



## รายงานการวิจัย

การหาสภาวะที่เหมาะสมของพริกชี้หนุอบแห้งด้วยวิธีอบแห้งแบบ  
อินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน  
Optimization For the Drying of chilli in a combined  
infrared And Vibration.

ชโลธร ศักดิ์มีาศ

Chalotron Sakmas

เศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์

Sattawat Thanimkarn

ชวกร มุกसान

Chavakorn Muksan

คณะเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2561

# การหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งพริกด้วยรังสีอินฟราเรด ร่วมกับการสั่นสะเทือน

ชโลธร ศักดิ์มาศ<sup>1</sup> เศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์<sup>1</sup> และชวกร มุกสถาน<sup>1</sup>

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการอบแห้งพริกด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน (VIR) สำหรับการอบแห้งพริกชี้หนู นอกจากนี้ยังทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแบบ VIR โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology; RSM)

การอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR โดยทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรด (4576, 6036 และ 7496 W/m<sup>2</sup>) ต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพทางกายภาพ โดยทำการอบแห้งพริกชี้หนู ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 10±0.15 g water/g dry matter จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเป็น 0.1 g water/g dry matter ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มระดับความเข้มรังสีในการอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้ง (DR) และสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผลเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เวลาในการอบแห้งจะลดลง โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ระหว่าง 85 ถึง 240 min ค่า DR สูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 0.0059 ถึง 0.0248 g water/g dry matter·min และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ระหว่าง 0.7302 ถึง 9.1281×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s พลังงานที่ต้องการใช้สำหรับกระบวนการอบแห้งมีค่าต่ำที่สุด 13.62 kWh/kg เมื่ออบแห้งพริกชี้หนูที่มีความเข้มรังสีอินฟราเรดสูงสุดคือ 7496 W/m<sup>2</sup> ในขณะที่การอบแห้งที่ความเข้มรังสีต่ำกว่าสามารถรักษาคุณภาพของ พริกชี้หนูแห้งได้

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธี VIR ทำการวางแผนการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken Design พบว่าความเข้มรังสีอินฟราเรด ความเร็วรอบการสั่นสะเทือน และความหนาของชั้นวัสดุมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีอย่างมีนัยสำคัญ สมการการถดถอยกำลังสองมีค่า R<sup>2</sup> = 0.95

**คำสำคัญ :** การหาสภาวะที่เหมาะสม พริก อินฟราเรด การอบแห้ง การสั่นสะเทือน

# Optimization For the Drying of chilli in a combined infrared And Vibration.

Chalotron Sakmas<sup>1</sup> Sattawat Thanimkarn<sup>1</sup> and Chavakorn muksan

## ABSTRACT

This research aimed to develop a vibratory bed assisted infrared drying (VC-VIR) technique for Chillis drying. The optimum condition for VIR drying of Chillis was determined by response surface methodology (RSM).

The effect of Infrared intensity (4576, 6036 and 7496 W/m<sup>2</sup>) on drying characteristics of Chillis and physical properties of the dried Chillis were investigated. Chillis was dried from about 10±0.15 to 0.1 g water/g dry matter. The results showed that increasing drying temperature increased drying rate (DR) and effective moisture diffusivity and consequently decreased drying time. The drying time, maximum DR, and effective moisture diffusivity were in the ranges of 85-240 min, 0.0059-0.0248 g water/g dry matter·min, and 0.7302-9.1281×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s, respectively. The lowest specific energy consumption of 13.62 kWh/kg was required when drying Chillis at the highest temperature of 7496 W/m<sup>2</sup>. Lower drying temperature could preserve quality of the dried Chillis.

The optimal condition for VC-VIR drying of CQ was determined using RSM. The response factor was quercetin content. Box-Behnken Design was applied with three factors. The second order polynomial regression model obtained was good fitted with R<sup>2</sup> of 0.95. showed that predicted and experimental quercetin contents were not significantly different (p>0.05).

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัย เรื่อง สภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งพริกด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการ  
สันสะท้อน ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณประจำปี พ.ศ. 2561 ของมหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ได้ให้การส่งเสริมและ  
สนับสนุนในการทำวิจัย เนื่องจากงานวิจัยเป็นภารกิจหลักของอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา และหวังเป็น  
อย่างยิ่งว่าอาจารย์ทุกท่านจะเล็งเห็นถึงความสำคัญของการทำวิจัยต่อไปในอนาคต

ชโลธร ศักดิ์มีาศ และคณะ



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พริก.....	3
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของพริก.....	3
2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	3
2.1.3 สรรพคุณของพริก.....	4
2.1.4 คุณค่าทางอาหารของพริก.....	4
2.2 หลักการอบแห้งวัสดุ.....	5
2.2.1 ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น.....	5
2.2.2 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่.....	5
2.2.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง.....	6
2.3 แบบจำลองการอบแห้ง.....	9
2.3.1 สมการการอบแห้งทางทฤษฎี.....	10
2.3.2 สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี.....	14
2.3.3 สมการการอบแห้งเชิงประจักษ์.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด.....	17
2.4.1 หลักการพื้นฐานการแผ่รังสี.....	17
2.4.2 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยน้ำ.....	20
2.4.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว.....	21
2.4.4 กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรด.....	23
2.5 การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง.....	26
2.5.1 แนวความคิดและหลักการทั่วไป.....	26
2.5.2 การออกแบบการทดลองสำหรับวิธีพื้นผิวตอบสนอง.....	29
2.5.2.1 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง.....	30
2.5.2.2 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	31
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
2.6.1 การอบแห้งอินฟราเรดและการอบแห้งอินฟราเรดภายใต้สภาวะ สุญญากาศ.....	31
2.6.2 อิทธิพลของการอบแห้งต่อคุณภาพและสารสำคัญในวัสดุ.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสันสะเทือน ภายใต้สภาวะสุญญากาศ.....	35
3.1.1 ปริมาณน้ำที่ต้องระเหย.....	35
3.1.2 พลังงานขั้นต่ำที่ต้องใช้สำหรับการอบแห้ง.....	36
3.1.3 ส่วนประกอบและโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง.....	37
3.1.4 ชุดควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้า.....	37
3.1.4.1 ชุดการทำงานอินฟราเรด.....	37
3.1.4.2 ชุดกลไกสร้างการสันสะเทือนของวัสดุ.....	37
3.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	38

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 แผนการทดลอง.....	38
3.3.1 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดต่อลักษณะการอบแห้ง และคุณภาพของพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการ การสันสะเทือน.....	40
3.3.2.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	40
3.3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้ง แบบอินฟราเรดร่วมกับการสันสะเทือน (VIR) .....	40
3.3.2.1 การออกแบบการทดลอง.....	40
3.3.2.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	42
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง.....	42
3.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล.....	43
3.6 การวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงาน.....	44
3.7 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของพริกชี้หนูอบแห้ง.....	45
3.7.1 การวิเคราะห์ความแตกต่างสีโดยรวม.....	45
3.7.2 การวิเคราะห์ปริมาตรและความหนาแน่นมวลรวม.....	45
3.7.3 การวิเคราะห์การหดตัว.....	46
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	47
4.1 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของ พริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด.....	47
4.1.1 ลักษณะการอบแห้งของพริกชี้หนู.....	47
4.1.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล.....	49



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	49
4.1.4 คุณภาพทางกายภาพของพริกชี้หนูปอบแห้ง: ค่าสี ความหนาแน่นมวลรวม และเปอร์เซ็นต์การหดตัว.....	50
4.2 สถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน.....	51
4.2.1 ลักษณะการอบแห้งของพริกชี้หนู.....	51
4.2.2 การวิเคราะห์สมการการถดถอยกำลังสอง.....	53
4.2.3 อิทธิพลของปัจจัยของการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR ต่อการเปลี่ยนแปลงสี.....	56
4.2.3.1 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความเร็วรอบการสั่นสะเทือนต่อการเปลี่ยนแปลงสี.....	56
4.2.3.2 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความหนาของชั้นวัสดุ.....	57





## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.3.3 อิทธิพลของความดันภายในห้องอบแห้งและความหนาของชั้นวัสดุ.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	61
5.1 อิทธิพลของความเข้มข้นสีอินฟราเรดร่วมกับการสันสะเทือน (VIR) ต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของพริกชี้หนู.....	61
5.3 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสันสะเทือน.....	61
บรรณานุกรม.....	62
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก ภาพเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสันสะเทือน.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	72



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

พริกชี้หนูเป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและผูกพันเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของคนไทยเรามาตั้งแต่ในอดีตคงจะเห็นได้จากอาหารที่รับประทานกันในแต่ละมื้อของแต่ละวันนั้นต้องมีพริกชี้หนูเป็นส่วนประกอบในการปรุงแต่งรสอาหาร เครื่องแกงต่างๆ กันทุกครัวเรือน นอกจากนี้ยังใช้เป็น ส่วนผสมของยาต่างๆ ทั้งรับประทานและดูทาภายนอกร่างกาย เช่น ยาช่วยเจริญอาหารและขับลม ขับปัสสาวะ แก้ไข้หวัด แก้ไอ ฯลฯ ตลอดจนใช้ผสมสุราทาบริเวณที่ถูกแมลงกัดต่อย ซึ่งโดยส่วนใหญ่ จะต้องทำการแปรรูปพริกชี้หนูสดให้อยู่ในลักษณะแห้ง อย่างไรก็ตามเพื่อรักษาสารสำคัญที่มีอยู่ในพริกชี้หนูซึ่งเป็นพืชสมุนไพร การอบแห้งแบบลมร้อนไม่สามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงได้ แต่การอบแห้งที่ อุณหภูมิต่ำส่งผลเสียต่อลักษณะการอบแห้งกล่าวคือ อัตราการอบแห้งต่ำและต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นานขึ้น (Demiray et al., 2013; Wankhadea et al., 2013)

การอบแห้งถือเป็นกระบวนการลดความชื้นเพื่อแปรรูปยาสมุนไพรที่มีความสำคัญ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนหรือเทคนิคการอบแห้งอื่นๆ มีการพิสูจน์ว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยให้ปริมาณสารสำคัญที่พบในยาสมุนไพร เช่น สารประกอบฟีนอล สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ และสารต้านอนุมูลอิสระ มีปริมาณมากขึ้น Lee et al., 2006; Mahinda et al., 2010; Park et al., 2009; Niamnuy et al., 2011) นอกจากนี้การอบแห้งแบบอินฟราเรดใช้การให้ความร้อนแบบแผ่รังสี เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับว่ามีข้อดีว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งเป็นการให้ความร้อนแบบพาความร้อนหลายประการ ซึ่งข้อดีหลักๆของเทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดได้แก่ การสร้างระบบอบแห้งแบบอินฟราเรดทำได้ง่าย การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถใช้ร่วมกับการให้ความร้อนรูปแบบอื่นๆได้สะดวก รังสีอินฟราเรดให้ความร้อนได้เร็ว ใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้น และให้อัตราการถ่ายเทพลังงานสูง และพลังงานคลื่นจากรังสีอินฟราเรดสามารถถูกซึบเข้าสู่วัสดุที่ต้องการให้ความร้อนได้โดยตรงจึงสูญเสียพลังงานต่ำ (Khir et al., 2006; Shih et al., 2008; Zare et al., 2012) ทั้งนี้มีการค้นพบว่าเทคนิคการอบแห้งแบบนี้สามารถให้ความร้อนแก่วัสดุได้สม่ำเสมอ กว่าเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นจึงส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งดีกว่าด้วย (Sakai and Hanzawa, 1994) จากผลการค้นพบนี้การอบแห้งแบบอินฟราเรดจึงเป็นเทคนิคการอบแห้งที่อาจให้ผลดีต่อการลดความชื้นพริกชี้หนูในด้านของการเพิ่มปริมาณสารสำคัญและการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง แม้ว่ารังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงานเพื่อการอบแห้งอย่างรวดเร็ว แต่ก็ได้รับความนิยม สำหรับการอบแห้งที่ผิวหน้าของวัสดุเท่านั้น มีรายงานวิจัยพบว่า ความเข้มของรังสีและความหนาของชั้นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการได้รับรังสีอินฟราเรดอย่างสม่ำเสมอ คือ 3100 ถึง 4290 W/cm<sup>2</sup> และ 12 ถึง 16 mm ตามลำดับ (Cakmak and Yildiz, 2011) ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจถึงการได้รับรังสีอินฟราเรด

ในระหว่างอบแห้งอย่างทั่วถึง การใช้เทคนิคเชิงกล เช่น การสั่นสะเทือนจึงน่าจะเป็นประโยชน์ จากงานวิจัยของ Das et al. (2004) รายงานว่าเมื่อใช้วิธีการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงด้วยรังสีอินฟราเรดโดยมีการสั่นสะเทือนของถาดอบแห้งด้วย พบว่าอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดเท่านั้น โดยที่เทคนิคการสั่นสะเทือนสามารถลดอิทธิพลจากความหนาของชั้นวัสดุต่ออัตราการอบแห้งไปได้

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนเพื่อการอบแห้งพริกชี้หนู โดยมีจุดมุ่งหมายในการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการอบแห้ง ได้แก่ ความเข้มข้นรังสีอินฟราเรด การสั่นสะเทือนของเบด ต่อลักษณะการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในกระบวนการ และคุณภาพของพริกชี้หนู นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังเสนอสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

## 1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาพัฒนาวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศสำหรับการอบแห้งพริกชี้หนู โดยมีวัตถุประสงค์จำเพาะดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นรังสีอินฟราเรดต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน

1.2.3 เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนโดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนสำหรับการอบแห้งพริกชี้หนู

1.3.2 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้เทคนิคการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร โดยเฉพาะกรณีศึกษากับพริกชี้หนูซึ่งสามารถต่อยอดความรู้สำหรับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรอื่นๆ ด้วย

1.3.3 แนวทางการพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรม และเป็นจุดแข็งในการจำหน่ายผลิตภัณฑ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ประกอบด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง คือ พริกชี้หนูและในส่วนของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ลักษณะการอบแห้ง (Drying characteristics) และแบบจำลองการอบแห้ง (Drying model) รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดในส่วนต่างๆ ดังนี้

## 2.1 พริก

### 2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของพริก

พริกเป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและผูกพันเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของคนไทยเรามาตั้งแต่โบราณกาล ดังจะเห็นได้จากอาหารที่รับประทานกันในแต่ละมื้อของแต่ละวันนั้นต้องมีพริกเป็นส่วนประกอบในการปรุงแต่งรสอาหาร เครื่องแกงต่างๆ กันทุกครัวเรือน นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมของยาต่างๆ ทั้งรับประทานและถูทาภายนอกร่างกาย เช่น ยาช่วยเจริญอาหารและขับลม ขับปัสสาวะ แก้ไข้หวัด แก้ไอ ฯลฯ ตลอดจนใช้ผสมสุราทาบริเวณที่ถูกแมลงกัด หรือต่อย สามารถบรรเทาอาการเจ็บปวดได้ และความเผ็ดร้อนจะช่วยให้ร่างกายขับเหงื่อออกมาเป็นจำนวนมาก จึงเป็นการช่วยกำจัดสารพิษออกจากร่างกายได้อีกทางหนึ่งด้วย

ในปัจจุบันพริกเป็นพืชหนึ่งที่นิยมปลูกกันทั่วไป ทั้งเป็นพืชผักสวนครัวและมีการปลูกกันเป็นอาชีพในทุกภาคของประเทศ ซึ่งสามารถทำรายได้ให้กับผู้ปลูกได้มากพอสมควร จากสถิติการปลูกพริกของประเทศไทยในปีเพาะปลูก 2525/2526 ของกรมส่งเสริมการเกษตร รายงานว่าพริกเล็ก (พริกชี้หนู) มีการปลูกกันมากที่สุดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือประมาณ 79,968 ไร่ และปลูกรองๆ ลงไปในภาคเหนือ 76,981 ไร่ ภาคตะวันตก 43,781 ไร่ ภาคใต้ 35,872 ไร่ ภาคตะวันออก 7,500 ไร่ และภาคกลางมีการปลูกน้อยที่สุดประมาณ 6,890 ไร่ นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้วยังมีการปลูกพริกชนิดอื่นๆ อีกมาก โดยเฉพาะพริกใหญ่ (พริกชี้ฟ้า) เพื่อใช้ทำเป็นพริกแห้งอีกเป็นจำนวนมากไม่น้อยเช่นกัน

### 2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

เป็นไม้ทรงพุ่มขนาดเล็กสูงประมาณ 45-75 cm ลักษณะลำต้นเป็นสี่เหลี่ยมใบเดี่ยวออกเรียงสลับกัน และตรงข้าม ลักษณะใบคล้ายรูปไข่ ปลายใบแหลม ดอกขนาดเล็กสีขาว ดอกเดี่ยวออกตามข้อลำต้น ประมาณ 1-3 ดอก ผลขนาดเล็ก ยาวประมาณ 1-1.5 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25-0.6 นิ้ว ผลอ่อน มีสีเขียว เมื่อโตเต็มที่จะเปลี่ยนเป็นสีส้ม แดง หรือ แดงปนน้ำตาล ผิวเป็นมัน ขนาดและรูปร่างของผลแตกต่างกันตามพันธุ์ มีรสเผ็ดมากน้อยตามชนิดพันธุ์ ใช้เพิ่มรสชาติอาหารประเภทต่างๆ ให้มีรสเผ็ด เช่น แกง ต้มยำ ยำ ผัด

### 2.1.3 สรรพคุณของพริก

2.1.3.1 แก้เจ็บคอ เสียงแหบใช้น้ำต้มหรือยาชงพริกชี้หนู กลั้วคอแก้ เจ็บคอและเสียงแหบได้ โดยใช้พริกชี้หนูป่นหีบมือเติมน้ำเดือดลง ไป 1 แก้ว ทิ้งไว้พออ่อน ใช้น้ำกลั้วคอ

2.1.3.2 ช่วยขับลม แก้อาหารไม่ย่อย เจริญอาหารโดยกินพริกชี้หนูสวน รักษากระเพาะที่ไม่มีกำลังย่อยอาหาร

2.1.3.3 แก้ปลาตุกยักษ์ใช้พริกชี้หนูสดเขียวหรือแดงก็ได้ ขยี้ตรงที่ปลาตุก แหว่งจะหายปวด ขยี้แล้วจะรู้สึกเย็น (ธรรมดาพริกชี้หนูร้อน) ไม่บวม ไม่ฟกช้ำด้วย

2.1.3.4 แก้วทำแตกใช้พริกชี้หนูทั้ง ๕ ปูนขาว ใส่พอควร เอาไปต้ม เอาน้ำมาแช่แก้วที่แตก ถ้าไม่หาย เอาต้นสลัดได รากหนอนตากยาก ใส่ลงไปด้วย

2.1.3.5 แก้ววมใบพริกชี้หนู บดผสมน้ำมะนาว พอกบริเวณที่บวม

2.1.3.6 รักษาแผลสดและแผลเปื่อยใช้ใบพริกชี้หนู ตำพอกรักษาแผล สดและแผลเปื่อย(อย่าใช้พริกชี้หนูปิดแผลมากเกินไปเพราะจะทำให้ร้อน

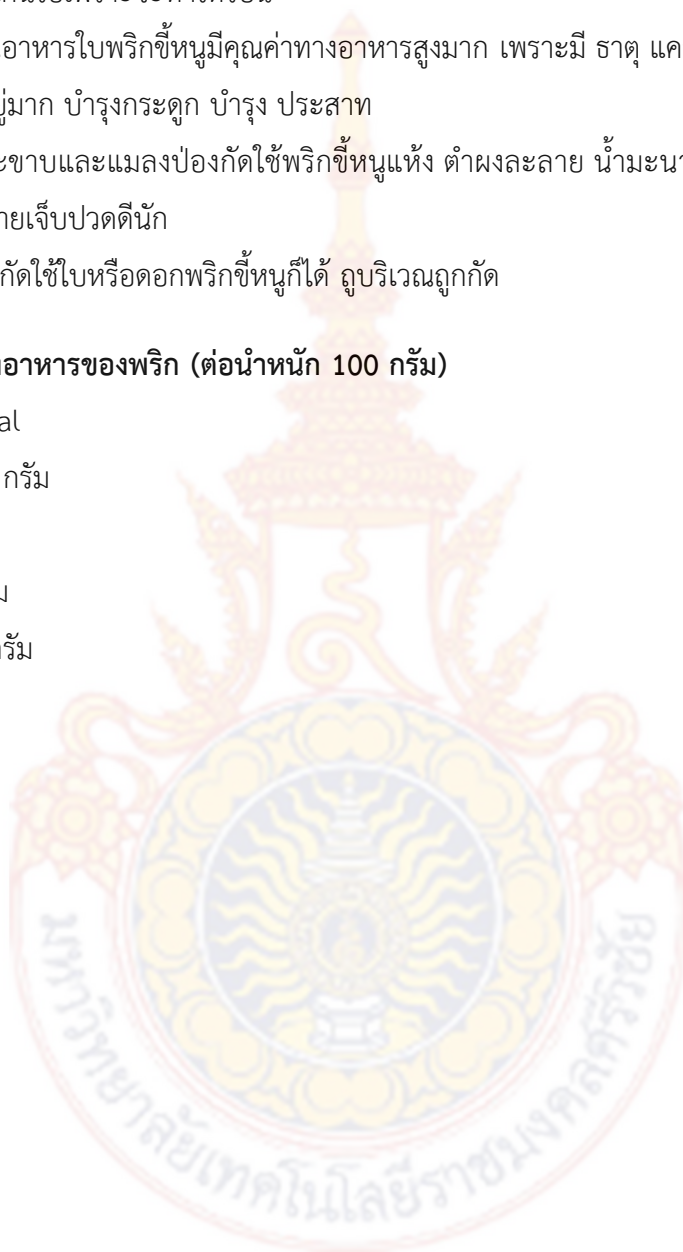
2.1.3.7 ใช้ใบเป็นอาหารใบพริกชี้หนูมีคุณค่าทางอาหารสูงมาก เพราะมี ธาตุ แคลเซียม ฟอสฟอรัส ไวตามีนเอ และบียู่มาก บำรุงกระดูก บำรุง ประสาท

2.1.3.8 แก้วพิษตะขาบและแมลงป่องกัดใช้พริกชี้หนูแห้ง ตำผงละลาย น้ำมะนาว ทาแผลตะขาบกัด แมลงป่องต่อย หายเจ็บปวดตื้อน

2.1.3.9 มดคันไฟกัดใช้ใบหรือดอกพริกชี้หนูก็ได้ ฎุบริเวณถูกกัด

#### 2.1.4 คุณค่าทางอาหารของพริก (ต่อน้ำหนัก 100 กรัม)

- พลังงาน 40 kcal
- คาร์โบไฮเดรต 9 กรัม
- น้ำตาล 5 กรัม
- โปรตีน 1.9 กรัม
- ใยอาหาร 1.5 กรัม





รูปที่ 2.1 พริกชี้หนู

## 2.2 หลักการอบแห้งวัสดุ

ในการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนถ่ายเทจากกระแสอากาศไปยังผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำ โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุเคลื่อนที่ออกมาถึงผิววัสดุโดยการเคลื่อนที่แบบคาปิลารี (Capillary flow) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว ซึ่งมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น ลักษณะการอบแห้งเป็นการอธิบายปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุในระหว่างการอบแห้ง รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงความชื้นแสดงตามฟังก์ชันของเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 2.6 โดยปกติความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาสามารถแบ่งพิจารณาเป็นช่วงตามลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทความชื้น ซึ่งสามารถแบ่งเป็นช่วงต่างๆได้ดังนี้

