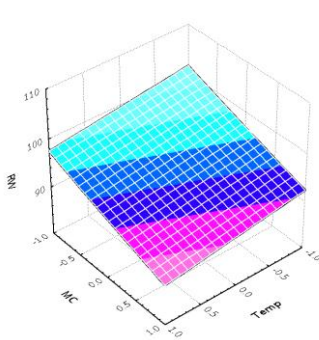


HA50

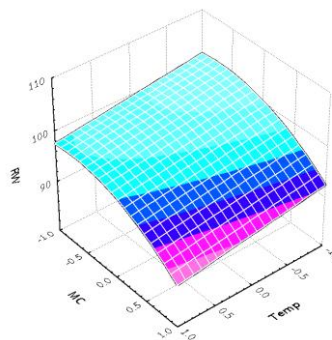


HA60

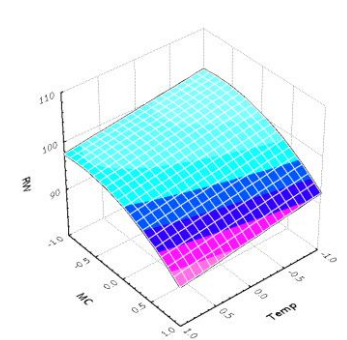
ภาพที่ ผ.29 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวข้าวสารสัมพัทธ์ ที่ระดับเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 4 นาทีในฟังก์ชันของความชื้นเริ่มต้นกับระดับเวลาในการเทมเปอร์ริง



HA 40



HA50



HA60

ภาพที่ ผ.30 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวข้าวสารสัมพัทธ์ ที่ระดับเวลาอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 6 นาทีในฟังก์ชันของความชื้นเริ่มต้นกับระดับเวลาในการเทมเปอร์ริง

### Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ อยู่ในระหว่างดำเนินการ
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
  - เชิงวิชาการ มีการพัฒนาผลการวิจัยไปสู่การสร้างโรงงานต้นแบบ ใน แผนงานวิจัยการพัฒนาโรงงานต้นแบบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการเทมเปอร์ริงและลมร้อน สำหรับโรงสีข้าวขนาดเล็กและผลกระทบด้านคุณภาพของข้าวและการจัดการศัตรูพืชหลังการเก็บเกี่ยว ภายใต้แผนงานวิจัยมุ่งเป้าตอบสนองความต้องการในการพัฒนาประเทศโดยเร่งด่วน : เรื่องข้าว ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 -2556
3. อื่นๆ -