### 2.2.1 ช่วงการปรับสถานะเบื้องต้น

จากรูปที่ 2.6 อยู่ในช่วง I เป็นช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง และรูปที่ 2.8 อยู่ในช่วง A ถึง B ช่วงนี้อุณหภูมิที่พื้นผิวของวัสดุอบแห้งเข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน และมีการระเหยของความชื้นเกิดขึ้นที่พื้นผิวของวัสดุ ค่าอัตราการอบแห้งของวัสดุมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น(ซึ่งอาจเริ่มขึ้นภายหลังช่วงเวลาสั้นๆที่วัสดุปรับเข้าสู่สภาวะการอบแห้ง)

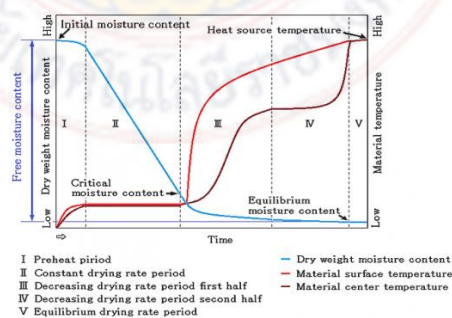
### 2.2.2 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

จากรูปที่ 2.6 อยู่ในช่วง II และรูปที่ 2.8 อยู่ในช่วง B ถึง C เป็นช่วงที่วัสดุมีความชื้นสูงอยู่ และบริเวณผิววัสดุเต็มไปด้วยน้ำอิสระ (Free water) ซึ่งเป็นน้ำที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างของอาหาร อาจมีการเกาะตัวกับองค์ประกอบของอาหารบ้างแต่แรงเกาะไม่แข็งแรงมากนัก มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีและจุลินทรีย์สามารถนำน้ำส่วนนี้ไปใช้ได้ ในอาหารมีองค์ประกอบที่ละลายหรือเกิดคอลลอยด์กับน้ำได้อยู่มากมาย องค์ประกอบเหล่านี้มีพันธะกับน้ำ และอยู่ในสภาวะ Adsorbed water และ Bound water ส่วนที่เหลือเป็นน้ำอิสระ (Free water)

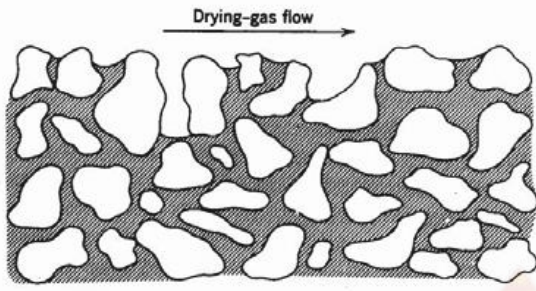
ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นที่ผิววัสดุเท่านั้น สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิของวัสดุคงที่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม (สมชาติ โสภณธรณ์, 2540) ปริมาณน้ำที่ผิวหน้าของวัสดุมีค่าคงที่ เนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในวัสดุเคลื่อนที่ออกมาแทนที่น้ำที่อยู่บริเวณผิวหน้าที่ระเหยไปอย่างเพียงพอ จนถึงระดับหนึ่งที่น้ำบริเวณผิวหน้าแห้งหมด ทำให้อัตราการทำแห้งลดลง จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงเรียกว่า Critical moisture content โดยการถ่ายเทมวลเกิดจากการแพร่ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุและที่อากาศรอบนอก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า หากความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุมีค่าน้อย น้ำระเหยจากผิววัสดุได้อย่างรวดเร็ว อัตราการอบแห้งมีค่าสูง ในทางตรงกันข้าม หากความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกมีค่ามาก น้ำระเหยจากผิววัสดุได้ช้า อัตราการอบแห้งในช่วงนี้มีค่าน้อย ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุนั้นระบุโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer Coefficient) ตามลำดับ โดยสัมประสิทธิ์ทั้งสองค่านี้ขึ้นอยู่กับความเร็วและทิศทางของไหลของตัวกลางการอบแห้งผ่านวัสดุเป็นหลัก

### 2.2.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

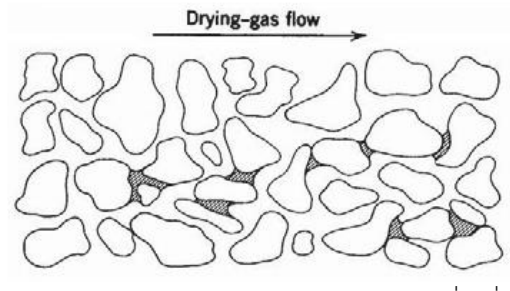
เริ่มจากจาก Critical moisture content จนสุดท้ายของการทำแห้ง โดยที่ค่าความชื้นของวัสดุเริ่มลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยอัตราการลดลงของความชื้นค่อยๆลดลงกับเวลาการอบแห้งที่เพิ่มมากขึ้น เรียกว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่หนึ่ง ดังรูปที่ 2.2 ช่วงที่ III และรูปที่ 2.4 อยู่ในช่วง C ถึง D น้ำที่อยู่ภายในวัสดุเคลื่อนที่มายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวของวัสดุไปยังอากาศ โดยเกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลขึ้นภายในเนื้อและผิวของวัสดุ ความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในวัสดุเป็นตัวควบคุมอัตราการระเหยของน้ำ อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก ดังแสดงในรูปที่ 2.3a เมื่ออบแห้งต่อไป โมเลกุลน้ำภายในวัสดุขึ้นในแพร่กระจายสู่ชั้นบน และเกิดการระเหยเป็นไออีก ดังรูปที่ 2.3b จนกระทั่งในที่สุดความชื้นของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงหรืออาจกล่าวได้ว่ากระบวนการอบแห้งสิ้นสุด ดังรูปที่ 2.2 ช่วงที่ IV และรูปที่ 2.4 อยู่ในช่วง D ถึง E ในช่วงสุดท้ายของการอบแห้ง ผิวหน้าของวัสดุมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอากาศแห้งที่เคลื่อนที่ผ่าน แต่โมเลกุลน้ำที่เหลืออยู่เล็กน้อย ยังคงสามารถระเหยได้อีกจนกระทั่งเกิดความชื้นสมดุลขึ้น ที่จุดนี้ความชื้นภายในวัสดุเท่ากับความชื้นของอากาศแห้งที่เคลื่อนที่ผ่าน แต่วัสดุยังคงมีโมเลกุลน้ำอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้นดังรูปที่ 2.3



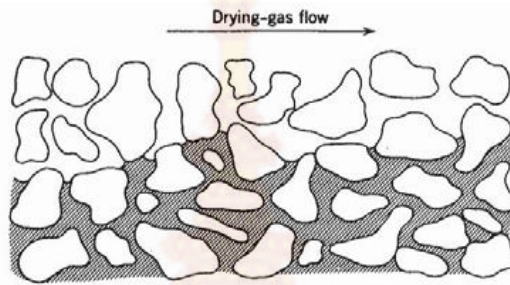
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (Moisture content) และอุณหภูมิระหว่างอบแห้ง (Heat-tech Co.,Ltd., 2015)



(b) ช่วงเวลาการอบแห้งลดลงครั้งที่สอง



(a) ช่วงเวลาการอบแห้งลดลงครั้งที่หนึ่ง



(c) ช่วงเวลาสิ้นสุดการ

อบแห้ง

### รูปที่ 2.3 การแพร่กระจายความชื้นในวัสดุ (Foust et al., 1980)

ข้อมูลลักษณะการอบแห้งมีความสำคัญ เพราะเป็นข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของวัสดุกับเวลา ซึ่งทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถระบุเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ อันนำไปสู่ความสามารถในการออกแบบกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นกับเวลาแล้ว ยังอาจคำนวณอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) จากข้อมูลลักษณะการอบแห้งได้ดังสมการ (2.4)

$$DR = -\frac{M_S}{A} \frac{dM}{dt} \quad (2.1)$$

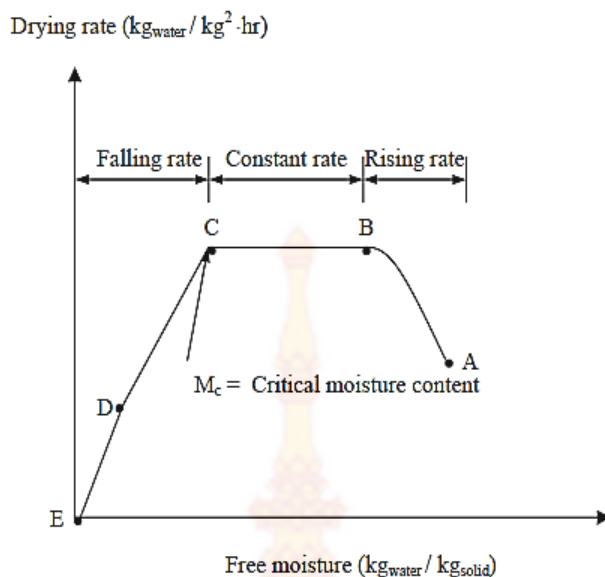
เมื่อ  $M_S$  = มวลแห้งของวัสดุ (g)

$A$  = พื้นที่ผิวของวัสดุที่เกิดการระเหยน้ำ ( $m^2$ )

สำหรับการหาค่า  $M_S$  ของวัสดุซึ่งได้จากการนำเอาวัสดุไปอบให้แห้งจนไม่มีความชื้นเหลืออยู่ เพื่อให้มั่นใจว่าวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่ามวลแห้งของวัสดุนั้นเหมาะสมอย่างแท้จริง ในกรณีที่ไม่ทราบค่า  $A$  ก็อาจระบุค่าอัตราการอบแห้งในรูปของมวลน้ำที่ระเหยไปต่อหนึ่งหน่วยเวลาได้

ถ้านำค่าอัตราการอบแห้ง (DR) มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้น (MC) ได้เส้นโค้งที่เรียกว่า เส้นโค้งอัตราการอบแห้ง (Drying Rate Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแตกต่างจากเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่เปลี่ยนไปกับเวลา ซึ่งเรียกว่า เส้นโค้งการอบแห้ง (Drying Curve)



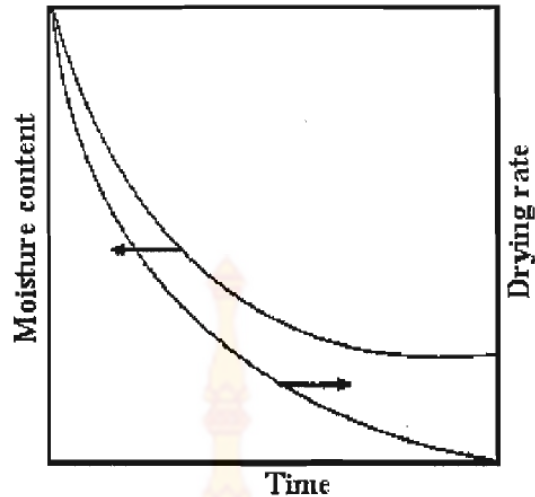


รูปที่ 2.4 ลักษณะของเส้นโค้งอัตราการอบแห้ง (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540)

### 2.3 แบบจำลองการอบแห้ง

การอบแห้ง เป็นกระบวนการการถ่ายเทความร้อนและมวล เพื่อต้องการระเหยน้ำออกจากวัสดุที่อบแห้ง จากหลักการของลักษณะการอบแห้งวัสดุประกอบด้วยช่วงอัตราการอบแห้ง 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial Adjustment Period), ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate Drying Period) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-rate Drying Period) อย่างไรก็ตามชีววัสดุหรือวัสดุทางการเกษตรส่วนใหญ่ เมื่ออบแห้งแบบการพาความร้อนปรากฏเพียงช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ซึ่งแบบจำลองการอบแห้งที่ใช้กันในปัจจุบันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของวัสดุ (Moisture ratio, MR) และเวลาในการอบแห้ง (time, t) ซึ่งในทางทฤษฎีก็เกิดขึ้นมาจากการพิจารณาลักษณะการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเช่นเดียวกัน ในระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ผิวหน้าของวัสดุไม่ได้ยึดติดไปด้วยน้ำซึ่งแตกต่างจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เนื่องจากการเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในวัสดุไปที่ผิวมีค่าต่ำกว่าอัตราการระเหยของน้ำออกจากผิววัสดุ อัตราการระเหยน้ำในช่วงนี้ถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะที่ปริมาณความชื้นของวัสดุลดลงต่ำกว่าจุดวิกฤติ ศักยภาพของกระบวนการอบแห้งลดลงพร้อมกับอัตราการอบแห้ง

การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรโดยทั่วไปอยู่ในช่วงของอัตราการอบแห้งลดลง นั้นหมายถึงอัตราการอบแห้งลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างการอบแห้ง จากรูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งเปรียบเทียบกับเวลา



รูปที่ 2.5 การอบแห้งวัสดุการเกษตรในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

การทำนายอัตราการอบแห้งของวัสดุการเกษตรในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนั้นค่อนข้างซับซ้อนกว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การวิเคราะห์กลไกการอบแห้งไม่ได้พิจารณาเฉพาะการถ่ายเทความร้อนและมวลที่ผิวภายนอกของวัสดุเท่านั้น แต่ต้องพิจารณาถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ความชื้นภายในวัสดุด้วย มีทฤษฎีมากมายที่อธิบายลักษณะการอบแห้งของวัสดุเกษตรในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยเฉพาะ สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semitheoretical Drying Equation) และ สมการการอบแห้งเชิงประจักษ์ (Empirical Drying Equation) ที่ช่วยในการออกแบบเครื่องอบแห้งได้ดี

### 2.3.1 สมการการอบแห้งทางทฤษฎี

ลักษณะกลไกทางกายภาพของความชื้นสำหรับวัสดุเกษตรที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนอาจเกิดขึ้นในแบบต่างๆ ดังนี้คือ

1. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจาก Capillary Flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface Force)
2. การแพร่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Liquid Diffusion)
3. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากการแพร่ความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็กๆ (Surface Diffusion)
4. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion)
5. การเคลื่อนที่ของไอน้ำในรูปของไอน้ำเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Diffusion)
6. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวและไอน้ำเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันรวม (Hydrodynamic Flow)

จากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุดังกล่าว Luikov (1996) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุ และความดันรวม ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial t} &= \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}\theta + \nabla^2 K_{13}P \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}\theta + \nabla^2 K_{23}P \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}\theta + \nabla^2 K_{33}P\end{aligned}\quad (2.2)$$

เมื่อ  $\nabla M$  = ความชื้นที่เปลี่ยนแปลง

$\nabla \theta$  = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

$\nabla P$  = ความดันที่เปลี่ยนแปลง

$K_{11}$ ,  $K_{12}$  และ  $K_{33}$  คือ Phenomenological coefficients

สมการรอบแหงของ Luikov ในการอบแหงวัสดุการเกษตรที่ช่วยให้เข้าใจง่ายขึ้นได้ เช่น การไหลของความชื้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันอย่างมีนัยสำคัญเกิดขึ้นเฉพาะในการอบแหงวัสดุอื่นๆ ที่อุณหภูมิสูงกว่าช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแหงทั่วไป นั่นคือ สามารถตัดเทอมความดันของสมการ Luikov ได้ ดังนั้นสมการการอบแหงที่ได้ คือ

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial t} &= \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}\theta \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}\theta\end{aligned}\quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.6) สามารถอธิบายการอบแหงและพฤติกรรมของความร้อนของวัสดุการเกษตรได้ดีมาก แต่ในการอบแหงจริงอาจไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของวัสดุ เนื่องจากวัสดุที่แหงและแห้งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก ดังนั้นแบบจำลองการอบแหงทางทฤษฎีที่ได้แสดงดังสมการ (2.7) ซึ่งเรียกว่า แบบจำลองการถ่ายเทมวลของฟิคส์ (Fick's second law)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M \quad (2.4)$$

โดยทั่วไปว่าการไหลของความชื้นภายในวัสดุเกิดขึ้นโดยการแพร่ ดังนั้น  $K_{11} = D$  (สัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้น) และเมื่อ

$$\nabla^2 M = \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} \quad (2.5)$$

สมการ (2.7) จึงสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{C}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (2.6)$$

เมื่อ  $M$  = อัตราการถ่ายเทมวล, kg/s

$t$  = เวลา, s

$r$  = ระยะทางการแพร่ความชื้น, m

$D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น,  $m^2/s$

$C$  = ค่าคงที่

โดย  $C = 0$  สำหรับการแพร่ความชื้นในวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก

$C = 1$  สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก

$C = 2$  สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม

โดยที่เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตสามารถเขียนได้ว่า  $M(r,0) = M_{in}$  และ  $M(r,t) = M_{eq}$  และกำหนดให้

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $MR$  = อัตราส่วนความชื้น

$M_{in}$  = ความชื้นเริ่มต้น, ฐานแห้ง

$M_{eq}$  = ความชื้นสมดุล, ฐานแห้ง

และคำตอบของสมการ (2.10) ซึ่งสอดคล้องกับสภาวะเริ่มต้น และสภาวะขอบเขตตามลักษณะรูปทรงของวัสดุ สามารถเขียนได้ดังนี้

สำหรับวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (Infinite Slap) สามารถเขียนได้ว่า

$$MR = \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ - \frac{(2n+1)^2 \pi^2 Dt}{4L^2} \right] \quad (2.8)$$

เมื่อ  $n$  = ลำดับที่ของฟังก์ชัน (1, 2, 3,...)

$L$  = ความหนาของวัสดุ (m)

สำหรับทรงกลม (Sphere) ที่มีรัศมีเท่ากับ  $r$

$$MR = \left( \frac{6}{\pi^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[ -\frac{n^2 \pi^2 Dt}{r^2} \right] \quad (2.9)$$

สำหรับทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีรัศมีเท่ากับ  $r$

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{r^2 \beta_n^2} \exp \left[ -\frac{\beta_n^2 Dt}{r^2} \right] \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\beta_n$  = ราก (Roots) ของฟังก์ชันเบสเซลออเดอร์ศูนย์ตามลำดับที่  $n$

เห็นได้ว่าสมการ (2.11) มีจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุด และเทอมท้ายๆ มีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นเช่นเดียวกับสมการ (2.12) และ (2.13) เมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามากและค่าความแตกต่างน้อยกว่า 5% ถ้าอัตราส่วนของ  $D\pi^2 t/r^2$  มีค่ามากกว่า 1.2 (Senadeera et al., 2003) ดังนั้นเราอาจตัดเทอมท้ายๆ ออกไปได้ โดยคงไว้เฉพาะเทอมแรก ( $n = 1$ ) ซึ่งคำตอบที่ได้อาจไม่ผิดไปมากนัก โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามาก จึงสามารถเขียนสมการใหม่สำหรับวัสดุแผ่นระนาบ วัสดุทรงกลมและวัสดุทรงกระบอก ตามลำดับได้ดังนี้ (Lee et al., 2004; Gachovska et al., 2008; Khazaei et al., (2008); Vega-Galvez et al., 2008)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left( -\frac{\pi^2 Dt}{4 L^2} \right) \quad (2.11)$$

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp \left( -\frac{\pi^2 Dt}{r^2} \right) \quad (2.12)$$

$$MR = \frac{4}{r^2 \beta^2} \exp \left( -\beta^2 \frac{Dt}{r^2} \right) \quad (2.13)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ( $D$ , Diffusion Coefficient) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในสมการของการอบแห้งตามรูปแบบสมการทางทฤษฎีที่ต้องนำมาใช้ในการจำลองสภาพการอบแห้ง โดยสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าคงที่ตลอดช่วงของการอบแห้ง (ไม่ขึ้นกับความชื้น) สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของความดันไอน้ำภายในและภายนอกวัสดุ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุทำให้ค่าความดันไอน้ำภายในและภายนอกแตกต่างกัน รูปแบบของ

สมการ Arrhenius เป็นที่นิยมในการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิอบแห้ง แสดงได้ดังสมการ

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.14)$$

เมื่อ  $D_0$  = Arrhenius factor,  $m^2/s$

$E_a$  = พลังงานกระตุ้น,  $kJ/kmol$

$R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ  $8.314 \text{ kJ/kmol.K}$

$T_{abs}$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์,  $K$

จากรายงานวิจัยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของวัสดุการเกษตรที่อบแห้งด้วยวิธีการพาความร้อนอยู่ในช่วง  $10^{-10} - 10^{-9} \text{ m}^2/s$  (Doymaz, 2005)

### 2.3.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

แบบจำลองกึ่งทฤษฎีเกิดจากการพัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎีเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นเนื่องจากแบบจำลองที่ได้ลดความซับซ้อนของ Fick's second law โดยไม่จำเป็นต้องสมมติฐานเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตของวัสดุ โดยการสมมุติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นของวัสดุ และความชื้นสมดุล ข้อสมมุติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของ Newton ตัวอย่างสมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎีแสดงดังตารางที่ 2.1 แต่ความถูกต้องของแบบจำลองจำกัดอยู่เฉพาะภายใต้เงื่อนไขสำหรับการอบแห้งที่ทำการทดลองเท่านั้น (Fortes and Okos, 1980) สมการดังกล่าวเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_{eq})$$

$$\frac{dM}{(M - M_{eq})} = -k dt \quad (2.15)$$

เมื่อกำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้น  $M(0) = M_{in}$  โดยการอินทิเกรตสมการที่ (2.18) ได้

$$\int_{M_{in}}^{M(t)} \frac{1}{M - M_{eq}} dM = -\int_0^t k dt \quad (2.16)$$

$$\ln \frac{M(t) - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = -kt \quad (2.17)$$

และจัดรูปแบบสมการที่ (2.20) ได้

$$MR = \exp(-kt) \quad (2.18)$$

เมื่อ  $k$  = ค่าคงที่ของการอบแห้ง

### ตารางที่ 2.1 สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

ที่	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง	อ้างอิง
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	(Lewis, 1921)
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(Henderson and Pabis, 1961)
3	Two term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(Henderson, 1974)
4	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	(Yaldiz et al., 2001)

### 2.3.3 สมการอบแห้งเชิงประจักษ์

สมการการอบแห้งเชิงประจักษ์ คือสมการที่สร้างจากแนวโน้มข้อมูลการทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างความชื้นและเวลาการอบแห้ง โดยไม่คิดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกลไกทางกายภาพ (Ozdemir and Devres, 1999) ค่าคงที่ของสมการอบแห้งเป็นการรวมกันของคุณสมบัติการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในขณะอบแห้ง เช่น การแพร่ความชื้น (Moisture diffusivity), การนำความร้อน (Thermal conductivity) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวล (Heat and mass coefficients) ซึ่งพบว่าสามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการตรงกับสภาวะการทดลอง ตัวอย่างสมการการอบแห้งเชิงประจักษ์แสดงดังตารางที่ 2.2

### ตารางที่ 2.2 สมการการอบแห้งเชิงประจักษ์

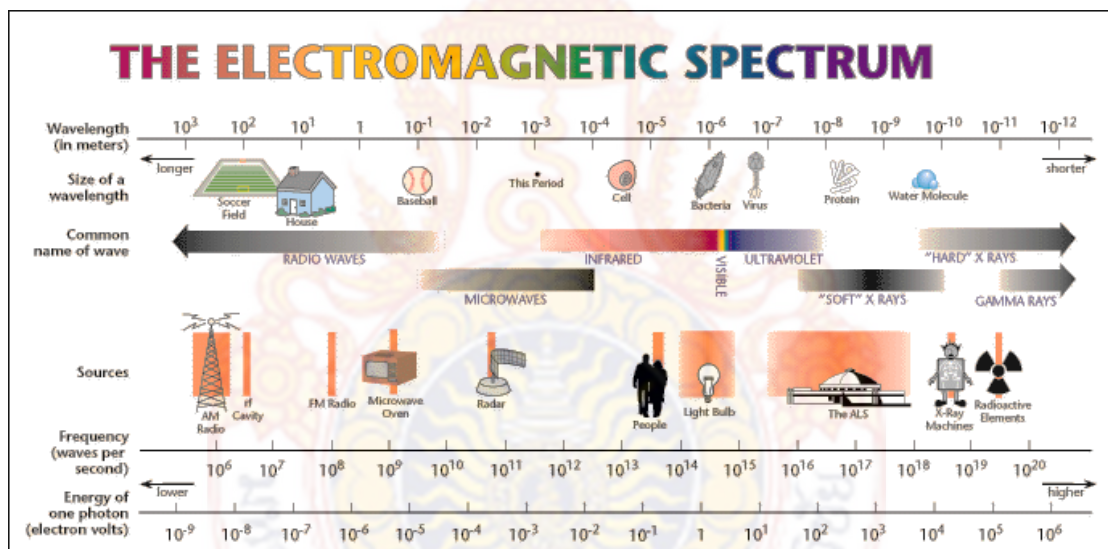
ที่	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง	อ้างอิง
1	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(Page, 1949)
2	Thompson	$t = a \ln MR + b (\ln MR)^2$	(Thompson et al., 1968)
3	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(Wang and Singh, 1978)
4	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(Midilli et al., 2002)
5	linear-plus-exponential	$MR = \exp(-kt^n) + bt + c$	(Sripinyowanich and Noomhorm, 2011)

## 2.4 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลังได้รับความสนใจในปัจจุบันเนื่องจากมีข้อดีหลายอย่างอย่างไรก็ตามเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานดังต่อไปนี้

### 2.4.1 หลักการพื้นฐานการแผ่รังสี

เป็นการแพร่ออกไปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลาง ความถี่ (Frequency,  $\nu$ ) และความยาวคลื่น (Wavelength,  $\lambda$ ) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางใดๆเป็นไปตามสมการ  $\lambda = c/\nu$  โดยที่  $c$  เป็นความเร็วของคลื่นในตัวกลางนั้นๆ วัตถุใดๆเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์ วัตถุนั้นๆแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) ออกมา ซึ่งเป็นผลมาจากการสั่นและการหมุนของโมเลกุล อะตอม และอิเล็กตรอนภายในวัตถุนั้น ซึ่งรังสีความร้อนก็จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีช่วงความยาวคลื่นครอบคลุมระหว่างรังสีที่มองเห็นได้ (Visible) รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation, IR) และบางส่วนของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation, UV) ส่วนรังสีอินฟราเรดนั้นเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างรังสีที่มองเห็นได้และคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (กมล พลคำ, 2553)

รังสีอินฟราเรดมีความยาวคลื่นในช่วง 0.75-1000  $\mu\text{m}$  โดยแบ่งย่อยได้เป็น 3 ช่วง คือ รังสีอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared, NIR) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.78-1.4  $\mu\text{m}$  รังสีอินฟราเรดกลาง (Middle Infrared, Mid-IR) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1.4-3  $\mu\text{m}$  และรังสีอินฟราเรดไกล (Far- Infrared, FIR) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 3-1000  $\mu\text{m}$  (Sakai and Hanzawa, 1994) สำหรับการทำความร้อนโดยรังสีอินฟราเรด รังสีอินฟราเรดไกลถือเป็นช่วงรังสีที่เหมาะสม โดยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทะลุเข้าไปในวัสดุไปกระตุ้นโมเลกุลน้ำภายในวัสดุ ทำให้โมเลกุลน้ำสั่น และเกิดความร้อนขึ้น (Ginzburg, 1969; Hebbler and Rostogi, 2001) จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา มีการใช้เทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดเพื่อลดความชื้นของวัสดุอาหารและวัสดุเกษตรหลายชนิด ได้มีการ



ยืนยันว่าการอบแห้งแบบอินฟราเรดใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าและใช้พลังงานน้อยกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน (Khair et al., 2006; Nowak and Lewicki, 2004)

วัตถุที่สามารถแผ่รังสีออกมาหรือดูดกลืนรังสีได้อย่างสมบูรณ์เรียกว่าวัตถุดำ (Blackbody) ที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นเฉพาะหนึ่งๆ ไม่มีผิวของวัตถุใดสามารถแผ่รังสีออกมาโดยมีพลังงานมากกว่าวัตถุดำ วัตถุดำสามารถดูดกลืนรังสีที่ตกกระทบทั้งหมดได้โดยไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นและทิศทางที่ตกกระทบ ทำนองเดียวกัน วัตถุดำแผ่พลังงานออกมาในรูปของรังสีอย่างสม่ำเสมอในทุกๆ ทิศทาง จากการศึกษาและทดลองของ Joseph Stefan พบว่าพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำต่อหนึ่งหน่วยเวลาและต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เป็นไปตามสมการ

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (2.19)$$

โดยที่  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  เรียกว่า ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลท์มานน์ (Stefan-Boltzmann constant) และ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature) ในหน่วยเคลวิน ความสัมพันธ์ตามสมการนี้ได้รับการตรวจสอบในทางทฤษฎีโดย Ludwig Boltzmann ดังนั้นสมการนี้จึงรู้จักกันในนามของ Stefan-Boltzmann law และเรียก  $E_b$  ว่ากำลังของการแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody emissive power)

กฎของสเตฟาน-โบลท์มานน์ ให้ค่าของกำลังของการแผ่รังสีซึ่งเป็นผลรวมของการแผ่รังสีตลอดทุกช่วงของความยาวคลื่น ในกรณีที่ต้องการทราบเพียงผลรวมของพลังงานการแผ่รังสีของวัตถุดำ ที่มีอุณหภูมิสัมบูรณ์ T ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และต่อหนึ่งหน่วยความยาวคลื่นของคลื่นที่มีความยาวคลื่นเฉพาะ  $\lambda$  ค่าหนึ่ง กฎของสเตฟาน-โบลท์มานน์ไม่สามารถทำได้ ดังนั้น Max Planck จึงได้พัฒนาสมการนี้โดยการเชื่อมโยงเข้ากับทฤษฎีควอนตัมของเขา จนได้สมการใหม่ที่เรียกว่า กฎของแพลงค์ (Planck's law) ดังสมการ

$$E_b(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T)] - 1} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}) \quad (2.20)$$

$$\text{โดยที่ } C_1 = 2\pi h C_0^2 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$C_2 = hc_0/k = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

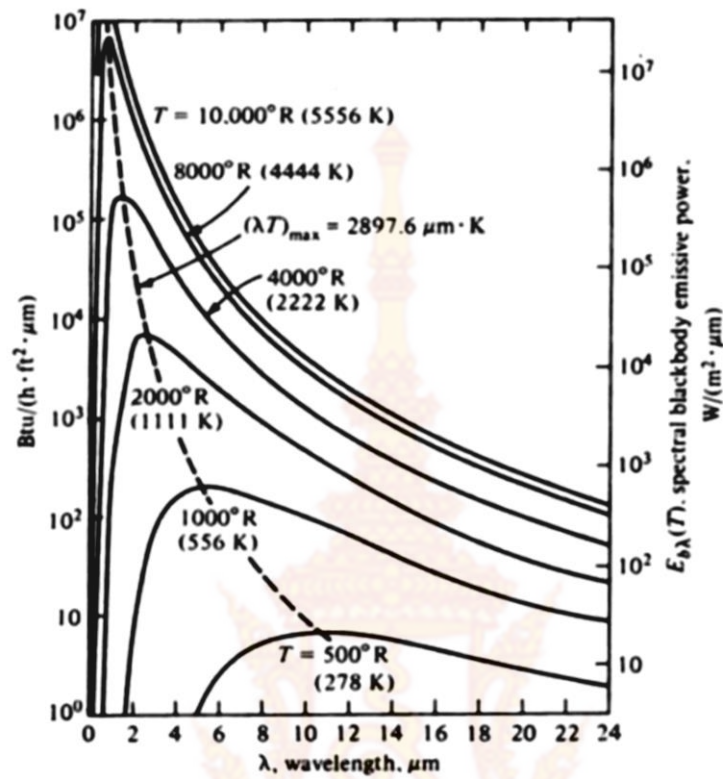
T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของผิว K

$\lambda$  = ความยาวคลื่นที่แผ่ออกมา  $\mu\text{m}$

ความสัมพันธ์ตามสมการนี้ใช้ได้กับพื้นผิวที่อยู่ในสุญญากาศหรืออากาศ สำหรับตัวกลางอื่นๆ ต้องแทน  $C_1$  ด้วย  $C_1/n^2$  โดยที่ n คือ ดัชนีหักเห (Index of refraction) ของตัวกลางนั้น

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจุดยอดของเส้นโค้งดังรูปที่ 2.7 เลื่อนไปทางด้านที่มีความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า ความยาวคลื่น  $\lambda_m$  จุดยอดนี้สำหรับเฉพาะ T ใดๆ เป็นไปตามกฎการเลื่อนที่ของวิน (Wien's displacement law) ดังสมการ

$$(\lambda T)_{\max \text{ power}} = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2.21)$$



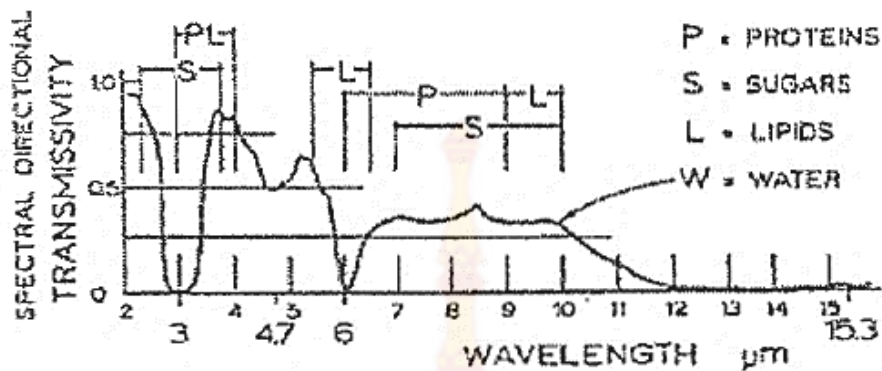
รูปที่ 2.7  
ความยาว

กราฟแสดง  
คลื่น ณ จุด

ยอด จากการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิต่างๆ (Ozisik, 1985)

#### 2.4.2 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยน้ำ

รังสีอินฟราเรดที่แผ่ไปยังวัสดุส่วนมากถูกดูดกลืนโดยชั้นฟิล์มบางๆ ของน้ำ น้ำแข็ง ไขมัน หรือ สารละลายน้ำ (water solution) ที่มีอยู่ในแคปิลลารี (capillary) ภายในวัสดุหรือโดยไอน้ำที่เกิดขึ้นรอบๆ วัสดุ ซึ่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำที่สถานะแตกต่างกันดูดกลืนรังสีที่มีความเข้มแตกต่างกัน Jamieson et al. (1963) และ Saprrow and Cess (1970) พบว่าไอน้ำที่ 0°C สามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 1.14, 1.38 และ 1.87  $\mu\text{m}$  ได้น้อย แต่ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่น 2.7 และ 6.3  $\mu\text{m}$  ได้ดี ส่วนน้ำในสถานะของเหลว (liquid water) ที่ 25°C ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่น 1.19, 1.43, 1.94, 2.93, 4.72 และ 6.10  $\mu\text{m}$  ได้น้อยแต่ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่น 3, 4.7, 6 และ 15.3  $\mu\text{m}$  ได้ดี ดังแสดงในรูป 2.8 สำหรับการดูดกลืนรังสีของไอน้ำที่อุณหภูมิ 27-827°C ขึ้นอยู่กับมวลไอน้ำต่อพื้นที่ ความดัน และอุณหภูมิ ส่วนอากาศมีผลกระทบน้อยมากต่อการดูดกลืนรังสีของไอน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมีผลต่อค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตั้งตารางที่ 2.3 โดยน้ำในสถานะของเหลวเริ่มดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตั้งแต่ฟิล์มที่มีขนาดบางๆ และที่ความหนา 10  $\mu\text{m}$  สามารถดูดกลืนรังสีได้ดีที่สุด



รูปที่

2.8 ย่านการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สำคัญขององค์ประกอบหลักของอาหารเปรียบเทียบกับสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำในสถานะของเหลว (Sandu, 1986)

ตารางที่ 2.3 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยฟิล์มน้ำ (Sandu, 1986)

ความหนาของฟิล์มน้ำ $\mu\text{m}$	ความยาวคลื่น $\mu\text{m}$			
	3.0	4.7	6.0	15.3
1.2	0.80	0.04	0.30	-
3.0	0.97	0.10	0.55	-
10.0	1.00	0.35	1.00	1.00

### 2.4.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว

พลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนที่ออกจากพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่ง (i) เมื่อมีการกระทบลงบนพื้นผิวที่สอง (j) อาจได้รับการดูดกลืนหรือสะท้อนกลับ แต่ถ้าพื้นผิวดังกล่าวเป็นวัตถุดำ รังสีซึ่งตกกระทบถูกดูดกลืนไว้ทั้งหมด ความร้อนจากการแผ่รังสีจากวัตถุหนึ่งอาจถ่ายเทมายังอีกวัตถุหนึ่งได้บางส่วนหรือทั้งหมด สัดส่วนของรังสีความร้อนที่ตกกระทบพื้นผิว j ต่อรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิว i เรียกว่า view factor หรือ shape factor ( $F_{ij}$ ) การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุดำที่อุณหภูมิแตกต่างกันสามารถแสดงความสัมพันธ์อยู่ในสมการของสตีเฟน-โบลซ์แมนและ shape factor

$$Q_b = A_i \times F_{ij} \times \sigma(T_i^4 - T_j^4) \quad (2.22)$$

เมื่อ  $Q_b$  = อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุดำ,  $W$

$A_i$  = พื้นที่ผิวของวัตถุ  $i$ ,  $m^2$

$F_{ij}$  = view factor หรือ shape factor ระหว่างพื้นผิว  $i$  และ  $j$

$\sigma$  = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann =  $5.67 \times 10^{-8}$ ,  $W/m^2.K^4$

$T_i$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิว  $i$ ,  $K$

$T_j$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิว  $j$ ,  $K$

การพิจารณาปัญหาการแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณซึ่งล้อมรอบด้วยพื้นผิวหลายอัน (Enclosure) และเป็นพื้นผิวที่แท้จริงหรือพื้นผิวเทา (Gray surfaces) ซึ่งมีการสะท้อนรังสีความร้อนออกจากทุกพื้นผิว โดยมีรังสีบางส่วนถูกดูดกลืนไว้เท่านั้น ในการวิเคราะห์สมมติว่าแต่ละพื้นผิวใน enclosure มีอุณหภูมิเท่ากันทุกจุด (Isothermal) และตัวกลางระหว่างพื้นผิวภายใน Enclosure สมมติว่าเป็น Nonparticipating medium คือ ไม่มีผลต่อรังสีความร้อน อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิภายใน Enclosure ที่ประกอบด้วยพื้นผิว  $i$  และพื้นผิว  $j$  สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการของ สตีเฟน-โบลซ์แมน ค่าการแผ่รังสีและ shape factor ดังนี้

$$Q_{ij} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{ij}} + \frac{1 - \epsilon_j}{\epsilon_j A_j}} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $Q_{ij}$  = อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุ  $i$  และ  $j$ ,  $W$

$A_j$  = พื้นที่ผิวของวัตถุ  $j$ ,  $m^2$

$\epsilon_i$  = ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ของวัตถุ  $i$

$\epsilon_j$  = ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ของวัตถุ  $j$

ในกรณีที่ enclosure ประกอบด้วยพื้นผิวมากกว่าสองพื้นผิว การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.9 และอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิออกจากพื้นผิว  $i$  มีค่าเท่ากับผลรวมของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว  $i$  และพื้นผิวอื่นๆ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิว (Emissive power) พลังงานจากรังสีทั้งหมดที่ออกจากพื้นผิว (Surface radiosity) ค่าการแผ่รังสีและ Shape factor ใน รูปสมการ

$$\frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i A_i}} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(A_i - F_{ij})^{-1}} \quad (2.24)$$

โดยที่  $E_{bi}$  คำนวณได้จาก

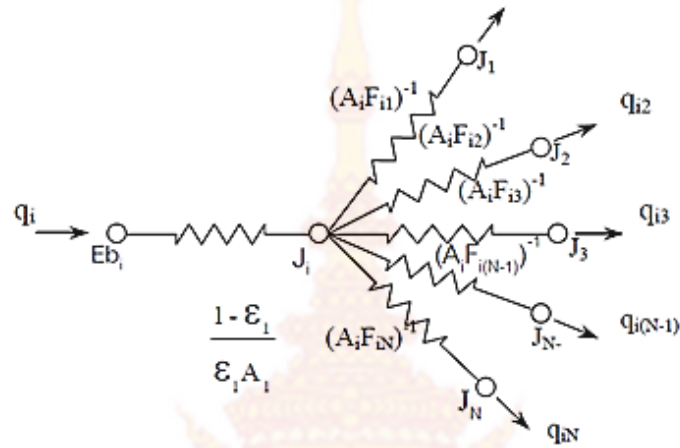
$$E_{b_i} = \sigma T_i^4 \quad (2.25)$$

เมื่อ  $E_{b_i}$  = Emissive power ของพื้นผิว  $i$ ,  $W/m^2$

$J_i$  = ค่า surface radiosity ของผิว  $i$ ,  $W/m^2$

$J_j$  = ค่า surface radiosity ของผิว  $j$ ,  $W/m^2$

$N$  = จำนวนพื้นผิวภายใน Enclosure



รูปที่ 2.9

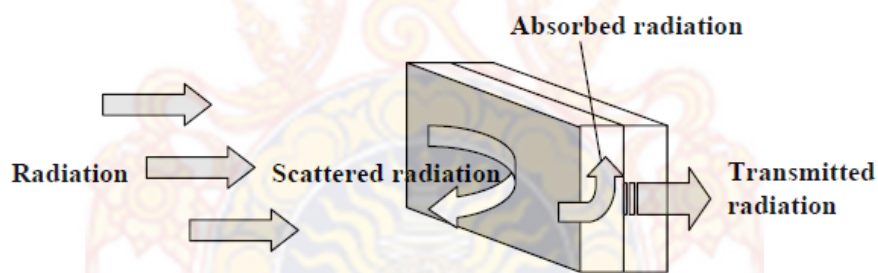
วงจรแสดงการ

แลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว  $i$  และพื้นผิวอื่นๆ

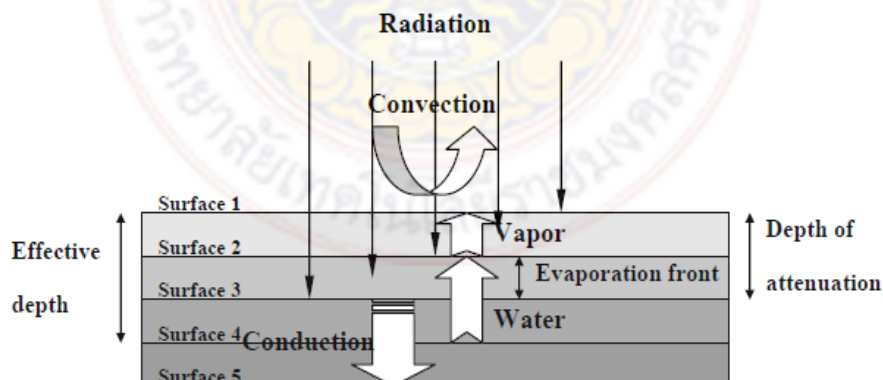
#### 2.4.4 กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรด

รูปที่ 2.14 อธิบายถึงผลการตกกระทบของรังสีบนผิววัสดุ โดยมีพลังงานบางส่วนที่วัสดุดูดซับเอาไว้ ในขณะที่บางส่วนถูกสะท้อนกลับออกไปตั้งแต่ที่ผิว และบางส่วนทะลุผ่านวัสดุไปโดยพุ่งตรงไปในแนวทิศทางเดิม หรือมีการหักเหของรังสี และจากงานวิจัยของ Sandu (1986) ได้กล่าวถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนภายในตัววัสดุ โดยจำลองการแผ่รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิห้องเพื่ออบแห้งวัสดุขึ้น (Moist solid plate) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 รังสีอินฟราเรดแบบโพลีโครเมติกแผ่ออกมาตกกระทบบนพื้นผิวของแผ่นวัสดุชั้นด้านหนึ่ง โดยที่พื้นผิวด้านตรงข้ามสมมติว่าเป็นฉนวนแบบแอดิยาเบติก (Adiabatic) มีกระบวนการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติและเป็นกระบวนการแบบไม่คงตัว (Transient process) รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาถูกแผ่นวัสดุชั้นดูดซับทำให้อ่อนกำลังลงตามความลึก ซึ่งความลึกดังกล่าวนี้เรียกว่า “ความลึกของการอ่อนกำลังลง (Depth of attenuation)” ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นตื้นๆ (Superficial layer) และเป็นบริเวณที่เกิดความร้อนเกือบคงที่ ซึ่งโปรไฟล์อุณหภูมิ (Temperature profile) มีค่าสูงที่สุดในช่วงความลึกของการอ่อนกำลังลงนี้ ขณะเดียวกันเกิดการถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นของแข็งชั้น โดยพื้นผิวที่ 1 (Surface 1) มีการสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับอากาศโดยการพาความร้อนซึ่งมีค่าน้อยมาก ส่วนพื้นผิวที่ 3 (Surface 3) เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในแผ่นวัสดุชั้นโดยการนำความร้อน พิจารณารูปที่ 2.12 (หมายเลข 1) ในสภาวะเริ่มต้นพิจารณาว่าแผ่นวัสดุชั้นนี้มีปริมาณความชื้นสม่ำเสมอ นำเกิดการระเหยในช่วงความลึกของการอ่อนกำลังลง (หมายเลข 2 และ 3) การ

ถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นภายในแผ่นวัสดุขึ้นและด้านหน้าของบริเวณการระเหย น้ำในสถานะของเหลวและไอน้ำเคลื่อนที่สู่ด้านหน้าผิวของการระเหยเนื่องจากแรงผลักดันต่างๆ เช่น การแพร่โมเลกุล, การแพร่ความร้อนและการแพร่แคปิลารีที่กระทำพร้อมกัน ส่วนการเพิ่มของความชื้นที่พื้นผิวที่ 2 (หมายเลข 2 และ 3) ซึ่งสูงกว่าความชื้นเริ่มต้นของแผ่นของแข็ง (หมายเลข 1) เกิดขึ้นระหว่างช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง เนื่องจากการแพร่ของน้ำในสถานะของเหลวเข้าสู่ภายในแผ่นวัสดุขึ้นทำให้ความชื้นที่พื้นผิวที่ 2 เพิ่มขึ้นมากกว่าความชื้นเริ่มต้น จึงส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ลึกกว่าความลึกประสิทธิภาพแพร่ออกมายังพื้นผิวที่ 1 ได้ช้าดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า “ข้อจำกัดของการถ่ายเทมวลเนื่องมาจากกระบวนการแพร่รังสีอินฟราเรด” ดังนั้นวัสดุที่อยู่ในทิศทางของการแผ่รังสีตกกระทบนั้นต้องไม่มีความหนาแน่นมากกว่าความลึกประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นชั้นที่ลึกที่สุดในวัสดุที่มีการเคลื่อนที่ของน้ำออกไปได้ดีที่สุด ส่วนน้ำที่อยู่ลึกกว่าความลึกประสิทธิภาพนั้นเคลื่อนที่ออกมาด้วยการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ถ้าวัสดุมีความหนาแน่นมากกว่าความลึกประสิทธิภาพต้องใช้เทคนิคอย่างอื่นเข้ามาช่วย เช่น วิธีการแผ่รังสีเป็นช่วงๆ ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ช่วยทำให้ความชื้นที่อยู่ในชั้นความหนาที่ลึกกว่าความลึกประสิทธิภาพแพร่ออกมายังความลึกประสิทธิภาพและส่งผลให้สามารถอบแห้งได้เร็วขึ้น หรืออาจใช้วิธีการแผ่รังสีอินฟราเรดมากกว่า 1 ทิศทางเป็นต้น (Sandu, 1986) ตารางที่ 2.4 อธิบายถึงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีการดูดซับพลังงานได้มากที่สุด และความสามารถในการทะลุทะลวงผลิตภัณฑ์ ณ ความยาวคลื่นนั้น

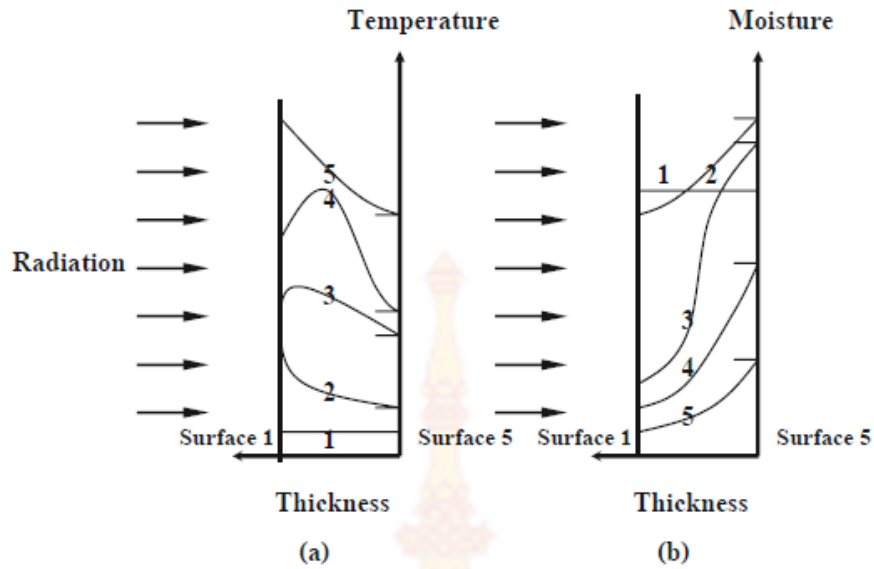


รูปที่ 2.10 การลดลงของการแผ่รังสีเมื่อตกกระทบบนผิววัสดุ (Sandu, 1986)



2.11 การอบแห้งวัสดุขึ้นด้วยการแผ่รังสี (Sandu, 1986)

รูปที่



รูปที่

2. 12

โปรไฟล์อุณหภูมิ (a) และโปรไฟล์ความชื้น (b) ระหว่างการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีของแผ่นของแข็งชั้นในรูปที่ 2 เมื่อ 1 คือเงื่อนไขเริ่มต้น และ 2-5 คือสถานะไม่สม่ำเสมอ (Sandu, 1986)

ตารางที่ 2.4 ความลึกของการทะลุทะลวงอาหารชนิดต่างๆ ต่อฟลักซ์ความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีของอุปกรณ์แผ่รังสี (Ginzberg, 1969)

Products	Spectral peak, $\mu\text{m}$	Depth of penetration (mm)
Dough, wheat	1	4-6
Bread, wheat	1	11-12
Biscuit	1	4
	0.88	12
Grain, wheat	1	2
Carrot	1	1.5
Tomato paste, 70%- 85% MC	1	1
Potatoes, raw	1	6
Potatoes, dry	0.88	15-18
Apples, raw	1.16	4.1

## 2.5 การหาสถานะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

ปัจจุบันมีนักวิจัยได้ให้ความสนใจในการออกแบบการทดลองเพื่อหาความสอดคล้องกับพื้นที่ของการตอบสนอง และประเมินความเหมาะสมในสถานะของการทดลอง การออกแบบนี้เรียกว่า Response Surface Design (RSD) และการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาคำตอบของการทดลองที่ประกอบด้วยจำนวนปัจจัยร่วมของการทดลองหลายปัจจัย ซึ่งทำให้สามารถพบการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด การตอบสนองที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้ใน 2 ลักษณะ คือ การตอบสนองที่มากที่สุด (Maximum) และ การตอบสนองที่ต่ำที่สุด (Minimum) ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการทดลอง

วิธีการนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกและอธิบายโดย Box and Wilson (1951) ต่อมา Bradley (1958) ได้เขียนบทความที่อธิบายในเชิงคณิตศาสตร์และสถิติ ที่ใช้ในการกำหนดวิธีการของพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology)

### 2.5.1 แนวความคิดและหลักการทั่วไป

พิจารณาสมการ

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \varepsilon \quad (2.26)$$

เมื่อ  $Y$  = ค่าตอบสนองที่สังเกตได้ (ตัวแปรตาม)

$f$  = ฟังก์ชันของการตอบสนองของ  $X_1, X_2, \dots, X_n$  ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (ตัวแปรอิสระ)

$\varepsilon$  = เทอมของความคลาดเคลื่อนสุ่ม

แม้ว่ารูปแบบความเที่ยงตรงของฟังก์ชันการตอบสนอง  $f$  มักไม่ทราบค่า แต่โดยทั่วไปแสดงให้เห็นว่าสามารถประมาณได้โดยฟังก์ชันเชิงเส้นตรงหรือเส้นโค้งของตัวแปรเชิงปริมาณความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear regression relationship) เป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2.27)$$

สมการ (2.30) เป็นสมการพื้นฐานอย่างง่ายที่เรียกว่า รูปแบบหรือสมการลำดับที่หนึ่ง (First-order model or equation) ส่วนสมการลำดับที่สอง (Second-order equation) เป็นความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นโค้ง (Quadratic regression relationship) ดังสมการที่ (2.31)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{11} X_1^2 + \dots + \beta_{nn} X_n^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \dots + \beta_{n-1,n} X_{n-1} X_n + \varepsilon \quad (2.28)$$

พารามิเตอร์ของสมการนี้มักไม่ทราบค่า ดังนั้นต้องถูกประมาณจากการทดลอง ความหมายในเชิงกายภาพของพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นดังนี้

$\beta_0$  = จุดตัด (Intercept) และการประมาณพารามิเตอร์นี้ใช้สัญลักษณ์เป็น  $b_0$

$\beta_i$  = เป็นผลเชิงเส้นตรง (Linear effect) ของ  $X_i$  และการประมาณพารามิเตอร์นี้ใช้สัญลักษณ์เป็น  $b_i$  แทน เมื่อ  $i = 1, \dots, n$

$\beta_{ii}$  = เป็นผลเชิงเส้นโค้ง (Quadratic effect) ของ  $X_i$  และการประมาณพารามิเตอร์นี้ใช้สัญลักษณ์เป็น  $b_{ii}$  แทน เมื่อ  $i = 1, \dots, n$

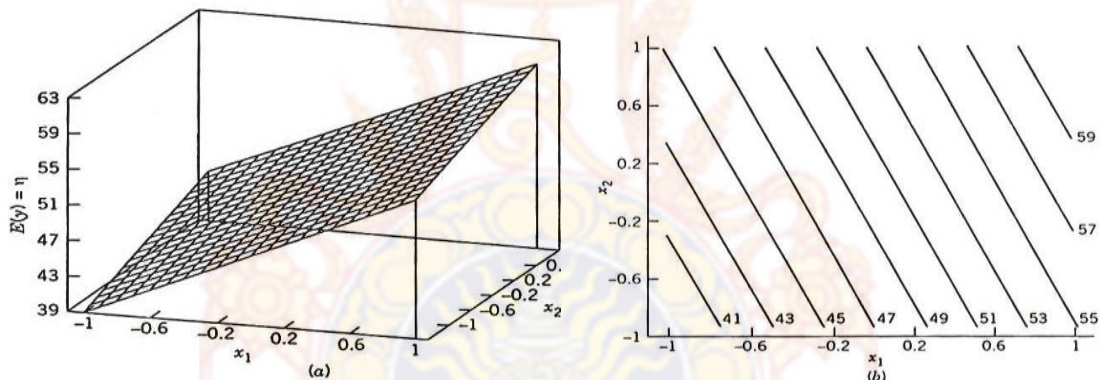
$\beta_{ij}$  = เป็นผลของปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction effect) ของ  $X_i$  และ  $X_j$  และการประมาณพารามิเตอร์นี้ใช้สัญลักษณ์เป็น  $b_{ij}$  แทน เมื่อ  $i < j$  และ  $i = 1, \dots, n-1$  ส่วน  $j = 1, \dots, n$



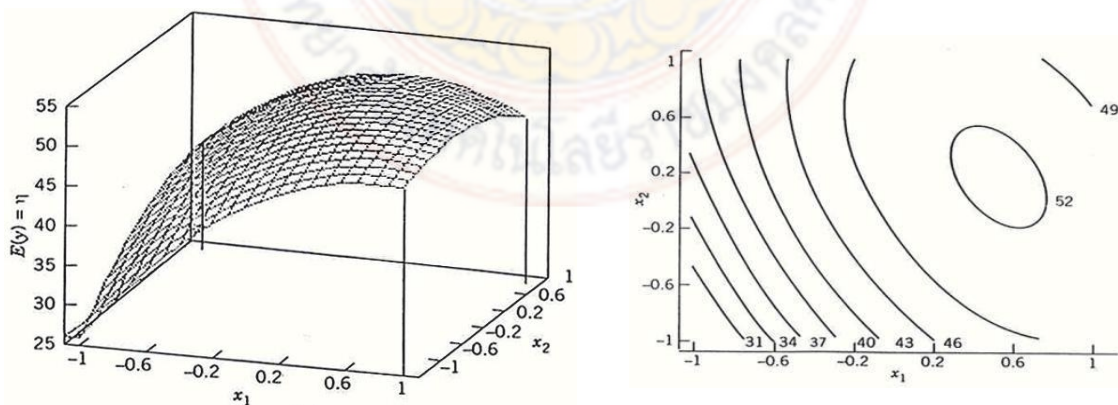
หลักการทางสถิติของกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares) ถูกนำมาใช้ในการประมาณพารามิเตอร์ของฟังก์ชันการตอบสนองของสมการถดถอยที่สมมุติฐานขึ้น เมื่อพารามิเตอร์ของฟังก์ชันการตอบสนองที่สมมุติฐานขึ้นถูกแทนที่ด้วยค่าประมาณ ผลลัพธ์ฟังก์ชันของการตอบสนองถูกทำให้สอดคล้องขึ้น และค่า  $\hat{Y}$  ได้เป็น

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + \dots + b_nX_n \quad (2.29)$$

สมการ (2.32) เป็นฟังก์ชันการตอบสนองเชิงเส้นตรงที่ถูกทำให้สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคาดคะเนการตอบสนองสำหรับค่าที่ต้องการของตัวแปรเชิงปริมาณ (Independent variables) เมื่อนำฟังก์ชันการตอบสนองที่ถูกทำให้สอดคล้อง ( $\hat{Y}$ ) มาสร้างกราฟในลักษณะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเชิงปริมาณ ผลลัพธ์ที่ได้เรียกว่า Response surface plots หรือ Contour maps Contour maps ของการตอบสนองมีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นที่ของการตอบสนอง ซึ่งถูกสร้างขึ้นเพื่อให้สอดคล้องในรูปสมการลำดับที่หนึ่งและรูปแบบสมการลำดับที่สอง จากรูปที่ 2.13 เป็นพื้นที่การตอบสนองของสมการลำดับที่หนึ่ง ส่วนรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นพื้นที่การตอบสนองที่ถูกกำหนดด้วยรูปแบบสมการลำดับที่สอง

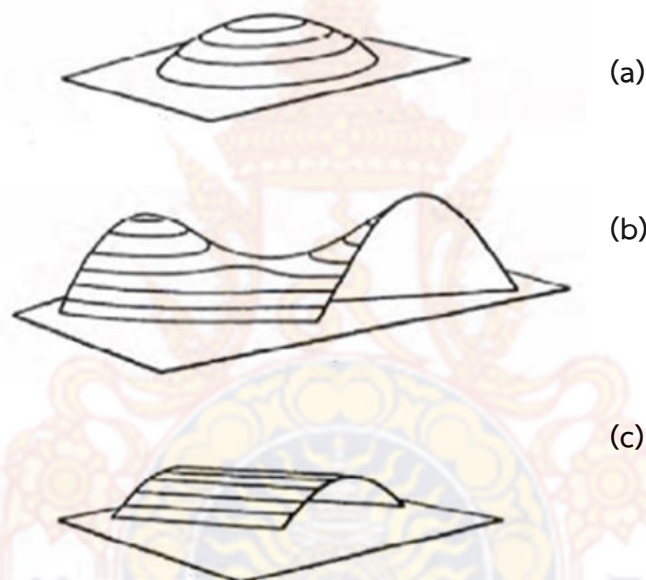


รูปที่ 2.13 เส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองรูปแบบสมการลำดับที่หนึ่ง (Myers and Montgomery, 1995)



รูปที่ 2.14 เส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองรูปแบบสมการลำดับที่สอง (Myers and Montgomery, 1995)

ลักษณะของกราฟพื้นผิวตอบสนอง สามารถพบลักษณะเฉพาะได้ 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ได้แก่ กราฟที่มีจุดให้ค่าสูงสุด (Maximum point) (รูปที่ 2.15a) ซึ่งสามารถทราบจุดตอบสนองสูงสุดของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าการตอบสนองมีสูงสุด กราฟที่เกิดจุดแบบอานม้า (Saddle point) (รูปที่ 2.15b) กราฟลักษณะนี้มีจุดตอบสนองสูงสุดหลายจุด ทำให้ไม่สามารถทราบจุดที่ดีที่สุดต่อการตอบสนองที่ต้องการ และกราฟที่เกิดจุดแบบคงที่ (Stationary ridge) (รูปที่ 2.15c) แสดงว่าค่าที่ใช้มีปริมาณของปัจจัยหนึ่งเหมาะสมในช่วงกว้างที่คงที่ และอีกปัจจัยปริมาณที่เหมาะสมกับค่าการตอบสนอง (Montgomery, 1991; Draper, 2006)

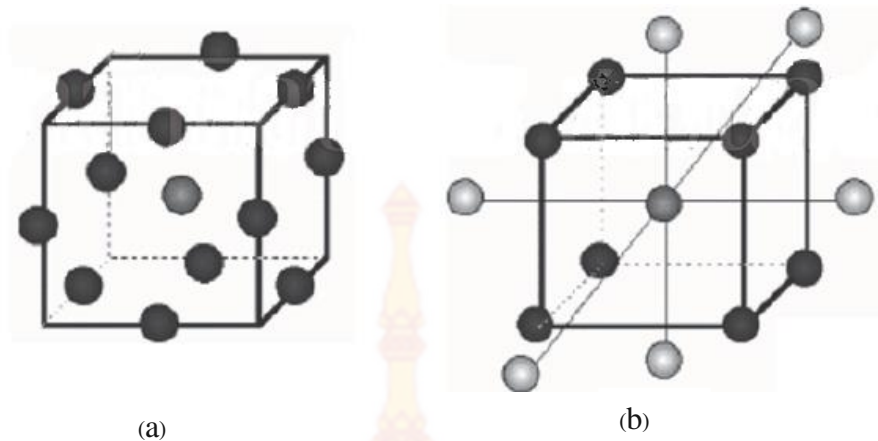


รูปที่ 2.15 ลักษณะเฉพาะ 3 แบบ ของกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Draper, 2006)

### 2.5.2 การออกแบบการทดลองสำหรับวิธีพื้นผิวตอบสนอง

เป็นวิธีการที่ใช้เทคนิคทางสถิติและคณิตศาสตร์เพื่อพัฒนา และหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ หรือใช้ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือปรับปรุงผลิตภัณฑ์เดิม เพื่อหา ลักษณะของคุณภาพ (Quality characteristic) ของผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า ตัวแปรตอบสนอง (Response) หรือผลลัพธ์ โดยในการศึกษาหาความสัมพันธ์ของผลลัพธ์กับปัจจัยการทดลองต้องมีการวางแผน และออกแบบการทดลองให้เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลด้วย (Box et al., 1978)

การออกแบบการทดลองด้วยวิธี full fractional factorial ที่อาศัยค่ากลางของข้อมูลจากระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองสูงสุดได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยที่นิยมใช้มีอยู่ 2 วิธีคือ Central Composite Design (CCD) และ Box-Behnken Design (BBD) โดยใช้การกระจายระดับของข้อมูลออกจากศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เพื่อศึกษาระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองสูงสุด



รูปที่ 2.16 โมเดลแสดงการกระจายของปัจจัยด้วยแผนการทดลอง Box-Behnken Design (a) และแผนการทดลอง Central Composite Design (b) (Draper, 2006)

### 2.5.2.1 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง

เป็นการออกแบบการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เมื่อตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพิ่มหรือลดค่าตัวแปรอื่นอาจเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง ทำให้ต้องมีการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic relationship) การกำหนดสถานะการทดลองที่ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร ว่าควรมีจำนวนการทดลองกี่การทดลองจึงเหมาะสม และครอบคลุม เช่น ถ้าต้องการศึกษาตัวแปร 3 ตัว จำนวนการทดลองคือ  $3^3 = 27$  การทดลอง ดังนั้นหากมีการศึกษาตัวแปร 5 ตัวแปร จำนวนการทดลองคือ  $3^5 = 234$  การทดลอง ซึ่งไม่เหมาะสมกับสถานการณ์ปัจจุบันที่มีทรัพยากรจำกัด ทางออกของการแก้ปัญหาคือ การใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง ซึ่งเป็นการออกแบบแผนการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงเส้นโค้ง แต่ใช้จำนวนการทดลองไม่มาก โดยทำการเลือกสถานะการทดลองบางการทดลองที่จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ รูปแบบที่ได้ยังคงมีผลของตัวแปรหลัก (Main effect) ความสัมพันธ์ของตัวแปร (Interaction) และสมการกำลังสอง (Quadratic terms)

ในการกำหนดค่ารหัส (Code value) ของระดับปัจจัย กำหนดให้ 0 แทนค่ากลาง (Center point) ถ้าทำการทดลองที่ 2 ปัจจัยการทดลองเป็น  $2^k$  คือ 4 ในแต่ละชนิดของปัจจัย ค่ามุม (Factorial point) มีอยู่ 4 จุด ให้ค่า +1 สำหรับค่าสูงสุด และ -1 สำหรับค่าต่ำ และค่าแกน (Axial point) มีอยู่ 4 จุด ให้ค่าเป็น  $+\alpha$  และ  $-\alpha$  แทนค่าสูงและต่ำตามลำดับ โดยค่า  $\alpha$  สามารถหาได้จากรากที่ 4 ของ  $2^k$  เมื่อ  $k$  คือจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยค่า  $\alpha$  ที่ได้ต้องนำไปคูณกับค่าคงที่ของความกว้างช่วงการแปรของระดับปัจจัย ดังนั้นการทดลองแบบ CCD จึงมี 5 ระดับ คือ  $-\alpha, -1, 0, 1$  และ  $+\alpha$  ตามลำดับจากค่ามากไปน้อย (Montgomery, 1991)

### 2.5.2.2 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพีตพื้นผิวผลตอบสนอง การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล  $2^k$  กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ ข้อดีคือ สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear effect) ผลกระทบกำลังสอง (Quadratic effect) และอันตรกิริยาหรือผลรวม 2 ปัจจัยได้ เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี 2 และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ซึ่งการกระทำเช่นนี้มีประโยชน์มากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์เป็นการรวมเอาปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่ทำการทดลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านกายภาพของกระบวนการ และการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken มีจำนวนครั้งในการทดลองที่ลดลง รวมถึงมีต้นทุนที่ถูกกว่าเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) จากรายงานการวิจัยจึงพบว่ามีการใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken กับงานด้านอบแห้งจำนวนมาก (สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และ ภูมินทร์ แจ่มเชื้อ, 2554; Lee et al., 2006; Perez-Francisco et al., 2008)

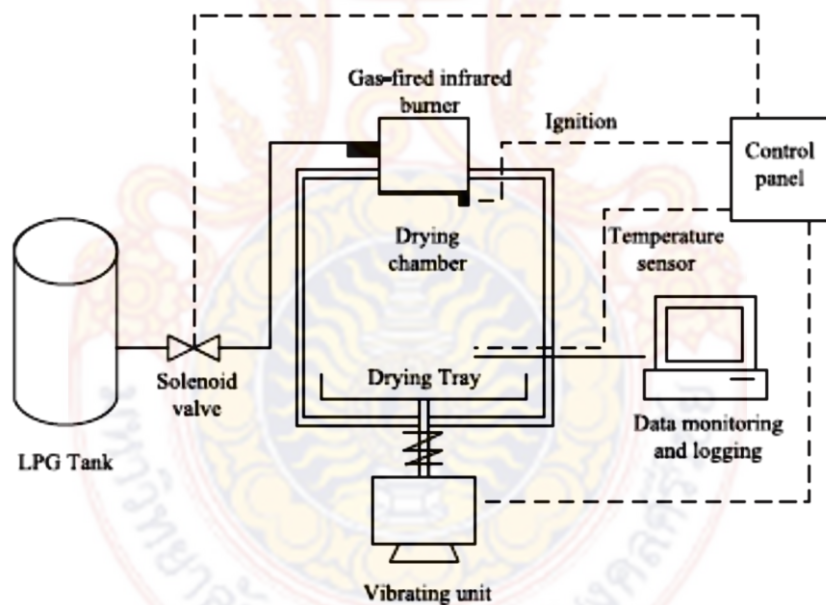
## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 การอบแห้งอินฟราเรดและการอบแห้งอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

มีงานวิจัยหลายงานที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถของวิธีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งให้อัตราการอบแห้งที่สูง และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ Swasdisevi et al. (2007) ทำการอบแห้งกล้วยด้วยรังสีอินฟราเรดแบบสุญญากาศ โดยใช้ความดันสุญญากาศ 5, 10 และ 15 kPa อุณหภูมิ 50, 55 และ 60°C และความหนาของชั้นวัสดุ 2, 3 และ 4 mm ผลการศึกษาพบว่าความดันสุญญากาศ อุณหภูมิ และความหนาของชั้นวัสดุมีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของกล้วยอบแห้ง โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ การอบแห้งด้วยความดันสุญญากาศ 5 kPa อุณหภูมิ 50°C และความหนา 2 mm Das et al. (2009) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงด้วยรังสีอินฟราเรดที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 5 ระดับ (1509, 2520, 3510, 4520 และ 5514 W/m<sup>2</sup>) ความหนาของชั้นวัสดุ 4 ระดับ (3, 6, 12 และ 25 mm) พบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีและความหนาของชั้นวัสดุ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นอยู่ระหว่าง  $0.778 \times 10^{-10}$  ถึง  $3.884 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s และที่ความเข้มรังสีอินฟราเรด 5514 W/m<sup>2</sup> ความหนาของชั้นวัสดุ 3 mm มีอัตราการอบแห้งสูงสุด แต่เมื่อใช้วิธีการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงด้วยรังสีอินฟราเรดโดยมีการสั่นสะเทือนของถาดอบแห้งด้วย พบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอินฟราเรด แต่ความหนาของชั้นวัสดุไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง Das et al. (2004) สำหรับการอบแห้งข้าวบาร์เลย์ (Afzal et al., 1999) โดยที่ระดับความเข้มของรังสีอินฟราเรด 0.167, 0.333 และ 0.5 W/cm<sup>2</sup> พบว่าการเพิ่มความเข้มของรังสีอินฟราเรดช่วยลดเวลาในการอบแห้ง แต่สิ้นเปลืองพลังงานและส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การงอกของข้าวบาร์เลย์ลดลง สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ การอบแห้งที่ความเข้มของรังสี 0.333 W/cm<sup>2</sup> ทั้งนี้ได้มีการรายงานว่าการเพิ่มความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วอากาศที่สูงขึ้นทำให้เกิดการระบายความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ออกไป

## 2.6.2 อิทธิพลของการอบแห้งต่อคุณภาพและสารสำคัญในวัสดุ

นอกจากผลของรังสีอินฟราเรดต่อลักษณะการอบแห้งแล้วรังสีอินฟราเรดยังมีข้อดีประการสำคัญในแง่ของการเพิ่มปริมาณสารสำคัญในวัสดุที่อบแห้งด้วย มีงานวิจัยหลายงานพบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถกระตุ้นและทำให้สารสำคัญในพืชสมุนไพรและผลไม้มีปริมาณเพิ่มขึ้นได้ Niamnuy et al. (2011) ได้ศึกษาผลกระทบของวิธีการและสภาวะการอบแห้งต่อสารต้านอนุมูลอิสระ และ  $\alpha$ -glucosidase ของถั่วเหลือง โดยวิธีการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมร้อน ฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไอร้อนยิ่งยวด และอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการสั่นสะเทือนของถาดอบแห้ง ดังรูปที่ 2.17 พบว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการสั่นสะเทือนของถาดอบแห้งทำให้สารต้านอนุมูลอิสระ และ  $\alpha$ -glucosidase ของถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยวิธีการอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 2.5 อีกทั้งวิธีการอบแห้งนี้ยังใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดด้วย Lee et al. (2006) ศึกษาการให้รังสีอินฟราเรดไกลที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 40 และ 60 min เปรียบเทียบกับการให้ความร้อนด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะเดียวกัน พบว่าที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  เวลา 60 min สามารถเพิ่มปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในน้ำสกัดจากเปลือกถั่วลิสงได้ถึง 48.83% เมื่อเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนด้วยลมร้อน



รูปที่ 2.17 เครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการสั่นสะเทือนของถาดอบแห้ง (Niamnuy et al., 2011)

ตารางที่ 2.5 ผลจากการอบแห้งต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและ  $\alpha$ -glucosidase ของถั่วเหลือง (Niamnuy et al., 2011)

Sample	Moisture content (% d.b.)	Antioxidant activity		$\alpha$ -glucosidase inhibitory activity (mg acarbose/g dry sample)
		DPPH ( $\mu$ M Trolox/g dry sample)	FRAP ( $\mu$ M FeSO <sub>4</sub> /g dry sample)	
Raw soybean	20.38 $\pm$ 0.11 <sup>b</sup>	11.67 $\pm$ 0.91 <sup>a</sup>	66.70 $\pm$ 2.73 <sup>a</sup>	n.d.
HAFBD 50°C	10.06 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	12.52 $\pm$ 0.94 <sup>a</sup>	69.32 $\pm$ 3.12 <sup>a</sup>	n.d.
HAFBD 70°C	9.96 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	14.33 $\pm$ 0.96 <sup>b</sup>	75.43 $\pm$ 2.94 <sup>b</sup>	n.d.
HAFBD 130°C	9.82 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	15.92 $\pm$ 0.72 <sup>cd</sup>	88.34 $\pm$ 5.09 <sup>c</sup>	4.94 $\pm$ 0.50 <sup>c</sup>
HAFBD 150°C	10.04 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	16.73 $\pm$ 0.57 <sup>de</sup>	101.15 $\pm$ 3.97 <sup>d</sup>	1.71 $\pm$ 0.35 <sup>a</sup>
GFIR-HAVD 50°C	9.87 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	14.55 $\pm$ 0.63 <sup>b</sup>	76.77 $\pm$ 4.01 <sup>b</sup>	n.d.
GFIR-HAVD 70°C	9.85 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	15.15 $\pm$ 0.52 <sup>bc</sup>	75.43 $\pm$ 2.94 <sup>b</sup>	n.d.
GFIR-HAVD 130°C	9.87 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	16.92 $\pm$ 0.26 <sup>de</sup>	117.39 $\pm$ 5.07 <sup>e</sup>	11.87 $\pm$ 0.79 <sup>e</sup>
GFIR-HAVD 150°C	9.97 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	17.80 $\pm$ 0.54 <sup>e</sup>	126.49 $\pm$ 4.41 <sup>f</sup>	8.59 $\pm$ 0.64 <sup>d</sup>
SSFBD 130°C	9.83 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>	16.20 $\pm$ 0.47 <sup>d</sup>	104.90 $\pm$ 3.19 <sup>d</sup>	7.73 $\pm$ 0.71 <sup>d</sup>
SSFBD 150°C	9.71 $\pm$ 0.15 <sup>a</sup>	17.02 $\pm$ 0.65 <sup>de</sup>	113.54 $\pm$ 2.25 <sup>e</sup>	3.68 $\pm$ 0.43 <sup>b</sup>

นอกจากนี้ Park et al. (2009) พบว่าในระหว่างกระบวนการทำแห้งชาเขียว เมื่อใช้ความร้อนจากอินฟราเรดไกลช่วยเพิ่มปริมาณฟีนอลิก จาก 116.30 เป็น 171.77 mg/g, ฟลาโวนอล จาก 17.54 เป็น 24.76 mg/g และกรดแอสคอร์บิก จาก 3.07 เป็น 4.20 mg/g เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการให้ความร้อนด้วยลมร้อน อีกทั้งยังสามารถรักษากลิ่นหอมและรสชาติได้อีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim et al. (2007) ซึ่งใช้วิธีการฉายรังสีอินฟราเรดในโสม ที่อุณหภูมิ 90, 100 และ 110°C เวลาในการฉายรังสี 0, 10, 20, 30 และ 40 นาที พบว่า การฉายรังสีอินฟราเรดสามารถเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากโสมได้ โดยที่การฉายรังสีที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 40 นาที ค่าของ Total phenolic contents (TPC) และ Puerarin เพิ่มขึ้นจาก 0.096 เป็น 0.148 g/mL และ 66.0 เป็น 77.8 ppm ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับการที่ไม่ฉายรังสี

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน (VIR) การดำเนินการวิจัยเริ่มต้นด้วยการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง VIR จากนั้นแบ่งวิธีการดำเนินการวิจัยออกเป็น 2 หัวข้อหลักได้แก่ การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสีอินฟราเรดต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของพริกชี้หนู และการหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้ง VIR โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยมีรายละเอียดในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

#### 3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน

กำหนดสมบัติสำหรับการคำนวณเพื่อออกแบบเครื่องอบแห้งโดยมีข้อมูลเบื้องต้นดังนี้

- ความชื้นเริ่มต้นของพริกชี้หนู ( $MC_i$ ) 10 g water/g dry matter
- ความชื้นสุดท้ายของพริกชี้หนู ( $MC_f$ ) 0.1 g water/g dry matter
- น้ำหนักพริกชี้หนูที่ใช้ในการอบแห้ง 270 g
- อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการอบแห้ง 100°C
- อุณหภูมิพริกชี้หนู 30°C

##### 3.1.1 ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหย

จากข้อมูลเบื้องต้นพริกชี้หนูมีความชื้นเริ่มต้น 10 g water/g dry matter นั่นคือในพริกชี้หนู 11 g มีน้ำ 10 g และมีน้ำหนักแห้ง 1 g ดังนั้นปริมาณน้ำเริ่มต้นคำนวณได้จาก

$$\text{น้ำเริ่มต้น} = \frac{10}{11} \text{ g}$$

ถ้า Whole weight 5000 g

$$\text{น้ำที่มีอยู่ในพริกชี้หนู} = \frac{10}{11} \times 5000$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำที่มีอยู่ในพริกชี้หนู} &= 4545.45 \text{ g} \\ \text{น้ำหนักแห้ง} &= 5000 - 4545.45 \text{ g} \\ &= 454.55 \text{ g} \end{aligned}$$

หลังการอบแห้งพริกชี้หนูมีความชื้น 0.1 g water/g dry matter ดังนั้นปริมาณน้ำคงเหลือคำนวณได้จาก

$$\text{น้ำคงเหลือ} = \frac{0.1}{1} \text{ g}$$

ถ้าน้ำหนักแห้ง 454.55 g

$$\text{น้ำคงเหลือในพริกชี้หนู} = \frac{0.1}{1} \times 4545.45$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำคงเหลือในพริกชี้หนู} &= 454.54 \text{ g} \\ \text{ดังนั้นน้ำที่ต้องระเหยออก} &= 4545.45 - 454.54 \text{ g} \\ \text{น้ำที่ต้องระเหยออก} &= 4090.90 \text{ g} \end{aligned}$$

### 3.1.2 พลังงานขั้นต่ำที่ต้องใช้สำหรับการอบแห้ง

ในการศึกษาความต้องการพลังงานสำหรับการอบแห้งพริกชี้หนู ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะของพริกชี้หนูโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (DSC 3, Mettler-Toledo Co., Ltd., Bangkok, Thailand) ค่าที่ได้เท่ากับ 3.89 kJ/kg.°C ดังนั้นพลังงานขั้นต่ำที่ต้องใช้สำหรับการอบแห้งสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ต้องการ} &= \text{ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)} + \text{ความร้อนแฝง (Latent Heat)} \\ &= mC_p \Delta t + mL \\ &= [(5 \text{ kg}) \times (3.89 \text{ kJ/kg} \cdot \text{°C}) \times (100 - 30 \text{ °C})] + [(4.1 \text{ kg}) \times (2257.2 \text{ kJ/kg})] \\ &= 10616.02 \text{ kJ} \end{aligned}$$

กำหนดให้เวลาที่ต้องการอย่างน้อยที่สุดในการอบแห้งพริกชี้หนูเท่ากับ 90 min

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นพลังงานขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับการอบแห้ง} &= 10616.02 \text{ kJ} / 5400 \text{ s} \\ &= 1.96 \text{ kJ/s หรือ } 1960 \text{ W} \end{aligned}$$

ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้แท่งรังสีอินฟราเรดขนาดกำลังไฟฟ้า 1000 W เส้นผ่าศูนย์กลาง 17 mm ยาว 0.3 m อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณพื้นผิว 750°C (CF Series, Sang Chai Meter Co., Ltd., Bangkok,



Thailand) จำนวน 2 หลอดต่อ 1 ถาดอบแห้ง เพื่อใช้เป็นต้นกำเนิดรังสีอินฟราเรดของเครื่องอบแห้ง  
อินฟราเรดร่วมกับการสันตะเทียน



### 3.1.3 ส่วนประกอบและโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งมีความยาวตลอดตัวเครื่อง 1.25 m ห้องอบแห้ง (Drying chamber) มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 1×1×1 m มีฝาสำหรับนำวัสดุเข้า-ออก จากห้องอบแห้ง ถาดวางวัสดุอบแห้งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 0.80 m ยาว 0.80 m สูง 0.20 m สามารถวางวัสดุที่ใช้ทดลองอบแห้งแบบชั้นบางได้ครั้งละประมาณ 5000 g โครงสร้างของเครื่องอบแห้งทั้งหมดทำมาจาก Stainless steel ซึ่งประกอบไปด้วยชุดการทำงานที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง 3 ชุดการทำงาน

### 3.1.4 ชุดควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้า

เป็นชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้าทั้งหมดของเครื่องอบแห้ง ซึ่งประกอบไปด้วย

1. สวิตช์นิรภัย (Emergency Switch) ทำหน้าที่ตัด-ต่อ กระแสไฟฟ้าในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉิน
2. ตัวควบคุมอุณหภูมิ และควบคุม Process (Temperature and Process Controllers) มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิผิวของหลอดอินฟราเรด ความเร็วรอบของการสั่นสะเทือน
3. สวิตช์ ปิด-เปิดการทำงานของลมร้อน และอินฟราเรด

#### 3.1.4.1 ชุดการทำงานของอินฟราเรด

ชุดการทำงานของอินฟราเรด ประกอบไปด้วยหลอดอินฟราเรด (CF Series, Sang Chai Meter Co., Ltd., Bangkok, Thailand) ขนาด 1000 W จำนวน 2 หลอด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.17 cm ยาว 70 cm ค่าการแผ่รังสี ( $\epsilon$ ) เท่ากับ 0.9 ติดตั้งอยู่เหนือถาดอบแห้งโดยมีระยะห่าง 20 cm มีเทอร์โมคัปเปิ้ล (type K, Lega model AK-01, Lega Cooperation Co., Ltd., Bangkok, Thailand) ติดตั้งที่ผิวของหลอดอินฟราเรดเพื่อวัดอุณหภูมิผิวหลอดขณะทำงาน

#### 3.1.4.2 ชุดกลไกการสร้างการสั่นสะเทือนของวัสดุ

ชุดกลไกการสร้างการสั่นสะเทือนของวัสดุ ประกอบไปด้วยเพลลาซึ่งส่วนปลายของเพลลา ด้านหนึ่งจะติดตั้งคันชักคันส่งซึ่งติดกับถาดอบแห้ง ส่วนปลายอีกด้านจะต่อเข้ากับมอเตอร์ต้นกำลัง การทำงานของการสั่นสะเทือนเกิดจากการหมุนของเพลลาซึ่งรับกำลังจากมอเตอร์จากนั้นส่งถ่ายกำลังไปยังคันชักคันส่งซึ่งจะทำให้ส่งถ่ายแรงไปยังถาดอบแห้งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไป-มา วัสดุจึงสามารถเกิดการสั่นสะเทือนได้ โดยสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้จะใช้รอบของการสั่นสะเทือน 800 rpm

## 3.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

พริกชี้หนู นำมาล้างด้วยน้ำเพื่อเอาสิ่งเจือปนออก วางไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 3.1 จากนั้นบรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท ขนาดถุงละ 5 kg นำไปเก็บรักษาในตู้เย็น ที่อุณหภูมิ  $4 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$

เป็นเวลา 24 h เพื่อให้พริกชี้หนูเกิดการถ่ายเทความชื้นเข้าสู่สภาวะสมดุล (Ozbek and Dadali, 2007) เมื่อจะทำการทดลองนำพริกชี้หนูออกจากตู้เย็น และวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 h

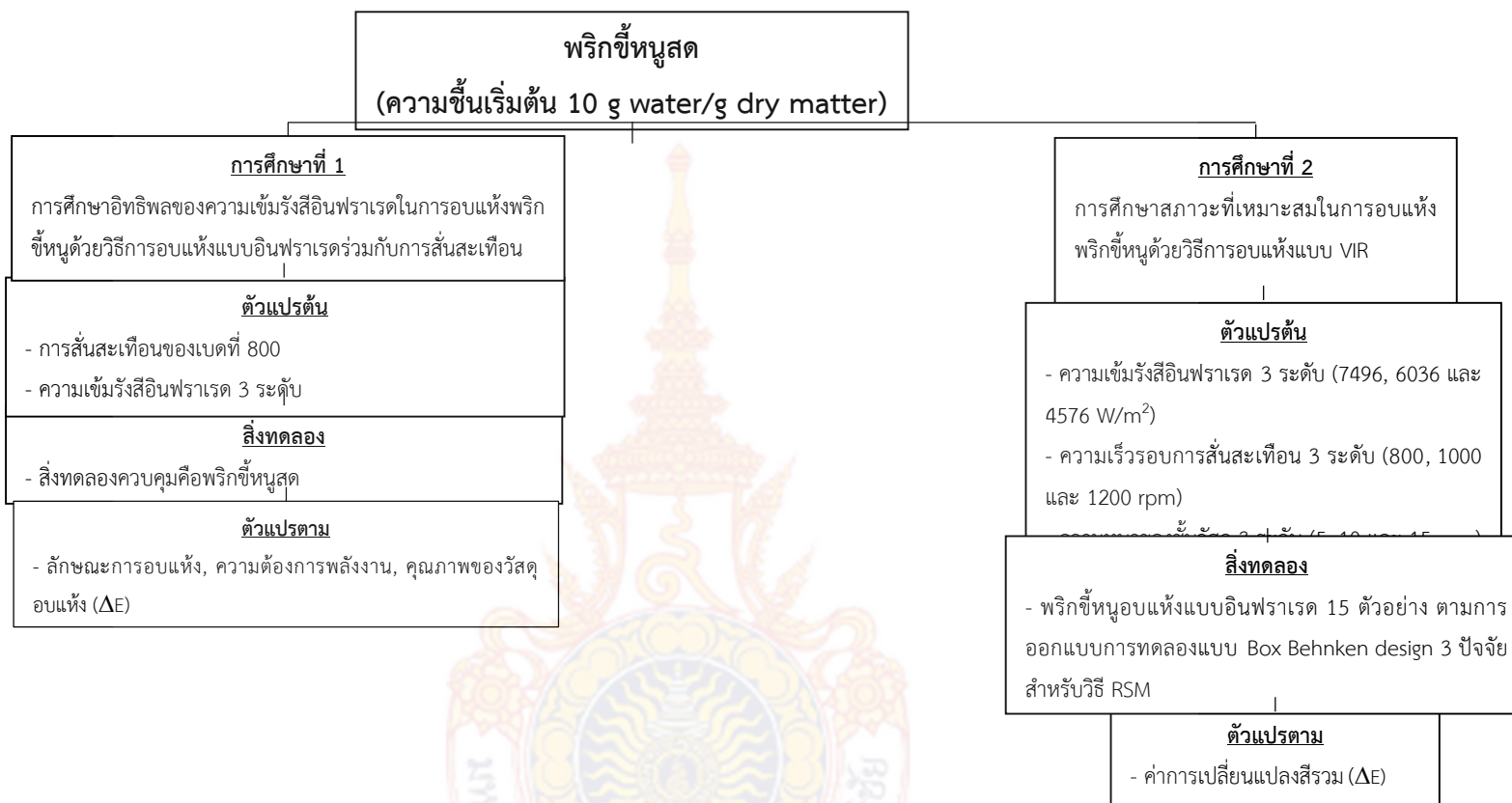


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างพริกชี้หนูที่ใช้ในการศึกษา

### 3.3 แผนการทดลอง

จากรูปที่ 3.2 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการทดลองทั้งหมดของงานวิจัยนี้ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 หัวข้อหลักดังแสดงในหัวข้อวัตถุประสงค์คือ การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นอินฟราเรดร่วมกับการสันสะเทือนต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของพริกชี้หนู และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้ง VIR โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ซึ่งแสดงในหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ตามลำดับ





รูปที่ 3.2 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

### 3.3.1 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน

ภายใต้การศึกษานี้เป็นการทดลองอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้ง VIR ที่ความเข้มรังสีอินฟราเรด 4576, 6036 และ 7496 W/m<sup>2</sup>

ทำการทดลองโดยการนำพริกชี้หนู 5000 g ต่อ 1 ถาด วางในถาดอบแห้งให้อยู่ในลักษณะเป็นชั้นเดียว (Single layer) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งตัวอย่างพริกชี้หนูจะถูกนำออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective diffusivity,  $D_{eff}$ ) และลักษณะการอบแห้งดังแสดงในหัวข้อที่ 3.4 และ 3.5 ทำการอบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.10 g water/g dry matter จากนั้นทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์คุณภาพของพริกชี้หนูได้แก่ค่าสีและอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

#### 3.3.1.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองอบแห้งพริกชี้หนูโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) นำเสนอข้อมูลการทดลองโดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ทดสอบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

### 3.3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน (VIR)

วิธีพื้นผิวตอบสนอง เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น ทำให้ง่ายในการจัดการและการอธิบายผลเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน โดยในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้เลือกทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีเป็นเป็นตัวแปรตอบสนอง ( $\Delta E$ , Y) โดยใช้โปรแกรม Unscrambler X 10.3 นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง (หัวข้อ 3.4) สำหรับสิ่งทดลองต่างๆ ด้วย

#### 3.3.2.1 การออกแบบการทดลอง

สำหรับการออกแบบการทดลองเป็นแบบ Box Behnken design แบบ 3 ปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 3.1 แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเข้มรังสีอินฟราเรด ( $X_1$ ) ความเร็วรอบการสั่นสะเทือน ( $X_2$ ) และความหนาของชั้นพริกชี้หนู ( $X_3$ ) โปรแกรมจะทำการประมวลผล ทำให้ได้สิ่งทดลองจำนวน 15 สิ่งทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2 เป็นการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางซึ่งทำซ้ำจำนวน 3 สิ่งทดลอง ผลการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางจะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถแสดงดังสมการ (3.1)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j}^n \beta_{ij} X_i X_j \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  และ  $\beta_{ij}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์  $X_i$  คือ ตัวแปรอิสระปัจจัยที่ต้องการศึกษาในการอบแห้ง

**ตารางที่ 3.1** ปัจจัย ระดับและขอบเขตของปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสูญญากาศ

ตัวแปร	รหัส	ระดับค่าตัวแปร		
		-1	0	1
IR (W/m <sup>2</sup> )	X <sub>1</sub>	4576	6036	7496
รอบการสั่นสะเทือน (rpm)	X <sub>2</sub>	800	1000	1200
Thickness (mm)	X <sub>3</sub>	5	10	15

**ตารางที่ 3.2** สิ่งทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

สิ่งทดลอง	ความเข้มรังสีอินฟราเรด (W/m <sup>2</sup> )	รอบการสั่นสะเทือน (rpm)	ความหนาชั้นวัสดุ (mm)
12	4576 (-1)	800 (-1)	10 (0)
8	7496 (1)	800 (-1)	10 (0)
13	4576 (-1)	1200 (1)	10 (0)
3	7496 (1)	1200 (1)	10 (0)
1	4576 (-1)	1000 (0)	5 (-1)
7	7496 (1)	1000 (0)	5 (-1)
2	4576 (-1)	1000 (0)	15 (1)
4	7496 (1)	1000 (0)	15 (1)
11	6036 (0)	800 (-1)	5 (-1)
15	6036 (0)	1200 (1)	5 (-1)
5	6036(0)	800 (-1)	15(1)
10	6036(0)	1200 (1)	15(1)
6	6036 (0)	1000 (0)	10 (0)
9	6036 (0)	1000 (0)	10 (0)
14	6036 (0)	1000 (0)	10 (0)

### 3.3.2.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อตรวจสอบความผันแปรที่ได้จากแบบจำลองจะใช้วิธี Analysis of variance (ANOVA) การทดสอบนี้ใช้สำหรับทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พิจารณาแบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ จากค่า p-value ค่าการทดสอบ Lack of Fit และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) คือ ค่าที่แสดง

สัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความแปรผันทั้งหมดใน Y ที่สามารถอธิบายโดยความแปรผันใน X หรือ อธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้นจึงเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่ประมาณเหมาะสมกับ ข้อมูลเพียงไร ถ้า  $R^2$  มีค่ามากขึ้นแสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น

ในการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณสารเคออร์ซิทีนระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายและ ค่าที่ได้จากการทดลอง. ใช้วิธีการทดสอบสมมุติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างหนึ่งกลุ่ม กับค่ามาตรฐานโดยมีสมมุติฐานคือ  $H_0 : \mu =$  ค่ามาตรฐาน และ  $H_0 : \mu \neq$  ค่ามาตรฐาน ที่ระดับความ เชื่อมั่น 95%

### 3.4 การวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง

การคำนวณหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นของพริกชี้หนู โดยการนำพริกชี้หนูจำนวน 5 g ใส่ในถ้วย อะลูมิเนียมขนาด 29.57 ml นำไปอบด้วยตู้อบแห้งลมร้อน (ULM 500, Memmert GmbH+Co.KG, Schwabach, Germany) ที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 h (AOAC, 2005) จากนั้นนำมาชั่ง น้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล 4 ตำแหน่ง นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้ง มาคำนวณหาความชื้นโดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการที่ (3.2)

$$M = \frac{M_w - M_d}{M_d} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $M$ ,  $M_w$  และ  $M_d$  คือ ความชื้นของพริกชี้หนู, น้ำหนักเริ่มต้น (g) และ น้ำหนักสุดท้ายของ พริกชี้หนู (g) ตามลำดับ

นำข้อมูลค่าความชื้นจากการทดลองหาที่เวลาใดๆ มาคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้น และ อัตรา การอบแห้งได้ จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (3.3)$$

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $M_i$ ,  $M_t$ ,  $M_e$  และ  $M_{t+\Delta t}$  คือ ความชื้นเริ่มต้น (g water/g dry matter), ความชื้นที่เวลา ใดๆ (g water/g dry matter), ความชื้นสมดุลของวัสดุ (g water/g dry matter), ความชื้นที่เวลา  $t+\Delta t$  และ เวลาในการอบแห้ง (min) ตามลำดับ ในการทดลองอบแห้งพริกชี้หนูนี้เป็นการทดลอง อบแห้งโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดซึ่งสามารถกำหนดให้ค่า  $M_e = 0$  เนื่องจากการอบแห้งด้วย อินฟราเรดสามารถลดความชื้นได้จนพริกชี้หนูมีความชื้นสมดุลที่ต่ำมาก (Sripinyowanich and Noomhorm, 2011)

### 3.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

กลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุชีวภาพในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเกิดขึ้นตามลักษณะการแพร่กระจายความชื้นตามที่อธิบายโดยกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิกส์ (Fick's second law) การแพร่กระจายความชื้นที่ได้จากกฎของฟิกส์แสดงดังสมการ 3.5

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\text{eff}} \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (3.5)$$

สมการ 3.5 ได้มีการพัฒนาโดย Crank (1975) สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะสมมาตร จากสมมติฐานที่ว่าซึ่งอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การแพร่ความชื้นไปในทิศทางมิติเดียว ไม่เกิดการหดตัวระหว่างการอบแห้ง อุณหภูมิและค่าการแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผลมีค่าคงที่ และไม่คิดความต้านทานภายนอกวัสดุ ชั้นของฟริกซีที่หนีที่ตัดออกมีลักษณะเป็นระนาบยาวอนันต์จะได้ดังสมการ 3.6 (Deng et al., 2018)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (3.6)$$

เมื่อ  $D_{\text{eff}}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ซึ่งหมายถึงเทอมของกลไกการส่งผ่านความชื้นทั้งหมดในวัสดุตัวอย่างที่อบแห้ง ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) และ  $L$  คือ ครึ่งของความหนาวัสดุ ( $\text{m}$ )

จากสมการ (3.6) มีจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุด และเทอมท้ายๆ จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้น ดังนั้นสามารถตัดเทอมท้ายๆ ออกไปได้ โดยคงไว้เฉพาะเทอมแรก ( $n = 0$ ) ซึ่งคำตอบที่ได้อาจจะไม่ผิดไปมากนัก โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามาก จึงสามารถเขียนสมการใหม่สำหรับวัสดุแผ่นระนาบได้ดังสมการ 3.7

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (3.7)$$

สมการ 3.7 สามารถทำให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายโดยเขียนให้อยู่ในรูปแบบของลอการิทึมธรรมชาติได้ดังดังนี้

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (3.8)$$

ค่าการแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผลโดยทั่วไปสามารถหาได้จากการสร้างกราฟจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูปของลอการิทึมของตัวแปรไร้หน่วยของอัตราส่วนความชื้น ( $\ln MR$ )



เปรียบเทียบกับเวลา (t) จะได้ความชันของเส้นกราฟซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการแพร่ความชื้นประสิทธิผล ดังต่อไปนี้

$$D_{\text{eff}} = -\frac{\text{Slope}4L^2}{\pi^2} \quad (3.9)$$

### 3.6 การวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงาน

พลังงานทั้งหมดที่ใช้สำหรับการอบแห้งพริกชี้หนูของแต่ละการทดลองทำการทดลองโดยการวัดค่าการใช้พลังงานด้วยเครื่องวัดพลังงานมัลติฟังก์ชัน (KM-06-N, Primus Company Limited, Bangkok, Thailand) ปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ที่รายงานในงานวิจัยนี้เป็นพลังงานที่ต้องการในการระเหยน้ำจำนวน 1 kg ออกจากวัสดุ ดังนั้นหน่วยของการใช้พลังงานจำเพาะจึงแสดงเป็น kWh/kg ดังแสดงสมการ

$$\text{SEC} = E_t / W_0 \quad (3.10)$$

เมื่อ  $E_t$  คือ ความต้องการพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (kWh) และ  $W_0$  คือ น้ำหนักของน้ำที่ระเหยออก (kg)

### 3.7 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของพริกชี้หนูอบแห้ง

#### 3.7.1 การวิเคราะห์ความแตกต่างสีโดยรวม

ในงานวิจัยนี้ทำการวัดสีของพริกชี้หนูอบแห้งด้วยเครื่องวัดสี Spectrophotometer (ColorFlex, Hunter Associates Laboratory, Inc., VA, USA) โดยทำการวัดค่าสีในระบบ CIE ( $L^*a^*b^*$ ) ซึ่งเป็นระบบบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน  $L^*$  จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า  $L^*(100)$  แสดงถึงสีขาว จนไปถึง  $L^*(0)$  แสดงถึงสีดำ ในแกน  $a^*$  จะบรรยายถึงแกนสีเขียวจาก  $a^*(-60)$  ไปจนถึงสีแดง  $a^*(+60)$  ส่วนแกน  $b^*$  จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน  $b^*(-60)$  ไปจนถึงสีเหลือง  $b^*(+60)$  และคำนวณค่าความแตกต่างสีโดยรวม (Total color difference,  $\Delta E$ ) สำหรับงานวิจัยนี้ผู้ทำการวิจัยทำการทดลองเพื่อหาความแตกต่างสีโดยรวมเปรียบเทียบกับพริกชี้หนูสดโดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการ (3.11)

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (3.11)$$

#### 3.7.2 การวิเคราะห์ปริมาตรและความหนาแน่นมวลรวม

พริกชี้หนูที่ผ่านการอบแห้งสามารถหาได้โดยอาศัยหลักการแทนที่ในของเหลว โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ Toluene ซึ่งมีความหนาแน่น  $0.8669 \text{ g/cm}^3$  ปริมาตรและความหนาแน่นมวลรวมของพริกชี้หนูหลังการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.12) และสมการที่ (3.13) ตามลำดับ

$$V = \frac{m_{\text{hs}} - m_{\text{h}}}{\rho_{\text{h}}} \quad (3.12)$$

$$\rho_h = \frac{m_s}{V} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $m_h$ ,  $m_{hs}$ ,  $m_s$  และ  $\rho_h$  คือ มวลของภาชนะที่บรรจุด้วย Toluene (g), มวลของภาชนะที่บรรจุด้วย Toluene และตัวอย่างพริกชี้หนู (g), มวลของพริกชี้หนู (g) และ ความหนาแน่นของ Toluene ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### 3.7.3 การวิเคราะห์การหดตัว

การหดตัวของพริกชี้หนูอบแห้งแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของพริกชี้หนูหลังการอบแห้งเปรียบเทียบกับพริกชี้หนูสด โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.14)

$$\% \text{Shrinkage} = \left( \frac{V_i - V}{V_i} \right) \quad (3.14)$$

เมื่อ  $V_i$ ,  $V$  คือ ปริมาตรของพริกชี้หนูสด ( $\text{cm}^3$ ) และ ปริมาตรของพริกชี้หนูหลังอบแห้ง ( $\text{cm}^3$ )

## บทที่ 4

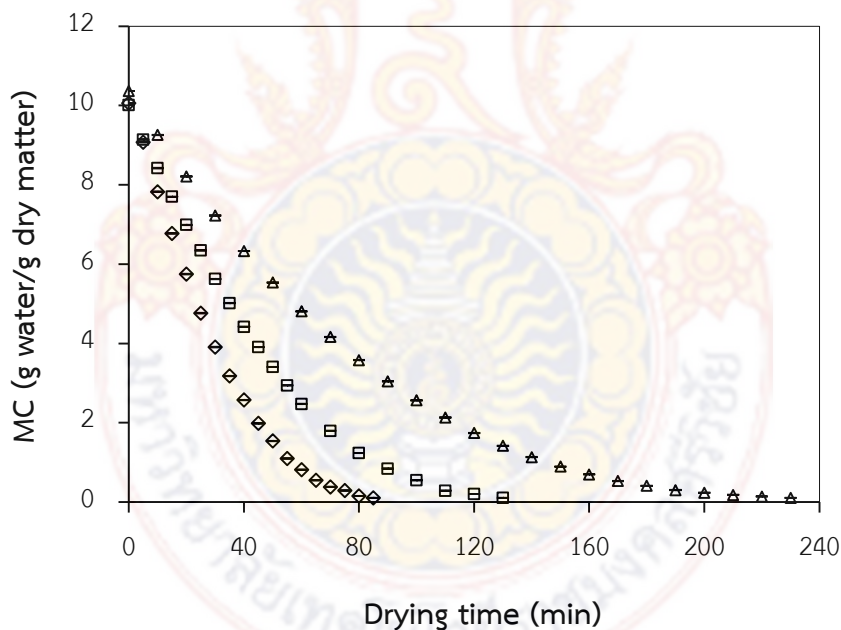
### ผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของความเข้มข้นสีอินฟราเรดต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด

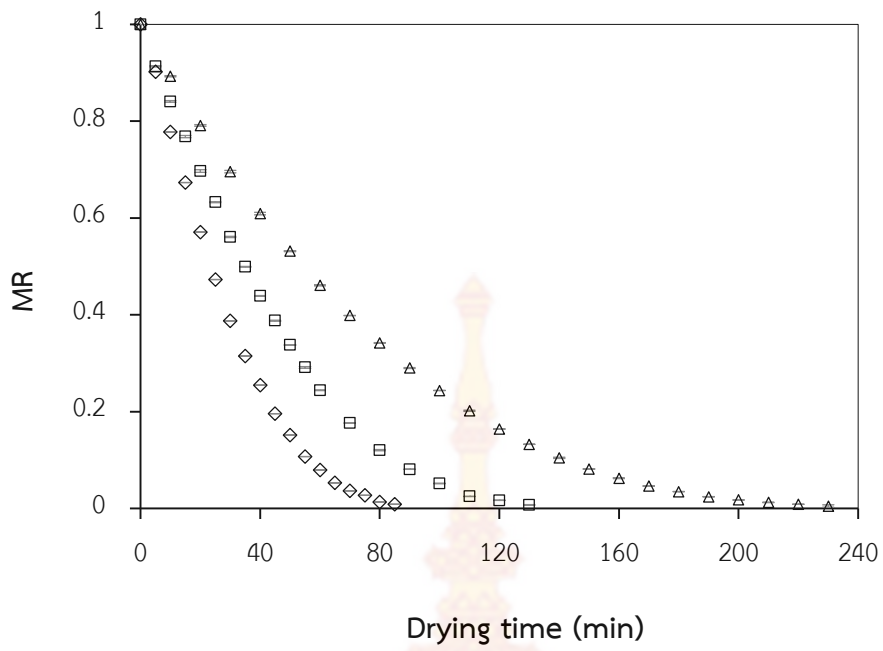
4.1.1 ลักษณะการอบแห้งของพริกชี้หนู

พริกชี้หนูที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ  $10.10 \pm 0.15$  g water/g dry matter ทำการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดรวมกับการสั่นสะเทือน (VIR) จนมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ  $.010 \pm 0.02$  g water/g dry matter ความเข้มรังสีอินฟราเรด 4576, 6036 และ 7496 W/m<sup>2</sup> ที่ระดับความเร็วลมคงที่  $1 \pm 0.2$  m/s พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เท่ากับ 230, 130 และ 85 min ตามลำดับ ที่ระดับความเข้มรังสี 7496 W/m<sup>2</sup> ซึ่งเป็นระดับที่มีความเข้มรังสีสูงสุดใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดเนื่องจากระดับพลังงานความร้อนที่ความเข้มรังสีอินฟราเรดสูงจะเร่งอัตราการถ่ายเทมวลสารหรือความชื้นได้ดีกว่าที่ระดับความเข้มรังสีอินฟราเรดต่ำ ดังเส้นโค้งการอบแห้งที่แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2

ดังที่แสดงในรูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นที่ความเข้มรังสีอินฟราเรดต่างๆ ไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR กระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเป็นหลัก โดยมีช่วงปรับสภาวะเบื้องต้นของวัสดุในช่วงเริ่มต้นกระบวนการเป็นระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น อัตราการสูญเสียความชื้นของพริกชี้หนูในช่วงแรกมีค่าสูงกว่าในช่วงปลายของกระบวนการ ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยวิธีการอบแห้งแบบขึ้นบาง (Doymaz and Pala, 2003) จากการวิเคราะห์อัตราการอบแห้งสูงสุดสำหรับแต่ละสภาวะการอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งสูงสุด คือ 0.0059, 0.0107 และ 0.0173 g water/g dry matter·min เมื่ออบแห้งพริกชี้หนูแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีอินฟราเรด 4576, 6036 และ 7496 W/m<sup>2</sup> ตามลำดับ

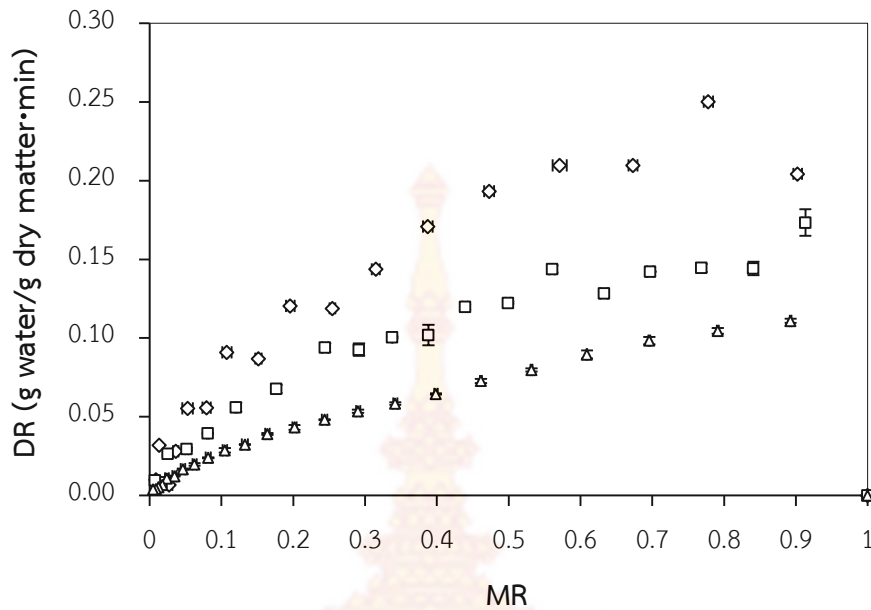


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งของพริกชี้หนูในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วย VIR



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้งของพริกชี้หนูในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วย VIR





รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้นของพริกชี้หนูในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วย VIR

#### 4.1.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

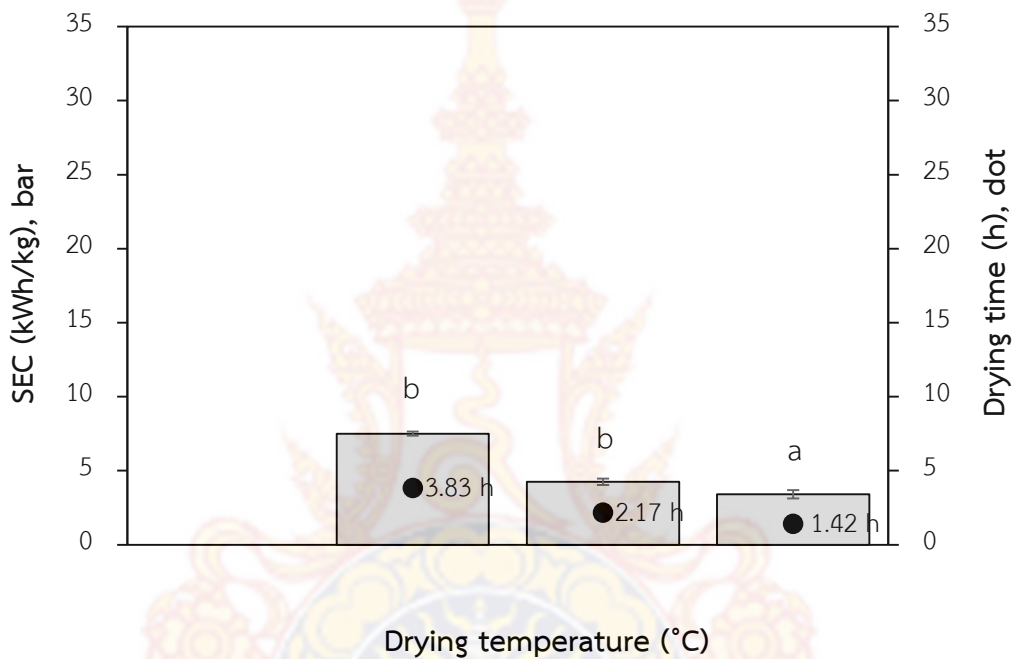
จากตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity,  $D_{eff}$ ) ของพริกชี้หนู ในระหว่างการอบแห้งด้วยดวลมร้อนที่ระดับความเข้มรังสีอินฟราเรด 4576, 6036 และ 7496  $W/m^2$  พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง  $3.6918 \times 10^{-9}$  ถึง  $9.1281 \times 10^{-9} m^2/s$  โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มรังสีอินฟราเรดที่ใช้ในการอบแห้งมีค่ามากขึ้น ซึ่งจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของวัสดุชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-11}$  ถึง  $10^{-9} m^2/s$  (Wang et al., 2007)

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกชี้หนูที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน

ความเข้มรังสี ( $W/m^2$ )	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ( $m^2/s$ )	$R^2$
4576	$3.6918 \times 10^{-9}$	0.963
6036	$6.0043 \times 10^{-9}$	0.958
7496	$9.1281 \times 10^{-9}$	0.959

#### 4.1.3 พลังงานจำเพาะ

ความเข้มรังสีอินฟราเรดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง VIR การทดลองนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าพลังงานที่ต้องการในการอบแห้ง VIR ของพริกชี้หนูในรูปแบบของพลังงานที่ต้องการใช้เพื่อระเหยน้ำ 1 kg ออกจากพริกชี้หนูหรืออัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จากการทดลองนี้พบว่าเมื่อระดับความเข้มรังสีอินฟราเรดที่ใช้ในการอบแห้งแตกต่างกันความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) โดยเมื่อทำการอบแห้งที่ระดับความเข้มรังสีอินฟราเรดต่ำ ( $4576 \text{ W/m}^2$ ) จะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงที่สุดโดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ความเข้มรังสีอินฟราเรดที่ระดับสูง ( $7496 \text{ W/m}^2$ ) ซึ่งพบว่ามีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด



รูปที่ 4.4 พลังงานจำเพาะ และเวลาในการอบแห้งของการอบแห้งพริกชี้หนูด้วย IR

#### 4.1.4 คุณภาพทางกายภาพของพริกชี้หนูอบแห้ง: ค่าสี ความหนาแน่นมวลรวม และเปอร์เซ็นต์การหดตัว

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองด้านสมบัติทางด้านคุณภาพ ได้แก่ ค่าความเป็นสีเขียว ความหนาแน่นมวลรวม และเปอร์เซ็นต์การหดตัวของพริกชี้หนูที่อบแห้งด้วย IR ซึ่งพบว่าความเข้มรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งที่ต่างกันสมบัติทางกายภาพที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) โดยที่เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ค่าความเป็นสีเขียว ( $a^*$ ) จะลดลง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non-enzymatic browning reaction) ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (Honma and Murata, 2011) แต่ในทางกลับกันค่าความหนาแน่นมวลรวมและการหดตัวกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดความเค้นภายในวัสดุในระหว่างทำการอบแห้งจึงทำให้ส่งผลต่อการหดตัวภายในของวัสดุ (Pan et al., 2008) จากผลการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าการอบแห้งพริกชี้หนูด้วย IR โดยใช้ความเข้มรังสีอินฟราเรด

ต่ำกว่าการอบแห้งโดยใช้ความเข้มรังสีอินฟราเรดสูงเมื่อพิจารณาจากคุณภาพทางกายภาพดังที่ได้กล่าวมา

**ตารางที่ 4.2** ค่าความเป็นสีเขียว ความหนาแน่นมวลรวม และเปอร์เซ็นต์การหดตัวของพริกชี้หนูในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบ VIR

ความเข้มรังสีอินฟราเรด (W/m <sup>2</sup> )	ค่าความเป็นสีเขียว a*	ความหนาแน่นมวลรวม (g/cm <sup>3</sup> )	การหดตัว (%)
4576	-1.1200±0.01 <sup>c</sup>	0.1843± 0.010 <sup>c</sup>	89.6286±2.94 <sup>b</sup>
6036	4.4967±0.08 <sup>b</sup>	0.2110±0.001 <sup>b</sup>	89.6335±0.55 <sup>b</sup>
7496	4.7533±0.08 <sup>a</sup>	0.2332±0.002 <sup>a</sup>	92.4747±0.32 <sup>a</sup>

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

#### 4.2 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด ร่วมกับการสั่นสะเทือน

การทดลองในหัวข้อนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken แบบ 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับคือ -1, 0 และ 1 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลในการอบแห้งจำนวน 3 ปัจจัยคือ ความเข้มรังสีอินฟราเรด (X<sub>1</sub>) มีระดับของปัจจัยเท่ากับ 4576(-1), 6036(0) และ 7496(1) W/m<sup>2</sup> ความเร็วรอบของการสั่นสะเทือน (X<sub>2</sub>) มีระดับของปัจจัยเท่ากับ 800(-1), 1000(0) และ 1200(1) rpm และความหนาของชั้นวัสดุ (X<sub>3</sub>) มีระดับของปัจจัยเท่ากับ 5(-1), 10(0) และ 15(1) mm ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ต่อค่าตอบสนองคือการเปลี่ยนแปลงสีรวม (ΔE) มีสิ่งทดลองทั้งสิ้นจำนวน 15 สิ่งทดลองโดยเป็นการทดลองที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง 3 สิ่งทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งเรียงลำดับสิ่งทดลองตามลำดับในการทดลองจากการสุ่มด้วยโปรแกรม Unscramble

**ตารางที่ 4.3** ตัวแปรและระดับค่าตัวแปรของการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

ตัวแปร	รหัส	ระดับค่าตัวแปร		
		-1	0	1
ความเข้มรังสีอินฟราเรด (W/m <sup>2</sup> )	X <sub>1</sub>	4576	6036	7496
ความเร็วรอบการสั่นสะเทือน (rpm)	X <sub>2</sub>	800	1000	1200
ความหนาของชั้นวัสดุ (mm)	X <sub>3</sub>	5	10	15

##### 4.2.1 ลักษณะการอบแห้งของพริกชี้หนู

จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน (VIR) ตามรูปแบบการทดลองแบบ Box-Behnken พบว่าความเข้มรังสี ความเร็วรอบการสั่นสะเทือน และความ

หนาของชั้นวัสดุส่งผลต่อลักษณะการอบแห้ง จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการอบแห้งสูงสุด พบว่าสิ่งทดลองที่ให้อัตราการอบแห้งสูงสุดที่มีค่าสูงอย่างไม่แตกต่างกันทางสถิติ ได้แก่ สิ่งทดลองที่ 7, 8 และ 11 โดยมีค่าอัตราการอบแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 0.190-0.213 g water/g dry matter·min และเวลาในการอบแห้งอยู่ในช่วง 85-100 min ซึ่งสิ่งทดลองที่ 7 และ 8 เป็นสิ่งทดลองที่ใช้ความเข้มข้นสีอินฟราเรดสูง และสิ่งทดลองที่ 11 เป็นสิ่งทดลองที่ใช้ความเร็วรอบในการสั่นสะเทือน และความหนาชั้นวัสดุน้อย จากการเปรียบเทียบค่าต่ำสุด (-1) และค่าสูงสุด (1) ของแต่ละปัจจัย จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการอบแห้งสูงสุดและเวลาในการอบแห้งมากที่สุด คือ ความเข้มข้นสีอินฟราเรด โดยการเพิ่มความเข้มข้นสีอินฟราเรดจาก 4576 W/m<sup>2</sup> เป็น 7496 W/m<sup>2</sup> ที่ความเร็วรอบการสั่นสะเทือนและความหนาของชั้นวัสดุเดียวกัน (สิ่งทดลองที่ 3 และ 13) ทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงกว่า 2 เท่า และอัตราการอบแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 1.6 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เวลาในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดของพริกขี้หนูที่สิ่งทดลองต่างๆ

สิ่งทดลอง	X <sub>1</sub> (W/m <sup>2</sup> )	X <sub>2</sub> (rpm)	X <sub>3</sub> (mm)	เวลาในการ อบแห้ง (min)	อัตราการอบแห้ง สูงสุด (g water/g dry matter·min)	อัตราการอบแห้ง เฉลี่ย (g water/g dry matter·min)
12	4576 (-1)	800 (-1)	10 (0)	180	0.126±0.001 <sup>defg</sup>	0.1516
8	7496 (1)	800 (-1)	10 (0)	85	0.190±0.002 <sup>ab</sup>	
13	4576 (-1)	1200 (1)	10 (0)	210	0.097±0.001 <sup>g</sup>	
3	7496 (1)	1200 (1)	10 (0)	100	0.153±0.001 <sup>bcd</sup>	
1	4576 (-1)	1000 (0)	5 (-1)	140	0.123±0.003 <sup>bcd</sup>	
7	7496 (1)	1000 (0)	5 (-1)	100	0.213±0.008 <sup>a</sup>	
2	4576 (-1)	1000 (0)	15 (1)	220	0.111±0.004 <sup>efg</sup>	
4	7496 (1)	1000 (0)	15 (1)	120	0.144±0.003 <sup>cde</sup>	
11	6036 (0)	800 (-1)	5 (-1)	95	0.201±0.006 <sup>a</sup>	
15	6036 (0)	1200 (1)	5 (-1)	110	0.188±0.003 <sup>bc</sup>	
5	6036 (0)	800 (-1)	15 (1)	120	0.139±0.001 <sup>cdef</sup>	
10	6036 (0)	1200 (1)	15 (1)	180	0.107±0.001 <sup>fg</sup>	



สิ่งทดลอง	X <sub>1</sub> (W/m <sup>2</sup> )	X <sub>2</sub> (rpm)	X <sub>3</sub> (mm)	เวลาในการ อบแห้ง (min)	อัตราการอบแห้ง สูงสุด (g water/g dry matter-min)	อัตราการอบแห้ง เฉลี่ย (g water/g dry matter-min)
6	6036 (0)	1000 (0)	10 (0)	130	0.164±0.003 <sup>bcd</sup>	
9	6036 (0)	1000 (0)	10 (0)	130	0.158±0.002 <sup>bcd</sup>	
14	6036 (0)	1000 (0)	10 (0)	130	0.160±0.002 <sup>bcd</sup>	

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### 4.2.2 การวิเคราะห์สมการการถดถอยกำลังสอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way analysis of variance; one-way ANOVA) ใช้สำหรับศึกษาความเหมาะสมของสมการและปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กันค่า F-value ที่สูงและค่า p-value ที่ต่ำกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าสมการและปัจจัยมีความสำคัญ จากผลการวิเคราะห์ในตารางสามารถสรุปได้ว่าสมการแบบ Quadratic เข้ากันได้กับผลของค่าการเปลี่ยนแปลงสีจากการทดลองเนื่องจากมีค่า p-value = 0.009 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 หมายความว่า ความเข้มรังสีอินฟราเรด ความเร็วรอบของการสั่นสะเทือน และความหนาของชั้นวัสดุมีความสัมพันธ์กับค่าการเปลี่ยนแปลงสีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง Quadratic

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Model	9	0.690358	0.076706	10.75	0.009
X <sub>1</sub>	1	0.315615	0.315615	44.21	0.001
X <sub>2</sub>	1	0.152076	0.152076	21.30	0.006
X <sub>3</sub>	1	0.063013	0.0630	8.83	0.031
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	1	0.000000	0.0000	0.00	1.000
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	1	0.047760	0.047760	6.69	0.049
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	1	0.003660	0.003660	0.51	0.506
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1	0.000011	0.000011	0.00	0.970
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1	0.105768	0.105768	14.82	0.012
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1	0.000447	0.000447	0.06	0.812
Residual	5	0.035693	0.007139		
Lack - of- Fit	3	0.034967	0.011656	32.11	0.030
Total	14	0.726051			

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยแสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าค่า R<sup>2</sup> และค่า adjusted R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.95 และ 0.86 ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของพริกชี้หูอย่างมีนัยสำคัญสามารถประเมินโดยค่า F-value และค่า p-value โดยที่ค่า F-value สูงขึ้นและค่า p-value น้อยลงตัวแปรหรือปัจจัยนั้นก็ยิ่งมีความสำคัญมากขึ้น จากตารางที่ได้กล่าวมาความเข้มของรังสีอินฟราเรด (X<sub>1</sub>) เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุดต่อการเปลี่ยนแปลงสีของพริกชี้หู เนื่องจากค่า F-value สูงสุดและ p-value ที่น้อยที่สุด

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

Term	Coef	SE Coef	T-Value	p-Value
Constant	1.8530	0.0488	37.99	0.000

X <sub>1</sub>	0.1986	0.0299	6.65	0.001
X <sub>2</sub>	0.1379	0.0299	4.62	0.006
X <sub>3</sub>	-0.0887	0.0299	-2.97	0.031
X <sub>1</sub> X <sub>1</sub>	-0.0018	0.0440	-0.04	0.970
X <sub>2</sub> X <sub>2</sub>	-0.1692	0.0440	-3.85	0.012
X <sub>3</sub> X <sub>3</sub>	0.0110	0.0440	0.25	0.812
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-0.00002	0.0422	-0.00	1.000
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	0.1093	0.0422	2.59	0.049
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0.0302	0.0422	0.72	0.506
R <sup>2</sup>		0.95		

จากผลการวิเคราะห์หารูปแบบสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองคือการเปลี่ยนแปลงสี (Y) กับปัจจัยของการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีอบแห้งแบบ VIR ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ปัจจัยคือ ความเข้มรังสีอินฟราเรดในการอบแห้ง (X<sub>1</sub>) ความเร็วรอบของการสั่นสะเทือน (X<sub>2</sub>) และความหนาของชั้นวัสดุ (X<sub>3</sub>) มีรูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.1)

$$\Delta E = 0.1986X_1 + 0.1379X_2 - 0.0887X_3 - 0.0018X_1^2 - 0.1692X_2^2 + 0.0110X_3^2 - 0.0000002X_1X_2 + 0.1093X_1X_3 + 0.0302X_2X_3 + 1.853 \quad (4.1)$$

นอกจากนี้ค่า R<sup>2</sup> ที่สูงยังสามารถระบุถึงความเหมือนกันของค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (Swamy et al., 2017) ซึ่งสามารถดูค่าการเปลี่ยนแปลงสีของพริกชี้หนูจากการทดลอง (Y) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง (Ŷ) ดังแสดงในตารางที่ 4.11 โดยความสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียงกับเส้นทวนสอบความแม่นยำหรือเส้นตรงที่ความชัน 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงสีของพริกชี้หนูแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้ง (Y) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนาย (Ŷ)

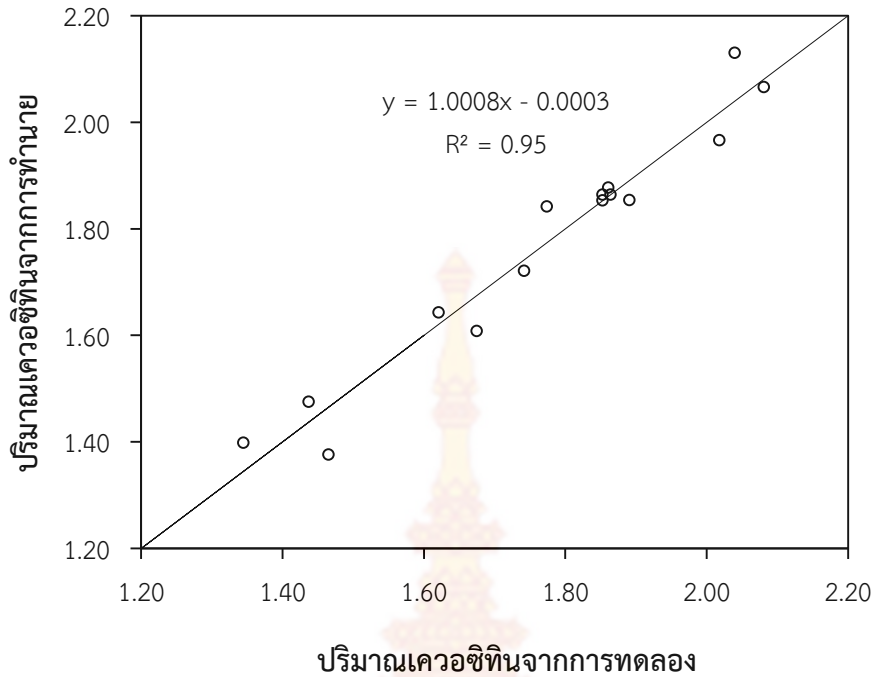
สิ่งทดลอง	X <sub>1</sub> (W/m <sup>2</sup> )	X <sub>2</sub> (kPa abs)	X <sub>3</sub> (mm)	Y	Ŷ
12	4576 (-1)	5 (-1)	10 (0)	1.398±0.052	1.345
8	7496 (1)	5 (-1)	10 (0)	1.721±0.021	1.742
13	4576 (-1)	25 (1)	10 (0)	1.643±0.021	1.621
3	7496 (1)	25 (1)	10 (0)	1.966±0.015	2.018

สิ่งทดลอง	X <sub>1</sub> (W/m <sup>2</sup> )	X <sub>2</sub> (kPa abs)	X <sub>3</sub> (mm)	Y	Ŷ
1	4576 (-1)	15 (0)	5 (-1)	1.877±0.015	1.861
7	7496 (1)	15 (0)	5 (-1)	2.130±0.089	2.040
2	4576 (-1)	15 (0)	15 (1)	1.376±0.031	1.465
4	7496 (1)	15 (0)	15 (1)	2.066±0.015	2.081
11	6036 (0)	5 (-1)	5 (-1)	1.608±0.067	1.675
15	6036 (0)	25 (1)	5 (-1)	1.854±0.037	1.891
5	6036 (0)	5 (-1)	15 (1)	1.475±0.037	1.437
10	6036 (0)	25 (1)	15 (1)	1.842±0.023	1.774
6	6036 (0)	15 (0)	10 (0)	1.864±0.011	1.863
9	6036 (0)	15 (0)	10 (0)	1.864±0.013	1.853
14	6036 (0)	15 (0)	10 (0)	1.831±0.022	1.853

หมายเหตุ:

X<sub>1</sub> = ความเข้มรังสีอินฟราเรด, X<sub>2</sub> = ความเร็วรอบการสั่นสะเทือน, X<sub>3</sub> = ความหนาชั้นวัสดุ, Y = ค่าการเปลี่ยนแปลงสีจากการทดลอง และ Ŷ = ค่าการเปลี่ยนแปลงสีจากการทำนาย





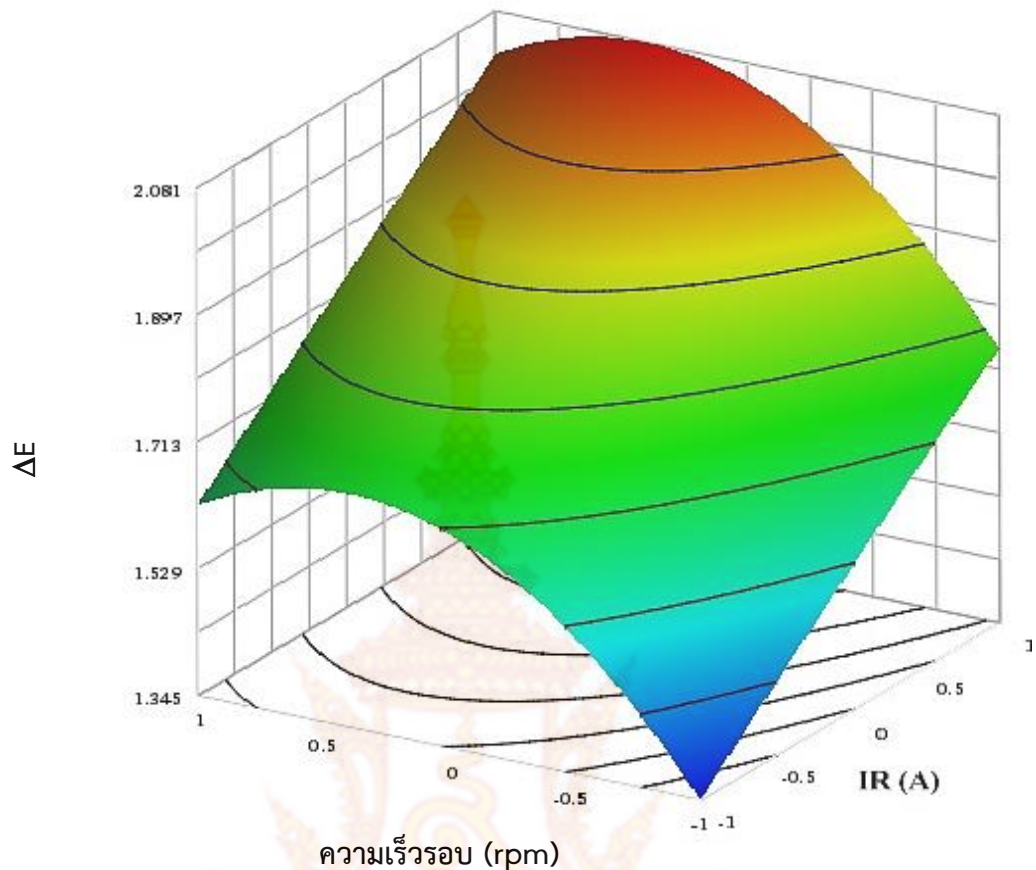
การเปรียบเทียบปริมาณสารเคอไจตินที่ได้จากการทดลองและจากการทำนาย

#### 4.2.3 อิทธิพลของปัจจัยของการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR ต่อการเปลี่ยนแปลงสี

สมการความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.1) สามารถนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัยด้วยพื้นผิวตอบสนองและ Contour plots โดยกำหนดให้ค่าของอีกปัจจัยหนึ่งอยู่ที่ระดับ 0 หรือกลาง (ตารางที่ 4.7) ค่าการเปลี่ยนแปลงสีกับความเข้มรังสีอินฟราเรด ความเร็วรอบการสั่นสะเทือน และความหนาของชั้นวัสดุแสดงดังในรูปที่ 4.6-4.8

##### 4.2.3.1 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความเร็วรอบการสั่นสะเทือนต่อการเปลี่ยนแปลงสีของพริกชี้หนูอบแห้ง

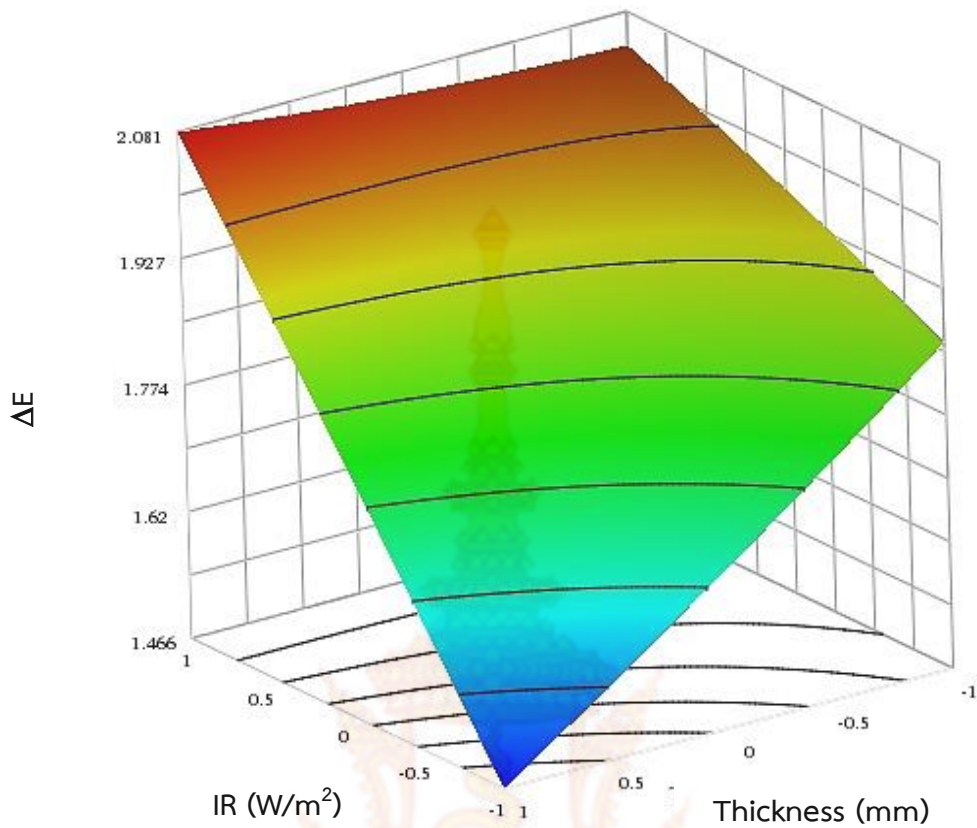
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอินฟราเรดกับความเร็วรอบการสั่นสะเทือน โดยกำหนดให้ความหนาของชั้นวัสดุมีค่าเท่ากับ 10 mm แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าการเปลี่ยนแปลงสีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้ความเข้มรังสีอินฟราเรดและความเร็วรอบของการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นโดยมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 2.077 mg/100 g dry matter เมื่อใช้ความเข้มรังสีอินฟราเรด 7496 W/m<sup>2</sup> ในสภาวะความเร็วรอบของการสั่นสะเทือนประมาณ 900-1100 rpm และจะลดลงเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 1100 rpm



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความเร็วรอบสั่นสะเทือนต่อการเปลี่ยนแปลงสี

#### 4.2.3.2 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความหนาของชั้นวัสดุ

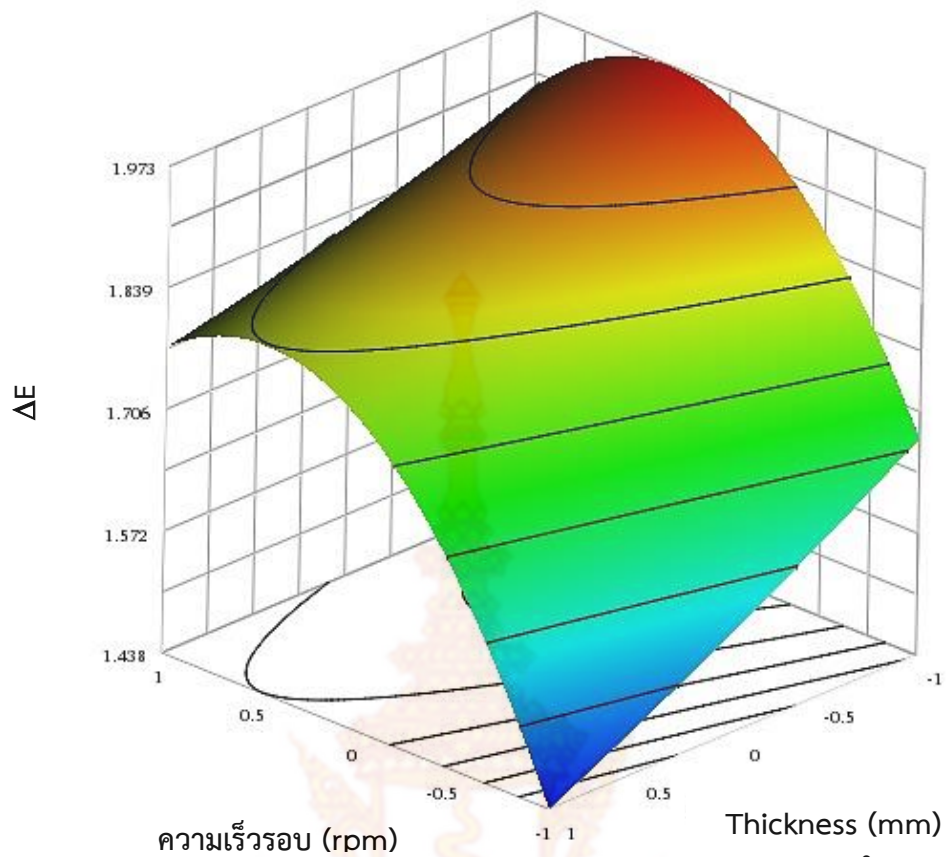
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอินฟราเรดกับความหนาของชั้นวัสดุโดยกำหนดให้ความเร็วรอบของการสั่นสะเทือนเท่ากับ 1000 rpm ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น โดยการอบแห้งด้วยความเข้มรังสีอินฟราเรดและความหนาของชั้นวัสดุมากที่สุดคือเท่ากับ  $7496 \text{ W/m}^2$  และ 15 mm ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงสีจะมีค่าสูงที่สุดคือ 2.081 เป็นที่น่าสนใจว่าความหนาของชั้นวัสดุที่มากขึ้นเมื่อความเข้มรังสีอินฟราเรดอยู่ในช่วง  $4576 - 7266 \text{ w/m}^2$  มีผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีลดลง แต่จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มรังสีอินฟราเรดมีค่าสูงตั้งแต่  $7266 \text{ W/m}^2$  การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุจะทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความหนาของชั้นวัสดุต่อปริมาณสารเคอซีทิน

#### 4.2.3.3 อิทธิพลของความเร็รรอบของการสั่นสะเทือนและความหนาของชั้นวัสดุ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็รรอบของการสั่นสะเทือนกับความหนาของชั้นวัสดุโดยกำหนดให้ความเข้มรังสีอินฟราเรดเท่ากับ  $6036 \text{ W/m}^2$  ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าการเปลี่ยนแปลงสีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้ความเร็รรอบของการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นโดยมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 1.969 ในสภาวะความเร็รรอบของการสั่นสะเทือนประมาณ 900 -1100 rpm ความหนาของชั้นวัสดุ 5 mm และจะลดลงเมื่อความหนาของชั้นวัสดุเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของความเร็วยรอบการสันสะเทือนและความหนาของชั้นวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงสี

#### 4.2.4 การหาค่าสถานะที่เหมาะสม

เมื่อนำสมการที่ (4.1) ศึกษาค่าสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธี VIR จะได้สถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งที่มีการเปลี่ยนแปลงสีสูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.9 เป็นดังนี้

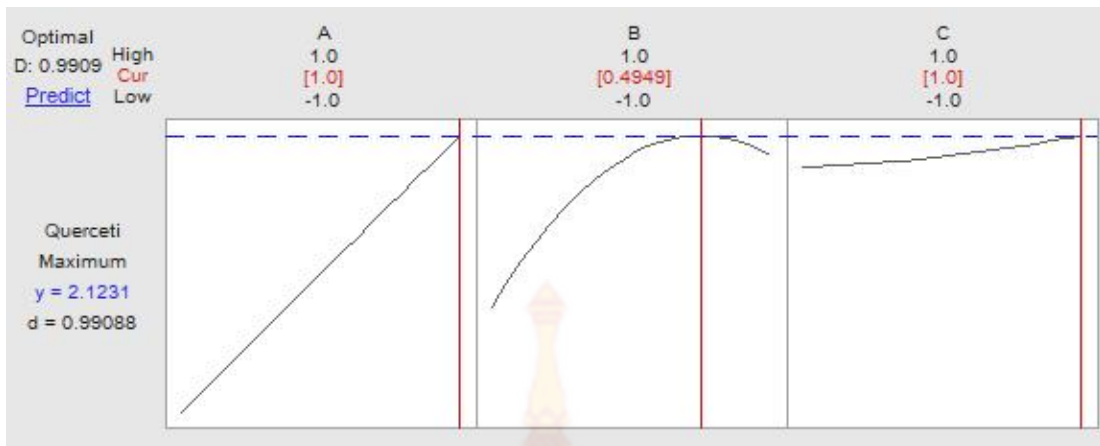
ความเข้มรังสีอินฟราเรด ( $X_1$ ) = 7496 W/m<sup>2</sup>

ความเร็วรอบของการสันสะเทือน ( $X_2$ ) = 997.96 rpm

ความหนาของชั้นวัสดุ ( $X_3$ ) = 15 mm

โดยมีการเปลี่ยนแปลงสีที่ทำนายได้ = 2.123





รูปที่ 4.9 สถานะที่เหมาะสม (Optimization plot) ของความเข้มข้นสีอินฟราเรด ความเร็วรอบของการสั่นสะเทือน และความหนาของชั้นวัสดุต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี



## 5.1 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน (VIR) ต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของพริกชี้หนู

จากการทดลองพบว่าความเข้มรังสีอินฟราเรดในอบแห้งที่แตกต่างกันมีผลต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของพริกชี้หนูอบแห้ง เมื่อความเข้มรังสีอินฟราเรดอบแห้งสูงขึ้น DR และ  $D_{\text{eff}}$  เพิ่มขึ้นและเวลาในการอบแห้งลดลง โดยความเข้มรังสีอินฟราเรดสูงสุด คือ  $7496 \text{ W/m}^2$  ทำให้ค่า DR สูงสุดและ  $D_{\text{eff}}$  มีค่ามากที่สุด คือ  $0.0248 \text{ g water/g dry matter}\cdot\text{min}$  และ  $9.1281 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ และที่ความเข้มรังสีอินฟราเรดนี้ยังใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด คือ 85 min อย่างไรก็ตาม ความเข้มรังสีอินฟราเรดที่ต่ำกว่ามีแนวโน้มที่จะทำให้คุณภาพของพริกชี้หนูแห้งดีขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงสีที่น้อยที่สุดได้จากการอบแห้งพริกชี้หนูแบบ VIR ที่  $6036 \text{ W/m}^2$

## 5.2 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกชี้หนูด้วยวิธี VIR โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบพหุตัวแปรโดยมีค่าตอบสนองคือการเปลี่ยนแปลงสี ทำการวางแผนการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken Design ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มรังสีอินฟราเรด ( $4576, 6036$  และ  $7496 \text{ W/m}^2$ ) ความเร็วรอบการสั่นสะเทือน (800, 1000 และ 1200 rpm) และความหนาของชั้นวัสดุ (5, 10 และ 15 mm) จากรูปแบบสมการที่ได้พบว่า ความเข้มรังสีอินฟราเรด ความเร็วรอบการสั่นสะเทือน และความหนาของชั้นวัสดุมีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีอย่างมีนัยสำคัญ สมการการถดถอยกำลังสองมีค่า  $R^2 = 0.95$  การทำนายการเปลี่ยนแปลงสีจากสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งซึ่งมีความเข้มรังสีอินฟราเรด  $7496 \text{ W/m}^2$  ความเร็วรอบการสั่นสะเทือน 997.96 rpm และความหนาของชั้นวัสดุ 15 mm ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีจากการทำนายเป็น 2.123

## บรรณานุกรม

- กมล พลคำ. 2553. “การอบแห้งสับปะรดโดยใช้วิธีการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวร่วมกับการพาอากาศร้อน.” วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- สมชาติ โสภณธรณฤทธิ. 2540. **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Afzal, T.M., Abe, T. and Hikida, Y. 1999. “Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley.” **Journal of Food Engineering**. 42 : 177-182.
- AOAC. 2005. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 18<sup>th</sup> ed. AOAC International. Arlington, VA, USA.
- Box, G. E. P. and Wilson, K. B. 1951. On the experimental attainment of optimum conditions. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**. 13(1) : 1-45.
- Box, G. E. P. , William, G. H. and Hunter, J. S. 1978. **Statistics for experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building**. New York: Wiley.
- Bradley, R.A. 1958. “Determination of optimum operating conditions by experimental methods. Part I. Mathematics and statistics fundamental to the fitting of response surfaces.” **Industrial Quality Control**. 15(1) : 16-20.
- Cakmak, G. and Yildiz, C. 2011. “The prediction of seedy grape drying rate using a neural network method. ” **Computers and Electronics in Agriculture**. 75 : 132-138.
- Crank, J., 1975. **The Mathematics of Diffusion** 2<sup>ed</sup>. Oxford University Press, London.
- Das, S. K, Das. and Satish, Bal. 2004. “Drying performance of a batch type vibration aided infrared dryer.” **Journal of Food Engineering**. 64 : 129-133.
- Das I., Das, S.K and Satish, Bal. 2009. “Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying. ” **Journal of Food Engineering**. 95 : 166-171.
- Demiray, E. , Tulek, Y. and Yilmaz, Y. 2013. “Degradation kinetics of lycopene,  $\beta$ -carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying.” **LWT - Food Science and Technology**. 50 : 172-176.
- Doymaz I, Pala M. 2003. “The thin-layer drying characteristics of corn. ” **Journal of Food Engineering**. 60 : 125-130.
- Doymaz, I. 2005. “Drying behaviour of green beans.” **Journal of Food Engineering**. 69 : 161-165.
- Draper, N.R. 2006. **Response surface design**. Encyclopedia of Statistical Sciences, 2<sup>nd</sup> ed. Edited by Samuel Kotz. Wiley Press, New York. 11: 7232-7243.

- Fortes. M. and Okos, M.R. 1980. **Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grain.** In : Mujumder, A.S., Ed., *Advances in Drying*, 1, Hemisphere, Washington DC, 119-154.
- Gachovska, T. K., A.A. Adedeji, M. Ngadi and G.V.S. Raghavan. 2008. "Drying characteristics of pulsed electric field-treated carrot." **Drying Technology**. 26(10) : 1244-1250.
- Ginzburg, A.S. 1969. **Application of infrared radiation in food processing.** Chemical and Process Engineering Series. Leonard Hill, London.
- Hebber, H.U. and Rostogi. 2001. "Mass transfer during infrared drying of cashew kernel." **Journal of Food Engineering**. 47 : 1-5.
- Henderson, S.M. and S. Pabis. 1961. "Grain drying theory I: Temperature effects on drying coefficients." **Journal of Agricultural Engineering Research**. 6(3) : 169-174.
- Henderson, S. M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of ASAC*. 17(6) : 1167-1172.
- Heat-tech Co.,Ltd.. 2015. "**The phase shift of the ustulation.**" [online]. Available: <http://heater.heat-tech.biz/air-blow-heater/science-of-the-drying/basic-knowledge-of-the-drying/how-does-the-drying-progress/6996.html>.
- Honma, S., Murata, M. 2011. **Food preservation and processing study.** Tokyo kagaku dojin, Tokyo, Japan.
- Jamieson, J.A., Mcfee, R.H., Plass, G.N., Grube, R.H., and Richards, R.G. 1963. **Infrared Physics and Engineering.** New York, USA.
- Kim Jong-Wan., Bae Hwang-Chan., Kim Min-Chul., Lee Seung-Cheol. 2007. "Effect of far-Infrared Irradiation on the antioxidant activity of puerariae radix extract." **Journal of Food Biochemistry**. 32 : 85-95.
- Khazaei, J., A. Arabhosseini and Z. Khosrobeygi. 2008. "Application of superposition technique for modeling behavior of a avishan ( Zataria multiflora) Leaves." **Transactions of the ASABE**. 51(4) : 1383-1393.
- Khair, R., Pan, Z. and Salim, A. 2006. "Drying rates of thin layer rough rice drying using infrared radiation." In **Proceedings of the 2006 ASABE. Annual International Meeting**, Portland, Oregon, USA.
- Lee, G., W. S. Kang and F. Hsieh. 2004. "Thin-layer drying characteristics of chicory root slices." **Transactions of the ASAE**. 47(5) : 1619-1624.
- Lee, S C., Jeong, Seok-Moon., Kim, So-Young., Park, Hae-Ryong., Nam, K.C. and Ahn, D.U. 2006. "Effect of far-infrared radiation and heat treatment on the antioxidant activity of water extracts from peanut hulls." **Food Chemistry**. 94 : 489-493.

- Lee, W.C., S. Yusof, N.S.A. Hamid and B.S. Baharin. 2006. "Optimizing conditions for hot water extraction of banana juice." **Journal of Food Engineering**. 75 : 473-479.
- Lewis, W. K. 1921. "The rate of drying of solid materials." **Journal of Industrial Engineering Chemistry**. 13(5) : 427-432.
- Luikov, A.V. 1966. **Heat and mass transfer in capillary porous bodies**. Oxford : Pergamon Press.
- Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. A. 2002. "New model for single-layer drying." **Drying Technology**. 20(7) : 1503-1513.
- Montgomery, D.C. 1991. **Design and Analysis of Experiments**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Wiley.
- Myers, R.H. and Montgomery, D.C. 1995. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. New York: Wiley.
- Niamnuy, C., Nachaisin, M., Laohavanich, J. and Devahastin, S. 2011. "Evaluation of bioactive compounds and bioactivities of soybean dried by different methods and conditions." **Food Chemistry**. 129 : 899-906.
- Nowak, D. and Lewicki, P.P. 2004. "Infrared drying of apple slices." **Innovative Food Science and Emerging Technology**. 5 : 353-360.
- Ozbek, B. and Dadali, G. 2007. "Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave." **Journal of Food Engineering**. 83(4) : 541-549.
- Ozdemir, M., and Devres O. Y. 1999. "The thin layer characteristics of hazelnuts during roasting." **Journal of Food Engineering**. 42 : 225-233.
- Ozisik M.N. 1985. **Heat transfer: a basic approach**. New York, McGraw-Hill.
- Page, G.E. 1949. "Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers." Master's thesis in Mechanical Engineering Department, Purdue University.
- Pan, Z., Shih, C., Mchugh, T.H. and Hirschberg, E. 2008. "Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying." **LWT-Food Science and Technology**. 41 : 1944-1951.
- Park, J.H., Lee, J.M., Cho, Y.L., Kim, C.T., Kim, C.J., Nam, K.C. and Lee, S.C. 2009. "Effect of Far- infrared heater on the physicochemical characteristics of green tea during processing." **Journal of Food Biochemistry**. 33 : 149-162.
- Perez-Francisco, J.M., R. Cerecero-Enríquez, I. Andrade-González, J.A. Ragazzo-Sánchez and G. Luna-Solano. 2008. "Optimization of vegetal pear drying using response surface methodology." **Drying Technology**. 26 : 1401-1405.
- Sakai Noboru, and Hanzawa Tamotsu. 1994. "Applications and advances in far-infrared heating in Japan." **Trends in Food Science & Technology**. 5(1) : 357-362.
- Sakai Noboru, and Hanzawa Tamotsu. 1994. "Applications and advances in far-infrared heating in Japan." **Trends in Food Science & Technology**. 5(1) : 357-362.

- Sandu, C. 1986. "Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis." **Biotechnology Progress.** 2 : 109-119.
- Saprow, E.M. and Cess, R.D. 1970. **Radiation Heat Transfer.** California.
- Senadeera, W., Bhandari, B.R., Young, G. and Wijesinghe, B. 2003. "Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying." **Journal of Food Engineering.** 58 : 277-283.
- Shih, C., Pan, Z., McHugh, T., Wood, D. and Hirschberg, E. 2008. "Sequential infrared radiation and freeze-drying method for producing crispy strawberries." **Transactions of ASABE.** 51 : 205-216.
- Sripinyowanich, J. and Noomhorm, A. 2011. "A New Model and Quality of Unfrozen and Frozen Cooked Rice Dried in a Microwave Vibro-Fluidized Bed Dryer." **Drying Technology.** 29(7) : 735-748.
- Swamy, G. J. & Muthukumarappan, K. 2017. "Optimization of continuous and intermittent microwave extraction of pectin from banana peels." **Food Chemistry.** 220 : 108-114.
- Swasdisevi, T., Devahastin, S., Ngamchum, R. and Soponronnarit, S. 2007. "Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices." **Songklanakarin Journal of Science and Technology.** 29(3) : 809-816.
- Thompson, T. L., Peart, R. M. and Foster, G. H. 1968. "Mathematical simulation of corn drying- a new model." **Transactions of American Society of Agricultural Engineers.** 11 : 582-586.
- Vega-Galvez, A., Ayala-Aponte, E., Notte, L. de la Fuente and R. Lemus-Mondaca. 2008. "Mathematical modeling of mass transfer during convective dehydration of brown algae *macrocystis pyrifera*." **Drying Technology.** 26(12) : 1610-1616.
- Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G, Wu, J. and Hu, X. 2007. "Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace." **Food Research International.** 40 : 39-46.
- Wankhadea, P.K., Sapkala, R.S. and Sapkal, V.S. 2013. "Drying Characteristics of Okra slices on drying in Hot Air Dryer." **Procedia Engineering.** 51 : 371-374.
- Wang, C.Y. and Singh, R.P. 1978. "Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying." **Transactions of American Society of Agricultural Engineers.** 11 : 668-672.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H. I. 2001. "Mathematical modeling of thin layer solar drying model of sultana grapes." **Energy.** 26 : 457-465.
- Zare, D., Naderi, H. and Jafari, A.A. 2012. "Experimental and theoretical investigation of rough rice drying in infrared-assisted hot air dryer using artificial neural network." **World Academy of Science, Engineering and Technology.** 69 : 286-290



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

เครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสันสะเหือน









ประวัตินักวิจัย

## หัวหน้าโครงการ

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายชโลธร ศักดิ์มาศ  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) MR.Chalotron Sakmas
- ตำแหน่ง อาจารย์
- หน่วยงาน  
สาขาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช 109 ม.2 ต.ถ้ำใหญ่ อ.ทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช 80110  
โทรศัพท์: 075-773131-2 ต่อ 102, 0896461395 โทรสาร: 075-329936  
Email: [chalotron.s@rmutsv.ac.th](mailto:chalotron.s@rmutsv.ac.th)

## 4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	วุฒิปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2553	โท	คอ.ม.	ครุศาสตร์อุตสาหกรรม (เครื่องกล)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2547	ตรี	คอ.บ.	ครุศาสตร์อุตสาหกรรม (วิศวกรรมเครื่องกล)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ژیญบุรี

- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิมการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ เครื่องจักรกลเกษตร, ต้นกำลังและการถ่ายทอดกำลัง
- ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละ

## ประวัติคณะผู้วิจัย (ต่อ)

### ผลงานวิจัย

ชื่อเรื่องโครงการวิจัย	ปีที่ทำ (พ.ศ)	แหล่งทุน	สถานภาพในการวิจัย
------------------------	---------------	----------	-------------------

การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเพื่อหยุดยั้งการเจริญเติบโตของด้วงวงงข้าวในข้าวสังข์หยดพัทลุง	2562	งบประมาณเงินรายได้คณะ	หัวหน้าโครงการวิจัย
การพัฒนาเครื่องยอยต้นปาล์มหมดอายุโดยใช้ต้นกำลึ่งจากเพลลาอำนวยการนำกลิ้งของรถแทรกเตอร์	2561	งบประมาณแผ่นดิน	ผู้ร่วมโครงการวิจัย
การหาสภาวะที่เหมาะสมของพริกชี้หนูอบแห้งด้วยวิธีอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสันระเหิด	2561	งบประมาณแผ่นดิน	หัวหน้าโครงการวิจัย
การมีส่วนร่วมพัฒนาชุมชนของประชาชนบ้านวังไทร ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอยะรัง จังหวัดนครศรีธรรมราช	2561	งบประมาณเงินรายได้คณะ	หัวหน้าโครงการวิจัย
การออกแบบและสร้างเครื่องปอกเปลือกผลลูกตาลอ่อน	2562	งบประมาณเงินรายได้คณะ	ผู้ร่วมโครงการวิจัย

7. งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว: ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

#### ผลงานที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

เศรษฐวัฒน์ ฤนิมกาญจน์ ชโลธร ศักดิ์มีาศ นศพร ธรรมโชติ และจิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ. 2561. ผลของการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงโดยใช้ลมร้อนร่วมกับการเป่าอากาศแวดล้อม. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย “ราชมงคลขับเคลื่อนนวัตกรรมก้าวไกลสู่ Thailand 4.0”, 1-3 สิงหาคม: 288-295.

นศพร ธรรมโชติ จาริพร เพชรชิต สาธิต บัวขาว เศรษฐวัฒน์ ฤนิมกาญจน์ และชโลธร ศักดิ์มีาศ. 2561. การศึกษาห่วงโซ่อุปทานของผลิตภัณฑ์ไบโอบางสำหรับมวนบุหรี่ยี่ ตั้งแต่เกษตรกรถึง

#### ประวัติคณะผู้วิจัย (ต่อ)

ผู้บริภค ตำบลวังวน อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต ครั้งที่ 11: 2561 “การบูรณาการภูมิปัญญาสู่นวัตกรรมและการพัฒนาท้องถิ่นอย่างยั่งยืน”, 20 ธันวาคม 2561: 79-87.

#### ผู้ร่วมวิจัย(2)

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายเศรษฐวัฒน์ ฤนิมกาญจน์  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Sethawat Thanikarn

2. ตำแหน่ง อาจารย์

3. หน่วยงาน

สาขาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช 109 ม.2 ต.ถ้ำใหญ่ อ.ทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช 80110  
โทรศัพท์: 075-773131-2 ต่อ 102, 0877462379 โทรสาร: 075-329936  
Email: [Sethawat.t@mutsv.ac.th](mailto:Sethawat.t@mutsv.ac.th)

4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	วุฒิปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2562	เอก	วศ.ด	วิศวกรรมเกษตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2554	โท	ค.อ.ม.	ครุศาสตร์อุตสาหกรรม (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2547	ตรี	ค.อ.บ.	ครุศาสตร์อุตสาหกรรม (วิศวกรรมเครื่องกล)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ژیญบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิมการศึกรษา) ระบุสาขาวิชาการ เครื่องจักรกลเกษตร, ต้นกำล้งและการถ่ายทอดกำล้ง

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพ ในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละ

### ประวัติคณะผู้วิจัย (ต่อ)

ผลงานวิจัย

ชื่อเรื่องโครงการวิจัย	ปีที่ทำ(พ.ศ)	แหล่งทุน	สถานภาพในการวิจัย
การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตเพื่อหยุดยั้งการเจริญเติบโตของตัวงวงข้าวในข้าวสังข์หยดพัทลุง	2562	งบประมาณเงินรายได้คณะ	ผู้ร่วมโครงการ
การหาสภาวะที่เหมาะสมของพริกชี้หนุอบแห้งด้วยวิธีอบแห้งอินฟาเรดร่วมกับการสันสะเทือน	2561	งบประมาณแผ่นดิน	หัวหน้าโครงการวิจัย

การมีส่วนร่วมพัฒนาชุมชนของประชาชน บ้านวังไทร ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช	2561	งบประมาณ เงินรายได้ คณะ	ผู้ร่วมโครงการวิจัย
การออกแบบและสร้างเครื่องปอกเปลือก ผลลูกตาลอ่อน	2562	งบประมาณ เงินรายได้ คณะ	ผู้ร่วมโครงการวิจัย

7. งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว: ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

#### ผลงานที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

เศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์ ชโลธร ศักดิ์มาศ นศพร ธรรมโชติ และจิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่ง เจริญ. 2561. ผลของการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงโดยใช้ลมร้อนร่วมกับการเป่าอากาศแวดล้อม. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย “ราชมงคลขับเคลื่อนนวัตกรรมก้าวไกลสู่ Thailand 4.0”, 1-3 สิงหาคม: 288-295.

นศพร ธรรมโชติ จาริพร เพชรชิต สาธิต บัวขาว เศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์ และชโลธร ศักดิ์มาศ. 2561. การศึกษาห่วงโซ่อุปทานของผลิตภัณฑ์ใบจากสำหรับมวนบุหรี่ ตั้งแต่เกษตรกรถึงผู้บริโภค ตำบลวังวน อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต ครั้งที่ 11: 2561 “การบูรณาการภูมิปัญญาสู่นวัตกรรมและการพัฒนาท้องถิ่นอย่างยั่งยืน”, 20 ธันวาคม 2561: 79-87.

#### ประวัติคณะผู้วิจัย (ต่อ)

#### ผู้ร่วมวิจัยท่านที่ 2

ชื่อ : นายชวกร มุกसान

Mr. Chavakorn Muksan

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน

3 9098 00615 01 2

3. ตำแหน่งปัจจุบัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์

4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

สาขาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช ใสใหญ่

109 หมู่ที่ 2 ตำบล ถ้ำใหญ่ อ.ทุ่งสง จ. นครศรีธรรมราช 80110

e-mail : Chava\_korn1@hotmail.com

#### 5. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญาตรี โท เอก	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สาขาวิชาเอก	ชื่อสถาบัน	ประเทศ

2546	โท	วท.ม. วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต	พัฒนาการ เกษตร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่	ไทย
2531	ตรี	วท.บ. วิทยาศาสตร์ บัณฑิต	เกษตรศึกษา- เกษตรกลวิธาน	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตบางพระ ชลบุรี	ไทย

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิกการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ สาขาแทรกเตอร์และเครื่องท่อนแรงฟาร์ม การจัดการเครื่องท่อนแรงฟาร์ม และชลประทาน เพื่อ การเกษตร

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพ ในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละ ผลงานวิจัย





